

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ ГУМАНІТАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Навчальна дисципліна:

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2

*Волоконно-оптичні багатохвильові системи передачі з розділенням оптичних
сигналів за довжиною хвилі*

Доцент кафедри Комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій,
кандидат технічних наук

Педяш Володимир Віталійович

2025 рік

Зміст

Вступ.....	3
Лекція 1. Принципи побудови волоконно-оптичних багатохвильових систем передачі з розділенням оптичних сигналів за довжиною хвилі (ВОСП WDM)	4
Лекція 2. Основні компоненти ВОСП WDM	9
Лекція 3. Спотворення оптичних сигналів та завади у багатохвильових ВОСП	14
Лекція 4. Лінійні тракти ВОСП	19
Список рекомендованої літератури.....	24

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Телекомунікаційні системи та мережі» є однією з профільних дисциплін підготовки фахівців за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» і спрямована на формування у студентів системних знань про принципи побудови, функціонування та розвитку сучасних телекомунікаційних систем і мереж різного призначення.

Стрімкий розвиток інфраструктури зв'язку в Україні та світі, впровадження мереж п'ятого покоління 5G, масштабування хмарних обчислень і Інтернету речей висувають принципово нові вимоги до рівня теоретичної підготовки та практичних навичок майбутніх інженерів-телекомунікаційників. Фахівець галузі зобов'язаний вільно орієнтуватися в архітектурі мереж передавання даних, методах мультиплексування та принципах побудови цифрових систем передавання, що є базисом для засвоєння спеціальних дисциплін наступних курсів.

Лекція 1. Принципи побудови волоконно-оптичних багатохвильових систем передачі з розділенням оптичних сигналів за довжиною хвилі (ВОСП WDM)

1.1. Основні принципи та концепції ВОСП WDM

Волоконно-оптичні системи передачі з хвильовим мультиплексуванням (ВОСП WDM, від англ. Wavelength Division Multiplexing) є одним із ключових напрямів розвитку сучасних телекомунікаційних мереж. Принцип їх роботи ґрунтується на одночасній передачі кількох оптичних сигналів різних довжин хвиль через одне волоконно-оптичне волокно, що дозволяє суттєво збільшити сумарну пропускну здатність лінії без прокладання додаткових кабелів.

Ідея хвильового мультиплексування полягає в тому, що кожен інформаційний канал модулюється на окрему несучу довжину хвилі у діапазоні 1260–1650 нм, де оптичне волокно забезпечує прийнятне затухання та дисперсію. Завдяки лінійності середовища розповсюдження оптичні сигнали різних довжин хвиль практично не взаємодіють між собою за умови дотримання належного рознесення частотних каналів.

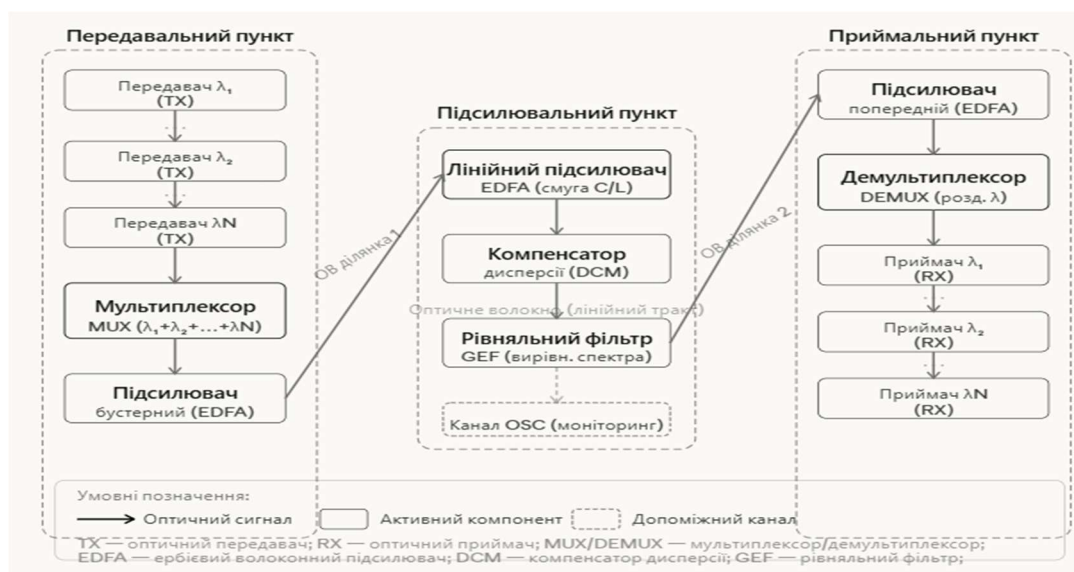


Рисунок 1.1 - Загальна структура системи ВОСП WDM

Концептуально система WDM складається з передавального та приймального мультиплексних вузлів, оптичного лінійного тракту з підсилювачами, а також засобів моніторингу та управління. На передавальній стороні сигнали з різних джерел об'єднуються оптичним мультиплексором і вводяться у волокно; на приймальній стороні демультиплексор розділяє хвилі та направляє їх до відповідних приймачів.

Розвиток технологій WDM зумовлений постійно зростаючим попитом на пропускну здатність каналів зв'язку, пов'язаним із розповсюдженням широкосмугових послуг, хмарних обчислень, відеосервісів та інтернету речей. Застосування WDM дозволяє операторам використовувати вже наявну волоконну інфраструктуру для багаторазового збільшення ємності мережі.

1.2. Види систем та плани робочих частот

Відповідно до стандартів Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ-Т), оптичний спектр розбивається на смуги, кожна з яких має власне позначення та призначення. Основними смугами є: О (Original, 1260–1360 нм), Е (Extended, 1360–1460 нм), S (Short, 1460–1530 нм), С (Conventional, 1530–1565 нм), L (Long, 1565–1625 нм) та U (Ultra-long, 1625–1675 нм). Більшість сучасних систем WDM використовують смуги С та L, де ербієві волоконні підсилювачі мають найкращі характеристики підсилення.

Для стандартизації частотного плану рекомендація МСЕ-Т G.694.1 визначає сітку частот для систем Dense WDM з кроком 12,5 ГГц, 25 ГГц, 50 ГГц та 100 ГГц, прив'язаних до опорної частоти 193,1 ТГц (довжина хвилі ~1552,52 нм). Для Coarse WDM рекомендація G.694.2 визначає сітку довжин хвиль з кроком 20 нм у діапазоні 1270–1610 нм.

