

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)

Дослідження параметрів та технічних вимог

до транспортної мережі DWDM

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ІМІМ-22-1

Ольховий Р.Р.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Телекомунікації

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 доц. Харченко Н.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____

(підпис)

Безрук В.М.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

/ Ольховий Р.Р. /

Керівник

/ Харченко Н.А. /

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Ольховому Ростиславу Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження параметрів та технічних вимог до транспортної мережі DWDM

затверджена наказом університету від 23 жовтня 2023 р. № 1233 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 11 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналіз явищ, що впливають на параметри магістральної лінії побудованої на базі технології DWDM. Ділянка мережі, що аналізується, складається з 19 вузлів які представляють собою транспортну лінію передачі даних між містами Харків та Львів. Довжина лінії 1020 км, прокладка кабеля проведена на опорах ЛЕП вздовж залізничної колії. Базове обладнання Huawei Optix BWS 1600g, яке забезпечує логічну топологію – «крапка-крапка». Пропускна здатність системи становить 10 Гбіт/с у одному оптичному каналі. Провести дослідження аномалій що можуть виникати в процесі експлуатації лінії, їх впливу на сигнал, а також визначити методи їх виявлення та контролю.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Вступ

1. Загальні відомості про досліджувану ділянку

2. Організація передачі даних у ВОЛЗ на базі технології DWDM

3. Дослідження параметрів та аномалій лінії Харків-Львів

4. Розділ інформаційної безпеки

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи; характеристика траси; типова структурна схема DWDM; специфіка технічних вимог до мережі DWDM; хроматична дисперсія; поляризаційна модова дисперсія; нелінійні ефекти у волоконній оптиці; контрольно-вимірювальне обладнання; розрахунок лінії зв'язку за згасанням та дисперсією; результуючі значення дисперсії та величини згасання; діаграма рівнів потужності сигналів на ділянці Харків-Львів, висновки

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.	23.10.23	виконано
2	Підбір літератури за темою роботи.	24.10-01.11.23	виконано
3	Загальні відомості про досліджувану ділянку	02.11-20.11.23	виконано
4	Організація передачі даних у ВОЛЗ на базі технології DWDM	21.11-20.12.23	виконано
5	Дослідження параметрів та аномалій лінії Харків-Львів	21.12.23-02.01.24	виконано
6	Розділ інформаційної безпеки	03.01-13.01.24	виконано
7	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту в ЕК	14.01-18.01.24	виконано

Дата видачі завдання 23 жовтня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Харченко Н.А.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 98 с., 34 рис., 18 табл., 15 джерел, 1 додаток.

Об'єкт дослідження – транспортна мережа DWDM.

Мета роботи – аналіз параметрів оптичної транспортної мережі.

Оператори зв'язку для того, щоб залишатися конкурентоспроможними повинні усвідомлювати, що їхні мережі зв'язку потребують постійної модернізації з точки зору підвищення пропускної здатності та гнучкості у різних видах трафіку та послуг що можуть передаватися мережею. Тому, з точки зору можливостей та параметрів передачі, найбільш популярною в даний час є технологія WDM. У технології WDM немає багатьох обмежень та труднощів, властивих технології TDM. Для підвищення пропускної спроможності лінії зв'язку замість збільшення швидкості передачі в оптичному каналі, як це робиться в системах TDM, WDM дозволяють збільшити кількість каналів навіть без заміни оптичного кабелю і обладнання.

У роботі проводилося дослідження впливу різних негативних факторів на оптичну лінію мережі та сигнали що в ній передаються. Відзначено принципи виявлення таких впливів та варіанти боротьби з ними.

ТРАНСПОРТНА ОПТИЧНА МЕРЕЖА, DWDM, МУЛЬТИПЛЕКСОР,
ОПТИЧНИЙ КАНАЛ МОНІТОРИНГУ, НЕЛІНІЙНІ ЯВИЩА, ДИСПЕРСІЯ,
EDFA.

THE ABSTRACT

Explanatory slip 98 p., 34 fig., 18 tab., 15 sources, 1 attach.

Object of research - DWDM transport network.

The purpose of the work - analysis of transport network construction parameters.

In order to remain competitive, communication operators must realize that their communication networks need constant modernization in terms of increased bandwidth and flexibility in the variety of types of traffic and services that can be transmitted through the network. Therefore, in terms of transmission capabilities and parameters, WDM technology is currently the most popular. WDM technology does not have many of the limitations and difficulties inherent in TDM technology. To increase the bandwidth of the communication line, instead of increasing the transmission speed in the optical channel, as is done in TDM systems, WDM allows you to increase the number of channels even without replacing the optical cable and equipment.

The paper investigated the influence of various negative factors on the optical line of the network and the signals transmitted through it. The principles of identifying such influences and options for combating them are noted.

TRANSPORT OPTICAL NETWORK, DWDM, MULTIPLEXER, OPTICAL CHANNEL MONITORING, NONLINEAR PHENOMENA, DISPERSION, EDFA.

ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	10
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДОСЛІДЖУВАНУ ДІЛЯНКУ	13
1.1 Характеристика траси	13
1.2 Аналіз технічних параметрів ділянки	15
1.3 Основні принципи технології DWDM	18
2 ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ВОЛЗ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ DWDM	22
2.1 Специфіка технічних вимог до мережі DWDM	22
2.2 Технології мультиплексування	23
2.3 Джерела випромінювання	32
2.4 Реалізація підсилювачів EDFA	38
2.5 Вибір одномодового оптичного волокна для побудови ВОЛЗ	41
2.6 Компенсатори дисперсії	47
2.7 Завадостійке кодування (FEC). Коди Ріда - Соломона	48
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА АНОМАЛІЙ ЛІНІЇ ХАРКІВ – ЛЬВІВ	51
3.1 Вплив кліматичних умов на параметри ВОЛЗ	51
3.2 Вплив дисперсії та нелінійних ефектів на параметри ВОЛЗ	52
3.2.1 Хроматична дисперсія	52
3.2.2 Поляризаційна модова дисперсія	56
3.2.3 Нелінійність	59
3.3 Моніторинг мережі DWDM. Контрольно-вимірювальне обладнання	65
3.4 Розрахунок лінії зв'язку за згасанням та дисперсією	70
3.5 Аналіз параметрів оптичної лінії	79
4 РОЗДІЛ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ	84
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	89
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ	90

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- AWG – Array Waveguide Grating – ґрати на основі масиву хвилеводів;
- BER – Bit Error Rate – коефіцієнт помилок;
- BFT – Fused Biconic Tapered Coupler – зварний біконічний розгалужувач;
- CPM – Cross-Phase Modulation – перехресна фазова модуляція;
- DBR-лазер – лазерні діоди з розподіленим бреггівським відображенням;
- DCF – Dispersion-Compensating Fibers – волокно із компенсуючою дисперсією;
- DEMUX (або OD) – оптичний демультимплексор;
- DFB-лазер – лазерні діоди з розподіленим зворотним зв'язком;
- DGD – Differential Group Delay – диференціальна групова затримка;
- DSF – волокно зі зміщеною дисперсією;
- DWDM – Dense Wavelength-Division multiplexing – щільні системи спектрального ущільнення каналів;
- EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier – підсилювач сигналів на основі оптичного волокна, легованого ербієм;
- EC-лазер – лазерні діоди з зовнішнім резонатором;
- FP-лазери – Fabry-Perot Laser – лазерні діоди із резонатором Фабрі-Перо;
- FWM – Four-Wave Mixing – чотирихвильове змішування;
- ITU-T – International Telecommunications Union-Telecommunications standardization sector - Міжнародний Союз електрозв'язку - Сектор стандартизації для телекомунікацій; випускає "рекомендації" стандартних протоколів;
- MUX (або OM) – оптичний мультиплексор;
- NZDSF – волокно зі зміщеною ненульовою дисперсією;
- OADM – Optical Add Drop Multiplexor – оптичний мультиплексор вводу/виводу;
- OSA – оптичний аналізатор спектру;
- OSC – Optical Supervisory Channel – виділений контрольний оптичний канал;
- OTDR – Optical Time Domain Reflectometer – оптичний рефлектометр;
- PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy – плезіохронна цифрова ієрархія

PMD – Polarization mode dispersion – поляризаційна модова дисперсія;
QoS – Quality of Service - якість обслуговування - концепція, що забезпечує виділення мережевих ресурсів, необхідні роботи програми;
SDH – Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія;
SF – оптичне волокно;
STM – Synchronous Transfer Mode - синхронний транспортний модуль;
TCP – Transmission Control Protocol – протокол контролю передачі;
TDM – Time-division multiplexing – мультиплексування за часом;
WDM – Wavelength Division Multiplexing – технологія хвильового мультиплексування оптичних каналів;

АМТС – автоматична магістральна телефонна станція;
ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку;
ЛП – лінійний підсилювач;
ОВ – оптичне волокно;
ПВ – периферійний вузол ММЗ;
ПОМ – передавальні оптичні модулі;
ПП – передпідсилювач.

ВСТУП

Нині системи зв'язку стали однією з основ розвитку суспільства. Попит на послуги зв'язку, від звичайного телефонного зв'язку до широкосмугового доступу до Інтернету, постійно зростає. Це висуває нові вимоги до сучасних мереж зв'язку, їхньої пропускної спроможності, надійності, гнучкості. Найбільшою мірою ці вимоги задовольняють мережі передачі даних на основі волоконно-оптичних ліній зв'язку, які мають величезну пропускну здатність.

Мережеві цифрові технології розвивалися досі паралельно для глобальних і локальних мереж. Технології глобальних мереж були в основному орієнтовані на розвиток цифрових телефонних мереж, що використовувалися для передачі голосу. Технології локальних мереж – навпаки, використовувалися, переважно, для передачі даних. Розвиток цифрових телефонних мереж йшов по лінії ущільнення каналів як за рахунок мультиплексування низькошвидкісних первинних каналів T1, так і за рахунок використання раціональніших методів модуляції, що дозволили застосовувати для передачі голосу сигнали з нижчими ніж 64 кбіт/с (основний цифровий канал – ОЦК) швидкостями: 40 , 32, 24, 16, 8 та 5,6 кбіт/с. Розвиток схем мультиплексування призвів до виникнення трьох цифрових ієрархій з різними (для різних груп країн) рівнями стандартизованих швидкостей передачі або каналів: DS2 або T2/E2, DS3 або T3/E3, DS4 або T4/E4. Ці ієрархії, названі плезіохронними (тобто майже синхронними) цифровими ієрархіями (PDH), широко використовувалися і продовжують використовуватися як для цифрової телефонії, так і для передачі даних.

У 1984 році було розроблено технологію синхронної цифрової ієрархії компанією Bellcore під назвою «Синхронні оптичні мережі» – SONET.

Основною метою розробників міжнародного стандарту було створення такої технології, яка дозволяла б передавати трафік всіх існуючих цифрових каналів (як американських T1-T3, так і європейських E1-E3) у рамках високошвидкісної магістральної мережі на волоконно-оптичних кабелях та забезпечила б ієрархію швидкостей сумісну з PDH, та можливістю підвищувати швидкості до кілька гігабіт на секунду [1].

В результаті тривалої роботи вдалося розробити міжнародний стандарт Synchronous Digital Hierarchy, SDH (специфікації G.707-G.709), а також доопрацювати стандарти SONET таким чином, що апаратура та стеки SDH та SONET стали сумісними та можуть мультиплексувати вхідні потоки практично будь-якого стандарту PDH [1].

В основі даних технологій закладено метод часового поділу інформаційних потоків (TDM – time division multiplexing) із формуванням синхронних транспортних модулів STM-N (N=1, 4, 16, 64, 256) із швидкостями передачі інформації відповідно: STM-1 – 155 Мбіт/с, STM-4 – 622 Мбіт/с, STM-16 – 2,5 Гбіт/с, STM-64 – 10 Гбіт/с, STM-256 – 40 Гбіт/с. Ця технологія передбачає об'єднання кількох вхідних низькошвидкісних потоків в один складений високошвидкісний канал (агрегатний потік). Використання технології TDM дозволило збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних ліній зв'язку до 10 Гбіт/с (STM-64) [1].

Бурхливий розвиток інтернету та інформаційних технологій вимагав впровадження широкосмугових систем і, як наслідок, модернізації систем TDM. Спочатку процес розвитку пішов екстенсивним шляхом за рахунок нарощування швидкості передачі: STM-1, STM-4, STM-16, STM-64. Однак незабаром з'ясувалося, що цей шлях є тупиковим, насамперед з технічних міркувань: вкрай складна і дорога модуляція передавальних лазерів, девіація їх частоти випромінювання, зменшення співвідношення сигнал-шум, посилення впливу дисперсії на високих швидкостях. Вирішити протиріччя допомогла властивість оптичного волокна: можливість передачі на кількох довжинах хвиль одночасно. З технічної точки зору, прорив був пов'язаний зі створенням підсилювачів сигналів на основі оптичного волокна, легованого ербієм (EDFA).

Цей новий спосіб передачі інформації з оптичного волокна отримав назву "технологія хвильового мультиплексування оптичних каналів" (wavelength division multiplexing - WDM), або "технологія спектрального ущільнення каналів". У технології WDM немає багатьох обмежень та труднощів, властивих технології TDM. Для підвищення пропускну спроможності лінії зв'язку замість збільшення швидкості передачі в оптичному каналі, як це робиться в системах TDM, WDM дозволяють збільшити кількість каналів (в даному випадку - довжин хвиль), що застосовуються в системах передачі. При цьому в певних випадках технологія WDM дозволяє збільшити пропускну спроможність

існуючої мережі без заміни оптичного кабелю і обладнання, що дорого замінює. Працювати з кількома каналами в одному волокні набагато зручніше, ніж з кількома волокнами, так як для обробки будь-якого числа каналів у волокні потрібно лише один мультиплексор WDM, один демуплексор WDM і кількість оптичних підсилювачів, що відповідає відстані [1].

У даній кваліфікаційній роботі розглядаються основні аспекти застосування технології DWDM на ділянці мережі великої протяжності. При цьому особлива увага приділяється аналізу параметрів ВОЛЗ і аномалій, що виникають у процесі експлуатації мережі, їх впливу на сигнал, що передається, а також методам їх виявлення та контролю.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ДОСЛІДЖУВАНУ ДІЛЯНКУ

У цьому розділі наведено загальні відомості про досліджувану ділянку мережі Харків – Львів та його технічні специфікації (характеристики кабелю та обладнання), а також основні принципи технології хвильового мультиплексування.

1.1 Характеристика траси

Для дослідження в даній кваліфікаційній роботі було обрано ділянку оптичної мережі Харків – Львів завдовжки 1020 км, побудовану з використанням технології DWDM. Він пролягає вздовж залізничної лінії Харків – Київ – Ужгород. Схема траси ділянки наведено рис. 1.1.

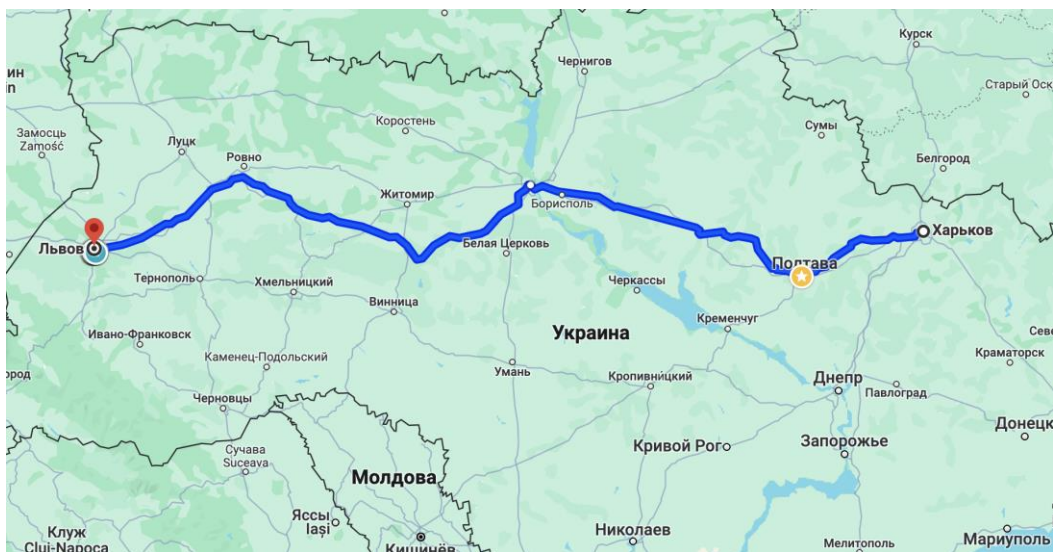


Рисунок 1.1 – Схема ділянки Харків – Львів

Ділянка мережі проходить територіями Харківської, Полтавської, Київської, Житомирської, Хмельницької Рівненської та Львівської областей (детальніше характеристика траси наведена у табл. 1.1). У цих районах панує помірно-континентальний клімат, який характеризується відносно великими амплітудами коливань температур (як річних, так і добових). Вказані області розташовані у глибині материка, і тому на їх клімат значний вплив мають континентальні повітряні маси. Вони несуть суху погоду. Узимку сюди

проникають відроги сибірського антициклону, які приносять холодну погоду, а влітку, коли він відступає, має вплив азорський максимум. Навесні і на початку осені на територію області проникає континентальне арктичне повітря, яке приносить різке похолодання.

Таблиця 1.1 - Загальна характеристика траси Харків - Львів

Станція	Відстань, км	Населений пункт	Населення на 2022 рік, тис. чол.
Харків-Пас.	0	м. Харків (обл. центр)	1100
Люботин	25	м. Люботин (Харківський р-н)	20
Шарівка	82	смт Шарівка (Богодухівський р-н)	1,6
Скороходове	100	смт Скороходове (Чутівський р-н)	3,2
Полтава	143	м. Полтава (обл. центр)	280
Покровське	181	с. Покровське (Решетилівський р-н)	2,3
Миргород	245	м. Миргород (рай. центр)	37
Лубни	280	м. Лубни (рай. центр)	44
Яготин	384	м. Яготин (Бориспільський р-н)	19
Київ	479	м. Київ (обл. центр)	2950
Фастів	546	м. Фастів (рай. центр)	45
Бердичів	661	м. Бердичів (рай. центр)	73
Шепетівка	753	м. Шепетівка (рай. центр)	40
Славута	767	м. Славута (Шепетівський р-н)	35
Здолбунів	817	м. Здолбунів (Рівненський р-н)	24
Дубно	855	м. Дубно (рай. центр)	36
Броди	918	м. Броди (Золочівський р-н)	23
Красне	976	смт. Красне (Золочівський р-н)	6,4
Львів-Пас.	1020	м. Львів (обл. центр)	717

Середньорічна температура коливається від 6,9°C у центральній частині областей до 7,4°C на півночі і півдні. Найтепліший місяць - липень, найхолодніший - січень. Улітку середні температури найвищі в південній частині області (18,8°C), а найнижчі - у центральній і західній частинах (18,0°... 18,5°C). У січні температури повітря в центральній частині дещо нижчі (-5,4°C) від температур в інших частинах області (-4,5... -5°C) [2].

Такі відмінності у величинах температур пояснюються особливостями рельєфу. Найнижчі показники температур повітря в центральній частині області значною мірою визначаються тим, що це - найбільш підвищена, безліса частина височини. Дещо вищі - температури січня і доволі високі температури липня в північній частині області пояснюються розміщенням її в зниженні (Мале Полісся), яке з півночі і з півдня оточене уступами Подільської і Волинської височин [2].

В усі пори року територія області перебуває під впливом циклонів, які формуються над Атлантичним океаном. Вторгнення на територію області континентальних мас повітря призводить до значних коливань температури в усі пори року. Улітку температура може підніматися до $+37^{\circ}\text{C}$, а взимку - опускатися до -34°C .

1.2 Аналіз технічних параметрів ділянки

На всій магістральній мережі використовується обладнання китайської фірми «Huawei Technologies». На ділянці Харків - Львів експлуатується система Huawei OptiX BWS 1600G.

Optix BWS 1600G – різновид обладнання DWDM великої ємності для магістральних каналів. Модульна конструкція, підтримка різноманітних конфігурацій та гнучкі можливості резервування дозволяють системі OptiX BWS 1600G займати провідну роль на ринку обладнання для оптичних мереж передачі. Система розроблена на основі розвинених та вдосконалених технологій, і знайшла своє застосування у багатьох магістральних транспортних мережах національного та міжміського рівнів. Завдяки модульному дизайну, система OptiX BWS 1600G може легко перейти від використання 40 довжин хвиль до 80, 120, 160 довжин хвиль. Під час розширення системи немає потреби вимикати обладнання або переривати надання послуг. Необхідно лише встановити нові апаратні засоби або новий вузол. У типовій конфігурації з резервуванням навіть додавання вузла OADM не вплине на роботу системи [3].

Двонаправлена передача здійснюється за двома оптичними волокнами: одне оптоволокно використовується для передачі, а інше для прийому. Використання мультиплексорів/демультиплексорів AWG-типу, ербієвих волоконно-оптичних підсилювачів, підсилювачів Рамана, джерел сигналів зі стабільними довжинами хвиль, функції балансування потужності каналів, усунення чірпування, компенсація дисперсії, універсальна та централізована система управління мережею – все це робить систему OptiX надійною з точки зору робочих характеристик та гнучкою з точки зору організації мережі.

Система управління мережею передачі NMS T2000 (NMS – network management system), розроблена компанією Huawei, підтримує наскрізне

керування каналами (довжинами хвиль), статистичний аналіз ресурсів довжин хвиль, керування аварійною сигналізацією, керування робочими характеристиками та технічним обслуговуванням обладнання тощо [3].

Технічні характеристики системи наведено у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики системи DWDM OptiX BWS 1600G

Модель	OptiX BWS 1600G
Діапазон довжин хвиль	C, L
Кількість довжин хвиль у базовій системі	40
Тип використовуваного волокна	Одномодове G.652, G.653, G.655
Можливість збільшення кількості довжин хвиль	До 192
Наявність службового зв'язку	Так, аналогові телефони
Система управління	NMS T2000
Інтерфейси	Fibre Channel 1 Gbps; Gigabit Ethernet; SDH (STM-16/64), SONET: OC-48c/192c; 10 Gigabit Ethernet
Рознесення несучих, ГГц	50/100
Транспондери	на фіксовану довжину хвилі; перебудовуються
Побудова OADM	3 виділенням 2xN оптичних каналів чи 40 каналів
Додаткові можливості	Відновлення сигналу 3R; Корекція помилок FEC, AFEC (відповідно до G.709)
Базовий мультиплексор/демультиплексор	На 40 довжин хвиль
Граничний OSNR на ділянці підсилення	17 дБ
Компенсатори дисперсії	На 20, 40, 60, 80 км у C-діапазоні
Оптичні підсилювачі	на 20, 26, 31 дБм; автоматичне регулювання
Канал керування	OSC – керуючий оптичний канал
Резервування	1+1

Термінальні мультиплексори/демультиплексори розташовані на станціях Харків-Пас. та Львів-Пас. Введення/виведення потоків передбачено на станціях Полтава, Миргород, Фастів, Бердичів, Славута та Дубно. На станції Шепетівка розміщено регенератор.

Оптичний тракт побудований за допомогою кабелю марки Lankore UT-024 SM ADSS 1,0кн. Оптичне волокно, що використовується – NZDSF Corning

LEAF (відповідно до річок МСЕ-Т G.655). Кабель прокладений методом підвісу на опорах контактної мережі залізниці. Конструкція кабелю показана рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Конструкція оптичного кабелю марки Lankore UT-024 SM

Характеристики кабелю наведено у табл. 1.3, характеристики волокна – у табл. 1.4.

