

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО
“ _____ ” _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР

Тема: «Аспекти впровадження NG- PON2»

Виконавець: _____ Ярослав ГАЛІНДЗОВСЬКИЙ
(підпис)

Керівник: _____ Веніамін АНТОНОВ
(підпис)

Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:

Консультант розділу «Охорона праці» _____ Батир ХАЛМУРАДОВ
(підпис)

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»
_____ Євгеній БОВСУНОВСЬКИЙ
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Денис БАХТІЯРОВ
(підпис)

Київ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ ” 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Галіндзовського Ярослава Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Аспекти впровадження NG- PON2»

затверджена наказом ректора від «07» вересня 2022 р. №1321/ст

2. Термін виконання роботи: з 05.09.2022 р. по 30.11.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: Цільова пропускна здатність складала не менше 40 Гбіт/с з лінійною швидкістю каналу на довжину хвилі до 10 Гбіт/с. Віртуальне з'єднання "точка-точка" (PtP WDM) за тією ж інфраструктурою PON, що і TWDM.

4. Зміст пояснювальної записки: Основні аспекти побудови оптичної лінії зв'язку NG-PON2, Проектування системи та технологічна здійсненність NG-PON2, Охорона праці, Охорона навколишнього середовища

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: Розвиток стандарту від PON до NG-PON2, WS-ODN з розгалужувачем потужності та WR-ODN зі змішаним циклічним AWG, Порівняння гібридного ODN та WS-ODN, Раманівські втрати на виснаження залежно від відстані за різних умов експлуатації, Маска позаканальної спектральної щільності потужності, Принцип роботи механізму дизерингу під час синхронізації за довжиною хвилі ONU, Циклічна маршрутизація AWG US по довжинах хвиль, Приклад конфігурації OLT, Зв'язок рівня TC AMCC з іншими системними функціями для прозорого та транскованого варіантів

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	05.09.2022- 06.09.2022	Виконано
2	Вступ	07.09.2022- 10.09.2022	Виконано
3	Основні аспекти побудови оптичної лінії зв'язку NG-PON2	11.09.2022- 15.10.2022	Виконано
4	Проектування системи та технологічна здійсненність NG-PON2	16.10.2022- 06.11.2022	Виконано
6	Охорона праці	07.11.2022- 12.11.2022	Виконано
7	Охорона навколишнього середовища	14.11.2022- 19.11.2022	Виконано
8	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	21.11.2022- 30.11.2022	Виконано

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	к.м.н., проф. Батир ХАЛМУРАДОВ		
Охорона навколиш- нього середовища	к.т.н., доц. Євгеній БОВСУНОВСЬКИЙ		

8. Дата видачі завдання: “22” серпня 2022 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Веніамін АНТОНОВ
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Ярослав ГАЛІНДЗОВСЬКИЙ
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Аспекти впровадження NG- PON2» містить 90 сторінок, 18 рисунків, 7 таблиці, 38 використаних джерел.

NG-PON2, P2P, P2MP, FTTx, ITU-T, GPON, XG-PON, OLT, WDM, ODN, WR-ODN, WS-ODN, OPP, ONU, TWDM AMCC, PtP WDM AMCC.

Об'єкт дослідження – аспекти впровадження пасивної оптичної мережі за технологією NG-PON2.

Предмет дослідження – проектування та побудова оптичної мережі з використанням технології NG-PON2.

Мета кваліфікаційної роботи – полягає в тому, щоб дати більш глибоке уявлення про вимоги фізичного рівня, втілені в G.989.2, та обґрунтувати деякі нові параметри, визначених оптичних інтерфейсів NG-PON2, розглянути важливі аспекти фізичного рівня системи NG-PON2, які відрізняють її від попередніх систем PON.

Метод дослідження – розрахунковий метод, метод порівняння, аналізу, метод моделювання, метод узагальнення та синтезу.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати для проектування мережі за технологією NG-PON2.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ОПТИЧНОЇ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ NG-PON2	13
1.1. Вступ	13
1.2. Огляд системи NG-PON2	14
1.3. Оптична розподільна мережа	16
1.3.1. WS-ODN та WR-ODN	16
1.3.2. Гібридний ODN	19
1.3.3. Класи втрат оптичного тракту та типи каналів	20
1.4. План довжин хвиль і можливості налаштування	21
1.4.1. Налаштування тимчасових класів	22
1.5. Штрафи оптичного шляху	24
1.5.1. Хроматична дисперсія	24
1.5.2. Раманівська нелінійність	25
1.5.3. Комбінований OPP	26
1.6. Аналіз перехресних перешкод	27
1.6.1. Спектральна щільність позаканальної оптичної потужності	31
1.6.2. Спектральна щільність позасмугової оптичної потужності	32
1.6.3. Спектральна щільність оптичної потужності, коли вона не включена	33
1.6.4. Стійкість до внутрішньосмугових перехресних перешкод	34
1.6.5. Маска для позаканальної спектральної щільності потужності	35
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЗДІЙСНЕНІСТЬ NG-PON2	38
2.1. Контроль довжини хвилі	38
2.1.1. Стабільність довжини хвилі	38
2.1.2. Точність довжини хвилі	40

2.1.3. Блокування довжини хвилі	40
2.2. Технологічна здійсненність - нові та складні підсистеми	43
2.2.1. Настроювані трансівери	43
2.2.2. Лазери із зовнішньою модуляцією та лазери із прямою модуляцією для прий- мача ONU	46
2.2.3. Мультиплектори довжин хвиль	50
2.3. Управління та контроль	54
2.3.1. PtP WDM AMCC	55
2.3.2. TWDM AMCC	57
2.4. Майбутні напрямки стандарту NG-PON2 PMD	58
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	63
3.1. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори діючі в робочій зоні інженера-дослід- ника	63
3.2. Технічні та організаційні заходи для зменшення рівня впливу небезпечних і шкі- дливих виробничих факторів	64
3.3. Пожежна безпека	68
3.4. Інструкція з охорони праці	72
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	76
4.1. Аналіз методів природокористування	76
4.2. Актуальність розглянутого джерела забруднення	77
4.3. Характеристика ПК як джерела забруднення	77
4.4. Вплив електромагнітних полів комп'ютера на здоров'я користувача	78
4.5. Комп'ютер як джерело електростатичного поля	79
4.6. Комп'ютер як джерело рентгенівського випромінювання	79
4.7. Еколого-економічне обґрунтування	80
ВИСНОВКИ	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ANSI - American National Standards Institute - американський національний інститут стандартів

APON - ATM PON – перший стандарт пасивних оптичних мереж ITU-T G.983.x, що базується на транспорті осередків ATM.

BPON - Broadband PON - стандарт широкосмугового пасивної оптичної мережі, рекомендація ITU-T G.983.3, що з'явився розширеним варіантом APON.

DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing - компактне спектральне ущільнення

EII - European Information Infrastructure - Європейська інформаційна інфраструктура

ETSI - European Telecommunications Standards Institute - Європейський Інститут Телекомунікаційних Стандартів

FTTB - Fiber To The Building - доведення кабелю з ОВ до будівлі

FTTC - Fiber To The Curb - доведення кабелю з ОВ до того місця, де встановлено кабельний шафа

FTTH - Fiber To The Home - доведення кабелю з ОВ до житлового будинку

FTTO - Fiber To The Office - доведення кабелю з ОВ до офісу

FTTOpt - Fiber To The Optimum - загальна аббревіатура, що означає доведення кабелю з ОВ до якоїсь оптимальної, з точки зору Оператора та/або користувача, точки)

FTTP - Fiber To The Premises - доведення кабелю з ОВ до приміщення клієнта

FTTR - Fiber To The Remote - доведення кабелю з ОВ до віддаленого модуля, концентратора, мультиплексора або УАТС

HDTV - (від англ. High-Definition Television) - телебачення високої чіткості

IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers - інститут інженерів з електроніки та електротехніки

IP - (від англ. Internet Protocol) - межсетевой протокол

ITU-T - (від англ. International Telecommunication Union, Telecommunication sector) - Міжнародний союз електрозв'язку

GPON - Gigabit PON - стандарт пасивних оптичних мереж ITU-T G.984.3, що розглядається як органічне продовження APON/BPON

GEAPON - Gigabit Ethernet PON - стандарт пасивних оптичних мереж IEEE 802.3ah, що базується на Gigabit Ethernet і забезпечує повну сумісність з IP-мережами.

POP - Point of Presence - інтерфейс між мережами різних Операторів; дослівно - точка присутності

PON - Passive Optical Network - це технологія пасивних оптичних мереж

PMP - Point-to Multipoint - конфігурація «точка - безліч точок»

PMD - Стандарт рівня, який залежить від фізичного середовища

PPP - Point-to-Point Protocol - протокол «точка-точка»

OLT (Optical Line Terminal) - пристрій, що встановлюється в центральному офісі. Це пристрій приймає дані з боку магістральних мереж через інтерфейси SNI (Service Node Interfaces) і формує низхідний потік до абонентських вузлів (прямий потік) по дереву PON.

ONT (Optical Network Terminal) - має, з одного боку, абонентські інтерфейси, а з іншого, - інтерфейс для підключення до дерева PON. ONT приймає дані від OLT, конвертує їх і передає абонентам через абонентські інтерфейси UNI (User Network Interfaces)

ONU - (від англ. Optical Network Unit) - оптичний мережевий модуль

Rx - приймачі блоку оптичної мережі (ONU)

xHaul - транспортні мережі Fronthaul, Midhaul і Backhaul, які з'єднують вузли стільникового зв'язку один з одним, з опорною мережею і, зрештою, з дата-центрами, в яких розміщується актуальний контент

TWDM - методі гібридного мультиплексування з тимчасовим і спектральним поділом каналів

Tx - передавачі блоку оптичної мережі (ONU)

ВСТУП

Актуальність теми. NG-PON2 – це перша в галузі заснована на стандартах пасивна оптична мережева система з кількома довжинами хвиль (у кожному напрямку), сумісна з оптичними розподільчими мережами з розподілом по потужності. Рекомендація про рівень, що залежить від фізичного середовища (ITU-T G.989.2), є результатом більш ніж трирічної спільної роботи членів FSAN та 15-ї Дослідницької комісії ITU-T, групи з питання 2 (Study Group 15, Question 2 of the ITU-T).

Робота присвячена темам проектування оптичних ліній, включаючи характеристики оптичної розподільної мережі, план довжин хвиль, деградацію, пов'язану з раманівською нелінійністю волокна, та стійкість до міжканальних перехресних перешкод. У роботі також описується можливість налаштування довжини хвилі блоків оптичної мережі та її вплив на специфікацію рівня, що залежить від фізичного середовища.

Робота проводить технічний аналіз та обґрунтування Рекомендації ITU-T G.989.2: специфікація рівня, що залежить від фізичного середовища, для пасивних оптичних мереж з пропускною здатністю 40 Гбіт/с (NG-PON2). У той час обговорюються теми, пов'язані з проектуванням оптичних ліній зв'язку, також основна увага приділяється управлінню довжиною хвилі, технологічній здійсненності, управлінню та проектування каналів управління, а також потенційним майбутнім напрямкам стандартизації такої багатохвильової системи PON. Оскільки система NG-PON2 продовжуватиме розвиватися, також обговорюються технологічні розширення, щоб забезпечити керівництво для майбутніх досліджень.

Мета і завдання дослідження полягає в тому, щоб дати більш глибоке уявлення про вимоги фізичного рівня, втілені в G.989.2, та обґрунтувати обґрунтування деяких нових параметрів, визначених оптичних інтерфейсів NG-PON2.

У наступних розділах детальніше обговорюються важливі аспекти фізичного рівня системи NG-PON2, які відрізняють її від попередніх систем PON.

У розділах, присвячених аспектам рівня, залежного від фізичного середовища

(PMD) стандартів NG-PON2 [1], ми розглядаємо контроль довжини хвилі, здійсненість технології, дизайн каналу управління та контролю, а також потенційні майбутні напрямки для NG-PON2 PMD стандарту.

У стандартах NG-PON2 вказані дві технології, а саме гібридна PON з мультиплексуванням, з тимчасовим та спектральним поділом каналів (TWDM) та накладання довжин хвиль точка-точка (PtP WDM). Однією з проблем при впровадженні обох цих технологій для системи NG-PON2 є реалізація передавача (Tx), що настроюється, в оптичному мережевому блоці (ONU) для бюджетних проєктів, з використанням послуг «оптоволокно до дому (fiberto-the-home services)». Розглядаються вимоги до характеристик довжини хвилі Tx, що настроюються, а також потенційні методи їх задоволення, обговорюються основні підсистеми та описуються передбачувані технології їх реалізації. У деяких випадках досить невеликі модифікації існуючих технологій, але для більш складних функцій і опцій необхідні значні технологічні кроки.

Об'єктом дослідження є аспекти впровадження пасивної оптичної мережі за технологією NG-PON2.

Предметом дослідження є проєктування та побудова оптичної мережі з використанням технології NG-PON2.

Методи досліджень – розрахунковий метод, метод порівняння, аналізу, метод моделювання, метод узагальнення та синтезу.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі було описано нові канали управління та контролю, що дозволяють керувати ONU NG-PON2, коли традиційні підходи, засновані на внутрішньосмугових методах, неможливі з різних службових та експлуатаційних причин.

Практичне значення отриманих результатів.

Незважаючи на те, що роботу над Рекомендацією ITU-T G.989.2 було завершено, низка можливих варіантів удосконалення вже розглядається. У роботі також розглядаються потенційні майбутні напрямки стандарту NG-PON2 PMD з особливим акцентом на розширену пропускну спроможність та надання розширене

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2022 р.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ОПТИЧНОЇ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ NG-PON2

1.1. Вступ

Оператори мереж продовжують спостерігати експоненційне зростання трафіку, що передається їх мережами, обумовлений додатками та послугами, що споживають велику смугу пропускання. На кордоні мережі попит на смугу пропускання, що росте, задовольняється за рахунок того, що оптоволокно простягається глибше в мережу доступу до абонентів і, в кінцевому рахунку, завершується в приміщенні абонента у разі оптоволокна до будинку/приміщення (Fiber-to-the-home/premises). Крім того, з'являються нові програми, що вимагають глибших волоконних архітектур, такі як Mobile Backhaul/Fronthaul і високошвидкісні орендовані лінії Ethernet (xHaul - транспортні мережі Fronthaul, Midhaul і Backhaul, які з'єднують вузли стільникового зв'язку один з одним, з опорною мережею і, зрештою, з дата-центрами, в яких розміщується актуальний контент).

Щоб задовольнити потреби більш високої пропускної спроможності, мережеві оператори шукають нові технології оптоволоконного доступу. З цією метою мережеві оператори-члени FSAN [1] працювали разом, щоб визначити свої вимоги до системи пасивної оптичної мережі (PON) нового покоління з більш високою пропускною здатністю [2]. У свою чергу, це призвело до подальших досліджень у рамках усієї групи FSAN для визначення технологій-кандидатів, які відповідають цим вимогам.

Система, визначена в FSAN як найбільш відповідальна їх вимогам у терміни, необхідних обслуговування очікуваного попиту, була заснована на методі гібридного мультиплексування з тимчасовим і спектральним поділом каналів (TWDM). Цільова пропускна здатність складала не менше 40 Гбіт/с з лінійною швидкістю каналу на довжину хвилі до 10 Гбіт/с. На додаток до цього були включені канали з накладанням

довжин хвиль, щоб забезпечити віртуальне з'єднання "точка-точка" (PtP WDM) за тією ж інфраструктурою PON, що і TWDM.

Як тільки ідеї, розроблені в рамках FSAN, стали досить зрілими, і виник високий рівень консенсусу у галузі, компанії-члени FSAN внесли своє пропозиція у ITU-T, щоб ініціювати офіційний проект розробки стандартів. NG-PON2 - це нова система PON, заснована на стандартах [3], що виникла в результаті проекту, зробленого Study Group 15, Question 2 of the ITU - T.

Рання розробка стандартів NG-PON2 була розглянута раніше [4] разом із загальним оглядом базових характеристик фізичного рівня.

1.2. Огляд системи NG-PON2

NG-PON2, як зазначено в рекомендаціях ITU-T серії G.989, є наступником стандарту G-PON [5] та XG-PON1 [6], які втілюють стандарти ITU-T 1 та 10 Гбіт/с – на основі технологій PON відповідно. Стандарт рівня, який залежить від фізичного середовища (PMD), поширюється на рекомендацію G.989.2. Ключовою особливістю, яка відрізняє систему NG-PON2 від її попередників, є специфікація першого в галузі стандарту PON, що підтримує кілька довжин хвиль у кожному напрямку та сумісність із оптичними розподільчими мережами (ODN) на основі розгалужувачів потужності. Багато існуючих функцій G-PON і XG-PON1, такі як класи втрат в оптичному тракті, підтримка радіочастотного відео та вимоги до обслуговування, зберігаються в системі NG-PON2, щоб забезпечити максимальне повторне використання існуючих технологій, встановленої волоконно-оптичної інфраструктури та співіснування з розгорнутими застарілими системами PON (Рис. 1.1).

У стандартах NG-PON2 вказано дві технології: TWDM PON [7] та накладання довжин хвиль PtP WDM PON. Через фундаментальну вимогу NG-PON2 до сумісності з ODN на основі розгалужувачів потужності, цим системам PON потрібно оптика, що налаштовується по довжині хвилі в передавачі (Tx) і приймачі (Rx) блоку оптичної мережі (ONU). Робота систем NG-PON2 не може залежати від фільтрації довжин хвиль ODN, навіть якщо не виключається робота через розгалужувачі довжин хвиль.

Це робить PtP WDM PON у NG-PON2 унікальним у порівнянні з попередніми концепціями систем WDM PON [8] і призводить до синергії в технології налаштовуваних приймачів з TWDM PON, що дає можливість знизити вартість оптичних компонентів.

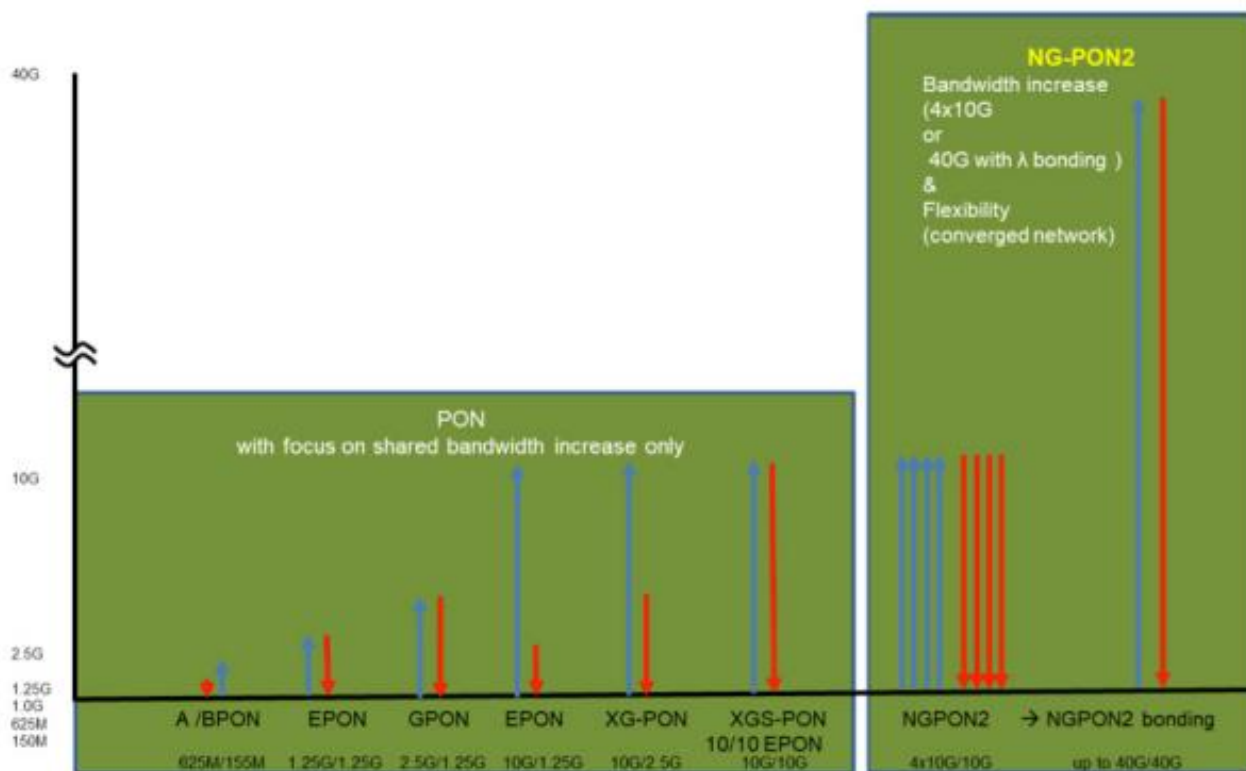


Рис.1.1. Розвиток стандарту від PON до NG-PON2

Системи NG-PON2 підтримують мінімальну сукупну пропускну здатність 40 Гбіт/с у напрямку DS і 10 Гбіт/с у напрямку US. З точки зору довжини каналу, TWDM пропонує три комбінації швидкості лінії DS/US (висхідного (US) і низхідного (DS) потоків): базовий варіант 10/2,5 Гбіт/с та додаткові симетричні швидкості 10/10 та 2,5/2,5 Гбіт/с. Для передачі послуг Ethernet, SDH/OTN та CPRI визначено три класи швидкості лінії (близько 1, 2,5 та 10 Гбіт/с) для PtP WDM. Кожна система NG-PON2 підтримує щонайменше 256 адресованих ONU на ODN. Оптичні параметри вказані для чотирьох та восьми двонаправлених каналів довжин хвиль для TWDM та PtP WDM відповідно. Проте специфікація передбачає майбутнє збільшення числа каналів довжини хвилі для обох технологій.