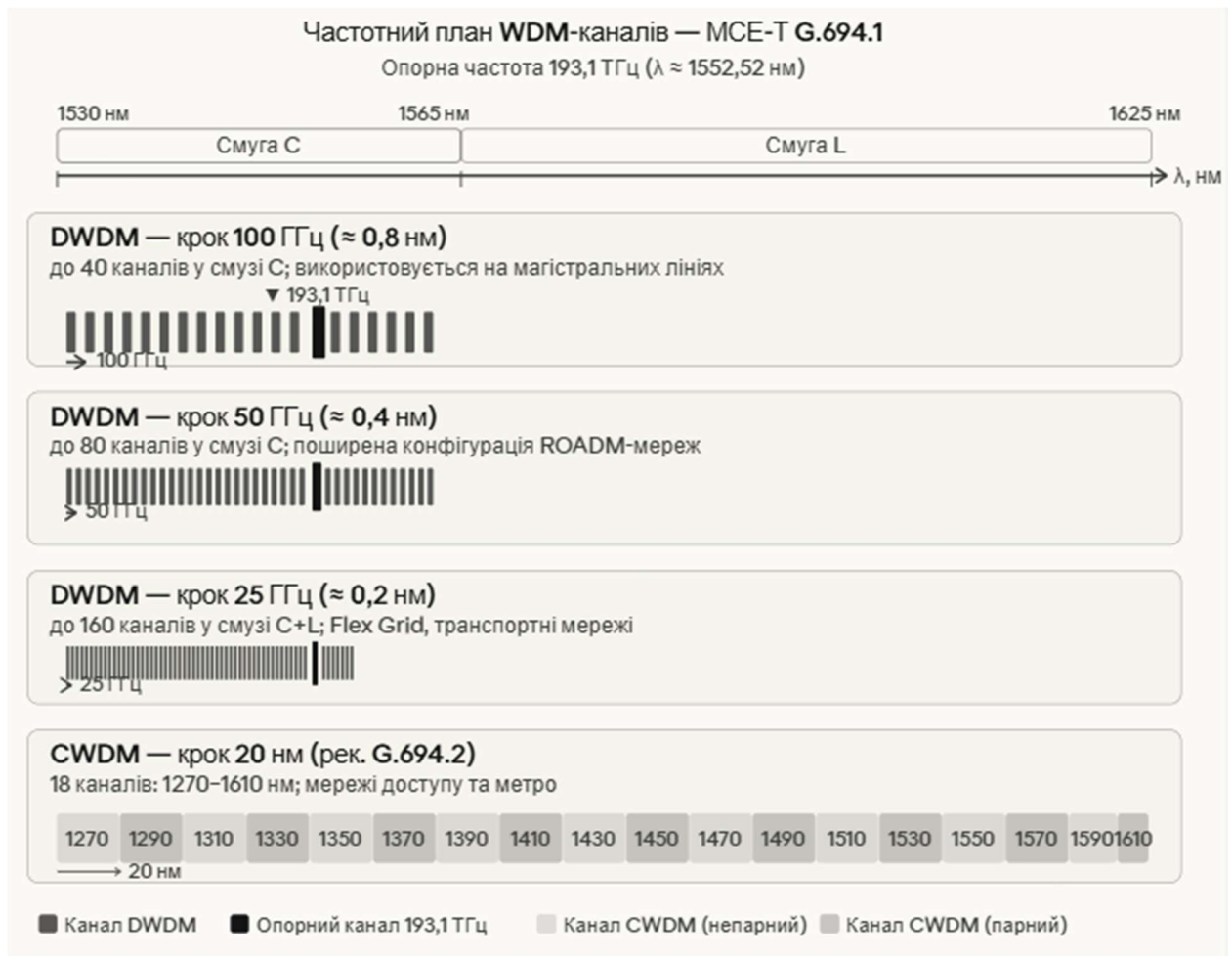


Рисунок 1.2 - Частотний план WDM-каналів згідно з рекомендацією MCE-T G.694.1

1.3. Технологія Coarse WDM (CWDM)

Технологія CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing — грубе хвильове мультиплексування) передбачає використання відносно широко рознесених довжин хвиль — з кроком 20 нм у діапазоні від 1270 до 1610 нм, що дає можливість розмістити до 18 каналів. Великий міжканальний інтервал дозволяє застосовувати некоштовні компоненти з послабленими вимогами до стабілізації температури джерел випромінювання.

Лазерні модулі в системах CWDM, як правило, не мають елементів термостабілізації (ТЕС), що суттєво знижує їх вартість, споживання

електроенергії та конструктивні складнощі. Завдяки цьому CWDM активно використовується в мережах доступу, кампусних та метрополітенних мережах, де вимоги до ємності менш жорсткі, а питання вартості є пріоритетними.

Основне обмеження CWDM полягає у складності реалізації оптичного підсилення: широкий спектр, що охоплює кілька вікон прозорості волокна, виходить за межу ефективного підсилення стандартних EDFA-підсилювачів (1530–1565 нм). Тому системи CWDM, як правило, використовуються на відстанях до 80 км без регенерації.

1.4. Технологія Dense WDM (DWDM)

Dense WDM (щільне хвильове мультиплексування) використовує значно менші міжканальні інтервали — від 100 ГГц (0,8 нм) до 12,5 ГГц (0,1 нм) і менше — що дозволяє розмістити у смузі C десятки і навіть сотні каналів. Сучасні системи DWDM здатні передавати 80–160 і більше каналів у смузі C+L, забезпечуючи сукупну пропускну здатність на рівні кількох терабіт за секунду через одне волокно.

Малий міжканальний інтервал у системах DWDM висуває підвищені вимоги до стабільності довжин хвиль лазерних передавачів. Для цього застосовуються термоелектричні охолоджувачі та схеми підстроювання частоти. Оптичні фільтри повинні мати вузьку смугу пропускання та крутий спад АЧХ для запобігання перехідним завадам між каналами.

Ключовою перевагою DWDM є можливість безпосереднього підсилення сигналів EDFA-підсилювачами в смузі C (1530–1565 нм), що забезпечує побудову транспортних ліній надвеликої довжини без електричної регенерації. Саме тому DWDM є основою магістральних та регіональних оптичних мереж.

1.5. Порівняльний аналіз технологій CWDM та DWDM

Вибір між технологіями CWDM та DWDM визначається комплексом факторів: дальністю передачі, необхідною ємністю, вартістю обладнання та умовами експлуатації. CWDM є оптимальним рішенням для коротких ліній (до 80 км) у мережах доступу та метро завдяки нижчій вартості та простоті. DWDM, навпаки, незамінна в магістральних мережах, де потрібна максимальна ємність і можливість підсилення на значних відстанях.

З точки зору масштабованості системи DWDM мають значно більший потенціал нарощування кількості каналів порівняно з CWDM. Застосування гнучкої сітки частот (Flex Grid) в сучасних системах DWDM дозволяє динамічно виділяти спектральні ресурси залежно від типу трафіку та швидкості передачі, підвищуючи ефективність використання спектра.

