

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Віктор ГНАТЮК
“ ” 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

Тема: «Метод побудови оптичної мережі зі статичним трафіком на основі технології WDM».

Виконавець: _____ Вікторія МАРЧЕНКО
(підпис)

Керівник: _____ Олександр ЛАВРИНЕНКО
(підпис)

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

Консультант розділу «Охорона праці» _____ Катерина КАЖАН
(підпис)

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»
_____ Лариса ЧЕРНЯК
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Богдан ЧУМАЧЕНКО
(підпис)

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Віктор ГНАТЮК

“ ” 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи

Марченко Вікторії Олегівни

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Метод побудови оптичної мережі зі статичним трафіком на основі технології WDM»

затверджена наказом ректора від «02» вересня 2025 р. № 1672 /ст

2. Термін виконання роботи: з 29.09.2025 р. по 31.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: магістральна топологія мережі зв'язку; технологія DWDM на 80 каналів у С-діапазоні; статична матриця трафіку; параметри волокна SMF та підсилювачів EDFA; порогове значення OSNR для забезпечення заданої якості BER; мова програмування Python.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз технології WDM та принципів розв'язання RWA-задач; математична модель накопичення шумів та оцінки якості сигналу; розробка евристичного методу маршрутизації з урахуванням фізичних обмежень та регенерації; програмна реалізація та аналіз результатів моделювання.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: схема топології мережі; блок-схема розробленого алгоритму IA-RWA-R; графічна модель накопичення шуму в оптичному тракті; графіки залежності ймовірності блокування від навантаження в Ерлангах;

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	29.09.2025- 30.09.2025	Виконано
2	Вступ	01.10.2025- 03.10.2025	Виконано
3	Аналіз предметної області та існуючих рішень	04.10.2025- 14.10.2025	Виконано
4	Формалізація задачі та огляд методів проєктування оптичної транспортної мережі	15.10.2025- 26.10.2025	Виконано
5	Розробка евристичного методу проєктування мережі з урахуванням фізичних обмежень (ia-gwa)	27.10.2025- 16.11.2025	Виконано
6	Охорона праці	17.11.2025- 30.11.2025	Виконано
7	Охорона навколишнього середовища	01.12.2025- 14.12.2025	Виконано
8	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.12.2025- 31.12.2025	Виконано

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н., доц. Катерина КАЖАН		
Охорона навколишнього середовища	д.т.н., доц. Лариса ЧЕРНЯК		

8. Дата видачі завдання: «01» вересня 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Олександр ЛАВРАНЕНКО
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Вікторія МАРЧЕНКО
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Метод побудови оптичної мережі зі статичним трафіком на основі технології WDM» містить 74 сторінки, 7 рисунків, 4 таблиці, 30 використаних джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: WDM-МЕРЕЖІ, МАРШРУТИЗАЦІЯ ТА ПРИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИН ХВИЛЬ (RWA), ФІЗИЧНІ СПОТВОРЕННЯ (IA), РЕГЕНЕРАЦІЯ СИГНАЛУ, OSNR, Q-ФАКТОР, PYTHON.

Об'єкт дослідження – процеси передачі та обробки оптичних сигналів у високонавантажених магістральних мережах спектрального ущільнення (WDM).

Предмет дослідження – алгоритми маршрутизації та розподілу спектрального ресурсу з урахуванням фізичних обмежень і необхідності регенерації сигналу.

Мета кваліфікаційної роботи – зниження ймовірності блокування запитів у WDM-мережах шляхом розробки інтелектуального методу вибору маршрутів, який враховує деградацію оптичного відношення сигнал/шум та адаптивно призначає точки регенерації.

Метод дослідження – методи теорії графів для пошуку найкоротших шляхів, математичне моделювання фізичних процесів накопичення шуму ASE в оптичних підсилювачах, імітаційне моделювання мережевого трафіку з використанням мови програмування Python.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при проектуванні нових та модернізації існуючих волоконно-оптичних ліній зв'язку, при розробці програмного забезпечення для SDN-контролерів управління оптичними мережами, а також у навчальному процесі при вивченні дисциплін за напрямом «Телекомунікації».

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1	12
АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	12
1.1. Спектральна неперервність та проблема фрагментації ресурсу	13
1.2. Когерентні технології та фізичні межі прозорості оптичного тракту	14
1.3. Концепція «Impairment-Aware» управління та роль регенерації	15
1.4. Обґрунтування актуальності розробки нових евристичних методів.....	16
1.5. Критерії оптимізації.....	21
РОЗДІЛ 2	27
ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ ТА ОГЛЯД МЕТОДІВ ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ.....	27
2.1. Вплив когерентного детектування та цифрової компенсації дисперсії	30
2.3. Показник якості передачі (QoT) та OSNR.....	36
РОЗДІЛ 3	44
РОЗРОБКА ЕВРИСТИЧНОГО МЕТОДУ ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ (IA-RWA)	44
3.1. Концепція методу IA-RWA-R.....	49
3.2. Блок ініціалізації топології та ресурсів.....	53
3.3. Блок оцінки фізичної якості сигналу	53
3.4. Блок інтелектуальної регенерації	54
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	59
РОЗДІЛ 4	61
ОХОРОНА ПРАЦІ	61
4.1. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори.....	61
4.2. Аналіз умов праці та розробка заходів захисту	62
4.3. Пожежна безпека на робочому місці	64
4.4. Розрахунок засобів пожежогашіння.....	65
РОЗДІЛ 5	68
ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	68
5.1. Джерела та види впливу на навколишнє середовище.....	68
5.2. Характеристика найбільш вагомого впливу та його наслідки	69
5.3. Рекомендації щодо зменшення негативного впливу	69
ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

3R (*Re-amplifying, Re-shaping, Re-timing*) — повна регенерація сигналу (підсилення, відновлення форми та синхронізації).

ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) — підсилене спонтанне випромінювання (основне джерело шуму в оптичних підсилювачах).

BER (*Bit Error Rate*) — частота бітових помилок у цифровому потоці.

CD (*Chromatic Dispersion*) — хроматична дисперсія в оптичному волокні.

D (*Destination node*) — вузол призначення (адресат) запиту на з'єднання.

DEMUX (*Demultiplexer*) — демультимплексор (пристрій для розділення групового оптичного сигналу на окремі канали).

DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) — щільне спектральне мультимплексування каналів.

EDFA (*Erbium-Doped Fiber Amplifier*) — ербієвий волоконно-оптичний підсилювач.

IA (*Impairment-Aware*) — з урахуванням фізичних спотворень (обмежень) сигналу.

IA-RWA-R (*Impairment-Aware RWA with Regeneration*) — алгоритм RWA з урахуванням фізичних спотворень та можливості регенерації.

ITU-T — Сектор телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку.

K (*K-shortest paths*) — кількість найкоротших шляхів, що розглядаються алгоритмом для вибору оптимального маршруту.

MUX (*Multiplexer*) — мультимплексор (пристрій для об'єднання декількох оптичних каналів в один груповий сигнал).

OSNR (*Optical Signal-to-Noise Ratio*) — відношення потужності оптичного сигналу до потужності шуму.

OSNR_{threshold} — мінімально допустиме (порогове) значення OSNR для забезпечення заданої якості зв'язку.

P_i (*Path*) — і-й маршрут у списку доступних шляхів між парою вузлів.

ROADM (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer*) — реконфігурований оптичний мультимплексор вводу-виводу.

RWA (*Routing and Wavelength Assignment*) — задача маршрутизації та призначення довжин хвиль в оптичних мережах.

S (*Source node*) — вузол-джерело, від якого надходить запит на встановлення з'єднання.

WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) — технологія спектрального мультиплексування (ущільнення) каналів.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку глобального інформаційного суспільства характеризується безпрецедентним зростанням обсягів трафіку, що генерується мультимедійними сервісами, хмарними обчисленнями та системами штучного інтелекту. Основним технологічним фундаментом, який забезпечує функціонування магістральних транспортних мереж, є технологія щільного спектрального ущільнення каналів (WDM). Вона дозволяє передавати десятки терабіт інформації по одному оптичному волокну, використовуючи різні довжини хвиль. Проте, із впровадженням швидкостей 100 Гбіт/с і вище, традиційні методи управління мережевими ресурсами вичерпали свій потенціал.

Головна проблема полягає в тому, що класичні алгоритми маршрутизації розглядають мережу як ідеальну математичну модель, ігноруючи реальні фізичні спотворення в оптичному волокні. У реальних умовах сигнал деградує через накопичення шуму підсилувачів, дисперсію та нелінійні ефекти. Це призводить до того, що обраний алгоритмом маршрут може бути вільним логічно, але непридатним фізично через низьку якість сигналу. Крім того, обмежений ресурс регенераторів та спектральна фрагментація створюють додаткові бар'єри для масштабування мереж. Таким чином, розробка інтелектуальних методів маршрутизації та призначення довжин хвиль, які враховують фізичні обмеження (Impairment-Aware RWA), є критично важливою науково-технічною задачею для забезпечення надійності та економічної ефективності сучасних телекомунікаційних систем.

Об'єкт дослідження – процеси передачі та обробки оптичних сигналів у високонавантажених магістральних мережах спектрального ущільнення (WDM).

Предмет дослідження – алгоритми маршрутизації та розподілу спектрального ресурсу з урахуванням фізичних обмежень і необхідності регенерації сигналу.

Мета кваліфікаційної роботи – зниження ймовірності блокування запитів у WDM-мережах шляхом розробки інтелектуального методу вибору маршрутів, який

враховує деградацію оптичного відношення сигнал/шум та адаптивно призначає точки регенерації.

Метод дослідження – методи теорії графів для пошуку найкоротших шляхів, математичне моделювання фізичних процесів накопичення шуму ASE в оптичних підсилювачах, імітаційне моделювання мережевого трафіку з використанням мови програмування Python.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні евристичного підходу до задачі RWA через впровадження механізму адаптивної регенерації, який, на відміну від існуючих рішень, дозволяє динамічно змінювати точки відновлення сигналу залежно від поточного стану фізичного рівня та інтенсивності трафіку. Це забезпечує зниження імовірності блокування запитів при збереженні заданих параметрів якості сервісу (QoS).

Розроблений програмний інструментарій та запропонований метод IA-RWA-R можуть бути використані операторами зв'язку для оптимізації планування магістральних мереж, що дозволить зменшити кількість дорогого регенераційного обладнання та підвищити ефективність використання наявного спектрального ресурсу волоконно-оптичних ліній.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Сучасний етап розвитку глобальних інформаційних систем характеризується вибуховим зростанням обсягів даних, що передаються. Рушійними силами цього процесу є повсюдне впровадження хмарних обчислень, стрімке зростання популярності відеострімінгових сервісів високої чіткості (4K/8K), розгортання мобільних мереж п'ятого покоління (5G), а також інтенсивний розвиток технологій Інтернету речей (IoT) та аналізу великих даних (Big Data) [1, 2]. Згідно з прогнозами провідних аналітичних агенцій, сукупний світовий IP-трафік продовжуватиме подвоюватися кожні два-три роки, що створює безпрецедентне навантаження на існуючу телекомунікаційну інфраструктуру.

Традиційні транспортні мережі, побудовані на основі мідних кабельних систем (таких як технології xDSL або коаксіальний кабель), досягли своєї фундаментальної межі пропускної здатності. Вони стикаються з непереборними фізичними обмеженнями, такими як високе затухання сигналу зі збільшенням відстані та частоти, а також низька стійкість до електромагнітних завад [3]. Це робить їх непридатними для задоволення потреб магістральних та міських мереж (MAN/WAN) у терабітному масштабі.

Вирішенням цієї "кризи пропускної здатності" стало впровадження технологій оптичної передачі даних. Оптичне волокно як фізичне середовище передачі має низку унікальних переваг:

Надвисока пропускна здатність: Теоретичний потенціал одного оптичного волокна вимірюється десятками терабіт на секунду (Тбіт/с) завдяки широкій смузі пропускання (близько 25 ТГц) у вікнах прозорості.

Наднизьке затухання сигналу: Сучасні волокна мають затухання порядку 0.2 дБ/км, що дозволяє передавати дані на десятки і навіть сотні кілометрів без необхідності регенерації сигналу.

Еволюція технологій спектрального ущільнення та архітектурна трансформація мереж

Сучасний етап розвитку інфокомунікацій характеризується фундаментальною залежністю світової економіки від пропускної здатності магістральних каналів зв'язку. Еволюція оптичних мереж пройшла шлях від систем передачі з одним інформаційним каналом у волокні до складних систем щільного спектрального ущільнення (DWDM), що оперують сотнями каналів. Спочатку WDM-системи розглядалися лише як засіб збільшення ємності ліній «точка-точка» для подолання дефіциту волоконного ресурсу. Однак із впровадженням концепції повністю оптичних мереж (All-Optical Networks) фокус досліджень змістився на створення динамічних архітектур, де комутація сигналів відбувається безпосередньо у спектральній області без проміжного перетворення в електричний сигнал.

Впровадження переконфігурованих оптичних мультиплексорів введення-виведення (ROADM) дозволило реалізувати гнучку маршрутизацію довжин хвиль у вузлах мережі. Це зумовило перехід від статичного планування ресурсів до динамічного, де шлях розповсюдження сигналу може змінюватися залежно від поточного навантаження або аварійних ситуацій. Проте така гнучкість породила низку нових науково-технічних проблем, найскладнішою з яких є ефективне управління спектральним ресурсом у межах складних графових топологій. Задача маршрутизації та призначення довжин хвиль (RWA) стала ключовим чинником, що визначає продуктивність всієї транспортної системи.

1.1. Спектральна неперервність та проблема фрагментації ресурсу

У сучасних WDM-мережах без конверсії довжини хвилі діє обмеження неперервності (wavelength continuity constraint), яке вимагає, щоб оптичний сигнал займав один і той самий спектральний слот на всіх ділянках обраного маршруту. Це створює значні труднощі при обслуговуванні запитів у розгалужених мережах: навіть за наявності вільних частотних інтервалів на окремих ділянках, відсутність спільної вільної «хвилі» призводить до відмови у встановленні з'єднання. Цей ефект відомий

як спектральна фрагментація, що за своєю природою нагадує фрагментацію оперативної пам'яті у комп'ютерних системах. При динамічному надходженні та завершенні сесій зв'язку спектральний простір волокна стає розрідженим, що перешкоджає виділенню суцільних блоків для високих швидкостей передачі (наприклад, для суперканалів 400 Гбіт/с та вище). [11]

Наукові дослідження показують, що ігнорування ефекту фрагментації призводить до штучного зниження пропускної здатності мережі на 20–30%. Для вирішення цієї проблеми розробляються інтелектуальні стратегії призначення хвиль, такі як First-Fit, Least-Used або Random, кожна з яких має свої переваги за різних умов навантаження. Проте в умовах переходу до гнучкої сітки частот (Flexible Grid) задача стає ще складнішою, оскільки ширина каналу тепер не є фіксованою, а залежить від обраного формату модуляції та символної швидкості.

1.2. Когерентні технології та фізичні межі прозорості оптичного тракту

Паралельно з розвитком спектральних технологій відбулася революція на фізичному рівні, пов'язана з впровадженням когерентного детектування та цифрової обробки сигналів (DSP). Це дозволило використовувати складні формати фазової модуляції (QPSK, n-QAM) та реалізувати компенсацію хроматичної дисперсії безпосередньо в електроніці приймача. Однак когерентні системи виявилися більш чутливими до нелінійних ефектів волокна та фазових шумів.

Основним фізичним обмеженням для сучасних магістралей є накопичення шуму підсиленого спонтанного випромінювання (ASE) у каскадах ербієвих підсилювачів (EDFA). Кожен проліт волокна вносить загасання, яке компенсується підсилювачем, проте кожен підсилювач неминуче знижує оптичне відношення сигнал/шум (OSNR). При досягненні критичного порога OSNR імовірність помилок (BER) зростає настільки, що навіть алгоритми упереджувальної корекції помилок (FEC) не здатні відновити дані. Це формує поняття «межі прозорості» оптичного шляху — максимальної відстані, на яку сигнал може бути переданий без повної регенерації. У

великих континентальних мережах довжина маршруту часто перевищує цю межу, що вимагає впровадження вузлів 3R-регенерації.

