

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи балансування навантаженням каналів
комп'ютерних мереж

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-22-2
Соболь Г.Ю.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Янковський О.А.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

Коваленко А.А.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 – Комп'ютерна інженерія _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Соболю Ганні Юріївні _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи балансування навантаженням каналів комп'ютерних мереж

затверджена наказом по університету від “ 6 ” листопада 2023 р. № 1299 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 січня 2024р.

3. Вхідні дані до роботи 1) моделі та методи для керування мережевими інформаційними потоками; 2) сучасні вимоги до мережних показників; 3) перелік використаних програмних та апаратних засобів: ОС Windows 10, OpNet 14, NS-3.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1) аналіз сучасного стану проблеми _____

2) огляд технологій балансування навантаженням _____

3) моделі управління мережним трафіком _____

4) вибір програмних та апаратних засобів реалізації _____

5) проведення експериментальних досліджень _____

б) висновки _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайдів презентації – 15 шт.

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз стану проблеми та сучасних методів її вирішення	07.11.23 – 14.11.23	
2	Огляд технологій управління балансування навантаженням	15.11.23 – 22.11.23	
3	Розробка моделі управління мережним трафіком	23.11.23 – 14.12.23	
4	Вибір програмних та апаратних засобів реалізації	15.12.23 – 21.12.23	
5	Тестування запропонованого метода	22.12.23 – 28.12.23	
6	Оформлення пояснювальної записки	29.12.23 – 12.01.24	

Дата видачі завдання 7 листопада 2023 р.р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Янковський О.А.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 67 с., 21 рис., 1 табл., 1 дод., 15 джерел.

WDM, ВІДНОВЛЕННЯ, ТОПОЛОГІЯ, МЕРЕЖА З
МАРШРУТИЗАЦІЄЮ ЗА ДОВЖИНОЮ ХВИЛІ, МУЛЬТИПЛЕКСОР,
ЗАХИСТ

У волоконно-оптичних комунікаціях мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) стало домінуючою технологією, яка забезпечує неймовірний інтелект і масштабованість в оптичних мережах.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка моделей та методів балансування інформаційними потоками в WDM мережах.

Робота зосереджена на алгоритмі маршрутизації світлового шляху із гарантованим QoS і призначенням довжини хвилі, який забезпечує кращі результати також щодо ймовірності блокування.

ABSTRACT

Master's thesis: 67 pages, 21 figures, 1 tables, 1 appendices, 15 sources.

WDM, RECOVERY, TOPOLOGY, WAVELENGTH ROUTING NETWORK,
MULTIPLEXER, PROTECTION

In fiber-optic communications, wavelength division multiplexing (WDM) has become the dominant technology that provides incredible intelligence and scalability in optical networks.

The purpose of the qualification work is to develop models and methods of balancing information flows in WDM networks.

The work focuses on a lightpath routing algorithm with guaranteed QoS and wavelength assignment, which provides better results also in terms of blocking probability.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	10
2 ОГЛЯД ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	11
2.1 Оптичне мультиплексування за довжиною хвилі.....	11
2.2 Розвиток мереж WDM	13
2.3 Адаптивна маршрутизація та регулювання навантаження.....	15
2.3.1 Повністю оптична багатоадресна передача до широкодоменої системи WDM.....	16
2.3.2 Багатоадресні передачі в оптичну систему WDM з одним переходом.....	16
2.3.3 Багатоадресна маршрутизація через системи повного розподілу	18
2.4 Відмовостійка маршрутизація в WDM	21
2.5 QoS у мережах WDM.....	22
3 IP ЧЕРЕЗ WDM	24
3.1 QoS у мережах IP-Over-WDM	25
3.2 Алгоритми виділення світлового шляху	26
3.3 Архітектура і деякі проблеми проектування.....	27
3.4 Відновлення світлового шляху в WDM.....	29
3.5 Класифікація методів відновлення.....	31
3.6 Оптична мережа WDM з маршрутизацією по довжині хвилі з підключеннями світлового шляху	33
3.7 Живучість WDM мереж.....	34
4 МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ WDM.....	37

4.1	Технологія балансування навантаженням.....	37
4.2	Метод балансування навантаженням.....	37
4.2.1	Розрахунок навантаження для прогнозування трафіку	38
4.2.2	Жадібна рандомізована адаптивна процедура пошуку.....	39
4.3	Прихована модель Маркова	40
4.4	Прогнозування перевантаження.....	42
4.5	Алгоритм призначення довжини хвилі.....	44
4.6	Алгоритм упорядкування довжини хвилі.....	46
4.7	Цільова функція.....	48
5	РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ	50
5.1	Показники ефективності.....	50
5.2	Порівняння ефективності	50
5.2.1	Трафік СВР зі змінною швидкістю передачі даних	52
5.2.2	Експоненціальний трафік із змінною швидкістю передачі даних.....	54
	ВИСНОВКИ.....	56
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	57
	ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

DEMUX – демультіплексор (англ., Demultiplexer)

DLA – розподіл світлових шляхів (англ., Distribute Light Path Allocation)

DLE – динамічне встановлення світлових шляхів (англ., Dynamic Lightpath Establishment)

GRASP – процедура жадібного випадкового адаптивного пошуку (англ., Greedy Random Adaptive Search Procedure)

HMM – прихована модель Маркова (англ., Hidden Markov Model)

ILP – цілочисельне лінійне програмування (англ., Integer Linear Program)

LBIQLE – технологія балансування навантаження для покращення Qos для встановлення світлового шляху (англ., Load Balancing Technique to Improve Qos for Lightpath Establishment)

LP – лінійне програмування (англ., Linear Programming)

LSP – шлях з перемиканням міток (англ., Label Switch Path)

MUX – мультиплексор (англ., Demultiplexer)

RWA – маршрутизація та призначення довжини хвилі (англ., Routing And Wavelength Assignment)

ВСТУП

У мережах WDM вимоги до зв'язку «точка-точка» змінюють проблему перевантаження існуючої мережі. У мережах з комутацією каналів зменшення перевантаження довжин хвиль на кожній лінії зв'язку є наполегливістю балансування навантаження. Вільні довжини хвилі потрібні та використовуються для майбутніх запитів на з'єднання, для керування несправностями та збоями під час відновлення.

Балансування навантаження включає дві додаткові проблеми, такі як підключення резервного шляху та проблема маршрутизації трафіку. Проблема, визначена для дослідження, полягала в досягненні необхідної якості обслуговування (QoS) у всіх мережах WDM з комутацією оптичних пакетів. Надання QoS гарантує кілька розширених послуг, таких як передача пакетів у реальному часі, що залишається в основному невирішеним для оптичних магістралей.

Запропонований метод балансування навантаженням використовується для підвищення QoS в мережі WDM. У цьому методі використовується прихована модель Маркова (НММ), заснована на передбаченні трафіку разом із завданням довжини хвилі і віртуальною топологією. Модель прогнозування трафіку з використанням НММ і GRASP використовується для мінімізації неузгодженості трафіку та балансування навантаженням на оптичні канали між вузлами.

1 МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У волоконно-оптичних комунікаціях мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) стало домінуючою технологією, яка забезпечує неймовірний інтелект і масштабованість оптичних мереж. Але прозорі оптичні мережі WDM надзвичайно вразливі до збоїв фізичного рівня.

В магістерській кваліфікаційній роботі необхідно запропонувати метод балансування навантаженням оптичних каналів високошвидкісних мереж з технологією спектрального стиснення передаваної інформації.

В рамках магістерської кваліфікаційної роботи необхідно:

- провести аналіз факторів, впливаючих на роботу оптичних мереж;
- провести аналіз моделей та методів балансування мережевим трафіком;
- запропонувати метод балансування навантаженням оптичних каналів;
- провести імітаційне моделювання;
- провести аналіз отриманих результатів.

2 ОГЛЯД ОПТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Оптичне мультиплексування за довжиною хвилі

У цю цифрову еру попит на зв'язок зріс, оскільки нові методи зв'язку та мережі мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) найкраще задовольняють цей попит. WDM стає домінуючою технологією, яка забезпечує неймовірний інтелект і масштабованість в оптичних мережах, об'єднуючи функціональні можливості існуючих мережевих архітектур, таких як синхронна оптична мережа (SONET), синхронна цифрова ієрархія (SDH) і так далі.

Хоча оптичні волокна можуть підтримувати дуже високі швидкості передачі даних (майже 50 терабіт на секунду), відповідне електронне обладнання для обробки не може впоратися з такою швидкістю, і, отже, електронна обробка даних у вузлах мережі обмежує пропускну здатність мережі. Таким чином, щоб підвищити швидкість, повністю оптичні системи WDM дозволяють швидко передавати інформацію без необхідності електронних перетворювачів на кожному вузлі. Наприклад, нещодавні дослідження оптичних мереж з високою пропускну здатністю використовують WDM для багатьох підходів багатоадресної передачі, таких як телевізійне мовлення, відеоконференції, електронне навчання через взаємодію, онлайн-продажі та спільні ігри.

Використання додатків WDM розширило можливості, розглядаючи переваги оптичних волокон. Кілька топологій WDM, таких як сітка та кільце, широко використовуються на основі цієї програми.

WDM – це стратегія мультиплексування, яка передає кілька інформаційних пакетів із величезною швидкістю передачі (5 ТГц) на одне оптичне волокно за допомогою численних каналів довжини хвилі з пропускну спроможністю лазерного світла 1–10 Гбіт/с.

У системі WDM можна пересилати інформацію до пункту призначення, який відповідає її довжинам хвилі, що називається маршрутизацією за довжиною хвилі, а система, яка використовує цю стратегію маршрутизації за довжиною хвилі, називається системою маршрутизації за довжиною хвилі. Ця система складається з комутаторів/вузлів маршрутизації довжини хвилі, які з'єднані між собою оптичними волокнами.

Деякі вузли, відомі як перехресні, об'єднані зі станціями-джерелами, де інформація від кількох кінцевих клієнтів може бути мультиплексована в один потік WDM. Потім вихідна станція виконує оптико-електричне (О/Е) перетворення для взаємодії з оптичною системою.

І навпаки, якщо передана довжина хвилі передає інформацію від джерела до пункту призначення без О/Е перетворення або буферизації на проміжних вузлах, це позначається як повністю оптична маршрутизована система, яка була запропонована для побудови величезних широкозонних систем.

Для даного запиту на обмін інформацією від джерела до пункту призначення з'єднання, фіксоване на оптичному рівні, таке як телефонна система з комутацією каналів, починає працювати з визначення маршруту (шляху) в мережі.

Ця система з'єднує вихідну станцію зі станцією призначення, розподіляючи вільну довжину хвилі на більшу частину волокна, з'єданого повністю оптичним способом, відомим як світловий шлях. Уся швидкість передачі (пропускна здатність), доступна на цьому світловому шляху, призначається з'єднанням на деякий час. Однак, коли з'єднання досягне кінця, відповідний шлях світла буде звільнено, і довжина хвилі стане неактивною на більшій частині з'єднання вздовж маршруту.

Розглянемо мережу з маршрутизацією на всіх довжинах оптичних хвиль, показану на рисунку 2.1. Він демонструє систему маршрутизації за довжиною хвилі, що містить два крос-з'єднання WDM, а саме S1, S2 та п'ять станцій доступу (від А до Е).

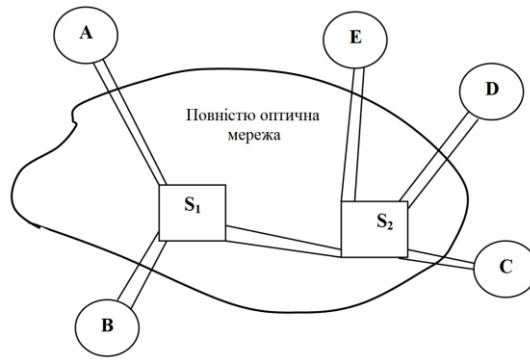


Рисунок 2.1 – Мережа з маршрутизацією за довжинами хвиль

У цій системі зберігаються три шляхи світла (С до В, С до А та D до Е). Щоб побудувати будь-який шлях світла, зазвичай вимагається, щоб подібна довжина хвилі була виділена для більшості з'єднань (каналів) на шляху. Ця передумова відома як обмеження довжини хвилі-частоти або обмеження смуги пропускання, а системи з прямою передачею довжини хвилі з цим обмеженням позначаються як системи безперервної довжини хвилі.

Обмеження безперервності довжини хвилі розпізнає систему з узгодженою довжиною хвилі в системі з комутацією каналів, яка уникає викликів тільки тоді, коли немає обмежень на жодному зі з'єднань шляху, виділеного для запиту.