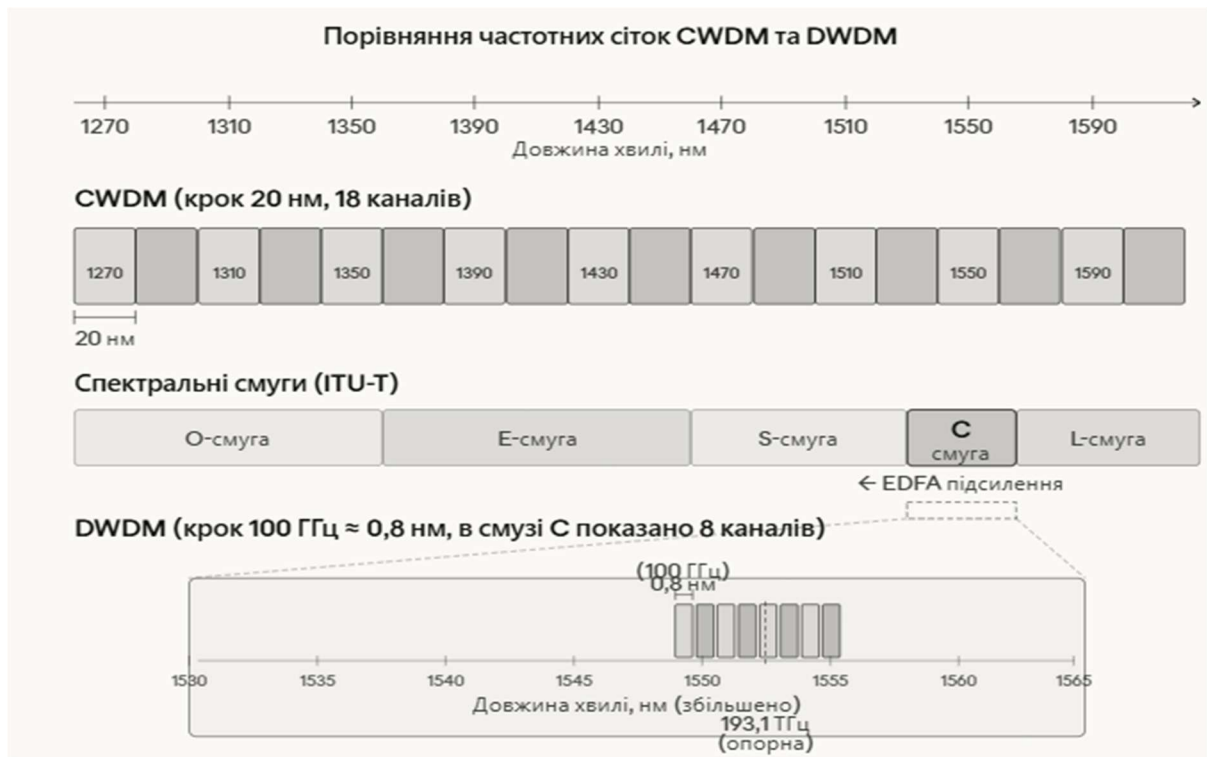


Рисунок 1.3 - Порівняння частотних сіток CWDM та DWDM

Лекція 2. Основні компоненти ВОСП WDM

2.1. Оптичні мультиплексори і демультимплексори

Оптичний мультиплексор (MUX) об'єднує оптичні сигнали різних довжин хвиль в один спільний тракт, тоді як демультимплексор (DEMUX) виконує зворотню операцію — розділення мультиплексованого сигналу на окремі канали. Від якості цих компонентів безпосередньо залежить рівень перехідних завад між каналами та загальна ефективність системи.

Серед технологій побудови мультиплексорів-демультиплексорів найбільшого поширення набули: інтерференційні тонкоплівкові фільтри (TFF), решітчасті решітки з арійованим хвилеводом (AWG) та дифракційні елементи. Тонкоплівкові фільтри застосовуються переважно в CWDM та 4-канальних DWDM системах завдяки низькій вартості й надійності. Хвилеводні AWG-мультиплексори забезпечують високу точність розділення каналів і реалізуються у вигляді інтегрально-оптичних схем на кремнієвій або InP-підкладці.

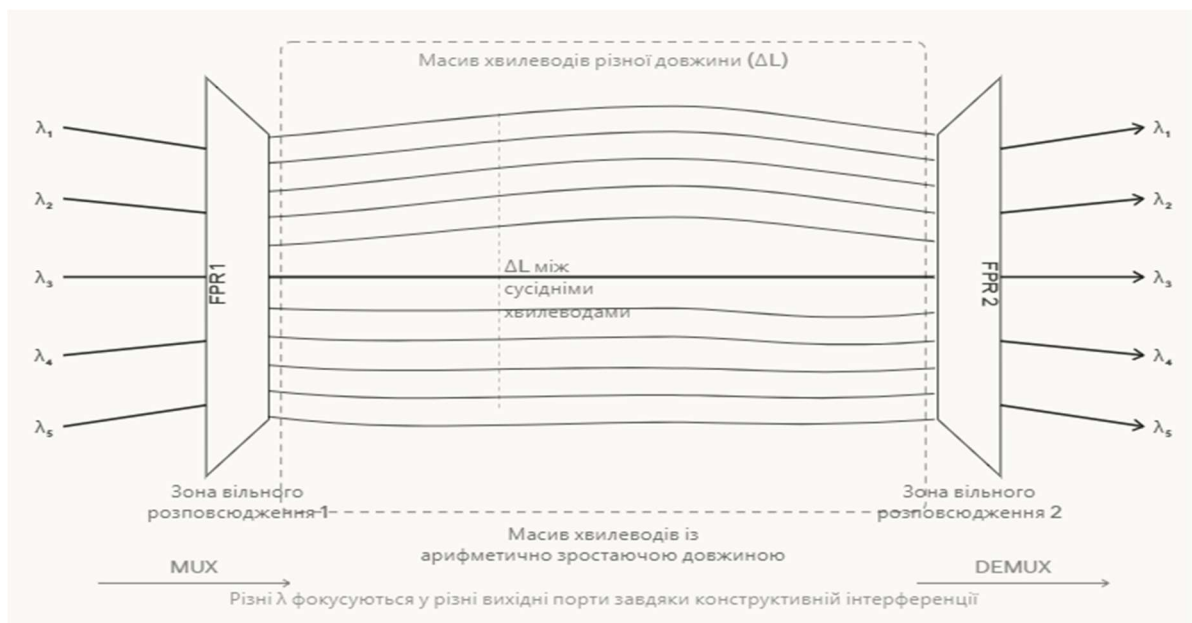


Рисунок 2.1 - Схема AWG-мультиплексора/демультиплексора

Рекомфігуровані оптичні мультиплексори-демультиплексори введення/виведення (ROADM) дозволяють динамічно, без фізичного перемикання волокон, вводити та виводити окремі довжини хвиль у вузлах мережі. Це забезпечує гнучку маршрутизацію трафіку та спрощує управління мережею.

