

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки та телекомунікацій

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ
ЗАСОБАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
RESEARCH OPTICAL DATA TRANSMISSION CHANNELS BY
MEANS OF IMITATION MODELING**

спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Телекомунікації та радіотехніка
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕКРМ-21
Лучук Володимир Віталійович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Якимчук Наталія Миколаївна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« ____ » _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Селепина Йосип Романович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітня програма: «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лучуку Володимиру Віталійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи Дослідження оптичних каналів передачі даних засобами імітаційного моделювання

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Якимчук Наталія Миколаївна*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» січня 2025 р. № 20/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 05.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Інформаційні матеріали щодо структури та параметрів WDM систем оптичного зв'язку, моделі оптичних каналів передачі даних. Програмне середовище OptiSystem для моделювання оптичної системи із джерелами сигналу, лінією зв'язку, елементами модуляції, фільтрації та приймачем.

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

Вступ

Розділ 1 Оптиковолоконні системи спектрального ущільнення каналів як об'єкт моделювання

Розділ 2 Імітаційне моделювання оптиковолоконних систем

Розділ 3 Аналіз та дослідження результатів моделювання

Розділ 4 Оптимізація розміщення підсилювачів

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Презентація PowerPoint 10 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Висновки</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		%	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Якимчук Н. М., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 03.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Оптиковолоконні системи спектрального ущільнення каналів як об'єкт моделювання</i>	до 06.09.2025 р.	
2.	<i>Розділ 2 Імітаційне моделювання оптиковолоконних систем</i>	до 20.9.2025 р.	
3.	<i>Розділ 3 Аналіз та дослідження результатів моделювання</i>	до 11.10.2025 р.	
4.	<i>Розділ 4 Оптимізація розміщення підсилювачів</i>	до 01.11.2025 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 15.11.2025 р.	
6.	<i>Формування переліку використаних джерел</i>	до 22.11.2025 р.	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 29.11.2025 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 01.12.2025 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 05.12.2025 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	до 30.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис) _____ **Лучук В. В.**
(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис) _____ **Якимчук Н. М.**
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лучук В. В. Дослідження оптичних каналів передачі даних засобами імітаційного моделювання. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Телекомунікації та радіотехніка» спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025. 76 с.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. В роботі проаналізовано структуру технології WDM, особливості імітаційного моделювання. Виконано моделювання та аналіз параметрів якості сигналу 8-канальної WDM системи. Проведена оптимізація розміщення та параметрів оптичних підсилювачів, для регенераційних і магістральних ділянок оптичного тракту. Отримані результати можуть використовуватись для проєктування WDM-систем нового покоління.

Ключові слова: WDM, імітаційне моделювання, EDFA, якість сигналу.

ANNOTATION

Luchuk V. Research Optical Data Transmission Channels by Means of Imitation Modeling. Manuscript.

Master's qualifying work of EP «Telecommunications and Radio Engineering» specialty 172 Telecommunications and radioengineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025. 76 с.

The master's thesis consists of an introduction, four sections, conclusions, a references and appendices. The work analyzes the structure of WDM technology and the specific features of simulation modeling. An 8-channel WDM system was modeled, and its signal quality parameters were evaluated. Optimization of the placement and parameters of optical amplifiers was carried out for both regeneration and long-haul sections of the optical link.

Keywords: WDM, Simulation Modeling, EDFA, Signal Quality.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ОПТОВОЛОКОННІ СИСТЕМИ СПЕКТРАЛЬНОГО УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТ МОДЕЛЮВАННЯ.....	9
1.1 Телекомунікаційні основи WDM.....	9
1.2 Структура систем спектрального ущільнення каналів.....	14
1.3 Специфікації моделювання та проектування WDM.....	21
РОЗДІЛ 2 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМ.....	25
2.1 Вибір та характеристика середовища моделювання.....	25
2.2 Модель волоконно-оптичної WDM системи	27
2.3 Вибір і розрахунок параметрів моделі оптоволоконного тракту.....	33
2.4 Моделювання блоку приймачів оптичних сигналів.....	39
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ..	42
3.1 Вимірювання і оцінка оптичної потужності компонентів.....	42
3.2 Вимірювання і оцінка якості передачі з використанням око-діаграм.....	45
3.3 Аналіз спектру оптичних сигналів.....	51
3.4 Оцінка співвідношення сигнал/шум окремих оптичних каналів.....	54
3.5 Аналіз і оцінка сигналів в часовій області.....	55
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ.....	60
4.1 Особливості акумуляції шуму в оптичних лініях з підсилювачами.....	60
4.2 Моделювання вибору оптичних підсилювачів для відрізків в межах довжини регенераційної ділянки	61
4.3 Моделювання вибору оптичних підсилювачів для довгих ліній магістральних ВОТ.....	66
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ.....	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

ASE (Amplified Spontaneous Emission) – підсилене спонтанне випромінювання, шум, що виникає в оптичних підсилювачах

BER (Bit Error Rate) – відносна кількість помилок під час передавання бітів даних; один із головних показників якості цифрового каналу

CW (Continuous Wave) – випромінювання лазера з постійною потужністю

DCF (Dispersion Compensating Fiber) – компенсаційне оптичне волокно

EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) – оптичний підсилювач, легований ербієм

MUX / DMUX (Multiplexer / Demultiplexer) – пристрої для мультиплексування та демультиплексування сигналів за довжиною хвилі

NZDSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber) – волокно зі зсунутою, але ненульовою дисперсією, що зменшує нелінійні ефекти у WDM-системах

OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) – оптичне відношення сигнал/шум, показник якості оптичного сигналу

PON (Passive Optical Network) – пасивна оптична мережа, що використовує безактивні елементи розподілу сигналу

PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence) – псевдовипадкова бітова послідовність, що використовується як тестовий сигнал у моделюванні

Q-фактор (Quality Factor) – параметр, який характеризує якість відновленого сигналу на приймачі; використовується для оцінки ефективності системи

RZ (Return-to-Zero) – формат лінійного кодування, при якому сигнал повертається до нульового рівня протягом кожного біта

WDM (Wavelength Division Multiplexing) – ущільнення сигналів за довжиною хвилі; технологія, що дозволяє одночасно передавати кілька каналів у межах одного оптичного волокна

ВСТУП

Актуальність теми. Стрімкий розвиток інформаційних технологій і постійне зростання обсягів переданої інформації зумовлюють підвищені вимоги до пропускної здатності та надійності систем зв'язку. Одним із найефективніших напрямів їх удосконалення є використання волоконно-оптичних систем передачі даних, які забезпечують високу швидкість, малу втрату сигналу, електромагнітну завадостійкість і потенціал масштабування. Сучасні тенденції розвитку телекомунікацій вимагають дослідження складних оптичних конфігурацій, зокрема систем із ущільненням за довжиною хвилі (WDM), з компенсацією дисперсії, з підсиленням сигналу тощо.

У таких умовах особливого значення набувають імітаційні методи дослідження, що дозволяють аналізувати роботу оптичних систем без потреби у складних і дорогих експериментальних установках. Серед сучасних програмних засобів, призначених для цього, провідне місце займає середовище OptiSystem, яке дає змогу створювати, моделювати й оптимізувати різноманітні типи оптичних ліній зв'язку. Його використання сприяє глибшому розумінню процесів передавання сигналів, дослідженню фізичних явищ у волокні та розробленню практичних рекомендацій для побудови ефективних телекомунікаційних систем.

Метою роботи є дослідження можливостей середовища OptiSystem для моделювання, аналізу та оптимізації оптичних систем передачі даних, а також визначення шляхів підвищення якості та ефективності роботи таких систем на основі результатів імітаційних експериментів.

Об'єкт дослідження – процес передавання інформаційних сигналів в оптичних каналах зв'язку.

Предмет дослідження – методи та засоби комп'ютерного моделювання оптичних систем передачі даних у середовищі OptiSystem, їх параметри, характеристики та вплив фізичних факторів на якість передачі сигналу.

Завдання, які необхідно виконати:

1. Проаналізувати принципи побудови та функціонування оптичних систем передачі даних різних типів і конфігурацій, визначити основні чинники, що

впливають на якість передавання сигналів у волоконно-оптичних лініях.

2. Розробити імітаційну модель оптичної системи в середовищі OptiSystem, що відображає ключові елементи та процеси передачі даних у каналі зв'язку.

3. Дослідити вплив фізичних параметрів оптичного каналу на якість відновлення сигналу.

4. Виконати параметричну оптимізацію системи для досягнення найкращих показників передачі, використовуючи інструменти аналізу OptiSystem.

5. Оцінити можливості середовища OptiSystem для дослідження оптичних систем усіх типів та сформулювати рекомендації щодо здійснення моделювання, інтерпретації результатів і практичного використання отриманих даних у навчальних і проєктних цілях.

Новизна роботи полягає у створенні та комплексному дослідженні багатоканальної WDM-моделі з оптимізацією дисперсії та підсилення, що дозволило встановити узагальнені принципи побудови й аналізу сучасних оптичних ліній у середовищі OptiSystem.

Окремі результати роботи були представлені у статті Якимчук Н. М., Лучук В. В. Алгоритмічний підхід до вибору кількості та параметрів підсилювачів у довгих WDM магістралях з використанням OptiSystem. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Луцьк, № 61, 2025. С. 280-289. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-37>.

РОЗДІЛ 1

ОПТОВОЛОКОННІ СИСТЕМИ СПЕКТРАЛЬНОГО УЩІЛЬНЕННЯ КАНАЛІВ ЯК ОБ'ЄКТ МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Телекомунікаційні основи WDM

Технологія спектрального ущільнення каналів (DWDM) зарекомендувала себе як одна з найефективніших у сфері сучасних систем зв'язку. Загальний принцип спектрального ущільнення каналів (WDM) забезпечує багаторазове зростання пропускної здатності існуючих ліній завдяки одночасній передачі каналів по одному волоконно-оптичному тракту. Упродовж відносно короткого періоду експлуатації продуктивність систем DWDM істотно зростає: кількість каналів збільшилася з чотирьох до ста двадцяти восьми, тоді як міжканальна роздільна смуга зменшилася з 500 ГГц до 50 ГГц. Такий прогрес став можливим завдяки розвитку волоконно-оптичних компонентів, фотонних інтегральних схем та удосконалених технологій пакування.

Спочатку в оптичних мережах зв'язку широкого поширення набули системи часових методів ущільнення каналів (TDM). Вони конструктивно залежать від електронних засобів мультиплексування та демультиплексування, тому їхні вузли здійснюють перетворення сигналів з оптичної форми в електронну, далі обробку мультиплексування/демультиплексування в електронному домені, а потім зворотне перетворення в оптичну форму. Через це пропускна здатність систем TDM безпосередньо обмежується швидкодією електронних процесорів. На відміну від них, системи спектрального ущільнення каналів (WDM) реалізують мультиплексування та демультиплексування винятково в оптичній області, що дає змогу формувати мережі, у яких вузлові функції виконуються без повторних перетворень сигналів між оптичним та електронним середовищами.

Однією з ключових технологій, що забезпечує розвиток оптичних мереж, є саме спектральне ущільнення каналів і демультиплексування (рис. 1.1). Суть цього принципу полягає у використанні оптичних пристроїв мультиплексування та демультиплексування, які є центральними елементами системи WDM. Оптичні сигнали генеруються лазерними діодами на ряді монохроматичних довжин хвиль

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, у заданому діапазоні спектра, після чого передаються через N волокон до системи WDM, де здійснюється їх ефективне об'єднання для подальшої високошвидкісної передачі [1].

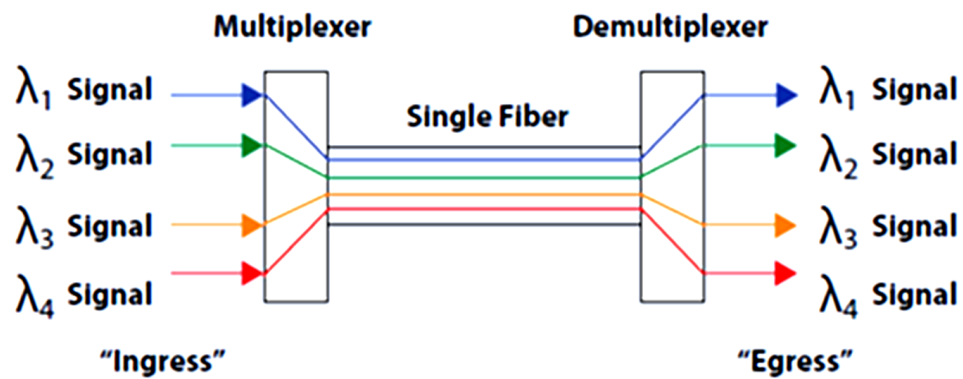


Рисунок 1.1 – Базова концепція WDM у волоконно-оптичних комунікаціях [1]

Система спектрального ущільнення каналів (WDM) об'єднує вхідні оптичні сигнали у багаточастотний вихідний потік, що отримав назву мультиплексування. Саме цей процес забезпечує можливість використання надзвичайно широкої смуги пропускання, притаманної оптичному волокну. Об'єднаний багатоспектральний сигнал спрямовується в одне волокно для транспортування на велику відстань. У приймальному пункті відбувається зворотний процес – демультиплексування, під час якого пристрій WDDM розділяє багаточастотний сигнал на окремі складові довжини хвиль, що відповідають вузькосмуговим каналам. Кожен канал після виділення ідентифікується за своєю центральною довжиною хвилі, яка має збігатися з початковою довжиною хвилі джерела випромінювання.

При проектуванні демультиплексорів важливо забезпечити правильний вибір ширини спектральних смуг каналів, $\Delta\lambda_N$. Вони повинні бути достатньо широкими для врахування технологічних та системних допусків, але водночас досить вузькими, аби уникнути накладання спектрів сусідніх каналів. Зазвичай пристрої WDM та WDDM є спектральними системами, що не мають можливості налаштування в процесі роботи, тому їхні робочі характеристики значною мірою визначаються точністю конструкторських рішень та якістю виготовлення.

Системи спектрального ущільнення каналів (WDM) функціонують за принципом використання різних довжин хвиль для передачі окремих каналів. Кожен канал може транспортувати як однорідний, так і різнорідний трафік: наприклад, на одній довжині хвилі може передаватися сигнал SONET / SDH (синхронна оптична мережа / синхронна цифрова ієрархія), на іншій – дані в режимі АТМ (асинхронний режим передавання), а ще інша може бути використана для передачі мовного трафіку в режимі TDM, потокового відео або даних за протоколом IP. Важливою перевагою є можливість передавання даних на різних швидкостях у межах однієї оптичної мережі. Це означає, що один канал може працювати на швидкості OC-3, OC-12, OC-48, OC-192 чи навіть OC-768, тоді як інший паралельно забезпечує передавання на іншій швидкості, і все це здійснюється через одне волокно [1]. Реалізація таких функцій відбувається за допомогою мультиплексора на передавальному боці та демультимплексора на приймальному.

Залежно від призначення впроваджуються конфігурації для протяжних магістральних ліній, для локальних мереж доступу, а також для реконфігурованих мережевих структур. Кожна з таких систем вимагає специфічного набору компонентів WDM. У найпростішому випадку, який відповідає конфігурації точка-точка, на передавальному боці як джерело сигналу використовується масив лазерів, налаштованих на заздалегідь визначені довжини хвиль. Канальні параметри цих джерел суворо регламентуються стандартами Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU). До ключових елементів WDM-мереж також належать мультиплексори з функціями введення та вилучення каналів (OADM), оптичні крос-комутатори (OCX) і підсилювачі оптичних сигналів, серед яких особливе місце посідають підсилювачі на волокнах, легованих ербієм (EDFA).

Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) розробив стандарт для оптичних систем зв'язку, який визначає використання певних частотних сіток для ідентифікації та позначення каналів WDM. Відповідно до цього стандарту початковим є канал з частотою 190,00 ТГц (канал 0, довжина хвилі 1577,86 нм), а наступні канали формуються з інтервалом у 0,10 ТГц. У більшості випадків робоча область охоплює діапазон С-спектра, який відповідає довжинам хвиль від

1520 до 1570 нм [1]. Зв'язок між довжиною хвилі λ та частотою ν у середовищі описується виразом (1.1):

$$c = \lambda \nu n, \quad (0.1)$$

де n – показник заломлення середовища;

c – швидкість світла у вакуумі.

Таким чином, при проектуванні систем спектрального ущільнення необхідно забезпечити, щоб центральна довжина хвилі кожного каналу збігалася з відповідним каналом за сіткою ІТУ. Наприклад, матричний хвилевідний ґратковий фільтр (AWG) на 40 каналів із міжканальною роздільною здатністю 100 ГГц може використовуватися в системах DWDM таким чином, що його центральна довжина хвилі буде відповідати каналу ІТУ №30 (193,00 ТГц, 1553,33 нм). Довжини хвиль каналів та їхні відповідні частоти можна визначити за наведеним вище рівнянням. У частотному поданні канали ІТУ описуються:

$$\nu_N = 190.00 + 0.1N, \quad N = 0,1,2,\dots \quad (0.2)$$

Міжканальна роздільна здатність за довжиною хвилі визначається за виразом (1.3):

$$\Delta\lambda = \frac{1}{c}(\Delta\nu\lambda^2), \quad (0.3)$$

де $c = 299792.458$ ТГц·нм;

$\Delta\nu = 0,1$ ТГц.

Із цього співвідношення випливає, що $\Delta\lambda \approx 0,8$ нм, однак ця величина дещо зростає пропорційно квадрату довжини хвилі. Системи спектрального ущільнення можуть бути спроектовані як для роботи на частотах сітки ІТУ, так і на їхніх кратних значеннях (200 ГГц, 500 ГГц тощо) або підкратних (50 ГГц).

У таких системах оптичні випромінювачі, зокрема лазери, модулюються

індивідуальними електронними сигналами. Модуляція може здійснюватися як безпосереднім способом, так і за допомогою зовнішніх електрооптичних методів. Таким чином, канали ІТУ розташовані з частотним інтервалом 100 ГГц, а робочі частоти отримали назву частотної сітки ІТУ (або сітки довжин хвиль).

Застосування технології щільного спектрального ущільнення каналів (DWDM) у магістральних та міських транспортних мережах вимагає врахування різних технічних вимог, що зумовлює необхідність відмінних стратегій проектування для цих двох категорій систем. Магістральні лінії охоплюють відстані від кількох сотень до тисяч кілометрів, тоді як у міських оптичних мережах протяжність зазвичай не перевищує 100 км. У магістральних системах як волоконна, так і трафікова топологія мають лінійний характер, тобто організовані за принципом з'єднання «точка-точка». Натомість у міських мережах застосовуються кільцеві, комірчасті або крос-комутаційні топології, що забезпечує гнучкість та можливість інтеграції різноманітних сервісів (рис. 1.2).

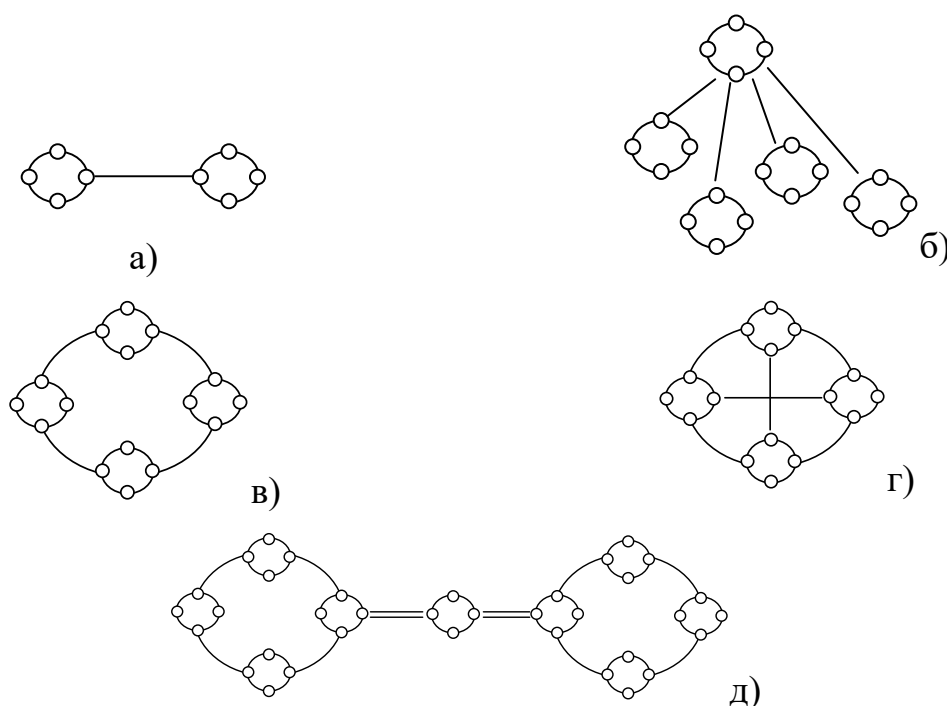


Рисунок 1.2 – Топології WDM: а) точка-точка, б) зірка, в) кільце, г) сітка, д) крос-комутатор [1]

Особливістю магістральних рішень є необхідність використання оптичного підсилення для компенсації втрат, спричинених затуханням сигналу на великих відстанях. Проте включення підсилювачів у мережу суттєво підвищує її загальну вартість, ускладнює архітектуру та може зменшувати кількість доступних каналів. Для систем далекого зв'язку ці додаткові витрати та конструктивні труднощі є виправданими, однак для міських мереж їх застосування часто недоцільне.

У міському сегменті оптичної мережі окремий канал трафіку зазвичай проходить крізь значну кількість вузлів введення / вилучення сигналів, перш ніж досягне кінцевого пункту призначення. Через це втрати, зумовлені роботою обладнання, відіграють критичну роль у формуванні балансу потужності. У таких умовах необхідно забезпечити оптимальне співвідношення між втратами у волокні та втратами на активних і пасивних компонентах мережі.

Раціонально спроектована топологія з використанням інтегрованих WDM-компонентів, зокрема матричних хвилевідних ґраткових фільтрів (AWG), дозволяє обійтися без застосування оптичних підсилювачів, що робить міські рішення економічно доцільнішими й технічно простішими у реалізації.

1.2 Структура систем спектрального ущільнення каналів (WDM)

Сучасні оптичні телекомунікаційні системи є основою високошвидкісних мереж зв'язку, здатних забезпечувати передачу великих обсягів інформації на значні відстані з мінімальними втратами. Для забезпечення якісної передачі сигналу система включає низку функціональних блоків: передавач, волоконно-оптичну лінію, підсилювачі, фільтри та приймач (рис. 1.3).

Передавальна частина системи забезпечує формування та модуляцію інформаційного потоку. Першим елементом є генератор псевдовипадкової бітової послідовності (PRBS Generator), який створює тестовий цифровий сигнал із наперед визначеною статистичною структурою. Такий сигнал використовується для моделювання реального потоку даних у цифрових системах.

Отримані біти надходять до електричного генератора імпульсів NRZ (Non-Return-to-Zero Pulse Generator), який перетворює послідовність бітів у

послідовність електричних імпульсів фіксованої тривалості. Формат NRZ характеризується тим, що рівень сигналу зберігається постійним протягом усього бітового інтервалу, що робить його простим і широко застосовуваним у високошвидкісних системах передачі.

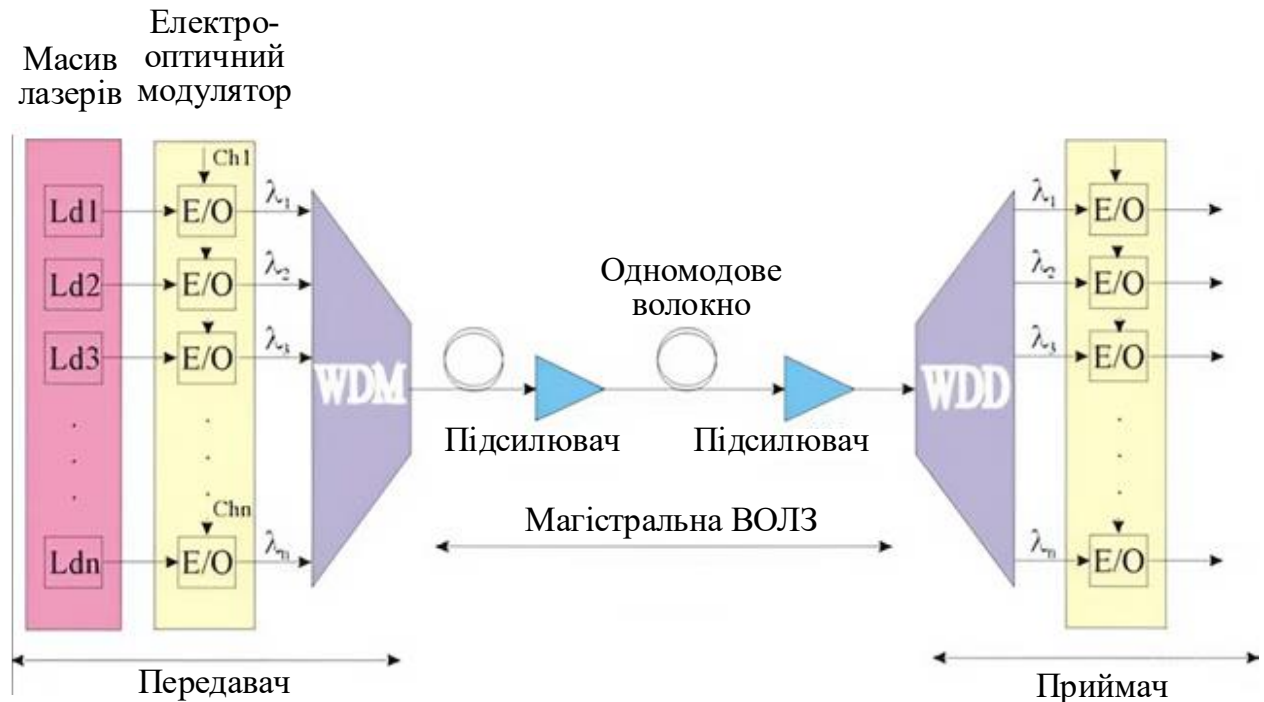


Рисунок 1.3 – Базова структура оптичної системи передачі «точка-точка» [10]

Джерелом оптичного випромінювання є лазер неперервного випромінювання, який генерує монохроматичне когерентне світло на фіксованій довжині хвилі, зазвичай близькій до 1550 нм – діапазону мінімальних втрат у волоконі. Основними параметрами лазера є ширина спектральної лінії, що визначає стабільність частоти випромінювання, та вихідна потужність, від якої залежить амплітуда оптичного сигналу на вході модулятора.

Модуляція найчастіше здійснюється за допомогою модулятора Маха-Цендера (MZM), який використовує інтерференційний принцип для зміни інтенсивності світлового сигналу відповідно до прикладеної напруги. Такий модулятор дозволяє реалізувати формат модуляції On-Off Keying, при якому логічна «1» відповідає наявності оптичного випромінювання, а логічний «0» – його відсутності.

Основним середовищем поширення оптичного сигналу є волоконно-оптична лінія зв'язку, яка моделюється як послідовність декількох прольотів (span). Кожен проліт містить відрізок волокна певної довжини, втрати на з'єднаннях і, за потреби, проміжний підсилювач.

Як передавальне середовище зазвичай використовується одномодове волокно зі зниженими параметрами дисперсії та втрат, наприклад, стандарт ІТУ-Т G.655. У процесі поширення сигналу у волокні виникають основні фізичні ефекти, які впливають на якість передавання:

- загасання – поступове зменшення потужності сигналу через поглинання та розсіювання в матеріалі волокна;
- хроматична дисперсія – різна швидкість поширення компонентів сигналу з різними довжинами хвиль, що призводить до розширення імпульсів;
- нелінійні ефекти – взаємодія сигналу з матеріалом волокна при високих потужностях, що може викликати спотворення;
- поляризаційна модова дисперсія – зміна форми сигналу внаслідок різної швидкості поширення ортогональних поляризаційних мод.

Під час поширення сигналу у волокні потужність поступово зменшується, тому для компенсації втрат застосовуються ербієві доповані волоконні підсилювачі (EDFA). Принцип їх роботи базується на стимульованому випромінюванні атомів ербію, активованих допоміжним насосним лазером. EDFA дозволяє підсилити сигнал у діапазоні довжин хвиль близько 1550 нм без електричного перетворення, що є ключовою перевагою для систем великої протяжності.

Основними параметрами підсилювача є коефіцієнт підсилення, який визначає ступінь компенсації втрат, коефіцієнт шуму, що характеризує додатковий шум, внесений підсилювачем, та рівень насичення вихідної потужності. У практичних моделях EDFA може працювати в різних режимах – як основний підсилювач лінії, як попередній для підвищення рівня сигналу перед приймачем, або як бустер на виході передавача.

У багатоканальних системах після EDFA встановлюється фільтр

вирівнювання підсилення, який компенсує нерівномірність підсилення по спектру. Це дозволяє уникнути спотворень між каналами при щільному спектральному мультиплексуванні.

Приймальна частина системи здійснює виділення та відновлення переданого сигналу. Спочатку оптичний сигнал проходить через оптичний смуговий фільтр, який обмежує спектр прийнятого випромінювання, зменшуючи вплив шумів та сусідніх каналів.

Далі сигнал потрапляє на PIN-фотодіод, який перетворює оптичну потужність у пропорційний електричний струм. Основними параметрами фотодетектора є чутливість, що визначає ефективність перетворення, та темновий струм, який характеризує рівень власних шумів.

Отриманий електричний сигнал фільтрується за допомогою електричного низькочастотного фільтра для усунення високочастотних шумів і відновлення форми імпульсів. Подальший аналіз якості прийнятого сигналу здійснюється за допомогою аналізатора бітових помилок, який оцінює ймовірність помилкової передачі біта та формує очкову діаграму, що відображає якість відкриття символів і рівень шумового впливу.

У разі реалізації багатоканальної системи використовується оптичний мультиплексор (MUX), що об'єднує кілька каналів із різними довжинами хвиль у спільний оптичний тракт.

