

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз впливу нелінійних ефектів на параметри передачі у системах із спектральним мультиплексуванням каналів за довжинами хвиль  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2024 року навчання,  
групи ІМІМ-24-1

Микита КРАВЦОВ  
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник професор Валерій БЕЗРУК

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Микола МОСКАЛЕЦЬ  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

*/ Микита КРАВЦОВ /*

Керівник

*/ Валерій БЕЗРУК /*

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« 24 » жовтня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Кравцову Микиті Дмитровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз впливу нелінійних ефектів на параметри передачі у системах із спектральним мультиплексуванням каналів за довжинами хвиль затверджена наказом університету від « 24 » жовтня 2025 р. № 959 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Технологічна основа ОСЗ, що досліджується: сімейство технологій WDM/CWDM/DWDM.

Проаналізувати причини виникнення і особливості впливу нелінійних ефектів, що викликані розсіюванням в ОБ (SBS, SRS) та нелінійністю показника заломлення волокна (FWM, SPM, CPM, MI). Надати рекомендації щодо запобігання і зменшення цих впливів на параметри передачі ОСЗ, зокрема на пропускну здатність, потужність оптичного каналу, протяжність лінії, тощо.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі.

Вступ

1. Загальні особливості організації, принципи функціонування та компоненти сучасних оптичних систем зв'язку зі спектральним мультиплексуванням каналів.
2. Класифікація спотворень, що виникають в оптичних системах зв'язку, та їх загальна характеристика.
3. Аналіз впливів ефектів нелінійності, що пов'язані із розсіюванням, на параметри передачі в ОСЗ.
4. Аналіз впливів ефектів нелінійності, що пов'язані із зміною величини показника заломлення ОБ, на параметри передачі в ОСЗ.

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайди у форматі Power Point (назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи, узагальнена структурна схема типової оптичної системи зв'язку, «вікна прозорості» і спектральні області стандартного одномодового ОВ, типова функціональна схема системи WDM, класифікація та основні типи спотворень в ОСЗ, стимульоване Бріллюенівське розсіювання (SBS), стимульоване Раманівське розсіювання (SRS), чотирихвильове змішування (FWM), фазова самомодуляція (SPM), перехресна фазова модуляція (CPM) та модуляційна нестабільність (MI), висновки).

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	24.10 – 30.10.25	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	31.10 – 04.11.25	виконано
3	Виконання розділу 1	05.11 – 14.11.25	виконано
4	Виконання розділу 2	15.11 – 22.11.25	виконано
5	Виконання розділу 3	23.11 – 04.12.25	виконано
6	Виконання розділу 4	05.12 – 13.12.25	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	14.12 – 16.12.25	виконано
7	Оформлення презентаційного матеріалу та подання роботи до ЕК	17.12 – 20.12.25	виконано
8	Підготовка до захисту та захист у ЕК	21.12 – 26.12.25	виконано

Дата видачі завдання 24 жовтня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
( підпис )

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
( підпис )

(проф. Валерій БЕЗРУК)  
(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 32 рис., 1 табл., 25 джерел, 2 додатки.

ОСЗ, СПЕКТРАЛЬНЕ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ КАНАЛІВ, WDM, CWDM, DWDM, НЕЛІНІЙНІ ЕФЕКТИ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ЯВИЩЕ РОЗСІЮВАННЯ, SBS, SRS, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, FWM, SPM, XPM, MI

Об'єкт дослідження – оптична система зв'язку, нелінійні ефекти в оптичних волокнах.

Мета роботи – аналіз впливу нелінійних ефектів різної фізичної природи на параметри передачі сигналів в оптичних системах зв'язку, які побудовані на основі технологій сімейства WDM.

Проаналізовані нелінійні ефекти, що виникають в ОВ, і їх вплив на параметри передачі сучасних ОСЗ. Всі нелінійні ефекти, що виникають в ОВ, зобов'язані або явищу розсіювання (SBS і SRS), або змінах показника заломлення (FWM, SPM, XPM і MI), тобто його залежності від рівня оптичної потужності, що вводиться. Такі спотворення обмежують пропускну здатність самого оптичного волокна, а також довжину оптичних ліній ОСЗ. Особливо гостро ця проблема стоїть в ОСЗ на основі технологій сімейства WDM, у яких досягається значне збільшення пропускну здатності і, відповідно, швидкості передачі інформаційних потоків.

## THE ABSTRACT

Explanatory note 80 pages, 32 fig., 1 tab., 25 sources, 2 app.

OCS, WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING, WDM, CWDM, DWDM, NONLINEAR EFFECTS, OPTIC FIBRE, SSS, DSF, NZDSF, PHENOMENON of SCATTER, SBS, SRS, REFRACTION INDEX, FWM, SPM, XPM, MI

Object of research – optical communication system, nonlinear effects in optical fibers.

The purpose of work – analysis the influence of nonlinear effects various physical nature on the parameters of signal transmission in optical communication systems built on the basis of WDM family technologies.

Nonlinear effects arising in optical fibers and their influence on the transmission parameters of modern OCS are analyzed. All nonlinear effects arising in optical fiber are due to either the scattering phenomenon (SBS and SRS) or changes in the refractive index (FWM, SPM, XPM and MI), i.e. its dependence on the level of optical power input. Such distortions limit the bandwidth of the optical fiber itself, as well as the length of optical fiber lines. This problem is especially acute in OCS based on WDM family technologies, which achieve a significant increase in bandwidth and, accordingly, the speed information flow transmission.

## ЗМІСТ

	с.
Перелік скорочень.....	8
Вступ.....	10
1 ЗАГАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ, ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ КАНАЛІВ .....	12
1.1 Узагальнена структурна схема типової оптичної системи зв'язку.....	12
1.2 Загальні особливості і розвиток оптичних систем WDM.....	16
1.3 Базова структура ОСЗ із спектральним мультиплексуванням каналів.....	20
2 КЛАСИФІКАЦІЯ СПОТВОРЕНЬ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ, ТА ЇХ ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА.....	24
2.1 Лінійні спотворення.....	24
2.2 Нелінійні спотворення.....	29
3 АНАЛІЗ ВПЛИВІВ ЕФЕКТІВ НЕЛІНІЙНОСТІ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ РОЗСІЯННЯМ, НА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАЧІ В ОСЗ.....	35
3.1 Ефект стимульованого Бріллюенівського розсіювання (SBS) в ОСЗ.....	35
3.2 Ефект стимульованого Раманівського розсіювання (SRS) в ОСЗ.....	43
4 АНАЛІЗ ВПЛИВІВ ЕФЕКТІВ НЕЛІНІЙНОСТІ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗМІНОЮ ВЕЛИЧИНИ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ОВ, НА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАЧІ В ОСЗ.....	49
4.1 Ефект чотирьохвильового змішування (FWM) .....	49
4.2 Ефект фазової само модуляції (SPM).....	54
4.3 Ефект, що утворює перехресна фазова модуляція (CPM).....	58
4.4 Ефект модуляційної нестабільності (MI).....	59
Висновки.....	61
Перелік джерел посилання.....	65
Додаток А Публікації.....	68
Додаток Б Слайди презентації.....	73

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ASE – Amplified Spontaneous Emission – підсилена спонтанна емісія (випромінювання);

BER – Bit Error Ratio – коефіцієнт бітових помилок;

C/N – Carrier-to-Noise Ratio – відношення несуча/шум;

CPolM – Cross Polarization Modulation – поляризаційну крос-модуляцію;

CPM – Cross-Phase Modulation – фазова крос-модуляція (перехресна фазова модуляція);

CSO – Composite Second Order – композитні (інтермодуляційні) спотворення другого порядку;

CTB – Composite Triple Beat – композитні (інтермодуляційні) спотворення третього порядку;

CW – Continuous Wave – безперервна хвиля;

CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexer – грубе спектральне мультиплексування каналів;

DFB – Distributed Feed Back Laser – лазер з розподіленим зворотним зв'язком;

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне спектральне мультиплексування;

EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) – оптичний підсилювач на волокні, що леговане ербієм;

FWM – Four-Wave Mixing – чотирехвильове змішування;

LTE – Line Terminating Equipment – лінійне термінальне обладнання;

MI – Modulation Instabliting – модуляційна нестабільність;

MMF – Multi Mode Fiber – багатомодове оптичне волокно;

OADM – Optical Add/Drop Multiplexer – оптичний мультиплексор вводу/виводу;

OXC – Optical Cross-Connect – пристрій крос-комутації;

PON – Passive Optical Network – пасивная оптическая сеть;

RIN – Relative Intensity Noise – відносна інтенсивність шуму;

SBS – Stimulated Brillouin Scattering – стимульоване Бріллюєнове розсіяння;

SMF – Single Mode Fiber – одномодове оптичне волокно;

SSMF – Standard Single Mode Fiber – стандартне одномодове волокно;

SPM – Self-Phase Modulation – фазова саомодуляція;  
SRS – Stimulated Raman Scattering – стимульоване Раманівське розсіяння;  
WDM – Wavelength Division Multiplexing – спектральне (хвильове)  
мультиплексування каналів;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;  
ВОК – волоконно-оптичний кабель;  
ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;  
ГЧЗ – груповий час затримки;  
ЕП – електричний підсилювач;  
ІМП – інтермодуляційний продукт;  
КУО – каналоутворююче обладнання;  
МД – міжмодова дисперсія;  
МІ – модуляція за інтенсивністю оптичного випромінювання;  
ОВ – оптичне волокно;  
ОЛТ – оптичний лінійний тракт;  
ОП – оптичний підсилювач;  
ОПер – оптичний передавач;  
ОПр – оптичний приймач ;  
ОР – оптичний регенератор;  
ОС – обладнання спряження;  
ОСЗ – оптична система зв'язку  
ПМД – поляризаційна модова дисперсія;  
ХД – хроматична дисперсія.

## ВСТУП

Стрімкий розвиток різного роду мережних мультимедійних додатків і послуг Інтернет – з одного боку, і не менш стрімке зростання попиту на них з боку користувачів – з іншого боку, ставлять перед мережними провайдерами задачі щодо наявності високошвидкісних ліній зв'язку і, як наслідок, підвищення пропускної здатності каналів зв'язку. Цю проблему спочатку намагалися вирішити шляхом організації волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) для підвищення швидкості передачі трафіку. Однак зростаючі вимоги до якості каналів зв'язку і послуг, що надаються, зростання абонентської бази, збільшення тривалості голосового і відео трафіку, що призвело до зростання обсягів даних, що передаються, вимагає використання у ВОЛЗ для зазначених цілей методів спектрального мультиплексування каналів (Wavelength Division Multiplexing, WDM) [1, 2].

На сьогоднішній день оптичні системи на основі технологій сімейства WDM є найкращим варіантом для організації протяжних магістральних ВОЛЗ завдяки високій ємності та спектральній ефективності. Однак одним з основних обмежуючих факторів технологічних можливостей таких систем є нелінійні ефекти, що виникають в оптичному волокні (ОВ) при передачі потоків трафіку. Перш за все, такі ефекти обмежують дальність передачі по оптичних лініях зв'язку. Крім того, вони мають негативний вплив на пропускну здатність ОВ і, як наслідок, на швидкість передачі трафіку, що в підсумку обмежує ефективність використання каналних планів WDM-систем в цілому, викликаючи як внутрішньоканальні, так і міжканальні нелінійні ефекти [3, 4].

Потрібно зазначити, що внутрішньоканальні нелінійні ефекти зумовлені нелінійним самовпливом окремих імпульсів інформаційного потоку та взаємодією різних імпульсів одного оптичного WDM-каналу між собою. Відповідно міжканальні нелінійні ефекти зумовлені нелінійною взаємодією між двома або більше WDM-каналами. Крім того, такі нелінійні ефекти можуть бути також зумовлені взаємодією інформаційних сигналів із підсиленням спонтанним випромінюванням (Amplified Spontaneous Emission, ASE). Зокрема, якщо говорити про нелінійні ефекти в системах грубого спектрального мультиплексування каналів (Dense WDM, DWDM), то в них вони викликані різними проявами ефекту Керра, що ґрунтується на зміні показника заломлення ОВ у залежності від

напруженості застосованого електричного поля). Серед таких нелінійних ефектів можна виділити [5, 6]:

- фазову саомодуляцію (Self-Phase Modulation, SPM);
- фазову крос-модуляцію або перехресну фазову модуляцію (Cross-Phase Modulation, CPM);
- чотирихвильове змішування (Four-Wave Mixing, FWM);
- поляризаційну крос-модуляцію (Cross Polarization Modulation, CPIM) та ін.

Відносний вплив різних видів нелінійної взаємодії залежить як від швидкості передачі символів у системі зв'язку, тобто від формату модуляції, так і від фізичних параметрів лінії зв'язку. Вплив міжканальних нелінійних ефектів у DWDM-системах, як правило, найбільш значний у разі наявності канальних швидкостей 10 Гбіт/с і менше. У цьому випадку ці ефекти породжують амплітудні та фазові спотворення, які переважно проявляються у вигляді зміни форми оптичних сигналів, що передаються. Внутрішньоканальні нелінійні ефекти частіше за все виникають у системах зв'язку на швидкостях 40 Гбіт/с і вище. Тут характер їх впливу можна описати як процес формування нелінійного шуму [5, 6].

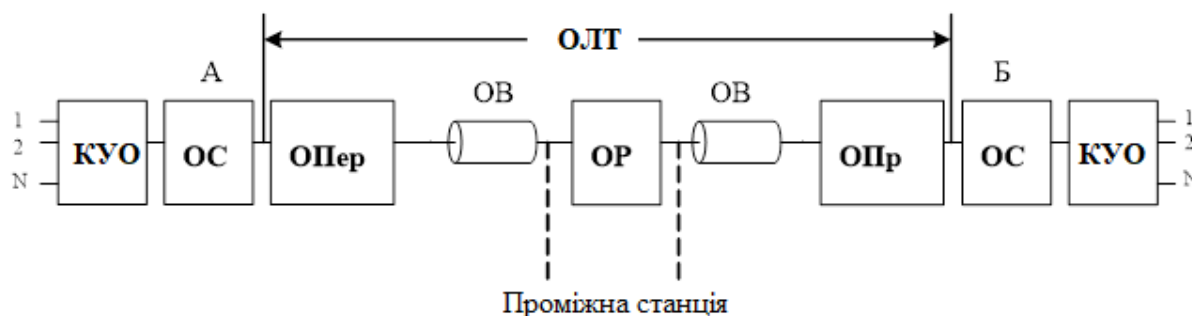
Отже, розуміння природи фізичних процесів щодо виникнення і впливу нелінійних ефектів на оптичні сигнали, що розповсюджуються по волокну є дуже актуальною задачею, тому що її вирішення не тільки дозволяє підвищити в цілому ефективність використання високошвидкісних ОВ ще на стадії проектування, але також має важливу практичну цінність щодо підвищення якості передачі інформації в WDM-системах. Тому метою цієї кваліфікаційної роботи є аналіз впливу нелінійних ефектів різної фізичної природи на параметри передачі сигналів в оптичних системах зв'язку (ОСЗ), які побудовані на основі технологій сімейства WDM, а також обґрунтування рекомендацій і вимог щодо зменшення цих впливів.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ, ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ КАНАЛІВ

## 1.1 Узагальнена структурна схема типової оптичної системи зв'язку

Здійснення передачі інформаційних потоків по оптичних лініях зв'язку забезпечується найбільшою на сьогоднішній день швидкістю – пропускна здатність може досягати близько терабіт (1000 Гбіт/с) в секунду, що обумовлено високою частотою несучої  $10^{14}$  Гц. Такі можливості ВОЛЗ забезпечувати передачу сигналів в надширокій смузі частот на значні відстані, а також постійне зростання вимог користувачів до збільшення пропускної здатності сучасних систем і мереж, зумовлюють необхідність проведення систематичних досліджень і розробок у сфері планування, проектування та організації ВОЛЗ.

В основі будь-якої сучасної оптичної системи зв'язку (ОСЗ) лежить подання обладнання в вигляді трьох функціональних систем, кожна з яких об'єднує обладнання за своїми певними функціями, що виконуються. Зокрема, ОСЗ складається з таких систем обладнання: каналотворюючого (КУО), що відповідає за створення та управління каналами, спряження (ОС), що забезпечує взаємодію між різними частинами оптичної системи, та обладнання оптичного лінійного тракту (ОЛТ). Узагальнена структурна схема типової ОСЗ представлена на рис. 1.1 [7, 8].



- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| <b>КУО</b> – каналотворююче обладнання; | <b>ОР</b> – оптичний регенератор;     |
| <b>ОС</b> – обладнання спряження;       | <b>ОЛТ</b> – оптичний лінійний тракт; |
| <b>ОПер</b> – оптичний передавач;       | <b>ОПр</b> – оптичний приймач         |
| <b>ОВ</b> – оптичне волокно;            |                                       |

Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема типової ОСЗ

На станції А з боку здійснення передачі (рис. 1.1) первинні сигнали в електричній формі надходять на КУО, на виході якого формується груповий сигнал, який далі подається в ОС, де здійснюється перетворення електричного сигналу в форму, що є оптимальною для передачі по ОЛТ. Далі електричний сигнал надходить в ОПер, в якому за допомогою модуляції оптичної несучої відбувається його перетворення в оптичний сигнал [7, 8].

Каналоутворююче обладнання включає у свій склад як індивідуальне, так і групове обладнання. Індивідуальне обладнання призначене для здійснення процесів дискретизації аналогових сигналів, що передаються, з боку передачі, а також для відновлення спектру вихідних сигналів зі спектру їх відлікових значень на боці прийому. Групове обладнання відповідає за виконання функцій кодування групового сигналу, передачі інформації в цифровій формі та декодування групового цифрового потоку в тракті прийому [7, 8].

У процесі поширення по ОВ оптичний сигнал піддається впливам загасання і спотворення, які обумовлені фізичними властивостями безпосередньо середовища передачі. З метою збільшення протяжності лінії зв'язку і забезпечення необхідних якісних характеристик щодо передачі інформації, через певні інтервали, що називаються ділянками регенерації, розміщуються проміжні станції, що обслуговуються і/або не обслуговуються – оптичні регенератори або ретранслятори (ОР). На цих станціях оптичний сигнал підсилюється, а також реалізуються процеси компенсації загасання і здійснюється корекція спотворень сигналу. У зв'язку з цим проміжні станції ОСЗ, як правило, здійснюють перетворенням оптичного сигналу в електричний на вході і зворотне перетворення електричного сигналу в оптичний на виході. Також треба зазначити, що в сучасних ОСЗ, особливо у разі організації ОСЗ на базі технологій WDM, можна реалізувати повністю оптичні проміжні станції на основі застосування оптичних підсилювачів (ОП) [7, 8].

На станції Б з боку прийому виконується зворотне перетворення оптичного сигналу в електричний для подальшої обробки і відновлення переданої інформації.

Для здійснення модуляції оптичної несучої інформаційним сигналом можуть застосовуватися амплітудна, частотна і фазова модуляції, а також модуляція за інтенсивністю оптичного випромінювання (МІ), поляризаційна модуляція (ПМ), та інші методи. Однак у переважній більшості практичних реалізацій ОСЗ використовується саме МІ, оскільки це відносно простий у

реалізації та енергоефективний метод. У разі фіксованих просторових координат миттєве значення електричного поля монохроматичного випромінювання світла можна представити у такому вигляді [7, 8]:

$$E(t) = E_M \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.1)$$

де  $E_M$  – амплітуда електричного поля;

$\omega_0$  та  $\varphi_0$  – відповідно частота і фаза оптичної несучої.

