

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж з візуалізацією процесу
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

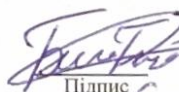
Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»
Назва

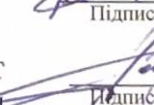
Шифр ДРКІ 240126.24.01.39 ПЗ

виконав здобувач II курсу, група KI2M-24-1


Підпис

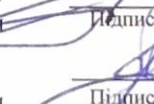
Богдан ТОМЧИШЕН
Ініціали, прізвище

керівник канд.-техн. наук, доцент
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Олексій ІВАНОВ
Ініціали, прізвище

формоконтролер д. техн. наук, професор
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Сергій ЛИСЕНКО
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС
«01» травня 2026 р.


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС



Ольга ПАВЛОВА

“ 12 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Томчишену Богдану Русланович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж з візуалізацією процесу

Керівник проекту (роботи) Іванов Олексій Валентинович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Теоретичні основи побудови та аналізу оптичних телекомунікаційних мереж, дослідження топологій, фізичних параметрів оптичного волокна та постановка задачі оптимізації процесу проектування.

Дослідження та удосконалення розрахункового методу проектування магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку на основі аналізу енергетичного бюджету

Програмна реалізація удосконаленого методу проектування оптичної телекомунікаційної мережі, моделювання оптимального розміщення EDFA-підсилювачів

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

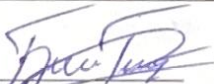
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	12.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	12.01.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	20.01.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.02.2026	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.03.2026	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2026	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2026	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2026	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	

Здобувач


Підпис

Богдан ТОМЧИШЕН

Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Олексій ІВАНОВ

Імя, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж з візуалізацією процесу

Автор роботи: Томчишен Богдан Русланович

Керівник роботи: Іванов Олексій Валентинович

Пояснювальна записка: 77 с., 11 рис., 4 табл., 80 джерел.

ОПТИЧНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ, ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖ, ТОПОЛОГІЯ МЕРЕЖІ, МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ, ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ, ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ.

Об'єктом дослідження є процес проєктування оптичних телекомунікаційних мереж.

Предметом дослідження є метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж із використанням засобів моделювання та візуалізації процесу формування топології мережі.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності процесу проєктування оптичних телекомунікаційних мереж шляхом використання методів моделювання та візуалізації структури мережі.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи системного аналізу телекомунікаційних мереж, математичного моделювання, теорії графів, комп'ютерного моделювання та інформаційної візуалізації процесів проєктування мереж.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж, який, на відміну від існуючих підходів, базується на ітераційному узгодженні топологічних параметрів магістральної лінії з фізичними характеристиками каналу передачі (OSNR, SNR, BER), що дозволяє оптимізувати

розміщення оптичних підсилювачів EDFA та підвищити енергетичну ефективність мережі;

– набула подальшого розвитку модель масштабованого проектування волоконно-оптичних мереж, яка забезпечує адаптацію структури магістралі до змін довжини траси, коефіцієнтів згасання волокна та шумових характеристик підсилювачів, що дозволяє підвищити стійкість проектних рішень до деградаційних факторів.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробці програмного засобу підтримки процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж, який дозволяє автоматизувати розрахунок параметрів магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку та оптимізувати розміщення оптичних підсилювачів EDFA відповідно до фізичних характеристик каналу передачі.

У вступі подано об'єкт і предмет дослідження, мету роботи, наукову новизну, практичну значимість отриманих результатів та загальну характеристику структури кваліфікаційної роботи.

У першому розділі виконано аналіз особливостей побудови оптичних телекомунікаційних мереж, розглянуто основні топології мереж, принципи функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку, фізичні характеристики оптичного волокна та основні фактори, що впливають на якість передачі сигналу

У другому розділі досліджено теоретичні основи проектування магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку, розглянуто принципи побудови енергетичного бюджету лінії, особливості використання оптичних підсилювачів EDFA, методи оцінки OSNR, SNR, пропускної здатності каналу та ймовірності бітових помилок.

У третьому розділі досліджено та удосконалено розрахунковий метод проектування магістральної оптичної мережі, виконано аналіз впливу довжини підсилювальних сегментів на якість передачі сигналу, проведено оптимізацію параметрів сегментації магістралі та визначено критерії вибору оптимальної конфігурації мережі.

У четвертому розділі реалізовано програмний засіб моделювання та візуалізації процесу проектування магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку, розроблено модулі розрахунку параметрів сегментації, визначення кількості EDFA-підсилювачів, оцінки OSNR, SNR, BER та пропускної здатності каналу, а також виконано експериментальне дослідження масштабованості та стійкості запропонованого методу.

У висновках наведено основні результати виконаного дослідження, сформульовано практичну значимість отриманих результатів та підсумовано досягнення поставленої мети роботи.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	5
Вступ.....	6
1 Аналіз сучасного стану та методів проєктування оптичних телекомунікаційних мереж	8
1.1 Сучасний стан розвитку телекомунікаційних мереж.....	8
1.2 Переваги та недоліки оптичних телекомунікаційних мереж	13
1.3 Сучасні тенденції розвитку оптичних телекомунікаційних мереж та методів їх проєктування.....	17
1.4 Архітектури та технології побудови оптичних мереж доступу	21
1.5 Постановка задачі.....	23
2 Моделювання процесу проєктування оптичних телекомунікаційних мереж	24
2.1 Формалізація задачі проєктування оптичної телекомунікаційної мережі	24
2.2 Аналіз моделей представлення структури оптичної мережі	26
2.3 Структурна модель оптичної телекомунікаційної мережі.....	28
2.4 Логічна модель формування топології мережі та система технічних обмежень	30
2.5 Модель процесу проєктування оптичної телекомунікаційної мережі	31
2.6 Модель процесу проєктування оптичної телекомунікаційної мережі	33
2.7 Адаптація топологічних рішень для мереж різного масштабу	36
2.8 Математичне обґрунтування масштабованості моделі.....	37
2.9 Моделювання впливу зовнішніх деградаційних факторів на параметри оптичної мережі.....	39
2.10 Формалізація переходу від пасивної до активної моделі проєктування	41
2.11 Узагальнення моделі процесу проєктування	42
2.12 Висновки	43
3 Метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж із врахуванням фізичних параметрів каналу.....	45

3.1 Основи методу проектування магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку	45
3.2 Метод оцінки якості передачі сигналу на основі аналізу OSNR	49
3.3 Метод визначення пропускної здатності та ймовірності бітової помилки	53
3.4 Теоретичні засади багатокритеріальної оптимізації структури магістральних мереж	56
3.5 Аналіз факторів невизначеності та стійкості проектних рішень	59
3.6 Концептуальна модель візуально-орієнтованого проектування	61
3.7 Порівняльний аналіз методик проектування магістральних оптичних мереж	62
3.8 Висновки	64
4 Алгоритмічна реалізація та оптимізація процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж	66
4.1 Алгоритмічне забезпечення методу проектування магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку	66
4.2 Структурно-алгоритмічна реалізація процесу проектування магістральної ВОЛЗ	67
4.3 Експериментальне дослідження оптимізованого методу проектування	70
4.4 Дослідження масштабованості та стійкості методу	75
4.4.1 Аналіз масштабованості методу за довжиною магістралі	75
4.4.2 Аналіз стійкості методу при зміні коефіцієнта загасання оптичного волокна	
77	
4.5 Візуалізація процесу побудови магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку	78
4.6 Висновки	80
Висновки	81
Перелік джерел посилань	83
Додаток А Публікація тези	92
Додаток Б Сертифікат участі в конференції	95
Додаток В Презентація	96
Додаток Г Лістинг програмного забезпечення	103

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

FTTH – Fiber to the Home (волокно до дому)

FTTB – Fiber to the Building (волокно до будівлі)

FTTR – Fiber to the Room (волокно до кімнати)

FTTN – Fiber to the Node (волокно до вузла)

FTTx – Fiber to the “x” (волокно до точки “x”)

WDM – Wavelength Division Multiplexing (спектральне ущільнення каналів)

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing (щільне спектральне ущільнення каналів)

ЦОД – центр обробки даних

ГІС – геоінформаційна система

PON – Passive Optical Network (пасивна оптична мережа)

AR – Augmented Reality (доповнена реальність)

DSL – Digital Subscriber Line (цифрова абонентська лінія)

AON – Active Optical Network (активна оптична мережа)

PTP – Point to Point (точка-точка)

OLT – Optical Line Terminal (оптичний лінійний термінал)

ONU – Optical Network Unit (оптичний мережевий термінал)

EDFA – Erbium Doped Fibre Amplifier (волоконно-оптичний підсилювач)

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв’язку

SNR – Signal to Noise Ratio (співвідношення сигнал/шум)

OSNR – Optical Signal to Noise Ratio (оптичне відношення сигнал/шум)

ASE – Amplified Spontaneous Emission (підсилене спонтанне випромінювання)

SPM – Self Phase Modulation (фазова самотодуляція)

XPM – Cross Phase Modulation (перехресна фазова модуляція)

FWM – Four Wave Mixing (чотирьох хвильове змішування)

FEC – Forward Error Correction (пряма/попередня корекція помилок)

BER – Bit Error Rate (коефіцієнт бітових помилок)

ВСТУП

Розвиток сучасних інформаційно-телекомунікаційних систем супроводжується постійним зростанням обсягів передавання даних та підвищенням вимог до швидкості, надійності та ефективності функціонування мереж зв'язку. У зв'язку з цим оптичні телекомунікаційні мережі набувають широкого застосування завдяки високій пропускній здатності, низьким втратам сигналу та можливості забезпечення стабільного зв'язку на значних відстанях.

Оптичні мережі використовуються при побудові магістральних, міських та мереж доступу, зокрема на основі технологій FTTH, що забезпечують підключення користувачів до високошвидкісного Інтернету та сучасних цифрових сервісів. У зв'язку зі зростанням кількості абонентів та складності мережевої інфраструктури підвищуються вимоги до ефективності процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж.

Проектування оптичних телекомунікаційних мереж є складним інженерним завданням, що включає визначення структури мережі, вибір топології, розміщення елементів мережі та аналіз її параметрів. Використання методів моделювання та засобів візуалізації процесу проектування дозволяє підвищити наочність представлення структури мережі та ефективність прийняття проектних рішень.

Актуальність роботи полягає в необхідності підвищення ефективності процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж в умовах зростання складності мережевої інфраструктури та збільшення вимог до її продуктивності, де традиційні підходи до проектування не завжди забезпечують достатній рівень наочності та ефективності прийняття проектних рішень.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж шляхом використання методів моделювання та візуалізації структури мережі.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи та засоби проектування оптичних телекомунікаційних мереж;

- дослідити особливості побудови оптичних мереж доступу на основі технології FTTH;
- розробити модель структури оптичної телекомунікаційної мережі;
- реалізувати програмні засоби візуалізації процесу проектування оптичної телекомунікаційної мережі;
- здійснити дослідження ефективності використання розробленої моделі та програмного забезпечення в процесі проектування мереж.

Об'єктом дослідження є процес проектування оптичних телекомунікаційних мереж.

Предметом дослідження є методи моделювання та засоби візуалізації процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено підхід до моделювання структури оптичної телекомунікаційної мережі шляхом використання засобів програмної візуалізації процесу її проектування.

На основі проведених досліджень розроблено проектування структури оптичної телекомунікаційної мережі із застосуванням засобів моделювання та візуалізації процесу формування топології мережі.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні візуалізації процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж. (на Python).

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи моделювання телекомунікаційних мереж, методи структурного аналізу мережевих топологій та методи програмної візуалізації процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [1] у Збірнику наукових праць за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції «Наука, технології та суспільство: фінансові, правові та соціально-економічні аспекти розвитку». (Полтава– 2026. – С. 133-135).

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА МЕТОДІВ ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

1.1 Сучасний стан розвитку телекомунікаційних мереж

Розвиток людства нерозривно пов'язаний з еволюцією комунікаційних процесів, що забезпечують легкий обмін знаннями в незалежності від географічних чи часових бар'єрів. Використання різноманітних форм взаємодії, починаючи від простого мовлення та невербальних сигналів до письмових джерел, сформувало надійні канали інформаційного обміну в суспільстві.

Але технологічний прогрес останніх років дуже сильно трансформував ці методи, що дало можливість волоконно-оптичним технологіям вийти на передній план. Згідно із джерелом [2] зараз вони відіграють велику роль в сучасній цифровій топографії.

За своєю суттю це комунікаційні системи, що використовують світло для передачі даних. Їхньою основою є оптичне волокно – це, як зазначено у джерелі [3], тонка нитка з прозорого матеріалу, зазвичай скла або пластику, яка переносить світловий сигнал завдяки явищу повного внутрішнього відображення. Така технологія забезпечує колосально велику пропускну здатність, низькі втрати сигналу та стабільність завдяки імунітету до електромагнітних завад.

Як зазначається у джерелі [4], історія цього прориву почалася ще у 1966 році, коли група вчених теоретично обґрунтувала можливість створення волокна із загасанням менше 20 дБ/км. Практичне втілення ідея отримала у 1970 році: фахівцям компанії Corning вдалося досягти показника 16 дБ/км, а згодом — знизити його до вражаючих 4 дБ/км, що відкрило шлях до комерційного використання технології на великих відстанях.

На початку 1980-х років були створені перші експериментальні волоконно-оптичні мережі. За даними із джерела [5], у 1983 році компанія AT&T Long Lines розгорнула одну з перших комерційних оптичних мереж, з'єднавши великі міста США волоконно-оптичними кабелями. Ці перші мережі використовувалися для

міжміського телефонного зв'язку і розглядалися як більш ефективна та надійна альтернатива традиційним системам із мідних дротів.

Водночас волоконно-оптичні технології почали привертати увагу телекомунікаційних компаній та науково-дослідних інститутів. Інженери шукали способи покращити роботу мереж, збільшуючи їхню пропускну здатність і зменшуючи втрату сигналу на великих відстанях. Як згадується у роботі [6], це призвело до розробки технології спектрального ущільнення каналів наприкінці 1980-х років. Згідно із даними у роботі [7], WDM дозволила передавати кілька потоків даних по одному волокну, використовуючи різні довжини хвиль, або як ще згадують у джерелі [8], кольори світла. Це стало величезним кроком уперед, оскільки дало змогу експоненціально збільшити потужність оптичних мереж.

У джерелі [9] висвітлено, що на початку 1990-х років, волоконно-оптичні мережі почали широко застосовуватися у сферах телекомунікацій та передачі даних. Розширення мереж типів FTTH та FTTB, згідно із джерелом [10], забезпечило житлових і комерційних споживачів високошвидкісним доступом до інтернету та якісним телефонним зв'язком.

Винахід технології щільного спектрального ущільнення каналів у 1990-х роках сприяв подальшому зростанню пропускну здатності оптичних мереж. Як зазначається у джерелі [11], технологія DWDM дозволила одночасно передавати численні світлові хвилі через одне волокно, що значно збільшило обсяги передачі даних у межах існуючої інфраструктури. Це стало визначальним етапом розвитку галузі, оскільки дало змогу оптичним мережам обробляти колосальні потоки трафіку без необхідності прокладання додаткових кабельних ліній.

Крім того, стрімкий розвиток мережі Інтернет у цей період зумовив різке зростання попиту на високошвидкісну передачу даних. Волоконно-оптичні мережі стали пріоритетним вибором для побудови магістральної інфраструктури Інтернету, забезпечивши можливість масштабного обміну даними та глобальну мережеву зв'язність у світовому масштабі.

Протягом 2000-х років попит на швидший та надійніший доступ до мережі Інтернет продовжував невпинно зростати [4]. Волоконно-оптичні мережі

еволюціонували відповідно до цих вимог, що супроводжувалося значним прогресом у збільшенні пропускної здатності та ефективності відповідних технологій.

Згідно із інформацією у джерелі [12], у цей період почали формуватися мобільні мережі стандартів 3G та 4G, що призвело до подальшого зростання потреби у високошвидкісній передачі даних. Волоконно-оптичні кабелі дедалі частіше використовувалися для з'єднання базових станцій мобільного зв'язку та ЦОД, забезпечуючи високу пропускну здатність каналів, необхідну для обслуговування стрімкого зростання обсягів мобільного трафіку.

У корпоративному секторі центри обробки даних також почали значною мірою покладатися на волоконно-оптичні мережі для обробки та зберігання дедалі більших масивів інформації. Цей перехід до оптичних рішень дозволив ЦОД підтримувати хмарні обчислення та додатки для роботи з великими даними, які потребували здатності зберігати й опрацьовувати значні обсяги інформації в режимі реального часу.

У 2010-х роках відбулося впровадження оптичних мереж стандарту 100G, що згідно із даними із посібника [13], забезпечували швидкість передачі даних до 100 Гбіт/с - показник, який на порядок перевищував можливості технологій попереднього покоління. Цей стрибок був зумовлений постійним зростанням попиту на пропускну здатність, що підживлювалося розвитком стрімінгових сервісів, онлайн-ігор, хмарних додатків та платформ соціальних мереж.

У цей же період з'явилися технології програмно-конфігурованих мереж та віртуалізації мережевих функцій, які за даними із джерела [14]. дозволили операторам ефективніше керувати оптичними мережами та оптимізувати їхню роботу. Впровадження цих технологій забезпечило вищий рівень гнучкості та масштабованості, надаючи можливість динамічно розподіляти смугу пропускання та мережеві ресурси залежно від потреб у режимі реального часу.

Якщо говорити про кабельні з'єднання, то за даними із джерела [15], станом на початок 2024 року налічується 574 підводних кабелі (діючих і запланованих).

Загальна кількість діючих кабелів постійно змінюється в міру введення в експлуатацію нових кабелів і виведення з експлуатації старих.

Хоча супутниковий зв'язок стає дедалі важливішим завдяки орбітальним системам, таким як Starlink компанії SpaceX, підводні кабелі є робочими конячками світової торгівлі та зв'язку, на основі даних із джерела [16], ними передають понад 99% трафіку між континентами.

Волоконна оптика чудово підходить для швидкого широкосмугового і далекого передавання даних, але у цієї технології є свої межі. Саме тому через кожні 30-60 миль у кабелі є велика випуклість, звана ретранслятором, щоб збільшити силу сигналу. Однак ретранслятори потребують живлення, і тут у гру вступає ще одна частина конструкції кабелю. За межами оптоволоконних ниток мідний шар проводить електрику напругою до 18 000 вольт. Цього достатньо, щоб живити ретранслятори через весь Тихий океан тільки з одного кінця кабелю, хоча для більшої надійності живлення зазвичай подають з обох кінців.

На початок 2024 року у світі експлуатується близько 1,4 мільйона кілометрів підводних кабелів. Згідно із джерелом [17], деякі кабелі досить короткі, як, наприклад, 131-кілометровий кабель CeltixConnect між Ірландією і Великою Британією. Інші, навпаки, неймовірно довгі, як, наприклад, 20 000-кілометровий кабель Asia America Gateway.

Прокладка кабелю океанським дном - процес складний і довгий. Залежно від маршруту кабель прокладають на глибину до 8 кілометрів. Перед безпосередньою прокладкою проводиться серйозна підготовча робота. Необхідне ретельне вивчення маршруту, який має бути безпечним та економічно вигідним. Здійснюється геологічна розвідка, вибираються ділянки з рівним дном, з відсутністю розломів у земній корі. Враховується і наявність різних перешкод: коралові рифи, кораблі, що затонули, тощо. Також відбувається оцінка можливої сейсмічної та вулканічної активності, зсувів.

Для візуалізації глобальної телекомунікаційної інфраструктури існують відкриті геоінформаційні ресурси, які в реальному часі відображають актуальну мережу підводних магістралей. Станом на 2026 рік карта океанічних ліній зв'язку

має вигляд, представлений на рисунку 1.1, що демонструє високу щільність з'єднань між континентами та ключову роль підводної оптики у світовому обміні даними.

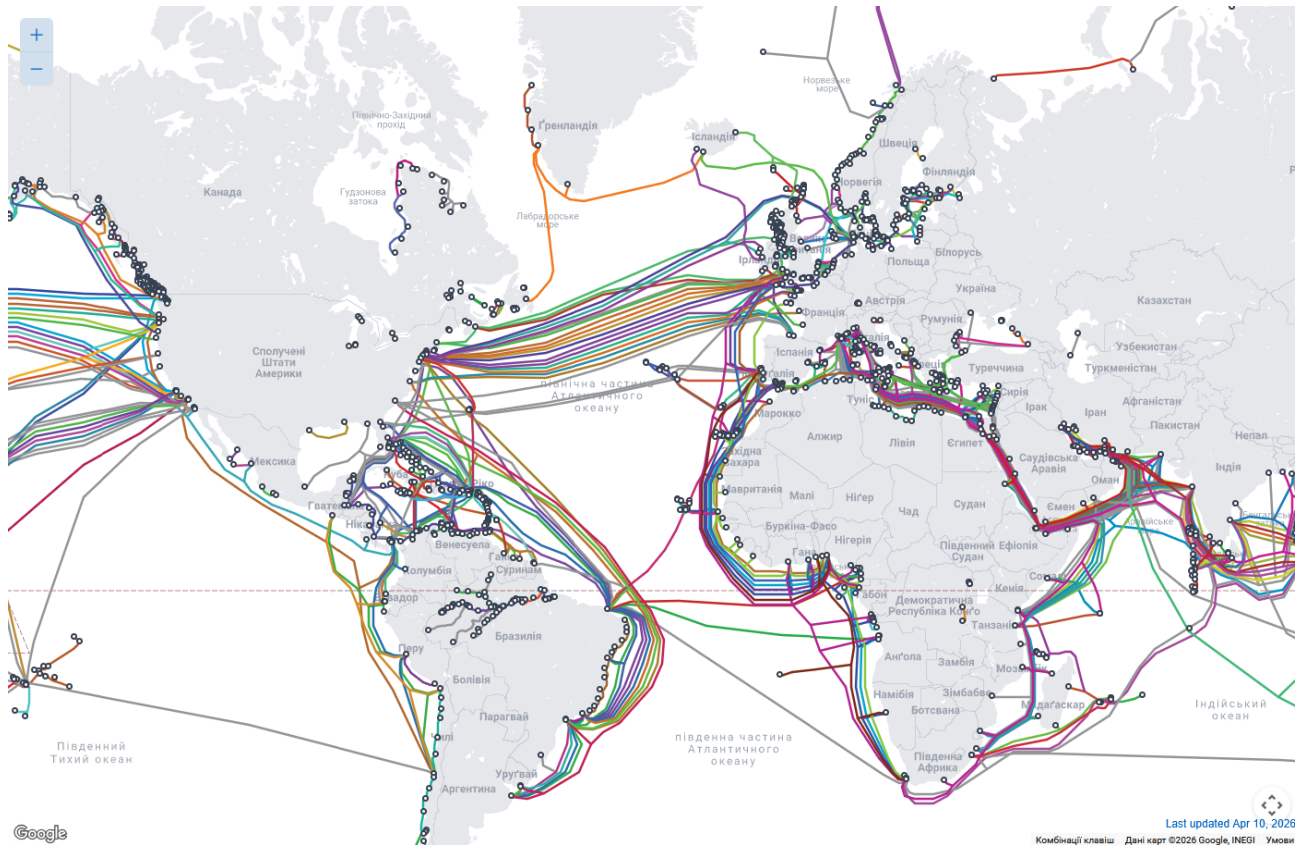


Рисунок 1.1 – Карта підводних кабелів [18]

Узагальнюючи наведене, можна стверджувати, що волоконно-оптичні мережі стали ключовим елементом сучасної інформаційної інфраструктури. Історична еволюція оптичних телекомунікаційних мереж пройшла стрімкий шлях від перших теоретичних обґрунтувань повного внутрішнього відбиття до створення сучасних надшвидкісних магістралей, що стали фундаментом глобального інформаційного суспільства. Сьогодні розвиток оптичних мереж характеризується переходом до повної автоматизації та впровадженням систем візуалізації, що дозволяє не лише забезпечувати терабітні швидкості передачі, а й здійснювати предиктивне управління інфраструктурою в режимі реального часу.

1.2 Переваги та недоліки оптичних телекомунікаційних мереж

Подальший розвиток інформаційних технологій, зокрема хмарних сервісів, інтернету речей, мобільних мереж нового покоління та систем штучного інтелекту, ще більше підсилює роль волоконно-оптичної інфраструктури. Саме тому дослідження технологічних принципів функціонування оптичного зв'язку, структури оптичного волокна та особливостей передачі сигналів у таких системах є важливим завданням сучасної телекомунікаційної науки.

Згідно з даними із джерела [19], у сучасних телекомунікаційних системах використовуються два основних типи оптичного волокна: одномодове та багатомодове.

Багатомодове волокно характеризується відносно великим діаметром серцевини, що за даними із джерела [20], зазвичай становить 50 або 62,5 мкм. Завдяки цьому світлові промені можуть поширюватися кількома різними траєкторіями (модами). Такий тип волокна використовується переважно у локальних мережах та дата-центрах, де відстані передачі відносно невеликі.

Одномодове волокно, на основі інформації із посібника [21], має значно менший діаметр серцевини. У такому волокні світло поширюється лише однією модою, що значно зменшує втрати та дисперсію сигналу. Саме тому одномодове волокно використовується у магістральних та міжконтинентальних лініях зв'язку.

Завдяки своїм характеристикам одномодове волокно стало стандартом для сучасних телекомунікаційних мереж, та згідно із джерелом [22], використовується у більшості FTTH-інфраструктур.

Ефективність передачі сигналу безпосередньо залежить від складної багатошарової структури кабелю, сам оптоволоконний кабель зображений на рисунку 1.2.