У сучасних телекомунікаційних системах для задач WDM найширше застосовуються три основні типи пристроїв MUX / DMUX [1]. До них належать тонкоплівкові інтерференційні фільтри, волоконні брегівські ґратки (FBG) та матричні хвилевідні ґраткові фільтри (AWG). Два перших типи є дискретними компонентами, тобто їхня робота ґрунтується на поєднанні кількох окремих елементів, що виконують функції мультиплексування та демультиплексування. Натомість AWG належить до класу фотонних інтегральних схем (PIC), сформованих на кремнієвій підкладці. Ця технологія є однією з найбільш перспективних, адже відкриває нові можливості для створення високопродуктивних і масштабованих WDM-рішень. Окрему увагу заслуговують також технології, що базуються на вільнопросторових дифракційних ґратках, які

демонструють потенціал щодо зниження вартості одного каналу, збільшення кількості каналів та покращення загальної продуктивності систем. Таким чином, сучасний розвиток WDM-систем спирається на конкуренцію кількох технологічних підходів, кожен з яких має свої унікальні переваги й визначає подальшу еволюцію оптичних мереж.

Структура тонкоплівкового інтерференційного фільтра ґрунтується на принципі роботи еталона Фабрі-Перо (рис. 1.4). Він складається з набору дзеркал, розділених резонаторними порожнинами, кількість яких зазвичай становить чотири або п'ять. Така конструкція функціонує як смуговий фільтр, у якому довжина хвилі пропускної смуги визначається переважно геометрією порожнини. Оскільки дзеркала мають часткове відбивання, частина падаючого світла проникає всередину, тоді як основна його частина відбивається назад.

Використання кількох комбінацій дзеркал і порожнин дає змогу виокремлювати надзвичайно вузьку смугу пропускання, причому зміна довжини резонаторної порожнини дозволяє вибирати потрібну довжину хвилі. Завдяки цьому еталони можуть бути сконструйовані для роботи на будь-якому каналі сітки ІТУ.

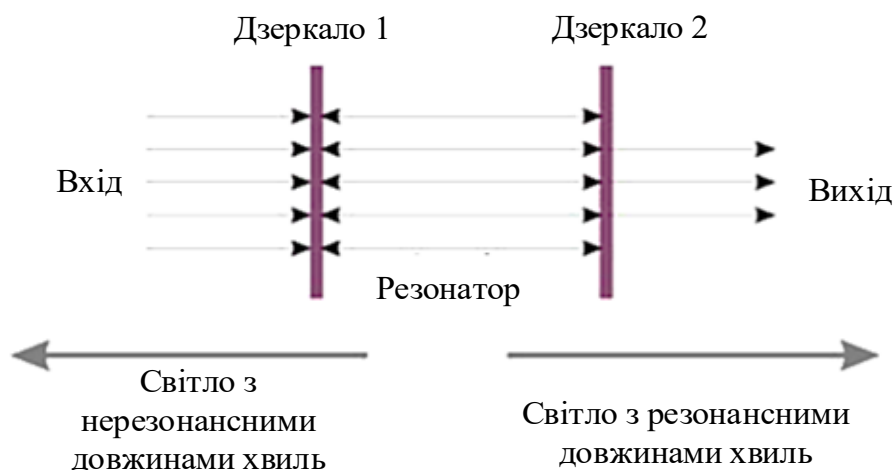


Рисунок 1.4 – Базова структура фільтра Фабрі–Перо (еталон) [1]

Попри відносну концептуальну простоту, виготовлення WDM-систем на основі тонкоплівкових фільтрів є складним технологічним завданням. Для стабілізації пропускної смуги кожного каналу ІТУ необхідне високоточне юстування та надійне з'єднання оптичних волокон із фільтром. До того ж для

кожного окремого каналу потрібен власний фільтр, який відповідає його пропускній смузі, через що центральна довжина хвилі може випадково відрізнятись від номінальної частоти за стандартом ІТУ. У випадку багатоканальних систем фільтри з'єднуються послідовно, і втрати сигналу при цьому накопичуються, що призводить до найбільших втрат на останньому каналі модуля. Для вирівнювання нерівномірності втрат у межах допустимих значень застосовується додаткове ослаблення на каналах із меншими втратами, щоб зрівняти їх із найбільш ослабленими.

Залучення великої кількості фільтрів робить процес збирання трудомістким і підвищує ймовірність відмови. У результаті вихід придатних виробів у технології тонкоплівкових інтерференційних фільтрів становить близько 40%, що суттєво знижує її привабливість у застосуванні до WDM-систем. Водночас, з огляду на те, що альтернативні технології ще не досягли достатнього рівня зрілості, саме цей підхід і досі зберігає помітну частку на ринку оптичних комунікацій.

Волоконна брегівська ґратка (рис. 1.5) являє собою періодично модифікований хвилевід, сформований у серцевині оптичного волокна завдяки періодичному збуренню показника заломлення вздовж його довжини.

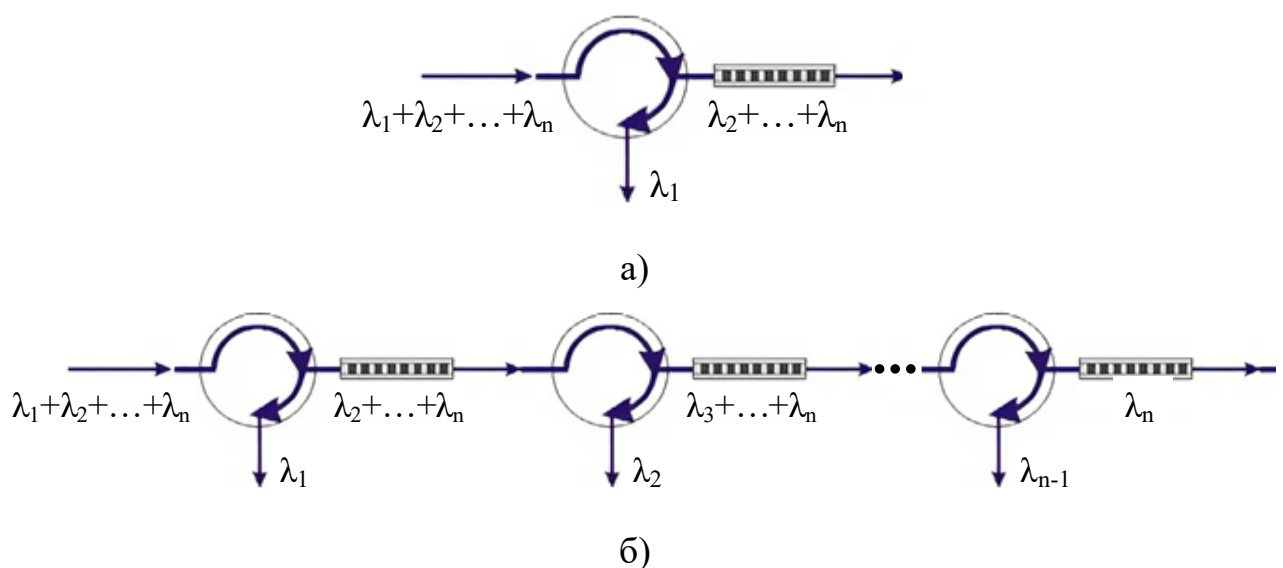


Рисунок 1.5 – а) фільтрація однієї довжини хвилі з мультиплексованого сигналу за допомогою волоконної Брегівської ґратки; б) базова структура демультіплексора (DMUX) на основі каскадних FBG та циркуляторів [1]

Для роботи в ближньому інфрачервоному діапазоні ($\sim 1,55$ мкм) періодичність FBG зазвичай становить від 1 до 10 мкм. Розташована на виході циркулятора, така ґратка відбиває назад лише ту довжину хвилі, для якої вона спроектована, виконуючи тим самим функцію смугового фільтра.

Основні параметри WDM-систем, зокрема центральна довжина хвилі, ширина смуги пропускання та пік відбиття, визначаються зміною характеристик ґратки. Ключовими параметрами проектування FBG є період ґратки, її довжина та глибина модуляції, яка визначається величиною варіації показника заломлення в області ґратки. Якщо показник заломлення змінюється з ідеальною періодичністю, у спектрі пропускання FBG виникають небажані бічні пелюстки. Тому на практиці для реалізації WDM-систем використовують так звані «розтягнуті» (chirped) брегівські ґратки, в яких період або середнє значення показника заломлення змінюється вздовж довжини структури.

Важливим обмеженням FBG є те, що вона є відбивним, а не пропускним пристроєм. Це означає, що для її використання в системах спектрального ущільнення необхідно застосовувати додаткові елементи, зокрема циркулятори або спеціальні фільтри, що інтегрують відбивну ґратку в архітектуру WDM.

Хоча кремнієва технологія досягла насичення у сфері мікроелектроніки, інженери знайшли для неї нове й перспективне застосування – створення оптичних хвилеводів на кремнієвих підкладках, здатних виконувати різноманітні функції з обробки оптичних сигналів. Такі чипи, призначені для мультиплексування та демультиплексування, відомі як фотонні інтегральні схеми (PIC) або планарні світлохвильові схеми (PLC). Найбільш поширеним застосуванням цієї технології в сучасних телекомунікаційних системах став матричний хвилевідний ґратковий фільтр (AWG), який виконує функції мультиплексора (MUX) та демультиплексора (DMUX) в оптичних мережах.

Попри існування кількох технологій для виготовлення оптичних мультиплексорів і демультиплексорів, кожна з яких має свої переваги та обмеження, постійно триває пошук рішень, що забезпечують вищу ефективність, нижчу собівартість та кращу надійність. У цьому контексті AWG становить особливий інтерес як інтегроване та компактне рішення для систем DWDM. Ці

пристрої стали ключовим елементом у розвитку повністю оптичних мереж, адже вони дають змогу об'єднувати кілька оптичних функцій на одній підкладці, формуючи єдиний модуль, придатний до серійного виробництва в умовах добре розвиненої напівпровідникової індустрії.

Додатковою перевагою технології AWG є можливість інтеграції як активних, так і пасивних елементів на одній підкладці, що забезпечує подальше зменшення габаритів пристрою, підвищення ефективності та надійності. Конструктивно AWG-оптичний чип складається з вхідних хвилеводів, вхідної розширювальної області (slab), масиву хвилеводів, вихідної області та вихідних хвилеводів. Усі ці компоненти виготовляються на єдиній підкладці, утворюючи оптичну інтегральну схему. Завдяки такій архітектурі матричні хвилевідні ґратки стали основою для побудови високопродуктивних, масштабованих і надійних систем спектрального ущільнення у сучасних оптичних мережах.

1.3 Специфікації моделювання та проєктування WDM

Основними параметрами, що визначають роботу систем WDM, є характеристики мультиплексорів (MUX) та демультимплексорів (DMUX). Традиційні одномодові волокна передають сигнали на довжинах хвиль у діапазонах 1300 нм і 1550 нм, тоді як у проміжному діапазоні 1340...1440 нм спостерігається значне поглинання. Тому WDM-системи використовують робочі вікна 1310 нм і 1550 нм. Важливою особливістю є незалежність роботи MUX / DMUX від швидкості передачі даних і формату сигналу.

До критичних параметрів, що враховуються при моделюванні і проєктуванні компонентів WDM, належать:

- втрати на введення (ослаблення сигналу) та їх рівномірність для каналів;
- ширина смуги пропускання каналу (або смуга пропускання), точність, стабільність та рівномірність (або хвилястість) у межах смуги;
- стабільність та точність центральної довжини хвилі, тобто відхилення від сітки ITU;

- перехресні завади між суміжними та несуміжними каналами;
- поляризаційні залежні втрати (PDL);
- втрати на відбиття або зворотне відбиття (для демультимплексора – DMUX);
- спрямованість або пряме відбиття (для мультиплексора – MUX);
- хроматична дисперсія та групова затримка.

Типові значення параметрів MUX / DMUX структурі наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Типові значення параметрів структури MUX / DMUX

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Ширина смуги пропускання	(ГГц) або (нм)	25 або 0,8
Рівномірність смуги пропускання	(дБ)	1,5
Втрати на введення та їх рівномірність	(дБ)	5 та 1,5
Поляризаційні залежні втрати (PDL)	(дБ)	0,5
Перехресні завади між суміжними та несуміжними каналами	(дБ)	25 та 30
Інтегральні середні перехресні завади	(дБ)	20
Втрати на відбиття (Return loss)	(дБ)	45
Спрямованість (Directivity)	(дБ)	50
Хроматична дисперсія	(пс/нм)	10
Диференціальна групова затримка	(пс)	0,5

Ці параметри регламентовані Telcordia та активно відстежуються виробниками обладнання. Типові значення наведені в таблицях і графіках, однак вони варіюються залежно від застосованої технології та рівня її досконалості (рис. 1.6 та рис. 1.7).

Подальший розвиток волоконно-оптичних систем, зокрема для коротколінійних застосунків і майбутнього інтернету нового покоління, вимагає активного використання наукових розробок та досліджень в галузі імітаційного моделювання, що є важливим інструментом, оскільки забезпечує можливість детального аналізу та оптимізації їх характеристик на етапі проектування.

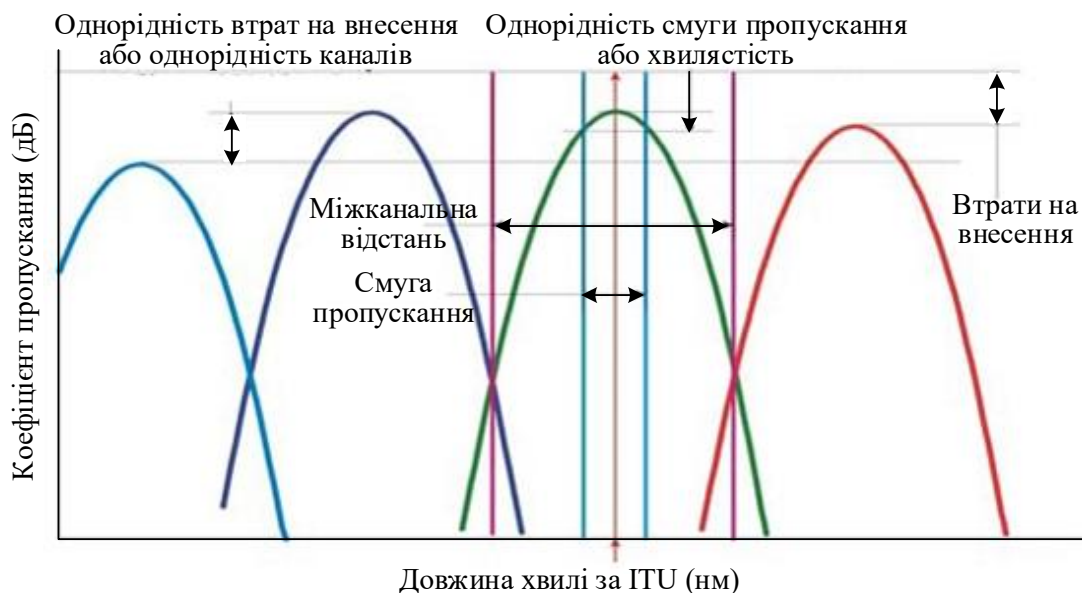


Рисунок 1.6 – Графічне зображення втрат на введення, рівномірності втрат на введення та рівномірності смуги пропускання [1]

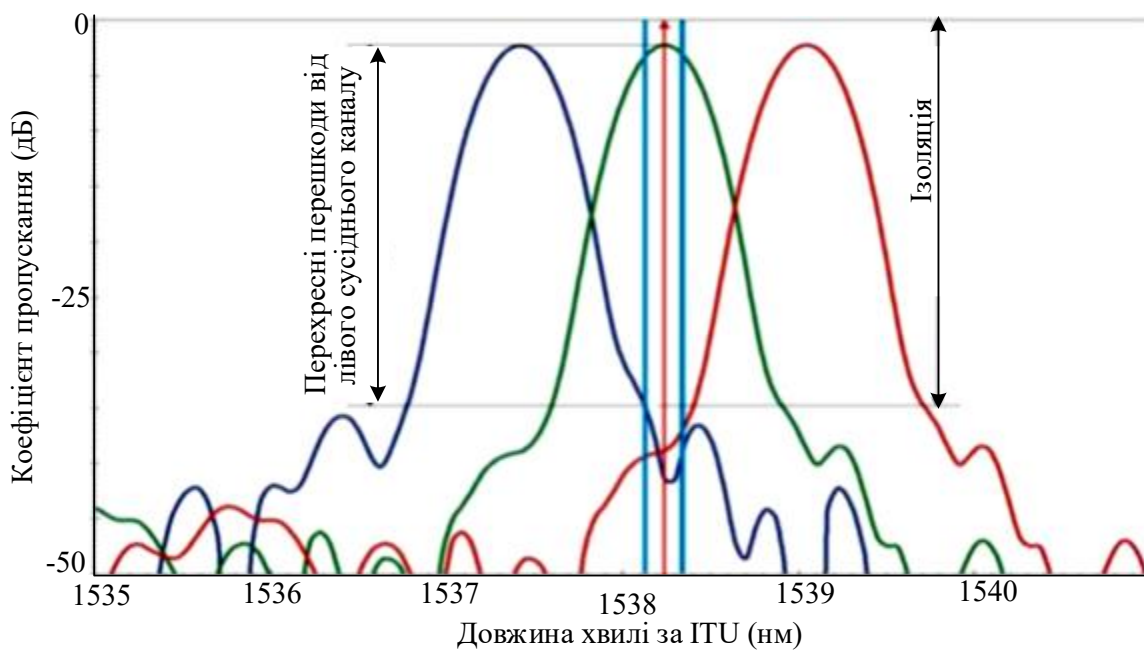


Рисунок 1.7 – Графічне зображення ізоляції каналів та перехресних завад між суміжними каналами [1]

Оптоволоконні WDM-системи є логічним об'єктом для моделювання, оскільки саме в них поєднується висока пропускна здатність, складна взаємодія фізичних ефектів у волокні та вимога до точного узгодження компонентів за спектральними параметрами, особливо коли мова йде про щільні сітки DWDM.

Використання сучасних моделей дозволяє відтворювати роботу оптичних каналів з урахуванням впливу дисперсії, нелінійних ефектів, шумів, перехресних завад та інших чинників, що визначають якість передавання сигналів. Це створює умови для зниження вартості експериментальних досліджень та скорочення часу впровадження нових технологічних рішень.

Особливістю імітаційного моделювання у сфері волоконно-оптичних систем є здатність забезпечувати комплексний аналіз взаємодії ключових параметрів, таких як ширина смуги пропускання, втрати на введення, ізоляція каналів, хроматична дисперсія та диференціальна групова затримка. Це дозволяє оцінювати ефективність роботи багатоканальних систем WDM / DWDM, досліджувати перспективні підходи до компенсації дисперсії, а також моделювати інтегровані фотонні рішення.

Головний виклик у моделюванні оптичних каналів полягає не лише у побудові схеми, а у здатності правильно інтерпретувати результати, відокремити вплив окремих факторів і усвідомити, що зміна одного параметра (наприклад, міжканальної роздільної здатності чи коефіцієнта підсилення EDFA) може мати каскадні ефекти на всі інші складові системи. Саме тому WDM-канали є показовим прикладом об'єкта, де імітаційне моделювання не просто корисне – воно є ключовим інструментом дослідження і оптимізації, без якого сучасні оптичні телекомунікації не могли б розвиватися у тому вигляді, який ми сьогодні вважаємо стандартом.

РОЗДІЛ 2

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТОВОЛОКОННИХ СИСТЕМ

2.1 Вибір та характеристика середовища моделювання оптичних каналів передачі даних

Порівняння характеристик популярних систем для імітаційного аналізу показало, що серед доступних інструментів найбільш повно відповідає вимогам дослідження оптичних каналів спектрального ущільнення на фізичному рівні середовище OptiSystem. Воно має поєднання достатньо широкого функціоналу та доступності: програмний пакет має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, орієнтований саме на побудову оптичних ліній зв'язку і надає безкоштовну 30-денну повнофункціональну версію, що є важливим у навчальному та дослідницькому використанні.

OptiSystem є системним симулятором для проектування, тестування й оптимізації практично будь-якого типу оптоволоконної траси – від аналогових систем розподілу телевізійного сигналу до міжконтинентальних DWDM-магістралей. Його архітектура базується на реалістичному відтворенні фізичних процесів у волокні, у компонентах передачі, підсилювачах та приймачах. Середовище підтримує ієрархічну організацію від рівня окремого компонента до рівня повної системи, а бібліотека оптичних елементів містить як пасивні, так і активні елементи з урахуванням спектральної залежності їх параметрів. Можливість розширення функціоналу користувачькими моделями, сценаріями та вбудованим MATLAB-компонентом розширює науковий потенціал платформи при моделюванні специфічних алгоритмів та дослідницьких задач. Підтримка параметричних sweer-режимів і оптимізації дозволяє не лише побудувати модель, але й системно дослідити вплив параметрів на якість каналу.

Таким чином, вибір саме OptiSystem є логічним та обґрунтованим рішенням: середовище дає можливість цілісно відтворити структуру оптичної лінії, послідовно дослідити поведінку каналів у WDM-системі та отримати результати, що мають інженерну та практичну цінність для подальшого аналізу.

Алгоритм виконання моделювання і проведення досліджень в цьому середовищі відображає основні етапи моделювання систем передачі інформації і як правило включає наступні етапи.

1. Системне планування моделі, що включає визначення мети моделювання, типу системи (волоконно-оптична, бездротова оптична, фотонна інтегрована тощо) та відбір ключових параметрів: архітектуру каналу, формат модуляції, діапазон довжин хвиль, типи волокон і приймачів. Такий підхід забезпечує узгодженість елементів та достовірність результатів.

2. Поступове нарощування складності моделі. Моделювання доцільно розпочинати з окремих компонентів (джерел випромінювання, модуляторів, приймачів, волоконних сегментів) із подальшим поетапним об'єднанням у повну систему. Це дозволяє виявити вплив кожного елементу та підвищує точність калібрування параметрів.

3. Моделювання впливу фізичних ефектів і шумів: дисперсії, нелінійності, поляризаційних ефектів, підсилення, втрат, фазових коливань і шумів приймача.

4. Використання інструментів аналізу спектральних і часових характеристик сигналів для комплексної оцінки якості сигналу на різних етапах тракту.

5. Параметрична оптимізація системи за допомогою можливостей автоматичної варіації параметрів, що дає змогу проводити оптимізацію потужності джерел, ширини смуги фільтрів, довжин волокон, коефіцієнтів підсилення, дисперсійних характеристик тощо. Це допомагає знайти оптимальний баланс між якістю сигналу та ефективністю системи.

6. Використання бібліотек компонентів та інтерфейси інтеграції. OptiSystem має велику базу готових елементів і підтримує інтеграцію з іншими інструментами (OptiFDTD, MATLAB, Simulink, VPI, CAD-редакторами). Це дозволяє проводити міждисциплінарні дослідження – від моделювання оптичних чіпів до аналізу мережевого рівня.

7. Валідація результатів. Для підвищення достовірності моделі результати моделювання доцільно порівнювати з аналітичними розрахунками, експериментальними даними або літературними прикладами. Це дозволяє оцінити точність і практичну застосовність отриманих висновків.

Результати моделювання, отримані в середовищі OptiSystem, можуть бути використані для інженерного проектування волоконно-оптичних ліній зв'язку, підбору типів волокон і підсилювачів, оцінювання пропускної здатності магістральних та доступових мереж. На етапі навчання ці результати дають змогу наочно продемонструвати вплив різних фізичних явищ і технологічних параметрів на якість передачі.

Використання OptiSystem у дослідженнях дозволяє мінімізувати кількість реальних експериментів, скоротити витрати часу та матеріальних ресурсів, а також попередньо оцінити ефективність нових технічних рішень.

Таким чином, моделювання в цьому середовищі є невід'ємною частиною сучасного процесу розроблення, навчання й оптимізації оптичних систем передачі даних.

2.2 Модель волоконно-оптичної системи мультиплексування за довжиною хвилі (WDM)

Для забезпечення практичного підтвердження теоретичних положень щодо структури, принципів роботи та ключових параметрів систем спектрального ущільнення каналів було здійснено побудову й аналіз конкретної імітаційної моделі восьмиканальної WDM-системи довжиною 100 км та швидкістю передачі 40 Гбіт/с (рис. 2.1).

Таким чином характеристики системи: смуги пропускання, міжканальні інтервали, втрати, підсилення та ізоляція, переходять із теоретичних величин у практичні значення, що визначають якість передачі сигналів у реальній WDM-лінії. На основі теоретичного обґрунтування та опису сформованої моделі, реалізованої в OptiSystem, та аналізу одержаних результатів її функціонування можна здійснити оцінку та надати висновки щодо можливостей та перспектив використання середовищ моделювання в практиці створення реальних оптичних систем передачі інформації.

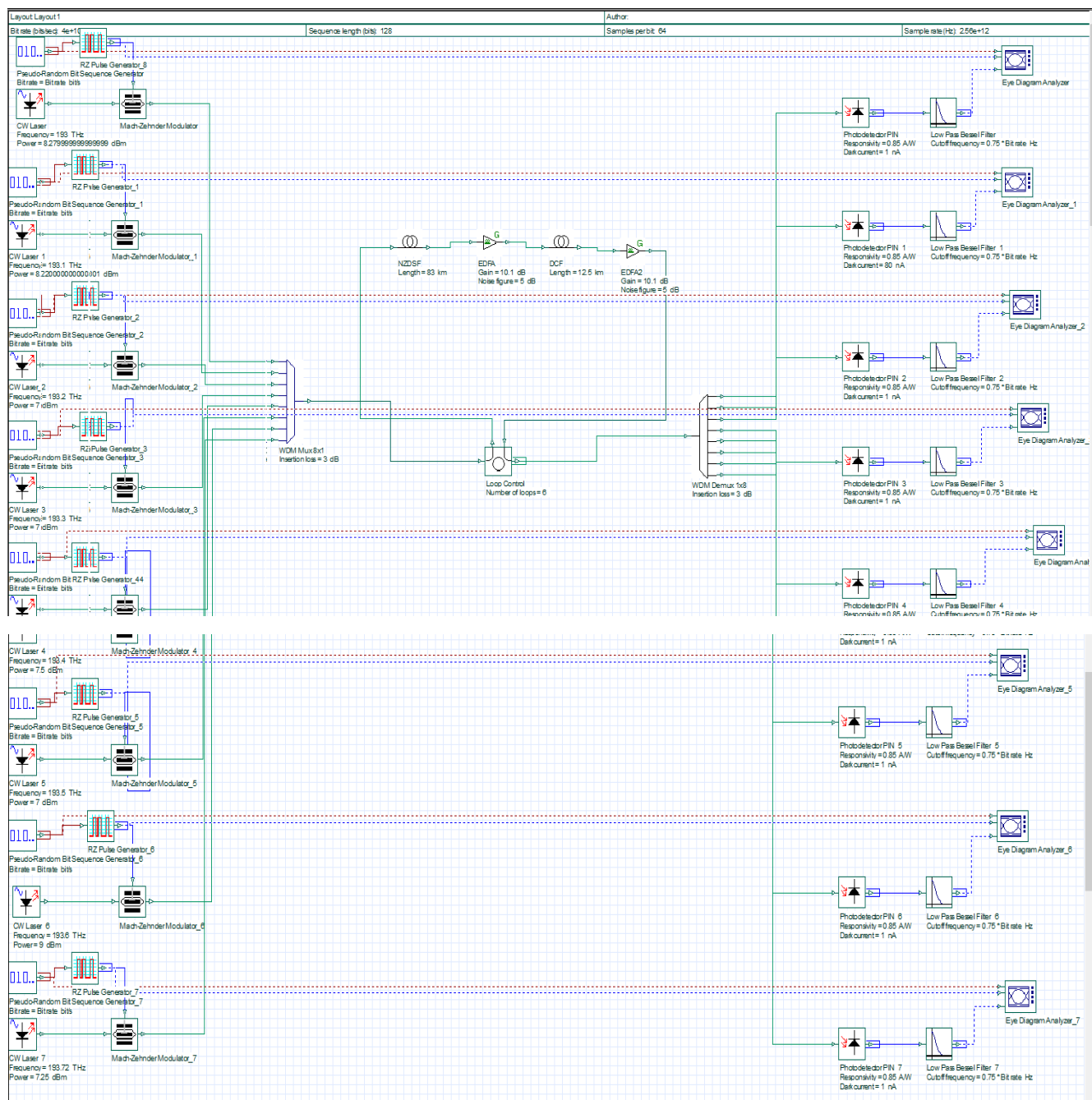


Рисунок 2.1 – Модель 8-канальної волоконно-оптичної системи з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM)

Вхідна група представляє собою 8 оптичних передавачів, модель якого зображено на рисунку 2.2. Цей фрагмент моделі утворює передавальну частину волоконно-оптичної системи зв'язку, у якій відбувається генерація псевдовипадкової послідовності бітів, її перетворення в послідовність оптичних імпульсів і модуляція неперервного оптичного випромінювання.

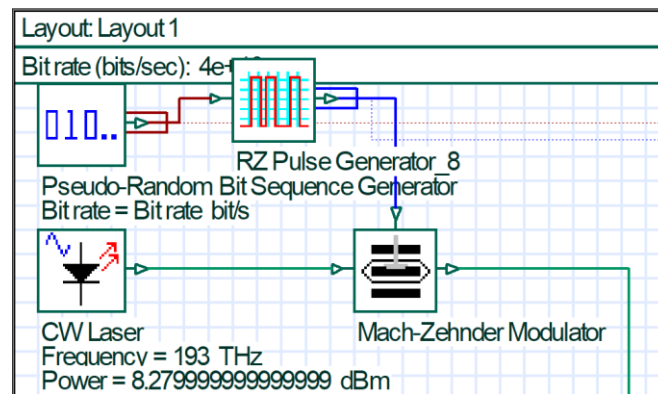


Рисунок 2.2 – Модель блоку оптичного передавача

Основу передавача становлять чотири ключові компоненти. Розглянемо їх докладніше.

