

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий факультет: інформаційних технологій та електроніки

Кафедра інформаційних технологій та програмування

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної випускної роботи

освітній ступінь бакалавр
спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(шифр і назва спеціальності)

на тему «Дослідження особливостей побудови транспортних мереж та їх технологій»

Виконав: студент групи РЕА-21д

_____ (підпис)

М. Є. Зайцев

_____ (ініціали і прізвище)

Керівник

_____ (підпис)

І. С. Тюндер

_____ (ініціали і прізвище)

Завідувач кафедри

_____ (підпис)

О. І. Захожай

_____ (ініціали і прізвище)

Рецензент: Зінченко В. Л.

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Навчально-науковий факультет: інформаційних технологій та електроніки
Кафедра інформаційних технологій та програмування
Освітній ступінь: бакалавр
Спеціальність: 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(шифр і назва спеціальності)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

“ ___ ” _____ Захожай О. І.
2025 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Зайцеву Микиті Єгоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження особливостей побудови транспортних мереж та їх технологій

керівник роботи Тюндер Ірина Сергіївна, ст. викл

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

затверджений наказом університету від “ 27 ” травня 2025 року
№67/15.15-С

2. Строк подання студентом роботи 16.06.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: Об'єктом даної роботи є транспортні телекомунікаційні мережі

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно висвітлити):

Вступ. Аналітичний огляд, з висвітленням наступних питань:

Функція та роль транспортної мережі у телекомунікаційній системі;

Виникнення оптичної транспортної мережі OTN-OTN та перехід на неї;

Особливості побудови транспортних ліній зв'язку у мобільних мережах

Висновки. Перелік використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу: слайди презентації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.03.2025р**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної випускної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Одержання завдання на виконання роботи	30.03.25	виконано
2	Укладання і погодження з керівником плану і етапів виконання роботи	06.04.25	виконано
3	Аналіз шляхів виконання завдання. Вибір і погодження з керівником оптимального шляху	13.04.25	виконано
4	Узагальнення даних літературних джерел, для виконання завдання дипломного проєкту.	20.04.25	виконано
5	Підготовлений результат дослідження кваліфікаційної роботи	27.04.25	виконано
6	Укладання, оформлення та погодження пояснювальної записки з керівником	04.05.25	виконано
7	Здача готової пояснювальної записки на кафедру	08.06.25	виконано
8	Укладання доповіді і презентації	10.06.25	виконано

Студент: _____ М. Є. Зайцев
підпис (ініціали і прізвище)

Керівник роботи _____ І. С. Тюндер
підпис (ініціали і прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту містить: сторінок – 71; рисунків – 11; таблиць – 6; джерел – 22; мова – українська.

Об'єкт дослідження – транспортні телекомунікаційні мережі.

Мета роботи:

1. Аналіз сучасних підходів до побудови транспортних мереж та дослідження принципів мультиплексування TDM, WDM, DWDM;
2. Дослідження вимог до сучасних транспортних мереж та аналіз показників продуктивності, таких як пропускна здатність, затримка передачі даних та надійність;
3. Розгляд та оцінка ролі технологій для розширення пропускної здатності транспортних мереж, зокрема оптичних OTN-OTN та DWDM, а також дослідження перспектив впровадження 400G/800G Ethernet.

У пояснювальній записці до кваліфікаційної випускної роботи було проаналізовано види технологій транспортних телекомунікаційних мереж, зроблено їх стислий огляд, а також розглянуто актуальність та перспективи мереж з їх використанням. Розглянуто переваги та недоліки моделей транспортних мереж, описано сумісність та відповідність сучасним вимогам.

ТРАНСПОРТНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ МЕРЕЖІ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ОПТИЧНОВОЛОКОННІ КАБЕЛІ, ОПТИЧНО-ВОЛОКОННИЙ ЗВ'ЯЗОК, ETHERNET, DWDM, OTN-OTN, ТРАНСПОРТНА ІЄРАРХІЯ, СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОПТИЧНА ДИСПЕРСІЯ, ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ, КОМУТАЦІЯ, ІНТЕРНЕТ, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ПІДСИЛЕННЯ СИГНАЛУ, МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ, DWDM, ТЕРМІНАЛИ, МЕРЕЖІ НОВОГО ПОКОЛІННЯ, МЕРЕЖІ, 5G / 6G.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	11
1 ФУНКЦІЯ ТА РОЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ.....	13
1.1. Поняття про транспортну телекомунікаційну мережу та електронну комунікаційну систему.....	13
1.1.1. Поняття класифікацій телекомунікаційних мереж.....	13
1.1.2. З чого складаються телекомунікаційні мережі.....	14
1.1.3. Історія розвитку телекомунікаційних транспортних мереж	15
1.2. Розгляд особливостей технологій побудови транспортних мереж PDH, SDH, NG SDH, ATM, MPLS-TP.....	18
1.3. Висновки до розділу 1	25
2. ВИНИКНЕННЯ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ OTN-OTN ТА ПЕРЕХІД НА НЕЇ.....	26
2.1. Виникнення OTN-OTN, особливості побудови мереж та розвиток універсальності мережі.....	26
2.2. Дисперсія світла як неминучий фактор перешкоди сигналу в оптичному волокні.....	28
2.3. Опис одномодових та багатомодових категорій оптичних волокон.....	30
2.3.1. Одномодові оптичні волокна.....	30

2.3.2. Багатомодові оптичні волокна.....	38
2.3.3. Методи компенсації та контролю дисперсій.....	44
2.4. Конфігурації прокладення оптичного волокна до кінцевих користувачів.....	50
2.5. Принципи мультиплексування даних у сучасних транспортних мережах.....	53
2.6. Структура обладнання транспортної мережі OTN-OTN.....	56
2.7. Висновки до розділу 2.....	59
3. ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТРАНСПОРТНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ.....	62
3.1. Принцип взаємодії мобільних станцій із транспортною мережею.....	62
3.2. Шлях мобільного трафіку від пристрою користувача до магістральної транспортної мережі.....	63
3.3. Аналіз вимог пропускної здатності транспортних мереж під сучасні потреби.....	65
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК.....	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АСП – Аналогові системи передачі
- ВОЛЗ – волоконно-оптичні лінії зв'язку
- ІКМ – Імпульсно-кодова модуляція
- ІЧ – Інфрачервоний
- КМУ – Кабінет Міністрів України
- ЦСП – Цифрові системи передачі
- АТМ – Asynchronous Transfer Mode
- BER – Bit Error Rate
- BGP – Border Gateway Protocol
- CBR – Constant Bit Rate
- CD – Chromatic Dispersion
- CU – Central Unit
- CWDM – Coarse Wavelength Division Multiplexing
- DCF – Dispersion Compensating Fiber
- DFB – Distributed Feedback Lasers
- DFE – Decision Feedback Equalizer
- DGD – Differential Group Delay
- DNS – Domain Name System
- DSF – Dispersion Shifted Fiber
- DSP – Digital Signal Processor
- DU – Distributed Unit
- DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing
- EDC – Electronic Dispersion Compensation
- EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier
- EPC – Evolved Packet Core

EoS – Ethernet over SDH

FBG – Fiber Bragg Grating

FCh – Fiber Chanel

FOADM – Fixed Optical Add-Drop Multiplexer

FTTB – Fiber to the Building

FTTC – Fiber to the Curb

FTTH – Fiber to the Home

FTTN – Fiber to the Node

FTTx – Fiber to the X

FWM – Four-Wave Mixing

GPS – Global Positioning System

HTTP – HyperText Transfer Protocol

IEC – International Electrotechnical Commission

IoT – Internet of Things

IP – Internet Protocol

ISO – International Organization for Standardization

ITU – International Telecommunication Union

ITU-T – ITU Telecommunication Standardization Sector

LAN – Local Area Network

LEAF – Large Effective Area Fiber

LMS – Least Mean Squares

LSP – Label Switched Path

LTE – Long-Term Evolution

MAN – Metropolitan Area Network

MMF – Multimode Fiber

MPLS – Multiprotocol Label Switching

MPLS-TP – MPLS Transport Profile

NFV – Network Functions Virtualization

NGN – Next Generation Network

NG-SDH – Next Generation Synchronous Digital Hierarchy

NMS – Network Management System

NZ-DSF – Non-Zero Dispersion Shifted Fiber

OAM – Operations, Administration, and Maintenance

OCh – Optical Channel

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OM – Optical Multimode

OMS – Optical Multiplex Section

OSPF – Open Shortest Path First

OTN – Optical Transport Network

OTH – Optical Transport Hierarchy

OTS – Optical Transmission Section

OXC – Optical Cross-Connect

PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy

PLL – phase-locked loop

PMD – Polarization Mode Dispersion

PON – Passive Optical Network

QAM – Quadrature Amplitude Modulation

QoS – Quality of Service

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying

ROADM – Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer

SDH – Synchronous Digital Hierarchy

SDN – Software-Defined Networking

SMF – Single-Mode Fiber

STM – Synchronous Transport Module

SWDM – Shortwave Wavelength Division Multiplexing

TDD – Time Division Duplex

TDM – Time Division Multiplexing

TCP/IP – Transmission Control Protocol / Internet Protocol

TP MPLS – Transport Profile MPLS

URLLC – Ultra-Reliable Low-Latency Communications

VBR – Variable Bit Rate

VDSL – Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line

VC – Virtual Container

VCI – Virtual Channel Identifier

VCSEL – Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

VIPA – Virtually Imaged Phased Array VPI – Virtual Path Identifier

VPN – Virtual Private Network

VoIP – Voice over Internet Protocol

WAN – Wide Area Network

WDM – Wavelength Division Multiplexing

WiFi – Wireless Fidelity

XGS-PON – 10 Gigabit Symmetrical Passive Optical Network

ВСТУП

У сучасному світі телекомунікаційні транспортні мережі відіграють головну роль у наданні швидкого та надійного обміну інформацією, адже крізь них відбувається функціонування інтернету, мобільного зв'язку, телебачення та інших засобів комунікації, що з'єднують користувачів із глобальними сервісами. Завдяки розвитку оптичних технологій, бездротових систем та інновацій у мережевій інфраструктурі, телекомунікаційні мережі зараз стають дедалі швидшими, ефективнішими та безпечнішими.

Щорічно транспортні телекомунікації розвивалися та мали потребу у більшій пропускну здатності передачі даних. Окрім цього, потрібно було розвивати й функціонал, який би зміг швидко та надійно передавати інформацію, раціонально використовувати енерго- та фізичні ресурси. Тому серед таких функцій активно розвивалося мультиплексування – спосіб передачі декількох сигналів в одному каналі. У різні періоди для певних типів транспортних мереж використовувалися різні технології мультиплексування. Наприклад, для телефонії та магістральних мереж застосовувалася модель із розподілом часових інтервалів передачі на кожен сигнал у каналі, а у телерадіосистемах – розподіл сигналів на окремі частоти в межах загального спектру.

Через значну кількість різних технологій та методів передачі даних виникла потреба створення та застосування такої транспортної мережі, яка буде об'єднувати усі попередні телекомунікаційні транспортні мережі та їх технології передачі даних. І вже з розвитком оптичноволоконних технологій це стало можливо, завдяки технології оптичної транспортної мережі та оптичної транспортної ієрархії (OTN-OTH). На сьогодні ця технологія розвивається, та є основною у телекомунікаційних транспортних мережах, адже вона дозволяє передавати сигнали різних існуючих технологій.

Актуальність теми полягає у тому, що транспортні мережі є основою телекомунікацій. Протягом останніх 30 років технології передачі даних стрімко

розвивалися та з кожним роком обсяг інформації, що передається, зростає. На сьогодні трафік у транспортних телекомунікаційних мережах надзвичайно великий і для того, щоб такий потік даних передавати швидко та надійно, зараз впроваджуються нові технології, які потребують побудови нових гілок ієрархії. Перехід до 5G та розгортання 6G потребують сучасних архітектур транспортних мереж щоб гарантовано надавати мінімальну затримку та високу пропускну здатність, як і для новітньої технології WIFI 7, також потребується впровадження нових частотних діапазонів для мереж 6G. Окрім цього у світі значно зростає використання відеострімінгу, розвиток сервісів штучного інтелекту, хмарних сервісів і також Інтернету речей (IoT), який використовується у розумних містах та автономних автомобілях, де необхідний наднадійний зв'язок, який повинен мати мінімальний пінг. Для центрів обробки даних та хмарних технологій також дуже важливе забезпечення високонадійними магістральними транспортними мережами.

Дана бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню особливостей побудови транспортних мереж та аналізу розвитку і перспектив їх технологій.

1 ФУНКЦІЯ ТА РОЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

1.1 Поняття про транспортну телекомунікаційну мережу та електронну комунікаційну систему

Спочатку визначимося з поняттями «транспортна телекомунікаційна мережа» та «електронна комунікаційна система». Відповідно до Закону України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 № 1280-IV транспортна телекомунікаційна мережа – це мережа, що забезпечує передавання знаків, сигналів, письмового тексту, зображень та звуків або повідомлень будь-якого роду між підключеними до неї телекомунікаційними мережами доступу [7]. Електронна комунікаційна система, згідно з Постановою КМУ «Про затвердження Порядку взаємодії органів виконавчої влади з питань захисту державних інформаційних ресурсів в інформаційних та електронних комунікаційних системах», – це сукупність технічних і програмних засобів, призначених для обміну інформацією шляхом передавання (випромінювання) або приймання сигналів, знаків, звуків, рухомих чи нерухомих зображень або іншим способом [8].

1.1.1 Поняття класифікацій телекомунікаційних мереж

Телекомунікаційні мережі можна поділити за розташуванням:

- Local Area Network (LAN) – локальна мережа, яка розташовується у межах будинку [3];
- Metropolitan Area Network (MAN) – міські мережі, що застосовуються, для об'єднання мереж в місті в одну велику мережу, зазвичай має доступ до WAN [3];
- Virtual Private Network (VPN) – приватна мережа, яка дозволяє під'єднуватися через сегмент публічної мережі до географічно віддаленої мережі та користуватися її сервісами [3, 11];
- Wide Area Network (WAN) – охоплює географічний регіон [3, 11];

- Internet – під'єднання до інших мереж у світі через публічну мережу загального користування [3].

Також телекомунікаційні мережі розподіляються за призначенням:

- кінцеві мережі – мережі доступу, до яких під'єднуються термінальні вузли(користувацьке обладнання – комп'ютери, термінали тощо) [4];

- транспортні мережі – мережі, які дозволяють транспортувати дані між різними підключеними до них телекомунікаційними кінцевими мережами [4];

- мережі вузлів – мережі забезпечення достовірності напрямку сигналів передачі даних [4].

1.1.2. З чого складаються телекомунікаційні мережі

Телекомунікаційні мережі складаються з головних складових, які відповідають за передачу, маршрутизацію, зберігання та обробку даних. Основою мережі є фізичні компоненти, що включають у себе передавальні середовища (оптичне волокно, мідні кабелі, бездротові технології, мобільний зв'язок, супутникові системи) та мережеве обладнання. До основних пристроїв належать маршрутизатори, комутатори, станції мобільного зв'язку, сервери та центри обробки даних та термінали, які є початковими та кінцевими пунктами прийому, передачі, створення чи перетворення цифрових або аналогових даних [3, 4].

Серед засобів передавального середовища зараз найчастіше стали використовуватися кабелі з оптичного волокна, оскільки вони дозволяють швидко та надійно без зайвих перешкод передавати велику кількість інформації та передбачають надійний та майже безперешкодний зв'язок [1]. Також у телекомунікаційних мережах передбачена логічна інфраструктура, яка містить у собі певні протоколи та стандарти, які необхідні для роботи мережі та керування трафіком. Серед таких протоколів та стандартів є TCP/IP, MPLS, DNS, а також програмно-визначені мережі SDN, які керують трафіком. Окрім логічної структури є ще функціональна, яка охоплює різні типи мереж, такі як LAN, MAN та WAN, а також телекомунікаційні сервіси, серед яких мобільний зв'язок,

цифрове телебачення, хмарні сервіси та Інтернет [2; 3]. Усе керування трафіком відбувається всередині вузлів, які задіяні у цих операціях [5].

1.1.3 Історія розвитку телекомунікаційних транспортних мереж

Телекомунікаційні мережі почали стрімко розвиватися ще у 1970-х роках, проте тоді вони не мали такої великої потреби, як сьогодні. Ще тоді з'явилися АСП - аналогові системи передачі, через які здійснювалися моніторинг стану мережі, керування та комунікація між різними точками транспортної мережі. Однак у АСП були певні недоліки у вигляді неякісної передачі сигналу через можливі перешкоди та низька пропускну здатність. Вже трохи пізніше з'явилися нові системи передачі – цифрові (ЦСП). На відміну від аналогових систем, такі системи були більш захищені від перешкод, мали більшу пропускну здатність, вищу енергоефективність та стабільність зв'язкового каналу, однак ці системи потребували синхронізації [6].