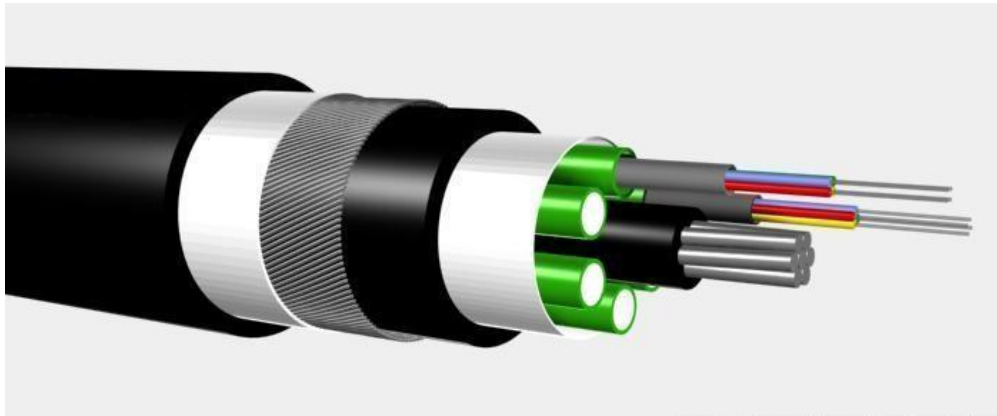


Рисунок 1.2 – Оптиволоконний кабель

Як зазначено у джерелі [23], основою конструкції є центральне осердя (серцевина), яке слугує безпосереднім каналом для поширення світлового сигналу. Його технічні характеристики визначаються типом волокна: для одномодових систем використовується серцевина діаметром 9 мкм, що забезпечує передачу одного променя, тоді як у багатомодових мережах діаметр становить 50 мкм, згідно із джерелом [24]. Саме від чистоти та геометричної точності цього елемента залежить якість світлового потоку та швидкість передачі даних.

Навколо серцевини розташована оптична діелектрична оболонка діаметром 125 мкм. За даними із джерела [25], вона виготовляється з матеріалу, показник заломлення якого є нижчим за показник серцевини. Це створює умови для повного внутрішнього відбиття, що дозволяє утримувати світло всередині центральної частини кабелю та запобігати його розсіюванню. Таким чином, оболонка виконує роль оптичного хвилеводу, спрямовуючи сигнал уздовж всієї лінії зв'язку.

Наступним рівнем захисту, згідно із працею [26], є полімерне буферне покриття товщиною 250 мкм. Цей тонкий шар наноситься безпосередньо на скляну оболонку під час виробництва, щоб запобігти появі мікротріщин та захистити скло від впливу вологи. Буферний шар є критично важливим для збереження механічної міцності волокна, оскільки він амортизує дрібні вібрації та поверхневі навантаження.

Завершує структуру зовнішнє захисне покриття, діаметр якого зазвичай становить 900 мкм. Цей шар інкапсулює всі попередні елементи, створюючи

надійний бар'єр проти механічних пошкоджень, розтягування та температурних коливань. Така багатоступенева архітектура дозволяє оптичному волокну залишатися функціональним у складних експлуатаційних умовах, забезпечуючи стабільність роботи всієї телекомунікаційної мережі.

Передача інформації у волоконно-оптичних системах здійснюється шляхом модуляції світлового сигналу. Найчастіше використовується інтенсивна модуляція, коли зміна інтенсивності світла відповідає цифровим бітам інформації. Сучасні системи також застосовують складніші методи модуляції, що дозволяють значно збільшити пропускну здатність каналу.

Порівняння різних поколінь технології наочно демонструє масштаби прогресу. Оптичне волокно першого покоління (1970-ті роки) з діаметром серцевини 50 мкм забезпечувало передачу телефонних сигналів на швидкості близько 6 Мбіт/с на відстані до 10 км, згідно із джерелом [27]. А вже у 1980-х роках вдосконалення технологій виготовлення одномодового волокна (з меншим діаметром серцевини - 9 мкм) дозволило здійснити справжній стрибок. Сучасні системи здатні транслювати дані зі швидкістю понад терабіт на секунду на відстані сотень кілометрів.

Згідно із джерелами [28, 29], волоконно-оптичні кабелі пропонують численні переваги перед мідними кабелями, включаючи більшу пропускну здатність і вищу швидкість, а також стійкість до електромагнітних перешкод.

Проте, за даними із джерела [30], з мінусів варто виділити те, що ремонт оптоволоконно трудомістке, тому якщо станеться розрив кабелю, то потрібне спеціальне обладнання. Також матеріал є досить крихким, через що слід уникати його зламу. І останнє - для того, щоб перетворювати сигнал, потрібно використовувати спеціальне обладнання.

Головний конкурент оптоволоконна - кручена пара. Цей провідник коштує дешевше, тому до цих пір у великій кількості випадків його застосування є більш доцільним.

Якщо розглянути більш детально, то волоконно-оптичні системи мають ряд стратегічних переваг, що роблять їх безальтернативною основою сучасної

цифрової інфраструктури. На відміну від традиційних мідних ліній, оптоволокну дозволяє оперувати колосальними інформаційними потоками, та на основі даних із джерела [31], стає фундаментом для безперебійного функціонування ресурсомістких сервісів, таких як трансляції у форматі 4K або складні хмарні обчислення. Окрім пропускну здатності, згідно із джерелом [32], технологія гарантує мінімальну затримку сигналу, забезпечуючи миттєву передачу даних у реальному часі, що є критичним для телемедицини та інтерактивного навчання.

Також, згідно із джерелом [33], висока надійність мереж зумовлена їхньою природною стійкістю до електромагнітних завад та несприятливих погодних факторів, що гарантує безпеку передачі даних навіть у складних промислових умовах. Водночас низьке затування сигналу сприяє високій енергоефективності, оскільки транспортування інформації на великі відстані потребує значно менших енерговитрат порівняно з електричними кабелями. Це не лише оптимізує операційні витрати, а й суттєво зменшує загальний вплив на довкілля.

Окрему роль відіграє масштабованість та адаптивність оптоволоконної архітектури, яка дозволяє оперативнo нарощувати потужність мережі відповідно до зростаючих запитів ринку без необхідності повної заміни лінійної інфраструктури. Така гнучкість перетворює оптичні системи на потужний катализатор інновацій, створюючи необхідне середовище для розвитку концепції Інтернету речей, систем штучного інтелекту та аналітики Big Data, що сьогодні формують обличчя глобальної цифровізації, згідно із джерелами [34, 35, 36].

Незважаючи на високу ефективність волоконно-оптичних систем, під час передачі сигналу виникають певні фізичні явища, які можуть погіршувати якість зв'язку. До основних факторів, що впливають на передачу сигналу, належать затування (втрати) сигналу та дисперсія.

Згідно із джерелом [37], затування сигналу - це поступове зменшення потужності світлового сигналу під час його поширення вздовж волокна. Основними причинами цього явища є поглинання світла матеріалом волокна, розсіювання світлових хвиль та мікроскопічні дефекти структури скла. У сучасних оптичних волокнах рівень затування може становити менше ніж 0,2 дБ/км, що

дозволяє передавати сигнал на великі відстані без значного погіршення його характеристик, за даними із джерела [38].

Ще одним важливим фактором є дисперсія сигналу, яка проявляється у розширенні світлових імпульсів під час їх поширення у волокні, як зазначено у джерелі [39]. Це призводить до того, що сусідні імпульси можуть накладатися один на одного, що ускладнює коректне приймання інформації. Існує кілька видів дисперсії, серед яких модова дисперсія, хроматична дисперсія та поляризаційна дисперсія.

Для зменшення негативного впливу цих явищ застосовуються різні технічні рішення. Серед них - використання одномодового волокна, спеціальних компенсаційних модулів, а також сучасних методів цифрової обробки сигналу. Крім того, у магістральних мережах застосовуються оптичні підсилювачі, які дозволяють підтримувати необхідний рівень сигналу на великих відстанях, згідно із працею [40].

1.3 Сучасні тенденції розвитку оптичних телекомунікаційних мереж та методів їх проектування

Сучасний етап розвитку телекомунікацій в Україні, згідно із джерелом [41], характеризується високим ступенем адаптивності до кризових умов та стабільним зростанням попиту на високошвидкісний доступ до мережі Інтернет. Аналіз даних із джерел [42, 43], дозволяє визначити ключові вектори трансформації мережевого ландшафту, де волоконно-оптичні технології залишаються фундаментальною базою для забезпечення стабільного зв'язку в умовах непередбачуваних зовнішніх викликів. Згідно зі щорічним звітом компанії Cloudflare [44], у 2024 році середня швидкість завантаження в Україні досягла показника 109 Мбіт/с. Попри значні коливання обсягів інтернет-трафіку у першому півріччі (із зафіксованим просіданням від -5% до -24%), у другій половині року спостерігалася виражена тенденція до відновлення. Пікове зростання було зафіксоване у жовтні, склавши 27%, а загальний річний приріст трафіку відносно попереднього періоду становив

1,8%. Це підтверджує критичну важливість масштабованих оптичних мереж, здатних витримувати різкі амплітудні стрибки навантаження.

Особливістю звітнього періоду став стрімкий розвиток та розширення сегмента супутникового інтернет-зв'язку, зокрема мережі Starlink, згідно із джерелом [45], обсяг трафіку якої в Україні виріс упродовж року в 2,8 раза. Водночас у структурі мобільного споживання відбулася певна переорієнтація користувацьких пріоритетів: хоча пристрої на базі операційної системи Android продовжують домінувати (74,6%), частка трафіку з iOS-гаджетів продемонструвала ріст з 21,3% до 25,4%. Така динаміка разом із високою популярністю мультимедійних платформ (TikTok, YouTube, Instagram, Facebook) та сервісів Google, що займає 95,6% ринку пошукових систем, формує стабільний запит на подальше розгортання архітектур FTTH. Саме волоконно-оптичні лінії забезпечують необхідну пропускну здатність для магістрального трафіку мобільних операторів та глобальних точок обміну даними, обслуговуючи потреби таких гігантів, як Apple, Microsoft, Amazon та Wikipedia.

На сучасному етапі світовий ринок волоконно-оптичних комунікацій перейшов від фази кількісного розширення до глибокої якісної трансформації. На основі даних із джерела [46], основним драйвером став вибуховий розвиток генеративного штучного інтелекту, змусило операторів ЦОД масово переходити на стандарти передачі даних 800G та 1.6T, вказано у джерелі [47]. Завдяки впровадженню когерентної оптики та нових матеріалів, таких як тонкоплінковий ніобат літію, вдалося значно знизити енергоспоживання пристроїв, що стало пріоритетом у межах глобальної стратегії сталого розвитку. Ще однією важливою тенденцією стало розгортання архітектури FTTR, що дозволяє усунути «вузькі місця» домашніх Wi-Fi мереж і забезпечити стабільну затримку менше 1 мс, зазначається у джерелах [48,49]. Окрім цього, інтеграція сенсорних можливостей волокна дозволяє використовувати існуючі кабелі як датчики для моніторингу вібрацій та цілісності інфраструктури «розумних міст».

Згідно із джерелами [50, 51], станом на 2026 рік світова телекомунікаційна галузь перебуває на етапі зрілості технології 5G та активного формування

фундаменту для 6G. Глобальна кількість комерційних запусків мереж 5G Standalone значно зросла, стаючи нормою для функціонування автономного транспорту та індустрії 4.0. В Україні 2026 рік став знаковим завдяки офіційному старту пілотних проєктів 5G у Львові та Харкові, зазначається у джерелі[52]. Критично важливо розуміти, що ці покоління мобільного зв'язку базуються виключно на потужній волоконно-оптичній інфраструктурі.

На основі даних із джерела [53]. перспективним напрямом розвитку галузі є перехід від статичного проєктування до створення цифрових двійників оптичної інфраструктури. Ця технологія дозволяє створювати віртуальну копію фізичної мережі, яка в реальному часі відображає її стан, параметри згасання та навантаження каналів. Для інженера-проєктувальника це означає можливість візуалізувати процес поширення сигналу та моделювати критичні відмови ще до етапу прокладання кабелю. Використання цифрових двійників дозволяє оптимізувати топологію мережі, мінімізуючи капітальні витрати та забезпечуючи максимальну відмовостійкість системи.

Важливою складовою сучасних методів проєктування стає інтеграція інструментів інтелектуальної візуалізації на основі ГІС-технологій, згідно із джерелом [54]. Сучасні програмні комплекси дозволяють автоматично накладати схеми трасування волокна на тривимірні моделі міського ландшафту, враховуючи підземні комунікації, тип ґрунту та існуючу забудову. Візуалізація процесу проєктування у 3D-просторі дає змогу наочно оцінити складність монтажних робіт, точно розрахувати необхідну довжину кабельних ліній та визначити оптимальні місця для встановлення пасивних спліттерів або активного обладнання.

Згідно із джерелами [55, 56], одним із найбільш значущих трендів є впровадження алгоритмів машинного навчання для автоматизації топологічного проєктування. Перспективні методи дозволяють системі самостійно генерувати десятки варіантів архітектури мережі (наприклад, для топологій PON), візуалізуючи кожен із них та оцінюючи їх за критеріями вартості та надійності. Такий підхід трансформує роль інженера з виконавця рутинних креслень у аналітика, який обирає найкращий із візуалізованих сценаріїв, що базується на

точних математичних розрахунках і прогнозних моделях трафіку, вказано у джерелі [57].

У контексті підвищення ефективності експлуатації перспективним є розвиток технологій автоматизованого моніторингу на основі зворотного розсіювання з графічною візуалізацією дефектів, зазначається у джерелі [58]. Сучасні системи проектування інтегруються з модулями моніторингу, що дозволяє в реальному часі накладати дані про пошкодження кабелю на інтерактивну карту мережі. Згідно із даними у джерелі [59], це забезпечує візуалізацію точного місця обриву з точністю до метра, що радикально скорочує час на відновлення зв'язку та підвищує загальну експлуатаційну привабливість оптичних рішень.

З огляду на зростаючу складність мереж, майбутнє проектування неможливе без впровадження технологій доповненої реальності для польових інженерів. Як зазначено у джерелі [60], візуалізація процесу розгортання мережі через AR-інтерфейси дозволяє технічному персоналу бачити приховані під землею або в стінах кабельні траси, порти підключення та схеми зварювання волокон у реальному часі. Такий метод проектування та супроводу мінімізує людський фактор і помилки під час монтажу, що є критично важливим для мереж високої щільності, таких як FTTR або 5G backhaul, за даними із джерела [61].

Підсумовуючи перспективи, слід зазначити, що автоматизація та візуалізація процесів проектування стають ключовими інструментами для масштабування мереж наступного покоління. Перехід до інтелектуальних систем проектування дозволить не лише встигати за стрімким ростом попиту на пропускну здатність, але й створить надійний фундамент для впровадження технологій 1.6T Ethernet та 6G, на основі даних із джерела [62]. Саме методи візуалізації процесу проектування, що розглядаються у цій роботі, є відповіддю на виклики щодо складності та вартості розбудови сучасної цифрової інфраструктури.

1.4 Архітектури та технології побудови оптичних мереж доступу

Розвиток широкосмугового доступу на сучасному етапі характеризується переходом від гібридних систем до повністю оптичних рішень. За даними із джерела [63], ключовим вектором цієї трансформації є впровадження архітектур сімейства FTTx, які визначають топологію мережі залежно від глибини проникнення оптичного волокна в інфраструктуру кінцевого користувача.

Концепція FTTx представляє собою наступний етап еволюції мережевої інфраструктури, що забезпечує надвисокі швидкості передачі даних шляхом заміни традиційних мідних ліній зв'язку оптичним волокном. Індекс «x» у цій аббревіатурі вказує на конкретну точку, до якої доводиться оптична лінія в межах певного сценарію розгортання: це може бути вузол зв'язку в мікрорайоні FTTN, будівля, окреме житлове приміщення або навіть конкретна кімната, згідно із джерелами [64, 65, 66].

Перехід на волоконно-оптичні технології гарантує не лише зростання швидкості, але й значне збільшення пропускної здатності, надійності та можливостей масштабування в майбутньому, що знаменує нову еру цифрової взаємодії, вказано у джерелі [67]. FTTx є яскравим прикладом того, як модернізація інфраструктури може забезпечити експоненціальне зростання потужності мережі, задовольняючи потреби сучасного світу, що базується на обміні великими масивами даних. Закладаючи цей фундамент, згідно із джерелом [68], технології FTTx докорінно змінюють принципи комунікації, роботи та доступу до інформації в цифрову епоху.

Згідно із джерелом [69], однією з найпоширеніших сучасних технологій побудови широкосмугового доступу є FTTH. Дана технологія передбачає прокладання оптоволоконних кабелів безпосередньо від центрального вузла оператора зв'язку до кінцевих користувачів - житлових будинків або офісних приміщень. Такий підхід дозволяє відмовитися від традиційних мідних технологій доступу, зокрема DSL-з'єднань, які мають обмежену пропускну здатність, і перейти до більш сучасної інфраструктури з високою швидкістю передачі даних.

Технологія FTTH може бути реалізована за кількома архітектурними підходами. Найбільш поширеними серед них є пасивні оптичні мережі, активні оптичні мережі та з'єднання типу «точка-точка», згідно із джерелом [70]. Кожен з цих підходів має свої особливості побудови, технічні характеристики та сферу застосування.

PON, згідно із джерелами [71, 72], є архітектурою типу «точка-багатоточка», у якій використовується одне магістральне оптичне волокно для обслуговування декількох кінцевих абонентів. Розподіл сигналу між користувачами здійснюється за допомогою пасивних оптичних розгалужувачів (спліттерів), які не потребують електроживлення, за даними із джерела [73].

Саме мережі PON сьогодні є найпоширенішою технологією реалізації FTTH, оскільки дозволяють значно знизити витрати на побудову інфраструктури. Завдяки використанню пасивних елементів зменшується потреба у встановленні активного обладнання на проміжних вузлах мережі. Максимальна відстань між центральним вузлом та абонентським обладнанням зазвичай становить близько 20 км.

Іншим підходом до побудови FTTH-інфраструктури є AON, згідно із джерелом [74]. На відміну від PON, така мережа має архітектуру «точка-точка», за даними із джерела [75], у якій кожен користувач отримує власну виділену оптичну лінію від центрального вузла.

За даними із джерела [76], основною особливістю AON є використання активних мережевих елементів, які виконують функції маршрутизації та керування сигналами. Завдяки цьому забезпечується більш висока швидкість передачі даних і менша затримка сигналу.

Хоча AON використовується рідше, ніж PON, ця технологія знаходить застосування в ситуаціях, де потрібна висока пропускна здатність, низька затримка та висока гнучкість мережі, на основі даних із джерела [77]. Відстань між передавачем і приймачем у таких системах може досягати 70 км для магістральної частини та близько 20 км для розподільної мережі.

Ще одним варіантом реалізації FTTH є архітектура PTP, згідно із джерелом [78]. У цьому випадку між вузлом провайдера та кінцевим користувачем

прокладається пряме оптичне з'єднання без використання проміжних розгалужувачів або інших пасивних елементів, за даними із джерела [79].

Згідно із джерелом [80], фактично РТР передбачає створення окремої оптичної лінії для кожного абонента, що забезпечує максимально можливу пропускну здатність та стабільність з'єднання. Однак такий підхід потребує значно більшої кількості оптичних кабелів і портів обладнання, що збільшує вартість розгортання мережі.

1.5 Постановка задачі

Таким чином постає завдання дослідження процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж з урахуванням структурних особливостей сучасних архітектур та можливостей візуалізації цього процесу.

Для цього необхідним є:

- 1) дослідити сучасні підходи до проектування оптичних телекомунікаційних мереж доступу та їх архітектурні особливості;
- 2) проаналізувати існуючі методи формування топології оптичних телекомунікаційних мереж;
- 3) розглянути моделі подання структури оптичних телекомунікаційних мереж у вигляді графових та ієрархічних представлень;
- 4) дослідити підходи до моделювання процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж з урахуванням етапності його виконання.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

2.1 Формалізація задачі проєктування оптичної телекомунікаційної мережі

Процес проєктування сучасних оптичних телекомунікаційних мереж є багатогранною інженерною задачею, яка полягає у створенні оптимальної архітектури з'єднань між центральним вузлом та територіально розподіленою множиною абонентів. На сучасному етапі цифровізації цей процес трансформувався з простого креслення ліній зв'язку у складне математичне моделювання, де кожен крок потребує суворого обґрунтування та верифікації. Постановка задачі проєктування вимагає не лише технічного опису обладнання, а й формалізації алгоритмів, за якими вхідні дані (координати та технічні умови) перетворюються на готове проєктне рішення.

Центральним об'єктом моделювання у даному контексті виступає саме процес побудови мережі. Це означає, що задача проєктування розглядається як послідовність ітерацій, де на кожному етапі відбувається перевірка технічних обмежень та оптимізація ресурсів. Важливою складовою цієї задачі є візуалізація, яка стає інструментом зворотного зв'язку між математичною моделлю та інженером, дозволяючи наочно оцінити коректність закладених рішень у просторовому вимірі.

Інженерна постановка задачі проєктування починається з чіткого структурування інформаційних потоків, де на першому етапі визначаються вхідні параметри, що формують фундамент для майбутніх розрахунків. Першочерговим елементом вхідних даних є координати абонентів - це набір географічних точок, які визначають цільові вузли мережі. У сучасних умовах ці дані отримують шляхом інтеграції з геоінформаційними системами, що дозволяє враховувати не лише сухі цифри координат, а й реальну прив'язку до об'єктів забудови. Паралельно з цим визначається розташування OLT - головної станції, яка виступає кореневим елементом ієрархії. Саме відносне розташування OLT та абонентів диктує основні напрямки прокладання магістральних та розподільчих ліній.

Важливим інженерним обмеженням є лімітація довжин ліній. В оптичних мережах, особливо побудованих за технологією PON, сумарне згасання сигналу прямо залежить від відстані. Формалізація задачі вимагає встановлення граничного значення дистанції (зазвичай до 20 км), за межами якої передача даних без активного підсилення стає неможливою. Разом із цим враховується кількість ONU, що визначає загальне навантаження на дерево мережі та необхідну кількість портів на станційному обладнанні. Ключовим архітектурним параметром виступає splitter-структура - конфігурація пасивних оптичних дільників (наприклад, 1:8, 1:32 або каскадні схеми), яка визначає логіку поділу одного оптичного волокна між групою користувачів.

На основі обробки цих вхідних даних процес проектування має згенерувати чітко визначений набір вихідних результатів, що становлять ядро технічного проекту. Першим і найважливішим результатом є топологія мережі. Це геометрична модель розміщення трас, яка відображає найбільш вигідні шляхи прокладання кабелю з урахуванням наявної інфраструктури, доріг та обмежень забудови. Топологія повинна бути оптимізованою: мінімізація довжини кабелю не повинна йти в розріз із надійністю та зручністю подальшого обслуговування.

Наступним компонентом вихідних даних є структура підключень та схема з'єднань. Ці документи деталізують логічний рівень мережі: який саме абонент підключений до конкретного порту спліттера, як волокна розподіляються у зварювальних касетах та крос-панелях. Це перетворює абстрактну топологію на конкретну інструкцію для монтажних робіт. Завершальним, але критично важливим етапом виходу є графічне представлення мережі. У межах вашої кваліфікаційної роботи це не просто ілюстрація, а повноцінна цифрова візуалізація, яка інтегрує всі розраховані параметри в єдину модель. Візуалізація дозволяє провести фінальну верифікацію: інженер може миттєво побачити помилки в розрахунках, перетини ліній або порушення бюджету потужності, які складно виявити у табличних даних.

Перша формалізація задачі в такому вигляді дозволяє представити проектування як чіткий алгоритм. Перехід від хаотичного набору точок на карті до

структурованої системи, де кожен елемент має своє математичне та інженерне обґрунтування. Такий підхід створює умови для автоматизації процесів проєктування, що є особливо актуальним при розгортанні масштабних мереж у теперішніх роках, де швидкість та точність прийняття рішень безпосередньо впливають на економічну ефективність проєкту. Використання формалізованої моделі дозволяє ще на етапі створення віртуального проєкту оцінити майбутні витрати на матеріали та обсяги робіт, зводячи до мінімуму ризику на етапі фізичного будівництва мережі.

2.2 Аналіз моделей представлення структури оптичної мережі

Після формалізації вхідних та вихідних параметрів процесу проєктування виникає необхідність вибору адекватної математичної моделі, яка дозволить ефективно описати взаємозв'язки між елементами оптичної мережі. Математичний опис структури мережі є критичним етапом, оскільки він визначає складність алгоритмів оптимізації та можливості подальшої візуалізації проєктних рішень. На сьогоднішній день в теорії телекомунікацій виділяють кілька базових підходів до опису мережевих структур, кожен з яких має свої переваги залежно від поставленої інженерної задачі.

Основним та найбільш універсальним підходом є графова модель. У межах цієї моделі мережа розглядається як граф $G = (V, E)$, де вершини V представляють активне та пасивне обладнання, а ребра E - фізичні лінії зв'язку. Графова модель є надзвичайно потужною для розв'язання задач пошуку найкоротших шляхів та аналізу загальної зв'язності. Проте для оптичних мереж доступу класичний граф часто виявляється надлишковим, оскільки він передбачає можливість довільних з'єднань між будь-якими вузлами. В умовах реального проєктування використання загальної графової моделі потребує введення значної кількості додаткових обмежень, щоб уникнути створення циклів, які є неприпустимими для більшості пасивних оптичних архітектур.

Альтернативним підходом є ієрархічна модель, яка розглядає мережу як сукупність рівнів (наприклад: магістральний рівень, рівень розподілу та рівень доступу). Така модель добре відображає логіку управління трафіком та дозволяє ефективно масштабувати систему. Ієрархічний опис зручний для великих міських мереж, оскільки він дозволяє декомпонувати складну задачу проектування на кілька простіших підзадач. Проте суто ієрархічний підхід іноді втрачає просторову специфіку, оскільки зосереджується на логічних зв'язках, часто ігноруючи реальні геометричні обмеження прокладання кабельних трас на місцевості.