1.3. Оптична розподільна мережа

Системи NG-PON2 можуть підтримувати ODN з поділом потужності та довжини хвилі, а також їх гібриди. ODN підтримує чотири класи втрат на оптичному шляху (OPL - optical path loss), раніше вказані для XG-PON1 (Таблиця 1.1), не накладаючи при цьому обмежень на кількість, географічне розподілення (у межах досяжності) або кількість портів розгалужувачів.

Підтримка ODN тільки з поділом потужності є обов'язковою вимогою для системи NG-PON2, щоб забезпечити зворотну сумісність із значною встановленою базою оптоволоконної інфраструктури доступу. Хоча ODN з розділенням по довжинах хвиль дозволені, ONU, що не мають здатності вибіркової за довжиною хвилі і, таким чином, можуть працювати тільки в ODN з повним поділом по довжині хвилі, виходять за межі стандартів NG-PON2.

Два класи архітектури PtP WDM PON ODN описані в Додатку А G.989.2:

- 1) ODN з вибором довжини хвилі (WS-ODN), який спирається на фільтри, що настроюються для забезпечення можливості вибору довжини хвилі в ONU;
- 2) ODN з маршрутизацією за довжиною хвилі (WR-ODN), який має вбудовану можливість маршрутизації довжини хвилі через роздільники довжини хвилі ODN.

Різні типи ODN та особливості їх проектування докладніше описані нижче.

1.3.1. WS-ODN та WR-ODN

Системи NG-PON2 підтримують одноступінчастий поділ, а також багатоступінчастий поділ WS-ODN з вимогою підтримки максимального коефіцієнта поділу щонайменше 1:64. Зрозуміло, можна використовувати більш низькі коефіцієнти поділу. Таким чином, з класами OPL, перерахованими в Таблиці 1.1. можна повторно використовувати всі успадковані ODN. Для співіснування з іншими системами PON, наприклад, G-PON та XG-PON1, мультиплексор діапазону довжин хвиль, званий елементом співіснування (CE - coexistence element), дозволяє їх об'єднувати в тому самому ODN. Відповідні втрати CE, що вносяться, об'єднані з ODN і, таким чином, охоплюються класом OPL. Поділ потужності в практичних пристроях призводить до

втрат, які масштабуються приблизно з $\log_2(M)$ 3,5 дБ, де M - загальний коефіцієнт поділу, а надмірні втрати 0,5 дБ передбачаються для кожного поділу 1x2. Таким чином, максимальне охоплення може залежати від коефіцієнта розподілу. Приклад WS-ODN показано у верхній частині рисунка 1.2.

Системи NG-PON2 також можуть бути засновані виключно на WR-ODN, що має сенс тільки для розгортання PtP WDM. WR-ODN дозволяє збільшити радіус дії або використовувати прийомопередавачі з нижчими класами бюджету. Це зв'язано з нижчими внесеними втратами у розгалужувачах довжини хвилі проти розгалужувачів потужності.

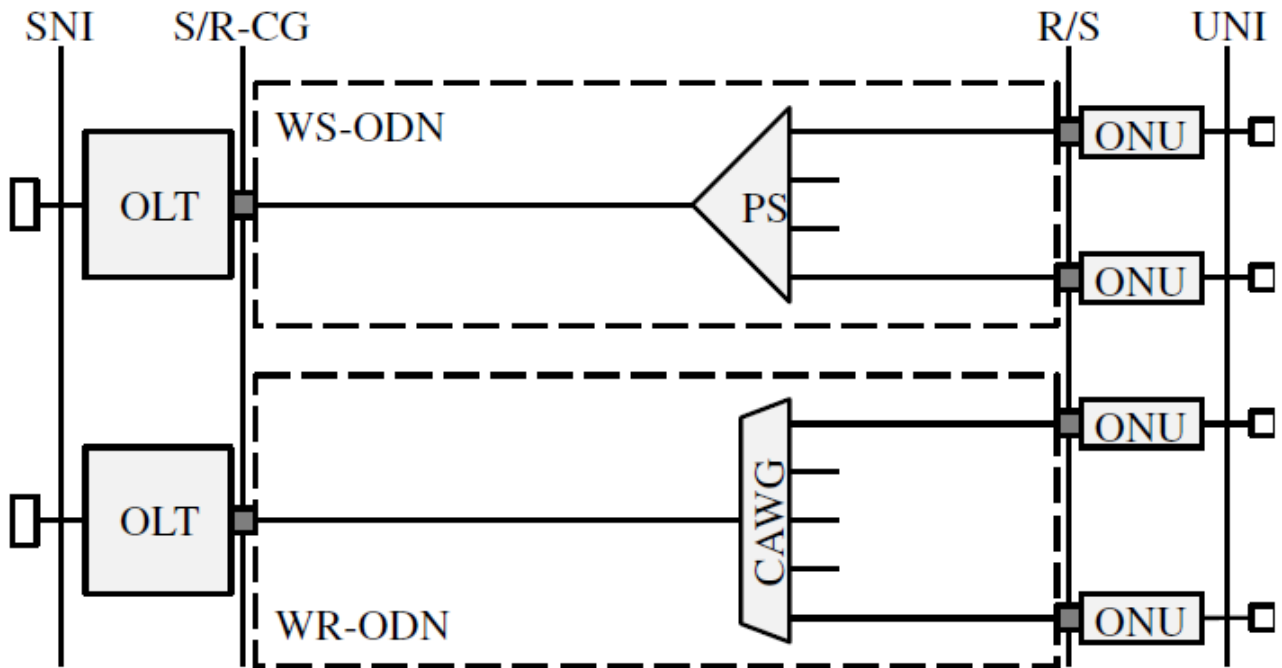
Для систем NG-PON2 потрібен мультиплексор довжин хвиль (WM – wavelength multiplexer) для об'єднання каналів з кількома довжинами хвиль. WM вважається частиною обладнання оптичного терміналу (OLT). Додаткові втрати від WM не є частиною втрат ODN, вказаних від виходу WM (еталонна точка S/R-CG) до входу ONU (еталонна точка R/S), як показано на рис. 1.2.

S/R-CG позначає місце, де OLT відправляє/приймає набір пар каналів довжин хвиль DS/US, званих групою каналів (CG), в/з ONU. У OLT функція завершення логічного каналу (CT) завершує кожен окремий канал TWDM або PtP WDM.

Таблиця 1.1

Класи втрат оптичних транспортних засобів ODN в NG-PON2

Клас втрат	Клас N1	Клас N2	Клас E1	Клас E2
Мінімум	14 дБ	16 дБ	18 дБ	20 дБ
Максимум	29 дБ	31 дБ	33 дБ	35 дБ



CG: група каналів

SNI: сервісно-мережевий інтерфейс

UNI: користувально-мережевий інтерфейс

Рис. 1.2. WS-ODN з розгалужувачем потужності (PS, вгорі) та WR-ODN зі змішаним циклічним AWG (CAWG, внизу). Також показані відповідні стандартні точки інтерфейсу мережі доступу.

Фільтри в WM і розгалужувачі довжини хвилі для WR-ODN можуть бути реалізовані у вигляді масивних хвилеводних решіток (AWG) або тонкоплівкових фільтрів. Спліттери (wavelength splitters) або розгалужувач на 40–80 каналів можуть мати втрати від 6 до 7 дБ при використанні AWG. Можна використовувати один змішаний спліттер, такий як циклічний AWG або каскадний фільтр. Приклад WR-ODN з одним AWG показаний у нижній частині рисунку 1.2.

Незалежна від довжини хвилі оптоволоконна мережа може спростити планування та виділення ширини смуги та довжини хвилі. Для повної гнучкості потрібно WS-ODN. WR-ODN можуть підтримувати лише певний ступінь гнучкості призначення довжини хвилі при використанні циклічних AWG $N \times M$ з кількома вхідними та вихідними портами [9].

Добуток загальної досяжності фідера і пропускної здатності WR-ODN може бути вищим, ніж у WS-ODN. Це пов'язано з нижчими втратами при розподілі WR-ODN. Таким чином, WR-ODN може краще підходити в тих випадках, коли PtP WDM використовується для агрегування частини мережі, наприклад, для комбінованого зворотного та прямого трафіку в сценаріях конвергенції фіксованого та мобільного зв'язку та нових сільських районах. WS-ODN є суворо обов'язковим у випадках підтримки застарілої ODN і, як правило, краще для побутового доступу та (щільних) міських районах.

1.3.2. Гібридний ODN

ODN NG-PON2 може бути гібридом типів WS і WR. У порівнянні з WS-ODN такі гібридні ODN можуть забезпечувати вищі коефіцієнти поділу для того ж класу OPL. Наприклад, як показано на рисунку 1.3, для роботи у двокаскадній WS-ODN з коефіцієнтом поділу 1:256 системі NG-PON2 потрібен бюджет втрат 26–28 дБ. Якщо розгалужувач потужності другого каскаду замінити на AWG, загальні втрати, що результують, складуть номінально 16–18 дБ, що дозволить розумно скоротити запас потужності системи і втрати в волокні.

Гібридний підхід також можна використовувати для розподілу сегментів ODN. Наприклад, перший сегмент відправляє всі сигнали на розгалужувач потужності, тоді як другий сегмент спрямовує певні довжини хвиль конкретним кінцевим користувачам через спліттер (розгалужувач довжин хвиль). В іншому прикладі перший сегмент групує довжини хвиль як набори довжин хвиль за допомогою розгалужувача довжини хвилі, тоді як другий сегмент відправляє всі довжини хвиль в одному наборі ONU через розгалужувач потужності. Можливі численні комбінації ODN для задоволення потреб різних операторів та додатків.

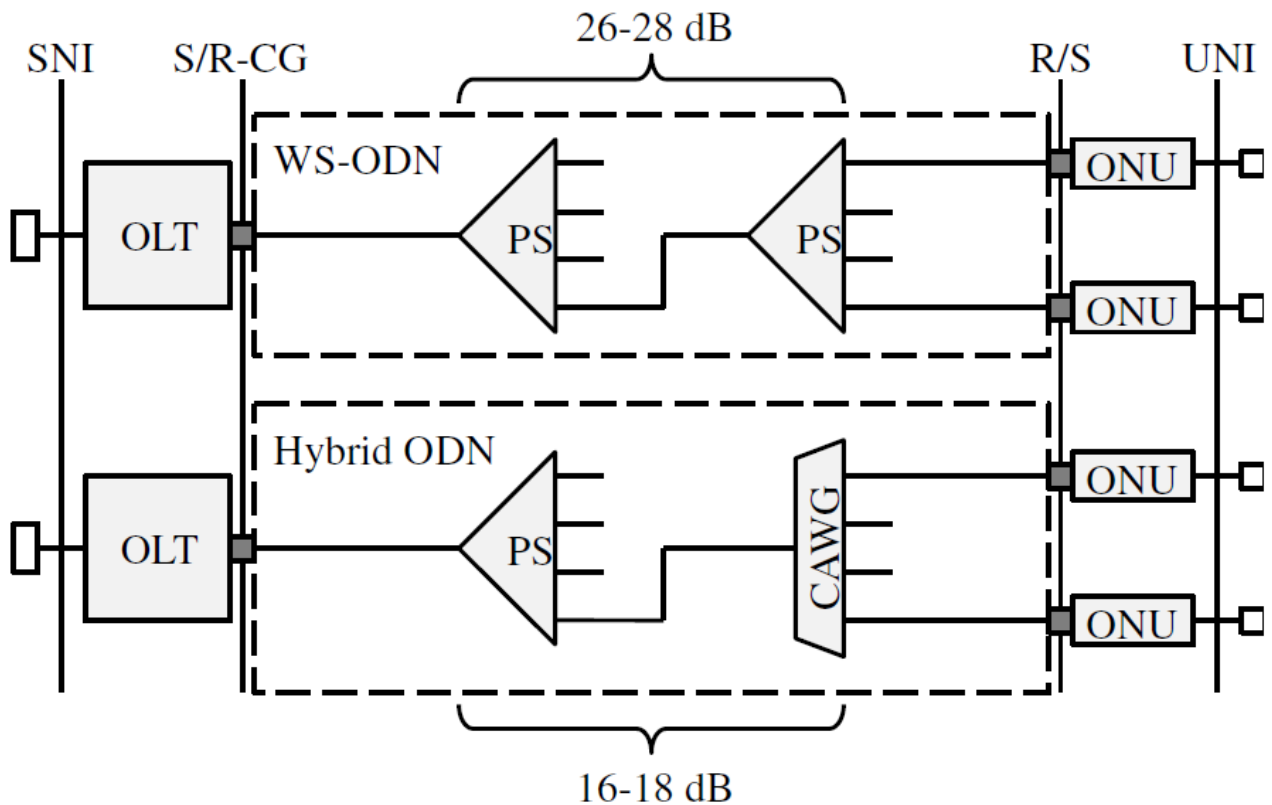


Рис. 1.3. Порівняння гібридного ODN та WS-ODN.

1.3.3. Класи втрат оптичного тракту та типи каналів

Чотири класи OPL, зазначені для систем NG-PON2, успадковані від рекомендації XG-PON1 PMD, тобто номінальний 1 (N1), номінальний 2 (N2), розширений 1 (E1) і розширений 2 (E2), як показано в Таблиці 1.1. Ці класи OPL дозволяють повторно використовувати встановлену оптоволоконну інфраструктуру на основі WS-ODN для систем NG-PON2. Параметри оптичного інтерфейсу Tx та Rx як для TWDM, так і для PtP WDM вказані для підтримки цих чотирьох класів OPL. Класи OPL NG-PON2 N1 (14–29 дБ) та E1 (18–33 дБ) сумісні з класами OPL G-PON B+ (13–28 дБ) та C+ (17–32 дБ), що дозволяє співіснування систем NG-PON2 та G-PON в одному ODN. Рівні потужності оптичного інтерфейсу класу N1 аналогічні класам IEEE EPON PX30 та PR/PX30. Клас E1 визначається рівнями потужності оптичного інтерфейсу, аналогічними класам IEEE EPON PX40 та PR/PX40. Така спільність оптичних характеристик дає змогу збільшити обсяг загальних оптичних субмодулів у двох типах систем PON, що, як очікується, допоможе мінімізувати витрати.

Як варіант реалізації NG-PON2 включає два висхідних типу каналу TWDM, які відрізняються параметрами оптичного інтерфейсу. Параметри лінії зв'язку типу А отримані з неявного припущення про відсутність використання оптичного підсилювача OLT Rx. І навпаки, базове припущення для каналу типу В полягає в тому, що параметри можна порівняти з OLT Rx з оптичним попереднім посиленням. Отже, для каналу типу А потрібний потужніший ONU Tx, а каналу типу В потрібна більш висока чутливість OLT Rx у точці S/R-CG. Це дає більше технологічних можливостей компонентів NG-PON2. Слід зазначити, що, незважаючи на те, що при визначенні параметрів інтерфейсу існують базові припущення щодо OLT Rx, стандарт NG-PON2 PMD не визначає будь-яку конкретну реалізацію.

1.4. План довжин хвиль і можливості налаштування

Вибір плану довжин хвиль NG-PON2 став результатом ретельної оцінки багатьох варіантів і компромісу між двома, здавалося б, вимогами, що розходяться. Хоча він повинен допускати співіснування зі застарілими поколіннями PON, він також має бути досить гнучким, щоб пристосовуватися до різних сценаріїв розгортання та майбутнього розширення.

Остаточний узгоджений план довжин хвиль показаний у Таблиці 1.2. Спектр TWDM DS розподіляється, щоб уникнути перешкод для відеосигналів RF і XG-PON1, дозволяючи здійснювати моніторинг ODN на довжині хвилі 1650 нм.

Вибір С-діапазону для TWDM US повинен забезпечити недорогу передачу ONU за рахунок повторного використання існуючих оптичних технологій, які в даний час поставляються у великих обсягах.

Три варіанти спектру TWDM US (широка смуга, скорочена смуга та вузька смуга) визначаються можливостями керування довжиною хвилі ONU Tx, при цьому покращене керування дозволяє використовувати більш вузьку робочу смугу. Для PtP WDM передбачено два варіанти спектру: розширений спектр для підтримки розгортання з нуля або повторне гнучке використання спектра, номінально виділеного для інших систем PON, але не зайнятого; та загальний спектр для повного співіснування

із застарілими системами PON та TWDM. На відміну від TWDM, PtP WDM дозволяє каналам довжин хвиль DS та US перебувати в одному діапазоні, що забезпечує деяку гнучкість реалізації.

Таблиця 1.2

Довжини хвиль NG-PON2

TWDM		PtP WDM
Downstream	Upstream	Down/Upstream
1596 – 1603 нм	Широка смуга 1524 – 1544 нм	Розширений спектр 1524 – 1625 нм
	Скорочена смуга 1528 – 1540 нм	Загальний спектр 1603 – 1625 нм
	Вузька смуга	
	1532 – 1540 нм	

Ключовою та відмінною особливістю системи NG-PON2 є її багатохвильова здатність; як TWDM, так і PtP WDM можуть використовувати більше одного каналу довжини хвилі збільшення загальної пропускної здатності системи. Таким чином, ONU з можливістю налаштування на конкретний канал як DS (ONU Rx), так і US (ONU Tx) необхідні для забезпечення безбарвної роботи. Ця можливість перебудови довжини хвилі ONU є новою функцією, яка відсутня у попередніх поколіннях стандартів PON. Він пропонує кілька нових можливостей (про це буде мовитися в наступному підрозділі), але в той же час вимагає вирішення деяких важливих завдань.

1.4.1. Налаштування тимчасових класів

Певною характеристикою пристрою, що настроюється (оптичного Rx або Tx) в ONU NG-PON2 є час його налаштування, яке визначається як минулий час з моменту, коли пристрій, що настроюється, залишає канал довжини хвилі джерела, до моменту, коли налаштований пристрій досягає цільової канал довжини хвилі. Зверніть увагу,

що певний час налаштування пов'язаний лише з оптичними пристроями, що налаштовуються. Він не включає вклад інших підсистем, а також протоколів і механізмів, які контролюють повну операцію налаштування на системному рівні. G.989.2 Додаток VIII надає приклад методу вимірювання часу налаштування, заснованого на зміні потужності, що спостерігається, через еталонний WM, коли оптичний Tx налаштовується з одного каналу довжини хвилі на інший.

Таблиця 1.3

Налаштування класів часу

Клас часу налаштування	Час налаштування
Клас 1	< 10 μ s
Клас 2	від 10 μ s до 25 мс
Клас 3	від 25 мс до 1 с

G.989.2 визначає три класи часу налаштування, як показано в Таблиці 1.3. Настроювані пристрої, що підтримують різні класи, можуть бути засновані на різних технологіях з потенційно різною вартістю, щоб забезпечити низку можливостей системи NG-PON2.

Найповільніші (клас 3) пристрої можуть бути засновані на теплових ефектах для зміни їх робочої довжини хвилі і підходять для додатків, в яких операції налаштування виконуються нечасто або, коли допустимо короткочасне переривання обслуговування. Механізми захисту на основі каналів можуть бути прийняті, але стандартна мета захисту протягом менше 50 мс не може бути досягнута. Напівстатичні механізми розподілу навантаження та енергозбереження, що ґрунтуються на зміні каналів, також можуть становити інтерес для пристроїв класу 3.

Настроювані пристрої класу 2 забезпечують швидше налаштування каналу, так що стає можливим захист менше 50 мс. Вони також включають функції динамічного розподілу навантаження та динамічного енергозбереження.

Настроювані пристрої класу 1, що характеризуються найкоротшим часом налаштування, можуть дозволити в майбутньому реалізувати функцію динамічного розподілу довжини хвилі та смуги пропускання в системі. OLT також може динамічно

керувати, окрім часу та тривалості передачі, довжинами хвиль передачі ONU, щоб забезпечити стрибкоподібну перебудову довжини хвилі між періодами передачі.

1.5. Штрафи оптичного шляху

Важливим аспектом проектування оптичних систем є облік штрафів оптичного шляху (OPP – optical path penalties). Для NG-PON2, на додаток до звичайних втрат, пов'язаних із хроматичною дисперсією, відносно висока оптична потужність та багатохвильова природа призводять до ще одного механізму деградації, а саме раманівської нелінійності. Це може призвести до нелінійних перехресних перешкод та збіднення сигналу для певних довжин хвиль. Далі як приклад буде описано US-аналіз 2,5 Гбіт/с для TWDM, щоб проілюструвати процес визначення загального дозволеного OPP.