Тоді миттєве значення інтенсивності оптичного випромінювання буде визначатись за наступним виразом [7, 8]:

$$P_{mm} = E^2(t) = E_M^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1.2)$$

а здійснення усереднення за періодом  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$  дасть величину  $P = \frac{1}{2} E_M^2$ , яка визначається як середня інтенсивність, або середня потужність оптичного випромінювання. У разі використання МІ-модуляції саме величина  $P$  змінюється в часі відповідно до модулюючого сигналу  $i(t)$ . Незважаючи на хвильову природу, оптичне випромінювання має квантові властивості і характеризується дискретністю процесу випромінювання та поглинання енергії. Тут енергія переноситься у вигляді окремих квантів, які називаються фотонами. Енергія фотонів дорівнює  $hf_0$ , де  $h$  – постійна Планка, а  $f_0$  – частота оптичної несучої. У зв'язку з цим потужність оптичного випромінювання  $P$  може бути описана інтенсивністю потоку фотонів, яка характеризується кількістю фотонів в одиницю часу, і виражається через співвідношення:  $J = \frac{P}{hf_0}$ . Звідси, у разі МІ-модуляції часова залежність інтенсивності фотонного потоку  $J(t)$  є пропорційною модулюючому сигналу, тобто  $J(t) \sim i(t)$  [7, 8].

Застосування модуляції за інтенсивністю обумовлено тим, що даний вид модуляції може бути реалізований в широкому діапазоні частот з використанням порівняно простих технічних засобів для напівпровідникових джерел оптичного випромінювання, що застосовуються в оптичних передавачах, таких як світлодіоди і лазерні діоди. Управління інтенсивністю випромінювання напівпровідникового джерела досягається шляхом зміни струму накачування

(інжекції) відповідно до модулюючого сигналу, що, як правило, забезпечується електронною схемою збудження, яка виконана у вигляді підсилювача струму. Використання МІ також дозволяє істотно спростити реалізацію зворотного перетворення оптичного сигналу в електричний. Фотодетектор, що входить до складу фотоприймального пристрою, є квадратичним елементом, вихідний струм якого пропорційний квадрату амплітуди оптичного поля, тобто потужності оптичного випромінювання, що падає на фоточутливу поверхню [7, 8].

Наведений вище принцип прийому оптичного сигналу відповідає методу здійснення прямого фотодетектування, який відноситься до некогерентного (або енергетичного) прийому. Іншим підходом до здійснення прийому є спосіб, що заснований на фотозміщенні, та який відноситься до когерентного прийому і поділяється на гетеродинний і гомодинний прийом [7, 8].

Гетеродинний прийом має значно вищу складність реалізації у порівнянні з методом прямого детектування, тому що вимагає просторового і часового узгодження хвильового фронту випромінювання гетеродина з хвильовим фронтом прийнятого сигналу. В результаті фотодетектування сумарного оптичного поля утворюється сигнал проміжної частоти, амплітуда, частота і фаза якого однозначно визначаються відповідними параметрами оптичного сигналу, прийом якого здійснюється [7, 8].

Гомодинний прийом має відмінності від гетеродинного у тому, що частоти випромінювань гетеродина і передавача співпадають. Такий метод додатково покращує співвідношення сигнал/шум до 3-ьох дБ. У той же час його практична реалізація є більш складною, що обумовлено необхідністю забезпечення фазового автоналаштування частоти лазерного гетеродина [7, 8].

Проте, як на початку розділу було зазначено, користувачі постійно потребують збільшення пропускної здатності навіть у ОСЗ, тому що постійно з'являються нові сервіси і додатки, які створюють все більше навантаження навіть у оптичних каналах магістральних мереж.

Під цим треба розуміти, що для здійснення ефективного транспортування високошвидкісного трафіку, обсяг якого постійно збільшується, потрібна технологія передачі даних, яка, з одного боку, має достатню продуктивність, а з іншого – надає оператору зв'язку можливості щодо масштабування мережі без внесення змін до її інфраструктури. Цим вимогам відповідає технологія спектрального мультиплексування (WDM), яка на цей час є основною

технологією створення оптичних магістралей нового покоління. Крім того, можливості WDM інтегруватися і конвергуватися з іншими мережними технологіями і протоколами передачі різних видів інформації робить її незамінною в процесі реалізації взаємодії між різними видами і службами зв'язку для надання послуг користувачам.

## 1.2 Загальні особливості і розвиток оптичних систем WDM

WDM являє собою технологію, яка реалізує можливість одночасно здійснювати передачу по кільком інформаційним каналів у одному оптичному волокну, розбиваючи для цього спектральну область, де вона функціонує, на каналні інтервали з різними довжинами хвиль. При цьому каналні інтервали можуть додаватися поступово і мати різну швидкість і формати передачі, що дає можливість операторам мереж ефективно нарощувати ємність мережі і впроваджувати різні типи сервісів і додатків на діючій мережі без додаткового прокладання ОВ. Перед розглядом особливостей, властивостей і загальних принципів побудови ОСЗ на основі технології WDM доцільно ввести термін «вікно прозорості», який використовується для опису робочих хвильових діапазонів сучасних ВОЛЗ. Необхідність розуміння цього терміну зумовлена тим, що коефіцієнт загасання в межах загальної смуги пропускання світловода має істотно нерівномірний характер. У зв'язку з цим його спектральну смугу пропускання поділяють на кілька окремих діапазонів, у межах яких загасання досягає мінімальних значень. За цієї властивості ці діапазони і почали називати вікнами прозорості [8, 9].

На початковому етапі, коли тільки почали розвиватися оптичні технології і системи передачі даних, до вікон прозорості відносили відносно вузькі спектральні області, що відповідали мінімумам кривої поглинання світлового випромінювання в ОВ, а саме [10]:

- спектральна область на довжині хвилі  $\lambda = 850$  нм – перше вікно;
- спектральна область на  $\lambda = 1310$  нм – друге вікно;
- відповідно спектральна область на  $\lambda = 1550$  нм – третє вікно.

Подальший розвиток технологій виготовлення оптичних волокон і вдосконалення їх характеристик, зокрема зменшення рівня загасання та

спектральний зсув так званих водяних піків, обумовлених наявністю гідроксильних груп ОН, у довгохвильову частину спектра, зумовили зробити перегляд і розширити межі вікон прозорості. У результаті цих змін друге вікно прозорості визначається в спектральній області від  $\lambda = 1270$  (1280) нм до  $\lambda = 1325$  нм, а третє вікно охоплює інтервал від  $\lambda = 1528$  нм до  $\lambda = 1565$  нм. Додатково виділили четверте вікно прозорості (1565 - 1620 нм), і п'яте вікно розташоване в межах 1325 - 1450 нм. Відповідно з цими уточненими спектральними областями вікон прозорості волокон ІТУ-Т були розроблені стандарти оптичного зв'язку з урахуванням цих нових спектральних областей в межах 1260 - 1675 нм для одномодового ОВ, як це показано на рисунку 1.2 [10].

Смуга	Назва	Діапазон
O	Основний (Original)	1260 – 1360 нм
E	Розширений (Extended)	1360 – 1460 нм
S	Короткохвильовий (Short wavelength)	1460 – 1530 нм
C	Звичайний або стандартний (Conventional)	1530 – 1570 нм
L	Довгохвильовий (Long wavelength)	1570 – 1625 нм
U	Надовгохвильовий (Ultra-long wavelength)	1625 – 1675 нм

Рисунок 1.2 – Спектральні області «вікон прозорості» для одномодового ОВ

Відповідна залежність загасання оптичного сигналу від  $\lambda$  в стандартному одномодовому волокні (Standard Single Mode Fiber, SSMF) з урахуванням спектральних областей вікон прозорості наведена на рисунку 1.3 [8, 10].

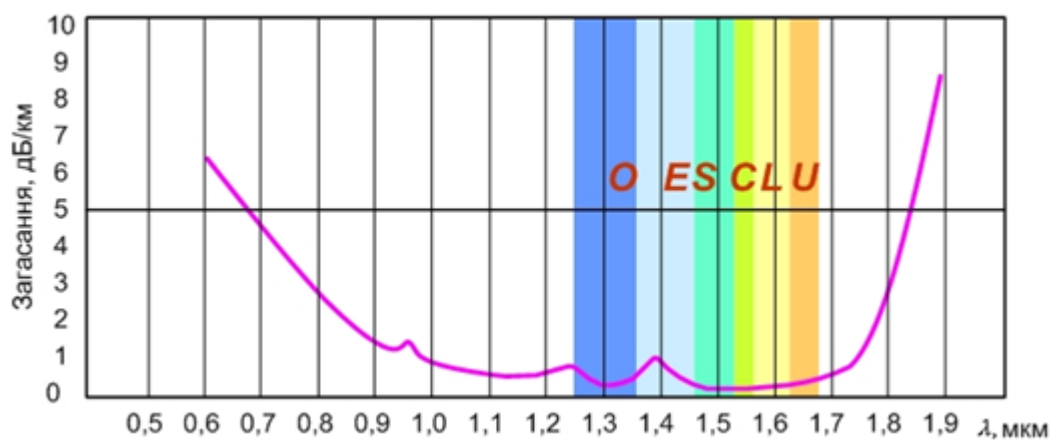


Рисунок 1.3 – Залежність загасання оптичного сигналу від  $\lambda$  в SSMF з урахуванням спектральних областей вікон прозорості

Спочатку стали застосовувати для організації ОСЗ технологію WDM, яка була двоканальною і забезпечувала передачу по SSMF на  $\lambda = 1310$  нм і  $\lambda = 1550$  нм. Такий спосіб використання WDM (рис. 1.4) був досить дешевим і простим, тому що працював на робочих довжинах хвиль 2-го і 3-го вікон прозорості і формував спектральний інтервал більш ніж 200 нм, але разом з тим це стримує подальше зростання пропускної здатності таких ОСЗ [8, 9].

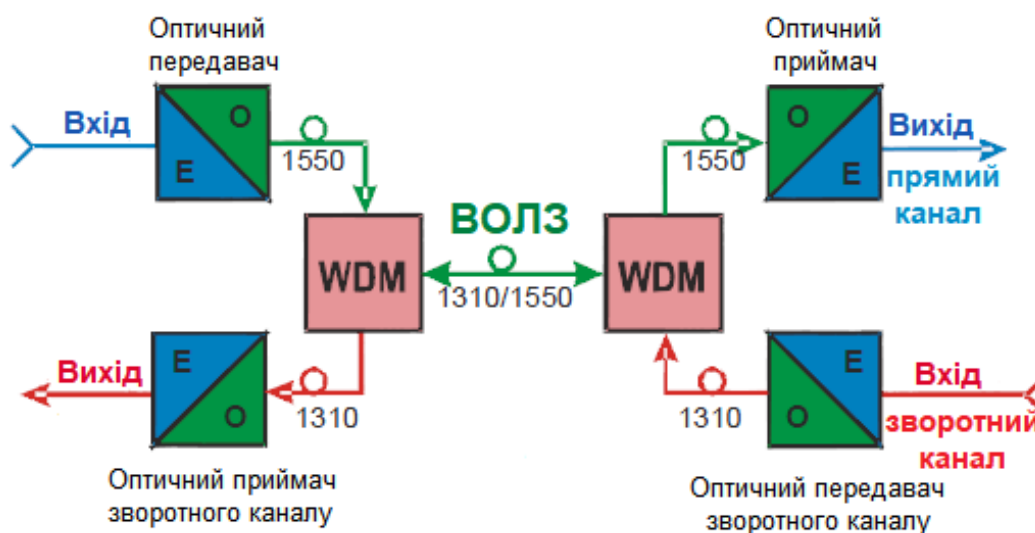


Рисунок 1.4 – Спрощена схема ОСЗ на основі двоканальної WDM-технології

Дещо пізніше з'явилися багатоканальні рішення побудови ОСЗ на основі технології щільного спектрального мультиплексування каналів (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM). Їх поява стала можливою в результаті розробки і створення ербієвих ОП, тобто підсилювачів на волокні, що є легованим рідкоземельними елементами ербію (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), які дозволили реалізувати рівномірне посилення інформаційних каналів на різних  $\lambda$  саме в тій спектральній області SSMF, де загасання оптичного сигналу має найменше значення (як видно з рис. 1.4 – це смуга С-діапазону на довжинах хвиль 1530 - 1565 нм). Цей діапазон є робочим для ОП EDFA, тому є очевидним фактом, що саме його необхідно найбільш ефективно використовувати. В результаті було поставлено завдання вмістити в цей інтервал якомога більше оптичних каналів. Це завдання було вирішене і стандартизоване при сприянні ІТУ-Т в Рек. G.692, в якій був затверджений так званий частотний план, що передбачає формування каналних інтервалів з відстанню між частотами оптичних несучих сусідніх каналів в 100 ГГц. Це в спектральній області 1550 нм відповідає спектральним

інтервалам 0,8 нм. Таким чином, був сформований спектральний діапазон (частотний план) на довжинах хвиль (частотах) 1528,77 нм (196,1 ТГц) - 1560,61 нм (192,1 ТГц), де для здійснення передачі потоків даних використовується 41 хвиля [8].

У процесі подальшого покращення продуктивності технології DWDM виробники обладнання запропонували рішення для формування та виділення оптичних несучих частот з інтервалом 50 ГГц ( $\Delta\lambda = 0,4$  нм), що давало можливість використовувати 81 хвильовий канал в одному спектральному діапазоні. Однак, для менш вимогливих додатків, стало можливим збільшити відстань між каналами до 200 і навіть до 400 ГГц. В результаті, остаточна версія стандарту ITU-T G.692 передбачає можливість розміщення каналів з кроком 50, 100, 200 і 400 ГГц (що відповідає  $\Delta\lambda$ : 0,4, 0,8, 1,6 і 3,2 нм). У даний час ITU-T пропонує також використовувати більш щільні варіанти DWDM з кроком між частотами несучих сусідніх каналів в 25 і 12,5 ГГц ( $\Delta\lambda = 0,2$  і  $\Delta\lambda = 0,1$  нм), проте такі ОСЗ найближчим часом навряд чи будуть затребувані через високу вартість як безпосередньо самого обладнання (особливо це стосується пристроїв введення оптичного випромінювання у волокно), так і технологічних умов організації систем [8].

Технологія DWDM є базовою фізичною платформою для побудови масштабованих високошвидкісних мультисервісних мереж, забезпечуючи гнучку передачу різноманітного трафіку великих обсягів, в тому числі і трафіку, чутливого до затримок, на великі відстані. Ця технологія підтримує швидкості передачі групових потоків від 150 Мбіт/с до 1500 Гбіт/с на одній робочій довжині хвилі робочої спектральної області [9].

Однак останнім часом спостерігається активний розвиток міських і абонентських мереж, де технології на основі принципів WDM також знаходять застосування. Оскільки в таких мережах немає необхідності передавати великі обсяги даних на далекі відстані, то можливості, що надаються DWDM-системами, стають досить витратними щодо здійснення їх підтримки. Тому знову з'явився інтерес до розвитку WDM-систем, які мають менш щільне розташування оптичних каналів. Такі системи отримали назву CWDM (Coarse WDM) або систем, що реалізують грубе спектральне мультиплексування каналів.

ОСЗ на основі CWDM здійснюють передачу даних в широкому хвильовому діапазоні від  $\lambda = 1260$  до  $\lambda = 1625$  нм, в якому формується до 18 оптичних

каналних інтервалів з кроком 20 нм між ними. Такі оптичні системи не передбачають наявності в лінії ОП, оскільки більшість каналів не входить в їх робочий діапазон довжин хвиль, а значить, максимальна довжина регенераційної ділянки обмежується параметрами трансиверів і фізичними властивостями ОВ, що використовується. Однак завдяки більшій міжканальній відстані знижуються вимоги до конструкції приймально-передавальних модулів (трансиверів) і пасивних оптичних компонентів ОСЗ, зокрема мультиплексорів. Як наслідок, вартість оптичної системи CWDM буде значно меншою у порівнянні з DWDM [9].

Таким чином, застосування технології CWDM обґрунтовано там, де потрібно застосувати недороге рішення з відносно невеликою відстанню між вузлами (до 50 км). У таких системах необхідна пропускна здатність не буде перевищувати 10 Гбіт/с на один оптичний канал, а масштабування ОСЗ в аспекті істотного збільшення числа несучих не передбачається [9].

### 1.3 Базова структура ОСЗ із спектральним мультиплексуванням каналів

Як вже зазначалося, технологія WDM дозволяє паралельно здійснювати передачу по одному ОВ світлових сигналів на різних  $\lambda$ , не допускаючи їх взаємного спотворення. Кожна така  $\lambda$  функціонує як незалежний оптичний канал. Обладнання WDM обробляє всі ці канали однаково чином на всій довжині тракту передачі. Слід підкреслити, що саме обладнання WDM не опікується деталями організації передачі даних на кожній окремій хвилі, зокрема такими як, наприклад, кодування чи протоколи. Його основне завдання полягає в тому, щоб об'єднати різні  $\lambda$  в єдиний світловий потік, а потім розділити їх на стороні прийому, виокремлюючи інформацію з кожного оптичного каналу. Базова функціональна схема ОСЗ такого типу представлена на рисунку 1.5 [8, 9].

На стороні передачі є  $n$  однотипних або різнотипних систем передачі, в якості яких виступає відповідне кінцеве лінійне термінальне обладнання (Line Terminating Equipment, LTE) мереж доступу, таких як: SDH, 10 Gigabit Ethernet або іншої системи WDM. Від них оптичні сигнали подаються на  $n$  оптичних передавачів (транспондерів), які працюють на довжині хвилі одного з каналних інтервалів системи WDM, зокрема:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$  [9].

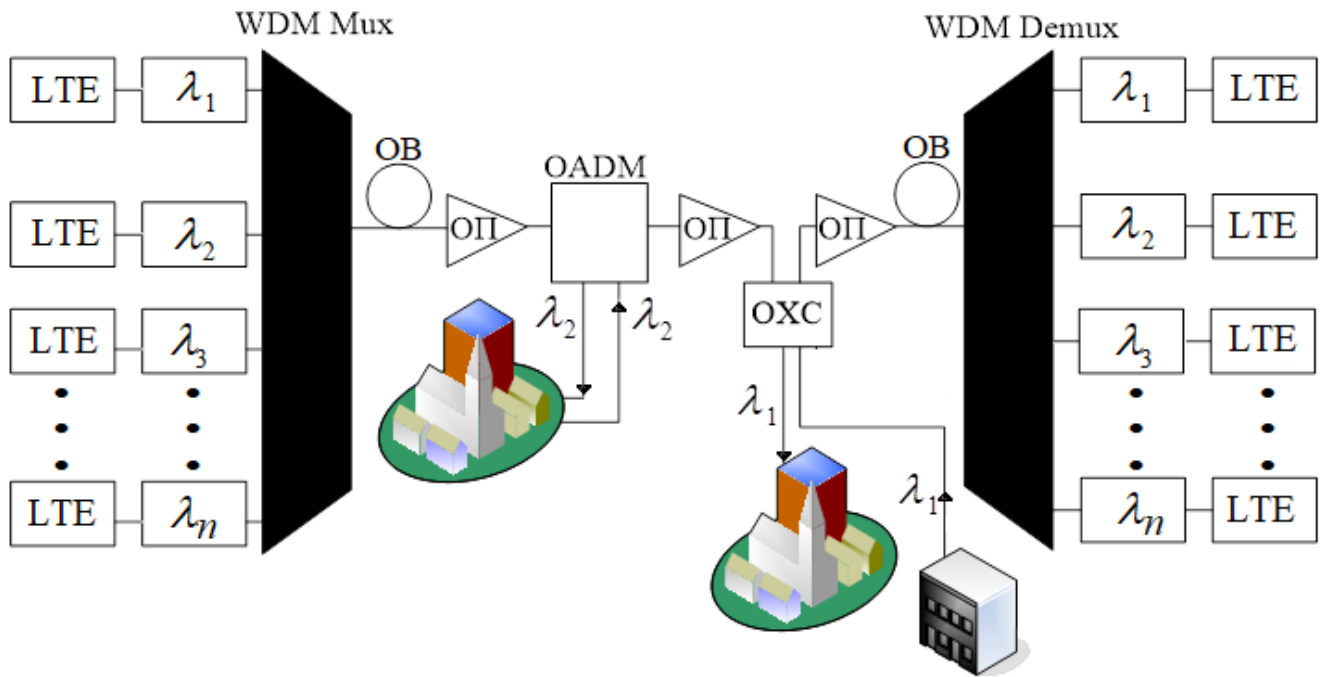


Рисунок 1.5 – Типова функціональна схема системи WDM

Сигнали на різних  $\lambda$ , що надходять від транспондерів на мультиплексор WDM (WDM Mux) об'єднуються ним в багатоканальний груповий потік, який далі передається по ОБ. На приймальному боці демультимплексор WDM (WDM Demux) розділяє груповий потік на оптичні сигнали з фіксованими довжинами хвиль, які подаються на транспондери і потім на входи відповідного обладнання LTE [9].