2.2. Оптичні передавачі та приймачі

Оптичний передавач у системах WDM формує модульований оптичний сигнал на заданій довжині хвилі. Основою передавача є лазерний діод з розподіленим зворотним зв'язком (DFB-лазер), який забезпечує одночастотну генерацію з вузькою лінією випромінювання та малим ширококовим шумом. Для систем DWDM із щільною сіткою частот стабільність довжини хвилі лазера має критичне значення — допустиме відхилення зазвичай не перевищує $\pm 2,5$ ГГц.

Зовнішні електрооптичні модулятори (наприклад, модулятори Маха-Цендера на LiNbO_3 або електрозглинаючі InP-модулятори) використовуються в системах з високими швидкостями передачі (від 10 Гбіт/с), де пряма модуляція лазера призводить до неприємного розширення спектра сигналу. Зовнішня модуляція дозволяє мінімізувати чирп та забезпечити вузький спектр оптичного сигналу.

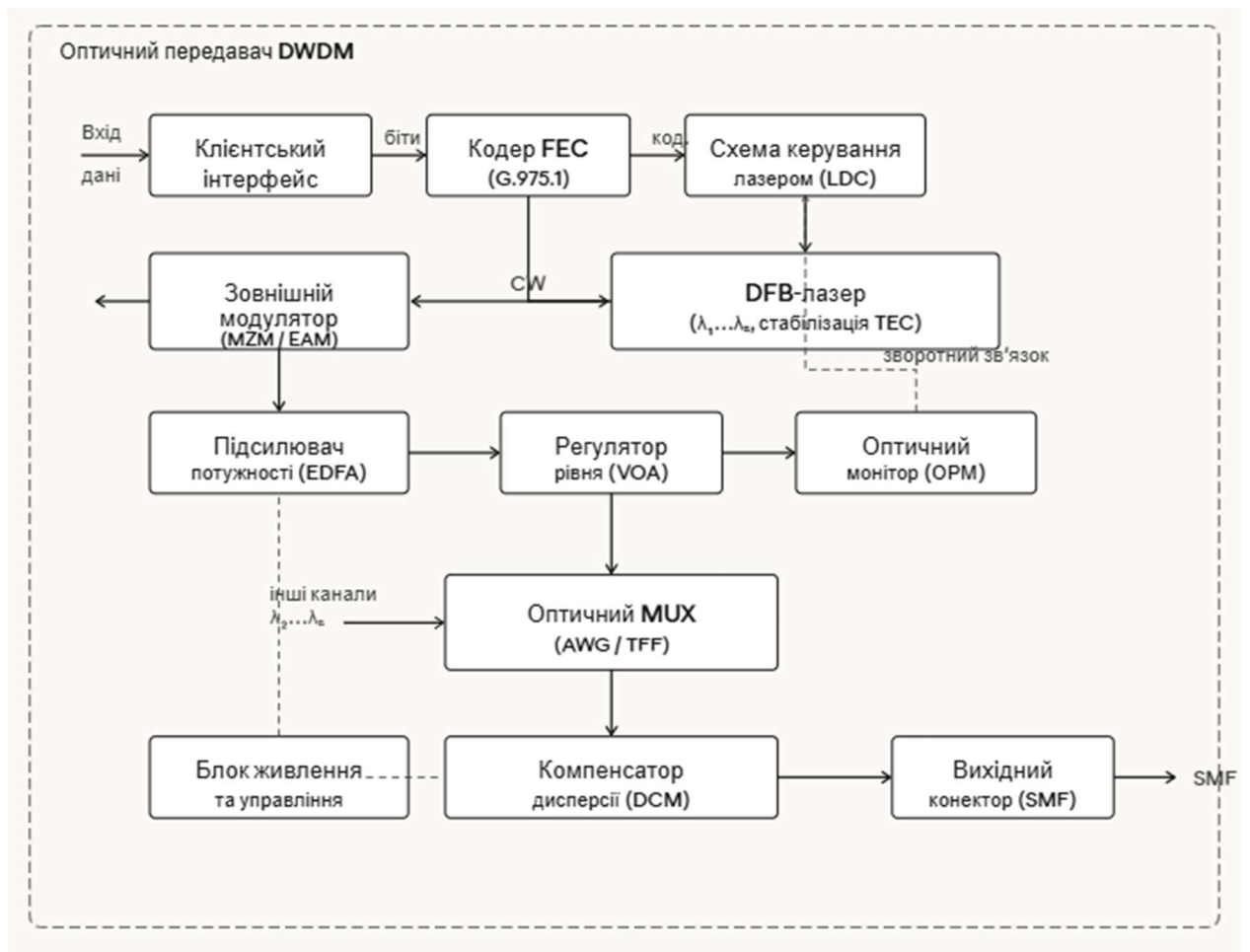


Рисунок 2.2 - Структурна схема оптичного передавача DWDM

Оптичні приймачі WDM-систем будуються на основі PIN-фотодіодів або лавинних фотодіодів (APD). Для систем із когерентним приймачем використовуються балансні фотоприймальні пристрої з відповідним локальним гетеродинним лазером. Основними параметрами приймача є смуга пропускання, шумовий еквівалент потужності (NEP) та мінімальна чутливість, яка визначає поріг безпомилкового приймання при заданому значенні коефіцієнта бітових помилок (BER).

2.3. Оптичні підсилювачі

Ербієві волоконні підсилювачі (EDFA — Erbium-Doped Fiber Amplifier) є ключовим елементом, що уможливив комерційне впровадження DWDM-систем. Принцип дії EDFA ґрунтується на вимушеному випромінюванні в легованому ербієм волокні при накачуванні лазером з довжиною хвилі 980 нм або 1480 нм. Підсилення відбувається безпосередньо в оптичній смузі, що виключає необхідність перетворення сигналу в електронну форму.

Смуга підсилення EDFA охоплює приблизно 1530–1565 нм (смуга C) і може бути розширена до смуги L (1565–1610 нм) шляхом подовження легованого волокна. Нерівномірність коефіцієнта підсилення за довжиною хвилі компенсується рівняльними фільтрами (GEF — Gain Equalization Filter) або вбудованими атенюаторами з регульованим загасанням.

Рамановські підсилювачі використовують нелінійний ефект вимушеного рамановського розсіювання безпосередньо у транспортному волокні. Їх перевагою є рівномірніший спектр підсилення та менший рівень шуму, однак вони потребують значно потужніших джерел накачування. Часто рамановські підсилювачі застосовують у поєднанні з EDFA для розширення смуги та зниження ефективного шумового показника лінії.

