Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Ефективність передачі даних за технологією WDM»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи ТСМ-23м
спеціальності 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
_____ Согур А. А.

Керівник: к.т.н., професор каф. ІКСТ
_____ Барась С. Т.
«16» _____12_____ 2024 р.

Опонент: д.т.н., професор каф. ІРТС
_____ Семенов А.О.
«16» _____12_____ 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри ІКСТ
_____ д.т.н., проф. Кичак В.М.
«16» _____12_____ 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
"24" 09 2024 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Согуру Антонію Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Ефективність передачі даних за технологією WDM
керівник роботи Барась Святослав Тадіонович, канд. техн. наук, професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "17" 09 2024 року № 310
2. Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: технології DWDM (міжканальні інтервали 1.6 нм, 0.8 нм, 0.4 нм та 0.2 нм) та CWDM (міжканальні інтервали не менше 20 нм); діапазон хвиль для технології DWDM від 1525 до 1565 нм; швидкість передачі даних не менше 40 Гбіт/с; розрахунок одномодового оптичного волокна для довжини хвилі 1550 нм, показника заломлення серцевини 1,4469, світловідбивної оболонки – 1,4396.
4. Зміст текстової частини: 1.Порівняльний аналіз технологій TDM та WDM. 2. Аналіз методів підвищення пропускної спроможності ВОЛТ. 3. Методи та засоби компенсації впливу дисперсійних явищ у волокні. 4. Розрахунок параметрів лінійного тракту для технології WDM. 5. Економічна частина.
5.Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Принцип роботи та загальний вид WDM-системи. Трансформація єдиного каналу у WDM. Робочі діапазони технологій CWDM та DWDM. Таблиця порівняльних характеристик технологій CWDM та DWDM. Принцип роботи мультиплексора введення-виведення (ROADM). Схема однокаскадного EDFA-підсилювача. Структура сигналу DP-QPSK та AM, Структура передавача DP-QPSK. Залежність хроматичної дисперсії стандартного одномодового волокна та DCF – волокна для різних профілів показника заломлення від довжини хвилі.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Барась С. Т., професор кафедри ІКСТ	04.09.2024	16.12.2024
Економічна частина		04.09.2024	16.12.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Техніко-економічне обгрунтування розробки	16.09.2024р.	
3.	Порівняльний аналіз технологій TDM та WDM. Аналіз методів підвищення пропускної спроможності ВОЛТ	12.10.2024р.	
4.	Методи та засоби компенсації впливу дисперсійних явищ у волокні	30.10.2024р.	
5.	Розрахунок параметрів лінійного тракту для технології WDM	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент _____ (підпис) Согур А. А.

Керівник роботи _____ (підпис) Барась С. Т.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396.2

Согур А. А. Ефективність передачі даних за технологією WDM. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 128 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 21 назв; рис.: 26; табл. 15.

Робота присвячена дослідженню режимів роботи волоконно-оптичних систем передачі для розробки рекомендацій щодо підвищення їх продуктивності при застосуванні технології хвильового мультиплексування.

Метою роботи є визначення напрямків удосконалення WDM-систем для підвищення ефективності передачі даних. Проведено порівняльний аналіз технологій часового та хвильового мультиплексування і показано переваги систем WDM за критерієм продуктивності. Проаналізовані методи підвищення пропускної спроможності волоконно-оптичних лінійних трактів при використанні технології WDM і у тому числі методи та засоби компенсації впливу дисперсійних явищ у волокні. Виконано розрахунки параметрів лінійного тракту для технології WDM. Наведено параметри та характеристики джерел випромінювання оптичного сигналу, оптичних приймачів та інших компонентів WDM-систем, показано підходи щодо їх правильного вибору.

Робота містить п’ять розділів. У першому розділі виконано порівняльний аналіз технологій TDM та WDM.

У другому розділі досліджено методи підвищення пропускної спроможності ВОЛТ.

У третьому розділі виконано дослідження методів та засобів компенсації впливу димперсійних явищ у волокні.

У четвертому розділі проведено розрахунок параметрів лінійного тракту для технології WDM.

У п’ятому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ABSTRACT

Sogur A. A. Data transmission efficiency using WDM technology. Master's qualification work in specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 128 p.

In Ukrainian. Bibliography: 21 titles; fig.: 26; table. 15.

The work is devoted to the study of the operating modes of fiber-optic transmission systems to develop recommendations for increasing their performance when using wave multiplexing technology.

The purpose of the work is to determine the directions of improving WDM systems to increase data transmission efficiency. A comparative analysis of time and wave multiplexing technologies is carried out and the advantages of WDM systems are shown by the criterion of performance. Methods for increasing the throughput of fiber-optic linear paths when using WDM technology are analyzed, including methods and means of compensating for the influence of dispersion phenomena in the fiber. Calculations of the linear path parameters for WDM technology are performed. The parameters and characteristics of optical signal radiation sources, optical receivers and other components of WDM systems are presented, and approaches to their correct selection are shown.

The work contains five sections. In the first section, a comparative analysis of TDM and WDM technologies is performed.

In the second section, methods for increasing the bandwidth of VOLT are investigated.

In the third section, a study of methods and means of compensating for the influence of dispersion phenomena in the fiber is performed.

In the fourth section, the calculation of the linear path parameters for WDM technology is performed.

In the fifth section, an economic justification of the feasibility of implementing this research work is performed.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ……..... 5
ВСТУП …….. 8
1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ TDM ТА WDM ……... 11
1.1 Загальні принципи роботи мереж передачі даних на оптичному волокні ……..……..……..…..... 11
1.2 Часове мультиплексування компонентних потоків TDM ……..….. 14
1.3 Хвильове мультиплексування оптичних сигналів WDM ……. 18
1.3.1 Основні складові технології …….……..... 18
1.3.2 Характеристика переваг та недоліків технології ……...… 20
1.3.3 Огляд технологій CWDM та DWDM ……..……...…. 23
1.4 Аналіз характеристик технологій TDM та WDM …..……..….. 26
1.5 Висновки до розділу …….……..…….. 29
2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВОЛТ …….…….. 30
2.1 Огляд методів підвищення пропускної здатності ВОСП ……..... 30
2.2 Вплив методів мультиплексування на ефективність ВОСП ……..... 31
2.3 Напрямки удосконалення компонентів WDM-системи ……... 37
2.4 Помилки в системах WDM при прийомі оптичного сигналу …..…… 44
2.5 Методи підвищення продуктивності WDM-систем ……..... 45
2.5.1 Збільшення швидкості передачі в системі ……..... 47
2.5.2 Збільшення дальності передачі ……... 50
2.6 Гнучкість та масштабованість сучасних оптичних систем ……..… 53
2.6.1 Формати модуляції. Суперканали …….. 53
2.6.2 Комутація на фотонному рівні ……..... 54
2.6.3 Комутація на електронному рівні ……..…. 55
2.6.4 Програмно-керовані мережі ……..... 55
2.7 Висновки до розділу……...…….. 57
3 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ДИСПЕРСІЙНИХ ЯВИЩ У ВОЛОКНІ ……..... 59

3.1	Оцінка впливу хроматичної дисперсії ……...	59
3.2	Характеристика стратегій компенсації дисперсії ………	68
3.3	Засоби компенсації хроматичної дисперсії в одномодовому волокні.	70
3.3.1	Характеристики компенсаторів дисперсії ……..	71
3.3.2	Волоконні компенсатори дисперсії ……..….	72
3.3.3	Компенсатори дисперсії на Брегівських решітках ……	75
3.3.4	Динамічні компенсатори дисперсії ……..….	77
3.4	Компенсація дисперсії за допомогою оптичного та електричного оброблення сигналів …….…...	77
3.5	Висновки до розділу …….....	79
4	РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ WDM ……..……..	81
4.1	Структура ОЛТ ВОСП з WDM ……...…	81
4.2	Вибір джерела випромінювання та фотоприймача ……..	83
4.3	Розрахунок параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчатим профілем показника заломлення ……..	86
4.4	Розрахунок параметрів багатомодового градієнтного волокна ……..	88
4.5	Розрахунок параметрів одномодового оптичного волокна ……..…	91
4.6	Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням згасання…….....	94
4.7	Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії……...……..…	95
4.8	Висновки до розділу …….....	96
5	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА …….....	98
5.1	Оцінювання наукового ефекту…….....	98
5.2	Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи……...	101
5.2.1	Витрати на оплату праці…….....	101
5.2.2	Відрахування на соціальні заходи……..	105
5.2.3	Сировина та матеріали…….....	105
5.2.4	Розрахунок витрат на комплектуючі……..	106

5.2.5	Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт……..	107
5.2.6	Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт…	107
5.2.7	Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень……..	108
5.2.8	Паливо та енергія для науково-виробничих цілей……	110
5.2.9	Службові відрядження…….....	110
5.2.10	Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації……...……	111
5.2.11	Інші витрати……...……...……	111
5.2.12	Накладні (загальновиробничі) витрати……..	111
5.3	Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи……...…….....	112
5.4	Висновки до розділу …….....	114
	ВИСНОВКИ ……..	115
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……	118
	Додаток А (обов’язковий) - Ілюстративний матеріал ……...	120
	Додаток Б – Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень ……...……..	127

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

APD – фотоприймач з підсиленням

AWG – Array Waveguide Grating (матрична хвилеводна рішітка)

BER – Bit Error Rate (відношення кількості помилково прийнятих біт до загальної кількості переданих біт)

CD – дисперсія хроматичного запізнення

CP – Control Plane (площина управління)

CWDM – Coarse WDM (грубе мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі)

DCF – double-clad fiber (волокно з компенсацією дисперсії)

DFB – Distributed Feedback (лазер)

DP – Data Plane (площина даних)

DP-QPSK – Dual Binary Quadrature Shift Keying (квадратурна фазова модуляція з двома поляризаційними станами)

DSP – Digital Signal Processing (корекція різниці фаз із використанням відновлення носійних)

DWDM – Dense WDM (щільне мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі)

EDC – електронна компенсація дисперсії

EDFA - Erbium-Doped Fiber Amplifier (оптичний підсилювач на основі волокна, легованого іонами ербію)

FBG – Fiber Bragg Gratings (волоконна решітка Брегга)

FEC - Forward Error Correction (алгоритми корекції помилок)

FMF – Few Mode Fiber (маломодове волокно)

FOV – оптичні ресивери з обмеженим полем зору

GFF – Gain Flattening Filter (оптичний фільтр)

HD FEC – Hard Decision Forward Error Correction (завадостійкий алгоритм для когерентних систем)

ICR – приймачі з інтегрованим підсиленням та конверсією

IDP – фотодетектор з інтегрованим підсиленням

LD – лазерний діод

MD – дисперсія модального запізнення

MDM - Mode Division Multiplexing (модове мультиплексування)

MIMO – Multiple Input Multiple Output (системи зв'язку з рознесеними передавальними і приймальними антенами)

MLSE – критерій максимальної правдоподібності

NRZ – Non-Return-to-Zero (код без повернення до нуля)

NZDSF – оптичне волокно з ненульовою дисперсією

OADM – Optical Add-Drop Multiplexer (фіксовані мультиплексори введення-виведення)

ODU – Optical Data Unit (блок даних оптичного каналу)

OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio (відношення сигнал/шум)

OTN – Optical Transport Network (оптична транспортна мережа)

OTU – Optical Transport Unit (транспортний блок оптичного каналу)

PD – фотодіод

PSCF – Pure Silica Core Fiber (волокно з чистої кварцової серцевини)

ROADM – Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer (мультиплексори, що перебудовуються)

RZ – Return-to-Zero (код з поверненням до нуля)

SDH – Synchronous Digital Hierarchy (синхронна цифрова ієрархія)

SDN – Software Defined Network (програмно-керована архітектура мережі)

SF – стандартне одномодове волокно

SLD – superluminescent diode (надлюмінесцентний діод)

SSMF – Standard Single Mode Fiber (стандартні одномодові волокна)

STM – Synchronous Transport Module (синхронний транспортний модуль)

TDM – Time Division Multiplexing (часове мультиплексування)

VCSEL – Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (лазер, що випромінює світло вертикально з напівпровідникового чіпа)

VGA – Variable Gain Amplifier (підсилювач зі змінним підсиленням)

WDM – Wavelength Division Multiplexing (хвильове мультиплексування)

WSS – Wavelength Selective Switch (матриця оптичної комутації)

ВОЛТ – волоконно-оптичний лінійний тракт

ВОСП – волоконно-оптичні системи передачі

ДК – дисперсійна карта

ЛЧМ – лінійна частотна модуляція

ОЛТ – оптичний лінійний тракт

ООВ - одномодове оптичне волокно

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання обсягів інформації поступово наближає до обмеження пропускної спроможності оптичного волокна. Її збільшення можна отримати трьома способами [1-4]: прокласти новий кабель, перейти до більш продуктивної апаратури часового мультиплексування або застосувати WDM.

Недоліки першого способу очевидні. Реалізація другого варіанта в мережах телекомунікацій також пов'язана з певними труднощами. По-перше, при таких швидкостях істотну роль починають відігравати поляризаційна модова дисперсія, викликана відхиленням поперечного перерізу волокна від кругової форми, та відбиті сигнали від місць з'єднання кабелів. Для компенсації дисперсії використовують відрізки волоконно-оптичного кабелю з дисперсією протилежного знаку – це також ускладнення системи. По-друге, зі зростанням швидкості передачі погіршується чутливість фотоприймача та посилюється згасання (розсіювання) світлового потоку. В результаті стає необхідним збільшення мінімальної потужності вхідного сигналу, при якій забезпечується установлена частота появи помилок (BER). Отже, доводиться встановлювати додаткові підсилювачі і регенератори [3-5].

Технологія WDM (хвильове мультиплексування) помітно підвищує ефективність використання сумарної пропускної спроможності оптичного волокна.

Передача на великі відстані здійснюється у діапазонах 1300 і 1550 нм, які характеризуються мінімальним згасанням сигналів. Ширина кожного з них становить 200 нм, що в сумі еквівалентно частотному інтервалу 60 ТГц.

Оцінюючи пропускну здатність волоконно-оптичного каналу зазвичай приймають, що для кожного 1 Гбіт/с потрібно 2 ГГц смуги пропускання. При такому підході 60 ТГц стають еквівалентними пропускній здатності 30 Тбіт/с, проте не враховуються обмеження приймально-передавальної апаратури, яка формує канал передачі даних. Якщо час спрацьовування фотоприймача

дорівнює 1 нс, то швидкість передачі трафіку по каналу не перевищить 1 Гбіт/с, якою б широкою не була смуга пропускання волокна. Пропускна здатність каналу визначається такими характеристиками приймально-передавальних пристроїв, як максимально досяжна швидкість модуляції передавача та здатність фотоприймача швидко та точно розпізнавати біти даних.

З урахуванням можливостей приймально-передавальних пристроїв швидкість передачі каналом телекомунікацій становить 10 Гбіт/с. З 60 ТГц потенційної смуги пропускання для забезпечення цієї швидкості практично використовується трохи більше 20 ГГц. Якщо ж розділити загальну смугу пропускання 60 ТГц на окремі частотні канали по 10 Гбіт/с, то обсяг даних, що передаються волокном в одиницю часу, збільшиться. Саме цей підхід реалізований у технології WDM [3-5]. Розгляд проблематики побудови та методів підвищення ефективності таких систем є актуальним.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у цій галузі спрямовані на підвищення ефективності і надійності роботи систем WDM, зокрема, за рахунок сучасних підходів щодо компенсації хроматичної дисперсії в оптичному волокні. Напрямків досліджень декілька. Дослідження в галузі лазерних технологій покликані створювати більш потужні, стабільні та компактні джерела світла для збільшення дальності передачі та пропускної здатності систем WDM. Ефективність мультиплексорів та демультиплексорів з меншими втратами та міжканальними завадами дає розвиток оптичних компонентів та технологій їх виготовлення. На підвищення якості та дальності передачі даних мають вплив нові матеріали та конструкції оптичних підсилювачів, які дозволяють збільшити підсилення сигналу та знизити рівень шуму [5, 6].

Мета та постановка задачі. Метою даної роботи є визначення напрямків удосконалення WDM-систем для підвищення ефективності передачі даних.

Задачами бакалаврської дипломної роботи є:

- порівняльний аналіз технологій TDM та WDM;
- аналіз методів підвищення пропускної спроможності ВОЛТ;

- оцінка методів та засобів компенсації впливу дисперсійних явищ у волокні;

- розрахунки параметрів лінійного тракту для технології WDM;

- економічні розрахунки.

Об'єктом дослідження є процеси формування, передачі, прийому та обробки оптичних сигналів у рамках технології хвильового мультиплексування WDM.

Предметом дослідження є методи та засоби, які забезпечують формування, передачу та приймання оптичних сигналів.

Методи досліджень базуються на використанні: теорії багатоканального зв'язку для порівняльного аналізу технологій TDM та WDM, теорії передачі оптичних сигналів для оцінки пропускної здатності та впливу дисперсійних явищ.

Новизна одержаних результатів:

а) вперше запропоновано перехід від амплітудних до більш складних фазових когерентних форматів модуляції оптичного сигналу;

б) запропоновано використання динамічних компенсаторів дисперсії для повністю оптичних мереж, де існують ділянки окремих оптичних трактів з різними значеннями дисперсії або із змінними дисперсійними властивостями.

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

1 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ TDM ТА WDM

1.1 Загальні принципи роботи мереж передачі даних на оптичному волокні

Відмінною характеристикою мереж передачі даних на оптичному волокні є частотний діапазон, що охоплює його видиму частину. Повний спектр електромагнітних хвиль охоплює діапазон від низькочастотних коливань до рентгенівських і гамма-випромінювань. На рис. 1.1 представлені всі ділянки цього спектру, включаючи і оптичний діапазон.

Видиме світло в оптичному діапазоні займає ділянку спектра від 380 нм (фіолетовий) до 780 нм (червоний). В оптичному зв'язку застосовується діапазон, який має назву ближньої інфрачервоної зони (0,8; 1,675 мкм). Це пояснюється двома причинами: за шкалою енергій цей діапазон відповідає ширині забороненої зони низки напівпровідників, тобто кванти такого випромінювання можуть породжуватися і поглинатися з іонізацією лише валентних електронів; цей діапазон має найбільшу прозорість в таких середовищах поширення хвиль як скловолокно і повітряна атмосфера. Таким чином, вирішується проблема виготовлення ефективних напівпровідникових приладів та узгодження їх роботи з середовищами передачі.

Оптичне випромінювання супроводжують явища інтерференції, дифракції та квантові або корпускулярні. Відомий зв'язок енергії кванта (фотона) з параметрами світлової хвилі з [4]:

$$E_{ф} = h \cdot f \qquad (1.1)$$

де h - постійна Планка $4{,}1 \cdot 10^{-5}$ еВ або $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Джс,

f - частота коливань.

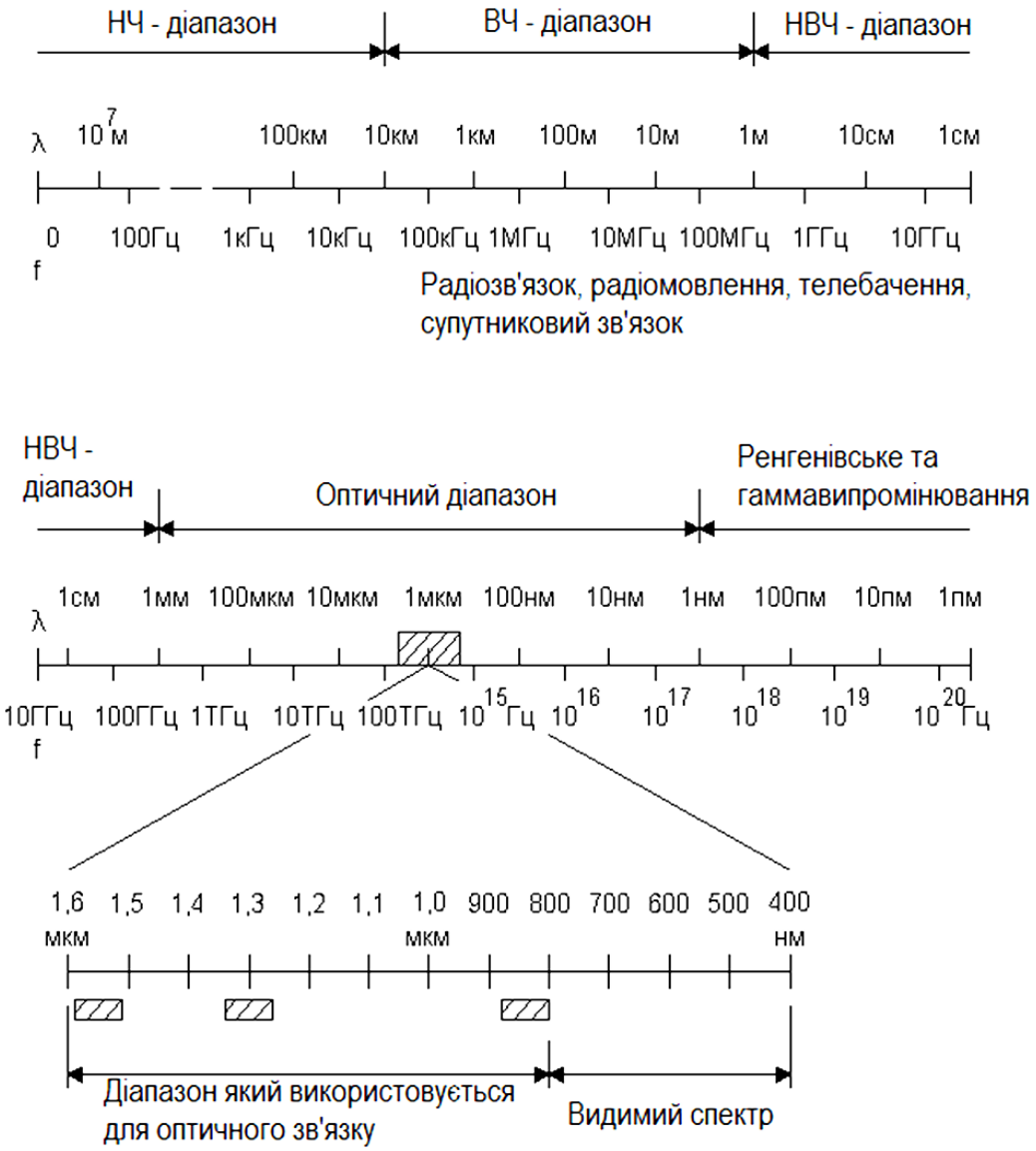


Рисунок 1.1 – Спектр електромагнітних хвиль

Енергія фотона може бути визначена з урахуванням зв'язку між довжиною світлової хвилі і частоти

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299792458[км/с]}{f[Гц]} \quad (1.2)$$

$$E_{ф} = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (1.3)$$

де c - швидкість світла у вакуумі, дорівнює 3х10^8 м/с.

Добуток $h \cdot c$ має постійне значення і становить 1,24 еВ·мкм.

Хвильові оптичні процеси охоплюють інтерференцію, дифракцію, поляризацію і використання для їх вивчення законів геометричної оптики, електро- і магнітооптичних ефектів. Квантово-механічна природа оптичного випромінювання проявляється, зокрема, в тепловій генерації і різних видах люмінесценції тощо [4].

Нижче наведено приклад оцінки смуги частот оптичного діапазону від 0,8 до 1,6 мкм.

Граничні частоти діапазону за відомою довжиною хвилі можуть бути обчислені з використанням формули (1.2).

$$f_1 = c / \lambda_1,\ f_2 = c / \lambda_2,$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, $\lambda_1 = 0{,}8 \times 10^{-6}$ м, $\lambda_2 = 1{,}6 \times 10^{-6}$ м.

Смуга пропускання вказаного діапазону складе

$$\Delta f = f_1 - f_2 = 3{,}75 \cdot 10^{14} - 1{,}875 \cdot 10^{14} \text{ Гц} = 187{,}5 \text{ ТГц}.$$

Основні принципи роботи мереж передачі на оптичному волокні включають наступні аспекти.

1. Модуляція світла. Для передачі даних по оптичному волокну використовується світловий сигнал. Інформація кодується як зміни інтенсивності чи частоти світла, що називається модуляцією світла. Зазвичай використовуються маніпуляція інтенсивністю світла.

2. Оптичний передавач. Оптичний передавач перетворює електричні сигнали, що надходять з передавального пристрою, в оптичні сигнали, які можуть бути передані по оптичному волокну. Цей процес включає модуляцію світла відповідно до даних, які потрібно передати.

3. Оптичне волокно. Оптичне волокно є середовищем передачі оптичних сигналів. Воно складається з скляного або пластикового волокна, в якому

світловий сигнал заломлюється і відбивається, дозволяючи йому переміщатися волокном на великі відстані без істотних втрат.

4. Підсилювачі сигналу. Проходячи по оптичному волокну оптичні сигнали втрачають свою енергію через дисперсію та інші фактори. Підсилювачі сигналу, такі як підсилювачі EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), використовуються для підсилення оптичного сигналу, що дозволяє зберігати потрібну інтенсивність на великих відстанях.

5. Оптичний приймач. Оптичний приймач приймає оптичний сигнал, що надійшов по оптичному волокну, і перетворює його назад на електричний сигнал. Цей процес включає демодуляцію оптичного сигналу і відновлення вихідних даних.

6. Обробка та маршрутизація даних. Після перетворення оптичного сигналу в електричний, дані можуть бути оброблені та маршрутизовані відповідно до вимог мережі. Це може включати операції маршрутизації, комутації та обробки помилок.

Зазначені основні принципи роботи мереж передачі на оптичному волокні можуть змінюватись в залежності від конкретних технологій і конфігурацій мережі та технологій мультиплексування.

1.2 Часове мультиплексування компонентних потоків TDM

Розглянемо часову мультиплексію (TDM). Цей метод полягає в поділі процесу передачі на ряд часових циклів, які далі розділяються на субцикли (N). Значення N визначає кількість часових каналів у цій системі. Кожен субцикл розподіляється на тайм-слоти — часові відрізки, протягом яких передаються біти одного з цифрових потоків. Інші позиції відводяться для імпульсів синхронізації, службових повідомлень та вставок.

Часове мультиплексування означає, що кожному інформаційному каналу, що використовує певну оптичну несучу, виділяється конкретний часовий інтервал для передачі даних. Таким чином, оптична несуча модулюється

сигналом першого каналу в першому часовому інтервалі, потім — сигналом другого каналу в наступному інтервалі, і так далі. Тривалість цих інтервалів має велике значення для досяжної швидкості передачі інформації. На неї впливають такі фактори, як швидкість передачі даних у лінії зв'язку і швидкість перетворення електричних сигналів в оптичні.

Схема передачі оптичних сигналів через лінію зв'язку з часовим ущільненням (TDM) представлена на рисунку 1.2 [5-6].

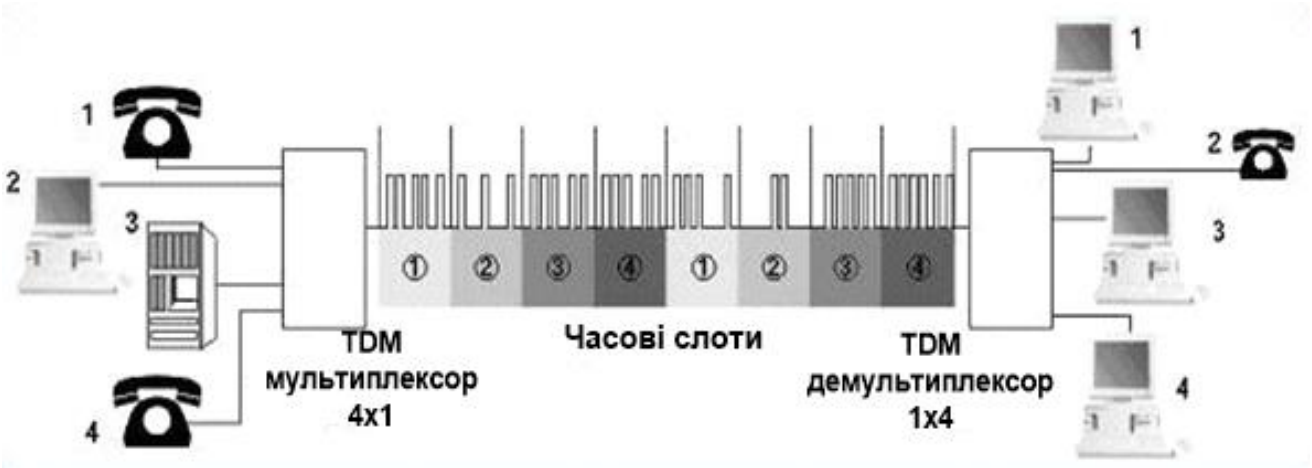


Рисунок 1.2 – Схема передачі оптичних сигналів
з часовим мультиплексуванням TDM

На вході та виході лінії зв'язку встановлені мультиплексор і демультиплексор, які разом забезпечують черговість передачі сигналів з різних каналів, управління часовими інтервалами та ідентифікацію номера каналу. Мультиплексор на одній стороні каналу збирає дані з усіх джерел і передає їх через волокно в визначені тайм-слоти. Демультиплексор, розташований на іншій стороні, виділяє ці тайм-слоти, зчитує дані і передає їх користувачам у вигляді єдиних вихідних потоків.