При побудові протяжних ОСЗ з використанням технологій WDM для посилення групового потоку застосовуються ОП. Це необхідно, оскільки при мультиплексуванні в WDM Mux в кожному каналному інтервалі вносяться значні втрати, які призводять до втрати потужності оптичного сигналу. Ці втрати значно знижують загальний енергетичний запас системи, роблячи передачу сигналу менш надійною і якісною. Як уже згадувалося, в системах дальнього зв'язку, що базуються на технології DWDM, найбільш поширеними є ОП EDFA. Варто зауважити, що стандартні EDFA в межах свого робочого діапазону (ширина якого становить близько 40 нм) здатні забезпечити підсилення слабких сигналів в межах 25-40 дБ [9].

На рисунку 1.6 представлена схема найпростішого однокаскадного ОП. Для його роботи використовується оптична накачка, яка може здійснюватися як в напрямку поширення сигналу (тобто попутно), так і проти нього (назустріч). Джерелом здійснення накачки служать один або декілька лазерів, що

випромінюють на довжинах  $\lambda = 980$  нм або  $\lambda = 1480$  нм. Процес підсилення оптичного сигналу відбувається наступним чином: іони ербію в активному волокні поглинають енергію накачки, здійснюючи перехід в збуджений стан. Коли збуджений іон ербію взаємодіє з сигнальним випромінюванням на  $\lambda = 1550$  нм, він повертається в основний стан. Цей перехід супроводжується випромінюванням фотона з  $\lambda = 1550$  нм, що і призводить до підсилення сигналу [9].

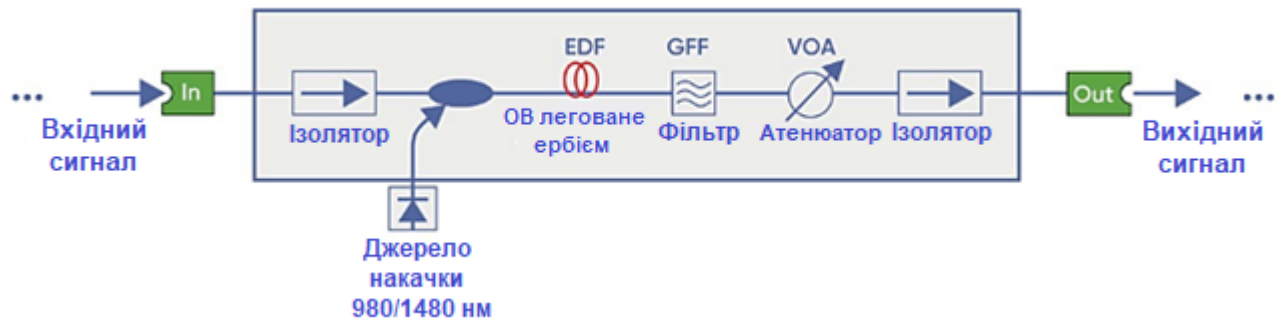


Рисунок 1.6 – Спрощена структура однокаскадного ОП EDFA

Звернемо увагу, що ефективність однокаскадних підсилювачів у сучасних DWDM системах є обмеженою. Тому зазвичай використовують багатокаскадні рішення, які забезпечують необхідний коефіцієнт підсилення шляхом регулювання вбудованого атенюатора у VGA-компонентах (Variable Gain Amplifier). Для корекції спектрального профілю групового сигналу використовуються згладжувальні оптичні фільтри (Gain Flattening Filter, GFF) [9].

Крім ОП EDFA в системах спектрального мультиплексування можуть бути задіяні також підсилювачі, функціонування яких базується на ефекті Раманівського розсіювання. Такі підсилювачі можуть бути як зосередженими, так і розподіленими. Зосереджені ОП показують експлуатаційні характеристики, що є співставними з ОП EDFA, а використання розподілених ОП пов'язане з підвищеними вимогами до безпеки. Це зумовлено високою потужністю лазерів накачки і необхідністю забезпечення високої якості оптичної лінії. Раманівські ОП є оптимальним вибором для дуже протяжних ділянок зв'язку (понад 150 км), де створення великої кількості проміжних пунктів підсилення є досить складним. В традиційній класифікації за функціональним призначенням виділялися такі категорії ОП [9]:

- ОП потужності (бустери), які встановлюються відразу після WDM Mux;

- лінійні ОП, які розташовуються в проміжних вузлах оптичної лінії, що має велику протяжність;
- попередні ОП на вході WDM Demux для досягнення оптимального рівня оптичного сигналу на вході транспондерів.

У складних ОСЗ, що містять багато різних вузлів, необхідно застосовувати різні оптичні методи для того, щоб об'єднати кілька каналів в одному волокні, а потім виділити їх у необхідних точках мережі. Так на проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені з групового сигналу за допомогою мультиплексорів вводу/виводу (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) або пристроїв крос-комутації (Optical Cross-Connect, OXC) тоді як інші канали проходять через вузол без перетворень. Крім того, у разі використання пристроїв OXC можна перенаправляти канали за новими напрямками [9, 11].

Однак при організації ОСЗ на основі мультиплексування WDM слід забезпечити врахування того факту, щоб всі розглянуті вище її вузли і компоненти обробляли всі оптичні канали однаково на всій протяжності лінії зв'язку. Це вимагає здійснення ретельного вибору обладнання, в ході якого слід брати до уваги не тільки його паспортні дані, але й враховувати специфіку виробничого процесу та фізичні принципи, що лежать в основі обробки оптичних інформаційних потоків [9].

Для отримання цілісної характеристики про систему WDM потрібно звертати увагу на велику кількість різних параметрів і характеристик, серед яких важливе місце займають нелінійні спотворення. Їх складність полягає в тому, що вони практично не виявляються звичайними методами тестування ОВ, такими як, наприклад, рефлектометрія. Проте їх вплив стає дуже істотним після того, як ОСЗ вводиться в експлуатацію. Тому важливо забезпечити контроль за нелінійними ефектами, як під час запуску обладнання, так і проводити його періодично в процесі експлуатації всієї оптичної системи [5, 6].

Далі проведемо аналіз основних видів спотворень, що впливають на функціонування таких систем, і детально розберемо причини виникнення нелінійності.

## 2 КЛАСИФІКАЦІЯ СПОТВОРЕНЬ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ, ТА ЇХ ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА

На канали передачі оптичних систем зв'язку, подібно до каналів електричних систем, впливає велика кількість різноманітних спотворень, що не найкращим чином відбивається на якості та достовірності інформації, що передається цими каналами. Значна частина втрат, що викликані цими спотвореннями, припадає на пасивні компоненти волоконно-оптичної інфраструктури, такі як: волоконно-оптичні кабелі, роз'ємні та нероз'ємні (зварні) з'єднання, оптичні розгалужувачі, пасивне мультиплекуюче обладнання та інші компоненти. У загальному випадку такі спотворення у каналах оптичних систем зв'язку класифікуються двома великими групами: лінійними та нелінійними.

Лінійні спотворення обумовлені фізичними властивостями ОВ, такими як загасання та дисперсія, а також характеристиками обладнання, зокрема оптичних передавачів і приймачів. Нелінійні спотворення, у свою чергу, виникають внаслідок інтенсивнісно-залежних оптичних ефектів, які проявляються у разі здійснення передачі оптичних сигналів високої потужності або великої спектральної щільності. Таким чином обидві зазначені групи спотворень можуть виникати як у активному обладнанні, так і в пасивних елементах системи, зокрема у ОВ, що потребує детального аналізу і моделювання, особливо в сучасних системах WDM для підвищення ефективності їх високошвидкісних каналів. Підхід до класифікації спотворень, що виникають в оптичних системах зв'язку, наведений на рис. 2.1 [6, 12].

### 2.1 Лінійні спотворення

У цій кваліфікаційній роботі не передбачене проведення ґрунтовного аналізу лінійних спотворень, тому тут зупинимося лише на їх основних причинах виникнення і особливостях впливу на оптичний інформаційний сигнал. Зокрема рисунок 2.1 демонструє, що до лінійних спотворень, які виникають в активному обладнанні, належать нерівномірність амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), нелінійність групового часу затримки (ГЧЗ) та внутрішній джитер.



- «прикордонний» джитер, що виникає на границі аналогової і цифрової частини схеми;

- «внутрішній» джитер, що виникає та діє в чисто цифровій схемі на будь-яких її ділянках.

Стосовно цифрових оптичних систем, то тут має місце «внутрішній» джитер. Зазвичай він виникає і діє в цифрових оптичних приймачах у блоці прийняття рішення (дискримінаторі) або при здійсненні налаштуванні таймерів ОПР регенераторів, які задають частоту для забезпечення подальшої передачі на основі синхроімпульсів, що були прийняті. Також «внутрішній» джитер може з'явитися в ланцюгах формування, обробки та передачі цифрових сигналів, завдяки чому може переноситися по всій системі, і навіть виходити за її межі та поширюватися між системами через відповідні цифрові інтерфейси передачі [14].

До лінійних спотворень, що виникають у світловодах оптичних систем, відносяться різного роду дисперсійні впливи, які загалом призводять до розширення світлових імпульсів, що утворюють інформаційні потоки. У разі значного розширення імпульсів, вони починають перекриватися і у якийсь момент часу їх стає неможливо виділити при прийомі, а інформація, що в них переноситься, втрачається. Тобто дисперсія, як фізичний процес, являє собою розсіювання у часі спектральних і модових компонентів оптичного сигналу та проявляється у збільшенні тривалості імпульсу оптичного випромінювання під час розповсюдження його по світловоду. Дисперсія визначається в розрахунку на 1 км і має розмірність [пс/км]. Серед факторів її виникнення основними є: відмінність швидкостей, з якими розповсюджуються у волокні різні оптичні промені, направляючі властивості світловода та фізичні параметри матеріалу, з якого він виготовлений. З цього випливає, що до причин виникнення дисперсії, з одного боку, можна віднести велику кількість мод у світловоді (міжмодова дисперсія, МД), а з іншого боку – нестабільність джерел випромінювання у своєму робочому спектрі випромінювання  $\Delta\lambda$  (хроматична дисперсія, ХД) [15, 16].

МД (на рисунку 2.1 не показана) відчутно впливає на розповсюдження оптичних сигналів у багатомодових ОВ (Multi Mode Fiber, MMF) за рахунок виникнення різниці групових швидкостей для різних типів хвиль (мод), що розповсюджувалися по світловоду. Її вплив у таких ОВ проявлявся у тому, що під час здійснення відправки одного імпульсу на приймальному кінці відбувається

накладання багатьох імпульсів, тому що оптичні промені затримуються на різний час. Вплив МД був ліквідований шляхом переходу з волокна MMF на SMF [16].

Але навіть у разі розповсюдження навіть тільки однієї хвилі по світловоду, з часом все рівно буде фіксуватися невелике збільшення тривалості імпульсів оптичного сигналу, що є наслідком впливу ХД. Вплив ХД є комплексним, тому що утворюється її складовими на основі матеріальної та хвилеводної (внутрішньомодової) дисперсій. Також треба зазначити, що ХД буде існувати як в SMF, так і в MMF.

Матеріальна дисперсія описується залежністю показника заломлення серцевини світловода від робочої  $\lambda$ . Ця залежність визначається типом матеріалу серцевини ОВ, а також наявністю у ньому різних домішок та їх складом. Цю складову хроматичної дисперсії можна описати наступним виразом [16]:

$$\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \cdot L \cdot M(\lambda), \quad (2.1)$$

де  $\Delta\lambda$  – ширина спектра випромінювання, нм;

$M(\lambda)$  – коефіцієнт питомої матеріальної дисперсії, пс/нм·км;

$L$  – довжина кабелю, км;

$n_1$  – показник заломлення серцевини оптичного світловода;

$\lambda$  – робоча довжина хвилі світловода, мкм або нм;

$c$  – швидкість розповсюдження світла, м/с;

$d$  – діаметр серцевини оптичного світловода, мкм.

Хвилеводна дисперсія визначає залежність затримки оптичного імпульсу від робочої  $\lambda$ , що пов'язана із зміною швидкості його розповсюдження у світловоді через профіль показника заломлення (тобто через хвилеводний характер поширення). Ця складова хроматичної дисперсії є пропорційною до ширини спектра випромінювання джерела  $\Delta\lambda$  і її можна описати наступним виразом [16]:

$$\tau_{\text{w}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda), \quad (2.2)$$

де  $N(\lambda)$  – коефіцієнт питомої хвилеводної дисперсії, пс/нм·км;

$\Delta$  – відносна різниця показників заломлення серцевини та оболонки,

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2};$$

$n_2$  – показник заломлення оболонки оптичного світловода.

У загальному випадку, коефіцієнт питомої дисперсії показує збільшення тривалості оптичного імпульсу (у пікосекундах, пс), спектральна ширина якого дорівнює 1 нм, після проходження відрізка світловода довжиною в 1 км.

Залежності коефіцієнтів питомої  $M(\lambda)$ ,  $N(\lambda)$  і питомої сумарної хроматичної дисперсії ( $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$ ) від довжини хвилі для стандартного кварцового одномодового світловода представлені на рис. 2.2 [15, 16].

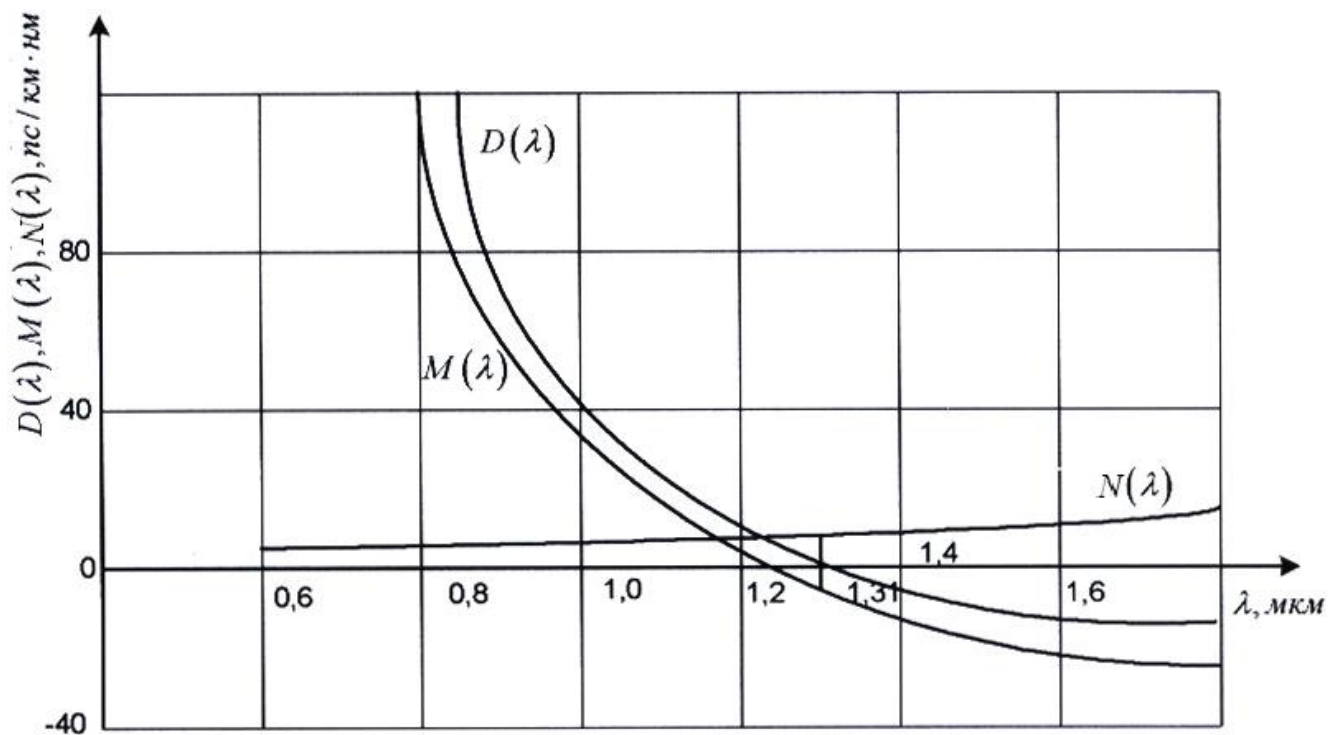


Рисунок 2.2 – Питомі значення хроматичної дисперсії та її складових при різних  $\lambda$

Із залежності питомої сумарної ХД та її визначення (рис. 2.2) витікає, що на певних  $\lambda$  виникає ефект взаємної компенсації обох складових ХД. Для кварцу, як основного матеріалу виготовлення ОВ, цей ефект виникає на робочій  $\lambda$  другого вікна прозорості (тобто  $\lambda = 1,31$  мкм для SSMF зі східчастим профілем показника заломлення). Тобто на цій довжині хвилі відбувається взаємна компенсація питомих коефіцієнтів  $M(\lambda)$  і  $N(\lambda)$ , а результуючий питомий коефіцієнт  $D(\lambda)$

хроматичної дисперсії обертається в нуль. Звідси ця довжина хвилі отримала назву довжини хвилі нульової дисперсії і позначається у джерелах як  $\lambda_0$  [15, 16].

Також із залежностей, що наведені на рис. 2.2 можна бачити, що в діапазоні значень  $\lambda$ , що лежать вище за 1,31 мкм, коефіцієнт питомої матеріальної дисперсії негативний, тобто хвилі відстають і прибувають пізніше. В діапазоні значень  $\lambda$ , що лежать нижче за 1,31 мкм,  $M(\lambda)$  є позитивним, тобто хвилі випереджають і прибувають раніше. Коефіцієнт питомої хвилеводної дисперсії завжди є більшим нуля [15, 16].

Таким чином, із визначення ХД та її складових, а також виразів (2.1) та (2.2) і графічних залежностей, наведених на рис. 2.2 можна бачити, що у разі бажання зменшити ХД, треба використовувати когерентні джерела випромінювання, наприклад такі, що мають  $\Delta\lambda \cong 2$  нм, а також здійснювати передачу оптичних сигналів на робочих довжинах хвиль, що є близькими до  $\lambda_0$  [16].