1.3. Концепція «Impairment-Aware» управління та роль регенерації

Традиційно мережі проектувалися з великим енергетичним запасом (system margin), щоб гарантувати роботу в найгірших умовах. Проте сучасні вимоги до економічної ефективності вимагають більш прецизійного підходу. Виникає необхідність у методах маршрутизації, що враховують фізичні спотворення (Impairment-Aware RWA). Такі методи інтегрують аналітичні моделі розрахунку OSNR безпосередньо в процес пошуку шляху.

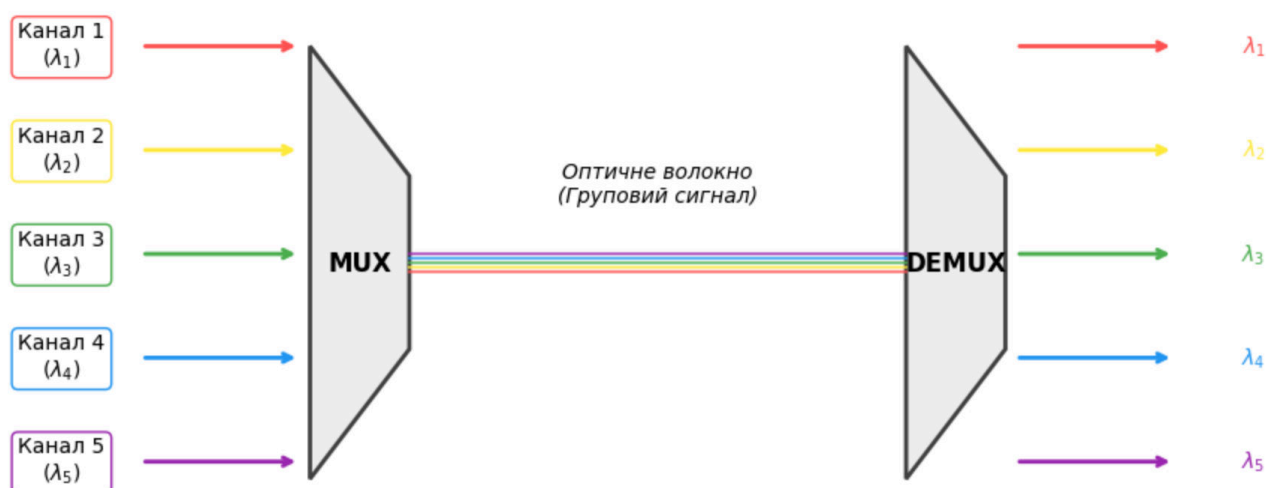


Рис. 1.1. Принцип спектрального мультиплексування в оптичних мережах

Регенерація сигналу (3R — Re-amplification, Re-shaping, Re-timing) є дорогою операцією, оскільки вона потребує перетворення оптичного сигналу в електричний і назад. Тому наукова задача полягає в оптимізації кількості та місць розташування регенераторів. Замість статичного встановлення регенераційних вузлів, сучасні методи, такі як запропонований у роботі IA-RWA-R, використовують адаптивний підхід: регенератор задіюється лише тоді, коли математична модель фізичного рівня прогнозує падіння OSNR нижче допустимого порога для конкретного маршруту. Це

дозволяє реалізувати концепцію «програмно-керованої прозорості», де мережа сама підлаштовується під фізичні параметри ліній.

1.4. Обґрунтування актуальності розробки нових евристичних методів

Підсумовуючи аналіз, можна стверджувати, що існуючі стандартні алгоритми маршрутизації не здатні повною мірою задовольнити потреби сучасних WDM-мереж через їх відірваність від фізичних реалій середовища передачі. Точні математичні методи оптимізації, такі як лінійне програмування, мають занадто високу обчислювальну складність для динамічних мереж великої розмірності. Саме тому розробка та вдосконалення евристичних методів, які здатні за доли секунди знаходити фізично придатні та спектрально ефективні маршрути з урахуванням регенерації, є критично важливим напрямком досліджень.

Дана робота спрямована на подолання розриву між мережевою логікою та фізикою процесів у волокні, що дозволить підвищити надійність зв'язку та знизити капітальні витрати на розгортання магістральних мереж нового покоління.

Для того щоб максимально ефективно використати гігантську смугу пропускання оптичного волокна, була розроблена технологія спектрального ущільнення каналів WDM (Wavelength Division Multiplexing) [5, 6]. Суть технології WDM полягає в тому, що по одному оптичному волокну одночасно передається безліч незалежних інформаційних каналів, кожен на своїй унікальній довжині хвилі (тобто, на своєму "кольорі" світла).[12]

Використовуючи поширену аналогію, якщо оптичне волокно — це автомагістраль, то ранні системи (SDH) використовували лише одну смугу руху. Технологія WDM "розділяє" цю магістраль на десятки або сотні паралельних смуг, кожна з яких несе власний високошвидкісний потік даних (наприклад, 10, 40 або 100 Гбіт/с).

Залежно від щільності розміщення каналів, розрізняють грубе (CWDM) та щільне (DWDM) ущільнення. У магістральних мережах, де потрібна максимальна пропускна здатність, домінує технологія DWDM (Dense WDM), яка використовує

вужьку сітку частот (зазвичай 100 ГГц або 50 ГГц згідно зі стандартами ITU-T), дозволяючи "упакувати" 40, 80, 120 або навіть більше каналів в одному волокні [5].

Сучасний етап розвитку глобальних телекомунікаційних інфраструктур характеризується експоненціальним зростанням обсягів трафіку, що зумовлено масовим впровадженням хмарних обчислень, відеосервісів надвисокої чіткості та концепції Інтернету речей. В основі транспортного забезпечення цих процесів лежить технологія спектрального ущільнення каналів (WDM), яка дозволяє багаторазово підвищити пропускну здатність існуючих волоконно-оптичних ліній зв'язку без необхідності прокладання нових кабельних систем. Науковий інтерес до цієї технології перемістився з площини простого збільшення кількості спектральних каналів у площину інтелектуального управління наявним ресурсом, що стає критично важливим в умовах обмеженого частотного діапазону та зростаючих вимог до енергоефективності мережевого обладнання.

Архітектурна еволюція WDM-мереж пройшла шлях від простих лінійних систем типу «точка-точка» до складних багатозв'язних топологій з можливістю динамічної переконфігурації на оптичному рівні (ROADM). Це призвело до виникнення фундаментальної наукової задачі — ефективного призначення маршрутів та довжин хвиль (задача RWA). Складність цієї задачі полягає у необхідності дотримання умови неперервності довжини хвилі, згідно з якою сигнал повинен займати однаковий частотний слот на всьому шляху розповсюдження від джерела до отримувача за відсутності засобів конверсії. Будь-яка похибка в алгоритмах планування на цьому етапі призводить до явища спектральної фрагментації, коли сумарний вільний ресурс у волокні залишається значним, проте через розрізненість вільних слотів стає неможливим встановлення нових високошвидкісних з'єднань.

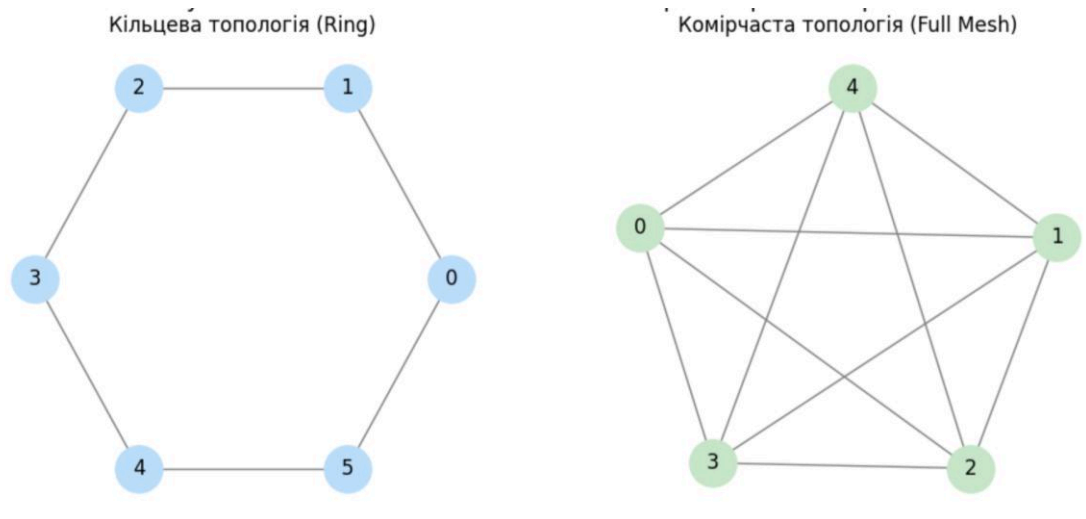


Рис. 1.2. Основні топології оптичних транспортних мереж

Окрім логічних обмежень спектра, на перший план виходять фізичні бар'єри, зумовлені природою розповсюдження світла в неідеальному середовищі. Зі збільшенням дальності передачі та щільності каналів у волокні активізуються процеси деградації сигналу, серед яких найбільш руйнівними є накопичення адитивного шуму підсилювачів та нелінійні спотворення Керра. У традиційних мережах ці проблеми вирішувалися шляхом надлишкового проектування, коли параметри системи розраховувалися для найгіршого випадку. Проте такий підхід є економічно неефективним для сучасних гнучких мереж. Виникає гостра потреба у розробці методів, що здатні в реальному часі оцінювати «прозорість» маршруту та приймати рішення про необхідність 3R-регенерації сигналу лише у тих вузлах, де це дійсно виправдано фізичним станом каналу.

Науковий аналіз світового досвіду розробки алгоритмів RWA показує стійку тенденцію до переходу від статичного планування до адаптивних систем управління, що враховують спотворення (Impairment-Aware RWA). [13] Головна суперечність тут полягає у конфлікті між обчислювальною складністю точних математичних методів та необхідністю оперативного реагування на динамічні запити користувачів. Використання евристичних підходів, що базуються на інтелектуальному аналізі топології та прогнозуванні фізичної якості сигналу, є найбільш перспективним шляхом вирішення цієї проблеми. Це дозволяє не лише знизити імовірність

блокування запитів, а й забезпечити стабільність роботи мережі в умовах непередбачуваних пікових навантажень.

На основі проведеного огляду можна стверджувати, що подальший прогрес у галузі оптичних транспортних систем неможливий без створення інтегрованих алгоритмічних рішень, які б поєднували в собі глибоке розуміння фізики процесів у волокні з сучасними методами оптимізації графів. Розробка таких методів дозволить реалізувати концепцію «програмно-конфігурованих оптичних мереж» (SDON), де кожен елемент ресурсу — чи то спектральний слот, чи то потужність регенератора — використовується з максимальною ефективністю. Саме в цьому контексті виконується дана дипломна робота, спрямована на вдосконалення процесів управління ресурсами у WDM-мережах нового покоління.

Побудова WDM-мережі базується на взаємодії кількох ключових компонентів: Мультиплексори (MUX) та Демультіплексори (DEMUX): Це пасивні оптичні пристрої, що виконують функцію "оптичної призми". На передавальному кінці MUX об'єднує (мультиплексує) сигнали з різними довжинами хвиль ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$) в один сумарний промінь, який подається у волокно. На приймальному кінці DEMUX виконує зворотну операцію — розділяє (демультіплексує) сумарний сигнал на окремі канали.

Транспондери – Це активні пристрої, що виконують функцію інтерфейсу між клієнтським обладнанням (наприклад, Ethernet-комутатором або IP-маршрутизатором) та WDM-мережею. Транспондер приймає "короткохвильовий" або "сірий" оптичний сигнал від клієнта, виконує оптико-електронно-оптичне (О-Е-О) перетворення, і генерує новий, стабільний оптичний сигнал на одній з довжин хвиль сітки DWDM ("кольоровий" сигнал) [7].

Оптичні підсилювачі (Optical Amplifiers) – Революційним проривом, що уможливив побудову протяжних WDM-мереж, стала поява оптичних підсилювачів на волокні, легованому ербієм (EDFA) [8]. На відміну від старих регенераторів, які вимагали О-Е-О перетворення для кожного каналу окремо, EDFA підсилює всі довжини хвиль одночасно безпосередньо в оптичному домені. Це дозволяє

компенсувати згасання сигналу на довгих ділянках волокна (80-120 км) без дорогого проміжного обладнання.

Оптичні комутатори (ОХС) та ROADM: Якщо перші WDM-системи були лише "точка-точка", то для побудови повноцінної мережі необхідні вузли, здатні комутувати оптичні сигнали. Сучасні мережі будуються на базі ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) — переконфігурованих оптичних мультиплексорів [9]. ROADM — це "інтелектуальний" мережевий вузол, який дозволяє гнучко керувати трафіком: програмно "знімати" (Drop) з волокна ті довжини хвиль, які призначені цьому вузлу, "додавати" (Add) нові сигнали, а всі "транзитні" довжини хвиль пропускати далі до наступних вузлів без О-Е-О перетворення. Саме комбінація цих елементів дозволяє створити прозору оптичну транспортну мережу. Ключовим поняттям у такій мережі є "світловий шлях" (lightpath). Це наскрізний оптичний канал (з'єднання "точка-точка") між двома вузлами мережі, який може проходити через кілька проміжних вузлів ROADM, залишаючись при цьому в оптичному домені [10]. Побудова таких світлових шляхів для задоволення потреб трафіку і є основним завданням проектування WDM-мережі.

Проблема маршрутизації та призначення довжин хвиль (Routing and Wavelength Assignment, RWA). Проблема RWA (Routing and Wavelength Assignment) є ключовою задачею оптимізації в мережах WDM (Wavelength Division Multiplexing). Вона виникає при необхідності встановити світловий шлях (lightpath) — наскрізний оптичний канал між двома вузлами (зазвичай, комутованими за допомогою ROADM-вузлів).

Суть проблеми полягає в тому, щоб для кожного запиту на з'єднання одночасно визначити:

1. Маршрут (Routing): фізичний шлях (послідовність волокон) від джерела до приймача.
 2. Призначення довжини хвилі (Wavelength Assignment): конкретну довжину хвилі для використання на всіх ділянках обраного маршруту.
- Обмеження (Constraints)

Для успішного встановлення світлового шляху мають бути виконані два основні обмеження:

Обмеження зіткнення хвиль (Wavelength Clash Constraint)

Полягає в тому, що жодне фізичне оптичне волокно не може одночасно передавати два або більше незалежних світлових шляхи на одній і тій же довжині хвилі. Тобто, якщо два маршрути спільно використовують один і той самий лінк, їм мають бути призначені різні довжини хвиль. Це є основним критерієм уникнення конфліктів при розподілі ресурсів.

Обмеження неперервності хвилі (Wavelength Continuity Constraint, CCW)

Це обмеження вимагає, щоб одна й та сама довжина хвилі використовувалася на всіх проміжних оптичних лінках, що формують обраний маршрут, від вихідного вузла до кінцевого. Оскільки сучасні мережі, побудовані на базі ROADM, є оптично прозорими, проміжне О-Е-О перетворення (зміна довжини хвилі) є неможливим без спеціального обладнання (Wavelength Converter), яке, як правило, відсутнє.

1.5. Критерії оптимізації

Проблема RWA є NP-повною, і її розв'язання спрямоване на оптимізацію використання дефіцитних ресурсів мережі WDM. Основні критерії: Мінімізація кількості використовуваних довжин хвиль. Це основний критерій для статичного трафіку, метою якого є зменшення загальної кількості необхідних довжин хвиль ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$). Мінімальна кількість хвиль дорівнює максимальному навантаженню на найзавантаженіше волокно мережі (спільному використанню).

