

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 та засоби управління передачею даних
комп'ютерних мереж

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМм-22-1
Макаренко О.П.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі
(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 _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Макаренку Олексію Павловичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Методи та засоби управління передачею даних комп'ютерних мереж _____

затверджена наказом по університету від “ 6 ” листопада 2023 р. № 1298 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 управління живучістю оптичних мереж _____

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 – 20 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 мережами	15.11.23 – 21.11.23	
3	Розробка моделі управління мережним трафіком	22.11.23 – 14.12.23	
4	Вибір програмних та апаратних засобів реалізації	15.12.23 – 21.12.23	
5	Тестування запропонованого метода	22.12.23 – 27.12.23	
6	Оформлення пояснювальної записки	28.12.23 – 12.01.24	

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 88 с., 41 рис., 4 табл., 1 дод., 8 джерел.

WDM, ВІДНОВЛЕННЯ, ДОВЖИНА ХВИЛІ, ЗАХИСТ, МЕРЕЖА З МАРШРУТИЗАЦІЄЮ ЗА ДОВЖИНОЮ ХВИЛІ, ФІЗИЧНА ТА ЛОГІЧНА ТОПОЛОГІЯ.

В кваліфікаційній роботі зосереджено увагу на двох різних проблемах: одна – це очищення мережевого трафіку, а інша – живучість мережі.

В сфері управління трафіком було запропоновано три моделі за трафіком. Ці моделі дуже ефективні для обробки трафіку та можуть бути реалізовані у всіх оптичних мережах.

Для забезпечення живучості оптичних мереж було запропоновано два методи живучості. Перший метод заснований на часі відновлення після збою мережі, а другий метод заснований на ймовірності очікування мережі.

ABSTRACT

Master's thesis: 88 pages, 41 figures, 4 tables, 1 appendices, 8 sources.

RECOVERY, WAVELENGTH, PROTECTION, WAVELENGTH ROUTING NETWORK, PHYSICAL AND LOGICAL TOPOLOGY, WDM.

The qualification paper focuses on two different problems: one is network traffic cleaning, and the other is network survivability.

In the field of traffic management, three traffic models were proposed. These models are very efficient for traffic processing and can be implemented in all optical networks.

To ensure the survivability of optical networks, two survivability methods have been proposed. The first method is based on the recovery time after a network failure, and the second method is based on the probability of network waiting.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	10
1 МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	11
2 ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ	12
2.1 Переваги оптичних мереж.....	12
2.2 Структура волоконно-оптичного кабелю	13
2.3 Принцип і механізм оптичного волокна.....	14
2.5 Переваги оптичних мереж.....	17
2.6 Оптоволоконна система передачі	18
2.7 Система мультиплексування за довжиною хвилі (WDM)	20
2.7.1 Компоненти системи WDM	20
2.7.2 Переваги системи WDM.....	24
2.7.3 Класифікація мультиплексування за довжиною хвилі (WDM)	25
3 КОНТРОЛЬ ТРАФИКУ	28
3.1 Типи управління трафіком	30
3.2 Різні методи мультиплексування для обробки трафіку	31
3.3 Живучість в оптичних мережах.....	32
3.3.1 Помилки каналу	33
3.3.2 Потреба в живучості	34
3.3.3 Переваги забезпечення живучості на рівні WDM	35
3.3.4 Методи забезпечення живучості оптичних мереж.....	36
3.4 Захист	37
3.4.1 Захист каналу.....	37
3.4.2 Захист шляху	38
3.5 Відновлення	39
3.5.1 Відновлення каналу	40

3.5.2 Відновлення шляху	40
3.5.3 Відновлення субдшляху	40
3.5.4 Проактивне та реактивне відновлення.....	40
3.5.5 Самовідновлювальне кільце (SHR).....	42
3.5.6 Автоматичне двоциклове покриття (ADCC).....	43
3.5.7 Петлева схема	44
3.5.8 Схема захисту Р-циклу	45
3.6 Маршрутизація та призначення довжини хвилі	47
3.6.1 Обмеження маршрутизації за довжиною хвилі	47
3.6.2 Методи маршрутизації за довжиною хвилі.....	48
3.6.3 Алгоритми призначення довжини хвилі	49
4 ПРОАКТИВНА СХЕМА ВІДНОВЛЕННЯ З ОБМЕЖЕННЯМ ЧАСУ ДЛЯ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ.....	50
4.1 Запропоновані та існуючі стратегії	50
4.1.1 Захист спільного шляху (SPP)	50
4.1.2 Захист виділеного шляху (DPP).....	51
4.1.3 Захист спільного шляху сигналами на півшляху (ЗССП).....	51
4.2 Приклад відновлення з'єднання в SPP, DPP і HSE-SPP	51
4.2.1 Процес відновлення з'єднання з захистом спільного шляху (SPP).....	52
4.2.2 Процес відновлення підключення за допомогою захисту виділеного шляху (DPP)	53
4.2.3 Процес відновлення з'єднання захисту спільного шляху з обміном сигналами на проміжному вузлі (HSE-SPP)	54
4.5 Модель системи.....	58
4.6 Обговорення параметрів мережі.....	59
4.7 Результати моделювання.....	61
5 РЕСУРСНОЕФЕКТИВНА СХЕМА ВІДНОВЛЕННЯ.....	67
5.1 Використані позначення.....	67
5.2 Захист спільного шляху (SPP)	68

5.3 Захист виділеного шляху (DPP).....	68
5.4 Запропонована схема відновлення на основі шляху	69
5.5 Екпериментальні результати.....	72
ВИСНОВКИ.....	76
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	77
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

AON – активна оптична мережа (англ., Active Optical Network)

APS – автоматичне захисне перемикання (англ., Automatic Protection Switching)

D-MLTDA – алгоритм проектування логічної топології з декількома переходами (англ., Decreasing Multi-hop Logical Topology Design Algorithm)

GLTDA – алгоритм проектування жадібної логічної топології (англ., Greedy logical topology design algorithm)

LR-PON – пасивна оптична мережа великого радіусу дії (англ., Long-Reach Passive Optical Network)

OADM – оптичний мультиплексор додавання/виведення (англ., Optical Add/Drop Multiplexer)

OXC – оптичний перехресний зв'язок (англ., Optical Cross-Connect)

POF – пластикове оптичне волокно (англ., Plastic Optical Fibre)

PON – пасивна оптична мережа (англ., Passive Optical Network)

PONDP – проблема проектування пасивної оптичної мережі (англ., Passive Optical Network Design Problem)

WDM – мультиплексування з розділенням хвиль (англ., Wavelength Division Multiplexing)

ВСТУП

Високошвидкісна мережа стала важливою у всіх сферах життя. Попит на пропускну здатність мережі зріс у багато разів за останні кілька років. Для мережевих інженерів стало серйозною проблемою забезпечити швидший Інтернет за доступною ціною.

Оптоволоконна система зв'язку знайшла рішення для подолання цієї проблеми. Ця система була визнана найкращим рішенням для забезпечення вимог щодо пропускну здатності користувачів і програм для підтримки різних мережевих служб. Це стало можливим завдяки великій ємності оптичних волокон. Оптичне волокно зазвичай підтримує пропускну здатність до 50 ТГц. Воно також забезпечує надзвичайно низький рівень бітових помилок.

Високопродуктивні мережі є важливими для глобальної інформаційної інфраструктури, економічного зростання та з'єднання спільнот. Привабливість передачі по оптичному волокну в основному пов'язана з більшою ємністю в порівнянні з мідними аналогами та стійкістю до електромагнітних перешкод та інших зовнішніх впливів [1]. У поточному сценарії волоконно-оптичні системи зв'язку розглядаються як домінуюча технологія як для протяжних мереж, так і для короткомагістральних мереж.

Вибухове зростання Інтернет – додатків і додатків у режимі реального часу неминуче вплинуло на потребу забезпечити не лише високий безпрецедентний, прискорений попит на вимоги до пропускну здатності та швидкості, але також вимагає швидшої мережевої інфраструктури та різних технологій. Оптичні мережі – це комунікаційні мережі великої пропускну здатності, які використовують оптичні технології для передачі даних. Оскільки світло має вищі частоти та меншу довжину хвилі, в оптичних мережах може передаватися більша кількість інформаційних бітів.

1 МЕТА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Оптичні мережі відомі як високопродуктивні мережі. Велика кількість даних може передаватися на дуже високій швидкості в оптичних мережах. Оптичні мережі вільні від електромагнітних перешкод та інших зовнішніх впливів. Отже, ці мережі є домінуючими мережами для широкосмугової передачі як на далекі, так і на короткі відстані.

Метою цієї магістерської кваліфікаційної роботи є аналіз існуючих методів забезпечення живучості оптичних мереж, а також дослідження та розробка алгоритмів підвищення живучості з покращеними характеристиками.

2 ОПТИЧНІ МЕРЕЖІ

2.1 Переваги оптичних мереж

Оптичним мережам надають перевагу перед іншими мережами з багатьох причин. Ось деякі з цих причин:

1. Висока пропускна здатність: оптичне волокно може забезпечити набагато більшу пропускну здатність порівняно з мідним середовищем. Асоціація телекомунікаційної промисловості (ТІА) класифікувала кабель категорії 6А для обробки смуги пропускання до 600 МГц на відстані 100 метрів. Він може приймати близько 18000 дзвінків одночасно. Оптичне волокно може забезпечити смугу пропускання понад 1000 МГц, яка може передавати майже 31000 одночасних викликів.

2. Електромагнітні перешкоди (ЕМІ): на сигнали під час спілкування впливають електричні та магнітні поля. Це називається електромагнітними перешкодами (ЕМІ). Оптичне волокно стійке до електромагнітних перешкод, оскільки воно є діелектриком за своєю природою. Воно не здатне проводити електричні або магнітні сигнали. Мідний кабель, якщо його не встановлено належним чином, вразливий до електромагнітних перешкод.

3. Легка вага: волоконно-оптичний кабель важить менше порівняно з мідним кабелем. Тому його можна легко транспортувати з одного місця в інше.

4. Незаймисті: волоконно-оптичний кабель є діелектриком за своєю природою, тому він не створює електричного струму. Але мідний кабель пропускає електричний струм і може спричинити пожежу, якщо він старий або зношений.

5. Низька втрата сигналу: із збільшенням довжини кабелю буде втрата потужності сигналу. Ця втрата називається загасанням і вимірюється в децибелах (дБ). Ці втрати менші в волоконно-оптичному кабелі.

б. Безпека: передача даних по волоконно-оптичному кабелю здійснюється в цифровій формі. Розрізати оптичне волокно важко. Цей спосіб передачі є безпечним. Мідний кабель можна легко розрізати і будь-яку телефонну розмову можна прослухати, а в оптичних мережах це неможливо.

Усі ці характеристики зведено в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння мідного кабелю та оптичного волокна

№ п/п.	Характеристика	Мідний кабель	Оптичне волокно
1	Пропускна здатність	Низька	Висока
2	Вага	Важкий	Легке
3	Безпека	Низька	Чудова
4	Загасання/км на 1 ГГц	>45 дБ	1 дБ

2.2 Структура волоконно-оптичного кабелю

Волоконно-оптичний кабель можна розділити на три різні частини. Такими частинами є сердечник, оболонка та буфер. Ця структура показана на рисунку 2.1.

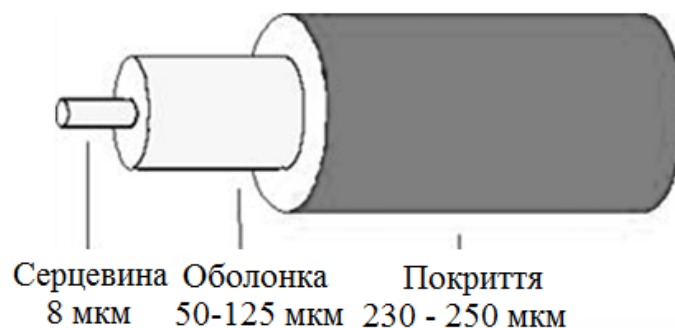


Рисунок 2.1 – Структура оптоволоконного кабелю

Середня частина кабелю називається серцевиною, і ця жила складається з кремнеземного матеріалу. Це ділянка волокна, що пропускає світло.

Після серцевини наступний шар – обшивка. Оболонка діє як хвилевід для світлових хвиль, що рухаються в кабелі. Він складається з чистого кремнезему.

Облицювання відіграє дуже важливу роль у поширенні хвиль. Якщо цей компонент відсутній, хвилі будуть виходити з ядра. Ця оболонка відбиває їх назад у ядро.

Після цього йде буферний шар. Цей буферний шар зазвичай захищає сердечник і оболонку від ультрафіолетового світла. Це додатково забезпечує жорсткість кабелю. Що стосується буфера, то він знаходиться посередині цих трьох шарів.

2.3 Принцип і механізм оптичного волокна

Світлові хвилі направляються з мінімальним затуханням в оптичному волокні. Оптичне волокно може передавати світло на дуже високій швидкості. Ця швидкість становить приблизно дві третини швидкості світла у вакуумі.

Оптичне волокно складається з тонких шарів скляних ниток. Воно складається з двох частин, тобто серцевини та оболонки. Концепція передачі світла в оптичному волокні базується на принципі повного внутрішнього відбиття.

Світло відбивається або заломлюється в залежності від кута падіння. Кут, під яким світло падає на поверхню розділу між оптично щільнішим і оптично тоншим матеріалом. Ядро має вищий показник заломлення порівняно з оболонкою. Це дозволяє променю, який потрапляє на цю поверхню під кутом, меншим за критичний, відбиватися. Це показано на рисунку 2.2.

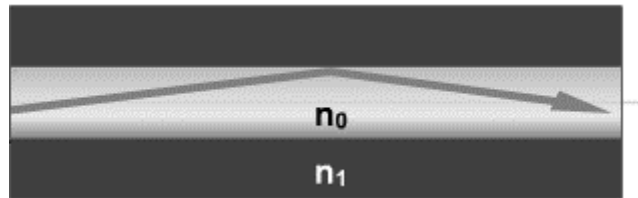


Рисунок 2.2 – Принцип оптичного волокна

2.4 Типи оптичних волокон

Оптичні волокна можна далі розділити на три категорії [2].

Одномодове волокно Будь-яке оптичне волокно з малим діаметром сердцевини, який приблизно в десять разів перевищує довжину хвилі світла, що поширюється, не можна моделювати за допомогою геометричної оптики. Таким чином, її необхідно аналізувати як електромагнітну структуру, а розв'язок забезпечується рівняннями Максвелла, зведеними до рівняння електромагнітної хвилі.

Електромагнітний аналіз також необхідний для розуміння певної поведінки, наприклад спектрів, які виникають, коли когерентне світло поширюється в багатомодовому волокні. Будучи оптичним хвилеводом, будь-яке волокно може підтримувати одну або кілька обмежених поперечних мод, у яких світло може поширюватися вздовж волокна. Волокно, яке підтримує лише один режим, називається одномодовим або мономодовим волокном [3].

Хвильове рівняння може моделювати поведінку багатомодового волокна з більшим сердечником. Це показує, що таке волокно може підтримувати більше ніж один спосіб розповсюдження. Результати такого моделювання багатомодового волокна приблизно узгоджуються з прогнозами геометричної оптики, якщо сердцевина волокна достатньо велика, щоб підтримувати більше ніж кілька мод. Було виявлено та проаналізовано, що вся світлова енергія волокна не повністю обмежена сердцевиною. Значна кількість світлової енергії у зв'язаному режимі поширюється в оболонці у

вигляді невиразної хвилі. Ця концепція в основному застосовна в одномодових волокнах. Типове одномодове волокно має діаметр серцевини 8–10 мікрометрів і призначене для використання в ближньому інфрачервоному діапазоні. Модова структура волокна залежить від довжини хвилі використовуваного світла.

Індексне волокно – це другий тип оптичного волокна. Показник заломлення в серцевині продовжує безперервно зменшуватися між віссю та оболонкою для градуйованого індексу волокна. Зменшення показника заломлення спричиняє плавний вигин світлових променів, коли вони наближаються до оболонки, а не різко відбиваються від межі сердечника та оболонки. Промені під великим кутом проходять більше через периферію ядра з нижчим індексом, а не через центр з високим індексом.

Вигнуті шляхи зменшують багатопроменеву дисперсію. Профіль індексу вибрано для мінімізації різниці в осьових швидкостях поширення різних променів у волокні. Цей ідеальний профіль індексу дуже близький до параболічного співвідношення між індексом і відстанню від осі.

Багатомодове волокно – оптичне волокно з великим діаметром серцевини (більше 10 мікрометрів) можна аналізувати за допомогою геометричної оптики. Таке волокно з електромагнітного аналізу називається багатомодовим волокном. У багатомодовому волокні зі ступінчастим індексом промені не спрямовуються вздовж серцевини волокна шляхом повного внутрішнього відбиття. Промені, які стикаються з межею оболонки сердечника під великим кутом (виміряним відносно лінії, нормальною до межі), більшим, ніж критичний кут для цієї межі, повністю відбиваються.

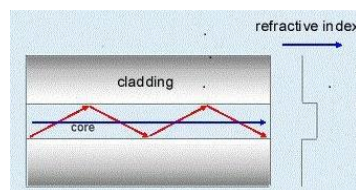


Рисунок 2.3 – Поширення світла через оптичне волокно

Мінімальний кут повного внутрішнього відбиття називається критичним кутом. Критичний кут визначається різницею показників заломлення між серцевиною та матеріалами оболонки.