Генератор псевдовипадкової послідовності (Pseudo-Random Bit Sequence Generator) відтворює інформаційний потік зі швидкістю 4×10^{10} біт/с (40 Гбіт/с), що відповідає типовим швидкостям у сучасних волоконно-оптичних лініях передачі даних. Обрана величина дозволяє перевірити працездатність системи в діапазоні високих частот, характерних для експериментів з надшвидкісними модуляціями.

Сформований бітовий потік надходить на генератор імпульсів (RZ Pulse Generator), який перетворює послідовність логічних «1» та «0» у серію коротких імпульсів тривалістю, меншою за період символу. Використання саме RZ-формату з коефіцієнтом заповнення близько 0,5 дає змогу покращити синхронізацію приймача, зменшити міжсимвольну інтерференцію та точніше відтворювати часову структуру сигналу. Для RZ-імпульсів смуга пропускання каналу має бути щонайменше 80 ГГц, щоб уникнути спотворень, що цілком відповідає обраним умовам моделювання.

На наступному етапі імпульсний електричний сигнал модулює неперервне оптичне випромінювання, сформоване лазером безперервної дії (CW Laser). Кожен канал має власне джерело безперервного когерентного випромінювання, ці лазери працюють на різних частотах у діапазоні 192...193 ТГц, що відповідає різним довжинам хвиль в оптичному спектрі. Частота лазера встановлена на 193 ТГц, відповідає центральній довжині хвилі 1550 нм – стандартній для

телекомунікаційних волокон, де втрати найменші. Оптична потужність джерела становить приблизно 7 дБм, тобто близько 5 мВт. Такий рівень потужності є реалістичним для макетів систем із зовнішньою модуляцією, забезпечуючи достатній динамічний діапазон для подальшого підсилення або передачі на значну відстань без перевантаження модулятора.

Оптична модуляція здійснюється за допомогою модулятора Маха-Цендера (Mach-Zehnder Modulator), який працює як ключовий елемент для перетворення електричного сигналу у зміну амплітуди оптичного випромінювання. Mach-Zehnder модуль працює на принципі інтерференції: електричний сигнал керує фазовою різницею між двома плечима інтерферометра, унаслідок чого на виході змінюється амплітуда оптичного випромінювання. Таким чином, цифрова інформація накладається на світлову хвилю у вигляді амплітудної модуляції. Такий тип модулятора обрано через його високу швидкодію, лінійність і здатність працювати у широкому діапазоні частот, що робить його стандартним рішенням для систем передачі зі швидкостями понад 10 Гбіт/с.

Після модуляції вісім незалежних оптичних потоків із різними довжинами хвиль подаються на WDM мультиплексор (WDM Mux 8x1), який об'єднує їх у єдиний оптичний потік. У реальних системах такий процес називається мультиплексуванням за довжиною хвилі, де кожен канал займає свою частину спектра, а об'єднаний сигнал передається спільним волокном. Завдяки цьому технологія WDM дозволяє досягати загальних швидкостей передавання у терабітному діапазоні без суттєвого ускладнення мережевої інфраструктури.

У схемі мультиплексування оптичних сигналів параметри модуля MUX визначають, як саме відбувається об'єднання кількох каналів у спільну оптичну лінію передачі, та безпосередньо впливають на якість сигналу на виході системи. Вони обираються виходячи з фізичних властивостей формату модуляції, бюджетів потужності й завад, а також із прагнення зменшити часові й спектральні спотворення.

Розглянемо кожне значення згідно вимог до якості прийому (рис. 2.3).

Параметр Bandwidth ΔF (смуга пропускання) визначає частотний діапазон, у межах якого мультиплексор може ефективно пропускати сигнал без значних

спотворень. Якщо смуга пропускання занадто вузька, частина спектра сигналу буде відфільтрована, що призведе до міжсимвольних завад і спотворень форми імпульсів.

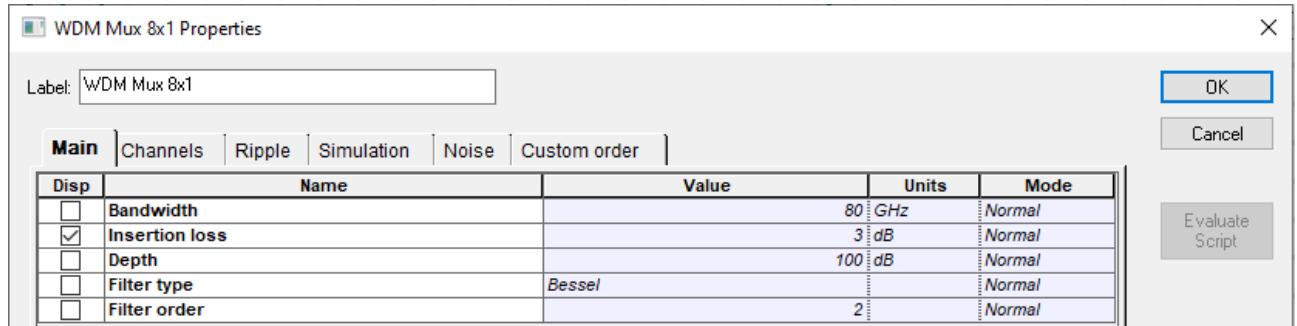


Рисунок 2.3 – Параметри блоку мультиплексора

Смугу пропускання ΔF вибираємо як мінімальну практичну ширину спектра, яку мусить пропускати канал, щоб не обрізати корисну частину спектру RZ-імпульсу. Тривалість одного імпульсу визначають за виразом (2.1):

$$T_p = D / R_s, \quad (2.1)$$

де R_s – символна швидкість;

D – коефіцієнт заповнення імпульсу.

Для однобітових символів (наприклад, RZ-формат) символна швидкість дорівнює бітовій швидкості $R_s = R_b$.

Для RZ-формату характерна ширина головного лоба спектра приблизно дорівнює $1/T_p$. Якщо в нашій схемі бітова швидкість $R_b = 40$ Гбіт/с і $D \approx 0,5$, тоді:

$$R_s = 40 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1},$$

$$T_p \approx 0,5/40 \cdot 10^9 = 12,5 \cdot 10^{-12} \text{ с} = 12,5 \text{ пс},$$

$$\Delta F \approx 1/T_p \approx 80 \cdot 10^9 \text{ Гц}, \approx 80 \text{ ГГц}.$$

Отже, вибір 80 ГГц є достатнім для передачі одного оптичного каналу зі швидкістю кілька десятків гігабіт за секунду, забезпечуючи мінімальне спотворення сигналу.

Insertion loss (втрати на введення) IL_{Mux} характеризує зниження потужності

сигналу при проходженні через мультиплексор. Ці втрати пов'язані з оптичними з'єднаннями, відбиттями та поглинанням у матеріалах елементів. У нашому приймаємо випадку втрати 3 дБ, тобто потужність сигналу на виході мультиплексора зменшується приблизно вдвічі, що є прийнятним значенням для більшості лабораторних моделей WDM-систем.

Глибина фільтра (Depth) 100 дБ означає ступінь придушення спектральних компонент поза смугою пропускання і визначає рівень міжканальних завад (crosstalk), що потрапляє у приймальний тракт. Практична вимога полягає в тому, щоб рівень витоку від суміжного каналу був значно нижчий за шумовий поріг і за корисний сигнал, тобто щоб внесок перехресних завад не підвищував BER.

Глибина фільтра повинна задовольняти приблизну нерівність (2.2):

$$\text{Depth} \geq \text{OSNR} + M, \quad (2.2)$$

де OSNR – необхідне оптичне відношення сигнал/шум для заданого BER;

M – включає запас на невраховані ефекти (наприклад, M = 10...20 дБ).

Значення Depth=100 дБ дає надлишковий запас і гарантує, що навіть при щільному розташуванні каналів енергетична частина сусіднього спектра буде заниженою настільки, щоб не впливати на Q-фактор каналу 1. Тобто глибина 100 дБ служить «тихою зоною» для придушення бокових піків і міжканальної інтерференції.

Вибір типу фільтра Bessel (фільтр Бесселя) і порядку 2 означає, що в мультиплексорі використовується фільтр другого порядку з характеристикою, що забезпечує максимально рівномірну часову характеристику без значних коливань фази. Бесселівські фільтри відомі своєю здатністю мінімізувати групову затримку, завдяки чому форма імпульсів зберігається практично незмінною під час передачі. Для нашої системи це важливо, оскільки дозволяє уникнути спотворення сигналу при високих швидкостях передачі, забезпечуючи чітке «око» на око-діаграмі.

Фільтри Бесселя характеризуються майже лінійною фазою й мінімальними флуктуаціями у робочій смузі, отже вони мінімізують розтяг і деформацію імпульсу в часі. Однак вони мають більш пологий спад амплітудної

характеристики порівняно з фільтрами з різким зрізом, тож треба вибирати порядок так, щоб знайти компроміс між стрімкістю зрізу і мінімумом фазових спотворень. Другий порядок є таким компромісом: він дає прийнятну крутість відсічки, достатню глибину придушення в поєднанні з низькою груповою дисперсією, що важливо саме для RZ-імпульсів у нашій системі. Підвищення порядку підвищить крутість і ослаблення в смузї загородження, але й посилить групові затримки й фазові нерівномірності, що може погіршити форму око-діаграми.

2.3 Вибір і розрахунок параметрів моделі оптоволоконного тракту

Після мультиплексора об'єднаний сигнал передається оптичним лінійним трактом. Нехай необхідно створити модель лінії загальною довжиною $L = 100$ км. Лінія буде складатись з відрізків оптоволоконна та підсилювачів. На рисунку 2.4 представлено відрізок лінії оптоволоконної передачі.

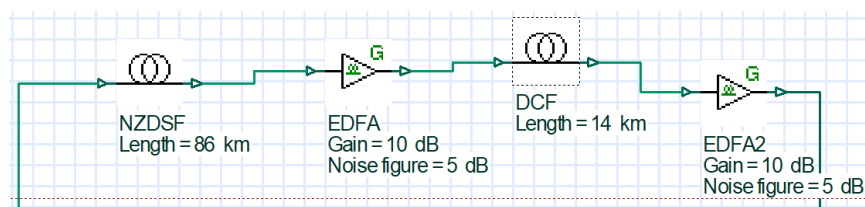


Рисунок 2.4 – Блок моделі оптоволоконного тракту $L = 100$ км

Оптоволоконна лінія довготривалого передавання сигналу включає основне волокно, волокно компенсації дисперсії та оптичні підсилювачі для забезпечення надійності та якості сигналу. Основне волокно NZDSF передає оптичний сигнал на значну відстань, проте накопичена хроматична дисперсія викликає розширення імпульсів і деградацію інформаційної якості, що особливо критично для високошвидкісних каналів WDM [3, 6]. Для компенсації цього ефекту в лінію вводиться компенсаційне волокно DCF з протилежною дисперсією, що дозволяє звести сумарну дисперсію до бажаного рівня. Оптичні підсилювачі, розташовані на початку та в кінці ділянки, компенсують загасання сигналу у волокні та втрати

на з'єднаннях, забезпечуючи достатню потужність для приймача. Така комбінація дозволяє підтримувати високу якість сигналу на довгих ділянках без необхідності проміжної регенерації, оптимізуючи бюджет потужності та контроль залишкової дисперсії.

Обґрунтуємо вибір параметрів елементів тракту.

2.3.1 Вибір довжини оптоволоконних ділянок

Першим елементом тракту є волоконна ділянка NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) довжиною L_{DSF} . Це волокно характеризується невеликим, але ненульовим значенням дисперсії, що дозволяє мінімізувати ефекти чірпування і нелінійних спотворень у системах щільного спектрального мультиплексування (DWDM) [3]. Його параметри – дисперсія, коефіцієнт загасання та ефективна площа моди – задаються відповідно до технічних характеристик реального волокна, яке використовується для передачі на великі відстані (рис. 2.5).

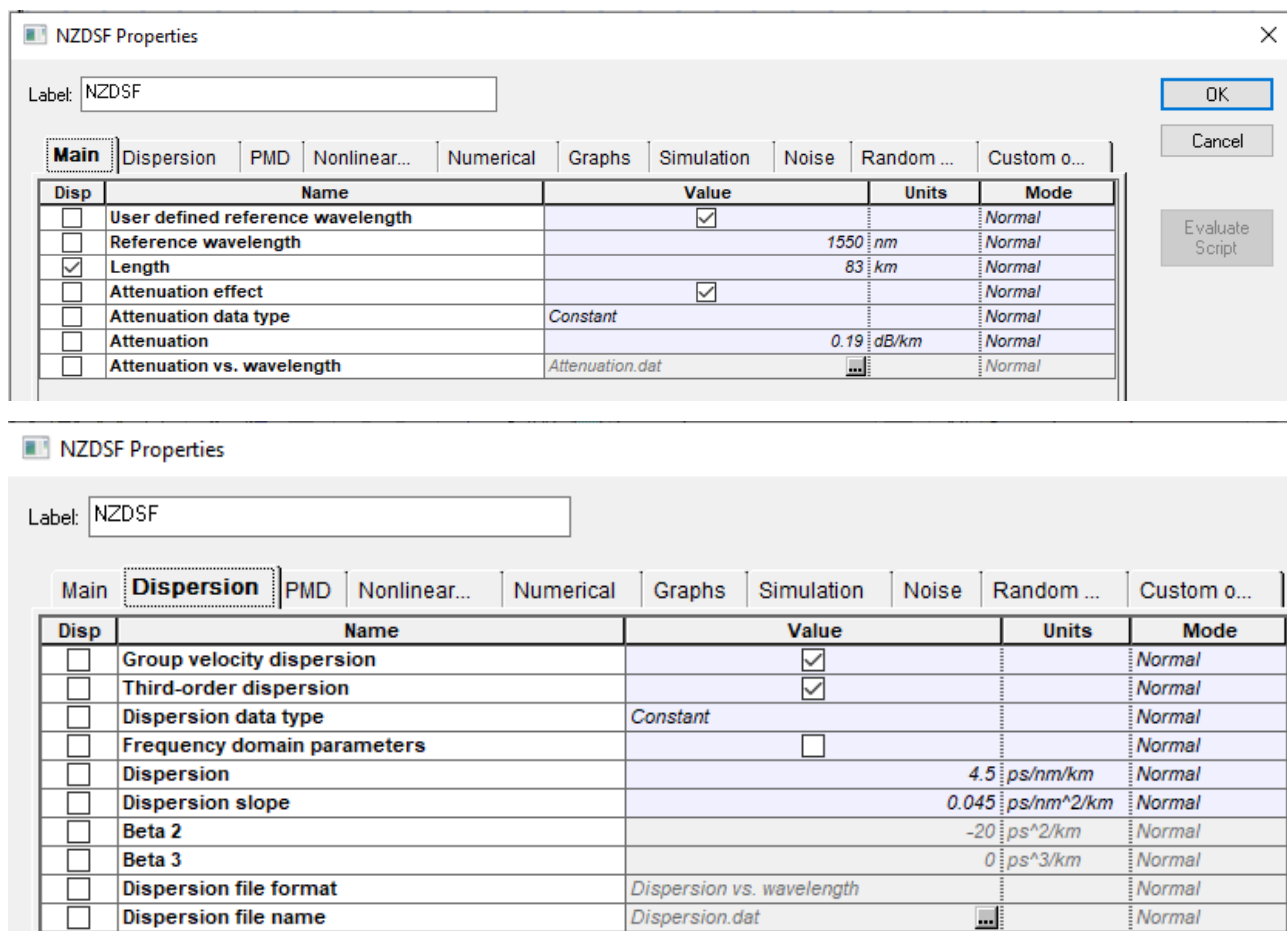


Рисунок 2.5 – Параметри блоку ділянки оптоволоконна NZDSF

Далі у схемі використовується DCF (Dispersion Compensating Fiber). Це волокно має високе від'ємне значення дисперсії, яке компенсує позитивну дисперсію основного каналу NZDSF. Завдяки цьому досягається зменшення часових розтягнень імпульсів і підвищення якості переданого сигналу.

Щоб розрахувати довжину компенсаційного волокна для даної ділянки оптичної лінії, потрібно забезпечити повну компенсацію дисперсії, накопиченої в основному волокні. Тобто, сумарна дисперсія на всій ділянці повинна бути близькою до нуля. Крім цього враховуємо, що сумарна довжина волокон основного і компенсаційного дорівнює $L=100$ км. Отже, отримуємо систему рівнянь [3]:

$$D_{DSF} * L_{DSF} + D_{DCF} * L_{DCF} = 0, \quad (2.3)$$

$$L_{DSF} + L_{DCF} = L, \quad (2.4)$$

де D_{DSF} – дисперсія основного волокна (приблизно $+4...6$ пс/(нм·км) для NZDSF);

L_{DSF} – довжина основного волокна;

D_{DCF} – дисперсія компенсаційного волокна (від'ємна, зазвичай $-20...-100$ пс/(нм·км));

L_{DCF} – довжина компенсаційного волокна;

L – загальна довжина ділянки.

Для нашої моделі $D_{DSF} = 4,5$ пс/(нм·км), $D_{DCF} = -30$ пс/(нм·км), $L = 100$ км.

Розв'язавши систему рівнянь, отримаємо: $L_{DSF} = 86,96$ км, $L_{DCF} = 13,04$ км.

У практиці проектування потрібно враховувати наявність відхилень [6]:

– точність параметрів волокон – номінальні значення дисперсії можуть мати відхилення від виробника (типово $\pm 5...10$ %);

– температурні та експлуатаційні фактори – блоки та з'єднання змінюють параметри за умов експлуатації;

– допуск на монтаж та довжини – фактична довжина змонтованого кабелю може відрізнятись;

– зміни в технології передавання – для різних швидкостей/модуляцій

вимоги до залишкової дисперсії різні.

Тому зазвичай залишають запас (резерв) на компенсацію – тобто проектують DCF трохи більшим (або передбачають змінні / налаштовувані DCM / модулі), або закладають невеликий залишок сумарної дисперсії.

Для типових IM/DD систем (1...10 Гбіт/с) приймається приблизно 10 % запасу на довжину DCF. Здійснимо розрахунок та аналіз значень залишкової дисперсії для різних значень запасу компенсації (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Зміна залишкової дисперсії

Запас p (%)	L_{DSF} , км	L_{DCF} , км	Залишкова дисперсія D_{res} , пс/нм
0%	86,95	13,04	$\approx 0,0$
5%	86,30	13,69	-22,5
10%	85,65	14,34	-45,0
15%	85,00	15,00	-67,5

Занадто великі значення залишкової дисперсії ведуть до перекомпенсації, що впливає на якість сигналу і приводить до таких явищ як [6, 7]:

- зміна форми оптичного імпульсу – імпульси «розкручуються» у протилежний бік, а отже відбувається збільшення міжсимвольних інтерференцій (ISI) та спотворення ширини і амплітуди імпульсів;

- підвищене спотворення спектра сигналу – негативна дисперсія може спричинити небажані фазові зміни в сигналів високої швидкості;

- зниження OSNR (сигнал/шум) – перекомпенсація не усуває шум, але може посилювати ефекти нелінійності через більш вузькі або розширені імпульси;

- проблеми при високошвидкісних модуляціях (≥ 40 Гбіт/с) – перекомпенсована дисперсія може виходити за межі, які DSP не здатен повністю компенсувати, що знижує якість бітової помилки (BER).

Допустимість залишкової дисперсії залежить від типу лінії та швидкості передачі. Отже, для отримання залишкової компенсації не більше 5 % вибираємо довжини ділянок: $L_{DSF} = 87$ км, $L_{DCF} = 13$ км.

2.3.2 Вибір підсилювачів потужності

Для цієї ділянки передбачено оптичні підсилювачі потужності EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Основна функція підсилювача – компенсувати

втрати потужності, що виникають під час проходження сигналу через волокно. Вибір саме EDFA зумовлений тим, що він забезпечує високий коефіцієнт підсилення у діапазоні довжин хвиль 1550 нм, де мають найменше загасання сучасні оптичні волокна. Значення підсилення підбирається таким чином, щоб компенсувати втрати на попередній ділянці NZDSF, з урахуванням допустимого рівня шуму та нелінійних ефектів [4].

Сумарна потужність підсилювачів вираховується на основі балансу бюджету потужності всієї системи з врахуванням втрат у її елементах.

Баланс потужностей по всьому тракту записується у вигляді (2.5) [4]:

$$P_{rx}(\text{дБм}) = P_{tx}(\text{дБм}) - \Sigma IL(\text{дБ}) + \Sigma G(\text{дБ}), \quad (2.5)$$

де P_{tx} – потужність передавача;

P_{rx} – потужність приймача;

ΣIL – сума всіх введених втрат в тракті, що включає втрати демультиплексора, втрати в з'єднаннях і втрати у волокні;

ΣG – сума всіх підсилень, зокрема підсилення EDFA.

Потужність передавача включає сумарну потужність всіх CW-лазерів, проте якщо лазер у режимі CW дає деяку неперервну потужність P_{CW} , то після модуляції випадковою бітовою послідовністю (PRBS) середня оптична потужність зменшується через те, що в біт-вікнах є «0» (або частково вимкнені) стани і через скінченний коефіцієнт загасання (extinction ratio) [4].

Для RZ пульс генератора (пульсова разом з коротким робочим дробом). При duty-cycle $D=0,5$ (частка часу в біт-слоті, коли є світло) і $p_1 \approx 0,5$, потужність одного передавача:

$$P_{RZ} = p_1 \cdot D \cdot P_{CW} = 0,25 \cdot P_{CW}, \quad (2.6)$$

де $P_{CW} = 7 \text{ дБм} = 0,00501 \text{ Вт}$.

Тоді орієнтовна оптична потужність передавача:

$$P_{TX} = \Sigma P_{RZ} = 0,25 * \Sigma P_{CW} = 0,25 * 8 * 0,00501 = 0,01001 \text{ Вт} = 10 \text{ дБм}.$$

Загальний діапазон вхідної потужності на приймачі. Для WDM-систем 10...40 Гбіт/с використовують фотодетектори типу PIN або APD, іноді у складі приймального модуля з попереднім підсилювачем (TIA) з параметрами вказаними в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Загальний діапазон вхідної потужності на фотодетектор

Тип фотодетектора	Робочий діапазон потужності	Типова чутливість (BER = 10 ⁻⁹)	Межа насичення
PIN (40 Гбіт/с)	від -18 до 0 dBm	≈ -18...-20 dBm	≈ 0 dBm
APD (40 Гбіт/с)	від -26 до -3 dBm	≈ -24...-26 dBm	≈ -3 dBm
PIN + EDFA	від -10 до +0 dBm	залежить від шумової фігури EDFA	≈ +0 dBm

При визначенні потужності на вході приймача необхідно уникнути режиму перенасичення фотодіода. Перенасичення фотодіода в оптичних системах зв'язку виникає тоді, коли рівень оптичної потужності на його вході перевищує допустиме значення. У такому разі фотодіод переходить у нелінійний режим, коли вихідний електричний сигнал уже не пропорційний вхідній світловій потужності. Це призводить до спотворення амплітуди, збільшення шумів і різкого зростання бітової похибки. Фізично перенасичення зумовлене тим, що носії заряду не встигають рекомбінувати, а електричне поле в області переходу зменшується, через що знижується швидкодія й лінійність детектора. Для PIN-фотодетекторів, які застосовуються в сучасних системах оптичного зв'язку (DWDM, CWDM, 10...100 Гбіт/с), перенасичення зазвичай настає тоді, коли оптична потужність на його вході перевищує приблизно 0 дБм, тобто 1 мВт. Отже виберемо значення P_{PIN} з діапазону -0...-10 дБм.

Якщо $P_{PIN} = -5$ дБм = 0,000316 Вт, тоді:

$$P_{rx} = 8 * P_{PIN} = 8 * 0,000316 = 0,002528 \text{ Вт} \approx 4 \text{ дБ.}$$

Величина сумарного згасання в лінії [4]:

$$\Sigma IL(\text{dB}) = IL_{\text{mux}} + IL_{\text{demux}} + IL_{\text{fib}}, \quad (2.7)$$

де $IL_{\text{mux}} = 3$ dB, $IL_{\text{demux}} = 3$ dB – втрати в мультиплексорі та демультимплексорі;

IL_{fib} – втрати в оптоволоконні.

Оскільки задано параметри загасання основного волокна $A_{DSF}=0,19$ дБ/км, можна оцінити втрати потужності:

$$IL_{DSF} = A_{DSF} * L_{DSF} = 0,19 \times 86 = 16,34 \text{ дБ.}$$

Аналогічно, якщо загасання компенсаційного волокна $A_{DCF}=0,256$ дБ/км, тоді втрати потужності в компенсаційному волокні:

$$IL_{DCF} = A_{DCF} * L_{DCF} = 0,256 \times 14 = 3,584 \text{ дБ.}$$

Звідси потрібне сумарне підсилення дорівнює

$$G_{amp} = P_{rx} - P_{tx} + (IL_{mux} + IL_{demux} + IL_{fib}) = 19,9 \text{ дБ.}$$

Отже, щоб забезпечити $P_{rx}=1$ dBm, потрібне загальне підсилення близько 20 дБ. В умовах практичної реалізації два EDFA з приблизно рівним поділом підсилення дають просте й ефективне рішення, тому логічно розподілити сумарне підсилення між EDFA після NZDSF і EDFA після DCF приблизно порівну: кожен з підсилювачів повинен давати близько 10 дБ. При цьому отримуємо запас потужності $\approx 0,1$ дБ над цільовим рівнем.

Параметр коефіцієнта шуму (Noise Figure ≈ 5 дБ в моделі) показує власний шум оптичного підсилювача, який з'являється через те, що при підсиленні сигналу підсилюються не лише фотони сигналу, а й спонтанно випромінені фотони атомів ербію. У EDFA ці шумові фотони мають випадкові фази і частоти в межах робочого спектра, тому вони додаються до сигналу як оптичний шум. Цей шум накопичується після кожного підсилювача і погіршує якість сигналу.

2.4 Моделювання блоку приймачів оптичних сигналів

Після проходження оптичної лінії сигнал надходить на WDM демультіплексор (WDM Demux 1x8), який виконує критично важливу функцію розділення оптичних каналів, які надходять по спільному волокну після передачі сигналів системи з щільним спектральним мультиплексуванням (DWDM). На етапі приймання він виділяє окрему довжину хвилі (або вузьку групу каналів), яка далі подається на фотоприймач або інший оптичний модуль. У моделюванні OptiSystem параметри демультіплексора визначають його реальні оптичні

характеристики – пропускну здатність, загасання, вибірковість та форму амплітудно-частотної характеристики фільтра та встановлюються подібно до параметрів мультиплектора. Отже, в нашому випадку: встановлена смуга пропускання – 80 ГГц; вставні втрати (Insertion loss) – 3 дБ, параметр глибини придушення сусідніх каналів Depth = 100 дБ, та вибрано фільтр типу Bessel другого порядку.

Такі параметри забезпечують якісну селективність і стабільність розділення у багатоканальних системах та дозволяють уникнути міжканальних перешкод.

Кожен виділений канал потім потрапляє на свій приймальний тракт, який складається з PIN фотодетектора та низькочастотного фільтра Бесселя (Low Pass Bessel Filter). Фотодетектор перетворює оптичну потужність у електричний сигнал пропорційно до оптичної інтенсивності. У цій моделі використано детектор із чутливістю 0,85 А/Вт і темновим струмом 1 нА, що забезпечує реалістичне відтворення характеристик приймального пристрою. Після фотодетекції сигнал проходить через фільтр Бесселя, який відтинає високочастотні шумові компоненти, залишаючи лише смугу, необхідну для відновлення переданої послідовності.

Таким чином було створено та досліджено модель волоконно-оптичної системи мультиплексування за довжиною хвилі (WDM) із вісьмома каналами передачі, кожен із яких працює зі швидкістю 40 Гбіт/с у форматі RZ. Модель охоплює всі основні елементи сучасної оптичної лінії зв'язку – від генерації цифрового потоку до прийому сигналу після проходження волоконної траси і добре відтворює принципову структуру реальних телекомунікаційних WDM-систем і може вважатися їхнім спрощеним аналітичним аналогом. Використані параметри (довжина хвилі 1550 нм, потужності джерел, дисперсія волокон, підсилення EDFA, типи фільтрів і смуги пропускання) відповідають значенням, прийнятим у промислових системах передачі даних у С-діапазоні (1530...1565 нм).

Такі моделі близькі до реальних ліній зв'язку, які застосовуються у магістральних оптичних мережах (DWDM, CWDM), а також у високошвидкісних каналах передачі даних між центрами обробки інформації або великими вузлами

телекомунікаційних систем.

Модель побудована з низкою допущень, характерних для навчальних і дослідницьких симуляцій: не враховано нелінійні ефекти у волокні, які впливають на роботу щільних WDM-систем на великих відстанях; прийнято ідеальну стабільність лазерів без фазового шуму та дрейфу частоти; температурні впливи, поляризаційна мода та дисперсія (PMD) не моделюються; шум підсилювачів EDFA враховується лише у вигляді фіксованої шумової фігури (NF); взаємні впливи між каналами (crosstalk) зведено до мінімуму завдяки ідеальній ізоляції MUX / DEMUX; фотодетектор моделюється як лінійний елемент без урахування насичення, відгуку та власних шумів електроніки [1, 2, 9].

Ці спрощення не змінюють загальних закономірностей, але забезпечують стабільність моделі й швидкість обчислень.

Створена модель може бути застосована для: навчання і демонстрації принципів роботи WDM-систем, у тому числі мультиплексування / демультіплексування, компенсації дисперсії та оптичного підсилення; оцінки впливу параметрів компонентів (довжини волокна, смуги пропускання фільтра, потужності лазера, підсилення EDFA) на якість сигналу (Q-factor, BER, OSNR); дослідження балансу потужності та проектування енергетичного бюджету системи; оптимізації довжини DCF для досягнення мінімальної залишкової дисперсії; аналізу часових і спектральних спотворень сигналів у багатоканальних WDM-системах; підготовки до побудови більш складних моделей, що враховують нелінійні та динамічні ефекти у волокні.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Вимірювання і оцінка оптичної потужності компонентів

Для оцінки якості функціонування моделі було використано ряд вимірювальних інструментів, що дозволяють візуалізувати результати моделювання системи (рис. 3.1).