2.2 Розвиток мереж WDM

Рисунок 2.2 ілюструє модель системи WDM типу «точка-точка». Системи WDM використовуються багатьма телекомунікаційними організаціями для з'єднань типу точка-точка. Це розташування оцінюється збільшеними запитами на каналі передачі даних. Якщо запит виходить за межі обмежень на волокон, WDM обмежить свої дорожчі волокна. 4-канальний мультиплексор WDM (MUX) об'єднує чотири автономні потоки даних. Кожен потік даних передається на певній довжині хвилі по волокну, а потім надходить до демультимплексора (DE-MUX).

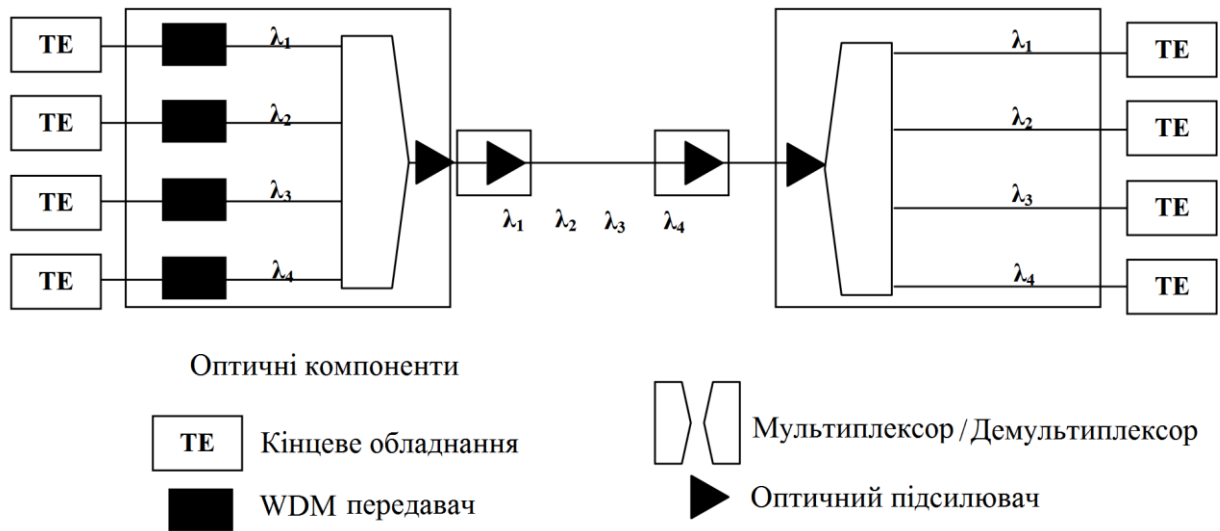


Рисунок 2.2 – Чотирьохканальна система передачі WDM точка-точка з підсилювачами

Двонаправлений мультимплексор додавання/відведення за довжиною хвилі (B-WADM) має дві окремі пари мультимплексора (MUX) і демультимплексора (DEMUX).

На рисунку 2.3 показана модель мультимплексора додавання/виведення за довжиною хвилі (WADM), яка складається з DEMUX, організованого набором перемикачів 2*2, і MUX.

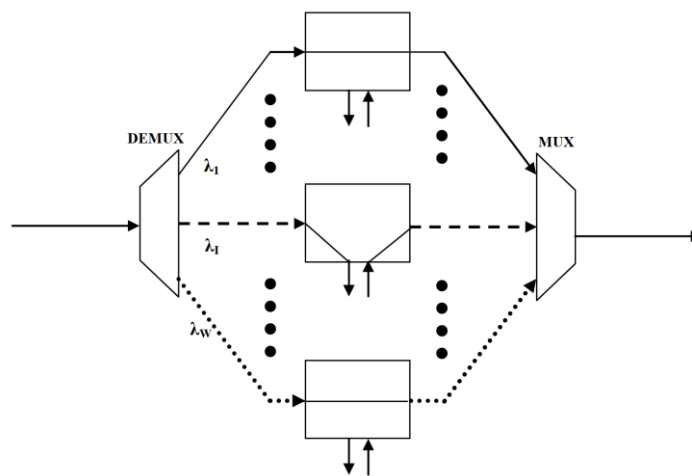


Рисунок 2.3 – Модель мультимплексора

Мультиплексор – це пристрій, який вибирає один із кількох аналогових або цифрових вхідних сигналів та пересилає обраний в одну лінію. Мультиплексор із подвійною кількістю входів має кілька ліній вибору, які використовуються для вибору лінії введення, яка надсилає дані на вихід. Мультиплексори в основному використовуються для збільшення обсягу даних, які можна надіслати через мережу протягом певного часу та пропускної здатності. І навпаки, DEMUX – це пристрій, що приймає один вхідний сигнал і вибирає одну з багатьох ліній виведення даних, які підключені до одного входу. WADM вбудований у фізичний оптоволоконний інтерфейс, і більшість перемикачів 2*2 перебуває у стані «смушка», тоді більшість довжин хвиль проходить через WADM «незбурено».

Якщо один з перемикачів 2*2 переведений у «перехресний» стан за допомогою електронного керування, тоді сигнал на відповідній довжині хвилі випадково «скидається», а інший інформаційний потік може бути «включений» на подібну довжину хвилі. Якщо інтерфейс WADM має хороші можливості обробки, то додаткова довжина хвилі буде «відкинута/додана». Мультиплексування вводу/виводу можна модернізувати для побудови оптичного мультиплексора вводу/виводу (OADM). Наприклад, OADM усуває частину навантаження в діапазоні довжин хвиль.

2.3 Адаптивна маршрутизація та регулювання навантаження

Мотивація балансування навантаження в системах на основі WDM полягає в тому, щоб зменшити блокування в системі. Блокування визначається затримкою в системах комутації пакетів, і, отже, мінімізоване блокування пропонує найкращі послуги QoS. У системах комутації каналів зменшене блокування означає, що певна кількість вільних довжин хвиль доступна для кожного з'єднання, щоб відповідати майбутнім вимогам зв'язку, щоб збільшити пропускну здатність і зменшити недоліки підходів до відновлення.

Регулювання навантаження в системах WDM складається з двох питань, а саме доступності світлового шляху та маршрутизації трафіку.

Маршрутизація трафіку бере свій початок з початкової стадії систематичних досліджень [1]. Адаптивна маршрутизація консолідує дані фази мережі для вибору шляху щодо кожної оптичної системи [2]. Стратегії відхилення потоку [3] можна використовувати для визначення оптимальної маршрутизації, яка збільшує пропускну здатність каналів системи.

2.3.1 Повністю оптична багатоадресна передача до широкодоменої системи WDM

Багатоадресна передача в мережах WDM є ефективним підходом до економії пропускну здатності та вартості. Однак вільна довжина хвилі може не бути однаковою між різними переходами в багатоадресному тракті світла, особливо в оптичних мережах WDM із великим навантаженням.

Для ефективної реалізації багатоадресних додатків слід запровадити техніку мережевого кодування (NC) у повністю оптичні багатоадресні мережі WDM, щоб вирішити проблему конфлікту довжин хвиль між багатоадресним запитом і одноадресним запитом. Порівняно з оптичною груповою розсилкою на основі перетворення довжини хвилі, оптична багатоадресна розсилка на основі NC може досягти кращої продуктивності багатоадресної передачі за менших витрат.

2.3.2 Багатоадресні передачі в оптичну систему WDM з одним переходом

У просунутих системах запит на пропускну здатність передачі, а також максимальна якість адміністрування вимагає ефективного використання системних активів, таких як приймачі, передавачі та пропускну здатність каналу передачі (смуга пропускання). Методом збереження цих активів є

продуктивне використання багатоадресної розсилки скрізь, де вона доступна. Джерело, що передає дані на кілька кінцевих пунктів призначення, відоме як багатоадресна передача, може знову запланувати унікальну передачу до різних пунктів призначення, щоб зберегти пропускну здатність каналу передачі даних. Численні попередні спроби досліджень багатоадресної розсилки були зосереджені на проблемах багатопрохідної розсилки.

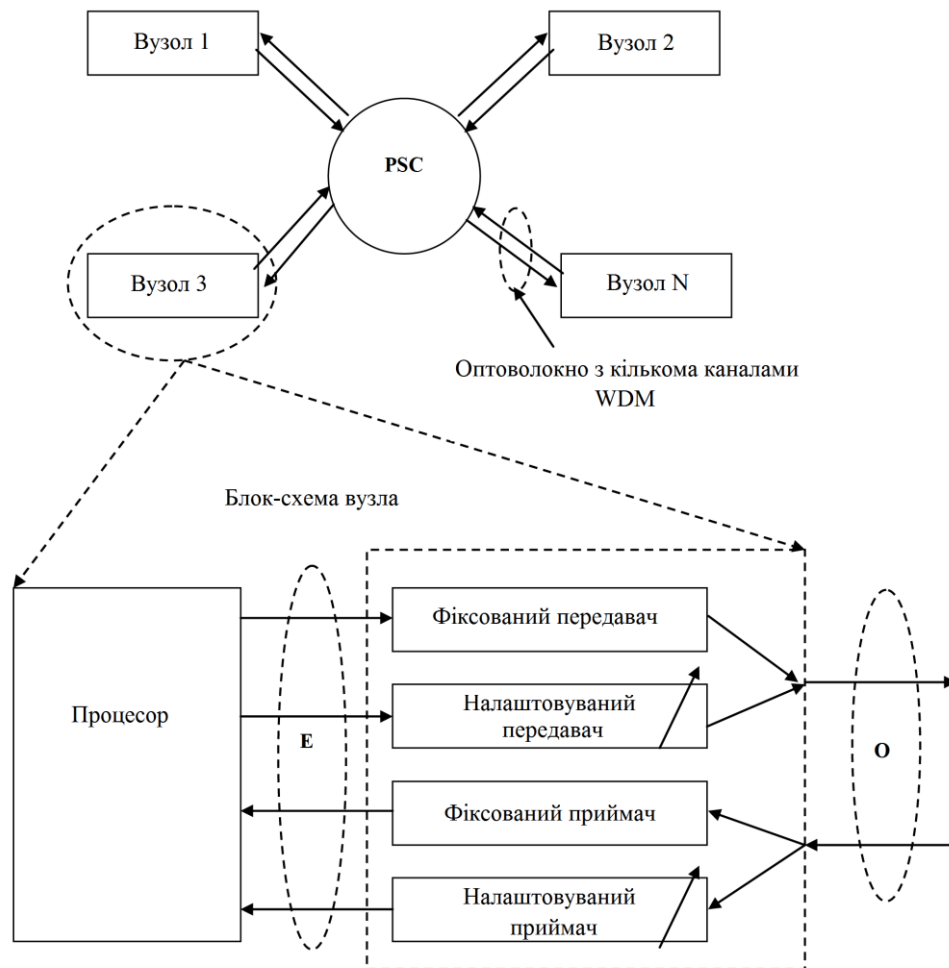


Рисунок 2.4 – Мережа на основі пасивної зірки

Рисунок 2.4 демонструє пасивні зірkozалежні мережі. Багатопрохідна багатоадресна розсилка на вихідному вузлі полягає в створенні незначних витрат, і вона проходить через більшість вузлів кінцевого призначення та відома як проблема мінімального дерева Штайнера [4].

Вузли зв'язуються через оптоволокну до пасивного зіркового зв'язувача, а інформаційні канали фіксуються на вузлах через регульовані приймачі та передавачі, які можуть спрямовувати будь-які потоки в структурі.

Передачі на кожному каналі виконуються до працюючих вузлів зірковим зв'язувачем і кожний вузол може отримувати дані, скеровуючи свій власний приймач на відповідний канал.

Вузол-джерело налаштовано для багатоадресної передачі до різних вузлів в пункті призначення. Вузли в пункті призначення налаштовуються на відповідний канал у потрібний час

Проблема багатоадресної розсилки на одному вузлі в системах WDM розглядається в кількох минулих роботах [5].

Унікальна передача в кожній груповій передачі даних призводить до незначного використання швидкості передачі та ресурсів передавача. Оскільки одержувачі на кожному вузлі призначення отримують доступ, кілька вузлів мають довшу затримку, ніж інші, щоб отримати повідомлення. Це спонукає до марнотратного використання ресурсів.

2.3.3 Багатоадресна маршрутизація через системи повного розподілу

Для систем повного світлового розділення очікується, що вузли матимуть велику пропускну здатність для розподілу. Як уже згадувалося раніше, шлях світла – це оптичний шлях, який перетинає кілька вузлів і підтримує властивість когерентності довжини хвилі для покращення роботи всієї системи.

Негайна реакція мережі після збою перемикавання трафіку на інший шлях відома як захист багатоадресного світлового шляху.