Усі промені, які стикаються з межею під малим кутом, заломлюються від сердечника в оболонку, і вони не пропускають світло. Цей критичний кут використовується для визначення кута приймання волокна. Він відомий як числова апертура. Високе значення числової апертури дозволяє світлу поширюватися по волокну в променях. Воно поширюється близько до осі та під різними кутами, забезпечуючи ефективне з'єднання світла з волокном. Високе числове значення апертури збільшує ступінь дисперсії, оскільки промені під різними кутами мають різну довжину шляху. Тому їм потрібен різний час, щоб пройти по волокну. Порівняння одномодового та багатомодового волокна наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння одномодового та багатомодового волокна

Параметр	Одномодове волокно	Багатомодове волокно
Роз'єми	Недорогі роз'єми	Висока вартість роз'ємів
Монтаж	Низька вартість	Висока вартість
Пропускна здатність	Високі втрати, низька пропускна здатність	Низькі втрати, висока пропускна здатність
Відстань	До 2 км	До 60 км

2.5 Переваги оптичних мереж

Оптичні мережі пропонують низку переваг порівняно з іншими мережами. Деякі з них:

- низькі втрати потужності: оптичне волокно забезпечує дуже низькі втрати потужності під час передач та завдяки низьким втратам потужності вони найкраще підходять для передачі на великі відстані;
- висока пропускна здатність: волоконно-оптичні кабелі мають

набагато більшу пропускну здатність, ніж металеві кабелі (обсяг даних, що передаються за одиницю часу, дуже великий у волоконно-оптичних кабелях);

- фізичний розмір: волоконно-оптичний кабель дуже тонкий, як правило, оптичне волокно в 30 разів тонше за мідний кабель;

- безпечна передача: волоконно-оптичні кабелі є найбільш захищеним середовищем передачі (дані передаються в цифровому вигляді, тому отримати інформацію дуже складно);

- вага: волоконно-оптичні кабелі набагато тонші та легші за вагу, ніж металеві кабелі;

- динамічна пропускну здатність: пропускну здатність прокладеного оптоволоконного кабелю можна динамічно збільшити за допомогою новітніх технологій і обладнання (такі технології, як щільне мультиплексування за довжиною хвилі (DWDM), надають волоконно-оптичним кабелям можливість за бажанням вмикати та вимикати різні довжини хвилі світла, що проходить волокном);

- стійкість до електромагнітних перешкод: волоконно-оптичний кабель за своєю природою є діелектриком (тому на нього не впливають електричні або магнітні поля);

- гнучкість: оптичне волокно має більшу міцність на розрив, ніж мідні або сталеві волокна того самого діаметру (він гнучкий і легко згинається в порівнянні з іншими металевими тросами);

- пожежна безпека: оптичне волокно є діелектриком за своєю природою (таким чином, електричний струм по кабелю не проходить, а ця особливість робить кабель легкозаймистим).

2.6 Оптоволоконна система передачі

Оптоволоконна система передачі є найбільш сприятливою системою передачі завдяки своїм унікальним характеристикам, як обговорювалося в раніше. Ця система передачі має певні основні компоненти. Типова

оптоволоконна система передачі «точка-точка» складається з трьох основних елементів, тобто оптичного передавача, оптоволоконного кабелю та оптичного приймача, як показано на рисунку 2.4 [4].

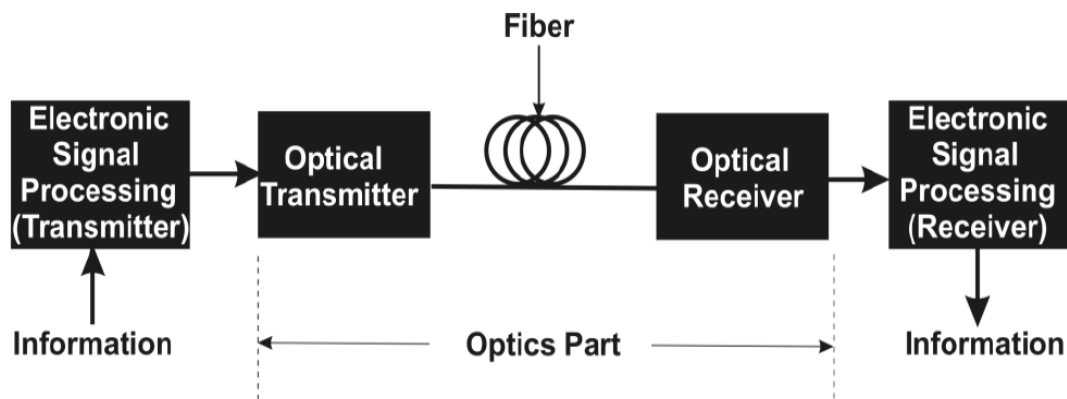


Рисунок 2.4 – Блок-схема одноканальної волоконно-оптичної лінії зв'язку

Передавач перетворює електричний аналоговий або цифровий сигнал у відповідний оптичний сигнал. Джерелом оптичного сигналу може бути як світлодіод, так і твердотільний лазерний діод.

Джерело світла можна модулювати відповідно до вхідного електричного сигналу, щоб створити пучок світла, який передається в середовище передачі. Середовищем передачі є оптичне волокно. Коли оптична інформація досягає приймача, оптичні сигнали перетворюються назад в електричні за допомогою оптичного детектора.

У цій системі інформація проходить електронно-оптико-електронне перетворення. Характеристики передачі оптичного волокна зазвичай наводяться в термінах ослаблення для заданої довжини хвилі на заданій відстані. Зі збільшенням відстані, пройденої сигналом, загасання також збільшується. Коли сигнал стає слабким на великій відстані, інформація, що передається, не може бути отримана з сигналу. Щоб запобігти надмірному ослабленню, використовуються регенератори для посилення потужності сигналу та відновлення форми сигналу [5].

2.7 Система мультиплексування за довжиною хвилі (WDM)

Системи WDM забезпечили основу для величезної пропускної здатності в оптичних мережах. Мережі WDM можуть передавати кілька оптичних сигналів по одному волокну за допомогою різних довжин хвиль лазерного світла. Це забезпечує швидший двонаправлений зв'язок по одному стандартному волокну з підвищеною пропускною здатністю. Оскільки оптична мережа підтримує велику пропускну здатність, мережа WDM розбиває її на кілька оптичних каналів з малою пропускною здатністю. WDM дозволяє використовувати значну частину доступної смуги пропускання оптоволокна, дозволяючи передавати багато незалежних сигналів з різними довжинами хвиль одночасно.

2.7.1 Компоненти системи WDM

Основні компоненти системи WDM такі ж, як і для будь-якої іншої мережі, тобто передавач, лінія зв'язку та приймач. Система WDM також вимагає деяких інших компонентів, таких як перемикачі, модулятори, підсилювачі тощо. У системі WDM передавач є лазерним джерелом зі стабільною регульованою довжиною хвилі. Перед відправкою сигналу через канал мультиплексори змішують довжини хвиль. Канал зв'язку є оптичним волокном із низькими втратами, а на кінці приймача є фотодетектори та демультимплексори довжини хвилі. Компонентами типової системи WDM є оптичні з'єднувачі, оптичні підсилювачі та мультиплексори.

Оптичні з'єднувачі розділяють світло, щоб відводити його на кілька шляхів, або об'єднують світло з кількох шляхів, щоб направляти їх в один шлях. Світловий сигнал поширюється інакше, ніж електричний. Електричний сигнал проходить через приймач на землю. Однак світловий сигнал поглинається приймачем, тому, якщо поставити ряд оптичних приймачів на вихідному кінці, майже жоден сигнал не пройде повз перший приймач.

Таким чином, необхідно розділити промінь і розташувати приймачі паралельно. Оптичний з'єднувач – це пристрій, який використовується для об'єднання або розділення сигналів в оптичній мережі. Муфта може бути пасивною або активною.

Пасивний роз'єм перерозподіляє сигнали без оптико-електричного перетворення і не потребує зовнішнього живлення. Активний з'єднувач використовує електронні пристрої. Пасивний спрямований зв'язувач 2×2 показаний на рисунку 2.5.

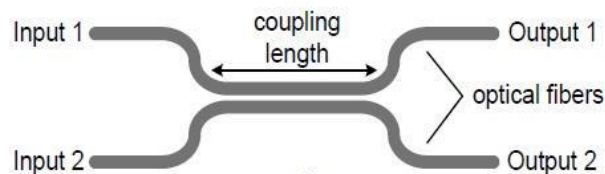


Рисунок 2.5 – Спрямований зв'язок

Він складається з пари хвилеводів паралельних оптичних каналів, розташованих у безпосередній близькості. Найпоширеніші з'єднувачі, які називаються з'єднаними волокнами, виготовляються шляхом з'єднання двох волокон посередині. Частка потужності сигналу, що передається від входу до виходу оптичного хвилеводу, визначається коефіцієнтом зв'язку α . Це означає, що частка α потужності сигналу на вході хвилеводу передається на його вихід.

Решта $(1-\alpha)$ потужності спрямовується на вихід іншого хвилеводу. Залежно від зв'язку між хвилеводами, з'єднувач може мати два стани, тобто перехресний стан і стрижневий стан. В ідеалі вся вхідна потужність одного хвилеводу спрямованого відгалужувача поєднується з іншим хвилеводом для перехресного стану, тоді як у стрижневому стані не повинно бути зв'язку між двома хвилеводами.

На рисунках 2.6 та 2.7 показано перехресний стан і стан смуги оптичного з'єднувача відповідно.

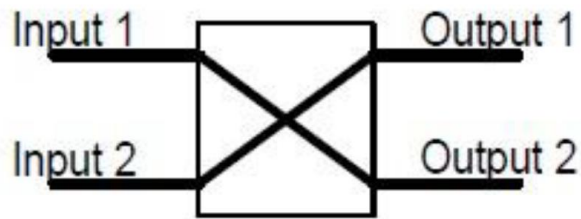


Рисунок 2.6 – Перехресний стан

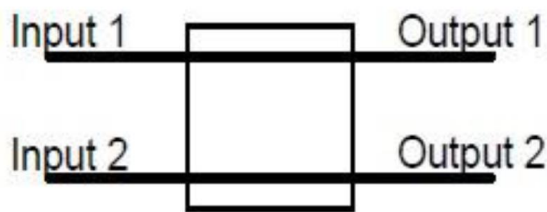


Рисунок 2.7 – Стан смуги

Пасивні з'єднувачі є взаємними пристроями, що означає, що їх функціональні можливості залишаються незмінними, коли їхні входи та виходи змінюються. З'єднувачі, в яких один із портів ізолюваний, можна використовувати для об'єднання або розділення сигналів. Роз'єднувач лише з одним входом називається розгалужувачем, тоді як роз'єднувач лише з одним виходом називається суматором. З'єднувачі також можуть вибирати довжину хвилі, і вони часто використовуються для об'єднання сигналів на 1310 нм і 1550 нм на одному волокні. Іншим застосуванням таких пристроїв є поєднання світла накачування на 980 нм із сигналом користувача на вході підсилювача.

З'єднувачі є важливими елементами в оптичних мережах із широким спектром застосувань. Найважливіше те, що вони є будівельними блоками кількох оптичних пристроїв: оптичних комутаторів, мультиплексорів і демультиплексорів, модуляторів, фільтрів і перетворювачів довжини хвилі. Крім того, ті елементи зв'язку зі значенням α , близьким до одиниці, можна

використовувати для відведення невеликих порцій оптичних сигналів з метою моніторингу. Оптичні елементи зв'язку характеризуються втратами на розщеплення, внесеними втратами та спрямованістю. Втрати на розщеплення визначаються як співвідношення між рівнем потужності на виході та рівнем потужності на вході з'єднувача.

Як правило, для роз'єму 2×2 це значення становить 3 дБ. З міркувань збереження енергії два сигнали на виході мають відносну фазову затримку $\pi/2$, дуже корисну характеристику, яка знайшла своє застосування в оптичних фільтрах. Внесені втрати виникають через недосконалість виробничого процесу і зазвичай коливаються від 0,1 дБ до 1 дБ. Спрямованість відноситься до кількості вхідної потужності, яка просочується з одного вхідного порту в інший.

Жоден волоконно-оптичний матеріал у волоконно-оптичній системі зв'язку не є ідеально прозорим. Видиме світло або інфрачервоні (ІЧ) промені, які переносяться волокном, послаблюються під час проходження через матеріал. Тому в оптичному волокні понад 100 кілометрів довжиною потрібні ретранслятори.

Звичайний повторювач пропускає модульований оптичний сигнал через три етапи, тобто оптико-електронне перетворення, посилення електронного сигналу та електроно-оптичне перетворення. Використання таких повторювачів у волоконно-оптичних системах зв'язку обмежує смугу пропускання сигналів, які можуть передаватися у великих прольотах волоконно-оптичних кабелів. Оскільки електронні схеми звичайного повторювача дуже повільні порівняно з оптичними сигналами. Комерційний розвиток мереж WDM став можливим завдяки розробці оптичних підсилювачів, відомих як підсилювачі волокна з легованим ербієм (EDFA), які забезпечують спосіб оптичного підсилення всіх довжин хвиль одночасно, незалежно від їхніх окремих бітрейтів, схем модуляції чи потужності. Підсилювач EDFA – це оптичний повторювач, який підсилює модульований лазерний промінь напряму, без оптоелектронного та електрооптичного

перетворення. У пристрої використовується коротке оптичне волокно, леговане рідкоземельним елементом ербієм. Коли лазерний промінь, що несе сигнал, проходить через це волокно, застосовується зовнішня енергія, як правило, на довжинах хвиль інфрачервоного випромінювання. Це так зване накачування збуджує атоми в ділянці оптичного волокна, легованого ербієм, збільшуючи інтенсивність лазерних променів, що проходять через нього. Промені, що виходять з EDFA, зберігають усі свої початкові характеристики модуляції, але мають вищу енергію, ніж вхідні промені.

На перший погляд може здатися, що мультиплексування різних довжин хвиль було б відносно простою роботою простого дозволу сигналам різних довжин хвиль падати на оптичне волокно в межах кута прийому останнього. Однак потрібно подбати про те, щоб шум, пов'язаний з кожним каналом, був мінімальним. Канали мають бути ізольовані, щоб гарантувати, що шум на іншій довжині хвилі не заважатиме сигналу, який передається. Мультиплексор довжини хвилі (MUX) поєднує падаючі довжини хвилі та запускає у волокно. На приймальному кінці демультимплексор (DEMUX) змінює вищезазначене та розділяє сигнал на компоненти. Мультиплексори, як правило, засновані на одному з двох принципів, а саме кутової дисперсії та оптичної фільтрації. Для розділення довжин хвиль використовуються призматичні та відбивні решітки. Ті самі елементи можуть поєднувати довжини хвиль при зміні напрямку променів.

2.7.2 Переваги системи WDM

Технологія мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) є найбільш прийнятною технологією для оптичних мереж з різних причин. Ця технологія пропонує ряд функцій для задоволення користувачів. Деякі з таких функцій:

- підтримка високої пропускної здатності: зв'язок за допомогою оптичного волокна забезпечує дуже велику пропускну здатність;
- гнучкість передачі даних: мережа WDM підтримує передачу даних

на різних бітових швидкостях, ця мережа також підтримує низку протоколів і таким чином, існує свобода передавати дані в різних формах за різними протоколами;

- повторне використання довжини хвилі: мережі WDM дозволяють маршрутизувати довжину хвилі, що дозволяє використовувати ту саму довжину хвилі знову і знову для різних волокон;

- простота вдосконалення: мережі WDM дуже гнучкі для змін в інфраструктурі мережі, будь-які зміни можуть бути внесені відповідно до мінливих вимог;

- надійність і безпека: мережі WDM надзвичайно надійні та безпечні, а ймовірність захоплення даних і перехресних перешкод дуже низька.

Відновлення мереж після збою також є дуже ефективним. Передбачено перенаправлення шляху між парою вихідного пункту призначення. У разі збою дані не втрачаються.

2.7.3 Класифікація мультиплексування за довжиною хвилі (WDM)

В оптичному зв'язку мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) – це технологія, яка передає кілька оптичних несучих сигналів по одному волокну за допомогою різних довжин хвиль лазерного світла. Це забезпечує двонаправлений зв'язок з підвищеною пропускну здатністю по одному стандартному волокну.

Ця технологія дозволяє інженерам збільшити пропускну здатність мережі без прокладання додаткового оптоволокна. Порівняно з іншими видами зв'язку він має більший захист від прослуховування, а також стійкий до перехресних перешкод.

У простій системі WDM, як показано на рисунку 2.8, передавальна сторона має ряд джерел світла з фіксованою довжиною хвилі або регульованих джерел світла, кожен з яких випромінює сигнали на унікальній довжині хвилі. Мультиплексор використовується для об'єднання цих

оптичних сигналів у безперервний спектр сигналів і з'єднання їх на одне волокно. В межах оптичної лінії зв'язку існують різні типи оптичних підсилювачів. На приймальному кінці використовується демультиплексор для розділення оптичних сигналів на відповідні канали виявлення для обробки сигналу.