Принцип часового ущільнення підтримується структурою первинної мережі так, що на кожному вищому рівні ієрархії кількість компонентних каналів в інтегральному потоці у цілому є кратною. Використання технології TDM дозволило збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних ліній зв'язку до 10 Гбіт/с. Лінії зі швидкістю 10 Гбіт/с поступово замінять нинішні

системи TDM на 2,5 Гбіт/с. Швидкість 10 Гбіт/с розмежовує два типи TDM-систем. При перевищенні цієї швидкості деякі характеристики оптичного волокна, такі як поляризаційна модова і хроматична дисперсія, починають суттєво впливати на якість передачі, що потрібно враховувати при розробці систем зв'язку. Це створює серйозні труднощі для нових розробок, спрямованих на швидкості 40 Гбіт/с і більше. Для подальшого збільшення швидкості необхідні нові методи модуляції лазерного випромінювання, що ускладнює і збільшує вартість обладнання для прийому та передачі. У таблиці 1.1 наведено стандартні інтерфейси та відповідні швидкості передачі для ієрархій SDH/SONET [6].

Таблиця 1.1 – Стандартні інтерфейси та відповідні швидкості передачі

Оптичний модуль SONET	Синхронний транспортний модуль SDH	Швидкість передачі
OC-3	STM-1	155 Мбіт/с
OC-12	STM-4	622 Мбіт/с
OC-48	STM-16	2,5 Гбіт/с
OC-192	STM-64	10 Гбіт/с
OC-768	STM-256	40 Гбіт/с

Одним з ключових факторів, що обмежують швидкість передачі сигналу при використанні технології TDM, є хроматична дисперсія. Це явище полягає в залежності ефективного показника заломлення від довжини хвилі, що призводить до розширення оптичних імпульсів під час їх поширення по волокну. Розширення імпульсів зростає із збільшенням довжини лінії. Наприклад, для вузькосмугового лазера (ширина спектра до 0,1 нм) максимальна довжина лінії зв'язку зменшується у 16 разів при переході з 2,5 Гбіт/с (STM-16) на 10 Гбіт/с (STM-64) через вплив хроматичної дисперсії. Використання методів, які зменшують цю дисперсію, може призводити до підвищення втрат, вартості та складності системи. Для стандартного ступінчастого одномодового волокна (G.652 за класифікацією ITU) максимальна дальність передачі на швидкості 10 Гбіт/с без компенсації дисперсії становить 50-75 км.

Щоб зменшити вплив хроматичної дисперсії, використовують вузькосмугові лазери з довжиною хвилі, близькою до довжини хвилі нульової дисперсії волокна. Проте, працювати безпосередньо на цій довжині хвилі не є доцільним через зростаючий вплив чотирихвильового змішування (FWM). Крім того, частота випромінювання лазерів з внутрішньою модуляцією може змінюватись з часом, що призводить до негативного явища, відомого як чирпування (Chirp). Модульований сигнал, частота якого змінюється, називається чірпованим сигналом. Чирпування викликає значне розширення спектра імпульсів, які генеруються. Це розширення можна суттєво зменшити, використовуючи лазери з зовнішньою модуляцією, що знайшло практичне застосування в сучасних високошвидкісних системах передачі.

Подальше збільшення швидкості передачі за технологією TDM вимагає розробки та впровадження складних і дорогих електронних компонентів. Уся відповідальність за їхню розробку лягає на оптичну промисловість, оскільки в інших сферах, таких як комп'ютерні технології, ці швидкості ще не досягнуті. Вимоги до точності синхронізації сигналів у системах передачі, пов'язаних із модуляцією струму лазерів, мультиплексуванням і демультиплексуванням на надвисоких частотах, є дуже високими.

Технологія завадостійкого кодування FEC (Forward Error Correction) може підвищити енергетичний потенціал системи на кілька дБ. FEC вже давно використовується в бездротовому та супутниковому зв'язку, де дані перед передачею кодуються з додаванням надлишкових бітів. Ця надмірність дозволяє виправляти випадкові помилки у цифровому сигналі без повторної передачі. У FEC виявлення та виправлення помилок здійснюється, як правило, фізичними засобами. Однак це кодування не може усунути всі помилки, що виникають через різні фактори, такі як хроматична дисперсія, поляризаційна модова дисперсія та перехресні завади.

Незалежно від того, чи стане TDM універсальним протоколом на зразок IP, чи буде адаптована до стандартів SONET/SDH, багато операторів використовуватимуть цю технологію в найближчі роки. Нові можливості TDM

сприяли успіхам у дослідженні солітонів. Які б проблеми не виникали в TDM і які б шляхи їх вирішення не використовувалися, жодна з існуючих технологій наразі не може її замінити. Однак технологія WDM може використовуватися паралельно з TDM для підвищення її ефективності.

1.3 Хвильове мультиплексування оптичних сигналів WDM

1.3.1 Основні складові технології

WDM-мультиплексування з розділенням по довжині хвилі є прогресивною технологією оптоволоконного зв’язку. Цей метод передачі даних передбачає об’єднання кількох оптичних сигналів з різними довжинами хвиль і швидкостями, які проходять через одне оптичне волокно. Цифрові сигнали, передані на різних довжинах хвиль, можуть мати однакову або різну швидкість і формат.

Основна структура системи WDM включає дві конфігурації: двоволоконну однонаправлену передачу та одноволоконну двонаправлену передачу.

Однонаправлений WDM означає, що всі оптичні шляхи мають один напрямок в одному волокні. На стороні передавача формуються оптичні сигнали з різними довжинами хвиль, що несуть різну інформацію. Вони об'єднуються через оптичний подовжувач і передаються по одному волокну в одному напрямку, уникаючи перетворення між собою завдяки різним довжинам хвиль. На приймальному боці сигнали розділяються оптичними мультиплексорами для завершення передачі кількох оптичних сигналів. Протилежний напрямок сигналів реалізується в іншому волокні.

Двонаправлений WDM передбачає, що оптичні сигнали передаються в обох напрямках одночасно через одне волокно, причому різні довжини хвиль забезпечують повнодуплексний зв’язок.

Система WDM зазвичай складається з чотирьох основних компонентів: оптичного передавача, оптичного релейного підсилювача, оптичного приймача

та оптичного контрольного каналу. Ключовими елементами технології WDM є оптичний мультиплексор і демультиплексор, які мають вирішальне значення для якості передачі. Мультиплексор об'єднує сигнали різної довжини хвиль на вході передавального волокна.

Демультиплексор – це пристрій, який розділяє багатохвильовий сигнал на окремі довжини хвиль. Він є оборотним: якщо поміняти місцями вхід і вихід, демультиплексор стає мультиплексором. Якісні показники оптичного мультиплексора залежать від перехресних завад і зміщення частоти. З огляду на те, що довжина хвилі помножена на частоту дає швидкість світла, технологія WDM фактично є мультиплексуванням з частотним розділенням. Схематично принцип роботи WDM ілюструється рисунком 1.3.

Рисунок 1.3 – Принцип роботи WDM

Мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі (WDM) відіграє важливу роль у підвищенні пропускної спроможності та ефективності використання оптичного волокна. Для коректної роботи WDM системи необхідно контролювати довжину хвилі (частоту) кожного оптичного сигналу. Якщо інтервал між довжинами хвиль занадто малий, його легко можна розділити на окремі канали. У разі, якщо інтервал занадто великий, ефективність використання оптичного волокна знижується, оскільки канали стають широкосмуговими, що обмежує їхню кількість. Рисунок 1.4 ілюструє перетворення єдиного каналу у WDM.

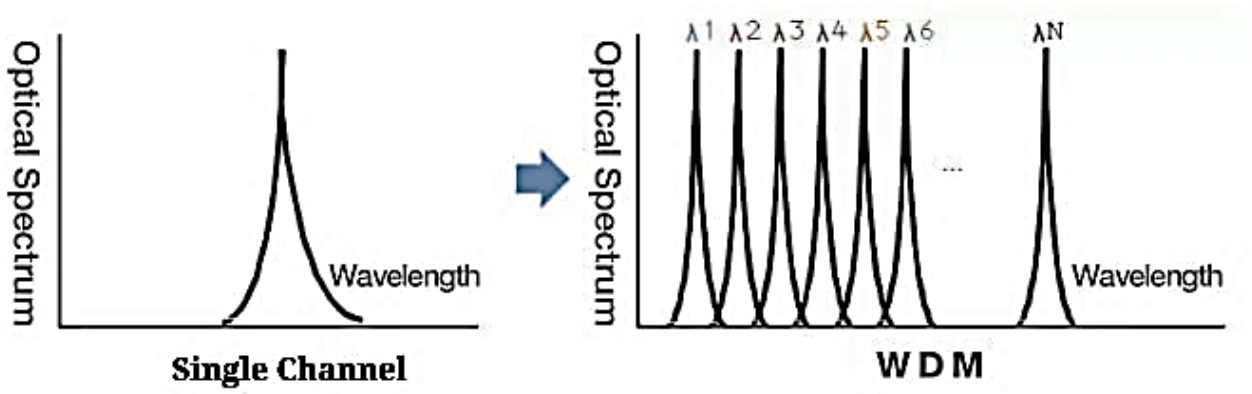


Рисунок 1.4 – Трансформація єдиного каналу у WDM

Технологія WDM має важливе значення для розширення мережі, надання широкосмугових послуг, збільшення пропускної спроможності оптоволокна.

1.3.2 Характеристика переваг та недоліків технології

Структура системи WDM представлена на рисунку 1.5.

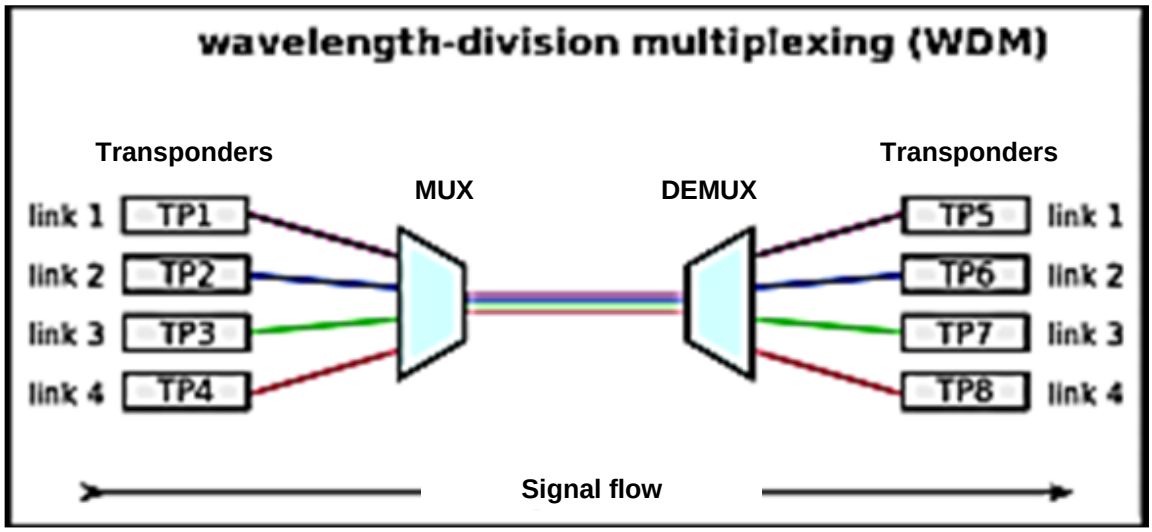


Рисунок 1.5 – Система WDM

Технологія WDM стрімко розвивається останніми роками завдяки кільком основним перевагам [6-8]:

1. Висока пропускна здатність: WDM дозволяє значно економити волокна. Для системи з однією довжиною хвилі потрібно дві пари волокон для

передачі та прийому сигналу. У системі WDM, незалежно від кількості сигналів, також достатньо лише двох волокон. Наприклад, для шістнадцяти сигналів зі швидкістю 2.5 Гбіт/с однохвильовій системі знадобиться 32 волокна, тоді як для WDM — лише два.

2. Прозорість для різних типів сигналів: Система WDM може передавати як цифрові, так і аналогові сигнали, а також їх синтезувати та розкладати.

3. Спрощене розширення мережі: Не потрібно прокладати додаткові волокна або використовувати дорогі мережеві компоненти під час розширення. Введення нових послуг або збільшення пропускної спроможності можливо за рахунок модернізації терміналів і додавання нових оптичних довжин хвиль. Це робить WDM ідеальним інструментом для розширення мереж.

4. Гнучка та надійна мережа: Завдяки можливості створення динамічно реконфігуруємих оптичних мереж з використанням оптичних мультиплексорів введення-виведення (OADM) та оптичного кросового обладнання (OXC), WDM забезпечує формування надійної та відмовостійкої повністю оптичної інфраструктури.

Тепер розглянемо проблеми, що виникають у технології WDM [8, 9]. Оптичні мережі на базі WDM, оснащені функціями мультиплексування введення-виведення та перехресного з'єднання, мають значні переваги, такі як легкість реконфігурації та хороша масштабованість. Це робить їх перспективними для розвитку високошвидкісних мереж у майбутньому. Однак для їх реалізації потрібно вирішити кілька важливих питань.

Управління мережею. Наразі управління мережею WDM, особливо в умовах складних вимог до маршрутів, залишається недосконалим. Без ефективного мережевого управління система WDM може не знайти застосування у великих масштабах. Оскільки WDM підтримує різноманітні типи службових сигналів, під час відмови важливо, щоб операційна система швидко виявляла несправності та їх причини. Для цього програмне забезпечення повинне бути на належному рівні. Необхідно визначити нові

параметри для точної оцінки якості обслуговування, оскільки традиційні методи, такі як частота помилок бітів, не підходять для WDM.

Взаємозв'язок. Оскільки WDM є новою технологією, її галузеві стандарти ще не достатньо розроблені, що ускладнює функціональну сумісність продуктів у різних сферах, особливо в аспекті управління мережею. Для масштабного впровадження WDM важливо забезпечити сумісність між різними системами WDM та їх інтеграцію з традиційними системами. Це вимагає активних досліджень в галузі оптичних інтерфейсів.

Оптичні пристрої. Невизначеність щодо деяких важливих оптичних пристроїв, зокрема лазерів з можливістю перебудови, безпосередньо гальмує розвиток оптичних мереж. Багато великих операторів стикаються з труднощами в управлінні кількома різними лазерами, не кажучи вже про десятки оптичних сигналів. Для ефективної роботи оптичних мереж зазвичай потрібні 4-6 налаштовуваних лазерів, але такі пристрої поки що не доступні на ринку. Функціональна схема лазера з можливістю перебудови представлена на рис. 1.6.

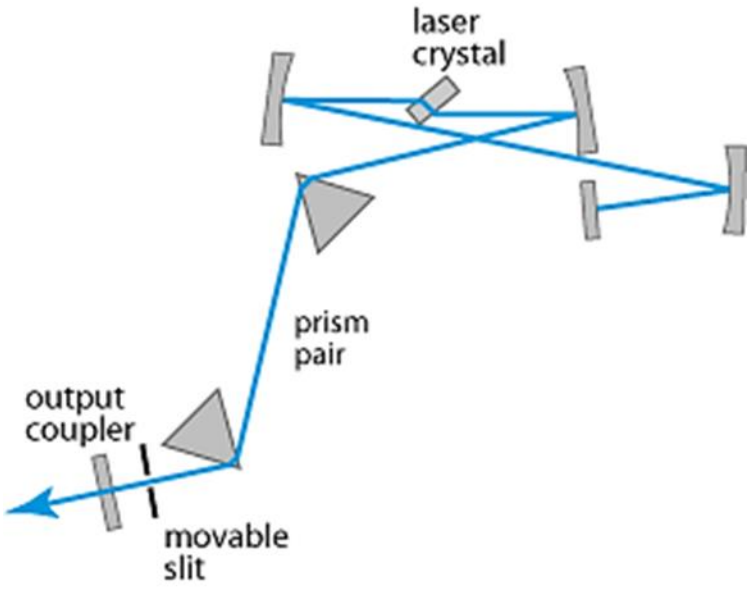


Рисунок 1.6 – Функціональна схема лазера, що перебудовується

1.3.3 Огляд технологій CWDM та DWDM

WDM, де відстань між довжинами хвиль становить десятки нанометрів, називається грубим мультиплексуванням з розділенням за довжиною хвилі (CWDM). Цю технологію визначено в Рекомендації ITU-T G.694.2 Міжнародною спілкою електрозв'язку.

З розвитком технології інтервал між довжинами хвиль поступово скорочувався. При інтервалі в кілька нанометрів технологію стали називати щільним мультиплексуванням з розділенням за довжиною хвилі (DWDM) [5-7].

Для CWDM використовуються неохолоджені лазери, тоді як у DWDM – охолоджені. Охолоджені лазери в DWDM налаштовуються за температурою, а неохолоджені – електронним способом. Налаштування температури є складним і дорогим процесом через нерівномірний розподіл температури у широкому діапазоні довжин хвиль. CWDM дозволяє обійти цю проблему, значно знижуючи витрати; вартість системи CWDM становить лише 30% від вартості DWDM.

CWDM досягається шляхом об’єднання довжин хвиль з різних волокон в одне волокно для передачі за допомогою оптичного мультиплексора. На приймальному кінці каналу використовується демультиплексор, щоб розподілити виділені довжини хвиль по різних волокнах та направити їх до відповідних приймачів.

CWDM має інтервал довжин хвиль 20 нм та охоплює 18 діапазонів хвиль від 1270 нм до 1610 нм. Розподіл довжин хвиль для CWDM наведено в таблиці 1.2. Цю технологію також визначено в Рекомендації ITU-T G.694.1.

У діапазоні хвиль від 1270 до 1470 нм має місце очевидне згасання сигналу, тому технологія CWDM віддає перевагу використанню 8 діапазонів хвиль від 1470 до 1610 нм, рисунок 1.7 [8-10].

Відстань між довжинами хвиль DWDM може становити 1.6 нм, 0.8 нм, 0.4 нм та 0.2 нм, що дозволяє розмістити 40/80/160 хвиль (до 192 хвиль). Діапазон хвиль DWDM, рисунок 1.7, становить від 1535 до 1565 нм (діапазон C) та від 1570 до 1610 нм (діапазон L).

Зазвичай технологія DWDM використовує діапазон хвиль C (від 1535 до 1565 нм) з інтервалом довжин хвиль 0,4 нм (частотний інтервал між каналами – 50 ГГц).

Таблиця 1.2 – Розподіл довжин хвиль для технології CWDM

Номер довжини хвилі	Центральна довжина хвилі, нм	Номер довжини хвилі	Центральна довжина хвилі, нм
1	1471	10	1291
2	1491	11	1311
3	1511	12	1331
4	1531	13	1351
5	1551	14	1371
6	1571	15	1391
7	1591	16	1411
8	1611	17	1431
9	1271	18	1451

Розглянемо деякі ключові відмінності між CWDM та DWDM.

Структура: CWDM має простішу конструкцію. Ця система не використовує оптичні підсилювачі та технологію балансування потужності, оскільки канали рознесені більш широко, що робить їх незалежними від міжканальних впливів (ортогональними).

Споживання енергії: CWDM споживає менше енергії. Експлуатаційні витрати системи оптичної передачі залежать від її обслуговування та енергоспоживання. Хоча витрати на обслуговування для DWDM і CWDM можуть бути подібними, енергоспоживання DWDM значно вищі. У системах DWDM збільшення кількості мультиплексованих довжин хвиль і швидкостей одноканальної передачі призводить до проблем із втратами потужності та управлінням температурою. CWDM, завдяки використанню неохолоджених лазерів, забезпечує низьке енергоспоживання.

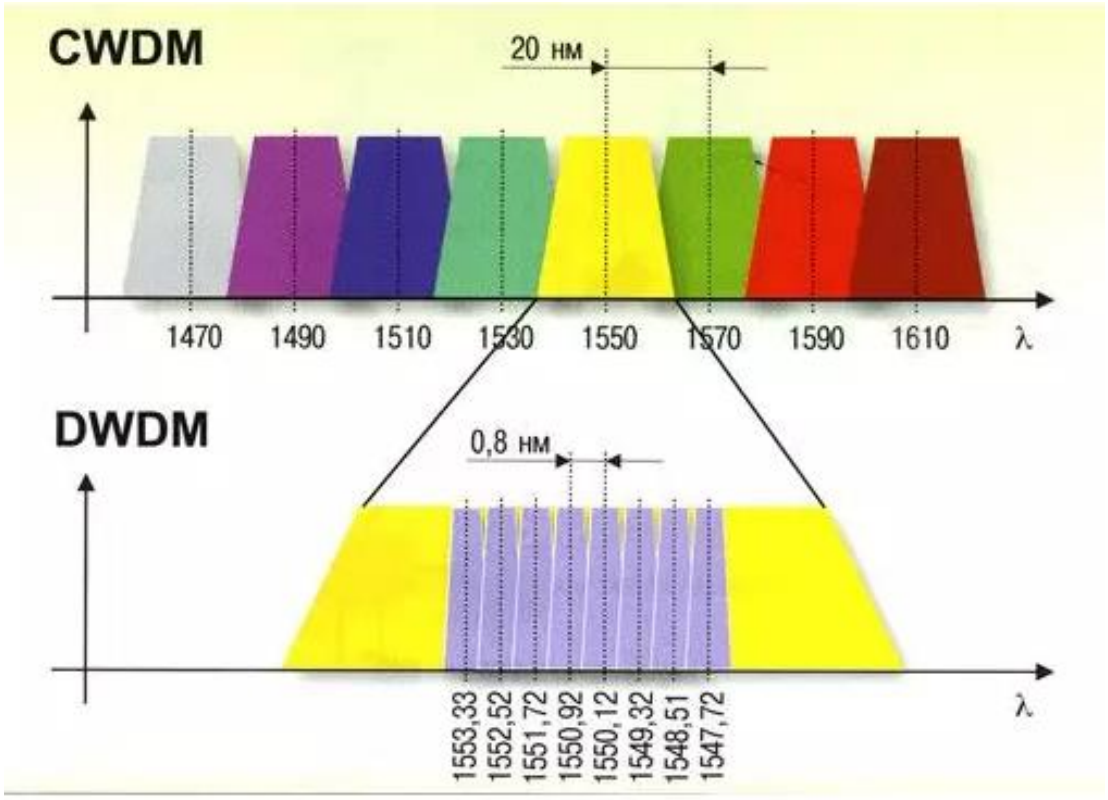


Рисунок 1.7 – Робочі діапазони технологій CWDM та DWDM

Габарити пристроїв: Пристрої CWDM мають менші розміри. Лазери CWDM істотно компактніші за лазери DWDM. Неохолоджені лазери CWDM зазвичай складаються з лазерного чіпа та контрольного фотодіода, закритих у металевому корпусі зі скляним вікном. Обсяг лазерного передавача DWDM приблизно в п'ять разів більший, ніж у CWDM. Наприклад, якщо обсяг лазера DWDM становить 100 см³, обсяг лазера CWDM без охолодження — лише 20 см³.

Вимоги до середовища передачі: CWDM має нижчі вимоги до оптичних волокон. Для технології DWDM, що перевищує 10G, потрібні волокна G.655, тоді як CWDM може використовувати волокна G.652, G.653 та G.655, що дозволяє йому працювати з уже прокладеними старими оптоволоконними кабелями.

Порівняльні характеристики технологій CWDM та DWDM наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльні характеристики технологій CWDM та DWDM

Характеристика	CWDM Грубе мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі	DWDM Щільне мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
Хвильовий інтервал	20 нм у цілому	0,8нм/0,4нм/0,2нм/1,6нм
Діапазон хвиль	від 1270 до 1610 нм	від 1525 до 1565 нм (C) від 1570 до 1610 нм (L)
Кількість діапазонів хвиль	18	40/80/160/(до 192)
Форма оптичної модуляції	Лазер без охолодження з електронним налаштуванням	Лазер з охолодженням з налаштуванням за температурою
Ціна	низька	висока
Дальність зв’язку	Коротка (оптичні підсилювачі не підтримуються	Велика
Структура	проста	Складна (комплекс)
Потужність споживання	низька	висока
Габарити	Малі	Великі
Вимоги до середовища передачі	Низькі	Високі

1.4 Аналіз характеристик технологій TDM та WDM

Технології WDM (мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі) та TDM (мультиплексування з розділенням за часом) є двома основними методами мультиплексування, які використовуються в оптичних мережах передачі даних. Ось їх порівняльні характеристики [7]:

1. Принцип роботи.

WDM використовує різні довжини хвиль світла для одночасної передачі кількох незалежних потоків даних через одне оптичне волокно.

TDM реалізує доступ до спільного каналу, розподіляючи час на короткі інтервали, під час яких кожному пристрою виділяється свій часовий слот для передачі даних.

2. Пропускна спроможність.

WDM суттєво збільшує пропускну спроможність оптичного волокна, передаючи кілька каналів даних на різних довжинах хвиль.

Пропускна здатність TDM обмежена часовими слотами. Вона залежить від частоти кадрів і кількості пристроїв, що беруть участь у мультиплексуванні, а також підлягає обмеженням, пов'язаним із дисперсією світла та дальністю зв'язку.

3. Гнучкість.

WDM дозволяє легко додавати та видаляти канали з різними довжинами хвиль без істотного впливу на інші канали.

У TDM гнучкість обмежена кількістю доступних часових слотів, і зміна структури мультиплексування може вимагати значної переконфігурації мережі.

4. Використання ресурсів.

WDM ефективніше використовує ресурси оптичного волокна, оскільки може застосовувати весь спектр довжин хвиль.

TDM може бути менш ефективним, оскільки деякі часові слоти можуть залишатися невикористаними, якщо пристрої не надсилають дані, що призводить до неповноцінного використання можливостей волокна.

5. Застосування.

WDM широко використовується в оптичних мережах для передачі даних на великі відстані та з високою пропускною здатністю.

TDM переважно застосовується у локальних і телефонних мережах для передачі даних і голосового зв'язку, де не потрібні надвисокі швидкості передачі.

Отже, вибір між WDM і TDM залежить від конкретних вимог застосування, включаючи пропускну здатність, гнучкість, вартість та інші фактори.

Типи сервісів, що постійно з'являються, і нові користувацькі додатки створюють все більше навантаження на магістральну транспортну мережу. Це означає, що для транспортування високошвидкісного трафіку потрібна технологія передачі даних, яка, з одного боку, має достатню продуктивність, з

іншого надає оператору можливості масштабування мережі без зміни інфраструктури. Цим вимогам задовольняє технологія спектрального мультиплексування WDM.

Перші WDM-системи були двоканальними з передачею на довжинах хвиль 1310 та 1550 нм. Дещо пізніше з'явилися багатоканальні рішення: CWDM – грубе спектральне ущільнення та DWDM – щільне спектральне ущільнення, де назви говорять про щільність розташування інформаційних каналів в оптичному спектрі.

Ефективність WDM-систем визначається низкою факторів [14]:

1. Якість обладнання. Високоякісне обладнання з мінімальними втратами хвилеводів, фільтрів та підсилювачів сприяє ефективній передачі даних через систему WDM.

2. Вибір довжини хвиль. Оптимальний вибір довжин хвиль для кожного каналу дозволяє максимально використовувати доступний спектр і уникати накладання сигналів.

3. Придушення інтерференційних явищ. Мінімізація інтерференції між різними каналами шляхом використання узгоджених фільтрів та методів сигналізації.

4. Потужність сигналу. Збалансоване керування потужністю сигналу в кожному каналі для забезпечення достатньої сигнально-шумової пропускної спроможності.

5. Управління завадами. Ефективне керування завадами, такими як дисперсія сигналу, крос-модуляція та несприятливі впливи навколишнього середовища.

Поліпшення цих аспектів може вплинути на підвищення ефективності системи WDM та забезпечити більш надійну передачу даних через оптоволоконні мережі.

1.5 Висновки до розділу

Проведено аналіз технологій часового (TDM) та хвильового (WDM) методів мультиплексування, що використовуються в оптичних мережах передачі даних у контексті збільшення пропускної спроможності та ефективності передачі. Показано їх порівняльні характеристики.

Розглянута проблематика підвищення пропускної спроможності ВОСП. Показано, що швидкодія електронних компонентів волоконно-оптичної системи передачі є обмежуючим фактором збільшення швидкості передачі даних для технології TDM. Ефективною альтернативою цій технології є WDM.

Стосовно пропускної здатності, то зазначено, що WDM характеризується суттєво більшим її значенням, оскільки створюється певна множина каналів даних на різних довжинах хвиль.

Пропускна здатність TDM обмежена часовими слотами. Вона також залежить від кількості пристроїв, що беруть участь у мультиплексуванні, частоти кадрів, а також має обмеження, пов'язані з дисперсією світла та дальністю зв'язку.

Розглянуто два основних варіанти WDM - це Dense WDM (DWDM) та Coarse WDM (CWDM). DWDM зазвичай використовується для передачі даних на довгі відстані з високою пропускною здатністю. CWDM має більш широкі проміжки між довжинами хвиль і зазвичай використовується для більш коротких відстаней та менш інтенсивних вимог до пропускної спроможності. У цілому, оскільки кожен канал WDM може передавати дані незалежно один від одного, технологія забезпечує високу швидкість передачі через оптичне волокно.

Технологія WDM є основою для побудови сучасних оптичних мереж зв'язку та відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної передачі даних на тривалі відстані з високою швидкістю та пропускною спроможністю.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ ВОЛТ

2.1 Огляд методів підвищення пропускної здатності ВОСП

Структурну схему багатоканальної волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) в спрощеному вигляді можна представити у вигляді, рис. 2.1. Проводячи аналіз роботи з її використанням, розглянемо загальні підходи щодо підвищення пропускної здатності ВОСП.