1.5.1. Хроматична дисперсія

Частина OPP, пов'язана з хроматичною дисперсією, заснована на існуючих стандартах, а також деяких основних припущеннях щодо типу Tx. Наприклад, при швидкості 2,5 Гбіт/с передбачається використання DFB-лазера з прямою модуляцією (DML) з відповідними спектральними характеристиками та втратами, пов'язаними з дисперсією. При швидкості 10 Гбіт/с розглядаються як DML, так і зовні модульований лазер (EML) Tx. Зверніть увагу, що G.989.2 передбачає використання EML для отримання значень OPP. При використанні DML на швидкості 10 Гбіт/с в діапазоні C/L та оптоволокну довжиною всього 20 км для досягнення значень OPP у G.989.2 необхідна деяка форма компенсації дисперсії, наприклад, волокно з компенсацією дисперсії в ONU або пакетний режим - можливість електронної компенсації дисперсії на OLT. Значення OPP, прийняті для аспекту лише хроматичної дисперсії, показані у рядках 1 та 2 Таблиці 1.4. Значення для раманівського OPP отримані в такий спосіб.

1.5.2. Раманівська нелінійність

Вплив раманівської нелінійності на волокно у системі NG-PON2 проявляється двома різними способами.

Таблиця 1.4

Значення штрафу для східного оптичного транспортного потоку 2,5 Гбіт/с

Умова	Відстань (км)	OPP (дБ)			
		N1	N2	E1	E2
Хроматична дисперсія	20	0,5	0,5	0,5	0,5
Хроматична дисперсія	40	1,0	1,0	1,0	1,0
Раманівська 4-х канална	20	0,25	0,4	0,75	0,75
Раманівська 4-х канална	40	0,4	0,6	1,0	1,0
Раманівська 8- ми канална	20	0,5	0,8	1,5	1,5
Раманівська 8- ми канална	40	0,75	1,25	2,25	2,25
Комбінована					
4 канали	20	0,75	0,9	1,25	1,25
4 канали	40	1,4	1,6	2,0	2,0
8 каналів	20	1,0	1,3	2,0	2,0
8 каналів	40	1,75	2,25	3,25	3,25
Значення стандарту G.989.2					
4 канали	20	1,0	1,0	1,5	1,5
4 канали	40	1,5	1,5	2,0	2,0
8 каналів	20	1,0	1,5	2,0	2,0
8 каналів	40	2,0	2,5	3,5	3,5

По-перше, канали US TWDM збіднюються зустрічними каналами DS TWDM і, по-друге, через перехресні перешкоди модуляції між будь-якими оптичними сигналами, що спільно розповсюджуються, розділеними в оптичній частоті на 1–40 ТГц. У разі виснаження потужності це пояснюється рекомендацією PMD NG-PON2 збільшенням OPP.

Максимальна середня потужність запуску каналу для 10 Гбіт/с DS TWDM у кожному класі OPL рекомендації PMD NG-PON2 показана в таблиці 1.5 разом із максимальною загальною потужністю запуску ODN.

При найгіршому розносі довжин хвиль ~ 78 нм ($\sim 9,6$ ТГц) між каналами DS і US TWDM коефіцієнт посилення комбінованого розсіювання, як і раніше, значний і становить близько 60% від пікового посилення. Навіть при ефективному зменшенні сумарної раманівської взаємодії за рахунок ефектів усереднення поляризації при зустрічному поширенні вплив все ще досить великий, щоб викликати значне зниження потужності.

Таблиця 1.5

Пускова потужність в ODN

Клас	1 канал (дБм)	4 канали (дБм)	8 каналів (дБм)
N1	+ 7	+ 13	+ 16
N2	+ 9	+ 15	+ 18
E1	+ 11	+ 17	+ 20
E2	+ 11	+ 17	+ 20

Рисунок 1.4 показує приклад результатів моделювання для раманівського виснаження, наданого під час розробки стандарту G.989.2. Такі результати можуть бути отримані, наприклад, шляхом чисельного розв'язання нелінійних рівнянь комбінаційного розсіювання [10]. Рисунок 1.4 показує найгірше раманівське виснаження каналів US TWDM для всіх класів OPL, а також чотири- та восьмиканальні випадки в залежності від оптоволоконної відстані. Суцільні криві являють собою восьмиканальний випадок, а пунктирні криві — чотиріканальний випадок (із загальною потужністю на 3 дБ менше, ніж для восьми каналів).

1.5.3. Комбінований ОРР

Взявши значення виснаження потужності із рис. 1.4 і додавши втрати за хроматичну дисперсію для довжини волокна 20 км або 40 км відповідно з відповідною кі-

лькістю каналів TWDM, обчислюється комбіновані втрати оптичного тракту. Наприклад, у випадку класу OPL N1 на відстані 20 км 0,5 дБ це значення OPP з урахуванням втрат тільки за дисперсію. Рис. 1.4 показує, що додаткові втрати, що здається, від романського виснаження становить 0,25 дБ для чотириканального випадку, що дає комбінований OPP 0,75 дБ. Стандарт NG-PON2 округляє до найближчих 0,5 дБ для OPP, що призводить до 1,0 дБ як остаточне значення G.989.2. Описана вище методологія може бути застосована до US 10 Гбіт/с для каналів TWDM і PtP WDM для визначення допустимих значень OPP.

Зверніть увагу, що лінійний код TWDM 10 Гбіт/с, 40 км US залишений для подальшого вивчення в G.989.2, що в основному пов'язано з розглядом OPP. В даний час обговорюються три варіанти реалізації:

- EML з NRZ;
- DFB з прямою модуляцією та NRZ, який вимагає електронної компенсації дисперсії у пакетному режимі на OLT;
- DFB з прямою модуляцією та сприятливим для дисперсії лінійним кодуванням, яке ще повністю не вивчене.

Кожна з цих реалізацій по-різному впливає OPP. Конкретний лінійний код та результуючі значення OPP можуть бути вказані лише після погодження припущень щодо реалізації.

1.6. Аналіз перехресних перешкод

Притаманні системам NG-PON2 багатохвильові характеристики як US, так і DS мають значення для проектування оптичних ліній, оскільки необхідно враховувати і обмежувати перехресні перешкоди за допомогою відповідних специфікацій у стандарті NG-PON2 PMD.

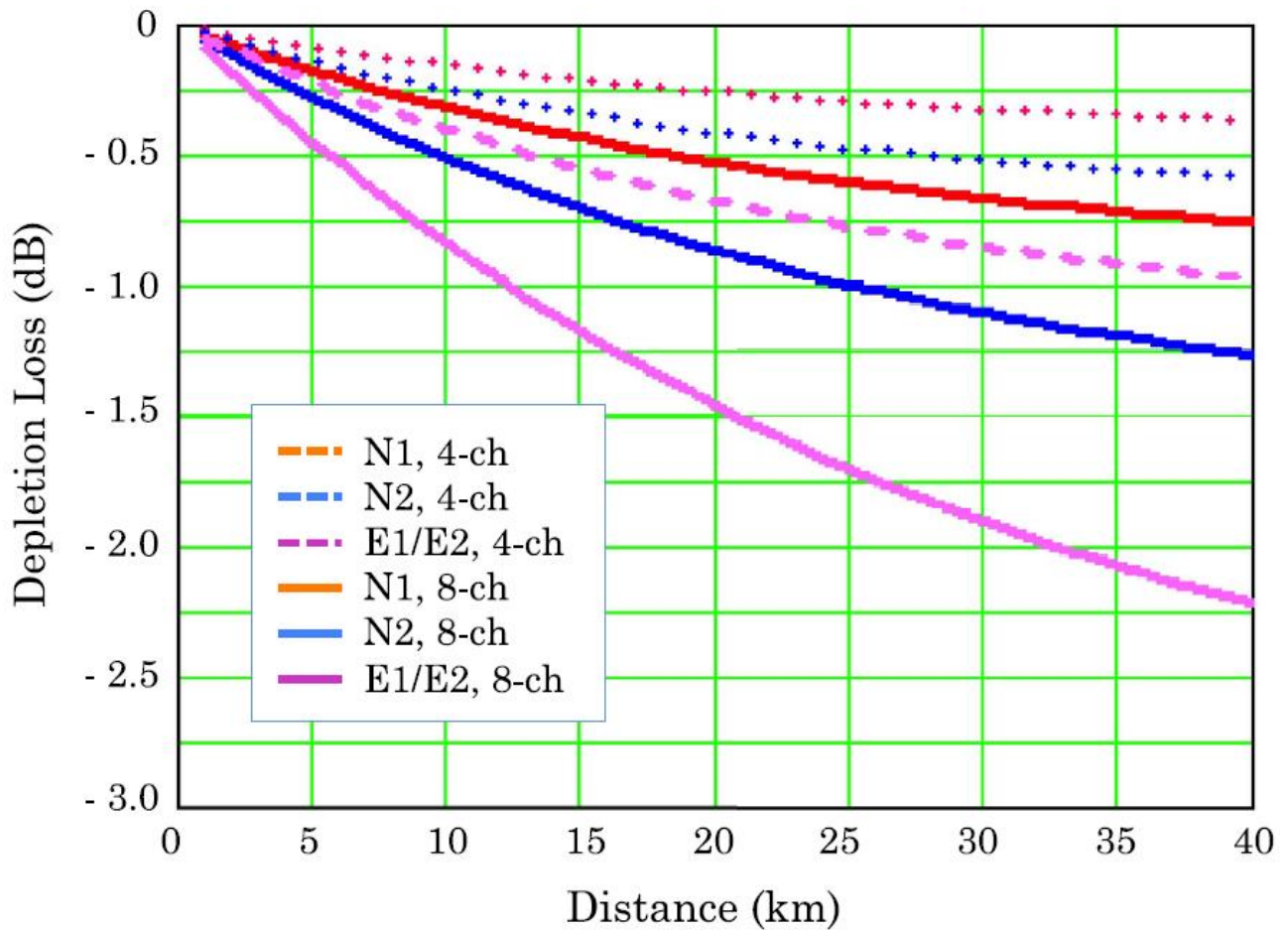


Рис. 1.4. Раманівські втрати на виснаження залежно від відстані за різних умов експлуатації.

Терміни оптичних перехресних перешкод, які є предметом PMD NG-PON2, відносяться до внутрішньосмугових інтерферометричних перехресних перешкод, що виникають через відхилення оптичної потужності спектральну область інших каналів, як показано на рис. 1.5. Погіршення, що виникають в результаті додавання потужності сигналів і складових перехресних перешкод через недосконалі демультиплексори в OLT і недосконалі настроювані фільтри в ONU, не підпадають під дію стандарту NG-PON2 PMD.

Загалом найжорсткіші вимоги до спектральних характеристик Tx виникають у US. Це відбувається через прозорість довжин хвиль WS-ODN і через велику різницю в рівнях потужності в OLT Rx для сигналів від різних ONU. Щоб визначити спектра-

льні властивості PON Tx, необхідно розглянути найгірші робочі умови, дозволені стандартом, щоб забезпечити правильну роботу системи PON, як показано на рис. 1.6. Ці умови виникають, коли ONU, на який впливають перехресні перешкоди, знаходиться в зоні максимальних втрат ODN і випромінює нижню частину діапазону потужності Tx. Сигнали, що заважають, походять від ONU, які розташовані з мінімальними втратами ODN.

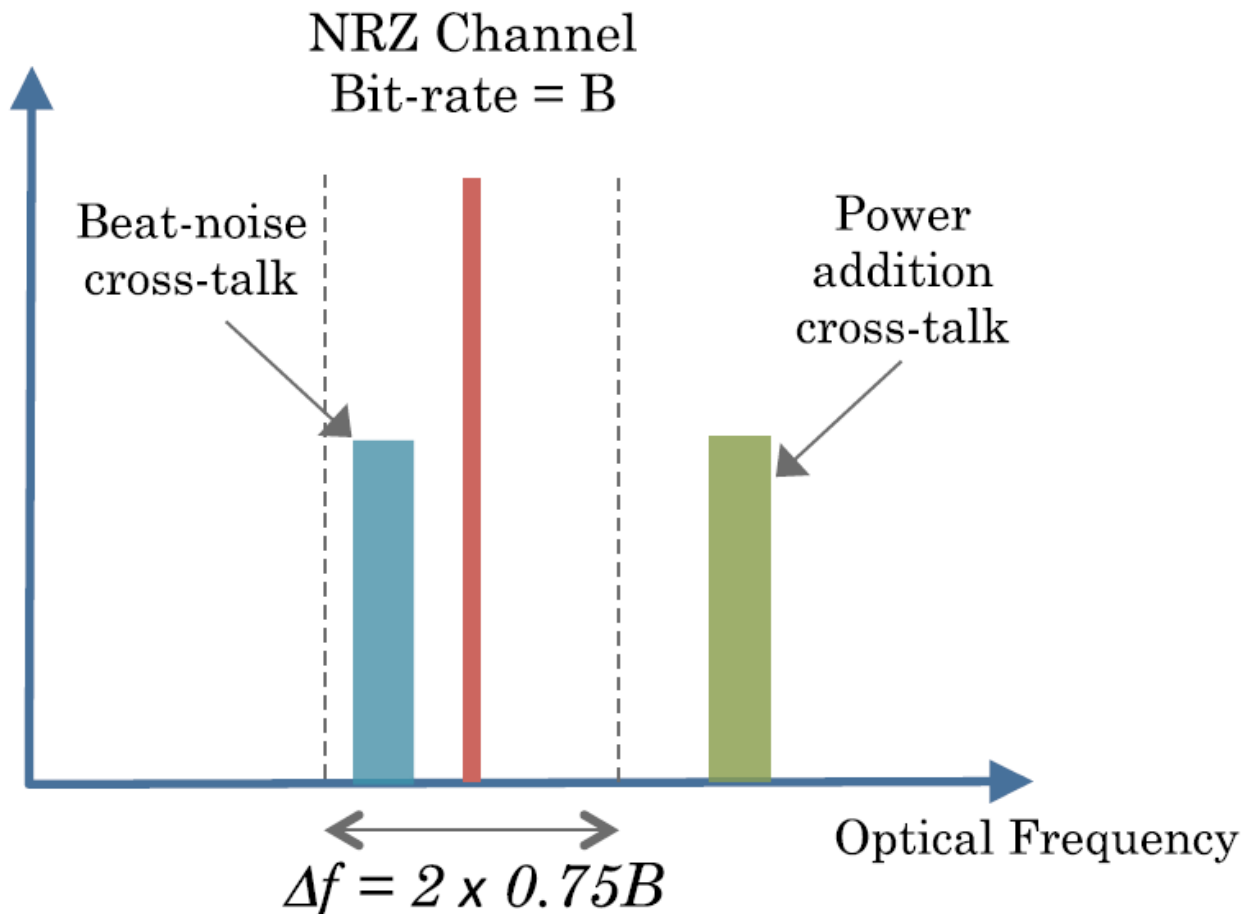


Рис. 1.5. Ілюстрування інтерферометричних (шумових биття) та режимів перехресних перешкод з додаванням потужності.

Можна показати, що для коефіцієнтів поділу ODN $1 : 2M$ (де M — ціле число) коефіцієнт поділу $1 : 64$ є максимальним, за якого можливі диференціальні втрати 15 дБ у класі E2 OPL. Це визначає обмеження на максимальну кількість потенційних джерел перешкод, які необхідно враховувати.

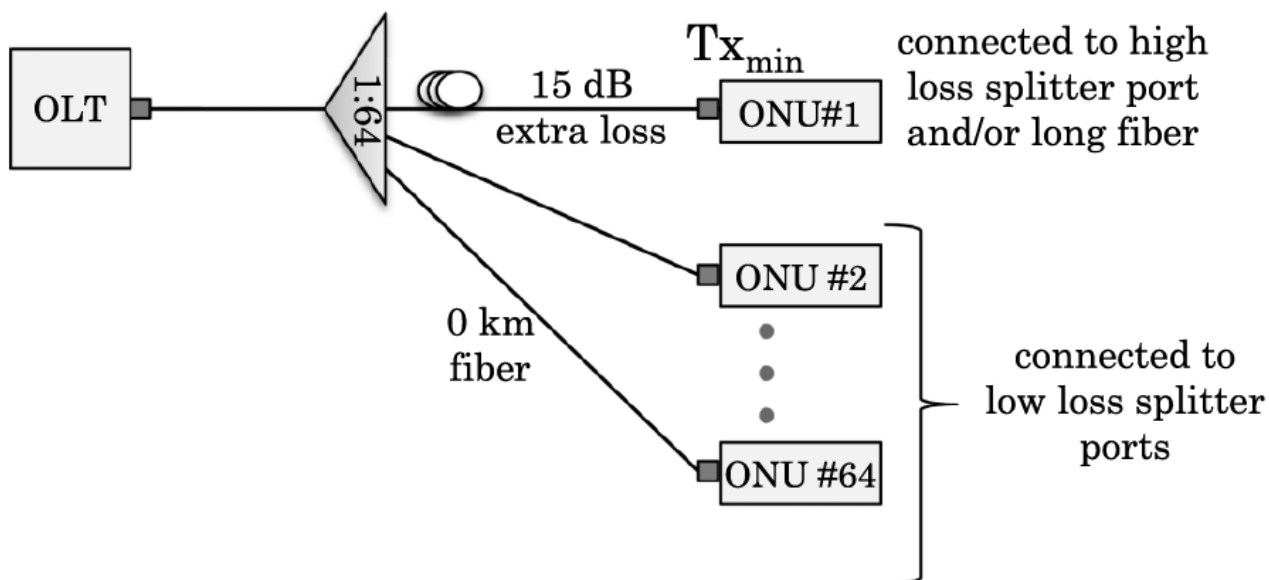


Рис. 1.6. ODN у найгіршому випадку для перехресних перешкод NG-PON2.

Для характеристики включеного каналу важливі два терміни перехресних перешкод: перешкоди, викликані подібними сигналами, тобто TWDM-to-TWDM і PtP WDM-to-PtP WDM, і перешкоди, викликані різнорідними сигналами, тобто TWDM-перехресні перешкоди між WDM та PtP між WDM та TWDM. Рекомендації NG-PON2 використовують два терміни для опису цих окремих випадків: (1) позаканальна спектральна щільність потужності та (2) позасмугова спектральна щільність потужності. Ці два терміни докладно описані нижче. Крім того, також пояснюються допустимі перешкоди, викликані вимкненим живленням передавача, коли він не увімкнений.

Враховуючи штраф, що приписується кожному джерелу перешкод, можна отримати відносну перехресну перешкоду (ϵ), використовуючи рівняння (1) [11] для оптично попередньо посиленого Rx та встановлення порога прийняття рішення щодо середньої потужності:

$$\text{Penalty (dB)} = -10 \log \left(1 - 4\epsilon Q'^2 \frac{1+r}{(1-r)^2} \right), \quad (1)$$

де r - коефіцієнт ослаблення сигналу, Q' виходить з необхідного BER з використанням рівняння (2):

$$\text{BER} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q'}{\sqrt{2}}\right). \quad (2)$$

BER каналу-жертви задається еталонним значенням BER для каналу, як визначено в G.989.2, і значною мірою визначається тим, чи використовується FEC чи ні.

Щоб врахувати зниження коефіцієнта ослаблення після передачі, r замінюється ефективним коефіцієнтом ослаблення (r'), що визначається рівнянням (3):

$$r' = \frac{(r + 1) + 10^{-E/10}(r - 1)}{(r + 1) - 10^{-E/10}(r - 1)}, \quad (3)$$

де E - eye closure penalty (погіршення/зменшення розкриття діаграми випромінювання) дБ, еквівалентний OPP.

У напрямку US включено ослаблення допустимих відносних перехресних перешкод (ϵ) на 1 дБ для врахування рандомізованих станів поляризації вихідних сигналів ONU Tx та, отже, зменшення когерентного шуму биття.

1.6.1. Спектральна щільність позаканальної оптичної потужності

Позаканальна спектральна щільність оптичної потужності (ООС - PSD) визначає максимальну спектральну щільність потужності, яку NG - PON2 Tx може випромінювати за межами спектрального інтервалу, що відповідає його поточному робочому каналу довжини хвилі.

Ця PSD вказується у відповідній опорній точці (S/R-CG для спрямування DS, R/S для спрямування US).

У напрямку US штраф в 1 дБ через перешкоди ООС був врахований у стандарті NG-PON2 PMD. У напрямку DS це значення звужено до 0,1 дБ, оскільки низький рівень ООС-PSD може бути досягнутий в еталонній точці S/R-CG завдяки функції смугового фільтра WM.

Для розрахунку ООС-PSD передбачається ODN для найгіршого випадку, як описано раніше, а $P_{ООС}$ визначається за рівнянням (4):

$$P_{\text{OOC}} \text{ (dBm)} = P_{\text{Tx}} \text{ (dBm)} + \varepsilon_{\text{OOC}} \text{ (dB)} - \Delta\text{ODN} \text{ (dB)} - 10 \log(N_{\text{OOC}}), \quad (4)$$

де ΔODN — максимальні диференціальні втрати від ODN між каналами, що заважають, тобто 15 дБ для US і 0 дБ для DS, а N_{OOC} — кількість каналів, що заважають. N_{OOC} на одиницю менше, ніж кількість каналів з довжиною хвилі у відповідному напрямку і в тому ж робочому діапазоні довжин хвиль, що і канал, що зазнає впливу перешкод.

Як приклад та для ілюстрації складних вимог до цього параметра ми отримуємо максимальну специфікацію OOC-PSD для передавача ONU у чотириканальному TWDM зі швидкістю 10 Гбіт/с.