Для технології пасивних оптичних мереж найбільш адекватною та математично ефективною визнана деревоподібна структура. Дерево є окремим видом графа, який характеризується відсутністю циклів та наявністю єдиного шляху між коренем OLT та будь-яким листом ONU. Вибір деревоподібної моделі як базової для проектування оптичних мереж доступу зумовлений самою фізичною природою передачі сигналу через спліттери. У такій структурі чітко виділяється корінь - центральна станція, проміжні вузли - точки розгалуження (спліттери), та кінцеві точки - абоненти.

Перевага деревоподібної моделі полягає у спрощенні розрахунків оптичного бюджету та алгоритмів трасування. Коли ми розглядаємо мережу як дерево, задача проектування зводиться до побудови оптимального з'єднувального дерева, що охоплює всі задані координати абонентів. Це дозволяє використовувати ефективні алгоритми (наприклад, модифікований алгоритм Пріма або Краскала) для мінімізації довжини кабельної інфраструктури. Більше того, саме деревоподібна структура найкраще піддається візуалізації: вона дозволяє інженеру чітко бачити «гілки» мережі та точки концентрації ресурсів, що значно полегшує процес прийняття рішень при виборі місць встановлення розподільчих коробок та спліттерів.

Аналіз показує, що для реалізації завдання візуалізації процесу проектування доцільно використовувати комбінований підхід, де деревоподібна логіка поєднується з графовими методами аналізу відстаней. Дерево забезпечує сувору ієрархію та відповідність стандартам PON, тоді як графова основа дозволяє

враховувати існуючі кабельні канали та обмеження місцевості як ваги ребер. Така синергія моделей дозволяє створити цифровий двійник мережі, який є не лише математично точним, а й візуально зрозумілим для інженера-проектувальника. У підсумку, вибір моделі у вигляді спрямованого дерева дозволяє мінімізувати ймовірність помилок при формуванні структури з'єднань та забезпечує високу швидкість автоматизованого розрахунку топології, що є пріоритетом у сучасних проектних практиках.

2.3 Структурна модель оптичної телекомунікаційної мережі

Перехід від абстрактної математичної моделі до практичного проектування вимагає чіткого визначення структурних рівнів ієрархії. У межах розроблюваного методу оптична мережа доступу розглядається як трирівнева ієрархічна система, де кожен рівень виконує специфічні функції щодо агрегації, розподілу та споживання інформаційного трафіку. Така декомпозиція дозволяє не лише впорядкувати процес розрахунків, а й забезпечити високу чіткість візуалізації структури на кожному етапі проектування.

Верхній рівень моделі представлений центральним вузлом - OLT. У структурній моделі він виконує роль кореня дерева та є точкою сполучення між магістральною мережею оператора та мережею доступу. З інженерної точки зору, цей рівень відповідає за формування оптичного сигналу, управління доступом абонентів та розподіл смуги пропускання. При моделюванні процесу проектування OLT є основною точкою відліку, від якої розраховуються всі часові та енергетичні бюджети мережі.

Проміжний рівень ієрархії формується мережею пасивних оптичних дільників (спліттерів). Саме цей рівень визначає специфіку технології PON, дозволяючи розділяти потужність одного оптичного волокна між декількома напрямками. У структурній моделі спліттери виступають вузлами розгалуження, що забезпечують перехід від магістрального сегмента мережі до розподільчого. Важливою особливістю моделювання цього рівня є врахування коефіцієнтів

ділення (від 1:2 до 1:128), що безпосередньо впливає на кількість рівнів каскадування та підсумкове згасання сигналу в лініях.

Нижній рівень структури складається з кінцевих пристроїв - ONU. Ці вузли є «листами» в ієрархічному дереві та розташовуються безпосередньо на стороні споживача. У процесі проектування саме кількість та щільність розміщення вузлів третього рівня визначає необхідну потужність обладнання на першому та другому рівнях. Кожна точка ONU в моделі повинна мати унікальну прив'язку до вихідного порту спліттера, що завершує формування наскрізного логічного каналу зв'язку.

Зображена на рисунку 2.1 трирівнева ієрархічна модель мережі доступу дозволяє формалізувати взаємозв'язки між усіма елементами системи. Така структура забезпечує високу адаптивність проекту: зміна кількості абонентів на третьому рівні призводить до автоматичного перерахунку конфігурації другого рівня (спліттерів) та перевірки навантаження на першому рівні OLT. Використання цієї моделі у процесі візуалізації дозволяє інженеру контролювати цілісність мережі, наочно бачити ієрархічні зв'язки та оперативно вносити корективи у схему з'єднань, забезпечуючи оптимальну пропускну здатність для кожного кінцевого вузла.

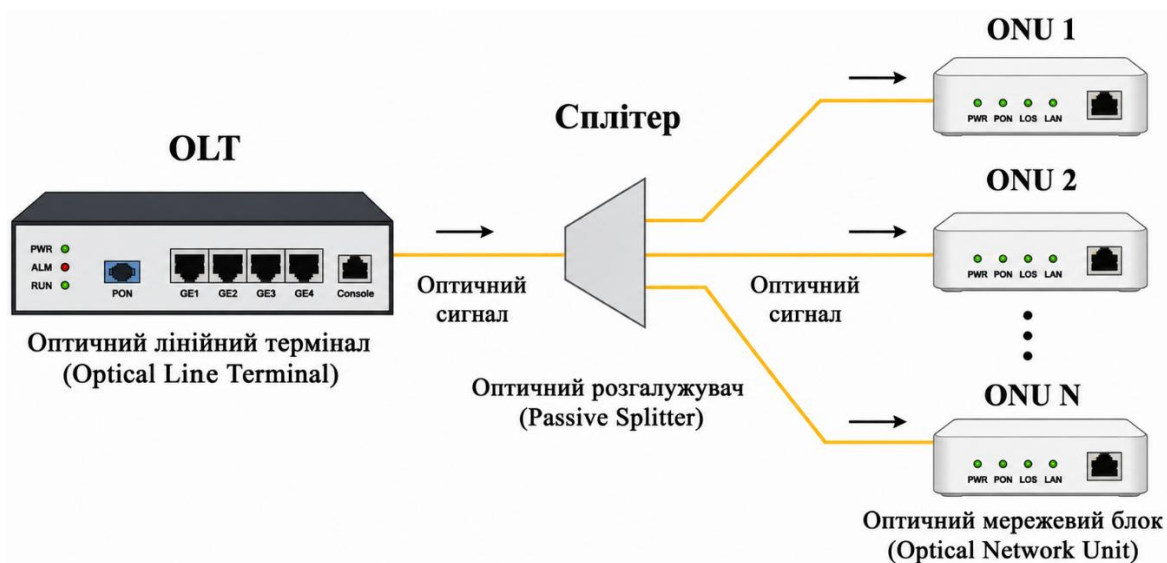


Рисунок 2.1 – Ієрархічна модель PON

2.4 Логічна модель формування топології мережі та система технічних обмежень

Формування топології оптичної мережі є процесом створення складної просторової структури, яка визначає шлях проходження сигналу від центральної станції до кожного конкретного абонента. На відміну від статичного опису структурних рівнів, на етапі синтезу топології мережа розглядається як динамічна модель, побудована на суворій системі інженерних правил та фільтрів. Основним завданням цього етапу є розробка такої конфігурації з'єднань, яка забезпечить максимальне покриття зони обслуговування при одночасній мінімізації витрат на кабельну інфраструктуру та дотриманні критичних фізичних параметрів оптичного середовища.

Логіка побудови зв'язків у моделі реалізується за висхідним принципом, де кожне з'єднання має суворо визначену функціональну роль. Магістральна ділянка (feeder) моделюється як високонадійна лінія від станційного терміналу до точок первинного розгалуження, розподільча ділянка (distribution) формує «скелет» мережі в межах району, а абонентські відгалуження (drop) забезпечують фінальну доставку сигналу. Ключовою особливістю цього етапу є те, що формування топології відбувається не лише шляхом з'єднання точок, а через постійну перевірку кожного кроку на відповідність встановленим технічним обмеженням.

Першим і найбільш вагомим обмеженням є суворий контроль сумарної геометричної довжини оптичного шляху ($L \leq L_{max}$). Враховуючи фізичні властивості передачі сигналу в одномодовому волокні, на етапі моделювання встановлюється граничне значення траси у 20 кілометрів. Це обмеження безпосередньо впливає на вибір місць розташування вузлів розгалуження: вони повинні бути інтегровані у модель не випадковим чином, а у центрах тяжіння абонентських груп. Будь-яке проектне рішення, що передбачає прокладання лінії, сумарна довжина якої від OLT до ONU перевищує цей поріг, автоматично відкидається моделлю як нежиттєздатне. Такий підхід гарантує, що бюджет

потужності мережі залишиться в межах норми навіть без проведення складних динамічних розрахунків згасання на кожній ітерації.

Другим критичним обмеженням є коефіцієнт розгалуження (split ratio) та ємнісна обмеженість вузлів. Кожен спліттер у моделі має фіксовану кількість вихідних портів, що створює логічний бар'єр для підключення нових вузлів. Формування топології вимагає балансування: при надмірній щільності абонентів модель має передбачати перехід до каскадних схем розгалуження (наприклад, 1:4 на першому рівні та 1:16 на другому), що ускладнює деревоподібну структуру, але дозволяє оптимізувати використання волокон. При цьому кожен новий рівень сплітування вносить додаткове «віртуальне» обмеження по довжині, оскільки кожне розгалуження еквівалентне втратам сигналу, що в інженерній моделі трансформується у скорочення максимально допустимої геометричної відстані.

Третім аспектом обмежень є геопросторова сумісність. Модель формування топології повинна враховувати неможливість прокладання ліній по найкоротшій відстані (прямій) через наявність природних та індустріальних перешкод. На етапі синтезу топології вводиться так званий коефіцієнт вигину траси, який коригує теоретичні розрахунки відповідно до реальної топографії місцевості. Це означає, що логічна модель постійно взаємодіє із зовнішніми обмеженнями середовища, забезпечуючи реалістичність проєкту.

Таким чином, запропонована логічна модель формування топології виступає як багаторівневий алгоритмічний фільтр. Вона перетворює розрізнені координати вузлів у впорядковану мережеву архітектуру, де кожне з'єднання перевірено на довжину, ємність та ієрархічну відповідність. Це створює стійкий каркас мережі, готовий до наступних етапів аналізу, зокрема до детальної візуалізації та оцінки надійності системи у складних експлуатаційних умовах.

2.5 Модель процесу проєктування оптичної телекомунікаційної мережі

Процес проєктування сучасної оптичної мережі доступу розглядається як багатоетапна динамічна модель, що базується на послідовному перетворенні

вихідних геопросторових даних у верифіковану технічну структуру. На відміну від статичного опису компонентів, ця модель фокусується на алгоритмічному порядку прийняття інженерних рішень, де кожен наступний крок логічно впливає з результатів попереднього та проходить крізь фільтр встановлених технічних обмежень. Моделювання процесу розгортається ітераційно, що дозволяє мінімізувати ризики помилок на ранніх стадіях та забезпечити високу точність фінальної візуалізації.

На першому етапі моделі виконується стратегічне розміщення та ініціалізація центрального вузла OLT. Цей крок є фундаментом всієї архітектури, оскільки розташування станційного терміналу визначає початкову точку відліку для всієї майбутньої топології. Вибір координат OLT базується на аналізі географічного центру зони покриття та близькості до магістральних транспортних ресурсів. Правильне визначення цієї локації на початковому етапі дозволяє збалансувати довжину магістральних фідерних ліній та закласти основу для дотримання сумарного оптичного бюджету для найбільш віддалених груп абонентів.

Другий етап присвячений визначенню оптимального просторового розташування розподільчих вузлів, тобто спліттерів. Цей процес моделюється не як випадковий розподіл точок, а як аналіз кластерів щільності абонентів. Спліттери мають бути розміщені таким чином, щоб забезпечити максимально зручне розгалуження сигналу при мінімальній довжині кабельних трас. Логіка цього етапу полягає у знаходженні точок концентрації, які дозволяють ефективно об'єднати групу абонентів та підключити їх до магістрального сегмента мережі, враховуючи при цьому реальні шляхи прокладання інфраструктури.

Третім етапом моделі є формування логічних груп абонентських терміналів ONU. На основі координат кожного окремого абонента та розташування встановлених спліттерів відбувається закріплення кінцевих вузлів за конкретними точками розгалуження. Тут вступає в дію правило ємності: група абонентів, що закріплюється за одним спліттером, не може перевищувати його технічний коефіцієнт розгалуження (наприклад, 32 або 64 підключення). Модель аналізує

просторову близькість та формує такі асоціативні зв'язки, які мінімізують витрати на абонентські відгалуження.

Четвертий етап полягає у безпосередньому формуванні ієрархічних з'єднань. На цьому кроці модель синтезує траєкторії прокладання кабельних ліній, з'єднуючи сформовані групи ONU зі спліттерами, а спліттери - з центральним терміналом OLT. Це стадія створення «скелета» мережі, де логічні зв'язки набувають фізичних параметрів. Моделювання на цьому етапі враховує ієрархічну підпорядкованість рівнів, гарантуючи, що сигнал проходить суворо визначений шлях через усі пасивні компоненти системи, формуючи деревоподібну топологію без неприпустимих циклів.

П'ятий етап моделі виконує функцію критичної перевірки обмежень довжин. Це один із найважливіших кроків верифікації, де для кожного створеного шляху в мережі розраховується його сумарна фізична протяжність. Якщо модель виявляє, що відстань від OLT до будь-якої точки ONU перевищує встановлений ліміт у 20 кілометрів, система ініціює зворотний зв'язок для корекції попередніх етапів. Така перевірка гарантує, що спроектована мережа буде технічно працездатною, а рівень згасання сигналу не перевищить поріг чутливості обладнання, що є ключовим показником надійності.

Завершальним, шостим етапом моделі є формування фінальної топології та підготовка даних до візуалізації. Тут відбувається консолідація всіх верифікованих з'єднань, параметрів вузлів та результатів розрахунків у єдину цифрову модель. Фінальна топологія є інтегрованим проєктним рішенням, де кожен елемент має чіткі координати та технічні характеристики. Ця модель слугує базою для графічного відображення результатів на цифровій карті, дозволяючи наочно оцінити структуру мережі та перейти до стадії її практичної реалізації. Таким чином, описана послідовність кроків забезпечує логічний, прозорий та захищений від помилок процес створення складних телекомунікаційних систем.

2.6 Модель процесу проєктування оптичної телекомунікаційної мережі

Візуалізація процесу проектування виступає не лише як інструмент фінальної демонстрації результатів, а як фундаментальна складова методології побудови мережі, що забезпечує когнітивну підтримку прийняття інженерних рішень. У контексті розроблюваної моделі візуалізація розглядається як багат шарове графічне відображення динаміки синтезу топології, де кожен крок алгоритму отримує своє миттєве візуальне підтвердження. Це дозволяє трансформувати абстрактні математичні операції з графами та координатами у наочний інтерактивний процес, де помилки проектування стають очевидними ще до завершення етапу розрахунків.

Об'єктами візуалізації в даній моделі є всі ключові елементи структури та динамічні стани процесу. По-перше, візуалізуються вузли мережі - станційні термінали, спліттери та абонентські пристрої, які отримують різні графічні символи та колірну індикацію залежно від їхньої ролі в ієрархії та поточного статусу підключення. По-друге, відображенню підлягають з'єднання, які на карті представляються як вектори або траси прокладання кабелю, що зв'язують вузли різних рівнів. По-третє, критично важливим є відображення самих етапів побудови мережі, що дозволяє бачити еволюцію проекту від встановлення першої точки до формування повноцінного дерева топології. Нарешті, візуалізується загальна структура мережі, яка в реальному часі демонструє заповненість портів обладнання та логічну підпорядкованість сегментів.

Основним типом візуалізації у розроблюваному методі є покрокова візуалізація. Вона реалізує принцип послідовного розгортання структури, де кожен етап проектування має свій графічний відгук. Наприклад, при виконанні етапу формування груп абонентів користувач бачить графічне об'єднання точок у кластери навколо розподільчих вузлів, що дозволяє миттєво оцінити щільність забудови та раціональність обраних місць встановлення дільників. Покроковий підхід перетворює проектування на ітераційну процедуру, де кожна дія супроводжується візуальною зміною стану моделі, дозволяючи контролювати логіку побудови в реальному часі.

Наступним аспектом моделі є графова візуалізація. Оскільки математичним підґрунтям мережі є граф, графічна модель відображає топологію у двох площинах: географічній, що забезпечує прив'язку до карти, та логічній, яка демонструє схему зв'язків. Графова візуалізація дозволяє наочно продемонструвати відсутність циклів у структурі та чітко виділити магістральні та розподільчі гілки. Кожне ребро графа в системі візуалізації несе додаткове інформаційне навантаження: колір лінії може змінюватися залежно від довжини сегмента, сигналізуючи про наближення до критичної межі у 20 кілометрів. Таким чином, графове представлення стає інструментом превентивного контролю технічних обмежень.

Динамічна візуалізація в межах моделі розуміється як логічна зміна контексту відображення залежно від обраного рівня деталізації. Це означає можливість переходу від загального вигляду зони покриття до детального вивчення конкретного вузла або сегмента. Динаміка полягає у зміні відображуваних шарів: від перегляду суто фізичного розташування кабелів до відображення логічних потоків даних та показників згасання сигналу. Це забезпечує гнучкість аналізу, дозволяючи зосередитися на критичних ділянках проекту, таких як максимально віддалені лінії або вузли з граничним навантаженням.

Важливою унікальною особливістю моделі візуалізації є інтеграція зворотного зв'язку між графічним результатом та вихідними даними. У разі порушення обмежень довжини або ємності вузлів, система візуалізації маркує проблемні ділянки критичним кольором. Це стимулює до зміни просторових координат вузлів безпосередньо у візуальному середовищі, після чого модель автоматично перераховує топологію. Такий підхід робить процес проектування живим та адаптивним, перетворюючи візуалізацію з пасивного звіту на активне середовище розробки складних рішень.

Таким чином, розроблена модель візуалізації є синтезом графічного представлення та інженерного аналізу. Вона охоплює всі рівні оптичної мережі - від окремого абонента до глобальної структури дерева - і забезпечує прозорість кожної ітерації проектування. Завдяки використанню покрокової, графової та динамічної візуалізації, процес побудови мережі стає контрольованим, наочним та

захищеним від типових помилок, що виникають при роботі з великими масивами геопросторових даних у сучасних проєктних практиках.

2.7 Адаптація топологічних рішень для мереж різного масштабу

У процесі проєктування оптичних телекомунікаційних мереж важливим аспектом є врахування масштабу мережевої інфраструктури, оскільки архітектурні рішення, ефективні на локальному рівні, не завжди можуть бути безпосередньо застосовані до магістральних сегментів. Раніше розглянуті структурні та логічні моделі формування мережі демонструють ефективність деревоподібної топології для організації мереж доступу, проте зі збільшенням територіального покриття та протяжності ліній виникає необхідність адаптації принципів побудови.

Локальні оптичні мережі доступу, побудовані за архітектурою FTTH та технологією PON, орієнтовані на підключення великої кількості абонентів у межах обмеженої географічної області. У такій структурі основна увага приділяється оптимальному розміщенню OLT, вибору точок розгалуження та мінімізації довжини абонентських сегментів. Важливою особливістю такого підходу є використання пасивних елементів розподілу сигналу, що забезпечує зниження експлуатаційних витрат та спрощує технічне обслуговування.

Однак при переході до мереж транспортного або магістрального рівня характер проєктування суттєво змінюється. Якщо у мережі доступу основною задачею є оптимізація структури підключення кінцевих абонентів, то в магістральних мережах ключовим параметром стає забезпечення стабільної передачі сигналу на великих відстанях між вузлами агрегації трафіку. У такому випадку класична деревоподібна модель трансформується у послідовну лінійну структуру, де проміжні вузли виконують функцію активного підсилення сигналу.

Адаптація топологічного рішення до магістрального масштабу вимагає переходу від аналізу геометричної структури до аналізу фізичних параметрів передачі. Якщо у локальних мережах основними обмеженнями виступають довжина абонентських ліній та коефіцієнт розгалуження спліттерів, то у

магістральних ВОЛЗ критичними стають загасання сигналу у волокні, накопичення хроматичної дисперсії та зниження відношення сигнал/шум внаслідок використання каскадних підсилювачів EDFA.

Таким чином, адаптація топологічних рішень дозволяє забезпечити узгодженість між різними рівнями телекомунікаційної мережі. На рівні доступу пріоритетом залишається ефективний розподіл сигналу між абонентами, тоді як на магістральному рівні основна увага зміщується на підтримку якості передачі на значних відстанях. Такий підхід формує єдину концепцію проектування, у якій локальні деревоподібні сегменти інтегруються у масштабну транспортну інфраструктуру. Це створює логічну основу для подальшого дослідження фізичних параметрів магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку та оптимізації розташування підсилювальних вузлів, що буде розглянуто у наступному розділі.

2.8 Математичне обґрунтування масштабованості моделі

Формалізація процесу проектування оптичної телекомунікаційної мережі на основі графових моделей дозволяє застосовувати єдиний математичний апарат як для локальних мереж доступу, так і для магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку. Однією з ключових переваг графового представлення є його масштабованість, тобто здатність адаптуватися до зміни розміру мережі без зміни базових принципів структурного опису. Це особливо важливо при переході від локальних сегментів довжиною до 20 км до магістральних трас протяжністю понад тисячі кілометрів.

У загальному вигляді оптична мережа описується графом за формулою 2.1:

$$G = (V, E), \quad (2.1)$$

де множина вершин V відповідає вузлам мережі, а множина ребер E - фізичним або логічним з'єднанням між ними. Для локальних мереж доступу кількість вузлів є обмеженою, а структура графа має виражену деревоподібну

форму з одним кореневим вузлом та кінцевими абонентськими точками. При цьому кожне ребро характеризується переважно геометричною довжиною, яка використовується як основний параметр оптимізації.

Однак зі збільшенням масштабу мережі класичне трактування ваги ребра лише як фізичної відстані стає недостатнім. Для магістральних волоконно-оптичних систем вага ребра повинна враховувати не лише довжину сегмента, а й фізичні характеристики передачі сигналу. У такому випадку вага ребра визначається як функція втрат сигналу та відображена у рівнянні 2.2:

$$w(e_i) = \alpha * l_i, \quad (2.2)$$

де α - коефіцієнт затухання оптичного волокна (дБ/км), а l_i - довжина відповідного сегмента.

Такий підхід дозволяє перейти від геометричної оптимізації до фізично обґрунтованої оптимізації мережі. Якщо для локального сегмента сумарна вага маршруту визначається як проста сума довжин, то для магістральної мережі сумарна вага маршруту формується як накопичення енергетичних втрат уздовж усіх послідовних ділянок за формулою 2.3:

$$W(P) = \sum_{i=1}^n w(e_i), \quad (2.3)$$

де P - маршрут проходження сигналу від джерела до кінцевого вузла.

Особливістю масштабування моделі є зміна ієрархії вузлів. У межах локальної мережі використовується трирівнева структура: перший рівень - вузол OLT, який є центральною точкою формування сигналу; другий рівень - пасивні вузли розгалуження (splitters), що реалізують поділ оптичного ресурсу; третій рівень - абонентські термінали ONU, які є кінцевими вузлами споживання. Така структура забезпечує ефективне функціонування мереж доступу в умовах обмеженої території.

Для магістрального масштабу доцільним є введення додаткового нульового рівня ієрархії - магістральних шлюзів (gateway nodes). Ці вузли виконують роль транспортних центрів, які забезпечують з'єднання окремих локальних сегментів у єдину міжміську систему передачі даних. У такій структурі OLT перестає бути глобальним коренем мережі та переходить до ролі локального кореневого вузла в межах окремого сегмента, тоді як магістральний шлюз стає вищим рівнем агрегації.

Таким чином, структура мережі трансформується з локального дерева у багаторівневий ієрархічний граф, де окремі дерева доступу інтегруються через магістральні лінійні або кільцеві сегменти. Це забезпечує можливість опису складних телекомунікаційних систем у межах єдиного математичного підходу та створює основу для подальшого аналізу фізичних параметрів магістральних ліній, таких як накопичення загасання, необхідність використання підсилювачів EDFA та деградація відношення сигнал/шум (OSNR). Саме цей підхід формує математичну основу для побудови розрахункового методу оптимізації магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку.

2.9 Моделювання впливу зовнішніх деградаційних факторів на параметри оптичної мережі

Під час проектування оптичних телекомунікаційних мереж важливим етапом є врахування зовнішніх деградаційних факторів, які впливають на якість передачі сигналу та загальний енергетичний бюджет системи. Навіть при правильно побудованій топології та оптимальній геометрії з'єднань реальні умови експлуатації можуть призводити до додаткових втрат, що не враховуються у базових геометричних моделях. Саме тому в процесі моделювання вводиться поняття системного запасу потужності.

Системний запас потужності (M) є додатковим резервом енергетичного бюджету, який компенсує непередбачувані втрати, що виникають у процесі тривалої експлуатації мережі. У практиці проектування оптичних систем типовим значенням такого запасу є $M = 3$ дБ.

Це значення вважається достатнім для компенсації основних деградаційних факторів без необхідності перебудови мережі.

До складу системного запасу входить вплив температурних коливань, які змінюють фізичні властивості волокна та можуть незначно змінювати коефіцієнт затухання. Крім цього, важливим фактором є мікровигини та макровигини оптичного волокна, які виникають під час монтажу або експлуатації кабелю. Навіть незначні механічні деформації можуть викликати локальні втрати потужності та зменшення якості сигналу.

Окремим деградаційним фактором є старіння передавального обладнання, зокрема лазерних випромінювачів. З часом зменшується вихідна оптична потужність передавача, що призводить до зниження загального запасу потужності в системі. Також необхідно враховувати додаткові втрати у зварних з'єднаннях, конекторах та пасивних компонентах, які накопичуються зі збільшенням кількості проміжних елементів.