Також треба звернути увагу, що в оптичних лініях, в яких швидкість передачі інформації є більшою за 2,4 Гбіт/с потрібно також враховувати поляризаційну модову дисперсію (ПМД) (див. рис. 2.1). Своїм виникненням ПМД має завдячувати тому, що в одномодовому світловоді, окрім основної моди, можуть поширюватися дві її поляризаційні складові, які одна до одної орієнтовані перпендикулярно. В реальних умовах геометрія ОВ, що виготовляються і експлуатуються, є з відхиленнями від ідеальної кругової симетрії. Це зумовлює різницю у фазових та групових швидкостях поширення цих поляризаційних компонент основної моди, що і призводить до виникнення ПМД. Таким чином, основним чинником виникнення ПМД є відхилення профілю серцевини світловода від циліндричної симетрії, яке може виникати як під час технологічного процесу виготовлення, так і внаслідок механічних або термічних впливів, що є супутніми процесу експлуатації волокна. Щоб досягти малих значень ПМД треба дотримуватися умов жорсткого контролю за параметрами волокна під час його виробництва [16].

## 2.2 Нелінійні спотворення

Аналогічним чином розглянемо види і причини виникнення нелінійних спотворень в оптичних системах зв'язку. Із рис. 2.1 можна бачити, що до

нелінійних спотворень, так же само, як і до лінійних, які були розглянуті вище, відносяться спотворення в активному обладнанні і в світловодах. Відповідно до технічного завдання, що було поставлене для виконання кваліфікаційної роботи, виникнення і впливи нелінійних спотворень, що виникають в активному обладнанні, не входить у задачі цього аналізу, тому на них зупинимось дуже стисло.

До спотворень другого порядку відносяться так звані композитні (інтермодуляційні) спотворення (Composite Second Order, CSO), які являють собою відношення (в децибелах, dB) середнього рівня сукупності паразитних сигнальних компонентів другого порядку, які розташовані у спектральній області навколо несучої, до рівня самої несучої. Аналогічно, композитні спотворення третього порядку (Composite Triple Beat, CTB) визначаються як відношення середнього рівня групи паразитних сигналів третього порядку, які розташовані у спектральній області навколо несучої відеосигналу до рівня самої несучої. Ці типи спотворень, як і відношення несуча/шум (Carrier-to-Noise Ratio, C/N), є ключовими характеристиками оптичних систем зв'язку. Значення цих характеристик за вітчизняним ДСТУ 52023-2003 встановлюються на рівні:  $C/N \geq 43$  dB,  $CSO \geq 54$  dB,  $CTB \geq 54$  dB. Для порівняння у європейському стандарті CENELEC EN 52083 ці характеристики регламентуються наступним чином: ( $C/N \geq 44$  dB,  $CSO \geq 57$  dB,  $CTB \geq 57$  dB) [17].

Зазначені параметри відображають режим роботи активних компонентів оптичної системи і знаходяться один до одного в оберненій залежності від рівня корисного сигналу: будь яке збільшення потужності інформаційного сигналу, з одного боку, покращує C/N, але одночасно погіршує параметри CSO і CTB, на значення яких впливає функціонування практично всіх оптичних пристроїв тракту – передавача, підсилювачів і приймача. Наприклад, у передавачі основним джерелом спотворень є робота оптичного модулятора, який найчастіше реалізується на лазерах з розподіленим зворотним зв'язком (Distributed Feedback Laser, DFB) [17].

Зазначені спотворення відносяться до категорії системних, тому що у більшості випадків значення CSO і CTB наводяться виробником не для окремих типів активного обладнання, а для всієї оптичної системи, що пов'язано зі спрощенням метрологічних процедур. Однак деякі виробники вказують нормативні значення цих спотворень і для окремо взятого обладнання (наприклад,

на передавач або приймач). Тому при здійсненні вибору оптичних пристроїв важливо уточнювати умови і режими експлуатації, з урахуванням яких були визначені характеристики, що зазначаються виробником [17].

Шуми в оптичній системі також у значній мірі обумовлені активним обладнанням. Зокрема шуми оптичного передавача формуються лазером в результаті спонтанної емісії фотонів, яка призводить до некогерентності оптичного випромінювання. Їх кількісною характеристикою є відносна інтенсивність шуму (Relative Intensity Noise, RIN), яка за фізичним змістом являє собою потужність шумів, що вимірюється в смузі 1 Гц, по відношенню до потужності квазікогерентного потоку світла, що випромінюється [18]. Значення цього параметру виражається як відношення середньоквадратичної величини флуктуацій оптичної потужності джерела світла до середньоквадратичної вихідної оптичної потужності. Оцінку даного параметру можна зробити на основі результатів вимірювання  $C/N$  для оптичної системи зв'язку, що досліджується [19].

Аналогічно до виникнення шумів у оптичному передавачеві, шуми ОП також спричиняються завдяки спонтанній емісії фотонів, яка в технічній літературі описується терміном «спонтанна емісія підсилювача» (ASE). Так у [18], при аналізі відношення  $C/N$  для ОП показано, що єдиним параметром, що є доступним для регулювання необхідного рівня  $C/N$ , є рівень вхідної оптичної потужності, збільшення якої призводить до поліпшення значення  $C/N$ . Однак, як і у випадку оптичного передавача, зростання вхідної потужності викликає збільшення композитних спотворень, але треба зазначити, що їх величина буде значно нижчою у порівнянні із спотвореннями, що виникають у передавачах і приймачах.

Шуми оптичного приймача багато в чому визначаються його чутливістю ( $S$ ). Як показано в [18], більш високе значення чутливості забезпечує поліпшення відношення  $C/N$ : або досягається заданий рівень  $C/N$  у разі меншої вхідної оптичної потужності, або забезпечується більш високе значення  $C/N$  у разі тієї ж величини вхідної оптичної потужності.

Відповідно до супровідного технічного завдання до цієї кваліфікаційної магістерської роботи необхідно здійснити аналіз впливу нелінійних ефектів, які виникають у оптичних лініях, на параметри передачі сучасних ОСЗ, що організовані на основі технологій WDM. Такого типу ефекти становлять один із ключових чинників, що обмежують пропускну здатність окремого ОБ, а також протяжність оптичних ліній не тільки систем WDM, але й загалом будь яких ОСЗ.

Тобто іншими словами можна сказати, що вплив цих ефектів є головним обмежуючим фактором на кількість інформації, що може бути передана по окремому світловоду оптичної системи зв'язку за певну одиницю часу. Тому у разі здійснення планування і проектування таких ОСЗ ці обмеження мають обов'язково бути враховані, а також мають бути розроблені вимоги та рекомендації щодо зменшення впливів нелінійних спотворень на якість інформації, що передається.

Підвищену увагу до проблем виникнення і контролю нелінійності в ОСЗ стали приділяти у зв'язку із збільшенням інформаційного трафіку, що передається по оптичним лініям, їх протяжності, кількості довжин хвиль, які використовуються в одному волокні для формування групових потоків, а також рівнів оптичної потужності. І знов таки треба звернути увагу, що особливо критичними впливи нелінійних ефектів стали у ОСЗ, що забезпечують передачі інформаційних потоків на основі технологій спектрального мультиплексування (WDM/CWDM/DWDM), у яких високі швидкості, а отже і збільшення пропускної здатності, досягаються за рахунок одночасної передачі потоків кількох незалежних оптичних каналів на різних  $\lambda$ .

Зокрема лабораторні дослідження реальних можливостей сучасних DWDM-систем демонструють швидкості передачі потоків на рівні 16 - 20 Тбіт/с. Але ще на початку 2000-х років дослідники Partha P. Mitra та Jason H. Stark (компанія Lucent Technologies Bell Laboratories) запропонували спрощену теоретичну модель передачі оптичних сигналів із близькими частотами в одномодовому стандартному волокні. На основі цієї моделі було показано, що максимально можлива швидкість передачі інформаційних потоків в одному світловоді, з урахуванням всіх технологічних можливостей, може бути близькою до 100 Тбіт/с. Основною причиною такої розбіжності між теоретичними та практичними показниками є саме наявність нелінійних ефектів у світловодах. На думку багатьох фахівців, навіть із появою нових типів волокон, що будуть менш чутливими до нелінійних спотворень, економічно обґрунтованою практичною межею залишається швидкість близько 10 Тбіт/с, а подальше нарощування пропускної здатності ОСЗ доцільніше здійснювати за рахунок збільшення кількості ОВ у волоконно-оптичних кабелях (ВОК) [20, 21].

Як показано на рис. 1.1, до причин виникнення нелінійних ефектів у ОВ відносять два основні механізми, що ґрунтуються на змінах показника заломлення (рефракційного індексу,  $n$ ) та процесах розсіювання у волокні.

До нелінійних ефектів, які пов'язані із розсіюванням, належать (див. рис. 1.1) стимульоване Бріллюенівське розсіювання (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) та стимульоване Раманівське розсіювання (Stimulated Raman Scattering, SRS). Ці нелінійні ефекти спричиняють часткове розсіювання енергії оптичного сигналу в бік довших хвиль. Зокрема в оптичних системах WDM спотворення, що спричинені впливом SBS і SRS, можуть призводити до виникнення перехресних завад між спектральними каналами та до нерівномірного розподілу оптичної потужності в частотному діапазоні: сигнали у спектральних каналах на одному краю спектра підсилюються надмірно, тоді як на іншому – можуть зазнавати істотного ослаблення [21, 22].

До нелінійних ефектів, що зумовлені залежністю  $n$  від оптичної потужності, належать вже згадувані у вступі FWM, SPM, CPM, а також до цього переліку ще можна додати інтермодуляцію та модуляційну нестабільність (Modulation Instability, MI) [6, 18].

Треба зазначити, що найбільше впливають на параметри передачі нелінійні спотворення, що пов'язані із зміною показника заломлення ( $n$ ) матеріалу світловода в залежності від оптичної потужності ( $P_0$ ) сигналу, що передається:

$$n = n_0 + n_n \cdot P_0 / A_{ef} \quad (2.3)$$

де  $n_0$  – показник заломлення серцевини світловода у разі низьких рівнів  $P_0$ , для кварцового скла він буде  $n_0 > 1,47$ ;

$n_n$  – коефіцієнт нелінійності показника заломлення,  $\text{м}^2/\text{Вт}$ . Його значення може бути в діапазоні  $2,2 \dots 3,6 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$  (так для кварцового скла  $n_n = 2,35 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$ );

$A_{ef}$  – ефективна площа серцевини світловода,  $\text{мкм}^2$ .

Поперечний розподіл інтенсивності оптичного випромінювання в SMF характеризується формою, що є близькою до гаусівської кривої. Внаслідок цього ефективний діаметр модової плями буде меншим за геометричний діаметр. Так, наприклад, для SSMF з діаметром серцевини  $d = 9,1 \text{ мкм}$  діаметр модової плями

становить від 30 до 80 мкм<sup>2</sup>, причому його значення знаходиться у прямій залежності від легуючих домішок [24].

Дивлячись на рівняння (2.3) можна бачити, що зменшення впливу нелінійності показника заломлення можливе за умови використання світловодів із максимально ефективною площею поперечного перерізу та їх функціонування при мінімальних значеннях оптичної потужності. В реальних оптичних системах рівні оптичної потужності часто диктуються системними вимогами та розрахунками, тоді як параметр  $A_{ef}$  виробники оптичних волокон постійно намагаються збільшити щоб наблизитися його до теоретично можливих значень [24].

На рис. 2.3 наведено залежність показника заломлення кварцу, як основного матеріалу виготовлення оптичних волокон, від величини оптичної потужності [24].

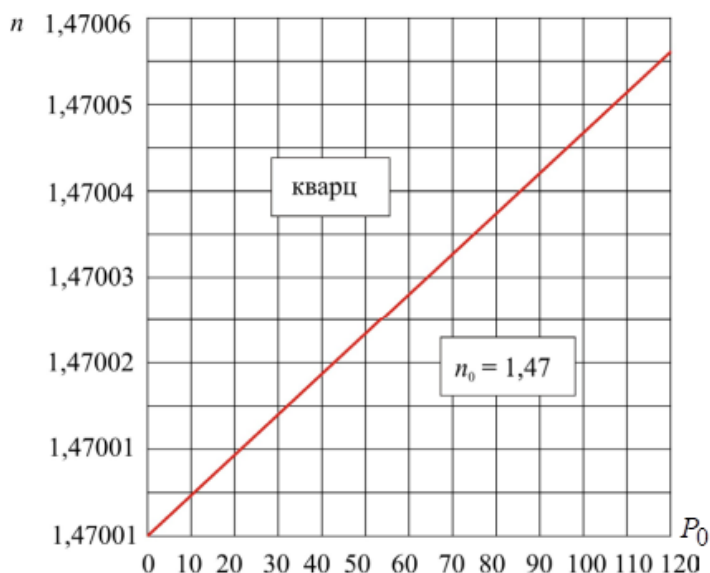


Рисунок 2.3 – Залежність показника заломлення від оптичної потужності у кварцовому волокні

Таким чином, із рівняння (2.3) та графічної залежності на рис. 2.3 можна бачити практично лінійний зв'язок між показником заломлення та оптичною потужністю випромінювання. Тобто зміна величини  $n$  є незначною, але навіть наявність такої зміни буде здійснювати істотний вплив на якість передачі високошвидкісних інформаційних потоків по оптичним лініям протяжних ОСЗ.

В наступному розділі більш глибоко будемо аналізувати нелінійні ефекти, пов'язані з розсіюванням і зміною  $n$ , у світловодах.

### 3 АНАЛІЗ ВПЛИВІВ ЕФЕКТІВ НЕЛІНІЙНОСТІ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ РОЗСІЯННЯМ, НА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАЧІ В ОСЗ

#### 3.1 Ефект стимульованого Бріллюенівського розсіювання (SBS) в ОСЗ

Ефект SBS встановлює верхню межу для оптичної потужності, що передається по ОБ. Коли оптична потужність перевищує певний поріг (так званий поріг SBS), світловий потік викликає генерацію акустичної (гіперзвукової) хвилі у волокні. Вона змінює величину показника заломлення  $n$ , що призводить до розсіювання світла та додаткового формування подібних акустичних хвиль. В результаті цього ефекту формується зворотна хвиля Стокса, яка розповсюджується до джерела світла (рис. 3.1). Це призводить до зменшення корисної потужності оптичного сигналу, що передається (рис. 3.2) [21, 23].

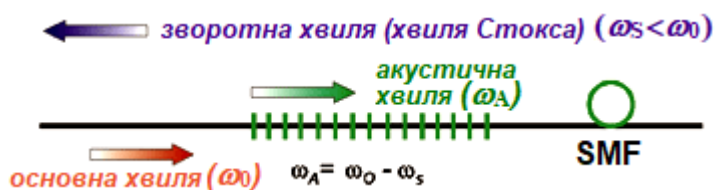


Рисунок 3.1 – Виникнення хвилі Стокса

Цей ефект накладає обмеження на граничну потужність, що може бути досягнена і передана передавальним пристроєм в лінію. Звернемо увагу, що при малих значеннях оптичних потужностей (тобто що реєструються до порогу SBS, див. рисунок 3.2) відбита світлова хвиля буде збільшуватися прямо пропорційно відповідно до рівня оптичної потужності, що первісно подається, тобто відповідає законам розсіювання Бріллюена і Релея. Згідно закону розсіювання Бріллюена-Мандельштама вони будуть відрізнятися на певну величину, яка в основному є залежною від ефективної площі серцевини ОБ ( $A_{ef}$ ) для відповідного його матеріалу і тільки лише після моменту перевищення порогу SBS настає лавинний процес поступового збільшення потужності відбитої хвилі. Стандартна величина порогу SBS для оптичної лінії, що має протяжність в 10 км становить десь 6...10 дБм. Вище цього рівня буде спостерігатися значне зростання втрат в світловоді, які безпосередньо залежать від рівня оптичної потужності, що підводиться [21, 23].

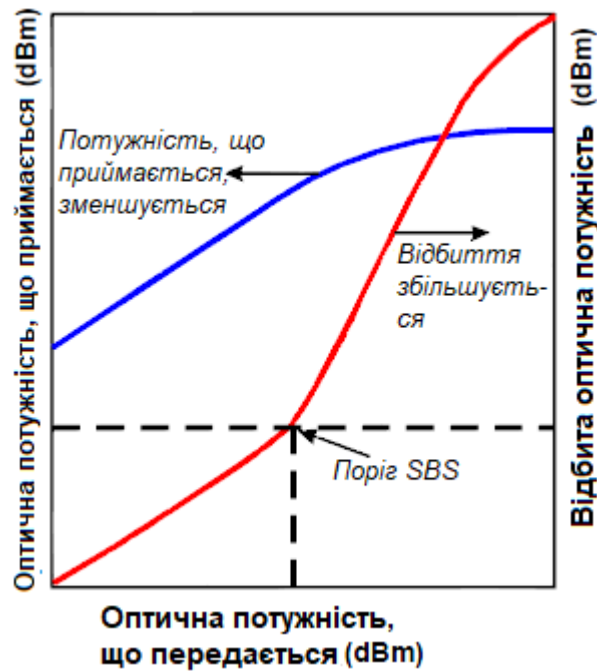


Рисунок 3.2 – Залежність потужностей відбитої та прийнятої хвилі від потужності, що передається

Окрім зменшення корисної оптичної потужності, у системі також спостерігається зростання шумових складових, зокрема підвищується RIN, наприклад від  $-155$  дБ/Гц до  $-138$  дБ/Гц, що призводить до погіршення показників якості передачі, насамперед такої характеристики, як коефіцієнт бітових помилок (Bit Error Ratio, BER). Дуже важливо здійснювати контроль впливу SBS для транспортних протяжних високошвидкісних ОСЗ на основі спектрального мультиплексування. З цією метою доцільним є застосування лазерних джерел безперервної хвилі (Continuous Wave, CW) у поєднанні із модуляторами зовнішньої модуляції. Також треба звернути увагу на те, що типові рівні потужності сигналів у ОСЗ на  $\lambda = 1550$  нм часто спричиняють виникнення ефекту SBS, оскільки зазвичай лежать у діапазоні від 8 дБм до 14 дБм, що перевищує характерну величину порогу SBS [21, 23].

Акустична хвиля, яка виникає внаслідок цього процесу (з частотою  $\omega_A$ , рис. 3.1), має гіперзвукову природу, а її частотний спектр може простягатися до 10 ТГц ( $10^{13}$  Гц). У разі перевищення сигналом порогової потужності SBS така хвиля зумовлює виникнення Бріллюенівського частотного звуку ( $\nu_B$ ), який суттєво впливає на спектральні та енергетичні характеристики оптичного сигналу. Його можна визначити за формулою [21]:

$$\nu_B = \frac{\omega_A}{2\pi} = \frac{2 \cdot n \cdot \nu_A}{\lambda_0}, \quad (3.1)$$

де  $\omega_A$  – частота акустичної (гіперзвукової) хвилі;

$n$  – показник заломлення матеріалу, з якого виготовлене ОБ;

$\lambda_0$  – довжина основної (робочої) хвилі;

$\nu_A$  – швидкість акустичної(гіперзвукової) хвилі.

Виходячи з того, що для  $\lambda = 1550$  нм швидкість акустичної (гіперзвукової) хвилі у ОБ на основі кварцового скла є  $\nu_A \approx 5 \times 10^3$  м/с, тоді частотний зсув буде  $\nu_B \approx 10$  ГГц (тобто близько 0,1 нм). Зазвичай, для більш кращого розуміння фізики процесу ефект  $\nu_B$  співставляють з модуляцією світлового потоку акустичною гіперзвуковою хвилею або ефектом Доплера. Графічне зображення ефекту  $\nu_B$  показано на рисунку 3.3 [21].