Світлове дерево – це розширення «точка-багато точок», яке використовується для створення прихованої основи для багатоадресної передачі в оптичній системі [6]. Кожній гілці згенерованого багатоадресного

дерева призначається довжина хвилі для створення світлового дерева для сеансу. Наприклад, у цій концепції світлового дерева всі вузли мають достатню межу розподілу світла, що створює повну систему розподілу світла. На кожній межі розгалуження промінь випромінюваного світла розбивається на певну кількість розділених променів, які перетворюють світловий шлях на світлове дерево, як показано на рисунку 2.5. Алгоритми завдання по довжині хвилі та множинної маршрутизації приймають вимогу відповідності довжин хвиль, що робить перетворення довжини хвилі зайвим.

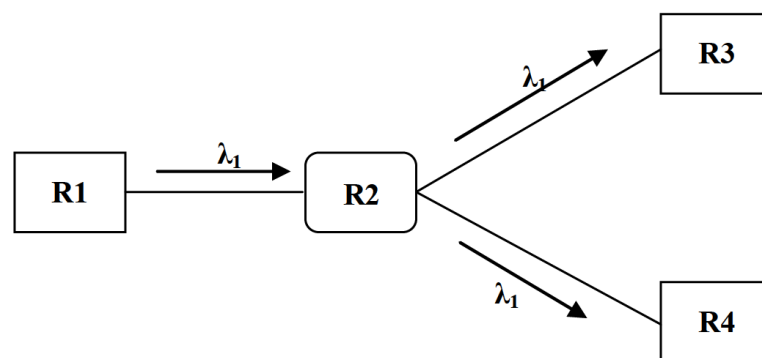


Рисунок 2.5 – Приклад дерева багатоадресної передачі

Обчислення багатоадресної передачі прийнятні для систем WDM із можливістю повного розділення (розщеплення) світла. Дерево багатоадресної передачі можна розділити на два види, а саме динамічне та статичне. Статичне можна розділити на нефіксовану та фіксовану форми. Подібним чином, Steiner Tree/Minimal Spanning Tree (MST) або процедури лінійного програмування (LP) використовуються для обчислення охоплюючого дерева для багатоадресної форми.

У статичній багатоадресній маршрутизації та розподілі довжини хвилі (Multicast Routing and Wavelength Assignment – MCRWA) визначаються дерева, призначені для багатоадресного збору, без поняття про корисність зв'язку. MCRWA – це технологія, реалізована в оптичних мережах WDM, де між джерелом і набором пунктів призначення встановлюються виділені

шляхи, на відміну від одноадресної передачі, коли джерело з'єднується лише з одним пунктом призначення. Для багатоадресного сеансу створюється багатоадресне дерево для встановлення з'єднання від джерела до всіх пунктів призначення. Оскільки система є багатоадресною, вона добре збалансована як за кількістю довжин хвиль, так і за навантаженням трафіку.

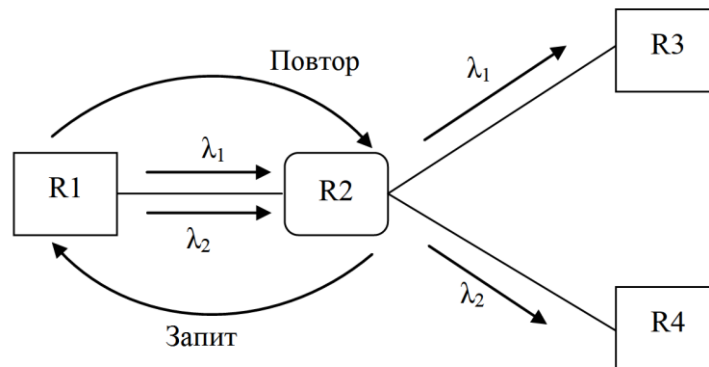


Рисунок 2.6 – Налаштування LSP, ініційоване джерелом

Якщо в багатоадресній формі побудований один MST, це змінений підхід, а якщо встановлено два дерева MST, це альтернативний підхід.

Надалі використовується алгоритм вибору довжини хвилі для захоплення дерева MST і переходу до задачі по довжині хвилі. Заміщаючий підхід більш кращий ніж статичний. В динамічному режимі MCRWA використовується можливість зв'язку на кожній довжині хвилі. Топології кожної довжини хвилі різні.

На рисунку 1.6 показано ініційоване встановлення шляху комутації міток (Label switched path – LSP). Можна виконати алгоритм LSP або MST на кожній довжині хвилі та вибрати ідеальну. Статичний MCRWA є помірно менш складним, ніж динамічний MCRWA. Тем не менше, динамічний MCRWA забезпечує більш високу продуктивність, і можливо цілком встановити обмеження по затримці для проблем MCRWA, щоб отримати потрібні результати.

2.3.4 Багатоадресна маршрутизація через системи розрідженого розподілу

У системах розрідженого розподілу не всі вузли мають здатність розділяти світло. Існує велика потреба повністю використовувати вузли для встановлення світлового шляху в мережі, що мінімізувало відхилення світлового шляху в мережах WDM. Стандарти вимагають спільних зусиль, пов'язаних із багатоадресною маршрутизацією Інтернет-протоколу (IP). Є два набори стандартів.

Один набір окреслює дерево багатоадресної передачі, тоді як інший набір створює дерево багатоадресної передачі, яке працює на рівні IP WDM. Унікальне багатоадресне дерево може бути недостатнім з точки зору багатоадресної інформації до кожного кінцевого пункту призначення в розрідженому світовому розділенні. Це означає, що багатоадресний прогноз дуже потрібен.

2.4 Відмовостійка маршрутизація в WDM

Під час конфігурації зв'язків із оптичним WDM з маршрутизацією за довжиною хвилі важливо надати певний рівень гарантії з'єднанням каналів і вузлів у системі.

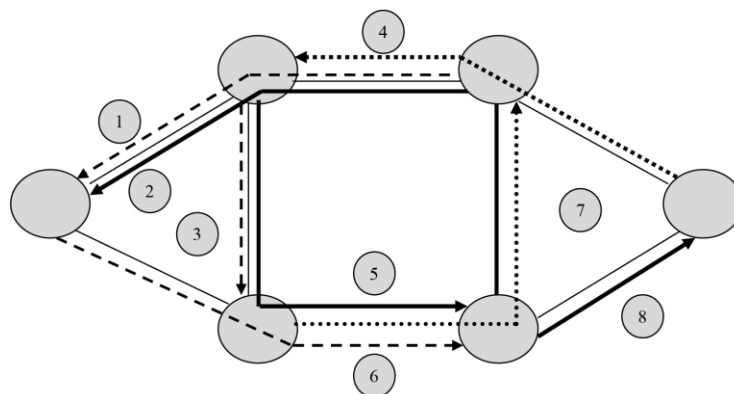


Рисунок 2.7 – Мережа з вісьмома маршрутизованими світловими шляхами

На рисунку показано маршрутизацію восьми обмежених світлових шляхів. Нормальним способом забезпечення безпеки є налаштування двох каналів непересічних світлових шляхів (маршрутів у термінах світлових шляхів) для кожного запиту з'єднання.

Один із шляхів світла, який називається основним (primary), використовується для передачі інформації, тоді як альтернативний шлях світла зберігається як резервний канал на випадок, якщо з'єднання в основному шляху світла розривається. Цей метод можна використовувати для захисту від будь-яких проблем з каналами в системі.

Для відновлення з'єднання основний шлях, а також шлях заміни використовуватимуться як непересічні вузли.

2.5 QoS у мережах WDM

Сьогодні більшість мережевих послуг визначаються з точки зору строгих параметрів якості обслуговування (QoS). У мережі WDM численні маршрути, які належать до оптичного рівня, обробляються без захисту. Отримання цих маршрутів у трафіку іноді впливає на протоколи верхнього рівня, тобто IP/MPLS.

Якість MPLS покращується, а динамічна маршрутизація виявляється більш привабливою, ніж фіксована маршрутизація для задоволення відповідних запитів.

Концепція QoS у системі зв'язку тісно пов'язана з продуктивністю мережі основної системи маршрутизації. QoS визначається як сукупний ефект продуктивності послуги, який визначає ступінь задоволеності користувача послугою. Мережа визначається за допомогою метрики QoS. Під час маршрутизації ініціалізація виконується таким чином, щоб вибраний маршрут відповідав вимогам QoS клієнта. Характеристики QoS використовуються для підтримки маршрутизації в оптичній мережі, включаючи пропускну здатність, затримку та швидкість втрат.

Для кожного світлового шляху коефіцієнт якості (Quality factor – QF) визначається як смуга пропускання та затримка. Смуга пропускання в основному залежить від довжини каналу та ефекту дисперсії, тоді як затримка залежить від довжини хвилі, призначеної для світлового шляху. Для обчислення шляху QoS потрібна інформація про поточний стан мережі та вимоги клієнта для запиту на підключення.

Після вибору маршруту, який задовольняє вимоги QoS, необхідно перевірити доступність довжини хвилі.

Світловий шлях, який починається і закінчується на IP-комутаторах, піддається обмеженню довжини хвилі. Світловий шлях використовує відповідну довжину хвилі на всіх каналах уздовж вибраного фізичного шляху.

Для обміну повідомленням від вхідного комутатора до вихідного комутатора потрібна послідовність з одного або кількох світлових шляхів. Відповідно, оптичний обмін відбувається всередині шляху світла, а оптико-електронний обмін відбувається між двома зворотними шляхами світла. Традиційні методи надання QoS в IP-системах важко застосовувати в кожній окремій оптичній системі, оскільки немає оптичного аналога для збереження та пересилання шаблонів. Забезпечення QoS світлових шляхів у системі WDM відображає шаблони маршрутизації, які забезпечують якість сигналу з гарантованою передачею по оптичному волокну.

Технологія QoS в оптичних системах WDM має велику різницю порівняно з технікою QoS в електронних комутаторах і маршрутизаторах.

Однією із значних відмінностей у мережі є відсутність черги пакетів у пристроях WDM, і, таким чином, пакети буферизуються до Fiber Defer Line (FDL). FDL – це довга волоконна лінія, яка використовується для затримки оптичного сигналу на певний період. Замість черги більшість оптичних систем використовують додаткову сигналізацію для підтримки пропускну здатності, що передається через оптично обмінювану інформацію.

3 IP ЧЕРЕЗ WDM

Вимога до високої швидкості передачі даних через сучасний IP-протокол полягає в забезпеченні високої пропускної здатності систем IP-через-WDM.

У системі IP-через-WDM вузли системи використовують маршрутизацію за довжиною хвилі (Wavelength routing switches – WRS) разом із комутаторами IP. Вузли асоціюються з ланцюгами, щоб розробити самодостатню фізичну топологію. Будь-які два комутатори IP у цій системі WRS можуть бути пов'язані з повністю оптичним потоком WDM, відомим як світловий шлях, і група світлових шляхів може підтримувати шаблон віртуального з'єднання.

Світловий шлях має здатність генерувати віртуальні вузли, і, відповідно, група світлових шляхів вводить віртуальну (або узгоджену) топологію в систему. У віртуальній топології світловий шлях бере на себе прямий трафік між вузлами, уздовж яких він взаємодіє. Трафік спостерігається від вихідних вузлів до вузлів, розташованих у пункті призначення. Вузли, які не пов'язані з віртуальною топологією, взаємодіють один з одним і використовують «схему з кількома переходами». шляхом використання електронних мереж комутації пакетів на проміжних вузлах, які належать до віртуальної топології.

Таким чином, комутація електронних пакетів може бути надана IP-комутаторам, комутаторам в ATM тощо, щоб підказувати системі ATM-через-WDM або окремо мережі IP-через-WDM.

У системі IP-over-WDM передбачено дві стратегії безпеки. Це:

- підтримка надійності мережі WDM (тобто налаштування резервного світлового шляху для кожного основного світлового шляху);
- підтримка відновлення на рівні IP (т. з. надмірне забезпечення системи).

3.1 QoS у мережах IP-Over-WDM

Підхід WRS розширює диференційовані оптичні послуги (Differentiated Optical Services – DoS). DoS демонструє надзвичайні оптичні властивості шляхів світла.

Світловий шлях має набір оптичних параметрів, наприклад затримку, частоту бітових помилок (BER) і пропускну здатність.

Ці оптичні параметри вимірюють QoS, доступний через наданий шлях. Причина таких оцінок полягає в тому, щоб охарактеризувати класи, пов'язані з оптичними послугами, пропорційними класам IP QoS [8].