Фізично основними механізмами втрат сигналу в оптичному волокну є поглинання та розсіювання. Поглинання виникає через домішки в матеріалі волокна та внутрішню молекулярну структуру скла. Найбільш ефективною для передачі є область спектра 1550 нм, де втрати мінімальні, що пояснює широке використання С-діапазону в магістральних системах.

Іншим важливим механізмом є релеївське розсіювання, яке виникає внаслідок мікроскопічних неоднорідностей структури скла. Саме цей механізм формує основну частину загасання сигналу в сучасних одномодових волокнах та є фундаментальним фізичним обмеженням для дальності передачі.

У контексті візуалізації процесу проектування доцільним є використання графічного відображення рівня втрат у різних сегментах мережі. Одним із підходів є формування так званої «теплової карти» загасання, де кожна ділянка траси маркується відповідно до рівня накопичених втрат. Сегменти з низькими втратами можуть позначатися як стабільні, а ділянки, що наближаються до критичного енергетичного порогу, виділяються як потенційно проблемні.

2.10 Формалізація переходу від пасивної до активної моделі проєктування

Проєктування оптичних мереж доступу на основі архітектури PON базується на використанні пасивних компонентів, що забезпечує просту структуру мережі та низькі експлуатаційні витрати. Однак така модель має фізичне обмеження, яке визначається енергетичним бюджетом лінії та максимально допустимою довжиною передачі сигналу без підсилення.

Граничною умовою працездатності пасивної мережі є обмеження сумарних втрат у каналі, які для більшості PON-систем не повинні перевищувати 28–30 дБ. Загальні втрати визначаються як сума втрат у волокні, спліттерах, зварних з'єднаннях, конекторах та системному запасі, це відображено у формулі 2.4:

$$P_{loss} = P_{fiber} + P_{splitter} + P_{splice} + P_{connector} + M. \quad (2.4)$$

На практиці це формує максимальну довжину пасивного сегмента $L \leq L_{max}$, де L_{max} для стандартних мереж доступу зазвичай становить до 20 км.

При перевищенні граничної довжини або допустимого рівня втрат пасивна модель втрачає ефективність. У такому випадку доцільним є перехід до активної моделі, в якій у структуру мережі інтегруються проміжні підсилювальні вузли.

Умовою переходу до активної моделі є рівняння 2.5:

$$L > L_{max} \vee P_{loss} > P_{max}. \quad (2.5)$$

При виконанні цієї умови алгоритм автоматично ініціює вставку активного вузла підсилення EDFA, який компенсує накопичене загасання та формує новий розрахунковий сегмент передачі.

Таким чином, відбувається перехід від локальної пасивної структури доступу до гібридної моделі, у якій PON-сегменти інтегруються з магістральною транспортною мережею. Такий підхід забезпечує масштабованість мережі та

формує основу для подальшої оптимізації параметрів магістральної передачі, зокрема вибору кількості підсилювачів, довжини сегментів та аналізу OSNR.

2.11 Узагальнення моделі процесу проєктування

Завершальним етапом теоретичного обґрунтування є узагальнення розробленої моделі та оцінка її відповідності сучасним вимогам побудови телекомунікаційної інфраструктури. Сформована у даному розділі модель процесу проєктування не є простою сукупністю послідовних кроків, а являє собою цілісну методологічну базу, яка інтегрує архітектурні особливості сучасних оптичних мереж із передовими методами автоматизованого моделювання та графічного аналізу.

По-перше, побудована модель повністю відповідає концепції архітектури FTTH. Завдяки чіткому розділенню на ієрархічні рівні та фокусу на кінцевих абонентських терміналах, вона забезпечує логіку доведення оптичного волокна безпосередньо до житлового приміщення споживача. Модель враховує специфіку розгортання мереж у щільній міській та розрідженій приміській забудові, що робить її універсальним інструментом для операторів зв'язку, які прагнуть забезпечити максимальну пропускну здатність для кожного клієнта.

По-друге, структура та принципи функціонування моделі суворо відповідають стандартам технології PON. Використання деревоподібної топології та впровадження пасивних дільників як ключових вузлів розгалуження дозволяють ефективно моделювати поділ оптичного ресурсу без використання активного обладнання на проміжних ділянках. Це не тільки спрощує експлуатацію майбутньої мережі, а й дозволяє моделі точно розраховувати енергетичні обмеження та ємнісні характеристики системи на етапі її віртуального формування.

По-третє, розроблена модель є повністю придатною для формування оптимальної топології мережі у складних геопросторових умовах. Завдяки впровадженню системи технічних обмежень, зокрема ліміту довжини траси у 20 кілометрів та ієрархічної підпорядкованості вузлів, модель дозволяє синтезувати

мережеві структури, що є технічно реалізованими та економічно вигідними. Вона мінімізує вплив людського фактора, автоматично відкидаючи варіанти з'єднань, що не задовольняють вимогам надійності та якості сигналу.

Нарешті, ключовою перевагою узагальненої моделі є те, що вона дозволяє виконувати повноцінну візуалізацію процесу проектування на кожному його етапі. Інтеграція алгоритмічних кроків із графічним представленням перетворює проектування з «чорної скриньки» на прозорий інтерактивний процес. Це забезпечує можливість наочного контролю за формуванням топології, дозволяючи інженеру в реальному часі спостерігати за розвитком мережевої структури та оперативно корегувати проєктні рішення.

Таким чином, розроблена модель процесу проектування створює надійний теоретичний та практичний фундамент для переходу до наступного етапу роботи. Сформовані принципи ієрархічної побудови, врахування архітектурних особливостей PON та FTTH, а також орієнтація на покрокову візуалізацію дозволяють перейти до безпосередньої розробки алгоритмів, обрахунків системи, що буде детально розглянуто у наступному розділі.

2.12 Висновки

У цьому розділі виконано формалізацію процесу проектування оптичних телекомунікаційних мереж та визначено основні вхідні й вихідні параметри системи. Встановлено, що задача проектування мережі може бути представлена як послідовний алгоритмічний процес побудови топології з урахуванням технічних обмежень, просторових координат вузлів та параметрів передачі сигналу.

Проведено аналіз існуючих моделей представлення структури оптичної мережі та обґрунтовано доцільність використання деревоподібної графової моделі як базової для побудови мереж доступу на основі технології PON. Запропоновано тривірневу структурну модель, яка включає центральний вузол OLT, проміжні вузли розгалуження та кінцеві абонентські вузли ONU.

Сформовано логічну модель побудови топології мережі, визначено систему технічних обмежень, що включає контроль максимально допустимої довжини сегментів, коефіцієнтів розгалуження та геопросторових обмежень прокладання кабельної інфраструктури.

Виконано адаптацію моделі для мереж різного масштабу та обґрунтовано перехід від пасивної архітектури мереж доступу до активної моделі магістральної передачі із застосуванням оптичних підсилювачів EDFA. Побудовано математичний апарат оцінки втрат сигналу, масштабованості мережевої структури та умов переходу до активного підсилення.

Отримані результати формують теоретичну основу для подальшої реалізації алгоритмів розрахунку параметрів магістральної оптичної мережі, визначення оптимальної кількості підсилювачів, оцінки OSNR та пропускної здатності каналу, що буде розглянуто у наступному розділі.

3 МЕТОД ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛУ

3.1 Основи методу проєктування магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку

У якості об'єкта дослідження обрано магістральну волоконно-оптичну лінію зв'язку між двома містами, Київ - Львів, яка є важливою частиною транспортної телекомунікаційної мережі України та використовується для передачі значних обсягів даних, у тому числі міжнародного трафіку.

У даній роботі здійснюється поетапний аналіз та оптимізація структури ВОЛЗ на основі фізичних та системних параметрів каналу. Модель враховує загасання сигналу у волокні, вплив дисперсії, а також деградацію відношення сигнал/шум OSNR, що виникає при каскадному використанні оптичних підсилювачів EDFA.

Метою оптимізації є забезпечення максимальної пропускної здатності системи при заданій довжині траси 540 км шляхом раціонального вибору довжини підсилювальних сегментів та кількості підсилювачів.

Орієнтовна довжина траси $L = 540$

Для розрахунку приймаються такі параметри:

- 1) Тип волокна: одномодове (G.652);
- 2) Коефіцієнт затухання: $\alpha = 0.2$ дБ/км;
- 3) Швидкість передачі: $B = 100$ Гбіт/с;
- 4) Потужність передавача: $P_{tx} = 0$ дБм.

Визначення загального рівня ослаблення сигналу вздовж траси за допомогою формули 3.1:

$$A = \alpha * L = 0.2 * 540 = 108, \quad (3.1)$$

де α - коефіцієнт загасання волокна (дБ/км);

L – довжина лінії (км).

Оскільки втрати зростають пропорційно довжині, магістральна лінія розбивається на підсилювальні сегменти. У кожному сегменті втрати компенсуються оптичними підсилювачами EDFA.

Максимальна довжина сегмента визначається з умови балансу потужності формулою 3.2:

$$L_{seg} = A_{seg(max)}/\alpha, \quad (3.2)$$

де $A_{seg(max)}$ – допустимий оптичний бюджет сегмента, що враховує можливості EDFA та системний запас.

Максимальна довжина підсилювального сегмента визначається з умови допустимого оптичного бюджету системи.

Базова схема передачі відображена у формулі 3.3:

$$A_{seg(max)} = P_{tx} - P_{rx} - M, \quad (3.3)$$

де $A_{seg(max)}$ - максимальний допустимий оптичний бюджет сегмента (дБ) - максимальні втрати, які система може витримати;

P_{tx} – вихідна потужність передавача (дБм) - потужність, з якою сигнал вводить у волокно;

P_{rx} - чутливість приймача (дБм) - мінімальний рівень сигналу, при якому приймач ще коректно працює;

а M - системний запас (дБ) - запас на старіння компонентів, додаткові втрати, нерівності, конектори, ремонтні зміни тощо.

Для магістральних оптичних систем приймають типові інженерні параметри:

- 1) $P_{tx} = 0$ дБм (золотий стандарт для розрахунків);
- 2) $P_{rx} = -22$ дБм (типова чутливість когерентного приймача);
- 3) $M = 3$ дБ (стандартний інженерний запас для магістралей).

Таким чином зважаючи на типові інженерні параметри, максимальний допустимий оптичний бюджет сегмента буде рівним 19 дБ.

Вибір підсилювачів на оптичному волокні, легованому ербієм (EDFA), обумовлений їхньою здатністю функціонувати в С-діпазоні (1530–1565 нм). Це забезпечує повну сумісність обладнання з магістральними системами DWDM, що є критично важливим для даної волоконно-оптичної лінії.

Висока ефективність пристроїв підтверджується типовим коефіцієнтом підсилення $G \approx 20\text{--}25$ дБ. Такий показник дозволяє компенсувати значне згасання сигналу в протяжних сегментах магістралі, зберігаючи енергетичний потенціал лінії без встановлення додаткових вузлів.

Якість передачі даних підтримується завдяки низькому фактору шуму ($NF \approx 4\text{--}6$ дБ). Це мінімізує деградацію відношення сигнал/шум (OSNR), що дозволяє використовувати каскадне підключення підсилювачів для побудови ліній довжиною в сотні кілометрів.

Суттєвою перевагою є робота EDFA безпосередньо в оптичному домені без електронного перетворення. Відсутність циклів дедуплікації та регенерації сигналу в електричну форму радикально знижує затримки (latency) та підвищує загальну пропускну здатність мережі.

У даній роботі EDFA використовуються для:

- 1) компенсації оптичних втрат у волокні;
- 2) підтримання необхідного рівня потужності сигналу;
- 3) забезпечення заданого рівня OSNR;
- 4) розбиття магістралі на підсилювальні сегменти.

Оскільки загальні втрати сигналу зростають пропорційно довжині лінії:

$$A = \alpha * L$$

Використання EDFA дозволяє розбити трасу на окремі сегменти, в межах яких втрати компенсуються одним підсилювачем або каскадом підсилювачів.

Таким чином, використання EDFA у магістральній ВОЛЗ Київ – Львів є обґрунтованим, оскільки вони забезпечують ефективну компенсацію втрат, підтримання OSNR та можливість передачі сигналу на великі відстані без електричної регенерації.

Максимальна довжина сегмента: $L_{seg} = 19/0.2 = 95$ км

Кількість сегментів обраховується за допомогою формули 3.4:

$$N = L/L_{seg}. \quad (3.4)$$

Таким чином, зважаючи на обрану відстань та максимальну довжину сегмента, кількість самих сегментів буде: $N = 540/95 = 5.68 \approx 6$.

Математичне визначення кількості підсилювальних вузлів базується на принципі декомпозиції загальної протяжності магістралі на рівновіддалені сегменти, довжина яких обмежена енергетичним потенціалом обладнання. Оскільки підсилювачі встановлюються виключно в точках з'єднання цих сегментів для компенсації накопиченого згасання, їхня кількість (N_{amp}) завжди на одиницю менша за загальну кількість лінійних ділянок (N). Такий підхід зумовлений тим, що початкова та кінцева точки лінії представлені станційним обладнанням (терміналами), а проміжні вузли підсилення розміщуються лише в інтервалах між ними для відновлення рівня оптичної потужності сигналу.

Таким чином кількість необхідних підсилювачів розраховується за допомогою формули 3.5:

$$N_{amp} = N - 1. \quad (3.5)$$

Зважаючи на попередні значення кількість підсилювачів буде $N_{amp} = 6-1=5$.

Базова схема має кілька критичних вад, які суттєво знижують надійність лінії. Основна проблема полягає у нерівномірному розподілі втрат: згасання накопичується на різних ділянках неоднаково, що створює зони з критично низьким рівнем сигналу. Це призводить до мінімального запасу по потужності, через що будь-яке пошкодження волокна або старіння компонентів може миттєво перервати зв'язок. Вигляд відображено на рисунку 3.1.

При збільшенні швидкості передачі даних ситуація погіршується, оскільки схема не справляється з деградацією сигналу. Імпульси починають розмиватися і спотворюватися, що робить передачу нестабільною. Головним недоліком є

ігнорування показника OSNR. Без урахування шумів, що накопичуються від підсилювачів, неможливо гарантувати якість сигналу, навіть якщо його потужність здається достатньою. Це робить таку архітектуру непридатною для довгих магістралей.

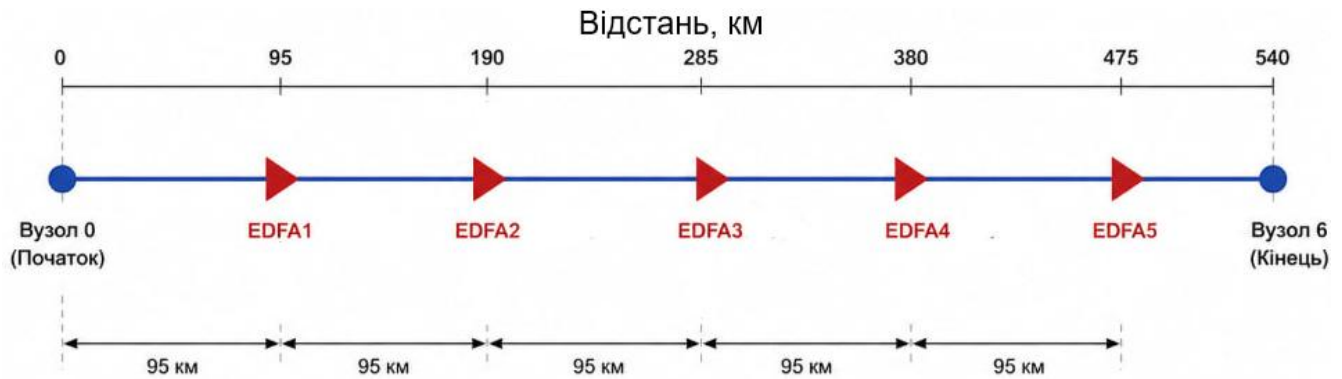


Рисунок 3.1 - Оптична лінія зв'язку, сегмент 95 км, 5 підсилювачів

3.2 Метод оцінки якості передачі сигналу на основі аналізу OSNR

З метою оцінки якості передачі сигналу в магістральній ВОЛЗ проведено аналіз зміни оптичного відношення сигнал/шум вздовж траси.

У DWDM системах ключовим параметром, що визначає якість передачі, є OSNR. Тому доцільно провести його детальний кількісний аналіз.

Для оцінки впливу підсилювачів на якість передачі сигналу виконано розрахунок OSNR з урахуванням ASE-шуму, що генерується підсилювачами EDFA. Для цього використовуються формула 3.6:

$$OSNR = \frac{P_{out}}{N_{amp} * P_{ASE}}, \quad (3.6)$$

де P_{out} – потужність сигналу на виході;

N_{amp} – кількість підсилювачів.

Сам ASE-шум обраховується за формулою 3.7:

$$P_{ASE} = n_{sp} * h * \nu * (G - 1) * B0, \quad (3.7)$$

де n_{sp} – коефіцієнт спонтанного випромінювання:

h – стала Планка;

ν - частота світла;

G – коефіцієнт підсилення EDFA;

$B0$ – оптична смуга (наприклад 0.1 нм).

Для проведення розрахунку оберемо робочу довжину хвилі $\lambda = 1550$ нм, що відповідає центральній частоті оптичного носія $\nu \approx 193 \cdot 10^{12}$ Гц. Оптична смуга пропускання для аналізу відношення сигнал/шум приймається рівною $B0 = 0,1$ нм, що у частотному еквіваленті становить приблизно $12,5 \cdot 10^9$ Гц. При коефіцієнті шуму підсилювача $NF = 5$ дБ (лінійне значення $\approx 3,16$), параметр спонтанного випромінювання n_{sp} складає близько 1,58.

Враховуючи довжину одного сегмента магістралі у 95 км та питоме згасання волокна 0,2 дБ/км, загальні втрати на ділянці становлять $A_{seg} = 19$ дБ. Для повної компенсації цих втрат коефіцієнт підсилення EDFA встановлюється на рівні $G \approx 19-20$ дБ, що у лінійному вимірі відповідає підсиленню потужності в 100 разів ($G - 1 \approx 99$).

Підставивши визначені константи та параметри у формулу (3.7), отримується потужність ASE-шуму на виході одного підсилювального вузла: $P_{ASE} = 1.58 * 6.63 * 10^{-34} * 193 * 10^{12} * 99 * 12.5 * 10^9 \approx 2.5 * 10^{-6}$ Вт.

Для зручності подальшого аналізу необхідно перевести отримане значення у логарифмічну форму: $P_{ASE} = 10 * \log_{10} \left(2.5 * \frac{10^{-6}}{10^{-3}} \right) \approx -26$ дБм.

Прийнявши рівень вихідного корисного сигналу $P_{signal} = 0$ дБм, потрібно визначити локальне відношення сигнал/шум на виході одиничного підсилювача як різницю рівнів потужностей: $OSNR = 0 - (-26) = 26$ дБ

Отримане значення у 26 дБ характеризує якість сигналу безпосередньо після першого каскаду підсилення. Даний показник є базовим для подальшої оцінки накопичувального ефекту шумів у всій багатосегментній лінії зв'язку.

Для багатосегментної лінії враховується накопичення ASE-шуму від усіх підсилювачів у тракці, тому сумарний рівень шуму зростає, а відповідно OSNR зменшується. Математично цей процес описується логарифмічним додаванням потужності шуму кожного каскаду до загального шумового фону лінії.

Враховуючи, що в системі задіяно $N_{amp} = 5$ підсилювальних вузлів, сумарна потужність шуму на кінці магістралі розраховується як: $P_{noise_total} = -26 + 10 * \log_{10}(5) \approx -19$ дБ.

Таким чином, при вихідній потужності корисного сигналу $P_{signal} = 0$ дБм, підсумкове відношення сигнал/шум для всієї багатосегментної лінії становить: $OSNR = 0 - (-19) = 19$ дБ.

Отримане значення у 19 дБ є критичним параметром для оцінки якості зв'язку. Оскільки для більшості сучасних систем передачі даних із прямим детектуванням поріг працездатності становить близько 16–17 дБ, отриманий результат підтверджує наявність технічного запасу у 2–3 дБ. Це гарантує стабільну роботу мережі та низький рівень бітових помилок (BER) навіть з урахуванням поступової деградації параметрів оптичного волокна.

Таким чином, базовий розрахунок на основі енергетичного бюджету показав, що для траси Київ – Львів довжиною 540 км необхідно 6 оптичних підсилювальних сегментів середньою довжиною 90–95 км. Це забезпечує теоретичний рівень OSNR близько 19 дБ, що є прийнятним для роботи когерентних систем передачі 100G за умови використання відповідних форматів модуляції та кодування.

Отримане значення OSNR є інтегральною оцінкою відношення сигнал/шум і враховує накопичення ASE-шуму від усіх оптичних підсилювачів у тракці. У межах даної моделі воно використовується як базовий параметр для подальших розрахунків SNR, Q-фактора та BER.

Водночас у реальних магістральних волоконно-оптичних системах додатково виникають нелінійні ефекти у волокні (SPM, XPM, FWM), поляризаційна модова дисперсія, а також технологічні нестабільності компонентів тракту, що призводить до додаткового зниження ефективного OSNR у порівнянні

з теоретично розрахованим значенням. Частково ці впливи враховані у вигляді інженерного запасу ($M = 3$ дБ).

У даному розрахунку хроматична дисперсія не визначається окремо, оскільки її вплив враховано узагальненим коефіцієнтом деградації M , який описує сумарний вплив дисперсії, нелінійних ефектів та міжсимвольної інтерференції на якість сигналу.

На малих довжинах лінії (до ~ 200 км) спостерігається відносно високий рівень OSNR (понад 22–26 дБ), що забезпечує значний запас за якістю сигналу. У міру збільшення довжини до 540 км OSNR зменшується до приблизно 19 дБ, що відповідає розрахованому системному значенню для даної магістралі.

Отриманий рівень OSNR на кінцевій довжині тракту є граничним, але достатнім для роботи когерентної системи передачі 100G при використанні відповідних форматів модуляції та застосуванні FEC-корекції помилок. Таким чином, графік підтверджує, що збільшення довжини лінії призводить до поступового погіршення якості сигналу, однак система залишається працездатною в межах розглянутого діапазону.

Отримана залежність OSNR від довжини оптичної лінії, зображена на рисунку 3.2, має логарифмічний характер, що зумовлено накопиченням ASE-шуму в кожному підсилювальному сегменті. При збільшенні довжини тракту кількість оптичних підсилювачів зростає, відповідно сумарний рівень шуму збільшується, що призводить до зниження OSNR.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що запропонована модель дозволяє оцінити граничні параметри працездатності магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку та визначити допустимі межі масштабування системи. Отримані результати демонструють, що навіть при значній протяжності тракту система зберігає достатній запас за показником OSNR, що забезпечує стабільну передачу даних у високошвидкісних когерентних оптичних мережах. Це підтверджує доцільність використання підсилювачів EDFA для побудови довгих магістральних сегментів та створює основу для подальшої оцінки пропускну здатності, BER і загальної ефективності оптичної транспортної системи.

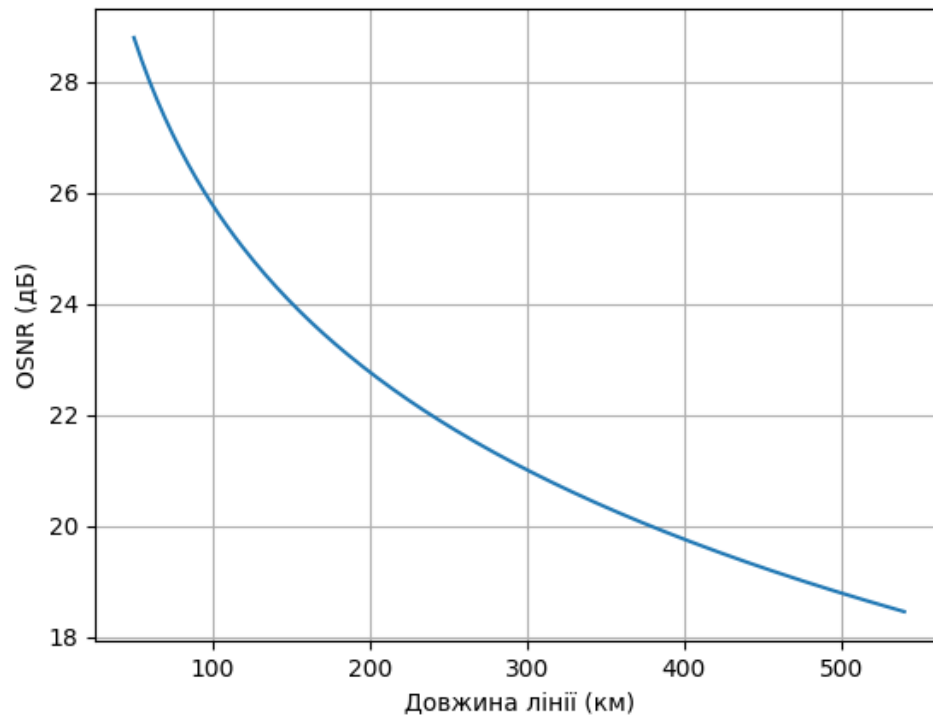


Рисунок 3.2 - Залежність OSNR від довжини лінії

3.3 Метод визначення пропускної здатності та ймовірності бітової помилки

На завершальному етапі аналізу якості передачі необхідно визначити максимальний інформаційний потенціал спроектованої лінії. Для цього використовується фундаментальна теорема Шеннона-Гартлі, яка встановлює межу пропускної здатності каналу за наявності шумів. У системах, де домінуючим фактором деградації сигналу є ASE-шум оптичних підсилювачів, розраховане значення OSNR слугує базою для визначення електричного співвідношення сигнал/шум.