2.4. Компенсатори дисперсії

Хроматична дисперсія є одним з основних факторів, що обмежують дальність передачі в оптичних системах. Компенсатори дисперсії (DCM — Dispersion Compensating Module) дозволяють нейтралізувати накопичену дисперсію шляхом введення затримки з протилежним знаком. Найпоширенішим типом є волоконний компенсатор на основі спеціально

виготовленого волокна з від'ємним коефіцієнтом дисперсії (DCF), що включається в тракт між підсилювачами.

Брегівські решітки з лінійно-змінним кроком (Chirped FBG) також широко застосовуються як компактні й гнучкі компенсатори дисперсії. Різні довжини хвиль відбиваються від різних ділянок решітки, що забезпечує різну групову затримку і тим самим компенсує дисперсію. Такі компенсатори мають менші втрати потужності порівняно з DCF і легко налаштовуються.

2.5. Оптичні фільтри та конвертори довжини хвилі

Оптичні фільтри у системах WDM виконують функції вибору окремих каналів, пригнічення ASE-шуму підсилювачів та вирівнювання спектрального профілю потужності. Застосовуються тонкоплівкові інтерференційні фільтри, акустооптичні фільтри, перелаштовувані фільтри Фабрі-Перо та інтегрально-оптичні пристрої. Ключовими параметрами фільтрів є смуга пропускання, пригнічення позасмугових сигналів та втрати вставки.

Конвертори довжини хвилі (Wavelength Converters) забезпечують передавання сигналу з одного оптичного каналу на інший, що є необхідним у мережах з оптичною комутацією. Технічно конверсія реалізується методами оптичного саомодуляції (XGM), чотирьохфотонного змішування (FWM) або різностного частотного перетворення в нелінійних хвилеводах. Конвертори дозволяють усунути конфлікти довжин хвиль при маршрутизації та збільшити гнучкість мережі.

Лекція 3. Спотворення оптичних сигналів та завади у багатохвильових ВОСП

3.1. Хроматична дисперсія та поляризаційна модова дисперсія

Хроматична дисперсія (CD) виникає через залежність показника заломлення оптичного волокна від довжини хвилі: різні спектральні компоненти сигналу поширюються з різними швидкостями, що призводить до розширення імпульсів у часі та міжсимвольної інтерференції. У стандартному одномодовому волокні (SMF-28) коефіцієнт дисперсії в смузі C становить близько $+17$ пс/(нм·км). Хроматична дисперсія пропорційна добутку коефіцієнта дисперсії, довжини лінії та спектральної ширини сигналу.

Вплив CD критично зростає зі збільшенням швидкості передачі та дальності лінії. Для систем 10 Гбіт/с максимальна дисперсійна толерантність складає близько 1000 пс/нм, тоді як для 40 Гбіт/с — лише 60 пс/нм. При когерентному прийманні з цифровою компенсацією дисперсії (DSP) вдається подолати ці обмеження в значно ширших межах.

Поляризаційна модова дисперсія (PMD) обумовлена двоприменезаломленням реального волокна внаслідок відхилень форми серцевини від кола та механічних напружень. Два поляризаційні стани поширюються з різними груповими швидкостями, що спричиняє випадкове розширення імпульсів. PMD є статистичною величиною, що описується коефіцієнтом PMD (пс/ $\sqrt{\text{км}}$). При швидкостях 40 Гбіт/с і вище PMD стає серйозним обмежуючим фактором, особливо у старих кабельних системах.

3.2. Нелінійні ефекти в оптичних волокнах

При великих оптичних потужностях у волокні проявляються нелінійні ефекти, що можуть суттєво погіршити якість передачі у WDM-системах.

Нелінійність кремнієвого скла описується показником нелінійності γ ($\approx 1,3 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ для стандартного волокна), і її вплив тим більший, чим менший ефективний перетин серцевини волокна.

Само модуляція фази (SPM) виникає через залежність показника заломлення від інтенсивності поля (ефект Керра): фронт і хвіст оптичного імпульсу набувають різних фазових зсувів, що призводить до розширення спектра та взаємодії з дисперсією. В аномальній дисперсійній зоні SPM може компенсувати дисперсію, сприяючи формуванню солітонів; у нормальній зоні - навпаки, прискорює розширення імпульсів.

Перехресна модуляція фази (XPM) є між-канальним аналогом SPM: амплітудні коливання в одному каналі впливають на фазу сусідніх каналів через нелінійний показник заломлення. Ефективність XPM залежить від відносного хроматичного зсуву між каналами (walk-off) та їх потужності. Чотирьохфотонне змішування (FWM) породжує нові частотні компоненти через взаємодію пар каналів, що може призвести до серйозних перехресних спотворень, особливо на нульовій дисперсії.