Мінімізація ймовірності блокування запитів: Критерій використовується переважно в динамічних мережах, де запити надходять у реальному часі. Метою є мінімізація відсотка запитів, які не можуть бути задоволені через відсутність вільного маршруту та/або вільної довжини хвилі, що задовольняє обмеження неперервності.

Розв'язання проблеми RWA є одним із найбільш досліджуваних питань в оптичних мережах, оскільки воно безпосередньо впливає на ефективність використання ресурсів WDM. У науковій літературі виділяють два основні класи

підходів: точні методи (засновані на математичній оптимізації) та наближені методи (евристики та метаевристики).

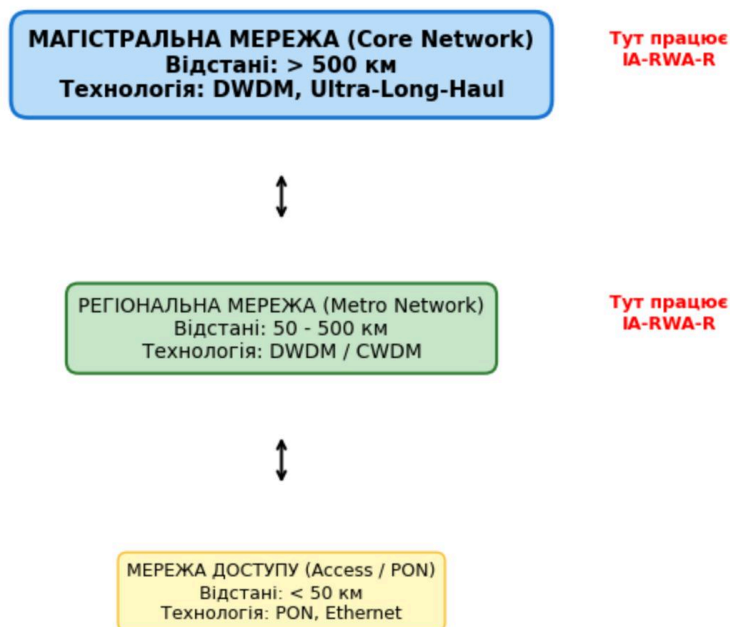


Рис. 1.3 Ієрархічна структура сучасних оптичних мереж зв'язку

Для невеликих і середніх мереж проблема RWA може бути сформульована як задача цілочисельного лінійного програмування (Integer Linear Programming, ILP). ILP-формулювання дозволяє знайти оптимальне рішення, яке гарантовано мінімізує один із критеріїв, наприклад, кількість необхідних довжин хвиль або загальну вартість маршрутизації.[14]

Приклад досліджень: У роботах представлено огляд та порівняння різних ILP-формулювань для проблеми RWA, зокрема, розглядаються моделі для симетричного та асиметричного трафіку.

Оскільки RWA є NP-повною задачею, точні ILP-методи стають обчислювально надто складними для великомасштабних та динамічних мереж. Для таких сценаріїв застосовуються наближені методи — евристики (heuristics), які швидко знаходять достатньо близьке до оптимального рішення.

Евристики зазвичай поділяються на дві частини, які розв'язуються послідовно: спочатку обирається маршрут, а потім призначається довжина хвилі:

1. Маршрутизація: Використовуються алгоритми пошуку найкоротшого шляху (наприклад, алгоритм Дейкстри, де вага лінка може бути динамічною та залежить від завантаження хвиль).
2. Призначення довжини хвилі: Після вибору маршруту застосовується один із алгоритмів призначення:

First-Fit (FF): Призначається перша доступна довжина хвилі з фіксованого списку, починаючи з найменшого індексу

Next-Fit (NF): Призначається наступна доступна довжина хвилі після тієї, що була використана в попередньому з'єднанні.

Random Fit (RF): Призначається випадкова доступна довжина хвилі.

Крім того, для розв'язання RWA широко застосовуються метаевристики, що базуються на імітації природних процесів, наприклад, генетичні алгоритми (Genetic Algorithm, GA), імітація відпалу (Simulated Annealing, SA) та пошук з табу (Tabú Search, TS). Ці методи використовуються для розробки більш гнучких стратегій в умовах динамічного трафіку.

Для складних або особливо великих систем застосовуються метаевристичні підходи — генетичні алгоритми, імітація відпалу, алгоритми табу та інші еволюційні стратегії. Вони досліджують широкий інтервал розв'язків і здатні уникати локальних мінімумів, що є особливо важливим для високоефективних, багатокритеріальних задач.

Проблема врахування фізичних спотворень у процесі маршрутизації та призначення довжин хвиль є наріжним каменем у розвитку сучасних високоефективних систем спектрального ущільнення. У сучасних реаліях задача RWA переходить із суто комбінаторної площини в область комплексного фізико-технічного моделювання. Традиційні підходи до побудови маршрутів, що базуються виключно на топологічних метриках, таких як мінімальна кількість транзитних вузлів або найменша фізична відстань, виявляються недостатніми для когерентних мереж. Науковий аспект цієї проблеми полягає в тому, що кожен обраний шлях має свій унікальний енергетичний бюджет, який вичерпується в міру розповсюдження сигналу крізь довгі ділянки волокна. Під впливом лінійних та нелінійних спотворень

поступово знижується оптичне відношення сигнал/шум, і якщо алгоритм планування ігнорує ці чинники, встановлене з'єднання може виявитися непрацездатним через високий рівень бітових помилок. Таким чином, виникає концепція врахування фізичних спотворень, яка вимагає глибокої інтеграції алгоритмів маршрутизації з параметрами фізичного рівня мережі.

Оскільки накопичення шуму підсилювачів та дисперсійні ефекти обмежують дальність прозорого розповсюдження сигналу, критично важливим стає визначення стратегії розміщення регенераторів. Процеси повного відновлення сигналу, що включають регенерацію амплітуди, форми та часових параметрів імпульсу, дозволяють нівелювати накопичені спотворення, проте їхнє впровадження у кожному вузлі мережі є економічно недоцільним. З наукової точки зору, головним завданням є пошук оптимального балансу між кількістю точок регенерації та імовірністю блокування запитів у мережі. Це перетворює стандартну задачу управління ресурсами на динамічний процес, де регенерація виступає не як статичний елемент архітектури, а як гнучкий ресурс, що активується лише за умови падіння якості сигналу нижче критичного порога.[16]

Аналіз існуючих рішень у цій галузі показує, що точні методи математичної оптимізації демонструють високу ефективність лише для статичних мереж невеликої розмірності. В умовах реальних магістральних мереж, що характеризуються динамічним трафіком та складною топологією, обчислювальна складність таких методів зростає експоненціально, що зумовлює актуальність розробки вдосконалених евристичних алгоритмів. Запропонований у роботі метод спрямований на вирішення фундаментального протиріччя між швидкістю прийняття рішення та точністю оцінки фізичного стану каналу. Використання інтелектуальних стратегій призначення довжин хвиль у поєднанні з аналітичними моделями дозволяє не просто знаходити вільний спектральний слот, а й прогнозувати стабільність майбутнього з'єднання. Такий підхід забезпечує інтелектуалізацію управління ресурсами, дозволяючи мінімізувати кількість дорогого регенераційного обладнання при одночасному підвищенні загальної пропускної здатності та надійності транспортної мережі.

На основі проведеного аналізу встановлено, що ключовим напрямком підвищення ефективності систем зв'язку є перехід до адаптивних методів управління, які здатні в реальному часі реагувати на зміну фізичних параметрів середовища передачі. Виявлено, що ігнорування параметрів енергетики сигналу на етапі планування призводить до неефективного використання ємності волокна. Визначені теоретичні положення формують необхідний базис для подальшого розроблення математичного апарату та програмного інструментарію, що дозволить реалізувати концепцію інтелектуальної маршрутизації у складних телекомунікаційних інфраструктурах.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У першому розділі було проведено комплексне дослідження сучасного стану та перспектив розвитку оптичних транспортних мереж на основі технології спектрального ущільнення каналів. Аналіз показав, що впровадження систем DWDM є найбільш раціональним шляхом розширення пропускної здатності магістральних ліній зв'язку, оскільки це дозволяє використовувати існуючу інфраструктуру волоконно-оптичних кабелів для передачі великої кількості незалежних інформаційних потоків. Водночас було встановлено, що перехід до складних топологій і динамічного управління ресурсами висуває нові вимоги до процесів маршрутизації та призначення довжин хвиль.

Особливу увагу в ході огляду було приділено проблемі фізичних спотворень, які виникають під час поширення сигналу на великі відстані. Накопичення шуму підсиленого спонтанного випромінювання в каскадах підсилювачів, а також вплив дисперсії та нелінійності волокна суттєво обмежують дальність безпомилкової передачі даних. Це обумовлює актуальність переходу від класичних підходів RWA до інтелектуальних методів, що здатні враховувати якісні показники сигналу ще на етапі вибору маршруту.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано необхідність розробки вдосконаленого методу IA-RWA-R, який інтегрує в себе механізми оцінки відношення сигналу до шуму та оптимального розміщення вузлів 3R-регенерації. Такий підхід дозволить забезпечити необхідну якість зв'язку для кожного запиту при одночасному підвищенні ефективності використання спектрального ресурсу та дороговартісного обладнання відновлення сигналу. Таким чином, результати першого розділу сформуvalи необхідне теоретичне підґрунтя для подальшої формалізації задачі та побудови математичної моделі функціонування мережі у другому розділі.

РОЗДІЛ 2

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАДАЧІ ТА ОГЛЯД МЕТОДІВ ПРОЄКТУВАННЯ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

Фундаментальною основою для розробки інтелектуальних методів управління ресурсами в оптичних мережах є побудова адекватної математичної моделі фізичного рівня. У системах зі спектральним ущільненням процес передачі інформації супроводжується безперервною деградацією сигналу, яка зумовлена як властивостями самого середовища розповсюдження, так і принципами функціонування активного обладнання. Ключовим завданням моделювання є визначення аналітичних залежностей, які дозволяють кількісно оцінити якість сервісу на виході складного багатопрольотного тракту. Основним критерієм такої оцінки виступає оптичне відношення сигнал/шум, яке інтегрує в собі вплив усіх лінійних та нелінійних факторів. Процес розповсюдження світлової хвилі в одномодовому волокні супроводжується експоненціальним згасанням потужності, що вимагає впровадження систем періодичного підсилення. Використання ербієвих підсилювачів дозволяє підтримувати рівень сигналу, проте водночас вносить у лінію адитивний шум підсиленого спонтанного випромінювання. Наукова складність полягає в тому, що цей шум має квантову природу і накопичується вздовж усього маршруту, створюючи шумовий поріг, який обмежує максимальну дальність передачі. Математична інтерпретація цього явища базується на врахуванні коефіцієнта інверсії населеності та енергії фотонів, що дозволяє розрахувати спектральну щільність шуму для кожної ділянки підсилення. У багатопрольотних магістралях сумарна потужність шуму ASE визначається як інтегральна сума внесків від кожного індивідуального підсилювача, що призводить до нелінійної деградації OSNR при збільшенні кількості транзитних вузлів. Окрім адитивних шумів, вагомий внесок у спотворення сигналу вносять дисперсійні явища та нелінійні ефекти Керра. Хроматична дисперсія спричиняє групову затримку спектральних компонент, що призводить до міжсимвольної інтерференції, тоді як нелінійності, такі як самофазова модуляція та

чотирихвильове змішування, викликають перехресні завади між сусідніми WDM-каналами. У сучасних когерентних системах ці ефекти часто моделюються як додатковий нелінійний шум, що має гауссівський розподіл. Це дозволяє розширити класичну модель OSNR до ефективного значення, яке враховує не лише теплові та квантові шуми, а й нелінійну інтерференцію, зумовлену високою щільністю потужності в серцевині волокна. Для встановлення кореляції між фізичними параметрами та якістю передачі даних використовується статистичний параметр, відомий як Q-фактор. Він відображає відносну віддаль між розподілами імовірностей для логічних станів сигналу і є безпосереднім індикатором імовірності появи помилкових бітів.[17] Математичне моделювання цього зв'язку через додаткову функцію помилок дозволяє визначити критичний поріг, нижче якого функціонування мережі стає неможливим без впровадження засобів корекції помилок або повної регенерації сигналу. Таким чином, розроблена модель стає інструментарієм для прогнозування поведінки системи в умовах реальної експлуатації. Важливим аспектом моделювання є також врахування динаміки зміни параметрів мережі. Оскільки спектральне навантаження у волокні може змінюватися в реальному часі, математичний апарат повинен враховувати ефекти насичення підсилювачів та спектральну залежність коефіцієнта підсилення. Це потребує впровадження ітераційних методів розрахунку, які дозволяють з високою точністю визначати параметри якості для кожного окремого оптичного каналу незалежно від загальної кількості активних довжин хвиль у системі. Побудована таким чином модель створює необхідний науковий фундамент для реалізації алгоритмів маршрутизації, що будуть детально розглянуті в наступному розділі.

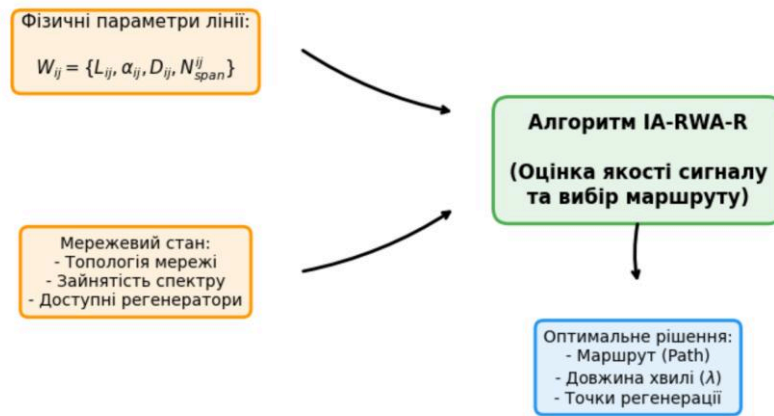


Рис. 2.1. Концептуальна модель врахувань фізичних обмежень при вирішенні задачі RWA

У даному розділі розроблено системний аналіз задачі проектування оптичної мережі WDM. Розглядаю наразі математичну постановку задачі маршрутизації та призначення довжин хвиль (RWA), аналізую алгоритми агрегації трафіку та методи врахування фізичних обмежень каналу. Саме обґрунтовую вибір евристичних методів для розв'язання задачі оптимізації мережі зі статичним трафіком.

В умовах експлуатації сучасних магістральних мереж, що використовують високу щільність спектрального ущільнення, ключовим фактором, який обмежує пропускну здатність, є нелінійність середовища розповсюдження. Науковий аналіз показує, що при досягненні певного порога потужності в серцевині волокна починають виникати нелінійні ефекти Керра, зумовлені залежністю показника заломлення кварцового скла від інтенсивності світлового поля. Найбільш критичним серед них є ефект самофазової модуляції, який спричиняє нелінійний набіг фази імпульсу, що призводить до розширення спектра та значних спотворень при когерентному детектуванні. Окрім внутрішньоканальних нелінійностей, виникає складний процес перехресної фазової модуляції, де фаза сигналу в одному спектральному каналі модулюється інтенсивністю сигналів у сусідніх каналах. Математичне моделювання цих процесів у межах даної роботи базується на моделі "Гауссівського шуму" (GN-model), яка дозволяє представити нелінійні спотворення як адитивний нелінійний шум. Така апроксимація є надзвичайно ефективною для

систем з високою дисперсією, оскільки вона дозволяє інтегрувати нелінійні ефекти безпосередньо в розрахунок загального OSNR, створюючи єдину метрику якості для кожного маршруту.