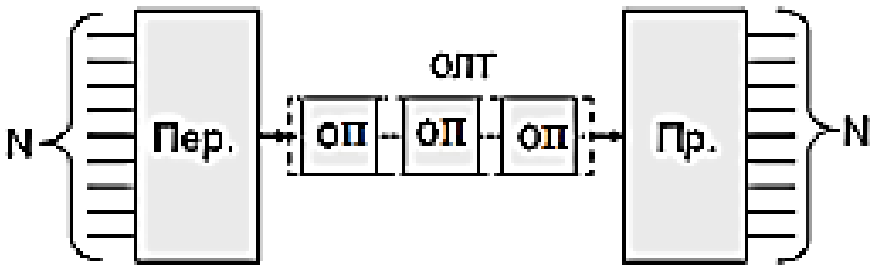


Рисунок 2.1 – Структурна схема багатоканальної ВОСП

На схемі, рисунок 2.1, показано: Пер. – передавач (передавальна сторона); ОЛТ – оптичний лінійний тракт; ОП – оптичні підсилювачі; Пр. – приймач (приймальна сторона). Оптичний лінійний тракт може містити також регенератори оптичного сигналу.

Будемо вважати, що оптичний кабель містить $N_{ов}$ оптичних волокон, у кожному волокні має $N_{опт.кан.}$ оптичних каналів. Вони формуються на основі технології WDM і мають свої значення робочої довжини хвилі. У кожному такому каналі передається синхронний транспортний модуль STM і у ньому реалізована гранична швидкість передачі інформації $V_{гран}$ [5].

$$C = V_{\text{гран}} \cdot N_{\text{ов}} \cdot N_{\text{опт.кан.}} \quad (2.1)$$

Окрім технології хвильового мультиплексування, згаданої у формулі (2.1), також можлива реалізація «чистого» часового мультиплексування. Багато сучасних волоконно-оптичних систем передачі використовують «чисте» часове ущільнення каналів (TDM) з практичною пропускною здатністю до 10 Гбіт/с. Ця цифра динамічно зростає завдяки новим надшвидким електронним системам модуляції, комутації та прийому лазерного випромінювання. Однак така динаміка вимагає реконструкції або встановлення нових регенераційних пунктів та компенсаторів, що призводить до значних матеріальних витрат на переобладнання та експлуатацію таких систем.

У випадку використання технології хвильового мультиплексування (WDM) в волоконно-оптичних системах, часовий ущільнений доступ зазвичай присутній в кожному частотному каналі.

2.2 Вплив методів мультиплексування на ефективність ВОСП

Для збільшення пропускної спроможності волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) існує кілька підходів. Зазвичай, їх реалізація зводиться до застосування методів ущільнення (мультиплексування) кількох інформаційних потоків в один груповий, який передається по лінії зв'язку. Для подальшого нарощування інформаційної ємності систем передачі активно використовують комбінації двох або більше методів. Тому, щоб визначити граничні можливості підвищення інформаційно-пропускної здатності ВОЛП, важливо проаналізувати доступні методи мультиплексування.

Першим методом, впровадженим у волоконно-оптичних системах зв’язку, стало часове мультиплексування (TDM – Time Division Multiplexing), при якому оптична несуча модулюється цифровим сигналом з бітовою швидкістю b. Швидкість TDM обмежена сучасними електронними технологіями і наразі досягла свого максимуму (згідно зі стандартом STM-256 – 40 Гбіт/с) [10]. Нещодавно в результаті досліджень було досягнуто швидкості близько 100 Гбіт/с. Ця складова загальної швидкості описується першим

множником (2.1). Подальше збільшення ємності каналу стикнулося з технологічними обмеженнями швидкості. Шляхи подолання цього обмеження досліджувалися в двох основних напрямках. Перший із них передбачав збільшення швидкості передачі в одному каналі до 160, а потім до 640 Гбіт/с, що призвело до ідеї використання солітонів як носіїв інформації та розвитку солітонних мереж. Другий напрямок полягав у збільшенні загальної пропускної здатності системи за рахунок використання кількох оптичних несучих довжин хвиль в одному волокні, що призвело до розвитку технології хвильового мультиплексування (WDM).

Отже, подальше збільшення загальної швидкості передачі базується на технології спектрального мультиплексування (WDM), яка дозволяє одночасно передавати кілька TDM-каналів на різних довжинах хвиль. Ця складова загальної швидкості передачі описується множником $N_к$ (2.1). Таким чином, поряд із часовим мультиплексуванням у оптичних системах почали використовувати метод хвильового (спектрального) мультиплексування.

Суть хвильового мультиплексування полягає в об'єднанні декількох оптичних несучих на різних довжинах хвиль λ_i (на передавальній стороні) та передачі отриманого сигналу $\Sigma\lambda_i$ через одне волокно з наступним розділенням несучих у відповідні волокна. Впровадження технології WDM у волоконно-оптичні системи стало можливим завдяки появі оптичних підсилювачів, які забезпечують підсилення групового сигналу в оптичній формі без перетворення в електричну. Ширина діапазону, в якому можна розмістити несучі, визначається смугою підсилення, яка для волоконно-оптичного підсилювача з легованим ербієм волокном становить приблизно 1530 – 1565 нм. Це накладає обмеження на кількість каналів, які можна сформувати в межах цього частотного діапазону.

Частотний план розміщення несучих викладений у Рекомендації МСЕ G.694.1. Спочатку в основу проекту стандарту було закладено частотний план з рівномірним розташуванням несучих частот каналів з мінімальним кроком 100 ГГц, який пізніше зменшили до 50 ГГц. У діапазоні довжин хвиль від 1528,77

нм до 1560,61 нм, що відповідає смузі підсилення оптичного підсилювача, можна розмістити максимум 41 або 81 канал відповідно.

Наступним кроком для збільшення кількості каналів є подальше зменшення кроку несучих до 25 ГГц або навіть до 12,5 ГГц. Частоти несучих (в ГГц) можуть бути розраховані за допомогою узагальненої формули.

$$f = 193{,}1 \pm n \cdot f_s, \tag{2.2}$$

де f_s – крок частотної сітки в ТГц, n – ціле число: 0, 1, 2, …, m.

Крок 12,5 ГГц є невеликим, тому його використання вимагає певних зусиль для підтримки стабільної довжини хвилі несучої, температурні зміни якої повинні знаходитися у межах встановлених стандартами допусків Δf. Ці допуски для різних швидкостей передавання та кроків частотної сітки можуть бути отримані на основі загальної нерівності, яка повинна виконуватися при виборі кроку частотної сітки f_s

$$4\Delta f \leq f_s - 2B, \tag{2.3}$$

де B – швидкість передавання в Гбіт/с. Значення частоти подано в ГГц.

З (2.3) можна отримати значення верхньої границі допусків на нестабільність несущої частоти, які наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Верхня границя допусків на нестабільність несущої частоти

Крок частотного плану, ГГц	100	50	25	12,5
Швидкість передавання 2,5 Гбіт/с	23	11	5	1,8
Швидкість передавання 10 Гбіт/с	20	7	1,2	-
Швидкість передавання 40 Гбіт/с	5	-	-	-

Слід зазначити, що даний вираз не враховує ширину спектральної лінії лазера, яка може мати значний вплив при малих частотних кроках, тому цей

аспект важливо враховувати. Основна енергія сигналу в імпульсній модуляції зосереджена в основній пелюстці спектру.

Отже, ширина спектру окремого оптичного каналу, зумовлена модуляцією, визначається як $\delta f_c = \frac{2}{\tau}$, де τ — тривалість модулювального імпульсу. Для коду NRZ це співвідношення можна виразити як $\delta f_c = 2B$, де B - швидкість передачі в каналі. Використання коду RZ призводить до розширення спектру сигналу, що, в свою чергу, збільшує частотні вимоги для ВОСП при фіксованій швидкості передачі. Отже, з точки зору економії частотного ресурсу, використання цього коду є невигідним.

При проектуванні системи передачі зі спектральним розділенням каналів важливе значення має величина частотного інтервалу між каналами f_s, яка повинна враховувати як ширину канального спектру (для коду NRZ це 2B), так і ширину спектральної лінії лазера ΔF. Крім того, слід враховувати часову нестабільність частоти $\pm\Delta f_\tau$. Таким чином, інтервал між сусідніми каналами повинен бути не меншим за $(2B + \Delta F + 2\Delta f_\tau)$. Це є граничним випадком, оскільки вираз (2.3) розроблений з урахуванням подвійного запасу на нестабільність несучої частоти. Відповідно, кінцеве співвідношення виглядатиме так:

$$2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau \leq f_s. \tag{2.4}$$

Очевидно в діапазоні частот $f_{min} \div f_{max}$ можна розмістити N каналів:

$$N = E\left[\frac{f_{max} - f_{min}}{2B + \Delta F + 4\Delta f_\tau}\right] \tag{2.5}$$

Якщо швидкість передавання збільшується, то N прямує до одиниці, а відносні частотні втрати на формування міжканальних інтервалів $\Delta f_v / (f_{max} - f_{min})$ зменшуються і прямують до значення $(\Delta F + 4\Delta f_\tau) / (f_{max} - f_{min})$.

Можна визначити ефективність використання частотного ресурсу, що є оберненою величиною

$$(f_{max} - f_{min})\Big/_{\Delta f_v} = (f_{max} - f_{min})\Big/_{N(\Delta F + 4\Delta f_\tau)} \quad (2.6)$$

Видно, що параметр (2.5) із збільшенням швидкості передавання прямує до значення $(f_{max} - f_{min})\Big/_{(\Delta F + 4\Delta f_\tau)}$.

Як видно з наведених даних, зі збільшенням швидкості передачі значення N зменшується, що, в свою чергу, знижує втрати частотного ресурсу в заданому діапазоні при підвищенні інформаційно-пропускної здатності ВОСП. Отже, при фіксованому частотному діапазоні можна досягти збільшення інформаційно-пропускної спроможності шляхом зменшення кількості каналів і водночас підвищення швидкості передачі в них. У крайніх випадках це може бути реалізовано через один канал із максимально можливою швидкістю передачі.

$$B = \frac{f_{max} - f_{min} - \Delta F - 4\Delta f_\tau}{2} \quad (2.7)$$

Спектральна ефективність досягає максимальних значень завдяки включенню в ширину спектру переданого сигналу обмежень на ширину спектру ряду попередніх канальних сигналів, кожен з яких становить $(\Delta F + 4\Delta f_\tau)$. Така структура зв'язку дозволяє мінімізувати втрати частотного ресурсу при формуванні міжканального інтервалу. Однак однією з технічних проблем залишається досягнення високої швидкості модуляції. Наприклад, міжканальні інтервали в 12,5 ГГц можуть бути замінені на 25, 50 або 100 ГГц з відповідним зменшенням їх кількості та втрат на міжканальні інтервали. Важливо також застосовувати лазери з мінімально можливою шириною спектральної лінії, такими як лазерні діоди з розподіленим зворотним зв'язком.

Перешкодами для збільшення швидкості передачі в каналі є хроматична дисперсія, яка зростає зі збільшенням швидкості. Це також призводить до

розширення імпульсів, що потребує використання компенсаторів дисперсії на основі компенсуючого волокна або волоконно-оптичних граток Брегга. Крім того, існують обмеження, пов'язані із сучасною електронікою, над якими також ведуться дослідження.

Останнім часом активно досліджується використання багатомодових (маломодових) волокон (MMF) для збільшення інформаційно-пропускної здатності ВОЛП. Цей аспект збільшення швидкості передачі описується множником N_m.

Щодо модового мультиплексування, результати досліджень свідчать про перспективність його застосування в маломодових оптичних волокнах [6,8] (MDM – Mode Division Multiplexing). Таке волокно підтримує невелику кількість мод (2-3 моди), що забезпечує високу селективність і легкість управління модовими спотвореннями. Використання режиму мультиплексування мод у поєднанні з цифровою обробкою сигналу множинного вводу/виводу дозволяє досягти N-кратного збільшення пропускної здатності в маломодовому волокні порівняно з одномодовим. В експериментах модове мультиплексування було досягнуто в двомодовому волокні з різними комбінаціями підтримуваних мод.

Стандартне багатомодове волокно (MMF) підтримує понад сто мод, що ускладнює формування та обробку оптичного сигналу. На відміну від нього, маломодове волокно (FMF – Few Mode Fiber) має обмежену кількість мод, що дозволяє значно спростити систему обробки сигналів.

Система передачі NxN MDM складається з N передавачів, які генерують канальні сигнали. Мультиплексування N сигналів здійснюється за допомогою модового мультиплексора, після чого сигнали, передані різними просторовими модами, об'єднуються в маломодовому волокні. Під час передачі всі моди на одній і тій же довжині хвилі обробляються як єдине ціле в рамках MDM суперканалу. Після передачі по волокну сигнали демультиплексуються модовими демультиплексорами.

Демультиплексовані сигнали потім детектуються N когерентними приймачами та перетворюються з оптичної в електричну форму. Електричні сигнали перетворюються на цифрові та обробляються за допомогою модуля цифрової обробки. Для компенсації модового зв'язку та/або перехресних перешкод у каналі, які можуть виникати через мультиплексор/демультиплексор (MUX/DEMUX) або волокно, використовується алгоритм MIMO (Multiple Input Multiple Output). Якщо MUX/DEMUX має унітарну функцію передачі з рангом N, що відповідає кількості мод, підтримуваних FMF, то пропускна здатність каналу може бути в N разів більшою, ніж у одномодовій системі.

У такій системі передачі існує три основні проблеми, що потребують вирішення:

1. Вибір відповідного оптичного волокна;
2. Розробка конвертора мод для переходу з моди LP01 до мод вищого порядку і назад;
3. Створення модового мультиплексора/демультиплексора.

2.3 Напрямки удосконалення компонентів WDM-системи

Будемо орієнтуватися на спрощену схему WDM-системи, рисунок 2.2, у якій відображені основні її компоненти [13].

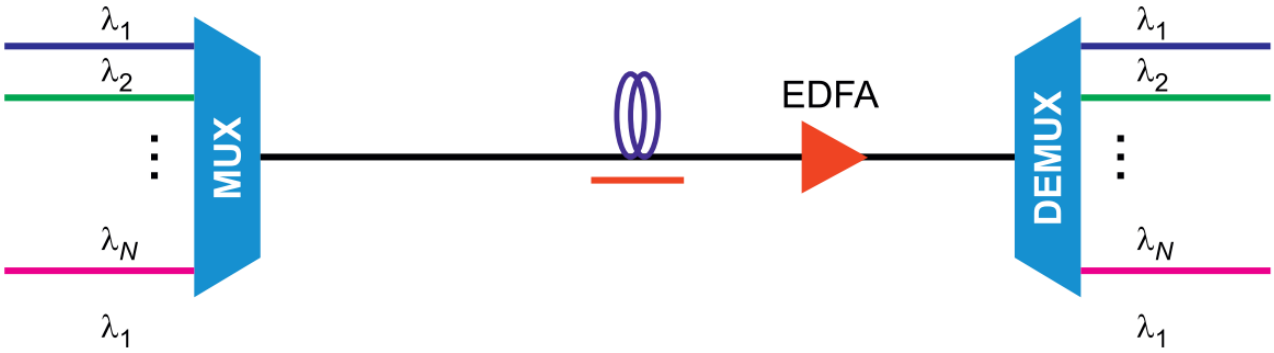


Рисунок 2.2 – Загальний вид WDM-системи

На схемі, рис. 2.2, показано передачу по одному волокну оптичних сигналів на різних довжинах хвиль.

Компоненти системи:

- Транспондери/мукспондери, які формують сигнали на різних довжинах хвиль (не показані на схемі, належать до клієнтського обладнання);
- Мультиплексори, що об'єднують сигнали з різних волокон на різних довжинах хвиль в одному волокні, і демультиплексори, які розділяють кілька сигналів на різних довжинах хвиль з одного волокна на різні волокна;
- Підсилювачі, що посилюють багатоканальний сигнал під час його передачі через оптичне волокно.

Транспондери/мукспондери

Адаптація клієнтських сигналів до мереж DWDM здійснюється за допомогою транспондерів та мукспондерів (агрегуючих транспондерів). Ці блоки перетворюють несучу довжину хвилі сигналу, що надходить від клієнтського обладнання, на стандартну довжину хвилі, а також приводять оптичний сигнал, що надходить з лінії, до несучої довжини клієнтського обладнання. Таким чином, вони поєднують функції передавальної та приймальної частин.

Транспондери/мукспондери забезпечують передачу лінійного сигналу потрібної довжини хвилі у вибраному форматі спектрального ущільнення. Компоненти передавальної частини (лазери, модулятори) та алгоритми корекції помилок (FEC – Forward Error Correction) забезпечують стійкість сигналу до шумів і спотворень. Використання сучасних форматів модуляції в транспондерах і мукспондерах дозволяє досягти високої пропускної здатності мережі.

Функціонал цих пристроїв розширюється завдяки підтримці рішень операторського класу: підвищується надійність, час безперервної роботи зменшується, а час перезапуску скорочується. Також забезпечується віддалений моніторинг. Сучасні модулі можуть підтримувати програмно-керовану архітектуру мережі SDN (Software Defined Network). Кількість вихідних портів транспондера відповідає кількості клієнтських портів. В залежності від

реалізації, він може мати внутрішню комутацію або жорстко пов'язувати вхідні та вихідні порти попарно.

При використанні технології OTN (Optical Transport Network), яка працює разом з DWDM і забезпечує перенесення різнорідного трафіку на оптичному рівні, завдання пристрою зводиться до інкапсуляції клієнтського сигналу в кадри низького порядку ODU (Optical Data Unit), додавання заголовка для процедури корекції помилок FEC та формування вихідного цифрового кадру. Ця процедура називається відображенням, а вихідний цифровий кадр, що модулює оптичну несучу, - OTU (Optical Transport Unit).

Застосування мукспондерів дозволяє ефективніше використовувати пропускну здатність лінії зв'язку, оскільки це заощаджує порти на оптичних DWDM-мультиплексорах. Іншою перевагою є економія обчислювальних ресурсів системи, оскільки контрольна сума FEC розраховується не для кожного клієнта, а для всього кадру OTU.

Оптичні мультиплексори [10].

Мультиплексори класифікуються за можливістю зміни канального плану та кількістю каналів. У першій категорії можна виділити дві групи: фіксовані мультиплексори, де кожен оптичний канал жорстко призначений для конкретного волокна, і ROADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) — перебудовувані мультиплексори, які дозволяють програмно змінювати розподіл каналів.

За кількістю каналів розрізняють термінальні (багатоканальні) мультиплексори з числом каналів N від 40 до 96, а також мультиплексори введення-виведення (OADM), де кількість каналів, що вводяться або виводяться, коливається від 1 до 16.

Всі транспондери та мукспондери підключаються до оптичного термінального мультиплексора, який є пасивним пристроєм, що об'єднує раніше сформовані оптичні канали в одне волокно. На приймальній стороні відбувається демультиплексування оптичного сигналу — процес, який є оберненим до мультиплексування. Саме мультиплексори та демультиплексори

є чистими WDM-пристроями, оскільки їх параметри визначають частотний план системи зв'язку: щільність розташування каналів, їх кількість та смугу пропускання.

Фіксовані багатоканальні мультиплексори виготовляються на основі AWG (Array Waveguide Grating), тоді як малоканальні можуть реалізовуватися як набір тонкоплівкових фільтрів (TFF). Втрати на канал у мультиплексорах на основі AWG-решіток не залежать від кількості каналів і складають приблизно 5 дБ.

Для формування рівномірного групового сигналу пристрої можуть бути оснащені керованими оптичними атенюаторами для кожного мультиплексованого каналу. Крім того, вони можуть мати вимірники потужності для віддаленого моніторингу спектра каналів та моніторний роз'єм для підключення вимірювального обладнання без розриву оптичної лінії.

Мультиплексори введення-виведення ROADM

Окремої уваги вимагає група програмно-реконфігурованих мультиплексорів введення-виведення. На відміну від фіксованих мультиплексорів (OADM), які жорстко визначають маршрути каналів, гнучкість та масштабованість системи забезпечуються мультиплексорами ROADM, які програмно змінюють розподіл каналів по волокнах, рис. 2.3.

WSS-матриці та їх роль в ROADM

Кількість WSS-матриць (Wavelength Selective Switch), які є основними компонентами ROADM, визначає функціональність мультиплексора введення-виведення та кількість доступних напрямків. WSS-матриця направляє вхідну довжину хвилі на один з N виходів. Завдяки розвитку прецизійних технологій на фотонному рівні стало можливим більш ефективне використання спектрального ресурсу через високу гранулярність WSS-пристроїв.

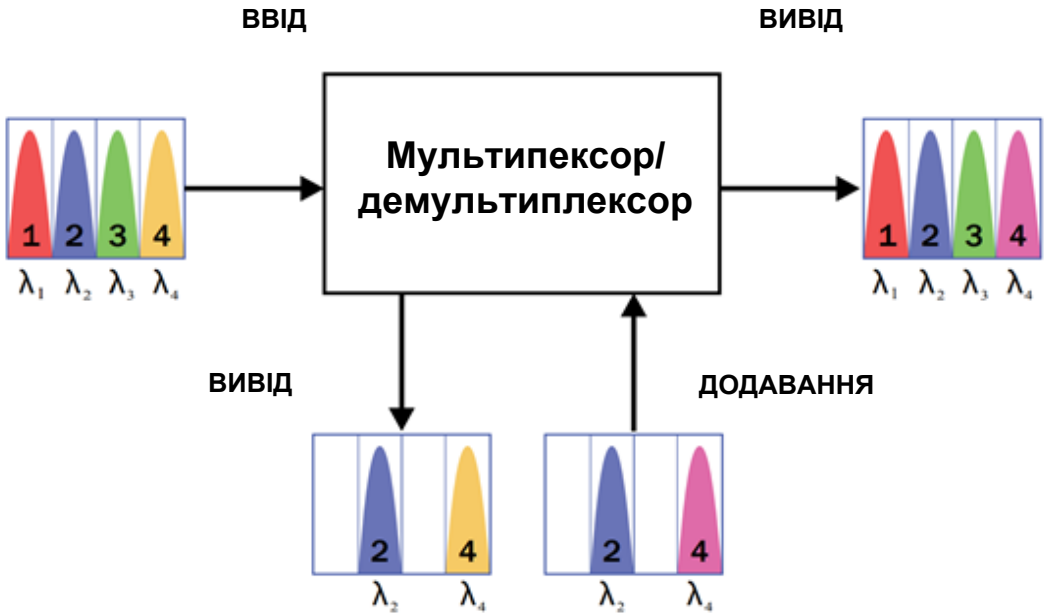


Рисунок 2.3 – Принцип роботи мультиплексора введення-виведення (ROADM), що реконфігурується

Передача сигналу через оптичне волокно

Передача сформованого групового оптичного сигналу відбувається через спеціально розроблені оптичні волокна. Для більшості систем, що використовують DWDM, оптимальними є стандартні одномодові волокна (SSMF – Standard Single Mode Fiber), параметри яких регламентуються рекомендацією MCE G.652.

Для систем DWDM значної протяжності було створено волокно з чистої кварцової серцевини (PSCF – Pure Silica Core Fiber), що відповідає рекомендації G.654D. Це волокно часто використовується в підводних лініях зв'язку.

У системах з великою кількістю каналів можуть застосовуватися волокна з підвищеною площею моди (SLA), що зменшує нелінійні спотворення та підвищує допустиму потужність сигналу, в результаті чого збільшується дальність безрегенераційної передачі сигналів. Для спрощення монтажу можуть використовуватися волокна зі зниженою чутливістю до втрат на згинах, відповідно до рекомендації G.657.

Оптичне волокно є джерелом загасання, тому для відновлення рівня оптичного сигналу необхідно використовувати спеціальні пристрої – оптичні підсилювачі. Вони підвищують дальність передачі сигналу. Зазвичай відстань між вузлами підсилення складає від 60 до 100 км і оптимізується для кожної проектованої лінії.

Для оптичних систем зв'язку застосовуються підсилювачі, які можуть базуватися на різних фізичних процесах. Найбільш популярними є підсилювачі на основі волокна, легованого іонами ербію (EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier).

Ці пристрої ефективно підсилюють сигнали в С-діапазоні, що характеризується найменшим поглинанням кварцового скла, в межах 1535–1565 нм. Структура простого однокаскадного підсилювача представлена на рисунку 2.4. Оптичне накачування може відбуватися як попутно, так і зустрічно, з використанням одного або кількох лазерів, які випромінюють на довжинах хвиль 980 або 1480 нм. Іони ербія поглинають енергію накачування, переходячи в збуджений стан. При взаємодії із сигнальним випромінюванням на довжині хвилі 1550 нм відбувається перехід збудженого іона ербія в основний стан, що супроводжується випромінюванням одиничного фотона на довжині хвилі 1550 нм.

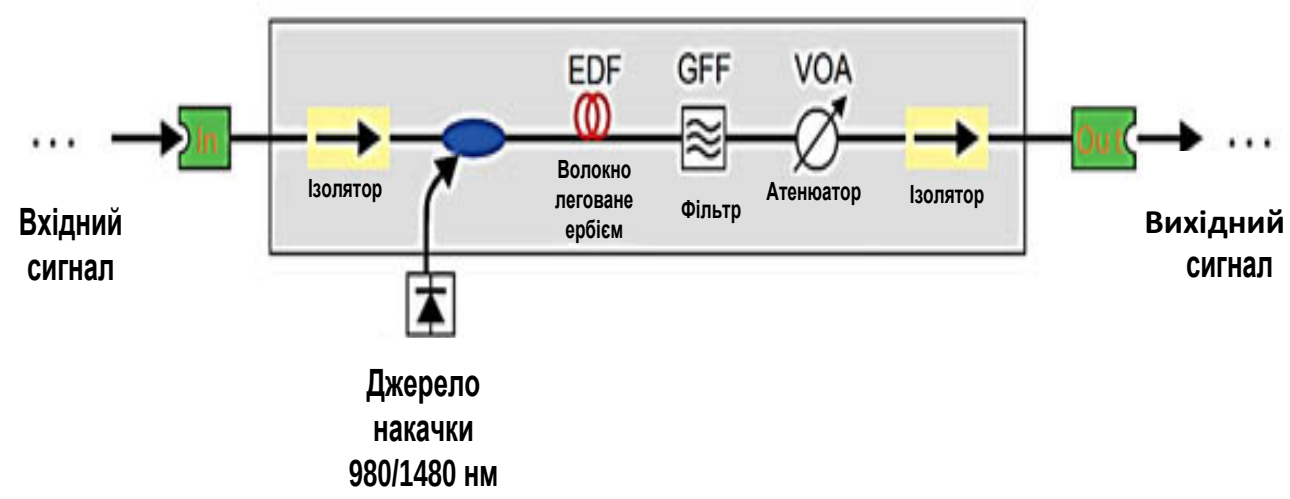


Рисунок 2.4 – Проста схема однокаскадного EDFA-підсилювача

Важливі параметри оптичного волокна

До ключових характеристик оптичного волокна належать коефіцієнт загасання, коефіцієнт дисперсії та коефіцієнт нелінійності. У сучасних багатоканальних протяжних DWDM-системах використання однокаскадних підсилювачів виявляється неефективним. Зазвичай застосовуються багатокаскадні схеми, які дозволяють регулювати необхідний коефіцієнт підсилення за допомогою вбудованого атенюатора у пристроях VGA (Variable Gain Amplifier) та вирівнювати спектр групового сигналу за допомогою оптичних фільтрів GFF (Gain Flattening Filter).

Окрім EDFA-підсилювачів, у зв’язкових технологіях можуть використовуватися волоконні підсилювачі на основі раманівського розсіювання. Підсилювачі, засновані на ефекті Рамана, поділяються на зосереджені та розподілені. Зосереджені підсилювачі мають схожі експлуатаційні характеристики з EDFA, тоді як розподілені вимагають підвищених заходів безпеки через високі потужності лазера накачування і відповідні параметри волоконно-оптичної лінії.

Підсилювачі Рамана є незамінними для великих прольотів (понад 150 км), де неможливо організувати велику кількість проміжних підсилювальних вузлів.

Раніше оптичні підсилювачі класифікували за функціональним призначенням на кілька груп: підсилювачі потужності (бустери), які встановлюються безпосередньо після оптичного мультиплексора; лінійні підсилювачі в проміжних точках довгих ліній зв'язку; попередні підсилювачі на вході демультиплексора для забезпечення оптимального рівня сигналу на вході оптичних приймачів. Однак останнім часом виробники DWDM-систем дедалі більше уникають такого поділу, підбираючи параметри підсилювачів безпосередньо під проектовану лінію, враховуючи неідеальності амплітудно-частотних характеристик усіх активних і пасивних компонентів системи.

2.4 Помилки в системах WDM при прийомі оптичного сигналу

Перед тим як розглянути методи підвищення продуктивності DWDM систем і модернізації оптичних транспортних мереж, важливо розглянути кілька причин виникнення помилок на прийомі. Однією з основних причин є шуми приймача, які можуть виникнути через неоптимальний рівень оптичної потужності на вході транспондера.

Хроматична дисперсія розширює оптичні імпульси, що зменшує екстинкцію (затухання світлової хвилі) і ускладнює їх прийом. Іншою проблемою є накопичення шумів підсиленого спонтанного випромінювання (ASE) під час проходження групового сигналу через ланцюг оптичних підсилювачів.

У лініях без оптичних підсилювачів основними джерелами помилок є дисперсія, шуми та перевантаження на прийомі. Використання оптичних підсилювачів перетворює ці проблеми з фундаментальних на інженерні: перед подачею сигналу на приймач його підсилюють до оптимального рівня, що дозволяє уникнути перевантаження та покращити чутливість. Для компенсації дисперсії використовуються спеціальні пристрої – компенсатори, які відновлюють тривалість імпульсів перед їх подачею на вхід приймальної частини транспондера.

Однак вирішення цих двох проблем призводить до внесення шуму ASE та нелінійних спотворень. Нелінійні ефекти виникають через високий рівень інтенсивності оптичного сигналу в регенераційній секції, де може бути кілька підсилювальних секцій.

Економічні міркування сприяють бажанню ефективно використовувати спектр підсилювача та зменшити кількість підсилювачів у лінії. Це, в свою чергу, призводить до появи щільно розташованих каналів великої потужності, що сприяє розвитку внутрішньоканальних і міжканальних нелінійних ефектів.