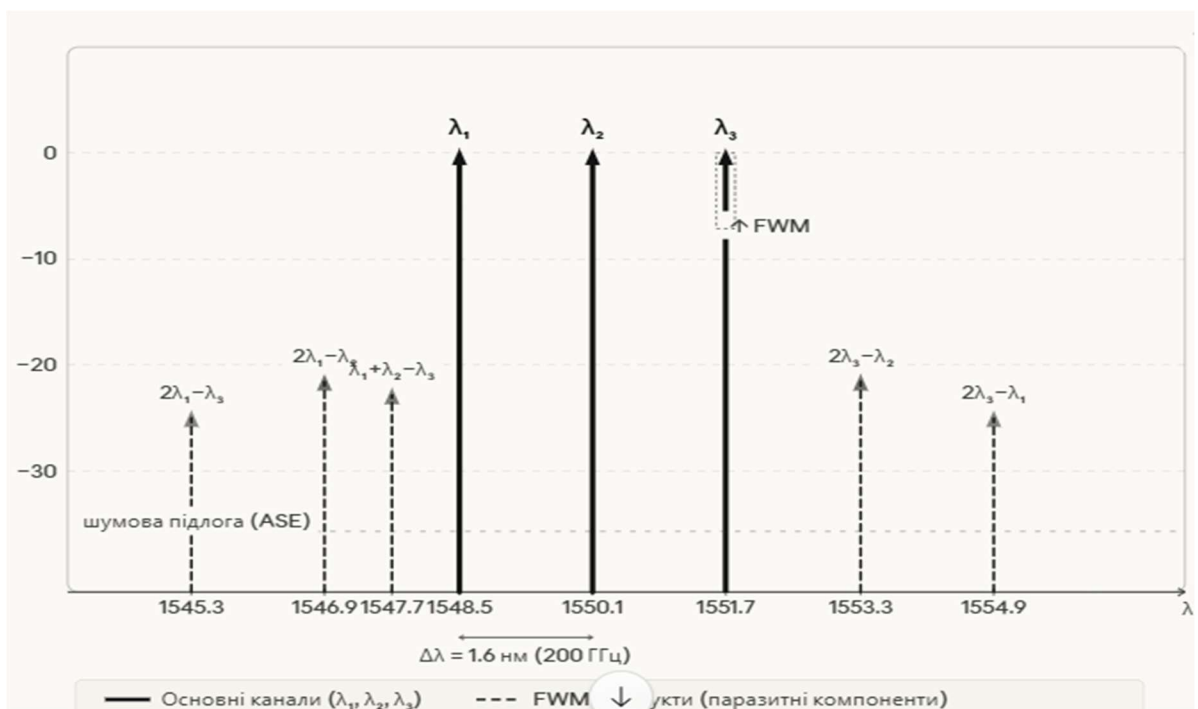


Рисунок 3.1 - Спектральний прояв ефектів FWM у DWDM-системі

Вимушене рамановське розсіювання (SRS) та вимушене мандельштам-бриллюєнівське розсіювання (SBS) також є значущими нелінійними ефектами. SRS призводить до перекачування потужності від каналів з меншою довжиною хвилі до каналів з більшою (ефект нахилу потужності), що порушує баланс рівнів каналів і погіршує якість передачі. SBS обмежує максимальну потужність безперервного сигналу в одному каналі і є особливо критичним у системах з вузьколінійними лазерами.

3.3. Шуми оптичних підсилювачів та перехідні ефекти

Посилене спонтанне випромінювання (ASE) є основним джерелом шуму в лініях з EDFA. Спонтанна люмінесценція активного середовища підсилюється у волокні разом з корисним сигналом, накопичуючись вздовж каскаду підсилювачів. Кількісно шум ASE характеризується шумовим показником підсилювача (NF, Noise Figure), типові значення якого становлять 4–6 дБ. Співвідношення сигнал/шум по оптичному полю (OSNR) є ключовим параметром якості DWDM-системи.

Перехідні завади між каналами у WDM-системах виникають через кілька механізмів: неідеальну вибірковість фільтрів та мультиплексорів, нелінійні ефекти XPM та FWM, а також насичення підсилювача при його навантаженні кількома каналами одночасно. Рівень перехідних завад нормується відношенням потужності небажаного сигналу до потужності основного каналу (XT, crosstalk).

Для аналізу впливу шумів і спотворень на ймовірність бітових помилок (BER) використовується комплексна модель тракту, що враховує OSNR, залишкову дисперсію, нелінійні ефекти та перехідні завади. Введення коефіцієнта Q (Q-фактора) дозволяє кількісно пов'язати форму часового ока на виході тракту з ймовірністю помилки.

3.4. Методи оптимізації та перспективні технологічні рішення

Для мінімізації нелінійних ефектів у WDM-системах застосовують волокна з великою ефективною площею серцевини (LEAF, TrueWave), що зменшують нелінійний коефіцієнт γ . Використання рознесення каналів з полярно-черговою схемою та оптимізація рівня оптичної потужності на вхід в кожен секцію підсилення дозволяють знизити вплив XPM і FWM.

Когерентні технології передачі з цифровою обробкою сигналів (DSP) на приймальному боці забезпечують компенсацію хроматичної та поляризаційної дисперсії в електронній формі, що суттєво пом'якшує вимоги до лінійного тракту. Формати модуляції QPSK, 16-QAM, 64-QAM дозволяють досягти спектральної ефективності понад 8 біт/с/Гц при збереженні прийняттого запасу OSNR.

Перспективними технологічними рішеннями для підвищення ефективності ВОСП WDM є: просторово-мультиплексовані системи (SDM) на основі багатоядерних або багатомодових волокон, цифрова зворотна симуляція (DBP) нелінійних ефектів та застосування машинного навчання для адаптивної компенсації спотворень. Розвиток Flex Grid ROADM і програмно-визначених оптичних мереж (SDON) відкриває нові можливості динамічного управління спектральними ресурсами.