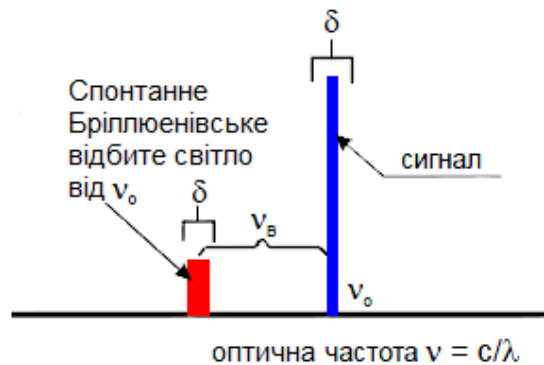


Рисунок 3.3 – Графічне зображення Бріллюенівського зсуву

Формулу для визначення порогової потужності SBS ( $P_{SBS}$ ) можна подати у наступному вигляді [21]:

$$P_{SBS} \approx \frac{21 \nu A_{ef}}{g_B L_{ef}} \left( 1 + \frac{\Delta \nu_{LS}}{\Delta \nu_B} \right), \quad (3.2)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт, що залежить від поляризаційного стану хвилі та має числове значення між 1 і 2;

$g_B \approx 4,6 \cdot 10^{-11}$  мВт – коефіцієнт підсилення стимульованого Бріллюенівського розсіювання, який залежить від типу світловода;

$\Delta\nu_{LS}$  – спектральна ширина випромінювання лазерного джерела;  
 $\Delta\nu_B \approx 20$  МГц (на  $\lambda = 1550$  нм) – ширина смуги Бріллюенівського частотного зсуву;

$A_{ef}$  – ефективна площа серцевини волокна, мкм<sup>2</sup>;

$L_{ef}$  – ефективна довжина волокна, яку можна визначити за формулою [21]:

$$L_{ef} = \alpha^{-1}[1 - e^{-\alpha L}]. \quad (3.3)$$

Графік залежності ефективної довжини ОВ від його фізичної довжини для різних величин погонних втрат ( $\alpha$ ) у волокні показаний на рисунку 3.4 [21].

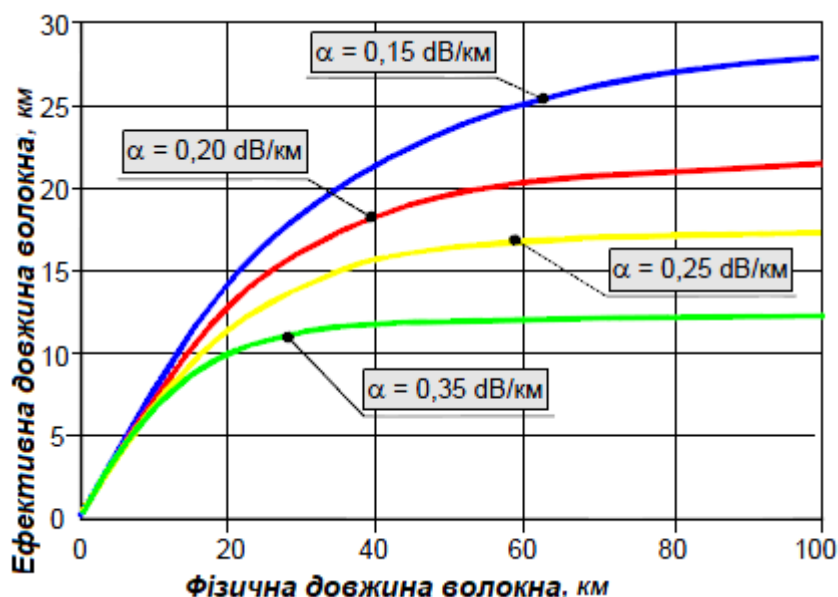


Рисунок 3.4 – Залежності  $L_{ef}$  волокна від його фізичної довжини для різних величин  $\alpha$

Треба мати на увазі, що при розрахунку  $L_{ef}$  по формулі (3.3), значення  $\alpha$  потрібно підставляти в неперах на кілометр (Нп/км), а не у вже звичній на сьогодні розмірності дБ/км. Зокрема [25]:

$$\alpha_{[Нп/км]} = \frac{\ln(10)}{10} \alpha_{[дБ/км]} \quad (3.4)$$

Враховуючи вираз (3.4), формулу (3.3) можна подати у потрібному вигляді для проведення розрахунку (через дБ/км) [21, 23]:

$$L_{ef} = \frac{4,343}{\alpha} \left( 1 - \frac{1}{e^{0,23\alpha L}} \right). \quad (3.5)$$

Для ОСЗ, що мають велику довжину (більш ніж 40 км) значення  $L_{ef}$  при типовому значенні втрат  $\alpha = 0,22$  дБ/км буде становити близько 20 км (див. рис. 3.4).

З формули (3.2) можна бачити, що поріг SBS є залежним від спектральної ширини лазерного джерела коливань (тобто, коли модулюючий сигнал є відсутнім). У найгіршому випадку, коли  $v = 1$  при  $L_{ef} = 20$  км і ефективному діаметрі модової плями ( $D_{ef}$ ) світловода 9,2 мкм, формулу (3.2) можна представити у логарифмічному поданні, що є більш зручним для розрахунку і оцінки [21, 23]:

$$P_{SBS}[dBm] = 14,8 - 10 \lg L_{ef} + 10 \lg \left( 1 + \frac{\Delta\nu_{LS}}{20} \right) + 20 \lg \left( \frac{D_{ef}}{9,2} \right), \quad (3.6)$$

Тобто у випадку, коли  $D_{ef} = 9,2$  мкм,  $L_{ef} = 20$  км,  $\Delta\nu_{LS} = 0,3$  МГц (наприклад, оптичний передавальний пристрій із зовнішньою модуляцією), поріг SBS буди мати значення 1,9 дБм (або 1,55 мВт). А у іншому випадку для оптичного передавача, що має  $\Delta\nu_{LS} = 200$  МГц, поріг SBS вже буде мати значення 12,2 дБм (або 16,6 мВт) [21].

Для зменшення впливу стимульованого Бріллюенівського розсіювання пропонуються кілька базових підходів.

По-перше, можливе застосування фазової модуляції замість традиційної амплітудної, що супроводжується суттєвим зменшенням потужності оптичної несучої. Водночас такий підхід не завжди є прийнятним з огляду на вимоги до практичної реалізації ОСЗ із спектральним мультиплексуванням [21].

По-друге, вплив SBS може бути зменшений шляхом зниження підведеної каналної оптичної потужності до рівня, що є нижчим за порогове значення SBS. Однак цей метод характеризується високою вартістю, оскільки потребує частішого застосування ОП EDFA уздовж магістралей ОСЗ, що, у свою чергу, призведе до погіршення відношення C/N [21].

По-третє, використовується підхід, який заснований на збільшенні спектральної ширини випромінювання лазерного джерела (див. формулу 3.6). При цьому застосування лазерів із безпосередньою модуляцією, які характеризуються широкою спектральною лінією, є небажаним через значне погіршення дисперсійних параметрів оптичних каналів ОСЗ [21].

Саме останній підхід набув найбільшого поширення в сучасних системах. В рамках цього підходу переважно реалізуються дві технології зменшення втрат від ефекту SBS, серед яких найбільш ефективною технологією є використання лазерів із зовнішньою модуляцією та розширеною («розмитою») частотою випромінювання на рівні кількох сотень мегагерц і більше (іншими словами реалізується так звана рандомізована модуляція). Відповідно з формулою (3.2), таке розширення спектра приводить до зростання значення порогової потужності SBS без додаткового збільшення дисперсії, що було б характерним у разі використання лазерів із безпосередньою модуляцією [21, 23].

Застосування згладженої частотної модуляції дозволяє не лише істотно підвищити поріг SBS (на 10 дБ і більше), але й адаптувати його до конкретної довжини оптичної лінії, що є дуже важливим з практичної точки зору. Крім того, такий підхід забезпечує збереження попереднього рівня RIN [18]. Лазерні джерела цього типу відомі як ACTL (Agilent Compact Tunable Laser) або лазери з управлінням SBS (SBS-control, SBS-C). Зокрема було встановлено, що примусова зміна швидкості модуляції в межах близько 10 кГц є достатньою для розширення спектральної ширини оптичної лінії, що була накопичена на довжині волокна більш ніж 40 км. Зокрема, наприклад, частотний зсув у 5 кГц відповідає часовому зсуву приблизно у 0,2 мс, протягом якого оптична хвиля (з урахуванням зменшення швидкості поширення світла в ОВ приблизно у 1,5 раза) проходить ділянку волокна довжиною близько 20 км, відбивається від навантаження та повертається до джерела. Такі лазерні джерела фактично реалізують режим оптичної частотної модуляції. Це якраз і забезпечує ефективне розширення спектра оптичного сигналу, що створюється лазером на основі підтримки зовнішньої модуляції [21].

На рисунку 3.5 наведена залежність вихідної потужності від вхідної, яка показує покращення порогу SBS у разі використання технології SBS-C на 2,4 дБ на оптичній лінії, що має довжину 25 км. Як можна бачити, у разі застосування технології SBS-C, що по суті реалізує примусове розширення спектра оптичного випромінювання, різниця між рівнями прийнятої та відбитої оптичної потужності

залишається практично сталою аж до підвищення вхідного рівня накачуваної оптичної потужності до значення близько 14 дБм [21].

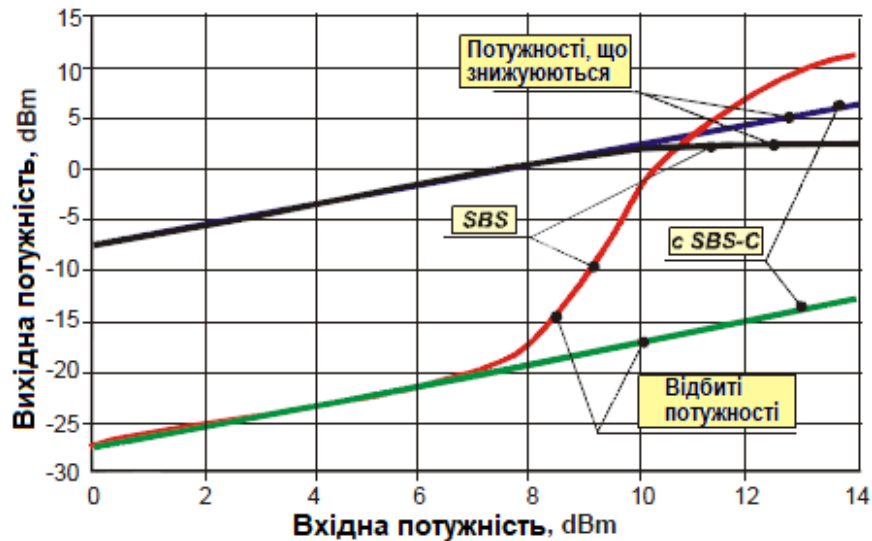


Рисунок 3.5 – Залежність вихідної потужності від вхідної, що показує покращення порогу SBS при використанні технології SBS-C

Друга технологія, що реалізується у підході заснованому на збільшенні спектральної ширини випромінювання лазерного джерела, ґрунтується на використанні джерел живлення лазерів із примусовою модуляцією. Тут здійснюється додаткова модуляція примусовим тональним змінним сигналом стабілізованого джерела постійного струму. Частота такої примусової модуляції джерела живлення лазера має бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту сигналу, що модулює. За стандартного режиму роботи рівень оптичної потужності передавача може перевищувати порогове значення SBS (рис. 3.6а). Натомість у режимі додаткової тонової модуляції відбувається формування двох додаткових спектральних складових (рис. 3.6б), кожна з яких за своїм енергетичним рівнем не перевищує поріг стимульованого Бріллюєнівського розсіювання [21].

Згідно теоретичних досліджень ця технологія дозволяє підвищити поріг SBS на величину біля 5 дБ, але її недоліком стосовно зменшення втрат через SBS є деяке погіршення дисперсійних параметрів. Однак у разі застосування спеціальних рішень дозволяє зменшити дисперсійні впливи практично до нуля [21].

Також потрібно дуже ретельно ставитися до використання ОП EDFA, що використовуються для підсилення сигналу в ОСЗ на основі технологій WDM.

Зокрема будь-яке треба мати на увазі, що використання ОП призводить до зниження порогу SBS.

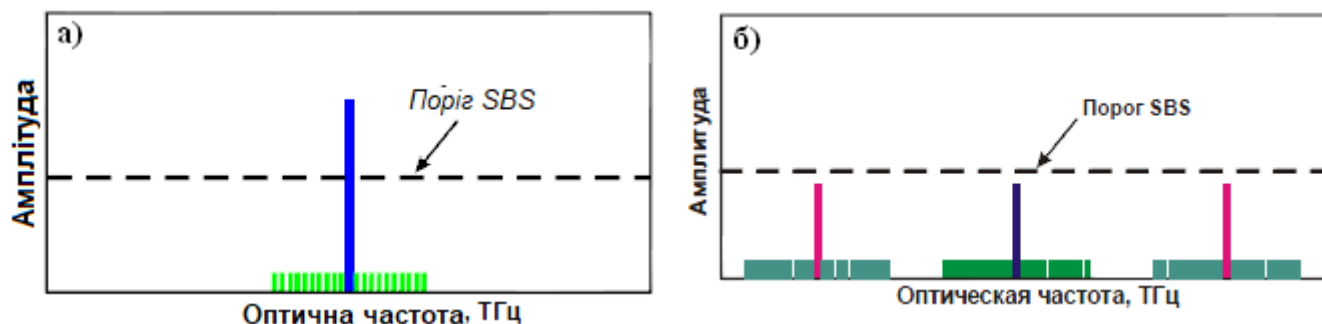


Рисунок 3.6 – Рівень оптичної потужності передавача: (а) – в стандартному режимі, (б) – в режимі додаткової тонової модуляції

Зокрема порогова потужності SBS для системи, що складається з  $N$  ОП ( $P_{SBS.N}$ ) визначається за наступним виразом [21, 23]:

$$P_{SBS.N} [dBm] = P_{SBS} [dBm] - 10 \lg N. \quad (3.7)$$

Повертаючись до формул (3.2) і (3.3), можна помітити, що поріг SBS має чітку залежність від довжини оптичного волокна (рис. 3.7).

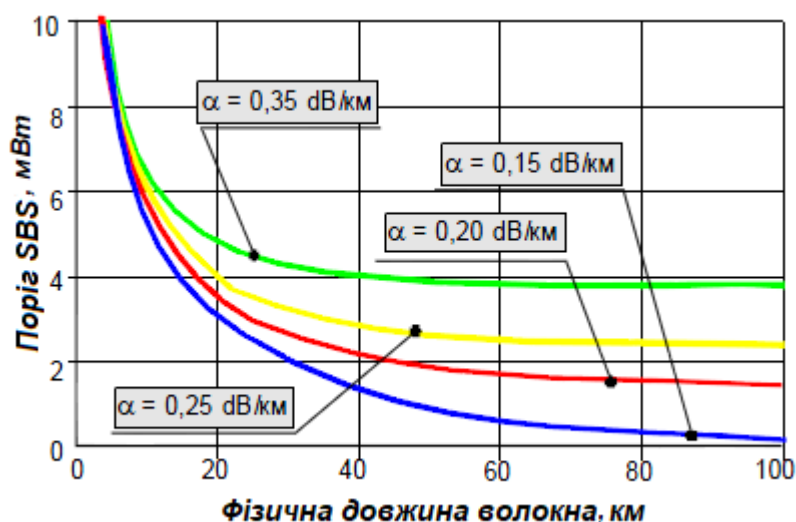


Рисунок 3.7 – Залежність порогової потужності SBS від фізичної довжини ОВ при різних значеннях  $\alpha$

Це можна пояснити не тільки зворотно-пропорційною залежністю порогу SBS від ефективної довжини світловода, але також і його експоненціальною залежністю від фізичної довжини світловода (див. формулу 4.5).

Для випадку передачі імпульсних сигналів важливо зазначити, що чим буде коротшою тривалість імпульсу, тим більше енергії необхідно для того, щоб настало Бріллюенівське розсіювання і, отже, тим буде меншою імовірність прояву цього ефекту у разі роботи ОСЗ на високих швидкостях передачі інформаційних потоків (рис. 3.8) [21].

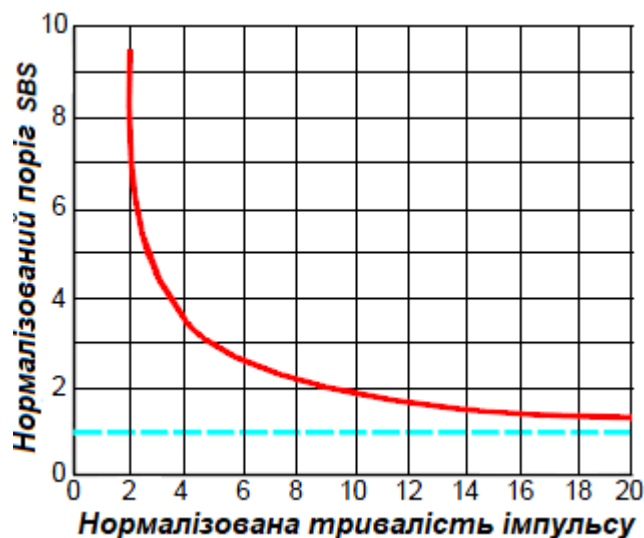


Рисунок 3.8 – Залежність тривалості імпульсу від порогу SBS

### 3.2 Ефект стимульованого Раманівського розсіювання (SRS) в ОСЗ

SRS здійснює менший вплив у порівнянні з SBS, тому що реальні ОСЗ на основі WDM дозволяють застосовувати ОП EDFA з рівнем близько 25 дБм або декількох ОП, що можуть мати менший рівень вихідного сигналу, як це витікає з формули (3.7). Але треба зазначити, що ефект SRS за своїми проявами впливів є дуже близьким до ефекту SBS, хоча і витікає з інших фізичних явищ. Він є частотно-залежним ефектом і має більш виражений характер на коротших хвилях. Так, на рисунку 3.9а наведений варіант типового спектру на вході ОСЗ, що побудована на основі 6-ти каналної системи DWDM зв'язку, яка працює на  $\lambda = 1550$  нм). Відповідно, на рисунку 3.9б показаний ефект SRS [22].

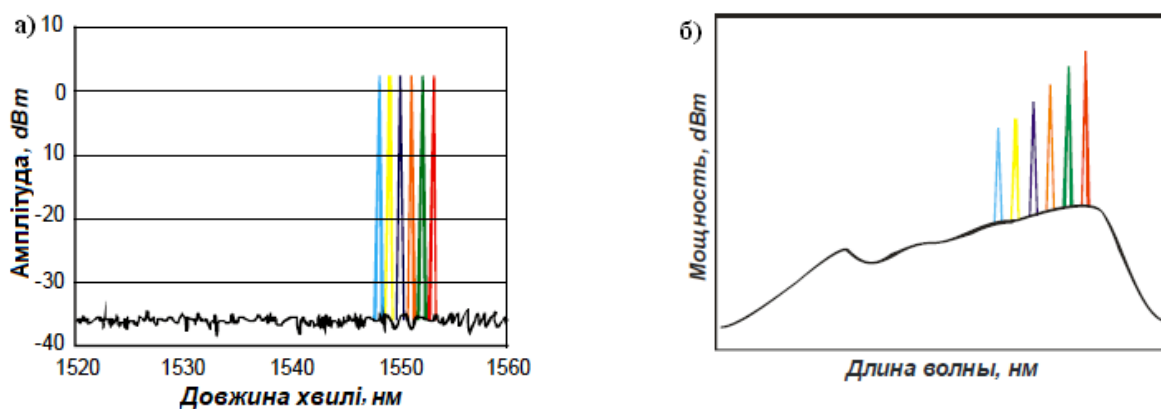


Рисунок 3.9 – Типовий спектр 6-ти каналної DWDM на вході ОСЗ (а) та прояв в ній ефекту SRS на виході ОСЗ (б)

Аналізуючи рис. 3.9, видно, що короткохвильові канали характеризуються значно меншою амплітудою порівняно з довгохвильовими, тобто має місце нерівномірність амплітуд сигналів у різних каналах. При цьому до більших втрат за загасанням схильні саме короткохвильові, тобто високочастотні, канали [22].