Мінімальна потужність запуску ONU 10 Гбіт/с становить +2 дБм за мінімального коефіцієнта загасання 6 дБ і BER до FEC на OLT Rx 10^{-3} . [$Q' = 2,88$, з рівняння (2)]. Використовуючи дозволений OPP 2 дБ та рівняння (3), тому ефективний коефіцієнт ослаблення становить 3,45 дБ. Рівняння (1) дає допустимі відносні перехресні перешкоди для штрафу 1 дБ у каналі US TWDM зі швидкістю 10 Гбіт/с як -28,9 дБ. З диференціальними втратами ODN в 15 дБ і трьома каналами TWDM, що заважають, ми отримуємо -45,7 дБм (в 15 ГГц) вимога OOC-PSD (включаючи ослаблення усереднення поляризації на 1 дБ). При максимально допустимій вихідній потужності ONU +9 дБм це призводить до того, що для найгіршого випадку відношення оптичного сигналу шуму (OSNR) передавача становить 54,7 дБ (в діапазоні 15 ГГц). З типовими передавачами доступу до оптоволокна, заснованими на лазерах DFB, здатних забезпечити коефіцієнт придушення бічної моди близько 45 дБ (SMSR), вимога OOC-PSD є серйозною проблемою для недорогої конструкції оптичних компонентів.

1.6.2. Спектральна щільність позасмугової оптичної потужності

Позасмугова спектральна щільність оптичної потужності (OOB-PSD) визначає максимальну спектральну щільність потужності, яку може випромінювати NG-PON2 Tx за межами вказаного робочого діапазону довжин хвиль. Ця PSD також вказується

у відповідній контрольній точці, тобто S/R-CG для спрямування DS, R/S для спрямування US.

В обох напрямках передачі в стандарті NG-PON2 враховані втрати 0,1 дБ через позасмугові перешкоди. Очікується, що це легко доступний низький штраф, оскільки функція оптичного смугового фільтра може бути накладена на будь-який Tx перед запуском в ODN. Наприклад, приймач ONU TWDM може реалізувати смуговий фільтр як частина дуплексера і, таким чином, придушити оптичне випромінювання за межами діапазонів довжин хвиль TWDM US.

Для розрахунку OOB-PSD знову передбачається ODN для найгіршого випадку, а P_{OOB} визначається рівнянням (5):

$$P_{OOB} \text{ (dBm)} = P_{Tx} \text{ (dBm)} + \varepsilon_{OOB} \text{ (dB)} - \Delta ODN \text{ (dB)} - 10 \log(N_{OOB}). \quad (5)$$

Тут N_{OOB} – це кількість каналів, що заважають, еквівалентне всім каналам довжин хвиль у відповідному напрямку і робочому діапазоні довжин хвиль.

У деяких випадках специфікація OOB-PSD для Tx визначається впливом цього позасмугового випромінювання, відображеного ODN, та впливом на канали, що поширюються у протилежному напрямку. Зокрема це визначає специфікацію DS OOB-PSD як для TWDM, так і для PtP WDM OLT Tx відповідно.

1.6.3. Спектральна щільність оптичної потужності, коли вона не включена

Спектральна щільність оптичної потужності, коли вона не включена (WNE-PSD), визначає максимальну спектральну щільність потужності, яку може випромінювати передавач NG-PON2 на будь-якій довжині хвилі всередині або поза робочим діапазоном довжин хвиль, коли передавач не включений, тобто номінально у вимкненому стані. Цей PSD також вказується у тих самих опорних точках, що й у OOC /OOB-PSD. Аналогічна формула, рівняння (6), використовується для отримання WNE-PSD як для OOC, так і для OOB:

$$P_{WNE} \text{ (dBm)} = P_{Tx} \text{ (dBm)} + \varepsilon_{WNE} \text{ (dB)} - \Delta ODN \text{ (dB)} - 10 \log(N_{WNE}). \quad (6)$$

У випадку TWDM у напрямку US максимальна кількість ONU (N_{WNE}) у неактивованому стані, що впливають на ONU-жертву, дорівнює 63.

Для визначення WNE-PSD у напрямку DS передбачається найгірший випадок ODN, як показано на рисунку 1.7. На рис. 1.7 показана мережа ODN із двома підключеними OLT, що забезпечує захист у разі відмови первинного OLT або фідерного волокна. Канали з однією і тією ж довжиною хвилі можуть бути надані для первинного і вторинного каналів, і в цьому випадку необхідно бути стурбовані потужністю в цьому каналі довжини хвилі від неактивованого DS Tx в порівнянні з включеним Tx на інший OLT.

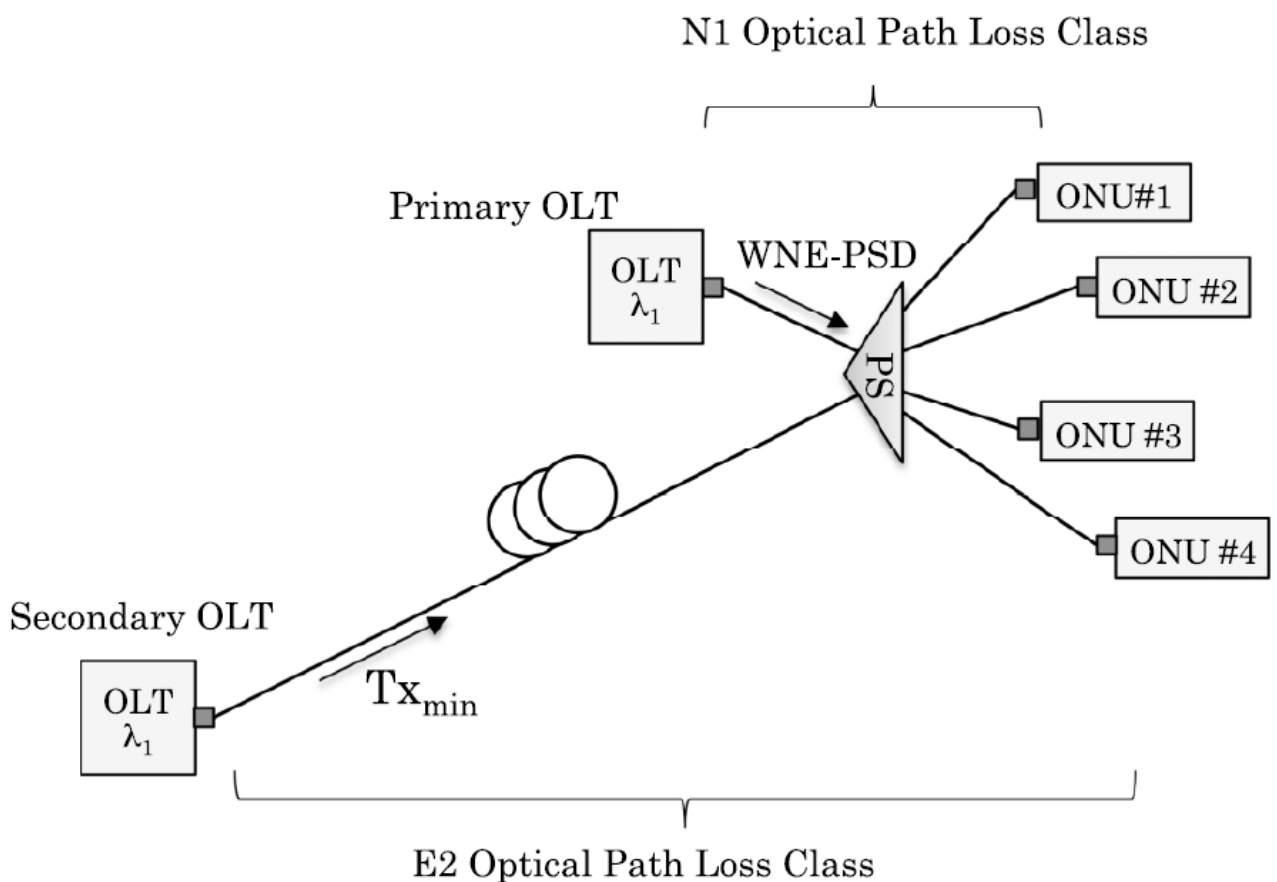


Рис. 1.7. ODN у найгіршому випадку для потужності низхідного потоку, коли не включена специфікація спектральної щільності (WNE-PSD) у NG-PON.

1.6.4. Стійкість до внутрішньосмугових перехресних перешкод

Щоб визначити критерії кваліфікаційного випробування Rx NG-PON2, відношення суми всіх членів внутрішньосмугових перехресних перешкод, як описано

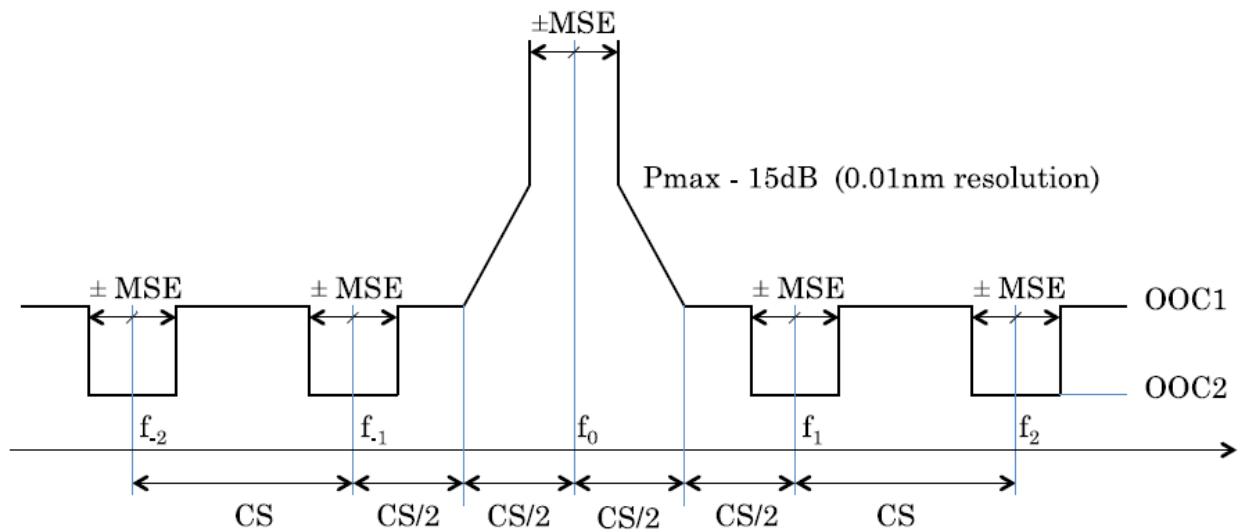
вище, до суми прийнятого сигналу. Термін «стійкість до внутрішньосмугових перехресних перешкод» використовується для вираження мінімального значення цього відношення, яке повинно бути допустимим при дотриманні заданої чутливості Rx. Крім того, передбачається, що перехресні перешкоди будуть поляризовані і вирівняні у зв'язку з поляризацією сигналу. Передбачається, що простий кваліфікаційний тест Rx може складатися з широкосмугового джерела світла, з'єднаного з сигналом, що передається, щоб відповідним чином встановити відношення сигналу до перехресних перешкод.

Завдяки тому, що чутливість Rx має бути забезпечена за наявності ефективного погіршення OSNR, штраф через внутрішньосмугові перехресні перешкоди, отже, не потрібно враховувати, як частина OPP.

1.6.5. Маска для позаканальної спектральної щільності потужності

Маска позаканальної спектральної щільності потужності (OOC-PSD) по відношенню до рознесення каналів (CS) показана на рисунку 1.8. Маска призначена для визначення потужності, що передається, допустимої за межами максимального спектрального відхилення передавача. У певному сенсі це аналог терміну SMSR, який часто використовується в інших додатках. Причина зміни термінології полягає в тому, що OOC-PSD є не відношенням, а абсолютним рівнем потужності, допустимим у даному спектральному інтервалі. Рівень впливу цієї потужності OOC на інші канали залежить від того, чи взаємодіє потужність інтерферометрично або як додавання потужності. Інтерферометрична інтерференція є більш руйнівною і є причиною двох рівнів маски OOC-PSD, OOC1 і OOC2.

Лазери можна сконструювати так, щоб найбільші бічні моди попадали в більш нешкідливі області OOC1. Таким чином, маска OOC-PSD є керівництвом для виробників лазерів щодо розміщення найбільших бічних мод для мінімального впливу. Дотримання цієї маски потрібне за всіх умов ініціалізації, реєстрації та налаштування ONU.



CS: інтервал між каналами.

Рис. 1.8. Маска позаканальної спектральної щільності потужності (OOB PSD) з G.989.2.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Серія рекомендацій ITU-T G.989 визначає NG - PON2 як першу в галузі систему PON з кількома довжинами хвиль у кожному напрямку (низхідний та висхідний потоки) та сумісністю з ODN на основі роздільника потужності. Система NG-PON2 складається з набору каналів TWDM та/або набору каналів PtP WDM, обидва з яких вимагають довжини хвилі Tx і Rx, що перебудовується, в ONU.

У цьому розділі було зосереджено увагу на темах, пов'язаних із проектуванням оптичних каналів зв'язку, і на тому, на якій підставі були розроблені вимоги до фізичного рівня.

Стандарти NG-PON2 забезпечують роботу із застарілими ODN на основі розгалужувачів потужності зі специфікаціями втрат на оптичному шляху, узгодженими з XG-PON1. План довжин хвиль враховує вимоги до співіснування з G-PON, XG-PON1 та RF-video. Гнучкість у плані довжин хвиль дозволяє використовувати будь-який незайнятий спектр розширення пропускної спроможності залежно від конкретного варіанта використання оператора.

Технологія NG-PON2 підтримує мережі ODN як з обраною довжиною хвилі, так і з довжиною хвилі, що маршрутизується, кожна з яких призначена для різних сценаріїв. WS-ODN може підтримуватися TWDM та PtP WDM, тоді як WR-ODN зазвичай розглядається тільки для розгортань PtP WDM. Гібридні ODN, що поєднують WS і WR, також можливі як для TWDM, так і для PtP WDM.

Функція ONU, що настроюється, ставить нові завдання перед проектуванням приймача. Рекомендація NG-PON2 PMD визначає три класи часу налаштування, які полегшують різні нові системні функції та сценарії використання мережі.

Через відносно високу оптичну потужність і багатохвильову природу комбінаційна нелінійність повинна враховуватися в погіршенні оптичного шляху. Було розглянуто результуюче виснаження потужності висхідного каналу, а також методологію, що використовується для отримання стандартизованих значень OPP.

Нарешті, інтерферометричні перехресні перешкоди через відхилення оптичної потужності спектральну область інших каналів або діапазонів мають великий вплив на конструкцію оптичної лінії зв'язку. Стандарт визначає максимальну спектральну густину потужності, яку може випромінювати NG-PON2 Tx для забезпечення правильної роботи системи. Були докладно пояснені визначення та висновки, що використовуються для визначення стандартизованих значень параметрів.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЗДІЙСНЕНІСТЬ NG-PON2

2.1. Контроль довжини хвилі

У цьому розділі буде розглядаються три ключові аспекти, що відносяться до управління кількома довжинами хвиль у системі NG-PON2, а саме:

- стабільність довжини хвилі;
- точність довжини хвилі;
- синхронізація довжини хвилі.

Також вводяться відповідні параметри керування довжиною хвилі, зазначені у G.989.2.

2.1.1. Стабільність довжини хвилі

Стабільність довжини хвилі системи NG-PON2 оцінюється за допомогою параметра, який називається *максимальним спектральним відхиленням* (MSE - maximum spectral excursion). MSE вказується з двох основних причин:

1) для запобігання витоку оптичної потужності в каналі з однією довжиною хвилі в канал із сусідньою довжиною хвилі, що викликає погіршення, викликане перехресними перешкодами;

2) щоб переконатися, що передавач працює в межах бажаної лінії пропускання каналу мультиплектора довжини хвилі (WM) для досягнення заданих характеристик каналу.

Спектральне відхилення T_x у стані каналу з фіксованою довжиною хвилі визначається як абсолютна різниця між номінальною центральною частотою каналу довжини хвилі та точкою -15 дБ спектру T_x , найбільш віддаленої від номінальної центральної частоти.

Для низхідного потоку (DS) TWDM рознесення каналів (CS - channel spacing)

становить 100 ГГц, а необхідна MSE становить ± 20 ГГц. У цьому випадку фільтр, що настроюється відносно просто відстежує максимальну прийнятну потужність через локальний контур зворотного зв'язку; таким чином, точне калібрування довжини хвилі фільтра ONU Rx не потрібне.

Для висхідного потоку (US) CS не фіксована і може бути в діапазоні від 50 до 200 ГГц, при цьому MSE вказується для трьох конкретних значень CS, як показано в таблиці 2.1. Ці значення MSE були вибрані з урахуванням необхідності уникати надто суворих вимог до калібрування довжини хвилі (для каліброваних лазерів), зміни потужності залежно від довжини хвилі та деталізації налаштування.

Залежність оптичної потужності передавача від довжини хвилі вказана в G.989.2 і становить $\pm 0,05$ та $\pm 0,02$ дБ/ГГц для висхідної передачі в US на швидкостях 2,5 та 10 Гбіт/с відповідно. Було необхідно визначити ці межі, оскільки залежність оптичної потужності від довжини хвилі викликає помилку налаштування, коли використовується механізм синхронізації довжини хвилі, що ґрунтується на вимірі прийнятої оптичної потужності. Ця помилка налаштування поряд зі специфікацією MSE обмежує допустиме відхилення спектру Tx. Потім було вибрано максимальний ступінь деталізації CS/20, щоб уникнути перевищення MSE при кожній спробі коригування довжини хвилі.

Щоб отримати значення MSE в таблиці 2.1 були розглянуті характеристики втрат і ізоляції як тонкоплівкових фільтрів (TFF - thin - film filters), так і масивних хвилеводних решіток (AWG - arrayed waveguide gratings), а також ширини спектру Tx, точності калібрування, деталізація налаштування та прийнятні штрафи за потужність. Хоча повний аналіз виходить за рамки роботи, можна обговорити деякі загальні міркування.

Наприклад, для CS = 100 ГГц можна залишатися в межах MSE, використовуючи лазер із шириною спектра 15 ГГц, відкаліброваної до ± 10 ГГц і кроком налаштування 5 ГГц (тобто CS/20). У поєднанні з WM (з розв'язкою по сусідньому каналу > 30 дБ і шириною смуги пропускання 0,5 дБ, що дорівнює 20 ГГц), перехресні перешкоди і втрати, що вносяться, збільшуються через те, що відхилення спектра лазера залишається нижче 0,1 і 0,5 дБ відповідно.

До короткочасного відхилення спектра, викликане включенням/вимкненням лазера ONU на межах пакета, має відповідати межі MSE. Пропоновані рішення для протидії цьому ефекту в [13-15].

2.1.2. Точність довжини хвилі

Точність калібрування Tx ONU, що настроюється, інакше його здатність передавати зі спектральним відхиленням в заданих межах, впливає на його вартість. У стандартах NG-PON2 визначено три рівні точності калібрування ONU Tx, що настроюється.

- достатнє калібрування;
- неточне калібрування;
- відсутність калібрування.

Таблиця 2.1

**Значення MSE для напрямку US NG-PON2
(MSE для проміжних значень CS інтерполюється)**

Рознос каналів CS (ГГц)	50	100	200
MSE (ГГц)	±12,5	±20	±25

Слабо відкалібровані та невідкалібровані ONU самі по собі не можуть гарантувати передачу в межах обмеження MSE та суворо вимагають додаткових механізмів, як описано в наступному підрозділі.

2.1.3. Блокування довжини хвилі

Власна точність довжини хвилі і стабільність оптичних пристроїв ONU, що перебудовуються, можуть бути ослаблені для зниження вартості, але це повинно бути компенсовано за рахунок прийняття альтернативних механізмів синхронізації довжини хвилі.

У напрямку DS, приймач ONU (Rx) може автономно знайти найкращу точку

налаштування довжини хвилі, відшуковуючи найбільшу оптичну потужність, що приймається, і/або найменшу частоту помилок на своєму робочому каналі.

У напрямку US прив'язка довжини хвилі ONU Tx може бути складнішою і залежати від зворотного зв'язку OLT. У G.989.2 метод синхронізації довжини хвилі, що передбачається при вказівці оптичних параметрів, являє собою такий метод, в якому довжина хвилі Tx ONU «підмішується (dithered)» для отримання синхронізації. Щоб полегшити це, зроблено два припущення:

1) OLT Rx може виконувати досить точне вимірювання потужності, але не довжини хвилі;

2) потужність запуску ONU Tx не змінюється значно за невеликих змін довжини хвилі.

Однією з можливих реалізацій схеми дизерингу (це загальна назва технічного принципу зменшення нелінійних спотворень сигналу при аналогово-цифровому перетворенні в ситуації дефіциту розрядності перетворення, даний принцип полягає в підмішуванні у вхідний сигнал АЦП малої нормованої шумової складової по відношенню до ваги молодшого розряду АЦП) є реалізація замкнутого контуру управління довжиною хвилі між ONU та OLT для досягнення та підтримки оптимальної точки налаштування ONU Tx. У цьому випадку форма фільтра OLT WM відіграє фундаментальну роль, оскільки зміна довжини хвилі ONU Tx перетворюється на зміну потужності на OLT Rx, як показано на рисунку 2.1.

Під управлінням OLT ONU передає в різний час на двох довжинах хвиль, що злегка розрізняються (λ^- та λ^+) навколо центральної довжини хвилі λ . Якщо λ точно збігається з центром каналу OLT WM і якщо смуга пропускання каналу WM має симетричну форму, то OLT Rx не виявить зміни потужності між різними часами передачі, і в цьому випадку ніяких коригуючих дій не потрібно.