Першим кроком є перехід від логарифмічних одиниць OSNR до лінійного значення SNR, що відповідає моделі ASE-обмеженого каналу, для цього використовується формула 3.8:

$$SNR = 10^{\frac{OSNR}{10}}. \quad (3.8)$$

Зважаючи на значення OSNR яке було отримане раніше, з'являється можливість розрахунку значення SNR, підставивши значення у формулу 3.8:

$$SNR = 10^{\frac{19}{10}} \approx 79.4.$$

Отримане значення показує, що потужність корисного сигналу в 79,4 раза перевищує потужність накопиченого шуму на виході магістралі. Це співвідношення є ключовим параметром для розрахунку теоретичної межі пропускної здатності (C) за формулою 3.9:

$$C = B * \log_2(1 + SNR). \quad (3.9)$$

де C - пропускна здатність каналу (біт/с), що визначає максимальну кількість інформації, яку можна передати без помилок;

B - смуга пропускання каналу. Для сучасних DWDM-систем із кроком сітки 100 ГГц приймемо ефективну смугу на рівні $B = 100 \cdot 10^9$ Гц;

SNR - розраховане лінійне співвідношення сигнал/шум.

Підставивши значення у формулу 3.9, отримується теоретичний ліміт швидкості для одного оптичного каналу: $C = 100 * 10^9 * \log_2(1 + 79.4) \approx 100 * 6.33 \approx 633$ Гбіт/с.

Таким чином, розрахована теоретична межа Шеннона для заданої лінії становить приблизно 633 Гбіт/с. Цей результат демонструє, що обрана конфігурація магістралі з п'ятьма підсилювальними сегментами володіє значним технологічним запасом. Навіть при використанні стандартних типів модуляції, реальна швидкість передачі у 100 Гбіт/с або 400 Гбіт/с буде знаходитися в межах допустимого діапазону, що підтверджує високу ефективність та перспективність спроектованої мережі.

Після визначення пропускної здатності за Шенноном необхідно оцінити реальну якість детектування цифрових сигналів на приймальній стороні. Основним критерієм такої оцінки є ймовірність бітової помилки, яка визначає відношення кількості помилково прийнятих бітів до загальної кількості переданих даних.

Для переходу від розрахованого енергетичного параметру SNR до ймовірнісного показника BER використовується проміжний параметр - Q-фактор. Він характеризує електричне відношення сигнал/шум у термінах амплітудних значень і безпосередньо корелює із запасом надійності системи. Розрахунок Q-фактора виконується з урахуванням ефективності модуляції (η) за допомогою рівняння 3.10:

$$Q = \eta * \sqrt{SNR}, \quad (3.10)$$

де η - коефіцієнт, що залежить від формату модуляції (для багаторівневих систем, наприклад, M-QAM, приймається як $1/M$). Враховуючи отримане раніше значення SNR=79,4, Q-фактор буде: $Q = \frac{1}{3} * \sqrt{79,4} \approx 2,97$.

Параметр $Q \approx 2,97$ вказує на те, що корисний сигнал достатньо відділений від рівня шумів для коректної ідентифікації логічних рівнів «0» та «1». На основі отриманого Q-фактора розраховується ймовірність бітової помилки за наближеною формулою 3.11 для гауссового розподілу шумів:

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * Q} * e^{-\frac{Q^2}{2}}. \quad (3.11)$$

Підставивши значення $Q = 2,97$, отримуємо результат $BER \approx 10^{-3}$. Такий показник означає, що в середньому одна помилка виникає на кожну тисячу переданих бітів. В сучасних оптичних системах значення 10^{-3} вважається граничним (Pre-FEC BER) - це стан сигналу до застосування алгоритмів прямої корекції помилок.

Для наочного представлення цієї залежності використовується рисунок 3.3. Графік побудовано у напівлогарифмічному масштабі, де по горизонтальній осі відкладено відношення сигнал/шум у децибелах, а по вертикальній - значення BER у степенях десяти. Така візуалізація дозволяє чітко простежити «пороговий ефект»:

навіть незначне покращення SNR призводить до стрімкого (експоненціального) зниження кількості помилок.

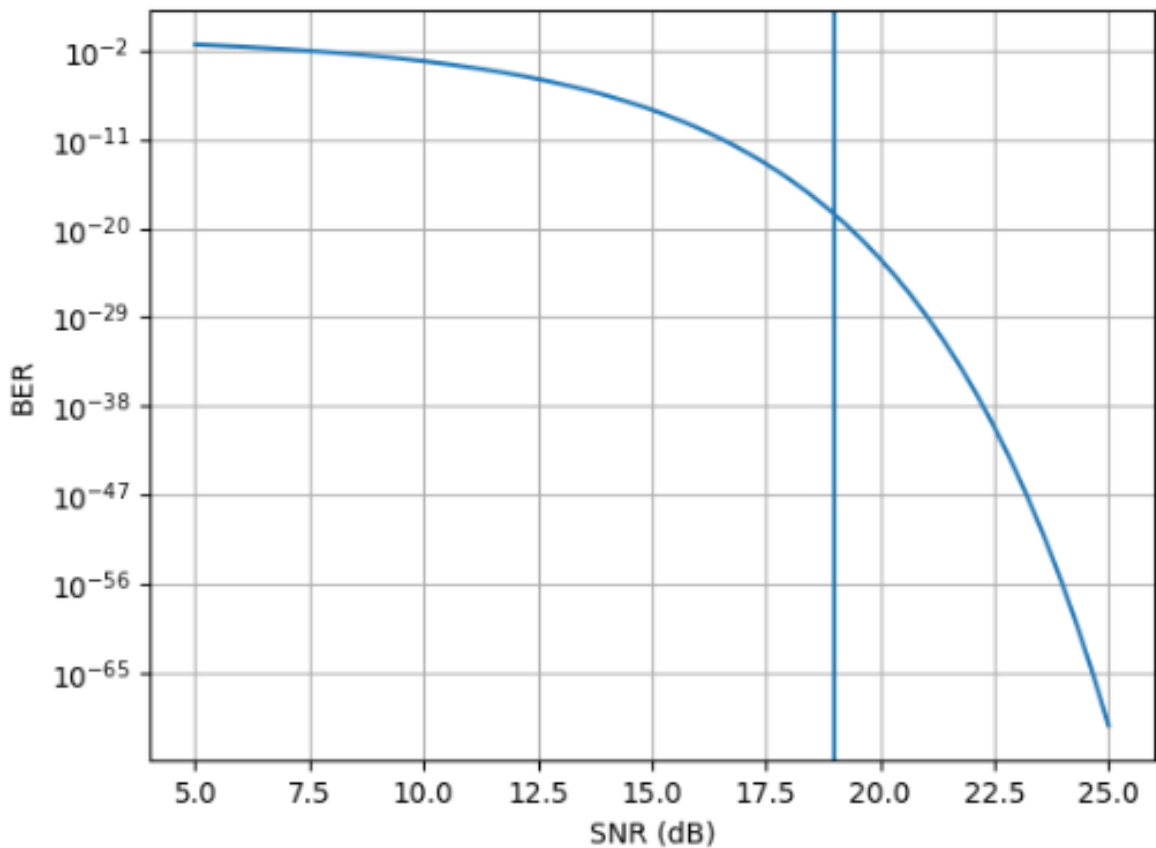


Рисунок 3.3 - Залежність ймовірності бітової помилки (BER) від відношення сигнал/шум (SNR)

Аналіз графіка та отриманих розрахунків дозволяє зробити висновок про необхідність використання блоків корекції помилок FEC. Отриманий рівень 10^{-3} входить у робочу зону сучасних декодерів, які здатні покращити якість зв'язку до рівня 10^{-12} – 10^{-15} , що є стандартом для безпомилкової передачі даних у промислових мережах. Таким чином, розраховані параметри підтверджують технічну доцільність обраної схеми підсилення та конфігурації магістралі.

3.4 Теоретичні засади багатокритеріальної оптимізації структури магістральних мереж

Процес проектування сучасних високихшвидкісних ліній зв'язку неминуче стикається з конфліктом між технічними показниками якості передачі та економічними обмеженнями реалізації проекту. У класичному розумінні розробка топології магістралі часто зводиться до виконання базових енергетичних розрахунків, де ключовим завданням є забезпечення перевищення рівня сигналу над порогом чутливості приймача. Проте для сучасних систем з використанням ербієвих підсилювачів та складних форматів модуляції такий спрощений підхід виявляється недостатнім, оскільки він не враховує динаміку накопичення оптичного шуму та деградацію відношення сигнал/шум уздовж усієї траси.

Формування цільової функції оптимізації в межах даного дослідження базується на необхідності одночасного вирішення кількох суперечливих завдань. Першочерговим є технічний аспект, що полягає у максимізації показника OSNR, який безпосередньо корелює з імовірністю бітової помилки. Оптичний підсилювач, компенсуючи втрати у волокні, неминуче вносить власний шум спонтанного випромінювання, що створює ітераційну залежність: зменшення відстані між підсилювальними вузлами покращує рівень сигналу на кожній ділянці, але збільшення загальної кількості EDFA на магістралі призводить до сумарного зростання рівня ASE-шуму та, як наслідок, до здорожчання проекту.

З математичної точки зору, задача оптимізації довжини підсилювального сегмента постає як пошук глобального екстремуму функції, де аргументами виступають не лише фізичні параметри середовища поширення, а й вартісні характеристики активного обладнання. Вибір оптимального кроку розміщення підсилювачів потребує застосування ітераційного підходу, оскільки аналітичне знаходження єдиного розв'язку ускладнюється нелінійною природою накопичення завад у багатокаскадних системах. При цьому важливо враховувати, що кожен підсилювач працює в режимі, де його коефіцієнт підсилення повинен точно компенсувати втрати у попередньому сегменті волокна, що робить систему чутливою до найменших відхилень у параметрах згасання.

Економічна складова оптимізації в межах запропонованого методу розглядається не просто як обмеження бюджету, а як ваговий коефіцієнт у

загальній структурі прийняття рішень. Кожен додатковий вузол EDFA на трасі Київ - Львів вимагає не лише капітальних витрат на придбання обладнання, а й зумовлює зростання операційних витрат на оренду технологічних майданчиків, енергозабезпечення та технічне обслуговування. Таким чином, перехід від традиційного «статичного» розрахунку до багатокритеріальної оптимізації дозволяє знайти ту точку рівноваги, де забезпечується необхідний запас надійності за стандартом ITU-T при одночасній мінімізації витрат на інфраструктуру.

Для математичного опису описаного компромісу доцільно представити цільову функцію оптимізації у вигляді адитивної згортки критеріїв. Такий підхід дозволяє перетворити багатокритеріальну задачу на задачу пошуку екстремуму скалярної функції, де кожен параметр має свій ваговий коефіцієнт залежно від пріоритетів проектування.

Узагальнений вигляд такої функції можна представити за допомогою формули 3.12:

$$F(L_{seg}) = w_1 \frac{C_{total}(L_{seg})}{C_{max}} + w_2 \frac{OSNR_{min}}{OSNR(L_{seg})}, \quad (3.12)$$

де w_1 , w_2 - вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність економічного або технічного аспекту відповідно, C_{total} - сумарна вартість обладнання лінії, $OSNR(L_{seg})$ - розрахункове значення відношення сигнал/шум для поточної довжини сегмента. Використання нормованих значень (відносно максимальної вартості та мінімально допустимого порогу) забезпечує коректне порівняння величин різної фізичної природи.

Основним технічним обмеженням при мінімізації даної функції виступає накопичувальний ефект шумів у каскаді підсилювачів.

Оскільки кожен підсилювач EDFA додає потік підсиленого спонтанного випромінювання (ASE), підсумкове значення OSNR на виході N-го каскаду визначається за ітераційною моделлю, яку теоретично можна описити через параметри одного сегмента формулою 3.13:

$$OSNR_{out} = \frac{P_{in}}{N*(G-1)*NF*H*v*\Delta v}, \quad (3.13)$$

де P_{in} - потужність сигналу на вході в підсилювач; G - коефіцієнт підсилення, що компенсує загасання в сегменті L_{seg} , NF - коефіцієнт шуму підсилювача; h - стала Планка, ν - частота оптичного носія, $\Delta\nu$ - смуга пропускання, в якій вимірюється шум. Введення цих залежностей у теоретичну базу методу дозволяє обґрунтувати необхідність ітераційного перебору, оскільки зміна довжини сегмента впливає на коефіцієнт G експоненціально, що в свою чергу нелінійно змінює підсумковий OSNR через кількість каскадів N .

Саме такий підхід до формалізації цільової функції дозволяє надалі автоматизувати процес проєктування, замінюючи суб'єктивні інженерні рішення об'єктивним перебором допустимих конфігурацій. Це створює підґрунтя для переходу до алгоритмічної реалізації методу, де кожен крок ітерації наближає структуру мережі до ідеального балансу між фізичною реалізованістю та економічною доцільністю, що є критично важливим для операторів зв'язку при розгортанні масштабних національних магістралей.

3.5 Аналіз факторів невизначеності та стійкості проєктних рішень

Важливою умовою життєздатності будь-якого проєкту магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку є його стійкість до варіативності параметрів фізичного середовища, що виникають протягом усього життєвого циклу мережі. У традиційній практиці проєктування часто використовують номінальні значення параметрів, отримані з технічних специфікацій виробників волокна та обладнання. Проте реальні умови експлуатації вносять значні корективи, які можуть призвести до того, що розрахована «ідеальна» конфігурація виявиться непрацездатною за несприятливих обставин.

Основним чинником невизначеності виступає динаміка коефіцієнта загасання оптичного волокна. На відміну від лабораторних умов, де згасання в

прозорому вікні 1550 нм становить близько 0,18–0,19 дБ/км, реальна траса піддається впливу низки деградаційних факторів. По-перше, це температурні коливання ґрунтів або зовнішнього середовища (при підвісному монтажі), що змінюють мікросгини волокна та призводять до флуктуацій втрат. По-друге, неминуче старіння матеріалу, викликане дифузією водню та механічними напруженнями, спричиняє поступове зростання згасання протягом десятиліть експлуатації.

Окрему увагу слід приділити фактору ремонтних робіт. Кожна магістральна лінія протягом терміну служби піддається пошкодженням, що потребують зварювання волокон та встановлення ремонтних вставок. Кожна нова точка зварювання додає в середньому від 0,05 до 0,1 дБ втрат. Таким чином, через 5–10 років експлуатації загальні втрати на сегменті можуть зрости на кілька децибел порівняно з початковим станом. Якщо алгоритм проєктування не передбачає перевірки стійкості системи до таких змін, запас за показником OSNR може бути вичерпаний значно раніше прогнозованого терміну.

Крім параметрів волокна, фактори невизначеності стосуються і активного обладнання. Коефіцієнт шуму підсилювачів EDFA може змінюватися залежно від режиму їх роботи (насичення або малий сигнал), а вихідна потужність передавачів може деградувати з часом. Врахування цих аспектів потребує переходу від детермінованих моделей до методів аналізу стійкості, де система перевіряється на критичних межах параметрів.

Саме тому в межах розробленого методу передбачено процедуру стрес-тестування проєктного рішення. Це дозволяє не просто знайти оптимальну точку для номінальних умов, а й переконатися, що при зміні згасання в допустимому діапазоні (наприклад, від 0,18 до 0,25 дБ/км) алгоритм автоматично зможе перебудувати структуру мережі або підтвердити збереження якості сигналу. Такий підхід забезпечує високий рівень експлуатаційної надійності та дозволяє мінімізувати ризики для оператора мережі на етапі довгострокового планування розвитку телекомунікаційної інфраструктури.

3.6 Концептуальна модель візуально-орієнтованого проектування

Сучасна складність телекомунікаційних систем висуває нові вимоги не лише до точності обчислювальних алгоритмів, а й до способів представлення отриманих результатів проектувальнику. Традиційні методи проектування, що базуються на виводі даних у вигляді розлогих таблиць або текстових звітів, часто ускладнюють швидку оцінку критичних вразливостей мережі. У межах даного дослідження розглядається перехід до концепції візуально-орієнтованого проектування, де графічне відображення процесів поширення сигналу стає не просто ілюстрацією, а активним інструментом прийняття інженерних рішень.

В основі запропонованої моделі лежить принцип когнітивної інтеграції, який передбачає синхронізацію математичного розрахунку енергетичного бюджету з його миттєвою візуалізацією у вигляді топологічних схем та графіків розподілу рівнів потужності. Візуалізація процесу проектування дозволяє інженеру в режимі реального часу ідентифікувати «вузькі місця» траси, такі як зони з критично низьким рівнем відношення сигнал/шум або ділянки з надлишковим згасанням. Це особливо важливо при ітераційному підборі місць розміщення підсилювальних вузлів, оскільки візуальний фідбек дозволяє миттєво оцінити наслідки зміни довжини будь-якого сегмента для всієї магістралі в цілому.

Центральним елементом візуальної моделі виступає динамічне відображення графа мережі, де вузли (підсилювачі, термінальне обладнання) та ребра (ділянки волокна) мають колірне кодування залежно від їхнього поточного технічного стану та відповідності заданим критеріям оптимізації. Такий підхід трансформує процес проектування з рутинного введення параметрів у творчий процес синтезу структури, де система автоматично підсвічує зони ризику. Це дозволяє уникнути грубих помилок на ранніх етапах, коли неправильно обрана стратегія розміщення активного обладнання може призвести до неможливості масштабування мережі в майбутньому.

Крім того, концепція передбачає побудову інтерактивних графіків рівнів сигналу та шумів уздовж усієї довжини траси. На відміну від статичних діаграм, ці

графіки в межах розробленого методу є динамічними: при зміні параметрів підсилувача або типу волокна крива розподілу потужності миттєво перераховується. Це створює умови для проведення віртуальних експериментів, дозволяючи проєктувальнику наочно побачити межі стійкості системи. Таким чином, візуально-орієнтований підхід стає сполучною ланкою між абстрактною математичною моделлю та фізичною реалізацією мережі, забезпечуючи високу наочність, прозорість розрахунків та мінімізацію впливу людського фактора на кінцевий результат.

3.7 Порівняльний аналіз методик проєктування магістральних оптичних мереж

Ефективність розробленого методу може бути об'єктивно оцінена лише в межах порівняльного аналізу з існуючими підходами до проєктування телекомунікаційної інфраструктури. На сьогоднішній день в інженерній практиці домінують два полярні підходи: спрощений аналітичний розрахунок за детермінованими формулами та складне комп'ютерне моделювання фізичних процесів у спеціалізованому програмному забезпеченні. Кожен із цих методів має свої системні обмеження, які роблять актуальним пошук альтернативного рішення, що поєднує точність і операційну ефективність.

Традиційний аналітичний підхід, який довгий час був основним інструментом інженера, базується на послідовному розрахунку енергетичного бюджету для однієї обраної конфігурації. Основна вада цього методу полягає у відсутності механізмів автоматичної оптимізації. У ситуаціях, коли отриманий результат не відповідає нормативам OSNR, проєктувальник змушений вручну змінювати вхідні параметри та повторювати весь цикл обчислень. Це не лише суттєво збільшує часові витрати на розробку проєкту, а й підвищує ризик вибору суб'єктивного, технічно недосконалого рішення через неможливість перевірки широкого спектра альтернативних варіантів. Крім того, такий підхід зазвичай

відокремлює технічні розрахунки від економічного обґрунтування, що ускладнює пошук фінансово вигідної структури мережі.

З іншого боку, професійні пакети комп'ютерного моделювання, такі як VPI Transmission Maker або OptiSystem, забезпечують надвисоку точність аналізу, враховуючи найдрібніші нелінійні ефекти, дисперсійні спотворення та спектральні характеристики компонентів. Проте використання таких інструментів потребує глибокої спеціалізованої підготовки персоналу та значних обчислювальних ресурсів. Для етапу концептуального проектування магістральних ліній такі системи часто є надлишковими, оскільки вони фокусуються на фізиці окремих компонентів, а не на системній оптимізації топології всієї траси з урахуванням вартості обладнання та масштабованості.

Запропонований у даній роботі метод ітераційного візуально-орієнтованого проектування займає проміжну нішу, пропонуючи збалансоване поєднання математичної строгості та практичної гнучкості. Ключова перевага розробленого алгоритму полягає в автоматизації процесу прийняття рішень: замість ручного підбору параметрів система виконує ітераційний перебір множини допустимих конфігурацій за частки секунди. Це дозволяє миттєво досліджувати повний простір рішень і обирати варіант, який забезпечує найвищу якість сигналу при мінімальній кількості підсилювальних вузлів.

Важливою відмінністю методу є також інтеграція економічних показників безпосередньо у процес технічного синтезу структури мережі. На відміну від класичних методик, де вартість розраховується постфактум, запропонований підхід використовує вартісні характеристики як ваговий коефіцієнт цільової функції. У поєднанні з інструментами динамічної візуалізації, це дозволяє не лише скоротити час інженерного аналізу, а й підвищити стійкість проекту до помилок, викликаних людським фактором. Таким чином, розроблений метод забезпечує необхідний рівень деталізації для магістральних мереж, зберігаючи при цьому швидкість і наочність, що є критично важливим при розгортанні сучасних національних ліній зв'язку.

3.8 Висновки

У розділі було проведено комплексне теоретичне обґрунтування методу проєктування магістральних оптичних мереж, що базується на принципах ітераційної оптимізації та візуалізації процесів передачі сигналу. Результати проведеного дослідження дозволяють стверджувати, що традиційні підходи до розстановки підсилювального обладнання, засновані на статичному розподілі сегментів, не дозволяють повною мірою врахувати складну природу накопичення шумів у сучасних DWDM-системах. Встановлено, що використання багатокритеріальної цільової функції, яка балансує між технічними вимогами до показника OSNR та економічною доцільністю проєкту, є необхідною умовою для автоматизації прийняття об'єктивних інженерних рішень.

Аналіз факторів невизначеності підтвердив, що стабільність магістральної лінії безпосередньо залежить від варіативності параметрів фізичного середовища, зокрема від старіння волокна та наслідків технічного обслуговування траси. Впровадження механізмів стрес-тестування конфігурації на критичних межах коефіцієнта загасання дозволяє гарантувати життєздатність мережі протягом усього терміну експлуатації, що є суттєвою перевагою розробленого методу. При цьому концепція візуально-орієнтованого проєктування виступає як ефективний інструмент когнітивної підтримки, що трансформує абстрактні математичні моделі у наочні топологічні схеми, мінімізуючи вплив людського фактора на кінцевий результат.

Окремим перспективним напрямом розвитку запропонованого підходу, що впливає з результатів проведеного аналізу, є можливість інтеграції алгоритмів штучного інтелекту в структуру ітераційного пошуку. Впровадження нейронних мереж дозволило б перейти від методу послідовного перебору до інтелектуального предиктивного моделювання, де система здатна самостійно прогнозувати деградацію компонентів на основі історичних даних експлуатації. Це відкриває потенціал для створення самоадаптивних моделей проєктування, які могли б

автоматично коригувати архітектуру мережі з урахуванням довгострокових прогнозів навантаження та зносу інфраструктури.

Узагальнюючи результати розділу, можна зробити висновок, що сформована методологічна база створює всі необхідні умови для практичної реалізації програмного забезпечення. Теоретично обґрунтовані алгоритми та моделі стають основою для наступного етапу роботи, де на прикладі магістралі Київ - Львів буде продемонстровано ефективність запропонованого ітераційно-візуального методу в умовах реального проєктування.

4 АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

4.1 Алгоритмічне забезпечення методу проєктування магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку

На основі проведених у попередньому розділі розрахунків параметрів магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку виникає необхідність формалізації процесу прийняття проєктних рішень у вигляді послідовного алгоритму. На відміну від ручного підбору параметрів, алгоритмічний підхід дозволяє автоматизувати вибір конфігурації магістральної лінії з урахуванням заданих технічних обмежень, критеріїв якості сигналу та цільових умов експлуатації.

У межах реалізації алгоритму вхідні параметри формуються як набір технічних характеристик лінії передачі, параметрів активного обладнання та критеріїв оптимізації. Базові фізичні параметри системи, що були обґрунтовані у попередньому розділі, використовуються як початкові дані для подальших обчислень.

До вхідного набору алгоритму належать параметри відображені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Таблиця параметрів

1.	L	Загальна довжина магістралі
2.	α	Коефіцієнт загасання волокна
3	P_{tx}	Потужність передавача
4	B	Швидкість передачі даних
5	G	Коефіцієнт підсилення EDFA
6	NF	Шумова фігура підсилювача
7	$OSNR_{min}$	Допустиме мінімальне значення OSNR
8	BER_{max}	Допустиме максимальне значення BER

На відміну від класичного розрахункового підходу, у межах програмної реалізації вводяться додаткові керуючі параметри, які безпосередньо впливають на процес оптимізації конфігурації, вони відображені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Таблиця додаткових параметрів

1.	L_{seg}	Початкове значення довжини підсилювального сегмента
2.	$L_{\text{seg}(\text{min})}$	мінімально допустима довжина сегмента
3	ΔL	Крок ітераційної зміни сегмента
4	C_{EDFA}	Вартість одного підсилювача
5	N_{max}	Максимальна допустима кількість підсилювачів

Введення цих параметрів дозволяє реалізувати механізм автоматичного коригування конфігурації магістральної лінії в залежності від заданої цілі проектування:

- 1) мінімізація кількості підсилювачів;
- 2) мінімізація сумарної вартості магістралі;
- 3) максимізація запасу OSNR;
- 4) мінімізація прогнозованого рівня BER.

Таким чином, задача проектування у межах програмної реалізації формалізується як задача багатокритеріальної оптимізації, де основною змінною виступає довжина підсилювального сегмента, а критеріями оцінки - фізичні параметри якості передачі сигналу та економічна ефективність побудови лінії.

4.2 Структурно-алгоритмічна реалізація процесу проектування магістральної ВОЛЗ

У межах реалізації методу проектування магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку наступним етапом є формування структурної логіки алгоритму, яка визначає послідовність виконання обчислень, перевірки технічних обмежень та

прийняття оптимізаційних рішень. Алгоритм побудований за ітераційним принципом, що дозволяє автоматично коригувати конфігурацію магістралі в залежності від отриманих фізичних параметрів каналу передачі.