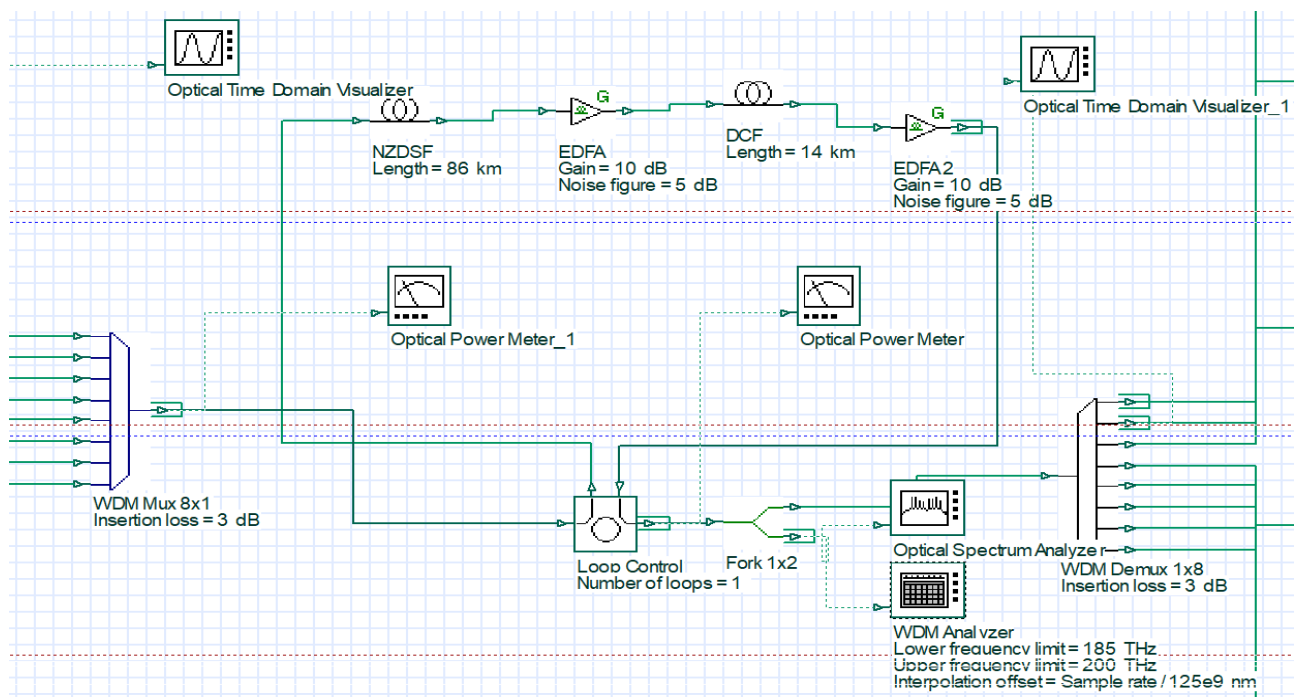


Рисунок 3.1 – Оптиволоконний тракт з вимірювальними елементами

Оптичний вимірювач потужності (Optical Power Meter) у середовищі моделювання OptiSystem є базовим інструментом контролю енергетичних параметрів сигналів у волоконно-оптичних системах передачі (рис. 3.2). Його основне призначення полягає у вимірюванні середньої або миттєвої оптичної потужності, що проходить через певну точку схеми, що дозволяє визначити рівень загасання, ефективність підсилення та баланс енергетичних потоків у системі. У процесі проєктування WDM- або одноканальної системи такий прилад використовується для кількісного аналізу передачі сигналу на різних етапах, від виходу передавача до входу приймача, і є одним із основних засобів контролю правильності налаштування підсилювачів, фільтрів і волоконних ліній.

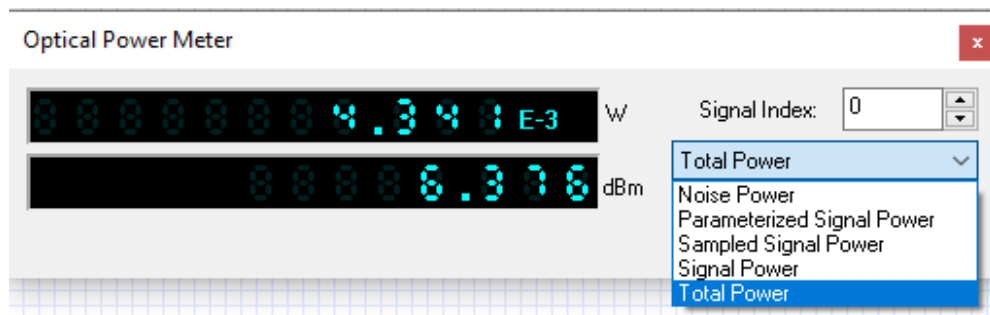


Рисунок 3.2 – Позначення і вікно результатів Optical Power Meter

Принцип роботи вимірювача потужності базується на обчисленні середнього значення оптичної потужності сигналу, що надходить на його вхід. У моделі OptiSystem цей процес реалізується чисельно шляхом інтегрування миттєвих значень оптичної напруженості протягом певного інтервалу часу з урахуванням довжини хвилі сигналу. Результат відображається у вигляді середньої потужності в одиницях дБм або ватах, що дозволяє безпосередньо порівнювати його з паспортними параметрами оптичних компонентів. Окрім абсолютного рівня потужності, прилад може використовуватись для розрахунку втрат у лінії, коефіцієнта підсилення або ефективності передавання, якщо встановити два вимірювачі у різних точках схеми.

Оптичний вимірювач потужності зазвичай розміщують перед підсилювачем, після нього, а також на вході приймального тракту. Таке розташування дає змогу оцінити динаміку змін потужності уздовж лінії передачі: на виході передавача визначається початкова потужність сигналу, після ділянки волокна – втрати в середовищі, після підсилювача – ефективність відновлення рівня сигналу, а на вході приймача – остаточна потужність, з якою сигнал надходить на фотодетектор. Вимірювання у цих точках дозволяє побудувати енергетичний баланс системи, перевірити, чи компенсує підсилення EDFA втрати у волокні, та чи залишається потужність у межах допустимого діапазону для коректної роботи приймального обладнання.

Результати, отримані за допомогою Optical Power Meter, мають ключове значення для оцінки якості проекрованої системи. Якщо на виході лінії потужність сигналу перевищує рівень чутливості приймача на 3...6 дБ і при

цьому не виходить за межі насичення фотодетектора, можна вважати, що система спроектована правильно в енергетичному плані. З іншого боку, занадто низька потужність свідчить про надмірні втрати або недостатнє підсилення, тоді як надлишкова потужність може спричинити нелінійні ефекти у волокні або перевантаження приймача. Таким чином, оптичний вимірювач потужності виступає універсальним індикатором енергетичного стану сигналу, забезпечуючи інженера точними даними для оптимізації структури системи.

Перевіримо значення загальної оптичної потужності після мультиплексора та перед демультимплексором (рис. 3.3 та табл. 3.1).

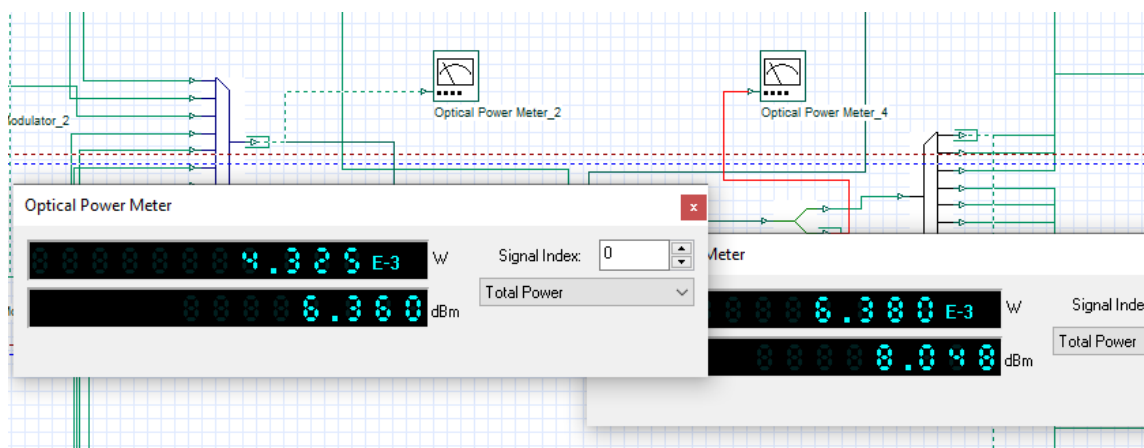


Рисунок 3.3 – Значення потужності на вході і виході оптичного тракту

Таблиця 3.1 – Значення потужності на вході і виході оптичного тракту

	На вході волоконно-оптичного тракту		На виході волоконно-оптичного тракту	
	Вт	дБм	Вт	дБм
Total Power	$4,325 \cdot 10^{-3}$	6,360	$6,380 \cdot 10^{-3}$	8,048
Noise Power	0	-100,000	$288,224 \cdot 10^{-6}$	-5,403

У результаті вимірювань встановлено, що після проходження сигналу через волоконно-оптичний тракт із оптичним підсилювачем (EDFA) загальна потужність збільшилася з 6,360 дБм до 8,048 дБм, тобто втрати у волокні були повністю компенсовані. Водночас загальний рівень шуму зріс із -100 дБм до -5.403 дБм, що свідчить про появу шуму спонтанного випромінювання (ASE), характерного для EDFA. Потужність корисного сигналу практично не змінилася.

Розрахуємо співвідношення сигнал шум на цій ділянці лінії:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} = \frac{6.38 \times 10^{-3}}{2.88224 \times 10^{-4}} = 22,13 = 13,45 \text{ дБ.}$$

Розраховане сумарне відношення сигнал/шум становить близько 13,45 дБ підтверджує наявність шумового впливу підсилювача і є типовим для WDM систем з одним каскадом EDFA (через внесення шуму ASE). Таким чином, EDFA ефективно компенсує загасання лінії, але вводить помітний шум, який необхідно враховувати при оцінці якості передачі (OSNR, BER).

Оцінимо значення потужності, що надходить на кожен фотодетектор:

$$P_{OUT} = (P_{Tot} - IL_{demux}) = 8,048 - 3 = 5,048 \text{ дБм} = 0,00320 \text{ Вт} = 3,2 \text{ мВт}$$

$$P_{PIN} = \frac{P_{OUT}}{8} = \frac{0,00320}{8} = 0,0004 \text{ Вт} = -3,98 \text{ дБм.}$$

Це значення лежить в допустимих межах чутливості та насичення PIN фотодетекторів.

3.2 Вимірювання і оцінка якості передачі з використанням око-діаграм

Вихідний сигнал надходить до аналізатора діаграми ока (Eye Diagram Analyzer), який дозволяє візуально оцінити якість роботи всієї проектованої системи (рис. 3.4).

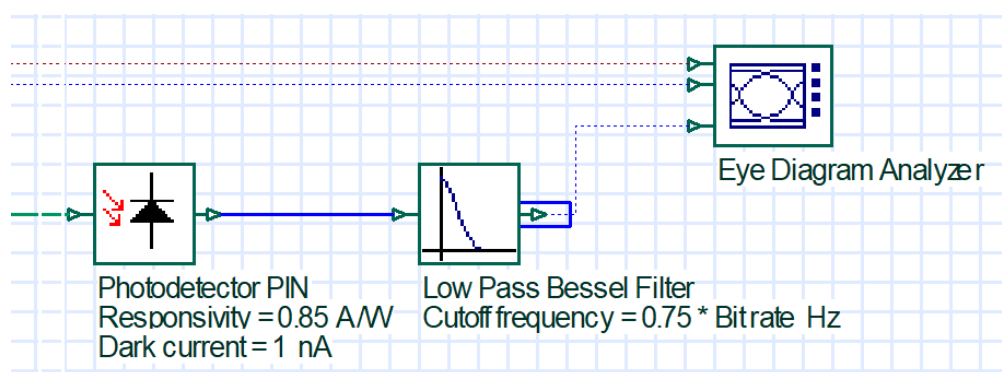


Рисунок 3.4 – Розміщення і позначення аналізатора око-діаграми

Аналізатор око діаграм має три входи: один для вихідного сигналу від фотодетектора і два для від генератора псевдовипадкової послідовності та

генератора імпульсів для синхронізації вхідного і вихідного сигналів. Окодіаграму отримують шляхом накладання у часовій області багатьох послідовних відрізків сигналу, кожен із яких відповідає одному бітовому інтервалу; у результаті формується характерне зображення, де відкритість «ока» відображає якість передавання даних і ступінь впливу шумів та спотворень.

У цифрових оптичних системах є основними критеріями оцінки якості передавання інформації є показники Q-фактор і BER (Bit Error Rate) [2]. Вони відображають ступінь завадостійкості каналу та надійність прийому даних.

Q-фактор (Quality Factor) характеризує співвідношення між середнім рівнем сигналу та рівнем шуму у приймальному тракті. Його можна трактувати як оптичний аналог відношення сигнал/шум (SNR). Для двійкової системи з рівнями сигналу «1» і «0» Q-фактор визначається формулою (3.1):

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.1)$$

де μ_1 і μ_0 – середні значення амплітуд сигналів логічних «1» та «0»;

σ_1 і σ_0 – стандартні відхилення шумів для цих рівнів.

Чим більший Q-фактор, тим вище роздільність між рівнями сигналу і менша ймовірність помилки під час прийому.

Bit Error Rate (BER) – це відношення кількості помилково прийнятих бітів N_{error} до загальної кількості переданих N_{total} :

$$BER = \frac{N_{error}}{N_{total}}. \quad (3.2)$$

BER безпосередньо пов'язаний із Q-фактором через апроксимацію для гаусового шуму виразом (3.3):

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (3.3)$$

де erfc – додаткова функція помилки.

Приклад вікна око-діаграми для одного вихідного сигналу зображено на рисунку 3.5.

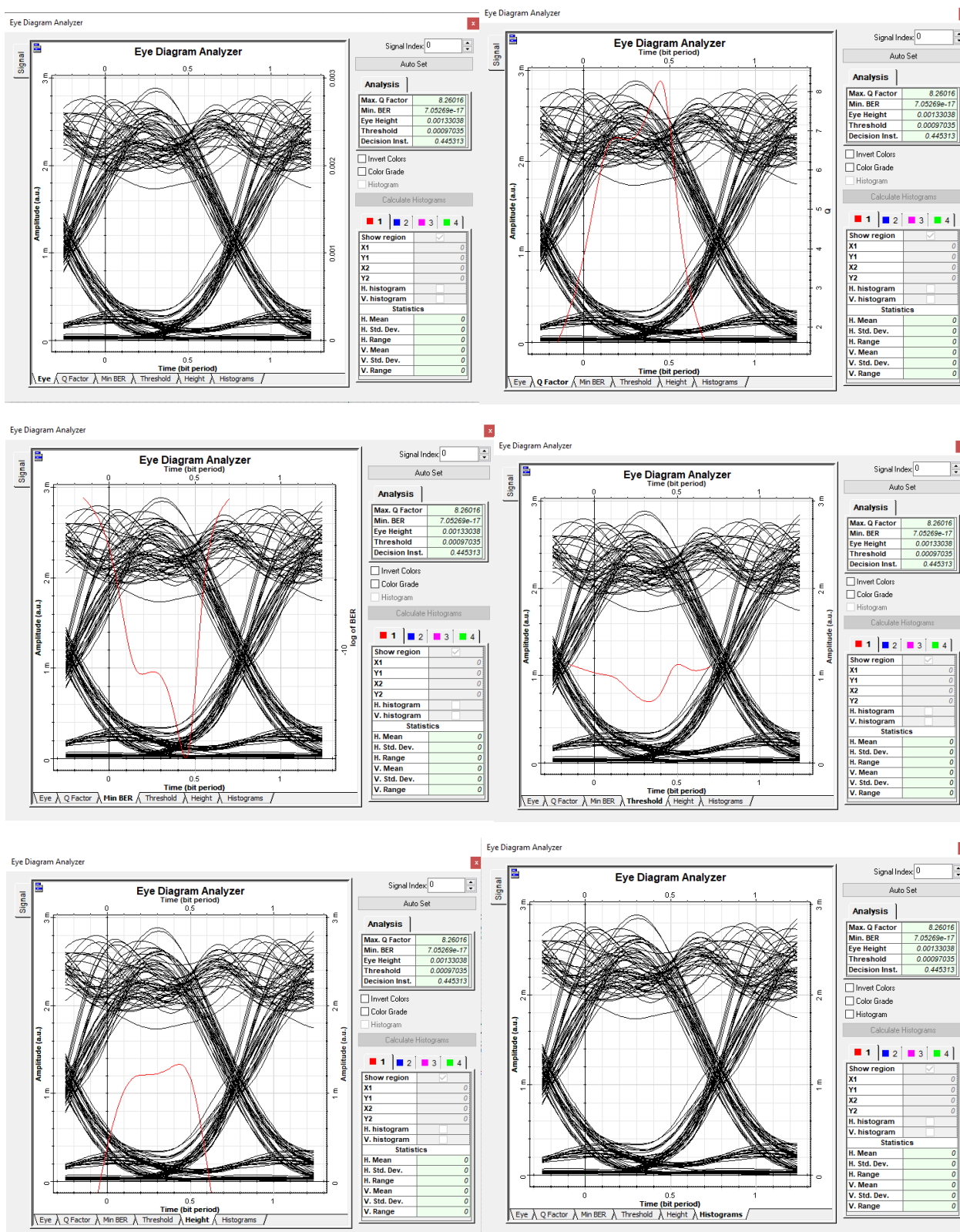


Рисунок 3.5 – Вікно аналізатора око-діаграми: а) око-діаграма; б) Q-фактор; в) мінімальне BER; г) відкриття «ока»; д) рівень прийняття рішення

Практично вважається, що $Q > 6$ відповідає $BER < 10^{-9}$, тобто прийом даних є надійним [2]. Значення Q-фактора зручно оцінювати за формою око-діаграми: чим ширше та чистіше відкрите «око», тим вищий Q і менша ймовірність бітової помилки. Ці параметри є ключовими при оптимізації оптичних систем передачі для досягнення необхідної якості зв'язку.

Око-діаграма, показана на рисунку 3.5 є результатом аналізу сигналу першого каналу в системі WDM після проходження всієї траси передачі – від модуляції до приймача. На осі абсцис відкладено час у межах одного бітового інтервалу (Bit period), а на осі ординат – амплітуду сигналу в умовних одиницях. Ідеальний сигнал мав би чітко розкрити «щілину» в центрі діаграми, яка утворює форму ока. У даному випадку видно, що «око» досить широко відкрите, що свідчить про добру якість сигналу, малу кількість шуму та незначні спотворення.

Згідно з числовими результатами аналізу: максимальне значення Q-фактора становить 8,26, що є досить високим показником для оптичної системи.

Мінімальне BER дорівнює $7,05 \times 10^{-17}$, що вказує на надзвичайно низьку ймовірність помилки при прийомі бітів – фактично система працює безпомилково. Такі результати є типовими для лабораторного або симуляційного середовища з оптимізованими параметрами лазерів, фільтрів і приймачів.

Параметр висота «ока» Eye Height має значення 0,00133, що відображає вертикальне відкриття «ока» – тобто різницю між середнім рівнем «1» і середнім рівнем «0» у точці прийняття рішення. Чим більше це значення, тим краще система розрізняє логічні стани. Невелике, але чітко виражене відкриття свідчить про правильне формування сигналу після передачі через волокно.

Threshold (0,00097) – це рівень прийняття рішення між логічними станами, при якому досягається мінімальне значення BER. Decision Instant (0,445 бітового періоду) визначає оптимальний момент вибірки сигналу для прийняття рішення, що узгоджується з положенням максимально відкритого «ока».

Загальний вигляд діаграми демонструє незначну кількість перекриттів і паразитних ліній у верхній частині, що може бути спричинено залишковими дисперсійними ефектами або незначним фазовим шумом передавача. Проте горизонтальне відкриття досить велике, отже, часові спотворення, такі як джитер,

є незначними.

Таким чином, за результатами око-діаграми можна зробити висновок, що перший канал WDM-системи забезпечує високоякісну передачу оптичного сигналу з мінімальними втратами інформації. Система працює в режимі з високою завадостійкістю, що підтверджується великим Q-фактором, малим BER і стабільною формою «ока». Такі характеристики є типовими для правильно спроектованих систем з оптимальними параметрами модуляції та ефективним спектральним розділенням каналів.

За допомогою цього інструменту оцінимо правильність вибору довжини компенсуючого оптичного волокна. Для цього за допомогою аналізатора отримаємо значення Q-фактора для різних значень довжини волокна L_{DCF} (табл. 3.2 та рис. 3.6).

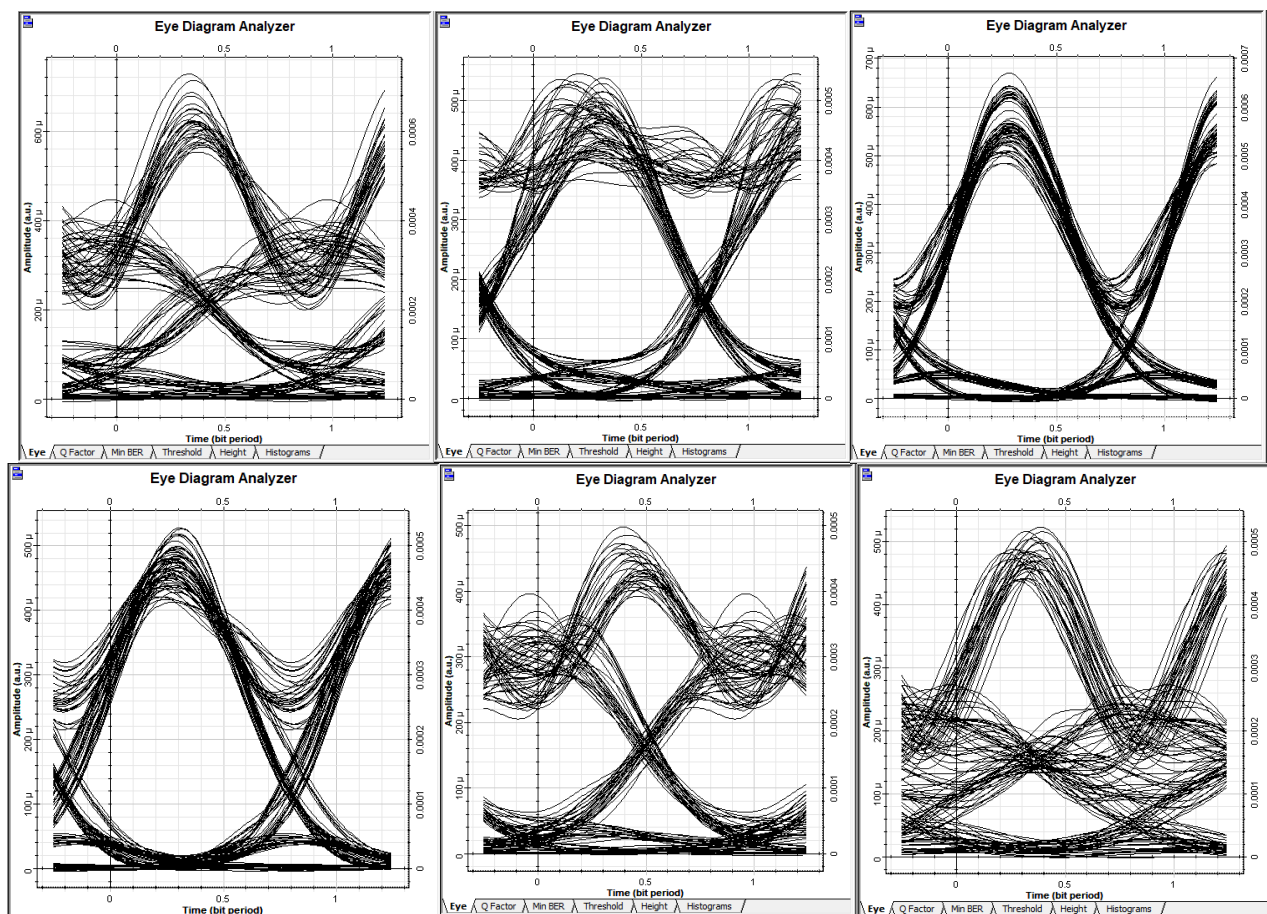


Рисунок 3.6 – Око-діаграма для різних L_{DCF} компенсуючого оптоволоконна

Таблиця 3.2 – Аналіз параметрів якості вихідного сигналу для різних значень довжини ділянки компенсуючого оптоволоконна

№	1	2	3	4	5	6
L_{DCF} , км	11	12	13	14	15	16
Max. Q Factor	3,511	7,929	11,446	15,686	5,991	2,326
Min. BER	0,00022198	$1,08716e^{-15}$	$9,57648e^{-31}$	$8,51814e^{-56}$	$1,01494e^{-09}$	0,0099985
Eye Height	$4,09636e^{-05}$	0,00024742	0,0003781	0,00036086	0,00013611	$-4,34812e^{-05}$
Threshold	0,00019041	0,00019663	$7,3538e^{-05}$	0,00014627	0,000143572	0,000137759
Decision Inst.	0,0234375	0,46875	0,523438	0,1875	0,117188	-0,109375

Побудуємо графік залежності Q-Factor та BER від довжини компенсуючого волокна L_{DCF} (рис. 3.7).

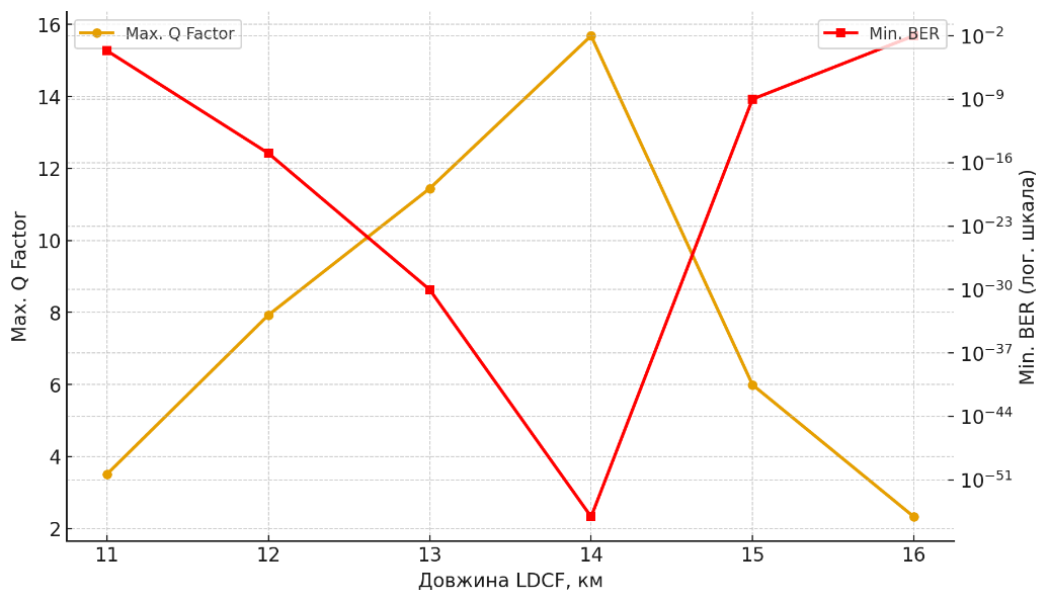


Рисунок 3.7 – Залежності Q-Factor та BER від довжини компенсуючого волокна

З графіка бачимо, що оптимальне значення $L_{DCF} \approx 14$ км, де Q-Factor максимальний ($\approx 15,7$), а BER мінімальний ($\sim 10^{-56}$). При коротших або довших значеннях L_{DCF} (11...12 км або 15...16 км) спостерігається різке погіршення показників, що свідчить про недокомпенсацію чи перекомпенсацію дисперсії.

Отже, для практичного проекту слід вибирати довжину компенсуючого волокна близько 14 км з допуском $\pm 0,3$ км як запас для стабільної роботи системи.

3.3 Аналіз спектру оптичних сигналів

Оптичний аналізатор спектру в середовищі моделювання OptiSystem є одним із основних інструментів, який використовується для дослідження частотних характеристик сигналів у волоконно-оптичних системах передачі, зокрема у багатоканальних WDM-системах. Його призначення полягає у візуалізації та кількісному аналізі спектра випромінювання, що формується на виході передавача, після проходження волоконної лінії або після каскаду підсилювачів. За допомогою спектроаналізатора можна визначити розподіл потужності сигналів за довжинами хвиль, виявити вплив нелінійних ефектів, шумів підсилювачів та взаємні перешкоди між каналами [9].

У середовищі OptiSystem аналізатор спектра моделює принцип роботи реального оптичного спектроаналізатора (OSA). Під час моделювання він здійснює обчислення спектральної щільності потужності сигналу, який надходить на його вхід, та подає результати у вигляді графіка залежності потужності (у дБм) від довжини хвилі (у метрах або нанометрах). Висота піків на спектрі відповідає рівню потужності окремих каналів, а їх розташування – центральним довжинам хвиль у мультиплексованій системі. Ширина кожного піку характеризує смугу пропускання каналу та може змінюватися під впливом дисперсії, нелінійностей або фільтрації. Між піками зазвичай спостерігається шумовий фон, що формується спонтанним випромінюванням підсилювачів (ASE), втратами у волокні чи паразитними відбиттями.

Для WDM-систем, у яких використовується декілька каналів з різними довжинами хвиль, оптичний спектроаналізатор дозволяє перевірити, чи рівномірно розподілена потужність між каналами, чи збережено їх взаємну рознесеність у спектральній області, а також чи не спостерігається перекриття спектрів через недостатню селективність фільтрів або перенасичення підсилювачів. За допомогою аналізатора можна оцінити ефективність роботи ербієвих підсилювачів (EDFA) – зокрема, ступінь вирівнювання їх підсилення в усьому діапазоні C-band, а також рівень шуму, який вони вносять у систему. Підняття шумового рівня на графіку спектра свідчить про накопичення ASE-

шуму, що є типовим для каскадних ліній передачі з кількома підсилювачами.