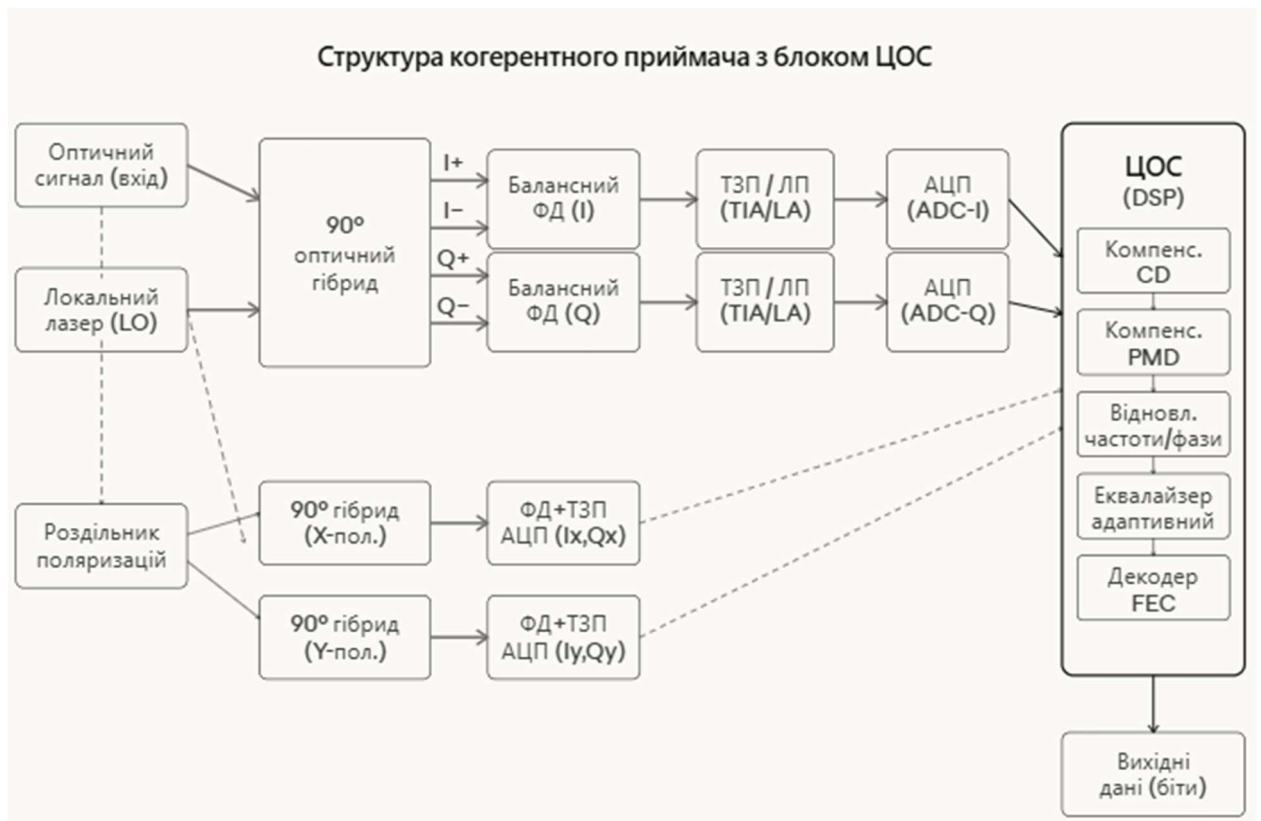


Рисунок 3.2 - Структура когерентного приймача з блоком цифрової обробки сигналів

Лекція 4. Лінійні тракти ВОСП

4.1. Призначення та структура лінійного тракту ВОСП

Лінійний тракт волоконно-оптичної системи передачі є сукупністю технічних засобів і середовищ, що забезпечують передавання оптичних сигналів між термінальними пунктами на задану відстань зі встановленими показниками якості. До складу лінійного тракту входять: оптичне волокно кабелю, лінійні підсилювачі (у підсилювальних пунктах), пристрої компенсації дисперсії, регенератори сигналів (у регенераційних пунктах), а також обладнання технічного обслуговування.

Відповідно до функцій пунктів обслуговування, лінійний тракт структурно розбивається на підсилювальні та регенераційні ділянки. Підсилювальна ділянка — відрізок між сусідніми підсилювальними пунктами, де здійснюється виключно оптичне підсилення сигналу без його відновлення у часовій та амплітудній формі. Регенераційна ділянка — відрізок між пунктами повної регенерації 3R (Reamplify, Reshape, Retime), де відновлюються усі параметри сигналу.

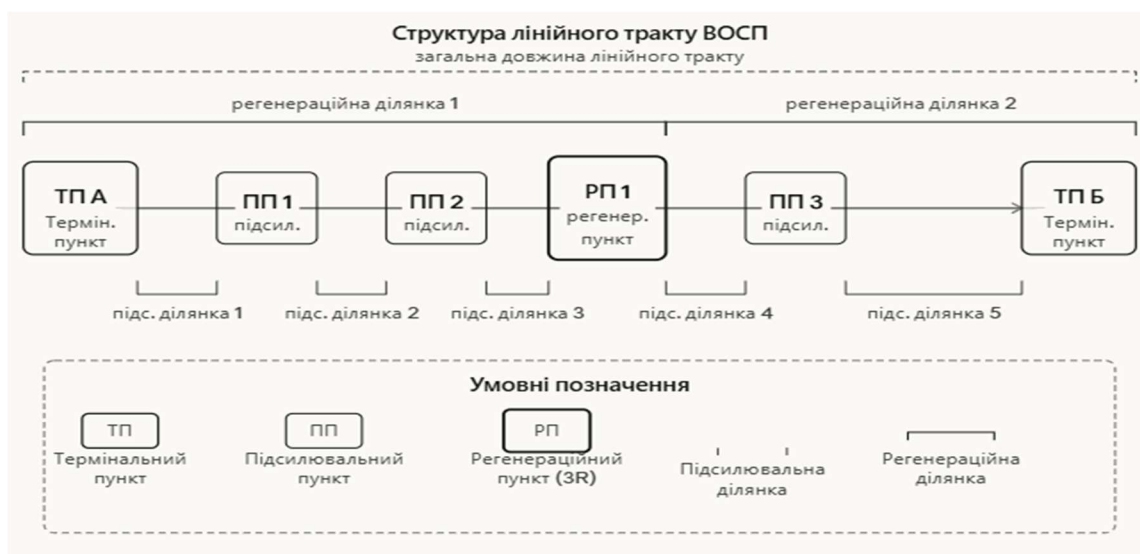


Рисунок 4.1 - Структура лінійного тракту ВОСП з підсилювальними та регенераційними пунктами

Сучасні транспортні WDM-системи будуються переважно за концепцією «оптично-прозорого» тракту (OLA — Optical Line Amplifier), де регенерація здійснюється лише у кінцевих пунктах або через значні відстані. Таке рішення мінімізує кількість складних і дорогих 3R-регенераторів, однак потребує ретельного обліку бюджету OSNR та нелінійних ефектів.

4.2. Розрахунок довжини підсилювальної ділянки

Розрахунок максимальної довжини підсилювальної ділянки L_{amp} ведеться виходячи з умови забезпечення заданого значення відношення сигнал/шум на виході ділянки. Основним критерієм є значення OSNR на рівні 0,1 нм у референсній точці після демультимплексора. Для каскаду з N однакових підсилювачів, що компенсують втрати однієї ділянки, OSNR визначається виразом, що враховує вхідну потужність каналу, коефіцієнт підсилення, шумовий показник підсилювача та спектральну смугу шуму.

Бюджет втрат підсилювальної ділянки включає: загасання оптичного волокна (α , дБ/км), втрати у з'єднувачах та зварних стиках, втрати у компенсаторі дисперсії та додатковому пасивному обладнанні. Для стандартного волокна G.652 загасання в смузі C становить близько 0,2 дБ/км. Типова довжина підсилювальної ділянки для систем DWDM при використанні EDFA з коефіцієнтом підсилення 20–25 дБ становить 80–120 км.

При розрахунку також враховується запас на деградацію системи (system margin), що зазвичай складає 3–4 дБ та враховує старіння компонентів, погіршення стиків кабелю з часом та нерівномірність підсилення за каналами. Нелінійні ефекти обмежують максимальну вхідну потужність каналу, тому оптимальна потужність ввімкнення підсилювача визначається як компроміс між вимогами до OSNR і нелінійністю.

4.3. Розрахунок довжини регенераційної ділянки

Довжина регенераційної ділянки обмежується переш за все накопиченим значенням OSNR після послідовності підсилювачів. Для оптично-прозорого тракту сумарний OSNR деградує зі збільшенням числа ділянок між регенераторами. Аналітична модель OSNR для каскаду з n підсилювальних ділянок дозволяє визначити максимальну кількість ділянок $n_{\max}$, при якій OSNR ще задовольняє вимоги до BER.

Залишкова хроматична дисперсія після компенсатора також є важливим обмежуючим параметром. Навіть після встановлення DCM залишається деяка не скомпенсована дисперсія, що накопичується вздовж тракту. При підвищених швидкостях передачі (≥ 40 Гбіт/с) залишкова дисперсія може ставати домінуючим чинником, що обмежує довжину регенераційної ділянки.