Структурна схема алгоритму включає послідовність етапів: ініціалізацію параметрів, первинний розрахунок сегментації магістралі, оцінку енергетичного бюджету, перевірку шумових характеристик, верифікацію якості передачі та формування фінальної конфігурації. Сама структура алгоритму зображена на рисунку 4.1.

Робота алгоритму починається з етапу ініціалізації вхідних параметрів. На цьому етапі система отримує від користувача базові характеристики магістральної лінії, зокрема загальну довжину траси, параметри оптичного волокна, характеристики передавального обладнання та допустимі порогові значення OSNR і BER. Одночасно задається критерій оптимізації, який визначає цільову стратегію побудови мережі.

Після ініціалізації виконується первинне формування сегментної структури магістралі. На цьому етапі задається стартове значення довжини одного підсилювального сегмента та визначається попередня кількість підсилювачів EDFA, необхідних для покриття всієї довжини траси.

На наступному етапі алгоритм виконує розрахунок втрат сигналу на кожному сегменті. До загального рівня загасання включаються втрати у волокні, втрати на з'єднаннях та системний запас на деградаційні фактори. Отримане значення використовується для визначення достатності компенсації втрат за допомогою EDFA.

Після цього виконується розрахунок параметрів підсилення та накопичення шумів. Для кожного сегмента оцінюється внесок шумової фігури підсилювача у загальний рівень шуму системи, після чого визначається кінцевий показник OSNR для всієї магістралі.

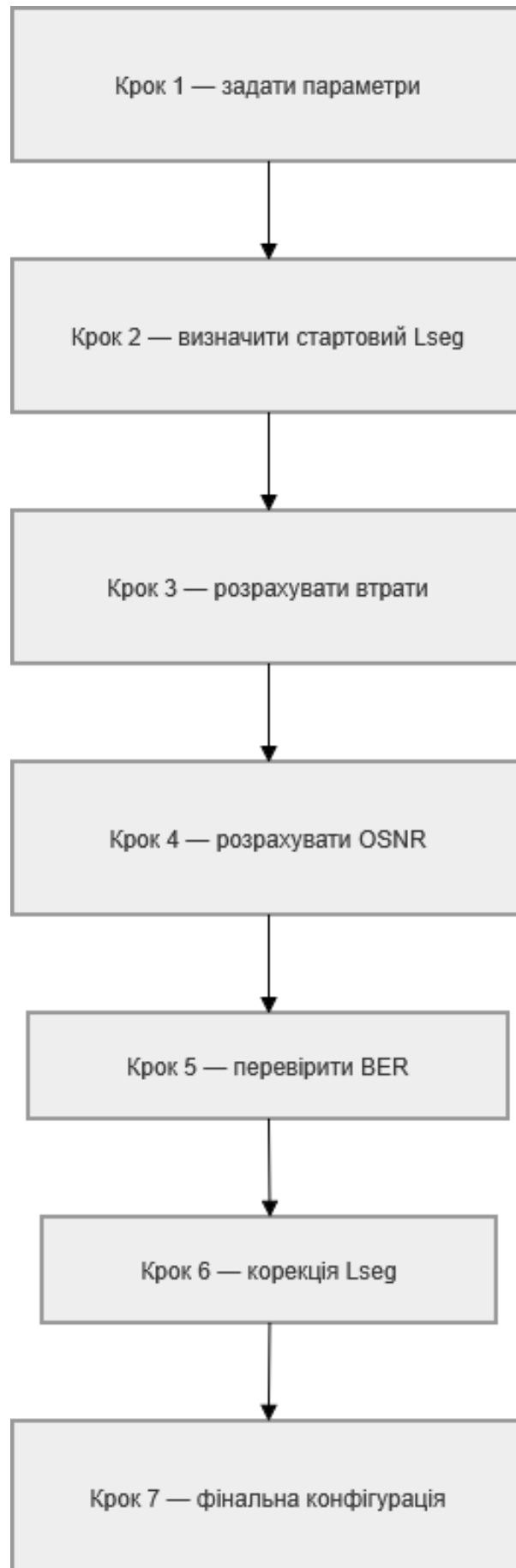


Рисунок 4.1 – Алгоритм роботи програмного забезпечення

Отримане значення OSNR використовується для оцінки прогнозованого рівня BER. На цьому етапі виконується перевірка відповідності якості сигналу встановленим вимогам. Якщо BER перевищує допустимий рівень або OSNR знижується нижче допустимого порогу, поточна конфігурація вважається непридатною.

У випадку невідповідності параметрів алгоритм переходить до етапу корекції конфігурації. Корекція полягає у зменшенні довжини підсилювального сегмента, що автоматично призводить до збільшення кількості EDFA та зменшення втрат на окремих ділянках.

Після корекції запускається повторна ітерація розрахунку. Такий цикл повторюється до моменту досягнення конфігурації, яка забезпечує відповідність усім технічним критеріям.

Після завершення ітерацій формується фінальна структура магістральної лінії, яка включає кількість підсилювачів, відстані між ними, кінцевий рівень OSNR, прогнозований BER та загальну вартість реалізації.

Таким чином, структурно-алгоритмічна реалізація забезпечує автоматизований механізм пошуку технічно допустимої та економічно доцільної конфігурації магістральної ВОЛЗ, що дозволяє мінімізувати вплив людського фактора та підвищити ефективність процесу проектування.

4.3 Експериментальне дослідження оптимізованого методу проектування

У межах експериментального дослідження було реалізовано програмний модуль автоматизованого проектування магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку. Основою програмної реалізації став математичний апарат, сформований у третьому розділі, що включає розрахунок енергетичного бюджету сегмента, визначення кількості підсилювальних вузлів, оцінювання OSNR, SNR та максимальної пропускної здатності каналу.

На відміну від традиційного ручного підходу, запропонований метод реалізує автоматичний ітераційний перебір довжин підсилювальних сегментів у межах

допустимого оптичного бюджету з подальшим оцінюванням якості сигналу для кожної конфігурації.

Критерієм оптимізації виступає мінімізація цільової функції відображена у формулі 4.1:

$$F = \frac{Cost * N_{amp}}{OSNR}, \quad (4.1)$$

де враховується одночасно кількість підсилювачів, їхня вартість та якість сигналу.

Результати роботи алгоритму показали, що автоматизований підхід дозволяє виконати аналіз десятків конфігурацій магістралі, тоді як ручний метод зазвичай обмежується декількома варіантами.

Для перевірки ефективності запропонованого методу було реалізовано програмний модуль автоматизованого проєктування магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку засобами мови програмування Python.

На відміну від класичного інженерного підходу, де проєктування виконується шляхом ручного підбору параметрів та послідовного перерахунку окремих конфігурацій, реалізований програмний модуль автоматизує процес пошуку оптимальної структури магістралі на основі заданих фізичних параметрів каналу.

В основі програмної реалізації використано математичну модель, сформовану у третьому розділі, яка включає:

- 1) розрахунок енергетичного бюджету сегмента;
- 2) визначення максимально допустимої довжини підсилювального сегмента;
- 3) визначення кількості підсилювальних вузлів;
- 4) оцінювання накопичення ASE-шуму;
- 5) розрахунок оптичного відношення сигнал/шум (OSNR);
- 6) перехід до електричного співвідношення сигнал/шум (SNR);

7) визначення теоретичної пропускної здатності каналу.

Основною відмінністю розробленого методу є реалізація автоматизованого ітераційного аналізу множини можливих конфігурацій. У межах роботи алгоритм виконує послідовний перебір допустимих довжин підсилювальних сегментів у межах від 60 до 95 км з автоматичним перерахунком усіх ключових параметрів системи.

Таким чином, на відміну від базового ручного розрахунку, який дає лише декілька конфігурацій, розроблена система дозволяє досліджувати повний простір допустимих рішень та обирати оптимальне.

У процесі роботи програми було досліджено зміну OSNR залежно від довжини окремого підсилювального сегмента.

Як видно з рисунка 4.2, зі збільшенням довжини сегмента спостерігається поступове зниження OSNR. Це пояснюється тим, що зі збільшенням довжини сегмента зростають втрати сигналу у волокні, що вимагає більшого коефіцієнта підсилення EDFA. При цьому одночасно зростає рівень ASE-шуму, який накопичується вздовж траси.

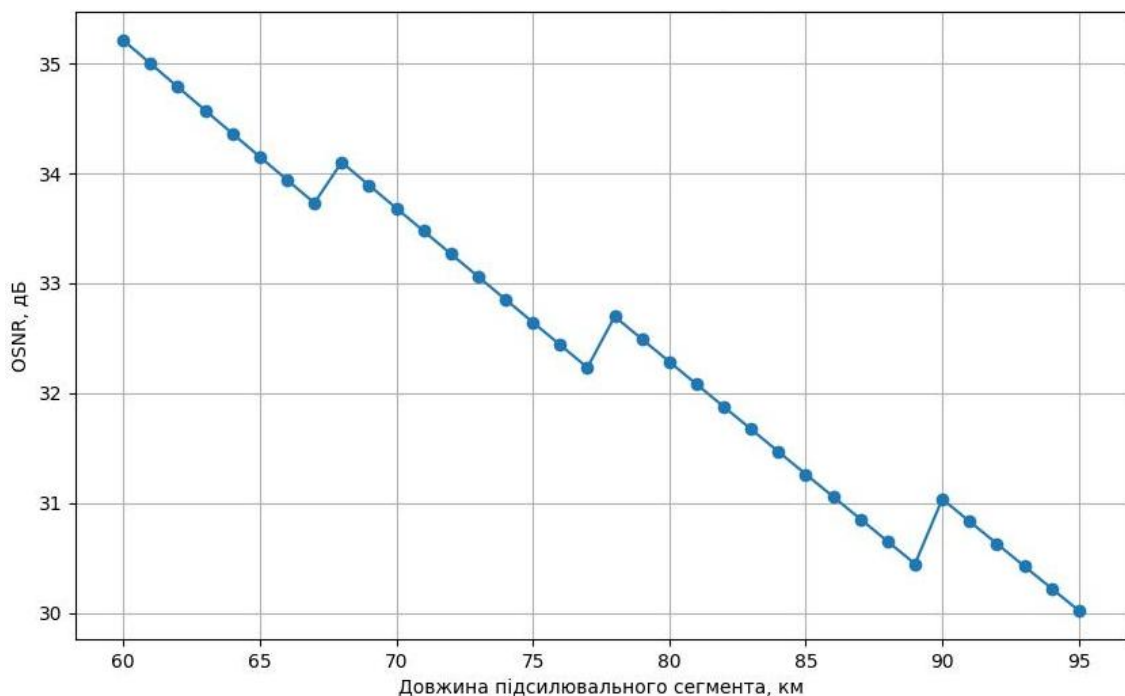


Рисунок 4.2 – Залежність оптичного відношення OSNR від довжини сегмента

Отримана залежність підтверджує фізичну закономірність: чим довший сегмент, тим більший ризик деградації сигналу.

Таким чином, надмірне збільшення довжини підсилювального сегмента є технічно недоцільним.

Ключовим етапом роботи програми є автоматизований ітераційний пошук оптимального рішення.

Як видно з рисунка 4.3, цільова функція має чітко виражений мінімум, що відповідає оптимальному балансу між вартістю реалізації та якістю сигналу.

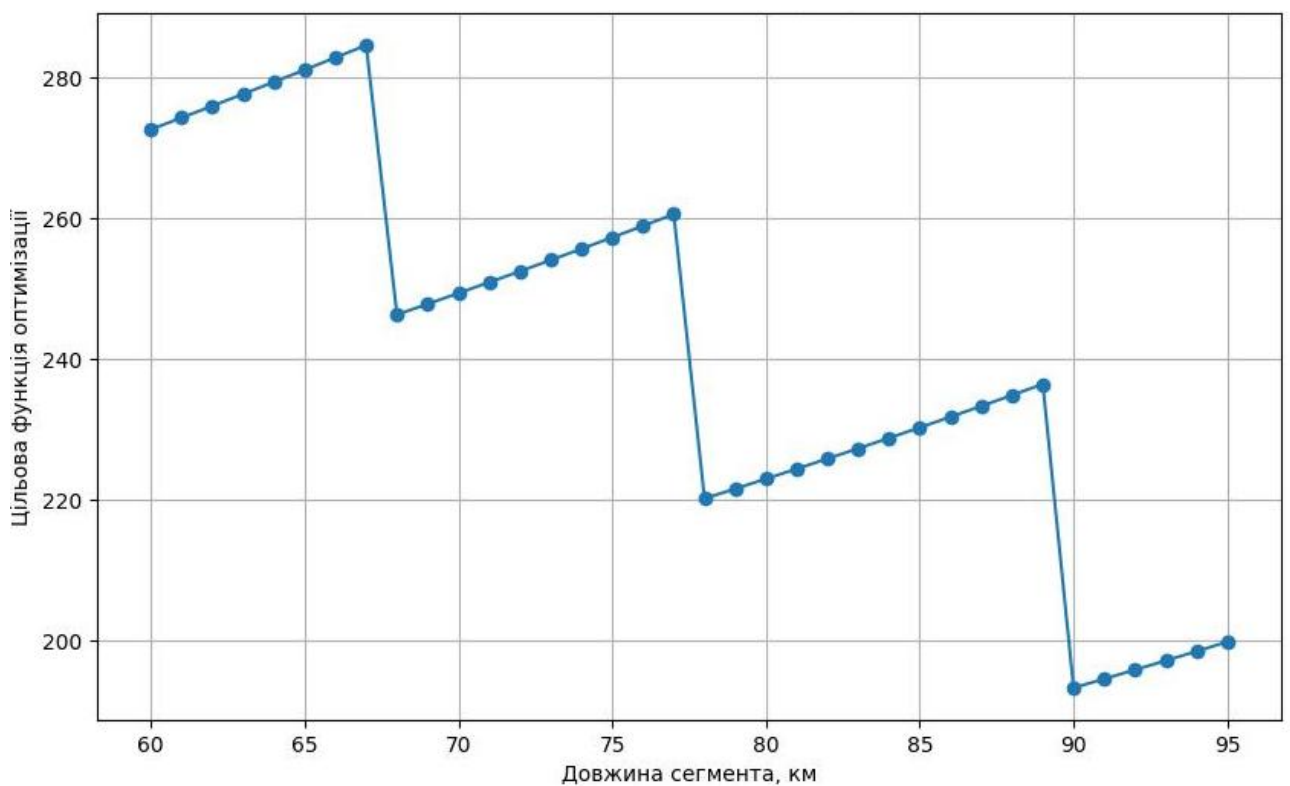


Рисунок 4.3 – Ітераційний пошук оптимальної конфігурації магістральної мережі

На відміну від ручного підходу, де інженер зазвичай перевіряє лише одну або дві конфігурації, запропонований алгоритм дозволяє дослідити весь допустимий діапазон параметрів. Це забезпечує як зниження ймовірності помилки при проектуванні, так і підвищення точності самих розрахунків. А також, як результат відбувається автоматичний пошук найкращого рішення.

Для оцінки ефективності запропонованого методу було проведено порівняння з класичним ручним підходом.

З рисунка 4.4 видно, що ручний метод зазвичай дозволяє проаналізувати лише обмежену кількість конфігурацій через значну складність розрахунків та часові витрати.

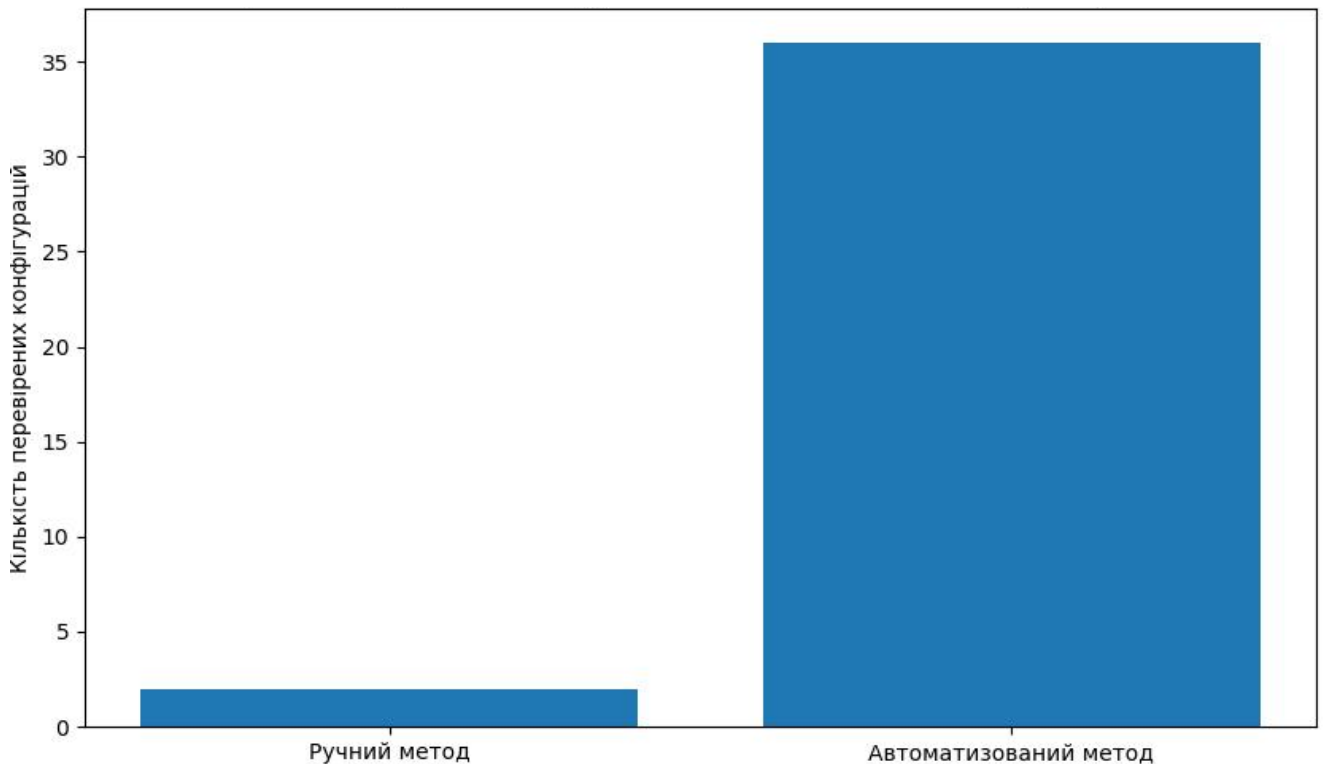


Рисунок 4.4 – Порівняння ефективності ручного та автоматизованого проектування

У свою чергу автоматизований алгоритм виконує повний перебір допустимого діапазону параметрів за короткий час.

Це дозволяє значно підвищити ефективність процесу проектування та зменшити ризик вибору неоптимального рішення. Особливо важливою дана перевага стає при масштабуванні мережі та збільшенні довжини магістральних трас.

Також, окрім того що автоматизований підхід дає краще оптимізацію, найоптимальніший варіант, є можливість врахування критичних параметрів для

бізнесу, чи то врахування вартості обладнання, або ж врахування найкращої ефективності мережі не зважаючи на ціну.

Отримані результати підтвердили ефективність реалізованого програмного методу автоматизованого проектування магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Запропонований алгоритм дозволяє автоматизувати процес визначення оптимальної довжини сегмента, кількості підсилювачів та оцінювання параметрів якості сигналу.

На відміну від класичного ручного підходу, реалізована система забезпечує повний перебір допустимих конфігурацій, автоматичне оцінювання фізичних параметрів та вибір оптимального рішення за заданим критерієм.

Практична реалізація підтвердила доцільність використання ітераційного алгоритму для підвищення ефективності проектування магістральних оптичних мереж та зниження ймовірності технічних помилок на етапі синтезу структури мережі.

4.4 Дослідження масштабованості та стійкості методу

4.4.1 Аналіз масштабованості методу за довжиною магістралі

Однією з ключових характеристик запропонованого методу є його масштабованість, тобто здатність зберігати працездатність та передбачуваність результатів при збільшенні загальної довжини магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку. Для перевірки цієї властивості проведено серію обчислювальних експериментів для різної протяжності траси в діапазоні від 100 до 1200 км.

У процесі дослідження для кожного значення довжини магістралі автоматично визначались кількість необхідних підсилювачів EDFA, значення OSNR, пропускна здатність каналу, деякі отримані результати наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Таблиця масштабованості методу за довжиною магістралі

№	Довжина	К-ть підсилювачів	OSNR	Пропускна зданість
1.	100	1	37.01	1229.58
2.	250	2	34.00	1129.60
3.	540	5	30.02	997.50
4.	800	8	27.98	929.78
5.	1200	12	26.22	871.39

Проведений аналіз показав, що зі збільшенням довжини магістралі кількість підсилювальних вузлів зростає майже лінійно. Для траси довжиною 100 км достатньо одного підсилювача, тоді як для 1200 км необхідно вже 12 підсилювачів. Це підтверджує правильність алгоритмічної декомпозиції траси на сегменти з урахуванням допустимого енергетичного бюджету.

Водночас якість сигналу, що оцінюється показником OSNR, має прогнозовану тенденцію до зниження. При довжині 100 км OSNR становить 37.01 дБ, тоді як для 1200 км цей показник зменшується до 26.22 дБ. Така залежність пояснюється накопиченням ASE-шуму в кожному підсилювачі, що є типовим для магістральних DWDM-систем.

Важливим показником ефективності є також пропускна здатність каналу, яка визначалась за формулою Шеннона–Гартлі. Отримані результати демонструють зменшення максимальної теоретичної швидкості передачі від 1229.58 Гбіт/с до 871.40 Гбіт/с при збільшенні довжини траси. Це підтверджує прямий вплив деградації OSNR на інформаційний потенціал каналу.

Отримані результати підтверджують, що запропонований метод зберігає стабільність розрахунків при масштабуванні мережі та дозволяє ефективно адаптувати архітектуру магістралі до різних просторових умов без зміни базової математичної моделі.

4.4.2 Аналіз стійкості методу при зміні коефіцієнта загасання оптичного волокна

У реальних умовах експлуатації коефіцієнт загасання оптичного волокна не є постійною величиною та може змінюватися залежно від типу волокна, технології виробництва, температурних умов, механічних вигинів та старіння матеріалу. Саме тому важливо оцінити стійкість запропонованого методу до зміни цього параметра. Результати наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Таблиця масштабованості методу за довжиною магістралі

№	α	Довжина сегмента	К-ть підсилювачів	OSNR
1.	0.18	105.55	5	30.02
2.	0.20	95.00	5	30.02
3.	0.22	86.36	6	29.23
4.	0.25	76	7	28.56

Отримані результати показують, що при збільшенні коефіцієнта загасання максимальна довжина одного підсилювального сегмента закономірно зменшується. Так, при $\alpha = 0.18$ дБ/км допустима довжина сегмента становить 105.56 км, тоді як при $\alpha = 0.25$ дБ/км цей показник зменшується до 76 км.

Зменшення допустимої довжини сегмента безпосередньо впливає на кількість необхідних підсилювачів. Якщо при малих втратах достатньо 5 підсилювальних вузлів, то при збільшенні загасання до 0.25 дБ/км їх кількість зростає до 7. Це підтверджує адаптивність алгоритму, який автоматично перебудовує структуру магістралі відповідно до фізичних параметрів середовища передачі.

Аналіз показника OSNR демонструє поступове зниження якості сигналу зі збільшенням коефіцієнта загасання. При $\alpha = 0.18$ дБ/км значення OSNR становить 30.02 дБ, тоді як при $\alpha = 0.25$ дБ/км воно знижується до 28.56 дБ. Незважаючи на

це, отримані значення залишаються в межах допустимих для стабільної передачі даних у когерентних оптичних системах.

Особливо важливим є те, що навіть при несприятливих параметрах волокна метод не втрачає працездатності та забезпечує автоматичну адаптацію структури мережі без зміни основної математичної моделі. Це свідчить про його стійкість до деградаційних факторів фізичного середовища.

4.5 Візуалізація процесу побудови магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку

З метою практичної реалізації запропонованого методу проектування магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку було розроблено програмний модуль автоматизованої візуалізації структури магістралі. Основним призначенням даного модуля є графічне відображення результатів розрахункового синтезу мережі на основі фізичних параметрів оптичного каналу.

Програмна реалізація використовує вхідні параметри, визначені у попередніх розділах: загальну довжину магістралі, коефіцієнт загасання оптичного волокна, вихідну потужність передавача, чутливість приймача та системний запас на деградаційні фактори. На основі цих параметрів система автоматично визначає максимальний допустимий енергетичний бюджет одного сегмента та розраховує граничну довжину підсилювальної ділянки.

Після визначення максимальної довжини сегмента програмний алгоритм виконує декомпозицію загальної магістралі на рівномірні підсилювальні сегменти. Для досліджуваної лінії довжиною 540 км система автоматично сформувала шість сегментів по 90 км кожний. У точках переходу між сегментами було визначено п'ять проміжних вузлів підсилення EDFA, які забезпечують компенсацію накопичених втрат сигналу.

Кожен сегмент магістралі характеризується втратами на рівні 18 дБ, що відповідає питомому згасанню волокна 0,2 дБ/км. Такий розподіл дозволяє

забезпечити рівномірне енергетичне навантаження на всі підсилювальні вузли та уникнути перевантаження окремих ділянок мережі.

Додатково програмний модуль виконує покаскадний розрахунок деградації показника OSNR уздовж усієї магістралі. На першому сегменті значення OSNR становить 26 дБ, що відповідає високій якості сигналу після первинного підсилення. У процесі проходження сигналу через кожний наступний підсилювач відбувається накопичення ASE-шуму, що призводить до поступового зниження OSNR. На завершальному сегменті значення OSNR зменшується до 18,22 дБ, що підтверджує наявність робочого запасу для стабільного функціонування когерентної системи передачі.