У 1980-х роках проблема з синхронізацією була вирішена завдяки появі технології плезіохронної цифрової ієрархії (PDH), у якій використовується 30-канальні мультіплекс-сигнали імпульсно-кодової модуляції (ІКМ), та 2 канали для синхронізації та керування. У такій системі використовується чергова передача сигналу по одному байту з кожного каналу та це дає змогу передавати цифровий потік, швидкість якого досягає 2 Мбіт/с. Ця 30-канальна технологія ієрархії має назву «ІКМ-30» [6]. На основі ІКМ-30 (E1) утворюються також вищі рівні цієї ієрархії, у яких відбувається множення попереднього рівня ієрархії на чотири, тобто наступними рівнями будуть ІКМ-120 (E2), ІКМ-480 (E3) та ІКМ-1920 (E4), швидкість яких, відповідно, зростає у чотири рази за попередній. Незважаючи на такі переваги, ця система мала вагомий недолік, сутність якого була у малоефективному і складному групуванні та розгрупуванні даних [1]. Однак потім цей недолік невдовзі був усунений завдяки створенню нової технології на базі PDH – це була синхронна цифрова ієрархія (SDH) [1, 6]. У цієї технології базова швидкість передачі даних була вищою, ніж у PDH. Окрім цього, канали та передавачі синхронізувалися від загального генератора, на відміну від PDH. Базовим рівнем швидкості передачі даних у SDH прийнято

швидкість 155.52 Мбіт/с – це використовується синхронним транспортним модулем STM-1, що має відповідність з ІКМ-1920 у технології PDH [6, 9]. Окрім цього, є ще одна перевага SDH технології та модуля STM-1, у можливості перенесення кількох корисних сигналів нижчої швидкості і це дозволяє використовувати PDH-потоки у модулях STM [1].

Водночас із синхронною цифровою ієрархією розвивалася технологія АТМ (Asynchronous Transfer Mode) – асинхронний режим передавання. Такий режим надавав послуги каналного рівня шляхом використання широкого діапазону засобів зв'язку на фізичному рівні, тобто дозволяв встановлювати з'єднання [1, 9]. Режим АТМ краще пристосований для транспортування даних з різним бітрейтом. Однак у цієї технології був недолік, через який комутатори мали відкидати пакети даних, які не вміщаються при різкому збільшенні трафіку. У 1990-х роках починається розвиток NGN – мереж нового покоління. Їх відмінність від попередніх моделей була у появі можливості розділити функції трансферу даних та надання послуг. Така можливість відокремлення надала мережам нового покоління модульність, завдяки якій стало можливо проводити модернізацію окремого сервісного обладнання, не змінюючи транспортне обладнання [9]. Для побудови таких транспортних мереж нового покоління за основу взяті технології оптичної транспортної ієрархії (ОТН – Optical Transport Hierarchy) [10]. А вже у кінці 2000-х років технологію АТМ починає витісняти ІР-VPN та на заміну АТМ-комутаторам прийшли маршрутизатори ІР/МPLS [4]. Разом із цим на почала активніше розвиватися технологія для оптичної транспортної мережі WDM – мультиплексування сигналу за довжиною хвилі світла, яке передає різні оптичні сигнали, щільно розташовуючи їх у оптичному каналі передачі. Протягом десятиліття це зумовило впровадження оптичних транспортних мереж та виникнення концепції переходу на повністю оптичну транспортну мережу ОТН [4; 10].

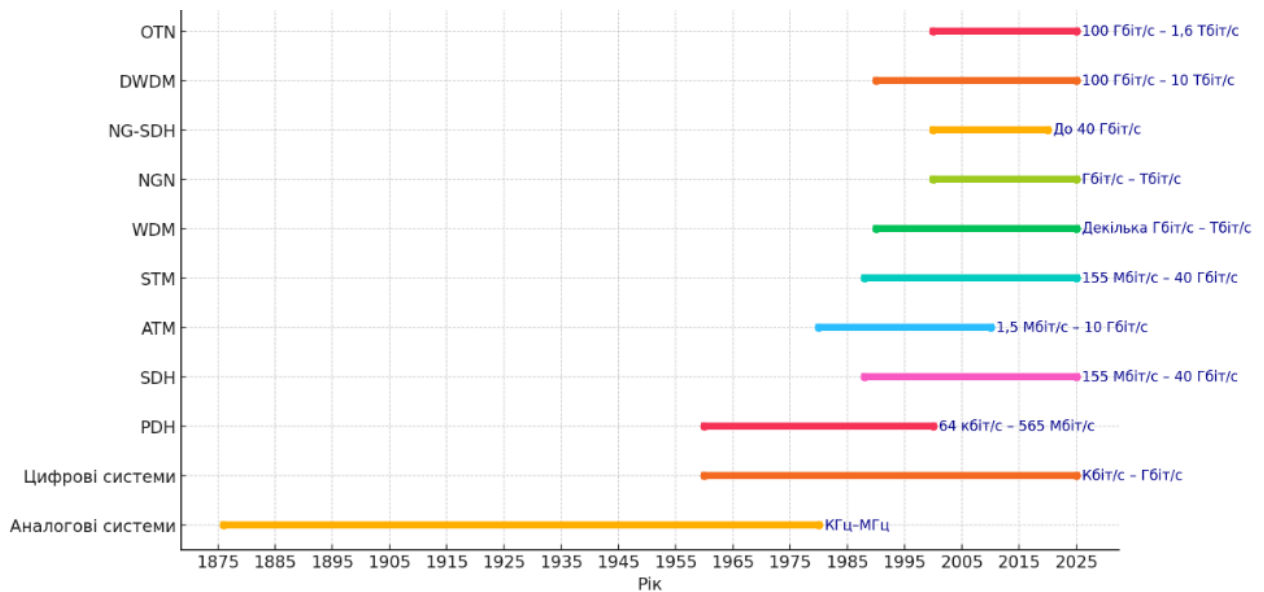


Рисунок 1.1 – Розвиток та використання технологій транспортних мереж

На сучасному етапі розвитку транспортних мереж здійснюється перехід від старих технологій до нових високошвидкісних оптичних конструкцій. Технології SDH і NG-SDH, які довгий час були основою мережевої інфраструктури, поступово витісняються більш ефективними засобами. Так PDH давно втратила свою актуальність, а ATM практично була витіснена у 2010-х роках через поширення Gigabit Ethernet та IP/MPLS.

Оптичні технології, такі як DWDM і WDM, стали основою магістральних мереж, оскільки вони дозволили транспортувати величезні обсяги даних та при цьому використовувати мінімальну кількість оптичних волокон. Засоби OTN вмюють раціонально керувати оптичним трафіком та підвищувати надійність та якість передачі даних разом із компонентами коригування системи. Стандарти швидкості продовжують зростати, і якщо раніше 100Гбіт/с вважалося вершиною технологій, то сьогодні впроваджуються швидкості 400 Гбіт/с та 800 Гбіт/с і навіть 1,6Тбіт/с, що значно збільшує пропускну здатність магістральних мереж.

Паралельно із розвитком транспортних мереж розвивався й функціонал експлуатації, адміністрування та технічного обслуговування мережевої інфраструктури (OAM). OAM використовується в різних технологіях, таких як SDH, NG-SDH, OTN, Ethernet, MPLS та IP-мережі [10]. У SDH мережах він контролює синхронізацію, виявляє бітові помилки (BER – Bit Error Rate) і захист трафіку, а в OTN OAM здійснює детальний моніторинг якості сигналу на рівні

оптичних каналів та виконує автоматичне виправлення помилок. Ця система повинна підтримувати різні рівні транспортних мереж (SDH, OTN, MPLS-TP, Ethernet) та бути адаптивною до зростання навантаження [9].

З розвитком MPLS-TP та сучасних Ethernet-мереж OAM розширився, включаючи механізми автоматичної діагностики, відстеження шляхів проходження трафіку та підтримку Automatic Protection Switching (APS) у мережах SDH/OTN, яка автоматично перемикає на резервний канал у разі пошкодження основного. А у MPLS-мережах повинна бути можливість перевірки тунелів за допомогою OAM-фреймів та попередньо визначених шляхів LSP (Label Switched Path) які використовуються для швидкої маршрутизації трафіку, уникаючи складної обробки заголовків IP на кожному проміжному маршрутизаторі [12].

1.2 Розгляд особливостей технологій побудови транспортних мереж PDH, SDH, NG SDH, ATM, MPLS-TP

PDH (плезіохронна (майже синхронна) цифрова ієрархія) і SDH (синхронна цифрова ієрархія) – це технології цифрової передачі даних, які використовуються в телекомунікаціях для передачі голосових сигналів і сигналів даних через канали зв'язку. Системи PDH працюють з невеликими розбіжностями в синхронізації між різними елементами мережі, тобто умовно вони працюють з однаковою швидкістю, але якийсь з елементів може працювати трохи швидше. Їх мережі потребують складних механізмів для підтримки належної синхронізації. Системи SDH навпаки підтримують сувору синхронізацію між усіма елементами мережі і їх мережі розроблені таким чином, щоб синхронізувати всі пристрої від загального генератора (Clock) [6].

У PDH існує два основних стандарти, тобто 30-канальний з додаванням 2 каналів синхронізації, який використовується в Європі, і 24-канальний, який використовується в Північній Америці/Японії. Базова швидкість становить 64 Кбіт/с. У даній технології передбачено поділ на рівні ієрархії. У першому рівні

за основу взято базову швидкість, яка помножується на чотири, а кожен наступний рівень помножується на чотири від попереднього з додаванням службових бітів для синхронізації [6]. Так само збільшується й кількість каналів. Швидкість передачі даних у рівнях ієрархії PDH для Європи зазначено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Швидкість передачі даних у PDH у Європі.

Рівень ієрархії	Швидкість передачі даних	Кількість каналів
Базовий E1	2,048 Мбіт/с	30+2 (30 голосових + 2 службових)
E2	8.448 Мбіт/с	120
E3	34.368 Мбіт/с	480
E4	139.264 Мбіт/с	1920
E5 (максимум)	565.148 Мбіт/с	7680

PDH була непоганим рішенням у 1980-х – 1990-х роках, але зараз застаріла. На той час дана технологія дозволяла якісно передавати велику кількість даних у порівнянні з аналоговими системами передачі, однак мала певні недоліки, через які була поступово витіснена повністю синхронною ієрархією SDH. Серед таких недоліків був складний доступ до окремих необхідних каналів, наприклад, для отримання одного каналу E1 із вищого рівня E4, потрібно демультимплексувати весь потік. Через це технологія PDH була неефективною для зручного керування трафіком та його перенаправлення. Також у даній технології була відсутня єдина стандартизація, тому європейська та північноамериканська системи були несумісними між собою і це ускладнювало міжнародне з'єднання. PDH допускає невеликі відхилення тактових частот у різних вузлах мережі, а це у свою чергу ускладнювало злиття сигналів без втрати частини інформації [6]. Максимальним рівнем ієрархії PDH вважається E4 з його швидкістю 139.264 Мбіт/с, проте існував ще рівень E5 зі швидкістю 565.148 Мбіт/с, який майже не використовувався через високу складність реалізації, якій заважали складний доступ до каналів та проблеми із синхронізацією. E5 з'явився вже пізно, коли

активно впроваджувалася технологія SDH, де другий рівень синхронного транспортного модуля (STM-4) мав швидкість 622.08 Мбіт/с. Максимальна швидкість SDH у модулі STM-256 досягає 40Гбіт/с. [1, 6] Це робить PDH у порівнянні непридатною для сучасних мереж із високою пропускнуою здатністю.

Синхронна цифрова ієрархія (SDH – Synchronous Digital Hierarchy) – це принцип побудови цифрових систем передачі, що використовують мультиплексування цифрових потоків, але з набагато вищою базовою швидкістю передачі та загальною синхронізацією всього обладнання, яке відповідає за формування та передачу каналів, на відміну від PDH. Основним рівнем передачі є швидкість 155,52 Мбіт/с. Цей рівень вважається аналогом четвертого рівня у PDH – КМ-1920 (139.264 Мбіт/с). Інформація передається синхронним транспортним модулем STM. STM-модуль передбачає синхронізацію єдиною тактовою частотою.

Оскільки SDH підтримує не тільки власні синхронні потоки, а й плезіохронні цифрові сигнали (PDH), потрібен спеціальний механізм для їх інтеграції [12]. Цю функцію виконують віртуальні контейнери (VC – Virtual Container) - логічні області STM-модуля, які слугують для транспортування цифрових потоків різних швидкостей. Завдяки цьому можна помістити плезіохронний сигнал у такий контейнер, який відповідатиме швидкості цього сигналу. Таким чином можна легко інтегрувати старі PDH-системи в сучасну оптичну інфраструктуру без необхідності кардинальної модернізації обладнання. До кожного віртуального контейнера додається трактовий заголовок (Path Overhead) – це спеціальні службові біти, які містять інформацію про маршрут, синхронізацію та контроль цілісності переданих даних.

У SDH визначено п'ять основних рівнів ієрархії: STM-1 зі швидкістю 155,52 Мбіт/с, STM-4 – 622,08 Мбіт/с, STM-16 – 2488,32 Мбіт/с, STM-64 – 9953,28 Мбіт/с та STM-256 – 40 Гбіт/с. На відміну від PDH, у SDH більш проста схема мультиплексування та демультіплексування сигналів. Це дозволило звертатися до окремих сигналів без необхідності демультіплексовувати весь потік, це насамперед дало змогу більш легкого під'єднання терміналів та іншого

обладнання. Крім того, SDH передбачає вбудовані механізми резервування, які мають гарантувати надійність у разі відмови каналів або несправності обладнання. Технологія також дозволяє створювати такі канали зв'язку, які не будуть втручатися у трафік, змінювати чи аналізувати його вміст, що важливо для голосового трафіку або передачі відеопотоку у рамках конфіденційності, також для передачі вихідних форматів без перетворення. SDH підтримує масштабованість і також сумісний з обладнанням різних виробників. Вартість такого обладнання залишається відносно невисокою, а процес налаштування відбувається швидко.

Попри численні переваги, SDH має і певні недоліки. Наприклад, один із каналів повністю використовується для службових даних, що зменшує корисну пропускну здатність. Крім того, технологія не дає ефективно використовувати смугу пропускання, оскільки має резервувати частину ресурсу на випадок відмови. Також у SDH відсутні динамічні механізми розподілу смуги між різними додатками та система пріоритетів для трафіку, що робить її менш універсальною порівняно з сучаснішими мережевими технологіями. Технологія SDH розвивалася та у результаті з'явилася версія наступного покоління NG-SDH [9].

NG-SDH (Next Generation Synchronous Digital Hierarchy) – це оновлена версія SDH, яка додає підтримку пакетної комутації та покращує ефективність використання смуги пропускання. Вона не є окремою технологією систем передачі, натомість за Рекомендаціями ITU G.707 розроблена для перелаштування SDH-мереж до сучасних вимог, таких як передача IP-трафіку, Ethernet і мультисервісних даних. На відміну від класичної SDH, яка використовує виключно систему мультиплексування TDM (Time Division Multiplexing) у якій кожен сигнал отримує часовий інтервал для передачі в загальному каналі. NG-SDH інтегрує пакетні технології, зокрема Ethernet over SDH (EoS) [9].

У звичайній SDH смуга пропускання виділяється жорстко для кожного каналу, у той час як NG-SDH динамічно змінює розподіл ресурсів між каналами

залежно від навантаженості трафіку. NG-SDH може передавати не лише стандартний SDH/PDH трафік, а й IP, MPLS, ATM, Ethernet та інші типи даних, а також швидше реагує на аварії у мережі, автоматично перемикаючи трафік на резервні маршрути.

NG-SDH значно розширює можливості звичайної SDH, однак вона не замінює повністю Ethernet та IP-мережі. Вона залишається актуальною для операторів зв'язку та великих корпоративних мереж, які потребують високої надійності, резервування та підтримки існуючих TDM-сервісів [9]. Однак у хмарних технологіях і мобільних мережах 5G перевага надається повністю пакетним технологіям, таким як MPLS, IP та WDM [5, 9].

ATM (Asynchronous Transfer Mode – це високошвидкісна технологія комутації та передачі даних, яка використовується для мультимедійних, телекомунікаційних та корпоративних мереж. Вона поєднує переваги комутації каналів (TDM) та комутації пакетів (IP), чим ефективно транспортує голос, відео та дані із гарантією якості обслуговування (QoS). У цій технології дані передаються у вигляді пакетів фіксованого розміру – 53 байти, 5 з яких застосовуються для заголовків. На відміну від TDM, де ресурси виділяються жорстко за часовими слотами, ATM динамічно виділяє пропускну здатність залежно від навантаження. В ATM використовується віртуальна комутація, яка складається з ідентифікатору віртуального шляху (VPI - Virtual Path Identifier) та ідентифікатору віртуального каналу VCI (Virtual Channel Identifier). Це дозволяє швидко перемикати потоки даних на рівні апаратури без необхідності аналізувати кожен пакет.

ATM підтримує різні класи обслуговування залежно від вимог до трафіку:
CBR (Constant Bit Rate) – для чутливих до затримок сервісів (IP-телефонія, відеоконференції);

VBR (Variable Bit Rate) – для потокового відео або змінного трафіку;

ABR (Available Bit Rate) – адаптивний режим для динамічного трафіку (IP);

UBR (Unspecified Bit Rate) – найменш пріоритетний режим для нерегулярного трафіку (файлові передачі, HTTP). Перевагами ATM є висока

швидкість передачі даних – до 10 Гбіт/с та ефективне використання ресурсів завдяки асинхронному мультиплексуванню сигналів, завдяки якому уникається простій смуги пропуску.

Однак, незважаючи на переваги, АТМ вимагає дорогого обладнання, на відміну від Ethernet та IP/MPLS, які пропонують подібний функціонал при меншій вартості. АТМ не адаптована до масштабних IP-мереж та сучасних дата-центрів. Сьогодні технологія АТМ майже не використовується у глобальних мережах, але ще зустрічається в деяких банківських системах, VoIP та спеціалізованих телекомунікаційних мережах.