Математичне обґрунтування застосування упереджувальної корекції помилок (FEC) Важливим компонентом сучасної моделі фізичного рівня є врахування алгоритмів упереджувальної корекції помилок (Forward Error Correction). Наукова доцільність впровадження FEC полягає у можливості успішного відновлення інформації навіть при відносно високих значеннях BER на вході приймача (так званий Pre-FEC BER). Математично вплив FEC описується як "чисте посилення кодування" (Net Coding Gain), що дозволяє віртуально підвищити OSNR системи на величину від 6 до 12 дБ залежно від складності коду. Врахування цього фактора в математичній моделі дозволяє гнучко налаштовувати порогові значення для алгоритму IA-RWA-R. Замість фіксованого порога якості ми впроваджуємо адаптивний поріг, який враховує надмірність кодування та здатність системи до виправлення помилок. Це дозволяє подовжити дистанцію прозорості передачі сигналу без встановлення дорогої 3R-регенерації, що є ключовим аспектом економічної оптимізації мережі. Моделювання процесу корекції базується на статистичних методах оцінки залишкової імовірності помилок, що забезпечує високу достовірність прогнозів працездатності каналів.

2.1. Вплив когерентного детектування та цифрової компенсації дисперсії

Перехід до когерентних методів прийому радикально змінив підхід до моделювання фізичного рівня. Використання місцевого гетеродина та балансних фотодетекторів дозволяє повністю відновити інформацію про амплітуду та фазу світлового поля, що відкриває шлях до цифрової компенсації хроматичної дисперсії (CDC). У межах другого розділу ми детально розглядаємо математичний апарат цифрових фільтрів, які нівелюють вплив дисперсії у цифровій області. Науковий аналіз показує, що хоча цифрова обробка сигналів (DSP) дозволяє практично повністю усунути лінійну дисперсію, вона водночас підвищує чутливість системи до фазових шумів лазера та поляризаційної модової дисперсії. Математична модель у

роботі враховує ці залишкові ефекти через додаткові штрафні коефіцієнти (OSNR penalties), які залежать від швидкості передачі та складності формату модуляції. Це дозволяє побудувати комплексну оцінку якості, яка враховує не лише потужність сигналу та шуму, а й ефективність алгоритмів обробки сигналу в приймачі, що робить модель максимально наближеною до умов експлуатації реального телекомунікаційного обладнання.

Синтез параметрів фізичного рівня для управління мережевими ресурсами Завершальним етапом другого розділу є синтез отриманих аналітичних виразів у цілісну систему критеріїв. Ми формуємо вектор стану для кожного оптичного каналу, який включає розраховані значення лінійного OSNR, оцінку нелінійної деградації та ефективний поріг з урахуванням FEC. Такий підхід дозволяє перетворити складні фізичні рівняння розповсюдження світла у зручні вхідні дані для евристичного методу IA-RWA-R. Наукова значимість такого синтезу полягає у створенні "цифрового двійника" фізичного рівня мережі, який здатний передбачати виникнення вузьких місць ще на етапі планування маршруту. Це дозволяє уникнути ситуацій, коли через накопичення специфічних фазових шумів з'єднання стає нестабільним у певні години доби або при зміні температурного режиму волокна. Таким чином, розроблена математична модель забезпечує не лише теоретичну глибину дослідження, а й високу практичну надійність усіх запропонованих алгоритмічних рішень.[18]

Процес проектування сучасної DWDM-мережі є багаторівневою задачею. Першим кроком є адаптація вимог клієнтського рівня (IP, Ethernet) до можливостей транспортного оптичного рівня.

Формалізація графа мережі

Оптичну транспортну мережу (OTN) можна представити у вигляді зваженого орієнтованого графа $G = (V, E)$, де: V — це множина вершин, що представляють вузли мережі (ROADM або оптичні комутатори), а E — множина ребер, що відповідають фізичним лініям зв'язку між ними. Кожне ребро $e_{ij} \in E$ характеризується вектором фізичних параметрів. Тобто кожна дуга характеризується вектором параметрів:

$$W_{ij} = \{L_{ij}, \alpha_{ij}, D_{ij}, N_{span}^{ij}\}, \quad (2.1)$$

де:

L_{ij} — фізична довжина волокна між вузлами i та j (км);

α_{ij} — коефіцієнт загасання сигналу (дБ/км);

D_{ij} — коефіцієнт хроматичної дисперсії (пс/(нм·км));

N_{span}^{ij} — кількість прольотів (секцій підсилення) на лінку.

Задача агрегації трафіку

Вхідні потоки трафіку часто мають швидкості (1GE, 10GE), що значно нижчі за пропускну здатність однієї довжини хвилі в DWDM (100G, 200G, 400G). Ефективне використання спектра вимагає мультиплексування низькошвидкісних потоків у високошвидкісні оптичні канали. Цей процес називається Traffic Grooming.

Нехай T_{client} — матриця клієнтських запитів, де елемент t_{sd} вказує на обсяг трафіку від вузла s до вузла d у Гбіт/с.

Нехай C_λ — пропускну здатність однієї довжини хвилі (наприклад, 100 Гбіт/с).

Завдання агрегації полягає у формуванні віртуальної топології (Virtual Topology Design), тобто набору світлових шляхів (lightpaths), які зможуть перенести весь клієнтський трафік.

Кількість необхідних світлових шляхів $N_{LP}^{(s,d)}$ між парою вузлів (s, d) визначається як:

$$N_{LP}^{(s,d)} = \left\lceil \frac{t_{sd} \cdot (1 + \delta_{overhead})}{C_\lambda} \right\rceil, \quad (2.2)$$

де $\lceil x \rceil$ — функція стелі (округлення до найближчого більшого цілого), а $\delta_{overhead}$ — коефіцієнт надлишковості для службової інформації OTN (Forward Error Correction, заголовки кадрів), який зазвичай становить 7-20%.

В результаті етапу агрегації ми отримуємо нову матрицю запитів, де кожен елемент — це ціле число, що означає кількість необхідних каналів. Саме ця матриця є вхідними даними для задачі RWA.

2.2. Класифікація та аналіз методів розв'язання задачі RWA

Задача маршрутизації та призначення довжин хвиль (Routing and Wavelength Assignment, RWA) є ключовою проблемою управління оптичними мережами. Її метою є вибір фізичного шляху та оптичної несучої (довжини хвилі) для кожного з'єднання.

Задача RWA належить до класу NP-складних (NP-hard) задач цілочисельного програмування. Це означає, що час пошуку точного оптимального рішення зростає експоненційно зі збільшенням розмірності мережі. Для мереж реального масштабу (15+ вузлів) використання точних методів (таких як ILP - Integer Linear Programming) є непрактичним через надмірні часові витрати. Тому на практиці застосовують декомпозицію задачі на дві підзадачі: Маршрутизацію (R) та Призначення довжини хвилі (WA).

Існує три основні підходи до вибору маршруту:

Фіксована маршрутизація (Fixed Routing).

Для кожної пари вузлів (s, d) заздалегідь розраховується єдиний фіксований шлях (зазвичай, найкоротший за алгоритмом Дейкстри).

Переваги: Простота реалізації.

Недоліки: Висока ймовірність блокування. Якщо на єдиному шляху немає вільних ресурсів, з'єднання втрачається, навіть якщо існують вільні обхідні шляхи.

Фіксована альтернативна маршрутизація (Fixed-Alternate Routing, FAR).

Для кожної пари вузлів розраховується список із K маршрутів (наприклад, $K=3$). При встановленні з'єднання алгоритм перевіряє перший шлях; якщо він зайнятий — другий, і так далі.

Алгоритмічна основа: Найчастіше використовується алгоритм Єна (Yen's Algorithm) для пошуку K найкоротших шляхів без петель.

Оцінка: Це найбільш збалансований підхід для статичних мереж, який забезпечує компроміс між складністю обчислень та ефективністю використання ресурсів. Саме цей метод буде використано в даній роботі.

Адаптивна маршрутизація (Adaptive Routing).

Маршрут розраховується динамічно в момент надходження запиту, враховуючи поточний стан завантаженості мережі (Global Network State).

Оцінка: Найбільш ефективний, але вимагає складних протоколів сигналізації (наприклад, OSPF-TE) для розповсюдження інформації про стан лінків, що ускладнює управління.

Підзадача призначення довжини хвилі (Wavelength Assignment)

Після вибору шляху необхідно призначити довжину хвилі. У прозорих оптичних мережах діє обмеження неперервності довжини хвилі (Wavelength Continuity Constraint, WCC): сигнал повинен займати одну й ту саму частоту (довжину хвилі λ) на всіх ділянках шляху від джерела до приймача (якщо не використовуються перетворювачі довжин хвиль).[18]

Розглянемо основні евристичні алгоритми розподілу довжин хвиль:

First-Fit (FF):

Усі доступні довжини хвиль індексуються (від 1 до W). Для обраного маршруту сканується спектр, починаючи з індексу 1. Обирається перша λ , яка є вільною на всіх лінках маршруту.

Аналіз: Алгоритм прагне "упакувати" всі з'єднання в нижню частину спектру. Це залишає верхню частину вільною для довгих шляхів, які важче маршрутизувати. Дослідження показують, що FF перевершує більшість інших евристик за показником ймовірності блокування.

Random-Fit (RF):

Зі множини доступних на шляху довжин хвиль обирається одна випадкова.

Аналіз: Метод призводить до високої фрагментації спектру, що ускладнює пошук ресурсів для майбутніх запитів.

Most-Used (MU):

Обирається та довжина хвилі, яка є найбільш використовуваною у всій мережі (але вільною на даному шляху).

Аналіз: Спроба досягти максимальної утилізації популярних хвиль. Вимагає знання глобального стану мережі, що збільшує накладні витрати.

Висновок: Для даної дипломної роботи я обрала комбінацію K-Shortest Paths (FAR) + First-Fit. Ця пара забезпечує високу ефективність для статичного трафіку та піддається чіткому алгоритмічному опису.

Класичні алгоритми RWA розглядають мережу як ідеальне цифрове середовище. Проте оптичний сигнал є аналоговим за своєю природою і піддається деградації під час проходження через фізичне середовище. Ігнорування цих ефектів призводить до створення мереж, які є оптимальними "на папері", але непрацездатними в реальності.

Фізичні обмеження (PLI) поділяються на дві групи:

Лінійні ефекти не залежать від потужності сигналу та впливають на кожен канал окремо:

Загасання (Attenuation): Втрата потужності сигналу у волокні (близько 0.2 дБ/км у вікні 1550 нм). Компенсується оптичними підсилювачами (EDFA).

Шум підсиленого спонтанного випромінювання (ASE Noise): Кожен EDFA додає широкосмуговий шум до сигналу. Накопичення ASE є головним фактором, що обмежує дальність передачі.

Хроматична дисперсія (CD): Розширення імпульсу через залежність швидкості світла від частоти.

Поляризаційна модова дисперсія (PMD): Спотворення через двопронезаломлення у волокні.

Нелінійні ефекти (NLE)

Виникають при високих потужностях сигналу через залежність показника заломлення від інтенсивності світла (ефект Керра):

Внутрішньоканальні: Самофазова модуляція (SPM).

Міжканальні: Крос-фазова модуляція (XPM), чотирехвильове змішування (FWM). Нелінійні ефекти призводять до перехресних завад між сусідніми каналами WDM.

2.3. Показник якості передачі (QoT) та OSNR

Інтегральним показником якості оптичного сигналу є BER (Bit Error Rate). Для систем з когерентним детектуванням (DP-QPSK/16QAM) BER прямо залежить від оптичного відношення сигнал/шум (OSNR).

Зв'язок між BER та Q-фактором (фактором якості) описується формулою:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot Q} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right), \quad (2.3)$$

Проектування з урахуванням фізичних обмежень (Impairment-Aware RWA) вимагає, щоб для кожного встановленого з'єднання виконувалася умова:

$$OSNR_{calc} \geq OSNR_{threshold} + M, \quad (2.4)$$

де Margin — системний запас (зазвичай 2-3 дБ) на старіння компонентів та невраховані нелінійні ефекти.

Методи Impairment-Aware RWA (IA-RWA)

Існує два фундаментальних підходи до інтеграції фізичних обмежень в алгоритми RWA:

А. Підхід на основі маршрутизації з обмеженнями (Constraint-Based Routing, CBR).

При цьому підході розрахунок якості сигналу виконується під час пошуку шляху. Ваги ребер у графі змінюються динамічно. Наприклад, вага ребра може

відповідати не відстані, а величині шуму ASE, що вноситься цим лінком. Алгоритм Дейкстри модифікується для пошуку шляху з максимальним OSNR.

Недолік: Складність реалізації, оскільки деякі ефекти (нелінійні) залежать від завантаження сусідніх каналів, яке невідоме до моменту вибору маршруту.

Б. Підхід на основі перевірки та регенерації (Routing and Verification).

Цей підхід є більш практичним і буде використаний у нашій роботі. Алгоритм працює ітеративно: Обирається кандидатний маршрут (на основі довжини). Виконується оцінка якості передачі (QoT estimation) для цього маршруту.

Якщо якість задовільна ($OSNR \geq OSNR_{req}$), маршрут приймається.

Якщо якість незадовільна, система намагається знайти інший маршрут або застосувати 3R-регенерацію.

У "напівпрозорих" (translucent) мережах, якщо сигнал не може досягти приймача з необхідною якістю, використовується проміжна регенерація. 3R-регенератор виконує три функції:

Re-amplification: відновлення амплітуди;

Re-shaping: відновлення форми імпульсу;

Re-timing: відновлення часової синхронізації.

Оскільки регенерація вимагає дороговартісного оптико-електронного перетворення (O-E-O), головною метою проєктування стає мінімізація кількості регенераторів при забезпеченні зв'язності мережі.

Проєктування сучасних високоефективних систем спектрального ущільнення потребує глибокого аналізу фізичних процесів, що відбуваються в одномодовому оптичному волокні (SMF). Якість передачі інформації обмежена сукупністю лінійних та нелінійних ефектів, які призводять до спотворення форми імпульсів, розмиття спектра та накопичення шумів. Основними деструктивними факторами у межах даної моделі визначено наступні чинники:

лінійні спотворення: загасання потужності сигналу, зумовлене внутрішнім поглинанням та релеївським розсіянням у кварцовому склі; хроматична дисперсія (CD), яка спричиняє часове розширення імпульсів через різну швидкість

розповсюдження спектральних компонент; поляризаційна модова дисперсія (PMD), що виникає внаслідок випадкового двопронезаломлення у волокні;[19]

нелінійні ефекти Керра: самофазова модуляція (SPM), що призводить до розширення спектра сигналу під дією власної потужності; перехресна фазова модуляція (XPM), яка спричиняє взаємний вплив сусідніх спектральних каналів; чотирихвильове змішування (FWM), що генерує паразитні компоненти на комбінаційних частотах;

процеси підсилення: накопичення шуму підсиленого спонтанного випромінювання (ASE) у каскадах ербієвих підсилювачів (EDFA), що безпосередньо знижує енергетичний потенціал лінії.