Таблиця 1.3 - Характеристики оптичного кабелю марки Lankore UT-024 SM ADSS

Кількість оптичних волокон в кабелі	24
Діаметр кабелю, мм	7,0
Вага кабелю, кг/км	35
Мінімальний радіус вигину, мм	190,5
Стійкість до поздовжнього розтягування, кН	6
Стійкість до зусилля, що роздавлює, кН/см	0,3
Стійкість до удару, Дж	5
Робоча температура	-60°C...+70°C
Температура монтажу	-30°C...+50°C
Строк служби	25 років
Оптичне волокно	Одномодове, з позитивною ненульовою зміщеною дисперсією (рек. МСЕ-Т G.655)
Максимальний потенціал, кВ	25

Таблиця 1.4 – Характеристики оптичного волокна Corning LEAF

Тип волокна	Одномодове, з ненульовою зміщеною дисперсією (рек. МСЕ-Т G.655)
Робочий діапазон довжин хвиль, нм	1530-1625
Максимальне згасання, дБ/км	0,25
Коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм.км), в інтервалі довжин хвиль (1530-1565) нм, за абсолютною величиною	4
Поляризаційна модова дисперсія (ПМД), пс/км	0,1
Діаметр модової плями на довжині хвилі 1550 нм, мкм	9,6±0,4
Діаметр оболонки, мкм	125±0,7
Неконцентричність серцевини та оболонки, мкм, не більше	0,5
Некруглість оболонки, %, трохи більше	0,7
Діаметр покриття, мкм	242±5
Неконцентричність оболонки та покриття, мкм, не більше	12

1.3 Основні принципи технології DWDM

Історично першими виникли двоухвильові WDM-системи, що працюють на центральних довжинах хвиль з другого та третього вікон прозорості кварцового волокна (1310 та 1550 нм). Головною перевагою таких систем є те, що через великий спектральний рознос повністю немає впливу каналів один на одного. Цей спосіб дозволяє або подвоїти швидкість передачі по одному оптичному волокну, або організувати дуплексний зв'язок [5].

Сучасні WDM-системи на основі стандартного частотного плану (ITU-T Rec. G.692) можна поділити на три групи:

- грубі WDM (Coarse WDM - CWDM) системи з частотним рознесенням каналів не менше 200 ГГц, що дозволяють мультиплексувати не більше 18 каналів (працюють у смузі від 1270 до 1610 нм);

- щільні WDM (Dense WDM - DWDM) системи з рознесенням каналів щонайменше 100 ГГц. Щільне спектральне мультиплексування дозволяє одночасно передавати по одному оптичному волокну до 160 незалежних інформаційних каналів різних оптичних несучих (довжинах хвиль);

- високощільні WDM (High Dense WDM - HDWDM) системи з рознесенням каналів 50 ГГц і менше, що дозволяють мультиплексувати не менше 64 каналів [5].

Частотний план DWDM-систем визначається стандартом ITU G.694.1. Відповідно до рекомендацій ITU в DWDM системах використовуються "С" (1525...1565 нм) та "L" (1570...1610 нм) вікна прозорості. Кожен діапазон потрапляють по 80 каналів з кроком 0.8 нм (100 ГГц). Зазвичай використовується тільки С-діапазон, оскільки кількість каналів, які можна організувати в цьому діапазоні, так вистачає з надлишком, до того ж загасання в волокні стандарту G.652 в С-діапазоні трохи нижче, ніж в L-діапазоні [5].

На рис. 1.3 зображено діапазон частот, що застосовуються у системі WDM.

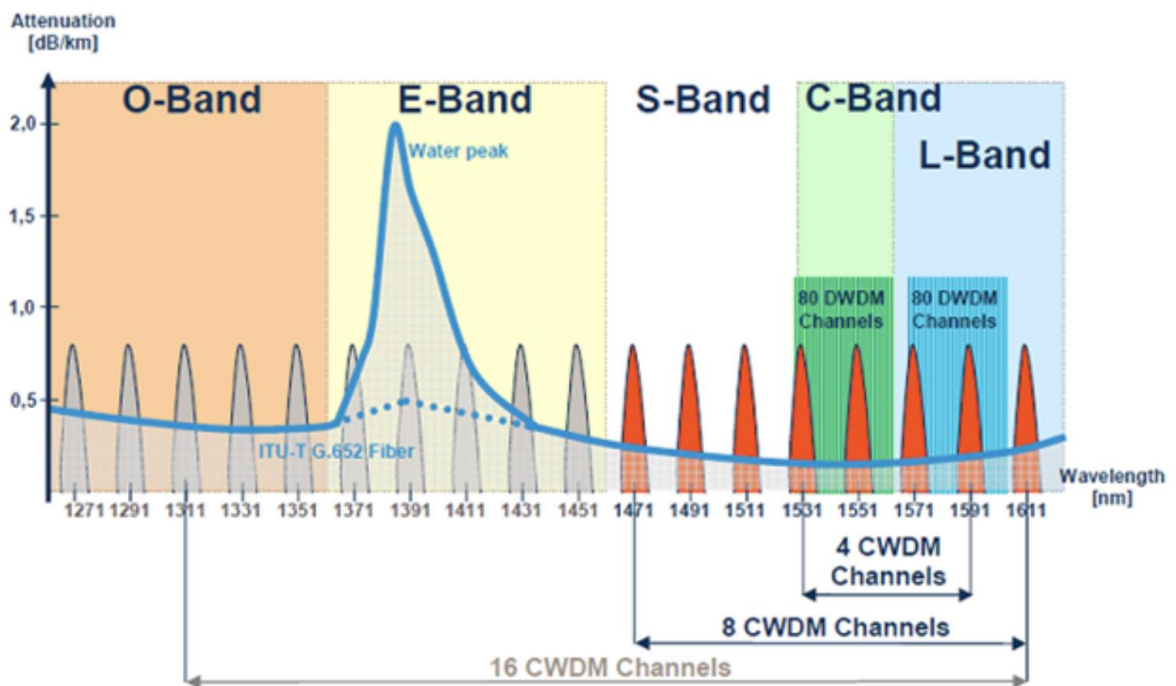


Рисунок 1.3 – Діапазон частот системи WDM

Принципова схема DWDM досить проста. Сигнали різних довжин хвиль, що генеруються одним або декількома оптичними передавачами, об'єднуються мультиплексором у багатоканальний складений оптичний сигнал, який далі поширюється по оптичному волокну. При великих відстанях передачі лінії зв'язку встановлюється один чи декілька оптичних підсилювачів. Демультиплексор приймає складений сигнал, виділяє з нього вихідні канали різних довжин хвиль та спрямовує їх на відповідні фотоприймачі. При

необхідності на проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені зі складеного сигналу за допомогою мультиплексорів вводу/виводу (OADM) або пристроїв крос-комутації.

Типова структурна схема DWDM наведена рис. 1.4.

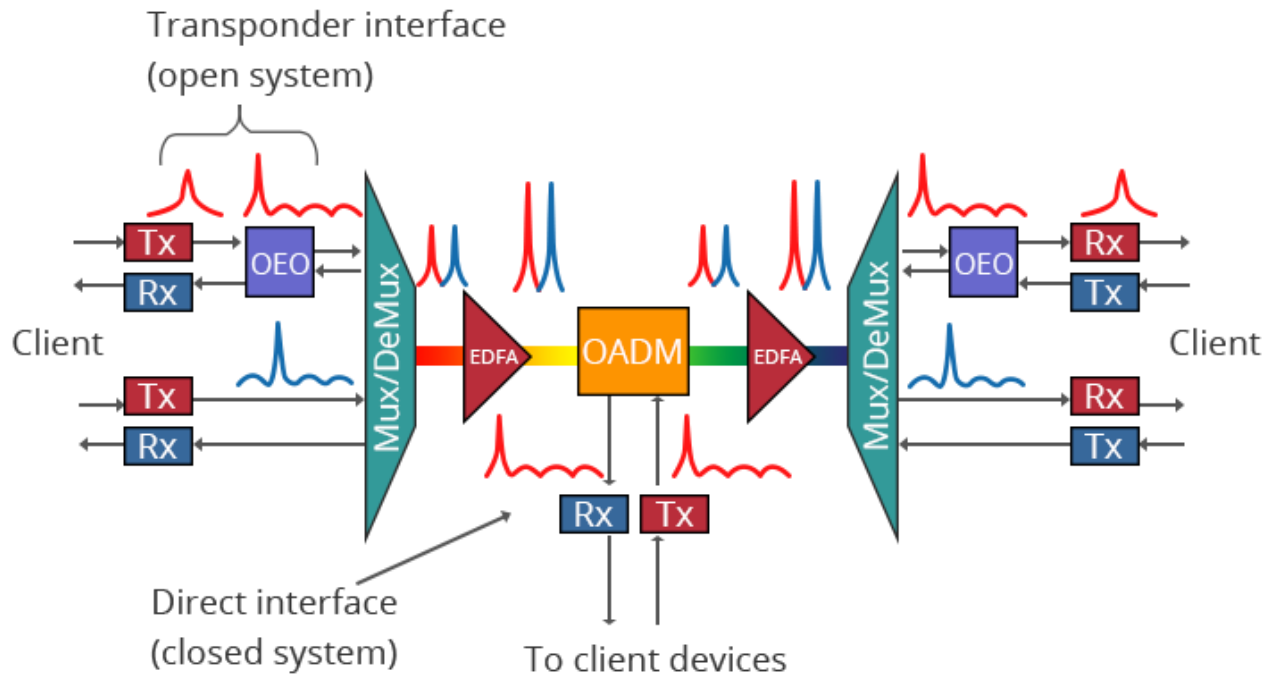


Рисунок 1.4 – Типова структурна схема DWDM

Головна перевага технології DWDM полягає в тому, що вона дозволяє подолати обмеження на пропускну здатність каналу та суттєво збільшити швидкість передачі даних. Причому використовуються вже прокладений волоконно-оптичний кабель та стандартна апаратура часового мультиплексування, а збільшувати швидкість передачі окремим каналом вище 10 Гбіт/с не потрібно. Завдяки WDM вдається організувати двосторонню багатоканальну передачу трафіку по одному волокну (у звичайних лініях використовується пара волокон – для передачі у прямому та зворотному напрямках).

Істотно і те, що в мережах SONET/SDH з'явилася можливість вибирати для окремого каналу значення швидкості (рівень ієрархії), яка не залежатиме від швидкості інших каналів, та використовувати різні методи передачі. Нарешті, поширенню DWDM сприяють останні технологічні досягнення: створення вузькосмугових напівпровідникових лазерів, що мають ширину

спектра випромінювання менше 0,1 нм, оптичних підсилювачів і оптичних фільтрів для розподілу близьких каналів.

Технологія WDM є універсальним вирішенням проблеми збільшення пропускної спроможності. Тим часом її застосування гальмується низкою факторів як економічного, так і суто технічного характеру.

Якщо говорити про економічну сторону, то впровадження DWDM у місцевих мережах стримується високою вартістю відповідної апаратури, особливо передавальних пристроїв, та складністю комутації трафіку. Разом з тим, дослідження показують, що рішення на базі DWDM можуть виявитися економічно ефективними і в мережах меншого масштабу. Для цього, зокрема, у них повинні застосовуватися недорогі мультиплексори вводу/виводу, які встановлюються у місцях сполучення місцевих та опорних мереж.

Фактор високої вартості апаратури виявляється ще важливішим для реалізації технології DWDM. При використанні близьких частот потрібні вузькосмугові напівпровідникові лазери з високою стабільністю довжини хвилі випромінювання, що генерується, які є найбільш дорогим елементом DWDM-систем, і це поки що стримує їх поширення у невеликих міських мережах.

Серед технічних проблем слід згадати значні втрати потужності сигналів у мультиплексорах/демультиплексорах, розбіжність, у багатьох випадках, робочих довжин хвиль WDM-обладнання та пристроїв часового мультиплексування, необхідність підвищення продуктивності вузлів комутації, ускладнення управління мережею через відмінності в технологіях передачі даних по мультиплексу каналів; відсутність промислових стандартів. Нарешті, не останнє місце у цьому переліку займають нелінійні явища, які за одночасної передачі кількох несучих здатні приводити як до ослаблення і спотворення сигналу, так і до його проникнення в інші канали, а це вже призводить до їх спотворення.

2 ОРГАНІЗАЦІЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У ВОЛЗ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ DWDM

У цьому розділі розглянемо і опишемо принципи організації передачі даних у ВОЛЗ, побудованих з використанням технології DWDM. Тут визначено специфіку технічних вимог до мережі DWDM, описано технологічні рішення, що застосовуються в мережевому обладнанні, розглянуто характеристики різних типів одномодових оптичних волокон та аспекти застосування завадостійкого кодування.

2.1 Специфіка технічних вимог до мережі DWDM

Основна вимога до компонентів систем DWDM полягає в тому, що вони повинні однаково обробляти всі канали протягом усього оптичного шляху лінії зв'язку. Для цього потрібно проводити ретельний вибір оптичних передавачів, мультиплексорів, підсилювачів та волокон.

Всі оптичні характеристики пасивних і активних компонентів мережі - втрати, що вносяться, втрати на відображення, дисперсія, поляризаційні ефекти і т.д. повинні вимірюватися як функція довжини хвилі у всьому діапазоні довжин хвиль, що використовується для передачі в системі DWDM. У системах DWDM часто використовують значно складніші пристрої, ніж у системах з однією робочою довжиною хвилі, і проводити тестування характеристик таких пристроїв набагато складніше. У мультиплексорах та вузькосмугових фільтрах систем DWDM використовуються тонкоплівкові фільтри, зварні біконічні розгалужувачі BFT (Fused Biconic Tapered Coupler), ґрати на основі масиву хвилеводів AWG (Array Waveguide Grating), волоконні бреггівські та звичайні дифракційні. Необхідно дослідити вплив активних компонентів (особливо оптичних підсилювачів) та взаємної інтерференції каналів на цілісність переданих сигналів для мінімізації потенційної можливості їх несприятливого впливу [6].

Незважаючи на те, що всі матеріали та компоненти при виробництві тестуються на відповідність стандартам, можливе погіршення їх характеристик за безпосередньої установки в польових умовах. При об'єднанні окремих

компонентів у єдину систему, невеликі відмінності їхніх характеристик можуть накопичуватися та непередбачуваним чином впливати на параметри мережі загалом. Для забезпечення гарантованої надійності мережі необхідно виконувати тестування не тільки кожного компонента окремо, але і всієї системи в цілому.

Тестування компонентів може спричинити багато складнощів. Різниця довжин хвиль сусідніх каналів у системах DWDM дуже мала, і параметри багатьох компонентів (наприклад, мультиплексорів) повинні відповідати межам допустимих відхилень. При великій кількості каналів спектральний діапазон, що використовується, стає досить широким, і підтримка близьких значень параметрів для всіх каналів (коефіцієнта посилення, дисперсії, рівня внесених шумів і т.д.) стає досить складним завданням.

Для того, щоб компоненти систем WDM були взаємозамінними і могли взаємодіяти між собою, у системах WDM необхідно використовувати стандартний набір частот генерації лазерів. Усіми питаннями, пов'язаними зі стандартизацією систем WDM, займається міжнародний орган стандартизації – сектор стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку ITU-T (International Telecommunications Union, ITU) у рамках дослідницької групи SG15 з транспортних мереж, систем та обладнання (Study Group 15 on Transport Networks, Systems and Equipment). Специфікації ITU-T G.692 щодо оптичних інтерфейсів для багатоканальних систем з оптичними підсилювачами визначає стандартний набір частот – частотний план систем WDM [7].

Частотний план ITU – це набір стандартних частот з урахуванням базової частоти 193100 ГГц. Стандартні частоти розташовуються вище та нижче цієї частоти з частотним інтервалом 50-100 ГГц.

2.2 Технології мультиплексування

Кожен лазерний передавач у системі WDM видає сигнал однієї із заданих частот. Всі ці сигнали (канали) необхідно мультиплексувати (об'єднати один з одним) у єдиний складений сигнал. Пристрій, який виконує цю функцію, називається оптичним мультиплексором MUX (або OM). Аналогічний пристрій на іншому кінці лінії зв'язку розподіляє складений сигнал на окремі канали та називається оптичним демультимплексором DEMUX (або OD). На відміну від

систем TDM, у яких подібні операції ущільнення каналів відбуваються в часовій області, і основна увага приділяється точності синхронізації приймача та передавача, в системах WDM мультиплексуванню та демультимплексуванню піддаються спектральні компоненти окремих сигналів, характеристики яких завжди відомі заздалегідь.

На рис. 2.1 схематично показані WDM-мультиплексор та демультимплексор.

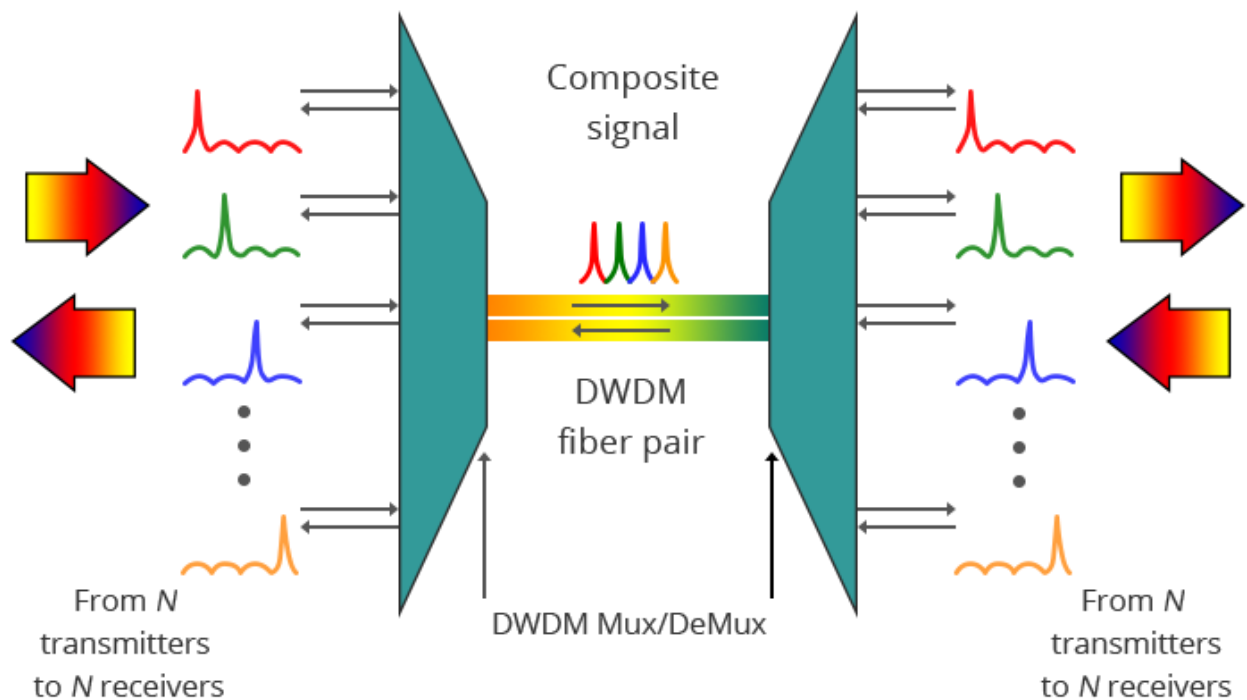


Рисунок 2.1 – Мультиплексор та демультимплексор

Сучасні оптичні мультиплексори створюються переважно на основі тонкоплівкових фільтрів і, трохи рідше – на матрицях хвильоводних дифракційних решіток та волоконних бреггівських ґратах. При подальшому збільшенні щільності розміщення каналів у системах DWDM та посиленні вимог до оптичних пристроїв MUX/DEMUX, мабуть, змінюватиметься і спектр використовуваних технологій [6].

Тонкоплівковий фільтр складається з декількох шарів прозорого діелектричного матеріалу з різними показниками заломлення, послідовно нанесених один за одним на оптичну підкладку. На кожній межі поділу між шарами через різницю їх показників заломлення частина падаючого світлового пучка відбивається назад. Це відображене світло посилює або пригнічує

падаючу хвилю (відбита хвиля інтерферує з падаючою) залежно від її довжини. Належно підібравши показник заломлення і товщину кожного шару, можна отримати фільтр, який пропускатиме будь-який заданий діапазон довжин хвиль і відбиватиме всі інші [6].

На рис. 2.2 схематично показаний принцип роботи тонкоплівкового фільтра. I_1 - хвиля, що падає; I_2 – відбита; I_3 – та що пройшла крізь фільтр.

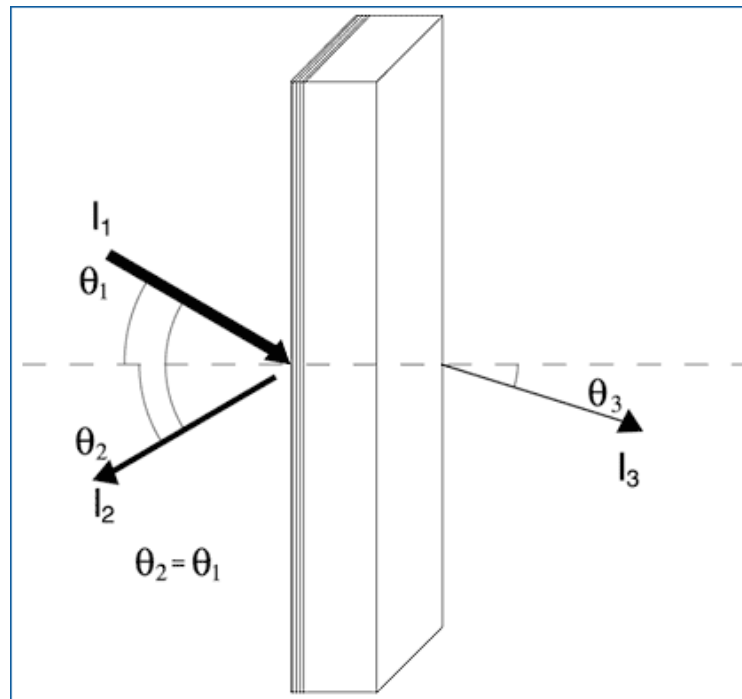


Рисунок 2.2 – Принцип роботи тонкоплівкового фільтра

Вибір діелектричних матеріалів обмежений, оскільки багато матеріалів з гарними оптичними властивостями мають фізичні якості, далекі від необхідних. У загальному випадку, чим жорсткіші вимоги до фільтра, тим більше шарів необхідно нанести на підкладку. Незважаючи на складності, ця технологія дозволяє, незначно змінюючи процес виробництва, створювати недорогі фільтри з різними спеціальними спектральними властивостями.

У мультиплексорах і демультиплексорах зазвичай використовуються одноступінчасті тонкоплівкові фільтри, кожен з яких виділяє зі складеного сигналу (або додає до нього) один канал. Фільтри розташовані під нахилом до оптичної осі, щоб відбите світло не потрапляло назад у систему. Похиле розташування фільтрів змінює ефективну товщину шарів і змінює таким чином смугу пропускання, що необхідно враховувати при проектуванні фільтрів. Для обробки багатохвильових сигналів використовують багатоступінчасті системи

фільтрів, у яких світло, відбите від кожного фільтра, потрапляє на вхід наступного фільтра, що надає виняткову важливість питанню їх вирівнювання (рис. 2.3) [6].

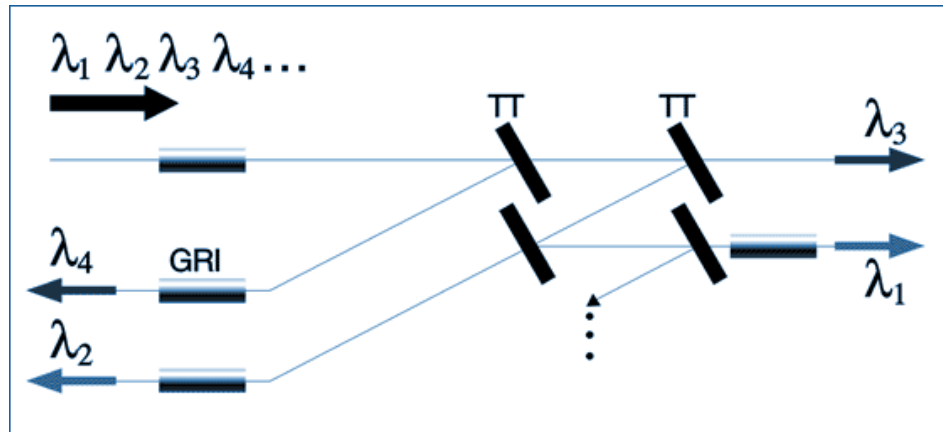


Рисунок 2.3 – Багатоступінчаста система тонкоплівкових фільтрів для демультиплексування складеного сигналу

Тонкоплівкові фільтри мають досить вузьку смугу пропускання і використовуються в системах WDM з 16 або 32 каналами. У сучасних системах із більш щільним розташуванням каналів використовують інші технології.

Волоконні бреггівські ґрати – це, по суті, оптичний інтерферометр, вбудований у волокно. Волокно, леговане деякими речовинами (зазвичай германієм), може змінювати показник заломлення під впливом ультрафіолетового світла. Якщо опромінити таке волокно ультрафіолетовим випромінюванням з певною просторовою періодичною структурою, то волокно перетворюється на свого роду дифракційну решітку. Іншими словами, це волокно практично повністю відображатиме світло певного, наперед заданого діапазону довжин хвиль, і пропускатиме світло всіх інших довжин хвиль, як показано на рис. 2.4.