MPLS-TP (Multiprotocol Label Switching - Transport Profile) є спеціалізованим варіантом технології MPLS, розробленим для роботи в транспортних мережах операторського рівня. Вона створює високонадійну передачу даних та поєднує універсальність служби передачі даних для різних типів клієнтів MPLS із жорсткими вимогами до якості обслуговування, характерними для SDH і OTN.

Головною особливістю MPLS-TP є використання комутації на основі міток для маршрутизаційного процесу. Відмінністю від MPLS є те, що ця технологія не використовує стандартні протоколи маршрутизації, такі як OSPF чи BGP, для визначення маршрутів у своїй контрольній площині. Натомість у MPLS маршрутизація залежить від таких протоколів для динамічного визначення шляху передавання даних

MPLS-TP підтримує як односпрямовані, так і двоспрямовані тунелі, що дає змогу створити схеми резервування і швидкого відновлення у разі відмови сегмента мережі. Завдяки механізмам автоматичного виявлення та відновлення з'єднання можна досягти рівня відмовостійкості, подібного до попередніх сталих транспортних мереж.

Ця технологія також надає можливості управління та моніторингу мережі, що включають механізми OAM (Operations, Administration, and Maintenance). Вони дозволяють здійснювати діагностику, вимірювання параметрів якості передачі, визначення маршрутів та швидке усунення несправностей [2, 9].

MPLS-TP сумісний з існуючими транспортними технологіями та підтримує координацію з Ethernet-мережами, а це робить його універсальним засобом для сучасних операторів зв'язку. MPLS-TP широко застосовується в магістральних і міських транспортних мережах, де необхідне поєднання продуктивності, надійності та простоти керування. Цей протокол здатен транспортувати інші протоколи у мережах ATM та IP. MPLS не є повноцінним рівнем в моделі OSI, але взаємодіє з іншими рівнями мережі, такими як мережевий (3-й рівень) і каналний (2-й рівень). MPLS працює між ними, фактично створюючи «проміжний» рівень [12].

У звичайних мережах (наприклад, в IP) маршрутизатор приймає рішення про маршрут на основі аналізу IP-адреси пакету.

В MPLS, замість того щоб маршрутизатор перевіряв IP-адресу в кожному пакеті, кожен пакет або комірка отримує коротку фіксовану мітку (Label), яка використовується для визначення маршруту і того, куди відправити пакет. Ця мітка служить «заміною» IP-адреси, і комутація відбувається за цією міткою, а не на основі аналізу заголовка пакета.

Завдяки цьому процес комутації стає швидшим, оскільки мітки коротші за IP-адреси і їхній аналіз займає менше часу, тому цей підхід поєднує переваги мереж, які використовують віртуальні з'єднання, як в ATM, з можливістю пакетної маршрутизації, яка використана в мережах на базі TCP/IP.

MPLS-TP є спеціалізованою версією технології MPLS, орієнтованою на використання в транспортних мережах для передачі даних. MPLS-TP також можна вбудувати в уже наявні транспортні технології та він також підтримує Ethernet. MPLS-TP підтримує ті ж архітектурні принципи, що й старіші технології транспортних мереж, як SDH. Завдяки можливості зручного розширення цієї мережі та високих можливостей використання пропускну здатності MPLS-TP широко застосовується в магістральних і міських транспортних мережах, де необхідно поєднати продуктивність, надійність та простоту керування [14].

1.3 Висновки до розділу 1

У даному розділі було описано та визначено поняття про транспортні мережі, розглянуто давні та сучасні перспективні технології та засоби для транспортування даних. Для подальшого розуміння особливостей побудови транспортних мереж були коротко розглянуті такі технології, як PDH, SDH/NGSDH, ATM, WDM, OTN-OTN, MPLS, MPLS-TP. Було проаналізовано, як проходила еволюція транспортних телекомунікаційних мереж, їх моделі, які з них застаріли, та які й досі продовжують розвиватися задля розширення функціоналу та більшої сумісності з різними існуючими видами телекомунікаційних мереж, а також для можливості відповідати сучасним потребам транспортування обсягів даних. Телекомунікаційні мережі складаються з фізичних компонентів, таких як обладнання, канали зв'язку, логічних елементів, таких як протоколи, програмні технології та функціональних сервісів. Вони надають зв'язок, передачу даних, безпеку та можливість розширення мережевих сервісів для сучасного цифрового світу.

2 ВИНИКНЕННЯ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ OTN-OTN ТА ПЕРЕХІД НА НЕЇ

2.1 Виникнення OTN-OTN, особливості побудови та розвиток універсальності мережі

Оптична транспортна мережа (OTN, Optical Transport Network), також відома як OTH (Optical Transport Hierarchy), виникла як відповідь на обмеження попередніх транспортних технологій, зокрема SDH, коли виникла потреба в обробці стрімкого зростання обсягів передавання даних у 1990-х роках. Її історія розвитку пов'язана з еволюцією волоконно-оптичних технологій та потребами у більш ефективному й масштабованому способі транспортування великих обсягів інформації між мережею доступу та ядром телекомунікаційної інфраструктури.

На початку 2000-х спроба розвивати перепускню здатність SDH до 160 Гбіт/с зазнала значних труднощів через фізичні властивості оптичного волокна, а саме – виникнення волоконної дисперсії (рис. 2.1). Через зигзагоподібне розсіювання оптичного сигналу збільшується шлях променю світла, а також виникає затухання сигналу на певній відстані (відстань якісної передачі значно скорочується у порівнянні із відстанню, яку може пройти не дисперсований сигнал).

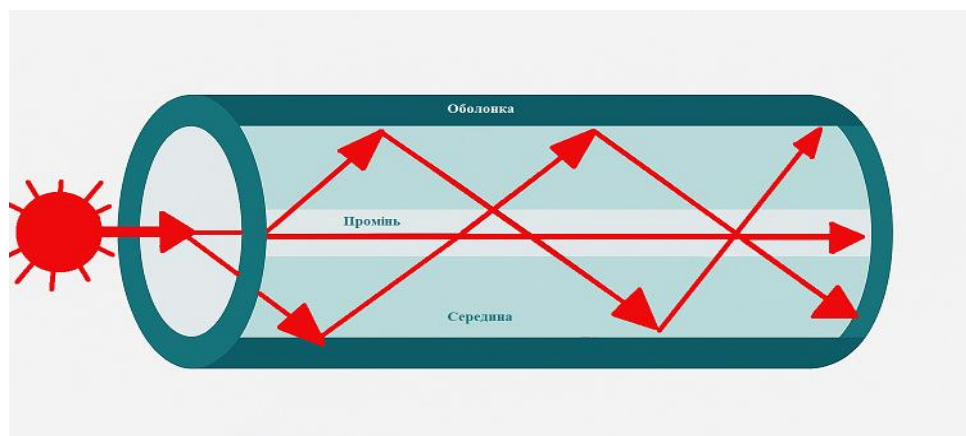


Рисунок 2.1 – Дисперсія в оптичному волокні.

Однак, у більш сучасних технологіях дисперсій уникнути теж не вдалося, проте знайшлися способи їх компенсувати, зокрема у технології DWDM – мультиплексуванням за довжиною хвилі.

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – технологія, яка є наразі основною у структурі сучасних телекомунікаційних мереж. Ця технологія виконує щільне мультиплексування з поділом по довжині хвилі, завдяки якому можна передавати десятки та навіть сотні незалежних каналів одночасно по одному оптичному волокну, кожен на своїй довжині хвилі. Такий підхід дає змогу підвищувати пропускну здатність мережі без необхідності прокладати додаткові кабелі, що робить такі кабелі ідеальними для побудови магістральних каналів зв'язку.

У простій оптичній лінії зв'язку через одне волокно передається один оптичний сигнал. Натомість технологія DWDM же працює за принципом оптичного мультиплексування, тобто об'єднання багатьох сигналів у різних довжинах хвиль (λ) в одному потоці. Наприклад, у системах DWDM типово використовуються хвилі в діапазоні 1530–1565 нм (С-діапазон), кожна з яких не заважає іншій. Спеціальні мультиплексори та демультіплексори дозволяють змішувати та розділяти сигнали на вході та виході системи, тому DWDM може підтримувати від 8 до 160+ каналів, проте реальні цифри залежать від використаної ширини смуги та кроком між частотами каналів. Зазвичай частотний крок між каналами 25 ГГц, 50 ГГц або 100 ГГц. Головними перевагами DWDM для використання у сучасних мережах є можливість додавати нові канали і при цьому фізично не змінювати структуру мережі, а також можливість передавати будь-які типи трафіку, такі як інтернет, мобільний зв'язок, аудіо- та відеоканали, при цьому без необхідності перетворювати сигнали, адже система підтримує будь-який протокол.

Завдяки цим перевагам більшість міжміських та трансконтинентальних оптичних кабелів використовують DWDM.

Таким чином вже у 2001 році Міжнародна телекомунікаційна спілка ІТУ-Т ухвалила рекомендацію G.709, яка визначила структуру OTN. Вона ввела нову

транспортну ієрархію – OTN, яка дозволяла інкапсулювати різні типи клієнтських сигналів, а також ширше розвинені методи мультиплексування сигналів, що дозволило протягом десятиліття додати підтримку високошвидкісних сигналів 10/40/100 Гбіт/с. А вже на сучасному етапі з 2010-х років з'явилася підтримка Flexible OTN – адаптивної передачі, яка використовує змінну смугу. Разом із цим активно розвивалося впровадження високошвидкісних каналів до 400G та вище. Розвиток цієї технології дав змогу масово використовувати її в інфраструктурі дата-центрів, 5G і хмарних сервісів.

І вже на сьогодні з активним розвитком мобільних мереж завдяки оптичним транспортним мережам та можливістю щільно мультиплексувати в них значно великі обсяги даних стало можливим підтримувати безліч мобільних пристроїв користувачів, адже Мережі 5G потребують високої пропускної здатності на транспортному рівні. Наприклад, Vodafone при розгортанні 5G-інфраструктури використовують DWDM для об'єднання базових станцій з дата-центрами. Кожна базова станція може мати 10-20 Гбіт/с трафіку, і DWDM може обслуговувати десятки таких станцій по одному кабелю.

Оскільки майбутні мережі 6G обіцяють досягти швидкостей у терабітному діапазоні, потреба в надійній, масштабованій оптичній інфраструктурі буде тільки зростати. DWDM буде базовою технологією для побудови магістральних та транспортних сегментів 6G-мереж. Очікується, що майбутні DWDM-системи використовуватимуть ще вужчі частотні кроки наприклад, 12.5 ГГц, що дозволить суттєво збільшити щільність каналів та пропускну здатність.

2.2 Дисперсія світла як неминучий фактор перешкоди сигналу в оптичному волокні

Волоконна дисперсія (Fiber Dispersion) є узагальненим поняттям, яке охоплює усі види дисперсії в оптичному волокні, у тому числі й дисперсії при певних режимах (модах) пропускання сигналу. Така дисперсія є неминучим фактором, який проявляється на певній довжині волокна.

Хроматична дисперсія (CD, Chromatic Dispersion) критична в одномодовому волокні, де сигнал передається лише в одному промені, але має ширину спектра з різними довжинами хвиль. Така дисперсія завдає перешкоди у технологіях 10G Ethernet, WDM, DWDM, OTN, та системах 100G/400G

У такому середовищі, як скло в оптичному волокні, коротші хвилі, наприклад, синє світло, зазвичай мають інший показник заломлення, ніж довші хвилі червоного світла. Тому, коли через волокно проходить імпульс, який містить багато довжин хвиль (наприклад, лазерний імпульс неідеальної монохроматичності), окремі компоненти цього імпульсу прибувають до приймача у різний час, проте найбільш це помітно на довжинах хвиль 1310 нм та 1550 нм. Це призводить до розтягування імпульсу в часі, що спричиняє накладення сигналів один на одного (інтерсимвольну інтерференцію) що веде до збільшення частоти бітових помилок та зменшення швидкості передачі даних.

Окрім хроматичної дисперсії є й інші види дисперсій, які виникають у різних режимах передачі сигналу по оптичному волокні. Такими видами є поляризаційна модова дисперсія (PMD) та інтермодова дисперсія.

Поляризаційна модова дисперсія (PMD, Polarization Mode Dispersion) – дисперсія, яка найчастіше виникає в одномодових волокнах, в системах передачі з надвисокими швидкостями від 10 Гбіт/с. Виникнення такої поляризації пов'язане з тим, що навіть в одномодовому волокні світлова хвиля поширюється у двох ортогональних поляризаційних модах, ідеально симетричних у теорії, але не в реальних умовах. Будь-яке фізичне порушення симетрії волокна (вигини, напруження, температура, тиск, дефекти виробництва, еліптичність волокна), викликає різницю в швидкостях поширення цих двох поляризацій. Цей вид дисперсії критичний для 40G/100G Ethernet, когерентних систем, де затримка у 10 пікосекунд може призвести до втрати бітів, та OTN, зокрема DWDM, оскільки особливо впливає на сигнал при високій щільності каналів і великій дальності. Ця дисперсія проявляється як часова затримка (Differential Group Delay, DGD) між компонентами сигналу, що мають різну поляризацію, тобто одна

поляризація проходить швидше за іншу, а це у свою чергу призводить до перехресних завад і спотворення сигналу.

Інтермодова дисперсія виникає в багатомодових оптоволоконних (Multimode fiber, MMF) лініях зв'язку, де світло під різними кутами одночасно поширюється кількома різними просторовими модами, тобто різними шляхами всередині волокна. У багатомодовому волокні світлові хвилі можуть відбиватись від границь між серцевиною та оболонкою під різними кутами. Ці режими мають різну довжину проходження і, відповідно, різний час затримки. Слідовно, короткий імпульс, що було подано на вхід волокна, розтягується у часі, оскільки кожен мод доходить до приймача в різний момент. Така дисперсія є обмежуючим фактором для перепускної здатності у багатомодових волокнах, особливо на ділянках оптичного волокна великої довжин. Така дисперсія проявляється тільки у багатомодових волокнах категорій OM1, OM2, OM3, OM4, але найбільше у OM1 та OM2. на коротких відстанях до 2 км та критична для швидкостей 1G/10G у MMF.

Усі перелічені види дисперсій в оптичному волокні поєднує різниця у часі між проходженням окремих компонентів сигналу. Проте кожен з видів має відмінності один від одного за типом, можливою дистанцією передавання якісного сигналу, а також виникнення у певних стандартах оптичних волокон.

2.3. Опис одномодових та багатомодових категорій оптичних волокон

2.3.1. Одномодові оптичні волокна

Одномодові оптичні волокна (SMF, single-mode fibers) – це тип оптичних волокон, призначених для передавання світла лише в одному напрямку розповсюдження, що дає змогу досягати дуже високої дальності передавання сигналу без значних втрат і спотворень. У такому типі волокна світло проходить вузьким пучком майже через середину оптичного волокна. Одномодове волокно пропускає такий тонкий промінь світла на сотні кілометрів завдяки своїй товщині всього у 8-11 мікрометрів.

Для одномодових волокон використовується лазерне джерело світла, найчастіше це лазерні діоди, зокрема DFB-лазери (Distributed Feedback Lasers). Вони генерують когерентне (синхронне), вузькоспектральне, інтенсивне світло, яке найбільш підходить для передачі по одномодовому каналу. Ці лазери працюють зазвичай на довжинах хвиль 1310 нм або 1550 нм, де оптичне волокно має мінімальні втрати й дисперсію.

Одномодові оптичні волокна класифікуються за стандартом ІТУ-Т G.65x та мають підтипи з відмінностями у характеристиках:

- G.652 – є першим стандартним одномодовим оптичним волокном вперше створеним у 1984 році, яке оптимально використовується для довжини хвилі 1310 нм, адже при цьому дисперсія низька. Також можна використовувати для довжини хвилі 1550 нм, але з більшою дисперсією (майже не використовується через високу дисперсію).

Цей стандарт має чотири підтипи: G.652.A, G.652.B, G.652.C і G.652.D. G.652.A є найстарішою версією, яка призначена для роботи з на довжині хвилі 1310 нм, сьогодні не використовується для побудови мереж, оскільки повноцінно замінюється іншими типами з ширшим функціоналом. G.652.B – покращена версія А, з кращими параметрами дисперсії та загального затухання, проте все ще переважно оптимальна для 1310 нм. Частково може працювати на 1550 нм, але без гарантії відсутності водяного піку (області підвищеного загасання в оптичному волокні, яка спричинена наявністю іонів гідроксилу, залишених у склі під час його виробництва. Ці іони сильно поглинають світло в діапазоні 1360–1460 нм). У типах А та В ця область не використовувалась для передачі сигналу, оскільки загасання в ній було дуже високим і це обмежувало використання таких волокон у системах CWDM, які потребують пропускання широкого спектра довжин хвиль. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) – це технологія грубого мультиплексування за довжинами хвиль, яка передає кілька оптичних сигналів по одному волокну, кожен на своїй довжині хвилі, з широкими інтервалами між каналами. Вона є простішою, дешевшою і менш щільною у порівнянні з DWDM. Ця технологія пропускає

одночасно до 18 каналів у діапазоні 1270-1610 нм з інтервалом між каналами у 20 нм та можливістю передачі на відстані до 80 км без підсилення. У пізніших типах волокна, таких як G.652.C та G.652.D, виробники навчилися очищувати скло від іонів, і таким чином усунули водяний пік. Це дозволило використовувати весь спектр сигналу від 1260 до 1625 нм і це дало змогу використовувати ці волокна у CWDM системах, зокрема через волокно G.652.C. Підтипи G.652.C та G.652.D мають однакові характеристики пропускання довжин хвиль, однак їх відмінність у тому, що в моделі D краще контрольована дисперсія при довжині хвилі 1550 нм, також має нижче затухання. Через це така модель є кращою для високошвидкісних і щільно мультиплексованих систем, таких як DWDM, XGS-PON, 100G Ethernet та частково для FTTH. Натомість підтип G.652.C може використовуватися частіше в CWDM, але менш ефективний при вищих швидкостях або довгих дистанціях та поступово стає застарілим.