Для випадків, показаних на рис. 2.2 зміна потужності покаже як величину, так і знак зміщення довжини хвилі. В результаті OLT дасть вказівку ONU застосувати відповідну корекцію налаштування.

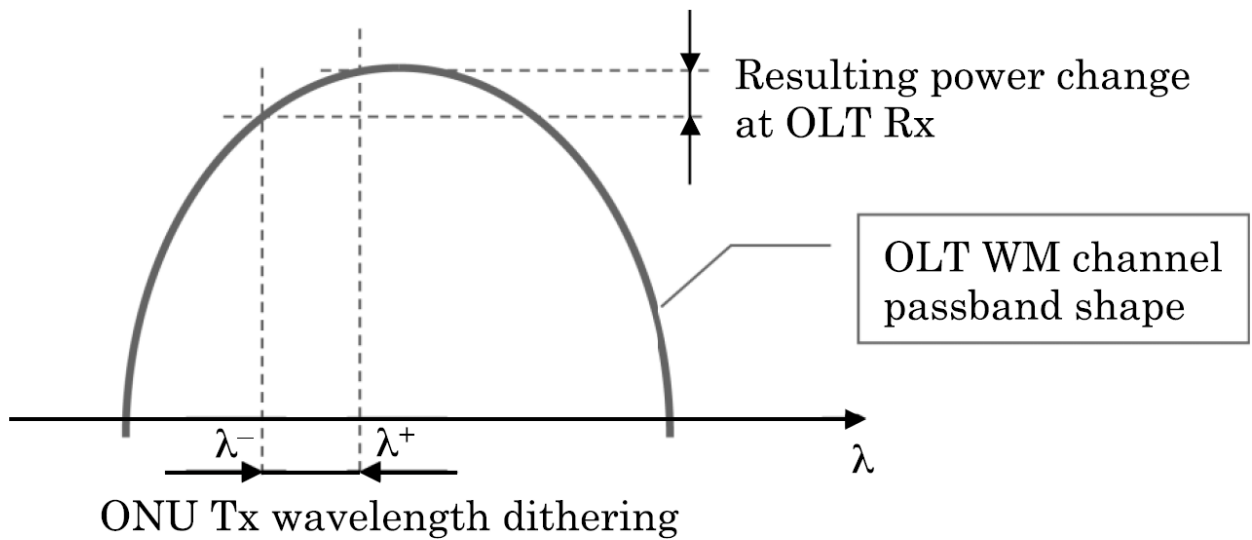


Рис. 2.1. Принцип роботи механізму дизерингу під час синхронізації за довжиною хвилі ONU.

Як зазначено в Додатку VIII до G.989.2, для підтримки описаного тут методу зворотного зв'язку від WM може знадобитися відповідність додатковим обмеженням щодо смуги пропускання фільтра, монотонності та нерівномірності смуги пропускання.

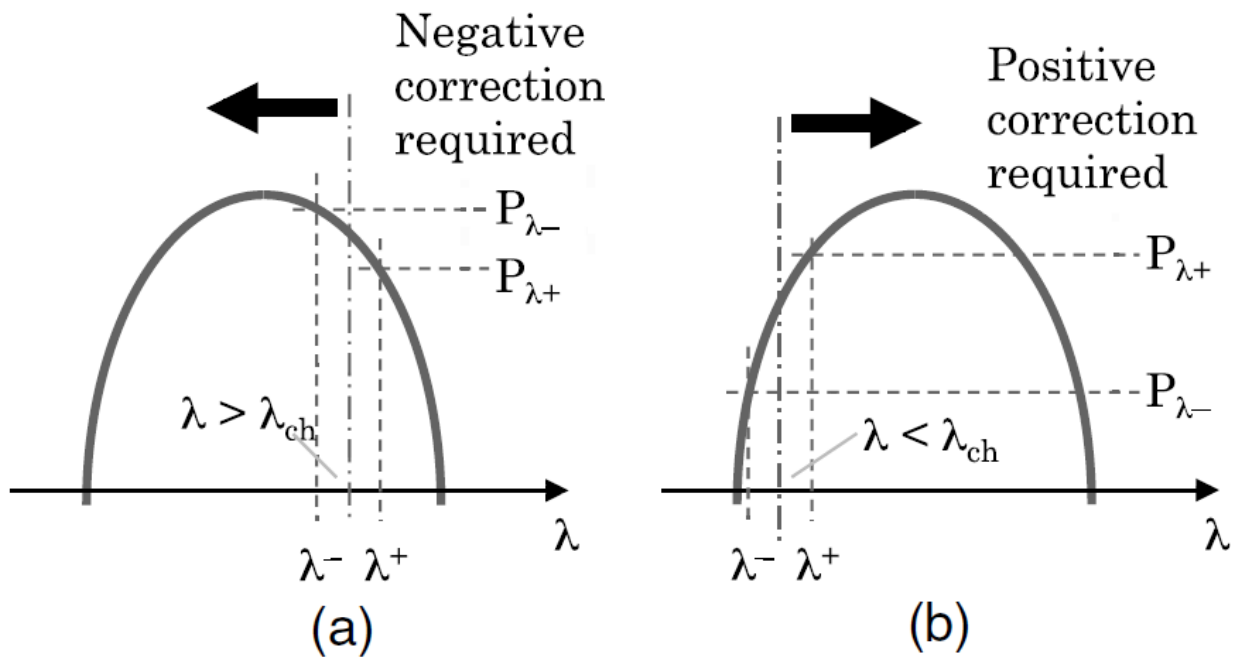


Рис. 2.2. Результат дизерингу для засмученого ONU.

(a) Потрібна негативна корекція. (b) Потрібна позитивна корекція.

Повинні бути гарантовані два фактори:

1) неправильне налаштування ONU Tx правильно визначається вимірюванням прийнятої потужності OLT до того, як буде перевищено межу MSE;

2) коливання потужності через певні форми фільтра WM (на додаток до розглянутої раніше залежності від довжини хвилі ONU Tx) не заважають механізму налаштування.

Слід звернути увагу, що у разі високої частоти помилок по бітах (BER) до застосування прямої корекції помилок (FEC) механізм захоплення довжини хвилі може бути зручніше ґрунтуватися на вимірі BER, а не вимірюванні потужності.

2.2. Технологічна здійсненність - нові та складні підсистеми

Принципове рішення щодо вибору багатохвильової системи з настроюваними прийомопередавачами ONU прямого виявлення для систем NG-PON2 було прийнято після ретельного аналізу можливих альтернатив. У порівнянні з попередніми поколіннями систем PON, заснованих на стандартах, це рішення відкрило додаткову область гнучкості та можливості конфігурації в області довжин хвиль. Це призвело до потреби нових компонентів з підтримкою DWDM з економічною реалізацією. У наступних підрозділах ми зосередимося на трьох ключових варіантах реалізації, що стосуються різних аспектів WDM, а саме:

- 1) прийомопередавачі, що настроюються;
- 2) лазери з прямою та зовнішньою модуляцією для ONU;
- 3) мультиплексори довжин хвиль.

2.2.1. Настроювані трансівери

ONU NG-PON2 повинні бути оснащені прийомопередавачі, що настроюються, здатними підтримувати CS на частотах до 50 ГГц. Це призводить до вимог і специфікацій щодо можливостей налаштування, включаючи робочий діапазон довжин хвиль, спектральне відхилення та ступінь деталізації налаштування. Вимога можливості на-

лаштування як Tx, так і Rx збільшує загальну складність прийомопередавачів. У поєднанні з іншими вимогами, такими як підтримка високого бюджету втрат для оптичної розподільної мережі (ODN) або високих швидкостей передачі даних, це вимагатиме складної конструкції прийомопередавача. Тому прийомопередавачі, що настроюються, особливо для класів ODN з високими втратами оптичного шляху (OPL) і швидкістю передачі даних 10 Гбіт/с, є складним завданням для недорогої реалізації.

Настроюваність у приймачі ONU може бути досягнута шляхом розміщення фільтрів, що настроюються, перед відповідним лавинним фотодіодом (APD - avalanche photodiode). В ідеалі це досягається шляхом інтеграції фільтрів, що перебудовуються, в оптичний вузол Rx. Існує кілька технологій фільтрів, що перебудовуються. Наприклад, був продемонстрований Rx, що перебудовується, зі швидкістю 10 Гбіт/с, заснований на термонастроюваних тонкоплівкових фільтрах Фабрі-Перо (Fabry – Perot filters), що охоплюють спектр до 800 ГГц [16]. Цей Rx досяг чутливості -26 дБм при BER до FEC 10^{-3} (порівняйте наявні у продажу APD [17] з чутливістю -33 дБм при 10^{-4} BER). Зверніть увагу, що приймачі PtP WDM повинні працювати без FEC, оскільки існують додатки, що вимагають малої затримки, наприклад, на рівні централізованого радіодоступу (Mobile Fronthaul) мереж мобільного зв'язку.

Вузкосмугове налаштування лазера може бути досягнуто, наприклад, за допомогою DFB-лазерів з термічним налаштуванням (діапазон налаштування до ~5 нм) або лазерів з електронним налаштуванням (трисекційних) DBR-лазерів (до ~12 нм) [18]. Їх реалізація як модулів малого форм-фактора pluggable plus (SFP+) вкрай бажана, особливо у сценаріях розгортання з оплатою зі зростанням.

Передавачі, що використовуються для модулів SFP+, що є у продажу, в основному засновані на конструкціях лазерів DBR з кількома секціями налаштування і потенційно використовують ефекти Верньє (Vernier effects) для досягнення повнодіапазонного налаштування [18]. Крім того, у цих передавачах використовуються зовнішні модулятори Маха-Цендера для досягнення низьких втрат оптичного тракту (OPP) при потрібній дальності дії.

Для модулів SFP+ максимальна споживана потужність 1,5 Вт зазначена в угоді

з кількома джерелами [19]. Для досягнення досить низького енергоспоживання термоелектричного охолоджувача (thermo - electric cooler - TEC, одного з основних споживачів енергії SFP+) пускова потужність цих модулів обмежена на рівні близько 0 дБм. Сьогодні більшість модулів SFP+ споживають від 1,5 до 1,8 Вт. Оскільки для приймачів NG-PON2 необхідно додати фільтр, що настроюється (можливо, споживає ще близько 100 мВт), малоймовірно, що мета 1,5 Вт буде досягнута при стартовій потужності > 0 дБм в найближчому майбутньому. Дещо вище енергоспоживання допустиме у форм-факторі SFP+, але це має бути відображено у відповідному хост-обладнанні (ONU, OLT). Таким чином, модулі SFP+ можна розглядати як відправну точку для недорогих прийомопередавачі, що настроюються.

Для деяких конфігурацій NG-PON2 може знадобитися додаткове оптичне посилення. Для TWDM виклик класу OPL E1 зі швидкістю 10 Гбіт/с у конфігураціях типу А без посилення є складним завданням. Таким чином, посилена конфігурація типу В може бути економічною альтернативою.

Так само для найвищого класу швидкості передачі даних PtP WDM дуже складно досягти класу OPL N1 без оптичного посилення в DS і без FEC. Специфікації G.989.2 вимагають, щоб чутливість ONU та OLT становила $- 23,5$ дБм (в еталонній точці R/S) та $- 28,5$ дБм (в еталонній точці S/R-CG), а пускова потужність ONU та OLT $+ 3$ дБм (при R/S) та $+7,5$ дБм (при S/R-CG) відповідно. Ці контрольні точки визначено раніше. В еталонній точці S/R-CG ці характеристики можуть бути виконані з використанням оптичного посилення OLT. Для ONU це призводить до необхідності Rx з чутливістю не менше -25 дБм без FEC та мінімальною пусковою потужністю ONU Tx $+4$ дБм. Така чутливість і пускова потужність можуть бути досягнуті за допомогою APD [20] та охолоджуваних DFB- або DBR - лазерів відповідно. Однак обидва параметри потребують поліпшення для сучасних комерційних модулів SFP+.

Оптичне посилення може бути реалізовано на OLT з підсилювачем або передпідсилювачем у напрямках передачі та прийому відповідно. На практиці це може бути реалізовано за допомогою напівпровідникових оптичних підсилювачів (SOA), інтегрованих у відповідні Tx або Rx або за допомогою спеціальних підсилювачів SOA або волоконно-оптичних підсилювачів, легованих ербієм, що працюють на відповідній

групі каналів.

SOA, інтегровані або з Tx, або з Rx, досліджувалися протягом тривалого часу [21]. У [22] описано порівняння продуктивності різних реалізацій бустера для Tx 10 Гбіт/с для додатків PON. SOA, інтегровані з Rx, націлені на підвищення чутливості, ослаблення вимог до електричних підсилювачів або підтримку швидкості передачі більше 10 Гбіт/с [23].

2.2.2. Лазери із зовнішньою модуляцією та лазери із прямою модуляцією для приймача ONU

Підтримка довжини хвилі ONU Tx в межах дозволеного MSE для спрямування US становить декілька проблем, особливо для 10 Гбіт/с.

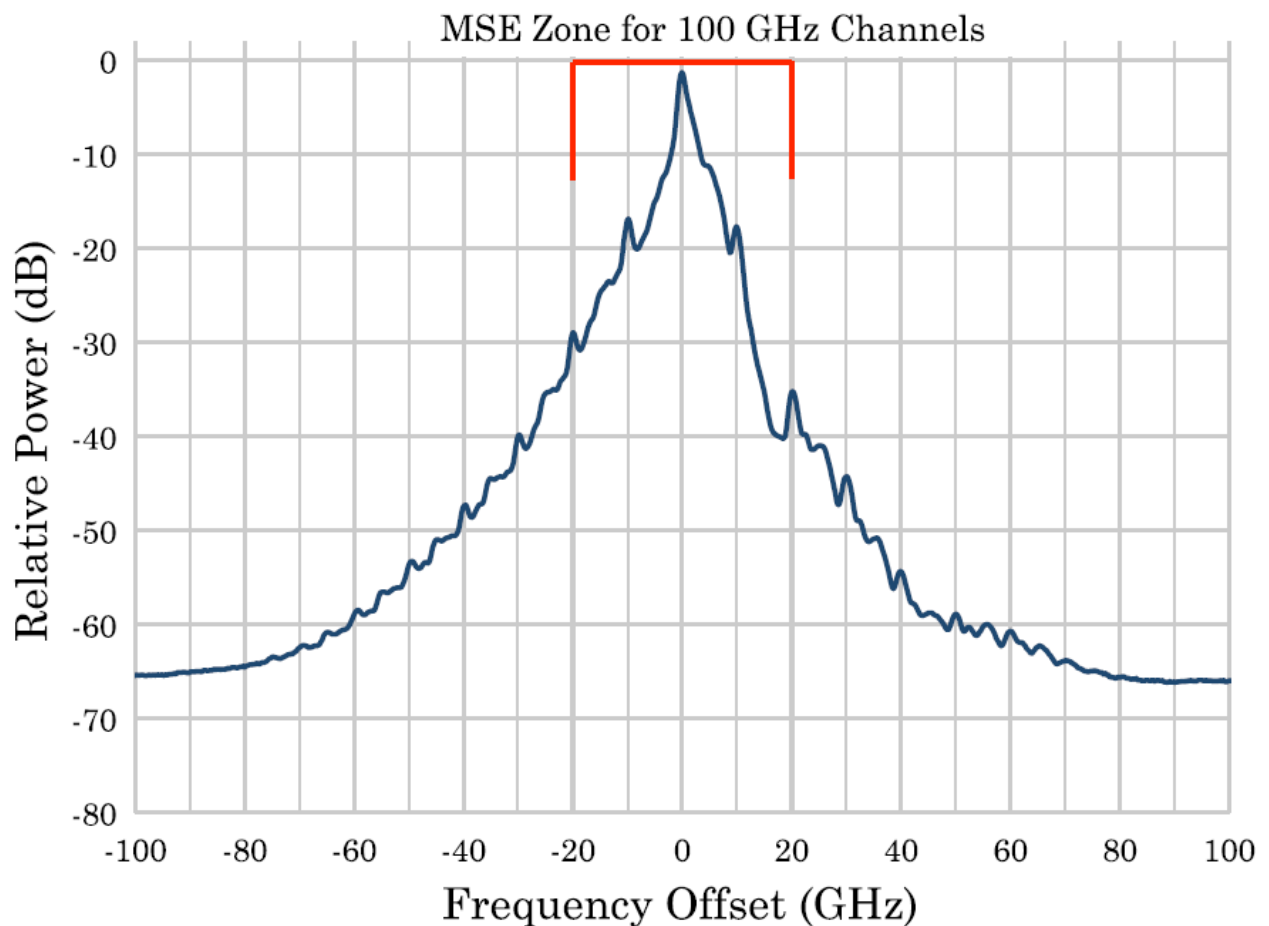


Рис. 2.3. Оптичний спектр EML Tx зі швидкістю 10 Гбіт/с, виміряний зі смугою роздільної здатності 2,5 ГГц.

Лазер із зовнішньою модуляцією (EML) Tx добре пристосований для передачі даних з високою швидкістю по оптоволокну на відстань до 100 км завдяки низькочастотному CHIRP. Рисунок 2.3 показує оптичний спектр EML Tx із швидкістю 10 Гбіт/с. Спектр сигналу має ширину близько 14 ГГц у точці 15 дБ. Якщо для US каналів вибрано базову станцію 100 ГГц, допустима MSE становить ± 20 ГГц. Таким чином, точність, з якою необхідно контролювати спектральний пік цього Tx, щоб залишатися в межах MSE, становить ± 13 ГГц. Такий EML Tx зазвичай розглядається у галузі як доступний за прийнятною ціною з використанням відомих технологій та методів.

Вимірний оптичний спектр DML Tx зі швидкістю 10 Гбіт/с показано на рис. 2.4. Через зсув частоти, викликаного модуляцією, спектр DML має два виразних піку, що відповідають логічним рівням «0» і «1» відповідно. Різниця в потужності між двома піками пов'язана з ER Tx, в даному випадку близько 7 дБ (близько до вимоги TWDM US 10 Гбіт/с, що дорівнює 6 дБ). CHIRP частоти у цьому прикладі становить близько 25 ГГц, що є високим значенням для типового DML-лазера, як буде пояснено нижче. Спектральна ширина 35 ГГц у точці 15 дБ на 15 ГГц ширша, ніж EML через частотний CHIRP. Таким чином, точність, з якою необхідно контролювати спектральний пік цього Tx, становить $\pm 2,5$ ГГц. Такий суворий контроль довжини хвилі зазвичай розглядається як неможливий без інтеграції дорогого фіксатора довжини хвилі Tx. На рис.2.4 також видно, що пік «1s» та пік «0s» повинні охоплювати центр фільтра, щоб відповідати зоні MSE.

З погляду перспективи передачі, хоча DML і є хорошим кандидатом для передачі US на швидкості 2,5 Гбіт/с, це може бути не так для передачі на швидкості 10 Гбіт/с через OPP, індукованого CHIRP. Тим не менш, існує метод [24] для пом'якшення проблем як з CHIRP, так і з жорстким контролем довжини хвилі, щоб скористатися перевагою DML Tx. У системі NG-PON2 фільтр WM використовується в OLT перед Rx. При відповідній конструкції фільтр послаблюватиме потужність нульових бітів, тим самим одночасно зменшуючи штраф за дисперсію і підвищуючи ER в OLT Rx. Зверніть увагу, що форма фільтра WM не визначена в G.989.2 і залишена на розсуд розробника.

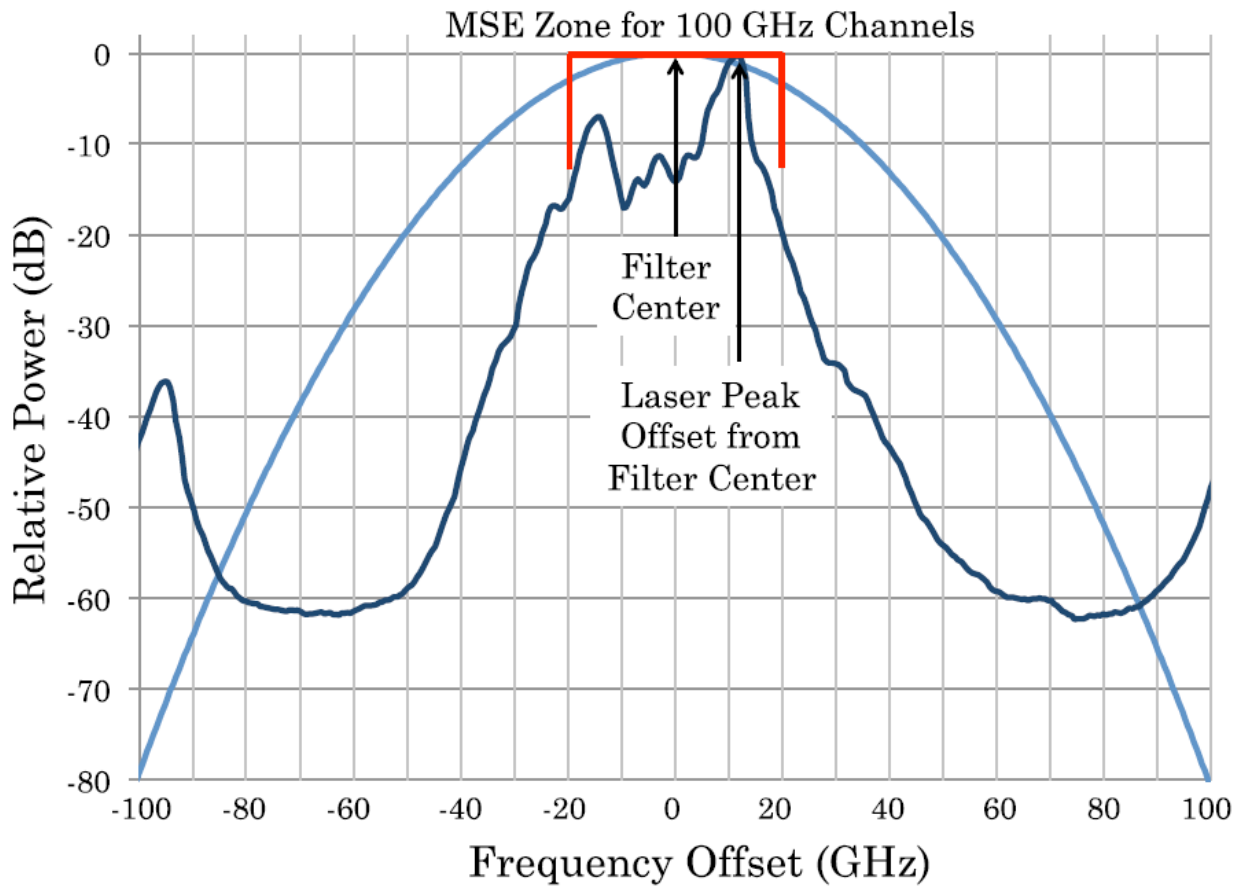


Рис. 2.4. Гаусівський фільтр та оптичний спектр DML Tx зі швидкістю 10 Гбіт/с, виміряні зі смугою роздільної здатності 2 ГГц та налаштовані відповідно до MSE.