Для транспондерів і мукспондерів, які проектуються для мереж без оптичних підсилювачів (зазвичай CWDM), основна увага приділяється

підвищенню чутливості та стійкості до дисперсії. У випадку DWDM систем це не є актуальним, оскільки потрібне каналоутворювальне обладнання, здатне протистояти шуму ASE та нелінійним спотворенням. Можна встановити граничні допустимі значення параметрів, що описують вхідний оптичний сигнал, як такі, що забезпечують необхідний коефіцієнт помилок за оптимальних умов.

Кількість помилок у бітовому потоці даних визначається через BER (Bit Error Rate), що є відношенням кількості помилково переданих біт до загальної кількості переданих біт. Замовник системи зв'язку зазвичай встановлює максимально допустиме значення BER, яке коливається між 10^{-10} та 10^{-12}.

Для CWDM-обладнання чутливість приймача визначається як мінімально допустима потужність на оптичному приймачі, при якій неспотворений оптичний сигнал приймається з кількістю помилок, що не перевищує певного заданого значення, також враховуються штрафи за дисперсію. У випадку DWDM-обладнання основним параметром є стійкість до шуму ASE. Рівень шуму ASE вимірюється через OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio – відношення сигнал/шум), а кожен DWDM-транспондер або мукспондер має своє необхідне значення OSNR. Мінімально допустиме значення OSNR є тим рівнем, за якого можливий прийом сигналу відповідно до визначеного замовником рівня BER.

2.5 Методи підвищення продуктивності WDM-систем

Визначимо термін «продуктивність системи зв'язку» як добуток загальної швидкості передачі C на дальність передачі L. Дальність у магістральних системах означає відстань передачі на багатопрогоновій лінії з проміжними підсилювачами без регенерації сигналу. Продуктивність DWDM-системи може бути збільшена двома шляхами: по-перше, шляхом підвищення швидкості передачі, і по-друге, за рахунок збільшення максимальної дальності передачі.

Швидкості передачі даних постійно зростають. Нещодавно системи з швидкістю 40 Гбіт/с вважалися новинкою, а зараз вони вже реалізуються в

опорних мережах мобільних операторів, датацентрах і у провайдерів інтернету. Вже стандартизовано та виготовляється обладнання для передачі даних на швидкостях 100G, 200G та 400G. Ця тенденція вплинула на розробку нових протоколів передачі інформації (таких як IEEE 802.3bs, IEEE 802.3ba, OTU4), нових форматів модуляції оптичних сигналів (наприклад, NRZ-DP-QPSK), а також на введення обов'язкової перевірки та корекції помилок (FEC) та інші технічні інновації.

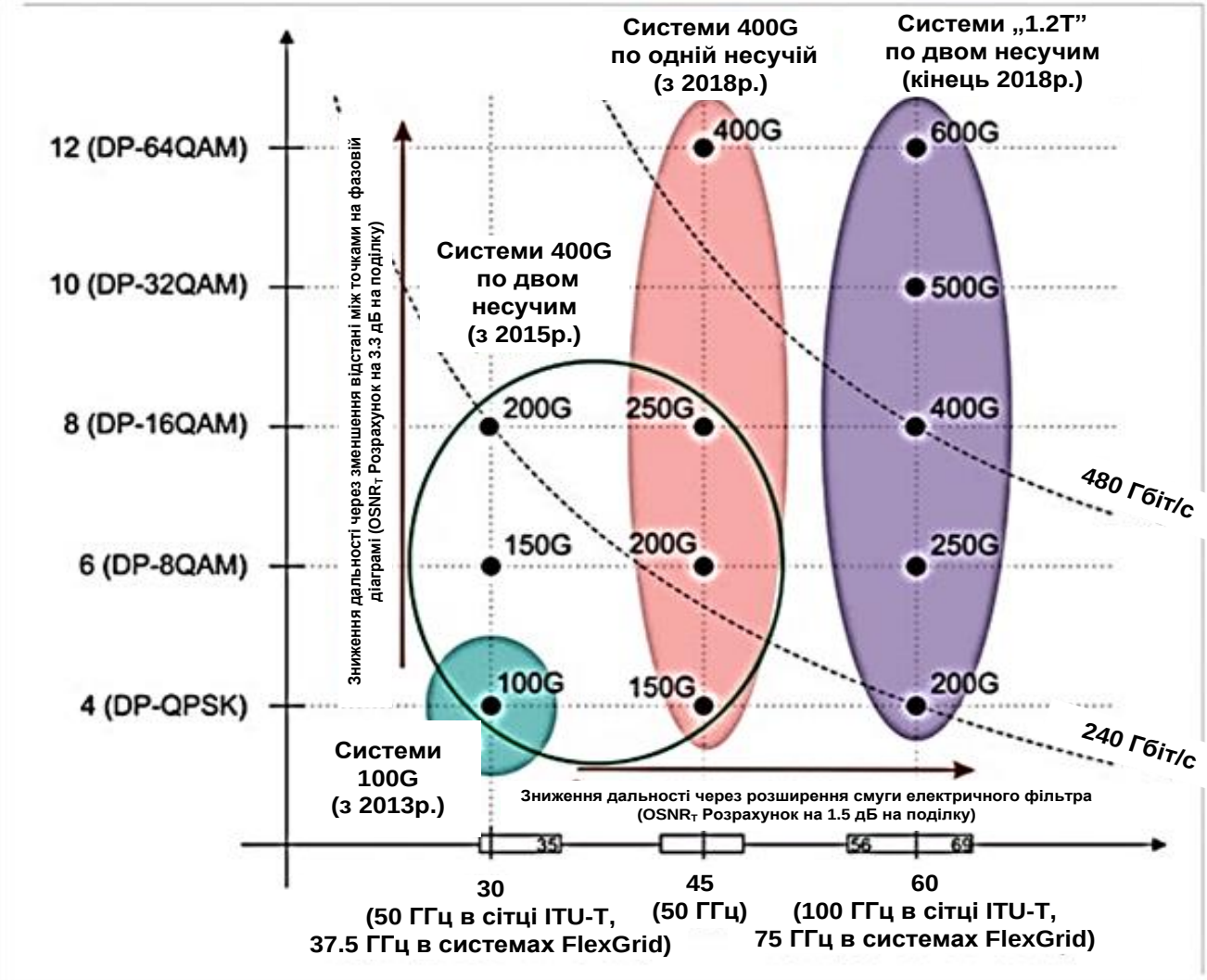


Рисунок 2.5 – Шляхи підвищення швидкості передачі даних

На рисунку 2.5 показані способи підвищення швидкості передачі даних. По горизонталі відображені символьна швидкість (гігасимволів/с) і оптичний спектральний діапазон, зайнятий несучою. По вертикалі розміщено символьну ефективність (біт/символ) та формат модуляції. Варто звернути увагу на

позначення швидкостей: G – Гбіт/с, T – Тбіт/с, що фактично вказує на одиниці виміру. Ці літери розташовуються поряд з цифрами, які відображають чисельне значення швидкості передачі інформації.

2.5.1 Збільшення швидкості передачі в системі

Швидкість передачі в системі з однаковими каналами визначається як добуток кількості каналів на швидкість у кожному з них. Ця швидкість у каналі залежить від двох основних факторів: символьної швидкості та символьної ефективності, що ілюструється на рисунку 2.5.

Сумарна бітова швидкість V (біт/с) системи зв'язку складається з швидкостей передачі даних у кожному каналі. Для системи з однаковими каналами вона обчислюється як добуток кількості каналів N_{CH} на швидкість V_B (біт/с) у кожному каналі. Максимальна кількість каналів у парі волокон обмежується стандартом спектрального ущільнення. Бітова швидкість каналу V_B розраховується як добуток символьної швидкості V_S (символів/с) на символьну ефективність формату модуляції ES (біт/символ). Параметр E_S показує, скільки інформації переносить один символ, і визначається логарифмом з основою 2 від кількості можливих значень символу.

Кількість каналів обмежена доступним спектральним діапазоном. Для стандартних EDFA-підсилювачів це приблизно 1530–1565 нм, що дозволяє реалізувати до 48 каналів на 50 ГГц або 96 каналів на 100 ГГц. З технологією FlexGrid кількість каналів може бути іншою [12].

1. Збільшення символьної швидкості V_S веде до підвищення частоти роботи модулятора. Граничні значення символьної швидкості електричного сигналу визначаються характеристиками матеріалів та модуляторів. Доступна швидкість, реалізована на стандартних компонентах, досягає 32 Гбод, що спостерігається в 100G-системах. Швидкість 45 Гбод використовується в новітніх процесорах 2×200G, тоді як 64 Гбод знаходяться на стадії лабораторних випробувань. Подальше зростання цього показника можливе, але суттєвих стрибків не очікується.

2. Важливо використовувати багаторівневі (багатопозиційні) формати модуляції. На початку розвитку застосовувалися амплітудні формати, такі як NRZ (Non-Return-to-Zero) та RZ (Return-to-Zero), причому RZ виявився більш стійким до нелінійних спотворень. Вони забезпечували швидкість передачі до 10 Гбіт/с. Проте, з підвищенням швидкостей понад 40 Гбіт/с амплітудні формати почали стикатися з проблемами, оскільки ширина спектра ставала схожою на міжканальний інтервал у DWDM-системах. Це, разом із нестійкістю амплітудно-модульованих сигналів, призвело до переходу на фазові формати, де інформацію несе фаза оптичного сигналу.

Сучасні технічні рішення використовують всі доступні ступені свободи сигналу: амплітуду, фазу та поляризацію. Найбільш популярним форматом для 100-гігабітних систем є DP-QPSK (Dual Binary Quadrature Shift Keying), в якому інформація кодується за допомогою двох поляризаційних станів та чотирьох фазових значень, що ілюструється на рисунку 2.6.

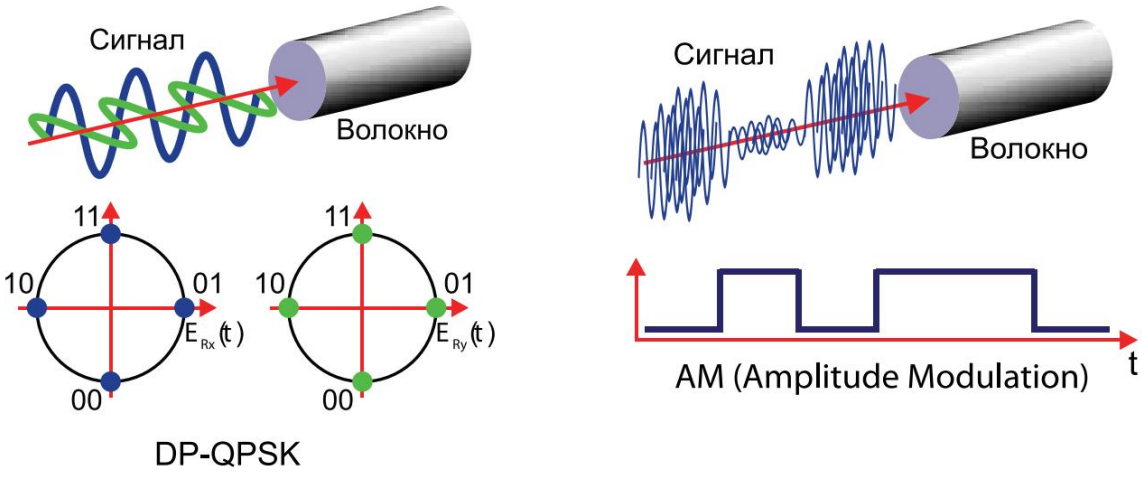


Рисунок 2.6 – Структура сигналу DP-QPSK та AM

На рисунку 2.7 ілюструється процес формування сигналу в форматі DP-QPSK. Безперервне випромінювання, що генерується лазером, розділяється на дві ортогональні поляризації. Кожна з цих поляризацій передається на квадратурні модулятори, де модулюється інформаційним сигналом з бітовою

швидкістю понад 25 Гбіт/с, включаючи FEC-заголовки. У одному з плечей інтерферометрів Маха-Цендера, які базуються на квадратурних модуляторах, створюється фазовий зсув на 90 градусів за допомогою керуючої напруги [12].

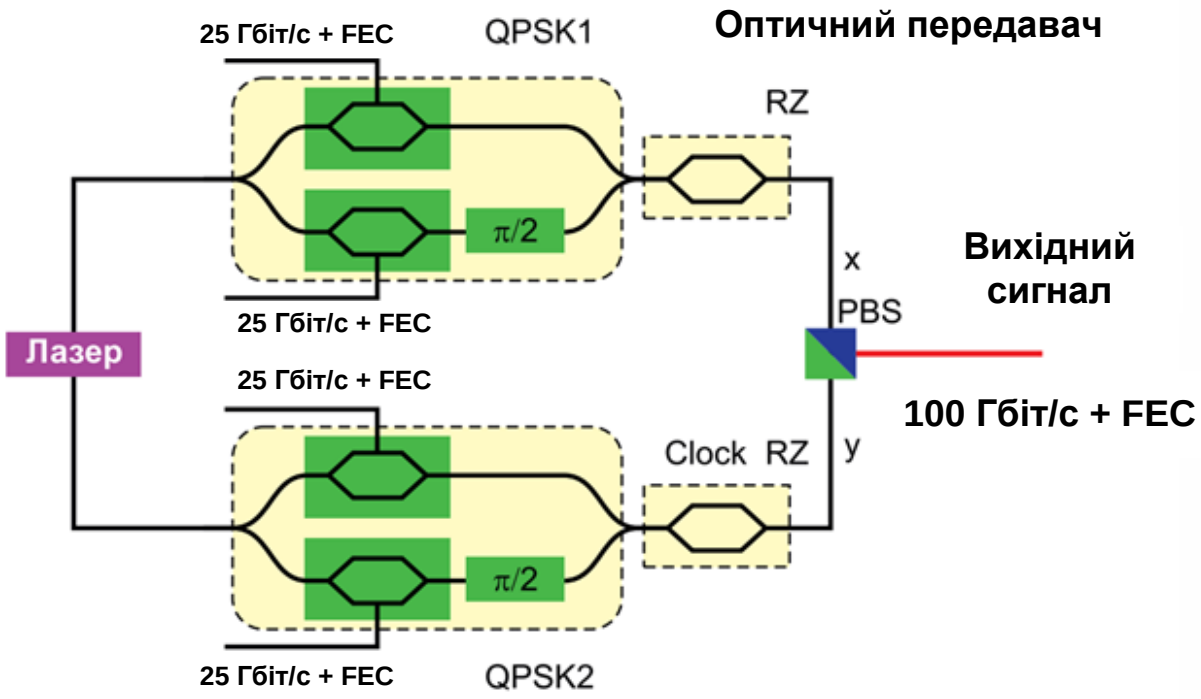


Рисунок 2.7 – Структура передавача DP-QPSK

Таким чином, формуються QPSK-сигнали в кожній поляризації, які потім об'єднуються за допомогою поляризаційного сплітера, створюючи структуру DP-QPSK. Кожен символ DP-QPSK переносить 4 біти інформації (по 2 біти в кожній поляризації). Для досягнення швидкостей 200G та 400G також використовується амплітуда світла, що реалізується через формати DP-16QAM та DP-64QAM, які суттєво підвищують спектральну ефективність і забезпечують високу швидкість передачі даних у стандартному діапазоні 50 ГГц.

У сучасних DWDM-рішеннях із щільно розташованими оптичними каналами, як правило, немає вільних міжканальних інтервалів, що робить збільшення спектральної ефективності єдиним способом підвищення загальної швидкості передачі даних без розширення спектрального діапазону. Це є однією з основних причин переходу від амплітудних до більш складних

фазових когерентних форматів модуляції. Проте, це також призводить до зменшення дальності передачі.

Що стосується нарощування числа несучих, то збільшення кількості каналів може здійснюватися за рахунок освоєння нових спектральних діапазонів, хоча це ускладнюється обмеженою ефективною смугою оптичних підсилювачів. Інший напрямок полягає у зменшенні міжканального інтервалу в існуючому оптичному діапазоні, що вимагає переходу на нові стандарти спектрального ущільнення і може призвести до зростання міжканальних завад.

2.5.2 Збільшення дальності передачі

Другим напрямком підвищення продуктивності DWDM-систем є збільшення дальності передачі. Цей параметр залежить від багатьох чинників, таких як стійкість вибраного транспондера до шумів ASE і нелінійних спотворень, характеристики підсилювачів і оптичних волокон, а також розташування каналів. Дальність передачі також визначається чутливістю приймача (в дБ) — показником, що вказує, при якому співвідношенні рівня корисного сигналу до рівня шуму в лінії (OSNR — Optical Signal to Noise Ratio) приймач здатний безпомилково виявити вхідний сигнал.

Іноді виникає потреба в збільшенні швидкості передачі без зменшення дальності. Така модернізація може здійснюватися шляхом заміни транспондерів на більш ефективні, щоб зберегти необхідний рівень OSNR.

1. Когерентний прийом

Для збереження дальності разом із спектрально ефективними форматами модуляції застосовують технологію когерентного прийому. Суть когерентного детектування полягає в змішуванні інформаційного сигналу, що надходить з лінії, з випромінюванням опорного лазера. Це перетворює спектр в оптичному діапазоні так, що електричний сигнал, сформований у фотоприймачі, містить усю інформацію про вихідний оптичний сигнал.

Структура когерентного приймача зображена на рисунку 2.8. За допомогою поляризаційних сплітерів інформаційний сигнал і опорне

випромінювання приймального лазера розділяються на дві ортогональні компоненти. 90-градусний оптичний змішувач використовується для поєднання поляризаційних складових сигналу з X- та Y-компонентами приймального лазера.

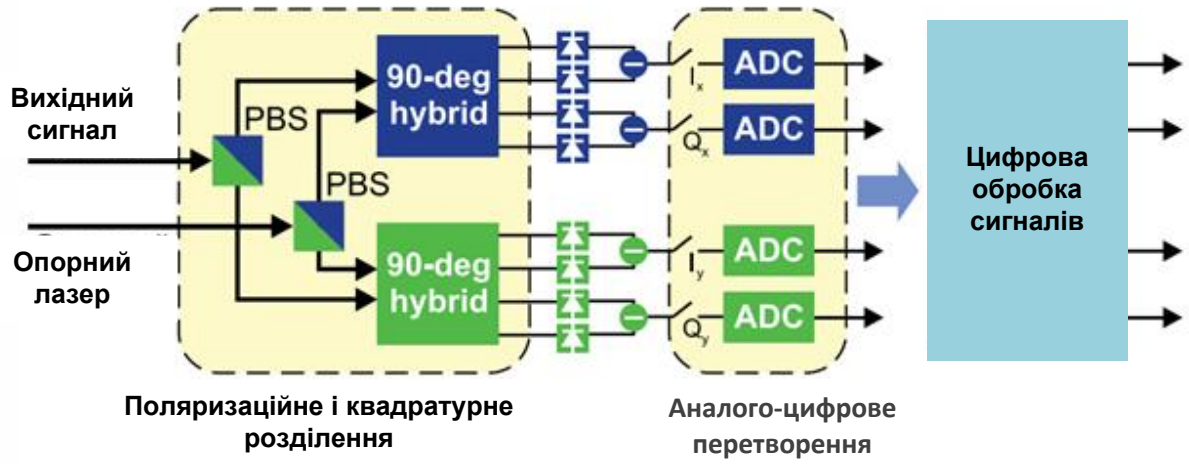


Рисунок 2.8 – Структура когерентного приймача

Частота опорного лазера може бути налаштована в межах ±20 МГц відносно несучої частоти передавального лазера. У сучасних когерентних рішеннях ширина випромінювання лазерів не перевищує 100 ГГц. Чотири пари сигналів з балансних фотодетекторів, що підвищують чутливість прийому, надходять до входів аналого-цифрових перетворювачів, формуючи таким чином чотири символьні потоки.

Серед найбільш поширених завадостійких алгоритмів для когерентних систем виділяють HD FEC (Hard Decision Forward Error Correction), реалізований на основі каскадних кодів, та SD FEC (Soft Decision Forward Error Correction), що базується на "м'якому" прийнятті рішень. Оптимальний тип коду обирається залежно від конкретної лінії, включаючи необхідну дальність, значення накопиченої дисперсії та інші параметри системи.

Незважаючи на те що принципи когерентного прийому були відомі давно, їх застосування в оптичному діапазоні ускладнювалося через високу вартість і складність високостабільних вузькосмугових лазерів, які вимагали синхронізації фази та частоти між прийнятим сигналом і випромінюванням

гетеродина. Проблему синхронізації фаз вдалося вирішити завдяки розвиткові потужних технологій цифрової обробки сигналів. Один з алгоритмів у блоці DSP (Digital Signal Processing) — це корекція різниці фаз із використанням відновлення несучих, що усуває потребу в апаратній синхронізації частот і фаз джерел.

2. Цифрова обробка сигналу. Завадостійке кодування.

Сьогодні DSP є невід'ємною частиною когерентного транспондера. Як показано на рисунку 2.7, чотири цифрові потоки з виходів АЦП потрапляють у блок DSP, де, окрім синхронізації та фазової диверсифікації, реалізуються інші алгоритми компенсації, необхідні для безпомилкового відновлення сигналів.

Перший функціональний блок процесора усуває неточності вхідного інтерфейсу, такі як часова несумісність між чотирма компонентами через різницю в оптичних та електричних шляхах у когерентному приймачі, а також нерівність їх амплітуд. Далі здійснюється перетворення асинхронної частоти дискретизації на частоту, яка дорівнює 2 відліки на символ. У DSP реалізується компенсація накопиченої хроматичної дисперсії в лінії, що виключає потребу в установці фізичного компенсатора, який би вносив додаткові втрати.

Для отримання чіткої фазової діаграми важливо мінімізувати відхилення амплітуди від заданого середнього значення, усуваючи обертання діаграми у фазовій площині. Оцінюється і компенсується фазовий шум, накопичений, зокрема, через нелінійні ефекти в волокні. Після завершення всіх етапів обробки визначаються значення прийнятих символів, а останнім кроком є процедура виправлення помилок FEC. Використання надмірного кодування при цифровій обробці багаторівневого сигналу може забезпечити виграш у необхідному OSNR до 9 дБ. До корисного навантаження в кожному транспондері додається FEC-заголовок, розмір якого визначається типом коду.

2.6 Гнучкість та масштабованість сучасних оптичних систем

Для досягнення гнучкості та масштабованості системи необхідно модернізувати фізичні компоненти та реалізувати програмну керованість мережі.

2.6.1 Формати модуляції. Суперканали

Запровадження когерентних рішень для DWDM-систем стало важливим кроком у підвищенні продуктивності. Канали 100G+ суттєво підвищили спектральну ефективність. Проте розвиток когерентних технологій не зупинився, відкриваючи нові можливості. Сучасні надвеликі інтегральні схеми (СВІС), що використовуються в транспондерах, дозволяють програмно змінювати формат модуляції для когерентних каналів, що дає змогу масштабувати швидкість передачі даних. Ця функція забезпечує оптимізацію мережі, дозволяючи вибирати між дальністю і швидкістю для кожного оптичного каналу.

Відомо, що перехід на вищий рівень модуляції зазвичай зменшує дальність системи зв'язку. Однак високошвидкісні цифрові потоки (200G+) можуть передаватися на великі відстані, використовуючи не одну, а кілька піднесущих, формуючи структуру суперканалу. Суперканал – це набір кількох оптичних піднесущих, якими можна управляти в оптичному тракті як єдиним цілим. Це вимагає переходу DWDM-систем від фіксованої сітки в 50 ГГц до гнучкого рішення з дискретністю до 12,5 і навіть 6,25 ГГц. Саме на таких відстанях можуть бути розташовані піднесущі, що формують суперканал — єдину структуру з точки зору інформації. Когерентні оптичні канали та суперканали з програмованою архітектурою вимагають, щоб архітектура реконфігурованих мультиплексорів, таких як ROADM, була змінена на конфігурацію FlexGrid-CDC.

2.6.2 Комутація на фотонному рівні

Коли когерентні DWDM-канали, включаючи суперканали, заповнені трафіком, гнучкий ROADM повинен при потребі перерозподілити окремі довжини хвиль у потрібні напрямки.

Нова концепція FlexGrid передбачає перехід від фіксованої частотної сітки до більшої дискретності та вдосконалення класичного ROADM для підтримки технології суперканалу з кількома піднесущими, які можуть розташовуватися на відстані до 12,5 ГГц, а іноді й 6,25 ГГц.

Функція «Colorless» забезпечує відсутність прив'язки довжини хвилі до конкретного порту ROADM, що дозволяє вводити та виводити будь-яку довжину хвилі на будь-якому оптичному виході пристрою. Функція «Directionless» підтримує можливість маршрутизації оптичного сигналу від транспондера в будь-який напрямок ROADM без жодних обмежень на вхідні та вихідні порти. Функція «Contentionless» дозволяє мати сигнали на однакових довжинах хвиль на вхідних портах, отриманих з різних транспондерів, обробляючи їх на оптичному рівні та розподіляючи по різних вихідних портах без змішування.

Проте фізична реалізація CDC Flex ROADM має високу вартість через необхідність наявності значної кількості матриць оптичної комутації WSS (Wavelength Selective Switch). Економічна доцільність впровадження таких вузлів повинна оцінюватися для кожної конкретної транспортної системи. У випадках, де потрібне більш економічне рішення і не передбачено повного програмного керування, можуть використовуватися спрощені варіанти (C ROADM, CD ROADM). У ситуаціях, коли не змінюється бодова швидкість і лінійні сигнали не є суперканалами, висока дискретність та Flex-рішення не є необхідними.

Блок ROADM повинен підтримувати команди, що надходять через OSC-канал від системи управління, що дозволить пристрою функціонувати як вузол програмно-керованої мережі.

2.6.3 Комутація на електронному рівні

У попередньому розділі обговорювалася комутація на рівні довжин хвиль у пристрої WSS, де не відбувається розділення сигналів на цифрові контейнери. Складнішим варіантом є реалізація OTN крос-коннекту (OXC). Наявність матриці крос-комутації є стандартною вимогою для замовників DWDM-обладнання в мережах зі складнішою топологією, ніж «точка-точка». OXC є керованою інтегральною схемою, яка призначена для встановлення логічних з'єднань між портами клієнтських і лінійних карт. У термінах OTN для кожного ODU низького порядку програмно визначається часовий інтервал для мультиплексування в ODU високого порядку. Побудова логічних з'єднань всередині шасі дозволяє формувати канали будь-якої складності та довжини в автоматичному режимі на мережі оператора. Додатково реалізується функція гнучкого резервування як окремих клієнтських каналів, так і магістральних ліній з гарячим резервуванням без потреби ручної комутації у випадку аварії.

Конкретна реалізація крос-комутації залежить від підключених лінійних карт, які визначають вимоги до пропускної спроможності кросматриці, її дискретності та внутрішнього протоколу. Наразі найбільший інтерес для конвергентних мереж, що поєднують різні типи трафіку, становлять матриці крос-коннекту, які реалізують одночасно комутацію пакетів і комутацію каналів. До такої крос-плати можуть підключатися лінійні карти як з OTN-інтерфейсами, так і з Ethernet-портами, а комутація здійснюється на рівні приватних пакетів всередині пристрою.

2.6.4 Програмно-керовані мережі

Другим напрямком розвитку транспортних оптичних мереж є впровадження програмної керованості.

Програмно-визначена мережа (SDN, Software Defined Network) – це мережа, в якій управління послугами реалізовано через адміністрування, при якому площина управління (CP, Control Plane) відокремлюється від площини даних (DP, Data Plane), як показано на рисунку 2.9.

Окрім CP і DP, в цій архітектурі з'являється додаткова складова – оркестратор. Оркестратор управляє SDN-контролерами, які моніторять стан різних мережевих ресурсів. Контролери збирають статистику з усіх мережевих пристроїв і взаємодіють з оркестратором, що працює на основі спрощеної моделі нижчих рівнів, використовуючи отримані дані для оптимізації та управління ресурсами від кінця до кінця. Для програм верхнього рівня надаються інтерфейси прикладного програмування (API).