- G.653 (DSF, Dispersion Shifted Fiber) – одномодове волокно зі зсувом дисперсії, створене у 1986 році (нині стандарт неактуальний та не має поділу на підтипи), використовується для довжини хвилі 1550 нм, при якій дисперсія практично нульова, однак це має суттєвий недолік для використання у технології DWDM – нелінійний ефект FWM (Four Wave Mixing) – це нелінійне оптичне явище, яке виникає, коли кілька довжин хвиль світла пропускаються через волокно одночасно (рис. 2.2) і це унеможлиблює використання цього волокна у сучасних DWDM-лініях зв'язку. FWM виникає, коли три оптичні хвилі на частотах f_1 , f_2 та f_3 взаємодіють у волокні, створюючи четверту хвилю на частоті f_4 , яка генерується нелінійною взаємодією між вихідними хвилями. Частота нової хвилі визначається за формулою: $f_4=f_1+f_2-f_3$.

Ефект FWM напряму залежить від хроматичної дисперсії оптичного волокна. Таким чином, якщо волокно має нульову дисперсію або низьку – ефект FWM посилюється. І навпаки, у волокнах з більшою дисперсією цей ефект зменшується. FWM може обмежувати спектральну ефективність системи через ввід небажаних сигналів в спектр. Тому це викликає практичне обмеження на те,

наскільки близько можуть бути розташовані канали WDM, оскільки зменшення інтервалу між каналами збільшує ймовірність виникнення ефекту змішування оптичних хвиль.

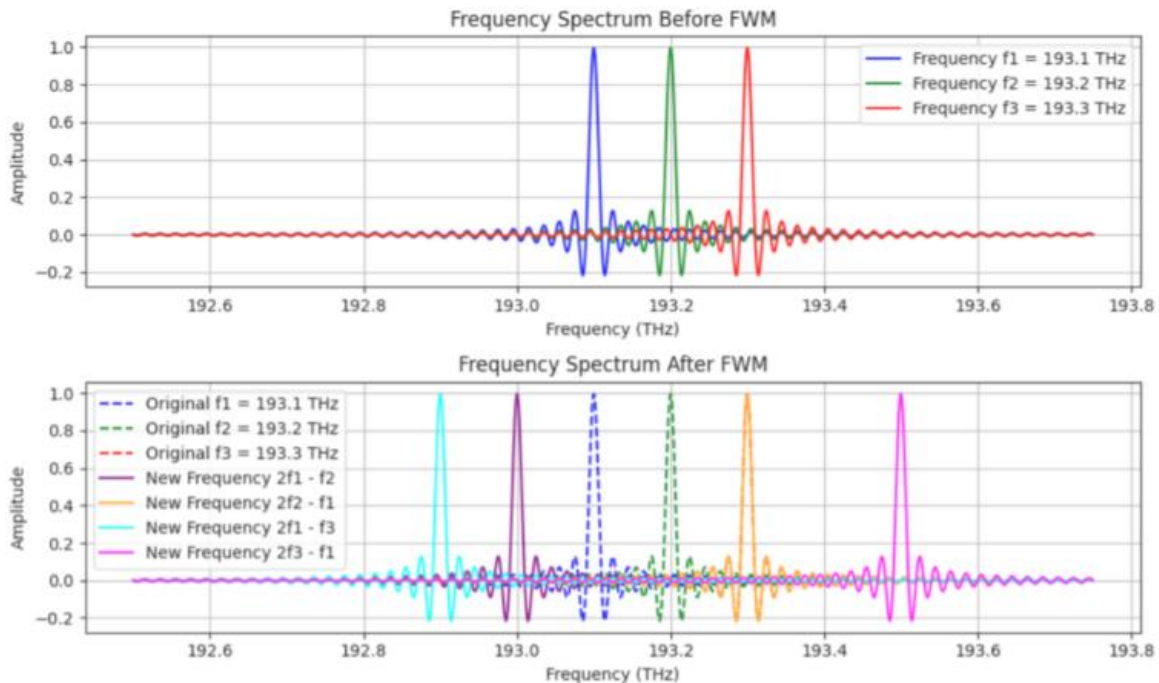


Рисунок 2.2 – Приклад виникнення четвертої хвилі через взаємодію оригінальних хвиль у DWDM

DSF використовувався раніше у міжміських мережах, однак наразі майже не використовується, оскільки має обмежений функціонал та може бути замінений більш оптимізованими стандартами.

- G.654 – одномодове волокно, створене у 1988 році, яке призначене для наддовгих магістральних ліній зв'язку, використовується у якості міжконтинентального підводного кабелю. Це волокно (LEAF, Larger Effective Area Fiber) добре оптимізовано для довжин хвиль 1550-1625 нм. Дане волокно має збільшений діаметр ядра у 10-11 мкм, завдяки чому має зменшену нелінійність і разом із цим підвищену потужність сигналу, та вищу дисперсію (16–20 пс/нм·км при 1550 нм) ніж у G.652, завдяки якій волокно G.654 має перевагу у використанні оптичних DWDM систем, адже у такому волокні буде наднизький ефект утворення чотирихвильового змішування FWM у С-діапазоні (1550нм). Також до переваг можна віднести мінімальні втрати сигналу у

порівнянні з іншими стандартами. Це дає можливість такому кабелю бути використаним у надвисокошвидкісних системах 100G, 400G, 800G, а також DWDM системах довжиною понад 1000 км без підсилення сигналу завдяки когерентній модуляції. Попри переваги, такий стандарт волокна має значно дорожчу вартість у порівнянні зі стандартом G.652, а також часткову або повну несумісність із ним через різницю у діаметрах ядра і потребує адаптації. Окрім цього волокно G.654 менш гнучке, тому його в певних випадках з обмеженими умовами буває складніше встановлювати. Цей стандарт не має офіційно затверджених підтипів ІТУ-Т, проте в технічній і комерційній літературі іноді виділяють варіації всередині G.654 для відображення оптимізації під різні довжини хвиль або швидкості передачі, які оптимізовані для певних застосувань: підводний зв'язок, наддалекі наземні лінії. Таким чином стандарт умовно поділяється на G.654.A, який є класичним, G.654.B/C/D, які оптимально використовуються для 100G/200G/400G DWDM, особливо в L-діапазоні, і також є більш новий тип G.654.E, який виготовляється з чистого кварцу та має мінімальні загасання сигналу. Воно створено у тому числі і для використання у мережах 5G, завдяки можливості задовільнити потребу у пропусканні швидкості 400G, отже цей стандарт стає новим вибором для побудови таких мереж.

- G.655 (NZ-DSF, Non-Zero Dispersion Shifted Fiber) – оновлена у 1996 році версія G.653 (DSF), одномодове волокно, спроектоване з оптимізацією, яка краще підходить для DWDM мереж наземної інфраструктури. Має два неофіційні підтипи С та D, де С ближче до G.653 та на сьогодні майже не використовується. Це волокно має близьконульову дисперсію. Non-Zero Dispersion – спеціально підібрана дисперсія для DWDM, де щільність каналів 50 GHz або менше створює ризик нелінійних перешкод. Дисперсія у цьому стандарті не є нульовою, але достатньо висока задля запобігання ефекту FWM і водночас досить низька, для можливості її компенсувати та уникати дисперсійних втрат, особливо у 40G/100G+ мережах. G.655 дозволяє легше керувати хроматичною дисперсією та знижує потребу в DCF (Dispersion Compensation Fiber) або DSP-обчисленнях, у порівнянні з системами у яких

використовуються G.652 або G.654, де на швидкостях понад 10 Гбіт/с велика дисперсія складна для компенсації. Типові значення дисперсії волокна G.655 складають 4–7 пс/нм·км на довжині хвилі 1550 нм. Таке значення стало «золотою серединою» для універсальності, якщо порівнювати з G.652 де типова дисперсія складає близько 17 пс/нм·км та G.653, де дисперсія приблизно 0 пс/нм·км. Стандарт G.655 може підтримувати трафік до 400G, але при цьому необхідно будувати мережі з більш короткими відстанями або використовувати підсилювачі та когерентні приймачі, проте найчастіше базове використання здійснюється на швидкостях 10-100G

- G.656 Wideband NZ-DSF – це оптичне волокно, розроблене у 2004 році для широкосмугових DWDM-систем для підтримки роботи у ширшому спектрі довжин хвиль, ніж класичні волокна G.652 чи G.655. Воно розширює роботу мережі за межі C-діапазону, використовуючи інфрачервоні S-, C- і L-діапазони 1460–1625 нм (рис. 2.3.), що значно збільшує пропускну здатність і дозволяє пропускати високошвидкісний трафік 100G, 400G, 800G Ethernet для різних відстаней - LR (Long Reach) та ER (Extended Reach) (табл. 2.1. – швидкості стандартів Ethernet для одномодових волокон). Має стандартний діаметр волокна близько 9.5–10.5 мкм та трохи більший показник дисперсії у 6–11 пс/нм·км, ніж у G.655. Особливість Wideband NZ-DSF полягає у тому, що при проектуванні мережі необхідно враховувати S- і L-діапазони світла, які підтримуються не усіма передавачами/приймачами та підсилювачами, тому сумісність обладнання має обмеження. Проте цей стандарт знаходить застосування у сучасних оптичних мережах через значно високу пропускну здатність з можливістю будувати мережі до 70-100 км без підсилення сигналу.

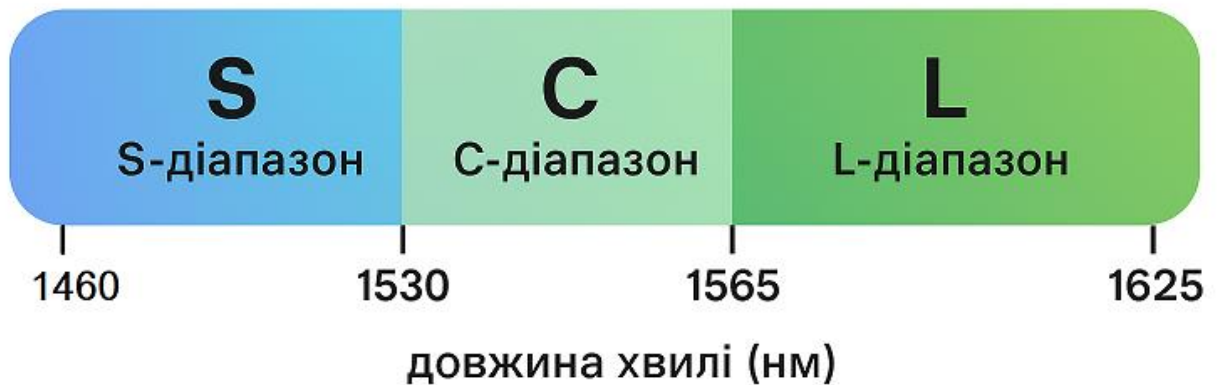


Рисунок 2.3. – Підтримувані ПЧ-діапазони категорією волокна G.656

- G.657 – відносно новий стандарт одномодового оптичного волокна, вперше створений у 2007 році. Головною особливістю даного волокна є висока гнучкість та стійкість до вигинів. Це волокно пристосоване для сигналів з довжиною 1310 нм та 1550 нм, як і у стандарті G.652, через що має повну та часткову сумісності залежно від підтипу з певною гнучкістю.

Таблиця 2.1 – Швидкості стандартів Ethernet для одномодових волокон

Стандарт	10GBASE-LR	10GBASE-ER	40GBASE-LR4	100GBASE-LR4	100GBASE-ER4	200GBASE-LR4	400GBASE-LR8
Швидкість	10 Гбіт/с	10 Гбіт/с	40 Гбіт/с (4×10G)	100 Гбіт/с (4×25G)	100 Гбіт/с (4×25G)	200 Гбіт/с (4×25) CWDM	400 Гбіт/с (8×50G) CWDM

У G.657 розрізняють основні підтипи волокон: A1, A2, B2, B3, кожен з яких має свій радіус допустимого згину та певну сумісність із сучасним підтипом волокна G.652.D (табл. 2.2.).

Таблиця 2.2 – основні властивості підтипів G.657

Підтип	Радіус згину	Сумісність із G.652
G.657.A1	≥ 10 мм	Максимальна повна з G.652.D
G.657.A2	≥ 7.5 мм	Повна
G.657.B2	≥ 5 мм	Часткова
G.657.B3	$\geq 2.5-5$ мм	Відсутня

До особливостей можна віднести надзвичайно низькі втрати сигналу (приблизно 0.1 дБ при довжині хвилі 1550 нм) при малому радіусі вигину. Волокно можна згинати навіть під кутом 90° без значних втрат. З такою особливістю можна використовувати такий кабель щільно абонентам у будинках, офісах, компактно прокладати кабель у стінах тощо (використовувати конфігурації FTTx (Fiber To The X), зокрема FTTH (Fiber To The Home)).

Таким чином новіші стандарти, такі як G.652.D та G.657 стали основними для використання у структурах пасивних оптичних мереж (PON), зокрема у GPON (Gigabit Passive Optical Network), оскільки одномодове волокно підтримує передачу на великі відстані, що важливо для GPON, особливо в сільській місцевості або при великому покритті, а також одномодове волокно має низькі втрати сигналу та підходить для передачі високих швидкостей.

GPON належить до класу пасивних оптичних мереж (PON), де оптичний сигнал від головної станції до абонентів передається через пасивні компоненти (розгалужувачі, сплітери), без використання електроживлення на маршруті. Мережа PON складається з OLT (Optical Line Terminal) – терміналу на стороні провайдера, ODN (Optical Distribution Network) – системи волоконно-оптичних ліній і пасивних сплітерів, та пристрою на стороні абонента - ONT (Optical Network Terminal) або ONU (Optical Network Unit). Сигнал від OLT подається на сплітер, який може мати розгалуження 1:8, 1:16 або навіть 1:64. Таким чином, одна оптична лінія може обслуговувати десятки користувачів. При цьому мати швидкість передачі: до 2.5 Гбіт/с на завантаження і до 1.25 Гбіт/с на відвантаження, а максимальна кількість користувачів може складати до 128 на один порт. Проте передача даних здійснюватиметься за типом мультиплексування за часом.

Наразі у багатьох українських містах такі провайдери, як Triolan, Volia, Lanet, Інтертелеком та інші, активно впроваджують GPON для заміни старих Ethernet- або DSL-мереж. Завдяки GPON можна підключати користувачів до гігабітного інтернету навіть у багатоповерхівках без необхідності прокладати

окремий кабель на кожного абонента, адже відбувається пасивне розгалуження від головної лінії.

Також PON зараз впроваджується для використання у мобільних мережах 5G, що потребують високої щільності базових станцій, які мають бути з'єднані з транспортною мережею високої пропускної здатності. PON ідеально підходить для підключення малих стільникових базових станцій особливо в міських умовах.

Проте у PON є кілька недоліків, наприклад розділення каналу між усіма абонентами спліттера через що швидкість може знижуватись при перевантаженні. Але це вирішується за допомогою використання нових технологій - XGS-PON (10 Гбіт/с PON) та NG-PON2 (40 Гбіт/с), проте для окремих абонентів зазвичай достатньо швидкості звичайної GPON.

2.3.2. Багатомодові оптичні волокна

Багатомодові оптичні волокна (MMF – Multimode Fiber) були створені для передачі великого обсягу даних на відносно короткі відстані у порівнянні з SMF, насамперед у межах будівель, кампусів або центрів обробки даних тощо. Вони були створені у відповідь на потребу у доступному й зручному способі передачі цифрової інформації з високою швидкістю, без використання металевих кабелів, які мають обмеження щодо пропускної здатності та піддаються впливу електромагнітних перешкод.

Головною відмінністю від одномодових волокон є те, що багатомодові волокна мають значно товщий діаметр ядра, який складає 62.5 мкм для найстарішої версії OM1, та 50 мкм для наступних стандартів OM1–OM5 відповідно до ISO/IEC 11801. Така значна товщина знадобилася для можливості передавати відразу декілька світлових променів (мод), кожен з яких має свій шлях для руху всередині волокна. Такий багатопроменевий прохід сигналу може транспортувати паралельно велику кількість даних. Однак такий метод передачі стикається з проблемою – інтермодовою дисперсією, у якій сигнали, що рухаються різними траєкторіями, досягають кінцевої точки в різний час і це у

свою чергу призводить до спотворень сигналу, а також обмежує максимальну довжину волокна.