На рис. 2.4 дано приклад звичайної смуги пропускання фільтра у формі Гауса з накладеним оптичним спектром DML Tx. Цей DML спеціально розроблений з більшим, ніж зазвичай, CHIRP, щоб отримати вигоду з методу фільтрації [24], описаного нижче.

На рис. 2.5 показано вплив налаштування DML на центральній довжині хвилі фільтра на чутливість OLT Rx. Зверніть увагу, що тут чутливість Rx вимірюється на рівні 10^{-3} BER і потужність вимірюються безпосередньо на вході Rx, а не S/R-CG, де чутливість OLT Rx визначається в G.989.2.

Фактична чутливість OLT Rx має бути значно кращою, ніж зазначена в S/R-CG, щоб врахувати втрати потужності, втрати від WM, роз'ємів та дуплексного фільтра.

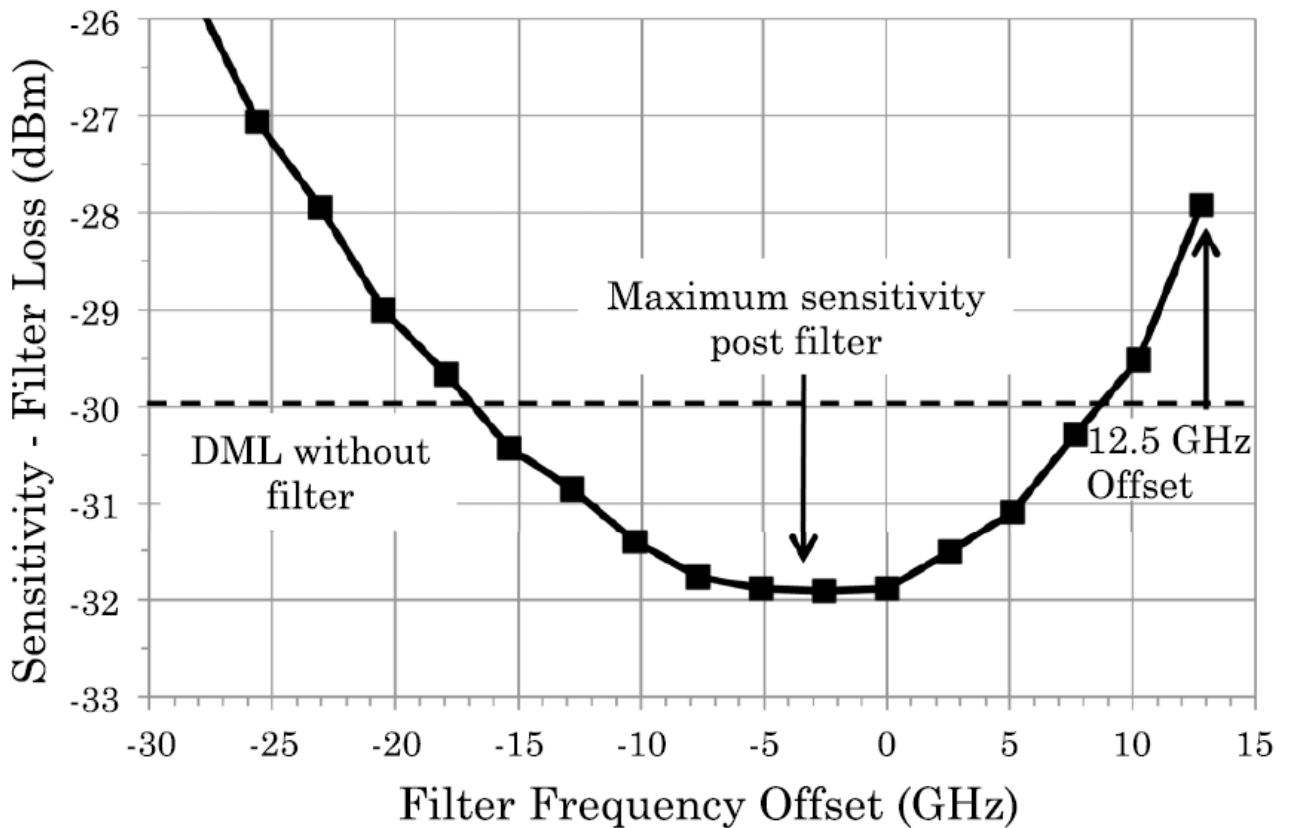


Рис. 2.5. Вплив на чутливість OLT Rx шляхом налаштування лазера DML центральною довжиною хвилі фільтра WM.

Як бачимо на рис. 2.4 налаштування лазера в межах зони MSE вимагає позитивного зсуву на 12 ГГц для лазерного піку (пік «1s»). Як видно із рис. 2.5 це призводить до погіршення чутливості Rx OLT приблизно з -30 дБм (без фільтра, горизонтальна пунктирна лінія) до -28 дБм. Якщо замість цього пік лазера змістити ліворуч між -10 і +4 ГГц від центру фільтра, чутливість збільшиться до -31,5 дБм. При такому розміщенні DML має допуск оптичної частоти ± 7 ГГц, що значно перевищує вихідний допуск $\pm 2,5$ ГГц. Однак потенційні перехресні перешкоди потужності «0s» у сусідній лівий канал повинні контролюватись за допомогою WM-фільтра з адекватною ізоляцією.

Таким чином, з вимогою MSE, що застосовується до піку «1s», а не до піку «0s», як DML, так і EML Tx можуть ефективно використовуватися для передачі US. DML більше залежить від форми фільтра WM та точності налаштування. Чи можна тепер вважати DML відповідним кандидатом для передачі 10 Гбіт/с, залежить від відносної

ваги, що надається вищої потужності передачі (перевага DML) порівняно з необхідною точністю налаштування (недолік DML).

2.2.3. Мультиплексори довжин хвиль

Оскільки в системі NG-PON2 використовується технологія WDM, OLT використовується WM для об'єднання і розділення довжин хвиль для сигналів DS і US відповідно. Технології компонентів WM можуть бути AWG або TFF. WM, що використовують TFF, складаються з ряду окремих простих фільтруючих елементів для створення бажаних властивостей WM. AWG мають властивості а циклічності декількох довжин хвиль у смузі пропускання в одному порту, при цьому вільний спектральний діапазон (FSR - free spectral range) визначає інтервал довжин хвиль між цими смугами пропускання. Як правило, AWG широко використовуються для великої кількості каналів з довжиною хвилі (> 80) та з вузькою базовою структурою 100 ГГц або менше. Це пов'язано з тим, що велика кількість вхідних та вихідних портів легко виготовляється з використанням технології планарних світлових хвиль на основі кремнезему.

З іншого боку, звичайний модуль WM на основі TFF пропонує невелику кількість каналів (зазвичай чотири), оскільки він складається з кількох TFF та іншої оптики вільного простору. Тим не менш, TFF мають кілька переваг у порівнянні з AWG, таких як низькі втрати, низькі перехресні перешкоди по сусідніх каналах (висока ізоляція) і низька вартість, коли потрібно невелика кількість каналів. При використанні TFF для великої кількості каналів, ці переваги поступово зникають. Точка перетину, коли AWG стають вигіднішими, ніж TFF, залежить від технології та постачальника.

Далі буде розглянуто три ключові аспекти WM: циклічні характеристики передачі AWG, варіанти конфігурації OLT з використанням TFF та AWG та аналіз перехресних перешкод сусіднім каналом для AWG.

1) *Циклічні характеристики AWG:* AWG мають циклічні властивості декількох довжин хвиль в смузі пропускання в одному порту. Ця властивість циклічності уможливорює конкретну реалізацію TWDM, яка допускає широкий діапазон довжин хвиль US [25]. Термін «Циклічний AWG» використовується для позначення AWG з унікальними властивостями маршрутизації довжини хвилі, як показано на рис. 2.6.

Зображений циклічний AWG має CS 100 ГГц з достатньою кількістю каналів, щоб зайняти всю смугу US частот від 1524 до 1544 нм, що відповідає широкосмуговому варіанту. Незалежно від того, де лазер ONU налаштований в діапазоні US, він буде знаходитись на відстані менше 50 ГГц від центру каналу, який прямує до одного з чотирьох закінчень каналу OLT (CT - channel terminations). Маршрутизація довжин хвиль до СТ показана різними кольорами і маршрутизація повторюється кожні 400 ГГц.

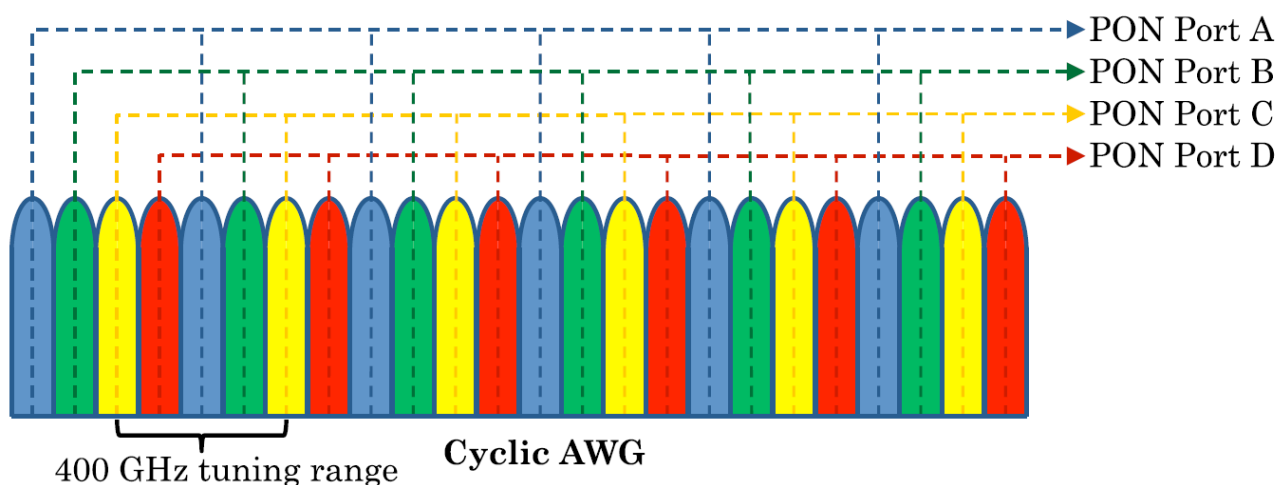


Рис. 2.6. Циклічна маршрутизація AWG US по довжинах хвиль. Чотири кольори позначають чотири різні закінчення каналу OLT.

З циклічним AWG можна використовувати лазер ONU, який термічно налаштований тільки з нагрівальним елементом. У той час як номінальна довжина хвилі лазера може змінюватись у більшій частині діапазону US, якщо нагрівач може змінити температуру кристала лазера на $\sim 35^\circ \text{C}$, тоді лазер може налаштуватися на будь-який бажаний СТ. Основним недоліком цього підходу є те, що через зміну температури навколишнього середовища лазер повинен буде переналаштовуватись (перескакувати на 400 ГГц), щоб залишатися підключеним до потрібного СТ. Якщо час налаштування великий, як це зазвичай буває з термічно налаштованим лазером, то перерва в роботі через періодичне переналаштування може бути неприйнятною. Цей підхід дійсно обіцяє недорогий лазер без необхідності в ТЕС, хоча можуть бути й інші проблеми, пов'язані з обмеженою пусковою потужністю і підвищеним шумом ASE, що

проходить через циклічний AWG.

2) *Варіанти конфігурації OLT:* Тут ми розглянемо три варіанти використання AWG та TFF у OLT NG-PON2, як показано на Рис. 2.7.

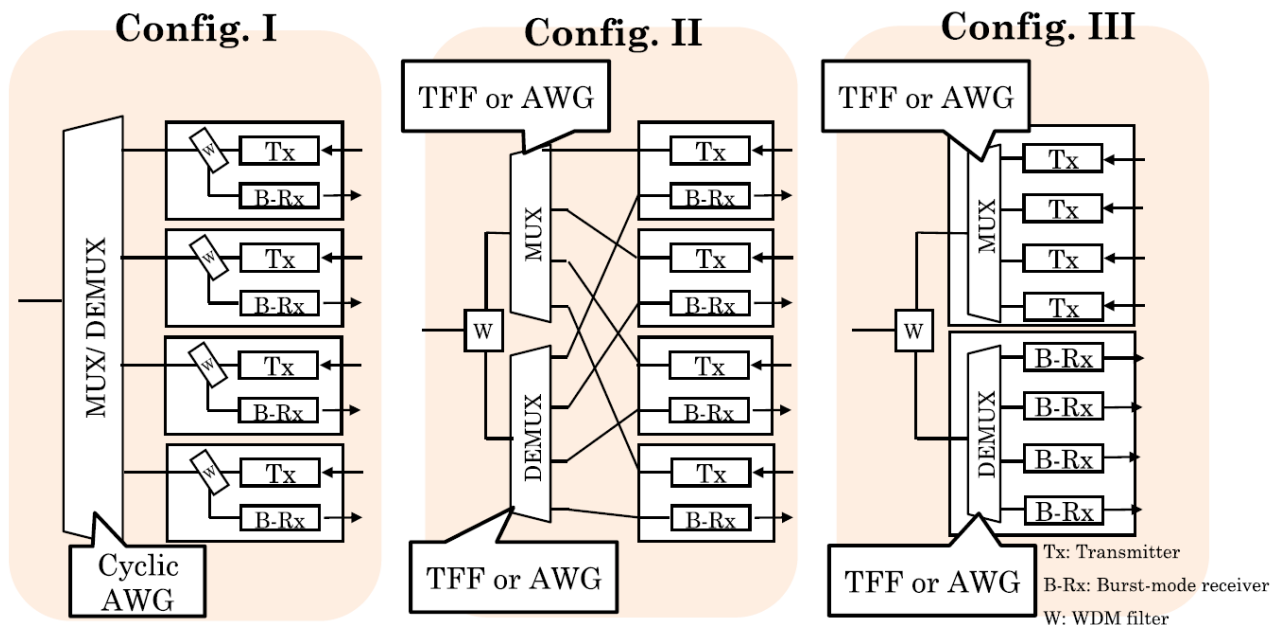


Рис. 2.7. Приклад конфігурації OLT.

Конфігурація I складається з WM та приймачів, які мають одну пару довжин хвиль сигналів US та DS. Конфігурація II містить фільтр WDM, WM та приймач, які мають два порти оптичного інтерфейсу. Конфігурація III складається з фільтра WDM, WM, чотиріканального Tx та чотиріканального Rx у пакетному режимі.

Однією з переваг конфігурації I є те, що приймачі мають один інтерфейсний порт оптичного вводу/виводу, що є загальною рисою існуючих систем PON. Ще однією перевагою є те, що один пристрій WM забезпечує просте налаштування фільтра. Однак, якщо AWG використовується як пристрій WM, він пропонує автономну CS (наприклад, 105 ГГц) для US каналів в С-діапазоні, в той час як він має мережне рознесення (наприклад, 100 ГГц) в L-діапазоні через його Показників FSR. TFF неможливо знайти прийнятні зміни I.

У конфігураціях II і III і TFF, і AWG застосовні як WM. Можна використовувати двопортові приймачі, широко поширені на телекомунікаційних ринках, тоді як для оптичного з'єднання між мультиплексором/демультиплексором і приймачами будуть

потрібні дуплексні комутаційні шнури. Конфігурація III приваблива невеликими розмірами, якщо можна застосувати технології інтеграції чотириканальних пристроїв, що використовуються у високошвидкісних приймач Ethernet (підключаються модулі CFP або QSFP). Однак, конфігурація III може не підтримувати сценарії розгортання з оплатою в міру зростання. Таким чином, конкретна конфігурація OLT залежить від типу а використовуваних WM і приймачів, а також від варіанта використання мережного оператора.

3) *Аналіз перехресних перешкод сусіднім каналом для AWG:* Оскільки G.989.2 визначає CS для сигналів US з мінімальною частотою 50 ГГц і максимальною частотою 200 ГГц, зниження потужності, викликане міжканальними перехресними перешкодами, не може бути незначним. Можна навести приклад дослідження взаємозв'язку між CS та перехресними перешкодами по сусідньому каналу, позначеними I_A у разі AWG. На рис. 2.8 показано розрахунок I_A залежно від CS для трьох різних значень смуги пропускання по 3 дБ: $\pm 12,5$, ± 20 і ± 25 ГГц. Фіолетова лінія при $I_A = -26$ дБ показує приблизне цільове значення втрат через міжканальні перехресні перешкоди 0,5 дБ, як описано в Додатку VIII G.989.2.

При моделюванні передбачався напівплоский профіль смуги пропускання AWG. Запас ширини смуги пропускання встановлений рівним ± 8 ГГц, що дозволяє отримати прийнятний вихід AWG на основі допуску виготовлення. Як показано на рис. 2.8, краще за I_A можна отримати при збільшенні CS для тієї ж смуги пропускання. Для одного і того ж CS I_A стає меншою мірою звуження смуги пропускання. Таким чином, результати показують, що менша смуга пропускання і ширша CS призводять до достатнього I_A . Зауважте, що результати залежать від конкретних параметрів AWG. Наприклад, якщо передбачається менший запас ширини смуги пропускання ± 4 ГГц, можна очікувати кращого I_A , як показано зеленою пунктирною лінією (CS = $\pm 12,5$ ГГц).

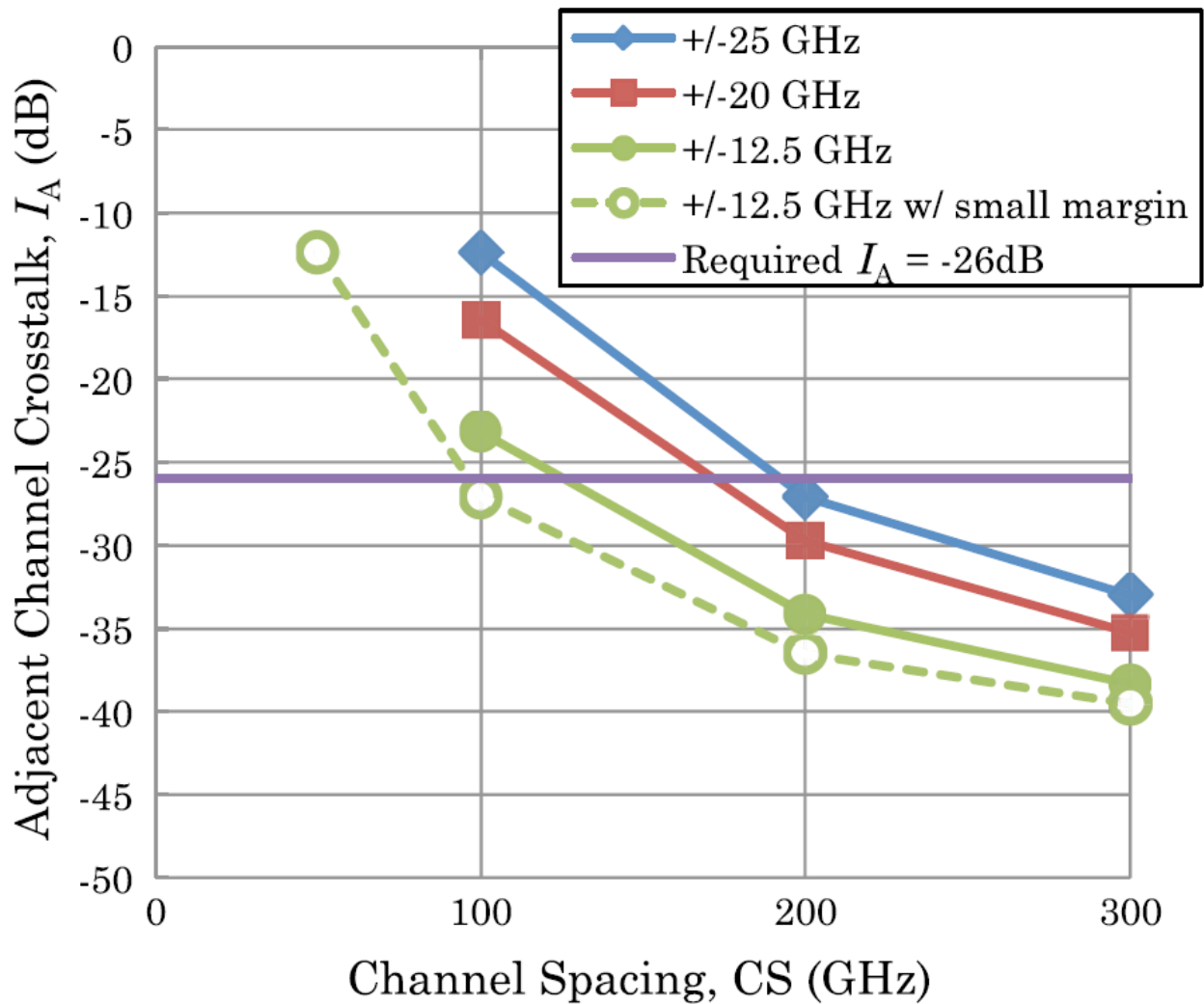


Рис. 2.8. Приклад дослідження взаємозв'язку між рознесенням каналів та перехресними перешкодами сусідніх каналів AWG з різною смугою пропускання.