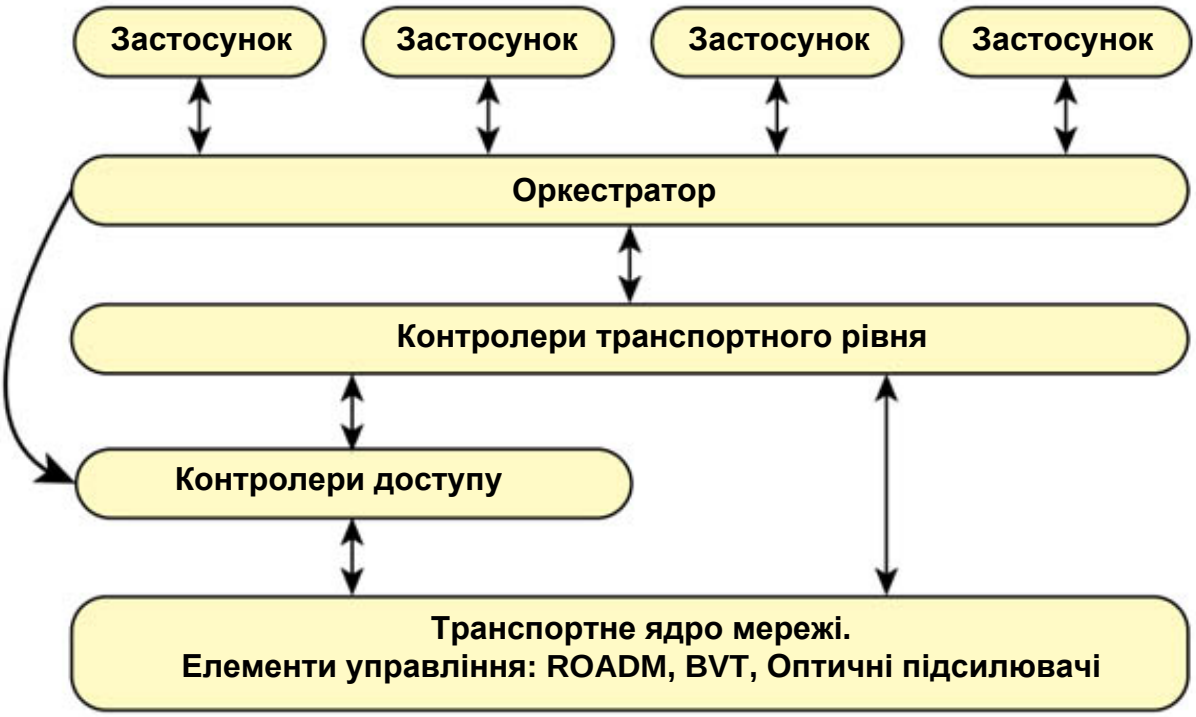


Рисунок 2.9 – Модель програмно-керованої мережі

Сьогодні важливим завданням є інтеграція технології SDN з оптичним обладнанням та пристроями OTN. Це дозволить забезпечити керованість і контроль на фізичному рівні, а також оптимізувати маршрути передачі трафіку з урахуванням таких параметрів, як підсилення, формат модуляції та відстань. Міжнародні стандартизуючі організації, зокрема MSA (Multi Source Agreement), працюють над специфікаціями для взаємодії систем управління з оптичними пристроями.

Другим аспектом є взаємодія площини управління з OTN-пристроями, що надасть гнучкість у побудові маршрутів на рівні OTN. У цьому випадку керованими пристроями стануть OTN-транспондери та блоки крос-комутації.

На даному етапі до програмно-керованих елементів системи відносяться: оптичні мультиплексори введення-виведення ROADM в конфігурації CDCFlexGrid, адаптивні когерентні транспондери у конфігурації BVT (Bandwidth Variable Transceivers) та оптичні підсилювачі з можливістю налаштування коефіцієнтів підсилення.

2.7 Висновки до розділу

Технології передавання з часовим розділенням каналів значно вичерпали свій інформаційно-пропускний потенціал, тому зараз вони інтегруються з технологіями хвильового мультиплексування для підвищення цього потенціалу. Серед напрямків, які сприяють збільшенню інформаційно-пропускної здатності, варто відзначити модове мультиплексування, мультиплексування за поляризацією, а також розвиток оптичних волокон з кількома сердечниками.

Проаналізовано ключові вузли, що впливають на ефективність систем WDM. Сучасні розробки у важливих елементах цих систем зосереджені на збільшенні пропускної спроможності, зниженні втрат сигналу, покращенні дальності передачі, а також на підвищенні загальної ефективності і надійності. В галузі лазерних технологій необхідно створювати більш потужні, стабільні та компактні джерела світла, що сприятиме підвищенню пропускної здатності та дальності систем WDM.

Розвиток оптичних компонентів та технологій їх виготовлення має на меті створення більш ефективних пристроїв мультиплексування та демультиплексування з меншими втратами і спотвореннями. Подальше вдосконалення оптичних підсилювачів із застосуванням нових матеріалів та конструкцій дозволить підвищити підсилення сигналу та знизити шум, що в свою чергу покращить якість передачі даних та збільшить дальність.

Комплексний підхід також вимагає розвитку оптичних фільтрів, компенсаторів, інтегрованих оптичних пристроїв (мультиплексорів/демультиплексорів та підсилювачів) і технологій цифрової обробки сигналів. Всі ці досягнення сприятимуть створенню потужніших, ефективніших та надійніших систем WDM.

3 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ДИСПЕРСІЙНИХ ЯВИЩ У ВОЛОКНІ

3.1 Оцінка впливу хроматичної дисперсії

У процесі передавання цифрового сигналу через оптичне волокно у вигляді послідовності оптичних імпульсів ці імпульси зазнають спотворень: їхня ширина змінюється з часом, а форма спотворюється. Це ускладнює відновлення імпульсів на приймальному кінці, збільшує рівень помилок у бітах, що є важливим показником якості роботи волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП), а також скорочує довжину регенераційної ділянки і зменшує швидкість передачі. Хроматична дисперсія оптичних імпульсів у лінійних одномодових оптичних волокнах (ООВ) є важливим чинником, що впливає на пропускну здатність волоконно-оптичних лінійних трактів (ВОЛТ). Довжина регенераційної ділянки зворотно пропорційна питомій хроматичній дисперсії лінійного волокна. Коли швидкість передачі TDM-сигналу збільшується в N разів, довжина регенераційної ділянки зменшується пропорційно в N разів при низькій швидкості передачі та в N^2 разів при високій швидкості, коли спектральна ширина оптичного імпульсу на виході передавача визначається ефективною шириною модуляції. Отже, хроматична дисперсія лінійного волокна повинна бути якнайменшою. Однак при високих швидкостях передачі для TDM-сигналу та у WDM-системах виникають нелінійні ефекти. Зокрема, у WDM-системах нелінійна взаємодія між каналами досягає максимуму при нульовому коефіцієнті хроматичної дисперсії волокна, що може призвести до підвищення коефіцієнта помилок при передачі сигналу. Тому DWDM-системи вимагають використання лінійних оптичних волокон з компромісними дисперсійними характеристиками: дисперсія в робочому діапазоні хвиль має бути достатньо малою, але не дорівнювати нулю.

Задачею є отримання аналітичних виразів, що описують зміни тривалості та фази оптичного імпульсу під час його поширення по ООВ. Це дозволить

сформулювати основні принципи широкосмугової компенсації хроматичної дисперсії, а також принципи побудови ВОЛТ із самокомпенсацією хроматичної дисперсії та частотної модуляції (ЧМ) імпульсу, спричиненої нею.

Розглянемо еволюцію оптичного імпульсу, що поширюється по ООВ, який є результатом суперпозиції плоских хвиль з неперервним спектром. Електричне поле імпульсу на вході в волокно можна подати як змінну в часі скалярну проекцію комплексного вектора напруженості на напрямок лінійної поляризації поля.

$$E(z, t)_{z=0} = E(0, t) = a(t)\ exp\ (i\omega_0 t), \tag{3.1}$$

де z – поздовжня вісь волокна, у напрямі якої поширюється імпульс;

a(t) – обвідна імпульсу, що враховує амплітудну модуляцію несущої хвилі з частотою ω_0.

Кожна спектральна складова імпульсу на шляху *r* її пробігу по волокну зазнає зменшення амплітуди згідно з коефіцієнтом погонних втрат оптичної потужності та набуває погонної фазової затримки $\tau_ф(\omega) = 1/v_ф(\omega) = 1/(\omega/\beta(\omega))$ відповідно до коефіцієнта $\beta(\omega)$ фази основної моди волокна ($v_ф$ — фазова швидкість моди). Нехай дисперсійна залежність $\beta = \beta(\omega)$ припускає розклад у ряд Тейлора навколо точки ω_0 і β_1, β_2…– її похідні відповідного порядку, $v_ф = \omega_0/\beta_0$ – фазова швидкість моди, обчислені на несущій частоті ω_0. Обвідна імпульсу рухається вздовж осі *r* із груповою швидкістю $v_{гр}$ хвильового пакета

$$v_{гр} = {}^{1}/_{\beta_1} = \left[\left(\frac{d\beta(\omega)}{d\omega}\right)\right]^{-1} \tag{3.2}$$

Зміну форми та фази імпульсу можна подати в замкненій формі, якщо урахувати в розкладі дисперсійної залежності $\beta(\omega)$ лише перші три члени. Це стосується вхідного імпульсу гауссової форми з обвідною

$$a(t) = exp[-t^2(1 + ia)/(2T_0^2)],\ \int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2\, dt = \sqrt{\pi T_0} \tag{3.3}$$

де T_0 – півширина імпульсу на рівні $e^{-1/2}$ його амплітуди;

$a = const$, α – параметр привнесеної лінійної ЧМ (ЛЧМ) вхідного імпульсу.

При фіксованому z відхилення від ω_0 миттєвої частоти вздовж імпульсу

$$\Delta\omega(z,T) = d[\omega_0 t + \varphi(z,T)]/dt - \omega_0 = -T[\alpha - (1+\alpha^2)\beta_2 z/T_0^2]/T_1^2(z) \quad (3.4)$$

у часі змінюється лінійно від переднього фронту імпульсу до заднього (T < 0), а для параметра ЛЧМ та ширини імпульсу маємо [11]:

$$\alpha_1(z) = \alpha - (1+\alpha^2)\beta_2 z/T_0^2 = \pm\sqrt{\frac{(1+\alpha^2)T_1^2(z)}{T_0^2} - 1}, \quad (3.5)$$

$$T = t - z/v_{\text{гр}},\ T_1(z) = T_0\sqrt{(1-\alpha\beta_2 z/T_0^2)^2 + (\beta_2 z/T_0^2)^2}, \quad (3.6)$$

$$\sigma_t(z) = T_1(z)/\sqrt{2}$$

Тут $T = t - z/v_{\text{гр}}$ – час у системі відліку, що рухається разом з імпульсом (який зберігає гауссову форму). Групова швидкість визначається на центральній частоті ω_0; $T_1(z)$ та $\sigma_t(z)$ – півширина імпульсу на рівні $e^{1/2}$ та середньоквадратичне значення тривалості імпульсу на шляху z його пробігу у волокні; β_2 – дисперсія групових швидкостей, $\text{пс}^2/\text{к м}$

$$\beta_2 = \left(\frac{d^2\beta(\omega)}{d\omega^2}\right)_{\omega=\omega_0} = \left[\frac{d\tau(\omega)}{d\omega^2}\right]_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{v_{\text{гр}}^2}\left[\frac{d\tau(\omega)}{d\omega^2}\right]_{\omega=\omega_0}, \quad (3.7)$$

де $\tau(\omega)$= $1/v_{\text{гр}}(\omega)$, пс/км, – погонна групова затримка спектральної складової імпульсу.

Якщо зберегти у розкладі дисперсійної залежності $\beta = \beta(\omega)$ у ряд Тейлора наступний член цього ряду, то матимемо розгорнений вираз для

середньоквадратичного значення $\sigma_{\Delta t}$ зміни тривалості імпульсу з урахуванням β_3 – дисперсії 2-го порядку та ширини спектра оптичного джерела [12]:

$$\sigma_{\Delta t}^2(L) = \sigma_t(L)^2 - \sigma_{t0}^2 = D^2L^2(\sigma_\lambda^*)^2 + 2\alpha DL\sigma_{t0}\sigma_\lambda \ + L^2\left(S + \frac{2D}{\lambda_0}\right)^2(\sigma_\lambda^*)/2 =$$

$$D^2L^2(\lambda_0^2/c)^2\sigma_\lambda^{*2} + 2\alpha DL(\lambda_0^2/(4\pi c)) + L^2\left(S + \frac{2D}{\lambda_0}\right)^2(\lambda_0^2/(4\pi c))^4 + \sigma_\lambda^{*4}/2 \quad (3.8)$$

де $\sigma_t(L)$ та $\sigma_{t0} = T_0/\sigma 2^{1/2}$ - середньоквадратичне значення тривалості імпульсу на шляху L його пробігу у волокні та, відповідно, вхідного імпульсу; D, S=dD(λ)/d λ – коефіцієнт хроматичної дисперсії волокна і крутизна дисперсії на довжині λ_0 несущої хвилі ($\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega_0} = \frac{c}{v_0}$ і v_0 – частота хвилі в герцах),

$$D = -2\pi c\beta_2/\lambda_0^2 \quad (3.9)$$

які пов’язані з β_3 – дисперсією 2-го порядку, пс3/км , такою залежністю:

$$\beta_3 = \left(\frac{d\beta_2(\omega)}{d\omega}\right)_{\omega=\omega_0} = \frac{\lambda_0^4}{(2\pi c)^2}\left(S + \frac{2D}{\lambda_0}\right)$$

σ_v^* (або σ_λ^*) – середньоквадратичне значення ширини спектра вхідного імпульсу (Гц), з урахуванням його додаткової ЧМ в оптичному передавачі та ефективної ширини модуляції σ_v^* і ширини σ_v спектра оптичного джерела

$$\sigma_v^* = \sqrt{(1+\alpha^2)/(4\pi\sigma_{t0})^2 + \delta_v^2}, \quad (3.10)$$

$$\sigma_v = 1/(4\pi\sigma_{t0}), \sigma_\lambda \approx (\lambda_0^2/c)\sigma_v \quad (3.11)$$

З рівнянь (3.5) та (3.6) випливають умови для самокомпенсації дисперсії та лінійної частотної модуляції (ЛЧМ), викликаної цією дисперсією, під час

проходження оптичного імпульсу через пару волокон 1 і 2, що мають дисперсію протилежних знаків, з урахуванням ЛЧМ імпульсу на вході. Відповідно до (3.4) за умови $\alpha = 0$ та (3.7), якщо дисперсія волокна D додатна ($\beta_2 < 0$), короткохвильовим складовим спектра імпульсу відповідають більші групові швидкості порівняно з довгохвильовими. Тому після проходження імпульсу по оптичному волокну (без початкової ЛЧМ) його спектр перегруповується таким чином, що короткохвильові складові (високочастотні) переміщуються на передній фронт імпульсу, а довгохвильові — на задній. Це призводить до аномальної дисперсії імпульсу. Подальше проходження імпульсу через волокно з від'ємною дисперсією D призведе до звуження імпульсу на початковому етапі і зворотного перегрупування його спектра: довгохвильові складові перемістяться на передній фронт, а імпульс знову розшириться на подальшому шляху. Завдяки чергуванню волокон з дисперсією, що має протилежні знаки, забезпечується самокомпенсація дисперсії в волоконно-оптичних лінійних трактах (ВОЛТ).

За допомогою формул (3.5) та (3.6) було отримано вираз для закону зміни параметра ЛЧМ імпульсу $\alpha_1(z_2)$ в залежності від його проходження через волокно 2 на відстані z_2, а також розгорнутий вираз для зміни квадрата середньоквадратичного значення тривалості імпульсу на шляху z_2 в волокні 2 порівняно з його значенням на вході в волокно 1 [11].

$$\alpha_1(z_2) = \alpha - (1 + \alpha^2)(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2)/T_0^2, \tag{3.12}$$

$$\sigma_{\Delta t}^2(z_2, L_0) = \sigma_t^2(z_2) - \sigma_t^2(L_0) = (1 + \alpha^2)(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2)^2/(2T_0^2) - \alpha(\beta_{21}L_1 + \beta_{22}z_2) \tag{3.13}$$

З формули (3.14) видно, що при виконанні умови

$$\beta_{21}L_1 = -\beta_{22}L_{12} \Leftrightarrow D_{21}L_1 = -D_{22}L_{12} \tag{3.14}$$

після проходження імпульсу через пару волокон 1 і 2 відновлюється як форма імпульсу на вході в волокно 1, так і початкове значення α-параметра ЛЧМ імпульсу. Це означає, що досягається самокомпенсація дисперсії та відновлення фази імпульсу. У разі наявності ЛЧМ у вхідному імпульсі відносна зміна його тривалості (за формулою (3.13)) залежить від шляху проходження в кожному волокні нелінійно, на відміну від випадку, коли α = 0. Зазначимо, що вирази (3.12) і (3.13) отримуються з (3.5) та (3.6) шляхом формальної заміни $\beta_2 z$ на $(\beta_{21} L_1 + \beta_{22} z_2)$.

Отримані результати дозволяють здійснювати більш точні дослідження, пов'язані з розробкою ефективних методів широкосмугової пасивної компенсації дисперсії в ВОЛТ, а також з організацією дисперсійного менеджменту під час розробки дисперсійних карт (ДК) для високошвидкісних ВОСП. Управління дисперсією в лінійному тракті ВОЛЗ дає можливість підвищити пропускну здатність ВОЛТ і створювати розгалужені мережі з великою протяжністю оптичного шляху без необхідності використання спеціальних пристроїв компенсації дисперсії, які потребують додаткових оптичних підсилювачів. ДК для ВОЛТ ВОЛЗ передбачає чергування сегментів волокон з додатною та від'ємною дисперсією, обраних так, щоб значення відносних нахилів їх дисперсій (S/D) були максимально близькими в широкому діапазоні довжин хвиль (λ), а довжини й питомі дисперсії кожної пари послідовних волокон задовольняли умову (3.14) повної самокомпенсації дисперсії, забезпечуючи рівномірну компенсацію як дисперсії, так і викликаної нею ЛЧМ багатоканального сигналу.

Формули (3.5) і (3.8), що описують зміни фази та тривалості оптичного імпульсу під час його руху по волокну, є основою для розробки активних методів компенсації хроматичної дисперсії в ВОЛТ, що використовують граничні можливості системи передачі без застосування пасивних пристроїв для компенсації. Цей метод ґрунтується на використанні попередньої ЛЧМ імпульсу в оптичному передавачі. При використанні лазерів з внутрішньою модуляцією, коли амплітудна модуляція застосовується безпосередньо до

струму накачування лазера, можливе інтенсивне динамічне розширення спектра генерованого імпульсу, що супроводжується зміщенням високочастотних спектральних складових до переднього фронту імпульсу, а низькочастотних — до заднього фронту. Такі імпульси називаються імпульсами з додатним чирпом. Кількісно міра чирпування сигналу описується через α-параметр чирпу передавача, вимірюваний в радіанах.

$$\alpha = \frac{d\varphi}{dt} \Big/ \left(\frac{1}{2P}\frac{dP}{dt}\right) \tag{3.15}$$

де φ і $d\varphi/dt$ – відповідно фаза імпульсу відносно значення $\omega_0 t$ і відхилення миттєвої частоти імпульсу від його середньої частоти ω_0; P - потужність оптичного випромінення вздовж імпульсу, Вт.

При зовнішній модуляції лазерного випромінювання α-параметр частотної модуляції (ЧМ) може змінюватися в межах від -1 до +1 радіана, причому знак та абсолютна величина чирпу можуть бути регульовані. У випадку внутрішньої модуляції α може досягати значно більших значень, при цьому вони будуть лише додатними і коливатимуться в межах від 10 до 100 рад. Якщо початковий імпульс у передавачі піддається додатковій ЧМ, що призводить до зсуву спектральних складових імпульсу в часі, і цей зсув є протилежним до того, що викликається хроматичною дисперсією в конкретному волокні, то взаємодія цих ефектів може забезпечити компенсацію дисперсії, подібно до того, як це відбувається при проходженні імпульсу через послідовні ділянки волокон з дисперсією протилежних знаків.

Зазначимо, що отримана формула (3.8) дозволяє розробити узагальнену математичну модель для розрахунку обмеженої хроматичною дисперсією дистанції передавання та активного методу компенсації дисперсії у ВОЛТ. Для розробки алгоритму розрахунку використовуємо системний параметр «епсилон». Як зазначено в Рекомендації ITU-T Rec.G.957 [13], для погіршення оптичного сигналу, викликаного дисперсією, після його проходження через ВОЛТ існує верхня межа для коефіцієнта BER (коефіцієнта помилок бітів у

приймачі). Ця межа досягається, коли максимальне розширення імпульсу становить певну частину ε < 1 тактового інтервалу NRZ-імпульсу:

$$(\sigma_{\Delta t}(L))_{max} = \varepsilon/\mathrm{B},$$

де B - швидкість передавання бітів. Значення ε залежить від конкретних системних параметрів, що використовуються на практиці.

При лінійному кодуванні RZ вхідний імпульс має тривалість *f/B*, яка є певною частиною тривалості NRZ-імпульсу, де f< 1 - імпульсний коефіцієнт. Оскільки реальні імпульси відрізняються від гауссових, у інженерних розрахунках вводять параметр N. Середньоквадратичне значення тривалості вхідного імпульсу N разів вміщується в часовому проміжку робочого циклу:

$$N\sigma_{t0} = \mathrm{f/B}.$$

Наприклад, для робочого циклу *f/B* при N=4 міститься 95,4% потужності гауссового імпульсу, а при $\mathrm{N}=2\sqrt{3} \approx 3{,}46$ - вся потужність прямокутного імпульсу.

Підставивши $\sigma_{t0} = \mathrm{f}/(BN)$ і максимальне розширення імпульсу ε /B в (3.8), отримаємо співвідношення між швидкістю передачі, шириною спектра оптичного джерела та дистанцією передавання, обмежену хроматичною дисперсією. Розв'язавши це співвідношення відносно $L|D|$ (пс/нм), отримуємо узагальнену формулу для розрахунку дистанції передавання, що враховує ширину спектра δ_ν оптичного джерела, ширину смуги модуляції (опосередковано — значення $\mathrm{NB}/(4\pi f)$), додаткову ЧМ імпульсу в передавачі, формфактор N, імпульсний коефіцієнт f і системний параметр ε, якщо знехтувати дисперсією 2-го порядку.

$$L|D| = \frac{15{,}68076 \cdot 10^5 \left(\frac{\varepsilon}{B}\right)^2 (1{,}55/\lambda_0)^2}{\pm\alpha + \sqrt{\left[\delta_\nu^2 + (1+\alpha^2)(NB/(4\pi\varepsilon/B)^2 + \alpha^2\right]}} \qquad (3.16)$$

де B та δ_ν — подано в гігагерцах; значення $15{,}68076 \cdot 10^5$ — у км/(мкм^2·с); значення λ_0 — у мікрометрах.

Аналіз проведених розрахунків показав, що існує оптимальне значення параметра α чирпу імпульсу в оптичному передавачі, яке дозволяє досягти максимальної довжини лінійного тракту між передавачем і приймачем. Ефект активної компенсації дисперсії у ВОЛТ за рахунок попередньої ЧМ імпульсу може бути реалізований лише за умови, що αD < 0. Таким чином, у випадку ВОЛТ на найбільш поширеному стандартному одномодовому волокні (категорії G.652), із застосуванням оптичного передавача з прямою модуляцією оптичного джерела, де α має лише додатне значення, активна компенсація дисперсії в діапазоні довжини хвилі λ = 1,55 мкм є неможливою. Це пояснюється тим, що типове значення коефіцієнта дисперсії D для цього волокна на довжині хвилі 1,55 мкм є додатним і становить близько 17 пс/(нм·км). За таких умов, при високому значенні α, значно зменшується максимальна відстань передавання, обмежена дисперсією, порівняно з її розрахунковим значенням, коли ігнорується частотна модуляція імпульсу в передавачі. Це може призвести до значного перевищення проектних значень дистанцій, швидкості передавання та ширини спектра оптичного джерела. Наприклад, для лазера з внутрішньою модуляцією, що має на несучій хвилі 1,55 мкм ширину спектра $\Gamma_\nu \approx 6{,}0697\delta_\nu - 125$ ГГц і параметр частотної модуляції α = +10 рад, та стандартного одномодового волокна з коефіцієнтом дисперсії D≈17 пс/(нм·км), при передачі цифрового сигналу NRZ-формату зі швидкістю B = 2,5 Гбіт/с розрахункова максимальна дистанція передавання, згідно з формулою (3.16), становить L≈30,4 км (N=4, f=1, ε=0,306). Водночас, якщо не враховувати частотну модуляцію імпульсу в передавачі, розрахункова максимальна дистанція передавання може бути завищена майже в 1,4 разу.

Оптимальний вибір типу лінійного волокна та оптичного передавача, з відповідними значеннями ширини спектра оптичного джерела та параметра попередньої ЧМ вхідного імпульсу, за яких досягається максимальна довжина лінійного тракту, слід проводити на основі аналізу розрахунків, виконаних за формулою (3.16). Цей аналіз показує, що при крайніх значеннях параметра α (від +1 рад до -1 рад, при зовнішній модуляції оптичного джерела) максимальна дистанція передавання може зрости в 2-3 рази порівняно з випадком, коли α = 0. При оптимальних значеннях α (наприклад, при зовнішній модуляції) збільшення дистанції може становити приблизно 1,2-1,4 разу. Наприклад, при швидкості передавання 10 Гбіт/с (λ = 1550 нм, $\Gamma_v \approx 0$) максимальна довжина ВОЛТ, обмежена дисперсією на стандартному одномодовому волокні, становить близько 60 км. Однак, використовуючи SML-лазер з від'ємним параметром чирпу α = -0,63, можна збільшити цю дистанцію до майже 86 км.

3.2 Характеристика стратегій компенсації дисперсії

Найбільш широко використовуються три стратегії компенсації дисперсії та методи їх реалізації:

- волокно з компенсацією дисперсії (DCF);
- волокниста решітка Брегга;
- електронна компенсація дисперсії.

Ось короткий огляд цих стратегій:

Стратегія використання волокна з компенсацією дисперсії (DCF) полягає у додаванні волокна з негативною дисперсією до звичайного волокна. Це дозволяє зменшити загальну дисперсію всієї волоконної лінії, а іноді навіть звести її до нуля, що сприяє досягненню високих швидкостей, великої пропускної здатності та забезпеченню зв'язку на значні відстані.

Волокно з компенсацією дисперсії реалізує три механізми компенсації: попередню компенсацію, посткомпенсацію та компенсацію симетрії (див.

рисунок 3.1). Ця стратегія широко використовується для модернізації волокон з вікнами прозорості на довжинах хвиль 1310 нм та 1550 нм.

Волоконна решітка Брегга (FBG) є відбиваючим пристроєм, що складається з волокна з модульованим показником заломлення. Цей пристрій здатний значно зменшити ефект дисперсії в системах передачі на відстані до сотень кілометрів. Довжина хвилі, що відповідає умовам модуляції, відбивається при проходженні через волоконну решітку Брегга, тоді як інші довжини хвиль продовжують передаватися. Волоконна решітка Брегга має численні переваги: вона інтегрується з іншими пасивними волоконними пристроями, має низькі втрати та доступну вартість. Крім того, її можна використовувати не лише для компенсації дисперсії, але й як датчик, стабілізатор довжини хвилі для лазерів та вузькосмуговий WDM фільтр.

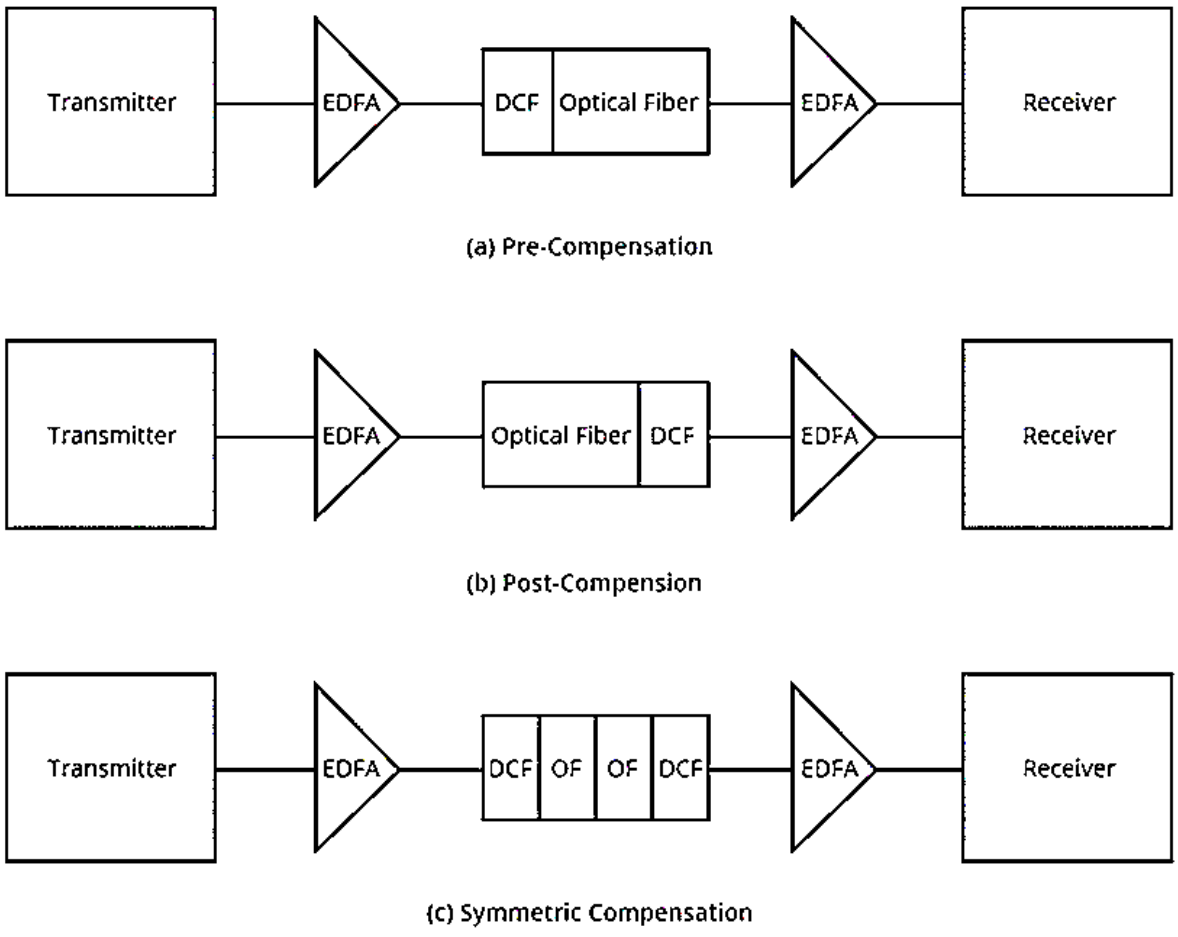


Рисунок 3.1 – Три механізми компенсації дисперсії

Електронна компенсація дисперсії (EDC) реалізується за допомогою електронної фільтрації, яка дозволяє компенсувати ослаблення сигналу в оптичних лініях зв’язку. Цей метод зазвичай використовує поперечний фільтр, вихід якого є зваженою сумою серії затриманих входів, автоматично враховуючи характеристики отриманого сигналу. Електронну компенсацію можна застосовувати як у одномодових, так і в багатомодових волоконних системах. Вона також може бути інтегрована з іншими функціями для приймачів, що працюють на швидкості до 10 Гбіт/с, знижуючи вартість передавача в одномодових системах та збільшуючи дальність передачі.