Система DoS складається з шести частин:

- класи обслуговування: клас обслуговування DoS узгоджується групою параметрів, які відображають якість, а також слабкі сторони оптичного сигналу, що передається вздовж світлового шляху;

- розрахунок задачі спрямування та довжини хвилі: у мережі WDM для заданого запиту на з'єднання необхідно знайти маршрут і призначити виділену довжину хвилі вздовж цього маршруту (алгоритм призначення маршруту та довжини хвилі запиту на підключення з використанням мінімальних мережевих ресурсів називається алгоритмом маршрутизації та призначення довжини хвилі (RWA), обов'язковим є використання алгоритму RWA, який приймає атрибути QoS каналів різних довжин хвиль, а прихована ідея цього обчислення RWA полягає у використанні підходів адаптивної ваги, які описують властивості каналів різних довжин хвиль (наприклад, пропускну здатність, затримка));

- групи світлових шляхів: світлові шляхи в системі організовані як групи, які відображають характеристики на основі оптичної передачі з кінцевою метою;

- класифікатор активності: потоки трафіку впорядковані в підтримувані класи за допомогою мережі;

- класифікація проводиться на вході;

- алгоритм призначення шляхів світла: для призначення шляхів світла було створено різні алгоритми;
- контроль доступу: об'єкт, відомий як локатор оптичних ресурсів, вимагає WDM для керування динамічним забезпеченням світлових шляхів.

Локатор оптичних ресурсів відстежує такі ресурсів, як кількість довжин хвиль, з'єднань і перехресних з'єднань, доступних для кожного світлового шляху, а також його якості, такі як використання смуги пропускання. Функція оптичного локатора полягає в тому, щоб встановити з'єднання від джерела до місця призначення в мережі, демонструючи відмінні області, якими проходить світловий шлях. Він також використовується для визначення правильного підключення до мережі.

3.2 Алгоритми виділення світлового шляху

Для передачі інформації між клієнтами мережі необхідно встановити з'єднання на оптичному рівні. Оптичний зв'язок, який підтримується між вузлом джерела s і вузлом призначення d , відомий як оптичний шлях або світловий шлях. Проблема пошуку маршруту для світлового шляху та призначення довжини хвилі шляху світла називається проблемою маршрутизації та призначення довжини хвилі (RWA).

Проблема RWA розділена на дві частини:

- маршрутизація;
- призначення довжини хвилі.

У моделі трафіку проблема RWA розділена на дві фази:

- встановлення статичного світлового шляху (Static Light path Establishment – SLE): ідея полягає в тому, щоб зменшити кількість довжин хвиль, необхідних для розміщення заданого набору з'єднань;
- встановлення динамічного світлового шляху (Dynamic Light path Establishment – DLE): ідея полягає в тому, щоб зменшити ймовірність блокування.

У статичному призначенні підмножина, яка належить до світлових шляхів, виділяється кожному класу адміністрування. Кількість шляхів світла в кожній підмножині залежить від класу адміністрування, тобто шляхам світла призначаються вищі класи адміністрування. Коли «запозичення» дозволено, класи адміністрування отримують світлові шляхи.

Група світлових шляхів отримується з трафіку з вищим пріоритетом, щоб дозволити трафік з нижчим пріоритетом. Отримання світлових шляхів у зворотному напрямку заборонено.

Що стосується динамічного шляху, починається з відхилених світлових шляхів для класів адміністрування. Потім доступну групу світлових шляхів можна призначити будь-якому з доступних адміністративних класів. Усі шляхи світла повинні мати однакові якості. Спосіб впоратися з динамічним призначенням світлового шляху полягає в тому, щоб використовувати належну пропускну здатність у мережах WDM [9].

3.3 Архітектура і деякі проблеми проектування

Як показано на рисунку 3.1, у системі з вузлами є три з'єднання, саме AD, BC і BE. Маршрут позначається стрілками. На кожному волокні є два канали з довжинами хвиль. Припустимо, що з'єднання знаходиться на парі вузлів BD, а два канали BC та CD доступні для викликів у даному вузлі. Якщо комутаційні вузли не включають можливість зміни довжини хвилі, запит на посилення може бути заблоковано. Якщо перетворювач довжини хвилі зайнятий у вузлі С, перевантаження залишиться. Проблеми, пов'язані з обладнанням, аналізуються цією мережею.

Підсилювачі необхідні для мультиплексування, втрат комутації, інноваційних пристроїв мультиплексування та перемикачів довжин хвиль. Щоб мінімізувати втрати, леговані ербієм волокна працюють у вікні 1550 нм. Максимальна потужність (> 100 мВт), високий коефіцієнт посилення (> 40 дБ) і шумозаглушення збалансовані.

Обмеженням каналів довжини хвилі є обмежена ширина спектру та діапазон профілю від 1525 до 1565 нм.

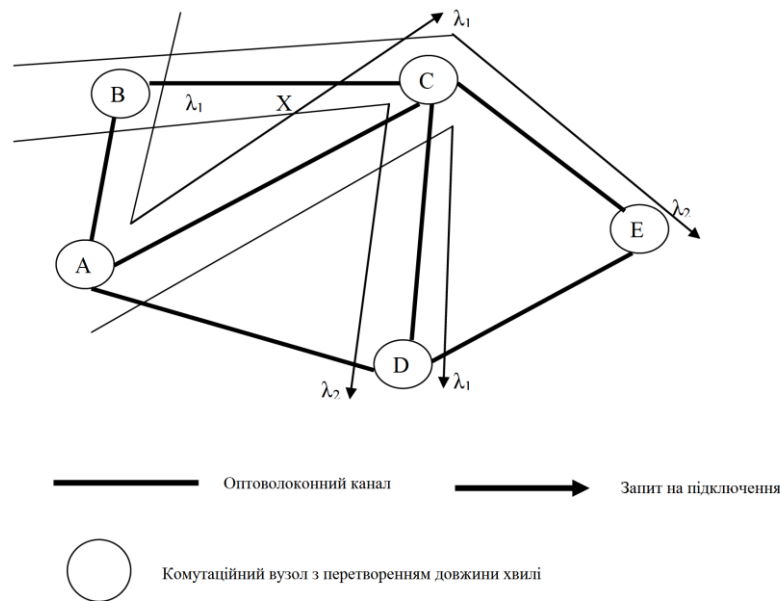


Рисунок 3.1 – Архітектура мережі WDM

Підсилювачі необхідні для мультиплексування, втрат комутації, інноваційних пристроїв мультиплексування та перемикачів довжин хвиль. Щоб мінімізувати втрати, леговані ербієм волокна працюють у вікні 1550 нм. Максимальна потужність (> 100 мВт), високий коефіцієнт посилення (> 40 дБ) і шумозаглушення збалансовані. Обмеженням каналів довжини хвилі є обмежена ширина спектру та діапазон профілю від 1525 до 1565 нм.

Система мультиплексування за довжиною хвилі дозволяє створювати канали з більшою довжиною хвилі, кожен з яких працює на прямій швидкості 1 Гбіт/с для мультиплексування у вікні волоконно-оптичної лінії з унікальним режимом.

Щоб збільшити кількість потоків, WDM вимагає лазерів з вузькою спектральною шириною, напівпровідникових лазерів, лазера з розподіленим зворотним зв'язком (DFB), оптичного мультиплексора/демультиплексора та оптичного каналу для розпізнавання потоків довжин хвиль [10].

3.4 Відновлення світлового шляху в WDM

Попит на передачу даних створює нові труднощі у постачальників телекомунікаційних систем. Відповідним підходом є використання оптичних систем, пов'язаних з технологією WDM. WDM має нескінченну швидкість передачі, доступну по волокну, через кілька каналів довжини хвилі, що не перекриваються, щоб розширити можливості передачі інформації. Концепція транспортної системи складається з трьох рівнів: шляхи, канали і фізичне середовище.

Існуючі системи використовують WDM як фізичний медіарівень для передачі «точка-точка», що називається системами WDM «точка-точка». У цих системах електричний сигнал перетворюється на оптичний сигнал, передається та буферизується як оптичний сигнал у кожному проміжному вузлі перед досягненням вузла призначення. На вузлах необхідні буфери, оптичні передавачі та приймачі. Практичним варіантом є подолання слабких місць систем WDM типу точка-точка в WDM.

Повідомлення передається між двома проміжними вузлами за допомогою світлового шляху, не вимагаючи будь-якої електрооптичної буферизації, що називається маршрутизацією за довжиною хвилі. Світловий шлях – це один із відповідних оптичних маршрутів між двома подібними вузлами, якому призначено однакову довжину хвилі на всьому шляху переданих даних. Шлях світла розрізняється фізичним рівнем і довжиною хвилі. На оптичному рівні шляхи світла фіксуються між підрозділами наборів вузлів для створення віртуальної топології.

Система WDM складається з крос-комутаторів по довжині хвилі (WXC), з'єднаних між собою оптоволоконними каналами. Крос-комутатори із селективною довжиною хвилі (WSXC) передають повідомлення по волокну, використовуючи однакові довжини хвиль. Це допускається мультиплексорами довжин хвиль, демультиплексорами довжин хвиль та комутаторами в оптичній мережі.

Така конструкція може не забезпечити найкраще виконання внаслідок обмеження конгруентності довжин хвиль (Wavelength congruity limitation – WCL). WCL вимагає однакової довжини хвилі на волоконних каналах на шляху передачі інформації.

Додатковим підходом є використання перехресного з'єднання з обміном довжини хвилі (WIXC) для перетворення довжини хвилі. Системи з перетворенням довжини хвилі дають переваги для вибору довжини хвилі. Перетворювачі довжини хвилі дорогі. Оскільки області застосування обмежені, кількість довжин хвиль, закріплених на волокні, обмежена.

Різні ланцюги використовуються як частина каналів з'єднання, щоб задовольнити запити клієнтів на пропускну здатність передачі даних. Системи, що використовують різні оптоволоконні канали у з'єднанні, відомі як багатоволоконні системи.

Системи WDM схильні до виходу з ладу таких частин, як вузли, канали зв'язку, мультиплексори довжин хвиль і демультимплексори. Адаптація до внутрішньої несправності натякає на здатність системи переконфігурувати та відновлювати відповідність у разі несправностей, відома як відновлення.

Оптичний рівень поділяється на три підрівні: рівень зони оптичного мультиплексування, рівень оптичної станції та рівень сегмента оптичної передачі.

Рівень оптичного каналу забезпечує наскрізне системне адміністрування оптичних каналів (світлових шляхів) для прозорості передачі даних користувача. Наприклад, ATM і SDH.

Сегментний рівень оптичного мультиплексування надає корисність системному адмініструванню загальних оптичних шарів з різними довжинами хвиль. Тоді оптичне відновлення на рівні зони мультиплексування керує відновленням або повторною передачею всіх світлових шляхів (які мультиплексуються разом) одночасно з групою каналів. Він не розпізнає окремі світлові шляхи, які мультиплексуються разом.

3.5 Класифікація методів відновлення

Неприємні проблеми в оптичних системах WDM – це розпізнавання несправностей, конфлікти та використання пропускної здатності. Вузли, що примикають до пошкодженого каналу, розрізняють збій зв'язку, перевіряючи рівні енергії сигналу на каналах.

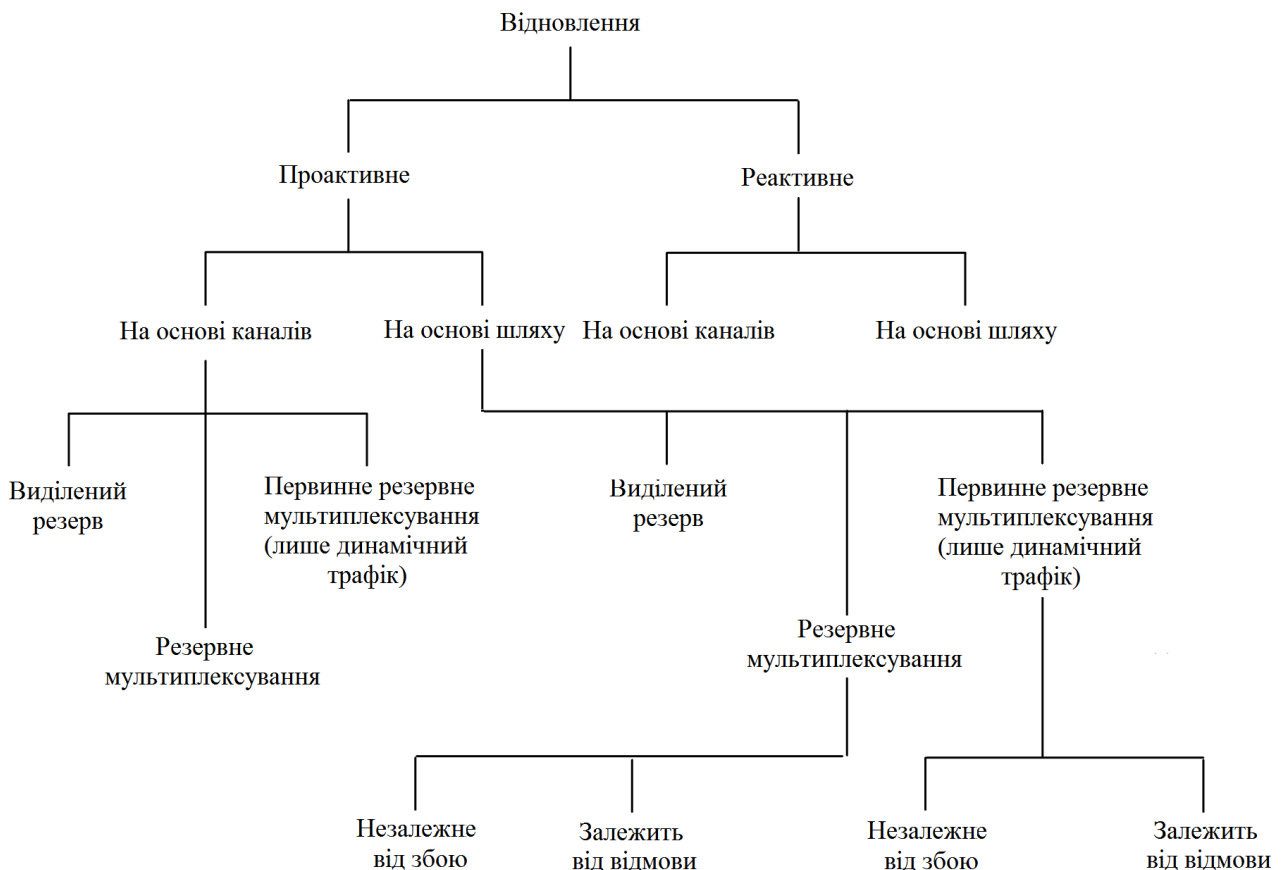


Рисунок 3.2 – Класифікація схем відновлення

Технології відновлення показані на рисунку 3.2. Вони поділяються на проактивні та реактивні методи. Реактивна стратегія є прямим методом для дублювання. У цій стратегії під час відмови світлового шляху починається пошук, щоб знайти інший світловий шлях, який не містить відмов. Це призводить до низьких накладних витрат при роботі без збоїв зв'язку, але потребує ефективну повторну передачу [11].