Центральна довжина хвилі фільтра на основі регулярної волоконної бреггівської решітки визначається її періодом, смуга пропускання обернено пропорційна її довжині. Обидва параметри залежать від температури, тому такі фільтри повинні бути поміщені в термостат або інший пристрій, що контролює температуру [6].

Волоконна бреггівська решітка може використовуватися як оптичний фільтр у пристроях мультиплексування та демультиплексування, як

компенсатор хроматичної дисперсії, або у комбінації з циркуляторами в мультиплексорах введення/виведення каналів.

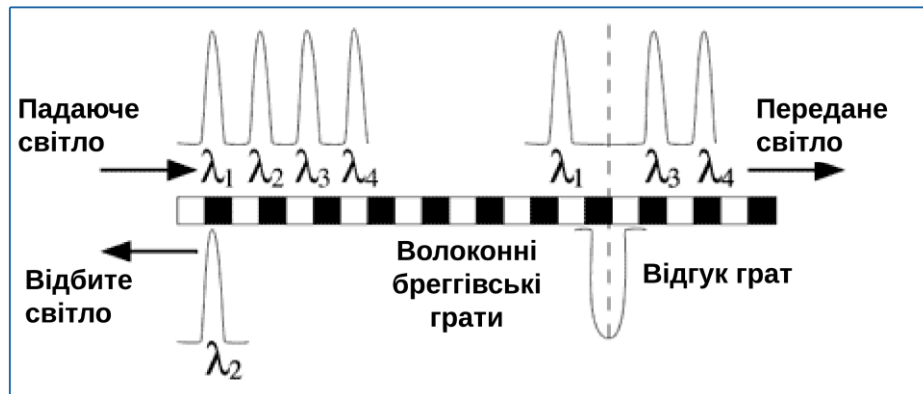


Рисунок 2.4 – Волоконні бреггівські ґрати, що виділяють зі складеного сигналу канал певної довжини хвилі

У мультиплексорах введення/виведення каналів волоконна бреггівська решітка може використовуватися разом із двома циркуляторами. З боку порту виведення каналу циркулятор виділяє відбиту хвилю і спрямовує в порт виведення (рис. 2.5, зліва). З боку порту введення циркулятор додає в складний сигнал, що передається, один канал на тій же довжині хвилі, що була виділена (рис. 2.5, праворуч). Такі пристрої часто використовуються на кордоні між магістральним каналом та мережею міського чи регіонального масштабу [8].

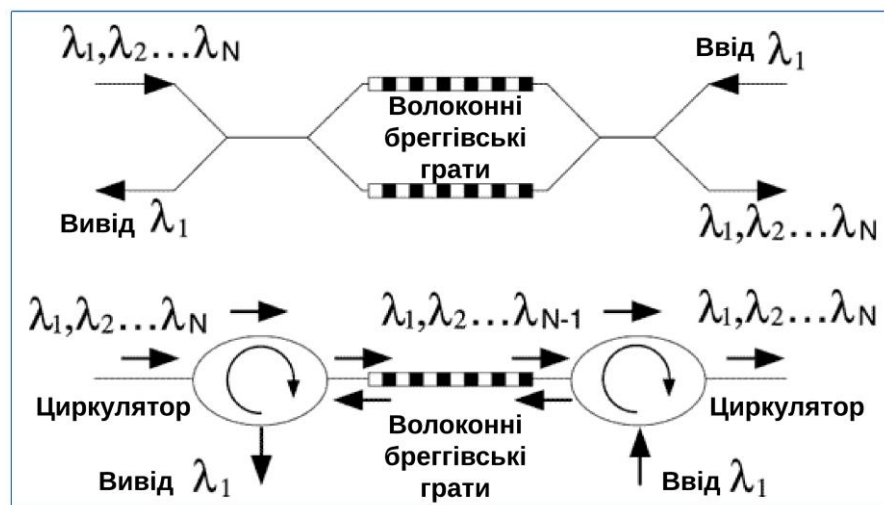


Рисунок 2.5 – Використання волоконних бреггівських ґрат у мультиплексорах введення/виведення каналів

Волоконні бреггівські ґрати останнім часом також стали використовуватися в пристроях мультиплексування/демультиплексування разом з інтерферометрами типу Маха-Цендера та комбінації з іншими типами фільтрів [6].

Поряд із мультиплексорами та демультиплексорами, розглянута технологія вузькосмугової фільтрації оптичних каналів також використовується для вирівнювання спектра сигналу перед підсилювачами EDFA, для стабілізації довжини хвилі та у хвильових стабілізаторах.

Дифракційні ґрати. Найбільш поширені в оптиці звичайні дифракційні решітки відбивають світловий пучок під різними кутами в площині падіння, причому кут, в яких відбите світло досягає максимальної інтенсивності, залежить від довжини хвилі. У дифракційних ґратах використовується той самий фізичний принцип, як і в тонкоплівкових фільтрах – придушення чи підсилення світла з допомогою інтерференції падаючих і відбитих хвиль (рис. 2.6).

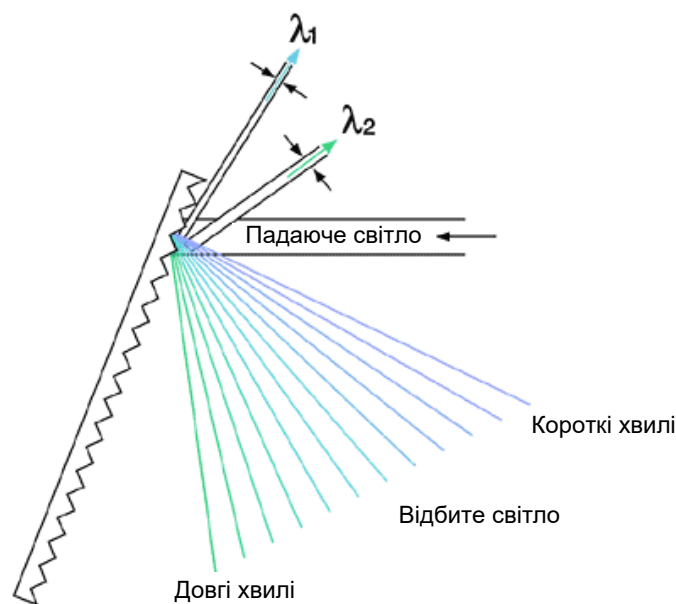


Рисунок 2.6 – Відображення складеного сигналу дифракційними ґратами

Припустимо, що в падаючому світлі є випромінювання різних довжин хвиль. Можна вибрати кут падіння таким чином, що хвилі певної довжини при відображенні від окремих ліній решітки відрізнятимуться по фазі одна від одної рівно на одну довжину хвилі. У цьому випадку всі відбиті хвилі

підсилюватимуть один одного. Такий кут буде кутом максимального пропускання для заданої довжини хвилі падаючого світла [8].

У пристроях мультиплексування та демультиплексування дифракційні решітки розташовуються на шляху світла таким чином, щоб сигнал потрібної довжини хвилі міг бути виділений зі складеного сигналу або доданий до нього. Хоча пристрої на основі дифракційних решіток дорогі і складні у виробництві, втрати, що вносяться ними, практично не залежать від числа каналів, що робить цю технологію однією з найбільш привабливих для використання в системах з великим числом каналів. Однак при цьому потрібно ретельно контролювати поляризацію падаючого оптичного випромінювання [8].

Інтегральні оптичні пристрої мультиплексування та демультиплексування – це оптичний еквівалент інтегральних схем в електроніці. Оптичні хвилеводи кілька шарів поміщаються на підкладку з кремнію або ніобату літію. У такому невеликому блоці міститься безліч оптичних компонентів, що взаємопов'язані один з одним. У разі використання сучасного повністю автоматизованого обладнання можливе масове виробництво таких блоків [8].

Інтегральна оптика – нова технологія. Для того, щоб повністю використати її потенціал, потрібні подальші наукові дослідження та конструкторські розробки. В даний час інтегральна оптика використовується при виробництві оптичних розгалужувачів, комутаторів, модуляторів, ербієвих та легованих різними рідкісноземельними елементами хвилеводних підсилювачів, бреггівських ґрат та інших компонентів систем DWDM.

Інтегральна оптика успішно застосовується для створення ґрат на основі масиву планарних хвилеводів (понад 100) різної довжини між двома планарними лінзами змішувачами AWG (Arrayed Waveguide Gratings). Принцип роботи таких ґрат показаний на рис. 2.7.

Вхідний сигнал, що містить випромінювання різних довжин хвиль, потрапляє у вхідний розгалужувач (перша пластина). Там він розщеплюється на N оптичних променів, кожен із яких потрапляє в окремий хвилеводний канал. Усі N хвилеводних каналів, що утворюють хвилеводну матрицю, мають різну довжину і вносять у сигнал різні фазові зсуви, що залежать від довжини хвилі. Після цього світлові пучки з окремих хвилеводних каналів знову поєднуються у вихідному розгалужувачі (друга пластина) і інтерферують таким чином, що випромінювання різних довжин хвиль потрапляє в різні вихідні хвилеводи.

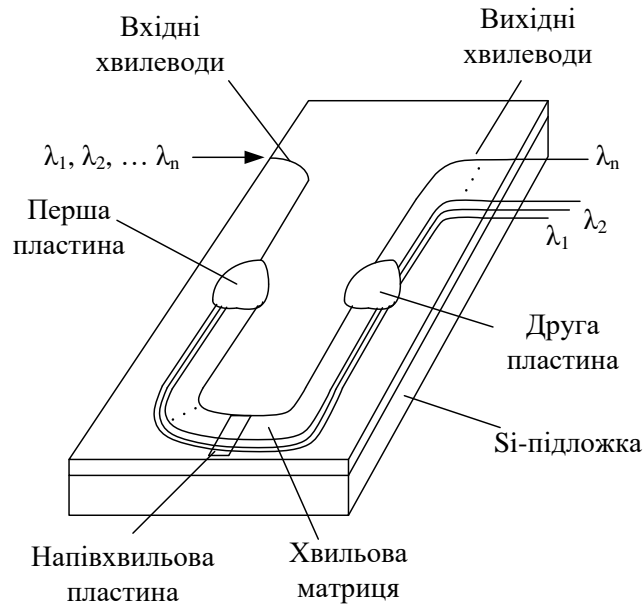


Рисунок 2.7 – Ґрати на основі масиву хвильоводів AWG – принцип роботи

Ґрати на основі масиву хвильоводів AWG використовуються для того, щоб перерозподіляти сигнали різних довжин хвиль (канали) між двома наборами волокон (рис. 2.7) або виділити (демультиплексувати) окремі канали складового сигналу окремі волокна. Ця технологія зараз стає основною для виробників мультиплексорів та демультиплексорів систем DWDM. Завдяки структурі, що легко масштабується, вона може широко застосовуватися в системах з сотнями каналів.

Зварні біконічні розгалужувачі. Найпростіший біконічний розгалужувач FBT (Fused Biconic Tapered) є парою одномодових оптичних волокон, на певній ділянці зварених один з одним по довжині. Основна мода волокна, яка поширюється серцевиною одного з оптичних волокон, при проходженні області зварювання перетворюється на моди оболонки. Коли волокна знову розділяються, моди оболонки знову перетворюються на моди волокна, що поширюються серцевиною кожного з вихідних волокон. В результаті виходить розгалужувач, що практично не вносить втрат. Вихідні сигнали не обов'язково мають рівну потужність, співвідношення їх потужностей визначається інтерференцією в області зварювання волокон і залежить від довжини цієї області [6].

Якщо два таких розгалужувачі розташовані послідовно (рис. 2.8), і два рукави мають різні оптичні шляхи між місцями зварювання, то така комбінація

діє подібно до інтерферометра Маха-Цендера. Потужність вхідного сигналу розподіляється між вихідними хвилеводами залежно від довжини хвилі з певною періодичністю. Якщо складовий вхідний сигнал містить оптичні канали двох різних довжин хвиль, то при певному підборі параметрів ці канали на виході опиняться у різних вихідних волокнах. Друге вхідне волокно не використовується [6].

Якщо на вхід надходить складений сигнал, який містить велику кількість каналів на різних частотах (з однаковими відстанями між ними), на виході в кожному волокні буде по половині каналів з відстанню між частотами вдвічі більшою. Використовуючи кілька розгалужувачів, можна вивести кожен канал в окреме волокно.

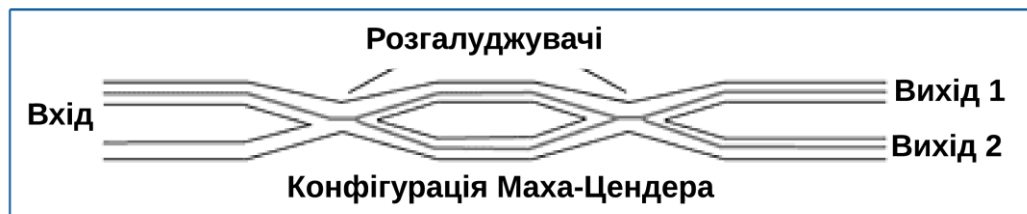


Рисунок 2.8 – Зварний біконічний розгалужувач FBТ – принцип роботи

Масиви таких пристроїв, окремі секції яких іноді замінені бреггівськими ґратами, використовуються для виділення каналів певної частоти багатоканальних систем WDM і DWDM або для додавання каналів в якому-небудь вузлі оптичної мережі. Оскільки вони є повністю пасивними пристроями і мають низькі втрати, допустиме застосування досить великих наборів таких пристроїв [6].

Існує також технологія тривимірного оптичного мультиплексування (3D Optics WDM). У ній використовується схема з плоскою відбивною дифракційною решіткою, увігнутим дзеркалом і масивом волокон (рис 2.9), розміщених у пазах решітки з фіксованим кроком. Схема роботи (в режимі демультимплексора) проста: мультиплексований потік із вхідного волокна (А), розходячись конусом з кутом β , відбивається від дзеркала і падає на дифракційну решітку, що відображає під різними кутами світло різної довжини хвилі. Ці дифраговані промені, відбиваючись від дзеркала, фокусуються у певних точках, де і повинні бути розташовані приймальні порти масиву волокон, що виділяють відповідні несучі. Для прикладу на рис. 2.9 показано

виділення одного такого каналу, конус променів якого з тим самим кутом β фокусується у точці (В) (порт вихідного волокна) [8].

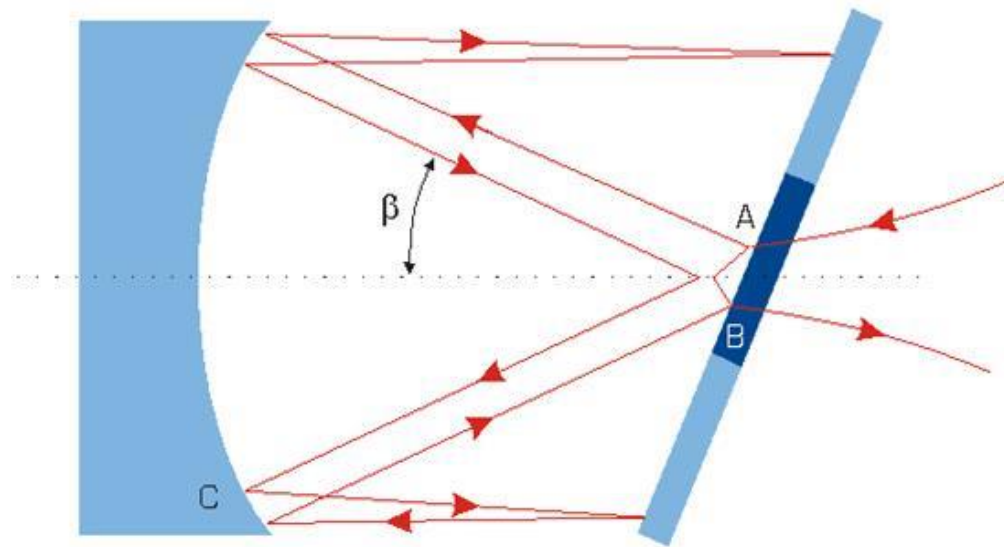


Рисунок 2.9 – Принцип тривимірного оптичного мультиплексування

Всі елементи конструкції строго фіксовані у скляному блоці, що дозволяє витримати та зберігати високу точність виготовлення. Конструкція дозволяє використовувати до 131 канал з кроком 1 нм або до 262 каналів з кроком 0,5 нм.

У всіх зазначених рішеннях процедура мультиплексування передбачається зворотною стосовно розглянутої процедури демultipлексування.

Основними показниками мультиплексорів/демультиплексорів, які погіршують якість сигналу, що передаються, є внесені втрати на компонентах, втрати на відображення і поляризаційно-залежні втрати. Як правило, це відомі величини, що слабо змінюються з часом; вони описуються виробником устаткування.

2.3 Джерела випромінювання

Передавальні оптоелектронні модулі (ПОМ), що застосовуються у волоконно-оптичних системах, призначені для перетворення електричних сигналів на оптичні. Останні мають бути введені у волокно з мінімальними втратами. Виробляються дуже різноманітні ПОМ, що відрізняються за конструкцією, а також за типом джерела випромінювання. Одні працюють на

телефонних швидкостях з максимальною відстанню до кількох метрів, інші передають сотні і навіть тисячі мегабіт на секунду на відстані кілька десятків кілометрів [9].

Головним елементом ПОМ є джерело випромінювання. Перерахуємо основні вимоги, яким має задовольняти джерело випромінювання, що застосовується у ВОЛЗ:

- випромінювання повинне вестись на довжині хвилі одного з вікон прозорості волокна. У традиційних оптичних волокнах є три вікна, у яких досягаються менші втрати світла при поширенні: 850, 1300, 1550 нм;

- джерело випромінювання має витримувати необхідну частоту модуляції для забезпечення передачі на потрібній швидкості;

- джерело випромінювання має бути ефективним, у тому сенсі, що більшість випромінювання джерела потрапляла у волокно з мінімальними втратами;

- джерело випромінювання повинне мати досить велику потужність, щоб сигнал можна було передавати на великі відстані, але і не стільки велику, щоб випромінювання призводило до нелінійних ефектів або могло пошкодити волокно або оптичний приймач;

- температурні варіації не повинні впливати на функціонування джерела випромінювання;

- вартість виробництва джерела випромінювання має бути відносно невисокою [9].

У телекомунікаційних мережах використовуються два основних типи джерел випромінювання, що задовольняють переліченим вимогам – світлодіоди (LED) та напівпровідникові лазерні діоди (LD). Головна відмінна риса між світлодіодами та лазерними діодами – це ширина спектра випромінювання. Світловипромінюючі діоди мають широкий спектр випромінювання, тоді як діоди мають значно вужчий спектр (рис. 2.10).

У технології DWDM через вузький спектр випромінювання використовуються лазерні діоди.

Чотири основні типи лазерних діодів набули найбільшого поширення:

- з резонатором Фабрі-Перо;
- з розподіленим зворотним зв'язком;
- з розподіленим бреггівським відображенням;

- із зовнішнім резонатором.

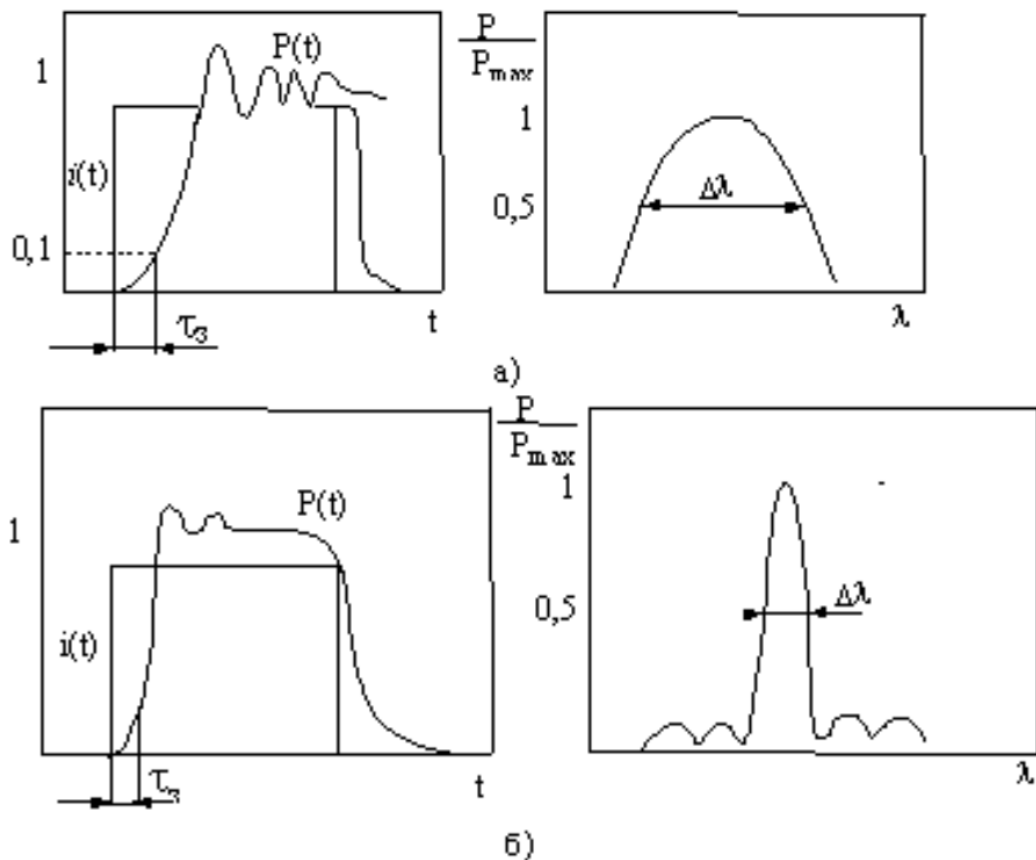


Рисунок 2.10 – Епюри імпульсів струму накачування та спектри випромінювання: а) для світлодіода, б) для лазера

Лазерні діоди із резонатором Фабрі-Перо (FP-лазери, Fabry-Perot). Резонатор у такому лазерному діоді утворюється торцевими поверхнями, що оточують з обох боків гетерогенний перехід. Одна з поверхонь відбиває світло з коефіцієнтом відбиття, близьким до 100%, інша є напівпрозорою, забезпечуючи таким чином вихід випромінювання назовні [9].

На рис. 2.11 показаний спектр випромінювання промислового лазерного діода з використанням резонатора Фабрі-Перо. Як видно з малюнка, поряд з головним піком, в якому зосереджено основну потужність випромінювання, існують побічні максимуми. Причина виникнення пов'язана з умовами утворення стоячих хвиль. Для посилення світла певної довжини хвилі необхідне виконання двох умов. Перше, довжина хвилі має задовольняти співвідношенню $2D = N\lambda$, де D – діаметр резонатора Фабрі-Перо, а N – деяке

ціле число. Друге, довжина хвилі повинна попадати в діапазон, у межах якого світло може посилюватися індукованим випромінюванням.

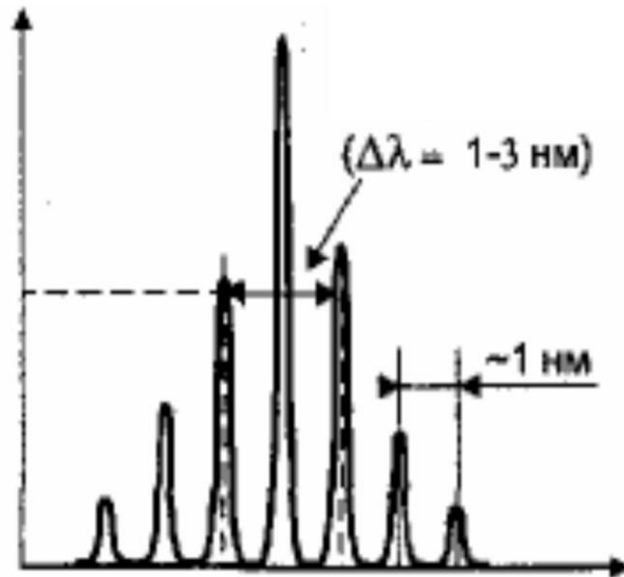


Рисунок 2.11 – Спектр випромінювання лазера з резонатором Фабрі-Перо

Якщо цей діапазон досить малий, то має місце одномодовий режим із шириною спектра менше 1 нм (рис. 2.10б). В іншому випадку в ділянці 0,5 можуть потрапити два або більше сусідніх максимумів, що відповідає багатомодовому режиму з шириною спектра від одного до декількох нм. FP-лазер має далеко не найвищі технічні характеристики, але для тих додатків, де не потрібна висока швидкість передачі даних, він, в силу більш простої конструкції, найкраще підходить з точки зору ціна-ефективність [9].