Типово багатомодові оптичні кабелі використовуються на ділянках до 550 м при швидкості 10 Гбіт/с та до 2 км при швидкості 100 Мбіт/с. Незважаючи на значно обмежену дистанцію передачі, багатомодові волокна все ж часто використовують замість декількох одномодових волокон через те, що MMF волокно є дешевшим у встановленні, оскільки його можна використовувати з менш дорогими джерелами світла – світлодіодами або VCSEL-лазерами (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers) (рис. 2.4.), які не мають такої точності як лазери для одномодових систем. Світлодіоди є дешевшими і простішими джерелами, які випромінюють некогерентне, широкоспектральне світло, що підходить для багатомодової передачі на короткі відстані до кількох сотень метрів. Типова довжина хвилі для багатомодових систем – 850 нм або 1300 нм. Довжина хвилі 850 нм використовується найчастіше, особливо з VCSEL-лазерами у високошвидкісних локальних мережах зі швидкостями 10G/40G. Однак навіть з цими лазерами, які мають точнішу довжину хвилі ніж світлодіод, дальність зазвичай обмежується кількома сотнями метрів через виникнення значної міжмодової дисперсії, хоч швидкість передачі може бути високою. Тому багатомодові системи використовуються на невеликих відстанях, оскільки таке обладнання є досить дешевим та простішим в обслуговуванні, проте можуть якісно передавати великі швидкості сигналів без електромагнітних завад.

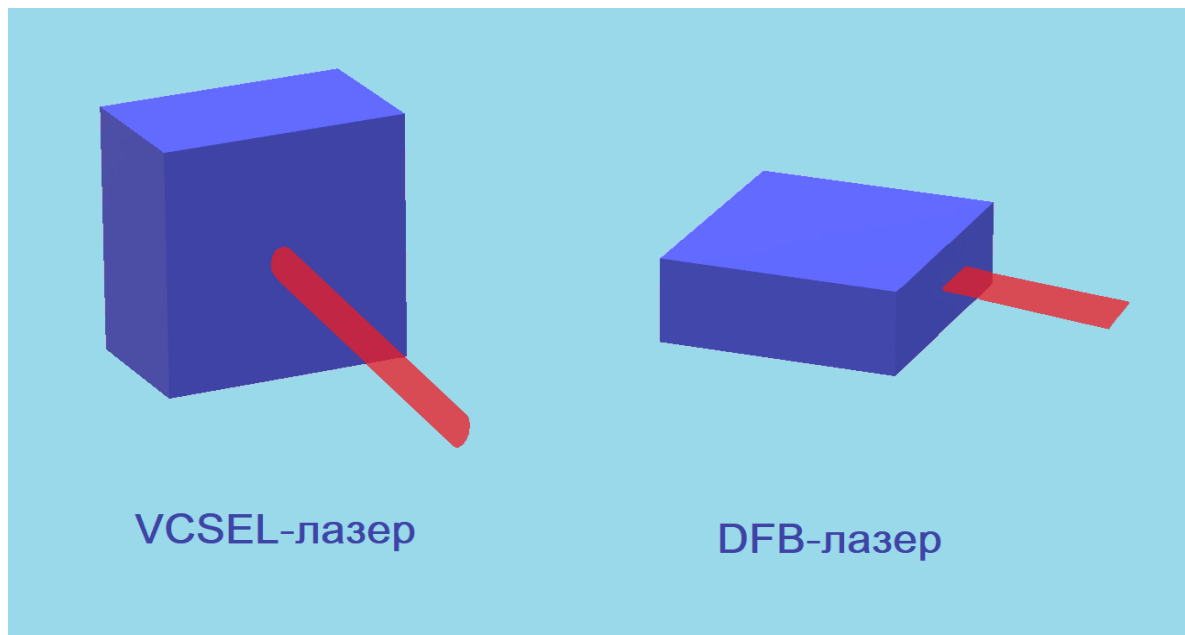


Рисунок 2.4 – VCSEL-лазер та DFB-лазер

OM1 (Optical Multimode) – це найстаріший та найменш продуктивний тип багатомодового оптичного волокна, який був стандартизований для використання в телекомунікаційних мережах ще на початку 1980-х років. Це волокно має діаметр ядра 62.5 мкм та призначене для роботи з джерелами світла, такими як світлодіоди, а не лазери, оскільки такі джерела дешевші й не вимагають точного центрування, а також на той час OM1 проектувався саме під використання світлодіодного джерела, оскільки VCSEL тоді ще тільки починали розвиватися, окрім цього не підходить для їх використання через збільшену товщину ядра через сильніше виникнення міжмодової дисперсії. Теоретично з таким лазером це волокно можна використовувати, проте робоча відстань буде досягати лише кілька десятків метрів, оскільки це волокно має ефективну смугу пропускання 200 МГц*км.

Хоча OM1 підтримує передачу даних на швидкостях до 1 Гбіт/с, його ефективна робоча відстань практично обмежена до 275 м (табл 2.3. – можливі дистанції передачі швидкостей по багатомодових волокнах). Через відносно велику модову дисперсію OM1 не підходить для новітніх високошвидкісних застосувань від 10 Гбіт/с та більше. Для таких задач розроблені покращені типи волокон – OM2, OM3, OM4 і OM5, які мають менший діаметр серцевини і завдяки цьому кращі оптичні характеристики. У сучасних мережах OM1 майже

не використовується в новому обладнанні, але все ще може бути присутній у старій інфраструктурі, якій понад 20 років.

OM2 – це друге покоління багатомодових оптичних волокон, яке з'явилося у кінці 1980-х як покращення OM1. Воно призначене для передачі даних на вищих швидкостях і на більші відстані, має при цьому невелику вартість і сумісність із LED-джерелами світла.

На відміну від OM1, OM2 має ядро діаметром 50 мкм, що зменшує міжмодову дисперсію – основну перешкоду для високошвидкісної передачі в багатомодових волокнах. Це дозволяє OM2 передавати дані на вищих швидкостях, до 1 Гбіт/с на відстань до 550 метрів при використанні джерела світла з довжиною хвилі у 850 нм а також має більшу смугу пропускання – 500 МГц/км.

Стандарт OM2 все ще насамперед був розрахований на LED-джерела, його оптичні характеристики вже помітно кращі, і він певною мірою сумісний із VCSEL-лазерами, але, як і у випадку з OM1, ефективність VCSEL на волокні OM2 обмеженою. Таким чином, за даними Fluke Networks OM2 можна використовувати для передачі швидкості 1 Гбіт/с на довжині 550 метрів, а 10 Гбіт/с на довжині усього 82 метри, однак це вже трохи більше у порівнянні з 33 метрами у волокні OM1.

З появою OM3 та OM4, які призначені для VCSEL, OM2 поступово втратив популярність у нових проєктах, але все ще використовується в наявних системах, де швидкості до 1 Гбіт/с є достатніми.

OM3 волокно стало третім поколінням багатомодових волокон, яке спроектували у 2002 році спеціально для роботи з VCSEL-лазерами. Поява цього стандарту стала зумовленою тим, що при переході на більш швидкісні системи 10G, старі стандарти OM1 та OM2 не могли задовільнити достатньою довжиною волоконно-оптичної лінії зв'язку. Тоді OM3 став гарним технологічним рішенням, яке надало змогу передавати ті самі швидкості на дальність до 300 метрів, у порівнянні з 33 м та 82 м у попередніх стандартах волокон. Оскільки OM3 розроблялося під використання лазерів, його виготовляли з покращеною

геометрією та чистотою матеріалу ядра, що дозволило зменшити міжмодову дисперсію. Ці умови стали коректніше підходити для VCSEL, які мають коротку довжину когерентності і не так критично сприймають неідеальності волокна, але все одно вимагають чіткого профілю заломлення.

Також особливістю OM3 є його висока смугово-пропускна здатність, яка складає щонайменше 2000 МГц*км на 850 нм, а також волокно має нижчий показник загасання – 3 дБ/км при 850 нм світінні та 1 дБ/км при 1300 нм і ці значення менші у порівнянні з OM1 та OM2 (3.5 дБ/км при 850 нм та 1.5 дБ/км при 1300 нм) згідно зі стандартами ISO/IEC 11801 та TIA-492. OM3 також підтримується майже всіма сучасними активними компонентами (трансіверами, патч-панелями, адаптерами тощо).

OM4 – вдосконалене багатомодове оптичне волокно, створене у 2009 році як еволюція OM3 для здійснення ще вищої продуктивності в умовах зростаючих потреб у передачі великих обсягів даних на короткі та середні відстані. Головна його відмінність від OM3 у значно більшій ефективній смузі пропускання, яка досягає щонайменше 4700 МГц*км при довжині хвилі 850 нм, завдяки покращенню показника заломлення світла і це дозволило різним модам світла рухатись більш синхронно, тобто прибуваючи до кінця волокна з меншою різницею в часі, що зменшує інтермодову дисперсію. Саме це дає змогу досягати стабільної передачі даних на швидкостях 10 Гбіт/с до 400 метрів, а 40 Гбіт/с або 100 Гбіт/с до 150 метрів за стандартами SR4, які передбачають передачу кількома паралельними волокнами. OM4 призначене для тих самих застосувань, але з вищою продуктивністю та дальністю передачі на високих швидкостях, а також має зворотну сумісність з OM3.

OM5 – це найновіший тип багатомодового оптичного волокна, розроблений у 2016 році для підтримки широкосмугової передавальної технології на кількох довжинах хвиль. Це волокно підтримує технологію SWDM (Shortwave Wavelength Division Multiplexing) – передачу даних з використанням декількох довжин хвиль від 850 до 950 нм по одному волокну. Фізично OM5 має ту саму геометрію, що й OM3 та OM4 у 50 мкм, і повністю з ними сумісне, але

відрізняється розширеною оптичною смугою пропускання в ширшому спектрі. Його ефективна смуга пропускання при 850 нм залишається на рівні 4700 МГц*км, як у OM4, але додатково OM5 гарантує 2470 МГц*км при 953 нм (однак це не використовується, бо є граничною межею тестування). На практиці використовуються довжини хвиль 850 нм, 880 нм, 910 нм та 940 нм. Незважаючи на свої можливості мультиплексування, OM5 досі рідше використовується у масових побудовах мереж через вищу вартість і обмежену кількість обладнання, що підтримує SWDM. Однак воно відкриває потенціал для 400 Гбіт/с та вище без переходу на одномодові рішення. Це досягається завдяки можливості передавати кілька каналів одночасно по одній парі волокон, кожен на своїй довжині хвилі. Це схоже на одномодове WDM, але в короткохвильовому спектрі, для багатомодових систем. Наприклад, якщо по кожній з 4-х довжин хвиль передати по 25 Гбіт/с, то отримаємо 100 Гбіт/с по одному волокну. Якщо таких волокон 4 пари, як у стандарті SR4 (Short Reach, тобто коротка дистанція, 4 – чотири пари волокон) (табл 2.4.), то отримаємо 400 Гбіт/с загалом. OM5 зберігає повну сумісність з OM4/OM3 для таких технологій, як наприклад 40GBASE-SR4 (використовує 8 волокон: 4 на передавання і 4 на прийом), 100GBASE-SR4, де передача йде одночасно по 4 (по 10/25 Гбіт/с кожне). Додавши до цього SWDM, можна збільшити обсяг передачі в рази, не змінюючи кабельну архітектуру.

Таблиця 2.3 – Можливі дистанції передачі швидкостей по багатомодових волокнах

Стандарт волокна	Діаметр ядра	Кількість мод при 850 нм	Макс. довжина при 100Мбіт/с	Макс. довжина при 1Гбіт/с	Макс. довжина при 10Гбіт/с	Макс. довжина при 40/100Гбіт/с
OM1	62.5 мкм	850-1000	До 2 км	275 м	33 м	-
OM2	50 мкм	500-600	До 2 км	550 м	82 м	-
OM3	50 мкм	500	До 2 км	1000 м	300 м	100 м
OM4	50 мкм	500	До 2 км	1000 м	400 м	150 м
OM5	50 мкм	500	До 2 км	1000 м	400 м	150 м

Кількість мод M в волокні оцінюється приблизно за формулою:

$$V \approx \frac{V^2}{2},$$

Де V – це нормалізована частота, яка дорівнює:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \times NA,$$

Де a – радіус ядра,

λ – довжина хвилі світла,

NA – числова апертура.

Таблиця 2.4. – Розподіл швидкостей по MMF у стандартах Ethernet.

Стандарт	10GBASE-SR	25GBASE-SR	40GBASE-SR4	100GBASE-SR10	100GBASE-SR4	200GBASE-SR4	400GBASE-SR8
Швидкість	10 Гбіт/с	25 Гбіт/с	40 Гбіт/с (4×10G)	100 Гбіт/с (10×10G)	100 Гбіт/с (4×25G)	200 Гбіт/с (4×50G)	400 Гбіт/с (8×50G)

2.3.3. Методи компенсації та контролю дисперсій

Зазвичай оптичні волокна мають певний показник дисперсії при проходженні світла. Через вплив дисперсій відбувається погіршення сигналу, оскільки його компоненти можуть загасати, або розтягуватися у часі. Однак, наявність дисперсії так і повна її відсутність мають свої недоліки (наприклад виникнення FWM під час використання DWDM).

Тому для регулювання інтенсивності дисперсії використовуються як пасивні методи (наприклад використання стандартів волокон з низькою дисперсією, або додавання ділянки волокна з від'ємною дисперсією), так і активні, наприклад електронно-цифрову компенсацію.

Розглянемо пасивні методи компенсації. Серед таких є компенсація за допомогою з протилежною дисперсією. Використання цього методу полягає в тому, що до основної лінії зі стандартним одномодовим волокном (типу G.652) додається вставка з іншого типу волокна, яке має негативне значення дисперсії. Це спеціальне волокно часто називають компенсуючим волокном, або DCF (Dispersion Compensating Fiber). Його призначення полягає в тому, щоб

скасувати або значно зменшити накопичену хроматичну дисперсію, яка виникає в результаті далекої передачі сигналу по стандартному волокну. У телекомунікаціях хоча зазвичай використовується світло в інфрачервоному діапазоні, та навіть невеликі відмінності у швидкості поширення різних довжин хвиль призводять до того, що імпульс розтягується в часі. Це викликає перекриття сигналів і деградацію даних на приймальній стороні. Компенсуюче волокно має дисперсію такого самого порядку, як і стандартне волокно, але з протилежним знаком. Наприклад, якщо стандартне одномодове волокно має позитивну дисперсію $+17$ пс/нм*км у діапазоні 1550 нм, то DCF може мати дисперсію приблизно -85 пс/нм*км. Таким чином, п'ять кілометрів компенсуючого волокна можуть компенсувати дисперсію, що накопичується на 25 кілометрах стандартного волокна. Після проходження через DCF, спотворений імпульс частково або повністю відновлюється до своєї початкової форми. DCF зазвичай додають у телекомунікаційні лінії на регулярних інтервалах разом з підсилювачами, наприклад, EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), оскільки DCF саме по собі має вищі втрати (близько $0,5$ дБ/км) порівняно зі стандартним волокном. Тому часто волоконна лінія будується як секції стандартного волокна, після яких іде блок підсилення та компенсації, що містить підсилювач і DCF-модуль. Згодом, для оптимізації й зниження втрат та витрат, почали впроваджувати волокна зі знизеним значенням дисперсії (наприклад, G.655 NZ-DSF), які мають більш плоский профіль дисперсії, що зменшує потребу в DCF. Проте метод компенсації дисперсії за допомогою DCF залишився важливим та необхідним у системах WDM, де десятки каналів одночасно передаються по одному волокну і точна корекція дисперсії для кожного з них є обов'язковою для підтримки якості передачі.

Іншим прикладом пасивної технології є використання дифракційних решіток, наприклад, VIPA (Virtually Imaged Phased Array), які створюють часову затримку для різних довжин хвиль за рахунок багатопроменевого інтерференційного ефекту. Ці пристрої зазвичай використовуються у

вужькоспектральних WDM-системах і поєднуються з іншими фільтраційними компонентами.

Окрім такого метода є ще один пасивний метод компенсації дисперсії – використання фазових сіток Брегга. Фазові сітки Брегга, або FBG (Fiber Bragg Grating), є ефективним інструментом для компенсації хроматичної дисперсії в сучасних оптоволоконних системах передачі. Це оптичні структури, які вбудовуються у серцевину волокна і створюються шляхом періодичної зміни показника заломлення. Такі зміни формуються з використанням ультрафіолетового випромінювання, що модулює показник заломлення в заданому ритмі, утворюючи інтерференційну структуру, яка фільтрує сигнал. Принцип дії фазових сіток Брегга базується на явищі Брегга – селективному відбитті світлових хвиль, довжина яких відповідає певній резонансній умові. Сітка відбиває лише вузький спектральний діапазон світла, тоді як решта спектра проходить далі (рис 2.5. – приклад роботи решіток Брегга).