3.3 Засоби компенсації хроматичної дисперсії в одномодовому волокні

В Україні, як і в усьому світі, зростає актуальність проблеми підвищення швидкості передачі інформації по волоконно-оптичних лініях зв’язку (ВОЛЗ). Це пов'язано зі стрімким розвитком Інтернету, який тепер використовується не лише для передачі даних, а й для телефонних розмов, зображень, MPEG-аудіо та відео (наприклад, IP-телефонії, мультимедіа та відеоконференцій). Окрім того, розвивається цифрове телебачення, що вимагає швидкості передачі близько 10 Мбіт/с на один телевізійний канал.

Для підвищення швидкості передачі інформації розробляються нові технології, такі як солітонні лінії зв’язку та мультиплексування за довжиною хвилі (WDM). Для цього створено оптичне волокно з ненульовою дисперсією (NZDSF), що відповідає рекомендаціям Міжнародного Союзу Електрозв’язку (G655). Однак ці рішення потребують значних інвестицій у будівництво нових високошвидкісних ліній зв’язку. Водночас у світі вже прокладено десятки мільйонів кілометрів стандартного одномодового волокна (SF), яке потенційно може передавати сигнали на швидкостях до кількох терабіт на секунду. Проте наразі немає електронних компонентів, здатних формувати такі високочастотні сигнали, а також відповідних модуляторів для їх промодуляції, що ускладнює

використання часового мультиплексування (TDM) для передачі зі швидкістю близько 100 Гбіт/с.

Існуючі системи передачі здатні працювати зі швидкостями до 10 Гбіт/с, і на цих швидкостях критично важливою стає проблема дисперсії сигналів у ВОЛЗ. Це особливо помітно в третьому вікні прозорості (1,55 мкм), де довжина регенераційних або підсилювальних ділянок становить близько 100 км. Діапазон довжини хвиль у 1,55 мкм має переваги через низьке загасання та наявність підсилювачів на волокнах, легованих ербієм (EFDA), які працюють у цьому діапазоні. При використанні EFDA сигнал підсилюється без корекції спотвореної дисперсією форми, тому важливо зменшити дисперсію в лінійному тракті до мінімуму. Для стандартного SF-волокна дисперсія в діапазоні 1,55 мкм є досить значною — від 15 до 20 пс/(км·нм). Проте за допомогою пристроїв компенсації дисперсії (ПКД) можна суттєво підвищити швидкість передачі сигналів і використовувати EFDA та технологію WDM, якщо ПКД мають відповідні характеристики.

3.3.1 Характеристики компенсаторів дисперсії

Для компенсації дисперсії зазвичай використовуються пасивні оптичні компоненти, хоча також є пропозиції щодо застосування активних пристроїв, таких як "чірповані" оптичні передавачі. Крім того, при створенні повністю оптичних мереж зв’язку потрібні динамічні компенсатори дисперсії, які можуть адаптуватися до змін у дисперсії.

Існує кілька типів пристроїв, здатних компенсувати дисперсію в лінійних трактах ВОЛЗ:

- Волоконні компенсатори дисперсії (DCF), які базуються на волокні зі складним профілем показника заломлення для досягнення необхідних дисперсійних властивостей.
- Волоконні Брегівські решітки (FBG) — дифракційні решітки зі змінним періодом, відомі також як "чірповані" решітки.

- Планарні хвилеводні контури, які мають резонансні властивості і викликають зсув фази різних спектральних компонентів.
- Пристрої, що базуються на перетворенні хвилевого фронту.

Найактивніші дослідження у сфері виготовлення та практичного застосування ПКД проводяться для волоконних компенсаторів та "чірпованих" волоконних решіток, зокрема у Саутгемптонському університеті, а також в компаніях Bell Labs, Sumitomo, Corning, Photonics та інших.

Основні характеристики компенсаторів дисперсії:

- значення дисперсії для діапазону довжин хвиль вікна прозорості 1.55 мкм, $\sigma_{\text{кд}}(\lambda)$ [пс/нм];
- повні внесені втрати модуля компенсації дисперсії, $\alpha_{\text{мкд}}(\lambda)$ [дБ];
- власні втрати ПКД $\alpha_{\text{пкд}}(\lambda)$ [дБ] (для DCF це величина $\alpha_{\text{в}} \cdot L_{\text{кд}}$, а для FBG – мінус $10lg(1 - R(\lambda))$, де R - коефіцієнт відбиття);
- коефіцієнт ефективності $K_{\text{еф}} = \frac{|\sigma_{\text{кд}}|}{\alpha_{\text{мкд}}}$ [пс/(нм·дБ)];
- робоча смуга довжин хвиль;
- поляризаційна модова дисперсія PMD [пс].

3.3.2 Волоконні компенсатори дисперсії

DCF є сегментом оптичного волокна зі складним профілем показника заломлення. Правильний вибір цього профілю забезпечує необхідні дисперсійні властивості та мінімізує загасання. Порівняно з іншими типами компенсаторів дисперсії, DCF має кілька переваг:

- Легкість інтеграції з волокном лінійного тракту.
- Висока надійність.
- Широка смуга робочих довжин хвиль.

Ця остання перевага дозволяє використовувати DCF у системах з WDM. Проте важливо контролювати нелінійні ефекти, які можуть виникати в DCF через високу щільність потужності. Висока щільність потужності зумовлена малим діаметром серцевини компенсуючого волокна та значною світловою

потужністю, що виникає внаслідок мультиплексування окремих оптичних потоків в єдиний.

Оскільки хроматична дисперсія накопичується зі збільшенням довжини волокна з коефіцієнтом $D(\lambda_s)$, де λ_s – центральна довжина хвилі джерела, її можна компенсувати, приєднавши сегмент компенсуючого волокна з питомою хроматичною дисперсією $D_{DCF}(\lambda_s)$ [пс/(нм•км)], яка має протилежний знак до $D(\lambda_s)$ в SF-волокні. Компенсуюча дисперсія DCF визначається як $\sigma_{\text{кд}}(\lambda_s) = D_{DCF}(\lambda_s) \cdot L_{DCF}$, пс/нм. Після проходження імпульсу через довжину L SF-волокна та довжину L_{DCF} компенсуючого волокна ($L_{DCF} \ll L$) середньоквадратичне розширення імпульсу буде мати значення.

$$\sigma(\lambda_s) = \sigma_s \left(L \cdot D(\lambda_s) + \sigma_{\text{кд}}(\lambda_s) \right), \text{ пс} \qquad (3.17)$$

де $\varepsilon D_{c\varepsilon} \gg D$.

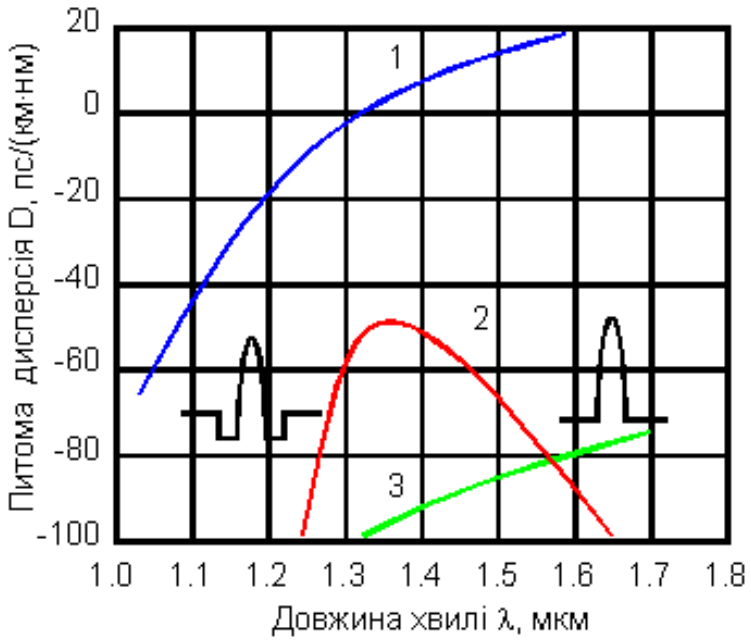


Рисунок 3.2 - Залежність хроматичної дисперсії стандартного одномодового волокна (1) та DCF – волокна для різних профілів показника заломлення (2, 3) від довжини хвилі

При передачі мультиплексного WDM сигналу через SF-волокно в прозорому вікні 1,55 мкм важливо правильно вибрати профіль показника заломлення DCF у поперечному перерізі волокна, а також матеріали серцевини, оболонки та радіус серцевини. Це забезпечить рівномірну компенсацію накопиченої дисперсії SF-волокна в діапазоні довжин хвиль 1530 нм < λ < 1560 нм. При цьому значення D_{DCF} і кут нахилу кривої $D_{DCF}(\lambda)$ повинні відповідати певним співвідношенням у цьому вікні. Методику розрахунку хроматичної дисперсії для волокон з будь-яким профілем показника заломлення можна знайти в монографії [10]. На рис. 3.2 представлена спектральна залежність питомої хроматичної дисперсії для SF-волокна (крива 1) та для волокон, що компенсують дисперсію при використанні SF-волокна з одним каналом (крива 2) і з WDM-сигналом (крива 3). Також наведені відповідні профілі показника заломлення для DCF.

Для компенсації дисперсії можна використовувати LP11-моду, що дозволяє досягти значної величини внесеної дисперсії (приблизно 350 пс/(км•нм)), при цьому остаточна дисперсія в компенсаційному тракті не перевищує 0,5 пс/(км•нм) [11]. Діаметр серцевини волокна DCF становить 6 мкм, а відносна різниця показників заломлення між серцевиною та оболонкою Δ дорівнює 2%.

При використанні DCF, що працює на LP_{11}-моді, необхідно застосовувати конвертори мод. Схема модуля для компенсації дисперсії на LP_{11}-моді зображена на рис. 3.3.

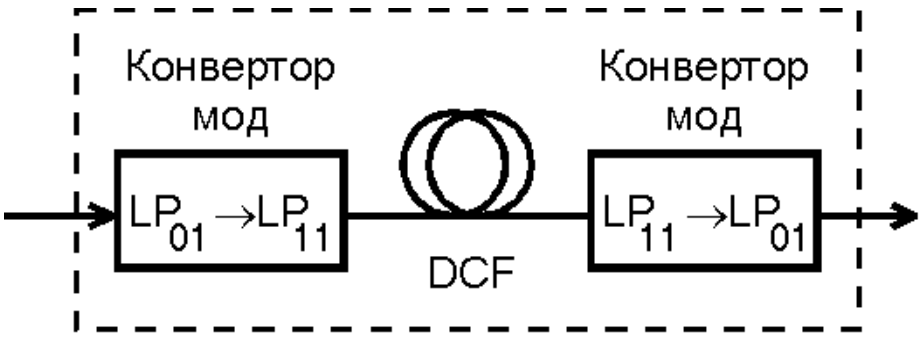


Рисунок 3.3 - Структурна схема модуля ПКД, який працює на LP_{11}-моді

Цей підхід до компенсації дисперсії має деякі труднощі в практичній реалізації конвертора мод, проте він має кілька переваг у порівнянні зі звичайним DCF:

- Широка спектральна смуга робочої довжини хвилі — до 100 нм.
- Низький рівень шумових завад, викликаних нелінійними факторами, завдяки більшій ефективній площі оптичного випромінювання.
- Менші оптичні втрати завдяки коротшому компенсуючому волокну.
- Узгодженість питомої дисперсії D_{DCF} з нахилом кривої спектральної залежності $D_{DCF}(\lambda)$.

Конструктивно пристрій компенсатора на основі DCF виконаний у вигляді котушки з волокном, яка розміщується в герметичному боксі. Два відрізки SF-волокна зварюються до кінців цього волокна.

3.3.3 Компенсатори дисперсії на Брегівських решітках

Компенсатор дисперсії на основі чірпованої Брегівської решітки (FBG) конструктивно являє собою короткий сегмент волокна, в якому всередині періодичної зміни показника заломлення серцевини утворена аперіодична решітка. Зміна кроку решітки здійснюється за лінійним законом.

Серед переваг FBG можна виділити:

- Легке з’єднання з волокном лінійного тракту.
- Простота конструкції.
- Висока надійність.
- Можливість регулювання дисперсії за допомогою механічних або температурних впливів.
- Спосібність забезпечувати значну дисперсію в обмеженому діапазоні довжин хвиль.

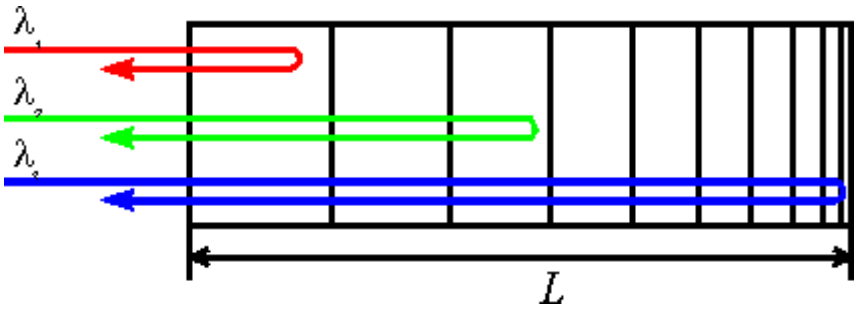


Рисунок 3.4 – Принцип дії чирпованої Брегівської решітки ($\lambda_3 < \lambda_2 < \lambda_1$)

Принцип дії FBG з лінійною зміною кроку ілюструється на рисунку 3.4. У цій періодичній структурі моди, що поширюються вздовж осі z, взаємодіють між собою. Енергія моди, яка рухається вперед, перетворюється в енергію моди, що рухається у зворотному напрямку. Це відбувається, коли для довжини хвилі, що поширюється, виконується умова Брега:

$$\lambda_b = 2n_{\text{еф}}\Lambda(z), \tag{3.18}$$

де $n_{еф}$ — ефективний показник заломлення, а $\Lambda(z)$ — період дифракційної решітки, що залежить від координати z. Таким чином, умова Брега змінюється вздовж довжини решітки. Чим довша решітка, тим ширший діапазон хвиль відповідає умові Брега. Для аналізу фізичних процесів у FBG та розрахунку її параметрів застосовують модель зв'язаних мод [12].

Значення дисперсії, яку вносить FBG у вікні прозорості 1,55 мкм, можна приблизно розрахувати за формулою [12]:

$$\sigma_{\text{кд}}(\lambda) = 2n_{\text{еф}} {L_{\text{р}}}\Big/{(c\Delta\lambda)}, \tag{3.19}$$

де c - швидкість світла у вакуумі, $L_{\text{р}}$ - довжина решітки, а $\Delta\lambda$ - ширина смуги пропускання решітки.

Серійно виготовлені довжини FBG можуть досягати 2 метрів і більше. Водночас розробляються решітки з шириною робочої смуги 10 нм, компенсуючою дисперсією 1360 пс/нм та відносно низьким загасанням 0,5 дБ [12].

FBG працює в режимі відбиття і підключається до лінійного тракту через циркулятор (направлений відгалужувач), що забезпечує мінімальні втрати при підключенні решітки до лінійного тракту на рівні 6 дБ.

3.3.4 Динамічні компенсатори дисперсії

Динамічні компенсатори дисперсії стають необхідними, коли під час роботи системи можливі зміни довжини лінійного тракту. Це особливо актуально для повністю оптичних мереж, де можуть комутуватися ділянки окремих оптичних трактів з різними значеннями дисперсії або з змінними дисперсійними властивостями, які виникають під впливом температури, часу, потужного світлового потоку у WDM-системах та іонізуючого випромінювання.

Один зі способів створення динамічного компенсатора дисперсії полягає в механічному поєднанні п’єзоелемента з відрізком оптичного волокна або планарною хвилеводною структурою, де сформована Брегівська решітка. Зміна кроку решітки може бути як лінійною, так і нелінійною. Запропонований у [13] динамічний компенсатор здатен регулювати дисперсію в межах від 300 до 1000 пс/нм, використовуючи пристрій для автоматичного контролю вносимої дисперсії. Залежність дисперсії від напруги, поданої на п’єзоелемент, є лінійною.

3.4 Компенсація дисперсії за допомогою оптичного та електричного оброблення сигналів

Основним типом дисперсії в одномодових волоконно-оптичних лініях зв’язку (ВОЛЗ) є хроматична дисперсія, яка визначається як сума хвилеводної та матеріальної дисперсій. Серед оптичних методів корекції дисперсійних характеристик ВОЛТ, що ґрунтуються на використанні Брегівських решіток, оптичного волокна з від’ємною дисперсією (DCF або RDF) та нелінійно-оптичних пристроїв, найпоширенішим є застосування компенсуючого

оптичного волокна з від'ємною хроматичною дисперсією, що суттєво перевищує хроматичну дисперсію одномодового телекомунікаційного волокна. Від'ємна дисперсія зазвичай досягається шляхом зменшення діаметра серцевини, що, в свою чергу, призводить до підвищення загасання сигналу та збільшення втрат на згинах. Для ВОЛТ довжиною 300 км необхідно близько 50 км волокна з компенсацією дисперсії, що призводить до додаткових втрат потужності близько 18 дБ. Цей метод не дозволяє здійснювати динамічні зміни в системі, що обмежує його застосування.

Для подолання цих проблем рекомендується використовувати методи електронної компенсації дисперсії (ЕКД), які можуть бути реалізовані в оптичних передавачах і приймачах. Основною перевагою цих методів є те, що вони не вимагають забезпечення вузькосмуговості сигналу.

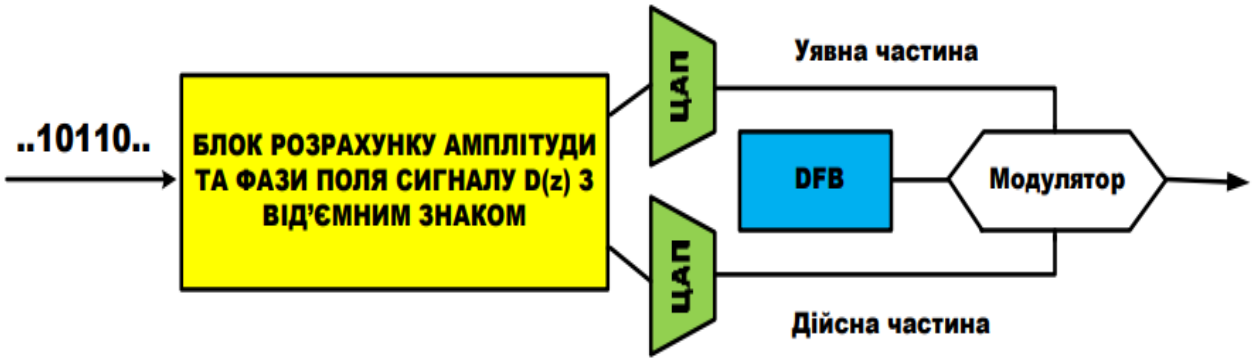


Рисунок 3.8 – Принцип роботи ЕКД у передавачі ВОСП

Електронна компенсація дисперсії в передавачі, як ілюструється рисунком 3.8, складається з кількох етапів. Спочатку розраховуються амплітуда та фаза сигналу, що проходить через волокно на відстані, відповідній довжині ВОЛТ, з урахуванням від'ємного значення дисперсії – D(z). Отриманий сигнал перетворюється в аналоговий за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Сформований сигнал (реальна та уявна частини) подається на модулятор, який компенсує вплив дисперсії. Використання електронної компенсації в цьому випадку дозволяє обійтись без модулів DCM, спрощуючи конструкцію оптичного підсилювача та дозволяючи змінювати конфігурацію мережі в режимі реального часу.

Електронна компенсація дисперсії в оптичному приймачі базується на обробці цифрового сигналу в системах адаптивного прийому. Зокрема, використовується метод послідовної оцінки за критерієм максимальної правдоподібності (MLSE). У цьому випадку детектор оцифровує прийнятий сигнал і обробляє його за алгоритмом MLSE, розпізнаючи бітову послідовність з певною ймовірністю, замість формування цифрової послідовності через компаратор.

Таким чином, оптичні методи компенсації дозволяють уникнути ускладнень у станційному обладнанні ВОЛЗ, інтегруючи компенсуючі пристрої безпосередньо в систему. Проте ці методи є дорожчими і можуть погіршити енергетичні характеристики системи. Натомість електронна компенсація не має цих недоліків і забезпечує динамічне управління параметрами системи, не ускладнюючи структуру лінійного тракту.

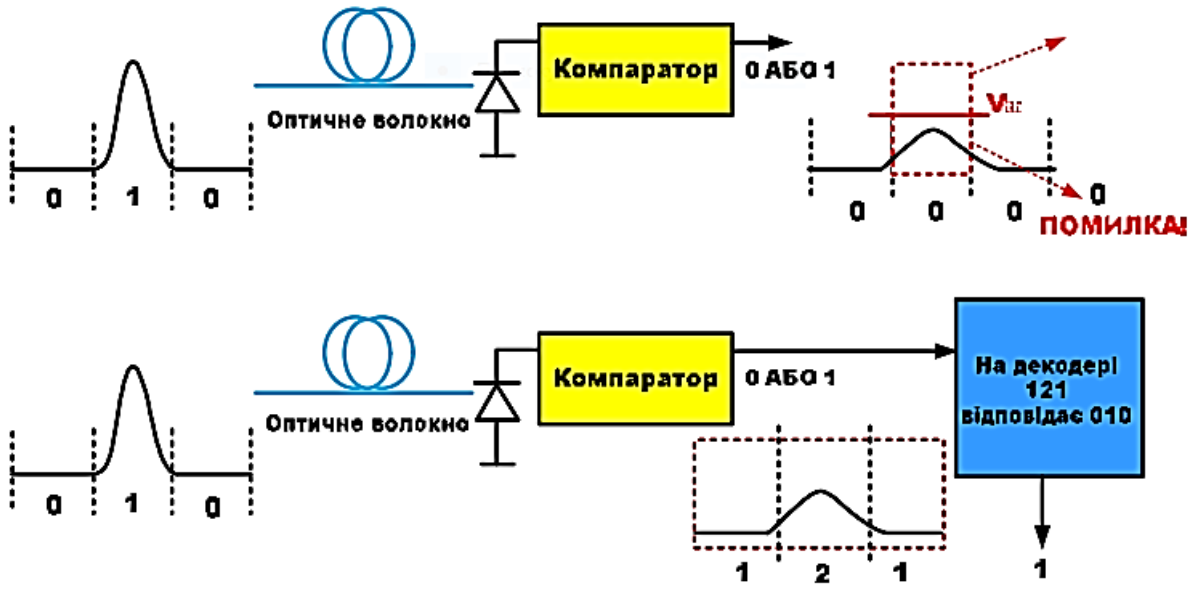


Рисунок 3.9 – Принцип роботи ЕКД у приймачі ВОСП

3.5 Висновки до розділу

Відповідно до розробленого узагальненого алгоритму для розрахунку дистанцій передачі з обмеженою хроматичною дисперсією, запропоновано способи створення моделей ВОЛТ з підвищеною пропускною здатністю.

Застосування отриманих результатів допоможе фахівцям краще зрозуміти реальні процеси, що відбуваються під час експлуатації ВОЛЗ, і сприятиме підвищенню пропускної здатності як нових, так і існуючих високошвидкісних ліній зв’язку.

Досліджено, що на магістральних лініях зв’язку основним обмежуючим фактором для подальшого зростання швидкості передачі є дисперсія сигналу, яка викликає міжсимвольну інтерференцію. У цьому контексті розглянуто різні методи та пристрої для компенсації дисперсії.

Розроблені технології компенсації дисперсії застосовуються в мережах на основі SF-волокна. Використання Брегівських решіток (FBG) переважно в одноканальних системах, оскільки вони можуть забезпечувати значні значення компенсуючої дисперсії (понад 10 000 пс/нм) в дуже вузькому діапазоні (~0.1 нм) довжин хвиль. Натомість волокна з від’ємною дисперсією (DCF) виявляються більш ефективними в багатоканальних WDM-системах через їх здатність працювати в широкому діапазоні довжин хвиль. Перехід на повністю оптичні мережі вимагатиме впровадження динамічних компенсаторів дисперсії та волоконних компенсаторів, що працюють на модах вищого порядку.

Проведено порівняльний аналіз електронних та оптичних методів компенсації дисперсії у ВОЛЗ, визначено їх основні переваги та недоліки. Виявлено, що оптичні методи дозволяють уникнути ускладнень у станційному обладнанні завдяки інтеграції компенсуючих пристроїв безпосередньо в систему, але вони є дорожчими і можуть погіршити енергетичні характеристики. Натомість електронні методи не мають цих недоліків і забезпечують динамічне управління параметрами системи, не ускладнюючи структуру лінійного тракту.

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ WDM

4.1 Структура ОЛТ ВОСП з WDM

Структурна схема системи з WDM для одного напрямку передачі представлена на рисунку 4.1 [5].

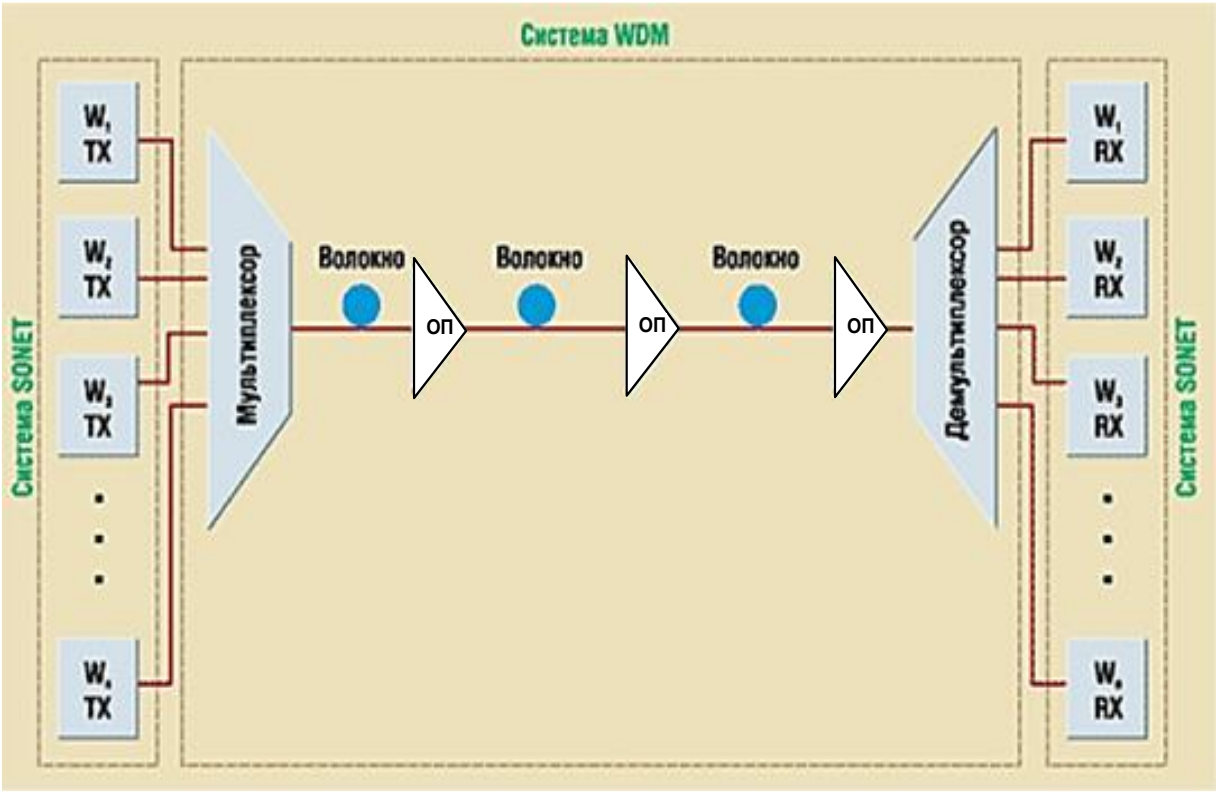


Рисунок 4.1 – Структурна схема ВОСП з WDM

Вхідні потоки даних, представлені кодованими цифровими імпульсними послідовностями, модулюються за допомогою оптичних модуляторів M_i на оптичні несущі з довжинами хвиль λ_i. Після цього ці сигнали мультиплексуються (об’єднуються) за допомогою мультиплексора WDM MUX в єдиний агрегатний потік. Після підсилення потужності сигнал вводиться в оптичне волокно (ОВ). На приймальному кінці потік, що виходить з ОВ, підсилюється попереднім підсилювачем (ПУ), демультиплексується (розділяється на складові потоки з модуляцією несучих λ_i) і детектується за

допомогою детекторів $Д_i$. Для зменшення перехідних завад і підвищення завадостійкості детектування перед детекторами можуть використовуватися смугові фільтри $Ф_i$. Демодулятори $ДМ_i$ формують вихідні кодові цифрові імпульсні послідовності. Крім підсилювачів потужності та попередніх підсилювачів, у системі також можуть використовуватися лінійні підсилювачі (ЛП).