Слід зазначити, що навіть у тому випадку, коли сусідні максимуми малі, тобто де реалізується одномодовий режим випромінювання і мало $\Delta\lambda$, зі зростанням швидкості передачі у лазера спостерігається перерозподіл потужності в модах, що призводить до паразитного ефекту – динамічного розширення спектру $\Delta\lambda$ (до 10 нм при частоті модуляції 1-2 ГГц). Цей ефект відсутній у трьох інших більш досконалих лазерних діодів, що відрізняються способом організації оптичного резонатора, і є в деякій мірі модернізацією простого резонатора Фабрі-Перо.

Лазерні діоди з розподіленим зворотним зв'язком (DFB-лазер) та з розподіленим бреггівським відображенням (DBR-лазер). Резонатори цих двох

досить схожих типів є модифікацію плоского резонатора Фабрі-Перо, у який додана періодична просторова модуляційна структура. У DFB-лазерах періодична структура поєднана з активною областю (рис. 2.12(а)), а в DBR-лазерах періодичну структуру винесено за межі активної області (рис. 2.12(б)). Періодична структура впливає на умови поширення та характеристики випромінювання. Так, перевагами DFB та DBR-лазерів у порівнянні з FP-лазером є: зменшення залежності довжини хвилі лазера від струму інжекції та температури, висока стабільність одномодовості та практично стовідсоткова глибина модуляції. Температурний коефіцієнт $\Delta\lambda/\Delta T$ для FP-лазера порядку 0,5-1 нм/°С, тоді як DFB лазера порядку 0,07-0,09 нм/°С. Основним недоліком DFB та DBR лазерів є складна технологія виготовлення і, як наслідок, більш висока ціна [9].

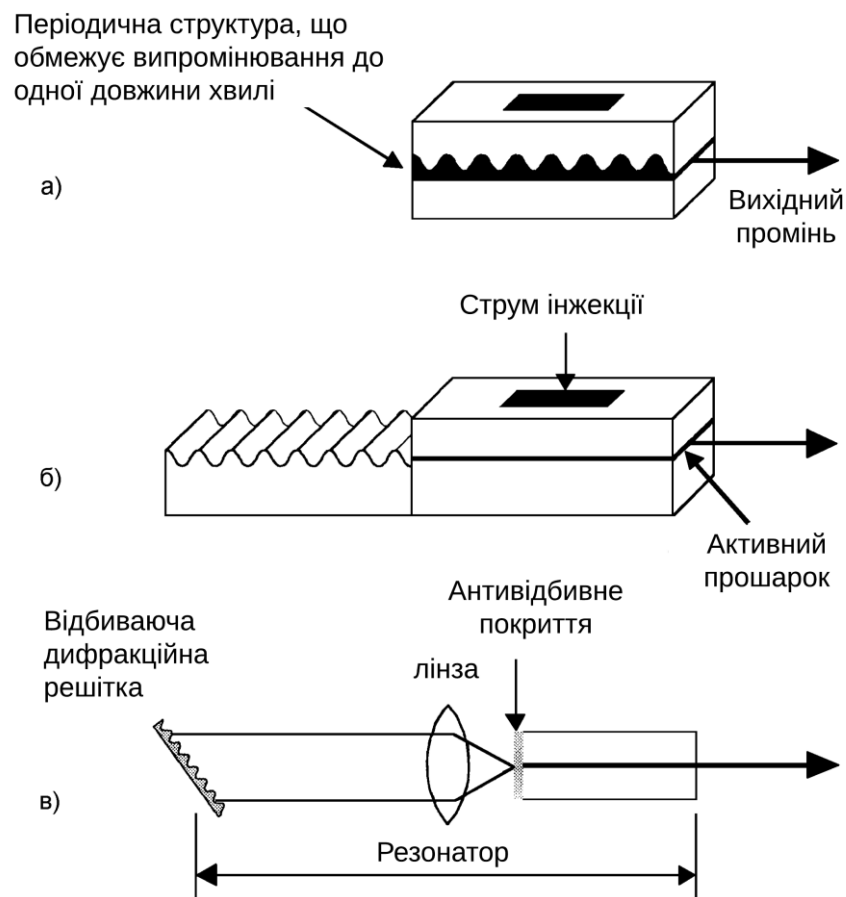


Рисунок 2.12 – Три основні типи лазерних діодів

Лазерний діод із зовнішнім резонатором (ЕС-лазер). У ЕС-лазерах один або обидва торці покриваються спеціальним шаром, що зменшує відображення, і, відповідно, одне або два дзеркала ставляться навколо активної області напівпровідникової структури. На рис 2.12(в) показаний приклад ЕС-лазера з одним зовнішнім резонатором. Антивідбивне покриття зменшує коефіцієнт відображення приблизно на чотири порядки, тоді як інший торець активного шару відображає до 30% світлового потоку завдяки френелівському відбиттю. Дзеркало, як правило, поєднує функції дифракційної решітки. Для покращення зворотного зв'язку між дзеркалом та активним елементом встановлюється лінза. Збільшуючи або зменшуючи відстань до дзеркала, а також одночасно розгортаючи дзеркало-решітку – це еквівалентно зміні кроку решітки – можна плавно змінювати довжину хвилі випромінювання, причому діапазон налаштування досягає 30 нм. Внаслідок цього, ЕС-лазери є незамінними при розробці апаратури хвильового ущільнення та вимірювальної апаратури для ВОЛЗ. За характеристиками вони схожі з DFB та DBR-лазерами [9].

Також важливими характеристиками джерел випромінювання є:

- швидкодія джерела випромінювання;
- деградація та час напрацювання на відмову.

Швидкодія джерела випромінювання. Експериментально вимірюваним параметром, що відображає швидкодію джерела випромінювання, є максимальна частота модуляції. Попередньо встановлюються пороги на рівні 0,1 і 0,9 від значення потужності світлового випромінювання при низькочастотній модуляції прямокутними імпульсами струму. Принаймні при зростанні частоти модуляції при переході на менші масштаби за часовою шкалою, форма світлових фронтів стає більш пологою. Для опису фронтів вводять час наростання τ_{rise} та спаду τ_{fall} потужності випромінювання, що визначаються як часові інтервали, за які відбувається наростання від 0,1 до 0,9 і, навпаки, спад світлового сигналу від 0,9 до 0,1. Максимальна частота модуляції визначається як частота вхідних електричних імпульсів, коли вихідний оптичний сигнал перестає перетинати порогові значення 0,1 і 0,9, залишаючись при цьому у внутрішній області. Для світлодіодів ця частота може досягати до 200 МГц, а у лазерних діодів – значно більше (кілька ГГц). Часи наростання та спаду надають інформацію про смугу пропускання W [10].

Деградація та час напрацювання на відмову. У міру експлуатації оптичного передавача його характеристики поступово погіршуються - знижується потужність випромінювання, і, зрештою, він виходить з ладу. Це відбувається через деградацію напівпровідникового шару. Надійність напівпровідникового випромінювача визначається середнім напрацюванням на відмову або інтенсивністю відмов. Лазерні діоди, що випускаються десять років тому, мали значно меншу надійність у порівнянні зі світлодіодами. Проте в даний час завдяки вдосконаленню конструкцій і технології виготовлення вдалося значно підвищити надійність діодів і наблизити їх до світлодіодів за часом напрацювання на відмову, яка становить до 50000 годин і більше (5-8 років).

Основною характеристикою лазерного передавача, що сильно впливає на параметри сигналу, є потужність випромінювання. При досягненні якоїсь граничної потужності починають особливо сильно проявлятися нелінійні ефекти.

2.4 Реалізація підсилювачів EDFA

Підсилювачі на волокні, легованому ербієм EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) забезпечують безпосереднє підсилення оптичних сигналів, без їх перетворення в електричні сигнали і назад, мають низький рівень шумів, а їх робочий діапазон довжин хвиль практично точно відповідає вікну прозорості кварцового оптичного волокна. Саме завдяки появі підсилювачів із таким поєднанням якостей лінії зв'язку та мережі на основі систем DWDM стали економічно привабливими [10].

Просту реалізацію EDFA можна подати у вигляді схеми, представленої рис. 2.13.

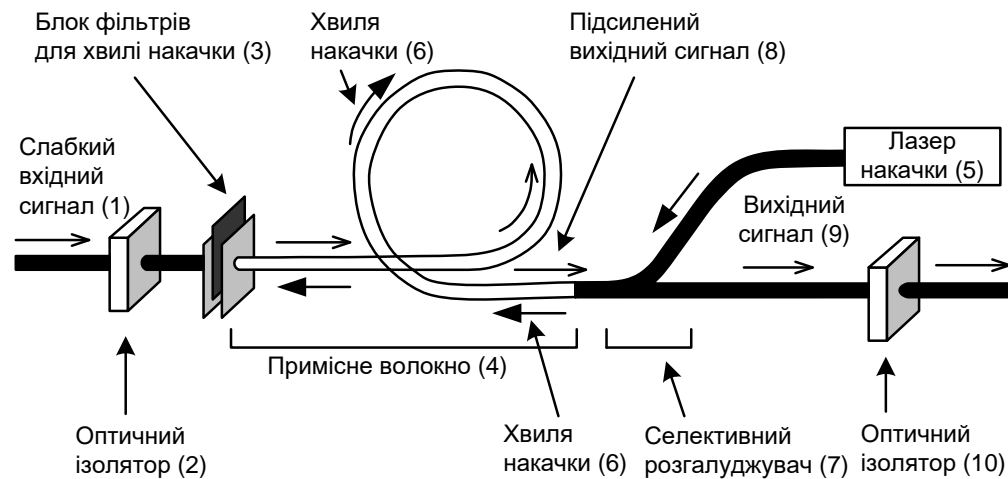


Рисунок 2.13 – Схема підсилювача EDFA

Слабкий вхідний оптичний сигнал (1) проходить через оптичний ізолятор (2), що пропускає світло в прямому напрямку - зліва направо, але не пропускає розсіяне світло у зворотному напрямку, далі проходить через блок фільтрів (3), які блокують світловий потік на довжині хвилі накачування, але прозорі до довжини хвилі сигналу. Потім сигнал попадає в котушку з волокном, легованим домішкою з рідкоземельних елементів ербія (4). Довжина такої ділянки волокна становить кілька метрів. Ця ділянка волокна піддається сильному безперервному випромінюванню напівпровідникового лазера (5), установленого із протилежної сторони, з більш короткою довжиною хвилі накачування. Світло від лазера накачування - хвиля накачування (6) - збуджує атоми домішок. Збуджені стани мають великий час релаксації, щоб спонтанно перейти в основний стан. Однак при наявності слабого сигналу відбувається індукований перехід атомів домішок ербія зі збудженого стану в основний з випромінюванням світла на тій же довжині хвилі та з тією ж самою фазою, що й вхідний сигнал. Селективний розгалуджувач (7) перенаправляє підсилений корисний сигнал (8) у вихідне волокно (9). Додатковий оптичний ізолятор на виході (10) запобігає попаданню зворотного розсіяного сигналу із вихідного сегмента в активну область оптичного підсилювача [10].

Практичні оптичні підсилювачі мають деякі особливості, які не видно з цієї схеми:

- леговане оптоволокно має менший діаметр сердечника (порядку 2 мкм), ніж стандартне одномодове волокно, це робиться для збільшення щільності пучка завдяки звуженню на переході зі стандартного в леговане оптоволокно, що дозволяє збільшити ефективність процесів збудження та посилення;

- допускається велике згасання сигналу в легованому оптоволокну (близько 10 дБ/км), викликане значною концентрацією домішок;

- використовується як сонаправлене, і протиспрямоване включення пучка накачки, останнє дозволяє приблизно на 2 дБ збільшити підсилення (при цьому приблизно на 1 дБ збільшується шум);

- для отримання більш стійкої роботи лазера накачування (відсутності осциляції) використовуються спеціальні фільтри-стабілізатори на основі, наприклад, оптоволоконних ґрат Брегга;

- для отримання більш широкої смуги підсилення та зменшення нерівномірності коефіцієнта підсилення (створення "плоскої" хвильової характеристики) в них використовуються спеціальні вирівнюючі пристрої, наприклад оптоволоконні ґрати Брегга;

- для збільшення підсилення поряд з однокаскадними ОП з одним лазером накачування розробляються та випускаються ОП з двома лазерами накачування (які теоретично можна розглядати як двокаскадні за наявності подвійного комплексу основних блоків), а також двокаскадні підсилювачі з додатковим виходом/входом між каскадами.

Тільки два типи підсилювачів знайшли в даний час широке застосування оптичних мереж зв'язку. Це напівпровідникові оптичні підсилювачі та EDFA.

Зазначені оптичні підсилювачі за функціональним призначенням можна розбити на три групи:

- потужні підсилювачі - Бустери, що встановлюються безпосередньо за передавачем; їхня особливість у тому, що вони працюють з потужним сигналом на вході і забезпечують максимально допустиме підсилення та високий рівень сигналу на виході (-10 дБм і вище) і не критичні до рівня шумів;

- лінійні підсилювачі - ЛП, що встановлюються на лінії як повторювачі; їх особливість у тому, що вони працюють із сигналом середнього рівня на вході, забезпечують необхідний рівень сигналу на виході та критичні до рівня шумів, що обмежує загальну довжину регенераційної ділянки системи;

- передпідсилювачі - ПП, що встановлюються безпосередньо перед приймачем; їхня особливість у тому, що вони працюють із сигналами дуже низького рівня на вході (від -45 до -30 дБм) і тому дуже критичні до рівня шуму підсилювача.

Зазначені типи оптичних підсилювачів, їх позначення та положення у схемі оптичної системи зв'язку показані на рис 2.14.

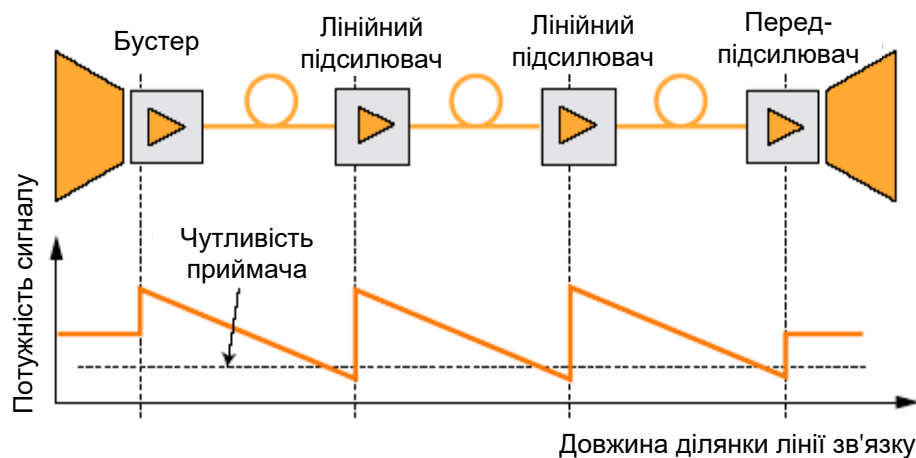


Рисунок 2.14 – Застосування різних типів оптичних підсилювачів

У свою чергу, ЛП діляться на ЛП першого покоління (ЛП-I) та ЛП другого покоління (ЛП-II). ЛП-I можуть бути однокаскадними або двокаскадними, але вони не мають додаткового входу між каскадами. ЛП-II – двокаскадні і мають такий вхід, що дає можливість для його більш гнучкого функціонального використання: дозволяє здійснювати внутрішню комутацію та різні функціональні перетворення (наприклад, компенсацію підсиленого спонтанного випромінювання (ASE), встановлення модуля компенсації дисперсії, введення/виведення одного з підсилених каналів у системах WDM та ін.). Це дає можливість зменшити кількість або номенклатуру устаткування, що використовується, а значить, і спростити можливе рішення [10].

На параметри сигналу, що передається, сильно впливає потужність підсилювача - через прояви нелінійних ефектів при великій потужності. Також підсилювач підвищує рівень шумів у лінії. Цей параметр завжди враховується виробником обладнання.

2.5 Вибір одномодового оптичного волокна для побудови ВОЛЗ

На початку 80-х років передавачі на довжину хвилі 1550 нм мали дуже високу ціну та низьку надійність і не могли конкурувати на ринку з передавачами на довжині хвилі 1300 нм. Тому стандартне ступінчасте волокно

SF стало першим комерційним волокном і зараз найбільше поширене в телекомунікаційних мережах. Воно оптимізоване по дисперсії для роботи у вікні 1310 нм, хоча дає менше згасання у вікні 1550 нм [11].

У міру вдосконалення систем передачі на довжині хвилі 1550 нм постає завдання розробки волокна з довжиною хвилі нульової дисперсії, що потрапляє всередину вікна прозорості. У результаті в середині 80-х років створюється волокно зі зміщеною дисперсією DSF, повністю оптимізоване для роботи у вікні 1550 нм як по згасанню, так і по дисперсії. Протягом багатьох років волокно DSF вважається найперспективнішим волокном. З приходом нових технологій передачі мультиплексного оптичного сигналу велику роль починають грати ербієві оптичні підсилювачі типу EFDA, здатні посилювати багатоканальний сигнал. На жаль, пізніші дослідження (на початку 90-х років) показують, що саме довжина хвилі нульової дисперсії (1550 нм), що потрапляє всередину робочого діапазону ербієвого підсилювача, є головним потенційним джерелом нелінійних ефектів (насамперед чотирихвильового змішування), які проявляються у різкому зростанні шуму під час поширення багатоканального сигналу [11].

Подальші дослідження підтверджують обмежені можливості DSF під час використання у системах WDM. Щоб уникнути нелінійних ефектів при використанні DSF у WDM-системах, слід вводити сигнал меншої потужності у волокно, збільшувати відстань між каналами та уникати передачі парних каналів (симетричних відносно 0).

Чотирихвильове змішування - це ефект, що призводить до розсіювання двох хвиль з утворенням нових небажаних довжин хвиль. Нові хвилі можуть призводити до деградації оптичного сигналу, що поширюється, інтерферуючи з ним, або перекачувати потужність з корисного хвильового каналу. Саме через ефект чотирихвильового змішування стало ясно, що необхідно розробити новий тип волокна, в якому 0 розташовувалося б вдалині, тобто, по один бік (ліворуч чи правіше) від усіх можливих каналів.

Волокно NZDSF створюється на початку 90-х з метою подолати недоліки волокна DSF, що виявляються під час роботи з мультиплексним оптичним сигналом. Відоме також як λ -зміщене волокно, воно має особливість у тому, що довжина хвилі нульової дисперсії винесена за межі смуги пропускання ербію.

Це зменшує нелінійні ефекти та збільшує характеристики волокна під час передачі DWDM сигналу [11].

Дві марки λ -зміщеного волокна, що з'явилися кілька років тому, широко використовуються сьогодні: волокно True Wave фірми Lucent Тес. і волокно SMF-LS фірми Corning. Обидва мають ненульову дисперсію у всьому діапазоні смуги пропускання ербію. Волокно True Wave забезпечує позитивну дисперсію при точці нульової дисперсії в районі 1523 нм, тоді як SMF-LS забезпечує негативну дисперсію з нульовою точкою дисперсії трохи вище 1560 нм. На початку 1998 року фірма Corning випустила ще одну марку λ -зміщеного волокна – LEAF™ (рис. 2.15) [11].

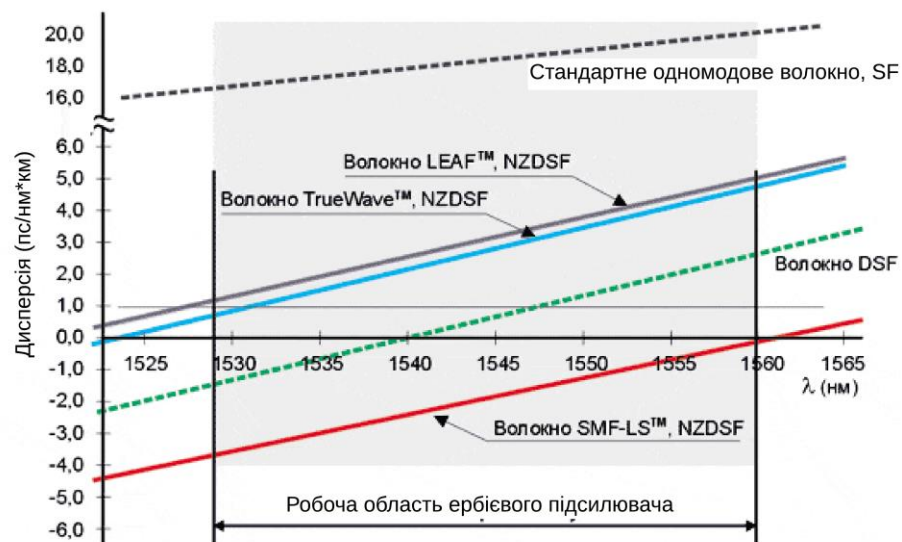


Рисунок 2.15 – Хроматична дисперсія одномодових волокон у вікні 1550 нм

Порівняльний аналіз основних характеристик волокон True Wave, SMF-LS та LEAF™ наведено у табл. 2.1.

За дисперсійними характеристиками волокно LEAF близько до волокна True Wave. Головною відмінністю цього волокна в порівнянні з трьома попередніми є велика ефективна площа для світлового потоку - діаметр модового поля зріс на 1 мкм. Розмір цього параметра стає дуже важливим для оптимізації систем діапазону 1550 нм. Більший діаметр модової плями дозволяє збільшити рівень потужності випромінювання волокна, що вводиться, на 2 дБ, зберігаючи при цьому вплив ряду нелінійних ефектів на колишньому рівні.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики одномодових волокон

Характеристики	SMF-28	True-Wave	SMF-LS	LEAFтм
Макс. згасання на довжині хвилі 1550нм (дБ/км)	≤ 0.20	$\leq 0,20$	≤ 0.25	≤ 0.20
Згасання на сухому стику (дБ) при 1550 нм	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1	н/д*
Хроматична дисперсія у зоні ненульової дисперсії				
Мін (пс/нм*км)	н/д	0.8	н/д	1
Мах (пс/нм*км)	20	4.6	-3.5	6
Нахил ненульової дисперсії S_0 (пс/(нм ² *нм))	н/д	≤ 0.095	≤ 0.092	н/д
Довжина хвилі ненульової дисперсії λ_0 (нм)	н/д	≤ 1540	≥ 1560	н/д
Діаметр поля моди (нм) за 1500 нм	10.5 ± 1.0 6	8.4 ± 0.6	8.4 ± 0.5	9.5 ± 0.5
Кабельна довжина хвилі відсічення λ_{cutoff} (нм)	н/д	≤ 1260	≤ 1260	н/д
Поляризаційна модова дисперсія (пс/ $\sqrt{\text{км}}$)	≤ 0.5 при 1550 нм	≤ 0.5 при 1550 нм	≤ 0.5 при 1550 нм	≤ 0.08

*н/д – немає даних

Сучасні тенденції розвитку засобів телекомунікаційного зв'язку свідчать про перспективність систем передачі по волокну, в яких поєднуються часове мультиплексування – TDM (STM-16 на 2,4 Гбіт/с та STM-64 на 10 Гбіт/с) у межах однієї довжини хвилі та хвильове мультиплексування WDM.

Інсталяція нових кабельних сегментів, або нарощування існуючих з урахуванням переходу швидкості передачі 2,4 і 10 Гбіт/с може здійснюватися з використанням перерахованих видів волокон. При виборі волокна слід враховувати такі чинники, як загальна вартість проекту, необхідні ємності каналів, надійність, складність системи та ін.