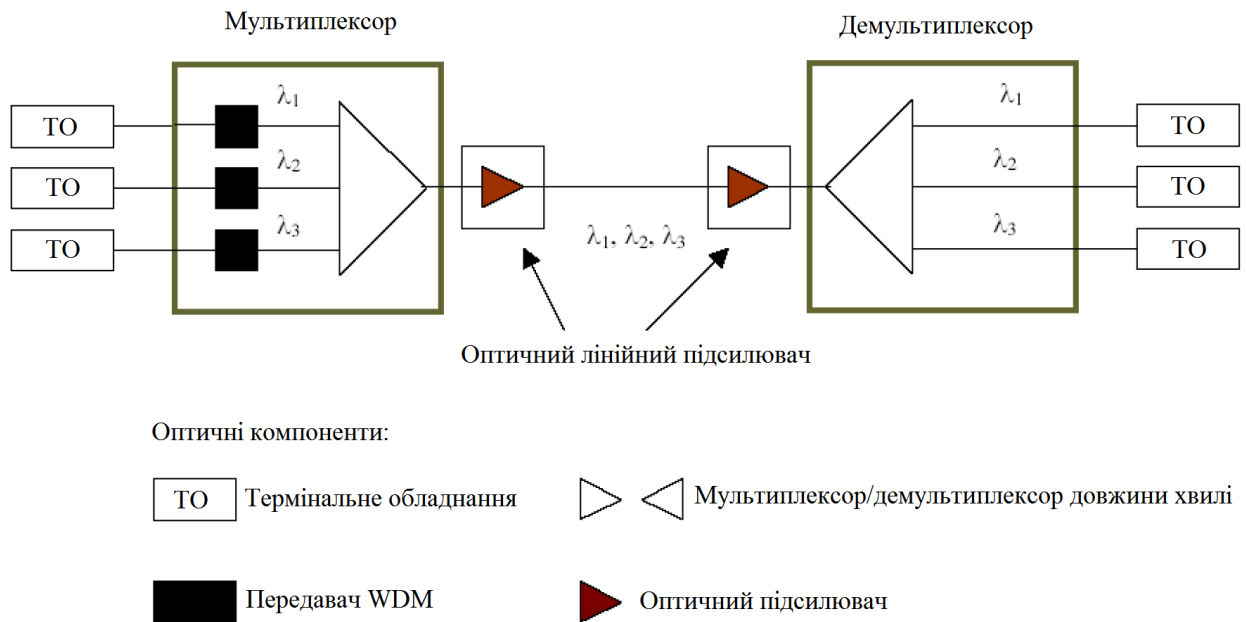


Рисунок 2.8 – Мультиплексування з поділом довжини хвилі

Порівняння різних типів мереж WDM наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння різних типів мереж WDM

Параметри	WDM	CWDM	DWDM
Міжканальний інтервал	1310 нм та 1550 нм	1.6 нм-25 нм	1.6 нм та менше
Немає базових діапазонів	C(1521-1560 нм)	S(1480-1520 нм) C(1521-1560 нм) L(1561-1620 нм)	C(1521-1560 нм) L(1561-1620 нм)
Вартість за канал	Низька	Низька	Висока

Системи WDM класифікуються за двома категоріями: щільне мультиплексування за довжиною хвилі (DWDM) і грубе мультиплексування за довжиною хвилі (CWDM). Вони пояснюються наступним чином:

- у щільному мультиплексуванні за довжиною хвилі (DWDM) мультиплексор/демультиплексор має справу з меншими діапазонами довжин хвиль (до 0,8 нм, 0,4 нм або навіть 0,2 нм) і може обслуговувати 40, 80 або навіть 160 довжин хвиль;

- у мультиплексуванні з грубим розподілом по довжині хвилі (CWDM) мультиплексор/демультиплексор працює з невеликою кількістю довжин хвиль, зазвичай вісім, але з великим проміжком між довжинами хвиль (зазвичай на відстані близько 20 нм).

3 КОНТРОЛЬ ТРАФИКУ

Догляд за трафіком в оптичних мережах відноситься до процесу мультиплексування, комутації та демultipлексування довжин хвиль ефективними способами для покращення продуктивності мережі, пропускної здатності та використання пропускної здатності, одночасно зменшуючи вартість мережі та коефіцієнт блокування.

Це термін, який використовується для опису оптимізації використання потужності в системах передачі даних за допомогою перехресних з'єднань, перетворень між різними системами передачі або рівнями в одній системі. Основними перевагами обробки трафіку є зниження вартості мережі та покращення продуктивності мережі.

Налаштування трафіку – це процес групування багатьох малих телекомунікаційних потоків у більші одиниці, які можна обробляти як єдине ціле. Мережа, що використовує як мультиплексування з розділенням часу (TDM), так і мультиплексування з розподілом по довжині хвилі (WDM), які призначені для якогось вузла, може бути розміщена на одній довжині хвилі, дозволяючи інші відкидати одним оптичним мультиплексором додавання-відведення за допомогою концепції дорожнього руху. Загалом метою обробки трафіку є мінімізація вартості мережі.

Вартість кінцевого обладнання (LTE) або мультиплексорів додавання/відведення (ADM) є найбільш домінуючим компонентом у вартості оптичної мережі WDM. Таким чином, догляд за трафіком зазвичай спрямований на мінімізацію використання ADM. Задоволення заданого набору запитів трафіку шляхом мінімізації вартості мережі та максимізації пропускної здатності мережі були основними напрямками обробки трафіку. Деякі з важливих факторів, які впливають на налагодження трафіку – це навантаження на трафік, пропускна здатність зв'язку та довжини хвилі, розміщення пристроїв налагодження, кількість пристроїв налагодження та

деталізація довжини хвилі. Різні дослідники та експерти запропонували низку алгоритмів обробки трафіку. Вони, як правило, пропонують кращі рішення щодо типів пристроїв для догляду або технології догляду, які будуть використовуватися, а також для їх розміщення в мережі.

Догляд за трафіком відіграє важливу роль як у мережах кільцевої, так і в сітчастій топології. Потоки даних в одному оптоволокну передаються на різних довжинах хвиль. Кожна довжина хвилі може бути додатково розділена на більше ніж один канал, що має менший відношення всієї смуги пропускання довжини хвилі. Світловий шлях від джерела до місця призначення може бути сформований за допомогою таких каналів довжини хвилі більш дрібної гранулярності. Ефективне планування розміщення пристроїв для догляду в сітчастій мережі є складним завданням [6].

Грумінг – це термінологія, яка описує різноманітні проблеми в телекомунікаційних мережах, спрямовані на оптимізацію використання пропускну здатності. Грумінг зазвичай передбачає перемикання трафіку з однієї довжини хвилі на іншу, діапазон хвиль, керування часовим інтервалом, оптоволоконом, кабелем тощо.

Ще одна функція, яка є фундаментальною для догляду, це можливість перемикати потоки низькошвидкісного трафіку на магістралі з високою пропускну здатністю. Загальна мета обробки полягає в тому, щоб допомогти розкласти проблеми забезпечення жорсткого ланцюга на невеликі, простіші та отримати збільшений простір для вирішення таких проблем. Управління трафіком стало дуже важливою проблемою в оптичних мережах, оскільки оптичні мережі забезпечують дуже високу швидкість передачі даних для величезної кількості даних. Вони корисні для мереж на короткій відстані, зокрема для локальної мережі (LAN), а також для мереж на великій відстані, зокрема для глобальної мережі (WAN), оскільки світло поширюється через волокно з високою швидкістю та забезпечує дуже мале затухання порівняно з електричними кабелями. Продуктивність будь-якої оптичної мережі можна виміряти за різними параметрами, такими як

ймовірність блокування, швидкість, вартість, частота відмов тощо. Для вимірювання, контролю та вдосконалення всіх цих параметрів були запропоновані різні алгоритми, моделі та методи [7].

3.1 Типи управління трафіком

Схеми догляду можна далі розділити на три категорії. Ці схеми:

- управління з одним стрибком;
- часткове управління догляд Multi Hop;
- повне управління Multi Hop.

Усі проблеми з доглядом за трафіком далі поділяються на чотири різні підпроблеми. Після цього поділу можна легко зрозуміти проблеми організації трафіку. Ці підпроблеми можуть бути незалежними. Ці підпроблеми:

- визначення віртуальної топології, яка складається зі шляхів світла: визначається дизайн віртуальної топології або набір шляхів світла, які необхідно встановити.

- маршрутизація світлових шляхів через фізичну топологію: це проблема загальної маршрутизації на фізичному з'єднанні, однак у цьому випадку світлові шляхи представляють вимоги трафіку;

- виконання призначення довжини хвилі для шляхів світла: призначення довжини хвилі для шляхів світла, дотримуючись обмеження безперервності довжини хвилі та уникаючи конфлікту довжин хвиль;

- маршрутизація трафіку за віртуальною топологією: після того, як віртуальна топологія була визначена та реалізована, фактичні потоки трафіку від вузла до вузла повинні бути скеровані через світлові шляхи.

Віртуальна топологія – це орграф (V, A) , де вершини (V) відповідають вузлам мережі з таким обладнанням, як OADM, OXC тощо, а між двома вершинами (A) існує ребро тоді і тільки тоді, коли існує між відповідними вузлами.

Можуть існувати спеціальні додаткові обмеження для маршрутизації світлового шляху в мережах WDM; напр. фізичні порушення, такі як втрати, хроматична дисперсія та нелінійні ефекти, можуть обмежувати фізичні стрибки на шляху світла. Довжини хвиль є одним із найважливіших ресурсів оптичних мереж. Кількість довжин хвиль, які можна мультиплексувати на одне волокно, обмежена. Високі витрати на щільне мультиплексування за довжиною хвилі (DWDM) породили мультиплексування з грубим поділом.

3.2 Різні методи мультиплексування для обробки трафіку

Для ефективної обробки трафіку в різних областях оптичних мереж використовуються різні методи мультиплексування. Вони пояснюються нижче:

- мультиплексування з просторовим розподілом (SDM): фізичний простір розділено для збільшення пропускної здатності передачі де набір волокон об'єднується в один кабель або кілька кабелів поміщаються в мережеве з'єднання;

- мультиплексування за довжиною хвилі (WDM): доступний частотний спектр поділяється на набір незалежних каналів (використання мультиплексування з частотним поділом (FDM) в оптичній мережі називається мультиплексуванням з поділом по довжині хвилі (WDM) або щільним мультиплексуванням по довжині хвилі (DWDM);

- мультиплексування з поділом часу (TDM): воно поділяє часову область смуги пропускання на повторювані часові інтервали фіксованої довжини, використовуючи TDM, кілька сигналів можуть спільно використовувати задану довжину хвилі, якщо вони не накладаються в часі;

- мультиплексування з розділенням пакетів (PDM): його також називають динамічним статистичним мультиплексуванням (DSM), таким чином, воно надає послугу віртуального каналу в мережевій архітектурі IP/MPLS через WDM.

3.3 Живучість в оптичних мережах

Вибухове зростання пов'язаних із Інтернетом веб-сервісів залучає мільйони нових користувачів до мережі, таким чином підживлюючи величезний попит на пропускну здатність. Мережі з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM), які використовують маршрутизацію за довжиною хвилі, стали домінуючою технологією для задоволення цього зростаючого попиту на пропускну здатність.

Зі збільшенням обсягу трафіку будь-який одиничний збій може бути катастрофічним. Живучість стає незамінною в таких мережах. Тому вкрай важливо проектувати мережі з майже нульовим часом простою. Мережа повинна швидко й ефективно відновлюватися після будь-якого збою без втрати значної кількості даних.

Тип послуг розширився від голосових до різноманітних мультимедійних послуг. Зі збільшенням кількості бізнес-користувачів переривання обслуговування навіть на короткий проміжок часу може мати катастрофічні наслідки. Таким чином, як запобігти перериванню обслуговування та зменшити втрату обслуговування до мінімуму, якщо переривання неминуче, стає критичним питанням, тому при проектуванні телекомунікаційних мереж слід враховувати живучість. Живучість є важливою частиною оптичних мереж, оскільки ці мережі передають велику кількість даних. Живучість мережі означає здатність мережі забезпечувати безперервне обслуговування навіть у разі збоїв.

Саме здатність мережі витримувати збої та відновлюватися після них є однією з найважливіших вимог до мереж. Її важливість зростає у волоконно-оптичних мережах із пропускну здатністю порядку гігабітів і терабітів на секунду. У мережі WDM, оскільки один канал може передавати десятки гігабіт даних на секунду, один збій може спричинити величезні збої в роботі великої кількості користувачів. Тому проектування живучих мереж WDM привернуло увагу дослідницької спільноти.

Управління несправностями стало критично важливим для управління живучістю високошвидкісних мереж. Вплив відмови посилюється надзвичайно великим обсягом трафіку, що передається в мережах WDM. У мережі WDM збій елемента мережі може спричинити збій кількох оптичних каналів, що призведе до великої втрати даних, що може призвести до переривання послуг зв'язку.

Мережа може вийти з ладу з різних причин. Але основні типи збоїв у мережі викликані або збоєм вузла, або збоєм зв'язку. Іноді збій каналу можливий і в мережах. Збій вузла виникає через несправність одного або кількох вузлів у мережі. Помилка з'єднання означає, що дані не можуть бути передані з одного вузла на інший через збій з'єднання між цими двома вузлами.

Збій вузла означає, що він працює в погіршеному режимі. Несправний вузол не може створювати та підтримувати резервування для потоків, але продовжує обробляти маршрутизацію та інші повідомлення керування. Збої вузла далі поділяються на збій одного вузла або збій кількох вузлів:

- збій одного вузла: якщо несправний лише один вузол у мережі, це називається збоєм одного вузла та у разі відмови одного вузла в мережі ланцюгової топології ланцюг буде розділено на два окремі ланцюги (в архітектурі концентратора один із цих ланцюгів буде повністю від'єднаний);

- збій кількох вузлів: у разі збою кількох вузлів одночасно буде вражено кілька вузлів і цей збій складно обробляти та відновлювати порівняно зі збоєм одного вузла.

3.3.1 Помилки каналу

Під час цієї помилки зв'язок між парою вихідного пункту та призначення не вдається. Цей тип несправностей часто є результатом зовнішніх причин. Порізи кабелю є дуже поширеною причиною таких несправностей. Сценарій збою зв'язку є найбільш вивченим. В основному це

пов'язано з двома факторами: він більш поширений порівняно з іншими збоями через високу частоту обривів волокна, а методи, що використовуються для захисту від збоїв зв'язку, можна розширити для інших збоїв, наприклад збоїв вузла.

Це також включає відмову компонентів лінії зв'язку, таких як лінійні підсилювачі або регенератори тощо. У минулому несправності вирішувалися вручну шляхом тимчасового перенаправлення розірваних з'єднань і відправлення бригад для ремонту пошкодженого обладнання на місці. Сьогодні оптичні мережі, які все ще потребують ручної зміни маршруту, можна вважати незахищеними мережами.

Періоди простоїв через відновлення трафіку за допомогою втручання людини є неприпустимими. Жоден оператор оптичної мережі не бажає приймати незахищені об'єкти. Таким чином, живучість мережі завжди повинна гарантуватися шляхом застосування ефективних методів автоматичного відновлення після збоїв. Помилки з'єднання поділяються на дві категорії:

- помилка одного каналу: у випадку збою одного каналу зазнає впливу лише на одне з усіх каналів мережі (даний вид відмови є найпростішим серед інших з точки зору реалізації методів відновлення);
- збій кількох каналів: такий збій виникає, коли в мережі виходить з ладу кілька каналів (кілька каналів можуть виходити з ладу одночасно або через незалежні проміжки часу).

3.3.2 Потреба в живучості

Зростання Інтернету та збільшення кількості бізнес-функцій, які залежать від комунікаційних мереж, роблять живучість важливим аспектом дизайну мережі. Через одне оптичне волокно проходить близько 100 терабіт даних на секунду. Таким чином, одна помилка може призвести до значної втрати обслуговування.

Є кілька причин, чому постачальники послуг розгортають схеми живучості у своїх мережах. Деякі з цих причин:

- задоволеність клієнтів;
- збій мережі може призвести до збитків для бізнесу;
- надійність мереж.

Живучість стосується трьох видів подій. Це атаки, збої та аварії. Атаки є потенційно шкідливими подіями та включають вторгнення та відмову в обслуговуванні.

Збої – це шкідливі події, викликані недоліками в системі або зовнішньому елементі, від якого система залежить.

Збої можуть виникати через помилки програмного забезпечення, погіршення якості апаратного забезпечення або пошкодження даних. Аварії охоплюють широкий спектр подій, таких як стихійні лиха. Живучість мережі вимірює здатність мережі постійно підтримувати встановлену якість обслуговування (QoS) за наявності різних сценаріїв збою.

3.3.3 Переваги забезпечення живучості на рівні WDM

Перевагами забезпечення живучості мережі на рівні WDM є:

- швидкість: вузли можуть швидко реагувати на виникнення збоїв (сигнали індикації вищого рівня не потрібні, таким чином, відновлення збоїв на рівні WDM відбувається набагато швидше);
- простота: це просто, оскільки потребує менше координації, ніж відновлення на вищих рівнях;
- ефективність: оскільки ресурси розподіляються між різними рівнями обслуговування, тож здатність відновлення може бути ефективно реалізована;
- прозорість: техніка захисту маршрутизації за довжиною хвилі не залежить від протоколів, які використовуються на вищих рівнях.

3.3.4 Методи забезпечення живучості оптичних мереж

Існують різні стратегії забезпечення живучості оптичних мереж. Існують певні цілі живучості мережі, які на практиці можуть частково суперечити одна одній:

- слід звести до мінімуму вплив невдачі з точки зору попиту, часу, вартості, послуг тощо;
- стратегія виживання має бути економічною;
- її має бути легко реалізувати;
- вона повинна мати можливість гарантувати швидке перемикання на резервний маршрут у разі збою, якщо є будь-який резервний маршрут.

В даний час оптичні мережі WDM потрібні для задоволення зростаючих вимог до мережевого трафіку. Таким чином, надійний дизайн мережі проти збою в мережі WDM стає критичною проблемою, оскільки збій зв'язку може призвести до величезних втрат даних. У цьому контексті кожен первинний шлях, на який впливає збій, має бути переключений на альтернативний шлях. Основні шляхи, за якими дані маршрутизуються під час нормального виконання, називаються робочими шляхами. Альтернативні шляхи, якими дані направляються, коли в мережі виявлено збій, називаються резервними шляхами. Різні схеми керування несправностями показано на рисунку 3.1. Технологію підтримання живучості в оптичних мережах можна класифікувати на дві категорії, тобто захист і відновлення залежно від того, як розподіляється резервна ємність. Вони пояснюються нижче:

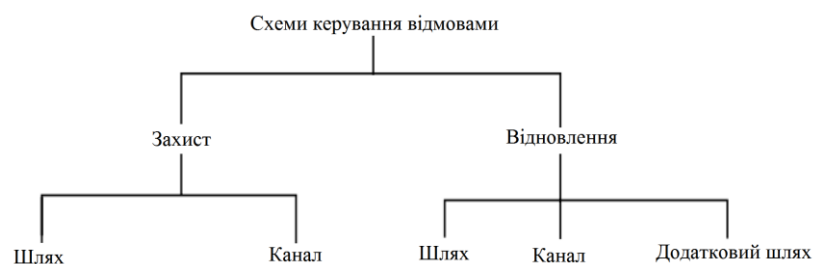


Рисунок 3.1 – Різні схеми живучості

3.4 Захист

У мережах WDM з маршрутизацією за довжиною хвилі спектр оптичного сигналу розбивається на кілька смуг довжин хвиль, що не перекриваються, що дозволяє співіснувати в одному волокні численним каналам довжин хвиль.