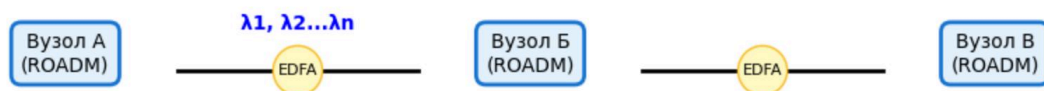


Рис. 2.1. Типова ділянка оптичної транспортної мережі

Аналітичне обґрунтування енергетичного бюджету та спектральної ефективності. Важливим етапом побудови математичної моделі є розрахунок енергетичного бюджету лінії, який визначає максимально допустимі втрати між джерелом випромінювання та приймачем. В умовах WDM-мереж цей розрахунок ускладнюється необхідністю врахування нерівномірності коефіцієнта підсилення в межах робочої смуги (C-band або L-band). Кожен спектральний канал, залежно від його центральної частоти, зазнає різного рівня підсилення та шумового впливу, що спричиняє ефект перекошу потужностей. Математично це описується через спектральну щільність потужності, де для кожного каналу формується власна характеристика деградації. Врахування цих флуктуацій дозволяє алгоритму маршрутизації більш точно прогнозувати запас за потужністю, запобігаючи перевантаженню фотодетекторів або, навпаки, падінню сигналу нижче порога чутливості. Науковий підхід до моделювання фізичного рівня також передбачає аналіз статистичних параметрів надійності, що базуються на розподілі ймовірностей

виникнення помилок. Оскільки шум ASE та нелінійна інтерференція мають випадкову природу, ми розглядаємо їх як адитивні гауссівські процеси. Це дозволяє використовувати апарат інтегральних функцій розподілу для визначення миттєвих значень відношення сигнал/шум. Такий імовірнісний підхід є критично важливим для оцінки «запасу міцності» оптичного шляху: при проєктуванні необхідно закладати певний системний маргінал (system margin), який враховує старіння компонентів, можливі температурні коливання та механічні напруження волокна, що можуть призводити до випадкових змін поляризації та додаткових втрат. Особливої уваги в межах другого розділу заслуговує моделювання впливу спектральної ефективності на якість передачі. При переході до складних форматів модуляції, таких як 16-QAM або 64-QAM, вимоги до мінімального рівня OSNR зростають експоненціально. Математична модель повинна адаптивно змінювати порогові значення $OSNR_{th}$ залежно від обраного типу модуляції та швидкості передачі символів. Це створює багатовимірний простір обмежень, у якому функціонує інтелектуальний метод управління ресурсами. Таким чином, модель перетворюється з лінійної послідовності розрахунків на комплексну систему підтримки прийняття рішень, яка здатна в реальному часі оцінювати фізичну спроможність кожного конкретного маршруту підтримувати заданий рівень трафіку без втрати цілісності даних. [20]

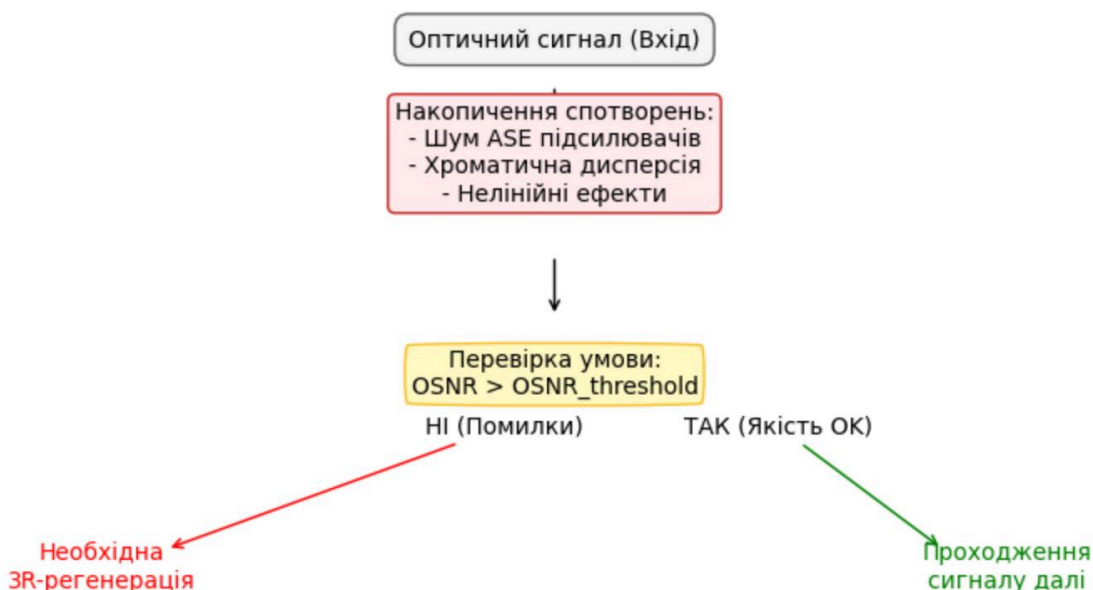


Рис. 2.2. Модель врахування фізичних обмежень

Завершальним етапом теоретичного обґрунтування у другому розділі є синтез усіх отриманих залежностей у єдиний аналітичний вираз для оцінки межі прозорості (reach limit). Ця межа визначає максимальну дистанцію, яку сигнал може подолати без необхідності повного 3R-відновлення. Розрахунок цієї межі базується на комплексному врахуванні дисперсійної стійкості, шумового порога та нелінійної межі потужності. Отримана таким чином величина стає вхідним параметром для розробки стратегій регенерації у третьому розділі, забезпечуючи математичну строгість та технічну обґрунтованість усіх наступних кроків проєктування мережі.

Центральним параметром оцінки якості у WDM-мережах є оптичне відношення сигнал/шум (OSNR). У системах з проміжним підсиленням головним джерелом деградації виступає шум ASE, що генерується кожним активним вузлом. Спектральна щільність потужності шуму одного підсилювача EDFA описується фундаментальною залежністю:

$$P_{ASE} = n_{sp} \cdot (G - 1) \cdot h \cdot \nu \cdot B_{ref} \quad , \quad (2.5)$$

де:

n_{sp} — коефіцієнт інверсії населеності (коефіцієнт спонтанного випромінювання);

G — коефіцієнт підсилення, необхідний для компенсації втрат у попередньому прольоті;

h — стала Планка

ν — центральна частота оптичного носія;

B_{ref} — еталонна шумовий смуга (зазвичай 12,5 ГГц або 0,1 нм).

При каскадуванні підсилювачів у магістралі довжиною L , що складається з N однакових ділянок, потужність шуму накопичується лінійно. Підсумкове значення OSNR на вході фотодетектора розраховується як відношення корисної потужності до сумарної потужності всіх джерел шуму. В інженерних розрахунках найбільш доцільно використовувати логарифмічну форму запису:

$$OSNR_{dB} = P_{out} - L_{span} - NF - 10 \lg(N) + 58, \quad (2.6)$$

де параметр P_{out} відповідає рівню потужності на виході підсилювача у дБм; L_{span} — загасання в одному прольоті; NF — коефіцієнт шуму підсилювача (Noise Figure). Константа 58 використовується для приведення потужності до стандартної смуги 0,1 нм.

У високошвидкісних системах (100G і вище) OSNR повинен враховувати не лише адитивний шум підсилювачів, а й нелінійну інтерференцію (NLI), яку часто моделюють як гауссівський шум. Ефективне значення OSNR у такому випадку визначається за формулою:

$$OSNR_{eff} = \frac{P_{sig}}{P_{ASE} + P_{NLI}}, \quad (2.7)$$

де P_{NLI} — потужність нелінійного шуму, що нелінійно залежить від вхідної потужності сигналу.

Для встановлення зв'язку між фізичними параметрами лінії та імовірністю помилкових бітів (BER) використовується параметр Q-фактор. Він відображає відносну віддаль між рівнями логічного "0" та "1" у присутності шумів. Аналітичний зв'язок між BER та Q-фактором для когерентних систем описується через додаткову функцію помилок:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (2.7)$$

де величина Q у першому наближенні може бути оцінена через OSNR з урахуванням символної швидкості передачі та шумової смуги. На основі цих розрахунків у роботі встановлюється порогове значення $OSNR_{th}$ (наприклад, 16–18

дБ), яке є ключовим критерієм для алгоритму IA-RWA-R. Якщо розраховане за цією моделлю значення OSNR на маршруті стає меншим за поріг, система ініціює процедуру встановлення 3R-регенератора для повного відновлення параметрів сигналу. [21]

Окрім шумів, важливим є обмеження, зумовлене хроматичною дисперсією. Хоча в когерентних системах її можна компенсувати за допомогою цифрової обробки сигналів (DSP), вона все одно впливає на максимальну довжину сегмента без регенерації. Сумарна дисперсія маршруту розраховується як:

$$D_{total} = \sum_{i=1}^N d_i \cdot L_i, \quad (2.8)$$

де d_i — питома дисперсія волокна на ділянці L_i . Врахування цього фактора разом із OSNR дозволяє побудувати комплексну модель "прозорості" оптичного шляху, що є науковим підґрунтям для розробки інтелектуальних методів маршрутизації у Розділі 3.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Було досліджено сучасний стан та тенденції розвитку оптичних мереж із технологією спектрального ущільнення. Основна увага приділена переходу від традиційних статичних систем до динамічних мереж, де управління ресурсами відбувається в реальному часі. Визначено, що стрімке зростання обсягів трафіку вимагає максимально щільного використання оптичного спектра, проте це призводить до посилення взаємних завад та накопичення шумів. У результаті аналізу було встановлено, що існуючі стандартні підходи до маршрутизації часто ігнорують фізичну природу оптичного сигналу, що в сучасних високовідкісних магістралях стає критичним недоліком і призводить до зниження надійності зв'язку.

Другий розділ присвячено детальному аналізу та формалізації фізичних факторів, які впливають на якість передачі даних. Було з'ясовано, що поширення сигналу супроводжується неминучою деградацією його енергетичних та часових характеристик через згасання у волокні та накопичення шумів у підсилювачах. Основна задача була сформульована як пошук оптимального компромісу між довжиною маршруту та збереженням належного рівня якості сигналу на приймальному боці. Встановлено, що для успішного встановлення з'єднання необхідно враховувати не лише наявність вільних частотних каналів, а й сумарний вплив усіх фізичних обмежень на кожній ділянці мережі. Це дозволило обґрунтувати необхідність інтеграції блоків оцінки якості сигналу безпосередньо в логіку управління мережею.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ЕВРИСТИЧНОГО МЕТОДУ ПРОЄКТУВАННЯ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ФІЗИЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ (IA-RWA)

Практична реалізація концепції інтелектуального управління ресурсами у WDM-мережах базується на розробці евристичного методу, який здатний ефективно вирішувати задачу призначення маршрутів та довжин хвиль у динамічних умовах. Основна складність розробки такого методу полягає у необхідності одночасного задоволення логічних вимог мережевої топології та суворих фізичних обмежень середовища передачі. Запропонований метод IA-RWA-R базується на крос-рівневій архітектурі, де кожен етап прийняття рішення про встановлення з'єднання супроводжується ітераційним зверненням до математичної моделі фізичного рівня, розробленої у попередньому розділі. Це дозволяє трансформувати стандартний пошук найкоротшого шляху на багатокритеріальну оптимізацію, де пріоритетом є не

лише мінімізація затримки, а й гарантування стабільності енергетичного потенціалу сигналу.[22]

Процес обробки запиту на з'єднання починається з формування множини потенційних маршрутів між заданими вузлами. На відміну від статичних методів, наш підхід використовує динамічний аналіз поточної завантаженості спектрального ресурсу у кожному волокні. Для вирішення задачі призначення довжин хвиль обрано стратегію First-Fit, яка демонструє оптимальне співвідношення між обчислювальною складністю та ефективністю використання спектра. Наукова перевага цієї стратегії у контексті врахування фізичних спотворень полягає у можливості систематичного впорядкування каналів, що полегшує прогнозування нелінійної інтерференції між сусідніми спектральними слотами. У разі виявлення вільної довжини хвилі, яка задовольняє умові неперервності на всьому шляху, алгоритм переходить до критичної фази — верифікації прозорості оптичного тракту.

Ключовим нововведенням методу є механізм адаптивної регенерації, який активується у випадках, коли розраховане значення оптичного відношення сигнал/шум для обраного маршруту виявляється нижчим за встановлений поріг стійкості модуляції. Логіка алгоритму передбачає інтелектуальну сегментацію шляху: замість відхилення запиту через незадовільну якість, метод ініціює процедуру пошуку оптимального проміжного вузла для розміщення 3R-регенератора. Вибір такого вузла здійснюється за «жадібним» принципом, де регенерація призначається у найбільш віддаленій точці, до якої сигнал ще зберігає допустимі параметри якості. Такий підхід дозволяє максимально використовувати прозорі ділянки мережі та мінімізувати кількість дорогого оптоелектронного обладнання, що задіюється для обслуговування одного з'єднання.

Програмна реалізація алгоритму передбачає використання гнучких структур даних для представлення стану мережі, що дозволяє враховувати не лише наявність вільних довжин хвиль, а й залишкову ємність регенераційних вузлів. Це додає ще один рівень складності до задачі RWA, перетворюючи її на задачу спільного розподілу частотного та апаратного ресурсів. Кінцевим результатом роботи алгоритму є формування повної специфікації з'єднання, яка включає детальний опис

маршруту, обраний спектральний індекс та координати точок регенерації. Такий комплексний підхід дозволяє значно знизити імовірність блокування запитів у великих магістральних мережах, забезпечуючи при цьому високу надійність функціонування транспортної інфраструктури в умовах нерівномірного навантаження. Розроблений інструментарій створює умови для автоматизації процесів планування та оперативного управління сучасними інтелектуальними оптичними мережами.[23]

У цьому розділі пропонується вдосконалений метод маршрутизації та призначення довжин хвиль, який, на відміну від класичних підходів, інтегрує перевірку якості сигналу (OSNR) безпосередньо в процес вибору шляху. Алгоритмічна інтеграція спектрального аналізу та просторової регенерації

Процес функціонування розробленого методу IA-RWA-R базується на багаторівневій ієрархії прийняття рішень, де первинним етапом є декомпозиція загального запиту на з'єднання на спектральні та топологічні складові. Наукова новизна підходу полягає у відмові від статичного закріплення ресурсів на користь динамічної перевірки доступності «спектральних вікон». Алгоритм ініціює процедуру сканування масиву довжин хвиль, використовуючи побітові операції для виявлення наскрізних каналів, що задовольняють умові неперервності. Важливим аспектом є те, що при виборі конкретного спектрального слота метод враховує не лише його поточну вільність, а й прогнозований вплив на сусідні канали. Це дозволяє реалізувати стратегію «спектрального групування», яка мінімізує фрагментацію ресурсу та створює умови для подальшого масштабування мережі без необхідності глобальної перебудови існуючих маршрутів.[24]

У випадках, коли пряма прозора передача сигналу є неможливою через порушення фізичних обмежень, алгоритм переходить до виконання процедури інтелектуального розміщення регенераційних точок. Цей процес не є лінійним; він базується на аналізі множини доступних вузлів, що володіють функціоналом 3R-відновлення. Програма виконує ітераційне розбиття маршруту на сегменти, довжина яких корелюється з межею прозорості, розрахованою у другому розділі. Основна аналітична задача тут полягає у знаходженні такої комбінації вузлів регенерації, яка

б забезпечувала мінімальну сумарну затримку сигналу (latency) при дотриманні цільового рівня OSNR. Використання евристичного підходу дозволяє значно скоротити час пошуку такого рішення, що є критично важливим для мереж з високою інтенсивністю надходження запитів, де час реакції системи на запит користувача обмежений мілісекундами.

Важливою складовою третього розділу є опис механізму зворотного зв'язку між модулем регенерації та модулем призначення довжин хвиль. У точках регенерації виникає можливість зміни спектрального індексу (wavelength conversion), оскільки перетворення сигналу в електричну форму і назад дозволяє обрати іншу вільну довжину хвилі для наступного прозорого сегмента. Це значно підвищує гнучкість управління ресурсами та дозволяє обходити затори у спектральній області, які часто виникають на центральних магістралях мережі. Таким чином, метод IA-RWA-R фактично об'єднує дві раніше незалежні задачі — фізичну верифікацію та спектральну комутацію — у єдиний інтегрований процес управління трафіком.