У контексті еволюції ВОЛЗ ключовими параметрами стають методики, що використовуються для корекції дисперсії у волоконно-оптичних системах. Корекція дисперсії дозволяє збільшувати довжину волоконно-оптичних WDM-систем, раніше обмежених через велику дисперсію, і одночасно уникнути впливу такого ефекту, як чотирихвильове змішування. Три методики корекції дисперсії:

- використання волокон із компенсуючою дисперсією DCF (dispersion-compensating fibers). Позитивна дисперсія, накопичена на одній ділянці з використанням стандартного волокна SF, може компенсуватися наступним сусіднім сегментом на основі волокна DCF з наперед підібраним значенням негативної дисперсії, в результаті чого підсумкова хроматична дисперсія може бути наближена до нуля. Компенсація хроматичної дисперсії допустима має систематичний характер накопичення дисперсії зі зростанням довжини;

- використання оптичних лазерних передавачів з дуже вузькою спектральною шириною (0,1 нм і менше), здатних модулювати випромінювання на частотах кілька ГГц;

- використання волокон типу NZDSF, в яких "зсувається" довжина хвилі нульової дисперсії за межі вікна 1550 нм, в результаті чого дисперсія стає досить великою, щоб придушити ефект чотирьоххвильового змішування, і в той же час досить малою, щоб підтримувати поширення сигналу високої ємності (високої частоти модуляції) на великі відстані.

Сегменти на основі волокна SF без корекції дисперсії допускають протяжність до 90 км (при швидкості передачі 2,4 Гбіт/с). Перші дві методики корекції дисперсії, застосовуючись окремо одна від одної або в комбінації, і дозволяють збільшити протяжність сегментів до 140 км при збереженні колишньої швидкості передачі (табл. 2.2 та 2.3).

Щоб задовольнити робочі вимоги під час планування мережі, слід ретельно виробляти стратегію нарощування мережі. Потрібно оцінювати відповідні топології мереж з урахуванням можливості їхньої роботи на швидкостях 2,4 та 10 Гбіт/с. Найближча мета - побудувати протяжні ділянки (до 120-140 км) при передачі на швидкості 2,4 Гбіт/с з використанням будь-яких з трьох головних типів волокон - повинна розглядатися спільно з планами далекої перспективи - інсталяція ліній на швидкості передачі 10 Гбіт/с з використанням послідовно встановлених лінійних підсилювачів. Високу швидкість передачі в останньому випадку можна досягти шляхом оптимізації довжини сегментів між лінійними підсилювачами (приблизно 70 км).

Загальні можливості розгортання кабельних систем на основі SF, DSF і NZDSF наведені в таблицях 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.2 - Передача 2.5 Гбіт/с сигналу в різних типах одномодових ВОЛОКОН

Підсилення потужності сигналу на одній довжині хвилі						
Волокно	Корекція дисперсії	Підсилювачі EDFA	Число каналів	Ємність каналів	Довжина прольоту	Обмеження системи
SF	Ні	Бустер	1	2.4 Гбіт/с	70-90 км	Потужність Дисперсія
SF	Зовнішня модуляція	Бустер	1	2.4 Гбіт/с	140 км	Потужність
SF	Компенсація дисперсії	Бустер	1	2.4 Гбіт/с	120-140 км	Потужність
DSF	Ні	Бустер	1	2.4 Гбіт/с	120-140 км	Потужність
NZ DSF	λ_0 виводиться із зони EDFA	Бустер	1	2.4 Гбіт/с	120-140 км	Потужність
Лінійне посилення багатоканального сигналу						
SF	Зовнішня модуляція	Бустер, ЛП	1,2,4,8	2.4-20 Гбіт/с	>500 км	ASE, відсутня плата
SF	Компенсація дисперсії	Бустер, ЛП	1,2,4,8	2.4-20 Гбіт/с	>500 км	ASE, відсутня плата
DSF	Ні	Бустер, ЛП	1,2,4,8	2.4 Гбіт/с	>500 км	ASE, відсутня. плата, ЧВС
NZ DSF	λ_0 виводиться із зони EDFA	Бустер, ЛП	1,2,4,8	2.4-20 Гбіт/с	> 500 км	ASE, відсутня плата

Таблиця 2.3 - Передача 10 Гбіт/с сигналу з різних типів одномодових ВОЛОКОН

Посилення потужності сигналу на одній довжині хвилі						
Волокно	Корекція дисперсії	Підсилювачі EDFA	Число каналів	Ємність каналів	Довжина прольоту	Обмеження системи
SF	Зовнішня модуляція	ПП	1	10Гбіт/с	50-70 км	Дисперсія
SF	Зовнішня мод-я + КД *	Бустер, ПП	1	10Гбіт/с	120-140 км	Потужність
DSF	Зовнішня модуляція	Бустер, ПП	1	10Гбіт/с	120-150км	Потужність
NZ DSF	ВМ, λ_0 вив-ся із зони EDFA	Бустер, ПП	1	10Гбіт/с	120-150км	Потужність
Лінійне посилення багатоканального сигналу						
SF	Зовнішня мод-я + КД *	Бустер, ПП, ЛП	1,2,4	10,20,40 Гбіт/с	>300 км	ASE, відсутня плата
DSF	Зовнішня модуляція	ПП, ЛП	1 нелін ефект	10 Гбіт/с	>300 км	ASE, відсутня плата, ЧВС
NZ DSF	ВМ, λ_0 вив-ся із зони EDFA	ПП, ЛП	1,2,4,8	10,20,40 Гбіт/с	>300 км	ASE, відсутня плата, SPM

* - Компенсація дисперсії може вимагати додаткового підсилення, щоб подолати згасання.

Хоча волокна SF та DSF цілком прийнятні для здійснення нарощування сегментів мереж, волокно NZDSF перспективніше при використанні в нових інсталяціях. При порівнянні волокон SF та DSF відзначимо, що SF краще підходять для мереж, що використовують хвильове мультиплексування. Недолік SF - велике значення дисперсії у вікні 1550 нм - може компенсуватися або додатковою ділянкою на основі волокна з дисперсією, що компенсує, або шляхом зменшення спектральної ширини випромінюваного сигналу (наприклад, використовуючи передавачі на основі DFB-лазерів).

2.6 Компенсатори дисперсії

Компенсатор дисперсії найчастіше представляє собою просто відрізок оптичного волокна, матеріал якого має аномальну хроматичну дисперсію на робочій довжині хвилі. Його дисперсія негативна, тоді як середовище основного волокна має позитивну дисперсію. Величина питомої дисперсії компенсатора, що припадає на одиницю довжини, набагато більше питомої дисперсії основного (компенсованого) волокна. Це дозволяє обходитися відносно короткими відрізками волокна компенсації дисперсії у звичайному волокні на значних відстанях (рис. 2.16) [10].

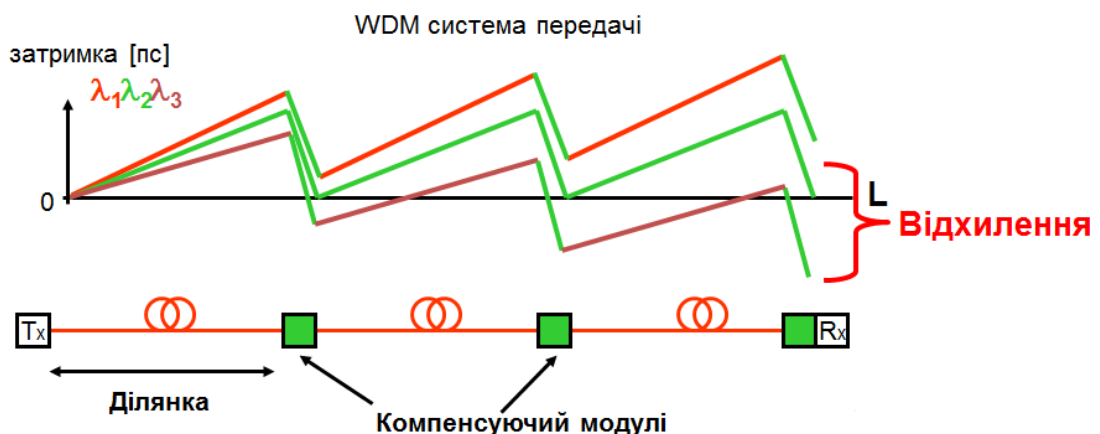


Рисунок 2.16 – Діаграма компенсації дисперсії оптичного волокна

Компенсація дисперсії може здійснюватися за допомогою дискретних компонентів, таких як бреггівські дифракційні решітки.

Щоб методика компенсації дисперсії була ефективною, необхідно вміти вимірювати повну дисперсію в основному волокні, так і коефіцієнт дисперсії коригувального волокна. Також необхідно мати можливість перевірки того, що компенсуюче волокно розрахункової довжини дійсно усунуло дисперсію.

2.7 Завадостійке кодування (FEC). Коди Ріда - Соломона

Запобіжна корекція помилок FEC (Forward Error Correction) знайшла широке застосування у техніці оптичного зв'язку останнього покоління. Її використання передбачено стандартами передачі SDH, OTN, Ethernet. Для виявлення та виправлення помилок найчастіше використовуються циклічні блокові коди (коди Хеммінга, коди Боуза-Чоудхурі-Хоквенгема (БЧХ), коди Ріда-Соломона (RS)) [12].

У техніці оптичних систем знайшли широке застосування коди Ріда-Соломона (Reed-Solomon – RS). З використанням цих кодів дані обробляються порціями по m біт, які називають символами. Код $RS(n,k)$ характеризується такими параметрами:

- довжина символу m біт;
- довжина блоку $n = (2m - 1)$ символів = $m(2m - 1)$ біт;
- довжина блоку даних k символів;
- $n - k = 2t$ символів = $m(2t)$ біт;
- мінімальна відстань Хеммінгу $d_{\min} = (2t + 1)$;
- кількість помилок, які потребують виправлення t .

Для виправлення всіх одно- та трибітових помилок у символах потрібно виконання нерівності 2.1:

$$\left(n + \frac{n(n-1)}{2} \right) \neq (2^{n-k} - 1) \quad (2.1)$$

Алгоритм кодування $RS(n, k)$ розширює блок із k символів до розміру n , додаючи $(n - k)$ надлишкових контрольних символів. Зазвичай, довжина символу є ступенем двійки і широко використовується значення $m = 8$, тобто. символ дорівнює одному байту.

Для виправлення помилок застосовується 16-символьний код RS(255, 239), який відноситься до класу лінійних циклічних блокових кодів. Кожен цикл передачі, наприклад, STM-N або OTUk, розбивається на блоки символів даних по 239 байт. Кожному такому блоку визначається контрольний блок із 16 символів - байт і приєднується до 239 байтів, 240-255 байти. Тобто $n=255$, $k=239$, тобто RS(255, 239). Об'єднаний блок k та $(n - k)$ утворює підрядок циклу. Синхронне побайтове мультиплексування підрядків утворює один рядок циклу (рисунок 2.17).

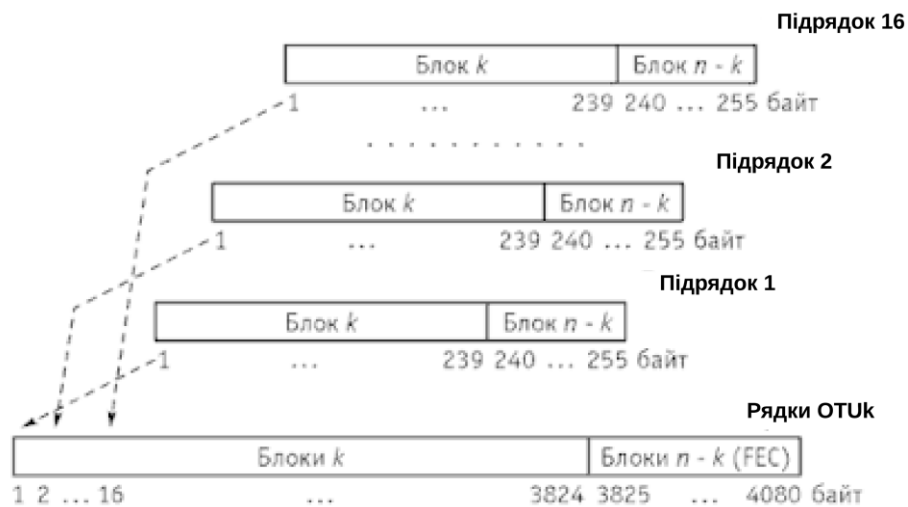


Рисунок 2.17 – Створення рядка з блоком контролю FEC

Порядок передачі рядка зліва направо. При формуванні блоку $(n - k)$ блок даних k зсувається на $(n - k)$ і ділиться на поліном 2.2:

$$= + + + + . \quad (2.2)$$

В результаті виходить приватне від ділення та залишок ділення завдовжки $(n - k)$. Блок даних k і залишок ділення об'єднуються, утворюючи підрядок. Після передачі підрядку на приймальній стороні проводиться його розподіл на поліном P , аналогічний тому, що був на передавальній стороні. Якщо після ділення залишок нульовий, то передача пройшла без помилок. Якщо після ділення залишок не дорівнює нулю, це ознака помилки. Місце помилки в блоці k визначається по залишку, наприклад табличним методом.

Виправленню підлягає задану кількість помилок у символі (1, 2 або більше у байті). Завдяки тому, що RS(255, 239) має відстань Хеммінгу $d_{\min} = 17$, можна коригувати до 8 символівних помилок.

При цьому число помилок, що виявляються, становить 16 в підрядку з FEC. У таблиці 2.4 наведено приклад теоретично розрахованого коефіцієнта помилок на виході декодера FEC RS(255, 239).

Таблиця 2.4 – Приклад результату розрахунку коефіцієнта помилок на виході декодера FEC RS (255, 239)

Коефіцієнт помилок на вході	Коефіцієнт помилок на виході
10^{-4}	5×10^{-15}
10^{-5}	$6,3 \times 10^{-24}$
10^{-6}	$6,4 \times 10^{-33}$

Практична ефективність кодування RS(255, 239) може становити від 5 до 8 дБ, тобто FEC дозволяє збільшувати довжини ділянок передачі порівняно із системами без FEC. Це особливо актуально на довгих лініях оптичної передачі та при реконструкції, коли здійснюється перехід на високі швидкісні режими, наприклад, з 2.5 Гбіт/с на 10 Гбіт/с. При цьому дуже важливо зберегти довжини ділянок передачі існуючої мережі та не будувати додаткових проміжних станцій.

У табл. 2.5 наведено характеристики використовуваних кодів попереджувальної корекції помилок FEC для ВОСП.

Таблиця 2.5 - Параметри використовуваних кодів FEC

Покоління FEC	Надмірність, %	Тип коду	Поріг виправлення помилок FEC	
			По Q_{\min}	По BER
1	7	Поодинокий RS	11,5 дБ	10^{-4}
2	10-25	Кратний RS	8,5 дБ	4×10^{-3}
3	20-25	Турбокод	6,2 дБ	2×10^{-3}

Отже, застосування технології запобіжної корекції помилок дозволяє суттєво знизити коефіцієнт помилок BER і таким чином збільшити бюджет потужності оптичної лінії. Виробники обладнання вказують на можливість застосування FEC у специфікаціях передавачів (OTU).

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА АНОМАЛІЙ ЛІНІЇ ХАРКІВ – ЛЬВІВ

В доданому розділі проведемо дослідження параметрів та аномалій ділянки мережі Харків – Львів. Опишемо вплив клімату та різних оптичних ефектів на параметри лінії зв'язку, наведемо огляд контрольно-вимірювального обладнання, яке використовується для спостереження за цими параметрами. Також у цьому розділі проведемо розрахунки основних оптичних показників – згасання та дисперсії. За результатами розрахунків будуть побудовані діаграми розподілу потужності сигналу, що передається. Після аналізу отриманих даних будуть зроблені висновки про рівень впливу різних чинників на параметри ВОЛЗ.

3.1 Вплив кліматичних умов на параметри ВОЛЗ

Всі раніше розглянуті компоненти мережі DWDM зрештою використовуються в польових умовах, де вони піддаються впливу різних факторів навколишнього середовища, таких як: температура, вологість, електричні та магнітні поля та багато іншого. Процедури виявлення залежності поведінки електронних компонентів і модулів від зовнішніх умов добре відомі. Для характеристики кожного компонента необхідно виконати всі належні вимірювання за умов його експлуатації [12].

Волоконно-оптичні компоненти, як і інші оптичні засоби комунікації, завдяки своїй конструкції надійно захищені від багатьох факторів довкілля зокрема електричних і магнітних полів. Герметичний монтаж захищає їх від проникнення вологи.

Температура є головним чинником навколишнього середовища. Багато важливих оптичних характеристик волоконно-оптичних компонентів залежать від фізичних розмірів: крок дифракційної решітки або брегівського еталона, довжини окремих волокон у решітці на основі масиву хвилеводів, товщина шарів тонкоплівкових фільтрів – всі ці розміри змінюються пропорційно до зміни температури з коефіцієнтом лінійного розширення. Хоча в деяких випадках у компонентах може бути передбачена компенсація температурних

змін (наприклад, нечутливий до температури біконічний розгалужувач), у загальному випадку має бути вимірною залежністю продуктивності пристрою від температури. Зазвичай вживають активних заходів для компенсації температурного впливу, або виготовляють термостабільні захисні корпуси [13].

Багато характеристик підсилювачів EDFA, у тому числі ті що змінюються з часом, чутливі до температури. Необхідно досліджувати температурну залежність спектра підсилення в очікуваному температурному діапазоні як найважливішої характеристики. Для інших характеристик, або для однієї найбільш впливової, досліджують температурну залежність на використовуваних довжинах хвиль [13].

Щоб одночасно вимірювати параметри всіх каналів, використовують набір фіксованих джерел, довжини хвиль яких відповідають довжинам хвиль кожного хвильового каналу, або широкосмугове джерело ASE, що покриває всю смугу системи передачі. Для проведення послідовних вимірювань можна використовувати лазер, що перестроюється. Для спектральних вимірювань також підбирають відповідний приймач: аналізатор OSA, багатохвильовий або звичайний вимірник хвиль.

3.2 Вплив дисперсії та нелінійних ефектів на параметри ВОЛЗ

Можна виділити три основні явища в оптичному волокні, що обмежують характеристики систем WDM – це хроматична дисперсія, модова поляризаційна дисперсія та нелінійні оптичні ефекти.

3.2.1 Хроматична дисперсія

Важливою оптичною характеристикою скла, що використовується при виготовленні волокна, є дисперсія показника заломлення, що проявляється в залежності від швидкості поширення сигналу від довжини хвилі – матеріальна дисперсія. Крім цього, при виробництві одномодового волокна, коли кварцова нитка витягується зі скляної заготовки, тією чи іншою мірою виникають відхилення в геометрії волокна і в радіальному профілі показника заломлення. Сама геометрія волокна разом з відхиленнями від ідеального профілю також робить істотний внесок у залежність швидкості поширення сигналу від

довжини хвилі, це хвилеводна дисперсія. Спільний вплив матеріальної та хвилеводної дисперсій називають хроматичною дисперсією волокна [2].

Явище хроматичної дисперсії слабшає зі зменшенням спектральної ширини випромінювання лазера. Навіть якби можна було використовувати ідеальне джерело монохроматичного випромінювання з нульовою шириною лінії генерації, то після модуляції інформаційним сигналом відбулося б спектральне розширення сигналу, і тим більше розширення, чим більша швидкість модуляції. Є й інші чинники, які призводять до спектрального розширення випромінювання, у тому числі можна назвати chirпування джерела випромінювання.

Таким чином, вихідний канал представлений не єдиною довжиною хвилі, а групою довжин хвиль у вузькому спектральному діапазоні, хвильовим пакетом. Так як різні довжини хвиль поширюються з різними швидкостями (або точніше, з різними груповими швидкостями), то оптичний імпульс, що має на вході лінії зв'язку строго прямокутну форму, в міру проходження по волокну ставатиме все ширше і ширше. При великому часі розповсюдження у волокні цей імпульс може змішатися з сусідніми імпульсами, ускладнюючи точне відновлення. Зі збільшенням швидкості передачі та довжини лінії зв'язку вплив хроматичної дисперсії зростає [13].

При деякій довжині хвилі λ_0 хроматична дисперсія перетворюється на нуль – цю довжину хвилі називають довжиною хвилі нульової дисперсії. Одномодове кварцове волокно зі ступінчастим профілем показника заломлення має нульову дисперсію на довжині хвилі 1310 нм. Таке волокно часто називають волокном із незміщеною дисперсією [13].

Хвильова дисперсія в першу чергу визначається профілем показника заломлення серцевини волокна та внутрішньої оболонки. У волокні зі складним профілем показника заломлення, змінюючи співвідношення між дисперсією середовища проживання і дисперсією хвилеводу, можна лише змістити довжину хвилі нульової дисперсії, а й підібрати потрібну форму дисперсійної характеристики, тобто форму залежності дисперсії від довжини хвилі.

Форма дисперсійної характеристики є ключовою для систем WDM, особливо по волокну зі зміщеною дисперсією (Рек. ITU-T G.653). Крім параметра λ_0 використовують параметр S_0 , що описує нахил дисперсійної характеристики на довжині хвилі λ_0 (рис. 3.1). У загальному випадку нахил на

інших довжинах хвиль відрізняється від нахилу при довжині хвилі λ_0 . Поточне значення нахилу S_0 визначає лінійну складову дисперсії на околиці λ_0 [14].

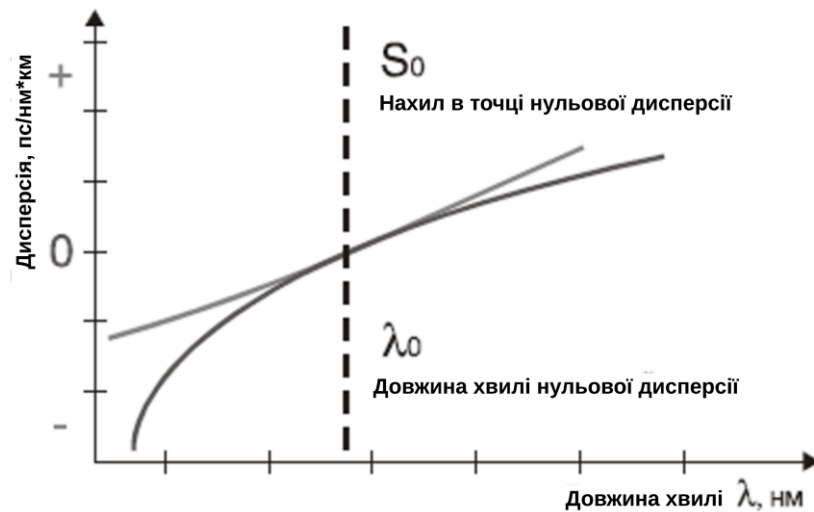


Рисунок 3.1 – Основні параметри залежності хроматичної дисперсії від довжини хвилі

Хроматична дисперсія τ_{chr} (зазвичай вимірюється в пс) можна розрахувати за формулою 3.1:

$$= , \quad (3.1)$$

де: $D(\lambda)$ – коефіцієнт хроматичної дисперсії (пс/(нм*км));

L – довжина лінії зв'язку (км).

Зауважимо, що ця формула не точна у разі ультра-вузькосмугових джерел випромінювання. На рис. 3.2 окремо показані залежності хвилеводної дисперсії для волокна з незміщеною (1) та зміщеною (2) дисперсією та матеріальною дисперсією від довжини хвилі.

Хроматична дисперсія системи передачі чутлива до:

- збільшення довжини та числа ділянок лінії зв'язку;
- збільшення швидкості передачі (збільшується ефективна ширина лінії генерації джерела).

На неї меншою мірою впливають:

- зменшення частотного інтервалу між каналами;

- збільшення кількості каналів.

Хроматична дисперсія зменшується при:

- зменшенні абсолютного значення хроматичної дисперсії волокна;
- компенсації дисперсії.

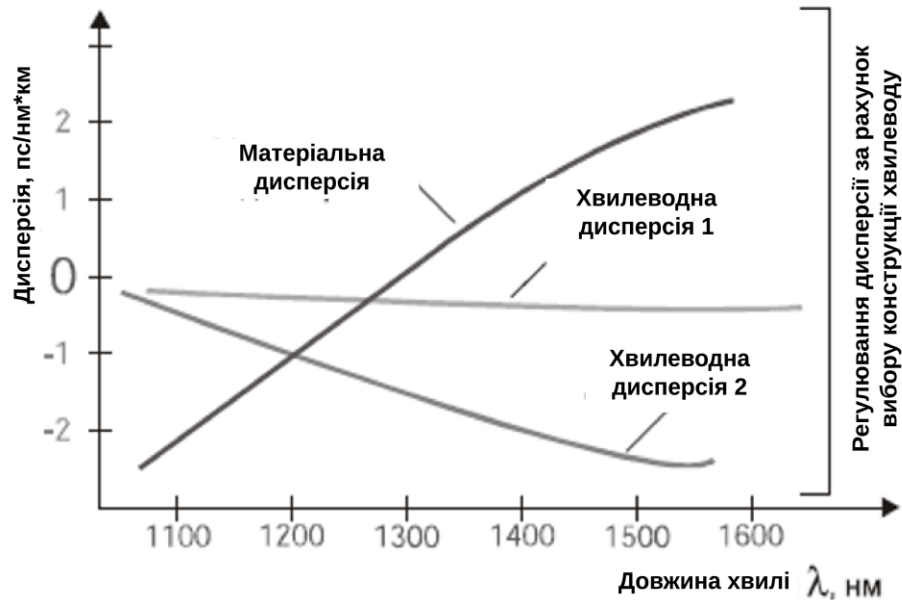


Рисунок 3.2 – Залежність дисперсії від довжини хвилі

У системах WDM із звичайним стандартним волокном (Рек. ІТУ-Т G.652) хроматичній дисперсії слід приділяти особливу увагу, оскільки вона велика в області довжини хвилі 1550 нм.