Відмова елемента мережі може призвести до відмови кількох оптичних каналів, що призведе до великих втрат даних і прибутку.

Живуча мережева архітектура, яка базується на попередньому резервуванні резервних ресурсів, називається захистом. Захист заздалегідь планує резервні маршрути, які будуть використані у разі збою. Захист може бути реалізований ефективним способом і запропонувати набагато швидше відновлення.

Схеми захисту можуть досягти повного відновлення за десятки мілісекунд. Захист можна додатково класифікувати як захист зв'язку та захист шляху. Схеми захисту можуть бути реалізовані як захист спільного шляху та захист спеціального шляху.

3.4.1 Захист каналу

Захист каналу також називається захистом зворотного зв'язку. Альтернативні шляхи, які називаються резервними або захисними шляхами, між кінцевими точками кожного каналу попередньо обчислюються. Зазвичай альтернативний шлях є окремим для кожної довжини хвилі. У разі збою каналу всі світлові шляхи, що використовують канал, які називаються основними або робочими світловими шляхами, перемикаються на кінцевих вузлах каналу на відповідні резервні світлові шляхи.

Таким чином, резервні шляхи та довжини хвиль резервуються навколо кожного каналу на основному шляху під час налаштування з'єднання. У разі збою зв'язку всі з'єднання, що проходять через невдалий канал, будуть

перенаправлені навколо цього каналу, а вузли джерела та призначення з'єднань, що проходять по збійному каналу, не постраждають від збою каналу.

Схему захисту каналів можна далі розділити на дві категорії, тобто захист виділеного каналу і захист загального каналу.

- захист виділеного каналу: резервний шлях і довжина хвилі резервуються для кожного каналу під час встановлення з'єднання (резервний шлях призначений для певного каналу, але на практиці може бути неможливо виділити резервний шлях для кожного каналу основного з'єднання та на тій самій довжині хвилі, що й основний шлях);

- захист загального каналу: ресурси, зарезервовані вздовж шляху, можуть бути спільними з іншими шляхами та у результаті резервні канали мультиплекуються серед різних сценаріїв збою.

3.4.2 Захист шляху

Захист шляху передбачає наскрізне перенаправлення всіх робочих світлових шляхів, які використовують несправний канал, уздовж попередньо обчислених резервних світлових шляхів. Весь маршрут робочих світлових доріжок може бути змінений.

Ці схеми можуть забезпечити гарантований захист, оскільки налаштування завершується, лише якщо вторинний шлях також доступний.

Вихідний і цільовий вузли кожного з'єднання статично резервують основний шлях і резервний шлях на наскрізній основі під час налаштування з'єднання.

Коли зв'язок виходить з ладу, вузол-джерело та вузол-приймач кожного з'єднання, яке проходить через збійний канал, інформуються про збій і використовуються резервні ресурси. Схеми захисту шляху та захисту каналу показані на рисунках 3.2 та 3.3.

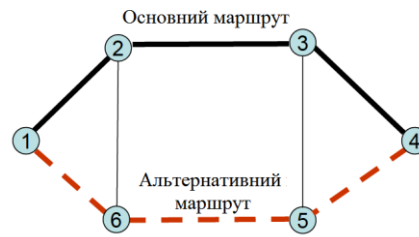


Рисунок 3.2 – Захист шляху

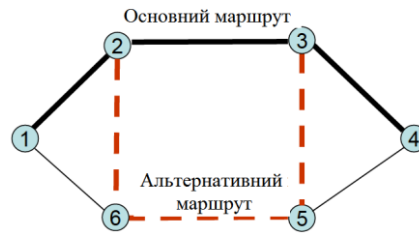


Рисунок 3.3 – Захист каналу

3.5 Відновлення

Відновлення – це схема реактивної живучості. Жодні ресурси не залишаються резервними під час встановлення підключення. Резервні канали та шляхи виявляються в режимі онлайн після збою. Щоразу, коли виникає збій, вільні ресурси ідентифікуються як резервний шлях. Потім передача відновлюється за допомогою цього резервного шляху. Відновлення далі підрозділяється на три типи: відновлення каналу, відновлення шляху, відновлення субшляху. Вони показані на рисунку 3.4

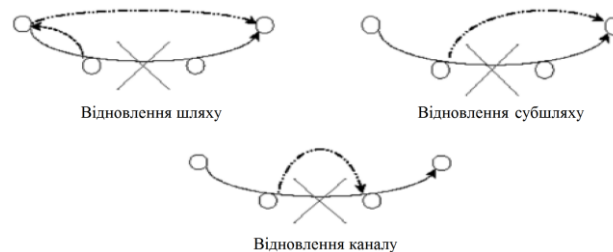


Рисунок 3.4 – Типи відновлення

3.5.1 Відновлення каналу

У разі збою кінцеві вузли збійного каналу зв'язку беруть участь у розподіленому алгоритмі для динамічного виявлення нового маршруту навколо каналу для кожної активної довжини хвилі, яка проходить через цей канал. Кінцеві вузли невіддалого каналу перенаправляють потоки на новий маршрут. З'єднання розривається, якщо не вдається виявити новий маршрут і відповідну довжину хвилі для розірваного каналу.

3.5.2 Відновлення шляху

Вихідний і кінцевий вузли кожного каналу незалежно виявляють резервний маршрут на наскрізній основі, і такий резервний шлях може бути на каналі іншої довжини хвилі. Коли виявлено новий маршрут і канал довжини хвилі, з'єднання перемикається на новий шлях. Підключення розривається, якщо немає нового маршруту.

3.5.3 Відновлення субдшляху

Коли канал виходить з ладу, верхній вузол невіддалого каналу виявляє збій і виявляє резервний маршрут від себе до відповідного вузла призначення для кожного розірваного з'єднання після успішного виявлення ресурсів для нового резервного маршруту з'єднання перемикається на новий шлях. Якщо недостатньо ресурсів, з'єднання розривається.

3.5.4 Проактивне та реактивне відновлення

У цій схемі проектування відновлення для оптичної мережі заздалегідь сплановано. У проактивній схемі резервні ресурси (такі як комутатори, волокна, доступний частотний слот тощо) резервуються заздалегідь під час

встановлення з'єднання або при проектуванні мережі. Ця схема забезпечує стовідсоткову гарантію відновлення та забезпечує швидке відновлення, але пропускна здатність витрачається даремно. Захист виділеного тракту (DPP) буває двох типів, як показано на рисунку 3.5 (а) і (б), один — це 1+1 DPP або автоматичне захисне перемикання (APS), а другий — 1:1 DPP/APS, а також захист спільного шляху 1:N (SPP), як зазначено на рисунку 3.5 (в), є проактивними схемами, які використовуються для відновлення після збою в оптичних мережах.

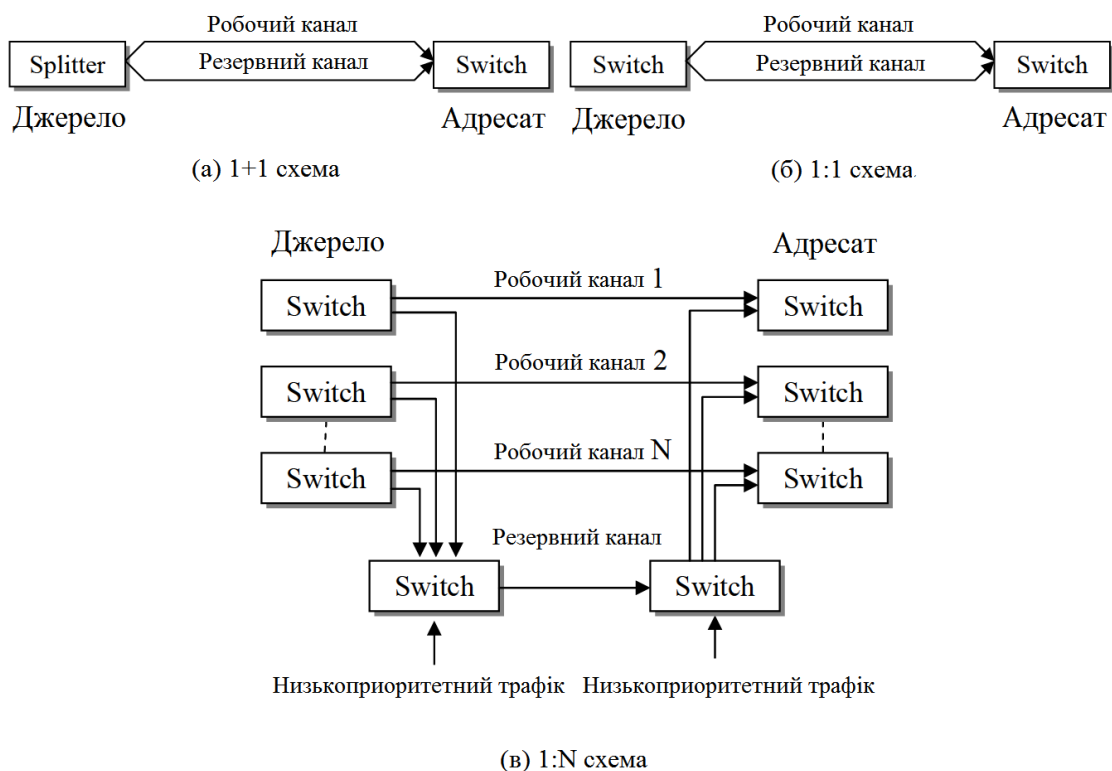


Рисунок 3.5 – Автоматичне захисне перемикання

Схема 1+1 DPP показана на рисунку 3.5 (а), трафік надсилається двома паралельними шляхами, які знаходяться одночасно на робочому та захисному шляху, а вузол призначення порівнює обидва сигнали та вибирає кращий (наприклад, менш шумний). У разі збою адресати перемикаються на захисний шлях. Ця схема проста і швидка, але пропускна здатність витрачається даремно.

У режимі DPP 1:1, як показано на рисунку 3.5 (б), під час нормальної роботи через захисний шлях не надсилається трафік або. У разі збою в мережі вихідний і кінцевий вузол переходять на шлях захисту. Ця схема краще використовує ресурси, але процес відновлення відбувається повільніше.

У 1:N SPP є N номерів робочого шляху, який спільно використовує один шлях захисту. Якщо збій трапляється в N числах робочого шляху, то один шлях захисту забезпечує відновлення.

3.5.5 Самовідновлювальне кільце (SHR)

Самовідновлювальне кільце також є дуже успішним методом відновлення в оптичних мережах. У цій схемі кільцева архітектура призначена для робочих і захисних шляхів. Техніка SHR є більш гнучкою, оскільки вона здатна обробляти як вузол, так і збій каналу одночасно. Використання високошвидкісного мультиплексора додавання-відведення робить його більш зручним і привабливим для живучих оптичних мереж. SHR також буває двох типів: перший – це кільце з однонаправленим самовідновленням (USHR), як показано на рисунку 3.6, а другий – це кільце з двонаправленим самовідновленням (BSHR), як показано на рисунку 3.7.

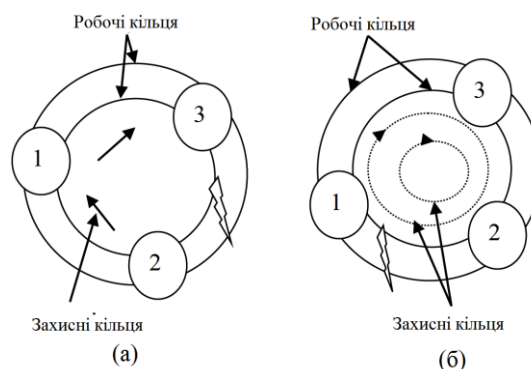


Рисунок 3.6 – Однонаправлене самовідновлювальне кільце з робочими кільцями (а) та з захисними кільцями (б)

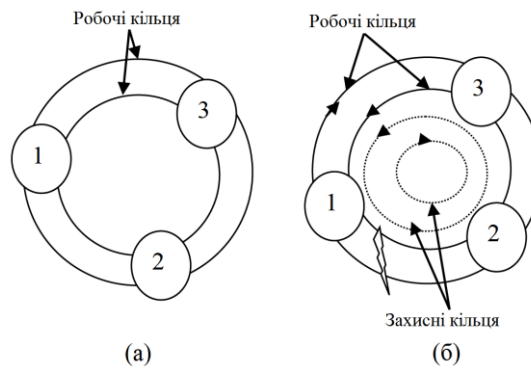


Рисунок 3.7 – Двонаправлене кільце самовідновлення з робочими кільцями (а)
та з захисними кільцями (б)

3.5.6 Автоматичне двоциклове покриття (ADCC)

ADCC реалізовано для сітчастої мережі, і кожен первинний маршрут має одне захисне волокно. Кожний канал має чотири однонаправлені з'єднання, і кожні два з'єднання використовуються для передачі даних, а два інших використовуються для захисту в протилежному напрямку від робочого з'єднання. Резервний маршрут використовується як набір циклів для кожного зв'язку захисту, який виникає лише один раз у будь-якому наданому циклі, як показано на рисунку 3.8.

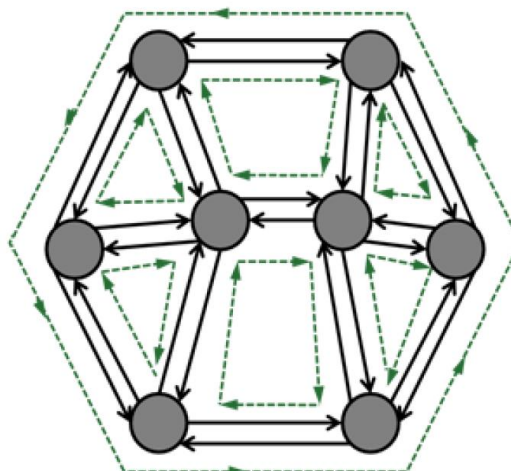


Рисунок 3.8 – Реалізація автоматичного двоциклового покриття

3.5.7 Петлева схема

Вся мережа поділена на підграфи (тобто на основні та вторинні). Основний підграф використовується для передачі даних, а вторинний використовується для резервування. Кожна ланка має два волокна в різному напрямку. Таким чином, підграф формується шляхом вибору одного волокна для основного, а іншого для вторинного з кожного маршруту. Якщо сталася поломка, основний маршрут закріплюється на вторинному волокні. Сигнал досягає іншого кінця збірної лінії зв'язку та автоматично перемикається на первинний підграф, як показано на рисунках 3.9 (а) і (б). Пунктирною лінією позначено основний, а пунктирною крапкою – вторинний підграф.

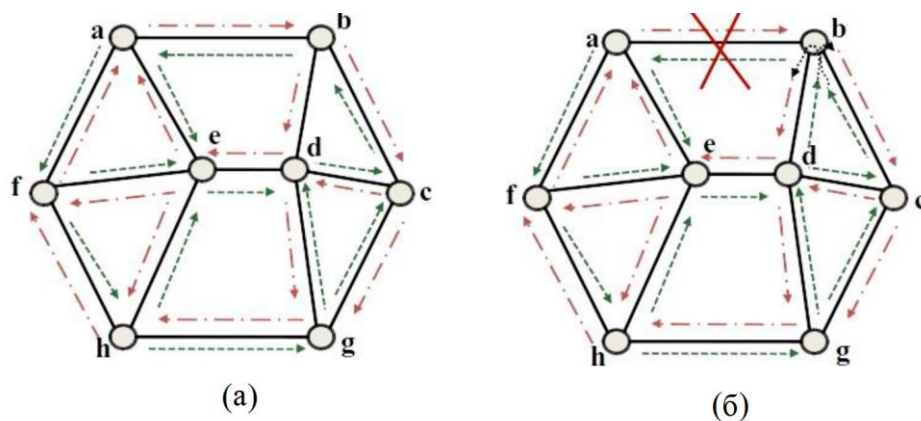


Рисунок 3.9 – Первинний підграф із зворотним зв'язком (а) та (б) вторинний підграф із захисними волокнами

Робочий маршрут на первинному підграфі від вузла b-а через вузол ab і отримує петлю у вузлі b на вторинному графі. Трафік резервного маршруту знаходить свій шлях у вузлі a. Резервний маршрут може приймати різні можливі номери шляхів для досягнення пункту призначення a, як показано на рисунку 3.9 (б). Маршрут, за яким спочатку передаються дані, вибирається як резервний легкий шлях, а наступний шлях відхиляється. У цьому випадку розглядається лише один резервний маршрут.

3.5.8 Схема захисту Р-циклу

Схеми захисту Р-циклу або попередньо налаштовані схеми захисту були вперше запропоновані Grover в [8]. Дослідники виявили більший інтерес до впровадження цієї схеми через її швидке відновлення та ефективне використання ресурсів.

Р-цикл забезпечує резервний маршрут до основної ланки, а також до сполучних ланок. У разі невдачі охоплюючого маршруту р-цикл має два маршрути для перенаправлення трафіку через резервну ємність. Отже, вимога до пропускної здатності в цій схемі зменшується наполовину в сполучній ланці.

На рисунку 3.10 (а) р-цикл показаний пунктирними лініями, і немає жодного збою зв'язку. Якщо збій стався на будь-якому каналі зв'язку, відновлення було здійснено шляхом перенаправлення трафіку в р-циклі шляхом перемикавання на кінцеві вузли недалого маршруту.

Прохідний маршрут має дві ланки захисту, як показано на рисунку 3.10 (в). Захист на р-циклі та на сполучній ланці представлено на рисунках 3.10 (б) та (в) відповідно.