2.3. Управління та контроль

Фундаментальна відмінність між системами TWDM і PtP WDM з точки зору управління та контролю полягає в тому, що TWDM являє собою наскрізну специфікацію повної системи на рівнях 1 і 2. Він розширює специфікації протоколу для попередніх поколінь PON, включаючи функції управління та контролю каналу TWDM. Тим часом PtP WDM призначений для передачі клієнтських послуг з мінімальною модифікацією корисного навантаження або без неї; отже, функції керування та контролю каналу PtP WDM мають бути додані по-новому. Таким чином, для забезпечення

таких функцій визначено допоміжний канал керування та контролю (AMCC).

Аспекти фізичного рівня AMCC були включені в першу опубліковану версію G.989.2.

2.3.1. PtP WDM AMCC

PtP WDM AMCC додається до кожного окремого каналу довжини хвилі в обох напрямках передачі, оскільки корисне навантаження передається прозоро, а не термінується PON. Прозорість необхідна, наприклад, для MOBILE FRONTHAUL, щоб уникнути додаткових затримок. У таких випадках канал сигналізації не буде доступний без AMCC. Без каналу сигналізації автоматичне налаштування та моніторинг ONU були б неможливими.

Для PtP WDM обговорюються два методи фізичного рівня AMCC: *прозорий* і *транскодуєчий*. Різниця між цими двома методами полягає в тому, як контент AMCC передається фізичним каналом, в той час як контент AMCC залишається незалежним від методу передачі.

Для прозорої передачі бітового потоку корисного навантаження без переривання якоїсь частини його структури кадру необхідно додати AMCC до корисного навантаження на тій же довжині хвилі з мінімальними перешкодами. Цей метод називається *прозорим* AMCC. У разі коли кодування даних корисного навантаження перетворюється на інший лінійний код, дані AMCC можуть бути передані за допомогою перетворення коду. Цей метод називається *транскодування* AMCC. Рисунок 2.9 порівнює ці два методи. В обох методах передається та сама інформація управління та контролю, а інтерфейси до систем управління вищого рівня ідентичні. Обидва методи відрізняються адаптацією PMD та рівнями PMD.

Наразі обговорюються дві реалізації прозорого AMCC. Вони засновані на перемодуляції основної смуги частот та низькочастотних контрольних тонах відповідно.

При перемодуляції основної лінії частот кадровані дані AMCC модулюються по амплітуді поверх потоку бітів корисного навантаження як сигнал основної лінії. Його можна виявити за допомогою простого порогового детектора після низькочастотної фільтрації сигналу, що приймається. Нині обговорюється низький індекс модуляції ~

10 %, щоб обмежити штрафи для сигналів даних корисного навантаження до $< 0,5$ дБ. Крім того, обговорюються та були продемонстровані перемодульовані швидкості передачі даних АМСС 150 кбіт/с.

Друга реалізація прозорого АМСС полягає в використанні низькочастотного контрольного тону. На стороні Tx сигнал клієнта поєднується з каналом управління та контролю в низькочастотній області, щоб забезпечити прозору АМСС з невеликими перешкодами між АМСС та даними корисного навантаження. Глибина модуляції каналу управління та контролю буде дуже низькою: вона буде оптимізована, щоб не зашкодити якості клієнтського сигналу. На стороні Rx сигнал керування та контролю демультимплексується після виявлення оптичного сигналу.

Транскодування АМСС додає інформацію управління та FEC додаткові кодові слова схеми кодування даних корисного навантаження.

На стороні Tx дані корисного навантаження PtP WDM у кодї № 1 та інформація управління об'єднуються у новий код № 2.

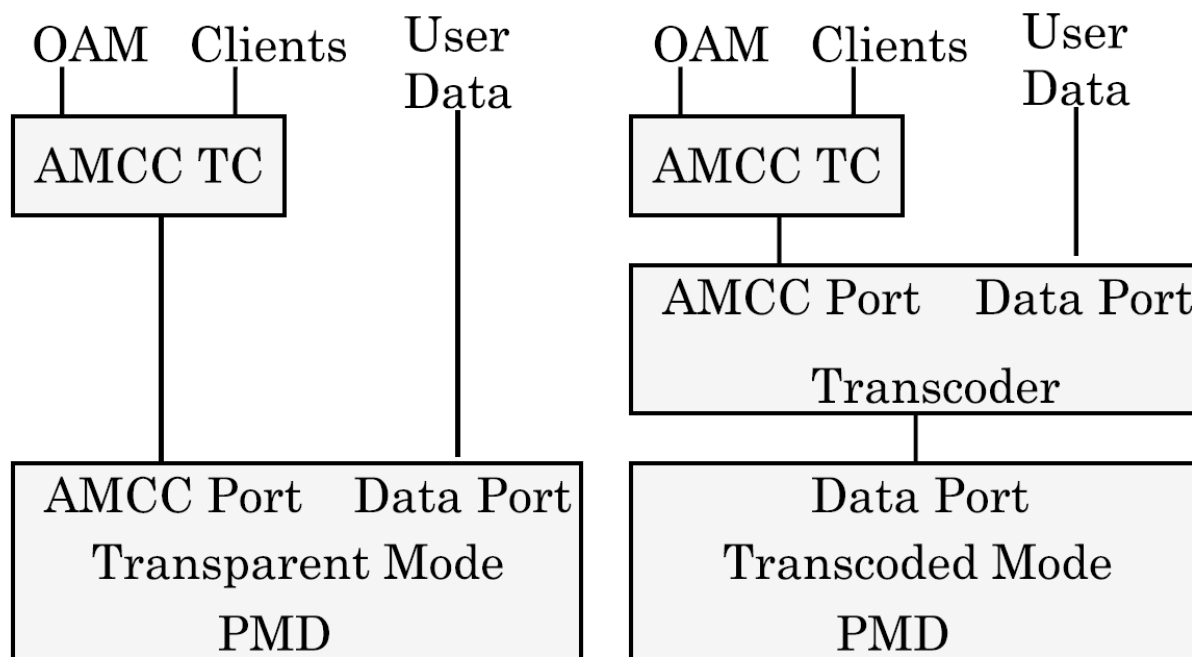


Рис. 2.9. Зв'язок рівня ТС АМСС з іншими системними функціями для прозорого (ліворуч) та транскодованого (праворуч) варіантів.

Код №2. FEC може використовуватися як частина транскодування для покращення коефіцієнта передачі. Rx декодує код №2 для отримання інформації управління PtP WDM, а дані корисного навантаження перетворюються назад на код №1. Як на стороні Tx, так і на стороні Rx немає вимог до модуляції та додаткової обробки сигналу, крім транскодування. Можна повторно використовувати одні й самі набори мікросхем, фізичні інтерфейси і носій сигналу каналу даних корисного навантаження PtP WDM.

2.3.2. TWDM AMCC

Підхід, що використовується в системах PON на основі TDM для виявлення та ранжирування, знову підключеного ONU, полягає у створенні невеликого переривання трафіку (тихого вікна) у кадрі US, в якому ONU може відправляти ідентифікаційну інформацію, наприклад свій серійний номер, не втручаючи активні ONU.

У TWDM PON, якщо ONU Tx недостатньо відкалібровано за довжиною хвилі, передача пакета виявлення US може відбутися в будь-якому каналі US. Тому потрібно відкривати тихе вікно одночасно на всіх каналах. Якщо це неприйнятно, наприклад через те, що канали належать окремим системам або незалежним мережним операторам, або якщо обслуговування на одному каналі не повинно перериватися через додавання ONU до іншого, необхідно використовувати новий підхід.

Одним із підходів є прийняття низькорівневої низькочастотної (LL-LF - low - level low - frequency) AMCC, через яку ONU може передавати US під час фази активації. Сигнал AMCC повинен бути досить слабким, щоб звести до мінімуму втрати, спричинені перешкодами для інших активних ONU, і водночас він має бути достатнього рівня, щоб дозволити його правильне виявлення OLT Rx. У [26] показано, що обидві умови не можуть бути легко досягнуті, якщо не будуть вжиті додаткові заходи.

Щоб полегшити виявлення сигналу AMCC, шум, що генерується активними ONU всередині смуги пропускання AMCC Rx, може бути зменшений або частотної або тимчасової області. У першому випадку належне кодування або фільтрація даних, що передаються, що, однак, може призвести до додаткових втрат. У дру-

тому випадку розподіл смуги пропускання для активних ONU може бути призупинено на короткий проміжок часу (тимчасовий інтервал на рис. 2.10), щоб забезпечити безшумне виявлення сигналу АМСС [26]. Під час таких «проміжків часу» вибірки сигналу АМСС можуть бути отримані, доки не буде завершено отримання повного повідомлення активації. Слід зазначити, що ці часові проміжки можуть генеруватися асинхронно на каналах з різними довжинами хвиль, тому можлива незалежна робота різних каналів.

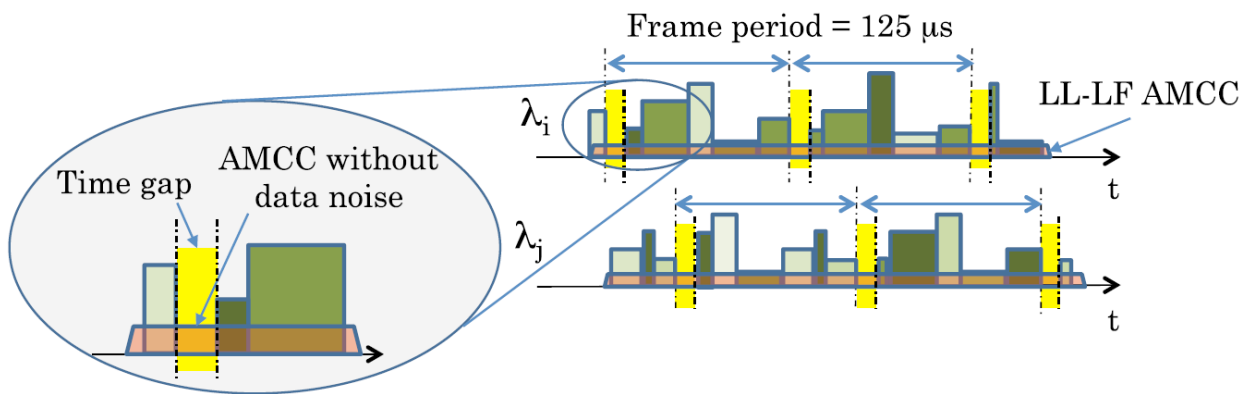


Рис. 2.10. Виявлення невідкаліброваного ONU з використанням інтервалу часу.

2.4. Майбутні напрямки стандарту NG-PON2 PMD

Після затвердження G.989.2 у грудні 2014 року ITU-T розпочав розробку поправки, яка визначає бюджетні класи потужності з низькими втратами. Загальна угода полягає в тому, щоб вказати принаймні два класи бюджету потужності з низькими втратами для PtP WDM з WR-ODN. Базовий клас підтримуватиме радіус дії 20 км. Інший клас буде відповідати вищим вимогам щодо радіусу дії 40 км. Ця робота активно ведеться робочою групою ITU-T Q2/SG15.

У більш віддаленому майбутньому, у міру вдосконалення базової технології, удосконалення технології NG-PON2 може бути зумовлене додатком доступу або окремими ринками, такими як оптичний транспорт або зв'язок центрів обробки даних. Рушійною силою цих поліпшень може бути збільшення ємності або зниження вартості, або те й інше. В даний час існує три очевидні напрямки розвитку системи NG-PON2.

Першим майбутнім напрямом є масштабування кількості довжин хвиль. Транспортні системи вже давно використовують збільшення кількості довжин хвиль як шлях збільшення пропускної спроможності, і система NG-PON2 працює приблизно так само. Масштабування довжини хвилі має вирішувати дві проблеми: перерозподіл спектру та можливості налаштування. Поточний спектр систем NG-PON2 є залишком спектра від попередніх трьох систем PON (G-PON, RF-overlay і XG-PON1). Деякий попередній системний спектр повинен бути відновлений для використання для розширення NG-PON2 .

Логічно було б вибрати найстаріші системи (G-PON та RF-overlay). Однак їх спектр далекий від заданих діапазонів довжин хвиль NG-PON2. Безперервне зростання спектра вимагатиме відмови від RF-overlay та XG-PON1. Який би спектр не відновлювався, технічні характеристики системи повинні враховувати наявність компонентів, що налаштовуються для покриття його. Один із принципів проектування систем NG-PON2 полягає в тому, щоб підтримувати невеликий діапазон налаштувань, який можна було б вирішити за допомогою багатьох технологій. Якщо збільшити пропускну здатність за рахунок розширення спектру, то знадобиться нове покоління пристроїв, що настроюються. У цьому сенсі можна сказати, що масштабування довжини хвилі потребує кількох складних компромісів.

Другий напрямок майбутнього – масштабування лінійної швидкості. Коли під час стандартизації NG-PON2 приймалися ключові рішення, 10 Гбіт/с була найекономічнішою швидкістю високошвидкісного з'єднання, а наступна вища швидкість (40 Гбіт/с) була дуже дорогою. Однак запровадження 100 Гбіт/с Ethernet і, зокрема, серії фізичних пристроїв 4x25 Гбіт/с підвищило доступність компонентів 25 Гбіт/с. В даний час ведеться проєкт IEEE 802.3 щодо визначення інтерфейсу Ethernet 25 Гбіт/с. З технічної точки зору 25 Гбіт/с значно легше, ніж 40 Гбіт/с як з точки зору цілісності електронного сигналу, так і з точки зору хроматичної дисперсії волокна. Таким чином, 25 Гбіт/с може стати наступною швидкістю передачі даних, яку підтримуватиме система NG-PON2.

Третій напрямок полягає у розгляді альтернативних лінійних кодів. NRZ обслу-

говував оптичний доступ з моменту свого створення, але зі зростанням швидкості передачі даних стали більш відповідними інші коди. Якщо NG-PON2 PHY залишиться прямим виявленням з модульованою інтенсивністю, то коди, що розглядаються, будуть простими.

Двома провідними кандидатами є duobinary та PAM-4. Обидва вони мають суттєву особливість, яка полягає в тому, що їм потрібна приблизно половина аналогової смуги пропускання порівняно з порівняним каналом NRZ. Це відкриває двері для підтримки вищої швидкості передачі даних фізично 10 Гбіт/с існуючого покоління. Важливо відзначити, що такі види кодів розробляються в промисловості для використання в центрах обробки даних. Можливо, це найпростіший шлях до швидкості 25 Гбіт/с.

Нині зовсім ясно, який із цих напрямів розвиватиметься насамперед. Експлуатаційні та технічні труднощі зміни плану довжин хвиль можуть призвести до того, що цей варіант залишиться на задньому плані, принаймні у короткостроковій перспективі. Поєднання вищої швидкості лінії з використанням нового лінійного коду виглядає досить привабливо, і тому може стати наступним удосконаленням системи NG-PON2 для досягнення загальної пропускну здатності 100 Гбіт/с. Однак необхідно встановити вимоги оператора до цієї можливості. Зокрема, чи потрібно клієнтам доступ лише до 10 Гбіт/с як пікову швидкість передачі даних, чи деякі захочуть періодично отримувати доступ до всіх 100 Гбіт/с? Якби останнє було вірним, то була б потрібна якась форма з'єднання каналів довжин хвиль. Це зв'язування каналів саме по собі буде новою функцією, яка досі зовсім не вивчена в системах оптичного доступу, але широко використовується в інших місцях.

У майбутньому можуть знадобитися інші поліпшення. Наприклад, більш високий бюджет потужності, отже, коефіцієнт поділу та охоплення, що дозволить мережевим операторам консолідувати центральні офіси. Однак це, ймовірно, стане предметом нового покоління систем PON.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У цьому розділі NG-PON2 було виділено теми, що стосуються аспекту проектування системи, такі як управління довжиною хвилі, здійсненність технології, а також функції управління та контролю.

Специфікація MSE важлива для управління довжинами хвиль ONU Tx у межах дозволеного спектрального інтервалу, щоб мінімізувати перехресні перешкоди та оптимізувати продуктивність каналу.

Точність калібрування довжини хвилі передавача ONU, що настроюється, безпосередньо впливає на вартість. Стандарт NG-PON 2 PMD розглядає новий метод синхронізації довжини хвилі, щоб послабити вимоги до точності та стабільності довжини хвилі ONU Tx.

Основна проблема, пов'язана з здійсненністю ONU Tx, полягає в тому, як досягти поєднання настроюваності, високого бюджету потужності та мінімального енергоспоживання при використанні найбільш економічних технологій. ONU Tx на основі EML та недорогого DML можуть бути ефективними варіантами, якщо до DML застосовується метод зменшення дисперсії.

Мультиплексор довжин хвиль OLT може бути заснований на технології AWG або TFF, а конкретний вибір залежить від постачальника. Для TWDM циклічні AWG можуть дозволити використовувати недорогий термічно налаштований лазер ONU. Було описано приклади конфігурацій OLT на основі AWG або TFF.

Оскільки PtP WDM призначений передачі клієнтського сервісу з мінімальною зміною корисного навантаження чи ні, канал AMCC необхідний забезпечення основних функцій управління. Можливі дві реалізації: прозора та транскодуюча, залежно від того, як передається контент AMCC. Для TWDM AMCC використовується для ONU для зв'язку US на етапі активації через багатохвильову функцію систем NG-PON2.

Останнім часом було створено кілька проектів NG-PON2 і проведено польові випробування. Технологічні інновації продовжуються з метою різкого зниження ви-

трат. Передбачається, що майбутні удосконалення конструкції системи NG-PON2 виграють від технологічних досягнень в інших галузях застосування (наприклад при використанні 5G) і, ймовірно, приймуть форму збільшення кількості довжин хвиль, більш високих швидкостей передачі даних або використання вдосконалених лінійних кодів. Маючи унікальні можливості забезпечення гнучкого двонаправленого багато-хвильового підключення зі швидкістю 40 Гбіт/с для житлових та комерційних послуг у рамках єдиної інфраструктури PON, система NG-PON2 має хороші можливості для підтримки нових можливостей у майбутніх мережах оптичного доступу.

РОЗДІЛ 3

ОХОРОНА ПРАЦІ

Метою виконання дипломної роботи є оптимізація планування та побудови високошвидкісної мережі з використанням технології NG-PON2. Суб'єктом в даному розділі дипломної роботи є інженер-дослідник, який розробляє модель оптичної мережі та аналізує важливі аспекти побудови та планування цієї мережі за допомогою технології NG-PON2.

Так як робота, пов'язана з обробкою та аналізом досліджуваних даних, здійснюється за допомогою персонального комп'ютера, то під час виконання обов'язків на інженера-дослідника можуть впливати шкідливі та небезпечні виробничі фактори, які можуть призвести до серйозних проблем фізичного та психологічного характеру.

Необхідність розробки заходів з охорони праці для нього пояснюється наявністю небезпечних та шкідливих виробничих факторів на робочому місці і необхідністю забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці.

3.1. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори діючі в робочій зоні інженера-дослідника

Небезпечний фактор — фактор, вплив якого на працюючого потенційно може привести до травми [27].

Шкідливий виробничий фактор — фактор, вплив якого на працюючого може привести до захворювання.

Групи небезпечних і шкідливих виробничих факторів [28]:

- Фізичні:
 - незахищені рухливі елементи виробничого обладнання;
 - загазованість, запиленість робочої зони;
 - підвищений рівень шуму;

- підвищений рівень напруги в електричній мережі, замикання якої може відбутися в тілі людини;
- підвищений рівень іонізуючого випромінювання;
- підвищений рівень електромагнітних полів;
- підвищений рівень ультрафіолетового випромінювання;
- недостатня освітленість робочої зони.
- Хімічні:
 - подразнювальні речовини.
- Біологічні:
 - макро- і мікроорганізми.
- Психофізіологічні:
 - фізичні перевантаження;
 - статичні навантаження;
 - динамічні навантаження;
 - гіподинамія.
- Нервово-емоційні навантаження:
 - розумова перенапруга;
 - перевтома;
 - перенапруга аналізаторів (шкірні, зорові, слухові і т.д.);
 - монотонність праці;
 - емоційні перенавантаження.