Описати характеристики ідеального оптичного волокна відносно легко. Вони включають характеристики поширення потужності по волокну, моди із заданим станом поляризації на заданій довжині хвилі та деякі інші характеристики. Однак коли волокна укладені в кабель, а потім прокладаються в різноманітних місцях і експлуатуються за різних умов, то волокно в кабелі стає далеко не ідеальним. Виникаючі в процесі виробництва волокна навантаження призводять до залишкових навантажень у його серцевині та оболонці, та викликають потім важко передбачувані явища подвійного променезаломлення. Крім цього, механічні впливи на волокно в скрученому кабелі створюють несиметричні навантаження, що збільшуються при його намотуванні. І, нарешті, під час монтажу кабель безперервно піддається навантаженням. Це і встановлення арматури, і прокладання в каналізації,

приєднання з'єднувальних муфт і т.д. Всі ці механічні дії ведуть до локальних, псевдовипадково-розподілених деформацій волокна, які порушують геометрію волокна або співвісність серцевини та оболонки.

3.2.2 Поляризаційна модова дисперсія

Поляризаційна модова дисперсія (PMD) – це основний механізм, з допомогою якого дефекти волокна проявляються на характеристиках системи передачі.

У будь-якій точці волокна імпульс поляризованого оптичного випромінювання можна розкласти на поляризаційні складові з двома взаємно ортогональними станами поляризації, спрямованими вздовж двох локально ортогональних осей волокна, так званих швидкої і повільної осей. На практиці, в покладеному в кабель волокні напрямок цих осей і відносна різниця швидкостей поширення по кожній осі (безпосередньо залежать від величини локального двопротомеломлення) змінюються вздовж оптичного шляху (рис. 3.3). На кожній ділянці волокна виникне часова затримка між компонентами оптичного сигналу, розкладеного по швидкій та повільній осях. Через те, що напрям осей двопротомеломлення сусідніх ділянок волокна змінюється випадковим чином, форма і межі оптичного імпульсу зазнають статистичне часове розпливання [14].

Дійсно, існують два взаємно ортогональні стани поляризації, звані основними станами поляризації PSP (Principal State of Polarization). Одне відповідає найшвидшому, інше – найповільнішому часу поширення імпульсу по волокну. Різниця часів поширення називається диференціальною груповою затримкою DGD (Differential Group Delay), що відповідає даній довжині хвилі. Величина затримки PMD визначається значенням DGD, яке усереднене по довжинах хвиль.

Так як окремі фактори, що викликають поляризаційну модову дисперсію PMD, неможливо виділити та виміряти, то явище PMD слід розглядати як безперервний та нестационарний стохастичний процес. Цей процес призводить до розширення інформаційних оптичних імпульсів, що може погіршити якість сигналу за його декодування приймачем (рис. 3.3). Таким чином, модова поляризаційна дисперсія є істотним фактором, що обмежує швидкість передачі по волокну.

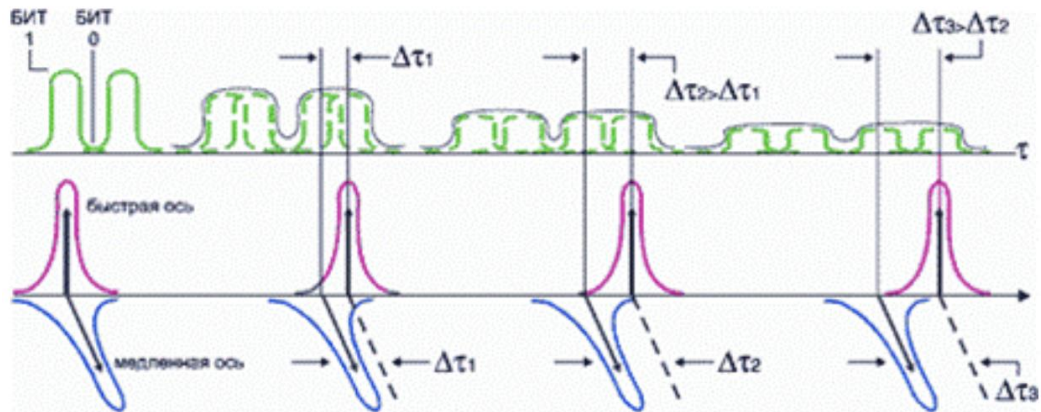


Рисунок 3.3 – Поширення імпульсу під впливом PMD

PMD вимірюється в піко секундах для кожної конкретної ділянки прокладеного волокна в лінії зв'язку.

Для обчислення PMD лінії зв'язку, що складається з кількох ділянок, виконують процедуру статистичного підсумовування. Загальна поляризаційна модова дисперсія лінії зв'язку визначається як квадратний корінь із суми квадратів PMD окремих ділянок, що утворюють лінію зв'язку (3.2). Якщо, наприклад, 9 з 10 ділянок лінії мають PMD по 0,2 пс кожна, а PMD десятої ділянки становить 2 пс, то загальна величина PMD лінії дорівнюватиме 2,088 пс.

$$\text{PMD}_{\text{total}} := \sqrt{\sum_{n=1}^N (\text{PMD}_n)^2} \quad (3.2)$$

Іншими словами, одна погана ділянка волокна псує загальну картину для всієї лінії зв'язку. Тому необхідно проводити тестування всіх ділянок лінії мережі зв'язку. Немає жодних підстав вважати, що якщо кілька вимірних ділянок мають малі затримки PMD, то вся лінія матиме прийнятне значення PMD.

Вплив PMD на якість сигналу лінії зв'язку зростає при:

- збільшенні швидкості передачі (один із найважливіших факторів);
- збільшенні кількості ділянок лінії (рівнозначно збільшенню довжини оптичного каналу);

- збільшенні кількості каналів (при більшому числі каналів зростає ймовірність великого відхилення диференціальної групової затримки від середнього значення хоча б в одному каналі).

Зменшення частотного рознесення каналів впливає PMD незначно (якщо таке зменшення не веде до збільшення числа каналів у фіксованій смузі пропускання, як, наприклад, у смузі посилення EDFA, що дорівнює 40 нм). Однак PMD можна зменшити, ретельно контролюючи геометрію волокна.

Явище PMD є серйозною перешкодою при встановленні систем WDM на мережах із звичайним волокном, що відповідає річкам. ITU-T G.652 (наприкінці 1980-х років було прокладено понад 80 мільйонів кілометрів такого волокна). При використанні нових типів волокна відповідно рек. ITU-T G.653, G.654 і G.655, проблема PMD не стоїть настільки гостро [14].

Критерії для оцінки питомого коефіцієнта PMD, що забезпечують з ймовірністю 99,994% диференціальну затримку менше 0,1 тривалості біта при запасі потужності, що не перевищує 1 дБ, розроблені та запропоновані ITU та наведені у табл. 3.1.

Вклад у PMD вносить як волокно, а й окремі компоненти системи зв'язку. Однак у останньому випадку, внесок у PMD є постійною, не випадковою величиною. Зменшення впливу PMD окремих компонентів досягається шляхом контролю якості у процесі їхнього виробництва.

Таблиця 3.1 – Максимальне значення PMD для заданої швидкості передачі

Бітова швидкість, Гбіт/с	Максимальна затримка PMD, пс	Коефіцієнт PMD для волокна довжиною 400 км, пс/км ^{1/2}
2,5	40	2,0
10	10	0,5
20	5	0,25
40	2,5	0,125

Донедавна PMD другого порядку, що враховує залежність поляризаційної модової дисперсії від довжини хвилі, мала незначний вплив на характеристики мережі. Але після того, як швидкість передачі перевищила 10 Гбіт/с, це явище стало у ряд факторів, що погіршують характеристики систем передачі. В одномодових волокнах великої довжини явище PMD другого порядку завжди супроводжується явищем PMD першого порядку. Тим не менш, PMD другого

порядку призводить до зниження ефективності системи лише за наявності хроматичної дисперсії лінії зв'язку або у разі виникнення чирпірування частоти передавача. PMD другого порядку може мати той самий порядок величини, що хроматична дисперсія, і прямо пропорційна довжині лінії на відміну від PMD першого порядку. Тому PMD другого порядку в першу чергу враховують для ліній телекомунікації. Проте на відміну хроматичної дисперсії PMD другого порядку виявляє стохастичний характер [14].

Статистика розподілу ймовірності DGD впливає на PMD другого порядку тим сильніше, чим менший необхідний коефіцієнт помилок. PMD другого порядку певною мірою залежить від швидкості зміни величини DGD зі зміною довжини хвилі. Однак набагато сильніша величина PMD другого порядку залежить від зміни напряму основних станів поляризації на виході волокна при зміні частоти оптичного сигналу.

3.2.3 Нелінійність

Нелінійні ефекти у волоконній оптиці подібні до нелінійних ефектів в інших фізичних системах (механічних або електронних). Вони породжують генерацію паразитних гармонік на частотах, рівних сумі або різниці основних частот системи. Ці додаткові сигнали призводять до непередбачуваних явищ втрат оптичних мереж зв'язку [14].

Нелінійність волокна не є дефектом виробництва чи конструкції волокна. Це невід'ємна властивість матеріального середовища при поширенні в ньому будь-якої електромагнітної енергії. Нелінійні ефекти слід враховувати через високу когерентність лазерного випромінювання. При заданому рівні потужності, що передається, напруженість електричного поля зростатиме зі збільшенням ступеня когерентності випромінюваних хвиль. Таким чином, у системах WDM з високим ступенем когерентності оптичні сигнали навіть помірної потужності можуть призводити до нелінійних явищ [14].

Нелінійність волокна стає відчутною, коли інтенсивність лазерного випромінювання (потужність на одиницю поперечного перерізу) досягає граничного значення. Крім того, вплив нелінійностей виявляється після проходження сигналом деякого шляху волокна в залежності від параметрів, конструкції волокна та умов його роботи.

Дійсно, напруженість електричного поля E оптичного сигналу, що поширюється, пропорційна його потужності P , помноженої на квадратичну по полю нелінійну добавку n_2 показника заломлення волокна і поділену на ефективну площу серцевини волокна A_{eff} , і може бути представлена відповідно до формули 3.3:

$$E(z + dz) := E(z) \cdot \exp \left[\left(\frac{-\alpha}{2} + i\beta + \frac{\gamma P(z, t)}{2} \right) dz \right], \quad (3.3)$$

де: α – згасання у волокні;

β - фаза хвилі, що розповсюджується;

γ – коефіцієнт нелінійності.

Якщо припустити, що оптичне випромінювання поширюється у волокні у вигляді пучка гауса, то ефективну площу можна виразити через діаметр модового поля волокна MFD (Mode Field diameter), як показано у формулі 3.4:

$$A_{\text{eff}} := \pi \cdot \text{MFD}^2. \quad (3.4)$$

Для волокон зі зміщеною дисперсією (рек. ITU-T G.653) і з ненульовою зміщеною дисперсією (рек. ITU-T G.655) ефективна площа A_{eff} приблизно дорівнює 50-60 мкм², у той час як для волокна зі зміщеною дисперсією (рек. ITU-T G.652) вона становить близько 80 мкм². Іноді використовують поняття ефективної довжини волокна L_{eff} , що дає той самий ефект, як і величина A_{eff} . Для типового одномодового волокна L_{eff} складає 20 км [14].

Залежно від характеру поведінки нелінійного коефіцієнта γ усі нелінійні явища можна поділити на дві категорії. Це явища розсіювання (коли дійсна частина коефіцієнта γ дає посилення або згасання) та явища заломлення (коли уявна частина коефіцієнта γ призводить до фазової модуляції).

У явищах розсіювання сигнал лазера розсіюється на звукових хвилях (акустичних фонах) чи молекулярних коливаннях волокна (оптичних фонах) і зміщується до більш довгих хвиль. Мають місце два наступні ефекти розсіювання:

- вимушене зворотне розсіювання Бріллюена-Мандельштама (на акустичних фонах);

- вимушене раманівське чи комбінаційне розсіювання (на оптичних фононах).

У явищах, що залежать від показника заломлення, при високому рівні потужності сигналу необхідно враховувати нелінійність показника заломлення (формула 3.5):

$$n := n_0 + n_2 I, \quad (3.5)$$

де: n_0 – показник заломлення волокна;

n_2 – коефіцієнт нелінійності показника заломлення волокна ($n_2 = (2...3) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{Вт}$ для кварцового волокна);

I – інтенсивність оптичного сигналу.

До явищ, що залежать від показника заломлення, належать:

- фазова автомодуляція чи вплив сигналу на власну фазу;
- перехресна фазова модуляція або вплив сигналу одного каналу на фазу сигналу в іншому каналі;
- чотирьоххвильове змішування або змішання деякого числа хвиль із виникненням випромінювання на нових довжинах хвиль.

При вимушеному зворотному розсіювання Бріллюена-Мандельштама сигнал лазера створює періодичні області зі змінним показником заломлення, тобто дифракційні ґрати, які розходяться від оптичного пучка подібно до акустичної хвилі. Відбиття, викликані цією віртуальною решіткою, підсилюються (сумуються) і виявляються у формі зворотного розсіяного світла з доплерівським зниженням частоти (зсувом в область довгих хвиль). Дане явище може призводити до значного підвищення рівня шумів та нестабільності поширення оптичного сигналу, оскільки більшість його потужності розсіюється назад [14].

Наприклад, для оптичного сигналу з довжиною хвилі 1525 нм у волокні, що відповідає рек. ІТУ-Т G.653, сигнал, що розсіюється назад, знижує свою частоту приблизно на 10,7 ГГц (+0,085 нм) при смузі пропускання близько 60 МГц. Для волокон рек. ІТУ-Т G.652 сигнал, що розсіюється назад, в тому ж хвильовому діапазоні знижує частоту на 11 ГГц (+0,088 нм) при смузі пропускання близько 30 МГц (рис. 3.4). Насправді явище SBMS починають

враховувати, якщо потужність монохроматичного пучка світла у волокні перевищує 6 дБм.

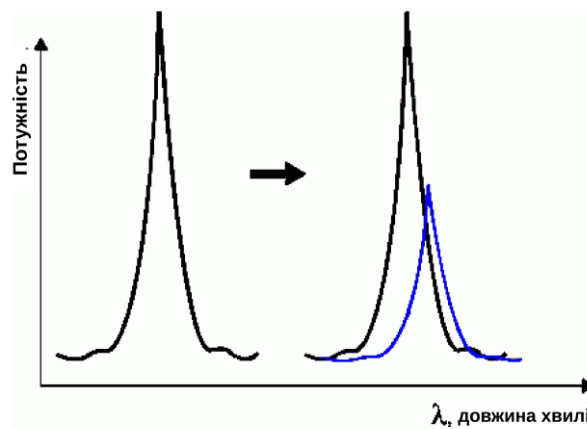


Рисунок 3.4 – Зворотне розсіювання Бріллюєна-Мандельштама

Для придушення зворотного розсіювання Бріллюєна-Мандельштама у існуючих системах було розроблено низку методик. Найбільш популярна полягає в швидкому (50 КГц) розмиванні довжини хвилі несучої частоти в діапазоні порядку 1 ГГц, що набагато більше смуги пропускання розсіяного зворотного сигналу (30-60 МГц).

Коефіцієнт комбінаційного розсіювання (Рамана) набагато менше (перетин комбінаційного розсіювання 10-12 см/Вт), ніж у явищі зворотного розсіювання Бріллюєна-Мандельштама. При цьому частота сигналу знижується набагато більше. Для хвиль із діапазону 1550 нм вона знижується від 10 до 15 ТГц, що відповідає збільшенню довжини хвилі на 100 нм (рис. 3.5).

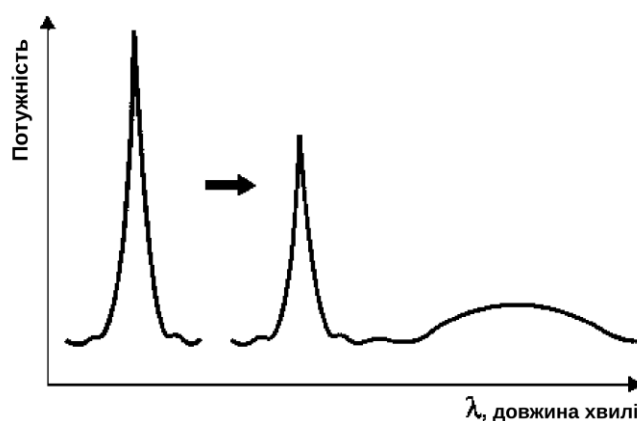


Рисунок 3.5 – Комбінаційне розсіювання (Рамана)

Сигнал, що розсіюється, має набагато більшу ширину смуги пропускання (близько 7 ТГц або 55 нм). У системах WDM це явище служить механізмом перенесення енергії від короткохвильових каналів до довгохвильових.

Фазова автомодуляція. При дуже високій інтенсивності лазерного випромінювання сигнал може модулювати свою власну фазу. Така модуляція розширює спектр сигналу та поширює чи стискає сигнал у часі залежно від знака хроматичної дисперсії. У хвості хвильового пакета виникає зрушення до більш коротких довжин хвиль, а в передньому фронті – в область довгих [14].

У системах WDM сигнал у спектрально розширеному фазової автомодуляції каналі може інтерферувати із сигналами сусідніх каналів.

Фазова автомодуляція зростає при:

- збільшенні потужності, що вводиться в канал, при постійному ефективному перерізі волокна;
- збільшенні швидкості передачі в каналі (при високих швидкостях передачі фронт наростання-спаду інформаційного імпульсу більш крутий);
- негативній хроматичній дисперсії.

Фазова автомодуляція створює більше проблем для систем WDM із волокном рек. G.652 (нульова дисперсія при 1310 нм) порівняно з системами, що використовують волокно зі зміщеною дисперсією у 1550 нм (рек. ІТУ-Т G.653) та з ненульовою зміщеною дисперсією (рек. ІТУ-Т G.655). Зменшення частотного інтервалу між каналами або збільшення числа каналів у системі незначно впливають на явище, що розглядається [14].

Фазова автомодуляція зменшується при:

- нульовій або невеликій позитивній хроматичній дисперсії;
- збільшенні ефективного перерізу волокна;
- компенсації дисперсії.

Явище перехресної фазової модуляції полягає у тому, що сигнал одного каналу модулює фази сигналів у сусідніх каналах. Перехресна фазова модуляція СРМ (Cross-Phase Modulation) чутлива до тих самих факторів, що і явище фазової автомодуляції, а також збільшення числа каналів. Рознесення каналів, як і при фазовій автомодуляції, на неї практично не впливає, але явище СРМ зменшується при:

- збільшенні ефективного перерізу волокна;

- компенсації дисперсії.

Перехресна фазова модуляція менш актуальна у системах WDM, що використовують волокна з більшим ефективним перерізом.

Чотирихвильове змішування FWM (Four-Wave Mixing) є одним із найшкідливіших нелінійних оптичних явищ у системах WDM. При досягненні критичного рівня потужності випромінювання лазера нелінійність волокна призводить до взаємодії трьох хвиль з частотами ω_i , ω_j , ω_k та появи нової четвертої хвилі на частоті $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. Деякі частоти таких помилкових сигналів можуть потрапити у робочі смуги пропускання каналів. У чотиріканальній системі WDM може виникнути 24 помилкових сигнали, а в 16-канальній до 1920 (рис. 3.6) [14].

Такі перешкоди можуть стати катастрофічними для приймального пристрою на кінці лінії.

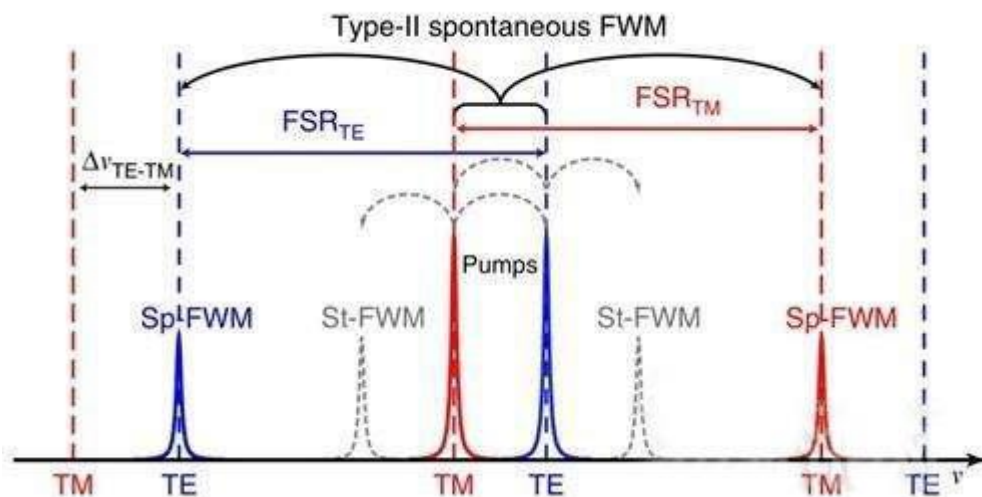


Рисунок 3.6 – Чотирихвильове змішування

Чотирихвильове змішування чутливе до:

- збільшення потужності каналу;
- зменшенню частотного інтервалу між каналами;
- збільшення числа каналів (попри те, що може бути досягнутий рівень порога насичення).

Дію чотирихвильового змішування слід враховувати в системах, що використовують волокно зі зміщеною дисперсією (Рек. G.653). Але воно менш критичне у волокнах з ненульовою зміщеною дисперсією (Рек. G.655), особливо у волокнах з великою ефективною площею. Збільшення швидкості

передачі в каналі незначно впливає на ефективність чотирихвильового змішування.

Вплив чотирихвильового змішування зменшується при:

- збільшенні ефективної площі волокна;
- збільшенні абсолютного значення хроматичної дисперсії.

Явище чотирихвильового змішування менш небезпечне в системах DWDM, що використовують волокно з незміщеною дисперсією (Рек. G.652) на довжині хвилі 1550 нм, оскільки дисперсійна характеристика в цьому випадку відносно полого. Для волокна зі зміщеною дисперсією (рек. G.653) дисперсійна крива має крутий нахил у цьому діапазоні, і явище FWM необхідно враховувати [14].

3.3 Моніторинг мережі DWDM. Контрольно-вимірювальне обладнання

Моніторинг системи DWDM – це безперервний контроль за станом активних каналів за допомогою відповідного набору тестів. Моніторинг ведеться як для того, щоб виявляти будь-які відхилення в оптичних характеристиках мережі, які можуть спричинити її працездатність, так збору статистичної інформації. Моніторинг включає широкий спектр дій, починаючи від планування послідовності тестів та управління їх проведенням і закінчуючи аналізом отриманих даних [15].

Моніторинг активних волокон – єдиний спосіб контролю стану системи. Для цієї мети можна використовувати спеціально виділений контрольний оптичний канал OSC (Optical Supervisory Channel). За допомогою каналу OSC ведеться постійне спостереження за роботою системи та ефективністю передачі даних, виявляються різні неполадки, втрати потужності та інші порушення цілісності сигналу. Канал OSC дозволяє проводити всі необхідні тести безперервно, а не за розкладом і без відключення каналів. Щоб гарантувати цілісність каналу OSC, яким можуть передаватися сигнали управління, довжину хвилі йому зазвичай вибирають поза робочого діапазону підсилювачів EDFA [15].

Для тестування за допомогою каналу OSC не потрібне якесь спеціальне тестове обладнання – використовується тільки те обладнання, яке необхідне для вимірювання вибраних характеристик. Для моніторингу втрат у з'єднувачах та

місцях зварювання волокон можна використовувати вимірювач потужності, а краще оптичний рефлектометр OTDR. За допомогою рефлектометра OTDR можна виявляти деякі проблеми в оптичному волокні до їхньої прояви. Певні дефекти натягу волокна легше виявити на довжині хвилі каналу OSC, а не у робочому діапазоні підсилювача EDFA. Моніторинг енергетичного потенціалу системи зв'язку ведуть за допомогою атенюатора, що перебудовується, і тестера оптичних втрат.