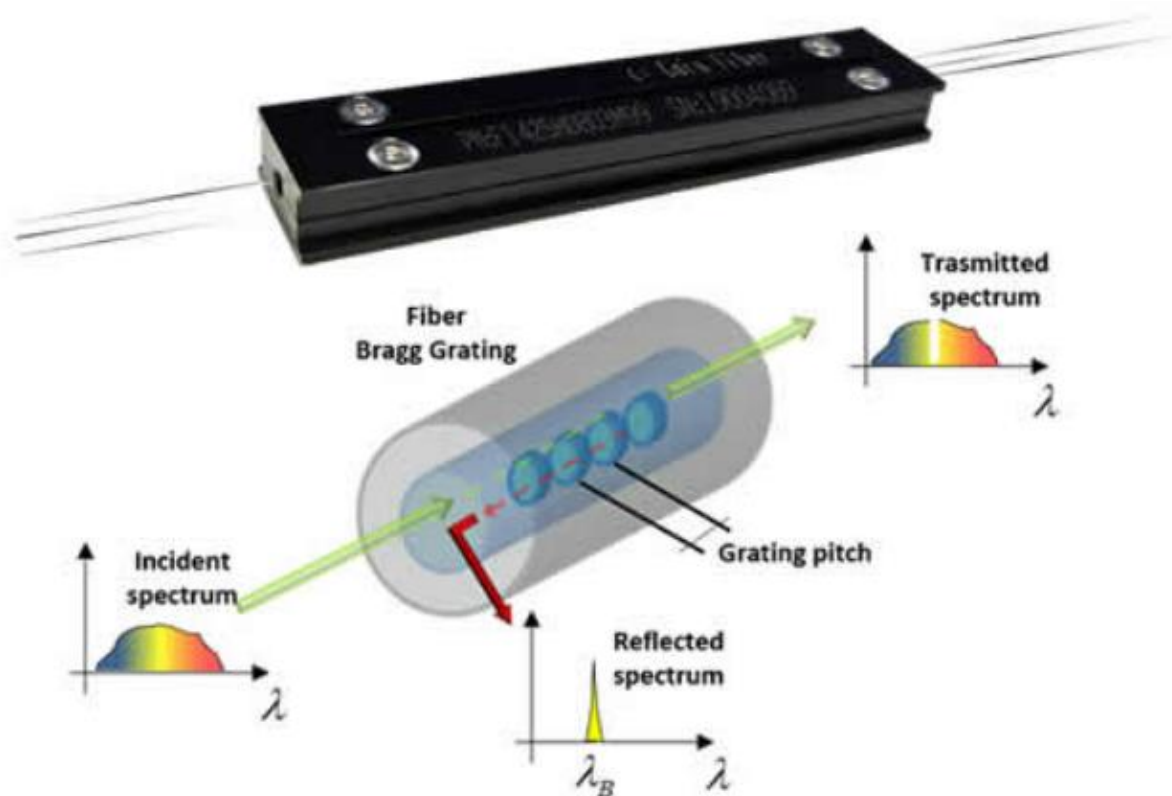


Рисунок 2.5 – Приклад роботи решіток Брегга в оптичному волокні

Це явище і дозволяє використовувати FBG як дисперсійні компенсатори, оскільки при налаштуванні сітки з непостійним кроком (chirped FBG), відображення різних довжин хвиль відбувається на різній глибині сітки. Таким чином, коротші довжини хвиль, які прибувають раніше, проходять довший шлях до відбиття і затримуються, тоді як довші довжини хвиль відбиваються ближче до входу і швидше повертаються. Така характеристика допомагає зменшити розтягнення імпульсу, що виникло внаслідок хроматичної дисперсії.

Важливою перевагою фазових сіток Брегга є можливість виконувати дисперсійну компенсацію в компактному і пасивному компоненті з дуже малою втратою. На відміну від компенсуючих волокон DCF, FBG не потребує великої довжини і не додає істотних втрат потужності, що важливо в системах WDM. Сучасні FBG-компенсатори здатні обробляти сигнали на високих швидкостях передачі, від 10 Гбіт/с і більше, з дуже високою точністю корекції та стабільністю. Такі компоненти часто інтегруються в модулі транспондерів чи фільтраційних блоків в оптичних мережах DWDM. Вони дозволяють виконувати як точкову компенсацію дисперсії на окремих каналах, так і групову, для певного спектрального діапазону. Оскільки фазова сітка є структурою з заданим профілем, її можна виготовити з урахуванням індивідуальних характеристик мережі, таких як довжина лінії, тип волокна та робоча довжина хвилі. Серед технічних обмежень слід зазначити, що FBG мають вузьку смугу пропускання, тому їхня ефективність найвища в щільно обмежених WDM-системах. Крім того, вони є чутливими до температури, і тому часто вимагають температурної стабілізації або компенсуючих технологій для збереження стабільності фільтраційного профілю в польових умовах.

Тепер розглянемо активні методи компенсації дисперсій. До активних методів компенсації дисперсії в оптичних системах зв'язку належать такі пристрої, які потребують електроживлення та електронної чи оптоелектронної обробки сигналу. Вони відрізняються активним втручанням в передаваний сигнал або застосовують інтелектуальну обробку даних з метою компенсації впливу дисперсії. Одним із найбільш поширених активних методів є електронна

компенсація дисперсії (EDC – Electronic Dispersion Compensation), яка складається з цифрових фільтрів у приймальному обладнанні. Для цього можуть використовуватися як лінійні адаптивні фільтри, так і більш складні алгоритми обробки, наприклад методи зворотного вирівнювання (decision feedback equalization), які враховують попередні символи для зменшення впливу інтерсимвольної інтерференції.

Ще одним прикладом активної компенсації є цифрова когерентна обробка сигналу, яка використовує когерентні приймачі та цифрові сигнальні процесори (DSP, Digital Signal Processor). Завдяки їм можливо не лише компенсувати хроматичну дисперсію, а й усувати PMD, нелінійні ефекти та навіть шум фазової нестабільності лазерів. Такий підхід є справді ефективним у високошвидкісних системах від 100 Гбіт/с і вище, а також у транспортних мережах DWDM та OTN.

EDC використовує цифрові сигнальні процесори (DSP) або аналогові високошвидкісні схеми, які обробляють електричний сигнал вже після надходження до оптичного приймача. У такій схемі оптичний сигнал спочатку перетворюється на електричний, а потім проходить фільтрацію для відновлення початкової форми імпульсів. Найбільш поширеними алгоритмами для EDC є лінійна еквалізація, адаптивна фільтрація (наприклад, LMS – Least Mean Squares), та DFE (Decision Feedback Equalizer), який використовує зворотній зв'язок для усунення інтерсимвольної інтерференції. Проте EDC обмежена по відношенню до дуже високих значень дисперсії (особливо в лініях понад 80 км), а також не може самостійно компенсувати поляризаційно-модові ефекти або нелінійності, що виникають у волокні при високих потужностях сигналу. Також до активних методів належать оптичні компенсатори на основі змінюваних фазових елементів, таких як фазові модулятори або керовані інтерферометри, які можуть динамічно підлаштовуватись під змінні умови сигналу та середовища, це є переважною можливістю особливо для багатомодових волокон, у яких температурні впливи можуть заважати сигналу.

Окремо DSP частіше використовується у сучасних когерентних оптичних приймачах, де сигнал після фотодетекції не просто відновлюється, а аналізується

і обробляється на рівні математичної моделі для максимально точного відтворення початкової інформації. Процес починається з того, що когерентний приймач приймає оптичний сигнал одночасно в обох поляризаційних площинах і на двох квадратурах (I (інфазний) та Q (квадратурний) компонентах, тобто сигнал поділяється на дві синусоїди: одна в тій самій фазі з опорним сигналом (I), інша зсунута на 90° (Q). Разом вони дозволяють точно кодувати і відтворювати амплітуду та фазу сигналу), що створює чотириканальний електричний сигнал. Після цього він перетворюється в цифрову форму за допомогою високошвидкісних АЦП (аналогово-цифрових перетворювачів). І вже далі цифровий сигнальний процесор виконує ряд етапів компенсації та відновлення. На прикладі хроматичної дисперсії процесор враховує теоретичний профіль розтягування імпульсів і «згортає» його назад, стискаючи імпульси до початкової форми. Потім застосовується вирівнювання по поляризації, оскільки поляризація сигналу може коливатись з часом, алгоритми автоматично обирають оптимальне вирівнювання, часто використовуючи методи адаптивної матричної обробки. Далі DSP виконує відстеження фази та частоти, що необхідно для когерентної детекції, адже будь-який фазовий зсув між лазером передавача й приймача може спотворити сигнал. Для цього застосовуються PLL (phase-locked loop) або спеціалізовані алгоритми зворотного фазового вирівнювання. Якщо застосовується складна модуляція (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), то DSP також виконує демодуляцію, відновлюючи передані біти з багатовимірних амплітудно-фазових комбінацій. QPSK, 16-QAM і 64-QAM – це формати цифрової модуляції, які використовуються для передачі даних. Вони відображають інформацію у вигляді змін фази та амплітуди сигналу. QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) кодує 2 біти за символ, змінюючи фазу сигналу. 16-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) кодує 4 біти за символ, комбінуючи 4 рівні амплітуди та фази. 64-QAM є ще складнішим, він кодує 6 бітів за символ, що дозволяє передавати більше даних, але вимагає вищої якості сигналу. Ці схеми зараз використовуються в сучасних оптичних та бездротових мережах, наприклад, 5G та T2 для досягнення високих швидкостей передачі.

PLL – Phase-Locked Loop або фазова автопідлаштувальна система – це електронна схема у цифровому або аналоговому вигляді, яка синхронізує фазу та частоту локального генератора, наприклад, у приймачі з фазою вхідного сигналу, наприклад, з сигналом передавача. У когерентних приймачах, коли сигнал приймається не просто за амплітудою, а також за фазою, як у QPSK, 16-QAM, будь-який зсув фази між передавачем і приймачем призводить до зміщення точок у діаграмі модуляції, тобто до помилок у розпізнаванні символів. PLL дозволяє стежити за цією фазою в реальному часі, обчислювати її відхилення й коригувати, щоб правильно демодулювати сигнал.

Сучасні технології, як 100G, 400G, 800G та 1.6T, неможливо реалізувати без потужних DSP-блоків, які здатні обробляти десятки гігабіт у реальному часі. DSP дозволяє підлаштуватися до будь-яких змін у волоконному середовищі без необхідності встановлювати додаткове оптичне обладнання на лінії, тому вона стала невід’ємною частиною в архітектурі сучасних транспортних мереж типу OTN-OTN та DWDM.

Таким чином наприклад в одномодових волокнах типу G.652 використовується DCF із великою негативною дисперсією, FBG та EDC, а у волокнах G.655 додають DCF меншої довжини, а також оптичні фільтри.

Натомість компенсація у багатомодових волокнах має дещо інші методи, оскільки у цих волокнах домінує міжмодова дисперсія, а не хроматична. Отже у багатомодових волокнах зовнішня оптична компенсація як DCF або FBG майже не застосовується, бо модова дисперсія залежить від умов збудження, вигинів волокна, тощо. Разом із цим зазвичай компенсаційні фактори втілюються у багатомодові волокна у процесі їх виробництва. Проте для коротких ліній (до 100–300 м) сучасні багатомодові системи (10G/40G/100G) використовують DSP/EDC для компенсації залишкової дисперсії.

2.4 Конфігурації прокладення оптичного волокна до кінцевих користувачів

FTTx (Fiber To The X) або оптичне волокно до точки X – загальний термін оптичноволоконної мережі, який містить у собі конфігурації прокладення оптичного волокна. Основними конфігураціями є FTTN, FTTC, FTTB та FTTH – це архітектури побудови широкопasmового доступу до мережі з використанням оптичноволоконних кабелів. Ці архітектури визначають наскільки близько до споживача підведене оптичне волокно (рис. 2.5).

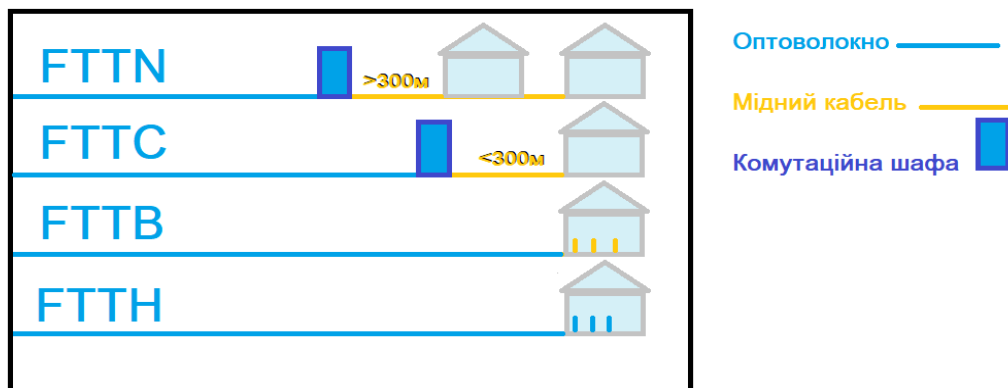


Рисунок 2.6 – Різниця конфігурацій FTTx

FTTN – Fiber to the Node або оптичне волокно до вузла, тобто волокно прокладається до найближчого вузла, (зазвичай розміщеної на вулиці або в мікрорайоні комунікаційної шафи) який обслуговує квартал. Від вузла до користувачів сигнал передається по стандартних мідних витих парах, найчастіше за допомогою VDSL (Very high-speed Digital Subscriber Line – надвисокошвидкісна цифрова абонентська лінія) або іншої DSL-технології. Через це якість та швидкість сигналу залежать від відстані до вузла, а також стану мідної лінії. Відстань від такого вузла до кінцевого споживача зазвичай складає понад 300 метрів, до декількох кілометрів.

FTTC – Fiber to the Curb або оптичне волокно до мікрорайону – це варіант, схожий на FTTN, але з відмінністю в тому, що оптичне волокно підводиться ближче до користувача, зазвичай до люка або невеликої шафи, розміщеної на відстані до 300 метрів від будинку. Після цього використовується коротша ділянка мідного кабелю, зазвичай коаксіального або виті пари, для підключення кінцевого обладнання. Завдяки меншій довжині мідної ділянки, порівняно з

FTTN, ця технологія надає кращу стабільність з'єднання, оскільки коротший мідний кабель менше піддається впливу від зовнішніх електромагнітних перешкод та має менший опір провідника, завдяки чому менше відбувається затухання сигналу. FTTN та FTTC не мають великої популярності, оскільки реалізовані зазвичай як перехідні рішення з поступовим заміщенням більш зручними та надійнішими FTTB та FTTH.

FTTB – Fiber to the Building – оптичне волокно до будівлі. У цій конфігурації що оптичне волокно прокладається безпосередньо до будівлі, наприклад, багатоквартирного будинку або офісного центру. Всередині будівлі передача сигналу до окремих квартир або офісів здійснюється від технічного/комунікаційного вузлу за допомогою Ethernet, коаксіального кабелю або мідної пари. FTTB часто використовується в міських умовах, де є висока щільність користувачів. Такий спосіб підключення має більшу надійність та відносно невеликі втрати сигналу, оскільки оптична ділянка охоплює майже всю відстань, однак обслуговувати такий комунікаційний вузол може бути складніше, адже у постачальників послуг може бути ускладнений доступ до будівлі.

FTTH (Fiber to the Home) – це найбільш чиста та сучасна форма оптичної мережі доступу, при якій волокно йде безпосередньо до житла користувача, квартири або приватного будинку і дозволяє отримувати користувачеві високі швидкості передачі даних, наприклад 1 Гбіт/с і вище та при цьому мати мінімальні затримки й втрати сигналу. Хоча у таких мережах найчастіше все одно використовується перехідна ділянка з мідного кабелю від оптичного адаптера до кінцевого пристрою, ця довжина дуже мала для того, щоб виникали значні перешкоди. Наразі більшість провайдерів прагнуть модернізувати мережу та обирають саме цю модель підключення користувачів до неї. Так, наприклад в Україні ця модель набрала популярності завдяки невисокій вартості прокладення мережі, та за допомогою цієї моделі долучають користувачів до мережі Інтернет такі крупні провайдери, як Укртелеком, Водафон, Київстар тощо.

2.5. Принципи мультиплексування даних у сучасних транспортних мережах

Мультиплексування у транспортних мережах – це технологія, яка об'єднує кілька потоків даних у єдиний сигнал для спільної передачі через один фізичний канал. Це необхідно для щільного використання наявних ресурсів мережі, зменшення витрат на інфраструктуру і підвищення пропускної здатності каналів зв'язку, замість, наприклад, прокладення окремого кабелю для кожної окремої функції. Принцип мультиплексування полягає в тому, що дані від різних джерел комбінуються відповідно до певного методу, наприклад, за часом (TDM), частотою (FDM) та довжиною хвилі (WDM) і передаються одночасно по одному каналу, а потім на приймальному боці розділяються назад на окремі потоки. Також ці методи доповнюються статистичним мультиплексуванням, принципом якого є динамічний розподіл ресурсу, де передача даних відбувається за наявності активності джерела, без жорсткого закріплення часових або частотних інтервалів.

TDM – Time Division Multiplexing – мультиплексування за часовим поділом, де кожному потоку надається власний часовий слот у межах повторюваного циклу. Передача даних від кожного джерела відбувається тільки у відведений йому часовий інтервал, навіть якщо в цей момент потік неактивний (рис. 2.7.). Завдяки цьому можна передбачити затримку, однак такий спосіб нерационально використовує пропускну здатність, адже канал зайнятий. У відповідь на це була розроблена асинхронна форма, в якій слот може динамічно надаватися активному потоку, що конфігурує передачу до реальної інтенсивності трафіку (рис. 2.8.). Такий підхід вимагає маркування кожного слота, щоб ідентифікувати, якому джерелу він належить.

Сама структура TDM базується на кадрах, які складаються з послідовності слотів. Кожен кадр охоплює один цикл перемикання між усіма потоками. Дані з кожного джерела розміщуються в певному слоті кадру і передаються разом як

єдиний сигнал. На приймальному боці мультиплексор виконує зворотну операцію, виділяючи кожен потік із загального сигналу, орієнтуючись на позицію слота у кадрі. Щоб утворити правильне розпізнавання початку кадру та меж слотів, у потік включається синхронізаційна інформація.