Припустімо, що ця ситуація пов'язана з іншим світловим шляхом, який спричиняє помилку через відсутність резерву, тоді відбувається відхилення світлового шляху.

Процес відновлення може бути досягнутий за допомогою запиту переміщення трафіку через перехресне з'єднання, що забезпечує встановлення світлового шляху та загальний контроль мережі. Системи з перехресним з'єднанням за довжиною хвилі (WXC) дозволяють уникнути непотрібного призначення довжини хвилі в мережі. Корисність каналу довжини хвилі вища в системах з перетворенням довжини хвилі, ніж у мережах із селективною довжиною хвилі.

Запит трафіку може бути динамічним або статичним. Запит статичного трафіку (група запитів) має пріоритет. Мета полягає в тому, щоб розподілити світлові шляхи, пов'язані зі здатністю відновлення, для кожного запиту для мінімізації необхідних додаткових активів (довжин хвиль або волокон). Ця проблема стосується системи, яка визначає обмеження, необхідні для поточних і очікуваних запитів.

З іншого боку, метою є обслуговування багатьох запитів через зміну системних ресурсів. Ця проблема є значною в умовах, коли є нові запити, і метою є маршрутизація великої кількості запитів на з'єднання, використовуючи обмежені ресурси в системі.

В умовах динамічного трафіку запити надходять до системи один за одним довільним чином. Після прийняття запиту він зберігається протягом обмеженого часу.

Тут мета полягає в тому, щоб збільшити прийом запитів та зменшити ймовірність блокування. Реконфігурація системи повинна бути досягнута під час інтенсивного трафіку в мережі. По-друге, повторна передача має відбуватися через зарезервовані довжини хвиль.

Підхід до відновлення може передбачати або розподілене, або централізоване керування. Погодження про розподілене керування вимагає кількох керуючих повідомлень для обміну між вузлами.

3.6 Оптична мережа WDM з маршрутизацією по довжині хвилі з підключеннями світлового шляху

WDM – це технологія для обробки запитів користувачів системи на пропускну здатність. Джерело та адресат з'єднуються один з одним через повністю оптичні канали WDM, відомі як світлові шляхи.

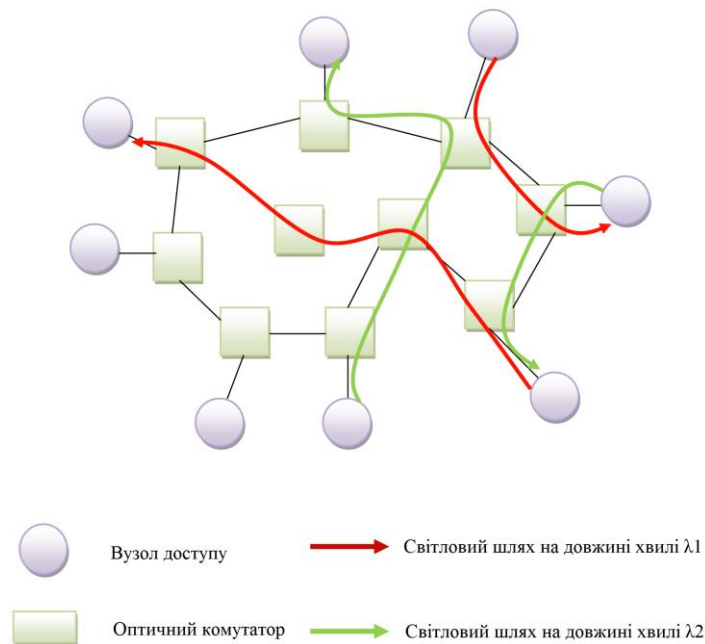


Рисунок 3.3 – Оптична мережа WDM з маршрутизацією по довжині хвилі зі з'єднаннями світлового шляху

Світловий шлях, який проходить у різних каналах зв'язку, використовується для зміцнення каналів в системі WDM з маршрутизацією за довжиною хвилі. Без перетворювачів довжини хвилі встановлення світлового шляху може бути досягнуто не на всіх волоконних каналах. Ця властивість відома як вимога безперервності довжини хвилі [12].

Рисунок 3.3 пояснює систему маршрутизації за довжиною хвилі. Світловий шлях встановлюється між набором вузлів, до яких здійснюється доступ, за допомогою різних довжин хвиль.

Проблема підтримки світлових шляхів завдяки призначенню та маршрутизації довжини хвилі для кожного з'єднання відома як проблема RWA. Є два способи підключення запитів. Вони статичні та динамічні.

У статичному варіанті весь набір груп у шляхах світла повинен мінімізувати зв'язки системи, тобто кількість довжин хвиль або кількість з'єднань у системі.

Проблема RWA для статичного руху трафіку відома як проблема встановлення статичного світлового шляху (SLE). У групі світлових шляхів, встановлених у мережі, не повинно бути жодного перекриття даних, які передаються через них.

У динамічному трафіку світловий шлях встановлюється для кожного запиту на з'єднання, і світловий шлях відхиляється через певні проміжки часу.

Цілі підходу динамічного та статичного руху полягають у створенні світових шляхів та призначенні довжин хвиль таким чином, щоб мінімізувати блокування мережі або збільшити кількість трафіку в каналах, тим самим збільшуючи трафік усієї мережі. Ця проблема відома як проблема динамічного встановлення світлового шляху (DLE).

3.7 Живучість WDM мереж

Загальне керування трафіком у мережі забезпечує хороший рівень QoS. Трафік необхідно оптимально передавати через мережу. Якщо він передається не оптимально, то в передачу даних вноситься значна затримка. Це призводить до проблеми підтримки QoS.

Щоб призначити ресурси як основним, так і резервним світловим шляхам для кожного за запиту, необхідні додаткові ресурси. Якщо в мережі відбувається збій зв'язку, то використовується адаптація зв'язків із суміжних каналів, що передбачає некритичну відмову, відому як надійна асоціація (D-асоціація).

Стратегії відновлення відрізняються своїми припущеннями. Ось деякі з припущень [12]:

- операції перехресних з'єднань незалежні від того, чи є вони вибірконими за довжиною хвилі або конвертованими за довжиною хвилі;
- запит трафіку – динамічний або статичний;
- оцінка продуктивності – час відновлення, використання пропускної здатності ресурсу тощо та інші;
- методи керування системою – централізовані або розподілені.

Методи, призначені для встановлення асоціацій, з адаптацією до внутрішніх збоїв, поділяються на проактивні та реактивні.

Реактивний підхід інакше називають динамічним відновленням. Якщо світловий шлях вийшов з ладу, збій зв'язку розпочинає пошук іншого світлового шляху, який не вважається несправним. Це забезпечує низькі накладні витрати без збоїв, але не забезпечує ефективне відновлення. Помилка виникає через брак ресурсів для відновлення з'єднання. Крім того, ці методи також вимагають розділення помилок, щоб виявити правильні підказки про помилки протягом більш тривалого часу; це може не вимагатися в частині проактивних стратегій. Активи захоплюються разом із посиленням світлових шляхів, щоб встановити основний світловий шлях.

Управління несправностями вузла надзвичайно складно для зміну маршруту. Відновлення проактивної стратегії використовує шлях відновлення на основі запиту або вимоги замість основного шляху світла. При резервуванні на основі запиту довжини хвилі не розподіляються між будь-якими двома світовими шляхами. Для кращого використання резервів можна використовувати методи мультиплексування (або спільного використання) [13].

Якщо два світлові шляхи не перекриваються, то їхні резервні світлові шляхи спільно використовуватимуть канал пропускної здатності. Ця процедура відома як мультиплексування посилення або спільне використання потужності передачі даних.

Технологія проактивного відновлення використовує важливе мультиплексування посилення або спільне використання пропускної здатності для покращення використання ресурсів [14].

Ця процедура дозволяє розподілити довжини хвиль каналу за основними резервними світловими шляхами. Двома основними заходами цієї процедури є надійність та доступність. Надійність ресурсу (або частки смуги пропускання) – це показник того, наскільки ефективно він працює за величезних вимог до пропускної спроможності протягом короткострокового періоду. Надійність, як і ефективність, має діапазон від 0 (ніколи не працює) до 1 (цілком надійний).

4 МЕТОД БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ WDM

4.1 Технологія балансування навантаженням

У мережах WDM наскрізне з'єднання вимагає динамічних маршрутів відповідно до поточного стану мережевого трафіку, щоб забезпечити базову якість обслуговування.

Розглядається технологія балансування навантаження, яка покращує якість обслуговування для встановлення світлового шляху в оптичних мережах WDM. Цей підхід містить три етапи, спочатку трафік мережі прогнозується за допомогою прихованої моделі Маркова (Hidden Markov Model – HMM). На другому етапі реалізується технологія впорядкування довжини хвилі, де перехресні перешкоди в мережі зменшуються. На останньому етапі цільова функція, заснована на процедурі жадібного випадкового адаптивного пошуку (Greedy Random Adaptive Search Procedure – GRASP), розглядається разом із прогнозованим навантаженням трафіку. Використовуючи цей метод, QoS в оптичній мережі WDM покращується з точки зору затримки пакетів, швидкості передачі та можливості блокування пакетів.

4.2 Метод балансування навантаженням

Цей метод використовує передбачення трафіку на основі прихованої моделі Маркова разом із призначенням довжини хвилі з урахуванням QoS і проактивною реконфігурацією віртуальної топології. Модель прогнозування трафіку з використанням прихованої моделі Маркова і процедури жадібного випадкового адаптивного пошуку (Greedy Random Adaptive Search Procedure – GRASP) використовується для мінімізації відхилення світлового шляху та

збалансування перевантаження оптичного каналу зв'язку, що в кінцевому підсумку максимізує використання ресурсів мережі. Різні етапи запропонованого рішення можна коротко пояснити таким чином:

- етап 1: на цьому етапі модель прогнозування трафіку будується на основі на основі прихованої моделі Маркова;

- етап 2: на цьому етапі реалізується впорядкування довжин хвиль, щоб визначити порядок довжини хвилі, і, отже, це допомагає уникнути перехресних перешкод у мережі;

- етап 3: на цьому етапі розробляється цільова функція на основі GRASP на основі прогнозованого трафіку з етапу 1 (вибране значення цільової функції чітко визначає, як віртуальна топологія найкраще підходить для заданого попиту на трафік).

Коли шаблон трафіку змінюється, потрібно змінити віртуальну топологію, щоб відобразити цілі цільової функції. Таким чином, це забезпечує корисну стратегію для покращення рівня QoS, визначеного бажаним максимальним коефіцієнтом використання.

Переваги

- запропонований метод забезпечує найкраще рішення для балансування навантаження, а також мінімізує відхилення світлового шляху в мережі;

- мінімізує перехресні перешкоди і тим самим зменшує ймовірність блокування в мережі;

- він також пропонує ефективне використання ресурсів, доступних у мережі.

4.2.1 Розрахунок навантаження для прогнозування трафіку

Розглянемо топологію мережі як граф $G = (N, L, W, F)$, де N і L представляють вузол і ребро відповідно. Кожне ребро складається з набору волокон, а W у представленні графа символізує довжини хвиль.