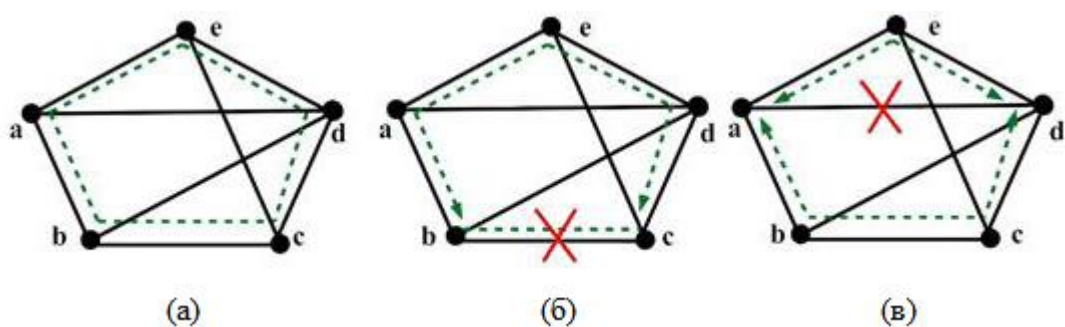


Рисунок 3.10 – Схема захисту Р-циклу

Р-цикли використовуються для захисту каналів, вузлів і шляхів в оптичному зв'язку. Якщо будь-який вузол виходить з ладу, можна захистити лише транзитний потік даних.

На рисунку 3.11 (а) і (б) запропоновано схему р-циклу оточування вузла (NEPC) і р-цикл захисту незалежного шляху від відмови (FIPP). На рисунку 2.11 (а) пунктирні лінії NEPC і штрих-крапки вказують на захист транзитного потоку через вузол а. Захист каналів за допомогою р-циклу поширюється на захист на основі шляху, тобто FIPP, як зазначено на рисунку 3.11 (б). Тут р-цикл FIPP показано зеленими крапками, які захищають непересічні шляхи, а захищений непересічний шлях показаний пунктирно-штриховими лініями.

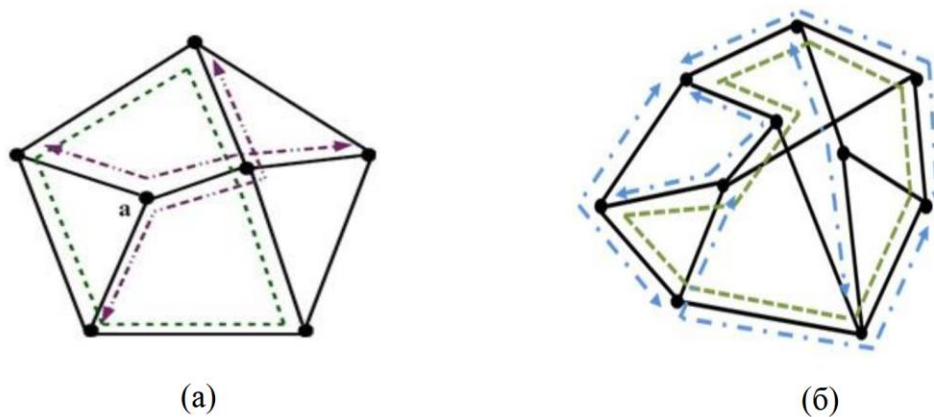


Рисунок 3.11 – Захист із використанням (а) р-циклу, що оточує вузол, і захист незалежного від відмови шляху р-циклу (б)

Захист каналу може бути забезпечений через наскрізний вузол або за допомогою сегментів шляху або р-циклів відновлення потоку трафіку. Р-цикл відновлення потоку та сегмент захисту шляху є більш ефективними порівняно з р-циклами захисту каналу.

Захист за допомогою р-циклу потоку важко реалізувати для всієї мережі, і це повільний процес відновлення. Пошук р-циклу з мінімальним використанням ресурсів є критичною проблемою оптимізації живучості оптичних мереж. Схема р-циклу широко описана в централізованій і розподіленій стратегії. У централізованій стратегії р-цикли вибираються з набору циклів відповідно до критеріїв мережевого графа.

3.6 Маршрутизація та призначення довжини хвилі

Маршрутизація та призначення довжини хвилі (RWA) – це унікальна функція мереж WDM, у якій світловий шлях реалізується методом вибору шляху фізичного зв'язку між парою джерела та призначення та резервування певної довжини хвилі на кожному з цих каналів для світлового шляху. Таким чином, для встановлення оптичного з'єднання необхідно мати справу з вибором шляху (проблема маршрутизації), а також із розподілом доступних довжин хвиль для з'єднань (проблема призначення довжини хвилі). Ця проблема відома як проблема маршрутизації та призначення довжини хвилі (RWA).

Можна розділити цю проблему на дві проблеми, а саме; проблему маршрутизації та задачу призначення довжини хвилі, а потім можна запропонувати різні рішення цих проблем.

Перед зв'язком між будь-якими двома вузлами має бути встановлено наскрізний світловий шлях.

Щоб створити світловий шлях, потрібно, щоб однакова довжина хвилі була розподілена на всіх ланках уздовж шляху. Це обмеження відоме як обмеження безперервності довжини хвилі.

3.6.1 Обмеження маршрутизації за довжиною хвилі

Є два обмеження, які слід мати на увазі, намагаючись вирішити проблему маршрутизації та призначення довжини хвилі. Перше чітке обмеження призначення довжини хвилі є справедливим для вирішення завдання призначення довжини хвилі в будь-якій мережі маршрутизації довжини хвилі.

Друге обмеження безперервності довжини хвилі застосовується лише для простого випадку маршрутизації, коли не має можливості перетворення довжини хвилі всередині вузлів. Отже:

- обмеження розподілу різних довжин хвиль: усім шляхам світла, що використовують спільне оптичне волокно, повинні бути призначені різні довжини хвиль, щоб уникнути перешкод.

- обмеження безперервності довжини хвилі: довжина хвилі, призначена кожному світловому шляху, залишається незмінною на всіх ланках, які вона проходить від вихідного кінцевого вузла до кінцевого вузла призначення.

3.6.2 Методи маршрутизації за довжиною хвилі

Перше чітке обмеження призначення довжини хвилі є справедливим для вирішення завдання призначення довжини хвилі в будь-якій мережі маршрутизації.

Зазвичай із доступних маршрутів вибирається найкоротший шлях. При надходженні запиту на з'єднання пари вузлів виконується пошук фіксованого для цієї пари вузлів маршруту на наявність вільної довжини хвилі.

В альтернативній схемі маршрутизації для пари вузлів передбачено два або більше маршрутів. Ці маршрути шукаються один за одним у заздалегідь визначеному порядку. Зазвичай ці маршрути впорядковані в порядку неубування їх довжини. Існує кілька підходів до маршрутизації запиту на підключення. Це пояснюються наступним чином:

- фіксована маршрутизація: це найпростіший підхід до маршрутизації, коли з'єднання завжди вибирає один і той самий фіксований маршрут для заданої пари вихідного пункту призначення (проблема з фіксованою маршрутизацією полягає в тому, що вона не в змозі впоратися з ситуацією несправності, коли один або більше каналів у мережі виходить з ладу);

- фіксована альтернативна маршрутизація: цей підхід передбачає, що кожен вузол у мережі підтримує таблицю маршрутизації, яка містить упорядкований список кількох фіксованих маршрутів до кожного вузла призначення;

- адаптивна маршрутизація: в адаптивній маршрутизації маршрут від джерела до вузла призначення вибирається динамічно залежно від стану мережі.

3.6.3 Алгоритми призначення довжини хвилі

Призначення довжини хвилі є унікальною функцією мереж з маршрутизацією за довжиною хвилі, яка відрізняє їх від звичайних мереж. На основі порядку пошуку довжин хвиль методи призначення довжини хвилі класифікуються на найбільш використовуваний, найменш використовуваний, випадкове призначення та алгоритм перетворення довжини хвилі. Нижче наведено короткий опис алгоритмів призначення довжини хвилі:

- найбільш використовуваний: вибирає довжину хвилі, яка найчастіше використовується в мережі (мета цієї політики полягає в тому, щоб підтримувати більше довжин хвиль, доступних для з'єднань, що проходять по довгих маршрутах);

- найменш використовуваний: цей тип призначення довжини хвилі подібний до алгоритму, який найчастіше використовується, за винятком того, що призначається найменш використовувана довжина хвилі;

- перша підгонка: у цьому алгоритмі всі довжини хвиль пронумеровані та під час пошуку доступної довжини хвилі враховується менша довжина хвилі перед більшим числом, а потім вибирається перша доступна довжина хвилі (цей алгоритм є кращим через його невеликі накладні витрати та низьку обчислювальну складність, а метою цієї схеми розподілу є мінімізація фрагментації довжини хвилі);

- алгоритм випадкового призначення: у цьому методі визначається набір довжин хвиль, які можна використовувати для встановлення з'єднання;

- алгоритм перетворення довжини хвилі: будь-який шлях вхідного світла можна призначити будь-якій довжині хвилі на стороні виходу.

4 ПРОАКТИВНА СХЕМА ВІДНОВЛЕННЯ З ОБМЕЖЕННЯМ ЧАСУ ДЛЯ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

У цьому розділі ми представляємо захист загального шляху обміну проміжною сигналізацією (HSE-SPP) відновлення після збою в еластичній оптичній мережі. У запропонованій схемі HSE-SPP проміжний вузол обраний обміну сигналами на резервному маршруті. При збої будь-якого каналу мережі вузли джерела та призначення генерується резервний маршрут для налаштування повідомлень на заздалегідь призначений проміжний вузол на зарезервованому резервному маршруті.

У проміжному вузлі відбувається процес обміну сигналами, підтвердження генерується і надсилається відповідним кінцевим вузлом. Отже, час відновлення при застосуванні HSE-SPP стає дуже низьким. Моделювання виконується для таких параметрів мережі, як час відновлення (RT), ймовірність блокування смуги пропускання (BBP), коефіцієнт надання смуги пропускання (BPR) і коефіцієнт переповнення ресурсів, і перевіряється за допомогою існуючих стратегій.

4.1 Запропоновані та існуючі стратегії

Розглянемо існуючі та запропоновані стратегії. Крім того, також представлено детальний приклад відновлення з'єднання.

4.1.1 Захист спільного шляху (SPP)

У цій схемі (Shared path protection) робочий і захисний маршрут встановлюється під час налаштування підключення. Резервні маршрути поділяють частотні слоти мережевих каналів, якщо їх основні маршрути не перетинаються. Процес спільного використання резервного маршруту (FS)

через мережевий канал відомий як резервне мультиплексування. Використовуючи резервне мультиплексування, зменшується виділення зайвих мережевих ресурсів. Однак через резервне мультиплексування перехресне з'єднання на проміжних вузлах збільшує час відновлення з'єднання.

4.1.2 Захист виділеного шляху (DPP)

У DPP (Dedicated path protection) резервні та робочі маршрути виділяються під час налаштування з'єднання подібним чином, як і в SPP. У DPP резервні маршрути не мають спільних частотних слотів. Таким чином, резервний механізм мультиплексування не виникає, і це призводить до більшого призначення мережевих ресурсів для резервних маршрутів. Але на проміжних вузлах немає необхідності в перехресному з'єднанні для резервного маршруту. Таким чином, час відновлення нижчий, ніж SPP.

4.1.3 Захист спільного шляху сигналами на півшляху (ЗССП)

У HSE-SPP (Halfway signaling exchange shared path protection) на зарезервованому резервному маршруті вибирається проміжний вузол для прийому повідомлень про встановлення з'єднання, надісланих парою, джерелом та вузлом призначення після збою. Коли проміжний вузол отримує повідомлення встановлення з'єднання від обох кінцевих вузлів; він генерує підтвердження для вузлів джерела та призначення для подальшого зв'язку.

4.2 Приклад відновлення з'єднання в SPP, DPP і HSE-SPP

Розглянемо запит на з'єднання між вихідним вузлом А і вузлом призначення В. Основний маршрут – це А-В, а резервний маршрут – А-В-С. Під час збою каналу вихідний і кінцевий вузли виявляють збій за допомогою

сповіщень про збій. Після отримання повідомлення про помилку починається процес відновлення підключення. У процесі відновлення з'єднання джерело генерує запити на встановлення з'єднання через резервний маршрут і чекає на підтвердження. Процес запиту передачі даних на резервному маршруті відомий як механізм двосторонньої сигналізації.

4.2.1 Процес відновлення з'єднання з захистом спільного шляху (SPP)

На рисунку 4.1 показано час встановлення з'єднання в стратегії SPP. Вихідний вузол А генерує повідомлення встановлення з'єднання MPCS, тобто обробку повідомлень для встановлення з'єднання, а також перемикач крос-з'єднання (тобто Cx) для резервного маршруту.

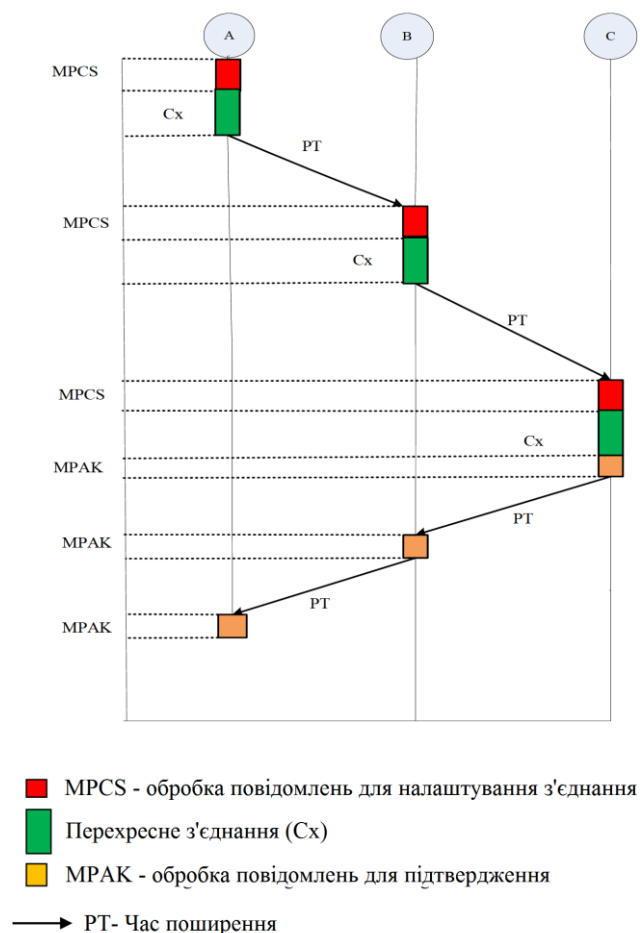


Рисунок 4.1 – Захист спільного шляху

І повідомлення встановлення з'єднання передається до вузла В. Вузол В отримує повідомлення встановлення з'єднання після часу поширення (РТ). РТ – це час поширення повідомлення від вузла А до вузла В.

Час поширення залежить від відстані між вузлами. Вузол В повторює той самий процес вузла А і пересилає до наступного вузла на маршруті. Вузол С є наступним пунктом призначення повідомлень.

Вузол С також займає той самий час для читання повідомлення та перехресного з'єднання, що й вузли А та В. Після прочитання повідомлення встановлення з'єднання Вузол С генерує підтвердження вихідному вузлу А через резервний маршрут. Обробка повідомлень (МРС/МРАК) і час розповсюдження повідомлення підтвердження такі самі, як і в повідомленнях встановлення з'єднання.

У рівнянні 3.1 наведено час відновлення з'єднання (RT) стратегії SPP для n вузлів і ℓ довжини резервного маршруту.

$$RTSPP = D_r + 2 \times n \times (MPCS + MPAK) + n \times C_x + 2 \times \ell \times RT. \quad (4.1)$$

4.2.2 Процес відновлення підключення за допомогою захисту виділеного шляху (DPP)

У стратегії DPP спільне використання резервних ресурсів заборонено, тому комутатори у вузлах резервного маршруту вже перехресно з'єднані. Як результат, для відновлення з'єднання не враховується витрата часу на перехресне з'єднання комутаторів. На рисунку 4.2 показано процес відновлення з'єднання в стратегії DPP. На рисунку показано, що час перехресного з'єднання для надсилання повідомлень встановлення з'єднання не враховується. Рівняння 4.2 – це процес відновлення з'єднання для n вузлів і ℓ довжини резервного маршруту.

$$RTDPP = D_r + 2 \times n \times (MPCS + MPAK) + 2 \times \ell \times RT \quad (4.2)$$

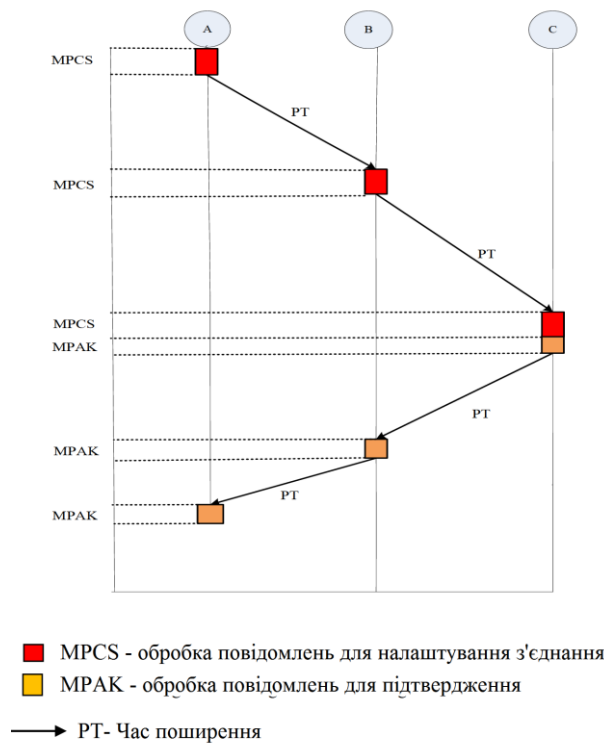


Рисунок 4.2 – DPP – захист виділеного шляху

4.2.3 Процес відновлення з'єднання захисту спільного шляху з обміном сигналами на проміжному вузлі (HSE-SPP)

На рисунку 4.3 показано процес відновлення з'єднання захисту спільного шляху обміну сигналами з проміжним вузлом. У цьому процесі спочатку вибирається проміжний вузол на резервному шляху як проміжний вузол, де здійснюватиметься обмін сигналами.