Для моніторингу стану оптичного кабелю використовується різноманітне тестове та вимірювальне обладнання. Насамперед, це оптичні аналізатори спектру OSA та оптичні рефлектометри OTDR. Оптичний аналізатор спектру дозволяє контролювати центральну довжину хвилі, відстань між сусідніми каналами, а також загальні характеристики, такі як потужність, відношення сигнал/шум та ін. (рис. 3.7).

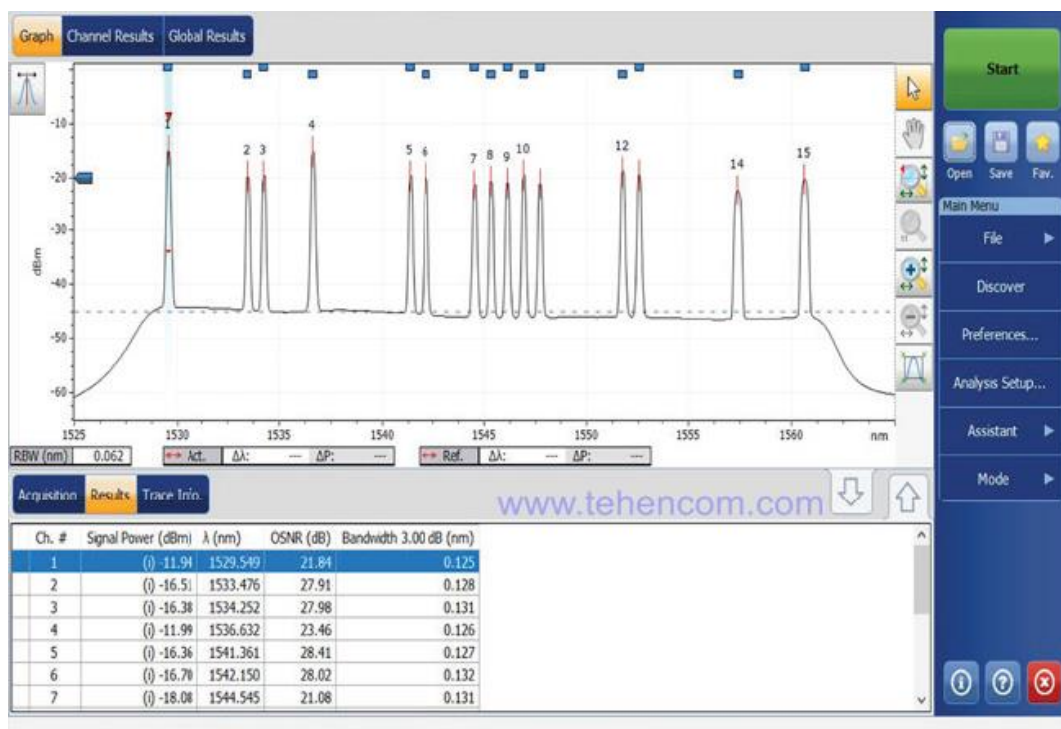


Рисунок 3.7 – Вимірювання OSNR за допомогою OSA

Основні характеристики OSA:

- динамічний діапазон – визначає можливість вимірювання амплітуд сигналів у широкому спектральному діапазоні;
- чутливість - здатність вимірювати оптичні сигнали малої інтенсивності;

- роздільна здатність смуги пропускання RBW (Resolution BandWidth) – можливість розпізнавання близько розташованих довжин хвиль, необхідна для дослідження спектральної структури каналів систем DWDM;

- точність – можливість точно та правильно вимірювати довжини хвиль та потужність.

Оптичні рефлектометри (Optical Time Domain Reflectometer – OTDR) є найбільш повнофункціональним приладом для експлуатаційного аналізу оптичних кабельних мереж.

Рефлектометр являє собою комбінацію імпульсного генератора, розгалужувача та вимірювача сигналу та забезпечує вимірювання відбитої потужності при організації вимірювань з одного кінця. Рефлектометри діють за принципом радара: у лінію посилається імпульс малої тривалості, який поширюється по оптичному кабелю відповідно до релеївського розсіювання та френелівського відбиття на неоднорідностях в оптичному кабелі (дефекти матеріалу, зварювання, з'єднувачі тощо).

На рис. 3.8 як приклад представлений зразок рефлектограми ОВ.

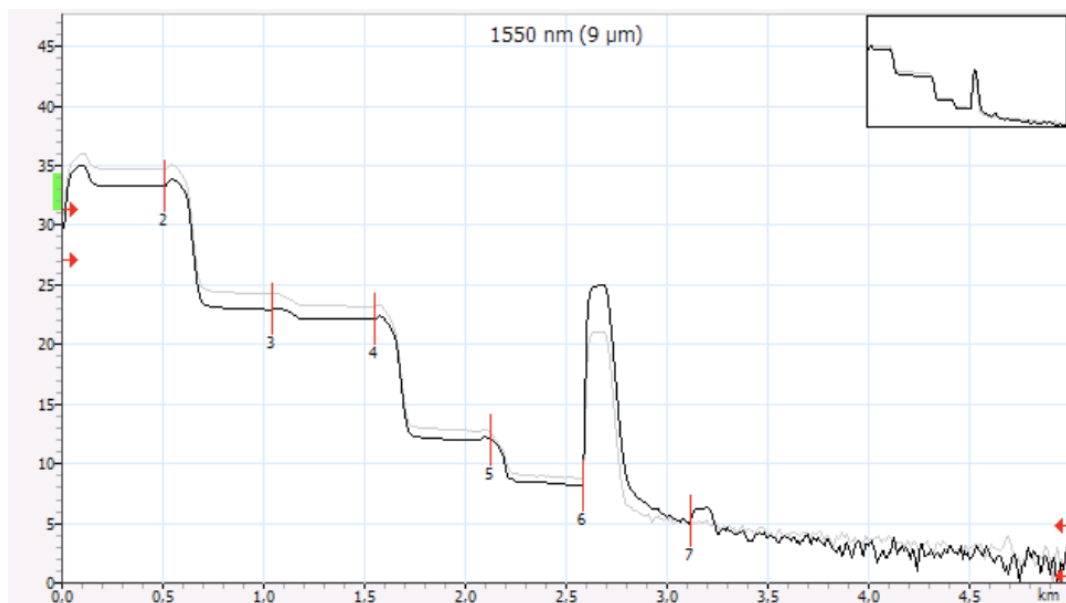


Рисунок 3.8 – Рефлектограма оптичного волокна

Імпульс у точці 0 відповідає локальному френелівському відображенню від стику вхідного торця загального каналу відгалужувача і вхідного торця ОВ, що тестується, точка 1 відповідає місці з'єднання волокон (наприклад, при зрощуванні будівельних довжин). Наявність помітного стрибка у точці 2

свідчить про погану якість з'єднання. Викид 3 може свідчити про наявність локальної неоднорідності типу мікротріщини, точка 4 - френелівське відбиття від вихідного торця ОВ.

За рефлектограмою визначають:

- загальні втрати у волокні та його коефіцієнт загасання;
- розподіл втрат за довжиною волокна;
- розташування муфт (зварних та механічних з'єднань) та втрати в них;
- місце ушкодження волокна;
- довжину оптичного волокна.

3.4 Розрахунок лінії зв'язку за згасанням та дисперсією

Насамперед необхідно розрахувати необхідну пропускну здатність системи з метою визначення кількості інтерфейсів та їх швидкості.

Ділянка мережі проходить територіями семи областей України. Населення цих суб'єктів є споживачем послуг зв'язку, що надаються.

За даними Всеукраїнського перепису населення 2022 р. чисельність населення цих територій складає:

- Харківська область: 2 658 461 чол;
- Полтавська область: 1 386 978 чол;
- Київська область: 1 781 044 чол;
- Житомирська область: 1 208 212 чол;
- Хмельницька область: 1 254 702 чол;
- Рівненська область: 1 203 463 чол;
- Львівська область: 2 512 084 чол.

Розрахуємо кількість телефонних каналів між суб'єктами цих областей за формулою 3.6:

$$ntf := \alpha_1 \cdot f_1 \cdot \gamma \cdot \frac{m_a \cdot m_b}{m_a + m_b} + \beta_1, \quad (3.6)$$

де:

$\alpha_1 = 1,3$ - постійний коефіцієнт фіксованої доступності;

$f_1 = 0,1$ - коефіцієнт тяжіння;

$\gamma = 0,05$ Ерл - питоме навантаження, тобто. середнє навантаження, створюване одним абонентом;

m_a і m_b - кількість абонентів, що обслуговуються станціями АМТС в кінцевих пунктах А і Б (тобто в суб'єктах областей, що розглядаються);

$\beta_1 = 5,6$ – постійний коефіцієнт поставлених втрат.

Кількість абонентів m_i визначається залежно від чисельності населення, що проживає в зоні обслуговування, та розраховується за формулою 3.7:

$$m_i := m_t \cdot N_i \quad (3.7)$$

де m_t - коефіцієнт, що показує співвідношення числа абонентів до загального числа населення областей. Зі статистичних даних, які показують, що у час стаціонарним телефоном користується 30% від всього населення, отримуємо коефіцієнт $m_t = 0,3$;

N_i – чисельність населення областей.

За формулою 3.7 обчислимо число абонентів:

Харківська область: $m_1 = 0,3 \times 2\,658\,461 = 797\,538$ чол;

Полтавська область: $m_2 = 0,3 \times 1\,386\,978 = 416\,093$ чол;

Київська область: $m_3 = 0,3 \times 1\,781\,044 = 534\,313$ чол;

Житомирська область: $m_4 = 0,3 \times 1\,208\,212 = 384\,063$ чол;

Хмельницька область: $m_5 = 0,3 \times 1\,254\,702 = 376\,410$ чол;

Рівненська область: $m_6 = 0,3 \times 1\,203\,463 = 361\,038$ чол;

Львівська область: $m_7 = 0,3 \times 2\,512\,084 = 753\,625$ чол.

Тепер за формулою 3.6 підрахуємо кількість телефонних каналів: між Харківською та Полтавською областями:

$$ntf_1 = 1,3 \times 0,1 \times 0,05 \times 797\,538 \times 1\,386\,978 / (797\,538 + 1\,386\,978) + 5,6 = 3297;$$

між Полтавською та Київською областями:

$$ntf_2 = 1,3 \times 0,1 \times 0,05 \times 416\,093 \times 1\,781\,044 / (416\,093 + 1\,781\,044) + 5,6 = 2198.$$

між Київською та Житомирською областями:

$$\text{ntf3} = 1,3 \times 0,1 \times 0,05 \times 534313 \times 1\,208\,212 / (534313 + 1\,208\,212) + 5,6 = 2414.$$

між Житомирською та Хмельницькою областями:

$$\text{ntf4} = 1,3 \times 0,1 \times 0,05 \times 384063 \times 1\,254\,702 / (384063 + 1\,254\,702) + 5,6 = 1918.$$

між Хмельницькою та Рівненською областями:

$$\text{ntf5} = 1,3 \times 0,1 \times 0,05 \times 376410 \times 1\,203\,463 / (376410 + 1\,203\,463) + 5,6 = 1870.$$

між Рівненською та Львівською областями:

$$\text{ntf5} = 1,3 \times 0,1 \times 0,05 \times 361038 \times 2\,512\,084 / (361038 + 2\,512\,084) + 5,6 = 2058.$$

Таким чином, сумарна кількість телефонних каналів:

$$\text{ntf1} + \text{ntf2} + \text{ntf3} + \text{ntf4} + \text{ntf5} + \text{ntf6} = 3297 + 2198 + 2414 + 1918 + 1870 + 2058 = 13755.$$

Необхідна пропускна здатність V_0 (Гбіт/с) системи DWDM може бути визначена як максимальна швидкість передачі інформації по волокну відповідно до формули 3.8:

$$V_0 := V_{tf} + V_{op} + V_{dsl} + V_{vl} + V_{tr}, \quad (3.8)$$

де V_{TF} – телефонний трафік;

V_{op} – трафік звичайних інтернет-користувачів;

V_{dsl} – трафік DSL-користувачів;

V_{vl} – трафік користувачів виділеної лінії;

V_{tr} - транзитний магістральний трафік 10 Гбіт/с.

З урахуванням раніше розрахованого числа телефонних каналів, необхідна пропускна спроможність для телефонного зв'язку зі швидкістю ОЦК 64 Кбіт/с: $V_{tf} = 0,000064 \times 13755 = 0,88$ Гбіт/с.

Тепер обчислимо потрібну пропускну спроможність для інтернет-трафіку. Припустимо, що цією магістралі проходить до 30% всього інтернет-трафіку регіону. Дане припущення ґрунтується на факті існування в регіоні ще двох магістралей.

За формулою 3.9 визначимо кількість інтернет-користувачів, що обслуговуються цією магістраллю:

$$N_{int} = 0,3 \cdot m_{int} \cdot (N_{kh} + N_{pol} + N_{kiev} + N_{jit} + N_{khm} + N_{riv} + N_{lviv}), \quad (3.9)$$

де $m_{int} = 0,47$ - частка постійних інтернет-користувачів від загальної кількості населення областей - 47%;

$N_{kh}, N_{pol}, N_{kiev}, N_{jit}, N_{khm}, N_{riv}, N_{lviv}$ - кількість населення в областях.

Тоді за формулою 3.9 отримаємо:

$$N_{int} = 0,3 \times 0,47 \times (2658461 + 1386978 + 1781044 + 1208212 + 1254702 + 1203463 + 2512084) = 1692697 \text{ чол.}$$

Необхідну пропускну спроможність для інтернет-користувачів обчислимо за формулою 3.10:

$$B := d \cdot V \cdot E \cdot N_{int}, \quad (3.10)$$

де d – частка користувачів певного виду послуг у відсотках від загальної кількості інтернет-користувачів;

V – швидкість з'єднання, Гбіт/с;

E – питоме навантаження, Ерл.

Частка звичайних інтернет-користувачів зі швидкістю з'єднання $V = 0,000056$ Гбіт/с та питомим навантаженням $E = 0,04$ Ерл становить 10%.

$$V_{op} = 0,1 \times 0,000056 \times 0,04 \times 1692697 = 0,379 \text{ Гбіт/с.}$$

Частка DSL-користувачів зі швидкістю з'єднання $V = 0,001$ Гбіт/с та питомим навантаженням $E = 0,2$ Ерл становить 36%.

$$B_{dsl} = 0,36 \times 0,001 \times 0,2 \times 1692697 = 121,87 \text{ Гбіт/с.}$$

Частка користувачів виділеної лінії зі швидкістю з'єднання $V = 0,001$ Гбіт/с та питомим навантаженням $E = 0,2$ Ерл становить 54%.

$$V_{vl} = 0,54 \times 0,001 \times 0,2 \times 1692697 = 182,81 \text{ Гбіт/с.}$$

Тоді за формулою 3.8 отримаємо:

$$B_0 = 0,88 + 0,379 + 121,87 + 182,81 + 10 = 315,939 \text{ Гбіт/с.}$$

Отже, при швидкості інтерфейсного потоку 10 Гбіт/с необхідне число каналів складе $N\lambda = B_0 / 10 = 32$ канали.

У періоди пікових навантажень необхідна пропускна спроможність магістралі зростає. Припустимо, що вона може збільшитись у півтора рази. Тоді необхідне число каналів становитиме $N\lambda = 1,5 \times 32 = 48$ каналів.

Визначимо можливу довжину регенераційної ділянки. Необхідно окремо розрахувати довжини ділянки для згасання (L_a) і дисперсії (L_w), оскільки причини, що обмежують граничні значення цих величин, незалежні одна від одної.

У загальному випадку необхідно розраховувати два значення довжини регенераційної ділянки згасання:

- L_{amax} - максимальна проектна довжина ділянки регенерації;
- L_{amin} – мінімальна проектна довжина ділянки регенерації.

Розрахунки виконаємо за виразами 3.11 – 3.13:

$$L_{amax} < \frac{A_{max} - M - n \cdot A_{rs}}{A_{ok} + \frac{A_{ns}}{L_{str}}}, \quad (3.11)$$

$$L_{\text{amin}} > \frac{A_{\text{min}}}{A_{\text{ok}} + \frac{A_{\text{ns}}}{L_{\text{str}}}}, \quad (3.12)$$

$$L_{\text{w}} := \frac{4,4 \cdot 10^5}{D \cdot d \cdot B}, \quad (3.13)$$

де A_{max} , A_{min} (дБ) – максимальне та мінімальне значення згасання апаратури ВОСП що забезпечує значення коефіцієнта помилок BER $< 1 \times 10^{-10}$ до кінця терміну служби; для обладнання Huawei Optix BWS 1600g значення параметрів становлять $A_{\text{max}} = 32$ дБ; $A_{\text{min}} = 1$ дБ;

$M = 6$ дБ – системний запас ВОСП кабелю ділянки регенерації;

$n = 2$ – кількість оптичних роз'ємних з'єднань на ділянці регенерації;

$A_{\text{rs}} = 0,5$ дБ – значення згасання потужності сигналу на роз'ємних оптичних з'єднаннях;

$A_{\text{ok}} = 0,25$ дБ/км – кілометрове згасання волокна Corning LEAF;

$A_{\text{ns}} = 0,05$ дБ – середнє значення згасання потужності сигналу на нероз'ємних оптичних з'єднаннях;

$L_{\text{str}} = 4$ км – будівельна довжина кабелю;

$D = 4$ пс/нм * км - дисперсія одномодового оптоволокна Corning LEAF;

$d = 0,1$ нм – ширина спектру ПОМ Huawei Optix BWS 1600g;

$B = 9953$ МГц - широкосмуговість сигналу, що передається.

Тоді, використовуючи вирази 3.11 – 3.13, отримаємо:

$$L_{\text{max}} = (32 - 6 - 2 \times 0,5) / (0,25 + 0,05 / 4) = 95,2 \text{ км};$$

$$L_{\text{amin}} = 1 / (0,25 + 0,05 / 4) = 3,81 \text{ км};$$

$$L_{\text{w}} = 4,4 \times 10^5 / (4 \times 0,1 \times 9953) = 110,51 \text{ км}.$$

Отже, довжина ділянки має бути в межах від 3,81 км до 95,2 км. У таблиці 3.2 наведено проектні довжини ділянок.

Під час передачі сигналів по ВОЛЗ застосовують методи імпульсної кодової модуляції, тобто. передана інформація представляється у вигляді двійкових кодів – бітів 1 і 0, причому 1 відповідає високому рівню потужності, а 0 – низькому. Модульований сигнал передається в ОВ імпульсами з тривалістю τ_0 і швидкістю передачі B_0 біт/с. У процесі поширення внаслідок

дисперсії відбувається «розмивання» імпульсів, тобто збільшення їхньої тривалості.

Якщо тривалість τ отриманих приймачем імпульсів перевищить бітовий інтервал, відбудеться накладення сусідніх імпульсів один на одного, що призводить до міжсимвольної інтерференції. Отже, приймач зможе розпізнати окремі імпульси, й у результаті збільшиться коефіцієнт бітових помилок BER. Бітовий інтервал T_0 (пс) пов'язаний зі швидкістю передачі сигналів V_0 співвідношенням 3.14:

$$T_0 := \frac{1}{V_0}. \quad (3.14)$$

Для стандарту STM-64 отримуємо $T_0 = 100,5$ пс.

Таблиця 3.2 - Довжини кабельних ділянок на трасі Харків - Львів

Станція	Протяжність ділянки, км	Відстань, км
Харків-Пас.	25	0
Люботин		25
Шарівка	18	82
Скороходове		100
Полтава	38	143
Покровське		181
Миргород	35	245
Лубни		280
Яготин	95	384
Київ		479
Фастів	115	546
Бердичів		661
Шепетівка	14	753
Славута		767
Здолбунів	38	817
Дубно		855
Броди	58	918
Красне		976
Львів-Пас.		1020

Максимальна тривалість імпульсу визначається відношенням 3.15:

$$\tau := \frac{T_0}{2}. \quad (3.15)$$

Отже, при швидкості передачі $B_0 = 9953$ Мбіт/с допустима тривалість імпульсу становитиме $\tau = 50,236$ пс.

Початкова тривалість імпульсу визначається виразом 3.16:

$$\tau_0 := \frac{T_0}{4}. \quad (3.16)$$

Для STM-64 $\tau_0 = 25118$ пс.

Кінцева тривалість імпульсу на i -й ділянці виражається через його початкову тривалість τ_0 співвідношенням 3.17:

$$\tau_i := \sqrt{(\tau_{0i})^2 + (\tau_{rezC_i})^2}, \quad (3.17)$$

де τ_{rezC_i} – повна результуюча дисперсія на i ділянці з урахуванням компенсації.

Проведемо розрахунок дисперсії кожної ділянки з таблиці 3.2.

Поляризаційна модова дисперсія τ_{pmd} (пс) для i -ї ділянки розраховується з виразу 3.18:

$$\tau_{pmd_i} := D_{pmd} \cdot \sqrt{L_i}, \quad (3.18)$$

де $D_{pmd} = 0,1$ пс/км – заявлена виробником ПМД волокна;

L_i - довжина i -ї ділянки, км.

Результати розрахунків ПМД наведено у табл. 3.3.

Хроматична дисперсія i -ї ділянки в пікосекундах визначається з виразу 3.19:

$$\tau_{chr_i} := D \cdot d \cdot L_i \quad (3.19)$$

Результати розрахунків зведено до табл. 3.4.