Хвильове мультиплексування спочатку призначалося для об’єднання двох основних несущих, 1310 нм і 1550 нм (2-ге і 3-тє вікна прозорості), в одному оптоволокні, що дозволило подвоїти ємність системи. Такі системи називаються широкосмуговими WDM (з рознесенням за довжиною хвилі 240 нм), на відміну від вузькосмугових WDM, де рознесення складає 24-12 нм. У вузькосмуговій системі WDM можливо розмістити 4 канали в 3-му вікні (1550 нм). Однак це розділення виглядає недостатньо коректним, оскільки у "широкосмугових" WDM спектр не перекривається, а складається з двох ізольованих смуг. Це питання було вирішене в стандарті ITU-T Rec. G.692.

У основі проекту стандарту лежить канальний (частотний) план з рівномірним розташуванням несущих частот каналів з мінімальним рознесенням (кроком) у 100 ГГц. При цьому кроці можна розмістити до 51 каналу з відповідними значеннями несущих частот.

Схема розширеного канального плану стала основою для класифікації WDM на грубі (CWDM), щільні (DWDM) та надщільні (HDWDM) системи, про які вже йшлося раніше. Хоча чітких меж між цими типами WDM поки не встановлено, дотримуються такого критерію: системи CWDM мають частотне рознесення 200 ГГц і дозволяють мультиплексувати до 16 каналів, тоді як системи DWDM мають рознесення не менше 100 ГГц і дозволяють мультиплексувати до 64 каналів.

4.2 Вибір джерела випромінювання та фотоприймача

WDM використовується для об'єднання кількох потоків даних, що передаються на різних довжинах хвиль, в один оптичний сигнал. У системах оптичного зв'язку зазвичай застосовуються лазерні діоди як джерела випромінювання та фотодіоди для прийому. Важливо правильно вибрати джерела та приймачі, які працюють на різних довжинах хвиль. Наприклад, у двоканальній WDM-системі можна використовувати два різних лазерні діоди, кожен з яких випромінює на своїй довжині хвилі, а також відповідні фотодіоди для прийому сигналів.

Зазвичай джерела випромінювання та приймачі обираються так, щоб зменшити перекриття спектрів і максимізувати пропускну здатність системи. Це також допомагає мінімізувати вплив крос-модуляції та міжмодових завад.

У системах оптичного зв'язку з WDM існує кілька типів джерел випромінювання, які підходять для цієї технології:

1. Лазерні діоди (LD) – одні з найпоширеніших джерел випромінювання в оптичному зв'язку, характеризуються високою потужністю та вузькою спектральною лінією, що робить їх ідеальними для WDM.
2. Fabry-Perot лазери – напівпровідникові лазери, які також використовуються в оптичному зв'язку. Вони забезпечують вузьку спектральну ширину та високу потужність випромінювання.
3. DFB (Distributed Feedback) лазери – ці лазери забезпечують стабільне випромінювання на певній довжині хвилі завдяки гратчастим елементам, розподіленим уздовж активної області. DFB-лазери широко використовуються в системах WDM.
4. VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) – тип лазерів, що випромінює світло вертикально з поверхні напівпровідникового чіпа. Вони забезпечують високу продуктивність при низьких витратах і можуть бути ефективно використані в WDM-системах.

5. Надлюмінесцентні діоди (SLD) – ці джерела мають ширший спектр випромінювання, ніж лазерні діоди, що може бути корисним у певних застосуваннях WDM.

Для оптичних систем зв'язку, що використовують WDM, застосовуються різні типи приймачів оптичного сигналу, які працюють на основі різних оптико-електричних перетворювачів [11].

Фотодіоди (PD) – це найпоширеніший тип приймачів в оптичних системах зв'язку. Вони перетворюють оптичний сигнал на електричний і зазвичай використовуються разом із лазерними діодами.

Фотоприймачі з підсиленням (APD) – ці приймачі забезпечують підсилення електричного сигналу, що підвищує чутливість системи зв'язку. Вони особливо корисні для систем з великою дальністю передачі або в умовах низького рівня сигналу.

Фотодетектори з інтегрованим підсиленням (IDP) – ці пристрої поєднують функції фотодіода та підсилювача в одному модулі, характеризуючись високою чутливістю та широким динамічним діапазоном.

Приймачі з інтегрованим підсиленням та конверсією (ICR) – ці приймачі перетворюють оптичний сигнал безпосередньо в цифровий формат, що зменшує необхідність у зовнішніх пристроях для обробки сигналу.

Оптичні ресивери з обмеженим полем зору (FOV) – ці приймачі здатні реєструвати оптичні сигнали з обмеженої області простору, що може бути корисним в мережах з багатьма розподіленими джерелами.

Вибір конкретного типу джерела та приймача залежить від вимог до продуктивності, бюджету та інших факторів системи зв'язку. При аналізі джерел випромінювання та приймачів оптичних сигналів для максимальної швидкості передачі важливо враховувати кілька ключових параметрів, таких як пропускна здатність, ширина спектральної лінії та швидкість модуляції.

Для досягнення максимальної швидкості передачі даних в оптичній системі необхідне поєднання високошвидкісних джерел випромінювання та приймачів разом з відповідною електронікою та обробкою сигналів.

На вибір типу джерела випромінювання в оптичній системі також впливають очікувані рівні дисперсії в оптичному волокні, яка може бути зумовлена різними фізичними явищами, такими як модальна дисперсія, хроматична дисперсія та дисперсія поляризації. Відповідно, різні типи джерел випромінювання можуть бути більш ефективними в залежності від характеру дисперсії.

Дисперсія хроматичного запізнення (CD) виникає через різну швидкість поширення світла різних довжин хвиль в оптичному волокні. Лазерні діоди з вузькою спектральною лінією або DFB лазери, які забезпечують малу ширину спектру, можуть бути більш ефективними для зменшення впливу цього типу дисперсії.

Дисперсія модального запізнення (MD) пов'язана з різними часами поширення світла в різних модах волокна. Спектральна ширина джерела випромінювання впливає на цей тип дисперсії. Використання лазерних діодів та VCSEL з вузькою спектральною шириною може допомогти знизити негативний вплив модальної дисперсії.

Дисперсія поляризації вимагає застосування компенсаційних методів, таких як компенсаційні волокна або спеціальні оптичні модулі. Джерело випромінювання впливає на поляризацію світла, тому важливо обрати таке джерело, яке забезпечує стабільність поляризації або легко компенсується.

Загалом, для зменшення впливу дисперсії в оптичному волокні важливо вибирати джерела випромінювання з вузькою спектральною шириною та стабільною поляризацією. Лазерні діоди і DFB лазери часто є оптимальним вибором завдяки їх здатності до контрольованої генерації світла.

Крім джерела випромінювання та приймача, важливим є також вибір матеріалу для оптичного волокна. Світловод складається з концентричних шарів, основними з яких є серцевина і оболонка. Для ефективного проходження оптичного променю через волокно, показники заломлення серцевини та оболонки повинні мати певні співвідношення.

4.3 Розрахунок параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчатим профілем показника заломлення

Маємо багатомодове оптичне волокно з кварцовою серцевиною з показником заломлення $n_1 = 1{,}4469$ на довжині хвилі 1550 нм, а оболонку – з кварцу з домішками барію (86,5 % SiO_2 + 13,5 % B_2O_3). Показник заломлення оболонки $n_2 = 1{,}4454$.

Ефективність введення променів у серцевину оптичного волокна зазвичай пов'язують з числовою апертурою. Числова апертура залежить від значень показників заломлення – серцевини і оболонки. Чим більша різниця між ними, тим вище ефективність введення і більше променів поширюється у серцевині волокна. Якби не було світловідбиваючої оболонки (серцевина в повітрі), то мала б місце найбільша ефективність. Тоді всі промені, що впали на торець волокна, будуть поширюватися в ньому – ефективність введення становить 100% [10, 11].

Числова апертура.

Маємо $n_1 = 1{,}4469,\ n_2 = 1{,}4454$. Тоді

$$NA = n_0 \cdot sin\alpha_{\text{кр}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \tag{4.1}$$

$$NA = \sqrt{1{,}4469^2 - 1{,}4454^2} = 0{,}0662.$$

Від числової апертури залежить значення критичного кута падіння променю. Як видно з формули (4.1), він становить $\alpha_{\text{кр}} = 3{,}8^0$.

При відсутності оболонки (волокно у повітрі, тобто $n_2 = 1$)

$$NA = \sqrt{1{,}4469^2 - 1^2} = 1{,}046,$$

отже, усі промені поширюються у волокні.

Міжмодова багатопроменева дисперсія.

Якщо має місце різниця часу поширення осьового та граничного променів у серцевині волокна (найшвидшого і найповільнішого), то виникає так звана багатопроменева часова дисперсія. Промені на виході волокна розходяться у часі, що є наслідком різної довжини пройденого шляху. Це впливає на тривалість оптичного сигналу, причому із збільшенням довжини волокна ця тривалість збільшується. Наслідком цього є міжсимвольна інтерференція, що спричиняє обмеження швидкості передачі інформації.

Конкретне значення дисперсії залежить від оптичних властивостей серцевини та світловідбиваючої оболонки. Дисперсія зростає, якщо різниця в показниках заломлення помітніша. Найбільше значення дисперсії спостерігається тоді, коли світловод не має світловідбивної оболонки. Найменша різниця показників заломлення є обмежувальним фактором чутливості волокна до макро і мікро вигинів. Тоді на границі «серцевина – оболонка» змінюється кут повного внутрішнього відбиття і промені світла покидають серцевину. Тобто, якщо різниця показників заломлення найменша, прокладка кабелю повинна виключати макровигини.

Визначимо для волокна без оболонки багатопроменеву часову дисперсію. Вона нормується на довжину лінії 1 км, її розмірність тривалість/км [11].

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{n_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \qquad (4.2)$$

Для $c = 3 \cdot 10^8$ м/с $\frac{\Delta t}{L} = \frac{1{,}4469}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{1{,}4469 - 1}{1} = 2{,}148 \cdot 10^{-9} = 2148$ нс/км.

При наявній світловідбивній оболонці для оптичного волокна з ($n_2 = 1{,}4454$) багатопроменева часова дисперсія становитиме (4.2):

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1{,}4469}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{1{,}4469 - 1{,}4454}{1{,}4454} = 5 \cdot 10^{-12} = 5 \text{ нс/км}.$$

При відсутності світловідбивної оболонки пропускна здатність волокна:

$$B \cdot L = \Delta f \cdot L = \frac{L}{\Delta t}. \quad (4.3)$$

$$B \cdot L = \frac{1}{2{,}148 \cdot 10^{-9}} = 0{,}466 \cdot 10^{9} = 0{,}466 \text{ МГц·км.}$$

$$L = \frac{0{,}466}{155} = 0{,}003 \text{ км.}$$

Пропускна здатність волокна при наявності оболонки ($n_2 = 1{,}4454$):

$$B \cdot L = \frac{1}{5 \cdot 10^{-12}} = 0{,}2 \cdot 10^{12} = 200 \text{ МГц·км.}$$

$$L = \frac{200}{155} = 1{,}29 \text{ км.}$$

Отже, оптичні підсилювачі за умови використання волокна зі ступінчатим профілем заломлення повинні розташовуватися через кожні 1,29 км.

Номінальна частота.

Номінальна частота визначається за формулою:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4.4)$$

$$V = \frac{50\pi}{1{,}55} \cdot 0{,}0662 = 6{,}705.$$

Кількість мод:

$$M = \frac{V^2}{4}. \quad (4.5)$$

$$M = \frac{6{,}705^2}{4} = 11.$$

4.4 Розрахунок параметрів багатомодового градієнтного волокна

Градієнтне волокно характеризується показником заломлення серцевини, який змінюється в радіальному напрямку від осі за певним законом. Траєкторія променів у такому світловоді не така, як у ступінчатого волокна, а має форму, що наближається до синусоїди. Змінюючи закон зміни показників заломлення в

серцевині можна керувати траєкторіями руху променів. Зокрема, для меридіональних променів можна досягти просторового фокусування.

Нехай робоча довжина хвилі становить 1550 нм. Вибираємо серцевину з показником заломлення $n_1 = 1{,}4619$, а світловідбивну оболонку – з показником заломлення $n_2 = 1{,}4469$.

Розрахунок числової апертури.

Визначимо максимальне значення числової апертури. За визначенням воно відповідає осьовому збігу джерела оптичного випромінювання та серцевини волокна [12].

$$NA_{max} = n_{\text{ср}} sin\alpha_{\text{кр}} = \sqrt{n_{\text{ос}}^2 - n(a)^2}\,. \tag{4.6}$$

$$NA_{max} = \sqrt{1{,}4619^2 - 1{,}4469^2} = 0{,}21.$$

Значення числової апертури вказується у паспорті на волокно. Згідно зі стандартом IEC G.651 воно лежить у межах 0,2 – 0,23.

Розрахунок багатопроменевої міжмодової дисперсії. Цей параметр визначається за формулою:

$$\frac{\Delta t}{L} = \left(\frac{t}{L}\right)_{\text{ос}} - \left(\frac{t}{L}\right)_{\text{мер}} = \frac{n_{\text{ос}}}{c} \cdot \frac{\alpha - 2}{\alpha + 2} \cdot \Delta. \tag{4.7}$$

де Δ - повна відносна різниця показників заломлення

$$\Delta = \frac{n_{\text{ос}}^2 - n(a)^2}{2 \cdot n_{\text{ос}}^2}. \tag{4.8}$$

$$\Delta = \frac{1{,}4619^2 - 1{,}4469^2}{2 \cdot 1{,}4619^2} = 0{,}01 = 1\%.$$

Якщо $\alpha = 2$, то міжмодова дисперсія становитиме:

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{n_{\text{ос}}}{c} \cdot \frac{\Delta^2}{2}. \quad (4.9)$$

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1{,}4619}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{0{,}01^2}{2} = 2{,}43 \cdot 10^{-13} = 0{,}243 \text{нс/км}.$$

$$B \cdot L = \frac{1}{2{,}43 \cdot 10^{-13}} = 0{,}41 \cdot 10^{13} = 4{,}1 \text{ ГГц·км}.$$

$$L = \frac{4{,}1 \cdot 10^3}{155} = 26{,}45 \text{ км}.$$

Значення багатомодової дисперсії є найменшим при оптимальному профілі показника заломлення [10-12], хоча у загальному воно залежить від показників заломлення (4.7):

$$\alpha_{\text{опт}} = 2(1 - \Delta). \quad (4.10)$$

$$\alpha_{\text{опт}} = 2(1 - 0{,}01) = 1{,}98.$$

Якщо $\alpha = \alpha_{\text{опт}}$, то міжмодова дисперсія становитиме:

$$\frac{\Delta t}{L} = \frac{1{,}4619}{3 \cdot 10^8} \cdot \frac{1{,}98-2}{1{,}98+2} \cdot 0{,}01 = 2{,}449 \cdot 10^{-13} = 0{,}2449 \text{ нс/км}.$$

$$B \cdot L = \frac{1}{2{,}449 \cdot 10^{-13}} = 0{,}408 \cdot 10^{13} = 4{,}08 \text{ ГГц·км}.$$

$$L = \frac{4{,}08 \cdot 10^3}{155} = 26{,}32 \text{ км}.$$

Аналіз результатів розрахунку показує, що за умови відхилення показника α від значення 2, узгодження між часом проходження меридіальних і косих променів погіршується і часова дисперсія зростає.

Джерела оптичного випромінювання не вважаються монохроматичними. Потужність їх випромінення зосереджена в певному хвильовому діапазоні (має певний спектр). А оскільки показник заломлення залежить від довжини хвилі, то ці складові характеризуються різним часом проходження по волокну. Як наслідок, через хростання матеріальної дисперсії тривалість оптичного

імпульсу збільшується. Як відомо, матеріальна дисперсія є функцією властивостей оптичного випромінювання та характеристик матеріалу.

Коефіцієнт матеріальної дисперсії.

Коефіцієнт матеріальної дисперсії залежить від довжини хвилі і складу матеріалу серцевини. На розрахунковій довжині хвилі $\lambda = 1310$ нм коефіцієнт матеріальної дисперсії практично дорівнює нулю. Будемо вважати, що через відсутність матеріальної дисперсії ця довжина хвилі є найбільш прийнятною для багатомодових оптичних волокон [9, 11].

Номінальна частота визначається за формулою (4.4).

$$V = \frac{50\pi}{1{,}55} \cdot 0{,}1788 = 20{,}25.$$

Кількість мод визначається за формулою (4.5).

$$M = \frac{20{,}25^2}{4} = 102{,}5.$$

4.5 Розрахунок параметрів одномодового оптичного волокна

Маємо одномодове оптичне волокно, у якому поширюється хвиля з довжиною 1550 нм, з показниками заломлення серцевини $n_1 = 1{,}4469$ і світловідбивної оболонки $n_2 = 1{,}4396$. Оптичне волокно вважається одномодовим, оскільки для нього виконується умова стосовно значення номінальної частоти [13]

$$V \le V_{\text{кр}} = 2{,}405. \qquad (4.11)$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda}\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \le 2{,}405.$$

$$2a \le \frac{2{,}405 \cdot \lambda}{\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

$$2a = \frac{2{,}405 \cdot 1{,}55}{\pi\sqrt{1{,}4469^2 - 1{,}4396^2}} = 8{,}19 \text{ мкм}$$

Приймемо $2a = 8$ мкм.

Тоді:

$$V = \frac{8\pi}{1{,}55}\sqrt{1{,}4469^2 - 1{,}4396^2} = 2{,}3$$

Умова (4.11) виконується.

Як уже зазначалось, джерела випромінювання не є монохроматичними. В одномодових оптичних волокнах ця обставина є основною складовою хроматичної дисперсії. Інші складові хроматичної дисперсії: хвильова та матеріальна є залежними від довжини хвилі: хвильова – зростає з ростом довжини хвилі, а матеріальна дисперсія з ростом довжини хвилі змінює свій знак, маючи спадаючий характер.

$$\frac{\tau}{L} = \left(\frac{\Delta t}{L}\right)_M + \left(\frac{\Delta t}{L}\right)_W = \frac{1}{c\lambda}(Y_M + Y_W) \cdot \Delta\lambda, \qquad (4.12)$$

де Y_W, Y_M – коефіцієнти хвильової та матеріальної дисперсії.

$Y_M = -0{,}0026.$

$Y_W = 0{,}0028.$

Для випадку застосування напівпровідникового лазера з хвильовим спектром $\Delta\lambda = 1$нм визначимо значення хроматичної дисперсії

$$\frac{\tau}{L} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 1{,}55}(-0{,}0026 + 0{,}0028) \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 4{,}19 \text{ пс/км.}$$

$$B \cdot L = \frac{1}{0{,}419 \cdot 10^{-15}} = 2{,}4 \cdot 10^{15} = 240 \text{ ГГц·км}$$

$$L = \frac{2{,}4 \cdot 10^6}{155} = 1550 \text{ км.}$$

Розрахунок коефіцієнта згасання, який характеризує внутрішні та зовнішні втрати у волокні. До внутрішніх відносять втрати, зумовлені розсіюванням та поглинанням.

Розрізняють поглинання, причиною якого є домішки у матеріалі серцевини і власне поглинання, зумовлене іонним та електронним резонансами.

Контроль за технологічним процесом виготовлення заготовки волокна може зменшити вплив домішок. Але залишаються іони гідроксиду ОН, які перебувають у матеріалі серцевини волокна – вони створюють основну проблему. Пік поглинання спостерігається на довжині хвилі 1,55 мкм. Очищення матеріалу дозволяє значно знизити зазначені втрати.

По показнику власного поглинання в оптичних волокнах найкращим матеріалом є кварц з домішками окису германію. Власна резонансна частота такого матеріалу розташовується далеко від робочого діапазону хвиль.

Втрати на поглинання [13]:

$$\alpha_n = 8{,}69\frac{\pi \cdot n_1}{\lambda} \cdot tg\delta \cdot 10^3, \text{ дБ/км} \qquad (4.13)$$

Втрати на розсіювання:

$$\alpha_{\text{р}} = \frac{\text{с}}{\lambda^4} \qquad (4.14)$$

Сумарні втрати у світловоді (кілометричне згасання):

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_{\text{р}} = 0{,}22 \text{ дБ/км}.$$

Можна визначити дальність передачі, якщо розраховувати на допустиме загальне згасання сигналу в лінії і його компенсації підсиленням за допомогою лінійного підсилювача з коефіцієнтом підсилення $P_{\text{підс}} = 20$ дБ. Вона становитиме

$$L = \frac{P_{\text{підс}}}{\alpha} = \frac{20}{0{,}22} = 90 \text{ км}.$$

4.6 Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням згасання

Енергетичний баланс у лінії визначається рівнянням [6]:

$$E = \alpha_k L_{\text{др}} + \alpha_{\text{рз}} n_{\text{рз}} + \alpha_{\text{нз}} n_{\text{нз}} + \alpha_{\text{мз}} + \alpha_{\text{зз}}, \quad (4.15)$$

де E – енергетичний запас системи; $L_{\text{др}}$ – ділянка регенерації; α_k – згасання оптичного волокна (0,22 дБ/км); $n_{\text{рз}}$ – кількість роз'ємних з'єднань; $\alpha_{\text{рз}}$ – згасання в роз'ємних з'єднаннях (0,5 дБ); $n_{\text{нз}}$ – кількість нероз'ємних з'єднань; $\alpha_{\text{нз}}$ – згасання в нероз'ємних з'єднаннях (в місцях зварювання) (0,4 дБ); $\alpha_{\text{мз}}$ – згасання через макровигини (0,5 дБ); $\alpha_{\text{зз}}$ – енергетичний запас (3…5 дБ).

Кількість нероз'ємних з'єднань:

$$n_{\text{нз}} = \frac{L_{\text{др}}}{L_{\text{буд}}} + 1, \quad (4.16)$$

де $L_{\text{буд}}$ – будівельна довжина кабелю (6,4 км).

Підставимо (4.16) в (4.15) і визначимо довжину ділянки регенерації з урахуванням згасання

$$L_{\text{др}} = \frac{E - \alpha_{\text{рз}} n_{\text{рз}} - \alpha_{\text{нз}} n_{\text{нз}} - \alpha_{\text{мз}} - \alpha_{\text{зз}}}{\alpha_k + \alpha_{\text{нз}} / L_{\text{буд}}} \quad (4.17)$$

Енергетичний баланс становить 21 дБ. З урахуванням формули (4.15) отримаємо довжину ділянки регенерації

$$L_{\text{др}} = \frac{21 - 0{,}5 \cdot 2 - 0{,}4 - 0{,}5 - 4}{0{,}22 + 0{,}4/6{,}4} = 53{,}45 \text{ км}.$$

Тобто довжина регенераційної ділянки складе 53 км.

4.7 Розрахунок довжини регенераційної ділянки з урахуванням дисперсії

Відповідно до рекомендацій ITU-T визначимо максимально допустимі для ділянки регенерації значення хроматичної дисперсії $D_{др}$ та поляризаційної модової дисперсії $PMD_{др}$ при погіршенні відношення сигнал/шум до 1 дБ.

$$D_{\text{др}} = 1040000/B^2. \quad (4.18)$$

$$PMD_{\text{др}} = 140/B, \quad (4.19)$$

де B – швидкість передачі інформації, Гбіт/с.

Хроматична дисперсія, приведена до 1 км довжини лінії, дорівнює [6]:

$$D_{\text{хр}} = D_{\text{ов}} \cdot \Delta\lambda = 18 \cdot 0{,}1 = 1{,}8 \text{ пс/(нм·км)}, \quad (4.20)$$

де $D_{\text{ов}}$ – параметр дисперсії (паспортне значення); $\Delta\lambda$ – ширина спектру випромінювання лазера, нм.

Для довжини ділянки регенерації 53 км визначимо на ній значення хроматичної дисперсії

$$D_{\text{рд}} = D_{\text{хрд}} \cdot L_{\text{др}} \cdot \Delta\lambda = 0{,}5 \cdot 53 \cdot 0{,}1 = 2{,}65 \text{ пс} \quad (4.21)$$

Також поляризаційної модової дисперсії

$$PMD_{\text{рд}} = PMD_{\text{хрд}} \cdot L_{\text{др}} \cdot \Delta\lambda = 0{,}02 \cdot 53 \cdot 0{,}1 = 1{,}069\text{пс} \quad (4.22)$$

Середньоквадратичне значення дисперсії на номінальній ділянці

$$\sigma = \sqrt{D_{\text{рд}}^2 + PMD_{\text{рд}}^2} = \sqrt{2{,}65^2 + 1{,}069^2} = 2{,}857 \text{ пс}. \quad (4.23)$$

Для синхронного транспортного модуля STM-64 (9,9 Гбіт/с) при кодуванні 8B/10B (частотна модуляція) і коефіцієнті модуляції 10/8=1,25 отримаємо

$$F_M = 9{,}9 \cdot 10^9 \cdot 1{,}25 = 12{,}37 \text{ ГГц}.$$

$$\tau = \Delta\lambda \cdot \sigma \tag{4.24}$$

де $\Delta\lambda$ – ширина імпульсу лазера (0,1 нм).

$$\tau = 2{,}857 \text{ пс/км}.$$

Смуга пропускання

$$W = \frac{0{,}44}{\tau}. \tag{4.25}$$

$$W = \frac{0{,}44}{2{,}857 \cdot 10^{-12}} = 15{,}398 \cdot 10^9 \text{ Гц·км}$$

$$L = \frac{15{,}398 \cdot 53}{12{,}37} = 65{,}974 \text{ км}.$$

4.8 Висновки до розділу

Представлені рекомендації щодо вибору джерела випромінювання та оптичного приймача з урахуванням технології WDM, зосереджені на мінімізації перекриття спектрів сигналів та максимізації пропускної здатності системи.

Виконано розрахунки параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчатим та градієнтним профілями показника заломлення, а також для одномодового волокна. Також розраховано довжину регенераційної ділянки з урахуванням згасання оптичного сигналу та його дисперсії.

Довжина регенераційної ділянки може змінюватись залежно від конкретних характеристик мережі, таких як тип оптичних волокон, потужність сигналу, рівень шуму та спотворень, а також вимог до якості переданих даних.

Довжина регенераційної ділянки у системах WDM має такі особливості:

- У системах WDM передаються кілька незалежних каналів на різних довжинах хвиль, тому довжина регенераційної ділянки зазвичай визначається характеристиками кожного окремого каналу.
- Оскільки канали можуть мати різні рівні дисперсії та втрати сигналу, довжина регенераційної ділянки може варіюватись для кожного каналу.
- Для збільшення пропускної здатності та ефективності передачі даних у системах WDM використовують підсилювачі сигналу EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) та пристрої для компенсації дисперсії, які допомагають розширити довжину регенераційної ділянки.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

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

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

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;

2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;

3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	60	0	58
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв’язок (або знайдено новий зв’язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об’єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	40	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		52,7		

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

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	75	70
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	70,0		

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

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [21]:

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор}, \quad (5.1)$$

де – $k_{нов}, k_{теор}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{нов} = 52,7, k_{теор} = 70,0$ балів;

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

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 52,7 + 0,4 \cdot 70,00 = 59,60 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{нау}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

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

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM», даний рівень становить 59,60 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов’язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій,

секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ($З_о$) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [21]:

$$З_о = \sum_{i=1}^{k} \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \qquad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

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

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, T_p=24 дні.

$$З_о = 17890{,}00 \cdot 6 / 24 = 4636{,}38 \ грн.$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	17890,00	772,73	6	4636,38
Інженер-розробник телекомунікаційних систем 1-ї категорії	17500,00	750,00	24	18000,00
Провідний фахівець проблем моделювання систем зв'язку	8400,00	681,82	12	8181,84
Всього				30818,22

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_р$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» розраховуємо за формулою:

$$З_р = \sum_{i=1}^{n} C_i \cdot t_i , \tag{5.3}$$

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

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

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

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}} , \tag{5.4}$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо $Мм$=8000,00 грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [21];

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

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно T_p = 24 дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$C_1 = 8000{,}00 \cdot 1{,}10 \cdot 1{,}15 / (24 \cdot 8) = 52{,}71$ *грн.*

$З_{р1} = 52{,}71 \cdot 3{,}50 = 184{,}48$ *грн.*

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця інженера-розробника телекомунікаційних мереж	3,50	2	1,10	52,71	184,48
Підготовка робочого місця провідного фахівця	6,10	3	1,35	64,69	394,59
Введення програмних блоків моделювання поведінки мереж	4,35	5	1,70	81,46	354,34
Інсталяція програмного забезпечення математичного моделювання мереж	7,50	4	1,50	71,88	539,06
Введення програмних блоків моделювання поведінки мереж	8,20	5	1,70	81,46	667,96
Налагодження програмних блоків математичної моделі дослідження	3,50	5	1,70	81,46	285,10
Формування (введення) бази даних дослідження моделі мережі	11,50	3	1,35	64,69	743,91
Тестування взаємодії моделей приймача, передавача	4,60	4	1,50	71,88	330,63
Контроль результатів дослідження	3,50	5	1,70	81,46	285,10
Всього					3785,18

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

$$З_{дод} = (З_о + З_р) \cdot \frac{Н_{дод}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $Н_{дод}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Приймемо 11%.

$З_{дод}$ = (30818,22 + 3785,18) · 11 / 100% = 3806,37 грн.

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

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

$$З_н = (З_о + З_р + З_{дод}) \cdot \frac{Н_{зп}}{100\%} \quad (5.6)$$

де $Н_{зп}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

Зн = (30818,22 + 3785,18 + 3806,37) · 22 / 100% = 8450,15 грн.

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Ефективність передачі даних за технологією WDM».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов’язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп’ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

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

$$М = \sum_{j=1}^{n} Н_j \cdot Ц_j \cdot К_j - \sum_{j=1}^{n} В_j \cdot Ц_{вj}, \quad (5.7)$$

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

n – кількість видів матеріалів;

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

$К_j$ – коефіцієнт транспортних витрат, ($К_j = 1,1 \ldots 1,15$);

$В_j$ – маса відходів j-го найменування, кг;

$Ц_{вj}$ – вартість відходів j-го найменування, грн/кг.