Отримані результати спектрального аналізу використовуються для оцінки якості проектованої системи передачі. За формою спектра можна визначити оптичне співвідношення сигнал/шум (OSNR), яке є ключовим параметром для прогнозування ймовірності бітової помилки (BER) у цифрових оптичних каналах. Якщо рівень шуму між каналами є низьким, а піки сигналів чітко відокремлені та мають приблизно однакову амплітуду, це свідчить про стабільну роботу системи й правильний вибір потужності передавачів і підсилення EDFA. Натомість, якщо спостерігається розмиття піків, зниження потужності каналів або підвищення шумового фону, можна зробити висновок про погіршення спектральної чистоти сигналу, надмірні втрати у волокні чи надлишковий шум підсилювачів.

На рисунку 3.8 представлено результати спектрального аналізу оптичного сигналу багатоканальної системи WDM після передачі по волоконно-оптичній лінії довжиною 100 км, у складі якої застосовано два ербієвих підсилювачі з коефіцієнтом підсилення 10 дБ і шумовою фігурою близько 5 дБ.

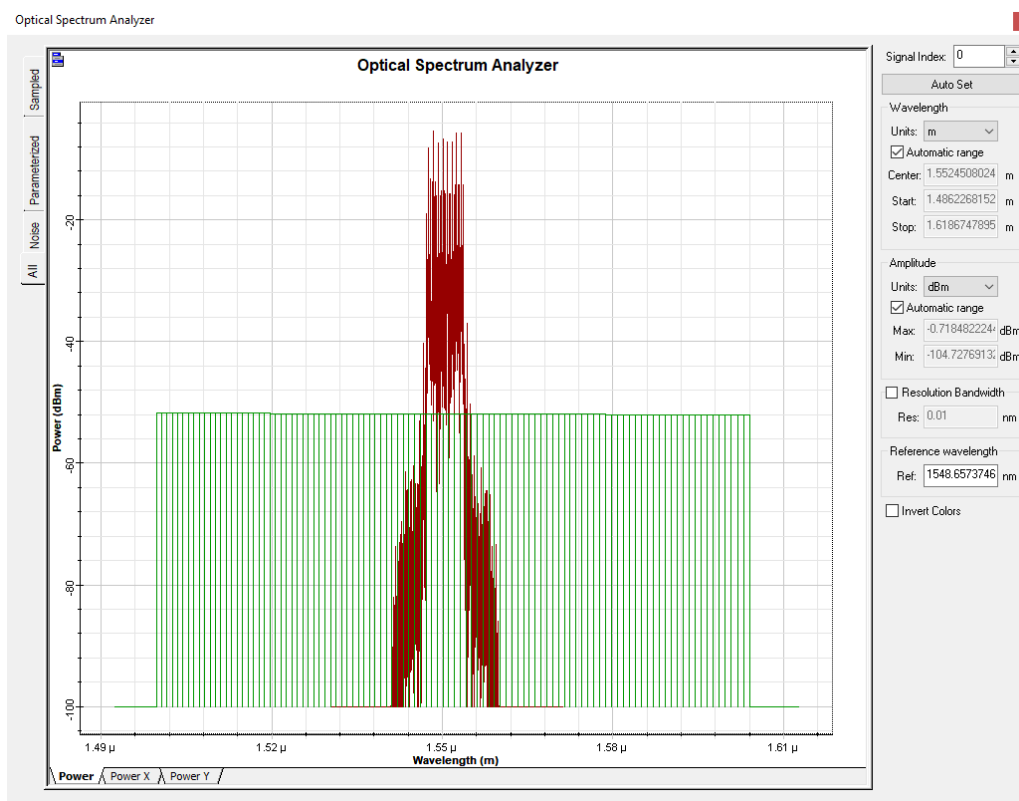


Рисунок 3.8 – Результати аналізатора спектру на виході загального оптоволоконного тракту

На графіку оптичного спектроаналізатора відображено залежність потужності сигналу від довжини хвилі. Спектр містить вісім чітко виражених піків, що відповідають окремим каналам WDM-системи, розташованим у діапазоні близько 1,55 мкм. Максимальна потужність сигналів становить приблизно 0,7 дБм, що свідчить про ефективне відновлення рівня сигналу після компенсації втрат у волокні за допомогою підсилювачів.

У центральній частині спектра, де зосереджено робочі канали, спостерігається підвищений рівень шумового фону, який зумовлений наявністю спонтанного випромінювання підсилювачів (ASE). Шумова підлога перебуває на рівні близько $-60 \dots -70$ дБм, а поза межами діапазону каналів знижується до приблизно -100 дБм, що відповідає характерним параметрам систем із двома каскадами EDFA. Ширина кожного спектрального піку залишається невеликою, що свідчить про збереження смуги пропускання та відсутність значних спектральних спотворень, викликаних дисперсійними або нелінійними ефектами у волокні. Таким чином, співвідношення сигнал/шум за графіком визначається як різниця між середнім рівнем пікової потужності сигналу каналу і середнім рівнем шуму між каналами, що показує, наскільки сигнал перевищує шум у оптичному домені. Чим більша різниця між цими рівнями, тим краща якість передачі – високий OSNR свідчить про малу ймовірність бітової помилки (BER) і добру роботу системи підсилення.

Розподіл потужності між каналами є досить рівномірним, отже, підсилювачі забезпечують задовільну рівність коефіцієнта підсилення в межах робочого спектрального діапазону. Разом з тим, наявність шумового фону свідчить про накопичення ASE-шуму, який визначає рівень оптичного співвідношення сигнал/шум (OSNR) і впливає на подальшу якість відновлення даних у приймальному тракті. Загальний вигляд спектра показує, що система успішно підтримує передачу всіх 8-ми каналів без значних перекриттів і втрат потужності.

Отже, результати спектрального аналізу підтверджують правильність вибору параметрів підсилювачів і волоконної лінії, а також свідчать про стабільну роботу WDM-системи на заданій довжині передачі з допустимим рівнем шуму, характерним для двокаскадного підсилення.

3.4 Оцінка співвідношення сигнал/шум окремих оптичних каналів

Для вимірювання і оцінки потужності корисного сигналу та шуму в кожному окремому каналі використовується WDM-аналізатор, що оцінює сигнал та потужність шуму для оптичного каналу на основі смуги пропускання роздільної здатності (рис. 3.9) [9].

Результуюче співвідношення сигнал/шум (SNR) для одного каналу розраховується наступним за виразом (3.4):

$$SNR = 10 \lg_{10} \frac{P_s}{P_{n0,1}} = P_s(\text{дБ}) - P_{n0,1}(\text{дБ}), \quad (3.4)$$

де P_s – потужність сигналу в межах вибраної смуги пропускання роздільної здатності (RBW) для аналізатора;

$P_{n0,1}$ – потужність шуму в межах смуги пропускання 0,1 нм.

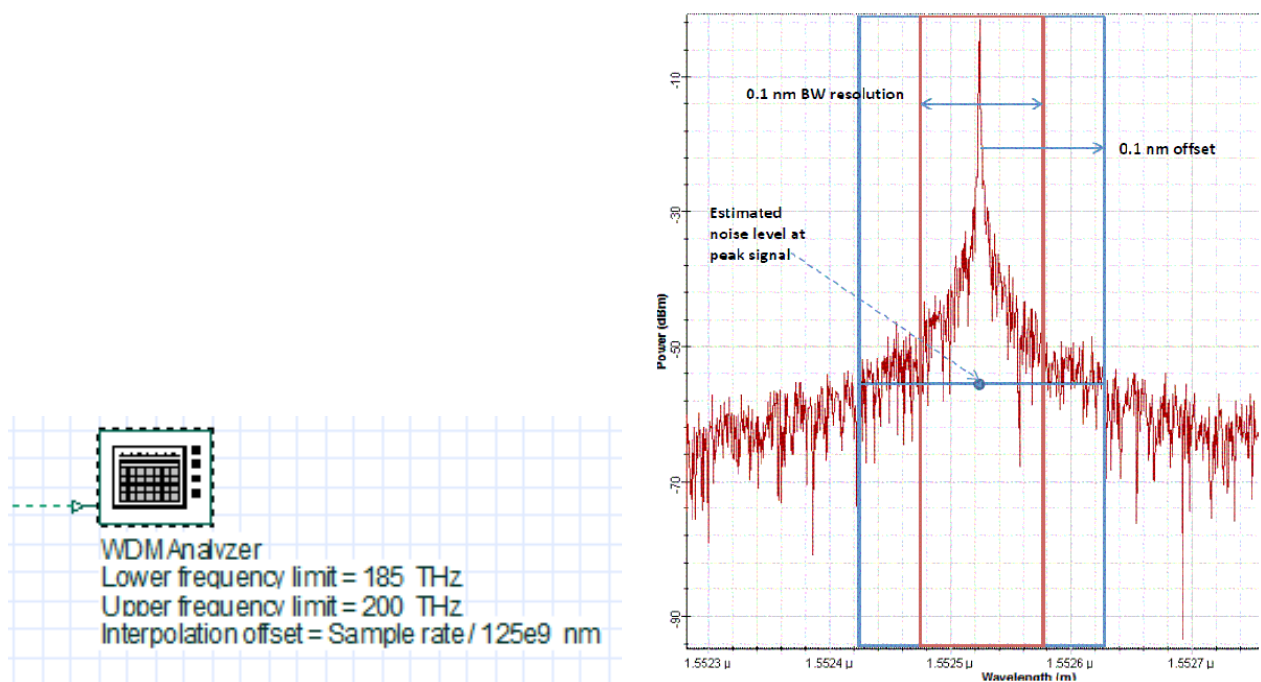


Рисунок 3.9 – Зображення і принцип вимірювання WDM-аналізатора

Результати вимірювань в заданій смугі пропускання 0,1 нм показують середнє значення OSNR $\approx 29 \dots 30$ дБ для одного каналу (рис. 3.10).

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	SNR (dB)	Noise Power: 0.1nm (dBm)	OSNR (dB)
193	-6.2298554	-35.896621	29.666765	-35.896621	29.666765
193.1	-6.2861267	-35.893808	29.607682	-35.893808	29.607682
193.2	-6.0882188	-35.890998	29.802779	-35.890998	29.802779
193.3	-6.216095	-35.888189	29.672094	-35.888189	29.672094
193.4	-6.2345676	-35.885382	29.650814	-35.885382	29.650814
193.5	-6.1802097	-35.885382	29.705172	-35.885382	29.705172
193.6	-6.1996977	-35.882577	29.682879	-35.882577	29.682879
193.72	-6.9810988	-35.879773	28.898675	-35.879773	28.898675

Рисунок 3.10 – Результати вимірювань WDM-аналізатора для 8 каналів

Типові значення порогів сигнал/шум:

- для NRZ OOK (10 Гбіт/с) потрібно OSNR ≥ 18 dB;
- для QPSK (10...40 Гбіт/с) – OSNR мінімум 15...18 dB;
- для більш складних форматів (16-QAM тощо) – поріг ≈ 25 dB.

Тобто система ще має запас по якості. Слід звернути увагу на останній канал (193,72 ТГц). Для нього: потужність $-6,98$ дБм, OSNR = 28,9 дБ, тобто $\approx 0,8$ дБ нижче середнього. Це може бути спричинено:

- нерівномірністю підсилення EDFA (gain tilt), для уникнення цього додають вирівнюючий фільтр за потреби можна додати gain flattening filter (GFF);
- краєм смуги MUX/DEMUX;
- втратами при мультиплексуванні або фільтрації на межі діапазону.

3.5 Аналіз і оцінка сигналів в часовій області

Оптичний візуалізатор у часовій області (Optical Time Domain Visualizer) – це програмний вимірювальний інструмент, який використовується в середовищі моделювання OptiSystem для спостереження та аналізу оптичних сигналів у часовій області. Його головне призначення полягає у відображенні форми сигналу, який передається по волоконно-оптичному тракту, з урахуванням усіх фізичних явищ, що впливають на його форму, амплітуду та часові параметри. Завдяки цьому візуалізатор дає змогу оцінити, як сигнал змінюється під дією дисперсії, загасання, шумів та нелінійних ефектів, а також як працюють елементи

системи, такі як підсилювачі, фільтри або компенсатори дисперсії.

Принцип роботи Optical Time Domain Visualizer полягає в тому, що він приймає вхідний оптичний сигнал і перетворює його у часову залежність потужності або напруженості світлового поля. Іншими словами, візуалізатор показує, як змінюється миттєва потужність оптичного сигналу в часі. Для цифрових систем та систем із модуляцією цей інструмент дозволяє виявити розмиття імпульсів, міжсимвольні спотворення або вплив дисперсії, які безпосередньо впливають на якість прийому даних.

В моделі WDM-системи Optical Time Domain Visualizer зазвичай розміщується у кількох ключових точках оптичного тракту. Найчастіше його під'єднують одразу після передавача, щоб побачити форму вихідного сигналу перед передачею у волокно, а також після ділянок волоконної лінії або після підсилювача, щоб оцінити, як сигнал змінився під впливом середовища та обладнання. Також доцільно розміщувати візуалізатор перед оптичним приймачем – саме там можна порівняти форму сигналу на вході системи та після всіх її елементів. Таке розташування дає змогу зробити висновки про те, наскільки система зберігає форму переданих імпульсів і чи достатньо компенсовано дисперсійні ефекти.

Результати, які надає Optical Time Domain Visualizer, мають безпосереднє фізичне значення. На його графіку можна спостерігати часову діаграму потужності сигналу: по горизонталі відкладається час, а по вертикалі – оптична потужність або інтенсивність. Якщо система працює коректно, то імпульси сигналу чітко розділені, мають стабільну амплітуду та форму, а між ними є помітні проміжки. Якщо ж на графіку видно розмиття або накладання імпульсів, це свідчить про наявність дисперсійних спотворень, надмірних нелінійних ефектів або шумового впливу підсилювача. Крім того, зміна амплітуди імпульсів може свідчити про втрати потужності або нерівномірність підсилення в різних каналах.

Оцінювання якості системи за допомогою Optical Time Domain Visualizer здійснюється шляхом аналізу форми сигналу у часовій області. Якщо на графіку видно чітко окреслені імпульси без суттєвих спотворень, можна вважати, що система працює ефективно, а оптична лінія забезпечує належну передачу даних.

Натомість поява «хвостів», розширення імпульсів або шумового фону є ознаками зниження якості, що потребує компенсації дисперсії або оптимізації параметрів підсилювачів.

Під час аналізу результатів моделювання WDM-системи за допомогою інструмента Optical Time Domain Visualizer спостерігається чітка різниця між вхідним і вихідним сигналами у часовій області (рис. 3.11). На вхідному графіку (рис. 3.11 а)) сигнал має рівномірну структуру з повторюваними імпульсами майже однакової амплітуди, що свідчить про стабільну роботу передавача та правильну модуляцію каналів. Потужність вхідного сигналу становить близько 5,6 мВт, що відповідає розрахунковій вихідній потужності лазера близько 7 дБм.

Після проходження тракту зв'язку, який містить волокна NZDSF і DCF, а також два підсилювачі EDFA, форма сигналу змінюється. На вихідному графіку видно збільшення середньої потужності приблизно до 9,6 мВт, що підтверджує ефективну роботу підсилювачів і компенсацію втрат у волоконних ділянках. Разом з тим спостерігається нерівномірність амплітуд окремих імпульсів і помітне підвищення шумового фону. Такі зміни пояснюються появою ASE-шуму (Amplified Spontaneous Emission), який є характерним для ербієвмісних підсилювачів і зростає із підсиленням потужності [9]. Крім того, різна висота імпульсів може бути наслідком спектрального перекосу підсилення, коли EDFA підсилює канали з різними довжинами хвиль нерівномірно. Це типове явище для широкосмугових WDM-систем без фільтра вирівнювання підсилення (GFF), де канали з коротшими довжинами хвиль отримують дещо більший гейн, а з довгими – менший.

Спотворення форми імпульсів також може бути пов'язане з неідеальною компенсацією хроматичної дисперсії у волокнах NZDSF і DCF, що призводить до часткового розтягнення та перекривання імпульсів у часі. Сукупна дія шуму, спектральної нерівномірності та дисперсії пояснює, чому вихідний сигнал має розмиту структуру з підвищеним рівнем фону [6, 7].

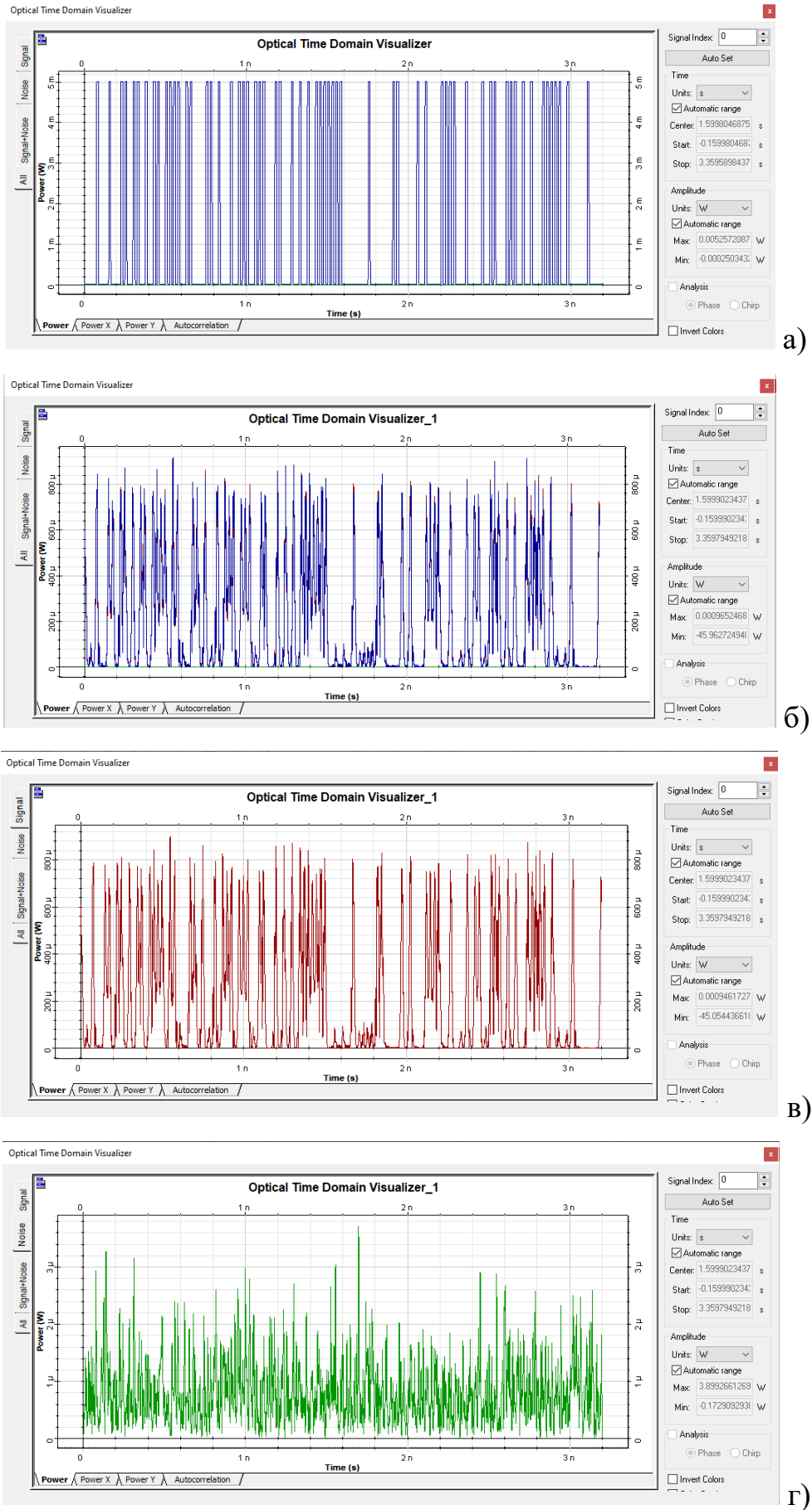


Рисунок 3.11 – Результати OTDV: а) вхідний сигнал; б) результуючий вихідний сигнал; в) вихідний сигнал; г) шум

Отже, результати часової візуалізації підтверджують, що система в цілому працює коректно, оскільки підсилювачі компенсують втрати потужності, однак у тракті спостерігаються побічні ефекти, властиві реальним EDFA, зокрема генерація ASE-шуму та нерівномірність підсилення між каналами [10]. Для покращення якості сигналу та підвищення OSNR доцільно застосувати фільтр вирівнювання підсилення (GFF), оптимізувати параметри підсилювачів і уточнити співвідношення довжин основного та компенсаційного волокон, щоб зменшити залишкову дисперсію й забезпечити більш рівномірне посилення всіх каналів WDM-системи.

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ

4.1 Особливості акумуляції шуму в оптичних лініях з підсилювачами

У перерахункових і реальних оптичних лініях із великою протяжністю застосування підсилювачів є необхідною умовою забезпечення прийняттого енергетичного балансу, оскільки природні втрати у волокні накопичуються майже лінійно з відстанню. Проте введення підсилювачів, зокрема EDFA, неминуче змінює не лише рівень сигналу, але й шумову структуру каналу. Підсилювач відновлює амплітуду корисного сигналу, однак при цьому додає власний шум, який у наступних каскадах також буде підсилений, що призводить до поступового зростання оптичного шумового фону вздовж тракту. Таким чином, оптимальна конфігурація оптоволоконної лінії є компромісом між необхідною загальною довжиною, допустимою кількістю підсилювачів, характеристиками волокна та спектральними параметрами WDM-системи [5, 8, 10].

При проектуванні ліній передачі з каскадуванням декількох оптичних підсилювачів необхідно враховувати ефект накопичення шуму спонтанного випромінювання (ASE – Amplified Spontaneous Emission). Особливо це актуально для довгих оптичних трактів, у яких сумарне загасання волокна є значним і потребує підсилення у декількох точках. Оптичний підсилювач вводить шум ASE разом із корисним сигналом. Якщо перший підсилювач має надмірно високе підсилення G_1 , то рівень шуму ASE після нього буде суттєвим, і цей шум надалі ще додатково підсилюватиметься наступним каскадом підсилення. Таким чином, надмірне збільшення G_1 призводить до накопичення шуму ASE, що у кінцевому результаті знижує оптичне відношення сигнал/шум (OSNR) на виході лінії та погіршує якість приймання [5, 10]. Тому оптимальною є стратегія розподіленого підсилення – коли загальне підсилення між двома підсилювачами розподіляється більш рівномірно, а не концентрується в одному каскаді. Такий підхід мінімізує внесок ASE від першого підсилювача і зменшує посилення шуму у другому підсилювачі.

Окремо слід враховувати вплив волокна дисперсійної компенсації (DCF –

Dispersion Compensating Fiber). Даний елемент має суттєву вставну втрату, тому його розташування між підсилювачами напряму впливає на необхідні рівні підсилення у кожному каскаді. Вставні втрати DCF одразу після першого підсилювача можуть призвести до додаткового зниження потужності сигналу перед другим підсилювачем, що вимагатиме збільшення G_2 . Таким чином, при оптимізації значень G_1 та G_2 обов'язково слід враховувати сумарні втрати в DCF, щоб забезпечити достатній рівень сигналу перед другим підсилювачем і уникнути перенасичення першого. Правильний розподіл підсилення з урахуванням вставної втрати DCF та накопичення шуму ASE забезпечує підвищення OCNR на виході лінії та покращує загальну завадостійкість WDM системи [5].

Для оцінки якості моделі будемо визначати параметри середнього співвідношення сигнал/шум на виході загального оптичного тракту, Q-фактор та BER на виході одного з каналів.

4.2 Моделювання вибору оптичних підсилювачів для відрізків в межах довжини регенераційної ділянки

У межах однієї регенераційної ділянки підсилювачі зазвичай встановлюють таким чином, щоб забезпечити вирівнювання втрат основного оптичного волокна до рівня, який дозволяє приймачеві зберігати необхідний запас по SNR без погіршення умов детектування. Типовим є розміщення бустерного підсилювача після передавача для формування високого початкового рівня потужності, а також попереднього підсилювача перед приймачем для компенсації кінцевих втрат і покращення чутливості. Безпосередньо у середині регенераційної ділянки підсилювачі можуть розташовуватись через рівні відстані, визначені не стільки географією, скільки допустимим зниженням потужності сигналу у волокні до точки, де подальша передача без підсилення ставала б критичною. Важливо, що оптимальна довжина між підсилювачами визначається характеристиками волокна, допустимими втратами, дисперсійними параметрами та дозволеним рівнем накопичення шуму [5, 10].

Розглянемо схему розміщення двох каскадів підсилення всередині однієї

регенераційної ділянки оптоволоконної лінії (рис. 4.1). Після основного відрізка NZDSF встановлено перший EDFA (табл. 4.1), що відновлює рівень потужності після головного прольоту. Далі сигнал проходить через ділянку компенсаційного волокна DCF, після якої встановлено другий підсилювач, який компенсує втрати після DCF та вирівнює енергетичний рівень перед приймачем. На вході, між каскадами та перед аналізатором якості розташовані оптичні вимірювачі потужності та аналізатор око-діаграми, що дозволяє кількісно оцінити вплив кожного етапу на якість сигналу.

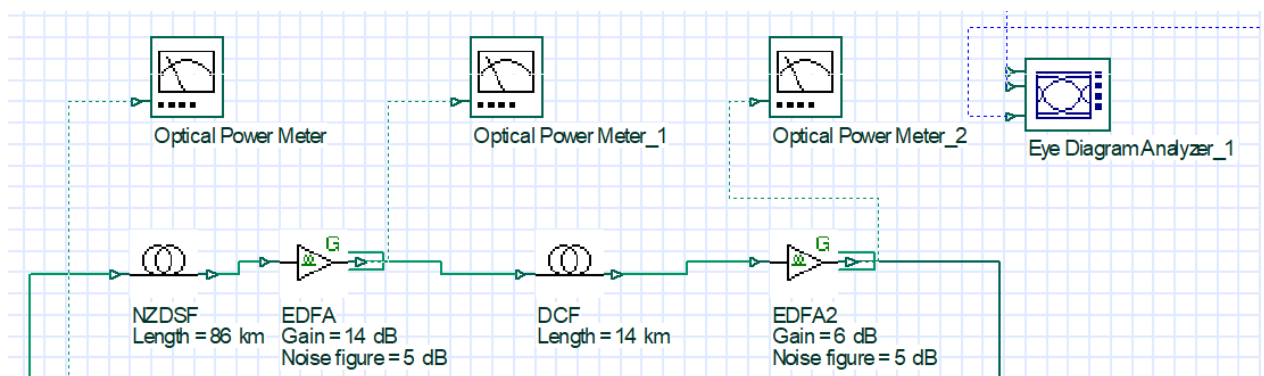


Рисунок 4.1 – Розміщення двох каскадів підсилення всередині однієї регенераційної ділянки оптоволоконної лінії $L=100$ км

Змоделюємо різний розподіл величини підсилення між двома підсилювачами і оцінимо параметри якості системи (табл. 4.1, рис. 4.2).

Таблиця 4.1 – Показники якості системи при зміні параметрів підсилювачів

G_1 , дБ	G_2 , дБ	P_1 (IN), дБм		P_2 (MID), дБм		P_3 (OUT), дБм		SNR, дБ	Max Q
		P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}		
4	16	5,639	-100	-6,700	-19,379	5,589	-3,947	9,536	8,29
6	14	5,610	-100	-4,730	-17,154	5,560	-4,734	10,294	8,42
8	12	5,604	-100	-2,736	-15,018	5,554	-5,315	10,869	8,105
10	10	5,628	-100	-0,711	-12,934	5,579	-5,727	11,306	7,807
12	8	5,518	-100	1,178	-10,881	5,468	-6,009	11,477	7,778
14	6	5,607	-100	3,267	-8,849	5,557	-6,195	11,752	7,56
16	4	5,564	-100	5,231	-6,828	5,521	-6,319	11,840	7,27

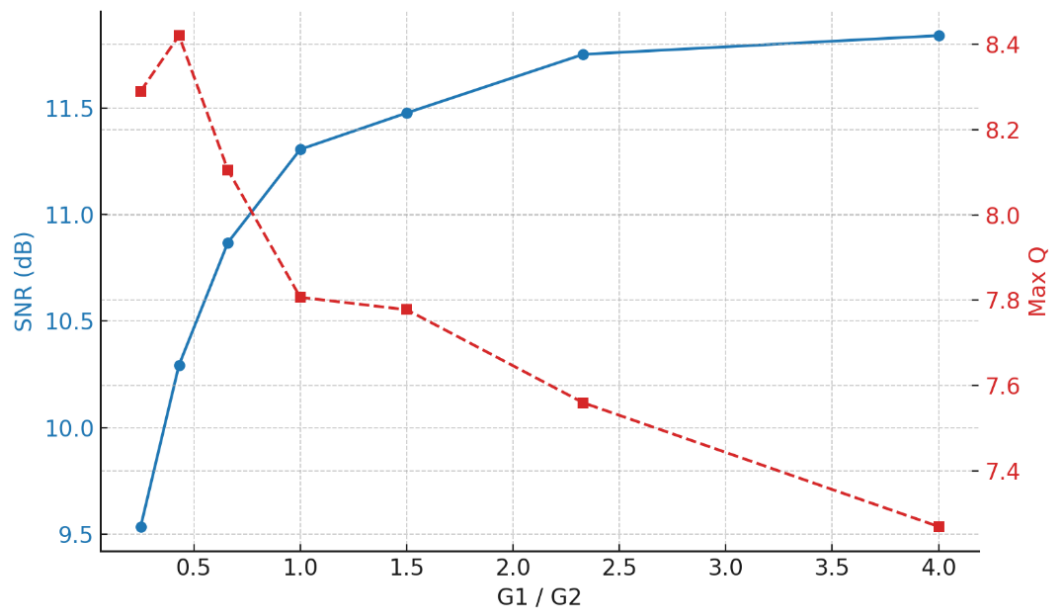


Рисунок 4.2 – Залежність SNR та Q-фактора від відношення рівнів підсилення EDFA

Аналіз показав, що при збільшенні підсилення EDFA1 відбувається суттєве збільшення шуму ASE перед DCF, який у подальшому додатково підсилюється EDFA2. Значення SNR поступово зростає, що свідчить про покращення співвідношення сигнал/шум завдяки більшій потужності сигналу. Водночас Q-фактор, який характеризує якість відновлення сигналу та рівень помилок (BER), навпаки – зменшується. Це вказує на те, що надмірне збільшення підсилення одного з каскадів (G_1) призводить до погіршення оптичного балансу системи, зростання нелінійних спотворень і, як наслідок, зниження якості переданого сигналу. Найвищий Q-фактор спостерігається при зменшенні G_1 до 6 дБ та збільшенні G_2 до 14 дБ, тобто при зміщенні більшої частини загального підсилення у другий каскад. Тому для даної довжини лінії оптимальним є варіант, коли перший підсилювач працює з меншим коефіцієнтом підсилення, а компенсація втрат після DCF виконується другим підсилювачем.