Для резервного маршруту А-В-С вузол В призначається як резервний маршрут, як показано на рисунку 4.3. У HSE-SPP як вихідний, так і кінцевий вузли генерують повідомлення про встановлення з'єднання одночасно після виникнення збою. У HSE-SPP мережеві ресурси розподіляються резервними маршрутами, тому враховується час перехресного з'єднання на вузлах. Після отримання повідомлень про встановлення з'єднання від обох кінцевих вузлів, вузол В генерує підтвердження для вузлів джерела та призначення. Після отримання підтвердження процес встановлення з'єднання завершується.

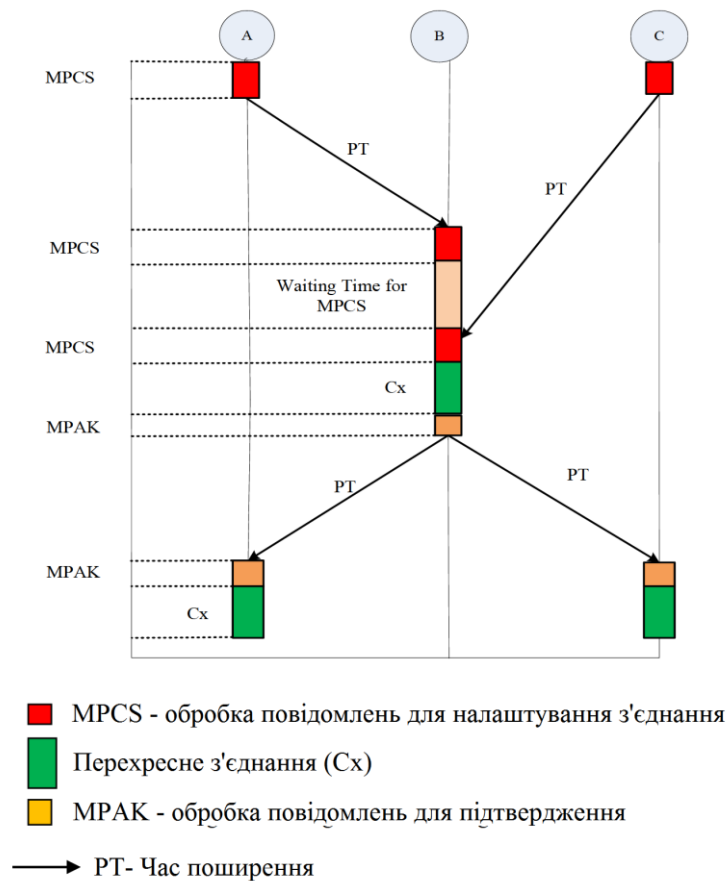


Рисунок 4.3 –Захист спільного шляху обміном сигналами на півшляху

Розглянемо вузли $ns-i/nd-i$ на резервних маршрутах між джерелом/одержувачем і проміжними вузлами, $ls-i/ld-i$ – довжина резервного маршруту від джерела/одержувача до проміжного вузла. Час відновлення з'єднання можна розділити на дві фази: час повідомлення про встановлення з'єднання (TCS) і час підтвердження (TACK).

$$RTHSE-SPP = Df + TCS + TACK \quad (4.3)$$

TCS і TACK наведені в рівняннях 4.4 і 4.5 нижче. Час повідомлення про встановлення з'єднання – це час, коли обидва повідомлення про встановлення з'єднання досягли проміжного вузла. Час повідомлення про встановлення з'єднання – це час, коли повідомлення про встановлення з'єднання досягнуло проміжного вузла.

Іншими словами, час установки пізніше повідомлення, що прийшло, вважається часом установки з'єднання. Нехай $T_{setup,s-i}$ та $T_{setup,d-i}$ - час встановлення з'єднання вихідного вузла з проміжним вузлом i вузла призначення з проміжним вузлом відповідно.

$$T_{setup,s-i} = n_{s-i} \times (MPCS + C_x) + \ell_{s-i} \times PT, \quad (4.4)$$

$$T_{setup,d-i} = n_{d-i} \times (MPCS + C_x) + \ell_{d-i} \times PT, \quad (4.5)$$

$$TCS = \text{Max} \{ T_{setup,s-i}, T_{setup,d-i} \}. \quad (4.6)$$

Нехай $T_{ack,s-i}$ та $T_{ack,d-i}$ є часом підтвердження від проміжного вузла до вузла джерела та проміжного вузла до вузла призначення відповідно.

$$T_{ack,s-i} = n_{s-i} \times MPAK + \ell_{s-i} \times PT, \quad (4.7)$$

$$T_{ack,d-i} = n_{d-i} \times MPAK + \ell_{d-i} \times PT, \quad (4.8)$$

$$TACK = \text{Max} \{ T_{ack,s-i}, T_{ack,d-i} \}. \quad (4.9)$$

Таблиця 4.1 – Середнє значення параметрів мережі для різних стратегій виживання

Network	ARPANET			COST239		
Parameters						
	DPP	SPP	HSE-SPP	DPP	SPP	HSE-SPP
Час відновлення (мс)	13.20	22.19	13.54	4.23	11.81	8.33
BBP	0.5626	0.2216	0.1870	0.4786	0.0873	0.0464
BPR	6.3072	3.2316	3.0255	3.5090	1.6697	1.6453
RO	3.7520	0.7028	0.5596	2.0418	0.2799	0.2633

Лістинг 4.1 – Псевдокод алгоритму для запропонованого обміну проміжними сигналами – захисту спільного шляху

Мережа $G(N, L, F)$, з N кількістю вузлів, L зв'язків і кожна лінія з частотними слотами F .

N_r : Кількість запитів на підключення

$R(s, d, J)$: номер запиту на з'єднання з джерелом (s), вузол призначення (d) і частотні слоти запиту (f)

$P_{s,d}^j$: Первинний шлях світла від джерела (s) до вузла призначення (d), для запиту на підключення R_j .

$B_{s,i}^k$: Резервний шлях світла від джерела (s) до проміжного вузла (i), для запиту на підключення R_k .

$B_{d,i}^k$: Резервний світловий шлях від пункту призначення до проміжного вузла (i), для запиту на підключення R_k

S_p : Призначення спектру для основного маршруту

S_b : Призначення спектру для резервного маршруту

Для основного маршруту

1: Запит на з'єднання прийнято «-0, Прийнятна смуга пропускання для маршруту

2: Запит на з'єднання прийнято «-0

3: For $j=1$ to N_r do

4: Пошук основного маршруту $P_{s,d}^j$ для R_j з S_p

5: If $P_{s,d}^j$ доступний then

6: Прийнята пропускна здатність «- Прийнята пропускна здатність + f_j

7: Призначити FS основним маршрутом

8: Запит на з'єднання прийнято «- Запит на з'єднання прийнято +1

9: end if

10: end for

Для резервного маршруту

11: Пропускна здатність відновлена «-0

12: Помилка пропускної здатності «-0, пропускна здатність для маршруту

13: For $j=1$ to L do

14: N_rFR^j кількість невдалих запитів на з'єднання, коли j^{th} канал розглядається

15: For $k \leftarrow N_rFR^j$ do

16: Помилка пропускної здатності «- Помилка пропускної здатності + f_k

17: Пошук резервного маршруту $B_{s,i}^k$ and $B_{d,i}^k$ для R_k з S_b

18: If $B_{s,i}^k$ and $B_{d,i}^k$ доступні then

19: Пропускна здатність відновлена «- Пропускна здатність відновлена + f_k

20: end if

21: end for

22: end for

4.5 Модель системи

У цьому розділі представлено визначення та позначення.

Розглянемо N вузлів, L зв'язок і F частотних слотів у мережі. R – набір запитів на встановлення з'єднання. P і B – набори основного та резервного маршрутів для запитів на підключення. Введемо такі позначення:

n – вузол мережі $\forall n \in N$;

ℓ – мережевий канал $\forall \ell \in L$;

f – частотний слот $\forall f \in F$;

r – запит на підключення, $\forall r \in R$;

p – основний маршрут, $\forall p \in P$;

b – резервний маршрут $\forall b \in B$;

B – резервний маршрут;

ℓ^f – частотний слот каналу ℓ ;

ℓ_p^f – частотний слот каналу ℓ призначений основному маршруту;

ℓ_b^f – частотний слот каналу ℓ , призначений b резервному маршруту;

RT_r – час відновлення запиту r , $\forall r \in R$;

RTC – обмеження часу відновлення.

Кількість частотних слотів на лінії зв'язку завжди менша або дорівнює максимальній FS , доступній на лінії зв'язку.

$$\sum_{\forall f \in F} \ell^f \leq F, \forall \ell \in L. \quad (4.10)$$

З метою безперервності маршруту повинен бути призначений один і той самий частотний інтервал кожного каналу.

Для основного маршруту:

$$l_{i_p}^f - l_{j_p}^f = 0, \forall i \neq j, \forall f \in F, \forall p \in P, \forall \ell \in L. \quad (4.11)$$

Для резервного маршруту:

$$l_{i_b}^f - l_{j_b}^f = 0, \forall i \neq j, \forall f \in F, \forall b \in B, \forall l \in L. \quad (4.12)$$

У суміжності мають бути призначені безперервні частотні слоти, тому різниця в індексації першого та останнього частотних слотів зв'язку завжди менша, ніж одна із затребуваних номерів частотних слотів. Розглянемо FD як кількість попиту на частотний інтервал. Для основного маршруту:

$$l_{i_b}^f - l_{j_b}^f = FD - 1, \forall i \neq j, \forall f \in F, \forall p \in P, \forall l \in L. \quad (4.13)$$

Для резервного маршруту:

$$l_{i_b}^f - l_{j_b}^f = FD - 1, \forall i \neq j, \forall f \in F, \forall b \in B, \forall l \in L. \quad (4.14)$$

Обмеження часу відновлення - це максимальний час для відновлення з'єднання після збою.

$$RT_r \leq RTC. \quad (4.15)$$

4.6 Обговорення параметрів мережі

Моделювання проводилося на версії MATLAB 2015 з операційною системою Windows 10, процесором Intel Core i5 1,80 ГГц і 8 ГБ оперативної пам'яті. Запити на з'єднання генеруються довільним чином шляхом розгляду двох топологій, тобто топології ARPANET і COST239, що мають 20 вузлів і 32 канали зв'язку та 11 вузлів і 26 каналів зв'язку, показаних на рисунках 4.4 та 4.5 відповідно.

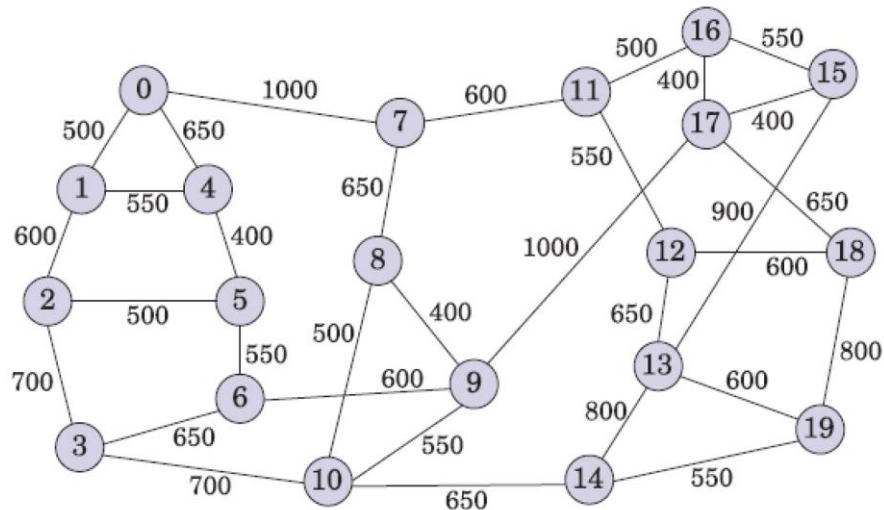


Рисунок 4.4 – ARPANET (20 вузлів і 32 канали)

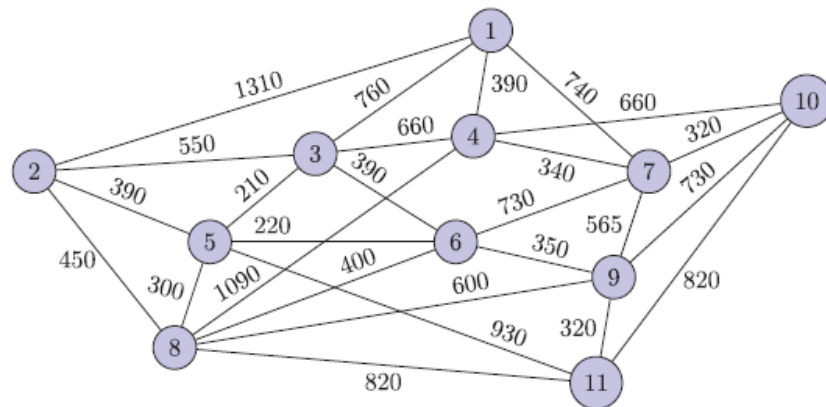


Рисунок 4.5 – Cost 239 (11 вузлів і 26 каналів)

Запити на з'єднання генеруються випадковим чином із різномірними частотними слотами від 1 до 8. Усі стратегії виживання є проактивними, коли шлях захисту визначається заздалегідь під час встановлення з'єднання. Крім того, затребуваному запиту призначається резервний маршрут на основі шляху. На основі шляху резервний маршрут не містить ні проміжного вузла, ні посилок основного маршруту.

Як основний, так і захисний маршрути повинні підтримувати безперервність спектру та обмеження суміжності. Крім того, підключення приймається лише тоді, коли резервний маршрут задовольняє обмеженню

відновлення з'єднання. Для маршруту К (=3) використовується найкоротший маршрут. Ефективність усіх трьох стратегій оцінюється за чотирма мережевими параметрами, наведеними нижче.

4.7 Результати моделювання

Час відновлення з'єднання – це час між моментами початку процесу відновлення з'єднання та отриманням підтвердження. Після виникнення збою необхідно якомога швидше відновити зв'язок. Тому для швидкого встановлення з'єднання час відновлення з'єднання має бути коротким. Щоб досягти швидкого відновлення з'єднання, було введено обмеження часу відновлення.

На рисунку 4.6 та 4.7 обмеження часу відновлення (RTC) становлять 45 і 21 мс для топологій ARPANET і COST239 відповідно.

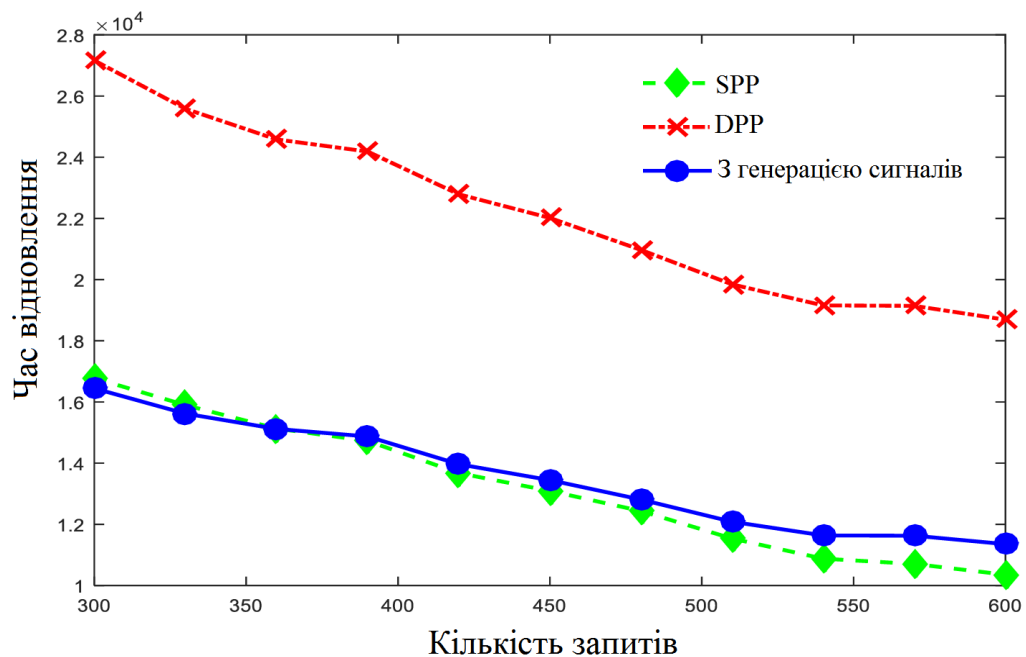


Рисунок 4.6 – Час відновлення в мікросекундах в залежності від кількості запитів для ARPANET

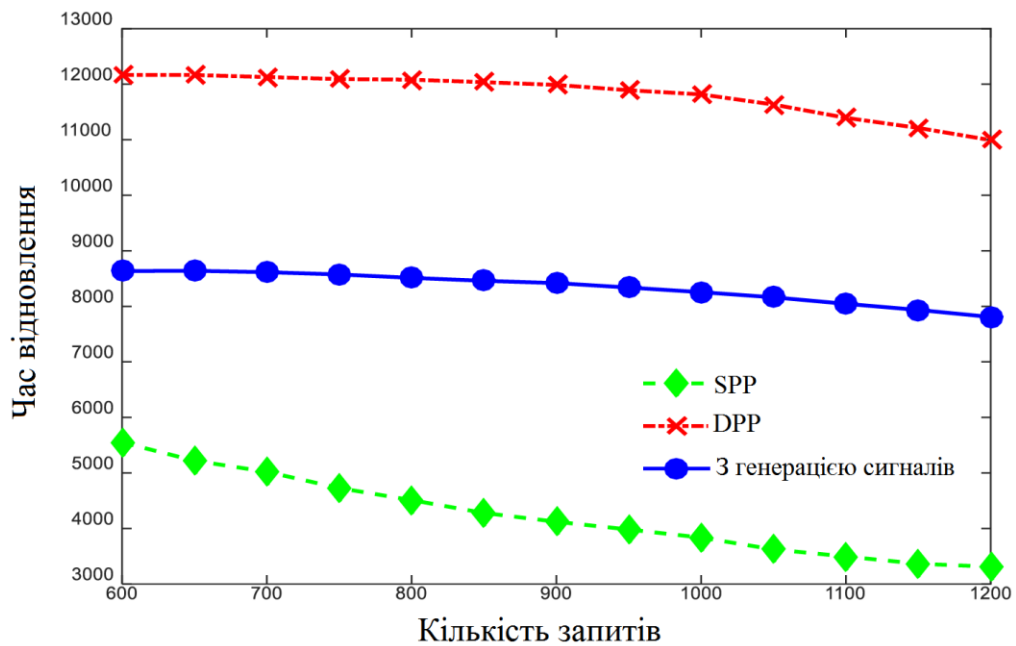


Рисунок 4.7 – Час відновлення в мікросекундах в залежності від кількості запитів для COST 239

На рисунку 4.6 та 4.7 показано час відновлення з'єднання, коли кількість запитів на з'єднання збільшується. У топології ARPANET час відновлення майже дорівнює DPP, але значно нижчий, ніж SPP. А у випадку COST239 час відновлення знаходиться між стратегіями DPP і SPP. Оскільки в мережі ARPANET резервні маршрути довші, тому продуктивність методу з проміжною сигналізацією порівнянна з DPP. Отже, метод з проміжною сигналізацією працює краще, коли резервні маршрути довші.