$М_1 = 3,0 \cdot 213,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 715,68$ *грн.*

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний (А4)	213,00	3,0	0	0	715,68
Папір для заміток (А5)	136,00	4,0	0	0	609,28
Начиння канцелярське	195,00	3,0	0	0	655,20
Органайзер офісний	208,00	3,0	0	0	698,88
Картридж для принтера	1240,00	1,0	0	0	1388,80
Диск оптичний (CD-R)	20,50	3,0	0	0	68,88
Диск оптичний (CD-RW)	22,00	1,0	0	0	24,64
FLASH-пам'ять (16 ГБ)	107,00	1,0	0	0	119,84
FLASH-пам'ять (64 ГБ)	329,00	1,0	0	0	368,48
Оптоволокно 0,75 мм	25,00	50,0	0	0	1400,00
Всього					6049,68

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі *($К_в$)*, які використовують при проведенні НДР на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» відсутні.

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{спец} = \sum_{i=1}^{k} Ц_i \cdot C_{пр.i} \cdot K_i \ , \qquad (5.8)$$

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

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

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

k – кількість найменувань устаткування.

$B_{спец} = 12580,00 \cdot 1 \cdot 1,12 = 14089,60$ *грн.*

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.7 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Компенсатор хроматичної дисперсії Cor-X для стандарту G.652 DCM-100-1U-SU	1	12580,00	14089,60
Одноволоконний оптичний мультиплексор Cor-X DWDM-100G-BiDi-08-16wave-1	1	8460,00	9475,20
Термінал (імітатор передавача)	1	7640,00	8556,80
Термінал (імітатор приймача)	1	6700,00	7504,00
Всього			39625,60

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних

засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{прг} = \sum_{i=1}^{k} Ц_{iпрг} \cdot C_{прг.i} \cdot K_i \ , \qquad (5.9)$$

де $Ц_{iпрг}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

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

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

k – кількість найменувань програмних засобів.

$B_{прг} = 5400,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 5940,00$ *грн.*

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	5400,00	5940,00
Пакет Microwave Office	1	6800,00	7480,00
Пакет Matlab 2020	1	5380,00	5918,00
Всього			19338,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

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

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_в} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \qquad (5.10)$$

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

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

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

$A_{обл} = (79899,00 \cdot 1) / (2 \cdot 12) = 3329,13$ *грн.*

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Електронно-обчислювальний комплекс моделювання мереж HP ELITEONE 870 G9 TOUCH AIO / I5-13500 (7B0E4EA)	79899,00	2	1	3329,13
Лазерний принтер HP LASERJET M211D (9YF82A)	7599,00	4	1	158,31
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних мереж	7840,00	5	1	130,67
Робоче місце провідного фахівця	7899,00	5	1	131,65
Приміщення лабораторії досліджень	423000,00	25	1	1410,00
ОС Windows 11	8380,00	2	1	349,17
Пакет Microsoft Office 2019	7864,00	2	1	327,67
Офісна оргтехніка	8400,00	5	1	140,00
Всього				5976,59

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^{n} \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot Ц_e \cdot K_{вni}}{\eta_i}, \quad (5.11)$$

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

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$Ц_e$ – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), приймемо $Ц_e$ = 10,98 грн;

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

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

$B_e = 0,42 \cdot 160,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 737,86$ *грн.*

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Електронно-обчислювальний комплекс моделювання мереж 6G HP ELITEONE 870 G9 TOUCH AIO / I5-13500 (7B0E4EA)	0,42	160,0	737,86
Лазерний принтер HP LASERJET M211D (9YF82A)	0,32	4,0	14,05
Робоче місце інженера-розробника телекомунікаційних мереж	0,10	160,0	175,68
Робоче місце старшого наукового співробітника	0,08	160,0	140,54
Офісна оргтехніка	0,40	3,0	13,18
Всього			1081,31

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за

договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

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

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

5.2.11 Інші витрати

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

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

$$I_в = (З_о + З_р) \cdot \frac{Н_{ів}}{100\%}, \qquad (5.12)$$

де $Н_{ів}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати», приймемо $Н_{ів}$ = 50%.

$I_в$ = (30818,22 + 3785,18) · 50 / 100% = 17301,70 грн.

5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

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

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

$$B_{нзв} = (З_о + З_р) \cdot \frac{Н_{нзв}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де $Н_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», приймемо $Н_{нзв}$ = 105%.

$B_{нзв}$ = (30818,22 + 3785,18) · 105 / 100% = 36333,57 грн.

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = З_о + З_р + З_{дод} + З_н + М + К_в + B_{спец} + B_{прг} + A_{обл} + B_е + B_{св} + B_{сп} + I_в + B_{нзв}. \quad (5.14)$$

$B_{заг}$= 30818,22 +3785,18 +3806,37 +8450,15 +6049,68 +0,00 +39625,60 + 19338,00 + 5976,59 +1081,31 +0,00 +0,00 +17301,70 +36333,57 = 172566,36 грн.

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

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.15)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, приймемо η=0,95.

ЗВ = 172566,36 / 0,95 = 181648,80 грн.

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

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

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

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

$$K_P = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \qquad (5.16)$$

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

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

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

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

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Приймемо B =181648,80 грн;

t – час проведення дослідження. Приймемо t = 0,08 років, (1 міс.).

Визначення показників I, n, T_C, R, B, t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [21].

$$K_P = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^2 \cdot 2 \cdot 4 \,/\, 181{,}6 \cdot 0{,}08 = 8{,}46.$$

Якщо $K_P > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» складають 181648,80 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Ефективність передачі даних за технологією WDM» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_P > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз технологій часового (TDM) та хвильового (WDM) методів мультиплексування, що використовуються в оптичних мережах передачі даних у контексті збільшення пропускної спроможності та ефективності передачі. Показано їх порівняльні характеристики.

Розглянута проблематика підвищення пропускної спроможності ВОСП. Показано, що швидкодія електронних компонентів волоконно-оптичної системи передачі є обмежуючим фактором збільшення швидкості передачі даних для технології TDM. Ефективною альтернативою цій технології є WDM. Технологія WDM характеризується суттєво більшим значенням пропускної здатності, оскільки створюється певна множина каналів даних на різних довжинах хвиль.

Розглянуто два основних варіанти WDM - це Dense WDM (DWDM) та Coarse WDM (CWDM). DWDM зазвичай використовується для передачі даних на довгі відстані з високою пропускною здатністю. CWDM має більш широкі проміжки між довжинами хвиль і зазвичай використовується для більш коротких відстаней та менш інтенсивних вимог до пропускної спроможності. Технологія WDM є основою для побудови сучасних оптичних мереж зв'язку та відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної передачі даних на тривалі відстані з високою швидкістю та пропускною спроможністю.

Сучасні досягнення у розробці найважливіших вузлів систем WDM спрямовані на збільшення пропускної спроможності, зниження втрат сигналу, збільшення дальності передачі, підвищення ефективності і надійності роботи. Показано, що в галузі лазерних технологій необхідно створювати більш потужні, стабільні та компактні джерела світла, що буде сприяти збільшенню пропускної здатності та дальності передачі систем WDM. Розвиток оптичних компонентів та технологій їх виготовлення повинен дати більш ефективні пристрої мультиплексування та демультиплексування з меншими втратами, меншими спотвореннями та міжканальними завадами. Необхідне подальше

вдосконалення з застосуванням нових матеріалів та конструкцій ефективних оптичних підсилювачів, які дозволять збільшити підсилення сигналу та знизити шумову компоненту. В результаті це підвищить якість передачі даних та розширить дальність передачі – складові ефективності WDM. З урахуванням комплексного підходу подальший розвиток повинні отримати оптичні фільтри, компенсатори, інтегровані оптичні пристрої (мультипексори/демультиплексори та підсилювачі), цифрова обробка сигналів. Показано, що ці аспекти допоможуть створити потужніші, ефективніші та надійніші системи WDM.

Згідно з розробленим узагальненим алгоритмом розрахунку обмеженої хроматичною дисперсією дистанції передавання запропоновано способи створення моделей ВОЛТ із підвищеною пропускною здатністю..

Показано, що на магістральних лініях зв’язку основним обмежувальним фактором подальшого зростання швидкості передачі інформації є дисперсія сигналу, яка стає причиною появи міжсимвольної інтерференції. У цьому контексті розглянуто методи та пристрої компенсації дисперсії.

Розроблені технології компенсації дисперсії знаходять застосування в мережах, побудованих на SF-волокні. Використання FBG ширше в одноканальних системах, тому що FBG може давати великі значення компенсуючої дисперсії (понад 10 000 пс/нм) у вузькій ~ 0.1 нм смузі довжин хвиль. Використання DCF більш ефективне в багатоканальних WDM-системах через те, що DCF може працювати в широкому діапазоні довжин хвиль. Перехід на повністю оптичні мережі вимагатиме впровадження динамічних компенсаторів дисперсії та волоконних компенсаторів, які працюють на модах вищого порядку.

Проведено порівняльний аналіз електронних та оптичних методів компенсації дисперсії в ВОЛЗ, визначені їх основні переваги та недоліки. Виявлено, що оптичні методи дозволяють уникнути ускладнень у станційному обладнанні завдяки інтеграції компенсуючих пристроїв безпосередньо в систему. Проте ці методи є дорожчими і можуть погіршити енергетичні характеристики. Натомість електронні методи не мають зазначених проблем і

забезпечують динамічне управління параметрами системи без ускладнення структури лінійного тракту.

Наведено рекомендації щодо вибору джерела випромінювання та оптичного приймача з урахуванням технології WDM. Їх вибір пов’язують з мінімізацією перекриття спектрів сигналів та досягненням максимальної пропускної здатності системи.

Виконано розрахунки параметрів багатомодового оптичного волокна зі ступінчатим та градієнтним профілями показника заломлення, а також одномодового оптичного волокна. Розрахована довжина регенераційної ділянки з урахуванням згасання оптичного сигналу та його дисперсії. Довжина ділянки регенерації може змінюватись в залежності від конкретних характеристик мережі, таких як тип оптичних волокон, потужність сигналу, рівень шумів і спотворень, а також вимог до якості переданих даних.

Виконана економічна частина, яка підтверджує ефективність проведених досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. В.Б. Каток. Волоконно - оптичні системи зв’язку. – К., Велар, 1999. – 483 с.

2. Основні напрямки стандартизації оптичних кабелів зв’язку / Каток В.Б., Ковтун О.С., Руденко І.Е. – Зв’язок, No 4, 2005. – с. 17-22.

3. Проектування лінійного волоконно – оптичного тракту [Електронний ресурс]: http://ua-referat.com/.

4. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки збільшення швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 75…77.

5. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. – Київ, 2005. – 194с.

6. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чіжмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.

7. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ: „Техніка”, 2001

8. Стеклов В.К., Нові інформаційні технології: Транспортні мережі телекомунікацій. Київ: «Техніка» 2004.

9. Корнійчук В.І. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі / В.І. Корнійчук, П.Д. Мосорін. – Одеса: Друк, 2001. – 363 с.

10. Кожем’яко В.П., Павлов С.В., Мартинюк Т.Б., Лисенко Г.Л. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2002. - 106 с.

11. Лисенко Г.Л. Аналіз і моделювання роботи оптичних комутаторів для високопродуктивних волоконно-оптичних мереж / Г.Л. Лисенко, С.Є.

Тужанський, О.Ф. Абудайя // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2005 - №2. – С. 69-76.

12. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1. Навчальний посібник / Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 127 с.

13. Методичні вказівки до підготовки магістерських кваліфікаційних робіт зі спеціальності “Телекомунікації та радіотехніка” (освітньо-професійна програма “Телекомунікації”) для студентів денної та заочної форм навчання / Уклад. Г. Г. Бортник, М. В. Васильківський.– Вінниця : ВНТУ, 2018.– 50с.

14. Каток, В.Б. Модовое мультиплексирование в волоконно-оптической связи/ В.Б. Каток, С.Е. Марков, А.А. Манько // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. –№4. – С.61 – 67.

15. Каток В. Б. Аналіз оптичних лінійних трактів із компенсацією хроматичної дисперсії / В. Б. Каток,Н.В.Омецинська / / Зв’язок.— 2007.— №5.— С. 13-20.

16. Іоргачов Д. В. Волоконно-оптичні кабелі: теоретичні основи, конструювання і розрахунок, технологія виробництва та експлуатація: монографія / Д. В. Іоргачов, О. В. Бондаренко, О. Ф. Дашенко, А. В. Усов. – Одеса : Астропринт, 2000. – 536 с.

17. Проектування лінійного волоконно – оптичного тракту [Електронний ресурс]: http://ua-referat.com/.

18. Хмелев К.Ф. Основы фотонного транспорта. – Киев: Техніка. 2008. – 680 с.

19. Бердников О.М., Хмельов К.П. Застосування технології WDM на телекомунікаційних мережах. / Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2003. – № 3. – с. 5…11.

20. Каток В.Б., Руденко І.Е., Ранський Є.Г., Однорог П.М. Волоконно-оптичний зв'язок / Під ред. Катка В.Б. – К.: Логос, 2015 – 383 с.:іл.

21. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

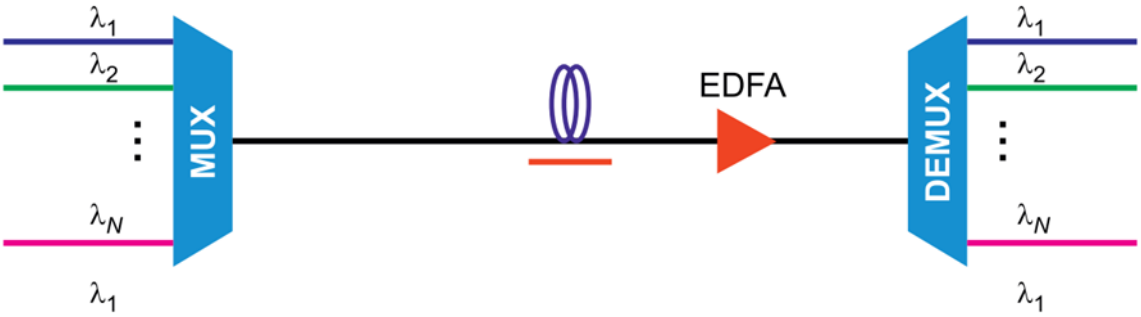
Додаток А

(обов’язковий)

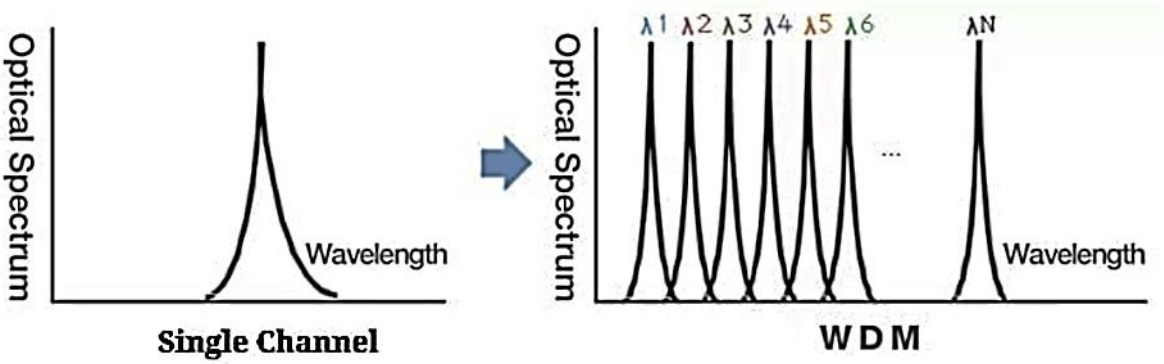
ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ WDM

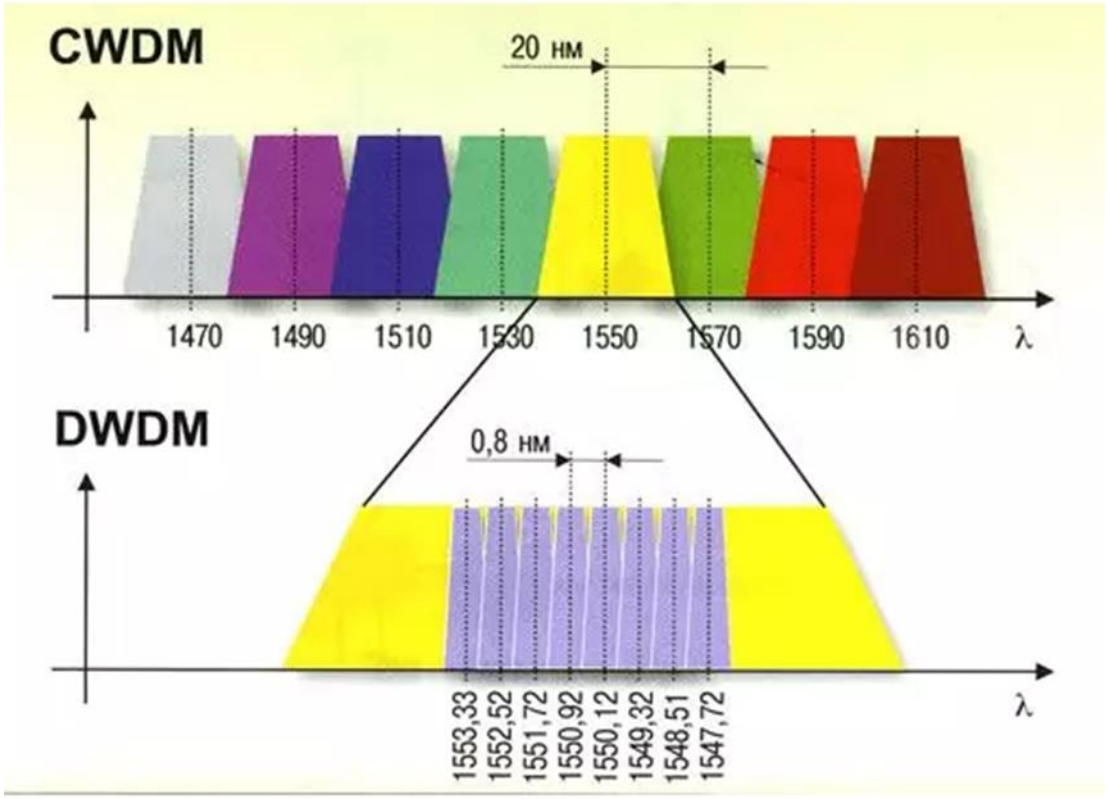
назва магістерської кваліфікаційної роботи



Принцип роботи та загальний вид WDM-системи



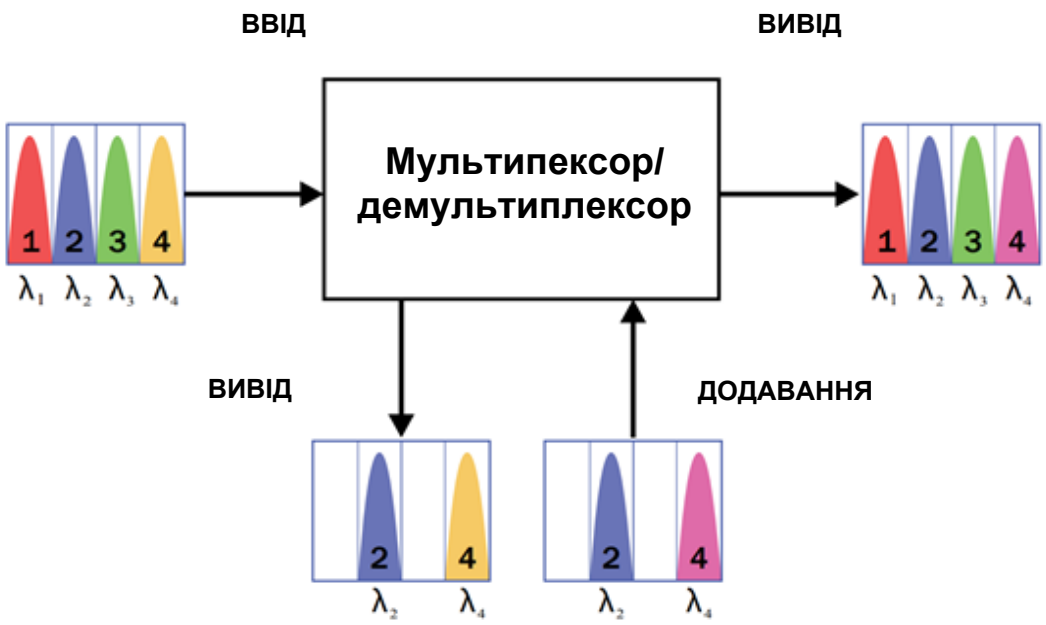
Трансформація єдиного каналу у WDM



Робочі діапазони технологій CWDM та DWDM

Порівняльні характеристики технологій CWDM та DWDM

Характеристика	CWDM Грубе мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі	DWDM Щільне мультиплексування з розділенням за довжиною хвилі
Хвильовий інтервал	20 нм у цілому	0,8нм/0,4нм/0,2нм/1,6нм
Діапазон хвиль	від 1270 до 1610 нм	від 1525 до 1565 нм (C) від 1570 до 1610 нм (L)
Кількість діапазонів хвиль	18	40/80/160/(до 192)
Форма оптичної модуляції	Лазер без охолодження з електронним налаштуванням	Лазер з охолодженням з налаштуванням за температурою
Ціна	низька	висока
Дальність зв’язку	Коротка (оптичні підсилювачі не підтримуються	Велика
Структура	проста	Складна (комплекс)
Потужність споживання	низька	висока
Габарити	Малі	Великі
Вимоги до середовища передачі	Низькі	Високі



Принцип роботи мультиплексора введення-виведення (ROADM)

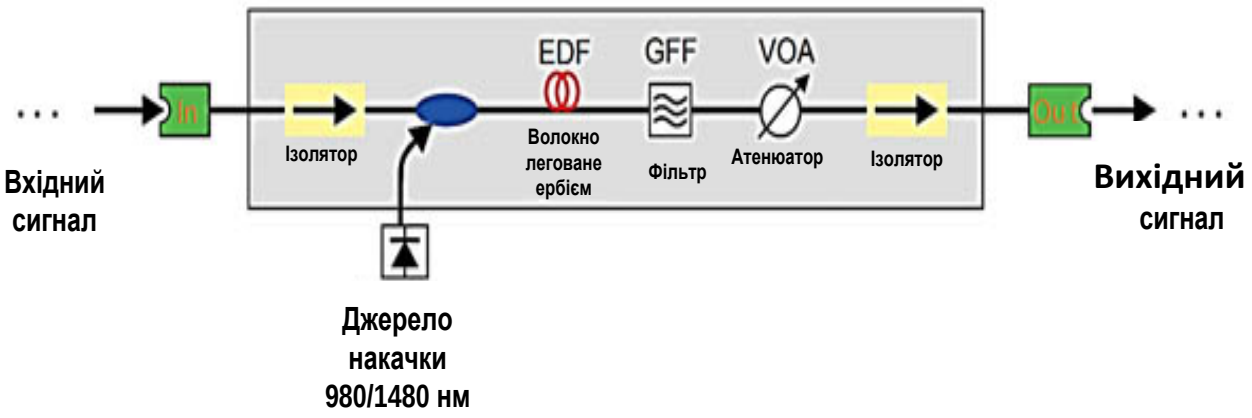
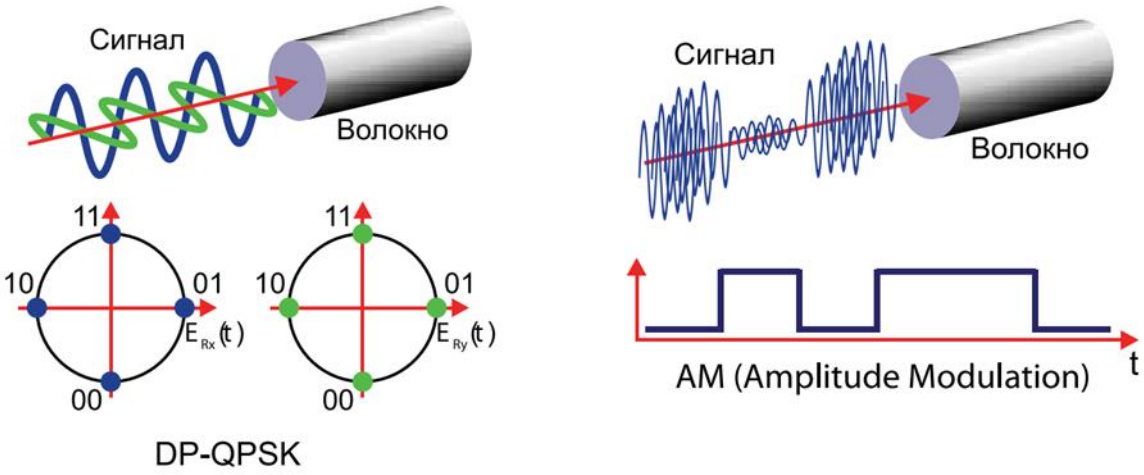
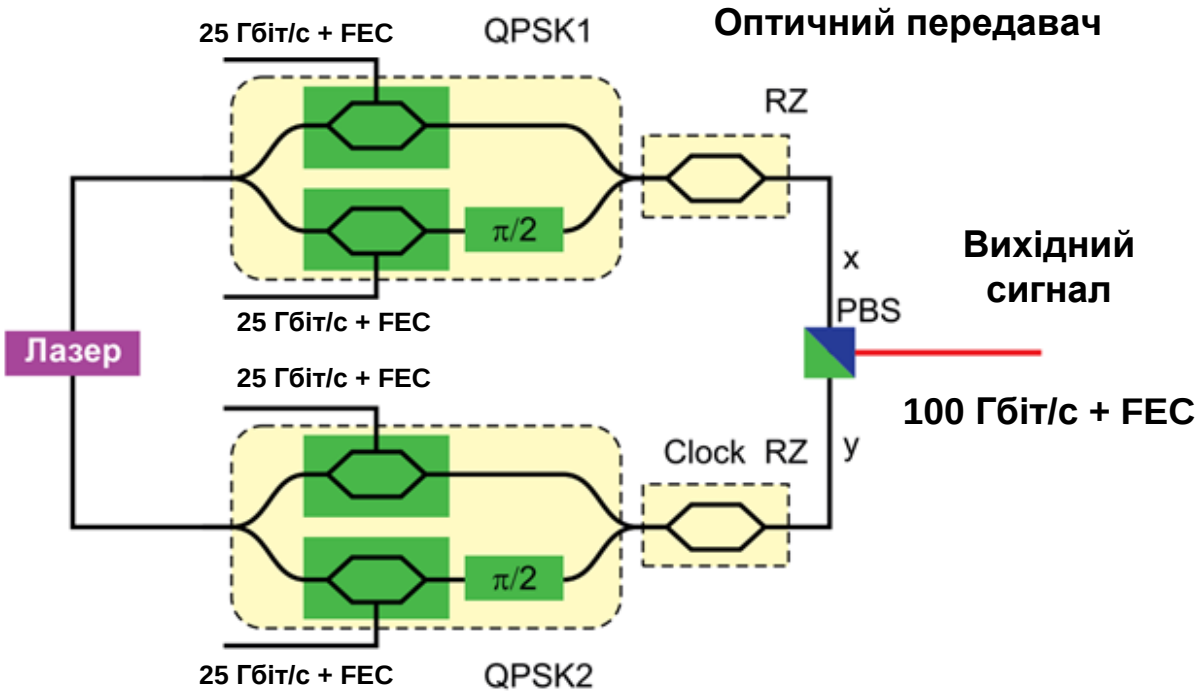


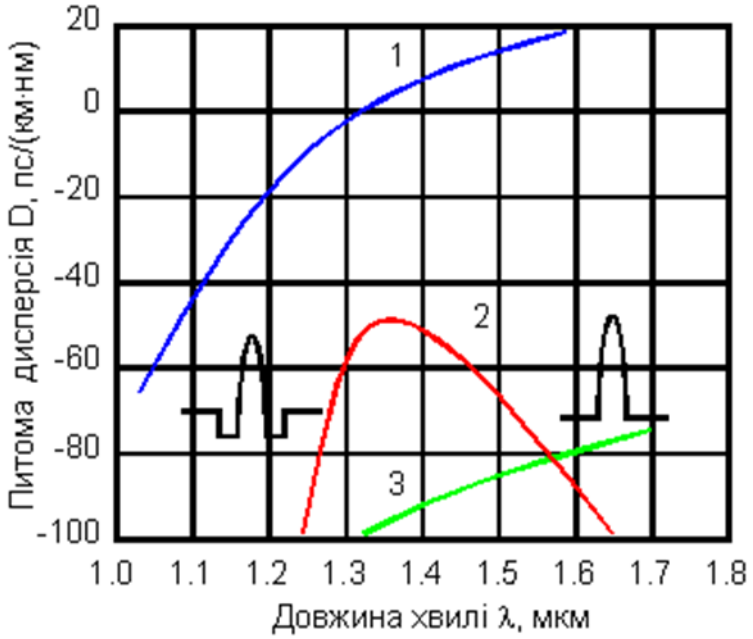
Схема однокаскадного EDFA-підсилювача



Структура сигналу DP-QPSK та AM



Структура передавача DP-QPSK



Залежність хроматичної дисперсії стандартного одномодового волокна (1) та DCF – волокна для різних профілів показника заломлення (2, 3) від довжини хвилі

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ
МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Ефективність передачі даних за технологією WDM

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Барась С. Т, к.т.н., професор

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	83 %
Загальна схожість	17 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

□ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.

□ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

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

Автор _____ Согур А. А.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

_____

_____

Особа, відповідальна за перевірку _____ Васильківський М.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт _____ _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)