Проведемо моделювання розміщення підсилювачів в різних точках оптоволоконного тракту при рівномірному розподілі коефіцієнта підсилення (табл. 4.2, рис. 4.3 та рис. 4.4).

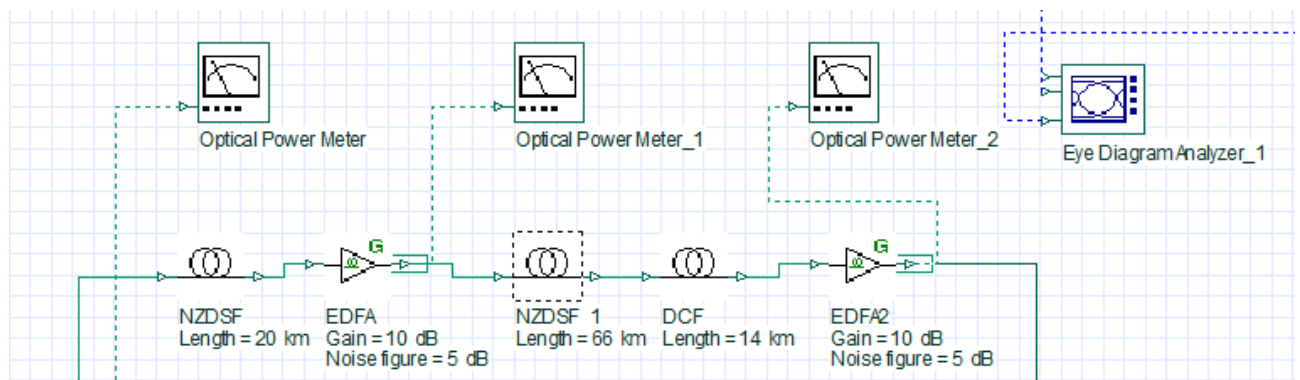


Рисунок 4.3 – Моделювання визначення точок розміщення EDFA для лінії 100 км

Таблиця 4.2 – Показники якості системи при зміні точки розміщення EDFA

L_1 , км	L_2 , км	P_1 (IN), дБм		P_2 (MID), дБм		P_3 (OUT), дБм		SNR, дБ	Max Q
		P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}		
20	80	5,564	-100	11,763	-12,934	5,514	-12,010	17,524	8,098
40	60	5,586	-100	7,986	-12,934	5,536	-10,978	16,514	8,435
50	50	5,593	-100	6,093	-12,934	5,543	-10,189	15,732	8,79
60	40	5,570	-100	4,171	-12,934	5,521	-9,196	14,717	8,604
80	20	5,591	-100	0,392	-12,934	5,542	-6,626	12,168	8,23
86	14	5,628	-100	-0,711	-12,934	5,579	-5,727	11,306	7,807

З результатів таблиці 4.2 та рисунку 4.4 бачимо, що навіть при однаковому коефіцієнті підсилення обох підсилювачів $G_1 = G_2 = 10$ дБ місце встановлення першого з них має критичний вплив на OSNR та Q. Перший EDFA не слід ставити на вході одразу за MUX – це дає поганий OSNR на кінець тракту. Max Q спочатку зростає і досягає максимуму при $L_1 \approx 50$ км, після чого знову знижується. Це означає, що існує оптимальна відстань до першого підсилювача, за якої баланс між рівнем сигналу та накопиченими шумами забезпечує найкращу якість передачі. При занадто короткій або надто великій відстані спостерігається деградація сигналу – у першому випадку через надмірне підсилення і нелінійні ефекти, у другому через надмірні втрати до підсилення. Отже, для оптимальної роботи системи доцільно розміщувати перший підсилювач приблизно на відстані 50 км від передавача ($\approx 50 \dots 60\%$ відстані).

Другий EDFA повинен мати достатній запас, щоб лише добрати втрати після DCF (яка має велику вставну втрату).

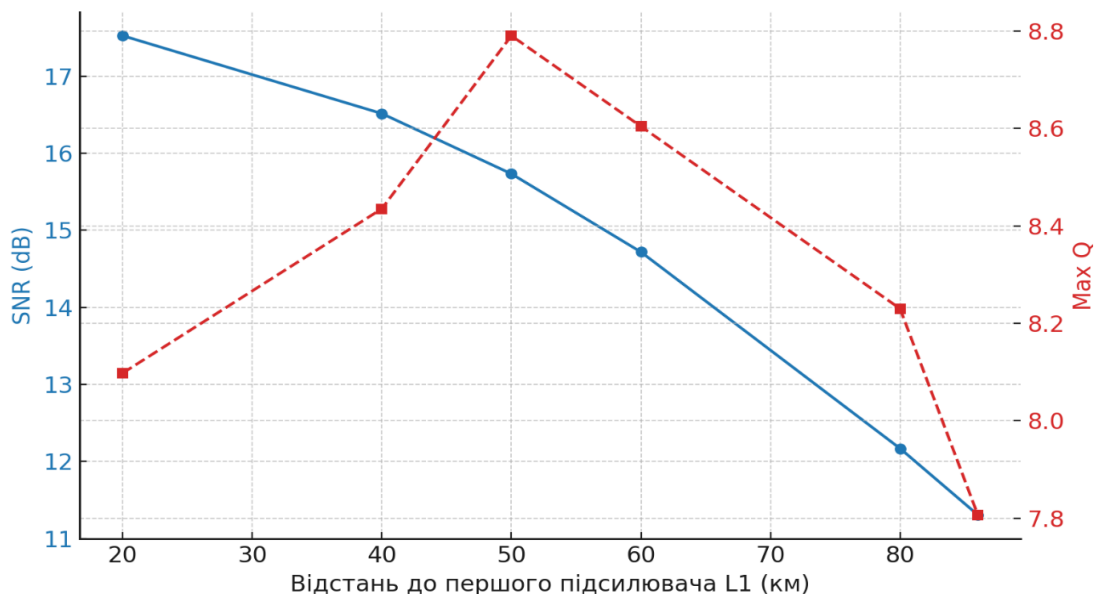


Рисунок 4.4 – Залежність SNR та Q-фактора від точки розміщення першого EDFA

Найгірший випадок, коли перший підсилювач розміщено практично в кінці тракту, внаслідок цього значна частина довжини проходиться на дуже низькому рівні.

Експериментальні результати в межах регенераційної ділянки однозначно показують дві взаємопов'язані закономірності:

1. Акумуляція шуму ASE робить небажаним концентрування підсилення в першому каскаді. Якщо значення G_1 занадто велике, перший EDFA генерує значний ASE, який далі підсилюється у другому каскаді – це призводить до зниження OSNR на виході і погіршення Q-фактора. Навпаки, зсув більшої частки загального підсилення в другий каскад зменшує внесок ASE від першого EDFA і забезпечує кращу якість прийому.

2. Положення першого EDFA істотно впливає на ефективність системи, навіть при однаковому сумарному підсиленні. Найкращі результати отримані при розміщенні першого підсилювача поблизу середини тракту або трохи ближче до передавальної частини (в експерименті – приблизно $L_1 \approx 0,5 \dots 0,6 \cdot L$). Занадто раннє розміщення (дуже близько до входу) або надто пізнє (близько до виходу) знижує Q-фактор через, відповідно, надмірне накопичення ASE у довгому залишковому відрізку або через проходження значної довжини на низькому рівні

сигналу перед підсиленням.

Крім цього, у практиці проектування та аналізу оптичної лінії з підсилювачами важливо враховувати низку супутніх обмежень, які безпосередньо впливають на коректність отриманих результатів та реалістичність моделювання [5, 8]. Передусім необхідно контролювати вихідну потужність EDFA щодо значення насичення, оскільки перевищення рівня P_{sat} призводить до роботи підсилювача в режимі нелінійного компресування та суттєво спотворює енергетичний баланс системи. Окрім цього, слід відстежувати нелінійну фазову складову сигналу, адже надмірний ріст цієї величини означає підвищення впливу нелінійних ефектів у волокні, що згодом може проявлятися у деградації очкової діаграми та зниженні ефективності розділення каналів у багатоканальних системах. Також необхідно коректно калібрувати прилади контролю рівня сигналу та шуму, зокрема оптичні вимірювачі та аналізатори спектра, щоб значення P_{signal} і P_{noise} відображали реальний стан енергетичного та шумового балансу.

4.3 Моделювання вибору оптичних підсилювачів для довгих ліній магістральних ВОТ

Розглянемо поведінку системи для довгих ліній при кратному збільшенні довжини оптоволокна в 2 та 3 рази. Припускаємо найкращий випадок – підсилювач 1 розміщений по середині тракту, підсилювач 2 – в кінці. Потужність підсилення розподіляється рівномірно. Вимірювач оптичної потужності встановлений на виході тракту (рис. 4.5).

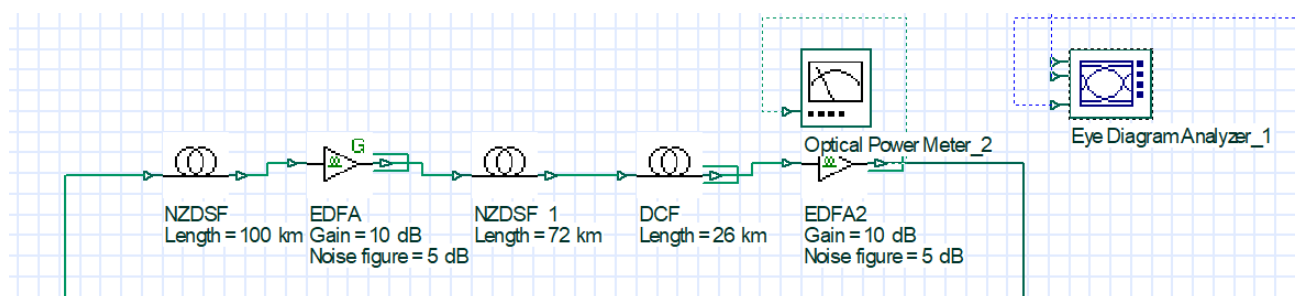


Рисунок 4.5 – Розміщення двох каскадів підсилення для лінії $L=200$ км

Результати оцінки потужності на виході лінії, SNR та Q-фактор для довжини лінії 200 та 300 км наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Показники якості системи для 200 і 300 км

L_1 , км	L_2 , км	L_3 , км	G_1 , дБ	G_2 , дБ	P_{signal} , дБм	P_{noise} , дБм	SNR, дБ	Max Q
50	36	13	10	10	5,543	-10,189	15,732	8,79
100	72	26	10	10	-14,005	-12,569	-1,436	0
100	72	26	15	15	-3,926	-6,775	2,849	6,74
100	72	26	20	20	5,993	-0,073	6,066	6,78
100	72	26	25	25	16,001	7,969	8,032	8,59
150	108	39	10	10	-33,799	-12,898	-20,901	0
150	108	39	15	15	-23,812	-7,727	-16,085	0
150	108	39	20	20	-13,770	-2,465	-11,305	0
150	108	39	30	30	6,289	9,808	-3,519	4,5

При збільшенні довжини лінії удвічі стає очевидно, що режим підсилення 10+10 дБ, який був прийнятно оптимальним на коротшій ділянці (~100 км), стає повністю недостатнім – кінцевий рівень сигналу падає нижче шумового дна, і Q-фактор практично деградує до нуля. Це означає, що при подвоєнні довжини оптичної траси сумарні втрати зростають настільки, що попередній баланс підсилення перестає бути життєздатним. Подальше збільшення загального підсилення (15+15, 20+20 дБ) покращує відношення сигнал/шум і повертає систему у робочий режим, але лише при дуже великій величині $G \approx 25+25$ дБ система знову виходить у зону високих значень Q ($\approx 8,6$), які є порівняними з короткою лінією. Таким чином, при збільшенні довжини лінії у 2 рази потрібно суттєво збільшувати доступне підсилення обох EDFA, причому пропорційно до сумарних втрат, інакше OSNR на виході обвалюється. Водночас слід враховувати, що практично для стандартних EDFA верхня межа робочого підсилення зазвичай не перевищує ~25-30 дБ на каскад, тому збільшувати коефіцієнт підсилення безкінечно неможливо – після цієї межі підсилювач переходить у насичення, зростає ASE і нелінійні ефекти, і OSNR починає погіршуватись.

Можна зробити висновок, що оптимальний режим роботи EDFA існує лише для певної довжини; при збільшенні дистанції необхідно не тільки змінювати коефіцієнт підсилення, але й змінювати архітектуру лінії.

Для моделювання такого режиму використаємо блок Loop Control, який

повторює зазначену конфігурацію волоконної ділянки кілька разів. Це дозволяє моделювати передавання сигналу на великі відстані, наприклад, до 1000 км, без необхідності фізичного дублювання однакових елементів у схемі (рис. 4.6).

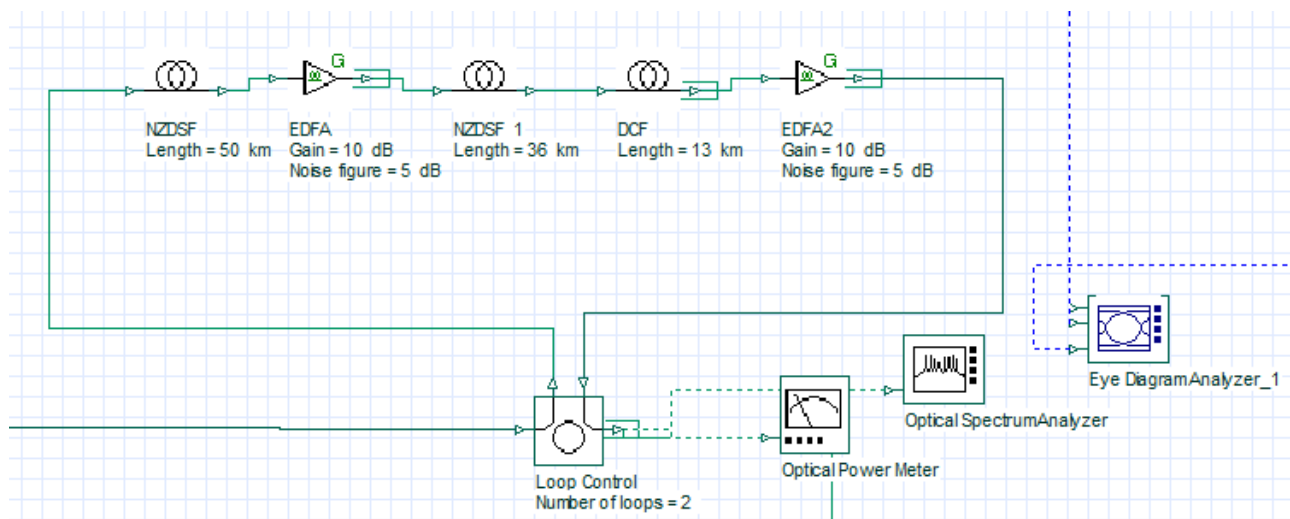


Рисунок 4.6 – Схема моделювання магістральних оптоволоконних ліній

Результати моделювання приведені в таблиці 4.4 та на рисунку 4.7.

Таблиця 4.4 – Показники якості системи для магістралей до 1000 км.

Кількість циклів	Загальна довжина волокна, км	P_{signal} , дБм	P_{noise} , дБм	SNR	Max. Q	Min. BER
1	100	5,806	-10,064	15,870	7,881	$1,61126e^{-15}$
2	200	6,056	-6,945	13,001	8,59	$1,47155e^{-14}$
3	300	6,261	-5,074	11,335	10,3343	$2,12498e^{-25}$
4	400	6,463	-3,714	10,177	9,84607	$2,65435e^{-23}$
5	500	6,369	-2,632	9,001	9,20468	$1,4546e^{-20}$
6	600	6,876	-1,720	8,596	7,16373	$3,43601e^{-13}$
7	700	7,096	-0,946	8,042	5,36278	$3,62788e^{-08}$
8	800	7,295	-0,252	7,547	5,25961	$7,03936e^{-08}$
9	900	7,535	0,374	7,161	4,43944	$3,96226e^{-06}$
10	1000	7,745	0,948	6,797	3,7639	$8,20616e^{-05}$

До приблизно 300...400 км система зберігає високий рівень якості – Q-фактор перевищує 9, а BER залишається меншим за 10^{-20} , тобто передача практично безпомилкова.

При досягненні загальної довжини $> 400...500$ км треба зменшувати коефіцієнт підсилення для кожного EDFA, щоб пригнічувати накопичення ASE.

Для магістралей > 800 км BER перевищує 10^{-7} , що вже є неприйнятним

показником якості передачі і вимагає застосування процедур корекції сигналу.

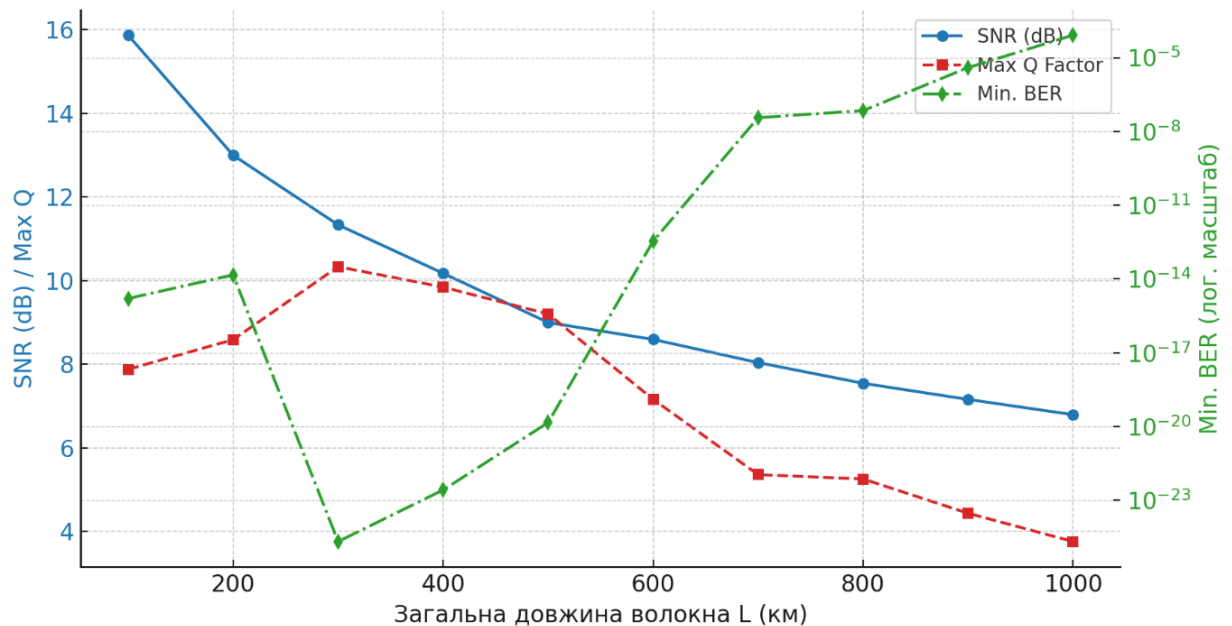
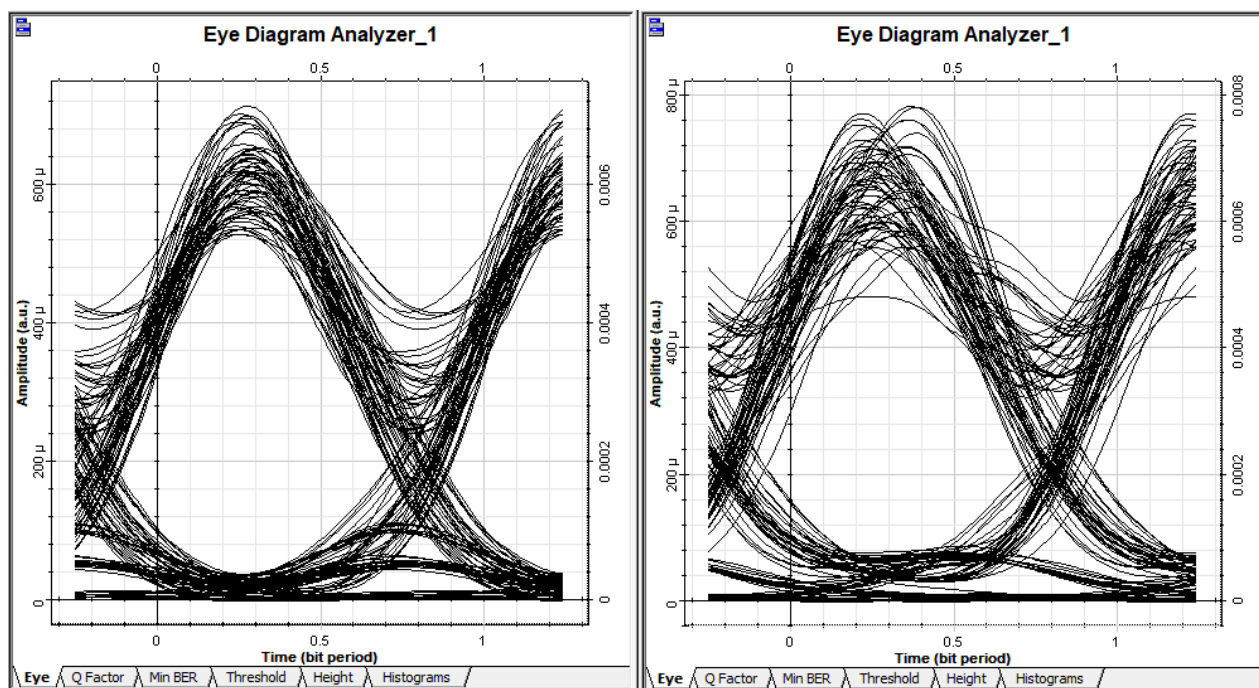


Рисунок 4.7 – Залежність SNR та Q-фактора від довжини лінії

При збільшенні кількості циклів (тобто ефективної довжини лінії) вихідний рівень сигналу дещо зростає за рахунок сумарного підсилення, але при цьому рівень шуму зростає значно швидше – відповідно SNR та Q-фактор спочатку покращуються (пікове значення спостерігається приблизно при 3...4 циклах), а далі стрімко погіршуються. Таким чином, система «виграє» на перших кількох прогонах за рахунок покращення балансу сигнал/шум після компенсації втрат, але після певної довжини шумова компонента стає домінуючою, і лінія переходить у режим деградації – різко росте BER, падає Q, а SNR втрачає стабільність. Отже, існує практична межа ефективної довжини лінії при заданій схемі підсилення без додаткових заходів регенерації, і подальше збільшення дистанції потребує не просто підсилення, а повної О-Е-О регенерації або принаймні вставки додаткових EDFA / ROADM із оптимізованим шумовим бюджетом.

Якість прийнятого сигналу добре видно на око-діаграмах для 400, 600, 800 і 1000 км ліній (рис. 4.8).



а)

б)

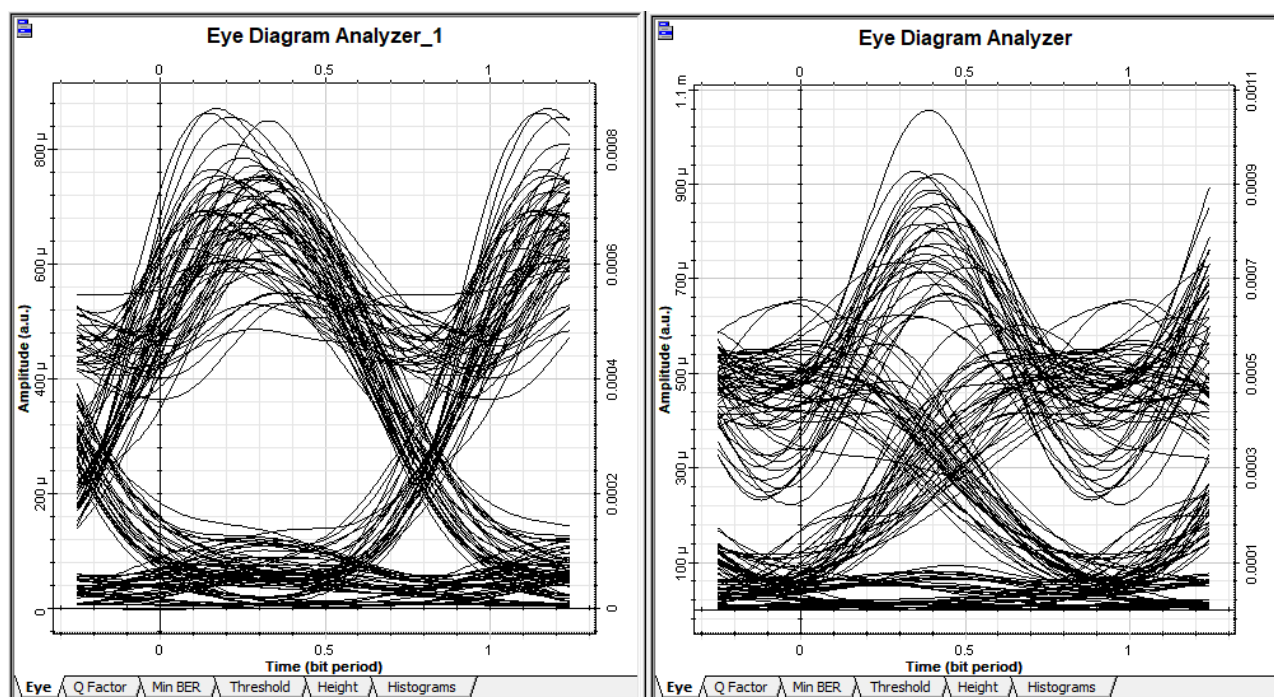
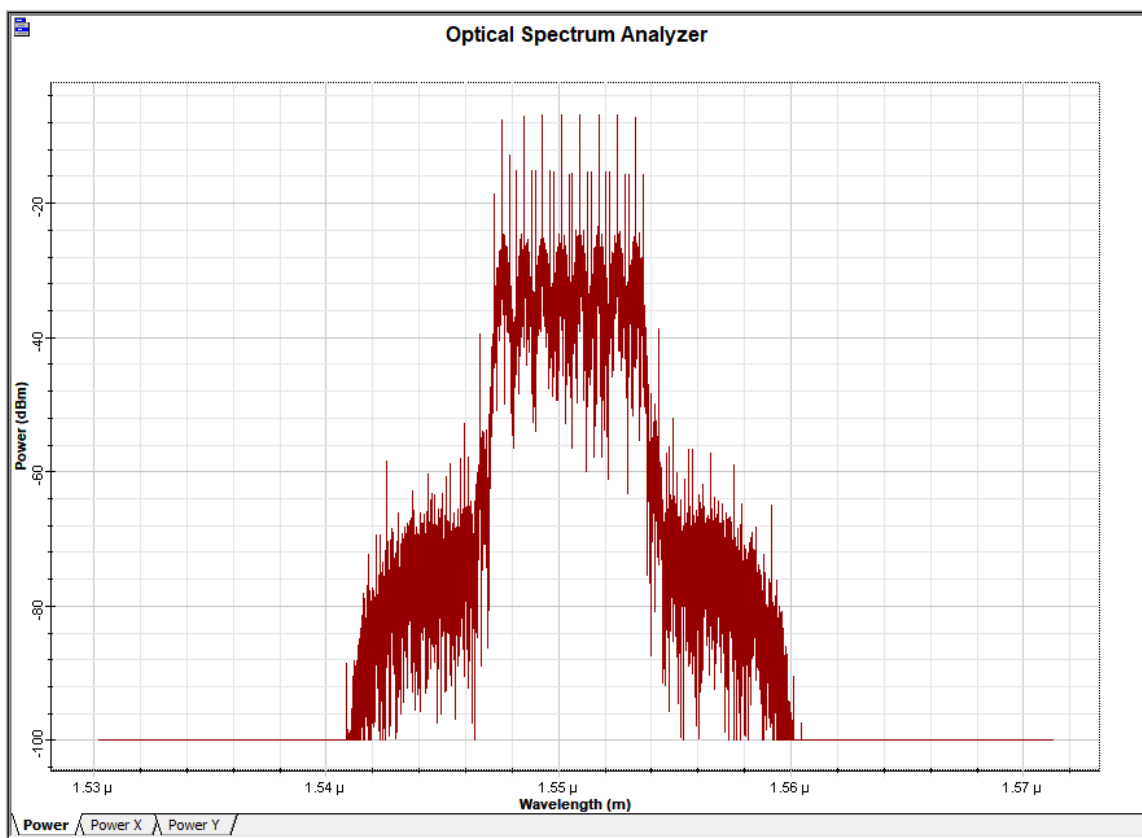
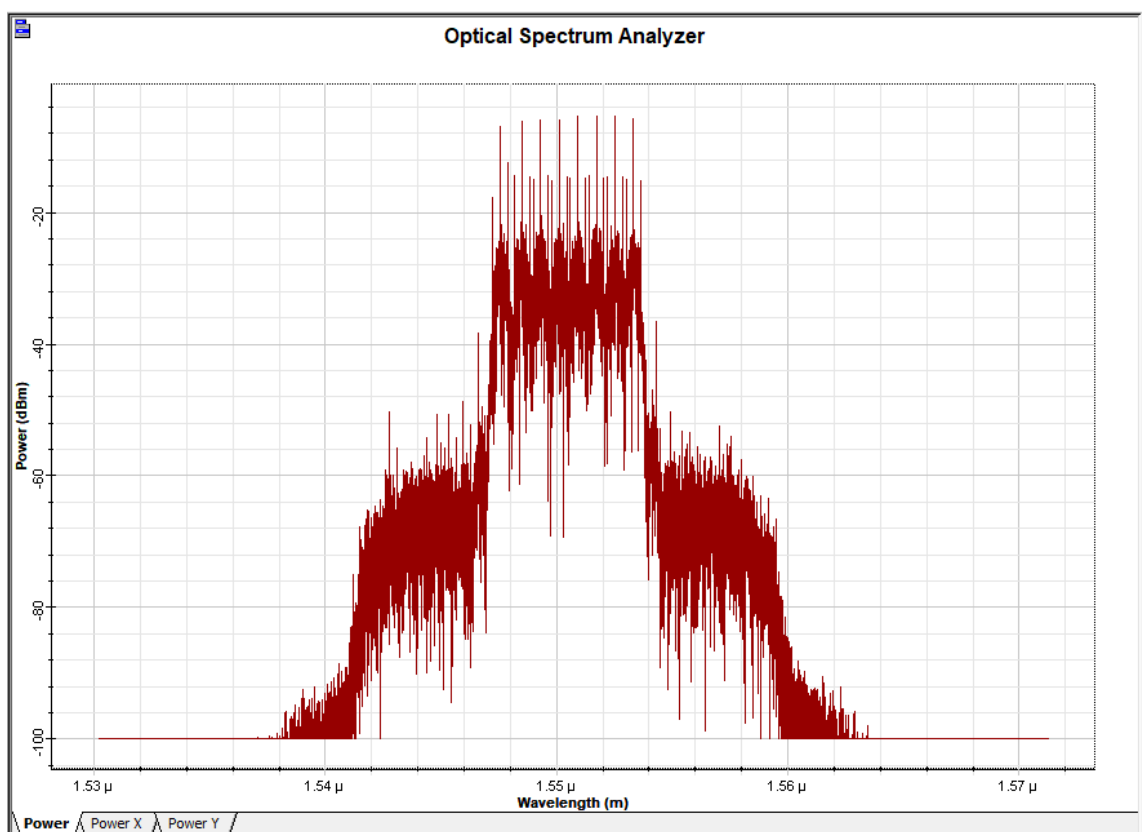


Рисунок 4.8 – Вигляд око-діаграм одного каналу для а) 400 км, б) 600 км,
в) 800 км, г) 1000 км

Рисунок 4.9 демонструє зміну спектральної діаграми каналу для лінії довжиною 200 км (а) та 800 км (б).