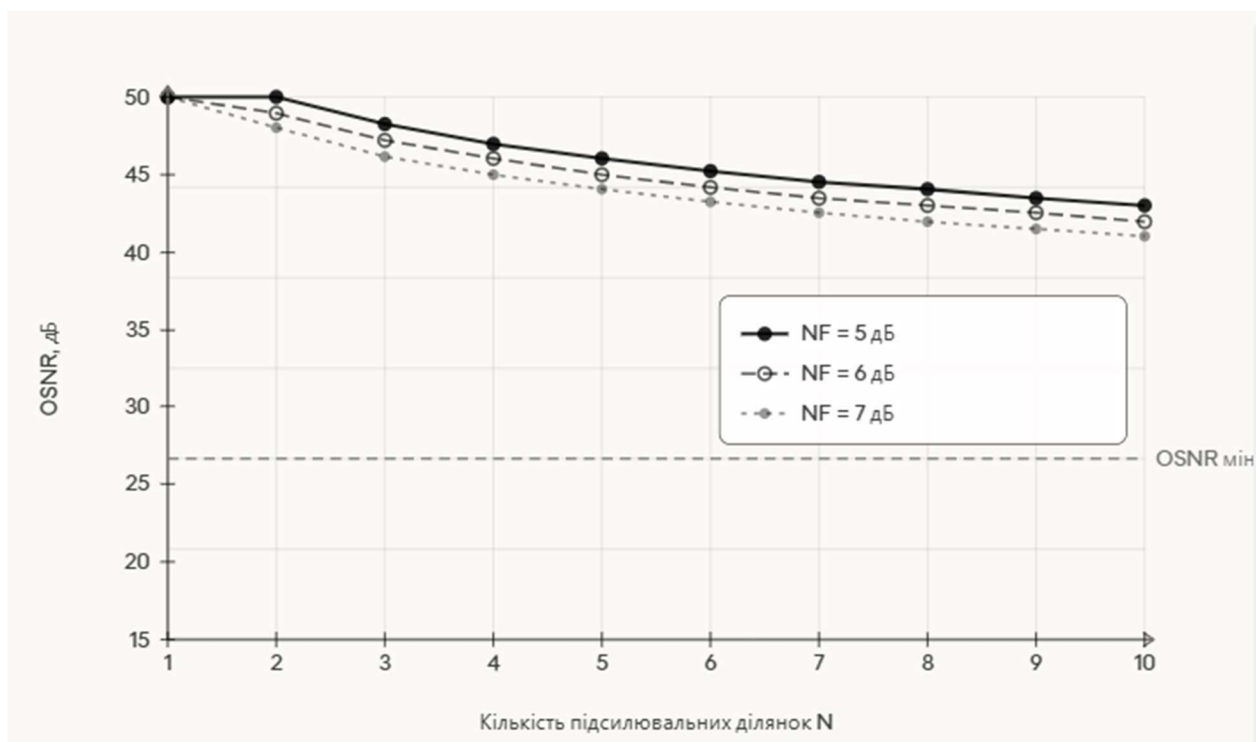


Рисунок 4.2 - Залежність OSNR від кількості підсилювальних ділянок у регенераційній секції

Для систем когерентної передачі завдяки DSP-компенсації значення допустимої залишкової дисперсії практично необмежено, тому регенераційна ділянка в класичному розумінні набуває іншого сенсу: регенерацію замінює електронна обробка сигналу на приймальних і передавальних транспондерах на вузлах мережі. Довжина між такими «прозорими» вузлами може сягати кількох тисяч кілометрів у транспортних підводних і магістральних системах.

4.4. Нормування якості широкосмугових каналів та трактів

Нормування показників якості оптичних каналів та трактів ВОСП здійснюється відповідно до рекомендацій МСЕ-Т серії G.800 та G.900. Основними характеристиками, що підлягають нормуванню, є: коефіцієнт бітових помилок (BER), коефіцієнт помилок блоків з похибками (BBER), коефіцієнт недоступності (UA), а також параметри джиттера і вандеру.

Для цифрових гієрархій SDH і OTN встановлюються кінцеві нормативи якості (end-to-end performance) для міжнародних і національних цифрових секцій, що потім розподіляються між ділянками тракту. Рекомендація G.826 визначає нормативи показників помилок для трактів ПЦІ та СЦІ на рівні окремих секцій. Для оптичних транспортних мереж OTN (G.709) нормативи розроблені в рекомендаціях серії G.8251.

У системах DWDM окремо нормується OSNR, залишкова дисперсія, рівень перехідних завад між каналами та нерівномірність потужності каналів у мультиплексованому сигналі. Значення OSNR у кінцевій точці тракту повинне перевищувати мінімальний поріг, що забезпечує задану ймовірність помилки з урахуванням коду завадостійкого кодування (FEC). Застосування FEC за стандартами G.975.1 дозволяє забезпечити приймання при OSNR на 6–8 дБ нижчому, ніж у системах без кодування.

Комплексне нормування якісних показників каналів і трактів ВОСП WDM є важливим інструментом проектування надійних і ефективних телекомунікаційних мереж. Системний підхід до розрахунку і нормування дає змогу забезпечити необхідний рівень сервісу в умовах зростання обсягів трафіку та ускладнення мережевих архітектур.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Голь В.Д., Ірха М.С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.
2. Тарбаєв С.І., Домрачева К.О., Заїка В.Ф., Трембовецький М.П. Проектування інфокомунікаційних мереж. Навчальний посібник.. – Київ: ННІТІ ДУТ, 2019. – 151 с.
3. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. – Львів: Львівська політехніка, 2016. – 336 с.
4. Кайдан М. В., Климаш М. М., Стрихалюк Б. М. Напрямні системи телекомунікаційних мереж. – Львів: Львівська політехніка, 2021. – 488 с.
5. П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник для вищих навчальних закладів. – К.:САММІТ-КНИГА, 2010. –640 С.: іл.
6. Буров Є.В. Комп'ютерні мережі: Підручник / Буров Є.В., Митник М.М. За заг. ред. Пасічника В.В. Львів: Магнолія 2019. – 204 с.
7. Горбатий І. В., Бондарєв А. П. Телекомунікаційні системи та мережі. Принципи функціонування, технології та протоколи. Львівська політехніка, 2016. – 336 с.
8. Комп'ютерні мережі. Локальні комп'ютерні мережі. Методичні вказівки до комп'ютерного практикуму. [Текст] / Уклад.: О.Ю. Кулаков, Р.Ю. Берест – К.: НТУУ «КПІ», 2012. –164 с.
9. Комп'ютерні мережі. Загальні принципи функціонування комп'ютерних мереж : Навчальний посібник / С. В. Мінухін, С. В. Кавун, С. В. Знахур. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – 210 с.