Таблиця 3.3 - Дільничні значення ПМД на трасі Харків - Львів

№ п.п.	Ділянка	Довжина ділянки, км	ПМД, пс
1	Харків-Пас. – Люботин	25	0,5
2	Люботин – Шарівка	57	0,75
3	Шарівка – Скороходове	18	0,42
4	Скороходове – Полтава	43	0,66
5	Полтава – Покровське	38	0,62
6	Покровське – Миргород	64	0,8
7	Миргород – Лубни	35	0,59
8	Лубни – Яготин	100	1
9	Яготин - Київ	95	0,97
10	Київ – Фастів	67	0,82
11	Фастів - Бердичів	115	1,07
12	Бердичів – Шепетівка	92	0,96
13	Шепетівка – Славута	14	0,37
14	Славута – Здолбунів	50	0,71
15	Здолбунів – Дубно	38	0,62
16	Дубно – Броди	63	0,79
17	Броди – Красне	58	0,76
18	Красне – Львів-Пас.	44	0,66

Таблиця 3.4 - Дільничні значення хроматичної дисперсії на трасі Харків - Львів

№ п.п.	Ділянка	Довжина ділянки, км	Хроматична дисперсія, пс
1	Харків-Пас. – Люботин	25	10
2	Люботин – Шарівка	57	22,8
3	Шарівка – Скороходове	18	7,2
4	Скороходове – Полтава	43	17,2
5	Полтава – Покровське	38	15,2
6	Покровське – Миргород	64	25,6
7	Миргород – Лубни	35	14
8	Лубни – Яготин	100	40
9	Яготин - Київ	95	38
10	Київ – Фастів	67	26,8
11	Фастів - Бердичів	115	46
12	Бердичів – Шепетівка	92	36,8
13	Шепетівка – Славута	14	5,6
14	Славута – Здолбунів	50	20
15	Здолбунів – Дубно	38	15,2
16	Дубно – Броди	63	25,2
17	Броди – Красне	58	23,2
18	Красне – Львів-Пас.	44	17,6

$$\tau_{rez\ i} := \sqrt{(\tau_{chr\ i})^2 + (\tau_{pmd\ i})^2} \quad (3.20)$$

Розраховані значення наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Дільничні значення повної дисперсії на трасі Харків - Львів

№ п.п.	Ділянка	Довжина ділянки, км	Повна дисперсія, пс
1	Харків-Пас. – Люботин	25	10
2	Люботин – Шарівка	57	22,8
3	Шарівка – Скороходове	18	7,2
4	Скороходове – Полтава	43	17,2
5	Полтава – Покровське	38	15,2
6	Покровське – Миргород	64	25,6
7	Миргород – Лубни	35	14
8	Лубни – Яготин	100	40
9	Яготин - Київ	95	38
10	Київ – Фастів	67	26,8
11	Фастів - Бердичів	115	46
12	Бердичів – Шепетівка	92	36,8
13	Шепетівка – Славута	14	5,6
14	Славута – Здолбунів	50	20
15	Здолбунів – Дубно	38	15,2
16	Дубно – Броди	63	25,2
17	Броди – Красне	58	23,2
18	Красне – Львів-Пас.	44	17,6

На окремих пунктах буде проводитися компенсація дисперсії. Характеристики модулів компенсації дисперсії Huawei Optix BWS 1600g наведено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - DCM Huawei Optix BWS 1600g

Назва модуля	Загасання, що вноситься, дБ	Довжина ділянки, що компенсується, км	Повна негативна дисперсія модуля, пс
DCM-A	4	20	-8,012
DCM-B	5	40	-16,012
DCM-C	6	60	-24,012
DCM-D	7	80	-32,012
DCM-E	8	100	-40,012

Значення повної дисперсії на кожній ділянці з урахуванням компенсації зведено до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 - Результуюча дисперсія ділянками на трасі Харків - Львів

№ п.п.	Ділянка	Довжина ділянки, км	Модуль компенсації	Результуюча дисперсія, пс
1	Харків-Пас. – Люботин	25	DCM-B	2
2	Люботин – Шарівка	57	DCM-D	-1,2
3	Шарівка – Скороходове	18	DCM-B	-0,8
4	Скороходове – Полтава	43	DCM-C	1,2
5	Полтава – Покровське	38	DCM-C	-0,8
6	Покровське – Миргород	64	DCM-C	1,6
7	Миргород – Лубни	35	DCM-C	-2
8	Лубни – Яготин	100	DCM-B	0
9	Яготин - Київ	95	DCM-B	6
10	Київ – Фастів	67	DCM-C	2,8
11	Фастів - Бердичів	115	DCM-B	6
12	Бердичів – Шепетівка	92	DCM-B	4,8
13	Шепетівка – Славута	14	DCM-C	-2,4
14	Славута – Здолбунів	50	DCM-B	4
15	Здолбунів – Дубно	38	DCM-C	-0,8
16	Дубно – Броди	63	DCM-C	1,2
17	Броди – Красне	58	DCM-C	-0,8
18	Красне – Львів-Пас.	44	DCM-D	1,6

Величини кінцевої тривалості імпульсу на і ділянці з урахуванням впливу дисперсії та її компенсації, розраховані за формулою 3.17, представлені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - Тривалість імпульсу даних під час передачі по трасі Харків - Львів

№ п.п.	Ділянка	Довжина ділянки, км	Тривалість імпульсу, пс
Початкова тривалість			25,197
1	Харків-Пас. – Люботин	25	25,146
2	Люботин – Шарівка	57	25,130
3	Шарівка – Скороходове	18	25,146
4	Скороходове – Полтава	43	25,130
5	Полтава – Покровське	38	25,168
6	Покровське – Миргород	64	25,197
7	Миргород – Лубни	35	25,117
8	Лубни – Яготин	100	25,824
Регенерація			25,273
9	Яготин - Київ	95	25,824
10	Київ – Фастів	67	25,572
11	Фастів - Бердичів	115	25,232

Продовження таблиці 3.8

12	Бердичів – Шепетівка	92	25,434
13	Шепетівка – Славута	14	25,130
14	Славута – Здолбунів	50	25,146
15	Здолбунів – Дубно	38	25,130
16	Дубно – Броди	63	25,168
17	Броди – Красне	58	25,824
18	Красне – Львів-Пас.	44	25,572

Розмір загасання на i -й ділянці визначається за наступною формулою 3.18:

$$A_i := A_{ok} \cdot L_i + A_{ns} \cdot nns_i + A_{rs} \cdot nrs_i, \quad (3.18)$$

де nns_i - кількість нероз'ємних зварних з'єднань на i -й ділянці, що визначається відношенням довжини ділянки до будівельної довжини кабелю.

Розраховані величини згасання наведена у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 - Дільничні величини згасання в кабелі на трасі Харків - Львів

№ п.п.	Ділянка	Довжина ділянки, км	Величина згасання, дБ
1	Харків-Пас. – Люботин	25	7,56
2	Люботин – Шарівка	57	15,96
3	Шарівка – Скороходове	18	5,72
4	Скороходове – Полтава	43	12,28
5	Полтава – Покровське	38	10,97
6	Покровське – Миргород	64	17,8
7	Миргород – Лубни	35	10,19
8	Лубни – Яготин	100	27,25
9	Яготин - Київ	95	25,94
10	Київ – Фастів	67	18,59
11	Фастів - Бердичів	115	31,19
12	Бердичів – Шепетівка	92	25,15
13	Шепетівка – Славута	14	4,68
14	Славута – Здолбунів	50	14,13
15	Здолбунів – Дубно	38	10,98
16	Дубно – Броди	63	17,54
17	Броди – Красне	58	16,23
18	Красне – Львів-Пас.	44	12,55

3.5 Аналіз параметрів оптичної лінії

Технічні вимоги до лінії зв'язку зазвичай задаються за допомогою допустимого значення коефіцієнта помилок BER (Bit Error Rate), який залежить від конкретної програми і може змінюватися від 10^{-3} для цифрової передачі голосу до 10^{-12} для передачі даних. Щоб лінія зв'язку могла підтримувати велику кількість додатків, вона повинна мати дуже низьке значення BER. Система DWDM повинна мати низьке значення BER на кожному каналі окремо [3].

Чутливість приймача показує, за якою мінімальною потужністю сигналу приймач ще забезпечує необхідне значення BER. Щоб визначити рівень потужності сигналу, що попадає на приймач, необхідно знати бюджет лінії зв'язку – сумарні втрати потужності на всіх компонентах від передавача до приймача.

Різниця між потужністю сигналу, що надходить приймач, і чутливістю приймача – важлива величина, яку називають запасом втрат лінії зв'язку. Зазвичай, при проектуванні ліній зв'язку запас втрат повинен становити не менше 5 дБ. Як би акуратно і ретельно не був підрахований бюджет лінії, значення якихось величин можуть виявитися більшими за очікувані; крім того, можлива поява неврахованих джерел втрат. Номінальні значення характеристик, зазначені постачальником, іноді можуть відрізнятися від їх фактичних значень. Тому при проектуванні лінії зв'язку необхідно передбачати певний запас втрат [3].

З розрахованих даних можна побудувати діаграму рівнів сигналу лінії у обох напрямках: Харків – Львів (рис. 3.9) і Львів – Харків (рис. 3.10). Проаналізуємо ці діаграми.

Рівень потужності сигналу джерела випромінювання, який може забезпечити OTU E2LWF системи Huawei Optix BWS 1600g, у нормальних умовах повинен перебувати в межах $-5...0$ дБм. Коливання потужності може бути обумовлені температурними впливами чи старінням лазера. Для лінії встановлено потужність джерела -2 дБм в обох напрямках.

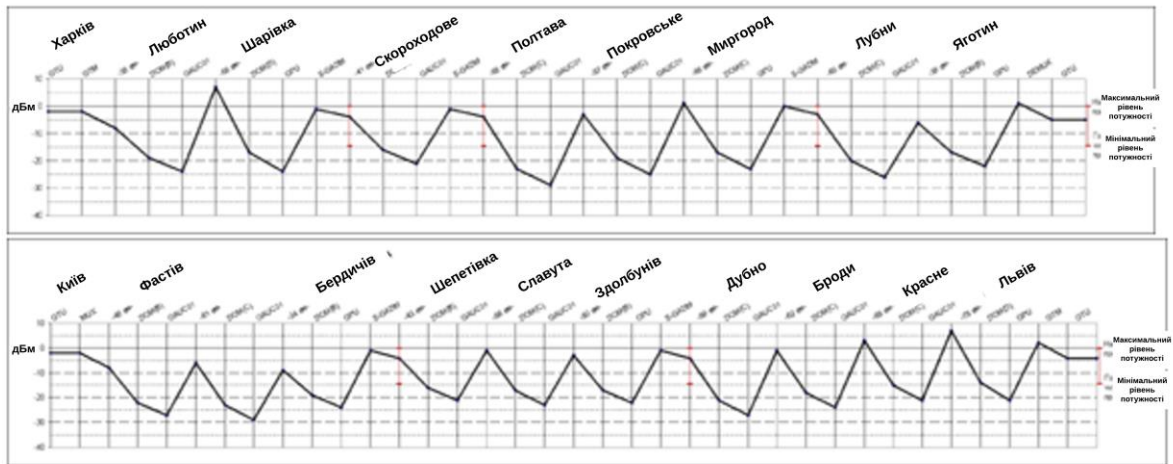


Рисунок 3.9 – Діаграма рівнів потужності сигналів на ділянці Харків – Львів

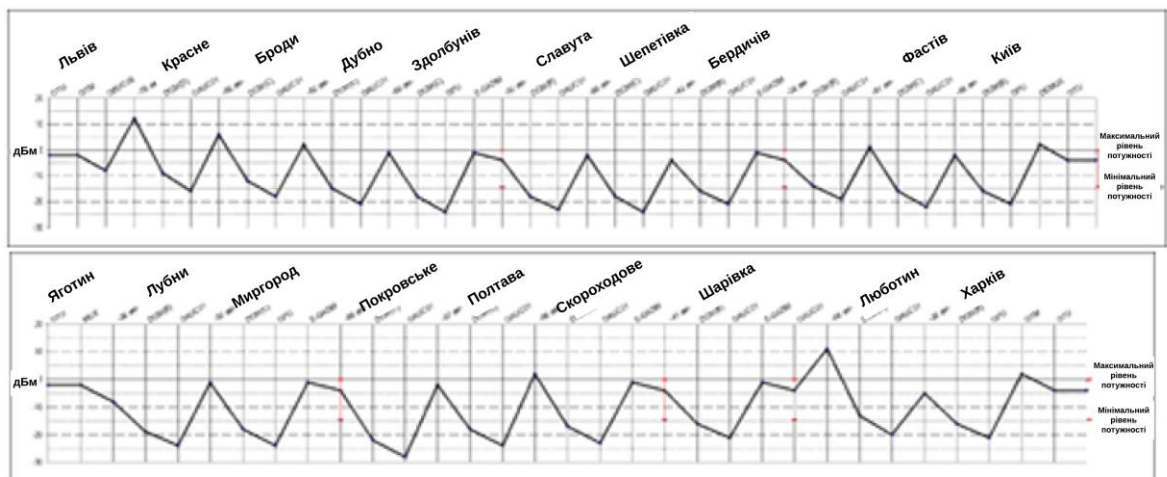


Рисунок 3.10 – Діаграма рівнів потужності сигналів на ділянці Львів – Харків

Рівень потужності сигналу на приймачі для обладнання Huawei Optix BWS 1600g має знаходитись у межах $-14 \dots 0$ дБм. Ця умова поширюється як на термінальне обладнання кінцевих пунктів, так і на обладнання пунктів вводу/виводу каналів. Межі позначені на діаграмах червоним кольором.

Значення згасання потужності сигналу на ОТМ при мультиплексуванні/демультиплексуванні 32 каналів становить 6 дБм. При збільшенні числа каналів до 48 згасання може досягти 8 дБм. Згасання

потужності сигналу на OADM становить 3 дБм. Значення згасання потужності у компенсаторах дисперсії наведено у табл. 3.6.

Значення потужності прийомі у бік Харків - Львів наведено у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 - Потужність сигналу на прийомі у напрямку Харків - Львів

№ п.п.	Пункт прийому сигналу	Потужність сигналу, дБм
1	Люботин	-4
2	Полтава	-4
3	Миргород	-3
4	Київ	-5
5	Бердичів	-4
6	Дубно	-4
7	Красне	-4

Таким чином запас по потужності прийому становить не менше 9 дБм. Цього значення достатньо, щоб якість прийому залишалася в допустимих межах протягом усього терміну служби обладнання з урахуванням шкідливих факторів.

Найвищий рівень потужності сигналу лінії становить 7 дБм. Цей рівень досягається на ділянках Шарівка – Скороходове та Шепетівка – Славута. Нелінійні ефекти починають особливо сильно проявлятися при потужностях сигналу понад 17 дБм.

Мінімальний рівень потужності сигналу лінії становить -29 дБм. Він досягається на ділянках Лубни – Яготин та Фастів – Бердичів. Нижній поріг чутливості оптичних підсилювачів становить -34 дБм.

Значення потужності прийомі у бік Львів - Харків наведено у табл. 3.11.

Таблиця 3.11 - Потужність сигналу на прийомі у напрямку Львів - Харків

№ п.п.	Пункт прийому сигналу	Потужність сигналу, дБм
1	Броди	-4
2	Славута	-4
3	Бердичів	-4
4	Київ	-4
5	Полтава	-4
6	Люботин	-4
7	Харків-Пас.	-4

Запас за потужністю прийому таким чином становить не менше 10 дБм.

Найвищий рівень потужності сигналу лінії становить 4,7 дБм. Цей рівень досягається дільниці Славута – Шепетівка. Нагадаємо, що нелінійні ефекти починають особливо сильно проявлятися при потужностях сигналу понад 17 дБм.

Мінімальний рівень потужності сигналу в лінії становить –31 дБм на ділянці Бердичів – Фастів.

Підведемо підсумки. Системний запас потужності прийому становить 9-10 дБм. Це достатньо для підтримки прийнятної якості сигналу протягом гарантованого терміну служби обладнання. Мінімальний рівень сигналу лінії не опускається нижче -29 дБм за нормальних умов. Нижній поріг чутливості оптичних підсилювачів -34 дБм, тобто існує запас потужності щонайменше 3 дБм. Максимальна потужність сигналу лінії досягає 4,7 дБм. Нелінійні ефекти починають проявлятися при рівні сигналу понад 17 дБм. Таким чином, існує запас потужності підсилення в 12 дБм.

Поширення імпульсу з допомогою дисперсії не істотно впливає на якість переданого сигналу завдяки її своєчасній компенсації. Детальні розрахунки було проведено у пункті 3.4.

Нелінійні ефекти зазвичай виявляються тільки в процесі експлуатації мережі, передбачити їх появу і ступінь впливу неможливо. Відомо, що на виникнення нелінійностей сильно впливає високий рівень потужності сигналу. Цей параметр враховано та наведено у розрахунках.

У системі Huawei Optix BWS 1600g передбачено можливість дистанційного моніторингу параметрів обладнання та стану оптичного тракту, що дозволяє своєчасно виявляти виникнення несправностей та аномалій.

4 РОЗДІЛ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

Найважливіша складова системи захисту – забезпечення фізичної безпеки системи передачі. Загроз піддається не тільки обладнання DWDM, встановлене у вузлах лінії зв'язку, але і сам оптичний тракт - кабель, підвішений на опорах КС, і місця його з'єднання (муфти). До таких загроз можна віднести:

- природні чинники (зокрема кліматичні);
- шкідливі дії людини.

Ділянка мережі проходить територіями Харківської, Полтавської, Київської, Житомирської, Хмельницької Рівненської та Львівської областей. У цих районах панує помірно-континентальний клімат, який характеризується відносно великими амплітудами коливань температур, як річних, і добових. У цих умовах у холодну пору року можливе промерзання оптичних муфт внаслідок конденсації вологи та її подальшого замерзання (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Наслідки промерзання оптичної муфти

Істотною загрозою цілісності кабелю є також урагани, які виникають під впливом континентальних повітряних мас.

Шкідливі дії людини найчастіше виявляються у вигляді крадіжки ділянки кабелю.

Для відновлення кабелю та муфт після пошкоджень вздовж усієї ділянки мережі розміщуються ремонтно-відновлювальні бригади.

Також важливою фізичною складовою інформаційної безпеки є електробезпека. Встановлення додаткових джерел живлення не тільки

допомагає запобігти пошкодженню обладнання від стрибків напруги та займання, але також запобігає втраті даних при відключенні живлення. На рис 4.2 показаний типовий приклад розміщення додаткових джерел живлення та стабілізаторів напруги у стійках з обладнанням Huawei Optix BWS1600g.

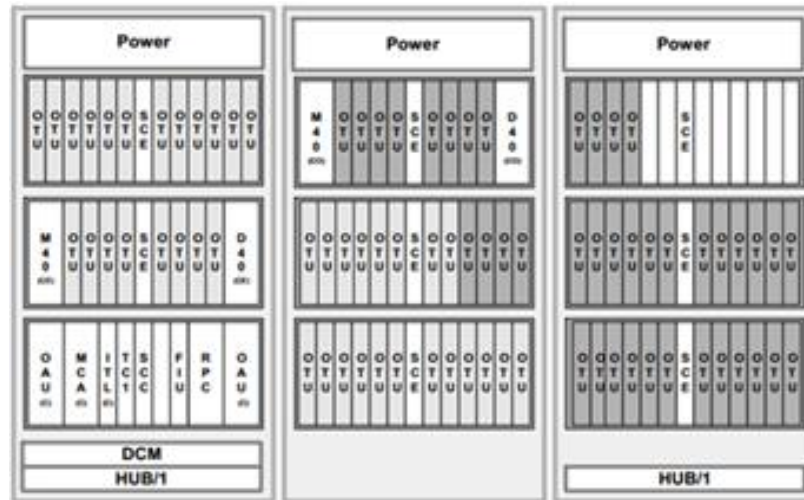


Рисунок 4.2 – Розміщення джерел живлення у типовій конфігурації термінального мультиплексора Huawei Optix BWS 1600g

На вузлах лінії зв'язку має бути передбачена можливість встановлення генераторів у разі тривалого відключення електроенергії.

У процесі аналізу інформаційних загроз безпеці мережі можна виділити три їх джерела:

- недоліки застосовуваної системи захисту;
- шкідливі програми;
- порушники.

Кожне з цих джерел загроз є комплексним і має бути розглянуте.

Недоліки системи захисту. Будь-яка система захисту будується навколо певної операційної системи, яка використовує стандартні протоколи зв'язку. Система захисту використовує певні засоби або механізми, які потребують правильного налаштування. Крім цього, необхідно правильно застосовувати ці засоби захисту [15].

Звідси виділимо три можливі недоліки системи захисту:

- технічні вади. До них можна віднести недоліки стандартних мережевих протоколів передачі даних (уразливість відповідних сервісів, побудованих на їх

основі), проломи в операційних системах, недосконалість параметрів захисту мережевого обладнання;

- конфігураційні недоліки, такі як використання простих паролів, неправильне настроювання використання служб і протоколів, неправильна конфігурація мережевого обладнання тощо;

- недоліки застосування. До них належать невідповідність програмно-апаратних засобів політиці захисту, недокументованість політики захисту, відсутність алгоритму дій при вторгненнях і плану відновлення системи, внутрішні розбіжності та конфлікти в організації і т.д. [15].

Шкідливі програми. Існує три типи шкідливих програм – вірус, черв'як та «троянський кінь».

Вірус – це шкідливий машинний код, який впроваджується (заражає) у робочі програми та виконувані файли. Для активізації вірусу потрібно запустити заражену програму. Вірус може перебувати на комп'ютері тривалий час у неактивному стані. У певний час він може активуватися і розпочати шкідливу діяльність.

Черви – це небезпечний тип машинного коду, який копіює себе самостійно. На відміну від вірусів, черв'яки запускають себе самі і автоматично розсилають свої копії електронною поштою, що дозволяє їм швидко поширюватися по мережі.

"Троянський кінь" - це шкідлива програма, яка запускається під виглядом необхідної програми. У такий спосіб можуть поширюватися віруси чи черв'яки.

Порушники. Особа, яка намагається отримати несанкціонований доступ до мережі, є порушником. Розрізняють два основні види порушників - зломщик (cracker) та хакер (hacker).

Зломщик – це людина, яка намагається без дозволу досліджувати систему захисту чи зламувати її. Як правило, діяльність хакера носить шкідливий характер.

Хакер – це людина, яка тестує цілісність та надійність системи захисту. Після виявлення проломів у системі захисту, хакер може викласти цю інформацію в Internet. Дії хакера звичайно не містять злого наміру.

Отже, мережа може зазнавати атак. Існує багато типів мережевих атак. Для ефективної протидії атакам потрібне використання відповідних засобів.

Використання необхідного засобу протидії можливе у разі визначення типу атаки, тому атаки необхідно класифікувати. Можна виділити чотири типи атак:

- розвідка;
- несанкціонований доступ;
- блокування сервісу;
- заміна даних [15].

Розвідка являє собою несанкціоноване дослідження структури мережі, побудова її карти, моніторинг служб та виявлення точок уразливості.

Атаки несанкціонованого доступу використовують відомі вразливі місця у службах автентифікації, закритих баз даних, сервісах WEB та FTP.

Атака блокування сервісу (DoS – Denial of Service) полягає в посиленні великої кількості запитів на вузол або мережу, що атакується, що призводить до перевантаження атакованого ресурсу і уповільнення або припинення обслуговування легальних користувачів.

Атаки типу підміни даних полягають у перехопленні даних, що пересилаються по каналу зв'язку, їх зміні та повторній передачі.

Для захисту від атак застосовують міжмережні екрани.

На рис. 4.3 показано типову схему підключення системи управління DWDM з використанням міжмережного екрану.



Рисунок 4.3 – Схема підключення системи керування DWDM із використанням міжмережевого екрану

Реалізація заходів щодо забезпечення безпеки покладено на організації, які обслуговують обладнання на вузлах лінії зв'язку.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі були розглянуті основні аспекти застосування технології DWDM на ділянці існуючої мережі великої протяжності. При цьому особливу увагу було приділено аналізу параметрів ВОЛЗ та аномалій, що виникають у процесі експлуатації мережі, їх впливу на сигнал, що передається, а також методам їх виявлення та контролю.

У першому розділі роботи наведено загальні відомості про досліджувану ділянку мережі Харків - Львів та його технічні специфікації (характеристики кабелю та обладнання), а також основні моменти технології хвильового мультиплексування.

У другому розділі більш докладно описана організація передачі даних з ВОЛЗ відносно технології DWDM. Були визначені специфіки технічних вимог до мережі DWDM, описані технологічні рішення, що застосовуються в мережевому обладнанні, розглянуто характеристики різних типів оптичних волокон та аспекти застосування завадостійкого кодування.

Третій (основний) розділ присвячений безпосередньо дослідженню параметрів та аномалій ділянки мережі Харків - Львів. Тут описується вплив клімату та різних оптичних ефектів на параметри лінії зв'язку, наведено огляд контрольньо-вимірювального обладнання, яке використовується для спостереження за цими параметрами. Також у цьому розділі проведено розрахунки основних оптичних показників – згасання та дисперсії. За результатами розрахунків були побудовані діаграми розподілу потужності сигналу, що передається. Після аналізу отриманих даних було зроблено висновки про рівень впливу різних чинників на параметри ВОЛЗ.

У розділі інформаційної безпеки розглянуто основні чинники, які становлять загрозу працездатності лінії зв'язку: фізичні на оптичний кабель, несанкціонований доступ і пошкодження устаткування чи даних.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бахаревський А. / DWDM мережі нового покоління: [Електронний ресурс] // Сайт Ciscoexpro.
2. Кліматичні умови України: [Електронний ресурс] // <https://storymaps.arcgis.com/stories/7c1e5428b65e4514bbb266983b54832c>
3. Introduction to DWDM Technology: Cisco Systems, Inc., 2001. – 66 с.
4. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable: Recommendation ITU-T G.652 / ITU-T, 2009. – 22 с.
5. Транспортні телекомунікаційні технології : навчальний посібник / Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 162 с.
6. Рекомендація ITU-T G.655. Характеристики одномодового оптичного волокна з ненульовою зміщеною дисперсією.
7. Рекомендація ITU-T G.975. Forward error correction.
8. Рекомендація ITU-T G.662. Загальні характеристики оптичних підсилювачів та систем.
9. Посібник з тестування обладнання DWDM. - ВАТ «Укртелеком», 2010. - 34 с.
10. Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers: Recommendation ITU-T G.692/ ITU-T, 2005. – 8 с.
11. OptiX BWS 1600G Backbone DWDM Optical Transmission System: Hardware Description. - Huawei Technologies Co., Ltd., 2011. – 851 с.
12. OptiX OSN 8800/6800/3800: Hardware Description. - Huawei Technologies Co., Ltd., 2010. – 2012 с.
13. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid: Recommendation ITU-T G.694.1/ ITU-T, 2012. – 20 с.
14. Synchronous frame structures used at 1544, 6312, 2048, 8448 and 44 736 kbit/s hierarchical levels: Recommendation ITU-T G.704/ ITU-T, 1998. – 45 с.
15. Технології захисту інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах : навч. посіб. / А. В. Жилін, О. М. Шаповал, О. А. Успенський ; ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 213 с.