а)



б)

Рисунок 4.9 – Вигляд діаграм спектроаналізатора для лінії а) 200 км, б) 800 км

На рисунку 4.9, а) спектр лінії 200 км характеризується чітко вираженими каналами, рівномірним розподілом потужності та незначним рівнем шумів у

міжканальних областях. Потужність оптичного сигналу в центральній зоні становить близько $-20\dots-40$ дБм, що свідчить про ефективну компенсацію втрат волокна підсилювачами та відсутність значних нелінійних спотворень. Розширення спектра порівняно з початковим незначне та обумовлене впливом хроматичної дисперсії.

На рисунку 4.9, б) представлено спектр після проходження лінії довжиною 800 км. У цьому випадку спостерігається помітне розширення спектра та підвищення рівня шумів у міжканальних ділянках до рівня $-70\dots-80$ дБм. Потужність окремих каналів знизилася на $2\dots3$ дБ, що зумовлено накопиченням ASE-шумів від каскадних підсилювачів і впливом нелінійних ефектів. Окрім того, спостерігається нерівномірність амплітуд каналів, що є наслідком різної спектральної характеристики підсилювачів та фазових зсувів між каналами.

Порівняльний аналіз показує, що зі збільшенням довжини лінії від 200 км до 800 км відбувається:

- зростання ширини спектра оптичного сигналу;
- підвищення рівня шумів (зниження OSNR);
- поява нерівномірності потужностей каналів;
- посилення впливу дисперсійних та нелінійних ефектів.

На основі цього ми можемо зробити висновок, що просте масштабування шляхом повторення регенераційної ділянки навіть при «оптимальному виборі і розподілі підсилювачів веде до поступового накопичення шуму, дисперсійних і нелінійних спотворень у довгих волоконно-оптичних лініях і падіння SNR.

Для більших відстаней потрібно вводити додаткові підсилювачі, фільтри вирівнювання посилення (GFF) та модулі компенсації дисперсії, а також розглянути можливість використання оптичної регенерації або FEC-кодів для збереження прийнятної якості сигналу.

Найбільш поширеною є схема регенерації 3R (Re-amplify, Re-shape, Re-time).

Типовий 3R-регенератор містить три етапи обробки: Re-amplify, Re-shape, Re-time.

1. Re-amplify (Re-Amp) – підсилення вхідного оптичного сигналу до стандартного рівня для подальшої обробки. Використовується EDFA або SOA, які дають підйом потужності без зміни структури сигналу.

2. Re-shape (Re-Shaper) – відновлення амплітудно-рівневих параметрів сигналу: формування крутих фронтів, нормалізація рівнів «0» та «1», фільтрація шуму на схилах імпульсу. Реалізується нелінійними оптичними пороговими елементами, Mach-Zehnder модуляторами або оптичними decision-gate структурами.

3. Re-time (Re-Timer) – відновлення часової прив'язки імпульсів – компенсація джиттера та фазового дрейфу. Виконується за допомогою PLL-синхронізації або clock-recovery схем.

3R не просто збільшує рівень сигналу – він перезаписує сигнал, відділяє корисну бінарну інформацію від накопиченого шуму, і «перезапускає» передачу так, ніби сигнал щойно сформовано передавачем. Це повертає високі значення Q, навіть коли EDFA вже більше не можуть утримувати OSNR на потрібному рівні.

3R-регенератори розміщують через певні інтервали по магістралі – залежно від типу волокна, формату модуляції та бюджету OSNR. Часто їх застосовують перед критичними ділянками з високими втратами: морські ділянки, ділянки з DCF, сегменти з високими нелінійностями. При збільшенні швидкостей (100G+, 400G+) роль 3R зростає, оскільки допустиме джиттер-вікно зменшується.

Таким чином, 3R-регенерація не просто підвищує рівень сигналу, а формує новий «опорний» стан сигналу для подальшої ділянки передавання, і саме тому є ключовим елементом магістральних DWDM мереж великої протяжності, де лише EDFA-підсилення вже не забезпечує необхідного рівня якості передачі. Це ключова технологія, що відділяє оптичне транспортування від суто оптичного підсилення.

У сучасних оптичних транспортних системах ще одним фундаментальним підходом до збільшення довжини магістралі без деградації якості є перехід до так званого coherent-режиму (coherent mode – когерентний режим). На відміну від «класичної» системи прямого детектування (direct detection – пряме детектування), у когерентних приймачах виконується гетеродинне змішування

сигналу з опорним лазером-локальним генератором (local oscillator – локальний генератор), що дозволяє відновити не лише амплітудну, але й фазову, та навіть частотну інформацію оптичного сигналу. Таким чином система переходить з домену «амплітудних» методів аналізу до повного векторного опису сигналу в комплексній площині, де сигнал представлений як I-та Q-компонента (in-phase / quadrature – синфазна та квадратурна компоненти). Ця ключова можливість фазової чутливості забезпечує різке зростання енергетичної та спектральної ефективності, а також суттєво підвищує стійкість до шуму.

Технологічно coherent-система використовує цифрову обробку сигналів у приймачі: компенсація PMD, компенсація хроматичної дисперсії, придушення нелінійних спотворень та адаптивне відновлення фазової траєкторії здійснюються цифровими фільтрами. Це означає, що значна частина функціоналу компенсації переміщується з оптики у цифрову частину, і лінія може бути набагато простішою в фізичному сенсі, оскільки її властивості компенсуються алгоритмічно. В результаті coherent-режим практично ліквідує необхідність в DCF-вставках на магістралях великої протяжності, а розподіл EDFA стає простішим і менш критичним до точного місця встановлення.

Застосування когерентних приймачів дозволяє істотно розширювати довжину регенераційної ділянки без використання частих 3R-регенераторів, а у поєднанні з FEC (forward error correction – виправлення помилок уперед) може забезпечувати передачу на тисячі кілометрів без оптичної регенерації взагалі. Тому coherent-режим сьогодні є базовим стандартом для оптичних систем 100G, 200G, 400G і вище, оскільки принципова здатність відновлювати фазу і застосовувати цифрові методи компенсації робить його стійким до шуму, дисперсії та нелінійних ефектів, що робить когерентну технологію найбільш ефективним рішенням для наддовгих DWDM-магістральних систем.

ВИСНОВКИ

1. В кваліфікаційній роботі магістра розроблено та досліджено модель багатоканальної оптичної системи з ущільненням за довжиною хвилі (WDM) у середовищі OptiSystem. Модель відтворює структуру реальної волоконно-оптичної лінії передачі та дозволяє досліджувати вплив основних параметрів системи на якість передавання сигналів.

2. Виконано аналіз умов компенсації хроматичної дисперсії в оптичному тракті. Визначено загальні принципи підбору довжин робочих відрізків волокна зі змінними дисперсійними характеристиками, що забезпечують мінімальну залишкову дисперсію та стабільну роботу системи.

3. Досліджено вплив параметрів мультиплексора, демультіплексора та приймального тракту на якість відновлення сигналів у WDM-системі. Встановлено, що правильний вибір смуги пропускання фільтрів і типу модуляції забезпечує ефективне розділення каналів і високу завадостійкість.

4. Проведено оптимізацію підсилення в оптичній лінії шляхом моделювання роботи каскадів підсилювачів на волоконі, легованому ербієм (EDFA). Показано, що баланс між рівнем підсилення та накопиченням шумів суттєво впливає на загальну якість сигналу та дальність передавання.

5. За результатами моделювання підтверджено працездатність запропонованої WDM-системи. Отримані око-діаграми, параметри якості сигналу та рівні шумів свідчать про відповідність моделі сучасним вимогам до високошвидкісних оптичних систем зв'язку.

6. Показано, що OptiSystem є універсальним інструментом для дослідження широкого спектра оптичних, сформульовано узагальнені рекомендації щодо здійснення моделювання та використання результатів у практичній діяльності.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Agrawal G. P. Fiber-Optic Communication Systems. John Wiley & Sons, 2021. 603 p.
2. Huang T., Fan Z., Su J., Qiu Q. Real-Time Eye Diagram Monitoring for Optical Signals Based on Optical Sampling. *Applied Sciences* 13(3): 1363, 2023.
3. Kareem A. H. A., et al. Performance evaluation of fiber-impairment mitigation techniques for DWDM systems. *Sci. Rep. Elsevier*. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666950123000512> (дата звернення: 10.09.2025 p.)
4. Luo H., et al. Optimization strategy of power control for C+L+S band ultra-wideband links. *Opt. Express*. Vol. 30, 2021. PP. 664-675.
5. Okoumassoun T. P., et al. Performance evaluation of optical amplifiers in a hybrid EDFA–SOA–Raman system. *J. Commun. Netw. Manag.* 2023. URL: <https://www.jocm.us/2023/JCM-V18N8-522.pdf> (дата звернення: 01.10.2025 p.)
6. Ong K. Y. K., et al. Dispersion compensation of high-speed data using an on-chip ring-resonator based tunable device. *Opt. Express*. Vol. 30, No. 9, 2022. PP. 13959-13972.
7. Sabri A. A., Jihad N. J., and Hadi W. A. H. Performance analysis of different dispersion compensation techniques in optical fiber communications system. *Journal of Optics*, vol. 54, no. 16, 2024. PP. 1491-1508.
8. Song Y., et al. Simple amplifier configuration algorithm for dynamic C+L band linksю *Opt. Lett.* Vol. 47, 18, 2022. PP. 4712-4715.
9. Zhou J., Zhang Y., Li X., et al. Enhancing C+L-band transmission performance through OSNR-flattening and link-damage-recovery algorithms. *Opt. Express*. Vol. 32, No. 21, 2024. PP. 37127-37139.
10. Zdravecký N., Ovseník Ľ., Oravec J., Lapčák M. Performance Enhancement of DWDM Optical Fiber Communication Systems Based on Amplification Techniques. *Photonics*. 9(8): 530, 2022.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
Публікації здобувача

*МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ*

**КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ
ТЕХНОЛОГІЇ:
ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО**

**НАУКОВИЙ
ЖУРНАЛ**



Головний редактор – професор, д.т.н., Гордєєв О.О.

№61 2025

м. Одеса

Ліщина Н. М., Суринович О. М., Корень В. В., Ліщина В. О. Аналіз та управління ризиками при розробці програмного комплексу для керування зарядними станціями електромобілів	136
Марченко І. Ф., Бурлаков О. О. Порівняльний аналіз алгоритмів рекомендацій у середовищі C#.	142
Мацько Ю. А., Христинець Н. А., Міскевич О. І. Архітектурно-програмна модель IoT-системи моніторингу та управління технічним обслуговуванням ліфтів	149
Мельник В. М., Багнюк Н. В., Корчук О. І. Пошук прихованих помилок програмного використання пам'яті програмним кодом C++ за допомогою статичного аналізу Deep Learning	156
Мусієнко М. П., Мусієнко О. Ю. Інтеграція п'єзокерамічних IoT-систем моніторингу з Amazon SageMaker для прогнозного аналізу	164
Оленич І. Б., Яремик Р. Я., Парандій П. П. Мікропроцесорна система вимірювання сенсорних характеристик газочутливих польових транзисторів на основі поруватого кремнію та плівки відновленого оксиду графену	171
П'ятикоп О. Є., Проніна О. І., Мороз М. С. Інтеграція машинного навчання у вебплатформи для автоматизації прогнозних розрахунків	178
Петренко С. В. Model Context Protocol: концептуальні засади та реалізація на Java	185
Розломій І. О., Косенюк, Г. В., Науменко С. В. Механізми криптографічного контролю автентичності коду у сенсорних вузлах з обмеженими обчислювальними ресурсами	193
Сверстюк А. С., Гузоватий С. В., Андрущак І. Є. Геокодинг у веброботці: аналіз методів та практична реалізація на базі Nominatim	199
Терлецький Т. В., Угрин Д. І., Багнюк Н. В., Пугач С. О., Лакодей О. Л. Дослідження шляхів реінжинірингу серверної кімнати для покращення ефективності функціонування IT-інфраструктури	206
Чумичов Д. Д., Нікулін С. Л. Використання контурів об'єктів супутникових знімків sentinel для класифікації сільськогосподарських земель за допомогою нейронних мереж	213
Шкітов А. А., Тимошенко А. Г. Прогнозування робочих днів погодо-залежного виробництва за допомогою фільтра Калмана	227
Андрущак І. Є., Шмаровоз С. В. Застосування SNMP протоколу для віддаленого контролю працездатності мережевої інфраструктури	236
Гринюк С. В., Поліщук М. М., Костючко С. М., Конкевич Л. М., Крив'ячук Н. С. Система автоматичного захисту Smart Home з мобільним управлінням	242
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА	
Камєнєва Ю. В., Федосов С. А., Новосад О. В. Проектування фільтрів у цифровій обробці сигналів	249
Ткачук В. В., Сацик О. В., Бортнійчук С. А., Кошкульський А. В. Синхронізація та надійність систем зв'язку з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти	256
Хоменко П. В., Радзівілов Г. Д. Математична модель формування діаграми направленості Smart антен за допомогою адаптивних методів та алгоритмів в умовах динамічного середовища	264
Якимчук Н. М., Лучук В. В. Алгоритмічний підхід до вибору кількості та параметрів підсилювачів у WDM магістралях з використанням OptiSystem	280

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-37>

УДК 621.391.8:621.315.617

Якимчук Наталія Миколаївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8173-449X>

Лучук Володимир Віталійович, студент

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна.

АЛГОРИТМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ КІЛЬКОСТІ ТА ПАРАМЕТРІВ ПІДСИЛЮВАЧІВ У WDM МАГІСТРАЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ OPTISYSTEM

Якимчук Н. М., Лучук В. В. Алгоритмічний підхід до вибору кількості та параметрів підсилювачів у WDM магістралях з використанням OptiSystem. У статті розглянуто алгоритмічний підхід до визначення оптимальної кількості, місцеположення та параметрів оптичних підсилювачів у волоконно-оптичних магістралях з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM). Для дослідження застосовано програмне середовище OptiSystem, яке дозволяє проводити моделювання фізичних процесів у волокну з урахуванням дисперсії, нелінійних ефектів, втрат та шуму підсилювачів типу EDFA. Запропонована методика базується на поетапному алгоритмі оптимізації енергетичного бюджету, розподілу коефіцієнтів підсилення та оцінки співвідношення сигнал/шум (OSNR), що забезпечує досягнення заданої якості передавання при мінімальній кількості підсилювачів. Проведені моделювання показали, що надмірне підсилення одного каскаду призводить до зростання шуму ASE та погіршення Q-фактора, тоді як оптимальний розподіл підсилення і розташування EDFA забезпечують найкращі параметри системи. Для довгих магістралей встановлено межу ефективного підсилення, після якої спостерігається деградація OSNR, що вимагає додаткових підсилювальних секцій або регенерації. Запропонований підхід може бути використаний для проектування енергоефективних WDM-ліній довжиною до 1000 км і створення автоматизованих процедур оптимізації телекомунікаційних систем нового покоління.

Ключові слова: WDM-система, оптичний підсилювач EDFA, OptiSystem, OSNR, Q-фактор, оптимізація енергетичного бюджету.

Yakymchuk N., Luchuk V. Algorithmic Approach to Selecting the Number and Parameters of Amplifiers in WDM Trunk Lines Using OptiSystem. The article presents an algorithmic approach to determining the optimal number, placement, and parameters of optical amplifiers in wavelength-division multiplexing (WDM) fiber-optic transmission lines. The OptiSystem simulation environment was used to model the physical processes in the fiber, including dispersion, nonlinear effects, losses, and noise generated by EDFA amplifiers. The proposed methodology is based on a step-by-step algorithm for optimizing the power budget, gain distribution, and signal-to-noise ratio (OSNR), ensuring the required transmission quality with a minimal number of amplifiers. Simulation results show that excessive gain in one stage leads to an increase in ASE noise and degradation of the Q-factor, while the optimal gain distribution and proper EDFA placement provide the best system performance. For long-haul links, a limit of effective amplification was identified, beyond which OSNR degradation occurs, requiring additional amplifier stages or signal regeneration. The proposed approach can be applied to the design of energy-efficient WDM lines up to 1000 km long and to the development of automated optimization procedures for next-generation telecommunication systems.

Keywords: WDM system, EDFA optical amplifier, OptiSystem, OSNR, Q-factor, power budget optimization.

Постановка наукової проблеми. Зростання пропускної здатності сучасних телекомунікаційних мереж безпосередньо пов'язане з активним впровадженням спектрально-ефективних систем мультиплексування за довжинами хвиль (WDM). У таких системах якість передавання суттєво залежить від оптимального вибору параметрів оптичних компонентів – лазерних джерел, мультиплексорів та демультіплексорів, підсилювачів EDFA, волоконних ліній та фільтраційних вузлів. Невірні налаштування ширини спектральних фільтрів, рівня підсилення, спектральної відстані каналів або довжини регенераційних ділянок призводять до зростання взаємних перешкод, міжканальних нелінійних ефектів, погіршення OSNR та зниження показників BER/Q-фактора. Проте безпосередній експеримент у реальних волоконно-оптичних сегментах часто є складним, дорогим і потребує значних ресурсів.

За цих умов застосування програмного моделювання стає ключовим підходом для дослідження характеристик WDM-систем та пошуку оптимальних інженерних рішень. Оптичний симулятор OptiSystem забезпечує можливість варіативного й точного аналізу взаємозв'язку параметрів компонентів та їх впливу на якість передачі інформації, враховуючи нелінійні ефекти, спектральні перекриття й частотні обмеження. Разом з тим проблема полягає в тому, що існує велика кількість параметрів, які впливають на результати; при цьому процес їх оптимізації не є тривіальним і потребує формалізованого підходу.

Таким чином, виникає задача визначення оптимальних значень параметрів WDM-систем (зокрема параметрів EDFA, ширини спектральних фільтрів та каналного розносу), використовуючи програмне моделювання в OptiSystem, з метою покращення загальної якості передачі та мінімізації міжканальних спотворень.

Аналіз досліджень. Сучасні дослідження у сфері WDM-оптичних систем демонструють чіткий зсув від класичних підходів до проектування підсилювальних ділянок до формалізованої

оптимізації параметрів лінійного тракту та конфігурації підсилювачів у просторі багатопільових критеріїв (QoT / енергоспоживання / CAPEX / досяжність). Ряд робіт зосереджується на оптимізації розміщення гібридних EDFA/Raman підсилювачів у довгих магістралях та мережах із підвищеною спектральною щільністю, включно з (C+L)-діапазонними системами [1–4]. В цих роботах показано, що вибір місця встановлення підсилювачів та їхнього підсилення не може спиратися на статичні правила «кожні 80–100 км», а повинен враховувати нелінійні обмеження, профіль загасання волокон і характер обмежень OSNR.

Інший напрямок – моделі точного опису EDFA, як індивідуальних компонентів в контексті інструментального моделювання (OptiSystem та ін.) [5,7]. Показано, що спрощені моделі EDFA призводять до некоректних прогнозів OSNR і помилкових рішень при оптимізації топології, а точні моделі підсилення й спектральної характеристики дозволяють уточнити критерії вибору типу підсилювачів, DCF-компенсації та схем фільтрації. Водночас залишається відкритою проблема узгодженого уніфікованого критерію оптимальності – більшість робіт оптимізують або потужність, або досяжність, або CAPEX/енерговитрати; практично відсутні дослідження, що забезпечують одночасну оптимізацію при заданих обмеженнях на OSNR та швидкість передачі.

Низка праць оцінює вплив нелінійних ефектів та міжканальних взаємодій (FWM, XPM, SPM), та демонструє, що саме вони визначають верхні межі підсилення й максимально можливу дальність [6,8,10]. З іншого боку, частина експериментальних досліджень демонструє, що при коректній оптимізації місця підсилювачів та врахуванні реального профілю загасання (у тому числі з DCF) можна суттєво скоротити число підсилювачів або зменшити необхідне середнє підсилення без деградації QoT.

Таким чином, незважаючи на значну кількість робіт, відсутній єдиний відтворюваний формалізований алгоритм, який би дозволяв безпосередньо за вхідними параметрами системи (вихідна/вхідна потужність, довжина лінії, коефіцієнти загасання, NF підсилювачів) – однозначно визначити оптимальну кількість підсилювачів, їх місце розміщення та індивідуальні коефіцієнти підсилення. Саме цю наукову і практичну прогалину заповнює запропонована методика: ми пропонуємо алгоритмічно-замкнений підхід із обмеженням на OSNR та врахуванням шумової фігури, що може бути реалізований у OptiSystem та інтегрований у процес проектування. Це робить дослідження релевантним як у науковому контексті (розширення теорії оптимального проектування), так і у промислових застосуваннях, оскільки дозволяє уникати надлишкового підсилення та надмірної кількості підсилювачів у лініях 10–800 км.

Перспективи подальшого розвитку – поширення підходу на multi-band (C+L+S) передачу, спільна оптимізація нелінійностей (GN-модель) та автоматизований вибір компромісу між OSNR, NLI та CAPEX, що сьогодні практично не представлено у літературі.

Метою дослідження є розроблення та валідація формалізованої методики визначення оптимальної кількості, місцеположення та робочих параметрів оптичних підсилювачів у WDM-лініях передачі. Методика має забезпечувати досягнення заданої якості передавання (QoT), у першу чергу в частині рівня вихідної OSNR, з урахуванням фізичних обмежень компонентів – зокрема максимальної потужності підсилювача, шумової фігури, втрат волокон (NZ та DCF сегментів) та впливу нелінійних ефектів. Додатковою метою є формулювання алгоритмічного процесу у вигляді послідовних правил/кроків, що можуть бути реалізовані в OptiSystem (або інших CAE-системах) як проектна процедура для мереж різної довжини, що дозволяє скоротити кількість підсилювачів без деградації OSNR та створює передумови до energy-efficient / CAPEX-efficient проектування нових WDM магістралей.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Оптична програмна платформа OptiSystem відіграє ключову роль у моделюванні WDM-систем та дозволяє проводити комплексну оптимізацію архітектури без необхідності виконання дорогих натурних експериментів. Ця система забезпечує точне відтворення фізичних процесів у волокні, зокрема врахування нелінійності, дисперсії, втрат, шумів підсилювачів EDFA та механізмів генерації ASE, що робить її придатною для аналізу реалістичних сценаріїв перед впровадженням у мережу [7]. Важливою перевагою є можливість конфігурувати структуру магістралі із змінною кількістю спанів, узгоджувати параметри каналів, налаштовувати коефіцієнти підсилення, розподіляти регенераційні вузли та проводити сценарні дослідження. OptiSystem забезпечує інструменти для автоматичного збору даних у формі таблиць та спектрального аналізу через WDM-аналізатор та оптичний аналізатор спектру OSA, що дозволяє порівнювати альтернативні конфігурації та проводити пошук оптимальних режимів на основі кількісних критеріїв. У підсумку,

OptiSystem виступає не лише інструментом візуалізації, а насамперед – експериментально-аналітичною платформою, яка дає можливість побудувати методіку прийняття рішень, оптимізувати параметри розміщення та числа підсилювачів, отримати числові залежності OSNR, BER та Q-фактора і сформувані алгоритм проектування WDM-ліній з прогнозованою якістю передачі для різних довжин і режимів експлуатації.

За допомогою OptiSystem була створена модель волоконно-оптичної системи 40Гбіт з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM) (рис. 1). У передавальній частині системи кожен канал формує свій оптичний сигнал за допомогою когерентного лазера, який випромінює на окремій частоті в діапазоні від 193,1 до 193,4 ТГц. Потік даних у кожному каналі генерується псевдовипадковою послідовністю бітів, що подається на модулятор Маха-Цендера, де відбувається модуляція оптичного сигналу. Таким чином, створюються кілька незалежних оптичних потоків, які потім об'єднуються за допомогою WDM-мультиплексора в єдиний багатоканальний сигнал.

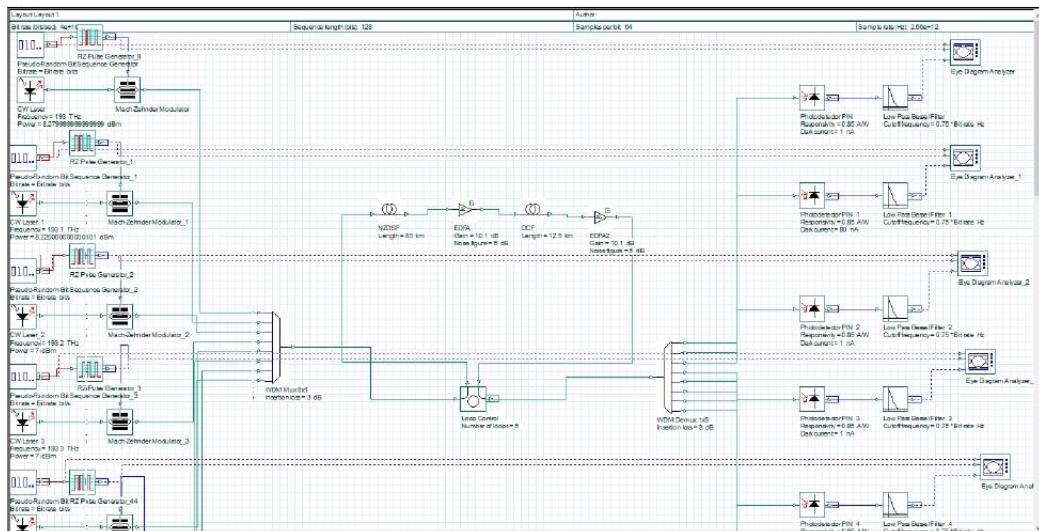


Рис. 1 Частина моделі 8-канальної системи WDM

Після мультиплексування об'єднаний сигнал надходить у досліджувану волоконно-оптичну лінію передачі, яка містить ділянку неметалізованого одномодового волокна (NZDSF), компенсуючий модуль дисперсії (DCF) та оптичні підсилювальні секції EDFA. Таке компонування повинне компенсувати хроматичну дисперсію та втрати потужності в лінії, забезпечуючи стабільну передачу сигналу на великі відстані.

На приймальному боці сигнал розділяється за допомогою WDM-демультиплексора, який виділяє кожен канал на окремій довжині хвилі. Далі кожен канал надходить на фотодетектор PIN, де оптичний сигнал перетворюється в електричний, проходить через низькочастотний фільтр і подається на аналізатор око-діаграм. За допомогою цих аналізаторів оцінюється якість переданих сигналів, зокрема рівень спотворень, завад і часових зсувів. Уся модель відтворює реальну структуру WDM-системи з урахуванням оптичного підсилення, компенсації дисперсії та багатоканального передавання даних, що дозволяє дослідити її роботу при різних параметрах волокна та підсилювачів.

Для забезпечення повної компенсації дисперсії накопиченої в основному волокні (NZDSF) розраховувалась довжина компенсаційного волокна (DCF):

$$D_{DSF} * L_{DSF} + D_{DCF} * L_{DCF} = 0, \quad (1)$$

$$L_{DSF} + L_{DCF} = L, \quad (2)$$

де: D_{DSF} – дисперсія основного волокна (приблизно $+4..6$ пс/(нм·км) для NZDSF), L_{DSF} – довжина основного волокна, D_{DCF} – дисперсія компенсаційного волокна (від'ємна, зазвичай $-20..-100$ пс/(нм·км)), L_{DCF} – довжина компенсаційного волокна, L – загальна довжина ділянки.