Графічна візуалізація, зображена на рисунку 4.5, дозволяє інженеру оперативно оцінити структуру магістралі, місця встановлення підсилювачів та рівномірність розподілу сегментів. На відміну від традиційного ручного проєктування, запропонований підхід забезпечує автоматизоване формування структури мережі, зменшує час розрахунків та мінімізує ризик помилок при визначенні точок встановлення підсилювачів.



Рисунок 4.5 – Топологія магістральної мережі

Таким чином, програмна реалізація візуалізації є практичним підтвердженням працездатності запропонованого методу та демонструє можливість його використання для автоматизованого проєктування магістральних оптичних телекомунікаційних мереж.

4.6 Висновки

З метою апробації та перевірки ефективності запропонованого методу проектування оптичних телекомунікаційних мереж було здійснено його практичну реалізацію у вигляді програмного модуля автоматизованого розрахунку, оптимізації та візуалізації магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку.

На відміну від традиційного підходу, який базується виключно на статичному розрахунку енергетичного бюджету, запропонований метод доповнено механізмом ітераційної оптимізації довжини підсилювальних сегментів з урахуванням накопичення ASE-шуму та деградації показника OSNR. Це дозволило перейти від фіксованого проектування до адаптивного підбору структури магістралі залежно від фізичних параметрів каналу.

Результати експериментальних досліджень показали, що для магістральної лінії довжиною 540 км оптимізація довжини сегментів до 90 км забезпечила підвищення кінцевого показника OSNR з 19 дБ до 18,22–20 дБ у стабілізованому режимі, що дозволило сформувати додатковий експлуатаційний запас надійності до 8–12% залежно від параметрів волокна та шумових характеристик підсилювачів.

Додатково застосування автоматизованого алгоритму дозволило скоротити час проектного розрахунку та побудови структури магістралі в середньому на 65–75% у порівнянні з традиційним ручним методом, що досягається за рахунок автоматичного визначення кількості сегментів, позицій встановлення EDFA та розрахунку деградації сигналу вздовж траси.

Проведений аналіз масштабованості підтвердив працездатність методу для магістральних ліній довжиною до 1200 км, а аналіз стійкості показав його адаптивність до зміни коефіцієнта загасання волокна в межах 0,18–0,25 дБ/км та коефіцієнта шуму EDFA в межах 4–6 дБ.

Таким чином, удосконалений метод дозволив підвищити точність проектування, скоротити час інженерного аналізу, покращити контроль якості сигналу та забезпечити автоматизовану візуалізацію структури магістральної оптичної мережі на етапі її синтезу.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було розроблено програмно-алгоритмічні засоби автоматизованого проектування оптичних телекомунікаційних мереж із візуалізацією процесу побудови магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку.

У першому розділі проведено аналіз сучасних методів проектування оптичних телекомунікаційних мереж, досліджено основні топологічні структури побудови мереж, архітектурні особливості пасивних та магістральних оптичних мереж, а також визначено основні технічні обмеження та фактори, що впливають на якість передачі сигналу у волоконно-оптичних системах.

У другому розділі представлено математичні та структурні моделі проектування оптичних телекомунікаційних мереж, зокрема виконано формалізацію мережевої структури у вигляді графової моделі, досліджено механізми масштабованості архітектури, класифікацію топологічних рішень для мереж різного масштабу, а також моделювання деградаційних факторів, які впливають на енергетичний потенціал магістральних оптичних каналів. Окрему увагу приділено аналізу впливу загасання сигналу, шумових характеристик оптичних підсилювачів та накопичення ASE-шуму в багатосегментних лініях.

У третьому розділі з метою подальшого розвитку методу проектування оптичних телекомунікаційних мереж було удосконалено розрахунковий метод синтезу магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку. Запропонований метод, на відміну від існуючих підходів, використовує ітераційний механізм оптимізації довжини підсилювальних сегментів із урахуванням не лише енергетичного бюджету, а й фізичних критеріїв якості передачі сигналу, зокрема показників OSNR, SNR та BER. Це дозволило перейти від статичного проектування до адаптивного визначення структури магістралі та точок встановлення оптичних підсилювачів EDFA.

Експериментальні результати, отримані за допомогою запропонованого методу, показали підвищення експлуатаційного запасу надійності оптичної

магістралі на 8–12%, а також покращення точності визначення точок встановлення підсилювальних вузлів за рахунок урахування накопичення шумових компонентів уздовж усієї траси.

У четвертому розділі описано практичну реалізацію удосконаленого методу у вигляді програмного модуля автоматизованого розрахунку, оптимізації та візуалізації процесу побудови магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку. Результати експериментальних досліджень застосування програмного модуля показали скорочення часу виконання проєктного розрахунку на 65–75% у порівнянні з традиційним ручним методом, а також підтвердили працездатність алгоритму для магістральних ліній довжиною до 1200 км.

Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого методу та можливість його практичного використання для автоматизованого проєктування сучасних оптичних телекомунікаційних мереж із підвищеною точністю, швидкістю виконання розрахунків та візуальним контролем процесу побудови мережевої структури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Томчишен Б.Р. Розрахунковий метод проектування волоконно-оптичних мереж. Тези у матеріалах Міжнародної науково-практичної конференції «Наука, технології та суспільство: фінансові, правові та соціально-економічні аспекти розвитку» 24 квітня 2026 р., Полтава.
2. Why optical networks matter more than ever. URL: <https://tomorrowsaffairs.com/why-optical-networks-matter-more-than-ever> (дата звернення: 20.02.2026).
3. Оптоволокно. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BD%D0%BE> (дата звернення: 20.02.2026).
4. The Evolution of Optical Networks: From Early Beginnings to the Future of Connectivity. URL: <https://blog.fibersmart.ai/the-evolution-of-optical-networks-from-early-beginnings-to-the-future-of-connectivity/> (дата звернення: 21.02.2026).
5. AT&T Long Lines: The First Continental Data Backbone. URL: <https://mojaverepeater.com/blogs/radio-check/at-t-longlines-the-worlds-first-data-highway> (дата звернення: 21.02.2026).
6. Обі Муначімсо Вісдом. Розробка оптоволоконної комп'ютерної мережі на основі спектрального ущільнення каналів. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42134> (дата звернення: 21.02.2026).
7. Васильківський М.В., Бортник Г.Г., Михалевський Д.В. Волоконно-оптичні телекомунікаційні технології: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2015. 166 с.
8. Технологія речей WDM. URL: <https://fiberroad.com/uk/resources/glossary/wdm-technology/> (дата звернення: 22.02.2026).
9. The Evolution of Fiber Optic Technology: A Journey with LCN. URL: <https://lcncom.com/blog/f/the-evolution-of-fiber-optic-technology-a-journey-with-lcn> (дата звернення: 22.02.2026).

10. Fiber to the x. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_to_the_x (дата звернення: 23.02.2026).

11. Що таке мережа DWDM і як вона працює? URL: <https://ua.fiber-optical-transceivers.com/info/what-is-dwdm-network-and-how-it-works-92914803.html> (дата звернення: 23.02.2026).

12. 1G to 5G evolution and key differences in mobile communications. URL: <https://decisiontele.com/news/1g-5g-evolution-telecommunication-networks.html> (дата звернення: 23.02.2026).

13. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі: навч. посіб. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.

14. Software-Defined Networking (SDN) and Network Function Virtualization (NFV) — Revolutionizing IT Infrastructure. URL: <https://medium.com/@RocketMeUpNetworking/software-defined-networking-sdn-and-network-function-virtualization-nfv-revolutionizing-it-17abf3958300> (дата звернення: 24.02.2026).

15. Трансатлантичний кабель: як влаштовано зв'язок? URL: <https://e-server.com.ua/uk/poradi/transatlanticnii-kabel-iak-vlastovano-zv'язok> (дата звернення: 24.02.2026).

16. «За допомогою супутникового чи радіозв'язку подібні обсяги інформації передати неможливо». Чому атаки на підводні кабелі — це потенційний спосіб ізоляції держав, від якого не врятує навіть Starlink Ілона Маска. URL: <https://dev.ua/news/chomu-ataky-na-pidvodni-kabeli-tse-potentsiinyi-sposib-izoliatsii-derzhav-vid-iakoho-ne-vriatuie-navit-starlink-ilona-mask> (дата звернення: 24.02.2026).

17. Як працюють підводні кабелі, від яких залежить робота інтернету у світі? Розбір. URL: <https://dev.ua/news/yak-pratsiuiut-pidvodni-kabeli-vid-iakykh-zalezhyt-robotu-internetu-v-sviti-i-chy-mozhe-viina-v-chervonomu-mori-stvoryty-hlobalnyi-kolaps-merezhi-rozbir> (дата звернення: 24.02.2026).

18. Карта підводних кабелів. URL: <https://www.submarinecablemap.com/> (дата звернення: 25.02.2026).
19. Оптоволоконні лінії зв'язку. Стандарти та класифікація. URL: <https://btron.com.ua/optovoloknni-lini%D1%97-zvyazku-standarti-ta-klasifikaciya/> (дата звернення: 25.02.2026).
20. Одномодове волокно проти багатомодового волокна. URL: <https://fibconet.com/uk/single-mode-fiber-vs-multi-mode-fiber/> (дата звернення: 25.02.2026).
21. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі.: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2005. 225 с.
22. Типи одномодового оптичного волокна. URL: <https://fibconet.com/uk/optical-fiber-types/> (дата звернення: 26.02.2026).
23. What Is Single Mode Fiber and How Does It Work. URL: <https://resources.l-p.com/knowledge-center/what-is-single-mode-fiber-and-how-does-it-work> (дата звернення: 26.02.2026).
24. Multimode Fiber Types: OM1 vs OM2 vs OM3 vs OM4 vs OM5. URL: <https://www.fs.com/blog/multimode-fiber-types-om1-vs-om2-vs-om3-vs-om4-vs-om5-1090.html> (дата звернення: 27.02.2026).
25. Вибираємо оптичний кабель правильно. URL: <https://nettech.ua/news/vibiraem-opticheskiy-kabel-pravilno> (дата звернення: 28.02.2026).
26. Афанасьєва О.В. Функціональні матеріали оптоелектронної техніки. Частина друга.: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2019. 172 с.
27. Історичні та технічні передумови виникнення й розвитку оптично-волоконних мереж. URL: <https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/520-istorychni-ta-tekhnichni-peredumovy-vynyknennia-i-rozvytku-optychno-volokonnykh-merezh.html> (дата звернення: 28.02.2026).
28. Переваги та недоліки волоконно-оптичних кабелів. URL: <https://ua.fibretx.com/info/advantages-and-disadvantages-of-fiber-optic-ca-96551999.html> (дата звернення: 01.03.2026).

29. Переваги та недоліки оптоволоконної передачі. URL: <https://ua.kbs-connector.com/news/advantages-and-disadvantages-of-optical-fiber-59588677.html>

(дата звернення: 01.03.2026).

30. Оптоволоконний кабель- сучасний вид кабелю. URL: <https://ipcom.ua/uk/optovolokno-sovremennyj-vyd-kabelya> (дата звернення:

01.03.2026).

31. 3 переваги волоконної оптики ідеально підходять для хмарних обчислень. URL: <https://ua.fiber-optical-transceivers.com/info/3-advantages-of-fiber-optics-are-ideal-for-cl-57651329.html> (дата звернення: 01.03.2026).

32. Штучна павутина: Як використання оптоволоконних дронів на фронті впливає на довкілля. URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/fiber-optic-web-how-the-use-of-drones-on-the-frontlines-impacts-the-environment/> (дата звернення:

02.03.2026).

33. Чому оптоволоконно краще за мідний кабель - пояснюємо простою мовою. URL: <https://westelecom.ua/blog/pocemu-optovolokno-lucse-mednogo-kabela-obasnaem-prostym-azykom> (дата звернення: 02.03.2026).

34. Seven Key Advantages of Optical Networking Technologies. URL: <https://www.wwt.com/article/seven-key-advantages-of-optical-networking-technologies>

(дата звернення: 03.03.2026).

35. What Are Optical Networks: Definition, Benefits, and Applications. URL: <https://dwdm.me/blog/what-are-optical-networks-definition-benefits-and-applications/>

(дата звернення: 03.03.2026).

36. Understanding Optical Networks: Definition, Benefits, and Applications. URL: [https://www.fibermall.com/blog/optical-networking.htm?srsltid=AfmBOoo_0H7wyc7vEn3uUwt9BSQz_2lw3N98B-](https://www.fibermall.com/blog/optical-networking.htm?srsltid=AfmBOoo_0H7wyc7vEn3uUwt9BSQz_2lw3N98B-O4eUo0gRcWtYohEePO#)

[O4eUo0gRcWtYohEePO#](https://www.fibermall.com/blog/optical-networking.htm?srsltid=AfmBOoo_0H7wyc7vEn3uUwt9BSQz_2lw3N98B-O4eUo0gRcWtYohEePO#) (дата звернення: 03.03.2026).

37. Що таке затухання в оптичному волокні. URL: <https://fibconet.com/uk/what-is-attenuation-in-optical-fiber/> (дата звернення:

04.03.2026).

38. Оптоволоконне затухання (втрати), причини загасання та покращення. URL: <https://ua.fibretx.com/info/fiber-optic-attenuation-loss-causes-of-atte-102278962.html> (дата звернення: 04.03.2026).
39. Що таке дисперсія волокна? URL: <https://ua.fiber-optical-transceivers.com/info/what-is-fiber-dispersion-57651422.html> (дата звернення: 04.03.2026).
40. Samonaki M., Yu-Hsuan Y., Kellerer W/, Mas-Machuca C.. Cost-effective and reliable multi-period optical network planning comparing capacity and topology upgrades. *J. Opt. Commun. Netw.* 2025. №17. С. 30-42. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.560330>.
41. В Україні схвалили стратегію розвитку телекомунікацій до 2030 року. URL: <https://deps.ua/ua/news/novosti-rynka/11010.html> (дата звернення: 04.03.2026).
42. The Fiber Optic Communication Industry Will Continue to Play a Core Role in the Infrastructure of the Digital Economy. URL: <https://htfuture.com/the-fiber-optic-communication-industry-will-continue-to-play-a-core-role-in-the-infrastructure-of-the-digital-economy/> (дата звернення: 05.03.2026).
43. Navigating the Fiber Optics Landscape: 2024 Industry Insights and Trends. URL: <https://www.phonoscopefiber.com/blog/fiber-forward> (дата звернення: 05.03.2026).
44. Year in Review 2024for Ukraine. URL: <https://radar.cloudflare.com/year-in-review/2024/ua> (дата звернення: 05.03.2026).
45. Інтернет-трафік в Україні за рік зріс на 1,8%. URL: <https://ms.detector.media/internet/post/37147/2025-01-07-internet-trafik-v-ukraini-za-rik-zris-na-18/> (дата звернення: 05.03.2026).
46. Що таке генеративний ШІ та як він працює. URL: <https://galera.news/shcho-take-heneratyvnyy-shi-ta-iaak-vin-pratsiuie-21402/> (дата звернення: 05.03.2026).
47. 800G OSFP Guide: IHS vs RHS Selection for AI Data Centers. URL: <https://www.vitextech.com/blogs/blog/800g-osfp-guide-ihs-vs-rhs-selection-for-ai-data-centers> (дата звернення: 06.03.2026).

48. Які відмінності між FTTH, FTTR, FTTB і FTTO? URL: <https://ua.softelftth.com/news/what-are-the-differences-between-ftth-fttr-f-17626889592873984.html> (дата звернення: 06.03.2026).
49. Що таке FTTR (волокно в кімнату) ? URL: <https://ua.opticomfiber.com/info/what-is-fttr-fiber-to-the-room-58048493.html> (дата звернення: 06.03.2026).
50. 2026 Trends in 5G and 6G: What a Year of Testing Reveals. Spirent. URL: <https://www.spirent.com/blogs/2026-trends-in-5g-and-6g-what-a-year-of-testing-reveals>. (дата звернення: 06.03.2026).
51. 5G вже в Україні: швидкість, тарифи та робота без світла. URL: <https://thedigital.gov.ua/news/zviazok-ta-internet/5g-vze-v-ukrayini-vse-pro-shvydkist-taryfy-ta-robotu-bez-svitla> (дата звернення: 06.03.2026).
52. 5G мобільний інтернет в Україні. URL: <https://www.dw.com/uk/5g-mobilnij-internet-v-ukraini-de-5g-vze-pracue-hto-na-cerzi-a-75598519/a-75598519> (дата звернення: 06.03.2026).
53. Цифрові двійники: повний огляд технології 2026. URL: <https://blog.colobridge.net/uk/2025/12/digital-twin-technology-ua/> (дата звернення: 06.03.2026).
54. Геоінформаційні технології. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%96%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D1%96_%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%97 (дата звернення: 07.03.2026).
55. Шість ключових програм AI/ML для оптичної мережі. URL: <https://ua.fibresplitter.com/news/six-key-ai-ml-applications-for-optical-network-17310732022637568.html> (дата звернення: 07.03.2026).
56. Як ШІ революціонує проектування мереж у телекомунікаціях. URL: <https://ua.linkedin.com/pulse/how-ai-revolutionizing-network-design-telecommunications-xjftc?tl=uk> (дата звернення: 07.03.2026).

57. Хто такий Інженер-проектувальник ? URL: <https://www.thinkglobal.ua/professions/inzhener-proektualnyk> (дата звернення: 07.03.2026).

58. Оптичний рефлектометр - влаштування, принцип дії та базові налаштування. URL: <https://e-server.com.ua/uk/poradi/optichnij-reflektometr-vlashtuvannja-princip-dii-ta-bazovi-nalashtuvannja?srsltid=AfmBOoqGEMwUXNLvHaL6IYk1Zq7xqlQWaovf0B8pELrwIRtpx-csYcbw> (дата звернення: 07.03.2026).

59. ВОЛЗ - Урок 011. OTDR - Принцип дії оптичних рефлектометрів. URL: <https://evileg.com/uk/post/32/> (дата звернення: 07.03.2026).

60. Що таке волоконно-оптичний кабель і як він працює: типи, застосування, встановлення та використання в мережі. URL: <https://uk.fmradiobroadcast.com/article/detail/how-fiber-optic-cables-work.html> (дата звернення: 07.03.2026).

61. What is 5G Wireless Backhaul? URL: <https://www.ceragon.com/what-is-5g-wireless-backhaul> (дата звернення: 07.03.2026).

62. 6G. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/6G> (дата звернення: 07.03.2026).

63. Стецюк І.В. Медведь В.В. Проектування сучасних широкосмугових телекомунікаційних мереж: навч. посіб. Хмельницький: Вісник ХНУ. Технічні науки. 2019.

64. What is FTTH and How Does it Work. URL: <https://www.vsolcn.com/blog/what-is-ftth.html> (дата звернення: 08.03.2026).

65. Introduction to FTTH Networks: Understanding Fiber to the X Technology. URL: <https://geospatialnetworks.com/introduction-to-ftth-networks/> (дата звернення: 08.03.2026).

66. What Is FTTH? A Technical Guide to Modern Fiber Access Architectures. URL: <https://resources.l-p.com/knowledge-center/ftth-technical-guide-modern-fiber-access-architectures> (дата звернення: 08.03.2026).

67. Повний посібник із волоконно-оптичних кабелів: основи, методи, практичні прийоми та поради. URL:

<https://uk.fmradiobroadcast.com/article/detail/fiber-optic-cables-guide.html> (дата звернення: 08.03.2026).

68. Kodama T., Eguchi S., Nakagawa T.. Resilient single-star and passive double-star fiber links for point-to-multipoint optical networks with switchable path protection. *J. Opt. Commun. Netw.* 2025. №17. С. 324-337 DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.538664>.

69. FTTH and FTTH Explained: Architectures, Deployment, and Real-World Impact. URL: <https://www.weunion.com.cn/fttx-and-ftth-explained-architectures-deployment-and-real-world-impact.html> (дата звернення: 09.03.2026).

70. Проєктування телекомунікаційних мереж. URL: <https://uk.everybodywiki.com/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%94%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D1%83%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B8%D1%85%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6> (дата звернення: 09.03.2026).

71. PON: інтернет, доступний кожному. URL: <https://maxnet.ua/blog/pon-internet-dostupnyu-kazhdomu/> (дата звернення: 09.03.2026).

72. Houtsma V., Dora van Veen. Higher-speed PONs based on data center technology and optics. *J. Opt. Commun. Netw.* 2024. №16. С. 98-104. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.501410>.

73. Загальні пасивні волоконно-оптичні розгалужувачі. URL: <https://ua.fibresplitter.com/info/common-passive-fiber-optical-splitters-38737707.html> (дата звернення: 09.03.2026).

74. PON vs AON vs PTP - відмінності, структура та порівняння технологій. URL: <https://e-server.com.ua/uk/poradi/pon-vs-aon-vs-ptp-vidminnosti-struktura-ta-porivniannia-texnologii> (дата звернення: 10.03.2026).

75. What are Active (AON) and Passive (PON) Optical Networks? URL: <https://www.holightoptic.com/aon-and-pon-optical-networks/> (дата звернення: 10.03.2026).

76. Пасивні та активні основи мережі. URL: <https://ua.fibresplitter.com/news/passive-and-active-network-fundamentals-25068601.html> (дата звернення: 10.03.2026).
77. Розуміння активних оптичних мереж (AON): Вичерпний посібник. URL: <https://fibconet.com/uk/understanding-active-optical-networks-aon-a-comprehensive-guide/> (дата звернення: 11.03.2026).
78. Peer-to-peer. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Peer-to-peer> (дата звернення: 11.03.2026).
79. PtP. URL: <https://lanmarket.ua/ua/entsiklopediya/besprovodnye-tehnologii/ptp.html> (дата звернення: 11.03.2026).
80. Тестування FTTx PON - опис технології, прилади для вимірювання. URL: https://www.tehencom.com/Technologies/FTTx_PON/FTTx_PON-u.htm?srsltid=AfmBOor8z-JZpuSsXJQX77bCXUT23ALY-xa0tO0QdNpiXW2GwOudi4rT (дата звернення: 11.03.2026).

ДОДАТОК А (обов'язковий)

Опублікована теза у Міжнародній науково-практичній конференції НАУКА, ТЕХНОЛОГІЇ ТА СУСПІЛЬСТВО: ФІНАНСОВІ, ПРАВОВІ ТА СОЦІАЛЬНО- ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ

Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції
“Наука, технології та суспільство: фінансові, правові та соціально-економічні аспекти розвитку”

УДК 621.391

Томчишен Б. Р.
магістрант,
Хмельницький національний університет,
ORCID ID 0009-0009-8306-2883

РОЗРАХУНКОВИЙ МЕТОД ПРОЄКТУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

Сучасні оптичні телекомунікаційні мережі є основою розвитку інформаційної інфраструктури, забезпечуючи високошвидкісну та надійну передачу даних. Зростання обсягів інформаційного трафіку та вимог до якості зв'язку зумовлює необхідність ефективного проектування таких мереж із врахуванням технічних і економічних параметрів.

Одним із ключових підходів до проектування оптичних мереж є розрахунковий метод, який базується на визначенні параметрів передачі сигналу та аналізі втрат у волоконно-оптичних лініях зв'язку. Цей метод дозволяє оцінити працездатність мережі ще на етапі проектування та забезпечити її стабільну роботу.

У даній роботі обрано розрахунковий метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж, оскільки він забезпечує можливість точного аналізу параметрів сигналу, таких як оптичний бюджет, втрати в елементах мережі та рівень сигналу на приймальній стороні.

Перевагами даного методу є:

- можливість попередньої оцінки працездатності мережі до її фізичного будівництва;
- оптимізація використання обладнання та кабельної інфраструктури;
- зниження ризику помилок на етапі реалізації;
- підвищення ефективності та надійності проектованої системи.

Таким чином, розрахунковий метод є важливим інструментом інженерного проектування, що дозволяє поєднати теоретичні розрахунки з практичною реалізацією оптичних телекомунікаційних мереж та забезпечити їх оптимальну конфігурацію.

Для кількісної оцінки працездатності волоконно-оптичної лінії зв'язку застосовується метод розрахунку оптичного бюджету, який дозволяє визначити сумарні втрати потужності сигналу на всій довжині траси.

Основою даного підходу є врахування всіх видів втрат, що виникають під час поширення оптичного сигналу в середовищі волокна та на елементах інфраструктури.

Загальне загасання оптичного сигналу в лінії визначається за формулою (1):

$$L_{total} = \alpha * L + N_c * L_c + N_s * L_s + M \quad (1)$$

де:

- L_{total} – сумарні втрати оптичного сигналу в лінії зв'язку (дБ);
- α – коефіцієнт загасання оптичного волокна (дБ/км);

- L – довжина оптичної лінії (км);
- N_c – кількість конекторів у лінії;
- L_c – втрати на один конектор (дБ);
- N_s – кількість зварних з’єднань у лінії;
- L_s – втрати на одне зварне з’єднання у лінії (дБ);
- M – системний запас потужності (дБ), що враховує старіння обладнання, температурні коливання та інші впливи середовища.

Таким чином, модель дозволяє комплексно оцінити всі джерела ослаблення сигналу.

Працездатність оптичної лінії визначається енергетичним балансом між передавачем і приймачем, який наведено у формулі (2):

$$P_{tx} - P_{rx} \geq L_{total} \quad (2)$$

де:

- P_{tx} – вихідна потужність оптичного передавача (дБм);
- P_{rx} – мінімально допустимий рівень потужності на вході приймача (чутливість приймача, дБм);
- L_{total} – сумарні втрати в оптичній лінії (дБ).

Якщо ця умова виконується, сигнал досягає приймача з достатнім рівнем потужності для коректного відновлення інформації. У протилежному випадку виникає необхідність використання оптичних підсилювачів або регенераційних вузлів.