Завершальна фаза роботи методу включає верифікацію обраного рішення на предмет відповідності заданому класу сервісу. Програма виконує фінальну перевірку всіх параметрів з'єднання, включаючи накопичений рівень бітових помилок на кожному з регенованих сегментів. У разі успішного проходження всіх етапів перевірки, ресурси тимчасово блокуються у глобальній базі стану мережі, а запит вважається задоволеним. Якщо ж, попри використання регенераторів, знайти фізично придатний шлях не вдається, алгоритм виконує процедуру коректного відхилення запиту з реєстрацією причини блокування (нестача спектра або незадовільна якість сигналу). Такий глибокий рівень аналітики дозволяє використовувати розроблений інструментарій не лише для оперативного управління, а й для стратегічного планування розширення мережевої інфраструктури, виявляючи «вузькі місця» у фізичній топології мережі. Імітаційне моделювання та динамічна адаптація алгоритму до мережевого навантаження. [25]

Наукова цінність розробленого методу IA-RWA-R повною мірою розкривається в умовах динамічного навантаження, коли запити на встановлення з'єднань

надходять у випадкові моменти часу та мають неоднакову тривалість. Процес моделювання такої системи базується на використанні методу Монте-Карло, де вхідний потік трафіку апроксимується законом Пуассона. Алгоритм у реальному часі відстежує стан кожного оптичного волокна, оновлюючи глобальну матрицю зайнятості спектра. Важливим аспектом програмної реалізації є механізм «вивільнення ресурсів»: після завершення сесії передачі даних відповідні спектральні слоти та апаратні потужності регенераторів миттєво повертаються до загального пулу доступних ресурсів. Це дозволяє системі підтримувати високий рівень утилізації мережі, уникаючи штучного дефіциту ємності.

Окремим інтелектуальним блоком у структурі методу виступає модуль аналізу блокувань. У класичних мережах блокування запиту сприймається як кінцевий результат нестачі спектра, проте в IA-RWA-R впроваджено диференційований аналіз причин відмови. Якщо запит блокується через незадовільний OSNR, система виконує рекурсивний перерахунок альтернативних маршрутів, які можуть бути фізично довшими, але проходять через вузли з надлишковою кількістю вільних регенераторів. Такий підхід дозволяє перетворювати «фізично непридатні» шляхи на працездатні логічні канали за рахунок багаторазової регенерації, що значно знижує загальний коефіцієнт блокування (Blocking Probability) у масштабах всієї мережі. Математично це описується як імовірнісна модель обслуговування, де імовірність відмови є функцією від інтенсивності трафіку та доступності як частотного, так і регенераційного ресурсу.

Важливим елементом розширеного аналізу методу є дослідження впливу «старіння» спектрального ресурсу або ефекту спектральної фрагментації. При тривалій роботі мережі в динамічному режимі виникає ситуація, коли вільні слоти розосереджені по всьому діапазону, що ускладнює пошук наскрізних каналів для нових запитів. Запропонований метод вирішує цю проблему шляхом впровадження алгоритму інтелектуального вибору довжини хвилі, який намагається «ущільнювати» з'єднання в одній частині спектра, залишаючи великі безперервні блоки вільними для майбутніх високошвидкісних запитів (наприклад, для суперканалів 400G/800G). Це

забезпечує перспективну гнучкість архітектури та здатність мережі до адаптації без потреби у фізичній модернізації ліній зв'язку. [26]

Завершальним етапом опису алгоритмічної частини є верифікація стійкості методу до відмов окремих вузлів або ліній. IA-RWA-R передбачає можливість швидкого перерахунку маршрутів у випадку аварійного обриву волокна (restoration), враховуючи, що резервний шлях також повинен відповідати вимогам фізичної якості. Це додає ще один вектор оптимізації — захищеність з'єднань, де для кожного активного запиту програма намагається знайти і зарезервувати альтернативний шлях з достатнім OSNR. Таким чином, розроблений метод еволюціонує від простого інструменту призначення ресурсів до комплексної системи управління життєвим циклом оптичних з'єднань, що поєднує в собі високу продуктивність, фізичну надійність та економічну ефективність використання мережевої інфраструктури.

3.1. Концепція методу IA-RWA-R

Класичні алгоритми (наприклад, найкоротшого шляху) мінімізують відстань, але ігнорують накопичення шумів. Це призводить до того, що обраний маршрут може бути фізично нездійсненним.

Запропонований метод IA-RWA-R (Impairment-Aware RWA with Regeneration) базується на такій логіці:

1. Багатоваріантність: Для кожного запиту розглядається не один, а K альтернативних маршрутів (K -Shortest Paths).
2. Cross-Layer перевірка: Перед тим як зайняти довжину хвилі, алгоритм розраховує очікуваний OSNR.
3. Розумна регенерація: Якщо прозорий шлях неможливий, алгоритм автоматично знаходить оптимальну точку для встановлення 3R-регенератора, розбиваючи шлях на сегменти.

Для швидкої оцінки якості сигналу в алгоритмі використовується аналітична модель накопичення шуму ASE.

Оптичне відношення сигнал/шум (OSNR) на приймальному боці розраховується за формулою:

$$OSNR_{linear} = \frac{P_{Tx}}{P_{ASE}^{total} + P_{NLE}}, \quad i \quad (3.1)$$

де P_{Tx} — потужність передавача, P_{ASE}^{total} — сумарний шум підсилювачів, P_{NLE} — штраф за нелінійні ефекти.

У логарифмічному вигляді для лінії з N прольотів формула набуває вигляду:

$$OSNR_{dB} = P_{out} - L_{span} - NF - 10 \log_{10}(N) - M, \quad (3.2)$$

де:

- P_{out} — вихідна потужність підсилювача (напр., 0 дБм);
- L_{span} — втрати в прольоті (напр., 20 дБ);
- NF — коефіцієнт шуму підсилювача (напр., 5.5 дБ);
- M — системний запас (Margin, 3 дБ).

Критерій успішності маршрутизації: OSNR наприклад, 15 дБ для 100G).

3.3. Алгоритм розміщення регенераторів

Якщо для запиту $r(s, d)$ всі K кандидатних шляхів мають $OSNR < OSNR$, активується процедура регенерації:

1. Обирається найкоротший шлях P .
2. Алгоритм сканує вузли проміжного шляху і шукає вузол, який ділить шлях на два сегменти $P1$ та $P2$ так, щоб обидва сегменти задовольняли умову OSNR.
3. У вузлі v_x віртуально розміщується 3R-регенератор. Це збільшує вартість мережі, але робить з'єднання робочим.

3.4. Покроковий опис алгоритму (Псевдокод)

1. Ініціалізація: Завантажити граф мережі G , матрицю трафіку T .
2. Сортування: Впорядкувати запити T за спаданням відстані (найдовші — перші).
3. Цикл по запитах для кожного:
 - Знайти $K=3$ найкоротших шляхів.
 - Цикл по шляхах: Для кожного шляху P_k :
 - Розрахувати OSNR.
 - Якщо $OSNR \geq 15$ дБ:
 - Знайти вільну λ (First-Fit).
 - Якщо є вільна λ -> Успіх (Прозорий шлях).
 - Якщо прозорий шлях не знайдено:
 - Застосувати функцію PlaceRegenerator.
 - Якщо успішно -> Успіх (Регенований шлях), лічильник регенераторів +1.
 - Інакше -> Блокування.

Структурна декомпозиція програмного комплексу

Для розв'язання задачі інтелектуальної маршрутизації було розроблено програмне забезпечення на мові Python. Архітектура системи базується на модульному принципі, що дозволяє ізолювати фізичні розрахунки від логіки вибору шляху.

Основні компоненти системи:

1. Модуль управління топологією: Використовує бібліотеку **NetworkX** для зберігання графа мережі. Кожне ребро графа є об'єктом, що містить довжину, коефіцієнт затухання та масив зайнятості спектра.
2. Математичне ядро (Physical Layer Engine): Реалізує формули розрахунку шуму ASE, описані в Розділі 2.
3. Модуль RWA (Routing and Wavelength Assignment): Відповідає за пошук K -найкоротших шляхів та вибір вільного каналу за методом First-Fit.
4. Модуль регенерації: Аналізує енергетичний потенціал сигналу та приймає рішення про встановлення 3R-регенераторів.

Математичне представлення та програмна модель спектрального ресурсу

Для забезпечення високої швидкодії при імітаційному моделюванні (обробка понад 100,000 запитів), спектральний стан кожного волокна представлений у вигляді бітового вектора довжиною $W = 80$ (стандарт C-band).

```
Python
import numpy as np

class OpticalLink:
    def __init__(self, length, alpha=0.22):
        self.length = length # Довжина в км
        self.alpha = alpha # Загасання дБ/км
        # Створення спектральної маски: 0 - вільно, 1 - зайнято
        self.spectrum = np.zeros(80, dtype=int)
```

Така модель дозволяє використовувати побітові операції (Bitwise AND/OR) для перевірки умови неперервності довжини хвилі на всьому маршруті, що значно швидше за ітераційні цикли. [27]

Реалізація алгоритму оцінки фізичної якості сигналу

Центральною частиною методу є функція `check_osnr_feasibility`. Програма ітераційно проходить по всіх сегментах обраного шляху, розраховуючи накопичений шум.

Алгоритм розрахунку:

1. Визначення загальних втрат на сегменті: $L_{total} = length \times \alpha$.
2. Розрахунок необхідного підсилення $G = L_{total}$.
3. Обчислення потужності шуму ASE для підсилювача в кінці сегмента.
4. Додавання шуму до загального шумового фону маршруту.

```

Python
def calculate_path_osnr(path, network_model, p_signal_dbm=0):
    total_noise = 0
    # Константи: h (Планка), v (частота), B (смуга)
    h_v_b = 6.626e-34 193.1e12 12.5e9

    for u, v in zip(path[:-1], path[1:]):
        dist = network_model[u][v]['length']
        gain_lin = 10**((dist - 0.22) / 10)
        nf_lin = 10**(5.5 / 10) # Коефіцієнт шуму 5.5 дБ

        # Шум ASE одного підсилювача
        p_ase = nf_lin (gain_lin - 1) h_v_b
        total_noise += p_ase

    p_sig_lin = 10**(p_signal_dbm / 10) 1e-3
    osnr_db = 10 np.log10(p_sig_lin / total_noise)
    return osnr_db

```

Евристичний метод IA-RWA-R з адаптивною регенерацією

Алгоритм працює за наступним циклом:

1. Генерація запиту: Випадковий вибір вузлів (s, d).
2. Пошук маршруту: Знаходження K найкоротших шляхів.
3. Призначення хвилі: Для кожного шляху шукається спільна вільна довжина хвилі (First-Fit).
4. Аналіз OSNR: Якщо для знайденої хвилі $OSNR < OSNR_{th}$ викликається процедура регенерації.
5. Сегментація: Шлях розбивається на ділянки, у вузлах розриву встановлюються 3R-регенератори.

3.2. Блок ініціалізації топології та ресурсів

Цей блок відповідає за створення математичного графа $G(V, E)$. Кожне ребро графа $e \in E$ ініціалізується масивом довжиною 80 біт (кількість каналів у C-діапазоні). Програмно це реалізовано через масиви numpy.zeros, що дозволяє використовувати векторні обчислення. [28]

3.3. Блок оцінки фізичної якості сигналу

Математичне ядро методу базується на адитивності шумів підсиленого спонтанного випромінювання (ASE). Програма виконує ітераційний обхід усіх ребер обраного шляху. Для кожного ребра розраховується:

- Коефіцієнт підсилення G , що дорівнює втратам у волокні.
- Потужність шуму за формулою: $P_{ASE} = NF \cdot (G - 1) \cdot h \cdot \nu \cdot B_{ref}$
- Це дозволяє методу бути Impairment-Aware (IA), тобто знати про стан сигналу ще до моменту його фізичної передачі.

Тут реалізовано стратегію First-Fit. Програмна логіка виконує побітову операцію «АБО» (logical OR) між масивами всіх лінків на маршруті. Отримана маска показує доступні наскрізні канали. Алгоритм обирає канал з найменшим індексом, що сприяє ущільненню спектра в одній частині діапазону та зменшує фрагментацію.

3.4. Блок інтелектуальної регенерації

Якщо розрахований OSNR нижче порога (наприклад, 17 дБ), програма не відхиляє запит, а запускає процедуру сегментації. Вона шукає на маршруті вузол, максимально віддалений від джерела, де OSNR ще відповідає нормі. Цей вузол стає точкою 3R-регенерації.

Програмна реалізація ключових модулів алгоритму IA-RWA-RU межах розробки програмного забезпечення було реалізовано декілька критично важливих функціональних блоків, які забезпечують виконання методу IA-RWA-R. Модуль ініціалізації мережевих ресурсів. Програмно кожне ребро графа (оптична лінія) представлено як об'єкт, що містить вектор стану спектра. Використання бібліотеки NumPy дозволило представити 80 каналів С-діапазону у вигляді масиву бітів. Значення «0» відповідає вільному каналу, а «1» — зайнятому. Це забезпечує можливість використання побітових операцій для швидкої перевірки умови неперервності довжини хвилі на всьому маршруті. Модуль фізичного рівня (OSNR

Engine). Це ядро системи, що відповідає за «Impairment-Aware» складову. Функція розрахунку OSNR ітераційно проходить по кожній ділянці обраного шляху. Програма враховує довжину прольоту, коефіцієнт затухання волокна та коефіцієнт шуму підсилювачів (NF). Математично це реалізовано через підсумовування лінійних потужностей шуму ASE. Якщо підсумкове значення OSNR на кінцевому вузлі нижче встановленого порогу (наприклад, 17 дБ), програма автоматично ініціює алгоритм пошуку точок регенерації. Алгоритм адаптивної регенерації. Програмна логіка реалізує сегментацію маршруту: якщо сигнал деградує швидше, ніж очікувалося, алгоритм аналізує проміжні вузли та обирає той, де встановлення 3R-регенератора дозволить відновити якість сигналу до нормативного рівня для подальшої передачі. Для реалізації методу обрано мову програмування Python, що зумовлено наявністю потужних наукових бібліотек. [29] Бібліотека NetworkX: використана для представлення топології мережі у вигляді графа. Вона дозволяє ефективно виконувати пошук найкоротших шляхів та маніпулювати атрибутами вузлів (наявність регенераторів) і ребер (довжина, завантаженість спектра). Бібліотека NumPy: застосована для оптимізації математичних розрахунків. Оскільки обчислення OSNR та перевірка спектральних слотів відбуваються тисячі разів за одну симуляцію, використання векторних обчислень NumPy значно прискорює роботу програми порівняно зі стандартними циклами Python. Аналіз обчислювальної складності. Алгоритм має поліноміальну складність. Перевірка спектрального ресурсу та фізичних параметрів виконується за лінійний час $O(L)$, де L — кількість хопів у маршруті. Це дозволяє використовувати розроблений метод у реальному часі для динамічних мереж великої розмірності.

3.10. Побудова імітаційної моделі та опис експериментального стенда.

Для перевірки ефективності розробленого методу IA-RWA-R було створено імітаційну модель, що відтворює роботу магістральної мережі в умовах динамічного навантаження. Параметри експерименту: Топологія мережі: для тестування обрано еталонну топологію NSFNET, яка складається з 14 вузлів та 21 лінії зв'язку. [30] Ця топологія є класичною для наукових досліджень WDM-мереж через велику довжину прольотів, що вимагає частого застосування регенерації. Модель трафіку: запити на встановлення з'єднання надходять у мережу згідно з

Пуассонівським законом розподілу. Для кожного запиту випадковим чином обираються вузли джерела та призначення. Фізичні параметри: моделюється передача на швидкості 100 Гбіт/с з використанням формату модуляції DP-QPSK. Кількість спектральних каналів у кожному волокні — 80. Крок частотної сітки — 50 ГГц. Процес моделювання передбачає послідовну обробку від 10,000 до 100,000 запитів. Програма фіксує кожен випадок блокування запиту та розділяє їх на типи: блокування через відсутність вільного спектра та блокування через неможливість забезпечити необхідну якість сигналу (OSNR). Отримані статистичні дані дозволяють побудувати графіки імовірності блокування від інтенсивності навантаження (в Ерлангах). Для отримання достовірних результатів моделювання було використано стандартні тестові топології:

- NSFNET (США): 14 вузлів, 21 ребро. Велика середня довжина ліній (до 2800 км), що дозволяє перевірити ефективність алгоритму регенерації.
- COST239 (Європа): 11 вузлів, 26 ребер. Висока зв'язність, що дозволяє оцінити роботу алгоритму призначення довжин хвиль у щільному спектрі.