Для вибраної моделі $D_{DSF} = 4,5$ пс/(нм·км), $D_{DCF} = -30$ пс/(нм·км), $L = 100$ км отримали розподіл довжин основного і компенсаційного волокна для різних значень для різних значень запасу компенсації дисперсії (Таблиця 1).

Таблиця 1 – Зміна залишкової дисперсії оптичного тракту

Запас ρ (%)	L_{DSF} , км	L_{DCF} , км	Залишкова дисперсія D_{res} , пс/нм
0%	86.95	13.04	≈ 0.0
5%	86.30	13.69	-22.5
10%	85.65	14.34	-45.0
15%	85.00	15.00	-67.5

Для компенсації втрат потужності, що виникають під час проходження сигналу через волокно передбачено оптичні підсилювачі потужності EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Вибір саме EDFA зумовлений тим, що він забезпечує високий коефіцієнт підсилення у діапазоні довжин хвиль 1550 нм, де мають найменше загасання сучасні оптичні волокна [4]. Значення підсилення підбирається таким чином, щоб компенсувати втрати на попередній ділянці NZDSF, з урахуванням допустимого рівня шуму та нелінійних ефектів.

$$P_{rx}(dBm) = P_{tx}(dBm) - \Sigma IL(dB) + \Sigma G(dB). \quad (3)$$

де P_{tx} – потужність передавача, P_{rx} – потужність приймача, ΣIL – сума всіх введених втрат в тракту, що включає втрати демультимплексора, втрати в з'єднаннях і втрати у волокні, а ΣG – сума всіх підсилень, зокрема підсилення EDFA.

Для забезпечення допустимого рівня потужності на вході фотодетектора $P_{rx} = 1$ дБм, при заданому значенні вхідної потужності та встановлених втратах в лінії розраховане загальне підсилення ΣG близько 20 дБ.

При проєктуванні лінії передачі з каскадуванням декількох оптичних підсилювачів необхідно враховувати ефект накопичення шуму спонтанного випромінювання (ASE – Amplified Spontaneous Emission) [10]. Особливо це актуально для довгих оптичних трактів, у яких сумарне загасання волокна є значним і потребує підсилення у декількох точках. Оптичний підсилювач вводить шум ASE разом із корисним сигналом. Якщо перший підсилювач має надмірно високе підсилення G_1 , то рівень шуму ASE після нього буде суттєвим, і цей шум надалі ще додатково підсилуватиметься наступним каскадом підсилення. Тому оптимальною є стратегія розподіленого підсилення – коли загальне підсилення між двома підсилювачами розподіляється більш рівномірно, а не концентрується в одному каскаді. Такий підхід мінімізує внесок ASE від першого підсилювача і зменшує посилення шуму у другому підсилювачі.

Окремо слід враховувати вплив волокна дисперсійної компенсації DCF. Даний елемент має суттєву вставну втрату, тому його розташування між підсилювачами напряму впливає на необхідні рівні підсилення у кожному каскаді. Вставні втрати DCF одразу після першого підсилювача можуть призвести до додаткового зниження потужності сигналу перед другим підсилювачем, що вимагатиме збільшення G_2 . Таким чином, при оптимізації значень G_1 , та G_2 , обов'язково слід враховувати сумарні втрати в DCF, щоб забезпечити достатній рівень сигналу перед другим підсилювачем і уникнути перенасичення першого.

Для оцінки якості моделі будемо визначати параметри середнього співвідношення сигнал/шум на виході загального оптичного тракту, Q-фактор та BER на виході одного з каналів. BER є кінцевим показником якості системи, який безпосередньо визначає ефективність зв'язку. Відповідно, Q-фактор – це оптичний або електричний параметр, що кількісно оцінює роздільність рівнів логічних «0» і «1» у сигналі після детекції [11]. Ці два параметри визначаються через результати аналізатора око-діаграми для кожного вихідного каналу WDM.

Чим більший Q, тим краще розділяються рівні «1» і «0», і тим менше помилок при прийомі. При $Q > 6$ система зазвичай працює стабільно. Коли $Q < 4$, то навіть корекція помилок (FEC) не може забезпечити прийнятну якість сигналу.

Було проведено моделювання розподілу підсилення EDFA розміщених на кінцях відрізків основного та компенсаційного волокна (рис. 2). Результати показано в табл. 2 та на графіку рис. 3.

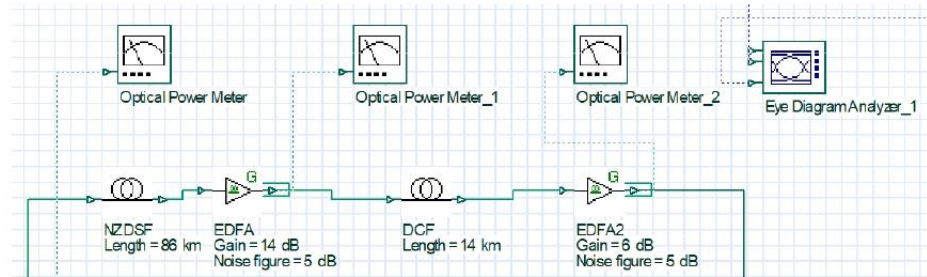


Рис. 2 Модельовання розподілу коефіцієнта підсилення EDFA для лінії 100 км

Таблиця 2 – Показники якості системи при зміні параметрів підсилювачів EDFA

G_1 , дБ	G_2 , дБ	P_1 (IN), дБм		P_2 (MID), дБм		P_3 (OUT), дБм		SNR, дБ	Max Q
		P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}		
4	16	5,639	-100	-6,700	-19,379	5,589	-3,947	9,536	8,29
6	14	5,610	-100	-4,730	-17,154	5,560	-4,734	10,294	8,42
8	12	5,604	-100	-2,736	-15,018	5,554	-5,315	10,869	8,105
10	10	5,628	-100	-0,711	-12,934	5,579	-5,727	11,306	7,807
12	8	5,518	-100	1,178	-10,881	5,468	-6,009	11,477	7,778
14	6	5,607	-100	3,267	-8,849	5,557	-6,195	11,752	7,56
16	4	5,564	-100	5,231	-6,828	5,521	-6,319	11,840	7,27

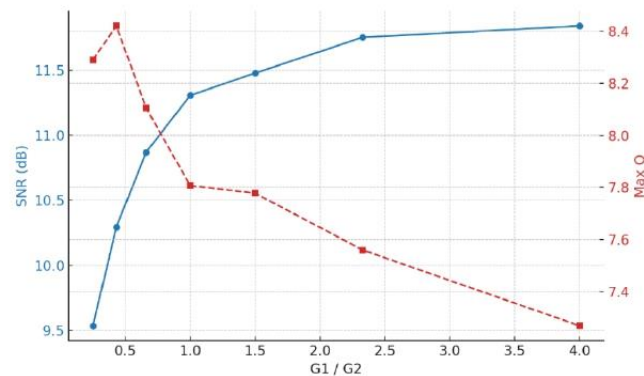


Рис. 3 Залежність SNR та Q-фактора від відношення рівнів підсилення EDFA

Аналіз показав, що при збільшенні підсилення EDFA1 відбувається суттєве збільшення шуму ASE перед DCF, який у подальшому додатково підсилюється EDFA2. Значення SNR поступово зростає, що свідчить про покращення співвідношення сигнал/шум завдяки більшій потужності сигналу. Водночас Q-фактор, який характеризує якість відновлення сигналу та рівень помилок (BER), навпаки зменшується. Це вказує на те, що надмірне збільшення підсилення одного з каскадів G_i призводить до погіршення оптичного балансу системи, зростання нелінійних спотворень і, як наслідок, зниження якості переданого сигналу. Найвищий Q-фактор спостерігається при зменшенні G_1 до 6 дБ та збільшенні G_2 до 14 дБ, тобто при зміщенні більшої частини загального підсилення у другий каскад. Тому для даної довжини лінії оптимальним є варіант, коли перший підсилювач працює з меншим коефіцієнтом підсилення, а компенсація втрат виконується другим підсилювачем.

Наступний крок демонструє результати моделювання розміщення підсилювачів в різних точках оптоволоконного тракту при рівномірному розподілі коефіцієнта підсилення (табл. 3, рис 3-4).

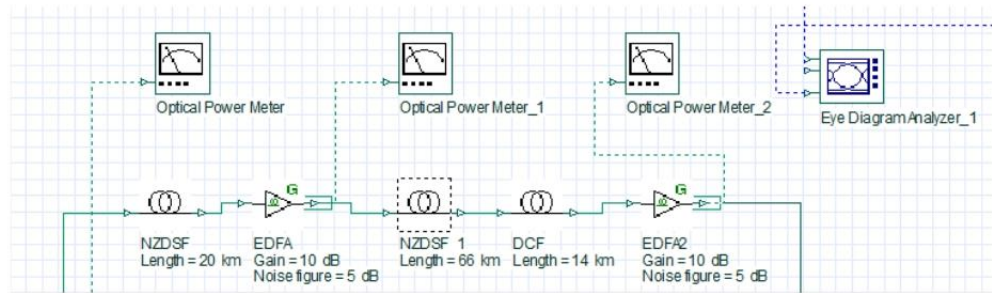


Рис. 4 Моделювання визначення точок розміщення EDFA для лінії 100 км

Таблиця 3 – Показники якості системи при зміні точки розміщення EDFA

L_1 , км	L_2 , км	P_1 (IN), дБм		P_2 (MID), дБм		P_3 (OUT), дБм		SNR, дБ	Max Q
		P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}		
20	80	5,564	-100	11,763	-12,934	5,514	-12,010	17,524	8,098
40	60	5,586	-100	7,986	-12,934	5,536	-10,978	16,514	8,435
50	50	5,593	-100	6,093	-12,934	5,543	-10,189	15,732	8,79
60	40	5,570	-100	4,171	-12,934	5,521	-9,196	14,717	8,604
80	20	5,591	-100	0,392	-12,934	5,542	-6,626	12,168	8,23
86	14	5,628	-100	-0,711	-12,934	5,579	-5,727	11,306	7,807

Отже, навіть при однаковому $G_1 = G_2 = 10$ дБ – місце встановлення першого EDFA має критичний вплив на OSNR та Q. Це означає, що існує оптимальна відстань до першого підсилювача, за якої баланс між рівнем сигналу та накопиченими шумами забезпечує найкращу якість передачі. При занадто короткій або надто великій відстані спостерігається деградація сигналу – у першому випадку через надмірне підсилення і нелінійні ефекти, у другому через надмірні втрати до підсилення. Отже, для оптимальної роботи системи доцільно розміщувати перший підсилювач приблизно на відстані ≈ 50 – 60% від загальної довжини ділянки.

Другий EDFA повинен мати достатній запас, щоб лише добрати втрати після DCF (яка має велику вставку втрату).

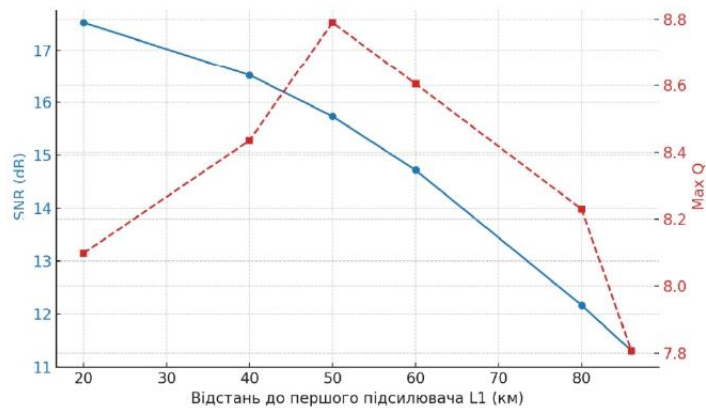


Рис. 5 Залежність SNR та Q-фактора від точки розміщення першого EDFA

Експериментальні результати в межах регенераційної ділянки однозначно показують дві взаємопов'язані закономірності:

- акумуляція ASE робить небажаним концентрування підсилення в першому каскаді;
- положення першого EDFA істотно впливає на ефективність системи, навіть при однаковому сумарному підсиленні.

Крім цього було проведено моделювання поведінки системи для довгих магістральних ліній до 1000 км (табл. 4).

Таблиця 4 – Показники якості системи для 200 і 300 км

L_1 , км	L_2 , км	L_3 , км	G_1 , дБ	G_2 , дБ	P_{signal} , дБм	P_{noise} , дБм	SNR, дБ	Max Q
50	36	13	10	10	5,543	-10,189	15.732	8,79
100	72	26	10	10	-14,005	-12,569	-1.436	0
100	72	26	15	15	-3,926	-6,775	2.849	6,74
100	72	26	20	20	5,993	-0,073	6.066	6,78
100	72	26	25	25	16,001	7,969	8.032	8,59
150	108	39	10	10	-33,799	-12,898	-20.901	0
150	108	39	15	15	-23,812	-7,727	-16.085	0
150	108	39	20	20	-13,770	-2,465	-11.305	0
150	108	39	30	30	6,289	9,808	-3.519	4,5

При збільшенні довжини лінії удвічі стає очевидно, що режим підсилення 10+10 дБ, який був прийнятно оптимальним на коротшій ділянці (~100 км), стає повністю недостатнім – кінцевий рівень сигналу падає нижче шумового дна, і Q-фактор практично деградує до нуля. Це означає, що при подвоєнні довжини оптичної траси сумарні втрати зростають настільки, що попередній баланс підсилення перестає бути життєздатним. Подальше збільшення загального покращує відношення сигнал/шум і повертає систему у робочий режим, але лише при дуже великій величині $G \approx 25+25$ дБ система знову виходить у зону високих значень Q ($\approx 8,6$), які є порівняними з короткою лінією. Таким чином, при збільшенні довжини лінії у 2 рази потрібно суттєво збільшувати доступне підсилення обох EDFA, причому пропорційно до сумарних втрат, інакше OSNR на виході обвалюється. Водночас слід враховувати, що практично для стандартних EDFA верхня межа робочого підсилення зазвичай не перевищує ~25–30 дБ на каскад, тому збільшувати G безкінечно неможливо – після цієї межі підсилювач переходить у насичення, зростає ASE і нелінійні ефекти, і OSNR починає погіршуватись.

Можна зробити висновок, що оптимальний режим роботи EDFA існує лише для певної довжини; при збільшенні дистанції необхідно не тільки змінювати коефіцієнт підсилення, але й змінювати архітектуру лінії.

Для моделювання такого режиму використаємо блок Loop Control, який повторює зазначену конфігурацію волоконної ділянки кілька разів. Це дозволяє моделювати передавання сигналу на великі відстані, наприклад, до 1000 км, без необхідності фізичного дублювання однакових елементів у схемі (рис. 6).

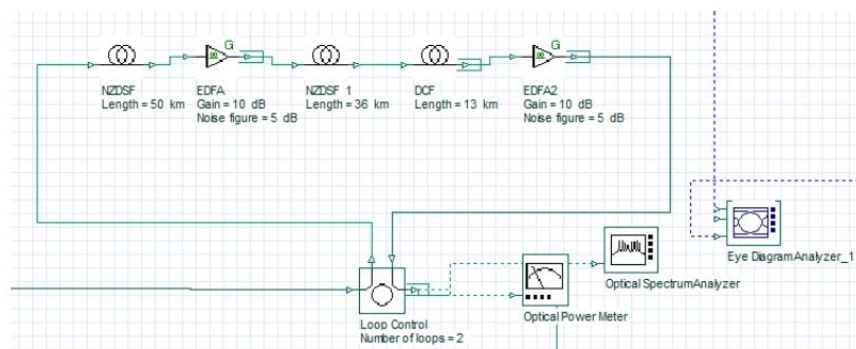


Рис. 6 Схема моделювання магістральних оптоволоконних ліній

При збільшенні кількості циклів (тобто ефективної довжини лінії) вихідний рівень сигналу дещо зростає за рахунок сумарного підсилення, але при цьому рівень шуму зростає значно швидше – відповідно SNR та Q-фактор спочатку покращуються (пікове значення спостерігається приблизно при 3–4 циклах), а далі стрімко погіршуються (табл.5, рис.7). Таким чином, система «виграє» на перших кількох прогонах за рахунок покращення балансу сигнал/шум після компенсації втрат, але після певної довжини шумова компонента стає домінуючою, і лінія переходить у режим деградації – різко росте BER, падає Q, а SNR втрачає стабільність. Отже, існує практична межа ефективної довжини лінії при заданій схемі підсилення без додаткових заходів регенерації, і подальше

збільшення дистанції потребує не просто підсилення, а повної О-Е-О регенерації або принаймні вставки додаткових EDFA/ROADM із оптимізованим шумовим бюджетом.

Таблиця 5 – Магістральні лінії до 1000 км.

Кількість циклів	Загальна довжина волокна, км	$P_{signals}$, дБм	P_{noises} , дБм	SNR	Max. Q	Min. BER
1	100	5,806	-10,064	15.870	7.881	$1.61126e^{-15}$
2	200	6,056	-6,945	13.001	8,59	$1.47155e^{-14}$
3	300	6,261	-5,074	11.335	10.3343	$2.12498e^{-25}$
4	400	6,463	-3,714	10.177	9.84607	$2.65435e^{-23}$
5	500	6,369	-2,632	9.001	9.20468	$1.4546e^{-20}$
6	600	6,876	-1,720	8.596	7.16373	$3.43601e^{-13}$
7	700	7,096	-0,946	8.042	5.36278	$3.62788e^{-08}$
8	800	7,295	-0,252	7.547	5.25961	$7.03936e^{-08}$
9	900	7,535	0,374	7.161	4.43944	$3.96226e^{-06}$
10	1000	7,745	0,948	6.797	3.7639	$8.20616e^{-05}$

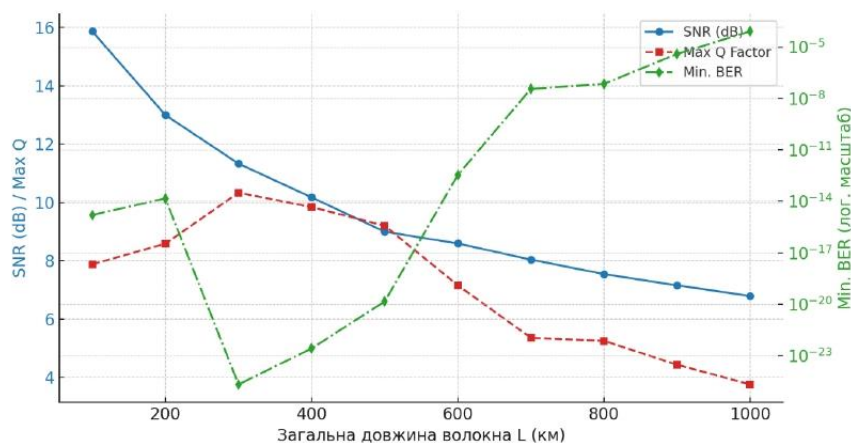


Рис. 7 Залежність SNR та Q-фактора від довжини лінії

В результаті аналізу отриманих результатів запропоновано формалізований алгоритм визначення кількості підсилювачів та їх оптимального розподілу підсилення (рис. 8).

Запропонований алгоритм ґрунтується на комбінації енергетичного бюджетування, моделювання шумової акумуляції ASE та контролю нелінійності фази у волокні, що дозволяє врахувати ключові фізичні обмеження WDM-лінії без проведення натурних експериментів. На відміну від класичної методики використання регенераційних ділянок (спанів) з фіксованою довжиною або підходів з рівномірним G-розподілом, ця процедура виконує адаптивний перерозподіл підсилення між етапами лінії з урахуванням взаємодії між накопиченням ASE та нелінійною фазою, що поліпшує OSNR за рахунок усунення перенасичення перших підсилювачів.

На першому кроці формується енергетичний бюджет, що базується на сумарних лінійних втратах основного та компенсаційного волокна, і визначається мінімальна необхідна кількість підсилювачів, виходячи з максимально доступного коефіцієнта підсилення та необхідного рівня потужності на приймачі. Це дозволяє отримати нижню оцінку числа EDFA у лінії.

На другому етапі здійснюється початкова розстановка спанів рівномірно по довжині траси, що служить базовою стартовою конфігурацією для подальшої оптимізації.

Третій крок передбачає для кожної кандидатної конфігурації послідовний розрахунок сигналу та шуму на виході кожного EDFA з урахуванням індивідуальних втрат спанів, ітеративне обчислення ASE на кожному каскаді та транспортування шуму до приймача. На основі цих даних визначається OSNR приймача, оцінюється відповідність мінімальним вимогам, і паралельно контролюється нелінійний фазовий набір на кожному інтервалі. Якщо хоча б одне обмеження не

виконується, здійснюється корекція конфігурації – збільшення кількості підсилювачів, перерозподіл коефіцієнтів підсилення на користь кінцевих каскадів.

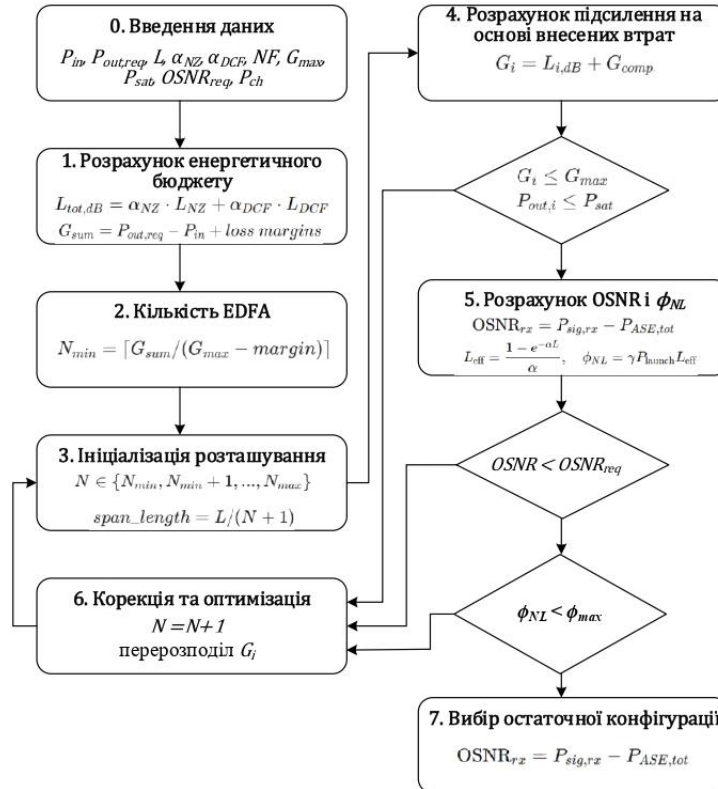


Рис. 8 Алгоритм проектування оптичної лінії з підсиленням EDFA

На завершальному етапі обирається конфігурація, яка забезпечує мінімальну кількість підсилювачів та мінімальні сумарні енергетичні витрати за умови виконання критеріїв OSNR та допустимого рівня нелінійних ефектів. Рекомендується додавати 1–2 дБ OSNR-запас для забезпечення стійкості до зміни умов експлуатації, таких як температурний дрейф, старіння компонентів та коливання коефіцієнта поглинання DCF. Саме такий підхід, у поєднанні з точним спектральним моделюванням в OptiSystem, формує практично застосовний алгоритм для проектування магістральних WDM-ліній довжиною у діапазоні 10–1000 км з передбачуваною якістю передачі та високою адаптивністю до конкретних технологічних вимог.

Результати моделювання демонструють можливість практичної інтеграції запропонованої методики у процес автоматизованого проектування магістральних оптичних систем, що підтверджує її прикладну значущість для сучасних телекомунікаційних мереж.

Висновки. У статті запропоновано формалізований підхід до вибору кількості, розміщення та параметрів оптичних підсилювачів у волоконно-оптичних WDM-лініях передачі з використанням середовища моделювання OptiSystem. У роботі створено детальну модель восьмиканальної WDM-системи, яка відтворює реальні процеси поширення сигналу, компенсації дисперсії та підсилення. На основі серії експериментів показано вплив коефіцієнтів підсилення та положення EDFA на показники SNR, Q-фактор і BER.

Результати моделювання довели, що надмірне підсилення першого каскаду призводить до накопичення шуму ASE та зниження якості сигналу, тоді як оптимальний розподіл підсилення між каскадами та правильний вибір місця розташування підсилювачів (приблизно на 50–60% довжини траси) забезпечують максимальний Q-фактор. Для довгих ліній (>200 км) встановлено межу ефективного підсилення, після якої спостерігається деградація OSNR, що потребує введення додаткових EDFA або регенераційних вузлів.

Запропонований алгоритм поєднує розрахунок енергетичного бюджету, контроль накопичення ASE і нелінійної фази, забезпечуючи адаптивний вибір кількості підсилювачів та їх параметрів. Такий підхід підвищує ефективність проектування WDM-магістралей, мінімізує кількість компонентів і зменшує енергоспоживання без погіршення якості передавання.

Список бібліографічного опису

1. Ibrahim M., Sticca G. S., Musumeci F., Castoldi A., Pastorelli R., Tornatore M. Selective Hybrid EDFA/Raman Amplifier Placement to Avoid Lightpath Degradation in (C+L) Networks. *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2022. URL: https://re.public.polimi.it/retrieve/01ceb99-c2a1-45ac-bf95-1d58a49732ea/ECOC_2022_GA_Raman_v1.pdf
2. Pedro J., Costa N. Optimized Hybrid Raman/EDFA Amplifier Placement for DWDM Mesh Networks. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 9, pp. 1552-1561, 1 May 1, 2018. DOI: 10.1109/JLT.2017.2783678.
3. Ebrahimzadeh A., Rahbar A., Alizadeh B. Cost Efficient Amplifier Placement and Gain Adjustment in All-Optical Networks: A Noise-Minimizing Approach. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127 (3), 2016. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.09.029.
4. Lundberg L., Andrekson P., Karlsson M. Power Consumption Analysis of Hybrid EDFA/Raman Amplifiers in Long-Haul Transmission Systems. *Journal of Lightwave Technology*. PP. 1-1. 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2668768.
5. Fei Y., Fumagalli A., Garrich Alabarce M., Sarti B., Moura U., Guerrero Gonzalez N., De Oliveira J. Estimating EDFA output power with an efficient numerical modeling framework. *IEEE ICC 2015 - Optical Networks and Systems Symposium*. Vol. 1, pp. 5222 – 5227, 2015. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249153.
6. Kareem A. H. A., Murdas I. A. Performance evaluation of fiber impairment mitigation for high capacity communication systems using optical compensation method. *Results in Optics*, Volume 11, 100399, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100399>.
7. Dhaam H. Z. Optimization of 16-WDM channel 40 Gbps optical link using OptiSystem. *BIO Web of Conferences*, 00084, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249700084>.
8. Ivaniga T., Ivaniga P. The In-Line placement of EDFA in CWDM/DWDM system for BER comparison at 1540 nm. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol. 12, pp. 1-7, 2019. DOI: 10.25103/jestr.125.01.
9. Uzunidis D., Matrakidis C., Stavdas A. Optimizing power, capacity, transmission reach and amplifier placement in coherent optical systems using a physical layer model. *PCI 2016*, 2016. DOI: 10.1145/3003733.3003755.
10. Durak F. Improving DWDM system performance through EDFA and DCF strategies. *Journal of Scientific Reports-A*, pp. 38-45. 2025. DOI: 10.59313/jsr-a.1602849.
11. Zablotskiy V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022, pp. 30-33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>.

References

1. Ibrahim M., Sticca G. S., Musumeci F., Castoldi A., Pastorelli R., Tornatore M. Selective Hybrid EDFA/Raman Amplifier Placement to Avoid Lightpath Degradation in (C+L) Networks. *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2022. URL: https://re.public.polimi.it/retrieve/01ceb99-c2a1-45ac-bf95-1d58a49732ea/ECOC_2022_GA_Raman_v1.pdf
2. Pedro J., Costa N. Optimized Hybrid Raman/EDFA Amplifier Placement for DWDM Mesh Networks. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 9, pp. 1552-1561, 1 May 1, 2018. DOI: 10.1109/JLT.2017.2783678.
3. Ebrahimzadeh A., Rahbar A., Alizadeh B. Cost Efficient Amplifier Placement and Gain Adjustment in All-Optical Networks: A Noise-Minimizing Approach. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127 (3), 2016. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.09.029.
4. Lundberg L., Andrekson P., Karlsson M. Power Consumption Analysis of Hybrid EDFA/Raman Amplifiers in Long-Haul Transmission Systems. *Journal of Lightwave Technology*. PP. 1-1. 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2668768.
5. Fei Y., Fumagalli A., Garrich Alabarce M., Sarti B., Moura U., Guerrero Gonzalez N., De Oliveira J. Estimating EDFA output power with an efficient numerical modeling framework. *IEEE ICC 2015 - Optical Networks and Systems Symposium*. Vol. 1, pp. 5222 – 5227, 2015. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249153.
6. Kareem A. H. A., Murdas I. A. Performance evaluation of fiber impairment mitigation for high capacity communication systems using optical compensation method. *Results in Optics*, Volume 11, 100399, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100399>.
7. Dhaam H. Z. Optimization of 16-WDM channel 40 Gbps optical link using OptiSystem. *BIO Web of Conferences*, 00084, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249700084>.
8. Ivaniga T., Ivaniga P. The In-Line placement of EDFA in CWDM/DWDM system for BER comparison at 1540 nm. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol. 12, pp. 1-7, 2019. DOI: 10.25103/jestr.125.01.
9. Uzunidis D., Matrakidis C., Stavdas A. Optimizing power, capacity, transmission reach and amplifier placement in coherent optical systems using a physical layer model. *PCI 2016*, 2016. DOI: 10.1145/3003733.3003755.
10. Durak F. Improving DWDM system performance through EDFA and DCF strategies. *Journal of Scientific Reports-A*, pp. 38-45. 2025. DOI: 10.59313/jsr-a.1602849.
11. Zablotskiy V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022, pp. 30-33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>.