Ефекти SBS та SRS проявляються у перерозподілі енергії оптичного сигналу, що супроводжується його розсіюванням і зміщується у довгохвильову область (рис. 3.10). У разі прояву ефекту SBS спектр стимульованого випромінювання є відносно вузьким (не перевищує 60 МГц), а також спостерігається зміщення у бік довгих хвиль на 10...11 ГГц. Натомість для ефекту SRS є характерним широкий спектр стимульованого випромінювання (в межах 7 ТГц), що зміщується у довгохвильову область на величину близько 10...13 ТГц [22].

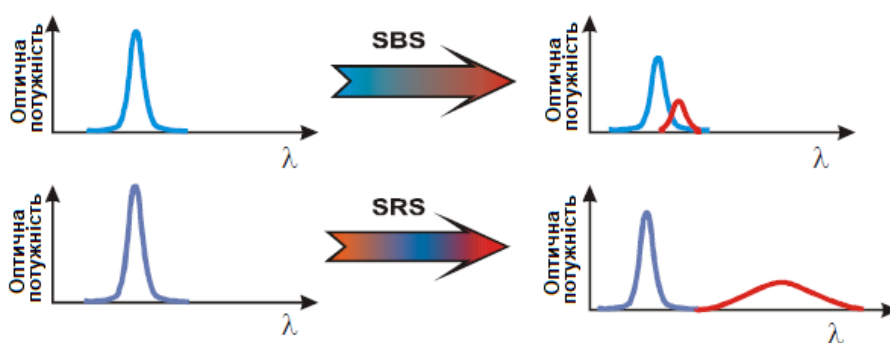


Рисунок 3.10 – Порівняння SBS та SRS

При своїй подібності все ж таки можна виділити кілька істотних відмінностей між SBS і SRS, зокрема [22, 23]:

- ефект SBS спостерігається виключно для хвилі, що поширюється назустріч, тобто розсіювання відбувається лише у зворотному напрямку – до джерела оптичного сигналу. Натомість ефект SRS проявляється як для хвиль, що поширюються назустріч (Стоксове випромінювання з рівнем, що є наближеним до  $-50\dots-60$  дБ відносно інтенсивності вихідного випромінювання), так і для співнаправлених хвиль (антистоксове випромінювання з рівнем, що є наближеним до  $-70\dots-80$  дБ відносно основної хвилі). Стоксова та антистоксова хвилі є частотно-симетричними відносно частоти випромінювання, що передається;

- у випадку ефекту SRS спектр стимульованого випромінювання характеризується значно більшим частотним зсувом у порівнянні з ефектом SBS, а також істотно більшою спектральною шириною. Ці характеристики перевищують відповіді для SBS приблизно на три порядки [22];

- порогова потужність ефекту SRS є значно вищою ніж для ефекту SBS (теж близько трьох порядків).

Вираз для здійснення розрахунку мінімального значення порогової потужності ефекту SRS ( $P_{SRS}$ ) за аналогією з формулою (3.2) можна записати у наступному вигляді [22, 23]:

$$P_{SRS} \approx \frac{16 K_{SRS} A_{ef}}{g_R L_{ef}}, \quad (3.8)$$

де  $K_{SRS}$  – коефіцієнт, що має деяке числове значення, яке має залежність, як від поляризаційного стану хвилі, так і від ряду інших факторів. Його мінімальне значення дорівнює 1. Для більшості практичних застосувань значення цього коефіцієнту становить 2;

$g_R \approx 4.2 \cdot 10^{-14}$  мВт – коефіцієнт підсилення ефекту SRS;

$A_{ef}$  – ефективна площа серцевини волокна, мкм<sup>2</sup>;

$L_{ef}$  – ефективна довжина волокна, яку можна визначити за формулами (3.3 - 3.5). Відповідний графік залежності  $L_{ef}$  від фізичної довжини волокна для різних величин його втрат  $\alpha$  був наведений вище на рисунку 3.4.

Графік, що демонструє залежність порогу SRS від фізичної довжини волокна є за своїм виглядом аналогічним SBS (див. рисунок 3.7), але відрізняється за значеннями характеристик. Він є наведеним на рисунку 4.11 [22].

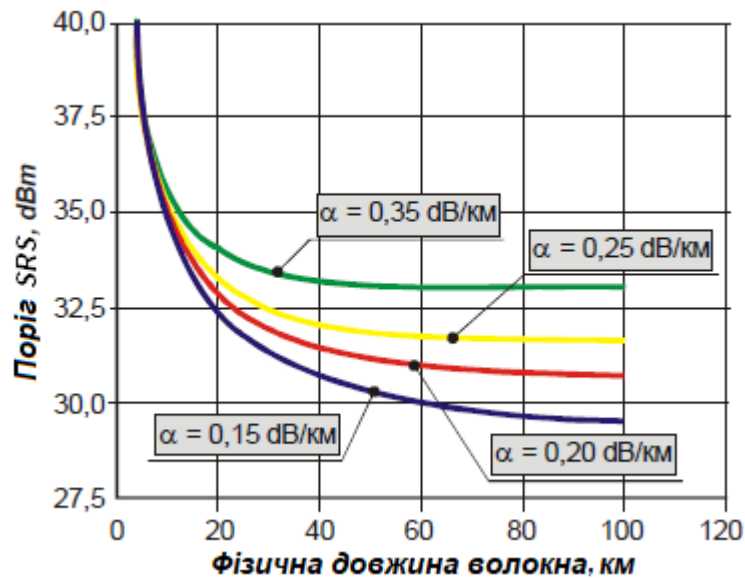


Рисунок 3.11 – Залежність порогової потужності SRS від фізичної довжини ОВ при різних значеннях  $\alpha$

Можна бачити, що для сучасних волокон порогова потужність SRS лише трохи вища за величину 30 дБм (або 1 Вт). У логарифмічному вигляді вираз для визначення цього порогу, за аналогією з пороговою потужністю SBS (3.6), приведемо для зручності у наступному поданні [22]:

$$P_{SRS}[\text{dBm}] = 44 - 10 \lg L_{\text{eff}} + 20 \lg \left( \frac{D_{\text{eff}}}{9.2} \right). \quad (3.9)$$

Таким чином, ефект SRS, на відміну від ефекту SBS, не створює обмежень на величину оптичної потужності, що вводиться у світловод. Зокрема, навіть у разі застосування на лінії досить потужного широкопasmового ОП з  $P_{\text{вух}} = 26$  дБм у оптичній системі CWDM, що має вісім каналів спектральна оптична потужність, що виділяється на один канал, буде становити [22]:

$$P_{SRS.N}[\text{dBm}] = P_{SRS}[\text{dBm}] - 10 \lg N, \quad (3.10)$$

де  $N$  – кількість оптичних каналів.

Зокрема

$$P_{SRS.N}[\text{dBm}] = 26 - 10 \lg 8 \approx 17 \text{ дБм.}$$

Проте SRS має значний вплив на функціонування сучасних ОСЗ особливо тих, що організовані на основі технологій із спектральним мультиплексуванням каналів за довжинами хвиль, тому що реалізується можливість здійснення підсилення оптичних сигналів у широкій смузі частот, що є зміщеною у бік нижчих частот відносно  $\lambda$  накачки на величину в інтервалі 12 - 15 ТГц (100 нм). Зокрема ОП EDFA, що застосовуються в протяжних високошвидкісних ОСЗ на основі технології DWDM якраз і характеризуються широкою смугою підсилення у 50...100 нм. Привабливою властивістю таких ОП є також застосування можливостей щодо підсилення оптичного сигналу безпосередньо в самому світловоді (приблизно на довжині 20 км). При цьому ОП є розподіленим, тобто має мінімальне значення коефіцієнту шуму (зокрема це значення для ОП EDFA становить 3 дБ). Це надає змогу досягти кращого співвідношення C/N (рис. 3.12) [22].

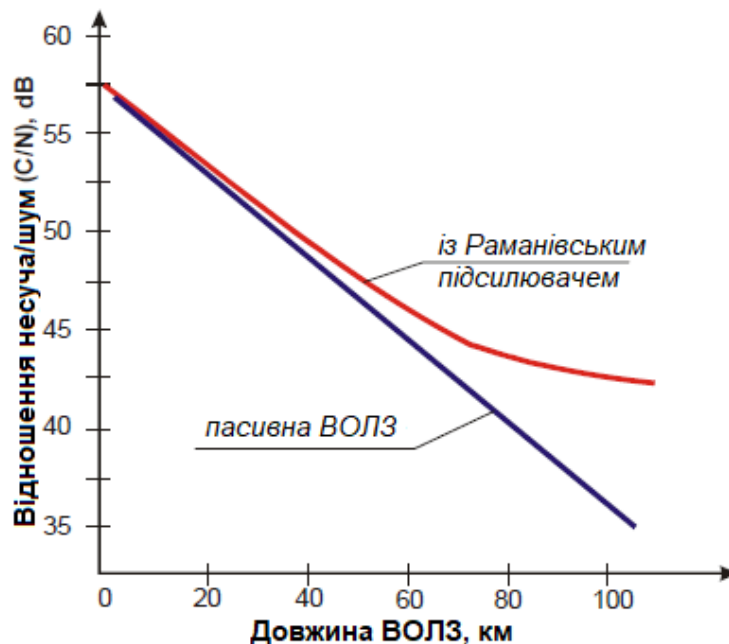


Рисунок 3.12 – Відношення несуча/шум у пасивних ВОЛЗ та на основі ОП EDFA

Оптичний підсилювач EDFA є досить простим у виконанні, і для його створення практично необхідне лише джерело накачки на відповідній довжині хвилі, зокрема, як показано на рис. 1.6, накачка здійснюється на  $\lambda = 980/1480$  нм, а також потрібно реалізувати ОБ леговане ербієм.

При використанні оптичних підсилювачів EDFA в системах DWDM, необхідно враховувати наявна можливість виникнення перехресних завад. Вони

виникають через взаємодію численних сигналів, що передаються на різних довжинах хвиль свої каналних інтервалів у стандартизованій сітці частот. Зокрема, сигнали, що мають більшу  $\lambda$  отримують додаткове підсилення, тоді як сигнали з меншою  $\lambda$  послаблюються. Це призводить до появи «нахилу» в груповому спектрі загального сигналу, що передається по ВОЛЗ (див. рис. 3.9б). Крутизна цього нахилу є прямо пропорційною оптичній потужності в лінії зв'язку. Оскільки в ОСЗ на основі щільного WDM важливим є забезпечення мінімальної різниці між потужностями каналів (різниця, як правило, не є більшою за 0,5 - 1,0 дБ), то ефект SRS робить обмеження максимальної потужності, яку можна передавати у каналі (зворотно- пропорційно квадрату кількості каналів). Для вирішення цієї проблеми існують оптичні еквалайзери, що призначені для вирівнювання АЧХ.

Проаналізовані у цьому розділі нелінійні ефекти Бріллюенівського (SBS) і Рамановського (SRS) розсіювань, як було показано, здебільшого були зумовлені фізичними законами розсіяння в оптичному середовищі. Далі, у наступному розділі, проведемо аналіз іншої групи нелінійних ефектів, які з'являються, коли змінюється показник заломлення волокна. Незважаючи на те, що таких ефектів досить багато, ми зосередимося на найважливіших з них, які мають найбільший вплив на сучасні ОСЗ.

## 4 АНАЛІЗ ВПЛИВІВ ЕФЕКТІВ НЕЛІНІЙНОСТІ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗМІНОЮ ВЕЛИЧИНИ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ ОВ, НА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАЧІ В ОСЗ

### 4.1 Ефект чотирьохвильового змішування (FWM)

Ефект FWM з'являється в ОСЗ, в яких реалізується багатоканальний режим, кожен з яких працює на своїй  $\lambda$ . Зокрема за таким принципом будуються ОСЗ на основі технологій сімейства WDM. Таким чином, для виникнення ефекту FWM достатньо, щоб по світловоду розповсюджувалося від двох і більше світлових хвиль. Зокрема, у разі ситуації коли по світловоду в одному вікні прозорості розповсюджується дві хвилі з оптичними частотами  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , то також як і в системах на електричних колах, між цими хвилями з'явиться нелінійна взаємодія. Результатом цього буде поява [25]:

- гармонійних складових, частоти яких будуть кратними  $2\omega_1, 3\omega_1, \dots, 2\omega_2, 3\omega_2, \dots$ , тощо;
  - комбінаційних частот 2-го порядку  $\omega_i = |\omega_1 \pm \omega_2|$ , які завжди будуть знаходитися за межами оптичного вікна прозорості, що розглядається.
  - комбінаційні частоти 3-го порядку, які можуть розташовуватися в спектральній області (або діапазоні частот), що розглядається.
- Узагальнене подання ефекту FWM наведено на рисунку 4.1 [25].

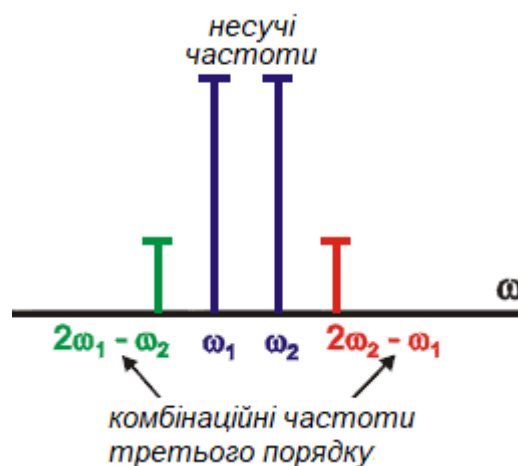


Рисунок 4.1 – Узагальнене подання ефекту FWM

Для приклад проаналізуємо достатньо просту модель з деякими вихідними трьома оптичними сигналами ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ), у якій виникає ефект FWM і призводить до спотворень (рис. 4.2) [25].

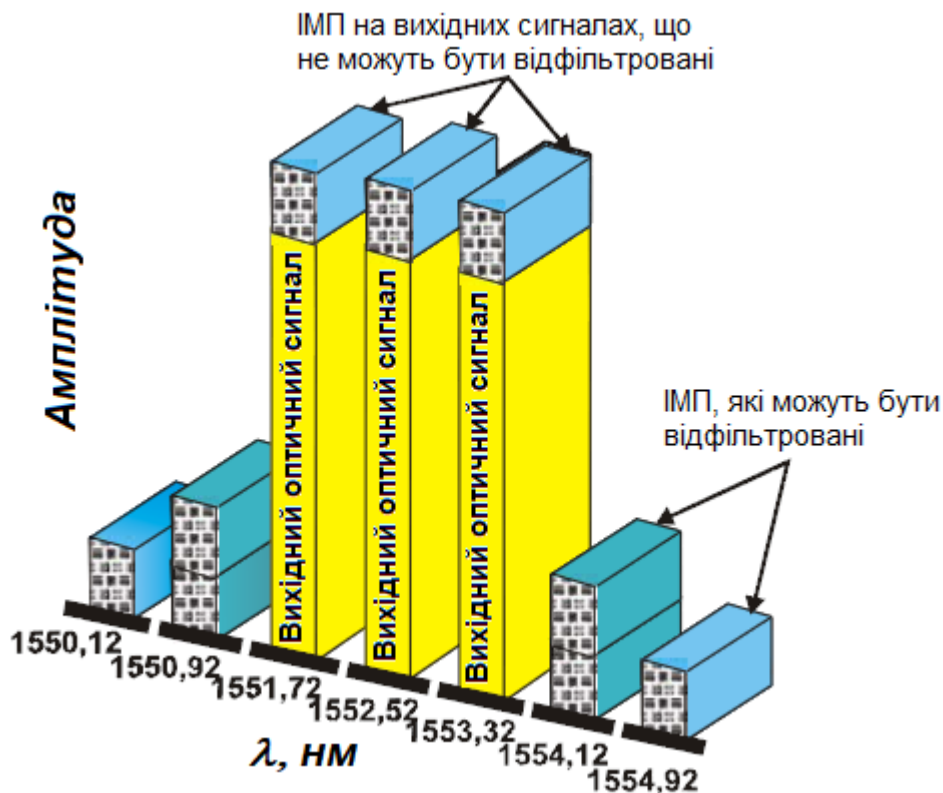


Рисунок 4.2 – Спрощена модель виникнення спотворень завдяки ефекту FWM

У такій оптичній системі за принципом, який вище було описано, виникне дев'ять довжин хвиль, що будуть пов'язаними з вихідними оптичними сигналами ( $\lambda_1 = 1551,72$  нм,  $\lambda_2 = 1552,52$  нм  $\lambda_3 = 1553,32$  нм), наведеними на рисунку 4.2. У цьому випадку комбінаційні частоти третього порядку матимуть такі значення:

$$\begin{aligned} \lambda_1 + \lambda_2 - \lambda_3 &= 1550,92 \text{ нм}; & \lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3 &= 1552,52 \text{ нм}; & \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 &= 1554,12 \text{ нм}; \\ \lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_3 &= 1552,52 \text{ нм}; & 2\lambda_1 - \lambda_3 &= 1550,12 \text{ нм}; & 2\lambda_2 - \lambda_3 &= 1553,32 \text{ нм}; \\ \lambda_2 + \lambda_3 - \lambda_1 &= 1554,12 \text{ нм}; & 2\lambda_3 - \lambda_1 &= 1554,92 \text{ нм}; & 2\lambda_3 - \lambda_2 &= 1554,12 \text{ нм}. \end{aligned}$$

Зауважимо, що кількість таких інтермодуляційних продуктів (ІМП – небажані нові частоти, що виникають у нелінійній системі) буде значно більшою, але вони розташовуються досить далеко від вихідних довжин хвиль, що є присутніми на вході у оптичну систему.

Також на рисунку 4.2 показано, що три складові інтермодуляційних спотворень за своєю довжиною хвилі співпадають з вихідними сигналами. Шість інших складових ІМП мають відносно вихідних сигналів деяке частотне зміщення і їх за потреби можна відфільтрувати. Складність ситуації полягає в тому, що із зростанням кількості вихідних оптичних сигналів (тобто у термінах WDM-систем – кількості спектральних каналів або каналних інтервалів), кількість складових ІМП ( $N_{\Sigma}$ ) буде різко збільшуватися. Цю залежність можна описати виразом [25]:

$$N_{\Sigma} = m(m-1)^2, \quad (4.1)$$

де  $m$  – кількість спектральних каналів.

Ця залежність наведена на рисунку 4.3 [25].