Загальне навантаження на ребро L можна представити як:

$$L_{\text{Load}}(s,d) = \sum_{r(s,d) \in R} N_{r(s,d),L_i}^{W_i}, \quad (4.1)$$

де $r(s,d)$ – маршрут від джерела до місця призначення, R – це набір усіх маршрутів для кожного джерела та пункту призначення, W_i позначає доступну довжину хвилі на цьому каналі.

Як правило, змінна $N_{r(s,d),L_i}^{W_i}$ дає значення навантаження на канал, яке приймає значення 0 або 1. Якщо маршрут використовував довжину хвилі W_i на каналі L_i , то:

$$N_{r(s,d),L_i}^{W_i} = \begin{cases} 1 \\ 0 \text{ інакше} \end{cases}. \quad (4.2)$$

4.2.2 Жадібна рандомізована адаптивна процедура пошуку

GRASP – це метаевристичний алгоритм, який зазвичай застосовують для задач комбінаторної оптимізації. GRASP зазвичай складається з ітерацій, створених із послідовних конструкцій жадібного рандомізованого рішення та подальших ітеративних покращень через локальний пошук. Жадібні рандомізовані рішення генеруються шляхом додавання елементів до набору рішень проблеми зі списку елементів, упорядкованих жадібною функцією відповідно до якості рішення, яке вони досягнуть.

Щоб отримати варіативність у наборі кандидатів жадібних рішень, добре ранжовані елементи-кандидати часто розміщують в обмежений список кандидатів (Restricted candidate list – RCL) і вибирають випадковим чином під час створення рішення.

Цей різновид жадібного рандомізованого методу побудови також відомий як напівжадібна евристика.

Прозорі оптичні мережі WDM вразливі до атак фізичного рівня. Пропонується метаевристичний алгоритм для етапу планування оптичних мереж WDM, враховуючи вплив потужних внутрішньосмугових перешкод. Запропонований евристичний алгоритм послідовно обслуговує зв'язки в певному порядку, а метаевристичний алгоритм, який називається Harmony Search, використовується для пошуку кращого порядку з метою встановлення запитів на з'єднання. Метою запропонованого алгоритму є встановлення запитів на з'єднання певним чином, який мінімізує вплив потужних сигналів перешкод через внутрішньосмугові перехресні перешкоди каналу.

4.3 Прихована модель Маркова

НММ – це стохастична модель сигналу, яка пропонує теоретичний опис системи обробки сигналу. НММ охоплює рекурентний кінцевий ланцюг Маркова, вихідні символи та розподіл у цьому алфавіті для кожного переходу в ланцюзі Маркова. У НММ стани та переходи приховані, а результат можна побачити лише через символи. Набір $L = (L_1, L_2, \dots, L_{N-1}, L_N)$ є прихованими шарами, вони невидимі, але довільно генерують суміш спостережень. Імовірність наступного стану залежить від попереднього стану. НММ включає набір прихованих шарів L і набір станів спостереження O . Основне представлення НММ показано на рисунку 4.1. Набір прихованих шарів і станів спостереження представлено як:

$$L=(l_1, l_2, l_3, \dots, l_n),$$

$$O=(o_1, o_2, o_3, \dots, o_n).$$

Нехай Q і R – послідовності станів і фіксованої відстані D :

$$Q=q_1, q_2, q_3, \dots, q_D,$$

$$\mathbf{R} = r_1, r_2, r_3, \dots, r_n.$$

НММ зазвичай формулюється як:

$$\lambda = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi), \quad (4.3)$$

де λ – довжина хвилі, \mathbf{A} – масив ймовірностей перешкод, \mathbf{B} – масив ймовірностей спостереження та π .

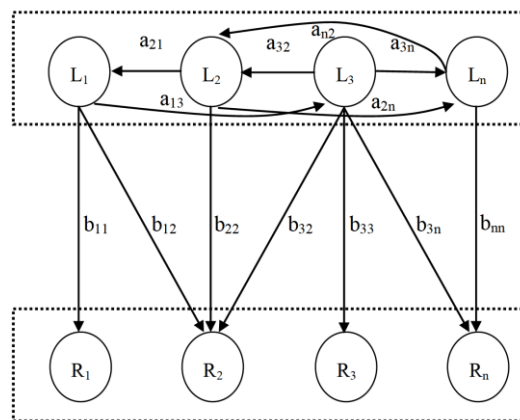


Рисунок 4.1 – Прихована модель Маркова

Рівняння (4.1) представляє перехідний масив, який є незалежним від часу та відстежує ймовірність стану перешкод:

$$\mathbf{A} = [a_{ij}], a_{ij} = P(o_t = 1_j | o_{t-1} = 1_i). \quad (4.4)$$

Тоді як \mathbf{B} не залежить від часу t . Він зберігає ймовірність спостереження, яка виробляється з стану. Масив спостереження \mathbf{B} деталізовано у рівнянні (4.5):

$$\mathbf{B} = [b_i(k)], b_i(k) = P(x_t = o_k | q_t = 1_i). \quad (4.5)$$

Ймовірність початкового стану:

$$\pi = [\pi_i], \pi_i = P(n_1 = I_i). \quad (4.6)$$

4.4 Прогнозування перевантаження

При такому підході для забезпечення QoS необхідно прогнозувати стан трафіку мережі. Трафік цієї мережі прогнозується на основі НММ. Відповідно до механізму прогнозування мережевого трафіку, модель НММ використовується для прогнозування трафікового навантаження потоків. Ця модель прогнозування НММ сприймає трафікове навантаження майбутнього трафіку потоків як приховані стани, а навантаження зв'язку на поточний трафік – як стан спостереження (O).

Нехай L буде набором прихованих шарів, як:

$$L = l_1, l_2, \dots, l_n. \quad (4.7)$$

Нехай O буде множиною ситуацій спостереження, як,

$$O = o_1, o_2, \dots, o_n. \quad (4.8)$$

Нехай S буде послідовністю станів довжини L для відповідного спостереження O і визначається як:

$$S = s_1, s_2, \dots, s_L. \quad (4.9)$$

Протягом інтервалу прогнозування T_r кожен проміжний вузол уздовж шляху заданої пари джерела та призначення оцінює час утримання зв'язку та передає це значення в модель прогнозування НММ як стан спостереження.

НММ прогнозує час утримування з'єднання H , для потоків на майбутній інтервал за допомогою послідовності спостереження S . Нарешті, з місця призначення час утримання з'єднання всього шляху пересилається до вихідного вузла.

Ймовірність спостереження O , у заданій послідовності S дорівнює:

$$P_r(O|S,L)=\prod_{i=1}^L P_r(O_i|s_i,\lambda)=b_{s_1}(o_1), b_{s_2}(o_2), \dots, b_{s_L}(o_L). \quad (4.10)$$

Ймовірність послідовності станів така:

$$P_r(S|L)=\pi_{s_1} a_{s_1 s_2} \times a_{s_2 s_3} \dots a_{s_{L-1} s_L}. \quad (4.11)$$

Мережа може легко оцінити ймовірність спостережень:

$$P_r(O|L)=\sum_N P_r(O|S,\lambda) P_r(S|\lambda)=\sum_{s_1 \dots s_L} \pi_{s_1} b_{s_1}(o_1) a_{s_1 s_2} b_{s_2}(o_2) \dots a_{s_{L-1} s_L} b_{s_L}(o_L). \quad (4.12)$$

Використовуючи алгоритм Вітербі, можна знайти послідовність одиночних станів для послідовності спостереження s_i . Щоб виявити стан високої ймовірності, мережа спочатку окреслює ймовірність найбільш можливого шляху як, ζ :

$$\zeta(i)=\max_{s_1, s_2, \dots, s_{L-1}} O(s_1, s_2, \dots, s_L = o_1, o_2, \dots, o_i | \lambda). \quad (4.13)$$

Використовуючи згадану вище функцію ймовірності, мережа може визначити стан високої ймовірності:

$$n_L = \arg \max_{1 \leq i \leq L} [\zeta_L(i)]. \quad (4.14)$$

На кожному кроці послідовність станів може бути відстежена назад як покажчик. Процес зворотного відстеження послідовності станів наведено в рівнянні:

$$n_L = \Psi_{L+1}(n_{L+1}), l=L-1, L-2, \dots, 1, \quad (4.15)$$

Де Ψ – матриця, $S \times L, L$ позначає довжину послідовності станів. Цей зворотний трек забезпечує необхідний набір станів.

4.5 Алгоритм призначення довжини хвилі

Реалізуючи цей алгоритм упорядкування довжини хвилі, можна зменшити перехресні перешкоди в мережі. Перешкоди в сусідньому каналі можуть спричинити граничне погіршення якості мережі WDM. У підході до призначення довжини хвилі з урахуванням QoS спочатку від вузла буде отримано запит на виділення необхідної довжини хвилі.

Ці отримані запити будуть поставлені в чергу, і централізований контролер приймає перший запит із черги, призначає йому довжину хвилі, а потім починає ітераційний процес для вибору довжини хвилі.

Потім оцінюється затримка в черзі. Якщо ця затримка в черзі перевищує порогове значення, отриманий запит буде заблоковано, інакше трафік буде прогнозуватись як в попередньому пункті 4.3.

На основі передбаченого трафіку в мережі довжина хвилі виділяється за допомогою алгоритму впорядкування довжини хвилі. Якщо вільної довжини хвилі не знайдено, запит буде відхилено, тобто буде подія блокування запиту.

В іншому випадку після оцінки затримки ($D_a(k)$), яка виникла під час процедури контролю допуску запитів (Call Admission Control – CAC), і коефіцієнту бітових помилок (Bit Error Rate – BER) (має бути менше 10^{-9}), запитувана довжина хвилі розподіляється, як показано на рисунку 4.2.

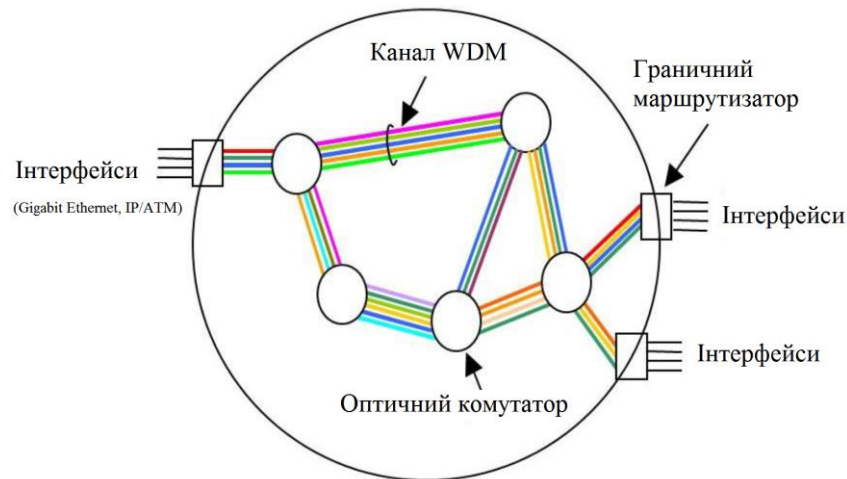


Рисунок 4.2 – Призначення довжини хвилі

Загальний час прийому виклику для запиту з'єднання можна записати як суму двох затримок: затримки в черзі та затримки обробки:

$$D_a(k) = D_q(k) + D_p(k), \quad (4.16)$$

де, $D_a(k)$ – це затримка, яка виникає під час процедури САС.

$D_q(k)$ – це затримка в черзі, тобто час, протягом якого запит має чекати в черзі.

$D_p(k)$ – затримка обробки.

$$D_p(k) = a\tau_{LP} \sum_{i=1}^m Y_i T_H, \quad (4.17)$$

де, m позначає кількість проб, перш ніж буде знайдено гідний (BER менше порогового значення T_H) світловий шлях, τ_{LP} – час, необхідний для обчислення набору вільних довжин хвиль, T_H – це порогове значення, при якому час, необхідний для перевірки, чи BER кандидата або взаємодіючого світлового шляху перевищує порогове значення BER, а Y_i – це кількість взаємодіючих шляхів світла, перевірених до того, як виникає збій.

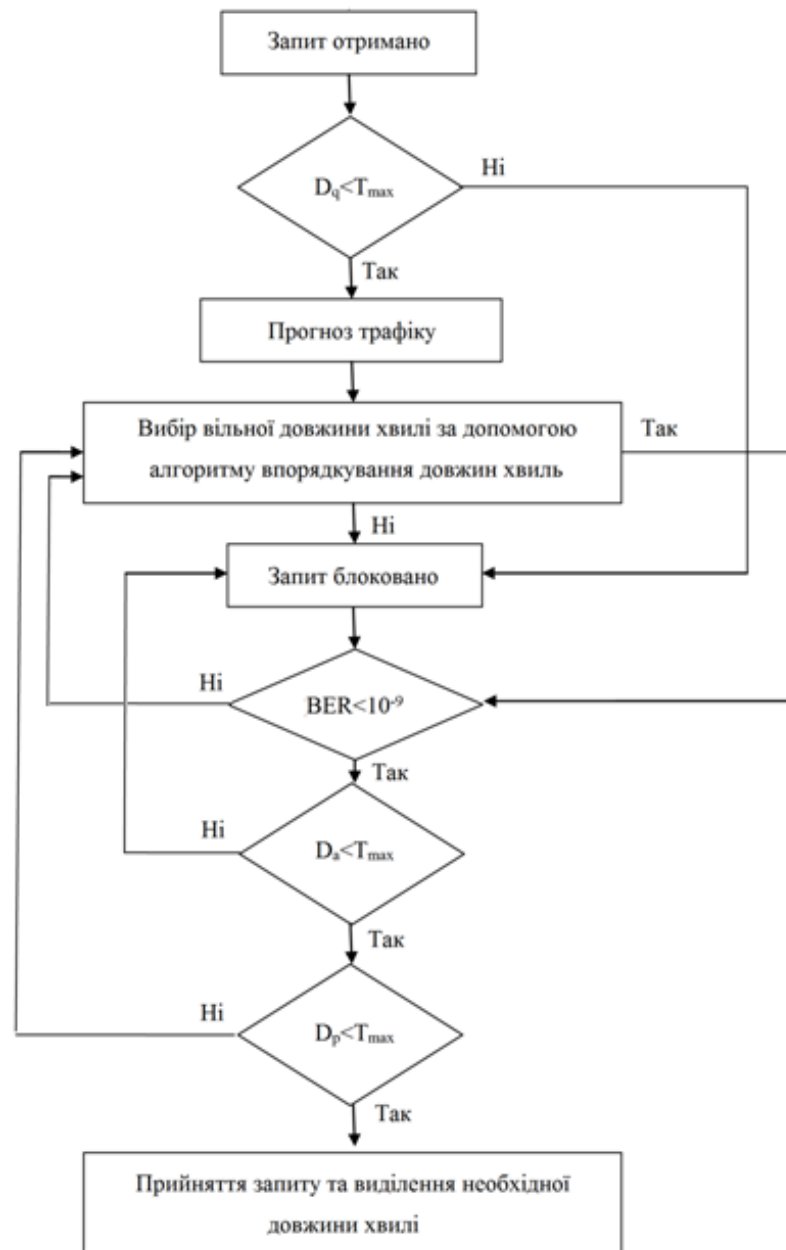


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритму призначення довжини хвилі

4.6 Алгоритм упорядкування довжини хвилі

Алгоритм упорядкування за довжиною хвилі, який використовується в цьому підході, базується на евристичній техніці упорядкування за довжиною хвилі в автономному режимі. Впорядкування довжини хвилі призначає довжину хвилі для отриманого запиту, що призводить до зменшення перехресних перешкод. Схема цього підходу показана на рисунку нижче.

Крок 1: W_0 і W_s – два масиви довжин хвиль, що відповідають послідовності довжин хвиль, послідовні довжини хвиль $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_j, \dots, \lambda_W\}$.

Спочатку призначити λ_1 в W_0 , а W_s містить інші довжини хвилі.

Крок 2: Оцінити рівень потужності перехресних перешкод $P_C(j,l)$ для довжини хвилі λ_j у W_s до кожного λ_l у W_0 за $P_C(j,l)=\exp(-\alpha|l-j|)$ для деякої константи $\alpha>0$.

Крок 3: Створити набір W_k , що складається з усіх довжин хвиль із однаковим мінімальним рівнем перехресних перешкод у найгіршому випадку $\min_{\lambda_j \in W_s} \min_{\lambda_l \in W_0} |P_C(j,l)|$.

Крок 4: Розпізнати наступну довжину хвилі, яку потрібно додати до впорядкованого списку, $\lambda_j = \operatorname{argmin}_{\lambda_k \in W_k} \sum_{\lambda_l \in W_0} P_C(k,l)$. Додати до λ_j до W_0 і видалити його з W_s .

Крок 5: повторити з кроку 2, доки W_s не буде порожнім.

Крок 6: Повернути впорядковану послідовність довжин хвиль $W_0 \in W$.

Основною метою цього алгоритму є те, що в будь-якій точці наступна довжина хвилі, яка буде використовуватися, повинна бути якомога далі спектрально від будь-яких раніше призначених довжин хвиль, оскільки показано, що ці перехресні перешкоди експоненціально зменшуються зі спектральним поділом. Перші дві довжини хвилі в упорядкованому списку є крайніми точками, тобто слотами довжин хвиль, позначеними 1 і W .

Після впорядкування вони видаляються зі списку невпорядкованих довжин хвиль. Алгоритм упорядкування за довжиною хвилі створює впорядкований список послідовно із залученням довжини хвилі з решти невпорядкованого набору довжин хвиль, який має найбільшу відстань з усіх довжин хвиль у впорядкованому списку.

Якщо існує кілька довжин хвиль з однаковим впливом перехресних перешкод, вибирається довжина хвилі, сума внесків перехресних перешкод якої у всіх уже відсортованих довжинах хвиль є мінімальною, як зазначено на кроці 4, згаданому в алгоритмі. Наприклад, якщо є 8 довжин хвиль, то кінцевий порядок буде (1, 8, 4, 6, 2, 7, 3, 5).

4.7 Цільова функція

Кінцевою метою проблеми повторної оптимізації в автономному режимі є мінімізація відхилення шляху світла або затримки створення (через тривалість процесу повторної оптимізації), одночасно збалансовуючи навантаження на оптичні канали (і, отже, максимізуючи використання ресурсів мережі).

Лістинг 4.1 – Псевдокод алгоритму упорядкування довжини хвилі

Фаза побудови вхідних даних X_p і функція сусідства N

Новий стан мережі X_p^*

$X_p^* \leftarrow \text{NULL}$ ($X_p^* \leftarrow \Phi$)

for $i=1$ to $|X|$ do

$X' \leftarrow X \setminus \{con_i\}$

$X' \leftarrow X \cup \{con_i\}$

If $f(X') \leq f(X^*)$ then

$X^* \leftarrow X'$

If local search type="depth search" then

$X \leftarrow X'$

end

end

end

return X^*

end

Кожен запит на підключення con_i в мережі отримується по одному під час фази прогнозування трафіку мережі і в кінцевому підсумку перенаправляється в мережі. Потім цільова функція оцінюється на новій мережі X' , і найкраще мережеве рішення X^* зрештою оновлюється новим значенням.

Якщо вибрано глибокий локальний пошук, наступна ітерація розпочне локальний пошук із нового мережевого рішення X' ; інакше буде виконано локальний пошук по ширині, починаючи з X , тобто початкового стану.

$$f(x) = \text{var}\left(1 - \frac{W_{\text{res}}}{W_{\text{max}}}\right), \quad (4.18)$$

де, $f(X)$ є цільовою функцією, де дисперсія навантаження порівнюється з коефіцієнтами пропускної здатності кожної ланки, W_{res} – остаточна довжина хвилі, W_{max} – максимальна довжина хвилі.



Рисунок 4.4 – Блок-схема впорядкування довжини хвилі

Вибране значення цільової функції, очевидно, визначає, наскільки топологія віртуальної мережі найкраще підходить для попиту на трафік даної мережі.

Знак мінус у рівнянні 3.9 вимагає збалансувати навантаження якомога рівномірніше. Коли шаблон трафіку змінюється, умова мережі може не залишатися оптимальною, і топологію віртуальної мережі необхідно змінити, щоб відтворити цілі цільової функції.

5 РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

5.1 Показники ефективності

Оскільки запропонований метод використовує HMM, обчислення балансування навантаження можливе за допомогою підходу GRASP. Тому для порівняння запропонованого методу обрано тільки GRASP.

Запропонований метод порівнюється з існуючою методом розрахунку оптимізації оптичних WDM мереж, реалізованим за допомогою підходу GRASP за трьома різними параметрами:

1. Використання смуги пропускання долю смуги пропускання, яку використовує адресат із загальної доступної смуги пропускання.
2. Імовірність блокування – це ймовірність, з якою виникають відмови на запити на з'єднання під час передачі.
3. Середня наскрізна затримка усереднюється для всіх збережених пакетів даних від джерел до пунктів призначення.

5.2 Порівняння ефективності

Моделювання виконане за допомогою інструменту Network Simulator (NS3). Перед початком моделювання налаштовується з'єднання між попередньо визначеними вузлами, напр. вузол «А» надсилає дані до вузла «В».

Коли зв'язок починається, вихідний вузол починає передачу з регулярним інтервалом 0,2 секунди. Крім того, кожне моделювання виконувалося протягом 500 секунд у зоні моделювання 1000×1000 м. У моделюванні 14 вузлів з'єднані мережею WDM. Моделюваний трафік може бути з постійною швидкістю передачі даних (CBR) або експоненціальним. Параметри моделювання зведені в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість вузлів	14
Кількість вихідних вузлів	10
Використовується тип мережі	WDM
Число довжини хвилі	4, 6, 8, 10, та 12
Кількість транспортних з'єднань	4, 6, 8 та 10
Джерела трафіку	постійний або експоненціальний
Розмір пакета	1500
Швидкість передачі даних	100, 200, 300, 400, 500 МБіт/с
Час моделювання	150 секунд

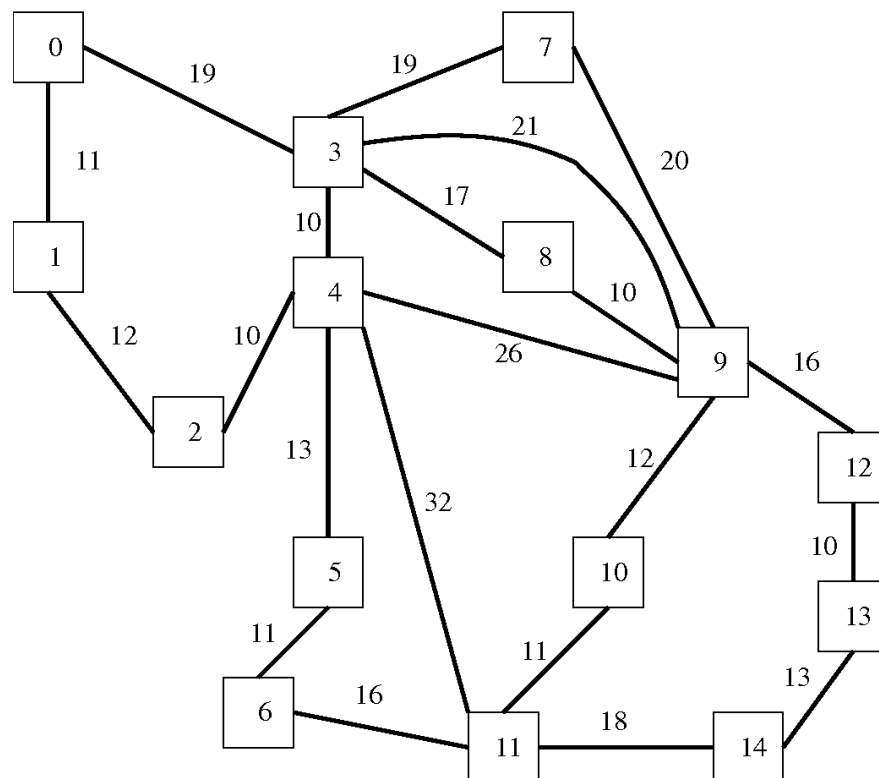


Рисунок 5.1 – Топологія мережі

У цьому моделюванні 10 вихідних вузлів надсилають дані своїх датчиків через канал зв'язку.

5.2.1 Трафік CBR зі змінною швидкістю передачі даних

Щоб збільшити швидкість передачі даних, можна використовувати архітектуру, яка одночасно передає кілька сигналів по одному шляху передачі.

Кожен сигнал поширюється в межах свого унікального частотного діапазону (несучої), який модулюється даними. Кожна піднесуча модулюється за допомогою традиційної схеми модуляції з низькою швидкістю символів, підтримуючи загальну швидкість передачі даних, подібну до звичайних схем модуляції з однією несучою в тій самій смузі пропускання.

В даному сценарії кількість підключень трафіку CBR фіксована як шість, а швидкість трафіку змінюється від 100 до 500 Мбіт/с. Рисунок 3.5 описує порівняння використання пропускнуої здатності запропонованого методу та існуючого методу GRASP.

Графік чітко показує, що використання пропускнуої здатності запропонованого методу є дуже високим порівняно з існуючим методом GRASP. Покращення коливається від мінімум 40% до 71,4% для зміни швидкості передачі даних від 100 Мбіт/с до 500 Мбіт/с.