Імовірність блокування пропускної здатності (ВВР) є одним із мережевих параметрів для оцінки ефективності існуючих і запропонованих стратегій. ВВР визначається як відношення загальної кількості відхилених запитів до загальної кількості затребуваних з'єднань.

Запит на підключення відхиляється коли основний і резервний маршрути недоступні. ВВР має бути низьким відповідно до заданих мережевих обмежень. На рисунках 4.8 та 4.9 представлено залежність ймовірності блокування пропускної здатності (ВВР) стратегії відновлення від кількості запитів на з'єднання для топологій ARPANET і COST239.

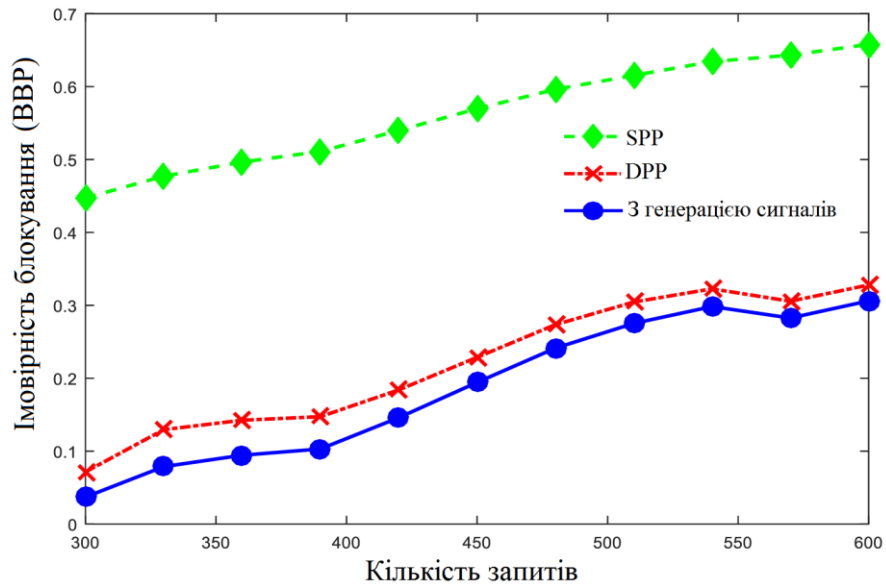


Рисунок 4.8 – ВВР в залежності від кількості запитів для ARPANET

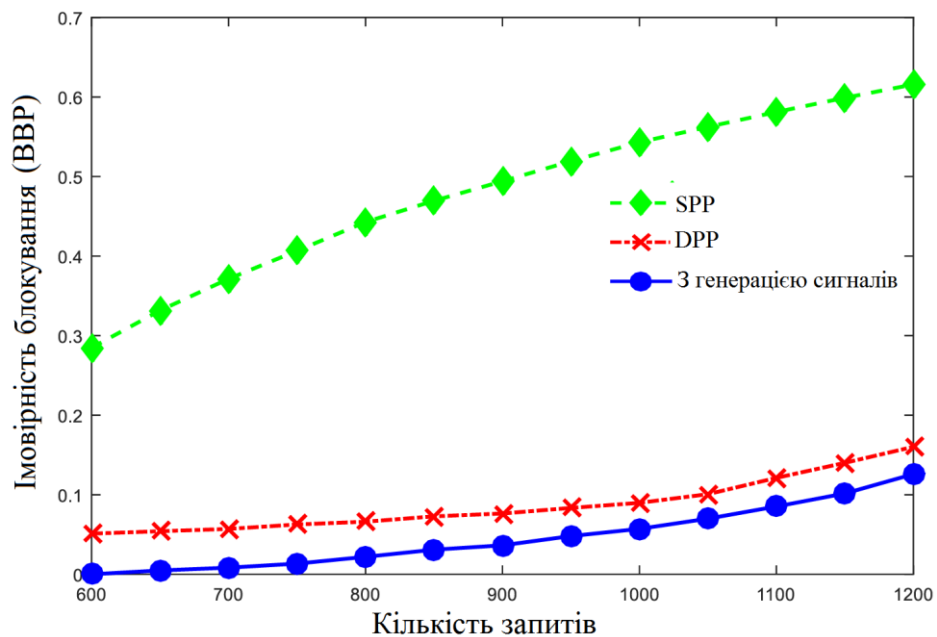


Рисунок 4.9 – Показує ВВР в залежності від кількості запитів для COST 239

Коли кількість запитів на з'єднання мала, мережеві ресурси достатньо великі для встановлення запитів на з'єднання, що призводить до низького ВВР. Зі збільшенням кількості запитів на підключення ВВР також збільшується через брак ресурсів мережі. Серед усіх трьох стратегій

запропонована стратегія захисту спільного шляху обміну сигналами на півшляху показала кращі результати та має нижчу ймовірність блокування пропускної здатності порівняно із захистом загального шляху (SPP) і захистом виділеного шляху (DPP).

Хоча запропонований метод і SPP використовують резервне мультиплексування для спільного використання ресурсів, але в SPP з'єднання відхиляються через обмеження відновлення з'єднання.

З іншого боку, використання мережевих ресурсів є неефективним у DPP через більшу надлишковість ресурсів резервного копіювання, що призводить до найвищого ВВР.

Щоб оцінити середню кількість призначень резервних маршрутів (FS) для встановлення запитів на частотний слот, було обчислено Коефіцієнт забезпечення пропускної здатності (BPR). BPR визначається як відношення загальної кількості FS, що використовуються, до загальної FS в мережі. У запропонованого методу і SPP спільне використання ресурсів резервних маршрутів збільшується із запитами на підключення, таким чином BPR зменшується, як зазначено на рисунках 4.10 та 4.11.

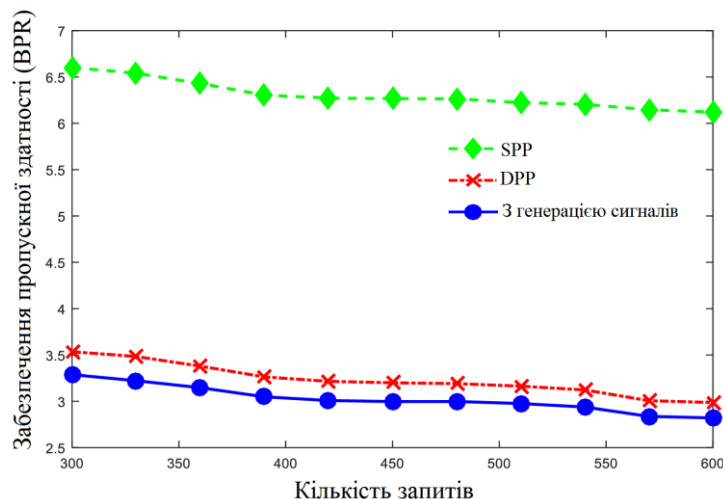


Рисунок 4.10 – Коефіцієнт забезпечення пропускної здатності (BPR) в залежності від кількості запитів для ARPANET

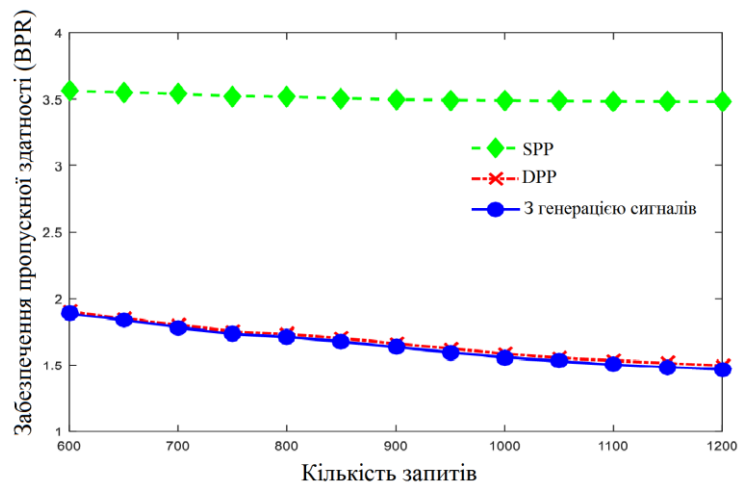


Рисунок 4.11 – Коефіцієнт забезпечення пропускної здатності (BPR) в залежності від кількості запитів для COST239

Для DPP із великою кількістю запитів на підключення приймаються лише найкоротші маршрути, оскільки ймовірність наявності ресурсів, доступних на довших маршрутах, стає дуже низькою. В результаті знижується BPR. Коефіцієнт надмірного використання ресурсів показує скільки резервних FS потрібно для кожного приймального частотного слота.

Воно визначається як відношення загальної кількості FS, що використовуються резервним маршрутом до загальної кількості прийнятих FS.

У запропонованій стратегії та SPP коефіцієнт переналаштування низький через спільне використання резервних ресурсів, тоді як у DPP переналаштування ресурсів високе.

На рисунках 4.12 та 4.13 показано, що запропонована стратегія має низький коефіцієнт перебудови порівняно з SPP і DPP для топологій ARPANET і COST239.

Середній коефіцієнт надмірного використання ресурсів (BROR) для топології ARPANET для запропонованої стратегії, SPP і DPP становить 0,5596, 0,7028 і 3,7520, а для COST 239 становить 0,2633, 0,2799 і 2,0418 відповідно.

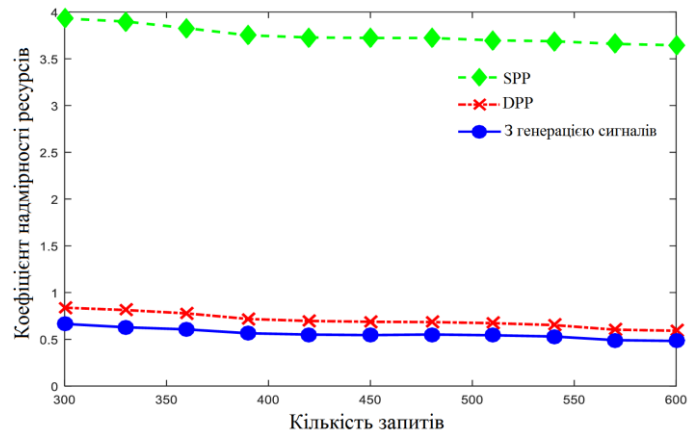


Рисунок 4.12 – Коефіцієнт надмірного використання ресурсів в залежності від кількості запитів для ARPANET

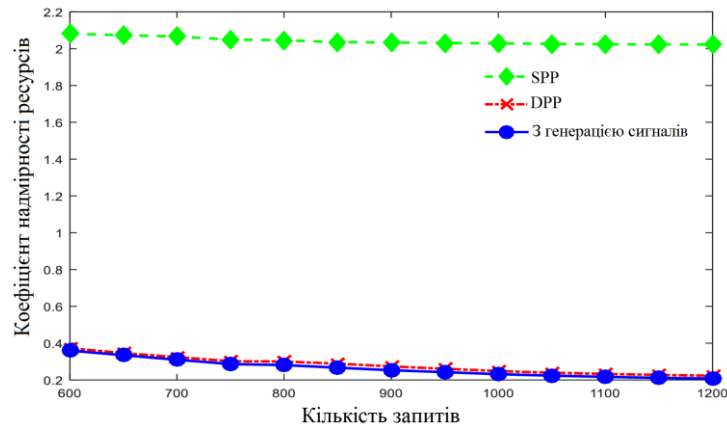


Рисунок 4.13 – Коефіцієнт надмірного використання ресурсів в залежності від кількості запитів для COST239

Такі параметри мережі, як час відновлення, ВВР, ВРР і коефіцієнт перебудови ресурсів, оцінюються для живучості оптичної мережі. Змодельовані результати кращі, ніж існуючі схеми SPP і DPP.

5 РЕСУРСНОЕФЕКТИВНА СХЕМА ВІДНОВЛЕННЯ

Розглянемо SPP і DPP, а також ефективну схему відновлення оптичної мережі після збою.

5.1 Використані позначення

В даному методі збій зв'язку виявляє сусідній вузол оптичної мережі. Різні параметри, які використовуються для часу перемикання захисту, такі як час обробки повідомлення, оптичне з'єднання та затримка розповсюдження в мережі тощо, наведені нижче:

- час обробки повідомлення на вузлі, M_t становить 10 мкс;
- затримка розповсюдження сигналу d_p кожного сигналу на лінії становить 400 мкс, що відповідає довжині 80 км;
- оптичні перехресні з'єднання, C_o не має фіксованих значень і становить 10 нс, 10 мс, 10 с і 500 с;
- F_t – час виявлення несправності, становить приблизно 10 мкс;
- кількість переходів l_h , до вузла, суміжний із вихідним і кінцевим вузлом, до якого відбулася помилка зв'язку;
- кількість каналів l_b для резервного шляху від джерела до кінцевого вузла.

Нехай $G(V, E, F)$ представляє граф мережі (вузли, зв'язки та частотний слот) і різні позначення наступні:

- v – набір вузлів $\forall v \in V$;
- e – множина посилянь $\forall e \in E$;
- f – набір частотних слотів для кожного каналу;
- s – вихідний вузол;
- d – вузол призначення;
- r – запит на підключення $\square r \in R$, тобто $\{(s_1, d_1), (s_2, d_2), \dots, (s_i, d_i)\}$ де

$\forall (s,d) \in V, \forall s \neq d, \forall i \in V;$

- P_i – основний маршрут i -го запиту на з'єднання, де $\forall i \in R;$
- B_j – шлях резервного копіювання j -го запиту на підключення, де $\forall j \in R.$

5.2 Захист спільного шляху (SPP)

У цій схемі найближчий вузол несправного каналу виявляє збій каналу та надсилає повідомлення про збій на вихідний вузол і кінцевий вузол. Потім вузол-джерело відправляє повідомлення про встановлення з'єднання вузлу-отримувачу, а оптичні крос-комутатори організують всі вузли для захисту резервного шляху, при цьому на момент встановлення з'єднання резервний шлях резервується заздалегідь.

Оптичні перехресні з'єднання не налаштовані для спільного використання резервних довжин хвиль. Кінцевий вузол після отримання повідомлення про встановлення підключення надсилає повідомлення підтвердження вихідному вузлу. Загальний час для завершення налаштування підключення становить:

$$T_{SPP} = F_t + l_h \times d_p + (l_h + 1) \times M_t + (l_b + 1) \times C_o + 2 \times l_b \times d_p + 2 \times (l_b + 1) \times M_t. \quad (5.16)$$

5.3 Захист виділеного шляху (DPP)

У DPP вузол, суміжний із збійним каналом зв'язку, надсилає повідомлення про збій каналу зв'язку до вузла джерела та приймача.

Потім вихідний вузол відправляє повідомлення про встановлення з'єднання кінцевому вузлу резервним шляхом, який заздалегідь зарезервований в момент встановлення з'єднання, а також оптичні крос-комутації налаштовуються в момент встановлення з'єднання і не потрібні під час встановлення з'єднання.

Реакція DPP повільніша порівняно із запропонованою схемою. Загальний час перемикавання для DPP становить:

$$T_{DPP} = F_t + l_h \times d_p + (l_h + 1) \times M_t + 2 \times l_b \times d_p + 2 \times (l_b + 1) \times M_t. \quad (5.17)$$

5.4 Запропонована схема відновлення на основі шляху

У цій схемі найближчий вузол до збійного каналу надає сповіщення вихідному та кінцевому вузлу користувача, а потім негайно вузол-джерело встановлює резервний шлях до кінцевого вузла.

Час відновлення для запропонованої схеми становить:

$$RT_{PBRS} = F_t + l_h \times d_p + T_c + T_a. \quad (5.18)$$

RT_{PBRS} – час відновлення для запропонованої схеми відновлення на основі шляху (PBRS), а T_c і T_a – час встановлення з'єднання від джерела до пункту призначення та час підтвердження від пункту призначення до джерела.