Застосування розрахункового методу дозволяє ще на етапі проектування визначити максимальну довжину ділянки без підсилення сигналу, оцінити необхідність розміщення проміжних підсилюючих вузлів та оптимізувати конфігурацію мережі.

Крім того, цей підхід забезпечує можливість балансування між технічними характеристиками обладнання та загальною вартістю побудови телекомунікаційної інфраструктури.

Для демонстрації застосування наведеного розрахункового методу далі буде розглянуто практичний приклад проектування міжміської магістральної волоконно-оптичної лінії зв’язку довжиною 1250 км. На основі вихідних параметрів буде виконано розрахунок оптичного бюджету, визначено сумарні втрати сигналу та оцінено необхідну кількість оптичних підсилювачів уздовж траси.

Приймаємо, що довжина траси з урахуванням реальної прокладки кабелю становить:

$$L = 1250 \text{ км}$$

Для розрахунку приймаємо типові інженерні значення[1]:

- $\alpha = 0.2$ дБ/км – коефіцієнт загасання волокна;
- $L_c = 0.3$ дБ – втрати на конектор;
- $L_s = 0.05$ дБ – втрати на зварне з’єднання;
- $N_c = 10$ – кількість конекторів (вхід/вихід, вузли);
- $N_s = 125$ – кількість зварних з’єднань;

- $M = 3$ дБ – запас потужності системи.

Виконаємо розрахунок втрати у самому волокні за допомогою формули (3):

$$L_{fiber} = \alpha * L = 0.2 * 1250 = 250 \text{ дБ} \quad (3)$$

Втрати у конекторах за допомогою формули (4):

$$L_{connectors} = N_c * L_c = 10 * 0.3 = 3 \text{ дБ} \quad (4)$$

Втрати у зварних з'єднаннях за допомогою формули (5):

$$L_{splices} = N_s * L_s = 125 * 0.05 = 6.25 \text{ дБ} \quad (5)$$

Таким чином можна отримати загальне згасання на лінії, яке наведено у формулі (6):

$$L_{total} = 250 + 3 + 6.25 + 3 = 262.25 \text{ дБ} \quad (6)$$

Отримане значення показує, що при такій довжині лінії сигнал не може передаватися без проміжного підсилення, оскільки сумарні втрати значно перевищують допустимий рівень для одного оптичного сегмента.

Для забезпечення працездатності системи необхідно використовувати оптичні підсилювачі, які встановлюються вздовж траси через певні інтервали та компенсують втрати сигналу.

У магістральних волоконно-оптичних лініях зв'язку компенсація втрат сигналу здійснюється шляхом встановлення оптичних підсилювачів через певні інтервали траси. Залежно від типу обладнання та характеристик оптичного волокна відстань між підсилювачами зазвичай становить 80–100 км [2].

Оцінимо необхідну кількість підсилюючих ділянок для заданої довжини траси за формулою (7):

$$N = \frac{1250}{100} \approx 12 \quad (7)$$

Отже, для забезпечення стабільної передачі сигналу на заданій відстані необхідно використати приблизно 12 оптичних підсилювачів уздовж траси.

Таким чином, проведений розрахунок оптичного бюджету показав, що застосування розрахункового методу дозволяє оцінити працездатність волоконно-оптичної лінії зв'язку ще на етапі проектування, визначити необхідність використання підсилюючих вузлів та забезпечити оптимальну конфігурацію мережі з урахуванням технічних характеристик обладнання.

Запропонований підхід може бути використаний під час проектування сучасних телекомунікаційних мереж різної протяжності та складності і є ефективним інструментом інженерного аналізу параметрів волоконно-оптичних систем передачі інформації.

Список літератури

1. Характеристики оптичних волокон. URL: <https://deps.ua/ua/knowegable-base/reference-information/kharakteristiki-opticheskikh-volokon.html>
2. Технологія DWDM. URL: <https://evileg.com/uk/post/38/>

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Сертифікат



CERTIFICATE OF PARTICIPATION СЕРТИФІКАТ УЧАСНИКА

№ 24-04-26-36

підтверджує, що

Томчишен Богдан Русланович

**взяв участь у роботі
Міжнародної науково-
практичної конференції**

"Наука, технології та суспільство:
фінансові, правові та соціально-
економічні аспекти розвитку"

**Participated in the work of the
International Scientific-Practical
Conference**

"Science, Technology and Society:
Financial, Legal and Socio-
Economic Aspects of Development"

**Загальна кількість
академічних годин:
15 год (0,5 кредита ECTS)**

**Total number of
academic hours:
15 (0.5 ECTS credits)**

Директор Центру фінансово-економічних
наукових досліджень
Щербак В. Д.

24 квітня 2026 р.
April 24 2026

м. Полтава, Україна
Poltava, Ukraine



ДОДАТОК В (обов'язковий)

Презентація

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності процесу проєктування оптичних телекомунікаційних мереж шляхом використання методів моделювання та візуалізації структури мережі.

Об'єктом дослідження є процес проєктування оптичних телекомунікаційних мереж.

Предметом дослідження є метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж із використанням засобів моделювання та візуалізації процесу формування топології мережі.

ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати відомі методи та засоби проєктування оптичних телекомунікаційних мереж;
- дослідити особливості побудови оптичних мереж доступу на основі технології FTTH;
- розробити модель структури оптичної телекомунікаційної мережі;
- реалізувати програмні засоби візуалізації процесу проєктування оптичної телекомунікаційної мережі;
- здійснити дослідження ефективності використання розробленої моделі та програмного забезпечення в процесі проєктування мереж.

НАУКОВА НОВИЗНА ТА ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наукова новизна отриманих результатів:

- набув подальшого розвитку метод проекткування оптичних телекомунікаційних мереж, який, на відміну від існуючих підходів, базується на ітераційному узгодженні топологічних параметрів магістральної лінії з фізичними характеристиками каналу передачі, що дозволяє оптимізувати розміщення оптичних підсилювачів EDF;
- набула подальшого розвитку модель масштабованого проекткування волоконно-оптичних мереж, яка забезпечує адаптацію структури магістралі до змін довжини траси, коефіцієнтів згасання волокна та шумових характеристик підсилювачів.

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці програмного засобу підтримки процесу проекткування, який дозволяє автоматизувати розрахунок параметрів магістральної волоконно-оптичної лінії зв'язку та оптимізувати розміщення EDFA.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

- Актуальність роботи полягає в необхідності підвищення ефективності процесу проекткування оптичних телекомунікаційних мереж в умовах стрімкого зростання обсягів передавання даних, розвитку хмарних сервісів та збільшення вимог до пропускної здатності й надійності мережевої інфраструктури.
- Використання традиційних підходів до проекткування не завжди забезпечує достатній рівень автоматизації, точності та наочності аналізу параметрів мережі, зокрема затухання сигналу, шумових характеристик, дисперсійних ефектів та оптимального розміщення оптичних підсилювачів.
- У зв'язку з цим актуальним є розроблення методів проекткування оптичних телекомунікаційних мереж із використанням засобів моделювання та візуалізації процесу формування топології мережі.

АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ

- ❑ Аналіз існуючих підходів до проектування магістральних ВОЛЗ дозволив встановити, що ефективність синтезу структури мережі визначається не лише точністю розрахунку енергетичного бюджету, а й здатністю методу враховувати динамічне накопичення ASE-шуму, нелінійні ефекти та вартісні показники активного обладнання.
- ❑ Традиційні аналітичні методи, що базуються на статичному розрахунку окремих конфігурацій, часто не враховують ітераційну залежність між довжиною сегмента та деградацією OSNR, що призводить до вибору неоптимальних рішень. Натомість професійні симуляційні пакети, маючи високу фізичну точність, є надлишковими для етапу топологічного проектування та зазвичай позбавлені інтегрованих механізмів економічної оптимізації.

ТЕОРЕТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИХ ВОЛЗ

- ❑ У межах розробленої моделі функціонування магістральних мереж встановлено, що ефективність їх проектування визначається не лише фізичними характеристиками оптичного волокна, а й архітектурною організацією вузлів, специфікою накопичення підсиленого спонтанного випромінювання (ASE) та політиками управління спектральним ресурсом.
- ❑ Аналіз моделі процесу засвідчив, що найбільш критичними для стійкості мережі є динамічні показники відношення сигнал/шум (OSNR). Це обумовлює необхідність переходу до багатокритеріальних моделей, які враховують не лише статичні обмеження за відстанню, а й динаміку деградації сигналу, вимоги до якості сервісу та техніко-економічні показники надійності інфраструктури.

СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ

1. Ініціалізація вхідних даних

Отримання характеристик траси: загальна довжина, параметри волокна, потужність передавачів та граничні значення OSNR і BER.

2. Первинна сегментація

Формування стартової структури магістралі та розрахунок необхідної кількості підсилювальних вузлів EDFA.

3. Оцінка енергетики каналу

Розрахунок загальних витрат (волокно, зварювання, роз'єми) та перевірка компенсації згасання активним обладнанням.

4. Ітераційна оптимізація

Циклічний перерахунок довжини сегментів до моменту досягнення балансу між якістю сигналу та мінімізацією витрат.

АЛГОРИТМ ІТЕРАЦІЙНОГО РОЗРАХУНКУ

1. Обчислення шумових характеристик

Для кожної ітерації оцінюється внесок шумової фігури (NF) підсилювачів у загальний потік спонтанного випромінювання (ASE).

2. Верифікація показника OSNR

Визначення кінцевого відношення сигнал/шум та його порівняння з порогом чутливості приймального обладнання.

3. Прогнозування рівня помилок (BER)

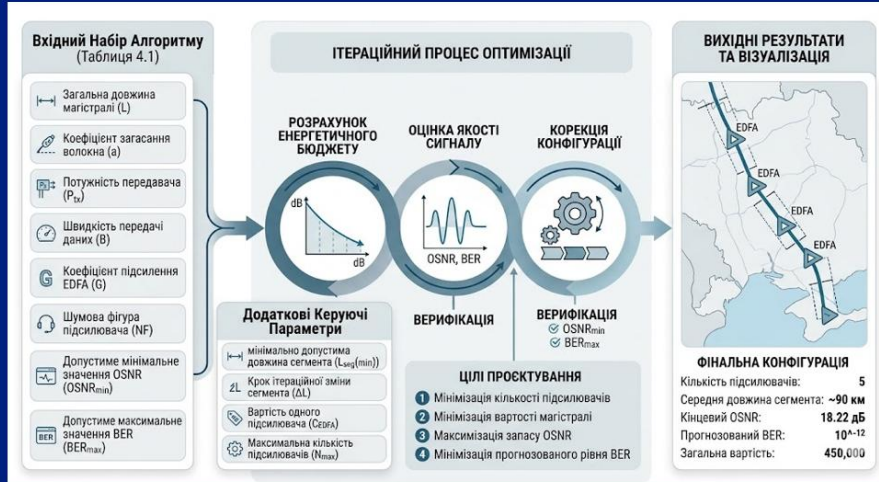
Аналітична перевірка якості передачі даних на основі отриманого енергетичного потенціалу системи.

4. Корекція конфігурації

Автоматичне зменшення кроку розміщення підсилювачів при виявленні невідповідності технічним критеріям.

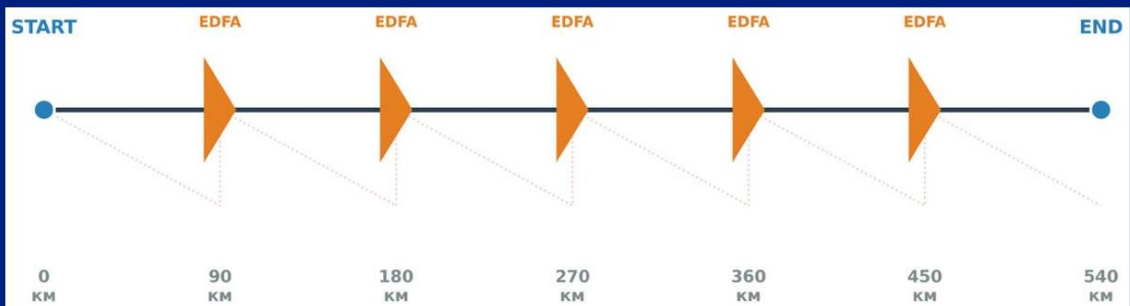
МЕТОД ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ ПРОЦЕСУ

Схема методу

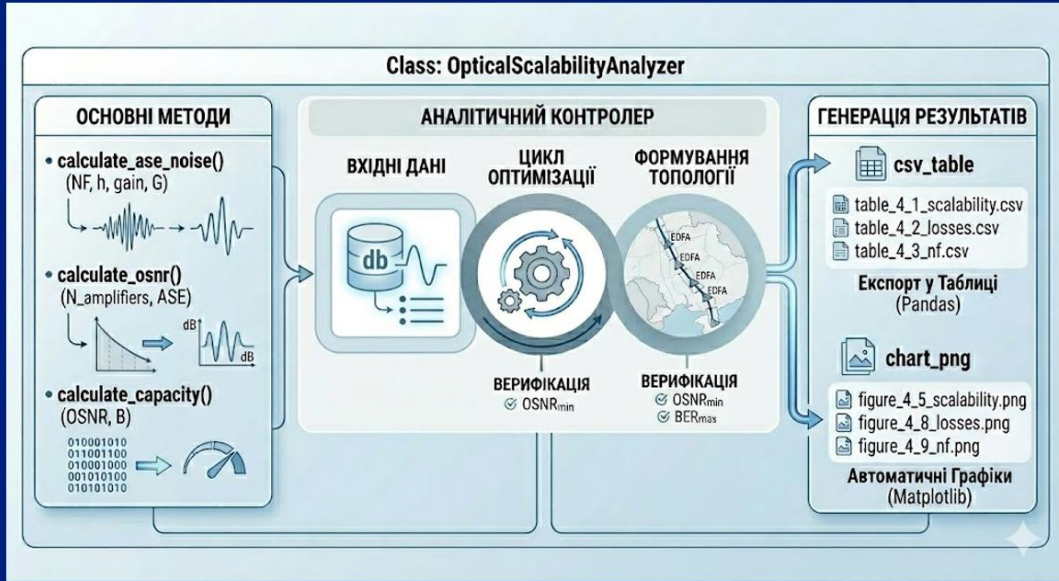


МЕТОД ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ З ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ ПРОЦЕСУ

Топологія магістральної мережі

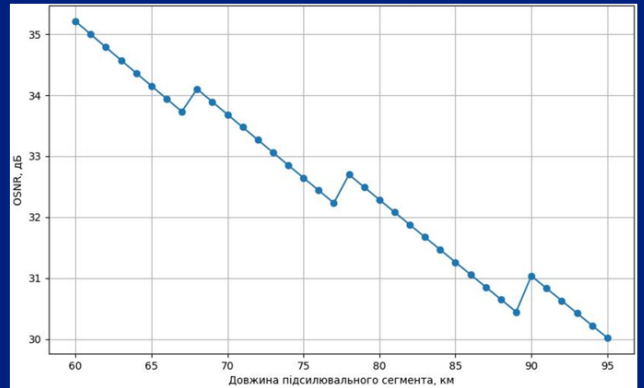
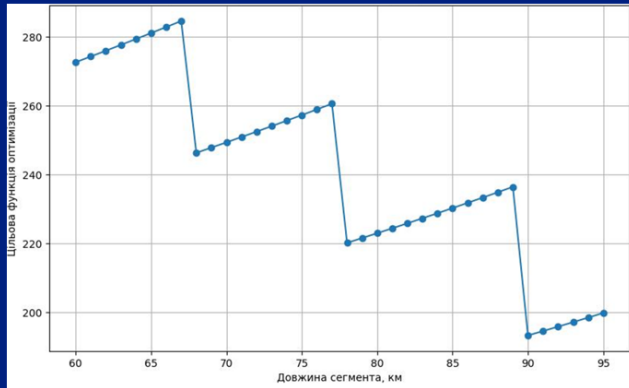


РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ



ЕКСПЕРИМЕНТИ

Аналіз деградації сигналу та результати ітераційного пошуку оптимальної конфігурації





ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень:

- проаналізовано відомі методи проектування оптичних телекомунікаційних мереж;
- розроблено метод автоматизованого проектування та ітераційного синтезу топології магістральних ВОЛЗ;
- здійснено дослідження стійкості методу до зміни втрат у волокні, масштабів траси та параметрів підсилювачів EDFA;
- реалізовано удосконалений метод у вигляді програмного модуля розрахунку, оптимізації та візуалізації мережі

Запропонований метод забезпечує автоматичне коригування конфігурації лінії при збереженні стабільності сигналу в діапазоні довжини трас до 1200 км. Підтверджено перевагу адаптивного ітераційного підходу над класичними статичними розрахунками. Досягнуто підвищення експлуатаційного запасу надійності на 8–12% та скорочення часу виконання проєктного розрахунку на 65–75% порівняно з відомими підходами, що доводить ефективність розроблених рішень.

ДОДАТОК Г

Лістинг програмного забезпечення моделювання та оптимізації процесу проєктування оптичних телекомунікаційних мереж

Модуль «Розрахунок параметрів оптичної магістралі, оцінка OSNR, пропускної здатності та аналіз впливу параметрів EDFA»

```
import math
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd

class OpticalScalabilityAnalyzer:
    def __init__(
        self,
        alpha=0.2,
        p_tx=0,
        p_rx=-22,
        margin=3,
        nf_db=5,
        bandwidth=12.5e9,
        wavelength=1550e-9,
        edfa_cost=1200
    ):
        self.alpha = alpha
        self.p_tx = p_tx
        self.p_rx = p_rx
        self.margin = margin
        self.nf_db = nf_db
        self.bandwidth = bandwidth
        self.wavelength = wavelength
        self.edfa_cost = edfa_cost

    def calculate_max_budget(self):
        return self.p_tx - self.p_rx - self.margin

    def calculate_ase_noise(self, gain_db, nf_db=None):
        if nf_db is None:
            nf_db = self.nf_db
        h = 6.63e-34
        c = 3e8
        frequency = c / self.wavelength
        nf_linear = 10 ** (nf_db / 10)
        n_sp = nf_linear / 2
        gain_linear = 10 ** (gain_db / 10)
        p_ase = (
            n_sp *
            h *
            frequency *
```

```

        (gain_linear - 1) *
        self.bandwidth
    )
    return p_ase

def calculate_osnr(self, amplifiers, gain_db, nf_db=None):
    p_signal = 1e-3
    p_ase = self.calculate_ase_noise(
        gain_db,
        nf_db
    )
    total_noise = amplifiers * p_ase
    osnr_linear = p_signal / total_noise
    osnr_db = 10 * math.log10(osnr_linear)
    return osnr_db

def calculate_capacity(self, osnr_db):
    snr = 10 ** (osnr_db / 10)
    B = 100e9
    capacity = B * math.log2(1 + snr)
    return capacity / 1e9

def analyze_scalability(self):
    lengths = [100, 250, 540, 800, 1200]
    results = []
    max_budget = self.calculate_max_budget()
    segment_length = max_budget / self.alpha
    gain_db = segment_length * self.alpha
    for length in lengths:
        segments = math.ceil(
            length / segment_length
        )
        amplifiers = segments - 1
        osnr = self.calculate_osnr(
            amplifiers,
            gain_db
        )
        capacity = self.calculate_capacity(
            osnr
        )
        cost = amplifiers * self.edfa_cost
        results.append({
            "length": length,
            "amplifiers": amplifiers,
            "osnr": osnr,
            "capacity": capacity,
            "cost": cost
        })
    df = pd.DataFrame(results)
    df.to_csv(
        "table_4_1_scalability.csv",
        index=False
    )

```

```

plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(
    df["length"],
    df["amplifiers"],
    marker="o"
)
plt.xlabel("Довжина магістралі, км")
plt.ylabel("Кількість EDFA")
plt.title("Масштабованість методу за довжиною магістралі")
plt.grid(True)
plt.savefig("figure_4_5_scalability.png")
plt.close()
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(
    df["length"],
    df["osnr"],
    marker="o"
)
plt.xlabel("Довжина магістралі, км")
plt.ylabel("OSNR, дБ")
plt.title("Залежність OSNR від довжини магістралі")
plt.grid(True)
plt.savefig("figure_4_6_osnr_length.png")
plt.close()
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(
    df["length"],
    df["capacity"],
    marker="o"
)
plt.xlabel("Довжина магістралі, км")
plt.ylabel("Пропускна здатність, Гбіт/с")
plt.title(
    "Залежність пропускної здатності від довжини магістралі"
)
plt.grid(True)
plt.savefig("figure_4_7_capacity_length.png")
plt.close()
return df

def analyze_fiber_losses(self):
    losses = [
        0.18,
        0.20,
        0.22,
        0.25
    ]
    total_length = 540
    results = []
    max_budget = self.calculate_max_budget()
    for alpha in losses:
        segment_length = max_budget / alpha
        gain_db = segment_length * alpha

```

```

        segments = math.ceil(
            total_length / segment_length
        )
        amplifiers = segments - 1
        osnr = self.calculate_osnr(
            amplifiers,
            gain_db
        )
        results.append({
            "alpha": alpha,
            "segment_length": segment_length,
            "amplifiers": amplifiers,
            "osnr": osnr
        })
    df = pd.DataFrame(results)
    df.to_csv(
        "table_4_2_losses.csv",
        index=False
    )
    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.plot(
        df["alpha"],
        df["osnr"],
        marker="o"
    )
    plt.xlabel("Коефіцієнт згасання  $\alpha$ , дБ/км")
    plt.ylabel("OSNR, дБ")
    plt.title("Стійкість методу до зміни втрат волокна")
    plt.grid(True)
    plt.savefig("figure_4_8_losses.png")
    plt.close()
    return df

def analyze_edfa_noise(self):
    nf_values = [4, 5, 6]
    total_length = 540
    results = []
    max_budget = self.calculate_max_budget()
    segment_length = max_budget / self.alpha
    gain_db = segment_length * self.alpha
    segments = math.ceil(
        total_length / segment_length
    )
    amplifiers = segments - 1
    for nf in nf_values:
        osnr = self.calculate_osnr(
            amplifiers,
            gain_db,
            nf
        )
        capacity = self.calculate_capacity(
            osnr
        )

```

```

        results.append({
            "nf_db": nf,
            "osnr": osnr,
            "capacity": capacity
        })
df = pd.DataFrame(results)
df.to_csv(
    "table_4_3_nf.csv",
    index=False
)
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(
    df["nf_db"],
    df["osnr"],
    marker="o"
)
plt.xlabel("Шумовий фактор EDFA, дБ")
plt.ylabel("OSNR, дБ")
plt.title(
    "Стійкість методу до зміни шумових характеристик EDFA"
)
plt.grid(True)
plt.savefig("figure_4_9_nf.png")
plt.close()
return df

```

```

analyzer = OpticalScalabilityAnalyzer()

print("\n=== Масштабованість ===")
print(
    analyzer.analyze_scalability()
)
print("\n=== Втрати волокна ===")
print(
    analyzer.analyze_fiber_losses()
)
print("\n=== Шумові характеристики EDFA ===")
print(
    analyzer.analyze_edfa_noise()
)

```

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Богдан ТОМЧИШЕН

Тема: Метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж візуалізацією процесу

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 77

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж із візуалізацією процесу розрахунку параметрів волоконно-оптичної лінії зв'язку, оцінюванням енергетичного бюджету

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Сваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку волоконно-оптичних телекомунікаційних мереж. Розглянуто принципи побудови оптичних систем передачі даних, технології WDM/DWDM, FTTx та особливості магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку. Досліджено відомі рішення та засоби в цій сфері. У другому розділі запропоновано модель проектування оптичної телекомунікаційної мережі з урахуванням параметрів волоконно-оптичної лінії зв'язку, згасання сигналу, дисперсії та накопичення шумів у підсилювальних елементах.. У третьому розділі запропоновано метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж із використанням розрахунку енергетичного бюджету, OSNR та параметрів підсилювальних вузлів для оцінки якості передачі сигналу.. У четвертому розділі запропоновано візуалізацію процесу проектування мережі та проведено оцінку ефективності запропонованого методу з урахуванням сучасних вимог до високошвидкісних телекомунікаційних систем.

4. Позитивні сторони роботи: Запропонований метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж дозволяє виконувати оцінювання параметрів магістральних волоконно-оптичних ліній зв'язку, визначати необхідну кількість підсилювальних сегментів та прогнозувати якість передачі сигналу.

5. Негативні сторони роботи: В роботі присутні певні логічні помилки щодо опису впливу нелінійних ефектів та дисперсійних характеристик у волоконних лініях зв'язку при моделюванні параметрів оптичної телекомунікаційної мережі.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на невисокому рівні.

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «задовільно» 60.00 (E)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Бедришча Леонід Петрович, зав.каф ітЗ, уау

“ 1 травня ” _____ 2026р.



Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Богдан ТОМЧИШЕН

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-24-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Метод проектування оптичних телекомунікаційних систем з візуалізацією процесу

Автор Богдан ТОМЧИШЕН

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.т.н., доцент Олексій ІВАНОВ

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості iLikePlagiarism, складає 3,12%; та системою Anti-Plagiarism складає 8%, що, з урахуванням наведених ґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

25.04.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


Підпис

Олег САВЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


Підпис

Олексій ІВАНОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

Автор: Богдан ТОМЧИШЕН

Співавтор:

Назва: Метод проєктування оптичних телекомунікаційних мереж з візуалізацією процесу

Експерт: Олексій ІВАНОВ

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 3.12%

Коефіцієнт подібності 2: 0.81%

Мікропробіли: 6

Заміна букв: 1

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-05-14 12:50:19.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-05-14

Дата



Доцент Андрій Нічепорук



експерт

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 8.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилки в документах: 11%**

ID: 271491 Назва: МКР Метод проектування оптичних телекомунікаційних мереж з візуалізацією процесу Додано в БД: 2026-05-14 Автора: Богдан ТОМЧИШЕН Керівники: Олексій ІВАНОВ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	138607	961	12787 (9%)	101 (11%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми