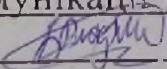


МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

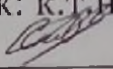
на тему:

«Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи TSM-23м
спеціальності 172 – Електронні
комунікації та радіотехніка

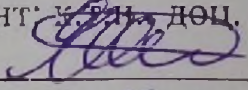
 Брашовецький В.Є.

Керівник: к.т.н., доц. каф. ІКСТ

 Стальченко О.В.

« 16 » 12 2024 р.

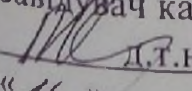
Опонент: к.т.н., доц. каф. ІРТС

 Осадчук Я.О.

« 16 » 12 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 » 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17- Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

"24" 09 2024 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Брашовецькому Володимиру Євгенійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах

керівник роботи Стальченко Олександр Володимирович, канд. техн. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "17" 09 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року

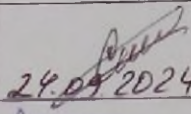
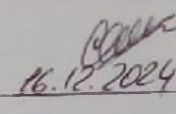
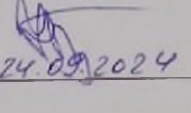
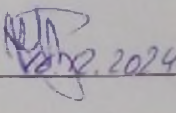
3. Вихідні дані до роботи: технологія спектрального мультиплексування – DWDM; крок мультиплексування – 0,8/0,4 нм; кількість каналів 80; швидкість передачі – 8 - 32 Тбіт/с; довжина секції мультиплексування – 80 км; тип волокна – одномодове стандартне за рекомендацією ITU-T G.652

4. Зміст текстової частини:

Вступ, Аналіз наукових публікацій досліджень в області резервування каналів WDM, Розробка нових варіантів схем резервування каналів WDM, моделювання нових схем резервування каналів WDM, Економічна частина, Висновок

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Типова схема організації мережі WDM; Типові схеми резервування оптичного маршруту; Схема резервування оптичних маршрутів (каналів) з використанням пасивних компонентів; Результати моделювання резервування оптичних каналів для першої версії; Результати спектральних значень оптичних каналів для другої схеми резервування; Результати спектральних значень оптичних каналів для третьої версії схеми резервування каналів WDM; Маршрути проходження основного та резервного тракта передачі даних першого клієнтського каналу.

6. Консультанти розділів роботи

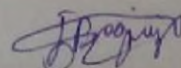
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Стальченко О.В., доцент кафедри ІКСТ	 24.09.2024	 16.12.2024
Економічна частина	Буреннікова Н.В. д.е.н., професор каф. ЕПВМ	 24.09.2024	 16.12.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

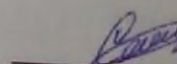
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	При
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	16.09.2024р.	
3.	Аналіз резервування каналів WDM	12.10.2024р.	
4.	Розробка структури резервування каналів	30.10.2024р.	
5.	Моделювання схем резервування каналів WDM	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент


(підпис)

Брашовецький В.Є.

Керівник роботи


(підпис)

Стальченко О.В.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ І ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ WDM.....	9
1.1 Технологія WDM.....	9
1.2 Резервування в мережах WDM.....	26
1.2 Висновки	39
2 РОЗРОБКА НОВИХ ВАРІАНТІВ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ WDM	41
2.1 Розробка схем резервування каналів WDM з використанням пасивних компонентів	41
2.2 Схеми резервування оптичних каналів на рівні птранспондерів.....	45
2.3 Резервування оптичних каналів WDM на оптичному рівні та рівні транспондера.....	47
2.4 Висновки	48
3 МОДЕЛЮВАННЯ НОВИХ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ WDM	49
3.1 Постановка задачі.....	49
3.2 Вибір програмного забезпечення для моделювання	50
3.3Розробка блок-схем резервування оптичних каналів WDM	54
3.4 Висновки	81
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	82
4.1 Оцінювання наукового ефекту	82
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	85
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	98
4.4 Висновок до розділу 4	100
ВИСНОВОК.....	101
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	104
Додаток А "Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах"	107
Додаток Б Протокол перевірки.....	114

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- AXX – Амплітудно-хвильова характеристика
- ВОЛЗ – Волоконно-оптична лінія зв'язку
- ВОСП – Волоконно-оптична система передачі
- ДОВ – Джерело оптичного випромінювання
- МСЕ-Т – Міжнародний союз електрозв'язку та телеграфії
- ОП – Оптичний підсилювач
- ОЕО – Оптоелектрооптичний
- РБВ – Розподілене Бреггове відбиття
- САПР – Система автоматизованого проектування
- ATM – Asynchronous Transport Module
- AWG (Arrayed Waveguide Grating) – Масивна хвилеводна решітка
- BER – Бітова помилка
- Ch – Канал
- CWDM – Широкосмугове множення довжин хвиль
- DWDM – Щільне множення довжин хвиль
- DP – Подвійна поляризація
- DP-16QAM – Подвійна поляризація - 16-квадратурна амплітудна модуляція
- DP-QPSK – Подвійна поляризація - квадратурний фазовий ключ
- EDFA – Підсилювач на ербієвому допованому волокні
- HDWDM – Високощільне множення довжин хвиль
- IMZ – Інтерферометр Маха-Цендера
- IP – Інтернет-протокол
- ITU-T – Міжнародний союз електрозв'язку - Телеграфія
- MEMS – Мікроелектромеханічні системи
- MPLS – Мультипротокольне маркування
- MUX – Мультиплексор
- NRZ – Без повернення в нуль

OADM – Оптичний додатково-вибірковий мультиплексор

OCS – Оптичний крос-перемикач

OMUX – Оптичний мультиплексор

OS – Оптичний перемикач

OSNR – Співвідношення сигнал/шум оптичне

PLC – Поляризаційний розподільник

REG – Регенератор

ROA – Рамановий оптичний підсилювач

ROADM – Перезавантажуваний оптичний додатково-вибірковий мультиплексор

Rx – Приймач

RZ – Повернення в нуль

SFP – Малий форм-фактор для підключення

STM-N – Синхронний транспортний модуль

SW – Перемикач

TDM – Множення за часом

TFF – Тонкоплівковий фільтр

TM – Термінальний мультиплексор

Tx – Передавач

VCSEL – Лазер на вертикальному поверхневому резонаторі

VOA – Змінний оптичний атенюатор

WB – Блокатор довжин хвиль

WDM – Множення за довжиною хвилі

WSS – Вибірковий оптичний перемикач довжин хвиль

4o mini

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний світ інфокомунікацій базується на транспортних технологіях мереж зв'язку, таких як WDM (Wavelength Division Multiplexing). Високі вимоги до надійності передачі даних та забезпечення якості сервісів вимагають вдосконалення схем резервування в мережах WDM, зокрема DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Актуальність теми визначається необхідністю вирішення проблем високої вартості обладнання, неефективного використання частотного ресурсу та підвищення надійності мереж шляхом розробки нових схем резервування.

Аналіз останніх досліджень.

Технологія WDM та аспекти організації резервування висвітлені у роботах таких авторів, як Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar та інших. У цих джерелах розглядаються теоретичні аспекти організації резервування та практичні реалізації. Проте, існуючі схеми мають недоліки, що потребують додаткових досліджень і вдосконалення.

Мета і завдання роботи.

Метою даної кваліфікаційної роботи є розробка нових схем резервування оптичних каналів у мережах DWDM. Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

- вивчення технології WDM та її компонентів;
- аналіз існуючих схем резервування оптичних каналів і маршрутів у системах WDM;
- розробка нових схем резервування;
- моделювання розроблених схем у середовищі OptiSystem;
- оцінка практичної доцільності розроблених схем.

Об'єктом дослідження є транспортні мережі зв'язку, побудовані на технології WDM, зокрема DWDM.

Предметом дослідження є основні та резервні оптичні канали WDM.

Методи досліджень базуються на математичному моделюванні оптичних мереж у середовищі OptiSystem, аналізі існуючих схем резервування та розробці нових методів з використанням сучасних оптичних компонентів.

Новизна одержаних результатів:

а) вперше запропоновано нові схеми резервування оптичних каналів у системах DWDM;

б) розроблені схеми передбачають інтеграцію в існуюче обладнання без значних витрат.

Апробація результатів магістерської кваліфікаційної роботи.

Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на LIII науково-технічній конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету у 2024 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи.

Результати роботи опубліковані у 5 наукових публікаціях, зокрема у 2 статтях у фахових журналах, 2 збірниках матеріалів конференцій та одному патенті України на корисну модель.

1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ І ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ WDM

1.1 Технологія WDM

1.1.1 Основи технології спектрального мультиплексування WDM (Wavelength Division Multiplexing) полягають в організації передачі різних сервісів (TDM, ATM, IP, Ethernet) через окремі оптичні канали на різних довжинах хвиль в одному оптоволокну. Типова схема, що ілюструє роботу технології WDM, наведена на рисунку 1.1.

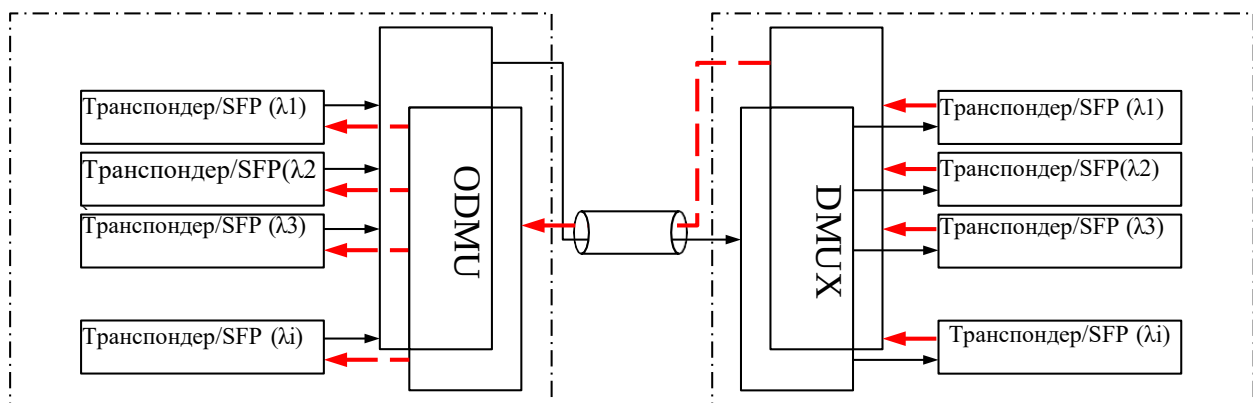


Рисунок 1.1 – Типова схема організації мережі WDM

Технологія WDM зазвичай використовується на магістральних транспортних мережах зв'язку. Для організації лінійного тракту в оптичних мережах WDM застосовується дуплексний двоволоконний варіант побудови мережі: одне волокно призначене для передачі цифрових каналів у напрямку "Захід – Схід" (позначається суцільною тонкою лінією), а друге — для передачі в напрямку "Схід – Захід" (позначено пунктиром).

Оптичні канали WDM можуть мультиплексуватися з різним кроком ($\Delta\lambda$). Залежно від кроку мультиплексування виділяють три технології:

- CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) – грубе спектральне мультиплексування;

- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – щільне спектральне мультиплексування;
- HDWDM (High-Density Wavelength Division Multiplexing) – високощільне спектральне мультиплексування.

У технології CWDM крок мультиплексування становить 20 нм (2500 ГГц), тоді як у технології DWDM цей показник — 0,8 нм (100 ГГц) або 0,4 нм (50 ГГц), а в HDWDM — 0,2 нм (25 ГГц) або 0,1 нм (12,5 ГГц). Мережі DWDM та HDWDM функціонують у третьому вікні прозорості оптоволокна, тоді як CWDM може працювати як у другому, так і в третьому вікні. Типовий спектральний план систем CWDM та DWDM представлений на рисунку 1.2.

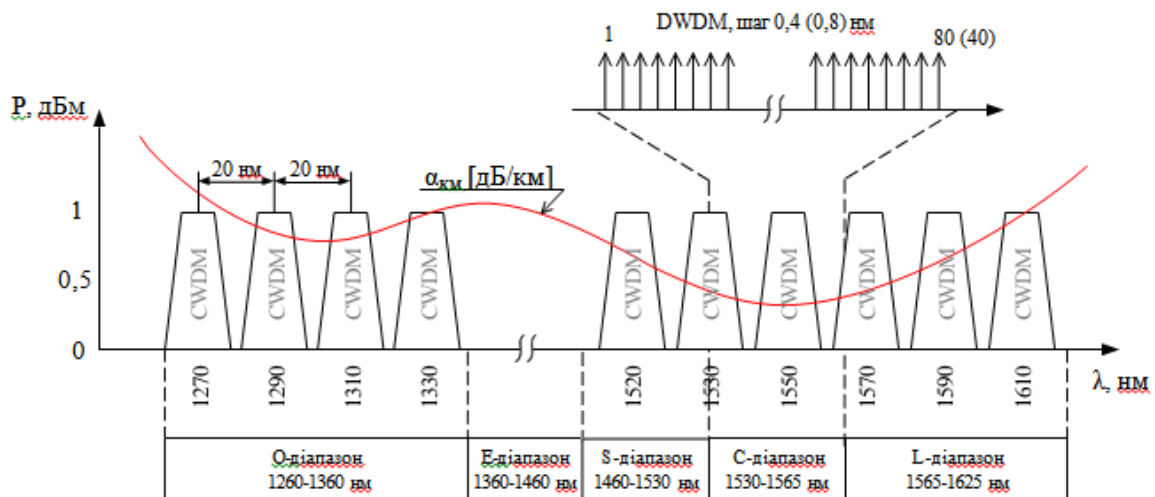


Рисунок 1.2 – Типовий спектральний план систем CWDM і DWDM

Кількість каналів у системі CWDM становить 18, у DWDM — 80, а в HDWDM — до 160. Швидкість передачі даних в одному оптичному каналі CWDM не перевищує 10 Гбіт/с, тоді як у системах DWDM і HDWDM може досягати до 400 Гбіт/с. Загальна пропускна здатність систем CWDM складає 180 Гбіт/с, у системах DWDM — від 8 до 32 Тбіт/с, а у системах HDWDM — більше ніж 32 Тбіт/с.

1.1.2 Компоненти системи WDM

1.1.2.1 Оптичний мультиплексор

Основним обладнанням для WDM є пасивний оптичний мультиплексор, який забезпечує мультиплексування (та демultipлексування) оптичних каналів з інтервалами 0,4 нм, 0,8 нм або 20 нм, залежно від типу технології WDM.

Оптичні мультиплексори (OMUX) виготовляються за двома основними технологіями:

- Технологія TFF (тонкоплівковий фільтр);
- Технологія AWG (гратка з хвилеводами).

Технологія TFF дослівно перекладається як "тонкоплівковий фільтр". Оптичний мультиплексор на основі TFF-фільтра є простою конструкцією з одним оптичним входним (або вихідним) портом і двома вихідними (або входними) оптичними портами. Між оптичними портами у скляній капсулі знаходиться тонкоплівковий фільтр, принцип дії якого заснований на явищі інтерференції. TFF-фільтр або пропускає певну довжину хвилі оптичного сигналу у прямому напрямку, або відбиває її у зворотному напрямку. Схема конструкції оптичного мультиплексора TFF та принцип його роботи наведені на рисунку 1.3 [3].

Оптичний мультиплексор, який може обробляти більше двох оптичних каналів, зазвичай представляє собою каскадне з'єднання TFF-фільтрів. Приклад схеми TFF-мультиплексора для восьми каналів показаний на рисунку 1.4.

Другою технологією, яка застосовується для виготовлення WDM-мультиплексорів, є технологія на основі масиву хвилеводів (AWG).

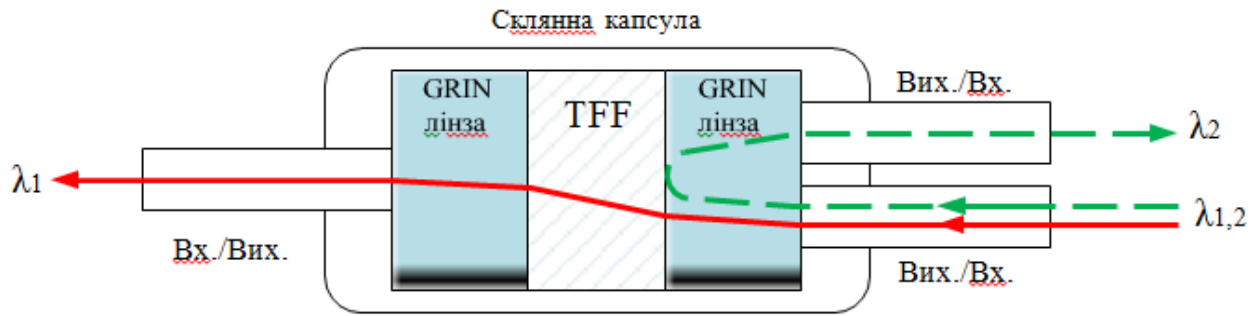


Рисунок 1.3 – Конструкція і принцип роботи TFF-мультиплексора

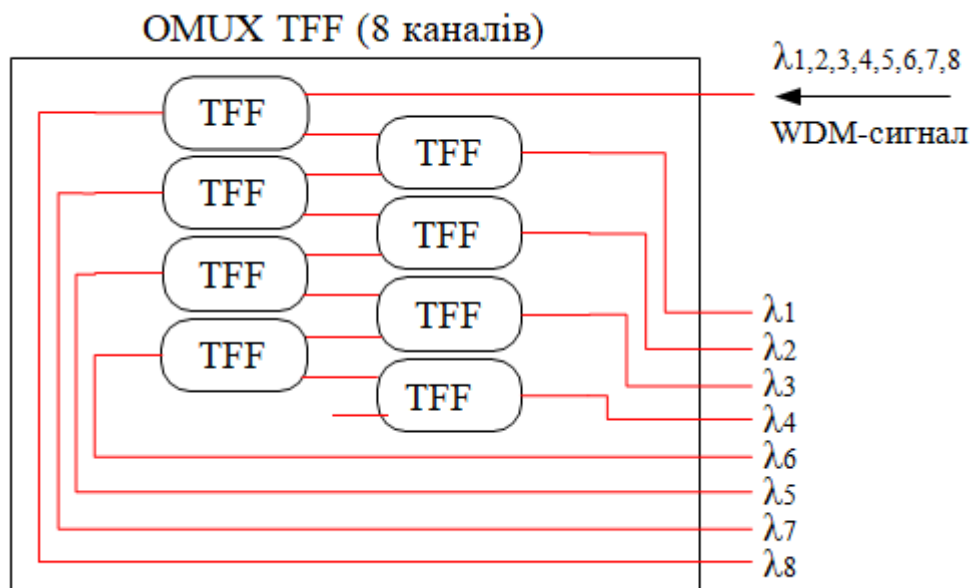


Рисунок 1.4 – Схема TFF-мультиплексора на 8 каналів

Принцип мультиплексування та демультиплексування в AWG-мультиплексорі також базується на явищі інтерференції. Структурна схема AWG-мультиплексора представлена на рисунку 1.5.

Основна відмінність між TFF-мультиплексором і AWG-мультиплексором полягає в тому, що кількість каналів, які можна мультиплексувати за допомогою TFF, не перевищує 20 через необхідність каскадування TFF-фільтрів.

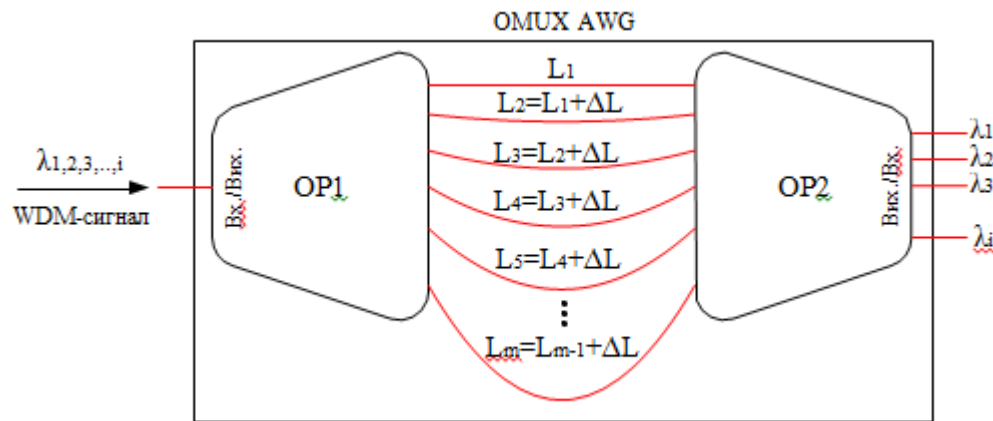


Рисунок 1.5 – Структурна схема AWG-мультиплексора

Справа в тому, що оптичний шлях для першого і останнього каналів різний. Довжина оптичного шляху для останнього каналу буде більшою, а отже, збільшаться і оптичні втрати. Як наслідок, на виході магістрального порту спостерігатиметься нерівномірна амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) загального WDM-сигналу, що в кінцевому підсумку може призвести до втрати оптичних каналів у лінійному тракті системи WDM.

В AWG-мультиплексорі втрати для всіх каналів є майже однаковими, проте спостерігається незначна різниця у втраті між каналами, яка не перевищує 1 дБ, тоді як у TFF-мультиплексорі ця різниця може перевищувати 1 дБ. На рисунку 1.6 наведена типова АЧХ загального сигналу на виході магістрального порту оптичного мультиплексора AWG і TFF [3].

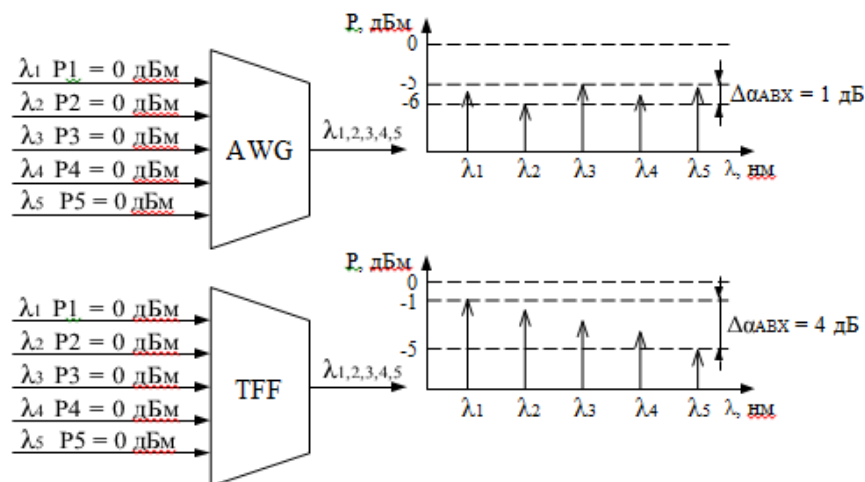


Рисунок 1.6 – Типова АВХ групового WDM-сигнала

Як правило, TFF-мультиплексори використовуються в мережах CWDM, тоді як AWG-мультиплексори — в мережах DWDM. Однак, для побудови мережі з 16 каналами можуть бути застосовані TFF-мультиплексори з еквалайзерами для вирівнювання амплітудно-частотних характеристик.

Використання AWG- і TFF-мультиплексорів дозволяє організувати мережі WDM топології «точка-точка», а самі мультиплексори називаються оптичними термінальними мультиплексорами (OMUX TM). Якщо необхідно здійснити введення або виведення оптичного каналу в проміжному вузлі, використовують оптичні мультиплексори введення-виведення (OADM).

Мультиплексори OADM поділяються на два типи:

- Неперебудовувані мультиплексори OADM з або без оптоелектрооптичного (OEO) перетворення;
- Перебудовувані (активні) мультиплексори OADM (ROADM).

Головним недоліком AWG- і TFF-мультиплексорів є те, що оптичні канали (довжини хвиль) фізично прив'язані до певного порту мультиплексора. Тобто, якщо необхідно переключити канал даних, що працює на довжині хвилі, наприклад, 1540,56 нм, на оптичний порт, призначений для мультиплексування каналу на довжині хвилі 1541,35 нм, це зробити не вдасться. Це пояснюється тим, що мультиплексори працюють на основі інтерференції, де параметри мультиплексора розраховані для фіксованої кількості портів та частотного плану.

Таким чином, OADM-мультиплексор дозволяє організувати статичне введення-виведення потрібного оптичного каналу. У перебудовуваному мультиплексорі ROADM можна виділити та ввести будь-який оптичний канал DWDM у проміжному вузлі згідно з частотним планом. При цьому вибір каналу здійснюється оператором дистанційно. Практика показує, що кількість вводимих-виводимих оптичних каналів у таких мультиплексорах не перевищує десяти.

Конструкція мультиплексорів OADM є досить простою та виготовляється за тим же принципом, що й термінальні мультиплексори OMUX WDM. Приклад OADM-мультиплексора представлено на рисунку 1.7.

Окрім пасивних OADM-мультиплексорів на основі TFF-фільтрів і AWG-мультиплексорів, також існують OADM-мультиплексори на основі оптичного циркулятора та решітки Брега (рисунк 1.8).

Відмінність між конструкціями OADM і ROADM полягає в тому, що в ROADM використовують активні керуючі елементи. Залежно від функціональності та принципу дії активних елементів, виділяють такі типи ROADM [1,4]:

- На основі хвильових блоаторів (WB) та перестроюваних оптичних атенюаторів (VOA);
- На основі мікроелектромеханічних систем (MEMS);
- На основі технології селекторного перемикання спектральних каналів (WSS).

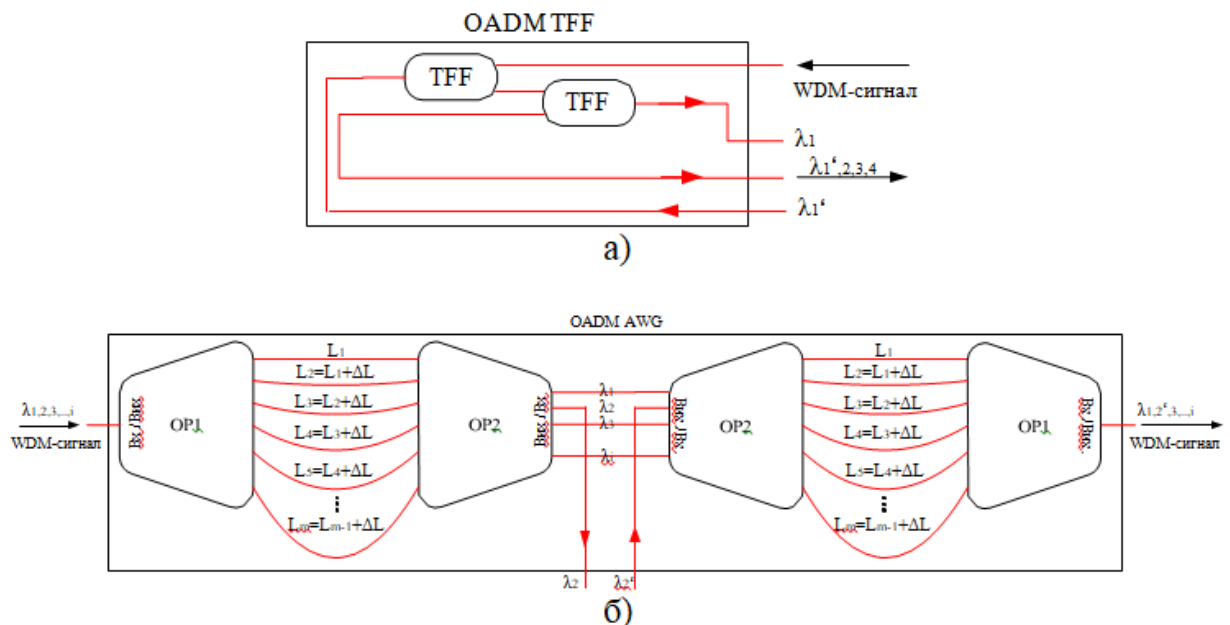


Рисунок 1.7 – Типова конструкція мультиплексора OADM на основі: а) TFF-фільтрів, б) AWF-мультиплексорів без OEO-перетворення

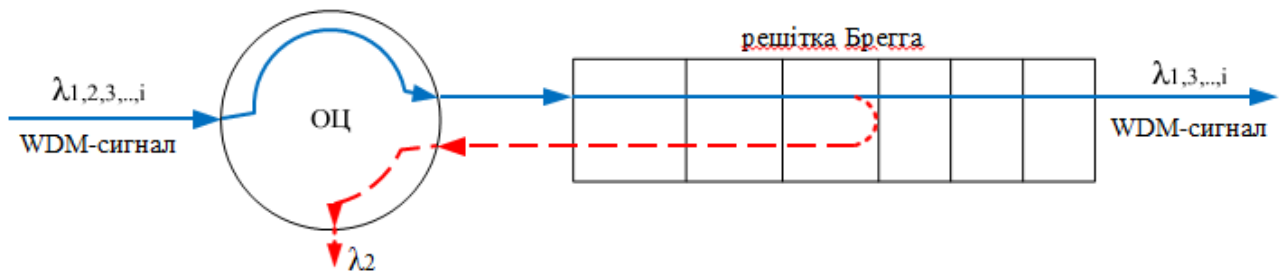


Рисунок 1.8 – Конструктивне виконання OADM на основі оптичного циркулятора та решітки Брега

Мультиплексори ROADM на основі WB і MEMS не знайшли широкого застосування для реалізації OADM, оскільки в WB ROADM для виділення або введення оптичного каналу потрібні додаткові проміжні операції. Водночас, MEMS ROADM, завдяки своїй конструкції, отримав широке застосування в оптичних крос-комутаторах.

Таким чином, на сьогодні основною технологією для введення та виведення оптичних каналів у ROADM є технологія селекторного перемикання спектральних каналів (WSS). Перемикачі WSS можуть бути реалізовані на основі рідких кристалів або іншого механізму, який виконує фотонну комутацію. Типова конструкція ROADM на основі WSS представлена на рисунку 1.9 [1,4].

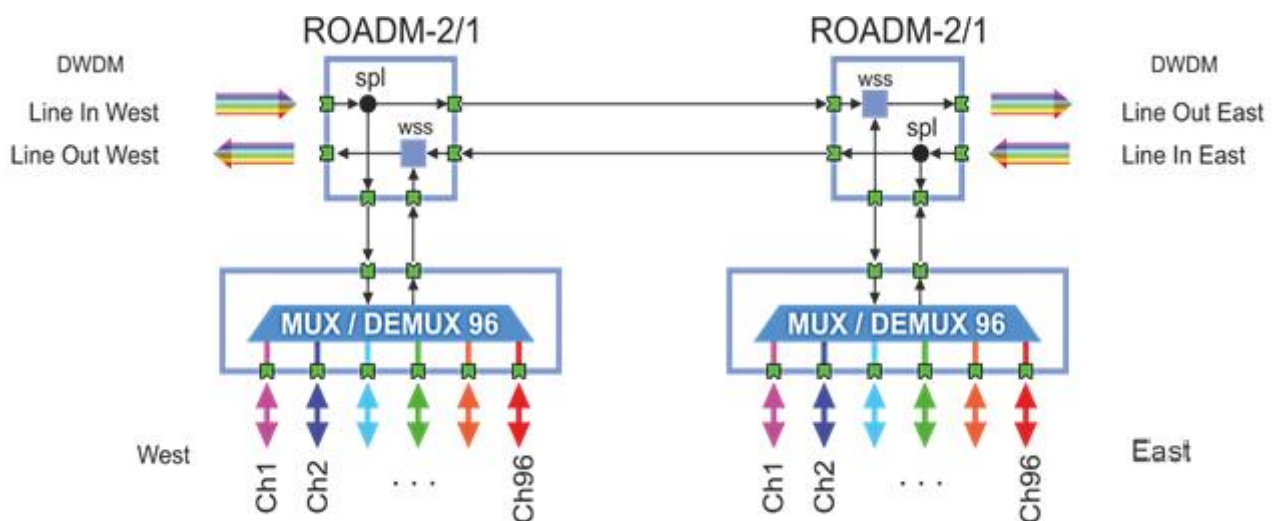


Рисунок 1.9 – Типова конструкція ROADM на основі WSS

1.1.2.2 Оптичні хвильові конвертери

Оптичний хвильовий конвертер призначений для перетворення довжини хвилі каналу даних (сервісного сигналу) у довжину хвилі каналу WDM відповідно до частотного плану.

Оптичні конвертери поділяються на два види: з оптоелектрооптичним перетворенням і без перетворення. Конвертери без перетворення базуються на напівпровідниковому підсилювачі біжучої хвилі та використовують нелінійні явища, такі як чотирьоххвильове змішування. Як правило, конвертований оптичний сигнал має малу корисну вихідну потужність, що в сотні чи тисячі разів менше рівня вхідного сигналу каналу даних, що ускладнює підсилення цього сигналу та його передачу по волоконно-оптичній лінії зв'язку.

Оптичні конвертери з оптоелектрооптичним перетворенням називаються транспондерами. Транспондери широко використовуються в системах DWDM і CWDM. Основними перевагами транспондерів є виконання таких функцій:

- регенерація сигналу;
- виявлення та виправлення помилок;
- введення електричних та/або оптичних сервісних сигналів.

Типова конструкція транспондера представлена на рисунку 1.10.

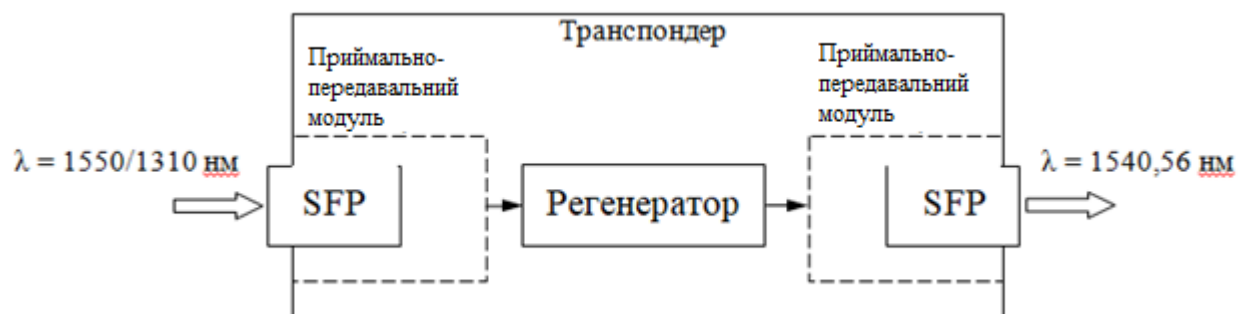


Рисунок 1.10 – Типова конструкція транспондера

1.1.2.3 Оптичні підсилювачі

На довгопрольотних мережах WDM, зокрема DWDM, використовують оптичні підсилювачі, які підсилюють оптичний груповий сигнал DWDM до номінального рівня. У мережах CWDM оптичні підсилювачі не застосовуються, оскільки необхідні підсилювачі з шириною смуги підсилення до 300 нм (42,6 ТГц), а використання широкосмугових підсилювачів призводить до спотворення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) лінійного WDM-сигналу.

Отже, для мереж DWDM використовують:

- Ербійські волоконно-оптичні підсилювачі EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier);
- Підсилювачі на основі вимушеного комбінаційного розсіяння сигналу (БКР-підсилювачі) або раманівські оптичні підсилювачі ROA (Raman Optical Amplifier);
- Гібридні з'єднання EDFA та ROA.

Максимальна кількість встановлених оптичних підсилювачів між двома WDM-мультиплексорами, за даними практики, не перевищує десяти. Це зумовлено наявністю спонтанного шуму підсилювача. При використанні кількох підсилювачів рівень спонтанного шуму кожного з них накопичується, що призводить до зменшення відношення корисної оптичної потужності сигналу до потужності оптичного шуму (OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio). Чим менше значення OSNR, тим вищий коефіцієнт помилок; тому довжина регенераційного ділянки у мережах DWDM становить 600 км, а в деяких випадках, при використанні сучасного обладнання та алгоритмів обробки сигналу, може досягати 4000 км. Для мереж CWDM, де не використовують оптичні підсилювачі, довжина регенераційного ділянки зазвичай не перевищує 160 км.

1.1.2.4 Компенсатори дисперсії

Компенсатор дисперсії – це пасивний пристрій, призначений для компенсації дисперсії (зокрема, хроматичної дисперсії) у довгопрольотних

мережах, таких як DWDM. Компенсатори дисперсії встановлюють в підсилювальних проміжних пунктах або в кінці траси перед оптичним мультиплексором. Оптичні втрати, які вносять компенсатори дисперсії, в середньому становлять 6 дБ.

Компенсатори дисперсії поділяються на:

Компенсатори дисперсії на основі оптоволокна або нелінійного компонента з від'ємною дисперсією;

Компенсатори дисперсії на основі решітки Брега.

В деяких випадках на довгопрольотних мережах DWDM установка компенсаторів дисперсії не є необхідною, оскільки транспондери здатні компенсувати накопичену дисперсію на електронному рівні завдяки регенерації сигналу.

На відміну від систем DWDM, у мережах CWDM компенсатори дисперсії не використовуються через відсутність жорстких вимог до стабільності оптичної несучої, спектральної ширини оптичного каналу та розкиду оптичних каналів. Крім того, довжина ділянки мережі між активним обладнанням (мультиплексорами) не перевищує 160 км, де накопичена хроматична дисперсія не впливає на якість передаваних даних.

1.1.2.5 Оптичні крос-комутатори

На магістральних мережах, що будуються за топологіями з відгалуженнями, такими як кільцева, зіркоподібна або решітчаста топологія, у вузлах, де потрібно здійснити відгалуження (комутацію) оптичних каналів, використовують оптичні крос-комутатори.

Крос-комутатор дозволяє комутувати оптичний канал з одного волокна в інше волокно того ж кабелю або іншого.

За способом комутації крос-комутатори поділяються на два основні типи: оптомеханічні та електрооптичні. За часом комутації крос-комутатори поділяються на чотири категорії:

- Низькошвидкісні – час перемикання в мілісекундах;
- Середньошвидкісні – час перемикання в мікросекундах;

- Високошвидкісні – час перемикання в наносекундах;
- Сверхшвидкісні – час перемикання в пікосекундах.

Залежно від переваг та недоліків, кожен тип крос-комутатора застосовується в різних компонентах систем DWDM. Наприклад, низькошвидкісні використовуються для резервного перемикання плат мультиплексора, середньошвидкісні – для перемикання на резервне оптичне кільце, високошвидкісні – для комутації даних, а сверхшвидкісні – для модуляції оптичної несучої.

Одним із основних типів крос-комутаторів, які використовуються в мережах DWDM, є крос-комутатор, у якому комутаційна матриця побудована на основі:

- Інтерферометра Маха-Цендера (IMZ – Interferometer Mach-Zehnder);
- Жидких кристалів;
- Мікроелектромеханічних систем (MEMS).

Зовнішній вигляд комутаційних матриць представлений на рисунку 1.11. Найбільшу популярність отримали матриці на основі IMZ, які використовуються як оптичні модулятори. Матриці на основі MEMS застосовуються для перемикання оптичних кілець. Через складність виготовлення матриці на основі рідких кристалів не використовуються.

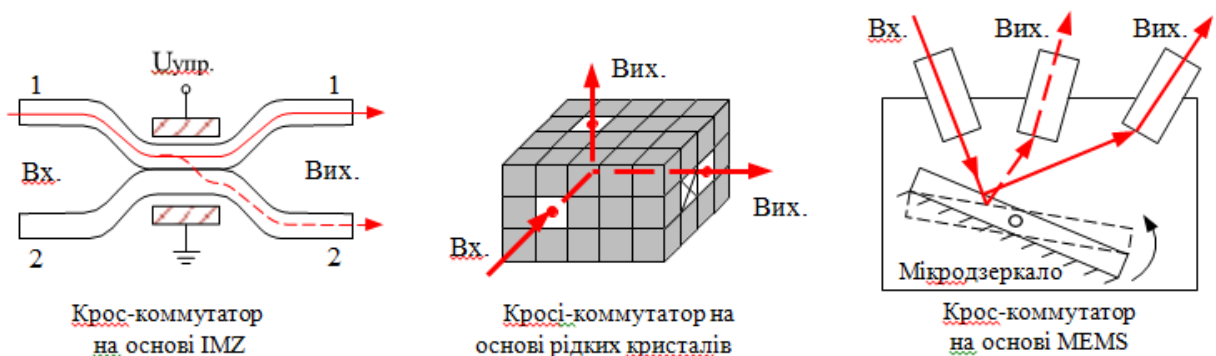


Рисунок 1.11 – Комутаційні матриці

1.1.3 Мережева конфігурація WDM

Під мережею WDM розуміють організацію побудови мережі на основі таких топологій, як лінійна структура, кільце, решітка та зірка. Для створення мережі WDM різної конфігурації основою є базова конфігурація термінального мультиплексора WDM (рисунок 1.12). Типова конфігурація мультиплексора введення-виведення (неперебудовуваний OADM-мультиплексор з ОЕО-перетворенням) у вузлі кільцевої топології мережі WDM показана на рисунку 1.13. Цей тип мультиплексора виконує не лише функцію введення-виведення даних, але й функцію регенерації сервісних сигналів (WDM-сигнал).

При побудові мережі WDM за решітчастою топологією, у вузлах встановлюються мультиплексори з функціями регенерації сервісних сигналів, введення-виведення і електронної (оптичної) крос-комутації каналу даних, таке обладнання отримало назву оптичний крос-комутатор (OCS). Типова конфігурація такого мультиплексора представлена на рисунку 1.14.

На довгих ділянках, де мультиплексори WDM не можуть компенсувати всі оптичні втрати, зазвичай використовують оптичні підсилювачі або регенератори, які являють собою збірку OADM-мультиплексора без введення-виведення каналів даних. Приклад наведений на рисунку 1.15 [1-9].

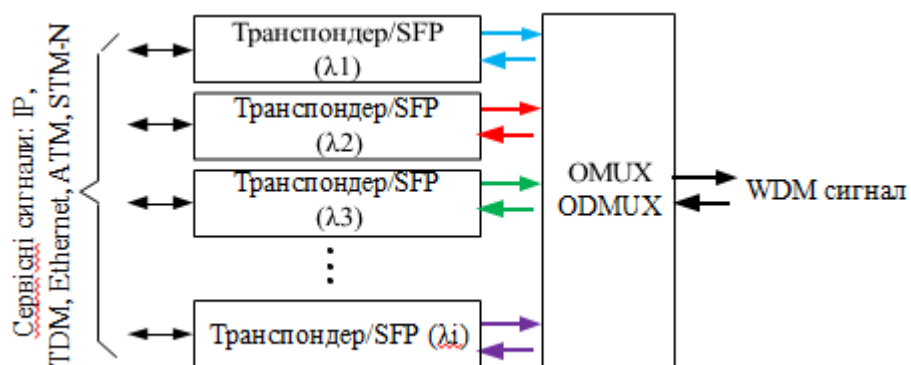


Рисунок 1.12 – Типова схема організації мережі WDM

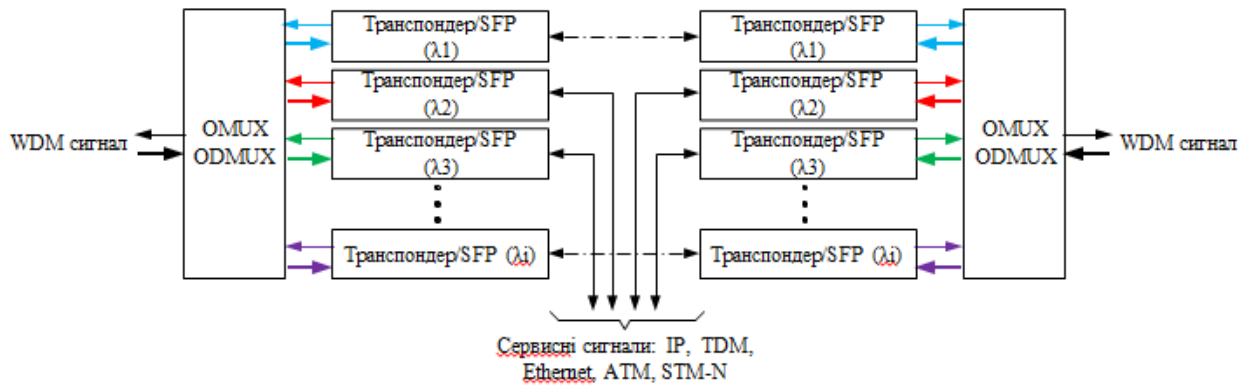


Рисунок 1.13 – Типова конфігурація OADM у вузлі кільцевої топології мережі

WDM

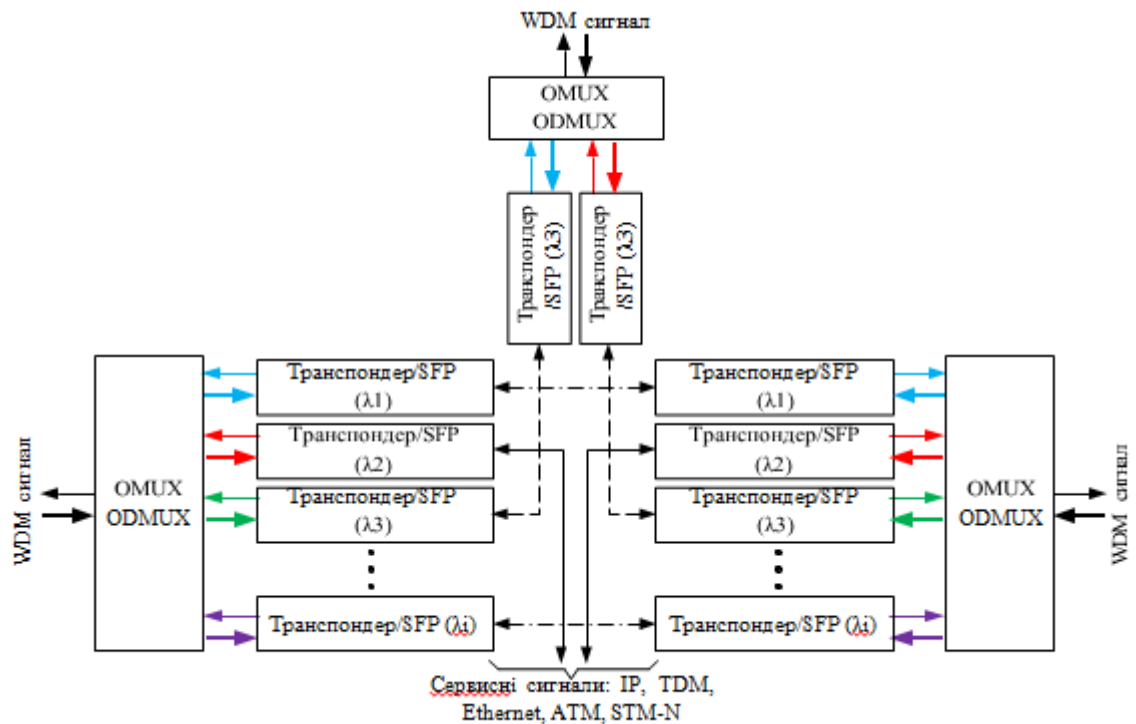


Рисунок 1.14 – Типова конфігурація OADM у вузлі решітчастої топології мережі WDM

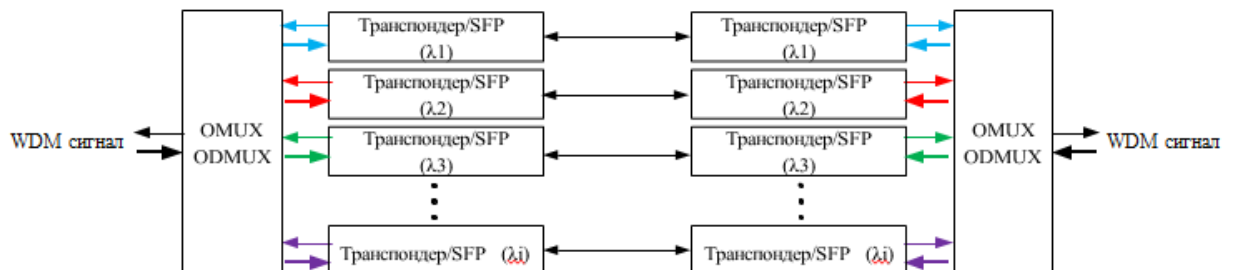


Рисунок 1.15 – Типова конфігурація регенератора мережі WDM

Загальна структурна схема мережі WDM представлена на рисунку 1.16. На схемі показані кінцеві термінальні мультиплексори (TM), мультиплексори введення-виведення (ADM), регенератори (REG), мультиплексори з функцією крос-комутації (OCS) та оптичні підсилювачі (ОП).

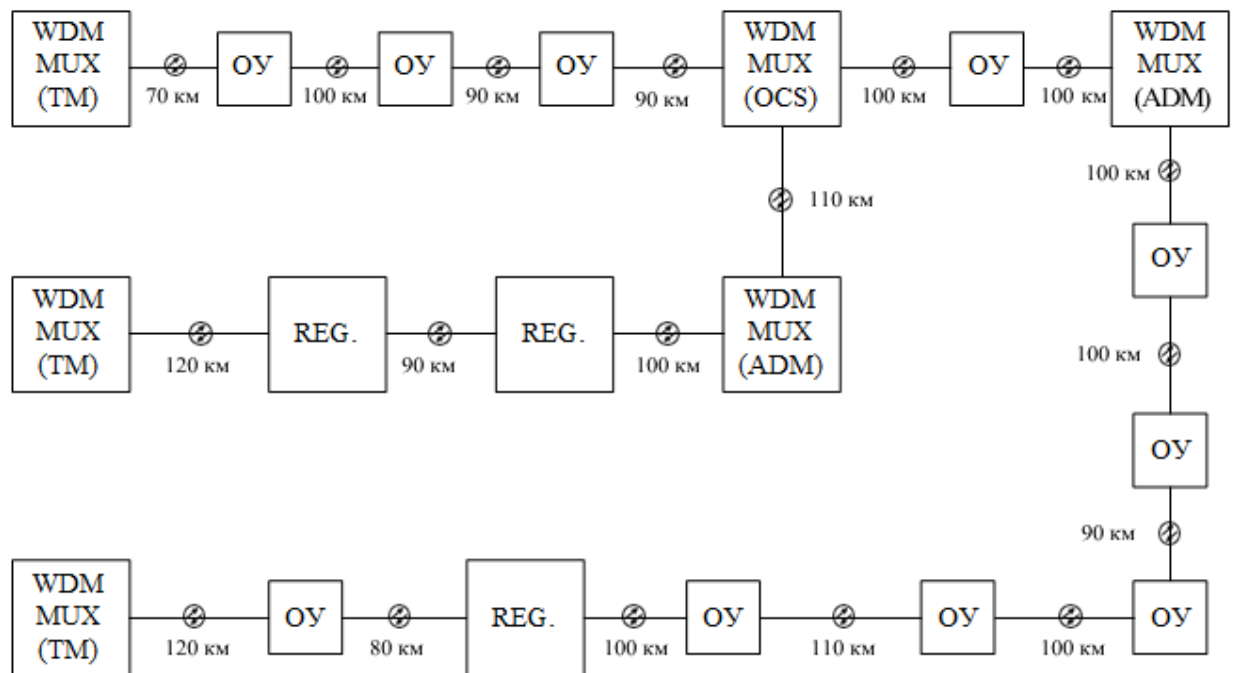


Рисунок 1.16 – Узагальнена структурна схема мережі WDM

Як правило, регенератори в мережах DWDM встановлюються на відстані близько 600 км. Це пов'язано з тим, що оптичний підсилювач, зокрема EDFA, вносить спонтанний шум у корисний сигнал, а при використанні кількох підсилювачів цей шум накопичується, що призводить до погіршення співвідношення сигнал/шум (OSNR) на приймальній стороні, а це, своєю чергою, призводить до збільшення кількості помилок. Для корекції помилок на довгопроботних магістральних лініях зв'язку WDM з оптичними підсилювачами рекомендується встановлення регенераторів.

Однак, довгопроботні мережі WDM можуть будуватися на базі регенераторів, що стосується, зокрема, мереж CWDM.

Часто реалізація мультиплексорів введення-виведення в кільцевих, лінійних і решітчастих топологіях здійснюється не на основі OADM-мультиплексора з ОЕО-перетворенням, а на основі неперебудовуваного OADM-мультиплексора без ОЕО-перетворення або перебудовуваного мультиплексора ROADM. Приклад конфігурації ділянки мережі WDM наведений на рисунку 1.17. На рисунку 1.17 не показані оптичні підсилювачі, оскільки ця конфігурація не передбачає їх використання, через те, що оптичні підсилювачі підсилюють весь груповий сигнал WDM, а не кожен оптичний канал окремо [1-9].

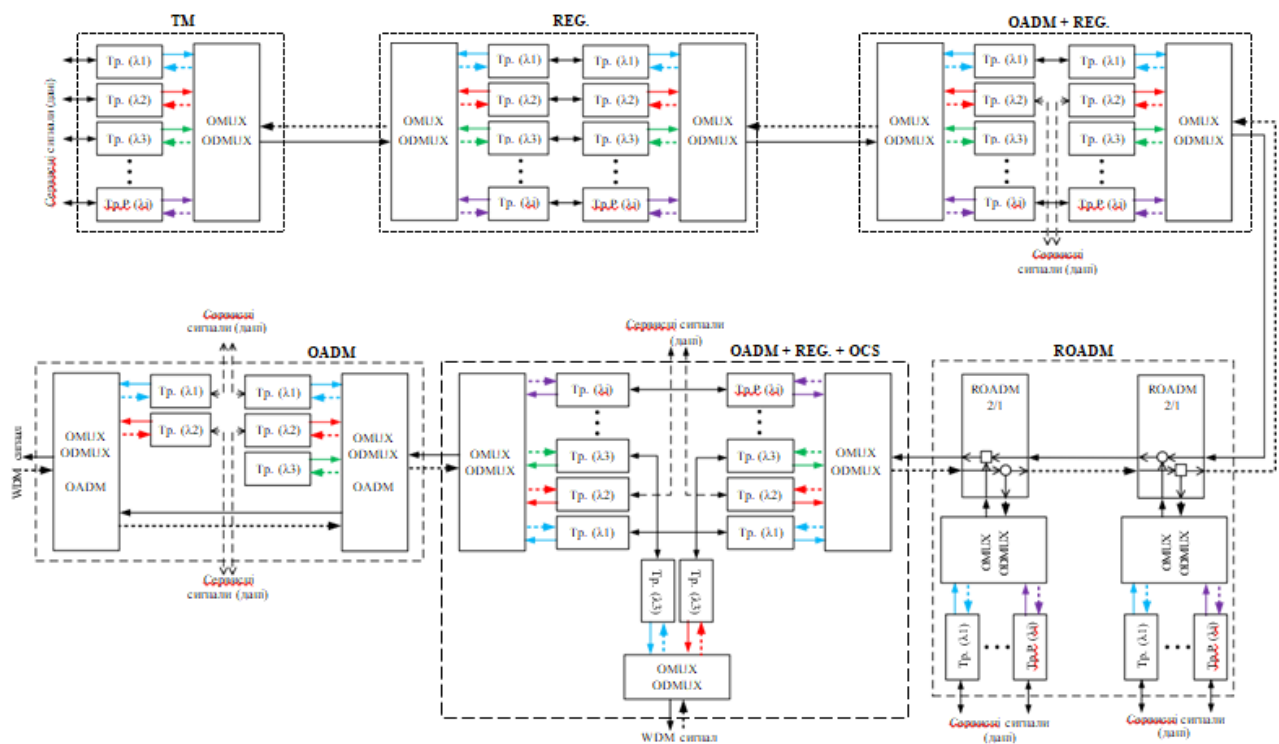


Рисунок 1.17 – Приклад конфігурації мережі ділянки WDM

1.1.4 Багатохвильовий лінійний тракт системи WDM

Під багатохвильовим лінійним трактом системи WDM розуміють комплекс технічних засобів (оптичні мультиплексори, регенератори, оптичні підсилювачі, крос-комутатори), що забезпечують передачу каналів даних (сервісних сигналів: IP, STM-N, Ethernet, ATM) на окремих довжинах хвиль

(оптичних каналах) у смузі частот оптичного волокна зі швидкістю, що відповідає параметрам цієї системи передачі.

Багатохвильовий лінійний тракт системи WDM включає ділянки підсилення, регенерації та мультиплексування, оптичний шлях і оптичний канал. Базову конфігурацію лінійного тракту WDM наведено на рисунку 1.28 [4,7,10].

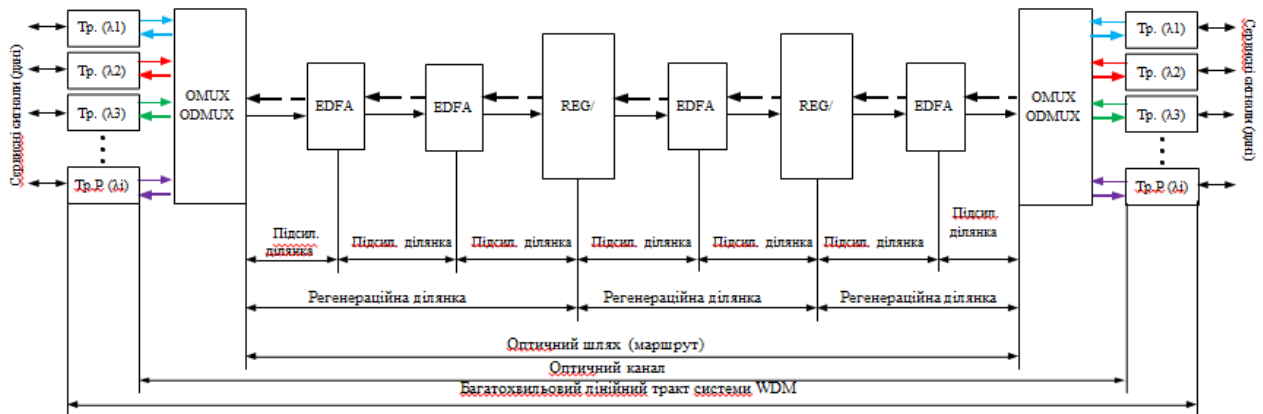


Рисунок 1.18 – Базова конфігурація лінійного тракту WDM

Згідно з рекомендацією ITU-T G.692 [10], оптичний шлях (маршрут) – це оптичне з'єднання між мультиплексором і демультиплексором, а оптичний канал – це оптичне з'єднання між передавальним транспондером мультиплексора і приймальним транспондером демультиплексора. Довжина оптичного маршруту та каналу може досягати 12500 км.

Підсилювальна ділянка – це ділянка між підсилювачем і підсилювачем, між підсилювачем і мультиплексором, між підсилювачем і регенератором, довжина якої може досягати 160 км. Регенераційна ділянка – це ділянка між регенератором і мультиплексором, між регенератором і регенератором, довжина якої становить від 600 км до 2000 км, залежно від класу використовуваного обладнання.

1.2 Резервування в мережах WDM

1.2.1 Огляд існуючих схем резервування

Одним із основних методів підвищення надійності мереж WDM є організація резервування. У системах WDM використовуються такі види резервування [1-13]:

- Мережеве резервування: каналів даних на електричному рівні, резервування оптичних каналів, резервування оптичного маршруту;
- Апаратне резервування: резервування окремих плат обладнання WDM, резервування кабелів зв'язку (оптичних волокон).

Зазвичай мережеве та апаратне резервування реалізується за двома схемами: $1:N$ і $1+N$.

Схема резервування $1:N$ означає, що один елемент (компонент) системи передачі WDM є активним (робочим), а решта N таких же елементів (компонентів) системи знаходяться в режимі очікування. Як тільки основний елемент (компонент) системи стає непрацездатним або пошкодженим, цей компонент замінюється на один із N резервних компонентів, при цьому перемикання з пошкодженого компонента на резервний виконується без зупинки роботи всієї мережі WDM.

Схема резервування $1+N$ означає, що один елемент (компонент) системи передачі WDM є активним (робочим), а решта N таких же елементів (компонентів) також є активними, але не основними, тобто приймають сигнал, але не обробляють його і не передають на наступні блоки обладнання. Резервні N елементи (компоненти) системи WDM приймають і обробляють сигнал з «гіршим» якістю, ніж основний компонент. Як тільки один із N резервних компонентів починає приймати сигнал з кращою якістю, ніж основний робочий елемент (компонент) системи WDM, виконується автоматичне перемикання на резервний компонент. У схемі $1+N$ всі компоненти, основні та резервні, працюють паралельно.

З точки зору економічності та низької вартості обладнання WDM, на практиці використовують два варіанти резервування: $1:1$ і $1+1$. Зазвичай схема

резервування 1:1 у порівнянні зі схемою 1+1 є економічно вигідною з точки зору енергоспоживання та технічної реалізації, що в свою чергу впливає на кінцеву вартість обладнання WDM. Однак надійність та якість передаваного сигналу за схемою резервування 1+1 вища в порівнянні зі схемою 1:1. Незважаючи на переваги та недоліки цих двох варіантів резервування, схеми резервування 1:1 і 1+1 отримали широке застосування в мережах WDM.

Апаратне резервування, зокрема резервування плат обладнання, реалізується за схемою 1:1. Як правило, в мультиплексорах резервуються такі плати, як плата живлення, плата крос-комутації. Однак резервування волоконно-оптичного кабеля на ділянках мережі WDM не практикується, оскільки прокладка другого оптичного кабеля призводить до додаткових фінансових витрат і труднощів в експлуатації та обслуговуванні резервного кабеля (ділянки мережі). Вирішенням цієї проблеми є організація кільцевих або решітчастих топологій мережі WDM, де один з сегментів кільця або решітки є основним напрямком передачі WDM-сигналу, а інші сегменти є резервними ділянками для цього WDM-сигналу або основними для інших WDM-сигналів. На рисунку 1.19 представлена типова конфігурація мережі WDM з захисним оптичним кільцем. На рисунку показані мультиплексори введення-виведення та напрямок передачі WDM-сигналу: основний і резервний. У разі пошкодження сегмента (ділянки) кільцевої (решітчастої) топології мережі здійснюється перемикання на резервний сегмент [1,4,7,11-13].

У мережах WDM лінійної топології або точка-точка організовують резервування не оптичного кабеля, а оптичних волокон у кабелі, при цьому резервні волокна є неактивними (темними), тобто не використовуються для передачі оптичного сигналу. У разі пошкодження активного (світлого) оптоволоконна або погіршення якості прийнятого сигналу в активному волокні, відбувається перемикання на резервне оптичне волокно в цьому ж кабелі. Такий метод не гарантує стопроцентне резервування мережі. Тому на магістралях, де необхідна організація стопроцентного захисту оптичного кабеля

від обриву (пошкодження), застосовують кільцеву або решітчасту топологію мережі.

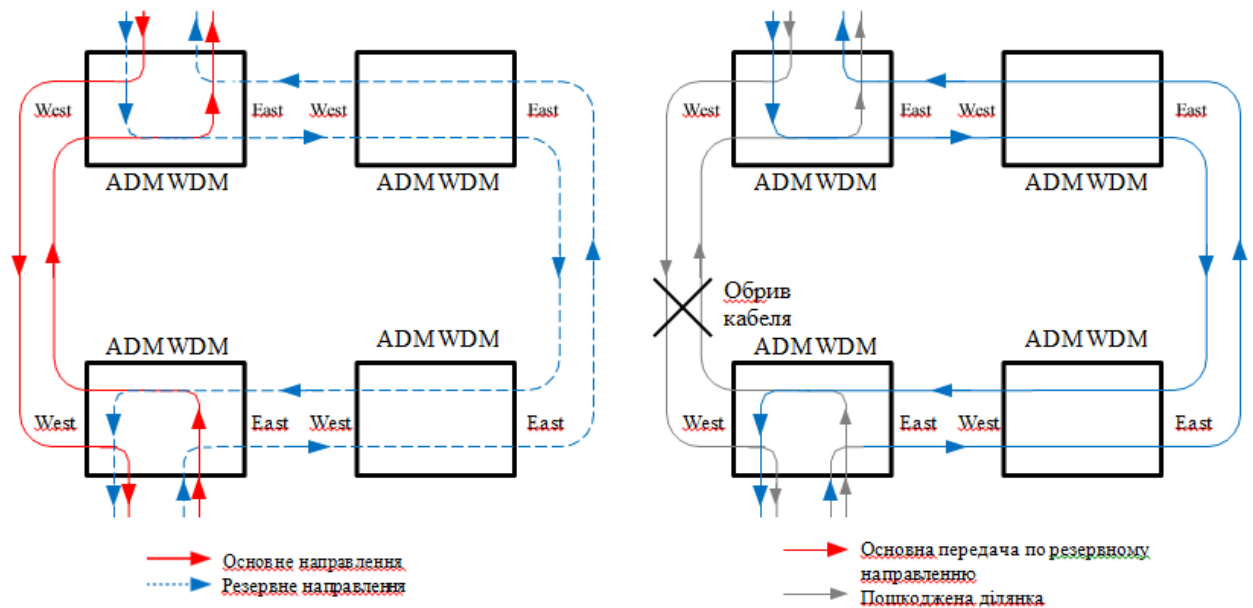


Рисунок 1.19 – Типова конфігурація мережі WDM з захисним оптичним кільцем

Цей вид резервування оптичної ділянки мережі WDM передбачає резервування не лише оптичного кабеля та оптоволокна, але й резервування оптичного маршруту. Резервування оптичного маршруту організується на ділянці між WDM-мультиплексорами. Типова схема резервування оптичного маршруту за схемами 1:1 та 1+1 представлена на рисунку 1.20.

За схемою 1+1, оптичний комутатор (OS) на передавальній стороні виконує дублікацію трафіку WDM і направляє його по двох незалежних оптичних волокнах (лініях зв'язку), а на приймальній стороні комутатор обирає одне з двох волокон (ліній зв'язку), де якість WDM-сигналу краща. У схемі 1:1 комутатор на передавальній стороні не виконує дублікацію WDM-сигналу. У разі втрати сигналу або погіршення якості сигналу в робочій лінії, комутатор автоматично перемикається на резервну лінію зв'язку (оптоволокно).

В представлених схемах резервування оптичного маршруту комутатор OS зазвичай є частиною WDM-мультиплексора і виконує функцію оптичного крос-комутатора OCS [1,4,7,13].

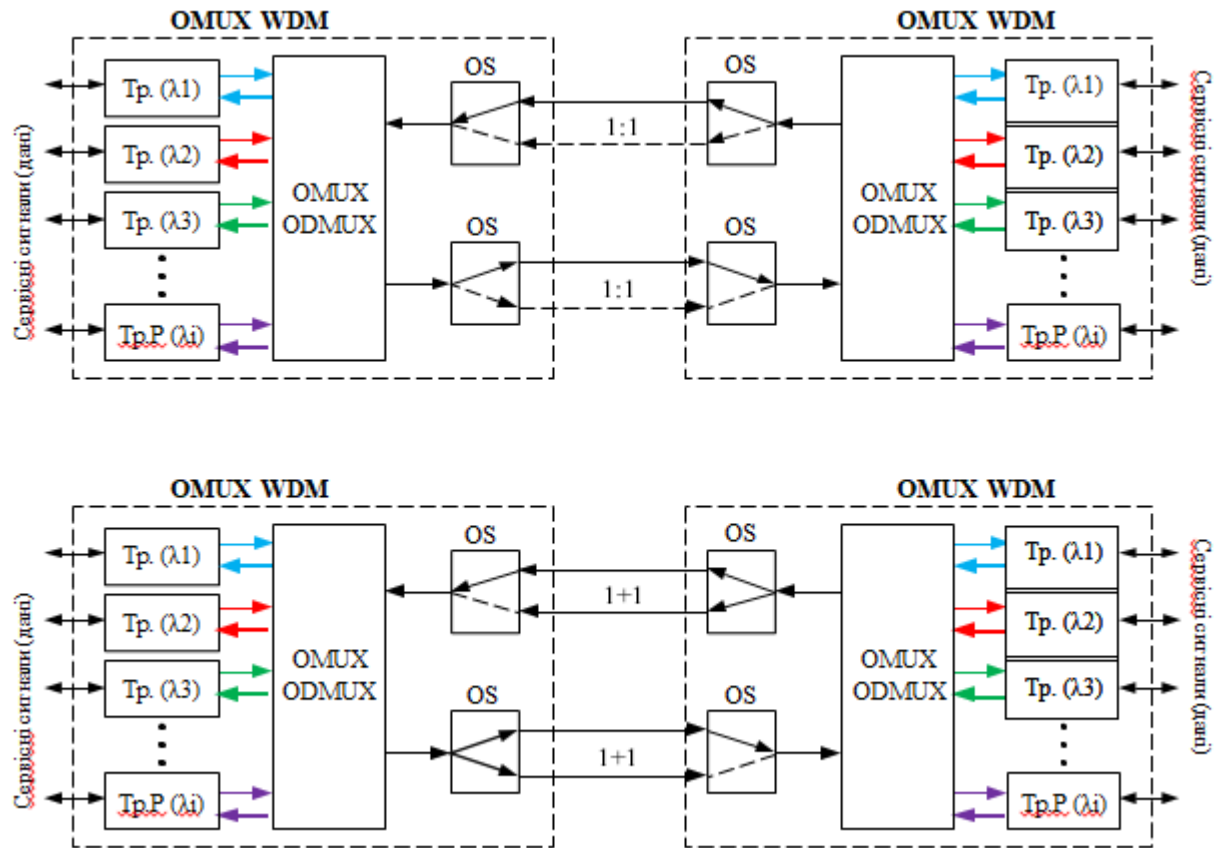


Рисунок 1.20 – Типова схема резервування оптичного маршруту за схемами 1:1 і 1+1

Схема, представлена на рисунку 1.31, не дозволяє організувати захист окремих оптичних каналів у разі виходу з ладу транспондера. Для захисту оптичних каналів також використовуються схеми 1+1 і 1:1 як на оптичному, так і на електричному рівні. Конструктивно, захист організується в транспондері, який додатково включає електричний комутатор (SW), резервний оптичний порт, контролер якості сигналу та керовані оптичні перемикачі (OS).

При реалізації схем резервування 1:1 та 1+1 на електричному рівні в транспондері також використовуються такі блоки, як електричний комутатор (SW), резервний оптичний порт і контролер якості сигналу. Матриця комутатора в блоці транспондера підтримує функцію «split and select» (функція роздільного прийому електричного сигналу по двох каналах і вибору одного з них), яка працює спільно з контролером якості сигналу. Схема резервування

оптичного каналу на електричному рівні за схемою 1:1 представлена на рисунку 1.21, а за схемою 1+1 – на рисунку 1.22.

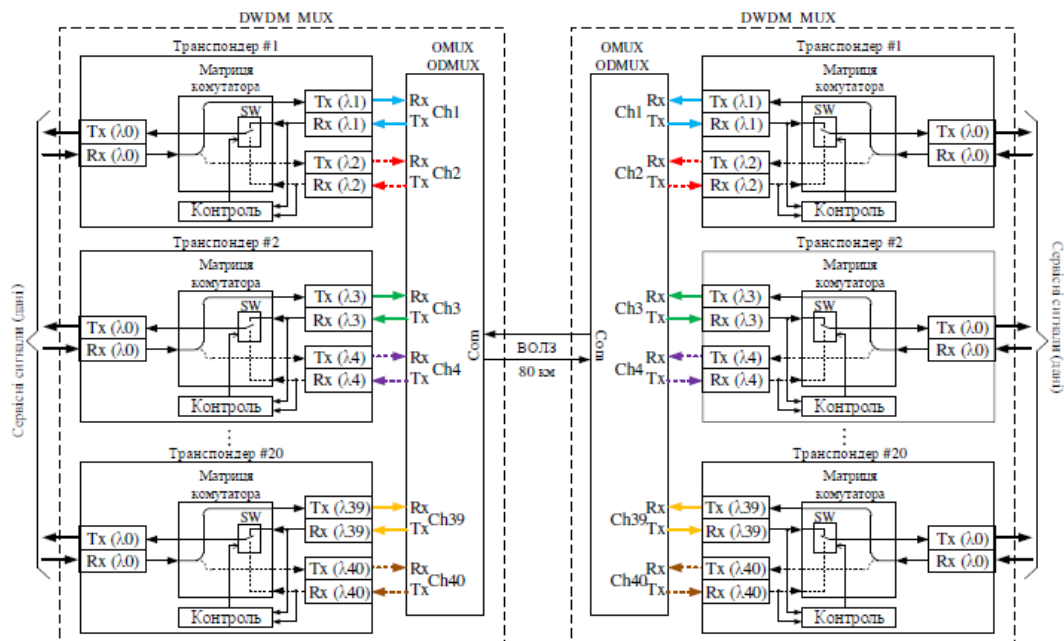


Рисунок 1.21 – Резервування оптичного каналу на електричному рівні за схемою 1:1 у мережі WDM топології «точка-точка»

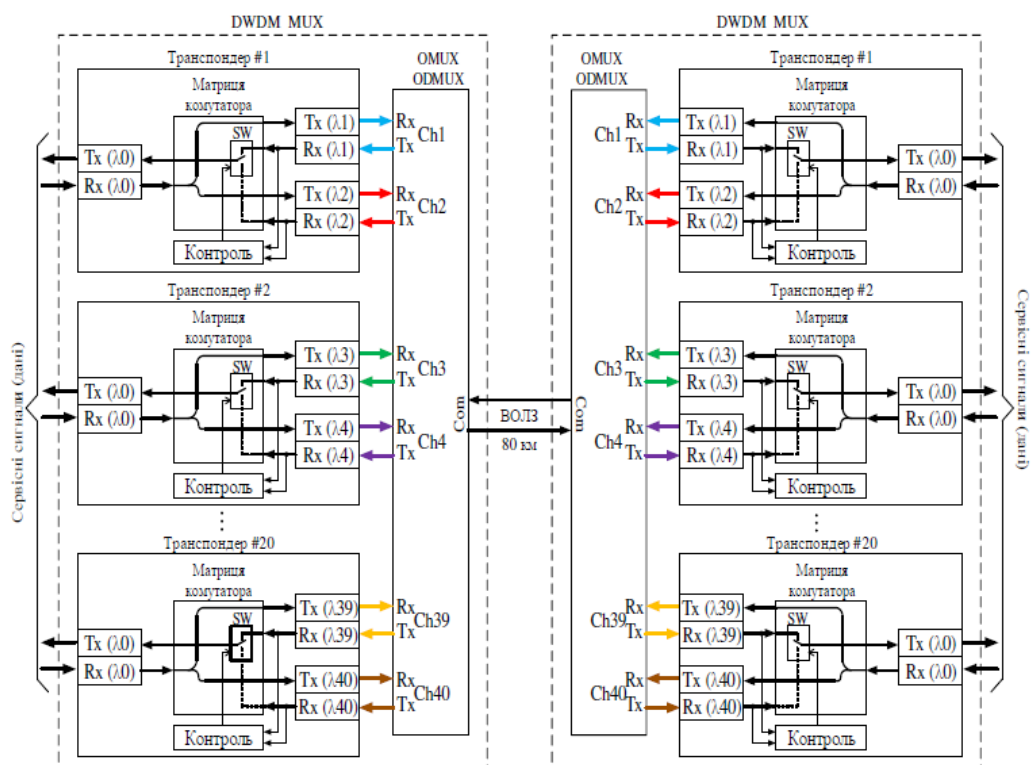


Рисунок 1.22 – Резервування оптичного каналу на електричному рівні за схемою 1+1 у мережі WDM топології «точка-точка».

При реалізації схем резервування 1:1 та 1+1 на оптичному рівні в транспондері також використовуються керовані оптичні перемикачі (OS). Вибір оптичного каналу здійснюється за допомогою оптичного перемикача OS, при цьому перемикач виконується з каналу, що вийшов з ладу, на стабільний канал, тобто канал з кращою якістю. Резервування оптичного каналу на оптичному рівні за схемою 1:1 представлено на рисунку 1.23, а за схемою 1+1 – на рисунку 1.24.

Як приклад наведено схему мережі DWDM на 40 оптичних каналів, з яких 20 каналів (непарних) використовуються як основні (робочі) канали, а 20 каналів (парних) – як резервні оптичні канали [1-13].

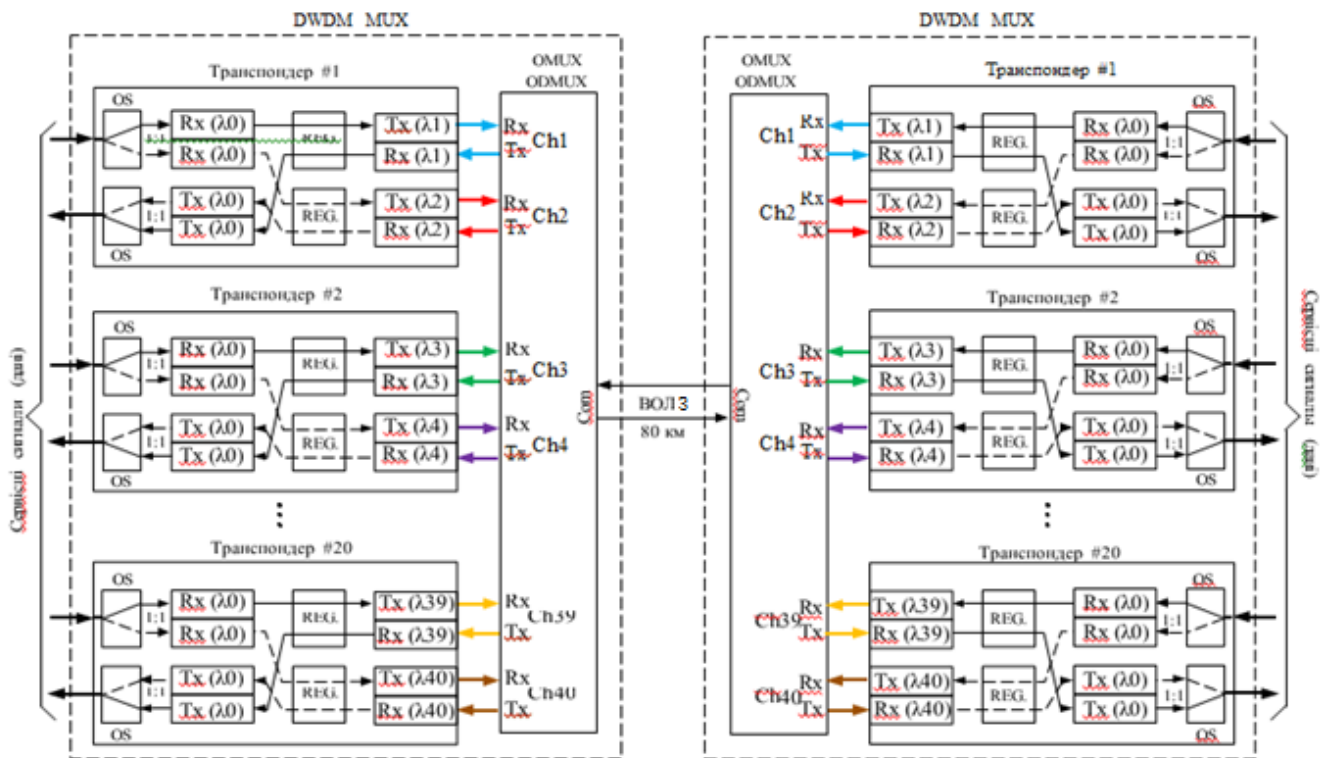


Рисунок 1.23 – Резервування оптичного каналу на оптичному рівні за схемою 1:1 у мережі WDM топології «точка-точка»

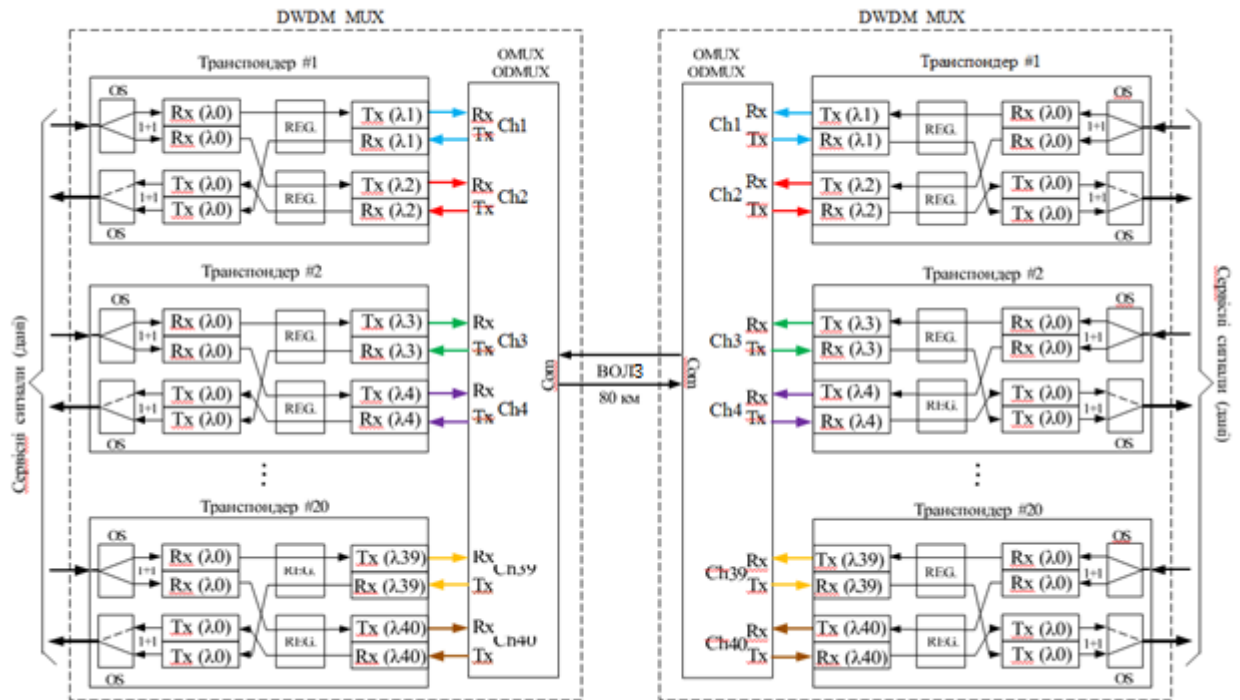


Рисунок 1.24 – Резервування оптичного каналу на оптичному рівні за схемою 1+1 у мережі WDM топології «точка-точка»

Розглянуті варіанти схем резервування оптичних каналів WDM використовуються в топології мережі «точка-точка». У випадках організації резервування оптичних каналів у кільцевій або решітчастій топології застосовуються більш складні конфігурації оптичних мультиплексорів введення-виведення, в яких інтегровані оптичні крос-комутатори.

Як приклад розглянемо ділянку оптичного кільця WDM-системи, що складається з двох мультиплексорів введення-виведення (рисунок 1.25).

У цьому прикладі мультиплексор введення-виведення MUX WDM #1 виконує введення-виведення оптичних каналів №3 і №4, а інші канали №1, №2, №5 – №40 передаються транзитом. Мультиплексор введення-виведення MUX WDM #2 виконує введення-виведення оптичних каналів №7 і №8, а решта каналів №1 – №6 і №9 – №40 також передаються транзитом.

Клієнтські канали даних, що передаються на довжинах хвиль λ_3 , λ_4 та λ_7 , λ_8 , організовані з захистом 1+1 на оптичному рівні, але без організації захисту

оптичних маршрутів між мультиплексорами, як і в прикладі мережі WDM топології «точка-точка».

В системах WDM організація захисту оптичних каналів є пріоритетнішою, ніж організація оптичних маршрутів. Порівнюючи представлені схеми резервування між собою, можна виділити слабкі ланки в конфігурації WDM-мультиплексорів, як термінальних, так і введення-виведення. До таких ланок відносяться транспондери та мультиплексори ROADM, оскільки в цих пристроях використовуються активні компоненти, такі як лазерні діоди ($Tx(\lambda_1)$), фотодіоди ($Rx(\lambda_1)$), процесори та мікроконтролери, регенератори, електричні комутатори (SW), система живлення, оптичні перемикачі (OS) і селективні перемикачі оптичних каналів (WSS), які піддаються більшому ризику виходу з ладу, ніж пасивні компоненти [1,3,13].

У транспондерах, при організації резервування оптичного каналу, виконується дублікація компонентів, таких як лазерні діоди, фотодіоди, регенератори та оптичні перемикачі залежно від оптичного або електричного рівня резервування. Резервування оптичних каналів на оптичному рівні за схемою 1+1 є найнадійнішим, однак це висока вартість обладнання та недоцільність схем резервування 1+1 та 1:1 з точки зору спектральної ефективності систем DWDM. Оскільки з 96 можливих оптичних каналів задіяні 43 канали, інші канали будуть знаходитися в активному (пасивному) резервуванні, що призводить до зменшення загальної пропускної спроможності системи DWDM вдвічі.

На відміну від транспондерів, у мультиплексорах ROADM не передбачена дублікація активних елементів, що зумовлено складністю виготовлення ROADM-мультиплексора та його високою вартістю.

У резервуванні оптичних маршрутів за схемами 1+1 та 1:1 слід зазначити недолік: для цього потрібно задіяти чотири оптичні волокна замість двох при традиційній передачі даних по волоконно-оптичних лініях зв'язку. Загальним недоліком резервування оптичних каналів і маршрутів за схемами 1+1 та 1:1, зокрема в системах DWDM, є висока вартість обладнання.

На відміну від систем DWDM, у системах CWDM резервування оптичного маршруту в більшості випадків організується на рівні захисного оптичного кільця, а захист оптичних каналів реалізується на стороні клієнта (рисунок 1.37) [1,4,13].

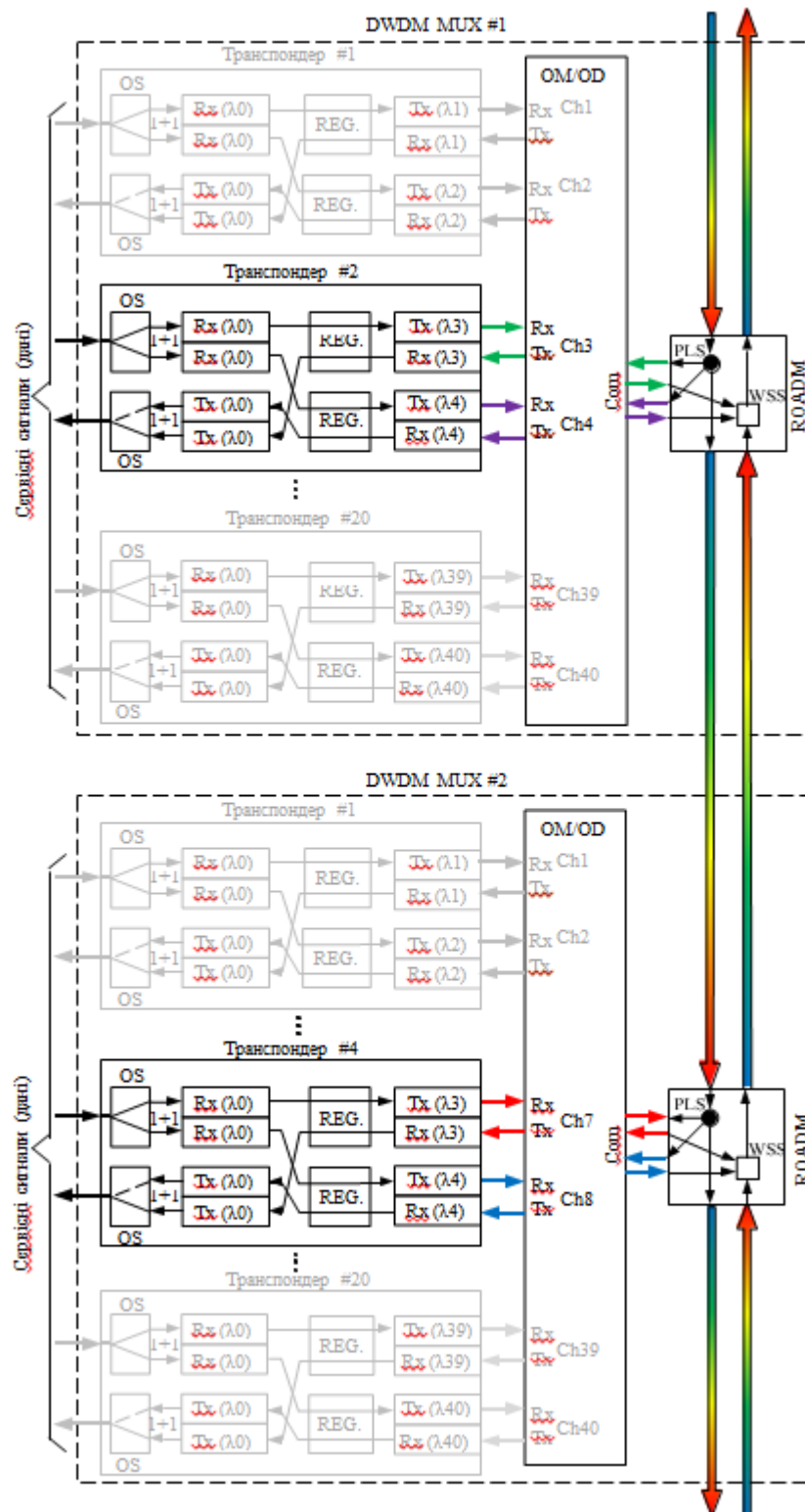


Рисунок 1.25 – Резервування оптичного каналу на оптичному рівні за схемою 1+1 на ділянці

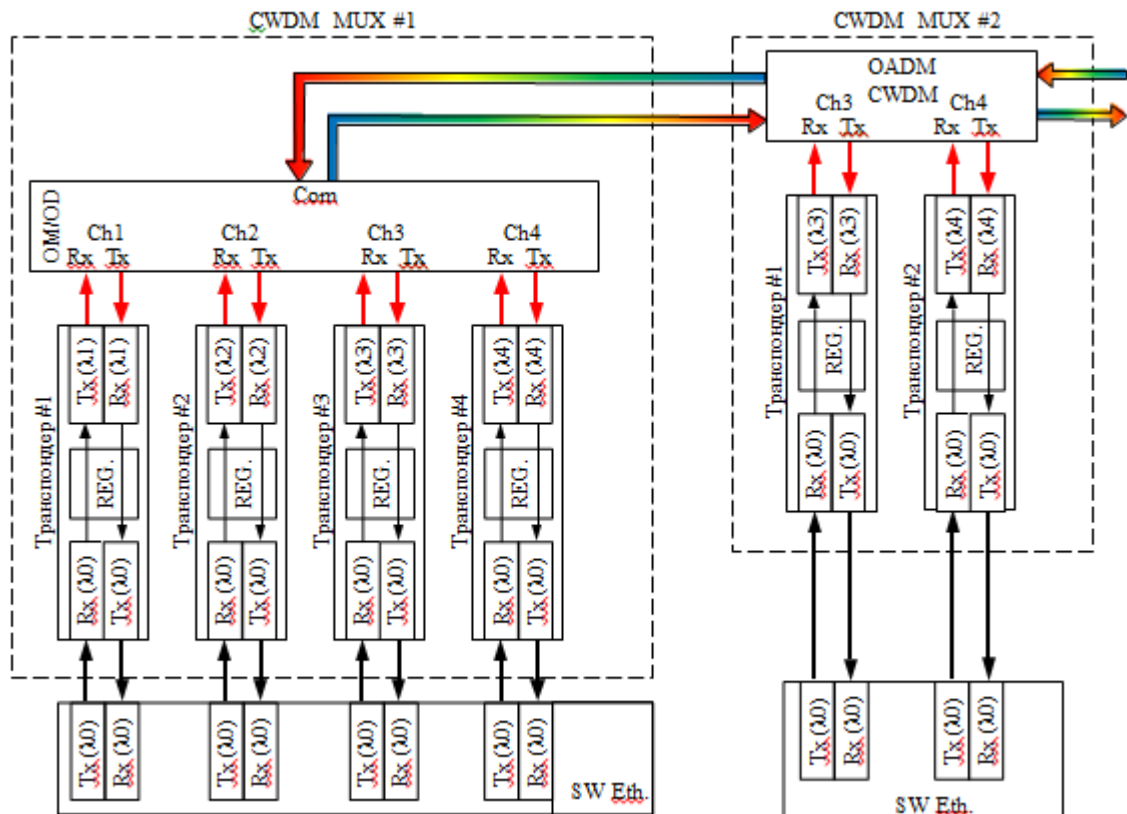


Рисунок 1.26 – Схема резервування оптичних каналів у системі CWDM

Це обумовлено тим, що вартість обладнання CWDM (компонентів CWDM) є нижчою за витрати на організацію резервування як оптичних маршрутів, так і оптичних каналів на оптичному та електричному рівнях.

1.2.2 Огляд науково-дослідних робіт

Аналізуючи наукові роботи [22-32], у яких представлена робота з технологією WDM (волнове спектральне ущільнення), можна стверджувати, що в розглянутій літературі всі дослідження орієнтовані на вдосконалення цих систем, а саме на збільшення швидкості передачі даних в оптичних каналах, підвищення дальності зв'язку, нові технології мультиплексування та оцінку якості сигналу за впливу нелінійних явищ.

Так, у науковій статті авторів Гайнова В.В., Конишева В.А., Леонова А.В., Лукиних С.Н., Нанія О.Е., Скворцова П.І., Трещикова В.Н., Шихалиєва І.І., Убайдуллаєва Р.Р. «Однопрольотні оптичні лінії зв'язку великої протяжності» теоретично досліджуються механізми деградації сигналу в

однопрольотних лініях зв'язку з каналною швидкістю 100 Гбіт/с і когерентним детектуванням, які обмежують граничну довжину однопрольотних ліній. Описано варіанти побудови однопрольотних ліній зв'язку великої протяжності, наведено результати їх експериментального дослідження та показано хорошу відповідність з розрахунковими даними. Надано оцінки максимально досяжної довжини та пропускнуєї спроможності розглянутих варіантів побудови однопрольотних ліній зв'язку. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено, що при використанні поляризаційного мультиплексування (DP), чотирирівневої фазової модуляції (QPSK), когерентного детектування та корекції помилок із м'яким прийомом рішень (SoftFEC) у поєднанні з волокном стандарту G.652, яке має ультранизьке затухання, дальність передачі DWDM-сигналів з каналною швидкістю 100 Гбіт/с в однопрольотних лініях зв'язку може перевищувати 500 км.

У науковій статті Портнова Е.Л. та Фатхулїна Т.Д. «Технології досягнення високих швидкостей передачі в сучасних когерентних DWDM-системах зв'язку» розглянуті передумови для створення систем зі спектральним ущільненням каналів, розвиток систем WDM від інтенсивного та екстенсивного шляхів до гібридної моделі, а також поєднання в одній системі передачі як каналів зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с з форматом модуляції NRZ, так і каналів зі швидкістю передачі 40 Гбіт/с з форматом модуляції NRZ-ADPSK для модернізації 80-канальних систем. Проаналізовано причини переходу від бінарних форматів модуляції до багаторівневих форматів модуляції та використання когерентних систем зв'язку. Показано принципи роботи когерентних гетеродинних і гомодинних приймачів, які забезпечують швидкість передачі інформації в одному каналі 100 Гбіт/с. Проведено порівняння різних форматів модуляції, що використовуються в сучасних системах зв'язку, за спектральною ефективністю. Виявлено обмеження на максимально допустиму вихідну потужність сигналу оптичних підсилювачів, що призводить до недопустимого розширення спектра випромінювання в одному оптичному каналі передачі.

У роботі автора Ібрагімова Р.З. та Фокіна В.Г. «Розрахунок оптичних параметрів DWDM-системи» запропоновано методику розрахунку оптичного відношення сигнал/шум для стандартних каналів високошвидкісних систем з N -числом оптичних секцій. Методика дозволяє враховувати перешкоди, що виникають під час поширення світла по різних типах оптичних волокон.

У дисертаційній роботі «Розробка методів оцінки перешкодостійкості когерентних оптичних систем зі спектральним ущільненням каналів» автора Р.З. Ібрагімова, метою якої є розвиток методології підвищення ефективності оцінки когерентних оптичних систем шляхом спільного врахування перешкод, що виникають при передачі цифрового сигналу по протяжних оптичних каналах, отримано такі результати:

- розроблено метод оцінки оптичного відношення сигнал/шум (OSNR), оснований на стандартизованій методиці Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т), який відрізняється спільним розрахунком перешкод чотирьоххвильового змішування і фазових спотворень, а також стимульованого розсіяння Рамана в заданому частотному діапазоні, що дозволяє підвищити ефективність розрахунку ймовірності помилки при проектуванні протяжних волоконно-оптичних DWDM-систем;
- розроблено метод оцінки OSNR в магістральних ROADMs;
- розроблено методики розрахунку граничної ширини спектра оптичного гетеродина в одноканальній системі;
- розроблено алгоритм відновлення фазових станів електричного сигналу при використанні оптичної модуляції DP-16QAM.

У роботі автора Трищекова В.Н. «Швидкісні DWDM-системи зі швидкістю каналу 100 Гбіт/с і вище» наведено опис систем DWDM, що застосовуються провідними операторами зв'язку Росії.

У роботі авторів Портнова Е.Л. та Фатхулїна Т.Д. «Аналіз розроблюваних технологій для досягнення максимальних швидкостей передачі інформації в сучасних DWDM-системах» представлений аналіз розроблюваних технологій, на базі яких реалізуються сучасні транспондери зі швидкістю каналу 100 Гбіт/с,

що забезпечують швидкість передачі до 8,8 Тбіт/с, використовуючи С-діапазон та сітку частот з кроком 50 ГГц, а також транспондери, що реалізують суперканали зі швидкістю передачі 1 Тбіт/с.

У статті «Аналіз структури ВОЛС з DWDM» авторів Храпова С.Д., Латипова О.О., Графовой Н.С., Старичихіна М.Г. розглянуті питання, пов'язані з коротким аналізом технології DWDM. Проведено аналіз передачі оптичного сигналу без впливу нелінійних спотворень.

У роботі авторів Sharan L., Shanbhag A.G., Chaubey V.K. «Дизайн і моделювання модифікованого дуплексного модуляційного 40 Гбіт/с 32-канального DWDM оптичного з'єднання для покращеної нелінійної продуктивності», а також авторів Богданова Е., Сигаєва А., Толстихіна І. «Імітаційне моделювання при розробці високошвидкісних систем DWDM» розглядаються питання організації високошвидкісних ВОЛС на базі спектрального мультиплексування.

У статті «Покращення продуктивності оптичного крос-комутатора в оптичній кільцевій метромережі для розширеної кількості користувачів і різних бітрейтів» авторів Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Naser A. Mohamed, Hamdy A. Sharshar, Mohamed Salah Tabour, Ahmed El-Sherbeny представлено моделювання резервування оптичних кілець системи DWDM, побудованої на основі оптичних крос-комутаторів.

У презентації «WDM the transmode way» представлено інформацію як про технологію WDM.

1.2 Висновки

Існуючі схеми резервування в мережах WDM, зокрема DWDM, є фундаментальними та загальновідомими, виходячи з аналізу літератури та наукових праць, де розглядаються питання резервування каналів WDM на оптичному та електричному рівнях, а також оптичних маршрутів WDM за схемами 1+1 і 1:1. Схеми резервування каналів WDM організовуються на рівні транспондерів, в складі яких використовуються оптичні крос-комутатори, що також застосовуються для захисту оптичних маршрутів WDM. Крім того, на практиці використовують простіший варіант резервування оптичних каналів і маршрутів – застосування кільцевої топології мережі WDM.

Аналізуючи ці схеми, можна виокремити недолік – це неефективне використання виділеного частотного діапазону (оптичних каналів) та висока вартість обладнання через використання оптичних крос-комутаторів. Крім цього, традиційні способи захисту оптичних каналів WDM не є гнучкими. Справа в тому, що у разі аварії на лінії або виходу з ладу транспондера в автоматичному режимі неможливо переключитися з одного оптичного каналу на інший, наприклад, з каналу №1 на канал №50. Це пояснюється тим, що оптичний канал WDM фізично прив'язаний до порту оптичного мультиплексора, реалізованого за технологією TFF або AWG. У таких ситуаціях перемикання відбувається вручну працівником зв'язку, який займається технічним обслуговуванням мережі WDM.

Рішення цієї проблеми добре відомі; для цього використовують оптичні крос-комутатори (OCS) великої ємності або активні мультиплексори введення-виведення ROADM з інтегрованими оптичними крос-комутаторами малої ємності. Очевидно, що використання такого роду обладнання призводить до підвищення вартості всієї мережі в цілому. Незважаючи на це, таке обладнання застосовується на великих міжміських транспортних магістралях систем DWDM.

Рішення подібних проблем, як у навчальній, так і в науковій літературі, не розглядається. Виходячи з цього, була запропонована ідея, в якій організація резервування каналів і маршрутів WDM буде реалізована на основі оптичного мультиплексора WDM (TFF або AWG), перебудовуваних транспондерів та додаткових пасивних компонентів, таких як двоканальний розгалужувач та поляризаційний сплітер. Загалом, це дозволить знизити вартість всієї системи DWDM за рахунок дешевих компонентів (поляризаційний сплітер, розгалужувач 1×2), вирішити проблему неефективного використання оптичних каналів, а також інтегрувати новий варіант схем резервування в діючі системи зв'язку WDM без значної реконструкції.

2 РОЗРОБКА НОВИХ ВАРІАНТІВ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ WDM

2.1 Розробка схем резервування каналів WDM з використанням пасивних компонентів

Аналізуючи традиційні схеми резервування каналів WDM у розглянутій літературі [1-13] та рекомендаціях [14-20], виділяється така проблема, як неефективне використання виділеного частотного діапазону в системах DWDM та неефективне підвищення пропускної спроможності під час організації резервування оптичних каналів. Рішенням подібних проблем є новий підхід до організації резервування оптичних каналів, при цьому ця проблема вирішується частково.

Виходячи з того, що використовувані компоненти в транспондерах мають високу надійність, можна стверджувати, що резервування каналів WDM доцільно організовувати на електричному рівні з використанням перебудовуваних лазерних діодів типу VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser – лазер з поверхневим випромінюванням і вертикальним резонатором) та пасивних компонентів, таких як оптичні розгалужувачі, напівпрозоре дзеркало (поляризаційний фільтр) та поляризатори світла. Схема представлена на рисунку 2.1.

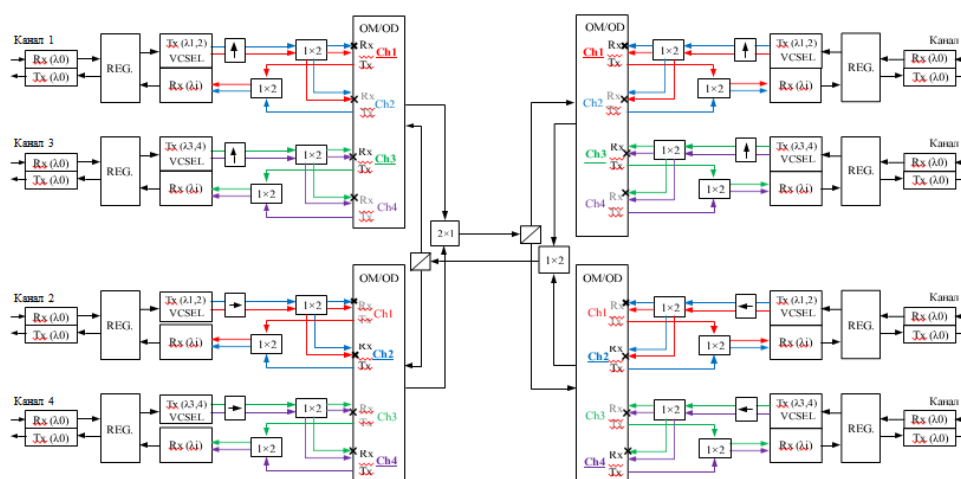


Рисунок 2.1 – Схема резервування оптичних маршрутів (каналів) з використанням пасивних компонентів

Використання оптичних поляризаторів світла, оптичних розгалужувачів 1×2 та напівпрозорих дзеркал дозволяє організувати простішу модель резервування оптичного каналу за схемами $1+1$ та $1:1$, при цьому кількість організованих основних і резервних каналів може становити 96. Резервні канали, що налічують 96, організуються на тих же довжинах хвиль, що й основні канали, але з іншим типом поляризації оптичного сигналу. Оскільки передаватимуться два WDM-сигнали з різною поляризацією, потрібно задіяти на передавальній та приймальній стороні два мультиплексори WDM. Верхні мультиплексори WDM дозволяють мультиплексувати і демультимплексувати оптичні канали з вертикальною поляризацією, а нижні мультиплексори WDM – оптичні канали з горизонтальною поляризацією.

Для об'єднання групового WDM-сигналу з різною поляризацією на виході мультиплексора WDM встановлюється оптичний розгалужувач (каблер) 2×1 . Для роз'єднання (демультимплексування) різнополяризованих сигналів WDM перед демультимплексором WDM встановлюється напівпрозоре дзеркало, яке виконує функцію поляризаційного демультимплексора.

Під час передачі клієнтських даних, наприклад, каналу 1, по основному оптичному каналу на довжині хвилі λ_1 , сигнал з розгалужувача 1×2 надходить на перший і другий оптичний порти мультиплексора (Ch1 і Ch2). Оскільки другий порт мультиплексора налаштований на довжину хвилі λ_2 , сигнал на довжині хвилі λ_1 підлягає перехідному затуханню цього порту, що призводить до блокування сигналу на довжині хвилі λ_1 на оптичному порту мультиплексора Ch2, як показано на рисунку 2.9. На приймальній стороні ситуація аналогічна: сигнал на довжині хвилі λ_1 буде спостерігатися на виході оптичного порту Ch1, а на виході порту Ch2 сигнал на довжині хвилі λ_1 буде заблокований.

Якщо потрібно передати клієнтські дані (канал 1) по резервному каналу на λ_2 , на приймальній стороні виконується перестройка лазера VCSEL з довжини хвилі λ_1 на довжину λ_2 . Фізика передачі оптичних сигналів на резервній довжині хвилі λ_2 для клієнтського каналу №1 аналогічна довжині

хвилі λ_1 . При цьому сигнал на довжині хвилі λ_2 з вертикальною поляризацією в теорії не заважає сигналу на довжині хвилі λ_2 з горизонтальною поляризацією для клієнтського каналу №3.

Представлений варіант резервування каналу WDM не гарантує стопроцентного резерву, оскільки на ділянці між транспондером і мультиплексором задіяний один лазерний діод і фотодіод, незважаючи на їх високу надійність. Крім того, розроблений варіант резервування оптичного каналу еквівалентний резервуванню оптичного маршруту системи WDM, що є практичнішим для організації резервування за схемою, представленою на рисунку 1.31.

Підвищення надійності розробленої схеми резервування (рисунк 2.1) потребує доопрацювання. Для цього необхідно задіяти два джерела оптичного випромінювання та два фотодіоди на ділянці мультиплексор – транспондер; при цьому використання перебудовуваних джерел випромінювання (VCSEL) не є обов'язковим. У такому випадку отримуємо схему резервування оптичних каналів на електричному рівні. Типова схема на чотири канали представлена на рисунку 2.10; при цьому можуть бути задіяні всі 96 оптичних каналів.

Представлене резервування оптичних каналів на рисунку 2.2 може організовуватися як за схемою 1:1, так і за схемою 1+1. Однак схема, представлена на рисунку 2.2, так само як і схема на рисунку 2.1, не гарантує стопроцентного резервування оптичного каналу. У цьому випадку схему, представлену на рисунку 2.2, також можна доопрацювати до рівня стопроцентного резервування оптичного каналу.

Для цього потрібно з боку клієнта задіяти два оптичні перемикачі, два фотодіоди і два лазерні діоди. Схема резервування оптичних каналів на оптичному рівні, яка дозволяє задіяти всі канали системи DWDM згідно з рекомендацією ITU-T G.694, представлена на рисунку 2.3. Ця схема може працювати як за схемою 1+1, так і за схемою 1:1.

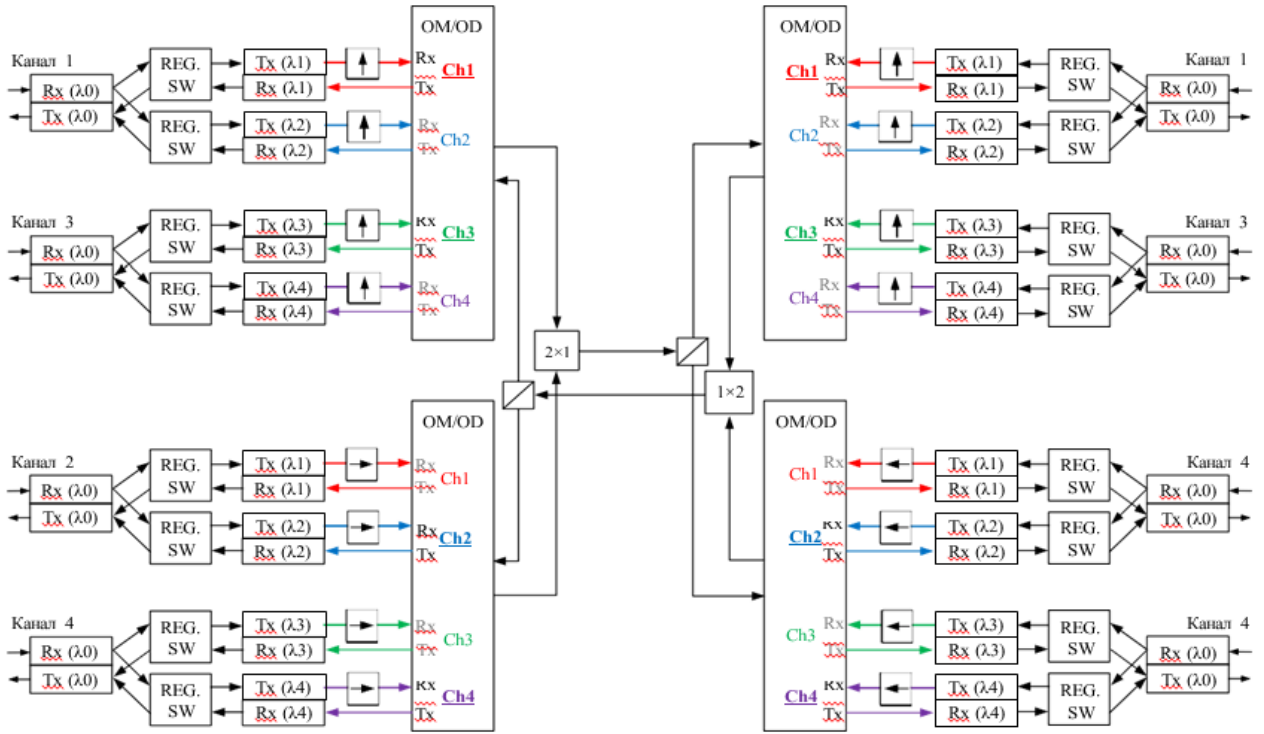


Рисунок 2.2 – Структурна схема резервування оптичних каналів на електричному рівні з використанням пасивних компонентів

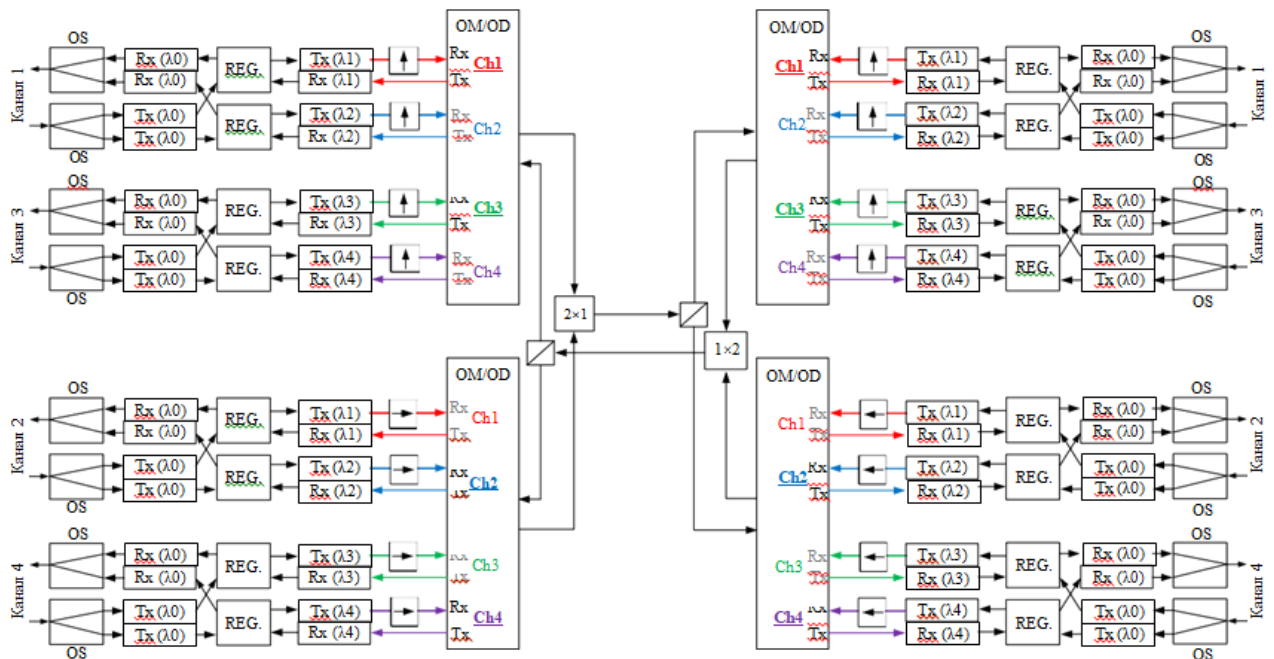


Рисунок 2.3 – Структурна схема резервування оптичних каналів на оптичному рівні з використанням пасивних компонентів

2.2 Схеми резервування оптичних каналів на рівні птранспондерів

Однак розроблені схеми (рисунок 2.1 – 2.3), в яких застосовуються поляризаційне мультиплексування і демультимплексування за допомогою розгалужувача 2×1 та напівпрозорого дзеркала, не дозволяють організувати передачу оптичних каналів WDM з такими форматами модуляції, як DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM, DP-32QAM, забезпечує передачу клієнтських даних зі швидкістю від 100 Гбіт/с до 400 Гбіт/с [21]. Це пояснюється тим, що в цих форматах модуляції застосовується подвійна поляризація (DP - Double Polarization) оптичного сигналу, що критично вплине на передачу та прийом такого формату сигналу в зазначених схемах. Використання таких схем резервування орієнтоване на резервування оптичних каналів з амплітудною або фазовою модуляцією оптичної несучої, що має пропускну спроможність десятки гігабіт на секунду.

Крім того, залишається відкритим питання про те, як на практиці поводитиме себе процес мультиплексування та демультимплексування поляризаційних WDM-сигналів, що потребує проведення математичного моделювання для оцінки якісних показників системи WDM, зокрема коефіцієнта помилок. Окрім цієї моделі організації резервування оптичних каналів, можна запропонувати модель з резервуванням оптичних каналів на рівні транспондера, де резервування організовується не для окремих компонентів транспондера, а для всього транспондера.

У схемах, представлених на рисунках 1.22 – 1.25, при «повному» виході з ладу одного з транспондерів, наприклад, у разі відмови системи живлення одного з транспондерів, відбудеться втрата двох оптичних каналів. У такому випадку відновлення працездатності оптичного каналу можливе в кільцевій (решітчастій) топології за рахунок перенаправлення оптичного каналу за резервним оптичним маршрутом (сегментом оптичного кільця). У випадку такої аварії в мережах WDM лінійної топології можна задіяти схему, представлену на рисунку 2.1, без поляризаторів і поляризаційних сплітерів.

Для стопроцентного резервування оптичного каналу на оптичному рівні необхідно додатково організувати резервний оптичний порт зі сторони клієнта. Типова схема резервування представлена на рисунку 2.4. Використання такої схеми знову призводить до неефективного використання виділеного частотного діапазону, тобто половина оптичних каналів залишиться невикористаною. Схема резервування, представлена на рисунку 2.4, може працювати в режимах як 1+1, так і 1:1.

Приклад захисту оптичних каналів у мережі WDM лінійної топології з використанням схеми резервування оптичних каналів на рівні транспондерів представлений на рисунку 2.5.

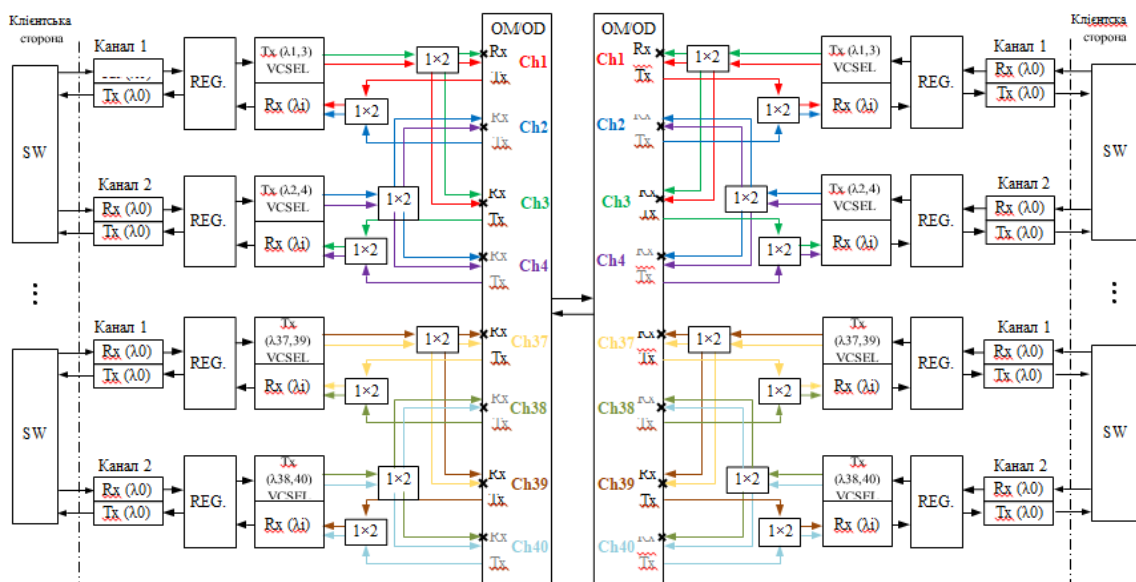


Рисунок 2.4 – Структурна схема резервування оптичних каналів на рівні транспондерів

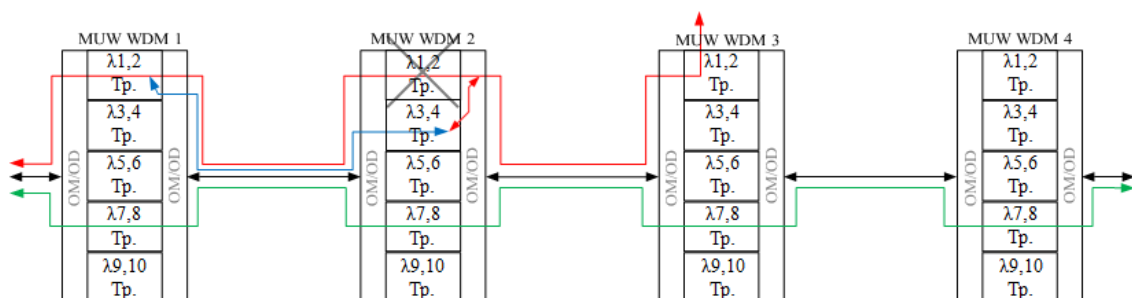


Рисунок 2.5 – Резервування оптичних каналів WDM у лінійній топології на рівні транспондерів

Такий підхід до резервування орієнтований на оптичні канали з високим пріоритетом. У цьому прикладі довжина хвилі $\lambda_{3,4}$ на ділянці мультиплексора WDM MUX 1 і WDM MUX 2, на якій передавалися дані клієнта з низьким пріоритетом, буде задіяна для передачі даних клієнта з високим пріоритетом.

2.3 Резервування оптичних каналів WDM на оптичному рівні та рівні транспондера

Якщо об'єднати розроблені схеми, представлені на рисунках 2.3 і 2.4, отримаємо схему стопроцентного резервування оптичних каналів WDM на оптичному рівні та рівні транспондера (рисунок 2.6), що дозволить реалізувати мережу DWDM з використанням усіх 96 оптичних каналів, але з пропускнуною спроможністю на канал не більше 40 Гбіт/с. Як було раніше сказано, швидкість оптичного каналу в цій схемі обмежується форматом модуляції оптичної несучої, а якісні показники залежать від можливості мультиплексування та демультиплексування поляризованих WDM-сигналів, що вимагає проведення моделювання розроблених схем з метою оцінки їх застосовності на практиці.

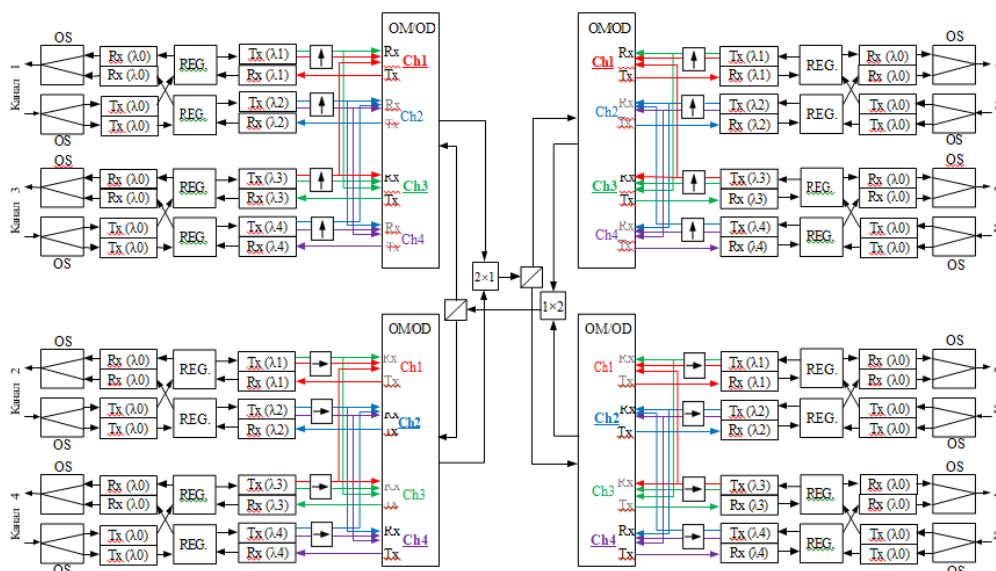


Рисунок 2.6 – Схема резервування оптичних каналів на оптичному рівні з резервуванням транспондерів на основі пасивних компонентів

2.4 Висновки

Розроблені схеми резервування оптичних каналів і маршрутів WDM, які реалізовані на основі пасивних компонентів, таких як оптичний поляризатор, оптичний розгалужувач 1×2 та поляризаційний сплітер, дозволяють забезпечити стопроцентне резервування всіх оптичних каналів системи DWDM без застосування дорогих оптичних крос-комутаторів великої ємності та активних мультиплексорів введення-виведення ROADM. Це також допомагає вирішити проблему ефективного використання всіх оптичних каналів за рахунок передачі основного та резервного каналу в різнополяризованих каналах WDM, тоді як у традиційних схемах з 96 можливих каналів 48 відводиться на резерв, а 48 – для передачі даних.

Слід зазначити, що резервування буде реалізовано на основі перебудовуваних транспондерів, у яких використовуються такі джерела випромінювання, як лазерні діоди з вертикальним резонатором і поверхневим випромінюванням (VCSEL). Незважаючи на те, що вартість цих лазерів вища в порівнянні з РБО-лазерами (часто використовуваними в системах DWDM), загальна вартість системи DWDM, у якій резервування буде реалізовано на основі цих компонентів, буде нижчою, на відміну від використання оптичних крос-комутаторів великої ємності та мультиплексорів ROADM. Також слід відзначити, що інтеграція нових схем резервування потребує модернізації програмного забезпечення, яке відповідатиме за управління транспондерами.

Для перевірки працездатності розроблених схем резервування та оцінки їх практичної застосовності необхідно провести моделювання в середовищі CAD (Система Автоматизації Проектних Робіт).

3 МОДЕЛЮВАННЯ НОВИХ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ WDM

3.1 Постановка задачі

Для оцінки практичної застосовності розроблених схем резервування оптичних каналів WDM необхідно виконати математичне моделювання. Моделювання буде здійснюватися за наступних умов:

- для спрощення моделювання розглядаємо мережу DWDM лінійної топології з одним проміжним вузлом без підсилювальних пунктів;
- довжину секції мультиплексування приймаємо рівною 80 км, оскільки середній енергетичний потенціал системи передачі DWDM, значення якого становить 28 дБ, дозволяє перекрити довжину волоконно-оптичної лінії до 90 км залежно від коефіцієнта кілометрового затухання оптоволокна;
- частотна сітка DWDM-системи відповідає кроку 100 ГГц (0,8 нм), оскільки більшість обладнання DWDM працює у цій частотній сітці;
- з огляду на обмеження продуктивності обчислювальної техніки кількість мультиплексованих каналів приймемо рівною чотирьом;
- як формат лінійного кодування доцільно застосувати RZ або NRZ, як найпоширеніший та найпростіший формат лінійного кодування;
- щоб зменшити вплив перехресних завад і міжсимвольної інтерференції на якість зв'язку, швидкість інтерфейсного потоку приймемо рівною 10 Гбіт/с;
- тип волокна – одномодове стандартне волокно згідно з рекомендацією ITU-T G.652;
- моделювання резервування на рівні транспондерів не розглядатиметься, оскільки цей метод резервування є традиційним і широко застосовується на практиці;
- для спрощення схем (коду програми) доцільно розглянути симплексний режим передачі чотирьох каналів WDM.

Виходячи з наведених умов, у роботі буде розглянуто моделювання схем резервування оптичних каналів, представлених на рисунках 2.1, 2.4 та 2.6. Це

обґрунтовано тим, що схеми резервування на рисунках 2.2, 2.3 та 2.6 є однотипними, різниця лише в резервуванні на рівні транспондерів, а згідно з умовами моделювання, транспондери не розглядатимуться. Надалі схеми на рисунках 2.1, 2.5 і 2.6 будуть називатися як схеми резервування оптичного каналу першої, другої та третьої версій відповідно. Застосовність розроблених схем резервування WDM на практиці слід оцінювати на основі таких фундаментальних параметрів каналу зв'язку, як коефіцієнт помилок і очкова діаграма.

3.2 Вибір програмного забезпечення для моделювання

Програмне забезпечення для моделювання розроблених схем резервування каналів WDM доцільно обирати з лінійки прикладних програм, що належать до систем автоматизованого проєктування (САПР), які дозволяють моделювати як телекомунікаційні мережі в цілому, так і окремі вузли та компоненти цих мереж. До таких програмних продуктів належать:

- Matlab Simulink;
- LabVIEW;
- OptiSystem.

Перспективним варіантом вважається система автоматизованого проєктування OptiSystem, оскільки вона орієнтована на вирішення складних завдань розробки, моделювання, тестування та оптимізації різних типів оптичних ліній зв'язку – від систем кабельного телебачення до магістральних ліній зв'язку стандарту DWDM.

Програмне забезпечення OptiSystem містить велику бібліотеку активних і пасивних компонентів, які мають частотно-залежні та динамічні параметри, що дозволяє дослідити вплив технічних характеристик компонентів на роботу ВОСП. Використання OptiSystem дозволяє швидко та економічно розробити модель мережі, зрозуміти процеси як в окремих блоках, так і в системі в цілому, а також отримати доступ до численних налаштувань, що визначають характеристики ВОСП, для глибокого дослідження оптичної системи.

OptiSystem включає широкий вибір оптичних та електричних компонентів, на основі яких виконується розробка не лише оптичних транспортних систем зв'язку та мереж доступу, а й передавачів і приймачів, підсилювачів, компенсаторів дисперсії, оптичних волокон, фільтрів та мультиплексорів. Для оцінки працездатності мережі чи окремих компонентів OptiSystem містить віртуальні прилади для вимірювання коефіцієнта помилок, рівня оптичного сигналу, отримання очкової діаграми та аналізу спектра сигналу [22] .

Графічний інтерфейс OptiSystem є інтуїтивно зрозумілим і простим, вигляд якого представлено на рисунку 3.1. Інтерфейс складається з чотирьох полів: перше поле – це меню програми, у другому полі представлена бібліотека OptiSystem, у третьому полі розробляється блок-діаграма досліджуваної лінії зв'язку або окремого компонента, а в четвертому полі розміщені інструменти для візуалізації блок-схеми.

Бібліотека OptiSystem складається з п'яти компонентів, чотири з яких («Custom», «Favorites», «Recently used», «Subsystems») є порожніми і призначені для користувацьких розробок. Бібліотека «Default» містить список активних і пасивних компонентів, на основі яких розробляються блок-схеми електричних, оптичних та електрооптичних вузлів телекомунікаційного обладнання. Структура бібліотеки «Default» представлена на рисунку 3.2.



Рисунок 3.1 – Інтерфейс програми OptiSystem

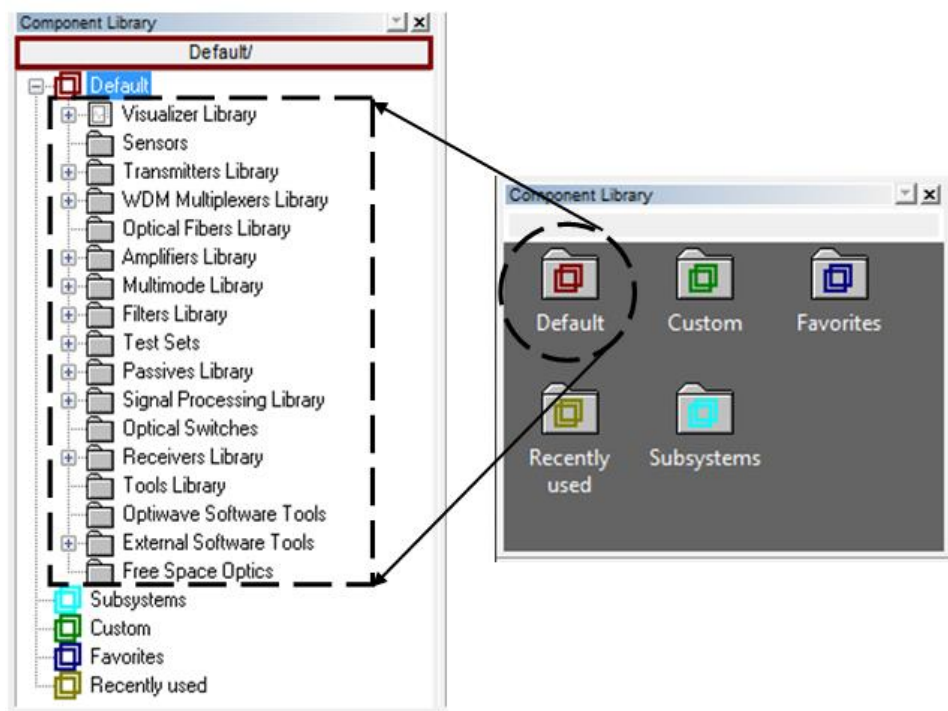


Рисунок 3.2 – Структура бібліотеки «Default»

Перед розробкою нової блок-схеми необхідно створити новий проєкт, вибравши в меню пункт File – New project. У полі №3 головного інтерфейсу з'явиться основна робоча область (рисунок 3.3), на якій розробляється блок-схема.

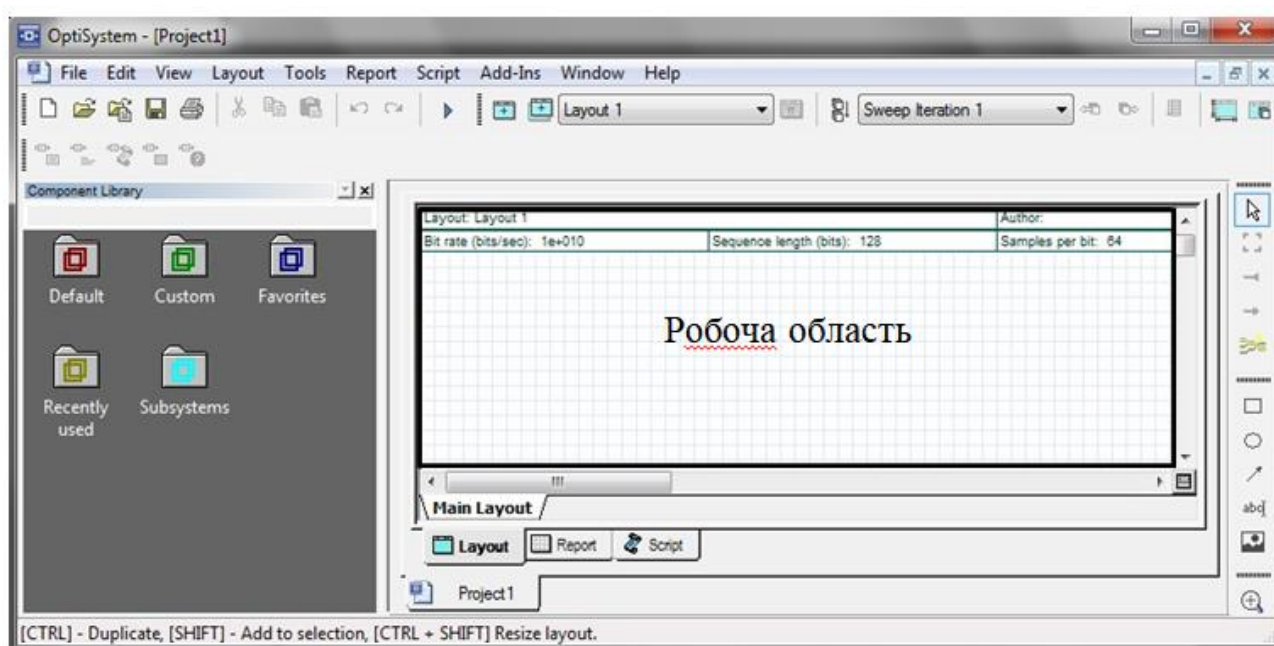


Рисунок 3.3 – Робоча область з розміткою інтерфейсу програми OptiSystem для розробки блок-схем

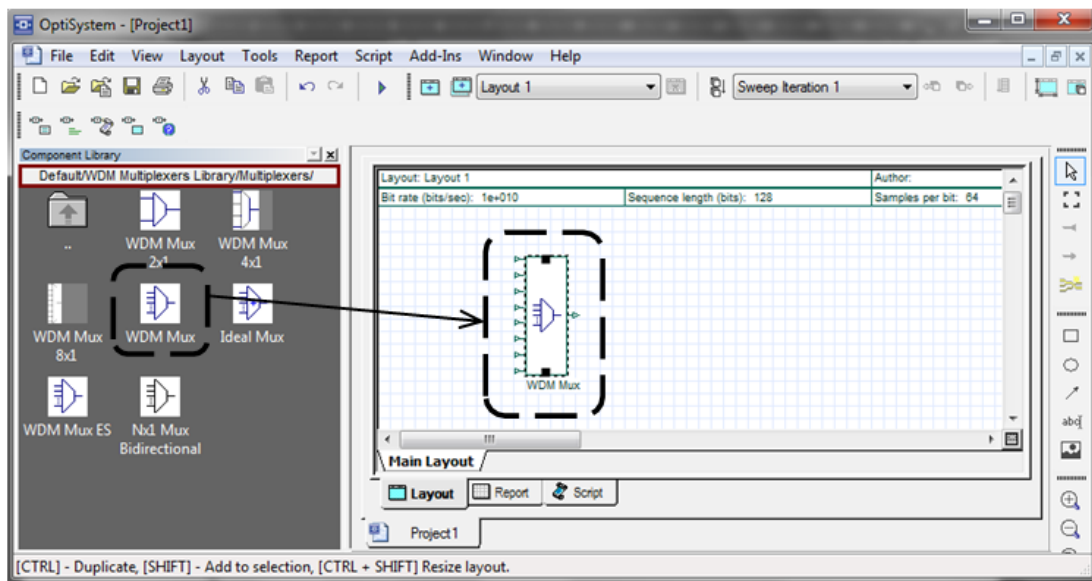


Рисунок 3.4 – Переміщення елемента з бібліотеки «Default» на робочу область

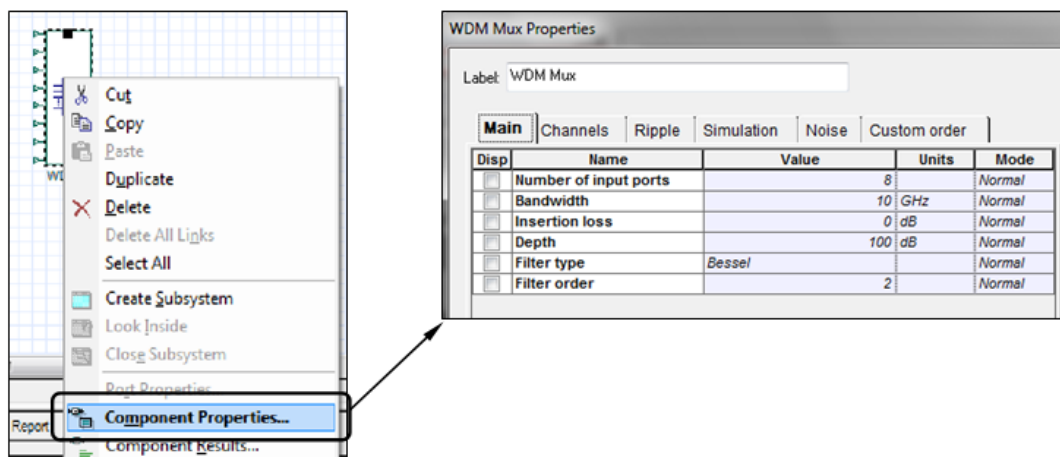


Рисунок 3.5 – Налаштування параметрів елемента з бібліотеки «Default»

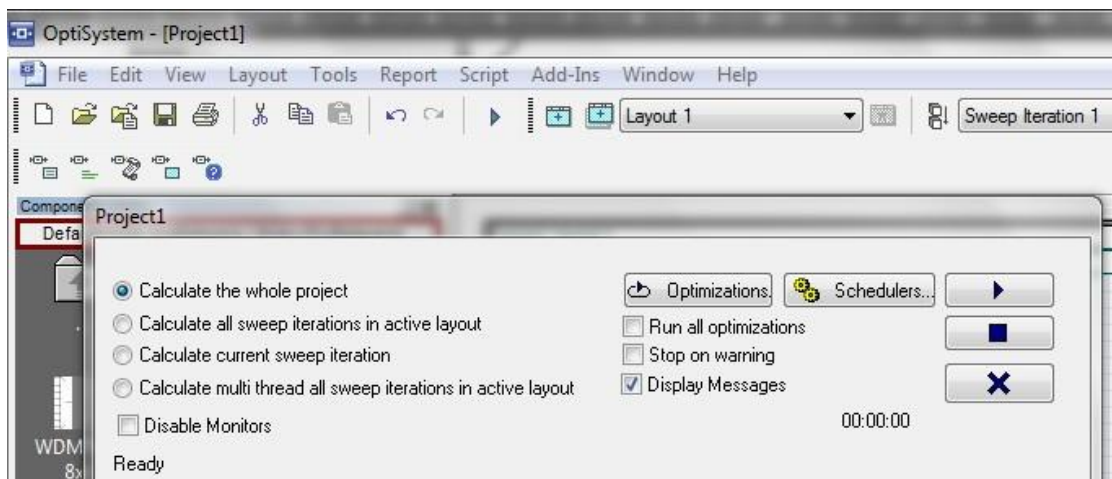


Рисунок 3.6 – Схема запуску моделювання в САПР OptiSystem

3.3 Розробка блок-схем резервування оптичних каналів WDM

3.3.1 Розробка першої версії блок-схеми резервування оптичного каналу WDM

Для моделювання схеми, представленої на рисунку 2.1, у САПР OptiSystem будуть задіяні наступні компоненти.

Чотири джерела оптичного випромінювання (лазерні діоди), які будуть моделювати керовані лазери типу VCSEL. Налаштування основних параметрів виконуватиметься вручну. Для цього в параметрах цього елемента задається довжина хвилі (частота оптичного випромінювання), бітова швидкість, тип модуляції, потужність оптичного випромінювання; решта параметрів залишаються без змін. Для кожного з чотирьох джерел оптичного випромінювання довжина хвилі задається відповідно до частотного плану: перший оптичний канал використовуватиме довжину хвилі 1552,52 нм (193,1 ТГц), другий канал – 1550,91 нм (193,3 ТГц), третій канал – 1551,72 нм (193,2 ТГц), а четвертий канал – 1550,11 нм (193,4 ТГц). За замовчуванням бітова швидкість становить 10 Гбіт/с, тип модуляції інтенсивності світла – NRZ (Non Return to Zero – лінійний код без повернення до нуля). Потужність оптичного випромінювання встановлюється на рівні 0 дБм як середнє значення потужності лазерного діода, яка може варіюватися від -5 дБм до +5 дБм. На рисунку 3.7 показано інтерфейс налаштування основних параметрів джерела оптичного випромінювання (ДОВ).

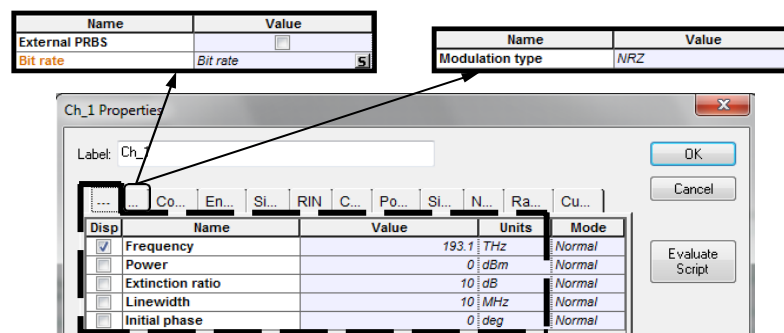


Рисунок 3.7 – Інтерфейс налаштування параметрів ДОВ (джерела оптичного випромінювання)

Чотири лінійні поляризатори світла призначені для поляризації оптичного випромінювання, що генерується лазерним діодом. Для непарних каналів (першого і третього) значення поляризації становитиме нуль градусів, що відповідає горизонтальній поляризації; для парних каналів (другого і четвертого) значення поляризації становитиме дев'яносто градусів, що відповідає вертикальній поляризації. В параметрах поляризатора встановлюється кут лінійної поляризації, інтерфейс меню наведений на рисунку 3.8.

Чотири приймачі оптичного випромінювання (фотодіоди) виконують функцію перетворення оптичного сигналу в електричний, а також функцію регенерації електричного сигналу за схемою 3R (підсилення, відновлення форми сигналу та ресинхронізація). Як фотодіоди будуть застосовані PIN-фотодіоди, оскільки цей тип фотоприймачів вносить менше власних шумів, а його енергетичний параметр (чутливість), у поєднанні з потужністю лазерного діода, дозволяє покривати дальність зв'язку до 80 км. У параметрах цього елемента налаштовуються чотири основні характеристики: тип фотодіода, значення темного струму, який впливає на величину власних шумів, тип напівпровідникового матеріалу (зокрема застосовано InGaAs — індій арсенід галію) та мінімальна чутливість фотодіода. На рисунку 3.9 представлено інтерфейс налаштування основних параметрів фотодіода.

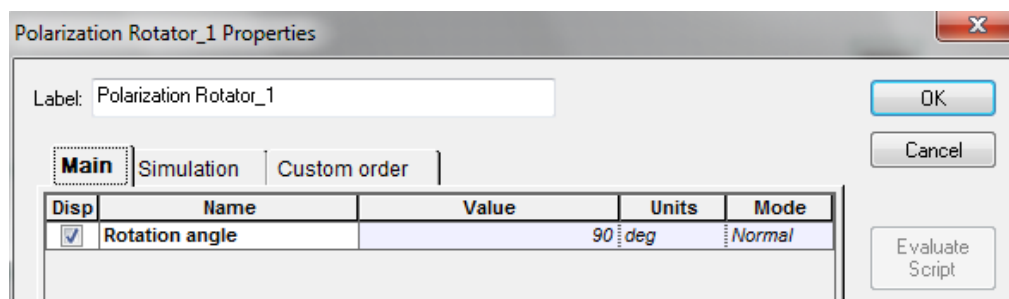


Рисунок 3.8 – Інтерфейс налаштування поляризатора

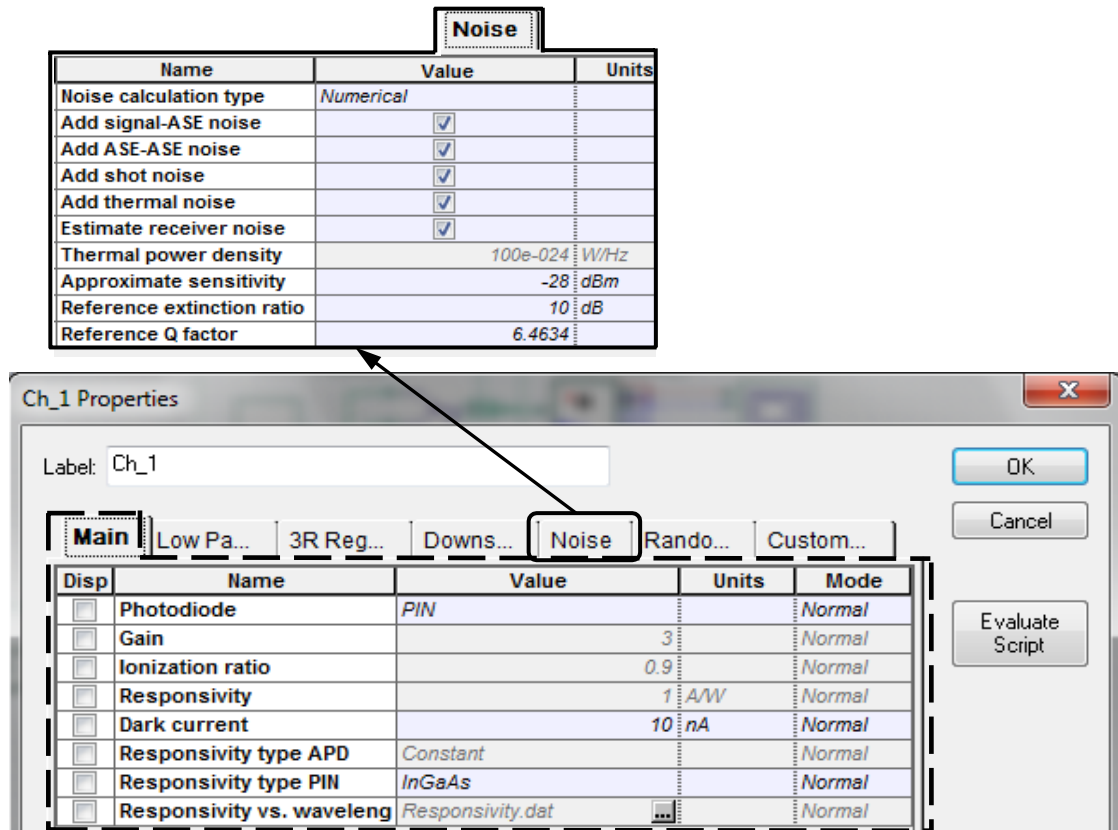
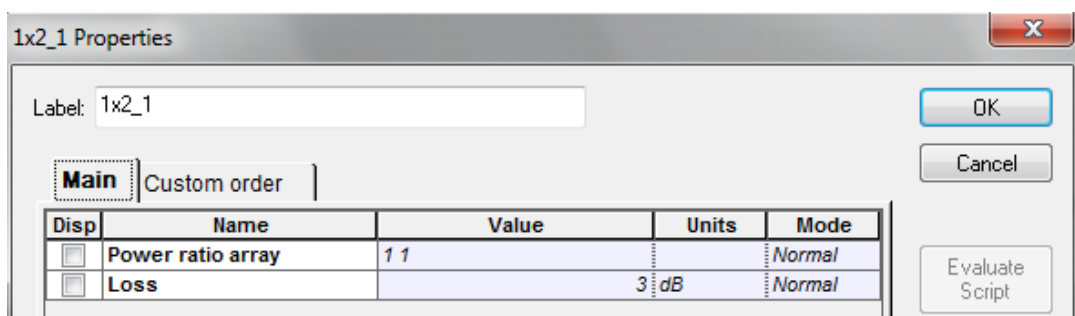
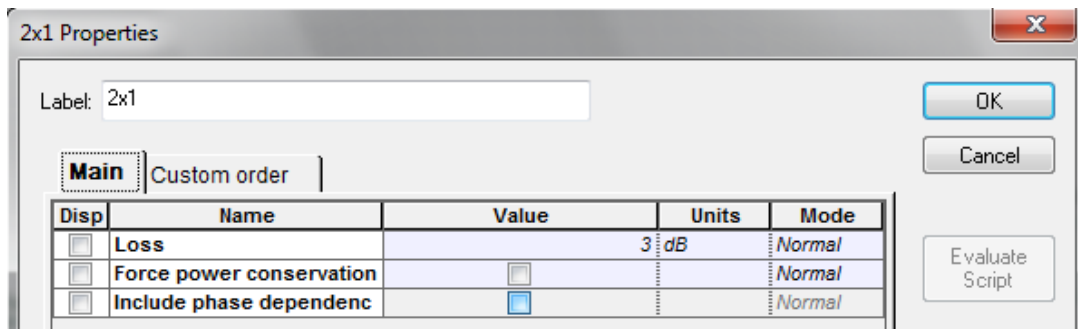


Рисунок 3.9 – Інтерфейс налаштування основних параметрів фотодіода

Для розгалуження (розподілу) оптичного сигналу, відповідно до схеми, представленої на рисунку 2.9, потрібно використовувати оптичні розгалужувачі типу 1×2 та оптичні об'єднувачі типу 2×1. В характеристиках цих пасивних елементів задається єдиний параметр – оптичні втрати, значення яких становить 3 дБ, що не перевищує максимально допустимі втрати оптичного розгалужувача PLC, які складають 4 дБ. Інтерфейс налаштування параметрів оптичного розгалужувача та об'єднувача представлений на рисунку 3.10.



a)



б)

Рисунок 3.10 – Інтерфейс налаштування параметрів оптичного розгалужувача (а) та об'єднувача (б)

Два мультиплексори та демультиплексори WDM, з кроком мультиплексування 100 ГГц, мають вносимі оптичні втрати 3 дБ та перехідне згасання між каналами в 40 дБ. Основними налаштовуваними параметрами є: кількість мультиплексованих/демультиплексованих оптичних каналів, вносимі втрати, крок мультиплексування, тип фільтра, значення довжин хвиль. Інтерфейс налаштування параметрів мультиплексора та демультиплексора представлений на рисунку 3.11.

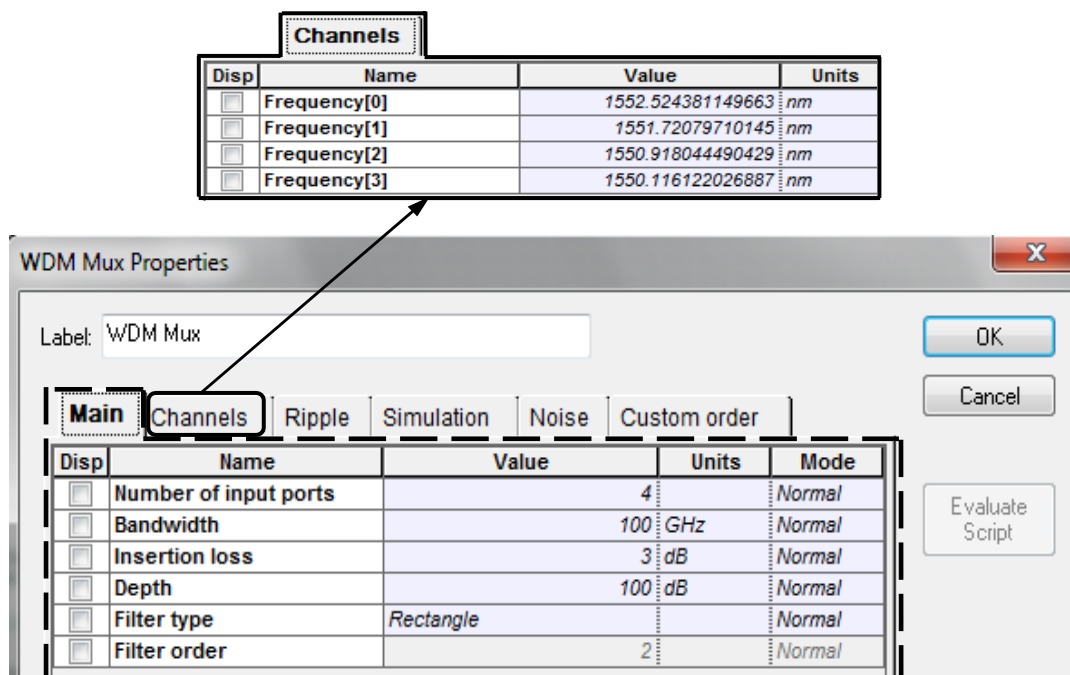


Рисунок 3.11 – Інтерфейс налаштування параметрів мультиплексора та демультиплексора

Оптичне волокно, яке імітує оптичну лінію зв'язку довжиною 80 км. Стандарт оптичного волокна відповідає рекомендаціям ITU-T G.652, з кілометровим затуханням 0,2 дБ/км і дисперсійним хроматичним параметром 18 пс/нм/км. У характеристиках компонента налаштовується лише один параметр – довжина волоконно-оптичної лінії зв'язку (ВОЛС). Інші параметри залишаються без змін, оскільки метою даної роботи є оцінка застосовності нових методів резервування каналів WDM, а не дослідження впливу параметрів ВОЛС на якість зв'язку. На рисунку 3.12 представлено інтерфейс налаштування параметрів ВОЛС.

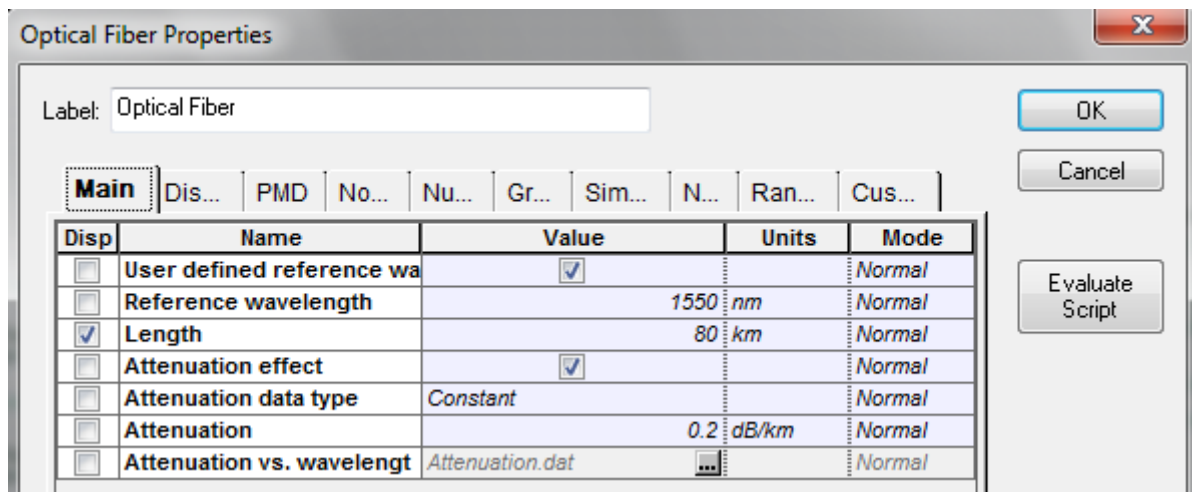


Рисунок 3.12 – Інтерфейс налаштування параметрів ВОЛС

Для розділення поляризованих оптичних сигналів на прийомі необхідно використовувати поляризаційний спліттер. Цей компонент, як пасивний пристрій, вносить оптичні втрати, які не перевищують 3 дБ. У налаштуваннях поляризаційного спліттера задається лише один параметр – кут поляризації, який за замовчуванням становить нуль градусів. Інтерфейс налаштування поляризаційного спліттера представлений на рисунку 3.13.

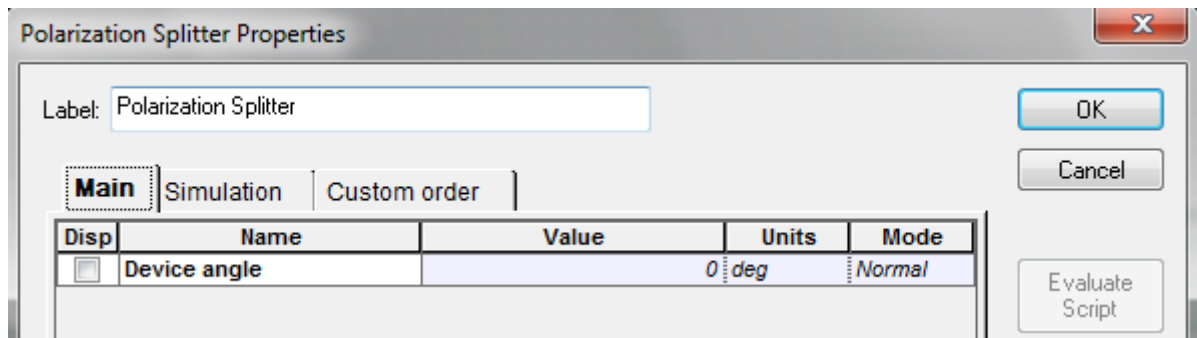


Рисунок 3.13 – Інтерфейс налаштування поляризаційного спліттера

Як показали перші результати моделювання, для мережі WDM довжиною 80 км, в якій інтегровані додаткові пасивні компоненти, такі як оптичний розгалужувач, об'єднувач та поляризаційний спліттер, не досягається необхідний коефіцієнт помилок. Для досягнення потрібного коефіцієнта помилок необхідна установка оптичного попереднього підсилювача, який компенсуватиме оптичні втрати пасивних компонентів. Таким чином, у якості попереднього підсилювача буде використано оптичні підсилювачі EDFA. Основні параметри підсилювача EDFA залишаються без змін. На рисунку 3.14 представлено інтерфейс налаштування параметрів підсилювача EDFA.

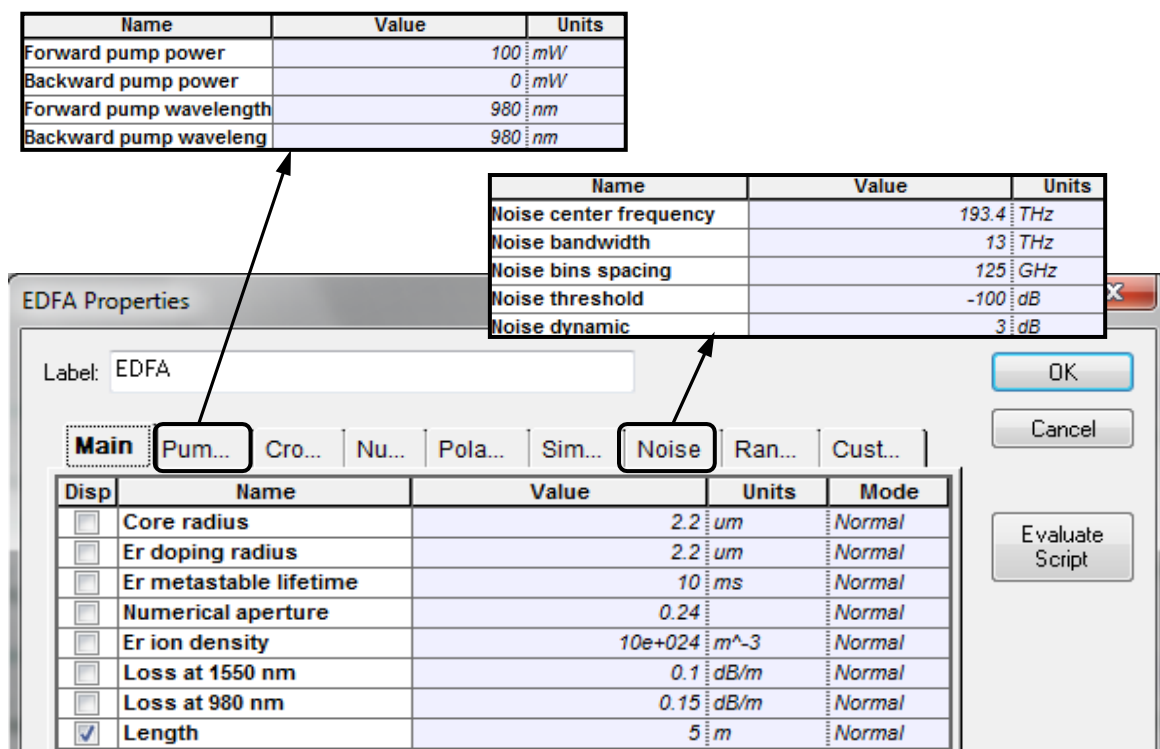


Рисунок 3.14 – Інтерфейс налаштування параметрів підсилювача EDFA

Блок-схема резервування оптичних каналів (маршрутів) із застосуванням пасивних компонентів (оптичних розгалужувачів, об'єднувачів і поляризаційних спліттерів), розроблена в середовищі САПР OptiSystem, представлена на рисунку 3.15. Для аналізу працездатності схеми резервування оптичних каналів першої версії використовуються вимірювальні інструменти:

- аналізатор WDM сигналу (WDM Analyzer);
- аналізатор «око-діаграми» (Eye Diagram Analyzer).

В аналізаторі WDM сигналу результати вимірювань відображаються у вигляді числових значень параметрів оптичного WDM каналу, таких як потужність оптичного каналу, довжина хвилі (частота) оптичного каналу, рівень шуму, співвідношення сигнал/шум (SNR – Signal to Noise Ratio). В аналізаторі «око-діаграми» результати вимірювань показуються у вигляді числових і графічних значень. До числових показників належать коефіцієнт помилок і Q-фактор, до графічних значень – «око-діаграми» та Q-фактор.

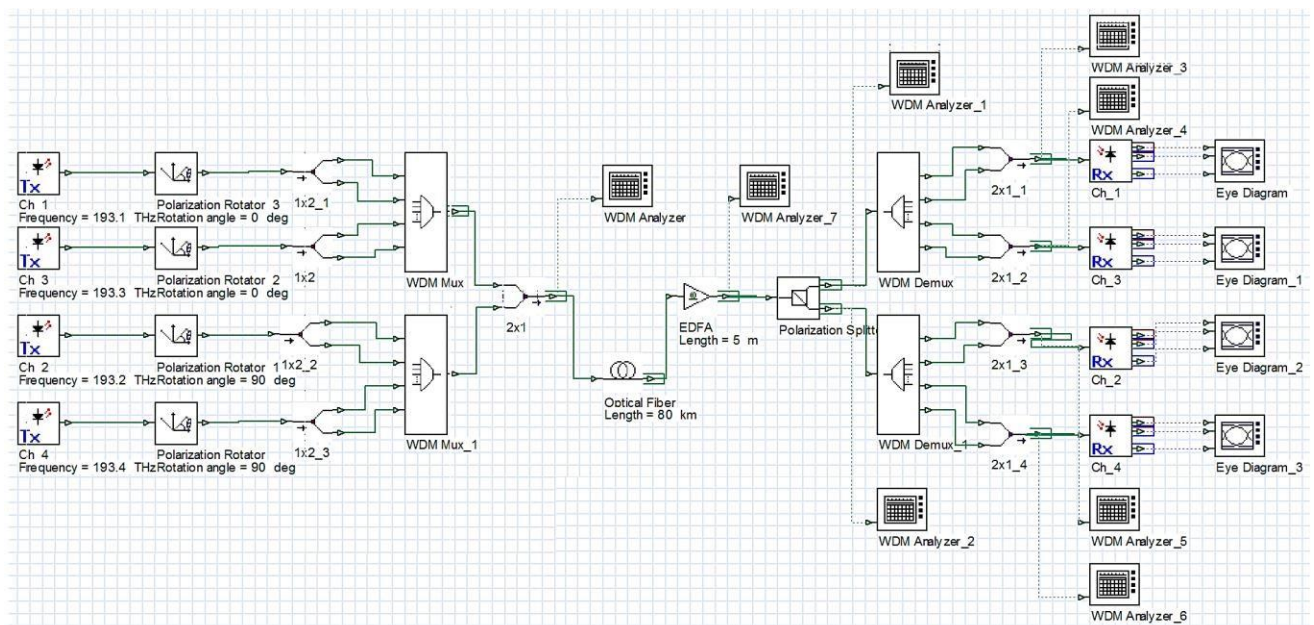


Рисунок 3.15 – Блок-схема резервування оптичних каналів для першої версії

3.3.2 Результати моделювання першої версії схеми резервування оптичних каналів WDM

Результати моделювання представлені на рисунку 3.16. Значення коефіцієнта помилок для оптичних каналів складають:

- перший канал: $8,4 \times 10^{-6}$;
- другий канал: $2,3 \times 10^{-5}$;
- третій канал: $6,4 \times 10^{-6}$.
- четвертий канал: $7,3 \times 10^{-5}$

Рекомендуємий коефіцієнт помилок для ВОЛС довжиною 80 км розраховується за формулою:

$$K_{ном80км} = 10^{-10} \times 80 = 8 \times 10^{-9} \quad (3.1)$$

де $K_{номL_x}$ - розрахований коефіцієнт помилок для ВОЛС з протяжністю секції мультиплексування L_x ;

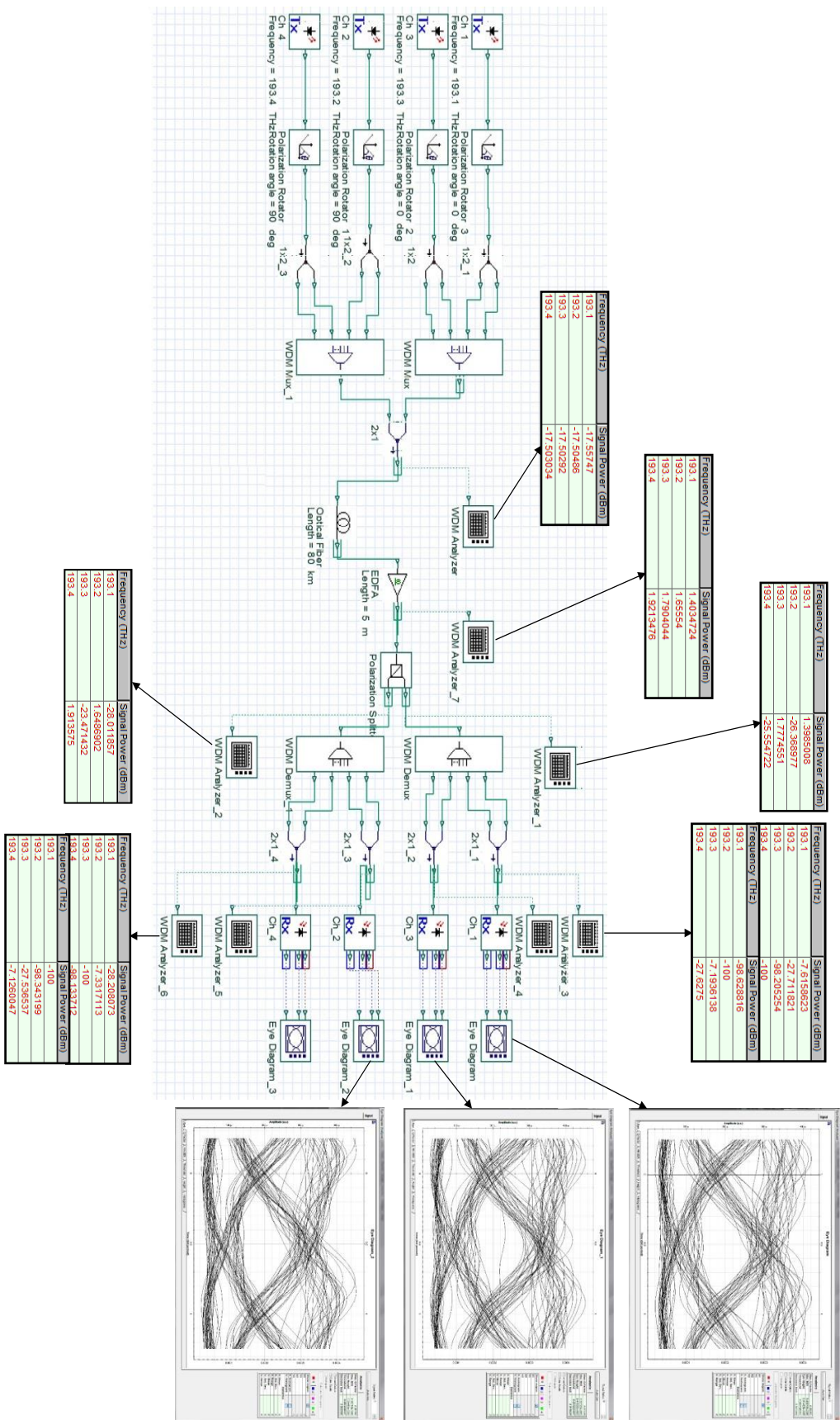
$K_{ном1км}$ - нормований коефіцієнт помилок на 1 км лінії зв'язку;

L_x - довжина секції мультиплексування (регенерації).

Коефіцієнт помилок на 1 км лінії зв'язку розраховується на основі нормованого коефіцієнта помилок для магістралі довжиною 10 000 км, який становить 10^{-6} . Тоді $K_{номL_x} = 10^{-10}$, а для 80 км складе:

$$K_{ном80км} = 10^{-10} \times 80 = 8 \times 10^{-9}$$

Рисунок 3.16 – Результати моделювання



Отримані результати моделювання в 1000 разів перевищують розрахункове аналітичне значення коефіцієнта помилок для лінії довжиною 80 км. По-перше, це пов'язано з систематичною помилкою на програмному рівні, оскільки в процесі моделювання коефіцієнт помилок не залежить від часу тестування чи алгоритму обробки прийнятого сигналу, а залежить від кількості ітерацій (вибірок), що впливають на час розрахунку. Як правило, кількість вибірок вибирається так, щоб забезпечити оцінку якогось параметра при оптимальних параметрах системи. Як показували проміжні результати моделювання, коефіцієнт помилок варіювався від 10^{-3} до 10^{-6} .

По-друге, це обумовлено перехідними процесами між суміжними оптичними каналами на прийомі. Так, для першого оптичного каналу на вході фотодіода спостерігаються спектральні складові сусіднього каналу, рівень яких відрізняється на 20 дБм, що впливає на збільшення коефіцієнта помилок. Основна причина перехідних процесів між оптичними каналами – це недосконалість параметрів оптичних компонентів (оптичний мультиплексор/демультиплексор, поляризаційний спліттер), таких як перехідне затухання. Чим більше значення перехідного затухання, тим менший вплив сусідніх каналів.

Для компенсації перехідних завад можна використовувати оптичні компоненти (оптичний мультиплексор/демультиплексор, поляризаційний спліттер) з більшим значенням перехідного затухання для сусідніх каналів або додатково залучити бустер, або зменшити довжину секції мультиплексування, наприклад, до 70 км, що забезпечить приріст у перехідному затуханні на 2 дБ і зменшить коефіцієнт помилок в 1000 разів складає $5,6 \times 10^{-9}$. Результат моделювання представлений на рисунку 3.17.

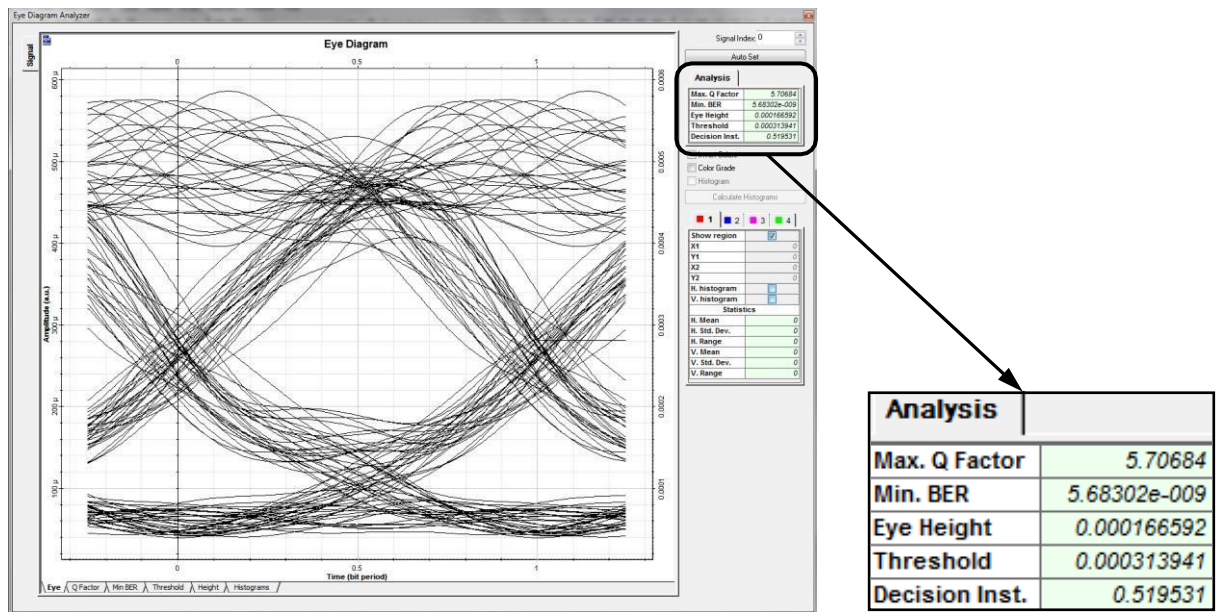


Рисунок 3.17 – Результат моделювання першої версії схеми резервування оптичного каналу для секції мультиплексування довжиною 70 км

Основаючись на позитивних результатах моделювання схеми резервування оптичного каналу першої версії (рисунок 2.9), можна стверджувати, що цей варіант резервування може бути використаний на практиці як у новозбудованих мережах, так і на існуючих об'єктах зв'язку. Для цього достатньо інтегрувати в діюче обладнання оптичні розгалужувачі/об'єднувачі, поляризатори, поляризаційний спліттер і передавальні модулі з перестраюваним лазером.

3.3.3 Розробка другої версії блок-схеми резервування оптичного каналу WDM

У другій версії схеми резервування оптичного каналу, представлений на рисунку 2.4, на відміну від першої версії, будуть задіяні лише оптичні розгалужувачі та об'єднувачі. Блок-схема резервування оптичних каналів для другої версії, розроблена в середовищі САПР OptiSystem, представлена на рисунку 3.18.

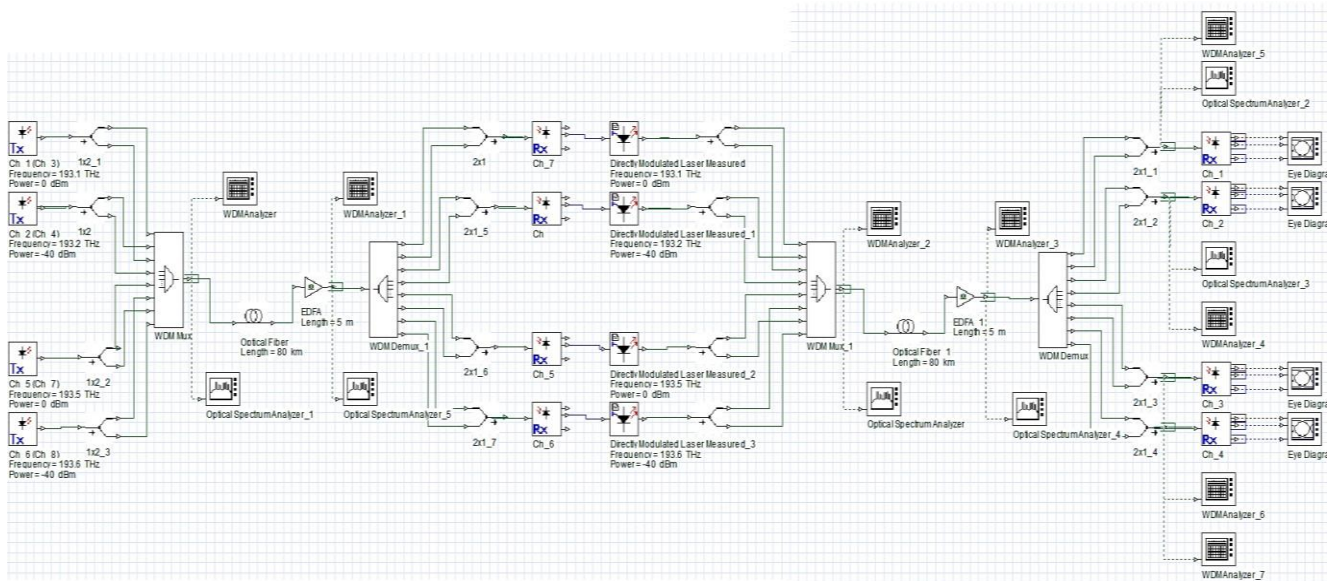


Рисунок 3.18 – Блок-схема резервування оптичних каналів для другої версії

Для аналізу працездатності схеми резервування оптичних каналів WDM задіяні такі вимірювальні інструменти, як:

- аналізатор WDM сигналу (WDM Analyzer);
- аналізатор «око-діаграми» (Eye Diagram Analyzer);
- аналізатор спектра сигналу WDM (Optical Spectrum Analyzer).

На відміну від моделювання першої версії схеми резервування оптичних каналів, у моделюванні резервування оптичних каналів для схеми другої версії розглядається моделювання проміжного вузла WDM, який може виконувати функцію регенерації, транзиту та вводу-виводу оптичного каналу WDM. Завдяки проміжному вузлу з'являється можливість перевірки працездатності резервування оптичного каналу при виході з ладу одного з транспондерів.

3.3.4 Результати моделювання другої версії схеми резервування оптичних каналів WDM

Для перевірки працездатності схеми резервування, представленої на рисунку 3.18, розглянуті два варіанти: штатний і резервний. Варто зазначити, що клієнту надаються два фізичних порти мультиплексора WDM, де перший

порт використовується для прийому та передачі даних, а другий є резервним. Передача та прийом можуть виконуватись на одному з двох оптичних каналів. Таким чином, для одного клієнта виділяється чотири оптичні канали WDM, де один канал виступає в ролі основного, а інші три використовуються як резервні канали зв'язку.

Для штатного режиму роботи схеми задіяні два оптичних канали: Ch 1 з частотою 193,1 ТГц та Ch 5 з частотою 193,5 ТГц. Оптичні канали Ch 2, Ch 3, Ch 4, Ch 6, Ch 7 та Ch 8 виконують роль резервних каналів зв'язку. Оскільки клієнту надаються два фізичних порти WDM мультиплексора, причому другий порт є резервним, то в блок-схемі, представлений на рисунку 3.18, другий резервний порт повинен бути неактивним (вимкненим).

З огляду на зазначені умови, де вказано, що моделювання транспондерів не розглядається, а саме моделювання повинно бути простим, моделювання вимкненого стану другого резервного каналу (транспондера) виконано шляхом встановлення вихідної потужності передавача рівною мінус 40 дБм. Результати отриманих спектральних значень оптичних каналів у штатному режимі представлені на рисунку 3.19.

Результати якісних показників оптичного каналу, до яких відносяться коефіцієнт помилок і око-діаграма, представлені на рисунку 3.20.

На рисунках 3.20а і 3.20б показані око-діаграми для першого клієнтського каналу даних. Око-діаграма, представлена на рисунку 3.20а, відноситься до робочого оптичного каналу WDM першого клієнтського каналу даних, а око-діаграма, представлена на рисунку 3.20б, відноситься до резервного оптичного каналу WDM цього ж клієнтського каналу даних.

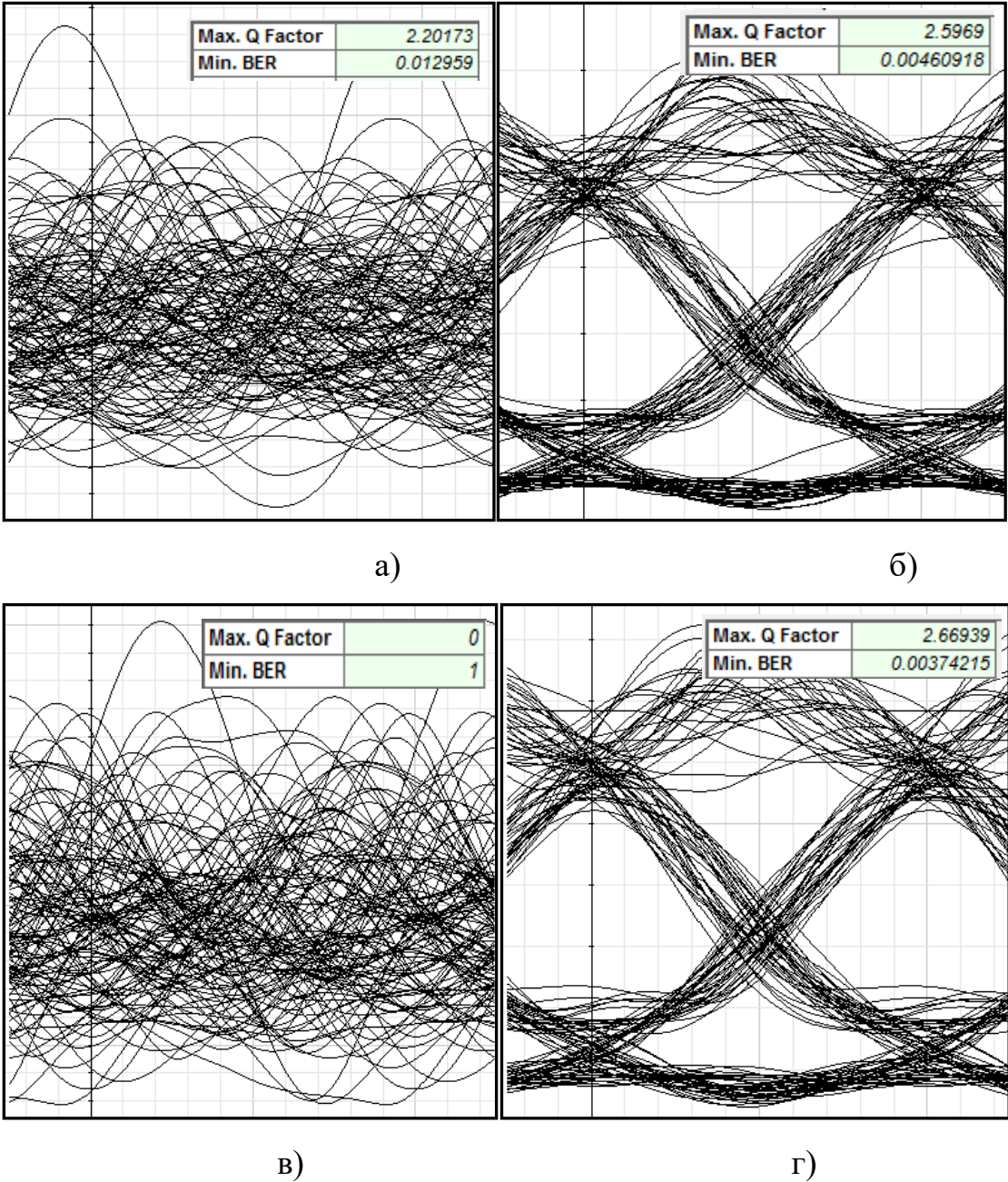
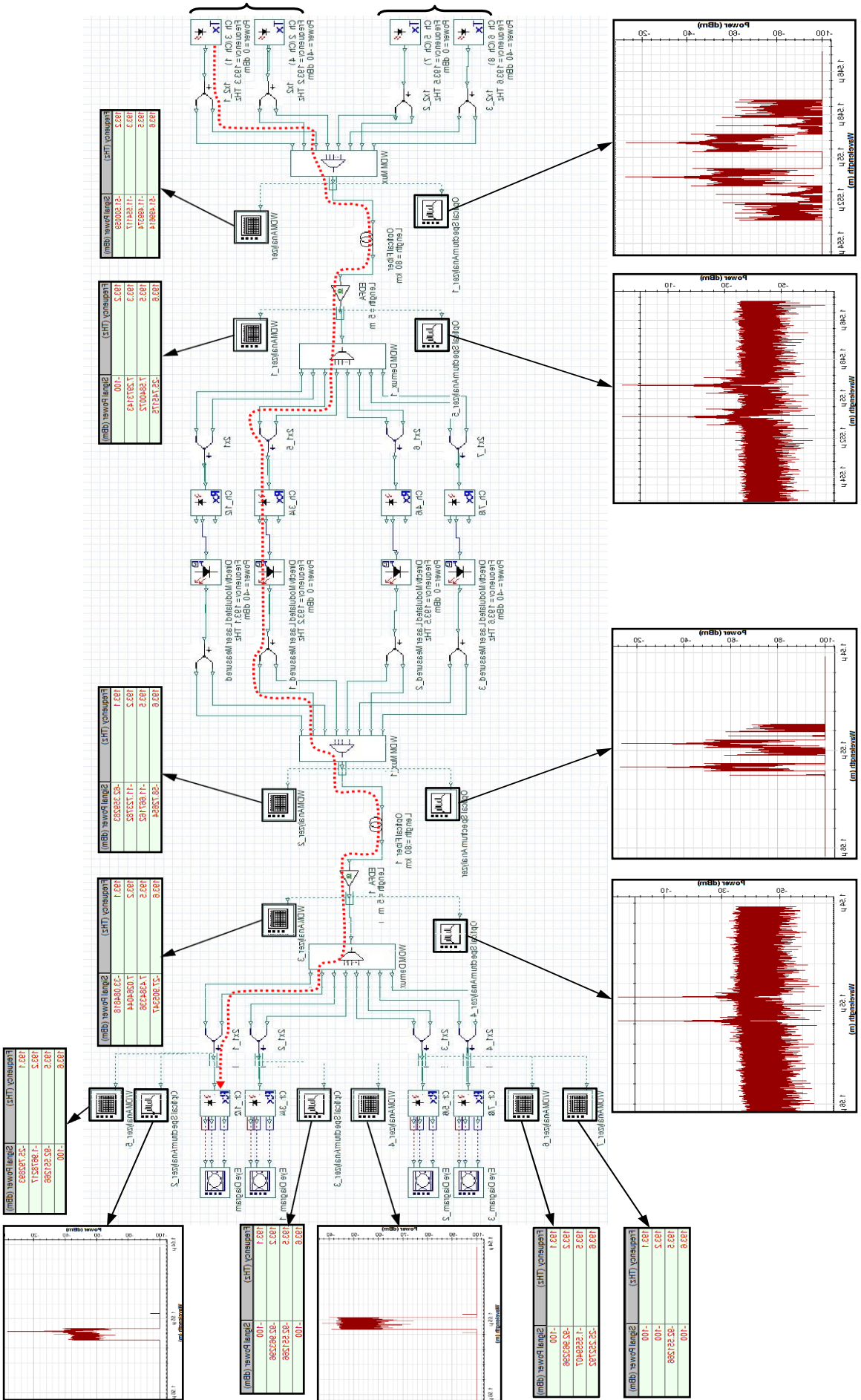


Рисунок 3.20 – Результати якісних показників оптичного каналу під час моделювання другої схеми резервування каналу WDM у штатному режимі

На рисунках 3.20в і 3.20г показані око-діаграми для другого клієнтського каналу даних. око -діаграма, представлена на рисунку 3.20в, відноситься до робочого оптичного каналу другого клієнтського каналу даних, а око -діаграма, представлена на рисунку 3.20г, відноситься до резервного оптичного каналу WDM цього ж клієнтського каналу даних. Коефіцієнт помилок для першого клієнтського каналу даних складає $4,6 \times 10^{-3}$, для другого – $3,7 \times 10^{-3}$. Отримані результати моделювання можна вважати позитивними, і незважаючи на високий коефіцієнт помилок, характер отриманої око-діаграми має схожість з око -діаграмами, отриманими для першої схеми резервування каналу WDM.

Для перевірки працездатності другої схеми резервування каналу WDM змодельємо вихід з ладу основного приймально-передавального модуля, встановивши значення потужності випромінювання першого передавача на мінус 40 дБ. Тоді в автоматичному режимі роботи апаратури зв'язку відбудеться перемикання на резервний канал. У цьому прикладі блок-схема буде працювати в режимі резервування оптичного каналу WDM для клієнтського каналу даних №1. Так, на ділянці між кінцевою і проміжною точками (в напрямку передачі) відбудеться перемикання з основного оптичного каналу Ch 1, що працює на частоті 193,1 ТГц, на резервний оптичний канал Ch 3, що працює на частоті 193,3 ТГц. У проміжному вузлі резервний приймально-передавальний оптичний модуль (який являє собою послідовно підключеного фотодіода і лазерного діода) клієнтського каналу даних №1 перейде в режим активної роботи. Цей блок буде приймати та обробляти оптичний канал Ch 3 з подальшою передачею на частоті резервного оптичного каналу Ch 2, що працює на частоті 193,2 ТГц. На приймальному кінці лінії зв'язку оптичний канал Ch 2 буде демультимплексуватися на перший приймально-передавальний оптичний модуль клієнтського каналу даних №1. Другий приймально-передавальний модуль на приймальному кінці буде знаходитись у режимі резервування (очікування). Результати отриманих спектральних значень каналів WDM у режимі резервування представлені на рисунку 3.21.

каналів для другої схеми резервування каналів WDM



Результати якісних показників оптичного каналу, а саме коефіцієнта помилок і око-діаграми, представлені на рисунку 3.22. На рисунках 3.22а і 3.22б показані око-діаграми для першого клієнтського каналу даних. На рисунках 3.22в і 3.22г показані аналогічні око-діаграми, але для другого клієнтського каналу даних.

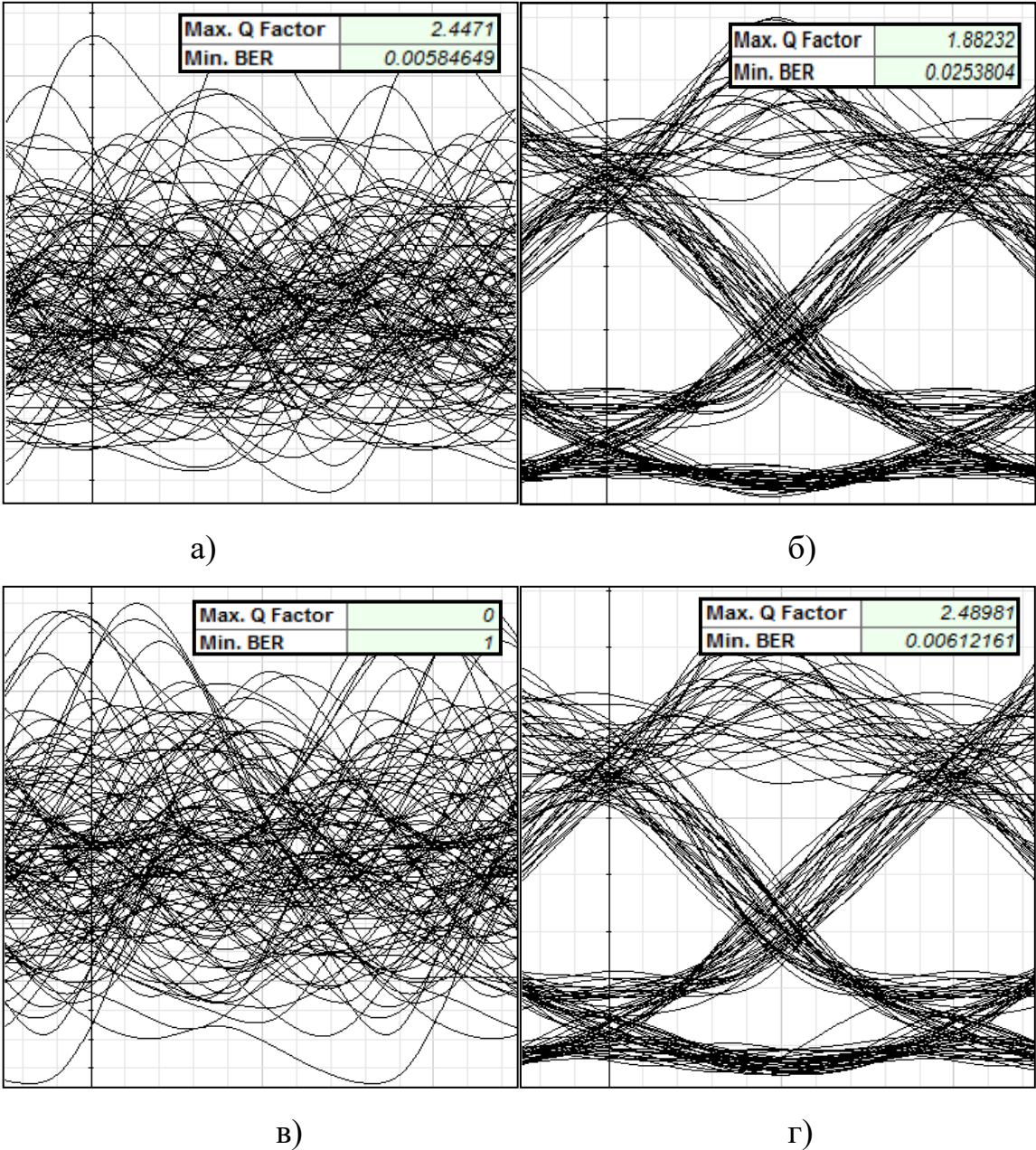


Рисунок 3.22 – Результати якісних показників оптичного каналу під час моделювання другої схеми резервування каналу WDM у режимі «резерв»

Око-діаграма, представлена на рисунку 3.22а, відноситься до робочого оптичного каналу WDM першого клієнтського каналу даних, а око-діаграма, представлена на рисунку 3.22б, стосується резервного оптичного каналу WDM першого клієнтського каналу даних. Коефіцієнт помилок як у штатному, так і в резервному режимах роботи блок-схеми становив не менше 10^{-3} , що не відповідає нормам. Причиною цьому є падіння оптичної потужності корисного сигналу в пасивних компонентах (оптичний об'єднувач і розгалужувач). Застосування підсилювача в лінії протяжністю 80 км не дозволяє компенсувати ці втрати. Як і в попередньому моделюванні, зменшення довжини лінії до 70 км веде до зменшення коефіцієнта помилок, який не перевищує 10^{-9} .

Отримані око-діаграми оптичних каналів для штатного та резервного режимів роботи блок-схеми мають схожий характер з отриманими око-діаграмами роботи блок-схеми, представленої на рисунку 3.16 для першої версії схеми резервування каналів WDM.

3.3.5 Розробка третьої версії схеми резервування оптичних каналів WDM

З урахуванням поставлених умов моделювання, блок-схема резервування оптичних каналів WDM для третьої версії представлена на рисунку 3.23.

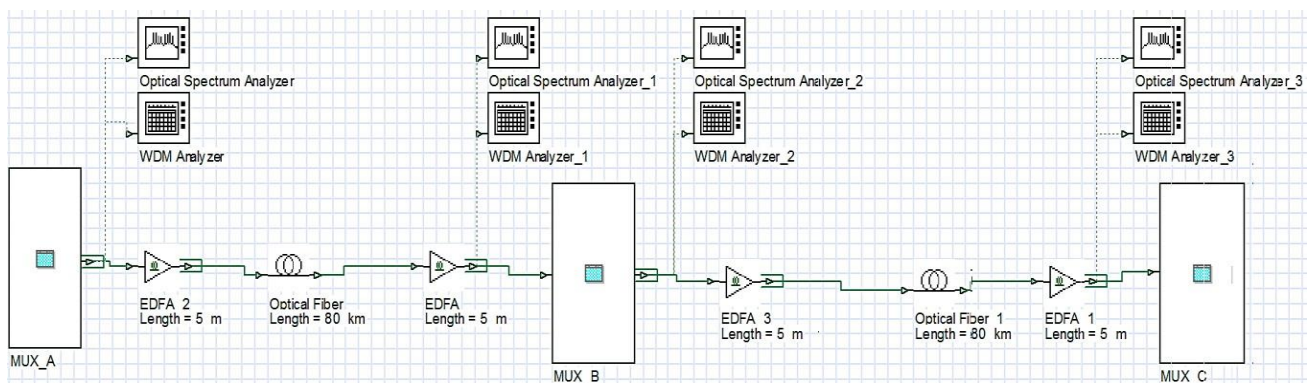


Рисунок 3.23 – Блок-схема резервування оптичних каналів для третьої версії

Відмінною особливістю блок-схеми резервування оптичних каналів третьої версії від попередніх є використання підсхем, які дозволяють зменшити розміри блок-схеми на робочому полі. Блок-схема, представлена на рисунку 3.23, має три підсхеми, які представляють собою кінцеві (MUX_A та MUX_C) і проміжний (MUX_B) мультиплексори.

Для створення підсхеми необхідно виділити компоненти, які повинні входити до підсистеми, затиснувши ліву кнопку миші на робочому полі. Після виділення компонентів, потрібно клацнути правою кнопкою миші для виклику контекстного меню та вибрати пункт Create Subsystem (створити підсистему), як показано на рисунку 3.24.

На робочому полі з'явиться підсистема, при наведенні курсору на яку, правою кнопкою миші викликається контекстне меню, де вибирається Component Properties (властивості компонента) для перейменування та вказівки параметрів цієї підсистеми.

Блок-схема мультиплексора MUX_A і MUX_C представлена на рисунку 3.25. Блок-схема проміжного мультиплексора MUX_B представлена на рисунку 3.26.

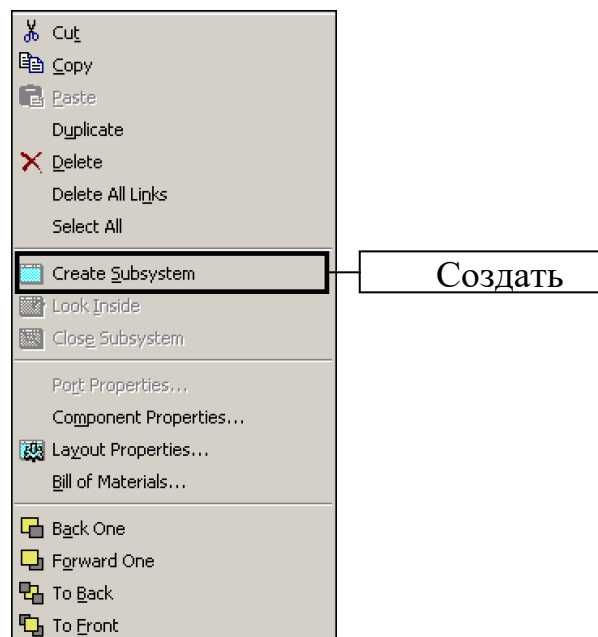


Рисунок 3.24 – Контекстне меню виділених компонентів

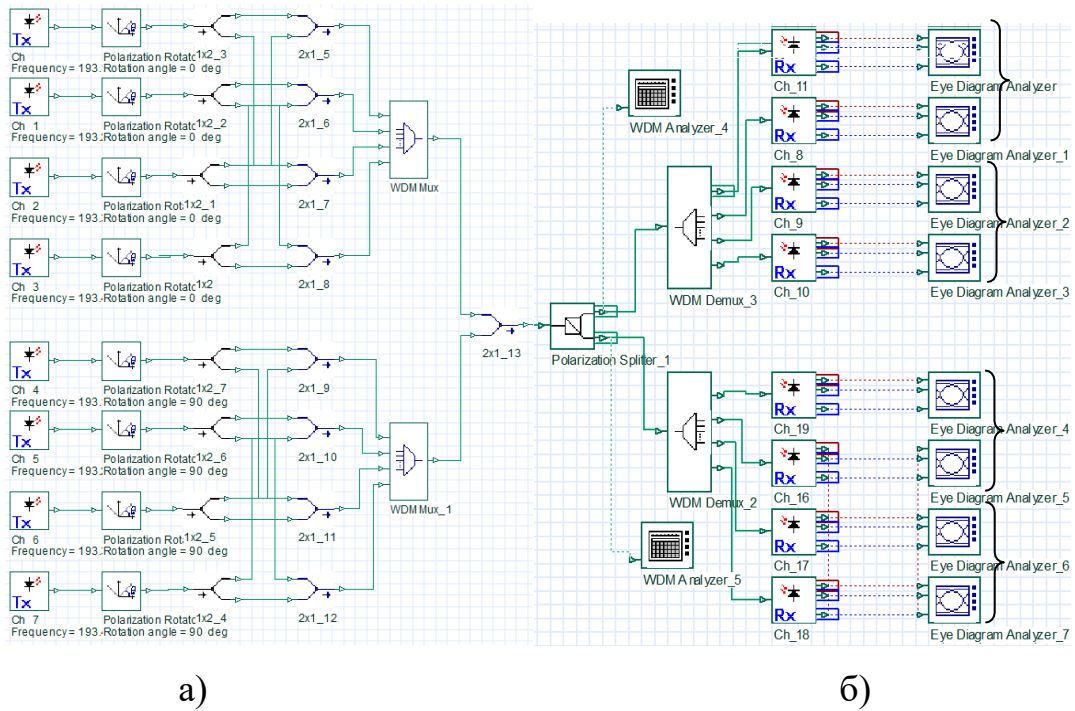


Рисунок 3.25 – Блок-схема мультиплексора: а) MUX_A; б) MUX_C

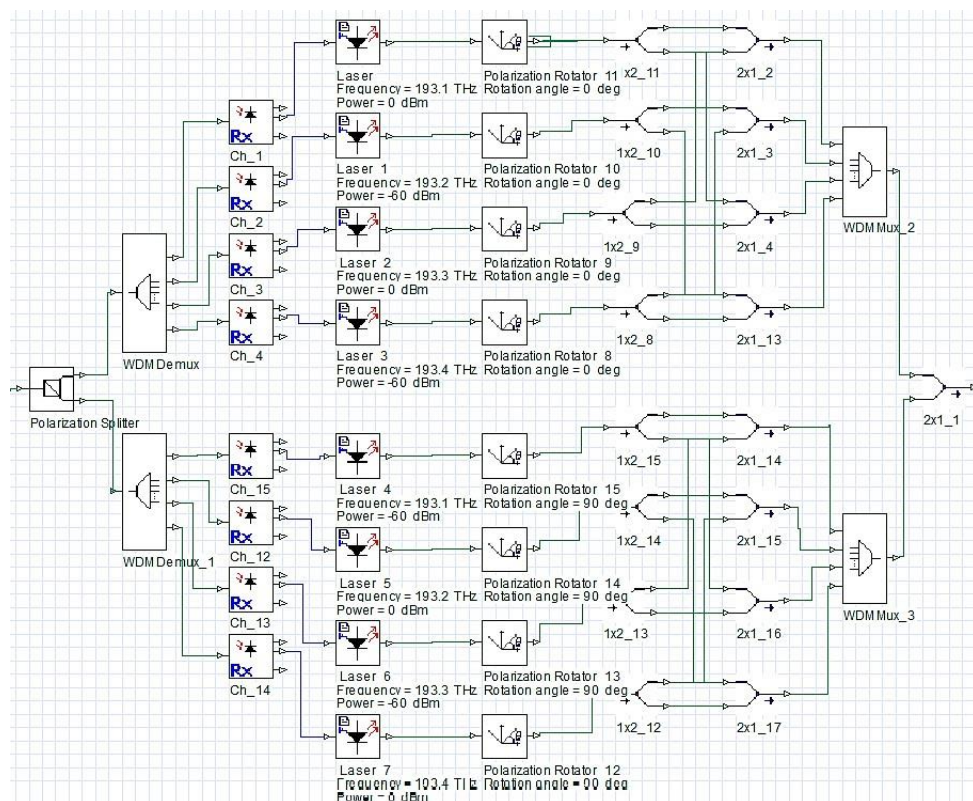


Рисунок 3.26 – Блок-схема мультиплексора MUX_V

Результати моделювання резервування оптичних каналів для другої версії показали, що коефіцієнт помилок становить не менше 10^{-3} , що не відповідає

нормам. Причиною цього є падіння оптичної потужності корисного сигналу в пасивних компонентах (оптичний об'єднувач і розгалужувач). Для компенсації цих втрат було прийнято рішення про встановлення додаткового підсилювача – бустера.

3.3.6 Результати моделювання третьої версії схеми резервування оптичних каналів WDM

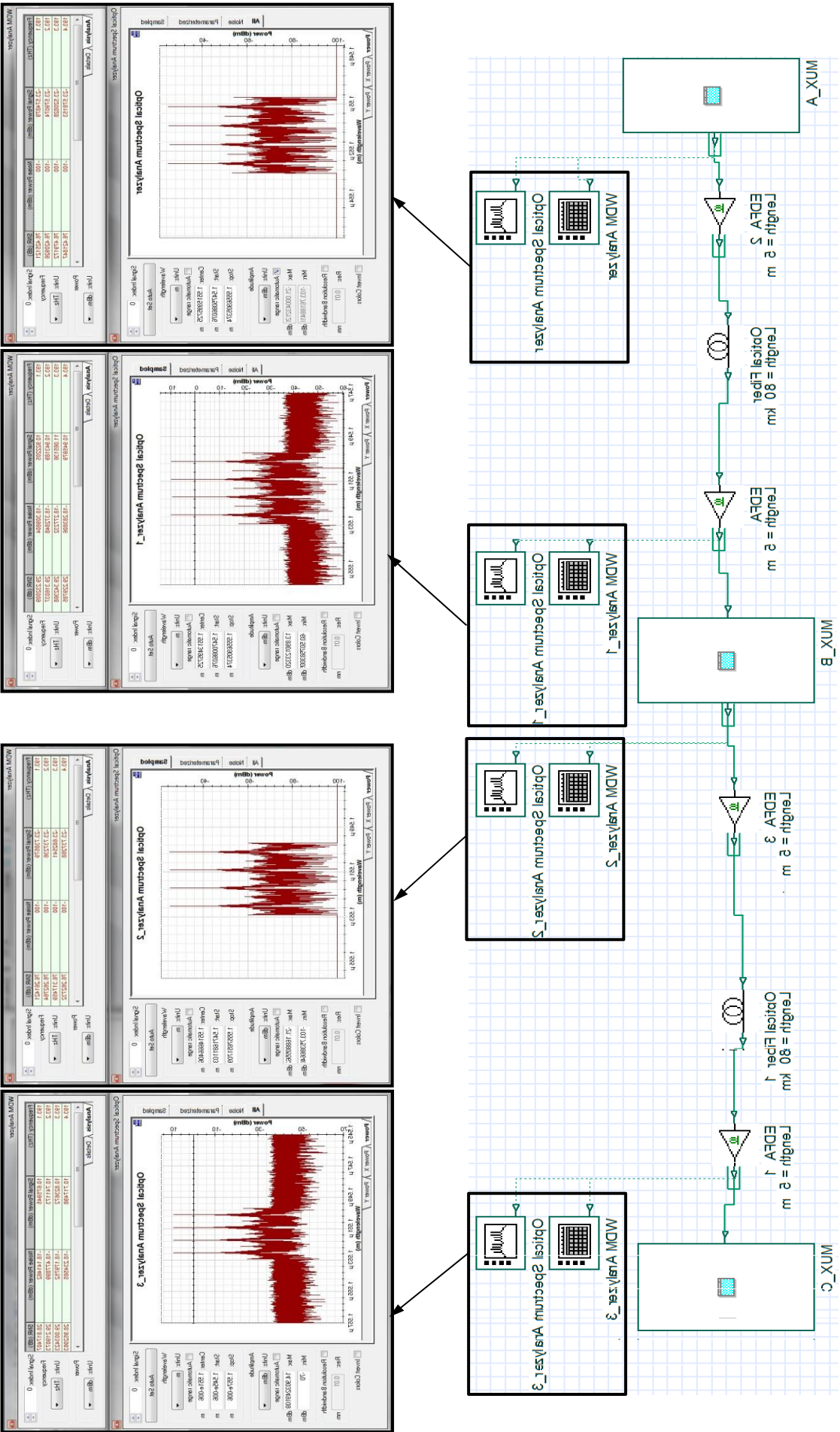
Результати моделювання третьої версії схеми резервування оптичних каналів WDM отримані в режимі штатної та резервної роботи розробленої блок-схеми.

Результат моделювання роботи блок-схеми в штатному режимі представлений у вигляді спектральних значень оптичних каналів, як показано на рисунку 3.27. Показані спектри каналів мають візуальні відмінності. Так, спектр каналів, знятий на виході мультиплексорів MUX_A і MUX_B, не має шумових процесів за межами робочої смуги групового DWDM сигналу, на відміну від спектра, знятому на вході мультиплексора MUX_B і MUX_C. Спектри, отримані на вході мультиплексорів, мають шумові процеси поза смугою групового DWDM сигналу. Ці шумові процеси є нічим іншим, як спонтанний шум оптичних підсилювачів. Проте цей спонтанний шум ніяк не впливає на зростання коефіцієнта помилок. Використання бустера є цілеспрямованою необхідністю, оскільки на ділянці «лазерний діод - бустер» спостерігаються втрати в 23,5 дБ. Це значення отримано як різниця рівня сигналу на виході лазерного діода, яке становить 0 дБм, та рівня сигналу на вході бустера, що становить мінус 23,5 дБм, відповідно до значень, представлених на рисунку 3.27.

На рисунку 3.28 представлені значення око-діаграми та коефіцієнта помилок для чотирьох каналів даних. Зліва показані око-діаграми основних (робочих) каналів WDM, а справа – око-діаграма резервних каналів WDM.

оптичних каналів для третьої версії схеми

Рисунок 3.27 – Результати спектральних значень



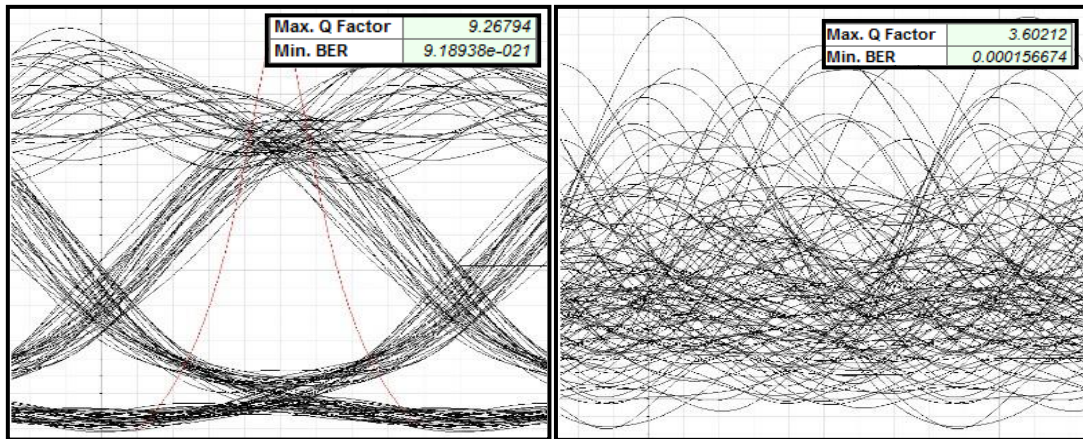
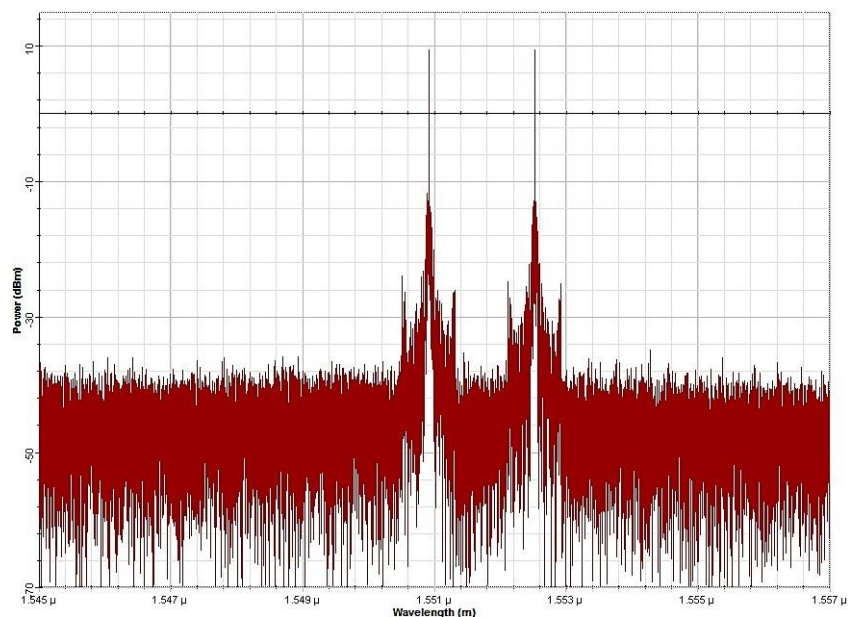
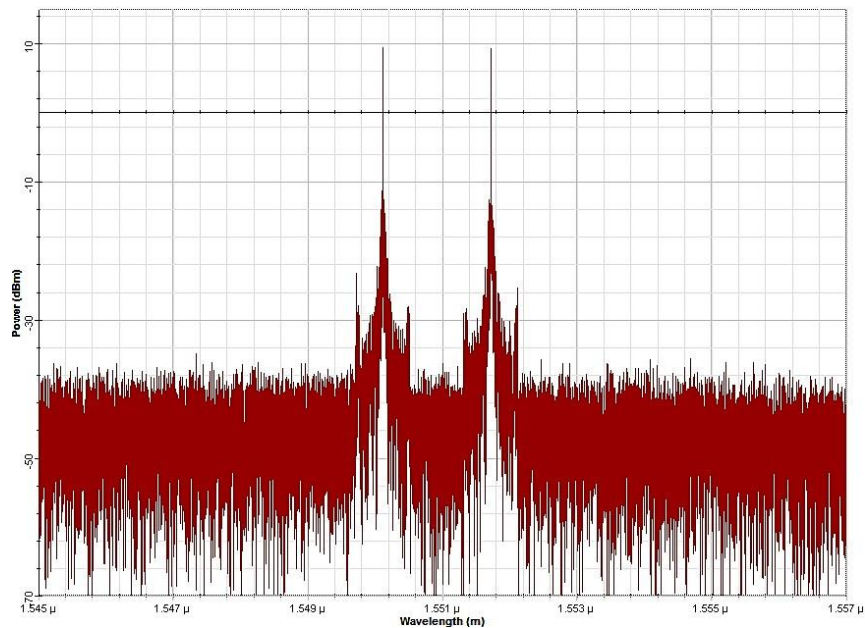


Рисунок 3.28 – Графіки око-діаграми і коефіцієнт помилок оптичних каналів даних для третьої версії схеми резервування каналів WDM

Для чотирьох каналів даних, що працюють на основних оптичних каналах 193,1 ТГц та 193,2 ТГц у горизонтальній площині поляризації, спектр яких показаний на рисунку 3.29а, а також для каналів на частотах 193,3 ТГц і 193,4 ТГц у вертикальній площині поляризації, спектр яких наведений на рисунку 3.29б, коефіцієнт помилок склав 10^{-21} , що свідчить про працездатність запропонованої схеми резервування каналів WDM у штатному режимі.



а)



б)

Рисунок 3.29 – Спектри каналів

Для перевірки працездатності схеми в режимі резервування змодельюємо збій передачі даних у першому каналі. Збій може бути викликаний виходом з ладу лазерного діода або фотодіода в тракті передачі першого оптичного каналу, або виходом з ладу транспондерів першого та другого оптичного каналу в проміжному мультиплексорі MUX_V, як показано на рисунку 3.30. На блок-схемі перехрестям позначені компоненти, що вийшли з ладу, а суцільною лінією показано основний тракт передачі даних першого клієнтського каналу.

Для моделювання збою в тракті передачі першого каналу потужність передавачів задаємо рівною -60 дБм. У ситуації, коли відбувається збій в роботі активних компонентів, виконується автоматична реконфігурація системи, а саме:

- У мультиплексорі MUX_A активується резервний другий оптичний канал першого каналу даних (Power = 0 дБм), частота каналу змінюється з 193,2 ТГц (частота каналу, встановлена за замовчуванням) на 193,4 ТГц (рисунок 3.30);

- У мультиплексорі MUX_V активується резервний четвертий оптичний канал другого каналу даних (Power = 0 дБм), частота каналу змінюється з 193,4

ТГц (частота каналу, встановлена за замовчуванням) на 193,2 ТГц (рисунок 3.30).

На рисунку 3.30 резервний тракт передачі для першого (клієнтського) каналу даних показаний пунктирною лінією. Коефіцієнт помилок для резервного каналу склав $2,5 \times 10^{-12}$, що менше нормативного значення, яке для ділянки 80 км становить 8×10^{-9} , відповідно до представлених розрахунків за формулою (3.1). Варто зазначити, що на рисунку 3.30 не показані оптичні підсилювачі через їх меншу громіздкість.

Отримані результати моделювання є позитивними, що свідчить про те, що запропонований варіант резервування оптичних каналів WDM з інтеграцією пасивних компонентів у існуючу архітектуру мультиплексорного обладнання є технічно здійсненним і дозволить підвищити надійність як проєктованих, так і діючих мереж DWDM.

3.4 Висновки

Результати моделювання показали, що запропоновані нові варіанти резервування оптичних каналів WDM можуть бути успішно застосовані на практиці як у діючих, так і в проєктованих мережах WDM. Розроблені схеми вирішують проблему високої вартості обладнання DWDM та неефективного використання частотного діапазону системи DWDM.

Однак існує ряд обмежень та особливостей. Так, у когерентних системах WDM, де застосовується модуляція оптичної несучої з поляризаційним мультиплексуванням, наприклад, модуляція типу DP-QPSK (четвертне фазове маніпулювання з подвійною поляризацією) або DP-32QAM (32 позиційна квадратурна амплітудна маніпуляція з подвійною поляризацією), використання розроблених схем резервування, що передбачають поляризаційні фільтри, є неможливим.

При реалізації нових схем резервування каналів WDM необхідно застосування оптичних підсилювачів (бустера і предусилювача) на лініях протяжністю понад 70 км, що забезпечить коефіцієнт помилок не гірше 10^{-9} .

Крім того, інтеграція нових схем резервування в діючі системи зв'язку WDM можлива лише за умови, що в якості джерел оптичного випромінювання в оптичних модулях (транспондерах) мультиплексорів WDM використовуються перестроювані лазерні діоди типу VCSEL. Програмне забезпечення мультиплексорів WDM також повинно мати можливість інсталяції нових кодів, алгоритми яких дозволять автоматично переключитися на резервний канал і побудувати новий оптичний маршрут під час збоїв у робочому каналі зв'язку.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	50	0	48
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	44	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		47,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	62	61
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	61,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [31]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 47,3, k_{\text{теор}} = 61,0$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 47,3 + 0,4 \cdot 61,00 = 52,80 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах», даний рівень становить 52,80 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах», під час

планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [31]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 16850,00 \cdot 32 / 21 = 25676,19 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	16850,00	802,38	32	25676,19
Ст. науковий співробітник	15600,00	742,86	21	15600,00
Інженер-розробник телекомунікаційних мереж 1-ї категорії	14600,00	695,24	18	12514,29
Технік 1-ї категорії	8100,00	385,71	16	6171,43
Всього				59961,90

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» розраховуємо за формулою:

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [31];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 59,22 \cdot 5,40 = 319,81 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця розробника телекомунікаційних мереж	5,40	2	1,10	59,22	319,81
Інсталяція програмного забезпечення середовища розробки і моделювання	7,30	3	1,35	72,68	530,59
Компіляція програмних блоків моделювання	5,80	4	1,50	80,76	468,40
Монтаж елементів мережі оптичного зв'язку	10,50	5	1,70	91,53	961,03
Технічне забезпечення протікання експериментів	16,00	3	1,35	72,68	1162,93
Всього					3442,75

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$З_{\text{доп}} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$З_{\text{доп}} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 12 / 100\% = 7608,56 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$З_n = (З_o + З_p + З_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (4.6)$$

де H_n – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$З_n = (59961,90 + 3442,75 + 7608,56) \cdot 22 / 100\% = 15622,91 \text{ грн.}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення,

тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 206,00 \cdot 1,02 - 0,0 \cdot 0,0 = 630,36 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, Грн/одиницю	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4 білий (80%)	206,00	3,0	0,0	0,0	630,36
Диск оптичний (DVD-R)	27,00	2,0	0,0	0,0	55,08
Органайзер офісний BOX-16A	198,00	4,0	0,0	0,0	807,84
Канцелярське приладдя	216,00	4,0	0,0	0,0	881,28
Тонер HP-26 (для заправки картриджа)	218,00	2,0	0,0	0,0	444,72
FLASH-пам'ять	219,00	2,0	0,0	0,0	446,76
Всього					3266,04

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$K_e = 1 \cdot 4050,00 \cdot 1,01 = 4090,50$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Абонентський термінал ONU Ubiquiti UFiber Nano G (UF-Nano) GPON	1	4050,00	4090,50
Маршрутизатор TP-LINK Archer AX73	1	4999,00	5048,99
Маршрутизатор Asus TUF Gaming AX6000	1	6709,00	6776,09
Всього			15915,58

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного

для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 3899,00 \cdot 1 \cdot 1,02 = 3976,98 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Роутер	1	3899,00	3976,98
Термінальне обладнання	1	8450,00	8619,00
Всього			12595,98

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прг}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прг.і}} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прг.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прг}} = 8199,00 \cdot 1 \cdot 1,05 = 8608,95 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет прикладного програмного забезпечення обробки даних	1	8199,00	8608,95
Всього			8608,95

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{C_{\text{обл}}}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{t_{\text{вук}}}{12}, \quad (4.11)$$

де C_0 – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_г$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (44299,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 3691,58 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронний комплекс аналітичної системи обробки даних	44299,00	2	2	3691,58
Персональний комп'ютер	17999,00	2	2	1499,92
Спеціалізоване робоче місце дослідника мереж	7999,00	5	2	266,63
Пристрій виводу текстової інформації	6500,00	4	2	270,83
Оргтехніка	8650,00	5	2	288,33
Приміщення лабораторії досліджень	415000,00	25	2	2766,67
ОС Windows 11	6510,00	2	2	542,50
Прикладний пакет Microsoft Office 2019	6490,00	2	2	540,83
Всього				9867,30

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,36 \cdot 240,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 648,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронний комплекс аналітичної системи обробки даних	0,36	240,0	648,00
Персональний комп'ютер	0,25	240,0	450,00
Спеціалізоване робоче місце дослідника мереж	0,10	240,0	180,00
Пристрій виводу текстової інформації	0,20	3,5	5,25
Оргтехніка	0,45	1,5	5,06
Абонентський термінал ONU Ubiquiti UFiber Nano G (UF-Nano) GPON	0,06	105,0	47,25
Маршрутизатор TP-LINK Archer AX73	0,03	105,0	23,63
Маршрутизатор Asus TUF Gaming AX6000	0,04	105,0	31,50
Роутер	0,04	105,0	31,50
Термінальне обладнання	0,09	105,0	70,88
Всього			1493,06

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 20 / 100\% = 12680,93 \text{ грн.}$$

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 30 / 100\% = 19021,40 \text{ грн.}$$

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\text{в}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{ив}}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де $H_{\text{ив}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{\text{ив}} = 55\%$.

$$I_{\text{в}} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 55 / 100\% = 34872,56 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де $H_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{\text{нзв}} = 100\%$.

$$B_{\text{нзв}} = (59961,90 + 3442,75) \cdot 100 / 100\% = 63404,66 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{\text{заг}} = Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}} + Z_n + M + K_e + B_{\text{спец}} + B_{\text{прз}} + A_{\text{обл}} + B_e + B_{\text{св}} + B_{\text{сп}} + I_e + B_{\text{нзв}}. \quad (4.17)$$

$$B_{\text{заг}} = 59961,90 + 3442,75 + 7608,56 + 15622,91 + 3266,04 + 15915,58 + 12595,98 + 8608,95 + 9867,30 + 1493,06 + 12680,93 + 19021,40 + 34872,56 + 63404,66 = 268362,59 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,9$.

$$ZB = 268362,59 / 0,9 = 298180,65 \text{ грн.}$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_C – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_C = 2$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 4$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 298180,65$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [31].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 2 \cdot 4 / 298,2 \cdot 0,17 = 10,30.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» складають 298180,65 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВОК

У ході виконання магістерської дисертації було досягнуто поставлену мету — розроблено нові схеми резервування оптичних каналів і маршрутів у системах WDM та оцінено їх практичну застосовність шляхом моделювання.

Для досягнення мети було вирішено низку завдань:

- Проведено аналіз літератури в області резервування в мережах WDM.
- Розглянуто основи спектрального мультиплексування, принципи побудови мереж WDM, а також основні компоненти систем WDM.
- Проаналізовано принципи організації резервування в мережах WDM, розглянуто переваги та недоліки застосовуваних на практиці схем резервування каналів WDM.
- Розроблено нові схеми резервування оптичних каналів WDM шляхом інтеграції пасивних компонентів (оптичних розгалужувачів, об'єднувачів, поляризаторів та поляризаційних фільтрів) у наявну архітектуру мультиплексорного обладнання WDM.
- У середовищі автоматизованого проєктування (CAIP) OptiSystem проведено моделювання розроблених схем резервування каналів WDM.
- Розроблено блок-схеми для оцінки застосовності запропонованих схем резервування каналів WDM у практичних умовах.
- На основі результатів моделювання (графіки очкової діаграми, коефіцієнт помилок, спектр групового сигналу WDM) проведено аналіз доцільності використання розроблених схем на практиці.

Результати дослідження показали, що запропоновані нові варіанти резервування оптичних каналів WDM можуть бути використані як у діючих, так і в проєктованих мережах WDM. Розроблені схеми вирішують проблему високої вартості обладнання DWDM та неефективного використання частотного діапазону системи DWDM.

Проте є певні обмеження:

- У когерентних системах WDM, де застосовується модуляція оптичної несучої з поляризаційним мультиплексуванням, наприклад, DP-QPSK чи DP-32QAM, використання розроблених схем резервування з поляризаційними фільтрами є неможливим.
- Для реалізації нових схем на лініях довжиною понад 70 км необхідно застосовувати оптичні підсилювачі (бустери та передпідсилювачі), що забезпечить коефіцієнт помилок не гірше, ніж 10^{-9} .
- Інтеграція нових схем резервування можлива лише за умови використання перебудовуваних лазерних діодів VCSEL у транспондерах мультиплексорів WDM, а також можливості оновлення програмного забезпечення для автоматичного перемикавання на резервний канал або побудови нового маршруту у випадку збою.

Практична значущість проведеного дослідження полягає у тому, що розроблені в САПР OptiSystem блок-схеми резервування каналів WDM можуть бути використані для лабораторних і практичних робіт у рамках навчальних дисциплін відповідно до стандарту підготовки кадрів за напрямом «Інфокомунікаційні технології та системи зв'язку». Для цього необхідно здійснити компіляцію проєкту (*.osp) для роботи у безкоштовній версії OptiPerformer, що потребує налаштування параметрів проєкту в САПР OptiSystem.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці нових схем резервування оптичних каналів WDM, які отримали позитивні результати під час моделювання, що свідчить про їхню практичну застосовність для підвищення надійності систем WDM.

Отримані результати можуть бути використані як довідкові дані у наукових і навчальних цілях, а також у виробництві телекомунікаційного обладнання WDM.

Варто зазначити, що результати дослідження є оцінювальними, не підтверджені на реальній системі DWDM і мають рекомендаційний, теоретичний характер.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1) Marcuse D. Principles of Optical Fiber Measurements. Academic Press, 2014. – 272 p.
- 2) Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems. 4th ed. – Wiley, 2010. – 626 p.
- 3) Green P.E. Fiber Optic Networks. Prentice Hall, 1993. – 768 p.
- 4) Sarkar P. WDM Optical Communication Networks: Theory and Practice. Springer, 2020. – 485 p.
- 5) Keiser G. Optical Fiber Communications. 5th ed. – McGraw Hill, 2021. – 592 p.
- 6) Mukherjee B. Optical WDM Networks. Springer, 2006. – 468 p.
- 7) ITU-T Recommendation G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. – International Telecommunication Union, 2020. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1>
- 8) ITU-T Recommendation G.671. Transmission characteristics of optical components and subsystems. – International Telecommunication Union, 2018. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.671>
- 9) NASA Goddard Space Flight Center. Laser Communication Demonstration Projects [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ntrs.nasa.gov>
- 10) Hamad T., Eslami M. Dynamic Wavelength Routing in All-Optical Networks. Elsevier, 2015. – 344 p.
- 11) Shen G., Tucker R.S. Translucent Optical Networks: The Way Forward. Springer, 2014. – 325 p.
- 12) ITU-T Recommendation G.872. Architecture of Optical Transport Networks (OTN). – International Telecommunication Union, 2022. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.872>
- 13) Bjarklev A. Photonic Crystal Fibers. Kluwer Academic Publishers, 2003. – 456 p.

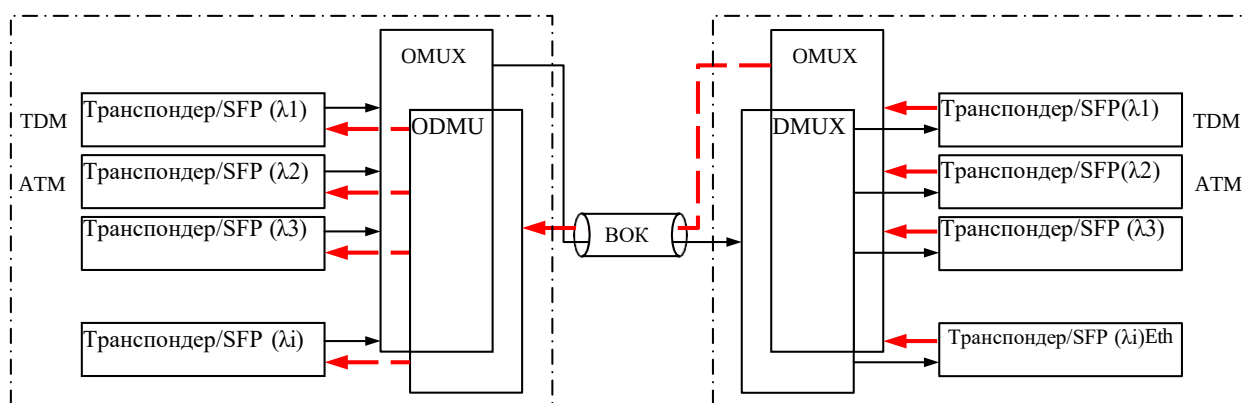
- 14) ITU-T Recommendation G.692. Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers. – International Telecommunication Union, 2005. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692>
- 15) Huang W. Optical Amplifier Technologies and Their Applications. Springer, 2021. – 212 p.
- 16) Saleh B.E.A., Teich M.C. Fundamentals of Photonics. 3rd ed. – Wiley, 2020. – 1350 p.
- 17) Sokolov O., Ivanenko A. Research on Fault-Tolerant WDM Systems. IEEE Communications Letters, 2023. – Vol. 27, No. 5. – Pp. 543-548.
- 18) Snyder A.W., Love J.D. Optical Waveguide Theory. Springer, 1983. – 734 p.
- 19) Korotkova O. Random Light Beams: Theory and Applications. CRC Press, 2021. – 308 p.
- 20) Ghafouri-Shiraz H. Fundamentals of Laser Dynamics and Their Applications to Optical Communication Systems. Wiley, 2004. – 322 p.
- 21) Kumar S. Fiber Optic Systems: Applications and Solutions. Springer, 2015. – 248 p.
- 22) ITU-T Recommendation G.698.2. Amplified multichannel dense wavelength division multiplexing applications. – International Telecommunication Union, 2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.698.2>
- 23) Zervas G., Slyne D. Elastic Optical Networks: A Survey. Optical Fiber Technology, 2014. – Vol. 25, No. 3. – Pp. 96-108.
- 24) Schupke D., He H. Survivable Network Design. IEEE Transactions on Communications, 2019. – Vol. 68, No. 4. – Pp. 2320-2329.
- 25) ITU-T Recommendation G.8080/Y.1304. Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON). – International Telecommunication Union, 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8080>

- 26) Kolawole M.O. Satellite Communication Engineering. CRC Press, 2002. – 336 p.
- 27) Biswas R., Singh S. Advances in Optical Communication and Networks. Elsevier, 2017. – 567 p.
- 28) Altabas J.A., Pastor D. Adaptive Modulation Techniques for Optical Networks. Springer, 2022. – 412 p.
- 29) Hillerkuss D. Optical OFDM Communication Systems. Springer, 2021. – 396 p.
- 30) Triki A., Ben Aissa M. Energy-Aware Routing and Protection Schemes in Optical Networks. Springer, 2020. – 247 p.
- 31) Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с

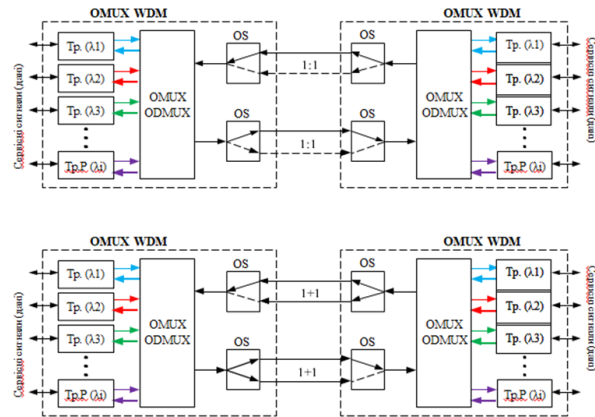
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ КАНАЛІВ В ОПТИЧНИХ
СИСТЕМАХ
назва магістерської кваліфікаційної роботи

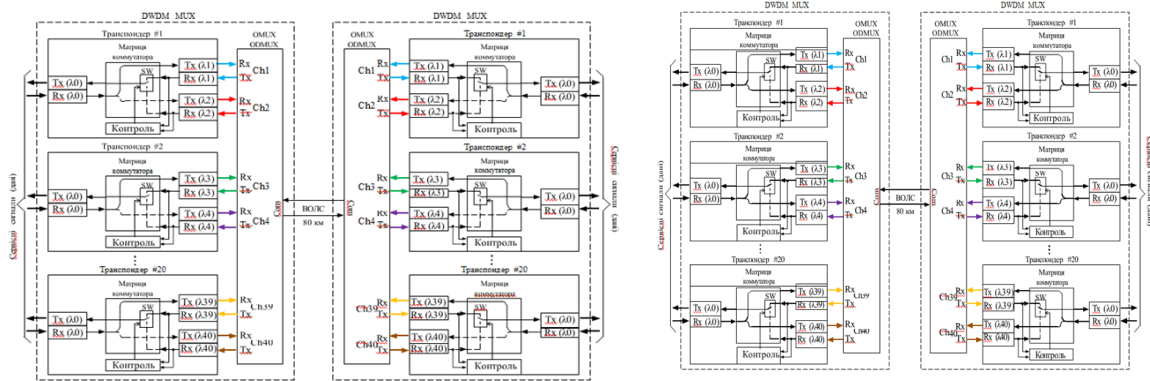
Типова схема організації мережі WDM



Типові схеми резервування оптичного маршруту

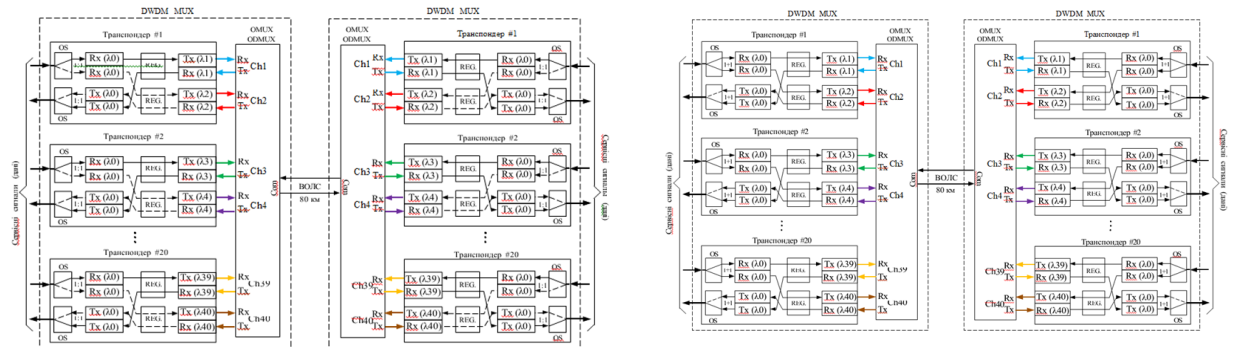


Типова схема резервування оптичного маршруту за схемами 1:1 і 1+1



Резервування оптичного каналу на електричному рівні за схемою 1:1 у мережі WDM топології «точка-точка»

Резервування оптичного каналу на електричному рівні за схемою 1+1 у мережі WDM топології «точка-точка».



Резервування оптичного каналу на оптичному рівні за схемою 1:1 у мережі WDM топології «точка-точка»

Резервування оптичного каналу на оптичному рівні за схемою 1+1 у мережі WDM топології «точка-точка»

Схема резервування оптичних маршрутів (каналів) з використанням пасивних компонентів

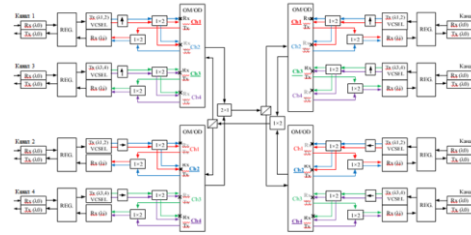
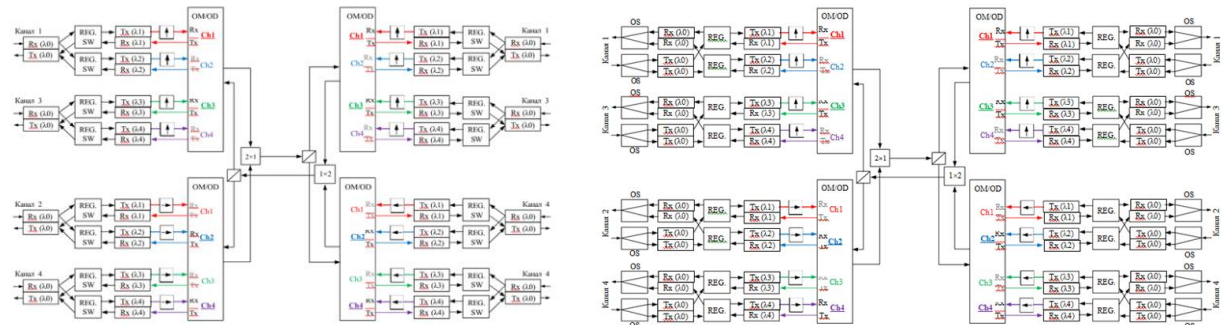
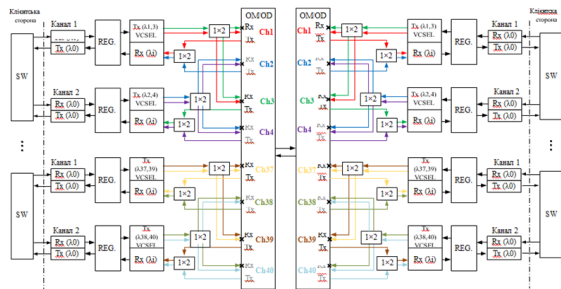


Схема резервування оптичних маршрутів (каналів) з використанням пасивних компонентів



Структурна схема резервування оптичних каналів на електричному рівні з використанням пасивних компонентів

Структурна схема резервування оптичних каналів на оптичному рівні з використанням пасивних компонентів



Структурна схема резервування оптичних каналів на рівні транспондерів

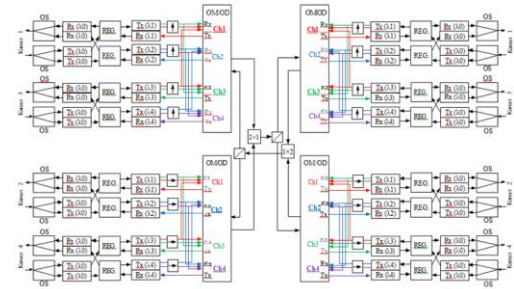
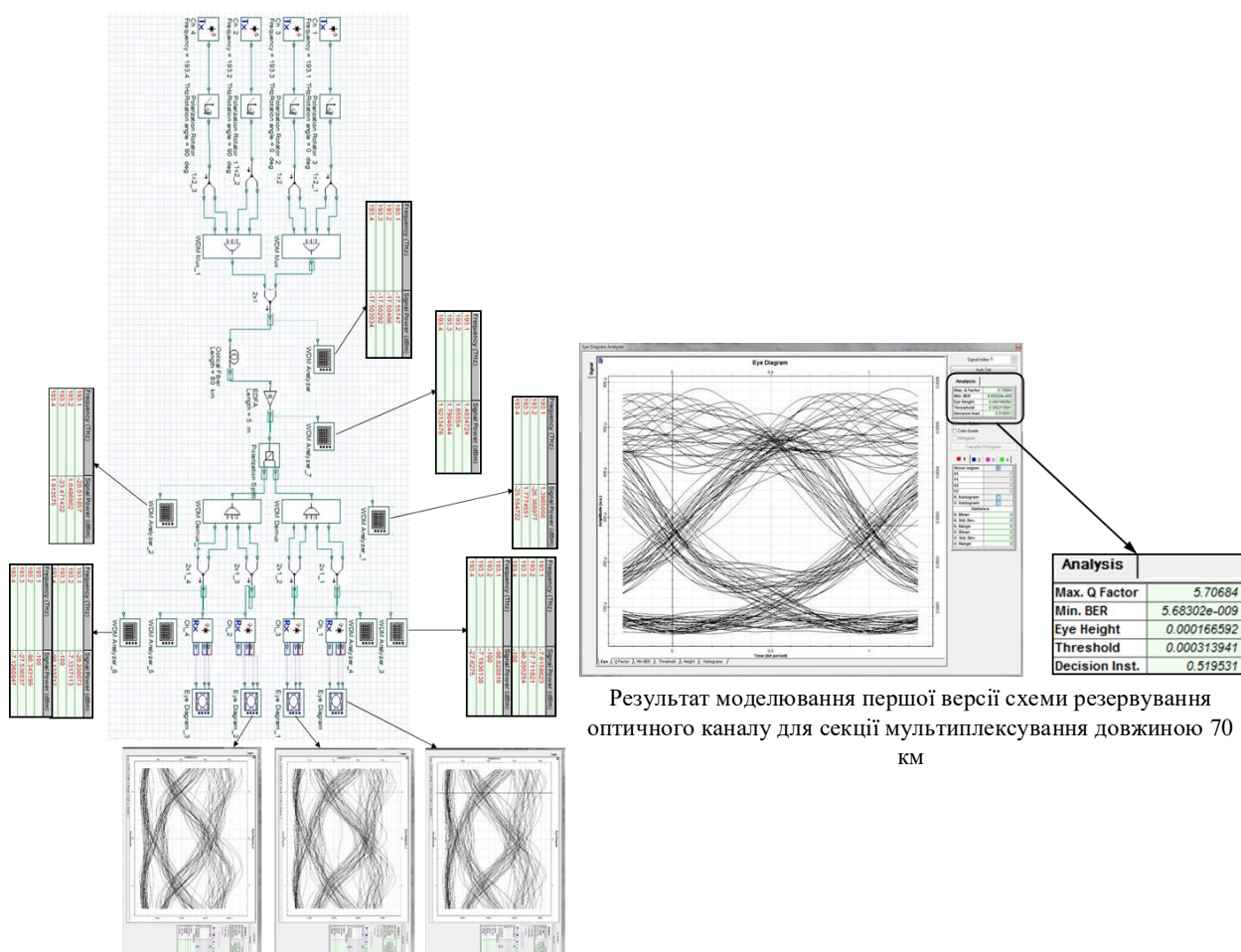


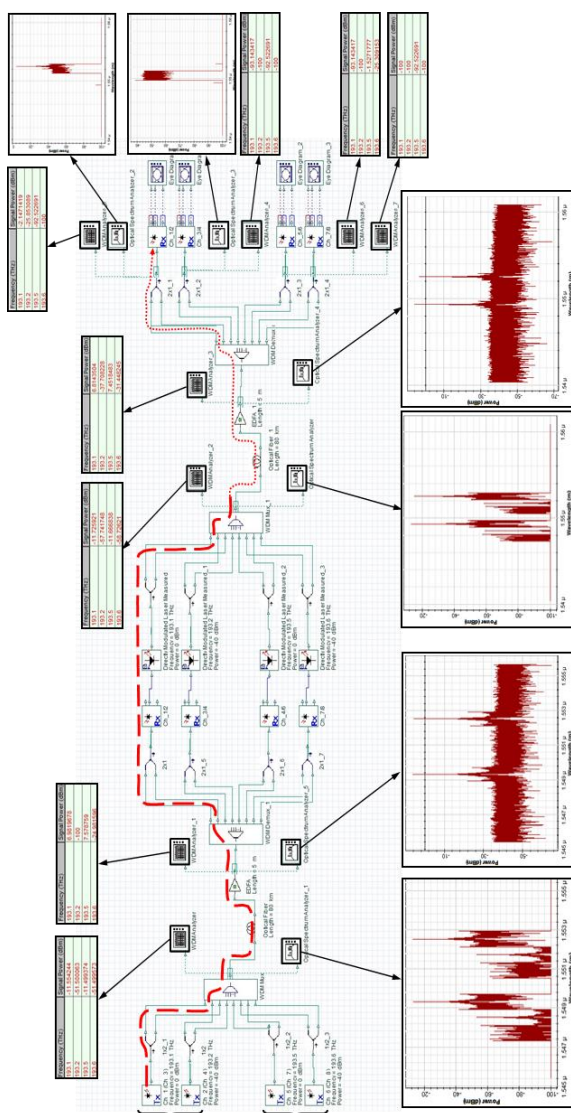
Схема резервування оптичних каналів на оптичному рівні з резервуванням транспондерів на основі пасивних компонентів

Результати моделювання резервування оптичних каналів для першої версії

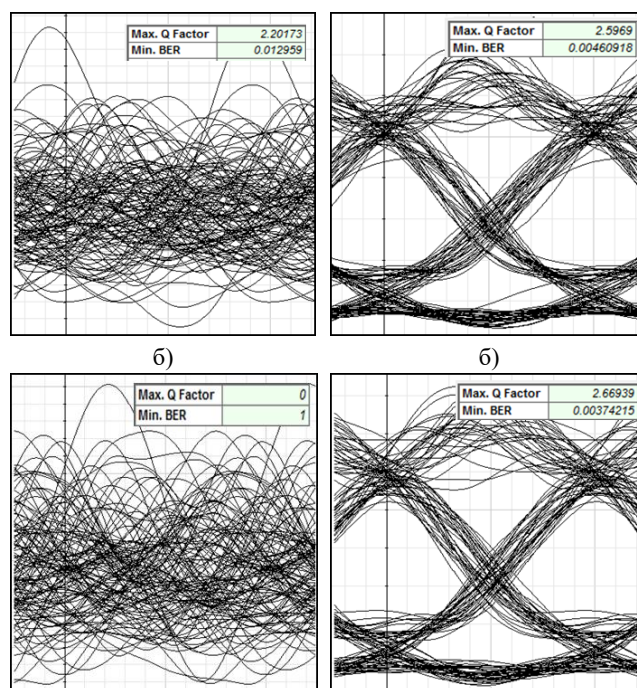


Результати моделювання резервування оптичних каналів для першої версії

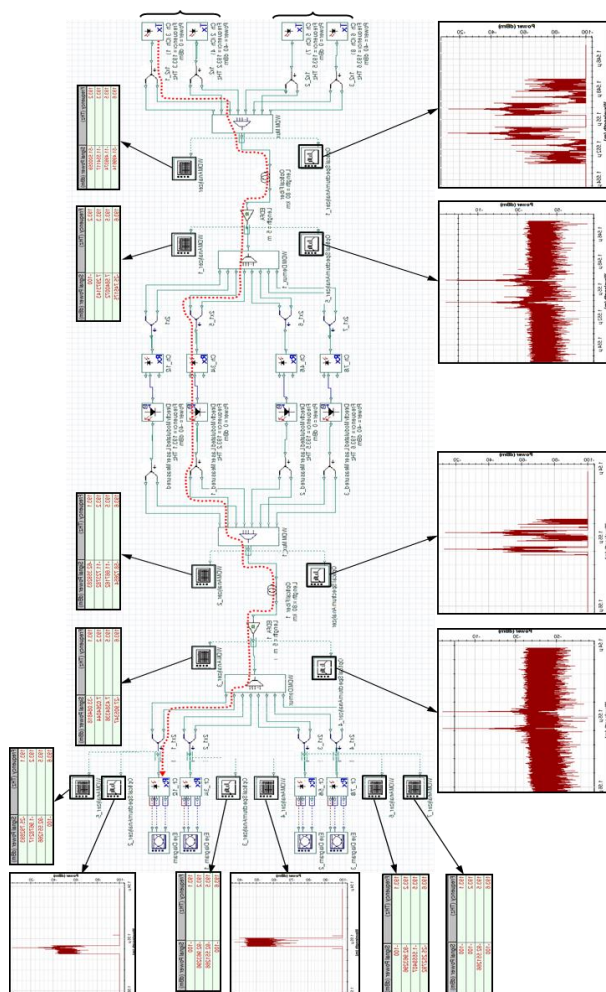
Результати спектральних значень оптичних каналів для другої схеми резервування



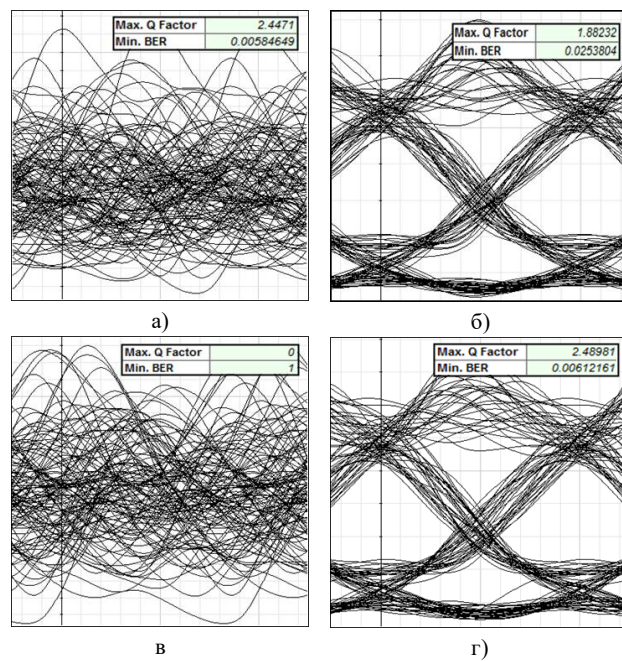
Результати спектральних значень оптичних каналів для другої схеми резервування каналів WDM у штатному режимі



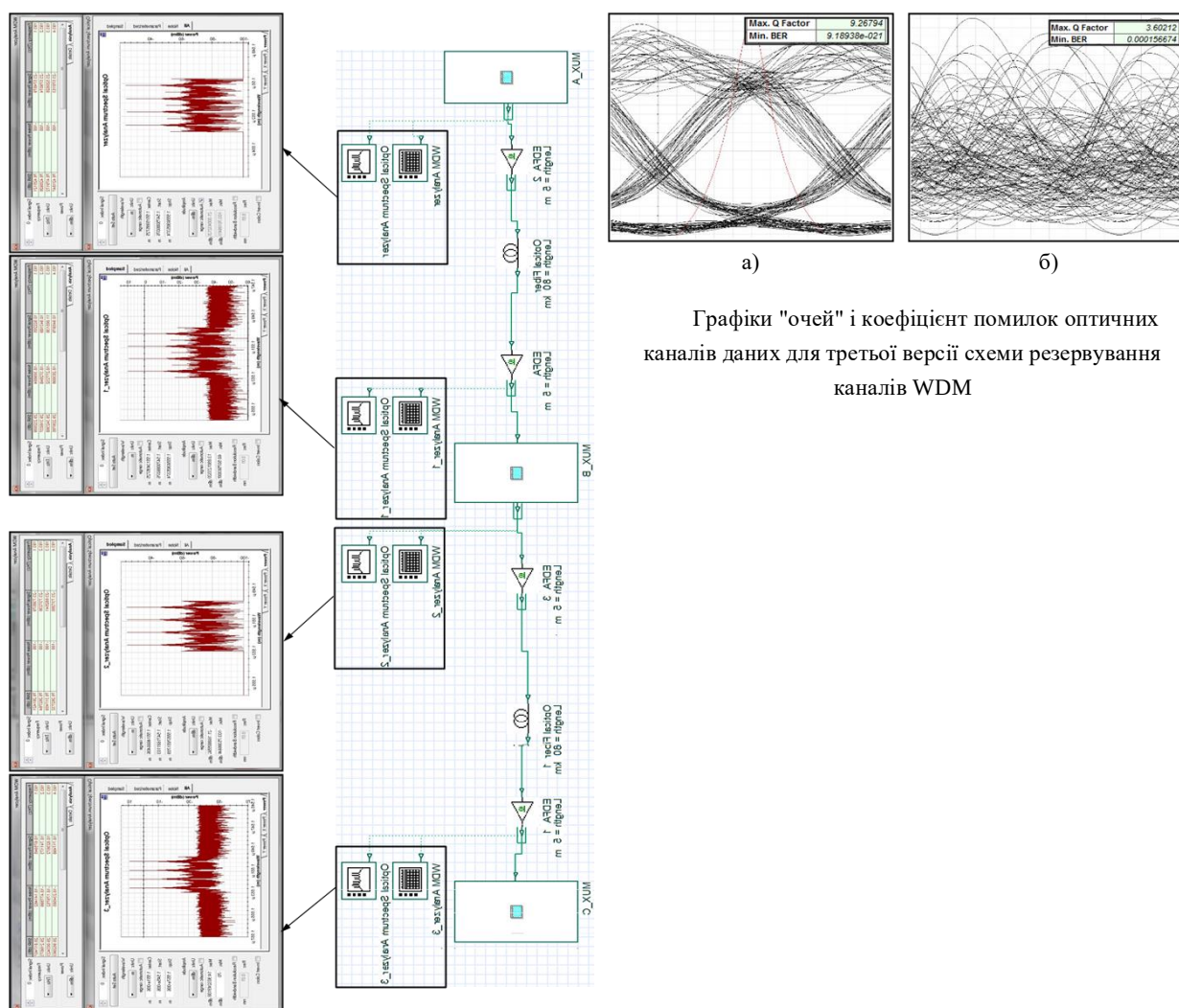
Результати якісних показників оптичного каналу під час моделювання другої схеми резервування каналу WDM у штатному режимі



Результати спектральних значень оптичних каналів для другої схеми резервування каналів WDM

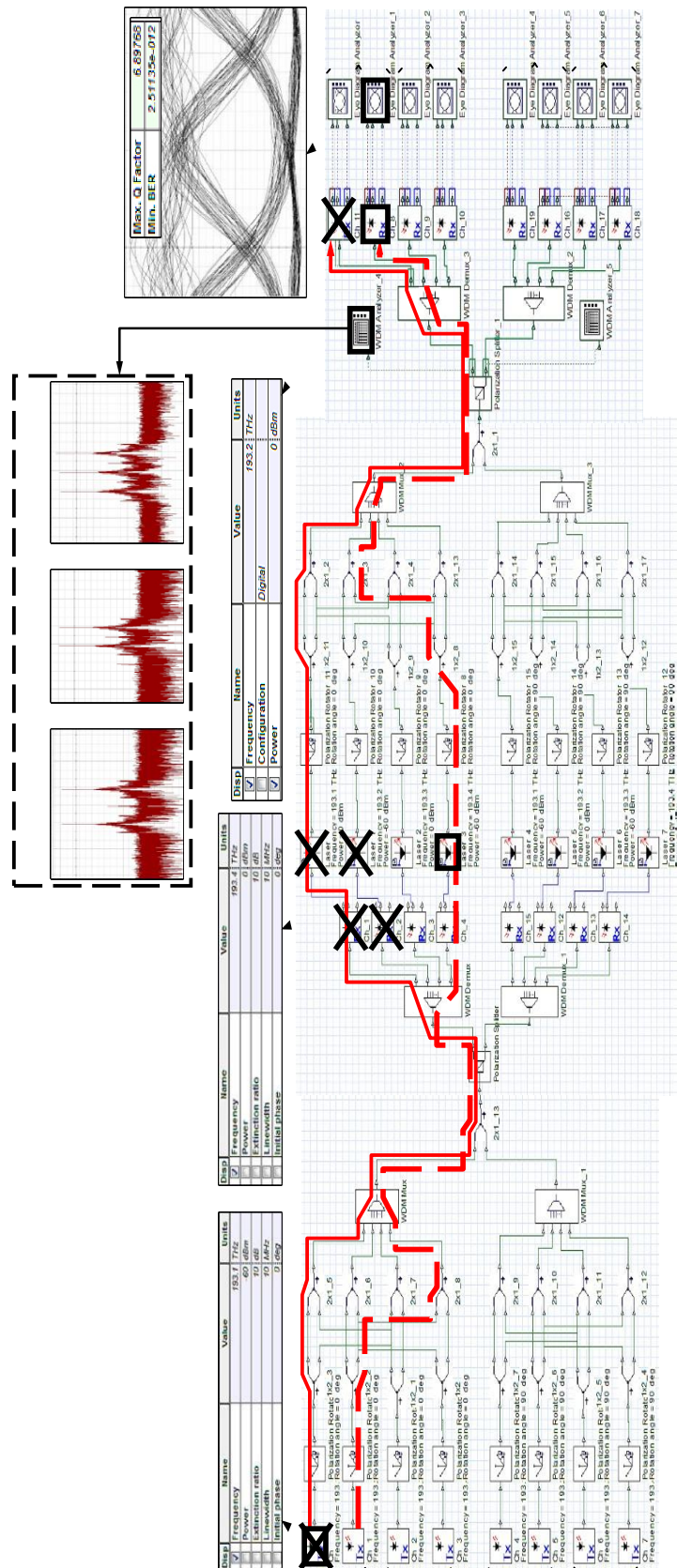


Результати спектральних значень оптичних каналів для третьої версії схеми резервування каналів WDM



Результати спектральних значень оптичних каналів для третьої версії схеми резервування каналів WDM.

Маршрути проходження основного та резервного тракта передачі даних першого клієнтського каналу



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Дослідження схем резервування каналів в оптичних системах

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Стальченко О.В к.т.н., доц. каф. ІКСТ

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	93%
Загальна схожість	7%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор

(підпис)

Брашовецький В.Є.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)