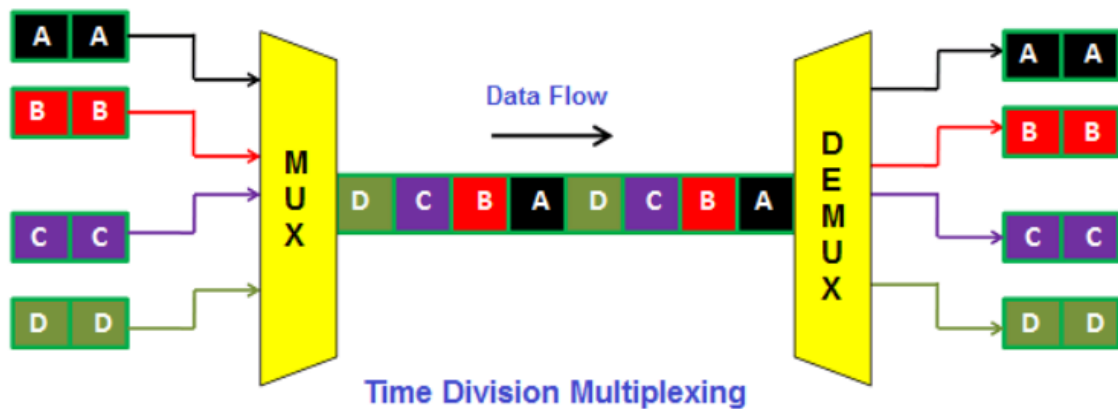


Рисунок 2.7. – Приклад робочого процесу мультиплексування TDM.

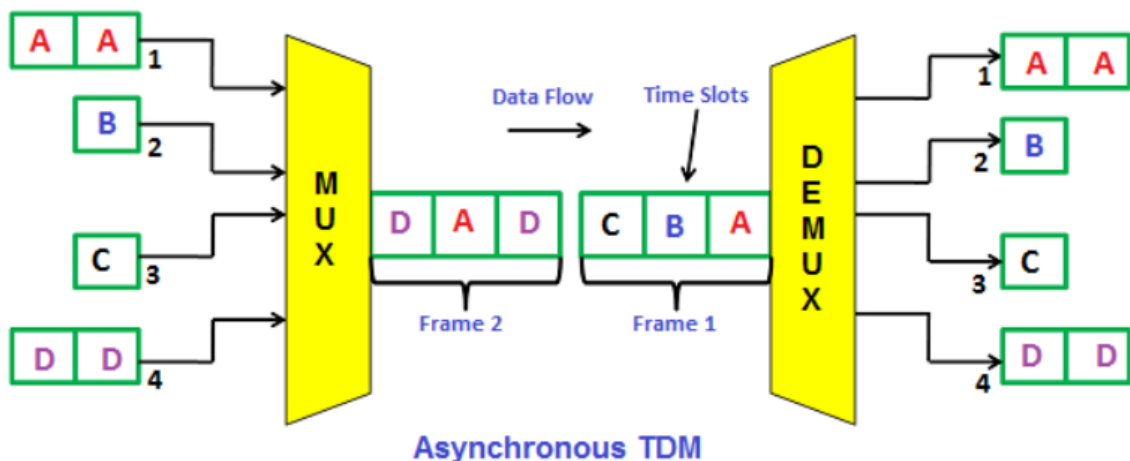


Рисунок 2.8 – Приклад асинхронного процесу мультиплексування TDM.

TDM широко використовувався у класичних цифрових телефонних мережах, де передача голосу між абонентами здійснювалась у вигляді цифрових сигналів з фіксованою смугою пропускання. З розвитком оптичних технологій і збільшенням обсягів даних TDM зберіг актуальність найбільше лише у таких стандартах, як SDH та PDH, де виконується ієрархічне мультиплексування цифрових потоків різної швидкості.

FDM – Frequency Division Multiplexing – мультиплексування з частотним поділом, що одночасно може передавати певну кількість незалежних сигналів по

одному каналу шляхом виділення кожному з них окремої частотної смуги. Кожен потік даних модуляцією переноситься на власну частоту в межах загального спектра, після чого всі сигнали передаються паралельно. У приймальній частині система демультимплексування за допомогою фільтрації розділяє загальний сигнал на складові частоти та відновлює окремі потоки.

Щоб уникнути взаємних завад між каналами, між сусідніми смугами частот залишаються захисні інтервали. Ширина кожної смуги визначається вимогами до передавання даних та типом сигналу, а також характеристиками використовуваної модуляції. У більшості реалізацій використовуються фільтри з високою селективністю, які здатні точно виділити сигнал у заданій частоті та знизити рівень перешкод від сусідніх каналів. FDM найчастіше використовується в аналогових системах зв'язку. Наприклад, у телевізійних або радіомовних системах кожен канал працює на власній частоті в межах певного діапазону. У телефонних мережах FDM дозволяло об'єднувати десятки й сотні телефонних розмов в один радіорелейний або коаксіальний тракт, де кожна розмова займала окрему смугу частот. З переходом до цифрових систем аналогічний підхід став застосовуватись і для цифрового сигналу, однак для цього спершу виконується перетворення цифрових даних у відповідні модуляційні сигнали.

У сучасних мережах принцип FDM трансформувався в подібні концепції для цифрових систем, зокрема в багаточастотне мультимплексування з ортогональним поділом OFDM, яке використовується в мобільному зв'язку, Wi-Fi та цифровому телебаченні. У OFDM піднесучі частоти розміщуються настільки щільно, що їх спектри перекриваються задля уникнення взаємних завад під час демодуляції. OFDM доступ використовується в багатьох сучасних комунікаційних системах, наприклад у стандартах LTE, 5G, Wi-Fi (802.11a/g/n/ac/ax) та цифровому телебаченні DVB-T/T2.

WDM – Wavelength Division Multiplexing – мультимплексування з поділом за довжиною хвилі, застосовується у волоконно-оптичних мережах для одночасної передачі кількох незалежних потоків даних через одне оптичне

волокно. Кожен потік транслюється окремою довжиною хвилі світла, тобто фактично власною кольоровою складовою у межах оптичного спектра. З технічної точки зору, це аналог частотного поділу в радіочастотних системах, але в оптичному діапазоні. Перед передачею кожен цифровий потік модуляцією формує оптичний сигнал за допомогою лазера на заданій довжині хвилі. Усі ці сигнали об'єднуються за допомогою мультиплексора в єдиний оптичний потік, який передається по волокну. На приймальному боці демультимплексор виконує розділення сигналу на окремі довжини хвиль, які надалі обробляються незалежно (рис 2.9.). Щоб уникнути взаємного впливу каналів, довжини хвиль рознесені на певну дистанцію, яка визначається типом системи та характеристиками приймального обладнання.

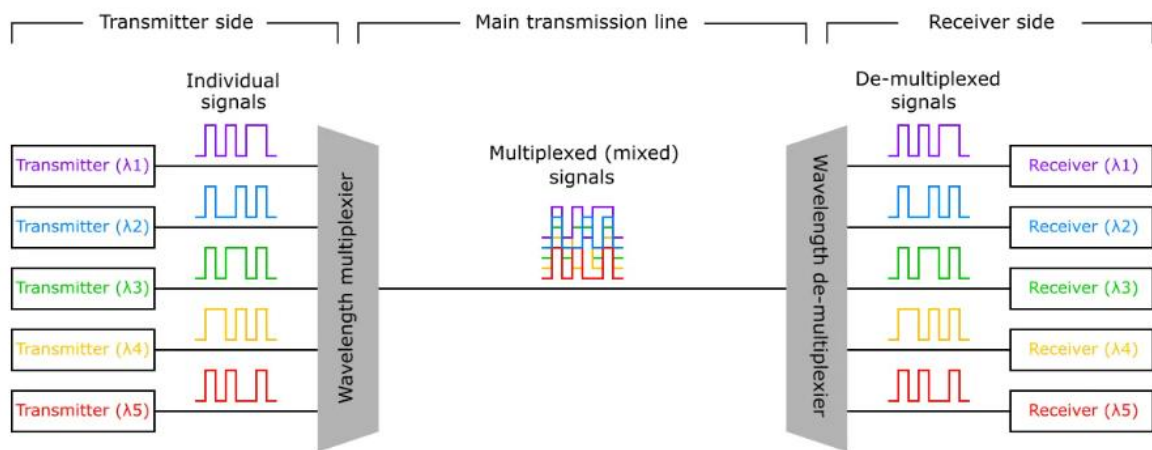


Рисунок 2.9 – Приклад мультиплексування за довжиною хвилі

Наразі підхід мультиплексування за довжиною хвилі є головним в оптичних транспортних мережах, оскільки в оптичних волокнах дає можливість створити майже нескінченну пропускну здатність, завдяки чому підходить під зріст вимог до новітнього обладнання бездротових мереж та мобільних 5G/6G, які потребують більшої кількості базових станцій.

2.6. Структура обладнання транспортної мережі OTN-OTN

Структура обладнання транспортної мережі OTN-OTN складається з ієрархічної, модульної та масштабованої архітектури, за допомогою якої можна

швидко передавати різноманітні типи трафіку по волоконно-оптичних лініях зв'язку з високою надійністю та можливостями підлаштованого керування. Насамперед у цій технології здійснюється мультиплексування даних у транспортні контейнери ODU (Optical Data Unit), які інкапсулюються у вищі рівні структури OTU (Optical Transport Unit) для передачі через фізичне середовище. Обладнання складається з декількох функціональних блоків: термінального обладнання, яке переводить на інтерфейси користувачькі сигнали та виконує мультиплексування, а також регенераторів для підсилення та відновлення сигналу на великих відстанях та ROADM-маршрутизаторів, які виконують динамічне перенаправлення оптичних каналів без необхідності оптичного-електричного перетворення. Крім того, структура включає в себе механізми моніторингу, керування трафіком і функцію виявлення несправностей через вбудовані канали управління та мережеві контролери.

Транспортні елементи можуть підтримувати різні рівні сигналів ODU (табл. 2.5.) (ODU0, ODU1, ODU2, ODU4 тощо), та підлаштовуватися під потреби пропускної здатності. Мережа має модульну побудову, через що можна легко робити мережу ширшою виходячи з потреби до зростаючого трафіку. OTN-мережа також підтримує функції захисту та відновлення для телекомунікаційного середовища, оскільки на сьогодні неперервність сервісів має значимість. Загалом структура обладнання OTN поєднує фізичні оптичні компоненти, електроніку високошвидкісної обробки сигналів, інтелектуальні системи керування, а також підтримку інтерфейсів для різних протоколів: Ethernet, SDH/SONET, Fiber Channel тощо.

Таблиця 2.5 – Порівняння рівнів ODU

Рівень ODU	Швидкість (Гбіт/с)	Сигнал
ODU0	1.25 Гбіт/с	1GbE, STM-16
ODU1	2.5 Гбіт/с	2GbE, STM-64
ODU2	10.04 Гбіт/с	10GbE, STM-256
ODU3	43.018 Гбіт/с	40GbE, FCh, STM-1024

ODU4	111.8 Гбіт/с	100GbE
------	--------------	--------

Оптичний канал OCh – Optical Channel – є одиницею оптичної передачі, що відповідає одному сигналу певної довжини хвилі, який транспортує певний потік даних, наприклад, OTU-сигнал. Це логічний канал, який існує всередині певної довжини хвилі в оптичному волокні. OCh створюється та управляється термінальним або мультиплексуєчим обладнанням.

Оптична секція мультиплексування OMS – Optical Multiplex Section – охоплює ділянку мережі, де декілька OCh-сигналів мультиплексуються у єдиний WDM-потік. В OMS містяться мультиплексори, демультимплексори, оптичні підсилювачі, наприклад, EDFA та ROADM, і вона відповідає за передачу кількох довжин хвиль в одному волокні між двома пунктами мультиплексування.

Оптична секція передачі OTS – Optical Transmission Section – найнижчий рівень в ієрархії, який стосується фізичного середовища передачі, тобто волокна, з'єднання, роз'ємів, дільників, тощо. Вона не несе інтелектуальної обробки, проте необхідна для підтримання якості комутації сигналу.

OXC – Optical Cross-Connect – це пристрій оптичної крос-комутації, який перенаправляє оптичні канали між вхідними та вихідними портами без електрооптичного перетворення. OXC – центральний компонент оптичних транспортних вузлів і може реалізовуватися як статично (FOADM), так і динамічно (ROADM).

FCh (Fiber Channel) – один із можливих клієнтських сигналів, що інкапсулюються в структуру OTN для транспорту. FCh використовується у високошвидкісних мережах зберігання даних і може передаватися через OTN так само, як Ethernet, SDH або інші протоколи.

FOADM – Fixed Optical Add-Drop Multiplexer – це фіксований оптичний мультиплексор введення/виведення каналів. Він дозволяє додавати або вилучати певні заздалегідь задані довжини хвиль – оптичні канали з WDM-потіку на конкретній точці мережі. Конфігурація FOADM не змінюється без ручного втручання, тому він використовується переважно в мережах із статичною архітектурою.

ROADM Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer – це оптичний мультиплексор введення/виведення каналів який можна реконфігурувати. На відміну від FOADM, ROADM дає змогу динамічно додавати, вилучати та перенаправляти будь-які довжини хвиль без ручного втручання, за допомогою програмного керування. Завдяки цьому можна програмно керувати маршрутизацією трафіку, змінювати топологію мережі в реальному часі, швидко відновлювати канали у разі аварій, а також підтримувати автоматичне балансування навантаження. Також ROADM підтримує фільтрацію за довжиною хвилі, оптичну комутацію каналів, моніторинг потоку сигналів та взаємодію з системами керування SDN/NMS (Network Management System). Також FOADM і ROADM є частинами підсистеми ОХС.

2.7 Висновки до розділу 2

Особливості побудови транспортних мереж з використанням одномодових та багатомодових волокон, а також засобів корекції сигналів у сучасних технологіях передачі даних у тому, що такі мережі наразі є основними засобами передачі інформації, завдяки можливості підлаштування компонентів під потреби передачі даних, та забезпеченні надійності таких мереж у сучасних телекомунікаційних системах. Одномодові волокна, завдяки здатності передавати сигнал лише в одному промені, досягають найменших показників втрат та мінімальної дисперсії, що робить їх незамінними для магістральних і міжміських з'єднань, де потрібно передавати дані на великі відстані з високою швидкістю та стабільною якістю сигналу. У таких випадках активно використовуються сучасні технології модуляції, як QPSK та QAM, які, хоча і чутливі до фазових спотворень, проте дозволяють значно підвищити щільність інформації в оптичному потоці. Це, у свою чергу, вимагає застосування методів компенсації, зокрема цифрової обробки сигналів (DSP), фазових автопідлаштувальних систем (PLL), і систем корекції дисперсії (CD) та поляризаційних впливів (PMD).

Багатомодові волокна, попри обмеження у відстані передачі через модову дисперсію, мають переваги в короткодистанційних побудовах мережі, наприклад, у локальних мережах, центрах обробки даних, корпоративних системах, де важливою є саме простота інсталяції та нижча вартість обладнання, яке задовільнить потреби транспортованих обсягів даних.

Поєднання цих типів волокон у багаторівневих транспортних структурах, де відбувається інтеграція магістральних, регіональних і доступових та абонентських сегментів, оптимізує витрати та при цьому залишає масштабованість мереж і підтримування високої якості сервісу. Застосування засобів корекції сигналів, таких як оптичні та електронні фільтри, оптичні підсилювачі EDFA, Raman, компенсатори дисперсії та цифрові алгоритми обробки, значно розширюють можливості таких мереж передавати великі обсяги даних у форматах високої складності навіть у складних умовах експлуатації. Таким чином, успішна побудова сучасної транспортної телекомунікаційної мережі вимагає раціонального поєднання фізичних характеристик оптичних волокон та врахування типу трафіку, протяжності каналів, вимог до швидкості та надійності, а також активного застосування новітніх технологій компенсації і цифрової модуляції, які будуть мати при цьому мінімальну затримку сигналу при обробці, тобто коригувати його в реальному часі. Це буде гарантувати ефективну роботу інфраструктури в умовах зростаючих вимог до обсягів передачі даних і мінімізації затримок.

Разом із цим можна зазначити, що ефективність побудови транспортних мереж значно зросла завдяки впровадженню ієрархічних структур передачі даних, таких як нині застаріла SDH, та більш нова мережа OTN, що зараз має активний розвиток та відіграє найголовнішу роль у мережевій ієрархії у поєднанні з Packet Switching.

Сучасні транспортні мережі дедалі більше відходять від жорстко структурованих синхронних систем на користь гібридних або повністю пакетних рішень, які використовують технології MPLS-TP, Ethernet over SDH/OTN, та навіть IP over DWDM для побудови універсальних транспортних платформ з

підтримкою різних типів трафіку, від аудіо/відео до критично важливих служб. З точки зору мультиплексування, нині головними технологіями для оптичних мереж є такі технології, як WDM, зокрема її варіанти DWDM та CWDM, які дозволяють передавати десятки або навіть сотні оптичних каналів одночасно в одному волокні, кожен з яких може нести незалежний потік даних. Таким чином сучасні транспортні мережі є досить складними багаторівневими структурами, які поєднують оптичні волокна різного типу, багатоканальне мультиплексування, ієрархічні та пакетні технології транспортування даних, а також інтелектуальні механізми обробки та компенсації сигналів. Завдяки цьому можна не тільки підтримувати стабільність мереж, але і витримувати перспективне зростання обсягів трафіку та готуватися до переходу на мобільні мережі 6G.