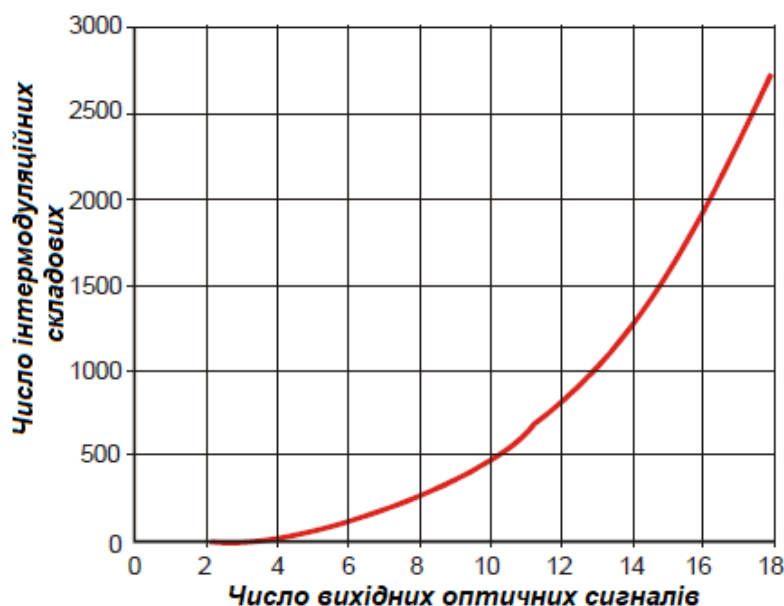


Рисунок 4.3 – Залежність кількості інтермодуляційних складових від кількості вихідних оптичних сигналів

Аналізуючи залежність на рисунку 4.3 можна бачити, що для 4, 8 і 16 вихідних оптичних сигналів кількість ІМП складе десь відповідно 24, 224 і 1920. І тут застосування будь-якої фільтрації вже не буде здатною усунути сусідні або співпадаючі за довжиною хвилі ІМП. Виходячи з цього можна зробити висновок, що ОСЗ на основі технології CWDM є значно більш захищеними від перешкод у порівнянні із ОСЗ на основі DWDM, що є цілком обґрунтованим. Також можна

бачити, що при рівній кількості оптичних каналів передачі (наприклад, до 8) ОСЗ на основі DWDM будуть більш захищеними від перешкод, тому що вони мають більшу вибірковість і більшу вузькосмуговість оптичних передавачів (транспондерів). Тобто єдиною можливістю забезпечити захист від FWM у разі наявності великої кількості оптичних каналів передачі є усунення причин її появи. На значення FWM, тобто на кількість ІМП, що виникають, здійснюють вплив два основні фактори:

- спектральні інтервали оптичних каналів (як було показано у першому розділі, їх значеннями є  $\Delta\lambda = 0,8$  нм (сітка частот 100 ГГц),  $\Delta\lambda = 0,4$  нм (сітка частот 50 ГГц) і  $\Delta\lambda = 0,2$  нм (сітка частот 25 ГГц);

- величина дисперсії ( $D$ ).

Зокрема із збільшенням спектрального інтервалу (інтервалу між несучими оптичними каналами систем WDM) значення FWM буде знижуватися незалежно від значення дисперсії, що є у волокні (рис. 4.4) [25].

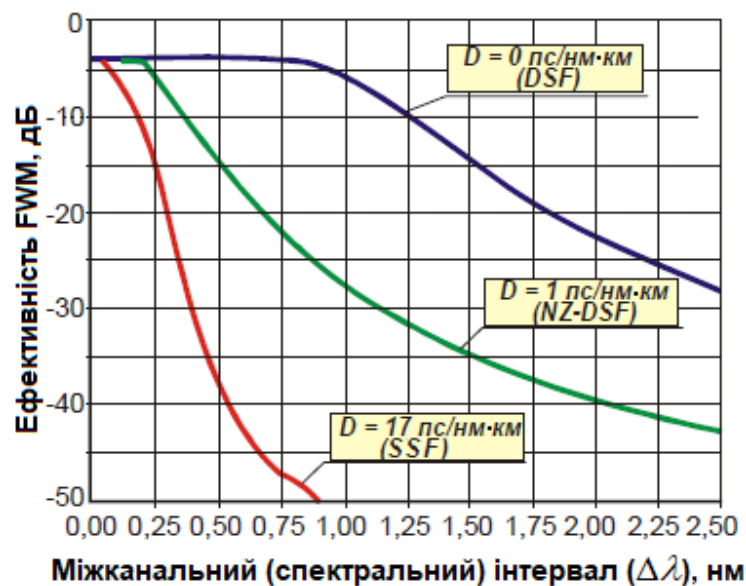


Рисунок 4.4 – Залежність відносної ефективності ефекту FWM від значень міжканального (спектрального) інтервалу та дисперсії для різних типів ОВ

У разі дисперсійних впливів на значення FWM, то тут треба мати на увазі, що її рівень залежить від типу ОВ, що використовується у ОСЗ. На цей час для організації ОСЗ на основі спектрального мультиплексування отримали три основні типи ОВ [10, 16]:

- стандартне одномодове волокно (SSF або SSMF), що має нульову дисперсію на  $\lambda = 1310$  нм та  $D \approx 17...20$  пс/нм·км – на  $\lambda = 1550$  нм;

- волокно зі зміщеною дисперсією (Dispersion Shifted Fiber, DSF), рівень нульової дисперсії якого був зміщений  $\lambda = 1310$  нм в область третього вікна прозорості на довжину хвилі  $\lambda = 1560$  нм;

- волокно зі зміщеною ненульовою дисперсією (Non Zero Dispersion Shifted Fiber, NZDSF) – цей тип волокон поділяється на ОВ з позитивною дисперсією (+D NZDS) і негативною дисперсією (-D NZDS). Величина дисперсії у волокнах NZ-DSF у більшості випадків відповідає діапазону 0,1...6 пс/нм·км.

Дисперсійні криві для цих типів ОВ наведені на рисунку 4.5.

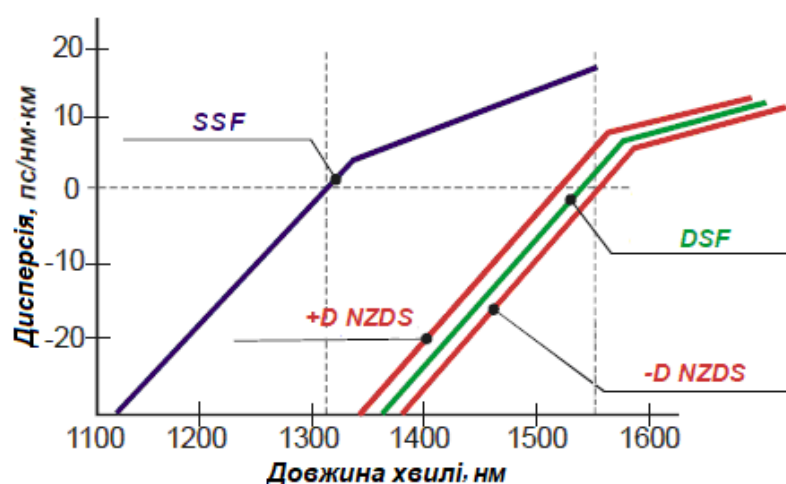


Рисунок 4.5 – Дисперсійні криві для різних типів ОВ

Особливо треба зазначити, що зменшити рівень впливу ефекту FWM можна саме за допомогою наявної хроматичної дисперсії, тобто у разі використання волокон SSF [25]. Це ствердження базується на тому, що на виході лазерів утворюється когерентне оптичне випромінювання, в якому сигнали перебувають в прив'язаній фазі відносно один одного. Тож, в разі розповсюдження оптичних сигналів вздовж лінії, вони в підсумку формують нову хвилю за рахунок взаємодії між собою. Зазначеному ефекту досить сильну протидію здійснює дисперсія, яка створює умови, у разі яких порушується узгодженість фаз оптичних сигналів після розповсюдження їх на великі відстані. В якості прикладу у табл. 4.1 показані стандартні значення величин FWM при частотному каналному інтервалі у 100 ГГц (тобто ширина спектрального інтервалу  $\Delta\lambda = 0,8$  нм, що відповідає ОСЗ на основі DWDM) для оптичної лінії, що має протяжність у 100 км при каналній потужності збудження із значенням +10 дБм.

Таблиця 4.1 – Стандартні значення величин FWM

Волокно	$\lambda$ , нм( $D = 0$ )	$D, \frac{\text{Пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} (\lambda = 1550 \text{ нм})$	FWM, дБ	$\Delta\lambda$ , нм
SSF	1310	17	-48	0,8
NZ-DSF	1567	1	-24	0,8
NZ-DSF	1567	1	-12	0,8
DSF	1560	0	-5	0,8

Як можна бачити із наведених в таблиці даних, у разі використання волокна SSF значення величини FWM є низьким. Однак потрібно мати на увазі, що наведене значення в -48 дБ є справедливим тільки для трьох каналів. Це так тому, що сам термін «чотирихвильове змішування» історично з'явився в силу того, що у дослідженнях використовується три лазерних джерела, а їх взаємодія призводить до появи нової, четвертої хвилі, що за частотою дуже близько є розташованою до трьох вихідних оптичних хвиль [25].

У реально діючих системах їх може бути більше. Нижче наведений вираз для приблизного розрахунку значення FWM для SSF з урахуванням частотного кроку розміщення  $N$  оптичних каналних інтервалів  $\delta_f$  записується у вигляді [23]:

$$FWM_{[dB]} \approx -57 + 10\lg(N/3) + 1200/\delta_f. \quad (4.2)$$

Так, зокрема для 8-канальної ОСЗ на основі CWDM із значенням величини  $\delta_f = 200$  ГГц, що відповідає частотному діапазону 192,4 - 193,8 ТГц, значення величини FWM буде біля -46,7 дБ, а для 16-канальної ОСЗ, де  $\delta_f$  буде 100 ГГц – величина FWM буде біля -37,7 дБ.

#### 4.2 Ефект фазової самомодуляції (SPM)

Ефект нелінійності SPM, так само, як і ефект FWM, виникає через залежність показника заломлення  $n$  від інтенсивності світла (2.4) (ефект Керра). Ефект SPM розглядається, в основному, стосовно сучасних ОСЗ, що функціонують на високих швидкостях (2,5 Гбіт/с і вище), тобто мають малі тривалості оптичних імпульсів (порядку 200...400 пс і менше). Даний ефект

починає негативно впливати у волокнах при потужностях більше 8...10 мВт і він не залежить від кількості каналних інтервалів і їх сітки часто. Цей поріг є достатньо умовним, тому що у великій мірі залежить від типу волокна [23].

Якщо звернутися до теоретичних основ теорії ланцюгів, то там вказується на наявність кореляції між спектром імпульсу та його часовими характеристиками, зокрема крутизною переднього та заднього фронтів. Застосування зворотного перетворення Фур'є дозволяє встановити, що високочастотні компоненти спектру визначають форму переднього фронту, а низькочастотні – форму заднього (рис. 4.6). При поширенні оптичного імпульсу вздовж волокна спостерігаються зміни його амплітуди. Це, в свою чергу, викликає варіації показника заломлення  $n$ , який є нелінійною функцією інтенсивності світла в даному перерізі по довжині волокна.

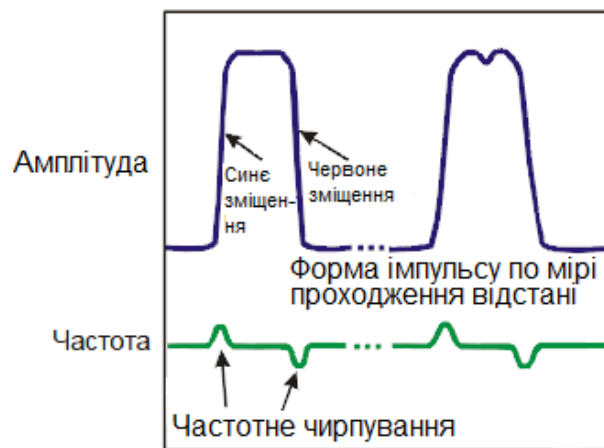


Рисунок 4.6 – Зміна форми оптичного імпульсу по мірі його поширення по світловоду

Таким чином, зміна енергії імпульсного сигналу в часі перетворює його потужність теж на функцією часу. Відповідно, якщо відбуваються зміни інтенсивності оптичного випромінювання ( $I$ ), то це також призводить до відповідних змін у часі показника заломлення [23]:

$$n = n_0 + n_H I(t). \quad (4.3)$$

Після проходження імпульсом з несучою частотою  $\omega_0$  певної відстані  $L$  неминуче відбудеться зміна його фази [23]:

$$\varphi_n(t) = \delta_n \cdot L\omega_0 / C, \quad (4.4)$$

де  $\delta_n$  – зміна значення показника заломлення. Це значення може бути як позитивним, так і негативним [23]:

$$\delta_n = n_n \cdot I(t)^2. \quad (4.5)$$

Слід звернути увагу, що енергія імпульсу буде мінімальною на його передньому фронті і максимальною, відповідно, на задньому. Отже, зміна значення показника заломлення (а значить спектра і форми оптичного сигналу) буде мати максимальні зміни саме на задньому фронті імпульсу, призводячи до значних спотворень його форми (але не саму його тривалість). Саме звідси з'явилася і сама назва цього виду нелінійних спотворень, тобто «фазова само модуляція». На рис. 4.7 наведений вигляд осцилограми на задньому фронті імпульсу за рахунок впливу ефекту SPM [23].

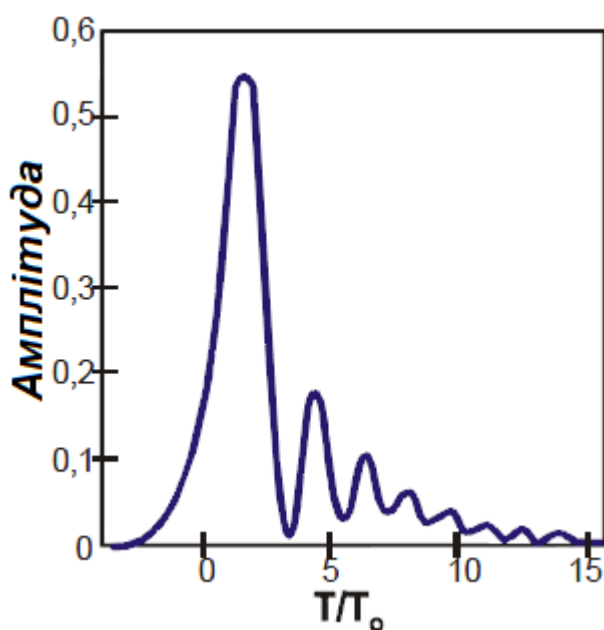


Рисунок 4.7 – Форма імпульсу у разі впливу SPM

Тому що частота в математичному поданні являє собою похідну фази за часом ( $\Delta\omega = d\varphi/dt$ ), то сам імпульс буде промодульованим не тільки за амплітудою, але і за частотою [23]:

$$\omega(t) = \omega_0 + d\omega(t) = \omega_0 + d\varphi_n(t)/dt. \quad (4.6)$$

Цей ефект, що полягає у короткочасній зміні несучої частоти отримав назву чірпування за частотою (рис. 4.8) [23].

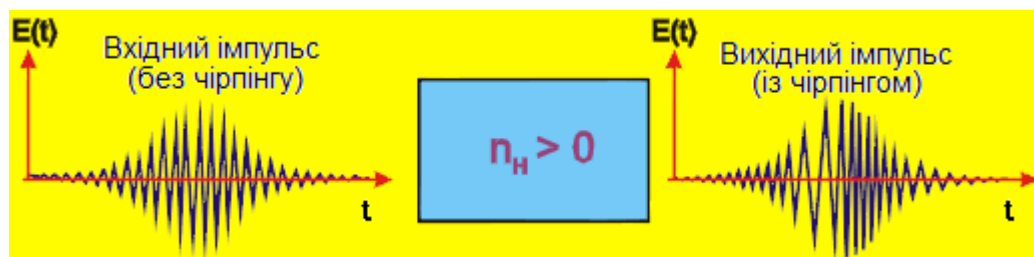


Рисунок 4.8 – Ефект чірпування за частотою

У разі, якщо коефіцієнт нелінійності показника заломлення  $n_n > 0$ , то буде спостерігатися зниження частоти, а у разі  $n_n < 0$  – то підвищення.

Окреслимо один важливий практичний момент, що ефект SPM призводить до появи чірпінгу приблизно так же само, як і при розповсюдженні імпульсу у волокні з дисперсією (наприклад, в SSF на  $\lambda = 1550$  нм). Однак між цими явищами є значні відмінності. Зокрема SPM викликає розширення спектра імпульсу (тобто виникають нелінійні спотворення), але цей ефект не змінює тривалість імпульсу або ж, завдяки значному спотворенню заднього фронту, буде спостерігається звуження імпульсу. Так, якщо тривалість імпульсу буде становити 10...20 пс, то звуження імпульсу може досягати у два-три і більше разів, і це може навіть призвести до того, що імпульси будуть роздвоюватися [23]. Все це призводить до різкого збільшення BER, в результаті чого високошвидкісна передача групових інформаційних потоків стає складною справою. Дисперсія ж, навпаки, призводить до зміни тривалості імпульсу, але не змінює ширину його спектру (тобто виникають лінійні спотворення).

З практичних результатів, що є у наявності, можна зробити висновок, що лазери з безпосередньою модуляцією показують ефект розширення спектру того ж порядкового рівня, що і ефекти SPM у волокні, і можуть бути використаними для передачі оптичних сигналів із швидкістю до 2,5 Гбіт/с на відстанях майже до 170... 200 км (у разі, якщо використовується SSF з впливом у 2 дБ або меншим). Для більш довгих оптичних ліній або у разі роботи на більш високих швидкостях передачі, то тоді будуть потрібні вже лазери із зовнішньою модуляцією [23].

### 4.3 Ефект, що утворює перехресна фазова модуляція (CPM)

Перехресна фазова модуляція або фазову крос-модуляція (Cross-Phase Modulation, CPM) є дуже схожою з SPM, але її аналізувати треба стосовно двох і більше оптичних каналів, тобто виключно для ОСЗ на основі WDM-технологій. Так само, як і у разі ефекту SPM, виникає зміна рефракційного індексу  $n$  у разі підвищення інтенсивності світлового потоку. Тому що каналні рівні потужностей в системах WDM є фактично однаковими, то ефект CPM робить більшим нелінійний фазовий зсув приблизно у  $2N$  раз, де  $N$  – кількість оптичних каналів у волокні, що використовуються у даний момент часу. CPM викликає ті ж самі спотворення оптичних імпульсів, як і ефект SPM, тільки значно у більшій мірі. Крім того, CPM залежить більше від дисперсійних впливів у волокні, ніж SPM [23].

Для того, щоб зменшити впливу CPM необхідно робити вибір ОВ з максимально ефективною площею перетину (до речі, це зауваження торкається всіх видів спотворень), і, за можливості, намагатися знизити рівень оптичної потужності у каналі (рис. 4.9).

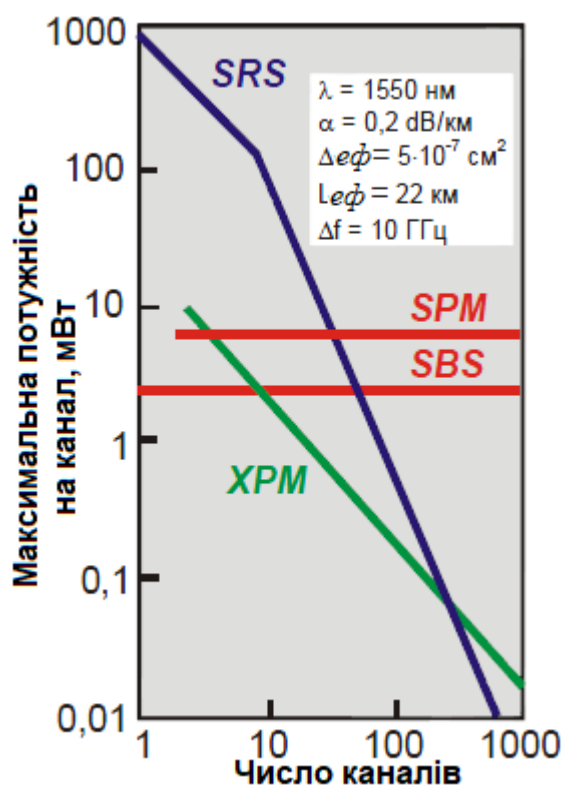


Рисунок 4.9 – Криві, що характеризують нелінійні спотворення, які пов'язані із зміною величини  $n$ , залежно від рівня каналної потужності.