Припускаємо, що n_{s-d} – вузли на резервному маршруті від джерела до пункту призначення, n_{d-s} – вузли від пункту призначення до джерела, l_{s-d} – довжина резервного маршруту від джерела до пункту призначення, а l_{d-s} – довжина підтвердження від вузла призначення до вихідного вузла. T_{s-d} і T_{d-s} – час встановлення з'єднання від джерела до пункту призначення та пункту призначення до джерела.

$$T_{s-d} = n_{s-d} \times (M_t \times C_o) + l_{s-d}, \quad (5.19)$$

$$T_{d-s} = n_{d-s} \times M_t + l_{d-s}. \quad (5.20)$$

$$T_c = T_{s-d}. \quad (5.21)$$

$$T_{a, d-s} = n_{d-s} \times M_t + I_{d-s}. \quad (5.22)$$

$$T_a = T_{a, d-s}. \quad (5.23)$$



Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритму відновлення на основі шляху для збою одного каналу

Лістинг 5.1 – Псевдокод алгоритму для схеми відновлення на основі шляху

```

//Для робочого маршруту
1: Запит на з'єднання прийнято $\leftarrow$ 0, Прийнятна пропускна здатність
маршруту
2: Запит на з'єднання прийнято $\leftarrow$ 0
3: For  $i=1$  to  $r$  do
4:   Пошук основного маршруту  $P_{s,d}^i$  для  $R_i$ , від  $S_p$ 
5:   If  $P_{s,d}^i$  доступний then
6:     Прийнятна пропускна здатність=Прийнятна пропускна
здатність+ $f_i$ 
7:     Призначити FS основним маршрутом
8:     Запит на з'єднання прийнято=Запит на з'єднання прийнято+1
//Для резервного маршруту
9:   Пропускна здатність відновлена $\leftarrow$ 0
10:  Обмеження пропускної здатності $\leftarrow$ 0, Пропускна здатність для
маршруту
11:  For  $r=1$  to  $Z$  do
12:    For  $j=1$  to  $rfR^i$  do
13:      Прийняти з'єднання та виділити ресурси для запиту на
підключення
14:      Пошук резервного маршруту  $B_{s,d}^j$  для  $r_j$  від  $S_b$ 
15:    end for
16:  end for
17:  else
18:    З'єднання відновлено=З'єднання відновлено+ $f_j$ 
19:  end if
20: end for

```

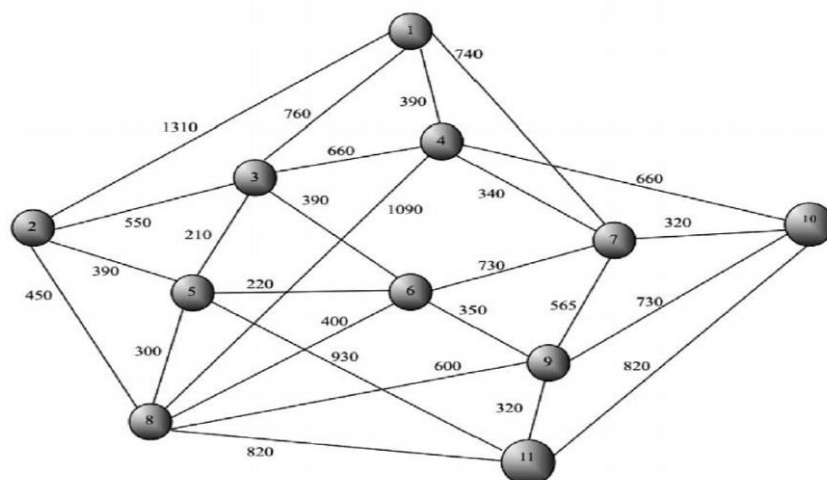


Рисунок 5.2 – Мережа COST 239

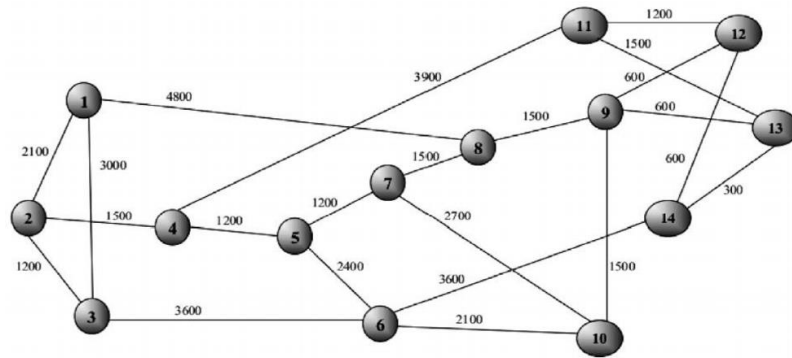


Рисунок 5.3 – Мережа NSFNET

5.5 Екперементальні результати

Оцінюються різні мережеві параметри в MATLAB 2015 на системі i5-7400 Intel core з 8 ГБ оперативної пам'яті за допомогою випадково згенерованих запитів джерела та призначення.

Імовірність блокування пропускної здатності (ВВР) визначається як відношення кількості відхилених запитів на пропускну здатність до загальної необхідної пропускної здатності. На рисунках 5.4 та 5.5 було помічено, що ВВР запропонованої стратегії є на багато меншим порівняно з SPP.

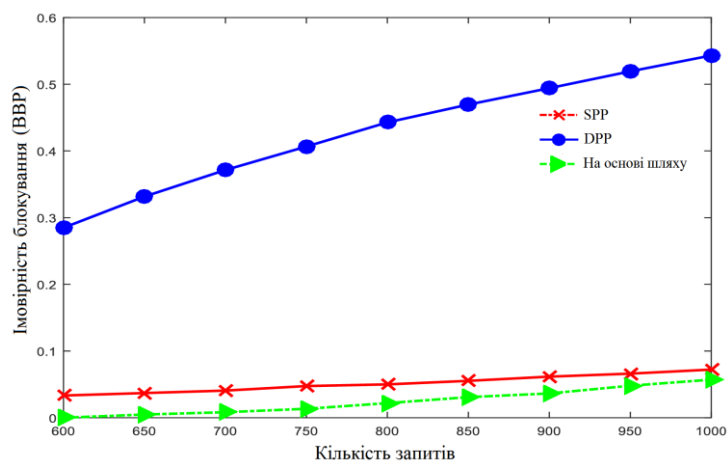


Рисунок 5.4 – Імовірність блокування пропускної здатності (ВВР) в залежності від кількості запитів для COST239

Отже, у запропонованій стратегії велика кількість прийнятих запитів s - d порівняно з SPP. Середнє ВВР для запропонованої стратегії, SPP і DPP становить 0,0245, 0,0515 і 0,4292 відповідно для COST239, а ВВР для мережі NSF становить 0,1038, 0,2066 і 0,2444 відповідно. Відхилення запиту на підключення в мережі NSF перевищує COST239.

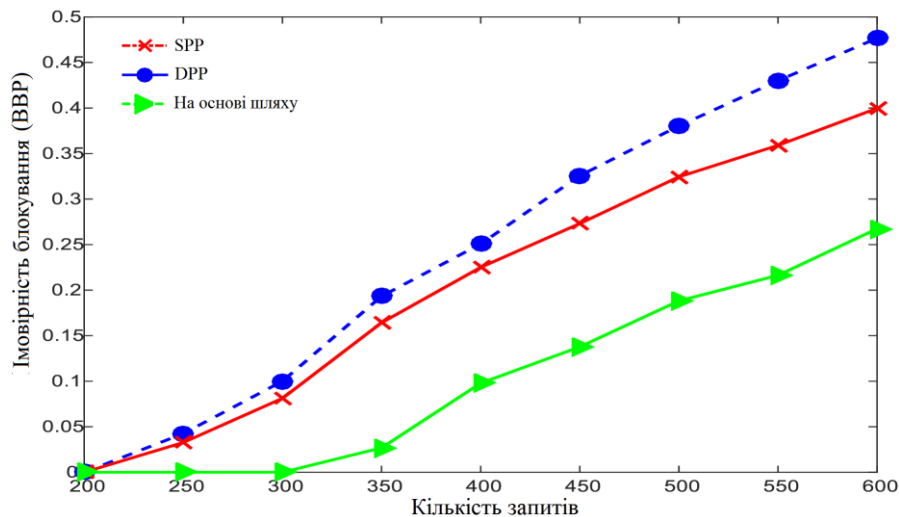


Рисунок 5.5 – Ймовірність блокування пропускної здатності (ВВР) в залежності від кількості запитів для NSFNET

Коефіцієнт використання ємності мережі (NCU) визначається як відношення загального використаного спектру до запиту на підключення, прийнятого в мережі.

Для COST 239 становить 45%, 38% і 37% для DPP, SPP і запропонованої схеми відповідно, тоді як для NSFNET становить 70%, 66% і 64% відповідно, як наведено на рисунках 5.6 та 5.7.

У використанні ємності мережі, якщо 70% спектру використовується для трафіку, уповільнення відбудеться в мережі; якщо це сповільнення збережеться протягом тривалого часу, у мережі виникне довга черга трафіку, що спричинить затримку трафіку. У COST239 трафік менший порівняно з NSFNET.

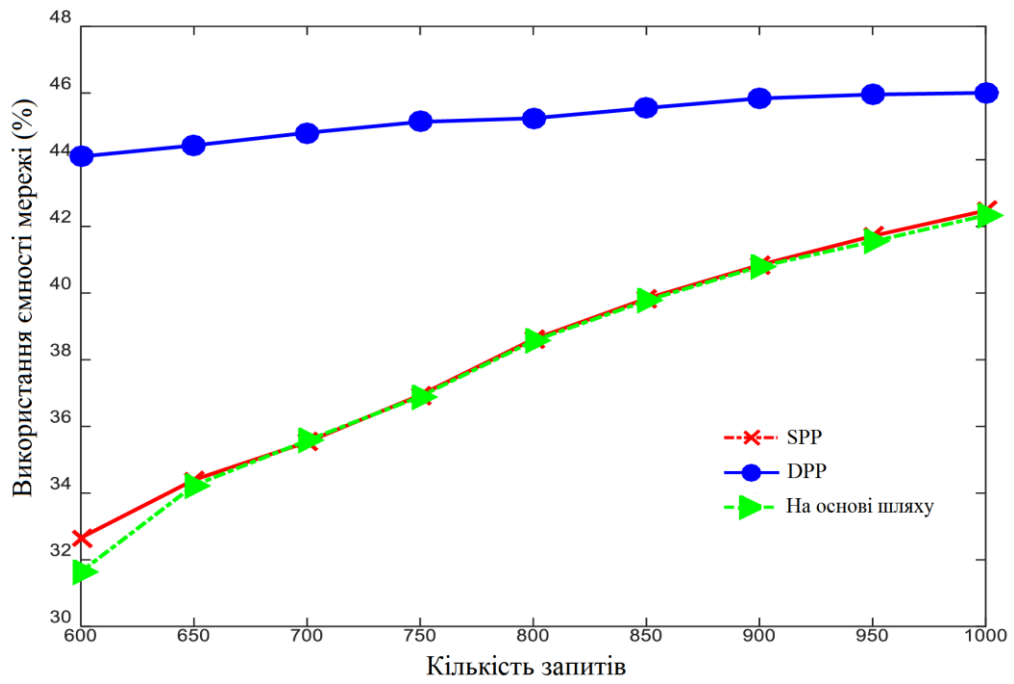


Рисунок 5.6 – Залежність використання ємності мережі від кількості запитів для COST 239

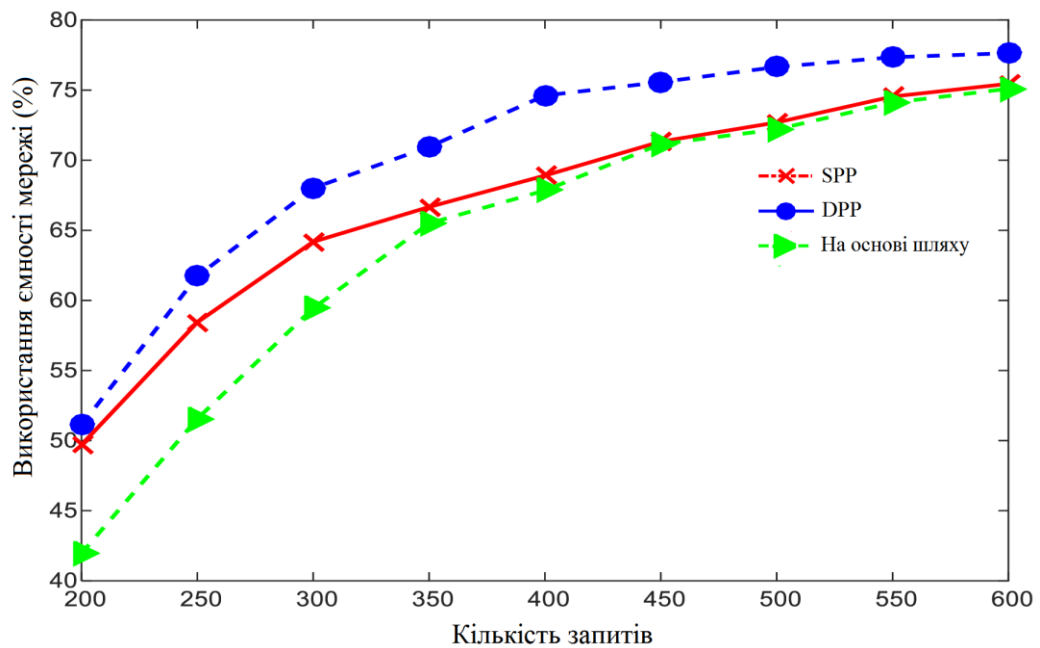


Рисунок 5.7 – Залежність використання ємності мережі від кількості запитів для NSFNET

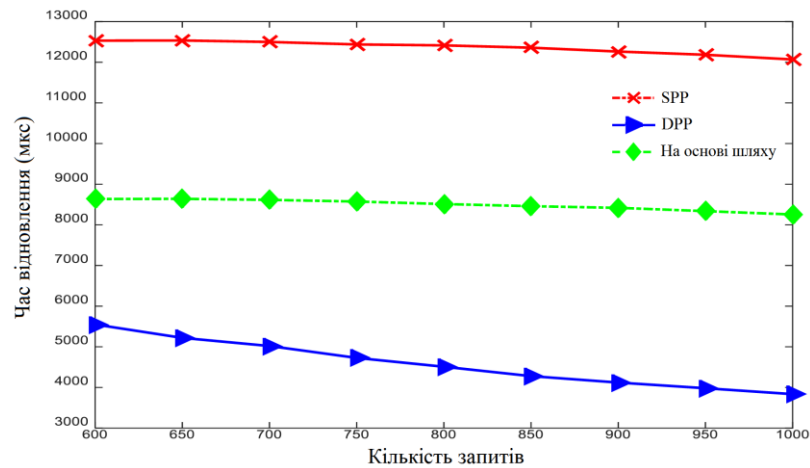


Рисунок 5.8 – Час відновлення в мікросекундах в залежності від кількості запитів для COST239

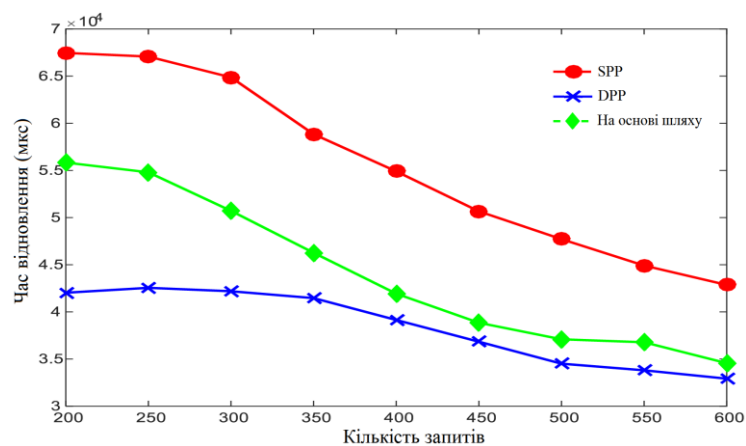


Рисунок 5.9 – Час відновлення в мікросекундах в залежності від кількості запитів для NSFNET

Час відновлення – це момент часу, з якого починається процес відновлення та повідомлення підтвердження, отримане від пункту призначення до джерела. Для швидкого відновлення потрібно ввести обмеження часу відновлення. Час відновлення в запропонованій схемі відновлення на основі шляху менший, ніж SPP, і вище, ніж DPP, для COST239, а також для мережі NSFNET він менший, ніж SPP і DPP, отже, кращий з точки зору використання ресурсів і часу відновлення.

ВИСНОВКИ

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та розробка методів підвищення живучості оптичних мереж для різних типів відмов в високошвидкісних оптичних мережах WDM з метою балансування оптимальності показників складності рішення та часу відновлення працездатності мережі.

В ході виконання кваліфікаційної роботи було запропоновано методи захисту загального шляху за допомогою обміну проміжним сигналом для відновлення після збою в каналах оптичної мережі та швидкого відновлення з'єднання на основі шляху у разі збою одного каналу.

Такий підхід забезпечує установку з'єднання від джерела до кінцевого вузла за допомогою проміжного вузла з підтвердженням та має кращу продуктивність з точки зору деяких параметрів мережі, таких як час відновлення, коефіцієнту блокування запитів та коефіцієнт надмірного використання ресурсів. Пропонована стратегія забезпечує не тільки швидке відновлення з'єднань, але й оптимально використовує мережеві ресурси.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. 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.
2. 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.
3. H. Zhang and O. Yang, "Finding protection cycles in dwdm networks," in *IEEE International Conference on Communication*, vol. 5, pp. 2756–2760, 2002. P. Tomsu, C. Schmutzer, "Next Generation Optical Networks", Prentice-Hall, Inc. 2002.
4. S. Ramaswami, B. Mukherjee, "Survivable WDM Mesh Networks, Part I- Protection", *Proceeding of IEEE INFOCOM'99*, pp. 744-751, March 1999.
5. Y. P. Aneja, S. Bandyopadhyay and A. Jaekel, "An efficient protection scheme for WDM Networks using dynamic lightpath allocation", *HPC-Asia*, December 2002.
6. C. G. Gruber, *Deployment of p-cycles in WDM Networks*. PhD thesis, Technische University Munchen, August, 2001.
7. 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.
8. Швецов К.О., Макаренко О.П., Янковський О.А. «Аналіз протоколів маршрутизації для мереж з високою пропускнуою здатністю», Тринадцята міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління». – Баку-Харків-Жиліна-2023. – С. 96.