3 ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ТРАНСПОРТНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ У МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Принцип взаємодії мобільних станцій із транспортною мережею

У сучасних мобільних мережах, починаючи з 4G і особливо у 5G, структура транспортної мережі поділяється на кілька рівнів: доступ, агрегація та магістраль. На рівні доступу базові станції підключаються до вузлів агрегації, тобто проміжних точок, які збирають трафік з кількох базових станцій. Далі трафік передається до магістральної мережі, яка з'єднує все з центрами обробки даних, основною мережею оператора та глобальним інтернетом.

Основною особливістю побудови таких мереж є перехід до повністю оптичної інфраструктури. Одномодові волоконно-оптичні лінії є стандартом для сучасного транспорту через їхню здатність передавати великі обсяги даних на значні відстані з мінімальними втратами сигналу. Також ще однією важливою вимогою до транспортної мережі є точна синхронізація. Для роботи мобільної мережі у режимі TDD (Time Division Duplex, де один і той самий частотний діапазон використовується для передачі та прийому) критично необхідно мати точне вирівнювання у часі між базовими станціями. Це досягається за допомогою протоколів синхронізації, таких як IEEE 1588v2 (Precision Time Protocol), а також використанням GPS/GLONASS-зразків або синхронізованих оптичних генераторів. У районах з недостатньою оптичною інфраструктурою транспорт здійснюється за допомогою радіорелейних ліній у діапазонах E-band (70/80 ГГц), що видають швидкості до 10 Гбіт/с, хоча й на коротких відстанях.

Крім пропускнуої здатності та синхронізації, не менш важливим є параметр затримки. У 5G однією з головних вимог є підтримка сценаріїв з наднизькою затримкою (URLLC – Ultra-Reliable Low-Latency Communications), де час реакції мережі повинен бути менше 1 мілісекунди. Досягнення цього вдається завдяки побудові транспортної мережі з обчислювальними вузлами, наближеними до

користувача, так званої концепції edge computing. В таких умовах обробка даних відбувається безпосередньо поблизу точки генерації трафіку, для мінімізації маршрутизації і зменшення загального часу відгуку.

Ще одним напрямом є автоматизація та віртуалізація транспортної інфраструктури. З появою SDN оператори отримують змогу централізовано керувати маршрутизацією, контролем трафіку, QoS-політиками та наданням безперервного обслуговування користувача навіть при зміні топології або аваріях в мережі.

На фізичному рівні мобільна мережа здебільшого має ієрархічну топологію з використанням зіркоподібної, деревоподібної та кільцевої структур. У класичній LTE-мережі або сучасній 5G мережі все починається з радіодоступу де тисячі базових станцій, які взаємодіють із користувачами. Кожна базова станція підключена до транспортної мережі, яка виконана за принципом агрегації, у якій багато станцій об'єднуються до агрегаційного вузла (aggregation router/switch), а звідти дані передаються до центрального ядра (core network).

3.2. Шлях мобільного трафіку від пристрою користувача до магістральної транспортної мережі

Передача мобільних даних у мобільних мережах є складним та багаторівневим процесом, у якому інформація проходить від користувацького пристрою через радіодоступ до базової станції, та вже від неї через вузли комутації та центри обробки даних проходить до головної транспортної мережі.

Базова станція, отримавши сигнал від пристрою, обробляє його та передає далі. У сучасних мережах це здійснюється через розділення функцій, зокрема на блоки DU (Distributed Unit) та CU (Centralized Unit). DU розташовується близько до самої антени й відповідає за обробку радіочастотного сигналу, модуляцію, демодуляцію, а також взаємодію з фізичним рівнем. CU, навпаки, розміщується далі, у більш захищених або пристосованих дата-центрах, і керує вищими шарами стеку, такими як управління з'єднанням, маршрутизацією та QoS.

Зв'язок між DU та CU здійснюється через інтерфейс під назвою F1 і зазвичай проходить через оптичні волокна. Далі CU вже з'єднаний із магістраллю, яка об'єднує всі базові станції в регіоні з ядром мережі оператора (core network). На цьому рівні з'являється вже повноцінна IP-мережа з маршрутизаторами, MPLS або Segment Routing, які транспортують дані до вузлів EPC в LTE або 5GCore в 5G.

Щоб дані потрапили в зовнішній світ, тобто до інтернету чи іншої мережі, вони проходять через так звані опорні (backbone) вузли. Ці вузли з'єднані між собою високошвидкісними оптичними каналами на технологіях DWDM та GPON. Таким чином інформація, яка починалася як радіохвиля між смартфоном і базовою станцією, швидко перетворюється на оптичний сигнал, що подорожує з величезною швидкістю через десятки чи сотні кілометрів волоконно-оптичної мережі.

Однак наразі існує проблема, через яку великі обсяги інформації, які передаються між пристроями користувачів та базовими станціями іноді не можуть пройти швидко до центрів обробки даних та глобальної мережі через недостатню пропускну здатність ліній зв'язку. Тобто, ті обсяги, що здатні передаватися між пристроями та стільниковими вежами, в окремих місцях можуть повільно передаватися на ділянках мережі, які не мають достатньої ширини пропускання. Це зумовлено повільним розвитком транспортних мереж у мережах мобільного зв'язку, оскільки прокладення додаткових каналів вимагає витрат на розгортання ширших ліній зв'язку, особливо на великі відстані (рис. 3.1.).

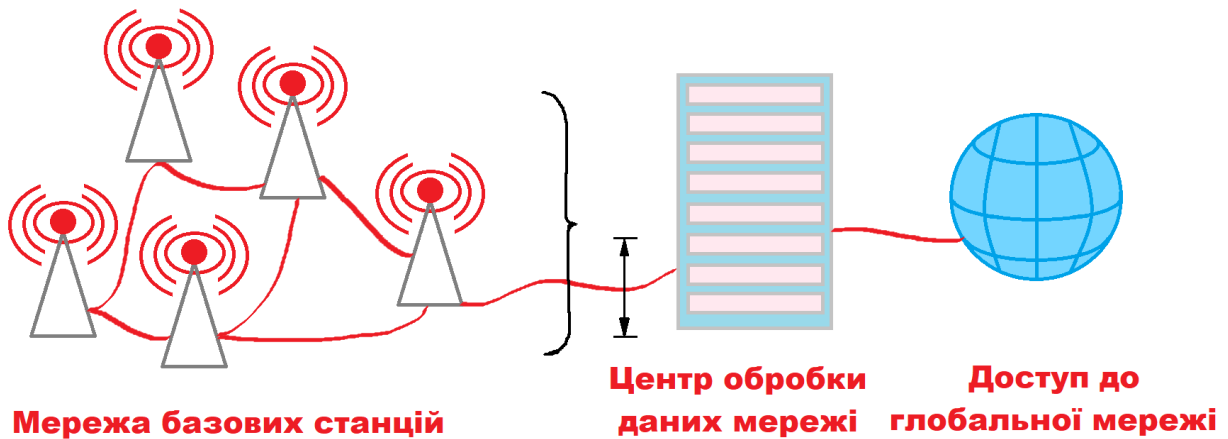


Рисунок 3.1 – Проблема пропускної здатності від групи базових станцій до головної транспортної мережі.

Така проблема зумовлена розташуванням великої кількості базових станцій різних поколінь, де поруч стоять вежі з антенами 2G, 3G та 4G.

Однак останнім часом зростає тенденція з вилученням станцій 3G на користь станцій наступного покоління, оскільки більшість пристроїв зараз підтримує як 3G так і 4G, тому немає необхідності займати робочий простір мережі малоефективними станціями, натомість які можна адаптувати на 4G та покращувати розвиток пропускної здатності мереж під вимоги та потреби сучасних поколінь мереж мобільного зв'язку.

3.3. Аналіз вимог пропускної здатності транспортних мереж під сучасні потреби

Станом на 2024-2025 роки в умовах актуальності та розвитку дистанційних засобів для комунікацій, за статистичними даними Ericsson обсяг спожитого трафіку зріс на понад 21%. Найбільшу частину ресурсу, приблизно 70% від усього трафіку, займають відеосервіси та стрімінгові платформи, переважно стрімінг 4K/8K, скрвіси YouTube, Twitch та TikTok. Для стрімінгу або потокового перегляду відео у 4K необхідна швидкість приблизно 40-60 Мбіт/с на одну особу.

Виходячи з цієї потреби, наприклад, для одночасного перегляду мільйоном користувачів, знадобиться швидкість до 60Тбіт/с.

Окрім цього наразі невід'ємною частиною життя стали засоби для відеоконференцій. Вони хоча й мають нижчу якість передачі відео – найчастіше 720р, проте такий трафік потребує швидкості щонайменше у 3 Мбіт/с, а це, наприклад при відеонаradі у компанії з 10 000 співробітниками, буде потребувати 30 Гбіт/с постійного трафіку. Разом із цим сьогодні активно розвиваються хмарні ігрові сервіси, наприклад GeForce NOW. Таким чином за даними NVIDIA для якості гри у 4К при 60 к/с мінімальна швидкість інтернету має становити приблизно 50 Мбіт/с, що означає, що для 1000 одночасних гравців знадобиться швидкість від 250 Гбіт/с до 500 Гбіт/с та затримку до 20-40 мс на весь шлях. При цьому для такого сервісу транспортна мережа має підтримувати пріоритезацію ігрового трафіку через MPLS, Segment Routing або OTN засоби якості сервісу. Загалом хмарні ігрові та графічні сервіси вимагають 400Гбіт/с каналів на сервери, проте наразі потреба зростає до використання 800 Гбіт/с та 1.2Тбіт/с швидкостей.

В епоху активного розвитку, впровадження та щоденного використання сервісів штучного інтелекту, швидкість між серверними вузлами сервісів має становити 400/800Гбіт/с, та на рівні транспортної мережі загалом до 1Тбіт/с і вище, а Інтернет речей, наприклад для автопілоту у транспорті потребує пропускну здатність щонайменше 1Гбіт/с та наднизьку затримку до 5 мс, а також використання 5G мереж, які мають відповідати таким вимогам. Такі обсяги даних керуються завдяки SDN та сумісній роботі ROADM, WDM/DWDM та OTN.

Що стосується модернізації мобільного зв'язку в Україні, то наразі відомо, що оператор Водафон Україна впроваджує перехід базових станцій з радіорелейного з'єднання на підключення через пасивні оптичні мережі PON, що підтримуватимуть 1-10 Гбіт/с. Це пояснюється швидким розширенням пропускну здатності мережі, яка знадобиться для переходу на LTE 2600 TDD. Тому що це дасть стабільну швидкість мобільного інтернету навіть при значному

збільшенні трафіку. Технологія TDD – це технологія дуплексного зв'язку, що використовується в мобільних мережах для передачі та отримання даних через різні часові інтервали на одній частоті. Вона вимагає високоточної синхронізації для потокової передачі даних (відео, потоків) у режимі реального часу, що є важливим для роботи сучасних сервісів та додатків. Таке рішення має забезпечити плавний перехід на 5G та 6G, завдяки дотриманій умови мінімальних затримок, що і є головними вимогами наступних поколінь для швидкодії з хмарними сервісами, потоковими даними, використанням штучного інтелекту та Інтернету речей. Разом із цим така модернізація стане більш стійкою до відключень електроенергії, оскільки не буде потребувати додаткових джерел альтернативної енергії на радіозв'язок між базовими станціями.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Транспортні мережі активно розвивалися протягом останніх 45 років, від простих кабельних телефонних ліній та аналогових засобів передачі даних до більш швидкісних, надійних і головне – захищених технологій передачі інформації. Таким чином технології з використанням мідних кабелів, що піддавалися електромагнітним перешкодам та значному загасанні сигналу на невеликих відстанях поступово були витіснені оптичною транспортною мережею OTN-OTN, яка дозволила транспортувати майже нескінченну кількість даних, а також передавати будь-які сигнали будь-якої технології через потік світла різної довжини хвилі в оптичному волокні завдяки щільному мультиплексуванню за довжиною хвилі – DWDM.

Разом із розвитком швидкості та пропускної здатності транспортних мереж стало можливо створювати безліч контенту та швидко отримувати доступ до різних сервісів з будь-якого кутку світу, адже оптичні мережі дали змогу не тільки швидко передавати великі обсяги даних, проте й на великі дистанції, до сотень кілометрів без підсилення сигналу, а завдяки оптичним підсилювачам, оскільки вони майже не впливають на затримку сигналу, стало можливо якісно передавати ці обсяги трафіку вже на тисячі кілометрів між континентами.

Сучасні технології стають дедалі масштабованими та доступнішими, що дає змогу кожному відчуті потенціал розвитку мереж та вільно користуватися усіма інтернет-сервісами навіть через мобільні мережі, які також стали використовувати волоконно-оптичні лінії зв'язку між своїми станціями та глобальною мережею задля забезпечення значної пропускної здатності та мінімізації затримок, що активно вимагає сучасний розвиток онлайн сервісів, хмарних технологій, IoT, штучного інтелекту, використання засобів віртуальної та доповненої реальності, які потребують обробки даних у реальному часі, а також розвитку систем обробки даних ближче до користувача – Edge Computing.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бірюков М. Л. Транспортні мережі телекомунікацій. Системи мультиплексування: підручник / М. Л. Бірюков, В. К. Стеклов; під ред. В. К. Стеклова. – К.: Техніка, 2005. – 312 с.
2. Бортник Г. Г. Телекомунікаційні системи передавання: навчальний посібник / Бортник Г. Г., Кичак В. М., Пунченко Н. О., Стальченко О. В. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 145 с.
3. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи: навч. посіб. [для студентів ВНЗ спец. 7.05090302 «Телекомунікац. системи та мережі», спец. 172 «Телекомунікації та радіотехніка»] / І. В. Горбатий, А. П. Бондарєв; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2016. — 336 с.
4. Климаш М. М., Колодій Р. С. Телекомунікаційні системи передавання інформації: навч. посіб. / М. М. Климаш, Р. С. Колодій. — Львів: Львівська політехніка, 2018.
5. Корнейчук В. І., Лесовой І. П. Волоконно-оптические измерения / В. І. Корнейчук, І. П. Лесовой. – К.: Наукова думка, 2002. – 323 с.
6. М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка»; уклад.: М. І. Кирик, В. І. Романчук. Технології телекомунікаційних мереж / М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка»; уклад.: М. І. Кирик, В. І. Романчук. — Л.: [б. в.], 2012. — 152 с.
7. Основи теорії телекомунікацій і радіотехніки [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: П. В. Кучернюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,3 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 290 с.
8. Постанова ВР України "Про електронні комунікації" від 16.12.2020 N 1089-ІХ.

9. Постанова КМУ "Про затвердження Порядку взаємодії органів виконавчої влади з питань захисту державних інформаційних ресурсів в інформаційних та телекомунікаційних системах" від 16.11.2002 N 1772.

10. Педяш В. В. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління: конспект лекцій. Модуль 5.2 / Педяш В. В. — Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2017.

11. Телекомунікаційні та інформаційні мережі : Підручник [для вищих навчальних закладів] / П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. – К.: САММІТ-Книга, 2010. – 708 с.: іл.

12. Шийка Я. В., Яремко О. М., Думич С. С. Технічна електроніка в телекомунікаціях: навч. посіб. для студ. спец. 6.050903 «Телекомунікації» Ін-ту телекомунікацій, радіоелектрон. та електрон. техніки / Я. В. Шийка, О. М. Яремко, С. С. Думич; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Нац. ун-т «Львів. політехніка», 2011.

13. Albanese, I. Big File Protocol for OTN and Ethernet Transport Systems [Text] / I. Albanese, Y. O. Yazır, S. W. Neville, S. Ganti, T. E. Darcie // Journal of Optical Communications and Networking. – 2015. – Vol. 7, Issue 2. – P. 96-108.

14. Iovanna, P. Future Proof Optical Network Infrastructure for 5G Transport [Text] / P. Iovanna, F. Cavaliere, F. Testa, S. Stracca, G. Bottari, F. Ponzini, A. Bianchi, R. Sabella // Journal of Optical Communications and Networking. – 2016. – Vol. 8, Issue 12. – P. B80-B92.

15. Liu Xiang. Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era/ LIU Xiang// iScience. – 2019. - Dec 22. – pp.489-506;

16.<https://odessa-journal.com/vodafone-ukraine-prepares-for-5g-and-even-6g--company-begins-connecting-base-stations-via-xpon>

17.<https://www.fiberlabs.com/glossary/wavelength-division-multiplexing/>

18. <https://www.itu.int/ru/mediacentre/backgrounders/Pages/5Gfifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
19. https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/ons-15454-series-multiservice-transportplatforms/data_sheet_c78-658542.html
20. https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/15000r10_0/ncs/linecard_configuration/guide/b_ncs_line_card_configuration/b_ncs_line_card_configuration_chapter_01010.html#concept_CCFFD01FD0524C51BD29D93968B6E4E1
21. <https://www.linkedin.com/pulse/10g-vs-100g-400g-strategic-evolution-regional-isps-2025-fancy-wang-qardc>
22. <https://www.zte.com.cn/content/dam/zte-site/res-www-zte-com-cn/mediare/zte/bn-files/ZTE%20TECHNOLOGIES%20%28No.6%29%202022.pdf>