Важливо також зауважити, що СРМ призводить до появи амплітудних спотворень часового джитера (рис. 4.10). Ці спотворення роблять вплив тим більший, чим буде вищою швидкість передачі оптичного сигналу і менший інтервал частот між каналами [23].

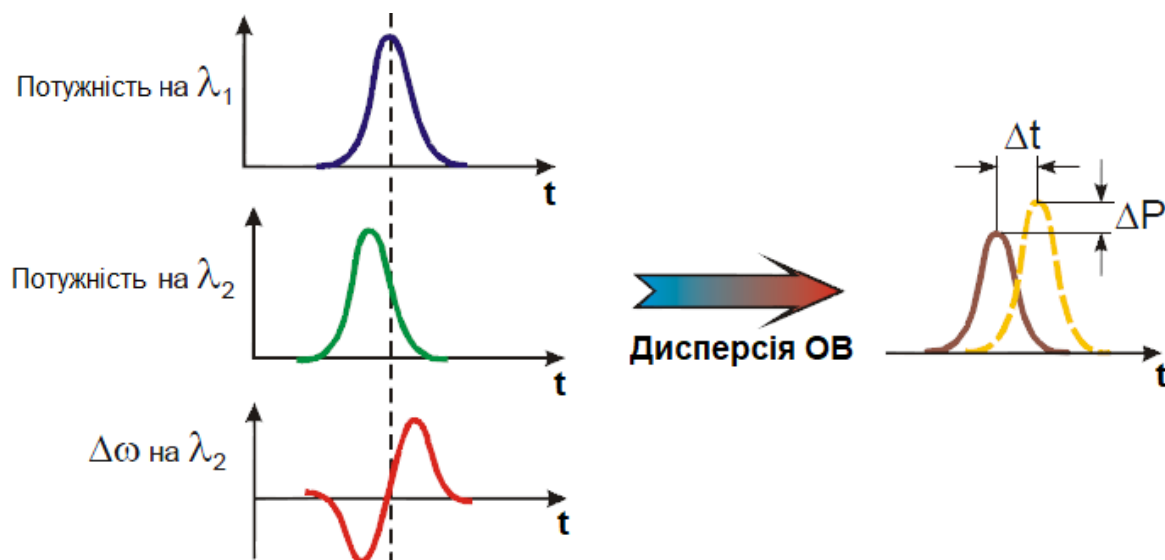


Рисунок 4.10 – Виникнення часового джитера під впливом СРМ

#### 4.4 Ефект модуляційної нестабільності (МІ)

Цей нелінійний ефект спостерігається тільки у світловодах з позитивною дисперсією. З точки зору часового подання МІ можна спостерігати у вигляді не дуже великих піків на оптичних імпульсах (рис. 4.11а), а в спектральному представленні МІ проявляється у вигляді розширення спектра імпульсу (рис. 4.11б) [23].

Піки на оптичних імпульсах виникають через явище самовпливу хвиль. Це означає, що довжина хвилі на задньому фронті імпульсу стає коротшою, ніж на передньому. У середовищі з позитивною дисперсією, зокрема у ОВ, коротші хвилі заднього фронту прискорюються сильніше, ніж довші хвилі переднього. Коли задній фронт починає взаємодіяти з переднім, то виникає інтерференція, яка і формує піки. Після того, як оптичний сигнал буде виявлено та проведена його фільтрація у електричній формі, амплітуда цих піків зменшується, роблячи їх впливи незначними для систем протяжністю аж до 1000 км [23].

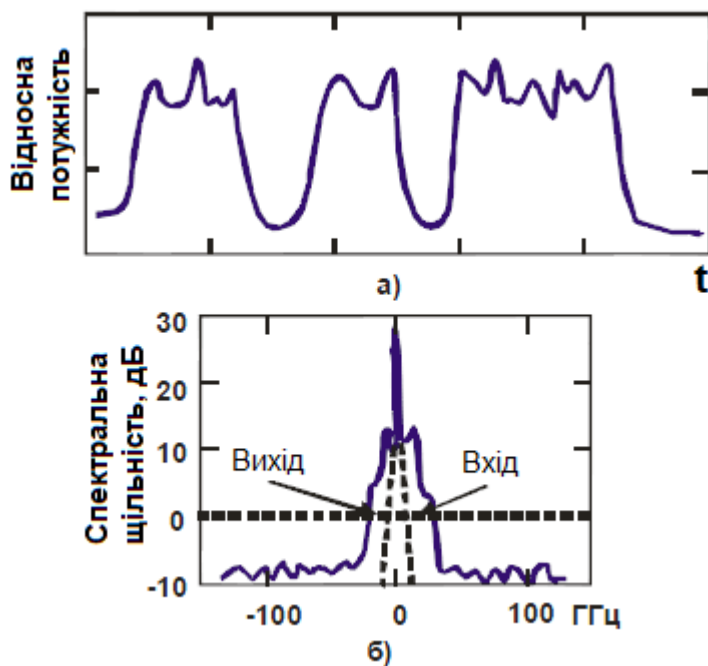


Рисунок 4.11 – Прояв ефекту МІ в часовому (а) і спектральному (б) поданні

Таким чином, у цьому розділі зроблено аналіз нелінійних ефектів, що проявляються в ОВ, та їх впливи на параметри сучасних ОСЗ з акцентом на системи спектрального мультиплексування каналів при великих рівнях оптичної потужності. Зокрема показано, що всі нелінійні ефекти, які були проаналізовані, є пов'язаними або з явищем розсіювання (SBS і SRS), або з нелінійними змінами показника заломлення  $n$  (FWM, SPM, CPM і MI), тобто його наявної залежності від рівня оптичної потужності, що вводиться у оптичне волокно. Розуміння механізмів генерації нелінійних спотворень і особливостей їх впливу на параметри сучасних ОСЗ, є ключовим для обґрунтованого вибору типу оптичного волокна та коректного планування та проєктування таких систем зв'язку.

## ВИСНОВКИ

В цій магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз впливу різних нелінійних ефектів, що виникають в оптичних волокнах, на параметри передачі сучасних оптичних систем зв'язку на основі спектрального мультиплексування каналів за довжинами хвиль. Серед основних параметрів на які робився акцент у процесі цього аналізу були пропускна здатність мережі, потужність оптичного каналу, протяжність лінії ОСЗ та інші спектральні характеристики, що впливають на забезпечення якості передачі даних.

Перший розділ кваліфікаційної роботи висвітлює загальні особливості організації та принципи функціонування ОСЗ зі спектральним мультиплексуванням каналів, а також розглядаються їх основні компоненти. Показано, що в основі будь-якої сучасної ОСЗ лежить подання обладнання в вигляді функціональних систем, кожна з яких об'єднує обладнання за своїми певними функціями, що виконуються. Зокрема, якщо ОСЗ представляти у вигляді узагальненої структури, то можна виділити наступні системи обладнання: каналоутворююче (КУО), що відповідає за створення та управління каналами, спряження (ОС), що забезпечує взаємодію між різними частинами оптичної системи, та обладнання оптичного лінійного тракту (ОЛТ) [7, 8].

Також у розділі звертається увага на те, що впровадження технологій спектрального мультиплексування каналів є ефективним рішенням розвитку сучасних ОСЗ і дає змогу збільшити, як їх пропускну здатність, так і дальність передачі. Тому велика увага приділена ґрунтовному опису загальних принципів і особливостей організації оптичних систем WDM. Зокрема була надана характеристика спектральним областям за довжинами хвиль, що використовуються такими системами, а також проаналізовані етапи розвитку таких систем та їх базова структура.

У другому розділі цієї кваліфікаційної роботи була зроблена класифікація та наведена загальна характеристика спотворень, що впливають на функціонування ОСЗ. Показано, що спотворення визначають граничну протяжність ОСЗ та обмежують їх пропускну здатність. Наголошено, що особливо важливо контролювати спотворення при функціонуванні ОСЗ на основі технологій сімейства WDM, оскільки їх наявність може призводити до неефективного

використання можливостей ОВ і обладнання, а також до зниження надійності ОСЗ в цілому.

Встановлено, що спотворення в ОСЗ поділяються на лінійні та нелінійні і виникають як в активному обладнанні, так і в ОВ. Відповідно до поставлених у технічному завданні задач основна увага приділяється здійсненню аналізу нелінійних спотворень, що виникають в ОВ, та причинам їх виникнення. Показано, що основні механізми нелінійності пов'язані з розсіюванням оптичного випромінювання і з залежністю показника заломлення від рівня оптичної потужності.

До нелінійних ефектів, що зумовлені явищами розсіювання, належать стимульоване Бріллюенівського та стимульоване Раманівське розсіювання, які в WDM-системах призводять до перехресних завад між каналами та нерівномірного розподілу потужності по спектру. Ефекти, що пов'язані зі зміною показника заломлення, включають чотирихвильове змішування, фазову і перехресну фазову модуляцію, а також модуляційну нестабільність. Незважаючи на малу величину зміни показника заломлення, ці ефекти істотно впливають на якість передачі високошвидкісних сигналів. Встановлено, що зниження їх впливу досягається за рахунок використання ОВ зі збільшеною ефективною площею перетину і роботи при мінімально допустимих рівнях оптичної потужності [21 - 25].

У наступних розділах цієї кваліфікаційної роботи більш детально проводиться аналіз зазначених ефектів нелінійності.

Зокрема, у третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано аналіз виникнення та впливу нелінійних ефектів SBS і SRS на параметри ОСЗ. Як уже зазначалося, ці ефекти зумовлені процесами розсіювання в ОВ і мають помітний вплив на допустимі рівні оптичної потужності та якість передачі сигналу.

Показано, що ефект SBS обмежує максимальну оптичну потужність, що передається по волокну. При перевищенні порогового рівня в ОВ збуджується акустична хвиля, що призводить до зміни показника заломлення і виникнення зворотної стоксової хвилі, внаслідок чого корисна потужність, що передається, зменшується. Вказано, що для лінії довжиною близько 10 км типовий поріг SBS становить 6...10 дБ, а його перевищення супроводжується зростанням втрат і збільшенням інтенсивності шуму, що погіршує показники BER. Встановлено, що поріг SBS залежить від спектральної ширини джерела випромінювання, довжини ОВ і параметрів сигналу, що передається. При цьому при високих швидкостях передачі ймовірність прояву ефекту знижується.

Наголошено, що основними методами зниження впливу SBS є обмеження оптичної потужності, що вводиться, застосування фазової модуляції та збільшення спектральної ширини лазерного джерела. Найпоширенішим є останній підхід, який реалізується з використанням зовнішньої або примусової модуляції лазерів, що дозволяє істотно підвищити поріг SBS.

Показано, що ефект SRS за механізмом прояву є схожим з SBS, проте характеризується ширшим спектром і істотно вищим порогом потужності. На відміну від SBS, ефект SRS спостерігається як для зустрічних, так і для співнаправлених хвиль і не обмежує введену у волокно оптичну потужність. Встановлено, що для сучасних оптичних волокон поріг SRS перевищує 30 дБ і також залежить від довжини лінії.

Зазначено, що ефект SRS відіграє важливу роль в сучасних ОСЗ завдяки можливості реалізації EDFA-підсилення в широкій смузі довжин хвиль, що робить його перспективним для систем на основі технології DWDM. Разом з тим при використанні підсилювачів EDFA необхідно враховувати ймовірність виникнення перехресних завад між спектрально мультиплексованими каналами.

Відповідно у четвертому розділі цієї роботи виконано аналіз впливу нелінійних спотворень, які обумовлені залежністю показника заломлення волокна від рівня оптичної потужності, що вводиться, на параметри ОСЗ. Розглянуті основні нелінійні ефекти цього типу, включаючи FWM, SPM, CPM та MI.

Показано, що FWM виникає в ОСЗ на основі WDM при взаємно близькому розташуванні оптичних каналів і призводить до появи інтермодуляційних складових, що погіршують завадостійкість системи. Встановлено, що рівень FWM визначається міжканальним інтервалом і хроматичною дисперсією ОВ, при цьому збільшення інтервалу і використання волокон з ненульовою дисперсією сприяють зниженню даного ефекту. Зазначено, що при великій кількості каналів ефективним способом придушення FWM є усунення умов його виникнення.

Ефект SPM проявляється при підвищених рівнях оптичної потужності і призводить до нелінійного розширення спектра імпульсу без зміни його тривалості. Цей ефект є найбільш характерним для високошвидкісних ОСЗ з малими тривалостями оптичних імпульсів.

Ефект CPM є характерним для систем WDM. Він викликає аналогічні, але більш виражені спотворення і у більшій мірі залежить від дисперсійних властивостей ОВ, а також призводить до появи часового джиттера.

Зниження впливу SPM і CPM досягається за рахунок зменшення оптичної потужності і застосування волокон зі збільшеною ефективною площею поперечного перерізу.

Ефект МІ спостерігається тільки в ОВ з позитивною дисперсією і проявляється у вигляді невеликих піків на імпульсах (часове подання) або як розширення спектру імпульсу (спектральне подання). Зазначено, що поява піків на імпульсах пов'язана з ефектом самовпливу хвиль.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Филиппов А.В. Особенности развития систем DWDM / А.В. Филиппов, Н.С. Мальцева // МНФ «Технические средства систем управления и связи. Материалы: V Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2021), 14-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2021). – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2021. – С. 57 - 60.
2. Орловский П.А. Технологии достижения высоких скоростей передачи в современных когерентных DWDM-системах связи. / П.А. Орловский // Научный форум «Технические и физико-математические науки»: сб. ст. по материалам XXIII МНПК. – М.: Изд-во «МЦНО», 2019. – С. 31 - 36.
3. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics / Govind P. Agrawal. – Elsevier Inc., USA, 2007. – 529 p.
4. Аверьянов Е.А. Метод компенсации нелинейных искажений сигнала в WDM системах связи на основе теории возмущений и машинного обучения [Электронный ресурс] / Е.А. Аверьянов, А.А. Редюк, О.С. Сидельников, М.А. Сорокина, и др. // Материалы 8-го семинара по волоконным лазерам. – 2018. – С. 239 - 241. Режим доступа: <https://rfl18.iae.nsk.su/articles/115.Аверьянов.pdf>.  
<https://doi.org/10.31868/rfl2018.239-241>
5. Леонов А. Нелинейные искажения и нелинейный шум в когерентных системах связи / А. Леонов, О Наний, В Трещиков // Первая миля. – №4. – 2014. – С. 50 - 55.
6. Кравцов М.Д. Зменшення впливу нелінійних ефектів на параметри передачі у оптичних системах сімейства WDM / М.Д. Кравцов, Ю.М. Колтун // матеріали 13-ої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації». Том 1. – Баку – Харків – Бельсько-Бяла. – 27 - 28 листопада, 2025 р. – С. 96 - 97. DOI: <https://doi.org/10.32620/PI.25.t1>
7. Иванов В.И. Оптические цифровые телекоммуникационные системы: консп. лк. / В.И. Иванов – Самара: ПГУТИ, 2011. – 212 с.
8. Иванов В.И. Спектральное уплотнение ВОЛС: учеб. пособ. / В.И. Иванов – Самара: ПГУТИ, 2011. – 151 с.

9. Основы технологии DWDM [Электронный ресурс] // Компания Т8 – Доступ здійснено 11.12.2025. – Режим доступу: [https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrарx7a89we9in5xc7cf8e86o4a1/T8\\_DWDM\\_basic\\_web.pdf](https://t8.ru/upload/iblock/213/bpaphrарx7a89we9in5xc7cf8e86o4a1/T8_DWDM_basic_web.pdf)
10. Типы оптического волокна [Электронный ресурс] // ВОЛС.Эксперт. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://vols.expert/useful-information/typy-opticheskogo-voлокna/>.
11. Олифер В. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: юбилейное издание / Виктор Олифер, Наталья Олифер. – СПб.: Питер, 2020. – 1008 с.
12. Колпаков И.А. Вопросы и проблемы построения оптических сетей [Электронный ресурс] / И.А. Колпаков, С.Ю. Колгатин, В.А. Нестеркин // Сайт группы компаний «Контур-М». – 2006. – Режим доступу: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat280606>.
13. Колпаков И.А. Критерий выбора оптических передатчиков для HFC-сетей [Электронный ресурс] / И.А. Колпаков, С.Н. Песков // Сайт группы компаний «Контур-М». – 2007. Режим доступу: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat131207>.
14. Джиттер [Электронный ресурс] / А.Н. Игнатов Устройства и системы оптической связи: уч. пособ. – 2013. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/15316449/page:97>.
15. Розорінов Г.М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. / Г.М. Розорінов, Д.О. Соловйов.– К.: Кафедра, 2012. – 344 с.
16. Колтун Ю.М. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Напрямні системи електричного та оптичного зв'язку» (частина 2)» підготовки бакалавра напряму 6.050903 «Телекомунікації» / Ю.М. Колтун. – Харків: ХНУРЕ, каф. ІМІ, 2017. – 237 с.
- 17 Песков С.Н. Искажения в оптических сетях. Часть 1: Искажения в оптических передатчиках. [Электронный ресурс] / С.Н. Песков, З.А.Зима, С.Ю. Колгатин // Сайт группы компаний «Контур-М». – 2005. – Режим доступу: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat020305>.
18. Песков С.Н. Шумы в оптических сетях [Электронный ресурс] / С.Н. Песков, З.А.Зима // Сайт группы компаний «Контур-М» – 2005. – Режим доступу: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat110405>.
19. Шумы и искажения в оптических системах [Электронный ресурс] / «ТВБизнес» – Доступ здійснено 23.11.2025. – Режим доступу: <https://www.tvbs.ru/page/shumy-i-iskazhenija-v-opticheskikh-sistemah.html>.

20. Partha P Mitra, Jason B Stark Nonlinear limits to the information capacity of optical fiber communications [Электронный ресурс] // Bell Laboratories, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ 07974. – 2018. – Режим доступа: <https://repository.cshl.edu/id/eprint/41236/1/0011016v1.pdf>.

21. Песков С.Н. Эффект бриллюэновского рассеяния в оптических сетях [Электронный ресурс] / С.Н. Песков, А.И. Барг, И.А. Колпаков // Сайт группы компаний «Контур-М». – 2005. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat230805>.

22. Песков С.Н. Рамановское рассеяние в оптических волокнах [Электронный ресурс] / С.Н. Песков, А.И. Барг, И.А. Колпаков // Сайт группы компаний «Контур-М» – 2005. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat200905>.

23. Песков С.Н. Нелинейные модуляционные эффекты в оптических волокнах [Электронный ресурс] / С.Н. Песков, А.И. Барг, И.А. Колпаков // Сайт группы компаний «Контур-М». – 2005. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat081105>.

24. Беспрозванных В.Г. Нелинейные эффекты в волоконной оптике: уч. пособ. / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 228 с.

25. Песков С.Н. Эффект четырехволнового смешения в оптических волокнах [Электронный ресурс] / С.Н. Песков, А.И. Барг, И.А. Колпаков // Сайт группы компаний «Контур-М» – 2005. – Режим доступа: <http://www.konturm.ru/helpstat.php?id=stat071105>