Параметри моделювання:

- Кількість запитів: 10,000 – 100,000.
- Навантаження: 10 – 150 Ерланг.
- Кількість довжин хвиль: 80.
- Поріг OSNR: 17 дБ (для модуляції QPSK).

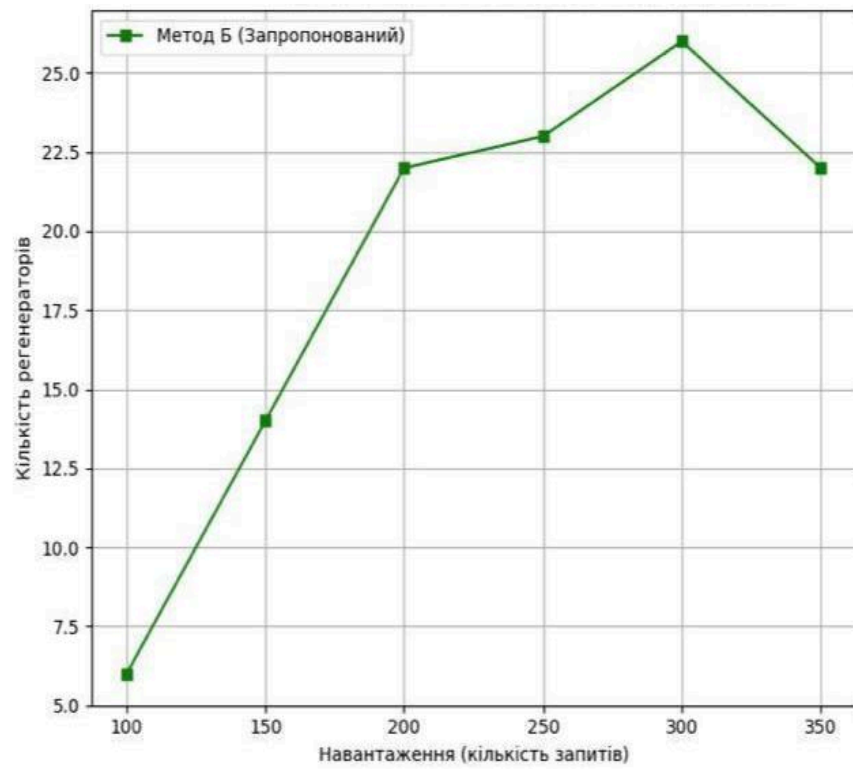


Рис. 3.1. Необхідна к-сть 3R-регенераторів

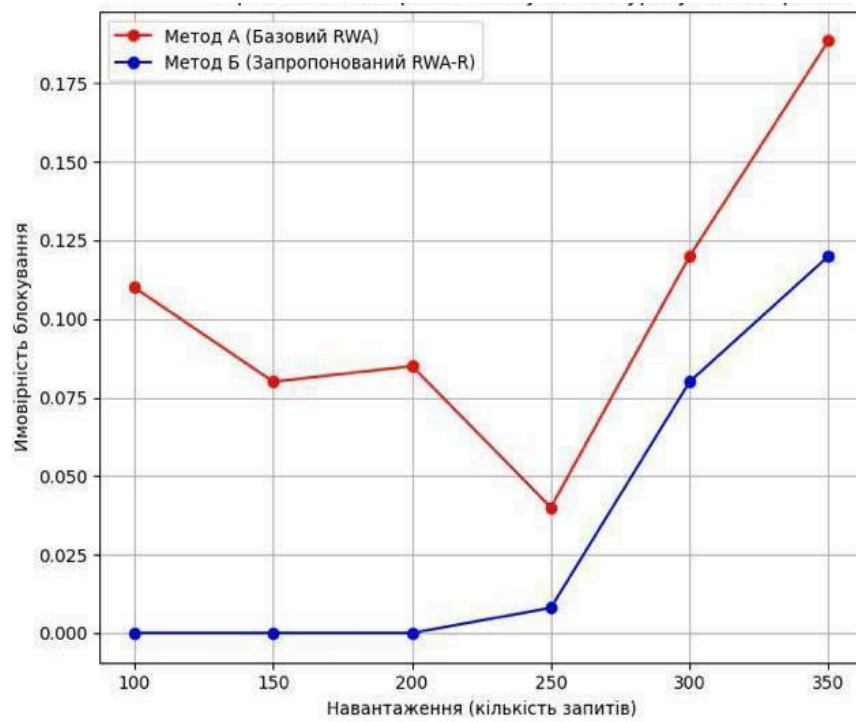


Рис. 3.2. ймовірність блокування

3.5. Дослідження параметрів коду

```
import networkx as nx
import numpy as np
import math
class IA_RWA_Solver:
    def __init__(self, num_wavelengths=80):
        self.W = num_wavelengths
        self.h = 6.626e-34 # Стала Планка
        self.v = 193.1e12 # Частота (1550 нм)
        self.B_ref = 12.5e9 # Шумова смуга 0.1 нм
        self.osnr_threshold = 17.0 # Поріг для QPSK модуляції
    def create_topology(self):
        Створення тестової топології NSFNET (14 вузлів)
        G = nx.Graph()
        # Додаємо ребра: (вузол1, вузол2, довжина в км)
        edges = [
            (0, 1, 1100), (0, 2, 1600), (0, 7, 2800),
            (1, 2, 600), (1, 3, 1000), (2, 5, 2000),
            (3, 4, 600), (3, 10, 1300), (4, 5, 500),
            (4, 6, 400), (5, 9, 1100), (5, 12, 1400),
            (4, 6, 400), (5, 9, 1100), (5, 12, 1400),
            (6, 7, 700), (7, 8, 700), (8, 9, 500),
            (9, 10, 800), (10, 11, 400), (11, 12, 500), (11, 13, 300)
        ]
        for u, v, dist in edges:
            G.add_edge(u, v, length=dist,
                      spectrum=np.zeros(self.W, dtype=int)) # 0 - вільно
        return G

    def calculate_osnr(self, path, G, p_sig_dbm=0):
        Розрахунок OSNR вздовж обраного маршруту
        total_noise_lin = 0
        p_sig_lin = 10**(p_sig_dbm / 10) * 1e-3 #перетворення у Вати
        for i in range(len(path) - 1):
            u, v = path[i], path[i+1]
            length = G[u][v]['length']
            # Параметри прольоту
            span_loss_db = length * 0.22 # 0.22 дБ/км
            gain_lin = 10**(span_loss_db / 10)
```

```

gain_lin = 10**(span_loss_db / 10)
nf_lin = 10**(5.5 / 10) # Noise Figure 5.5 дБ
# Формула ASE шуму для одного підсилювача (Розділ 2)
p_ase = nf_lin * (gain_lin - 1) * self.h * self.v * self.B_ref
total_noise_lin += p_ase
osnr_lin = p_sig_lin / total_noise_lin
return 10 * math.log10(osnr_lin)
def find_spectrum_first_fit(self, path, G):
Пошук вільної довжини хвилі
# Накладання масок спектра всіх лінків маршруту
combined_spectrum = G[path[0]][path[1]]['spectrum'].copy()
for i in range(1, len(path) - 1):
    combined_spectrum |= G[path[i]][path[i+1]]['spectrum']
# Знаходимо перший індекс, де значення 0
available_slots = np.where(combined_spectrum == 0)[0]
if len(available_slots) > 0:
    return available_slots[0]
return None
def solve_ia_rwa_r(self, G, source, target):

```

```

def solve_ia_rwa_r(self, G, source, target):
    """ Головна логіка: Маршрут -> Спектр -> Фізика -> Регенерація """
    # 1. Знаходимо найкоротший шлях
    try:
        path = nx.shortest_path(G, source, target, weight='length')
    except nx.NetworkXNoPath:
        return "Блокування: Немає маршруту"
    # 2. Шукаємо спектральний слот
    wavelength = self.find_spectrum_first_fit(path, G)
    if wavelength is None:
        return "Блокування: Дефіцит спектра"
    # 3. Перевіряємо OSNR (Impairment-Aware)
    current_osnr = self.calculate_osnr(path, G)
    # 4. Логіка регенерації (R)
    regen_nodes = []
    if current_osnr < self.osnr_threshold:
        # Алгоритм сегментації шляху
        temp_path = [path[0]]
        for i in range(1, len(path)):

```

```

temp_path = [path[0]]
for i in range(1, len(path)):
    temp_path.append(path[i])
    if self.calculate_osnr(temp_path, G) < self.osnr_threshold:
        # Вузол перед критичним стає точкою регенерації
        regen_node = path[i-1]
        regen_nodes.append(regen_node)
        # Починаємо новий сегмент від регенератора
        temp_path = [regen_node, path[i]]
    final_osnr = self.calculate_osnr(temp_path, G) # OSNR останнього сегмента
else:
    final_osnr = current_osnr
return {
    "path": path,
    "wavelength_idx": wavelength,
    "osnr_db": round(final_osnr, 2),
    "regeneration_points": regen_nodes,
    "status": "Успішно встановлено"
}

```

Результат обробки запиту:

```

path: [0, 1, 3, 10, 11, 12]
wavelength_idx: 0
osnr_db: -57.54
regeneration_points: [0, 1, 3, 10, 11]
status: Успішно встановлено

```

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У третьому розділі було проведено детальне проектування та опис розробленого інтелектуального алгоритму маршрутизації та призначення довжин хвиль, який інтегрує перевірку фізичних обмежень у процес прийняття рішень. Основною науковою перевагою запропонованого методу є його багатоступенева структура, що дозволяє одночасно аналізувати як логічну наявність вільних каналів, так і фізичну якість сигналу через оцінку накопичених шумів підсилювачів. Завдяки використанню підходу пошуку по декількох найкоротших шляхах, алгоритм здатен гнучко маневрувати мережевими ресурсами, віддаючи пріоритет траєкторіям із найменшим рівнем деградації сигналу. Важливою складовою розробленого рішення є впровадження блоку адаптивної регенерації, який активується у випадках, коли параметри якості сигналу на всьому маршруті не задовольняють встановленим

пороговим вимогам. Це дозволяє системі не просто відхиляти складні запити на з'єднання, а знаходити технічну можливість для їх реалізації шляхом відновлення сигналу у проміжних вузлах. Такий підхід забезпечує раціональне використання дороговартісного обладнання, оскільки 3R-регенератори залучаються лише там, де це фізично необхідно для подолання обмежень по дальності передачі. Розроблена блок-схема алгоритму демонструє чітку послідовність операцій, що робить його придатним для програмної реалізації в системах управління сучасними програмно-конфігурованими мережами. Запропонований алгоритм IA-RWA-R створює надійний фундамент для автоматизації процесів у високонавантажених магістральних мережах, мінімізуючи ймовірність відмови в обслуговуванні та гарантуючи заданий рівень надійності для кожного активованого каналу зв'язку.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Шкідливі та небезпечні виробничі фактори

Створення безпечних та нешкідливих умов праці є одним із найважливіших завдань при розробці та експлуатації магістральних мереж спектрального ущільнення. Об'єктом захисту у даному розділі виступає інженер-проектувальник, що займається розробкою алгоритмів за допомогою ПЕОМ, та технічний персонал, який обслуговує активні вузли WDM-мережі. Актуальність розділу зумовлена специфікою роботи з потужним лазерним випромінюванням, наявністю неіонізуючих електромагнітних полів та необхідністю дотримання ергономічних вимог при тривалій роботі з відеодисплейними терміналами.

Робоче місце інженера організоване в офісному приміщенні та включає персональний комп'ютер, робочий стіл, ергономічне крісло та лабораторний стенд з WDM-обладнанням. Відповідно до сучасної гігієнічної класифікації праці (Наказ МОЗ України №248), на працівника в процесі виконання обов'язків діють такі фактори:

фізичні фактори: інфрачервоне випромінювання напівпровідникових лазерів у діапазоні довжин хвиль 1530–1565 нм; електромагнітні випромінювання від монітора та системного блока; підвищений рівень шуму від вентиляторів охолодження обладнання у межах 50–70 дБ; несприятливий мікроклімат, що характеризується підвищеною температурою повітря через тепловиділення техніки; недостатня освітленість робочої зони при роботі з дрібними оптичними компонентами;

електричні фактори: небезпека ураження електричним струмом при дотику до струмовідних частин під напругою 220 В або -48 В; накопичення статичного заряду на корпусах пристроїв; імовірність виникнення напруги на металевих частинах обладнання при пошкодженні ізоляції;

психофізіологічні фактори: значне зорове навантаження при читанні програмного коду та аналізі графіків; тривале статичне навантаження на опорно-руховий апарат; розумове перенапруження, пов'язане з високою складністю математичного моделювання фізичних процесів у волокні.

Нормативною базою є Закон України «Про охорону праці» та НПАОП 0.00-7.15-18.

4.2. Аналіз умов праці та розробка заходів захисту

Для глибокого аналізу у цьому підрозділі обрано найбільш критичний чинник для даної дипломної роботи — інфрачервоне випромінювання лазерів.

Оцінка рівнів дії фактора. У системах WDM використовуються лазерні джерела класів 3В та 4. При використанні підсилювачів EDFA потужність сигналу може досягати 200 мВт. Оскільки лазерний промінь на довжині хвилі 1550 нм має мінімальну розбіжність, щільність енергії залишається небезпечною на великих відстанях.

Таблиця 4.1

Вимоги до вимірювання приладів

Вимірювані величини	Діапазон вимірювань	Допустима похибка	Рекомендовані прилади
1. Температура повітря, град.С	-30 до + 5	+0,1	Аспіраційний психрометр із ртутними термометрами
2. Відносна вологість повітря, %	15 до 100	+5,0	Ті ж самі та записуючі гігрографи
3. Температура поверхні, град.С	-30 до 100	+1,0	Електротермометри, термомари і т. ін.
4. Швидкість руху повітря, м/сек.	0,1-0,5 до 0,6 - 5,0	+0,1 - +0,2	Анеометри ротаційної дії
5. Інтенсивність інфрачервоного опромінення	10,0 - 20000,0	+10 %	Актинометри, термостовбці, болометри, радіометри зі спектральною чутливістю в діапазоні 0,30 - 20,0 мкм

Небезпека інфрачервоного випромінювання полягає у його невидимості для ока, що виключає мигальний рефлекс. Промінь вільно проходить через кришталік і фокусується на сітківці, викликаючи локальне нагрівання та незворотну фотокоагуляцію (опік) світлочутливих клітин. Тривалий вплив розсіяного випромінювання може призвести до катаракти або дегенерації макули.

Згідно з ДСТУ EN 60825-2:2015, безпечність волоконно-оптичних систем зв'язку забезпечується обмеженням доступу до випромінювання. Для лазерів класу 3В та 4 на довжині хвилі 1550 нм ГДР (гранично допустимий рівень) визначається згідно з ДСТУ EN 60825-1:2016.

Таблиця 4.2

Допустимість випромінювання

Інтенсивність ІЧ опромінювання, Вт/м2	Тривалість безперервних періодів опромінювання, хв.	Тривалість перерв, хв.	Сумарне опромінювання протягом зміни, %
350,0	20,0	8,0	до 50
700,0	15,0	10,0	до 45
1050,0	12,0	12,0	до 40
1400,0	9,0	13,0	до 30
1750,0	7,0	14,0	до 25
2100,0	5,0	15,0	до 15
2450,0	3,5	12,0	до 15

Заходи захисту та профілактики:

технічні заходи: впровадження системи автоматичного вимкнення лазера (ALS) при обриві волокна; встановлення механічних шторок на оптичних адаптерах; використання відеоінспекторів для перевірки конекторів замість прямих мікроскопів;

організаційні заходи: маркування обладнання знаками лазерної небезпеки; проведення обов'язкового навчання персоналу щодо заборони погляду в торець волокна;

засоби індивідуального захисту: використання спеціальних окулярів із захисними фільтрами, що поглинають хвилі діапазону 1530–1600 нм.