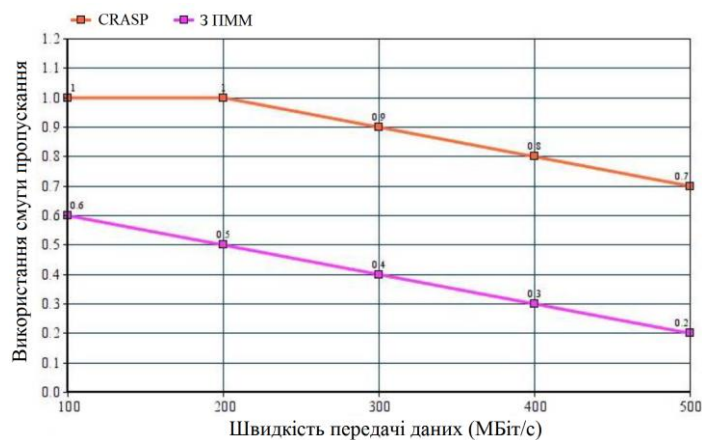


Рисунок 5.2 – Порівняння використання смуги пропускання з різною швидкістю передачі даних

На рисунку 5.3 показано порівняння ймовірності блокування запропонованого методу та існуючого методу GRASP. Графік чітко показує, що ймовірність блокування запропонованого методу є дуже низькою порівняно з GRASP. Покращення коливається від мінімум 33,33% до 60% для зміни швидкості передачі даних від 100 Мбіт/с до 500 Мбіт/с.

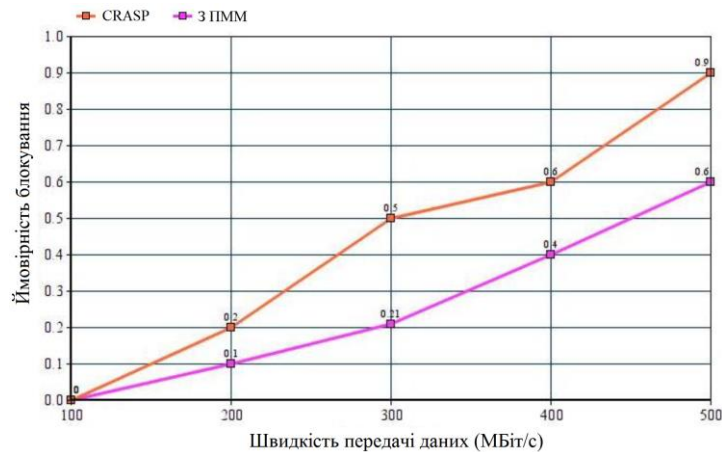


Рисунок 5.3 – Порівняння ймовірності блокування з різною швидкістю передачі даних

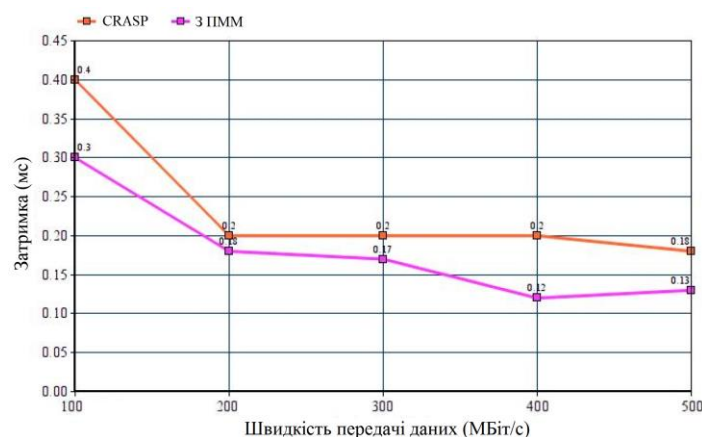


Рисунок 5.4 – Порівняння затримки з різною швидкістю передачі даних

На рисунку 5.4 показано порівняння затримки передачі запропонованого методу з реалізацією GRASP. Графік чітко показує, що затримка запропонованого методу є дуже низькою розглядаючи його у

порівнянні з існуючим підходом GRASP. Покращення коливається від мінімум 27,77% до 40% для зміни швидкості передачі даних від 100 Мбіт/с до 500 Мбіт/с.

5.2.2 Експоненціальний трафік із змінною швидкістю передачі даних

Щоб збільшити швидкість передачі даних, можна використовувати архітектуру, яка одночасно передає кілька сигналів по одному шляху передачі. Кожен сигнал поширюється в межах свого унікального частотного діапазону (несучої), який модулюється даними.

Тут експоненціальні потоки трафіку передаються від різних джерел до пунктів призначення. Для цього сценарію швидкість трафіку змінюється від 100 Мбіт/с до 500 Мбіт/с для шести з'єднань трафіку. Рисунок 5.5 показує порівняння використання смуги пропускання запропонованого методу та існуючого методу GRASP.

Видно, що використання пропускнуої здатності запропонованого методу має переваги порівняно з існуючою технікою GRASP. Покращення коливається від мінімум 22,03% до 63,33% для зміни швидкості передачі даних від 100 Мбіт/с до 500 Мбіт/с.

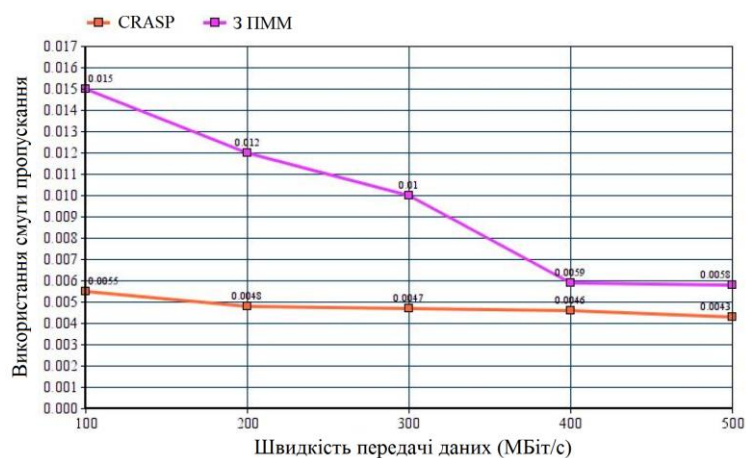


Рисунок 5.5 – Порівняння використання смуги пропускання з різною швидкістю передачі даних

Рисунок 5.6 показує порівняння ймовірності блокування запитів на з'єднання. Видно, що ймовірність блокування запропонованого методу є дуже низькою порівняно з існуючою технікою GRASP.

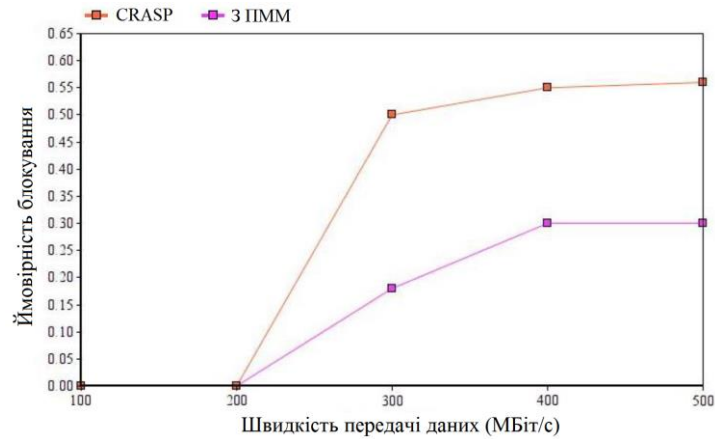


Рисунок 5.6 – Порівняння ймовірності блокування з різною швидкістю передачі даних

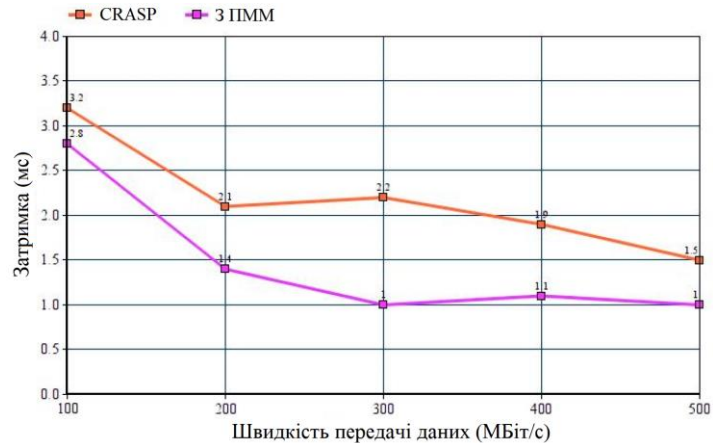


Рисунок 5.7 – Порівняння затримки з різною швидкістю передачі даних

Рисунок 5.7 демонструє порівняння затримки використовуваних методів. Графік чітко показує ефективність запропонованого методу є порівняно з існуючою технікою GRASP. Покращення коливається від мінімуму 12,5% до 54,54%.

ВИСНОВКИ

У волоконно-оптичних комунікаціях мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) стало домінуючою технологією, яка забезпечує неймовірний інтелект і масштабованість оптичних мереж.

В кваліфікаційній роботі розглянуто методи балансування навантаження, які покращують якість обслуговування в оптичних мережах WDM.

Запропоновано метод балансування навантаженням мережевих каналів для забезпечення QoS. В запропонованому методі використовується прихована модель Маркова, заснована на передбаченні трафіку разом із завданням довжини хвилі і віртуальною топологією. Модель прогнозування трафіку з використанням прихованої моделі Маркова використовується для мінімізації неузгодженості трафіку та балансування навантаженням на оптичних каналах між вузлами мережі.

Проведене імітаційне моделювання з метою підтвердження теоретичних викладок представлених в кваліфікаційній роботі підтвердило високу ефективність запропонованого методу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. L. Sahasrabudhe, S. Ramamurthy , B. Mukherjee, “Fault management in IP- over-WDM networks: WDM protection versus IP restoration” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 20, No. 1, pp. 21 - 33. January 2002.
2. C. Liu and L. Ruan, “Finding good candidate cycles for efficient p-cycle network design,” in 13th international Conference on Computer Communication and Networks(ICCCN 2004), pp. 321 – 326, 2004.
3. Y. P. Aneja, S. Bandyopadhyay and A. Jaekel, “An efficient protection scheme for WDM Networks using dynamic lightpath allocation”, HPC-Asia, December 2002.
4. Ramamurthy, L. Sahasrabuddhe, and B. Mukherjee, “Survivable wdm mesh net- works,” Lightwave Technology, Journal of, vol. 21, no. 4, pp. 870–883, 2003.
5. C. G. Gruber, Deployment of p-cycles in WDM Networks. PhD thesis, Technische University Munchen, August, 2001.
6. H. N. Nguyen, D. Habibi, V. Q. Phung, S. Lachowicz, K.Lo, and B. Kang, “Joint optimization in capacity design of networks with p-cycle using the fundamental cycle set,” in IEEE GLOBECOM, (USA), 2006.
7. J. Doucette, D. He, W. D. Grover, and O. Yang, “Algorithmic approaches for efficient enumeration of candidate p-cycles and capacitated p-cycle network design,” Design of Reliable Communication Networks (DRCN) 2003, pp. 212 – 220, 2003.
8. Z. Zhang, W.-D. Zhong, and B. Mukherjee, “A heuristic method for design of survivable wdm networks with p-cycles,” IEEE Communications Letters, vol. 8, no. 7, pp. 467 – 469, 2004.
9. Z. Zhang, W. Zhong, and B. Mukherjee, “A heuristic algorithm for p-cycles configuration in wdm optical networks,” in Opto-Electronics and Communications Conference(OECC), vol. 23, pp. 568 – 569, 2003.

10. W. Grover and J. Doucette, "Advances in optical network design with p-cycles: Joint optimization and pre-selection of candidate p-cycles," tech. rep., 2002.
11. A. Agrawal, "Algorithms for the Logical Topology Design in WDM All-Optical Networks", aagrwal@usc.edu, March 2002.
12. D. S. W. D. Grover, "Bridging the ring-mesh dichotomy with p-cycles," in Design of Reliable Communication Networks (DRCN 2000), (Munich, Germany), pp. 92 – 104, 2000.
13. P. Tomsu, C. Schmutzer, "Next Generation Optical Networks", Prentice-Hall, Inc. 2002.
14. H. Zhang and O. Yang, "Finding protection cycles in dwdm networks," in IEEE International Conference on Communication, vol. 5, pp. 2756–2760, 2002.
15. Свиридов О.О., Соболев Г.Ю., Янковський О.А. «Адаптивне управління трафіком у великих масштабах для забезпечення якості обслуговування (QoS)», Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». –Баку-Харків-Жиліна-2023. – С. 95.