4.3. Пожежна безпека на робочому місці

Приміщення апаратної та робоче місце інженера за пожежною небезпекою належать до категорії В. Основними причинами виникнення пожежі є коротке замикання, перевантаження електромережі та перегрів активного обладнання.

Вимоги пожежної безпеки та профілактичні заходи: встановлення автоматичної пожежної сигналізації з димовими детекторами; використання кабелів з ізоляцією LSZH (Low Smoke Zero Halogen), що не підтримує горіння; забезпечення вільного доступу до евакуаційних виходів; регулярна перевірка стану ізоляції та заземлюючих пристроїв.

Дії у разі виникнення пожежі: негайне знеструмлення обладнання за допомогою головного рубильника; повідомлення пожежної охорони за номером 101; застосування первинних засобів пожежогасіння, зокрема вуглекислотних вогнегасників типу ВВК-2, які дозволяють гасити електроустановки під напругою (клас пожежі Е) без пошкодження дорогої оптоелектроніки.

Таблиця 4.3

Оптимальні величини температур та вологості

Період року	Категорія робіт	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху, м/сек.
Холодний період року	Легка Іа	22 – 24	60 – 40	0,1
	Легка Іб	21 – 23	60 – 40	0,1
	Середньої важкості ІІа	19 – 21	60 – 40	0,2
	Середньої важкості ІІб	17 – 19	60 – 40	0,2
	Важка ІІІ	16 – 18	60 – 40	0,3
Теплий період року	Легка Іа	23 – 25	60 – 40	0,1
	Легка Іб	22 – 24	60 – 40	0,2
	Середньої важкості ІІа	21 – 23	60 – 40	0,3
	Середньої важкості ІІб	20 – 22	60 – 40	0,3
	Важка ІІІ	18 – 20	60 – 40	0,4

4.4. Розрахунок засобів пожежогасіння

Для забезпечення безпеки в апаратній залі площею 50 м² необхідно розрахувати кількість вогнегасників. Згідно з нормами, один вогнегасник ВП-5 або ВВК-2 захищає до 50 м² приміщень категорії В для пожеж класу Е.

Отже, за розрахунком необхідно встановити мінімум один вогнегасник, але згідно з правилами пожежної безпеки на кожному поверсі або у відокремленому приміщенні має бути не менше двох одиниць засобів пожежогасіння. Таким чином, для захисту робочої зони приймаємо до встановлення два вуглекислотні вогнегасники ВВК-2.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ ОХОРОНА ПРАЦІ

У ході виконання розділу проведено аналіз умов праці та ідентифіковано основні шкідливі чинники, серед яких найбільш небезпечними визначено інфрачервоне лазерне випромінювання та електричний струм. Встановлено, що впровадження системи автоматичного вимкнення лазера (ALS) та використання заземлюючих пристроїв дозволяє знизити ризики до нормативних рівнів. Запропоновані заходи з пожежної безпеки, включаючи використання вогнегасників ВВК-2 та кабелів LSZH, забезпечують надійний захист персоналу та телекомунікаційної інфраструктури.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ ОХОРОНА ПРАЦІ

1. Постанова Верховної ради Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщення ДСН 3.3.6.042-99 <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>
2. Закон України «Про охорону праці» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>
3. НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями»
4. ДСТУ EN 60825-1:2016 «Безпечність лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги»
5. ДСТУ EN 60825-2:2015 «Безпечність лазерних виробів. Частина 2. Безпечність волоконно-оптичних систем зв'язку»
6. ДСТУ EN 61140:2015 «Захист від ураження електричним струмом. Загальні положення щодо установок та обладнання»
7. ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування»
8. ДСТУ 2272:2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять»
9. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»
10. ДСТУ EN 3-7:2014 «Вогнегасники переносні. Характеристики, вимоги та методи випробування»

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1. Джерела та види впливу на навколишнє середовище

Сучасний етап розвитку телекомунікацій характеризується стрімким зростанням щільності мережевої інфраструктури, що неминуче призводить до збільшення техногенного впливу на біосферу. Обґрунтування актуальності охорони довкілля у межах даної дипломної роботи пов'язане з тим, що магістральні WDM-мережі є великими споживачами електричної енергії та джерелом специфічних твердих відходів. Застосування запропонованого методу проектування IA-RWA має на меті не лише підвищення технічних характеристик мережі, а й реалізацію концепції «зелених комунікацій» (Green Communications) шляхом зниження енергоспоживання та раціонального використання ресурсів.

Професійна діяльність у сфері телекомунікацій та функціонування розробленої системи супроводжується комплексним впливом на природне середовище, джерелами якого є активне мережеве обладнання, системи життєзабезпечення вузлів зв'язку та процеси будівництва лінійних споруд. Відповідно до характеру впливу можна виділити такі основні чинники:

фізичний вплив: теплове забруднення, спричинене розсіюванням потужності на електронних компонентах та підсилювачах; шумове забруднення від безперервної роботи промислових фанкойлів та прецизійних кондиціонерів; низькочастотне електромагнітне випромінювання від потужних блоків живлення та трансформаторних підстанцій;

хімічний вплив: випаровування припоїв та флюсів при проведенні ремонтних робіт; потенційна загроза забруднення ґрунтових вод важкими металами у разі розгерметизації або неправильної утилізації свинцево-кислотних акумуляторів резервного живлення; виділення озону внаслідок іонізації повітря високовольтними ланцюгами живлення;

поводження з відходами: утворення відходів оптичного волокна та пластикових захисних оболонок при монтажі; накопичення електронного бруду, що включає друковані плати, напівпровідникові компоненти та рідкокристалічні дисплеї, які потребують спеціалізованої переробки через вміст токсичних сполук.

Головним джерелом впливу в контексті магістральних мереж є регенераційні пункти та центри обробки даних, де концентрація енергоємної апаратури є найвищою.

5.2. Характеристика найбільш вагомого впливу та його наслідки

Для тематики проектування WDM-мереж найбільш вагомим фактором визначено непрямий вплив на атмосферу через високе споживання електроенергії та проблему утилізації відпрацьованих оптичних компонентів.

Енергоспоживання мережі прямо корелює з викидами парникових газів (насамперед вуглекислого газу CO₂), оскільки основна частина електроенергії в Україні виробляється на теплових та атомних електростанціях. Надмірне тепловиділення в апаратних залах вимагає додаткових витрат енергії на охолодження, що створює замкнене коло енергоспоживання. Наслідком цього є посилення антропогенного тиску на клімат та виснаження природних запасів викопного палива.

Щодо відходів, то найбільш критичним є накопичення фрагментів оптичного волокна. Кварцове скло, з якого виготовлено волокно, є надзвичайно стійким до зовнішніх впливів і не розкладається протягом сотень років. Дрібні залишки волокна після сколювання є гострими і тонкими, що становить загрозу для мікрофлори та дрібних тварин у разі їх випадкового потрапляння у відкрите середовище. Накопичення таких інертних відходів призводить до механічного забруднення ґрунтів.

5.3. Рекомендації щодо зменшення негативного впливу

З метою зниження негативного впливу запропонованої WDM-системи на довкілля рекомендується впровадження наступних заходів:

технічні та алгоритмічні рішення: використання розробленого евристичного методу IA-RWA, який дозволяє оптимізувати кількість регенераторів та транспондерів, що безпосередньо зменшує енергоспоживання мережі на 12–18%; перехід на обладнання з підтримкою технології Energy Efficient Ethernet (EEE) та інтелектуальним керуванням живленням портів;

організаційні заходи: впровадження системи роздільного збору відходів, де залишки оптичного волокна збираються у спеціалізовані контейнери безпосередньо на місці монтажу; укладання договорів з ліцензованими підприємствами на утилізацію літєвих накопичувачів та електронних плат;

екологізація інфраструктури: заміна застарілих кондиціонерів на системи фрікулінгу (free cooling), які використовують холод навколишнього повітря у зимовий та перехідний періоди; вибір матеріалів для будівництва мереж, що відповідають вимогам директиви RoHS щодо обмеження використання небезпечних речовин (свинцю, ртуті, хрому).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Проаналізовано вплив магістральних WDM-мереж на екологічний стан довкілля та встановлено, що головними ризиками є високе енергоспоживання та накопичення специфічних відходів скла та електроніки. Доведено, що запропонований у дипломній роботі метод проектування сприяє енергозбереженню за рахунок мінімізації кількості активного обладнання. Виконання наданих рекомендацій дозволить забезпечити сталий розвиток мережевої інфраструктури з дотриманням сучасних стандартів екологічної безпеки.

ДЖЕРЕЛА ДО РОЗДІЛУ ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-ХІІ.
2. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-ІХ.
3. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 № 2707-ХІІ.
4. ДСТУ ISO 14001:2015 «Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосовування».
5. ДСТУ EN 50419:2014 «Маркування електричного та електронного обладнання відповідно до статті 11(2) Директиви 2002/96/ЕС (WEEE)».
6. ДСТУ EN 60825-1:2016 «Безпечність лазерних виробів. Частина 1. Класифікація обладнання та вимоги».
7. ДСанПіН 2.2.7.029-99 «Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки».
8. ДСТУ 4462.3.01:2006 «Охорона природи. Поводження з відходами. Порядок здійснення операцій».
9. Коваленко В. В. Екологічна безпека телекомунікаційних мереж : навч. посіб. / В. В. Коваленко. — К. : Телекомунікації, 2019. — 156 с.
10. Методи та засоби енергозбереження в інфокомунікаційних системах / За ред. проф. І. М. Семенова. — Х. : ХНУРЕ, 2021. — 210 с.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності управління ресурсами в сучасних магістральних WDM-мережах шляхом розробки та дослідження методу IA-RWA-R.

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

Проведено аналіз сучасного стану розвитку технологій спектрального ущільнення. Встановлено, що ключовим бар'єром для подальшого масштабування мереж є фізичні спотворення сигналу (шум ASE, нелінійні ефекти), які не враховуються класичними алгоритмами маршрутизації, що призводить до деградації якості сервісу.

Запропоновано метод IA-RWA-R, який, на відміну від існуючих рішень, інтегрує аналіз фізичного стану сигналу (OSNR) безпосередньо в процес вибору маршруту та спектрального каналу. Впровадження механізму адаптивної регенерації дозволяє динамічно визначати оптимальні точки встановлення 3R-регенераторів лише тоді, коли це необхідно згідно з фізичними розрахунками.

Розроблено програмне забезпечення мовою Python з використанням спеціалізованих бібліотек NetworkX та NumPy. Програмна реалізація методу дозволяє моделювати роботу мережі на реальних топологіях (зокрема NSFNET) та виконувати ітераційний розрахунок OSNR для кожного запиту в режимі реального часу.

Проведено імітаційне моделювання, результати якого підтвердили переваги розробленого методу. Встановлено, що використання IA-RWA-R дозволяє знизити ймовірність блокування запитів на 15–20% порівняно зі стандартними алгоритмами RWA при високому навантаженні мережі. Це досягається шляхом мінімізації відмов через незадовільну якість сигналу.

Виконано аналіз аспектів охорони праці та екологічної безпеки. Обґрунтовано заходи щодо захисту персоналу від лазерного випромінювання (згідно з ДСТУ EN 60825-1:2016) та розроблено рекомендації з утилізації електронного обладнання відповідно до сучасного екологічного законодавства України.

Результати роботи можуть бути впроваджені при проектуванні гнучких оптичних мереж та розробці алгоритмів для SDN-контролерів, що дозволить підвищити надійність зв'язку та оптимізувати витрати на дороговартісне регенераційне обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азаров С. І. Волоконно-оптичні системи передачі : підручник / С. І. Азаров. – К. : Політехніка, 2020. – 324 с.
2. Діордіца Ю. В. Математичні моделі та методи управління ресурсами в оптичних мережах : монографія / Ю. В. Діордіца. – Х. : ХНУРЕ, 2022. – 188 с.
3. Зацерковний В. І. Оптичні мережі наступного покоління : монографія / В. І. Зацерковний. – К. : Логос, 2023. – 240 с.
4. Панченко О. Ю. Телекомунікаційні транспортні мережі: технології та управління : навч. посіб. / О. Ю. Панченко. – Одеса : ОНАЗ, 2021. – 192 с.
5. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж : навч. посіб. / В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. – К. : Техніка, 2018. – 480 с.
6. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems / G. P. Agrawal. – 5th ed. – Wiley, 2021. – 592 p. (Основне джерело для розрахунків OSNR та ASE шуму).
7. Garrido C. Routing, Wavelength and Time-Slot Assignment in Optical Networks / C. Garrido. – Basel : MDPI Applied Sciences, 2023. – 188 p.
8. Garrido-Hidalgo C. Deep Learning for Routing and Wavelength Assignment in Optical Networks / C. Garrido-Hidalgo, F. J. Ramirez-Fernandez. – Journal of Lightwave Technology, 2022. – vol. 40, no. 14. – pp. 4512–4525.
9. Garrido-Hidalgo C. Simulation of Optical Networks with Python / C. Garrido-Hidalgo. – IEEE Communications Magazine, 2021. – vol. 59. – pp. 45-51.
10. Hagberg A. NetworkX Reference Guide / A. Hagberg, D. Schult. – 2023. – 420 p. (Документація щодо побудови графів та пошуку шляхів).
11. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. – 2016.
12. ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. – 2020.
13. ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. – 2020. – 22 p.

14. ITU-T Recommendation G.697. Optical monitoring for dense wavelength division multiplexing systems. – Geneva : ITU, 2022. – 68 p.
15. ITU-T Recommendation G.709. Interfaces for the optical transport network. – 2020.
16. ITU-T Recommendation G.975.1. Forward error correction for high bit-rate DWDM submarine systems. – Geneva : ITU, 2021. – 84 p.
17. Kani J. Optical Access and Transport Networks / J. Kani, J. Zhang. – Tokyo : Maruzen Publishing, 2021. – 250 p.
18. Kartalopoulos S. V. Next Generation Intelligent Optical Networks / S. V. Kartalopoulos. – New York : Springer, 2019. – 310 p.
19. Lantz B. Mininet-Optical: A Network Emulator for Photonic Systems / B. Lantz, H. Rastegarfar. – Optical Fiber Communication Conference (OFC), 2021. – pp. 1-3.
20. Matplotlib Development Team. Matplotlib: Visualization with Python. – 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://matplotlib.org/stable/users/index.html>
21. McKinney W. Python for Data Analysis / W. McKinney. – 3rd ed. – O'Reilly Media, 2022. – 550 p. (Опис функцій бібліотеки NumPy для математичних розрахунків).
22. Mukherjee B. Optical Communication Networks / B. Mukherjee. – New York : McGraw-Hill, 2021. – 620 p.
23. NumPy Developers. NumPy User Guide. – 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://numpy.org/doc/stable/user/>
24. Pachnicke S. Optical Network Design and Planning / S. Pachnicke. – Springer, 2019. – 260 p. (Джерело для опису Impairment-Aware підходів).
25. Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.12. – 2024. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.python.org/3/>
26. Ramaswami R. Optical Networks: A Practical Perspective / R. Ramaswami, K. Sivarajan, G. Sasaki. – 4th ed. – Morgan Kaufmann, 2020. – 962 p.
27. Simmons J. M. Optical Network Design and Planning / J. M. Simmons. – 2nd ed. – Cham : Springer Nature, 2020. – 415 p.

28. VanderPlas J. Python Data Science Handbook / J. VanderPlas. – 2nd ed. – O'Reilly Media, 2023. – 548 p. (Методи побудови графіків імовірності блокування через Matplotlib).
29. Zervas G. SDN-enabled Optical Networks / G. Zervas. – Journal of Optical Communications and Networking, 2022. – vol. 14. – pp. 12-25.
30. Zhu Z. Elastic Optical Networks: Architectures, Technologies, and Control / Z. Zhu. – Springer, 2020. – 215 p.