3.2. Технічні та організаційні заходи для зменшення рівня впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів

3.2.1. Електромагнітне поле

Джерело виникнення — промислові установки, радіотехнічні об'єкти [29].

Електромагнітні поля ВЧ широко використовуються в системах зв'язку.

Електромагнітне поле великої інтенсивності приводить до перегріву тканин, впливає на органи зору. Електромагнітне поле помірної інтенсивності до порушення

діяльності центральної нервової системи; серцево-судинної; порушуються біологічні процеси в тканинах і клітках. Електромагнітне поле малої інтенсивності до підвищення стомлюваності, головні болі; випадання волосся.

Необхідні заходи щодо захисту від впливу електромагнітних полів:

- зменшення складових напруг електричного і магнітного полів у зоні індукції, у зоні випромінювання — зменшення щільності потоку енергії, якщо дозволяє даний технологічний процес або обладнання,
- обмеження часу перебування в зоні джерела електромагнітного поля,
- екранування робочого місця або джерела випромінювання електромагнітного поля,
- раціональне планування робочого місця для зменшення випромінювання електромагнітного поля,
- застосування засобів попереджувальної сигналізації,
- застосування засобів індивідуального захисту.

3.2.2. Виробниче освітлення

Раціональне освітлення виробничих ділянок є одним з найважливіших факторів попередження травматизму і професійних захворювань. Правильно організоване освітлення створює сприятливі умови праці, підвищує працездатність і продуктивність праці. Освітленість виробничих, службових і допоміжних приміщень регламентується будівельними нормами і правилами, галузевими нормами [30].

Освітлення на робочому місці повинне бути таким, щоб працюючий міг без напруження зору виконувати свою роботу. Стомлюваність органів зору залежить від ряду причин – недостатність освітленості, надмірна освітленість, неправильний напрямок світла.

Недостатність освітлення приводить до напруження зору, послаблюється увага, настає передчасна втома. Яскраве надмірне освітлення викликає осліплення, роздратування і різь в очах. Неправильний напрямок світла на робоче місце може створювати різкі тіні, відблиски і дезорієнтувати працюючого. Усі ці причини можуть привести до нещасного випадку і профзахворювань [32].

3.2.3. Заземлення

Вимоги до заземлення електрообладнання.

Заземлення телекомунікаційного обладнання повинне виконуватися з метою [31]:

- захисту персоналу від поразки електричним струмом при ушкодженні ізоляції;
- захисту обладнання від електростатичних розрядів;
- захисту обладнання від впливу електромагнітних перешкод.

Стійки, металеві кронштейни з ізоляторами, антенні пристрої ТВ, а також металеві частини шаф, кросів, пультів та інші металоконструкції обладнання пристроїв зв'язку повинні бути заземлені.. Металеві шафи, каркаси та інші металоконструкції, на яких встановлене електрообладнання напругою вище 42В перемінного струму, повинні мати захисне заземлення шляхом з'єднання з нульовою житловою електричною мережею напругою 380/220 В.

Величина опору заземлення обладнання повинна відповідати ДСТ 464-79. Опір заземлення не повинен перевищувати значення 2 Ом у будь-який час року.

Робоче заземлення обладнання зв'язку, сигналізації варто виконувати відповідно до технічних вимог на це обладнання [33].

Розрахунок захисного заземлення

Вихідні дані:

Все обладнання живиться від трьохфазної мережі, напругою 380В з ізолюваною нейтралю. Загальна потужність джерел живлення мережі перевищує 100 кВА. Будинок має залізобетонний фундамент на глинистому ґрунті. Площа, обмежена периметром будинку 852000м².

Розрахунок:

Оскільки напруга у мережі не перевищує 1000В, має ізолювану нейтраль і потужність джерел живлення більш 100кВА, за нормативний опір заземлення беремо $R_n = 4 \text{ Ом}$.

У якості природного заземлювача використовуємо фундамент будинку. Для нашого випадку питомий опір ґрунту (глина) $\rho_r = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; коефіцієнти сезонності, що

залежать від кліматичної зони $\psi_B = 1,5 - 1,8$ при розрахунку вертикальних електродів і $\psi_T = 3,5 - 4,5$ при розрахунку опору горизонтальних електродів) приймаємо рівними: $\psi_B = 1,65$, $\psi_T = 4$.

Питомий електричний опір ґрунту в зоні розміщення заземлювача визначається за формулою:

$$\rho = \rho_T \cdot \psi_T = 40 \cdot 4 = 160 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (3.1)$$

Опір природного заземлювача для залізобетонного фундаменту:

$$R_e = 0,5 \rho / S^{1/2} = 0,5 * 160 / 200^{1/2} = 5,66 \text{ Ом}, \quad (3.2)$$

що перевищує $R_H = 4 \text{ Ом}$.

Отже необхідний штучний заземлювач, підключено паралельно природному з припустимим опором:

$$R_{H, \text{доп.}} = R_e \cdot R_H / (R_e - R_H) = 5,66 \cdot 4 / (5,66 - 4) = 13,4 \text{ Ом}. \quad (3.3)$$

Штучний заземлювач розташовуємо на низькій і зволоженій ділянці території підприємства на відстані 30м від будинку. Заземлювач виконуємо як систему розташованих у ряд вертикальних електродів у вигляді стержнів довжиною $l = 2,6\text{м}$ із кутової сталі з шириною $b = 0,05\text{м}$, верхні кінці яких лежать на глибині $t_0 = 0,7\text{м}$ і з'єднані смугою зв'язку із сталі, перетином 5 x 40мм.

Для вертикальних електродів, питомий опір ґрунту в зоні розміщення заземлювачів:

$$\rho = \rho_B \cdot \psi_B = 40 \cdot 1,65 = 66 \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (3.4)$$

Опір одиночного вертикального електрода визначимо:

$$R_3 = 0,366 \cdot \rho (\lg 2l/d + 0,51 \lg (4t+1)/(4t-1)) / \lambda = 20,32 \text{ Ом} \quad (3.5)$$

де $l \gg d$; $t = 0,5l = t_0$; l , d відповідно довжина і діаметр електрода;

для електрода з кутової сталі значення $d = 0,95b$.

Для визначення кількості вертикальних електродів n знаходимо попередньо коефіцієнт використання вертикальних електродів η_3 на їхню кількість:

$$\eta_3 \cdot n = R_3 / R_{H, \text{доп.}} = 1,52 \quad (3.6)$$

Задавши відстанню α між електродами у вигляді співвідношення α/l , знаходимо n (для $\alpha/l = 2$; $n = 2$).

Знаходимо довжину L горизонтального провідника, що з'єднує вертикальні електроди.

При розташуванні в ряд:

$$L = 1,05 \cdot (n-1) \cdot \alpha = 1,05 \cdot (2-1) \cdot 5,2 = 5,46 \text{ м} \quad (3.7)$$

при розташуванні по контуру,

$$L = 1,05 \cdot n \cdot \alpha = 1,05 \cdot 2 \cdot 5,2 = 10,92 \text{ м} \quad (3.8)$$

Опір горизонтальної смуги при $L \gg 4 t_0 \gg c$,

$$R_n = (0,366 \rho/L) \lg 2L^2/c \cdot t_0 = 17,39 \text{ Ом.} \quad (3.9)$$

де c – ширина смуги, рівна діаметрові вертикального електрода.

При $\alpha/l = 2$ і $n = 2$ знаходимо $\eta_3 = 0,91$ і $\eta_n = 0,94$. Тоді результуючий опір штучного заземлювача:

$$R_n = R_3 \cdot R_n / (R_3 \cdot \eta_3 + R_n \cdot \eta_n \cdot n) = 6,96 \text{ Ом.} \quad (3.10)$$

Отримане значення не перевищує припустимого опору

$$R_{n, \text{доп}} = 13,4 \text{ Ом.}$$

Оскільки штучний заземлювач досить віддалений від природного, можна не зважати на вплив їхніх полів розтікання струму. Тоді загальний опір усього комплексу заземлення, що складається з природного і штучного заземлювачів:

$$R_3 = R_n * R_c / (R_n + R_c) = 3,12 \text{ Ом, що менше } R_n = 4 \text{ Ом.} \quad (3.11)$$

3.3. Пожежна безпека

Протипожежні заходи.

Пожежа – неконтрольований процес горіння, що супроводжується знищенням матеріальних цінностей і створює небезпеку для життя людей.

Горіння – хімічна реакція, що супроводжується виділенням тепла та світла.

Класифікація приміщень і будинків по ступені вибухово-пожежної небезпеки [35].

Усі приміщення і будинки підрозділяються на 5 категорій:

А – вибухово-пожежної небезпеки. Та категорія, у якій здійснюються технологічні процеси, зв'язані з виділенням палих газів, ЛВЖ із температурою спалаху до 28 °С,

$t_{всп} \leq 28 \text{ }^\circ\text{C}$; Р – понад 5 кПа.

Б – приміщення, де здійснюються технологічні процеси з використанням ЛВЖ із температурою спалаху понад 28 °С, здатні утворювати вибухонебезпечні та пожежонебезпечні суміші, при запаленні яких утвориться надлишковий розрахунковий вибух тиском понад 5 кПа.

$t_{всп} > 28 \text{ }^\circ\text{C}$; Р – понад 5 кПа.

В – приміщення і будинки, де відбуваються технологічні процеси з використанням палих і важко палих рідин, твердих палих речовин, що при взаємодії один з одним або киснем здатні тільки горіти. За умови, що ці речовини не відносяться ні до А, ні до Б. Ця категорія пожежонебезпечна.

Г – приміщення і будинки, де відбуваються технологічні процеси з використанням непалих речовин і матеріалів у пальному, розпеченому або розплавленому стані.

Д – приміщення і будинки, де відбуваються технологічні процеси з використанням твердих непалих речовин і матеріалів у холодному стані.

Основні причини пожеж: коротке замикання, перевантаження проводів /кабелів, утворення перехідних опорів.

Режим короткого замикання – поява в результаті різкого зростання сили струму, електричних іскор, часток розплавленого металу, електричної дуги, відкритого вогню, ізоляції що зайнялася.

Причини виникнення короткого замикання:

- помилки при проектуванні,
- старіння ізоляції,
- зволоження ізоляції,
- механічні перевантаження.

Пожежна небезпека при перевантаженнях – надмірне нагрівання окремих елементів, що може відбуватися при помилках проектування у випадку тривалого проходження струму, що перевищує номінальне значення [35].

При 1,5 кратному перевищенні потужності резистори нагріваються до 200–300 °С.

Пожежна небезпека перехідних опорів – можливість заpalення ізоляції або інших прилеглих палих матеріалів від тепла, що виникає в місці аварійного опору (у перехідних клемах, перемикачах та ін.).

Пожежна небезпека перенапруги – нагрівання струмоведучих частин за рахунок збільшення струмів, що проходять через них, за рахунок збільшення перенапруги між окремими елементами електроустановок. Виникає при виході з ладу або зміни параметрів окремих елементів.

Пожежна небезпека струмів витоку – локальне нагрівання ізоляції між окремими струмоведучими елементами і заземленими конструкціями.

Заходи для пожежної профілактики.

- будівельно-планувальні,
- технічні,
- способи і засоби гасіння пожеж,
- організаційні.

Будівельно-планувальні визначаються вогнестійкістю будинків і споруджень. Межа вогнестійкості – це кількість часу, під час якого під впливом вогню не порушується несуча здатність будівельних конструкцій до появи першої тріщини.

Усі будівельні конструкції по межі вогнестійкості підрозділяються на 5 ступенів.

Для приміщень ОЦ використовують матеріали з межею вогнестійкості від 0,25 до 2,5 годин.

Технічні міри:

- дотримання протипожежних норм при проектуванні систем вентиляції, опалення, освітлення, електричного забезпечення,
- використання різноманітних захисних систем,

- дотримання параметрів технологічних процесів і режимів роботи обладнання.

Організаційні міри – проведення навчання з пожежної безпеки, дотримання заходів для пожежної безпеки.

Способи і засоби гасіння пожеж [35]:

- зниження концентрації кисню в повітрі,
- зниження температури горючої речовини нижче температури запалення,
- ізоляція горючої речовини від окислювача.

Таблиця 3.1.

Класифікація пожеж та рекомендовані вогнегасні речовини.

Класифікація пожеж	Характеристика середовища, об'єкта	Вогнегасні засоби
A	Звичайні тверді і горючі матеріали (дерево, папір)	Всі види
B	Горючі рідини, які плавляться при нагріванні (мазут, спирти, бензин)	Розпилена вода , усі види піни, порошки, склади на основі брометила
C	Горючі гази (водень, ацетилен, вуглеводні)	Газові склади, до складу яких входять інертні розріджувачі (азот, порошки, вода)
D	Метали і їхні сплави (натрій, калій, алюміній, магній)	Порошки
E	Електричні установки під напругою	Порошки, двоокис азоту, оксид азоту, вуглекислий газ, склади брометила

Вогнегасні речовини: вода, пісок, піна, порошок, газоподібні речовини, що не підтримують горіння (хладон), інертні гази, пара.

Засоби вогнегасіння:

Ручні:

A: вогнегасники хімічної піни.

B: вогнегасник повітряно-механічної піни.

С: вогнегасник порошковий.

Д: вогнегасник вуглекислотний, бром етиловий.

Протипожежні системи.

А: система водопостачання.

В: піногенератор.

Система автоматичного пожежогасіння з використанням засобів автоматичної сигналізації.

А: пожежний оповіщувач (тепловий, світловий, димовий, радіаційний).

В: для ОЦ використовуються теплові датчики-оповіщувачі типу ДТЛ, димового, радіоізотопні типу РІД.

Система пожежогасіння ручної дії (кнопковий оповіщувач).

Для ОЦ використовуються вогнегасники вуглекислотні ОУ не менш двох вогнегасників на кожні 20 м²

3.4. Інструкція з охорони праці

Вимоги безпеки перед початком роботи [34].

- Перед початком роботи працівник повинен зовнішнім оглядом перевірити цілісність корпусів системного блоку, відео монітора, принтера, клавіатури.
- Перевірити цілісність кабелів живлення, місць їх підключення (розеток електромережі, продовжувачів електромережі, розгалужувальних коробок, штепсельних вилок).
- Підготувати своє робоче місце, прибравши речі, які можуть заважати при виконанні роботи.
- Ввімкнути живлення ПК.
- У випадку, якщо після ввімкнення ПК не проходить загрузка або комп'ютер не виходить на робочий режим, працівник повинен повідомити керівника чи спеціаліста відділу інформаційних технологій.
- При виявленні ушкодження або яких-небудь інших недоліків повідомити безпосереднього керівника. Не приступати до роботи без його вказівки.

Вимоги безпеки під час роботи

- Необхідно стійко розташувати всі складові пристрої на столі, в тому числі і клавіатуру. Разом з тим повинна бути передбачена можливість переміщення клавіатури. Її розташування і кут нахилу повинні відповідати побажанням користувача ПК. Якщо в конструкції клавіатури не передбачений простір для опору долонь, то її слід розташовувати на відстані не менше 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моніторного поля. При роботі на клавіатурі слід сидіти прямо, не напружуватись.

- Для зменшення несприятливого впливу на користувача пристроїв типу "миша" (вимушена поза, необхідність постійного контролю за якістю дій) слід забезпечити вільною більшу площу поверхні столу для переміщення "миші" і зручного упору ліктьового суглоба.

- Не припустимі сторонні розмови, роздратовуючи шуми тощо.

- Періодично при вимкненому ПК слід видаляти злегка зволоженою мильним розчином хлопко-паперовою салфеткою пил з поверхонь апаратури. Екран і захисний екран протирають ватою, зволоженою спиртом.

- Не дозволяється використовувати рідинні або аерозольні засоби чистки поверхонь ПК.

Забороняється:

- самостійно ремонтувати апаратуру, в яких кінескоп та інші елементи можуть знаходитись під високою напругою (до 25 кВ0.)

- класти будь-які речі на апаратуру ПК, бутерброди та напої на клавіатуру або поруч з нею. Це може вивести її з ладу;

- затуляти вентиляційні отвори в апаратурі, це може призвести до її перегріву і виходу з ладу.

- Для зменшення негативного впливу на стан здоров'я працівників різних факторів ризику, пов'язаних з роботою на ПК, передбачаються додаткові регламентовані перерви для відпочинку користувачів ПК:

- через кожний час безперервної роботи – 10 хвилин;

- через кожні 2 години – 15 хвилин.

- При можливості слід чергувати зміну діяльності з іншою, не пов'язаною з роботою на ПК.
- З метою зменшення негативного впливу монотонності доцільно застосовувати чергування операцій введення тексту і введення даних (зміна змісту і темпу роботи) і т.п.
- При роботі на лазерних принтерах:
- Розташовувати принтер необхідно поряд з системним блоком так, щоб з'єднувальні шнури не були натягнуті. Забороняється ставити принтер на системний блок.
- Перш, ніж програмувати роботу принтера, впевніться, що він знаходиться в режимі зв'язку з системним блоком.
- Для досягнення високоякісного, чистого, з високою роздільною здатністю зображення щоб не зіпсувати апарат, потрібно використовувати папір, марка якого вказана в інструкції до принтера (найчастіше папір вагою 60-135 г/м², типу Canon або Xerox 4024).
- Обрізання країв паперу повинно бути виконаним гострим лезом ножа, без заусенців – це зменшить вірогідність загинання паперу.
- При виконанні роботи (більше 20 хвилин), коли втручання користувача в роботу програми не потрібне, бажано вимикати живлення відео монітора.
- Для підтримки загального тону м'язів, профілактики кістково-м'язових порушень, зорового дискомфорту та інших несприятливих суб'єктивних почуттів під час регламентованих перерв необхідно виконувати комплекси рекомендованих вправ для очей, для хребта, для рук.
- Кількість мікро пауз до 1-2 хвилин слід визначити індивідуально. Форма та зміст перерв можуть бути різними виконання допоміжних робіт, не пов'язаних з роботою ПК, приймання їжі, виконання рекомендованих вправ.
- Виконання фізичних вправ протягом дня рекомендується індивідуально, залежно від почуття втоми. Гімнастика повинна біти на корекцію вимушеної пози покращення кровообігу, часткову компенсацію, дефіциту рухової активності.

- Про виявлені несправності (іскріння, пробоїв, запаху гару, ознак горіння тощо) негайно припинити роботу, відключити все обладнання від електромережі і терміново повідомити безпосереднього керівника або спеціаліста по ремонту ПК.

Вимоги безпеки при закінченні роботи на ПК.

- Закінчити і зберегти в пам'яті ПК файли, які знаходились у роботі. Виконати всі дії для коректного завершення роботи в оперативній системі.
- Вимкнути принтер та інші периферійні пристрої, вимкнути системний блок. При наявності пристрою безперебійного живлення (ПБЖ) вимкнути його живлення.
- Вимкнути ПК кнопкою «POWER» (ЖИВЛЕННЯ) та вийняти штепсельну вилку кабелю живлення з розетки
- Накрити клавіатуру кришкою для попередження попадання в неї пилу.
- Навести порядок на робочому місці.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У даному розділі розглянуті заходи, що виключають або що обмежують вплив на технічний персонал ІТ відділу небезпечних і шкідливих виробничих чинників. Зроблений розрахунок освітленості в робочій зоні. Ми отримали 9 світильників з 36 світлодіодними лампами, що є найкращим варіантом освітленості робочої зони та не порушує встановлених норм освітленості 300-500 лк. Було представлено інструкцію з охорони праці при роботі за персональним комп'ютером та рекомендації стосовно пожежної безпеки в ІТ відділі.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Охороні навколишнього середовища з кожним роком надається все більше значення, що обумовлено, у першу чергу, різким зростанням кількості шкідливих викидів промисловості і транспорту, що наносить біосфері величезний збиток. Деякі зміни в навколишньому середовищі очевидні для усіх. Це забруднення повітряного басейну, морських акваторій і прісноводних водойм, порушення ґрунтового покриву, лісових ресурсів, зменшення чисельності і повне зникнення деяких видів тварин і рослин.

Процеси впливу людини на природу складні і можуть мати віддалені і важко передбачувані наслідки такі, як зміна клімату, зниження загальної біологічної продуктивності, погіршення фотосинтезу. Варто також враховувати, що здатність природи до самоочищення і самовідновлення має границі.

4.1. Аналіз методів природокористування

Навколишнє середовище – це єдина система зв'язаних поміж собою природних об'єктів та явищ, в якій проходить праця, життя та відпочинок людини.

Охорона навколишнього середовища є одним з найважливіших питань на сучасному етапі розвитку людства. Розмах природоохоронних заходів зростає з кожним роком. Їх найважливішою метою є більш економне та раціональне ведення народного господарства, більш ефективна охорона природи.

Державній системі стандартів в області охорони природи привласнений клас «17». Перший стандарт було створено у 1976 році (ДСТ 17.00.01-76).

Зараз, коли ця проблема стала однією з насущних задач людства, вже створено більш 35 стандартів, спрямованих на охорону навколишнього середовища.

4.2. Актуальність розглянутого джерела забруднення

Усі прилади, що працюють з використанням електричного струму, є джерелами електромагнітних полів. Комунікаційна мережа, що розроблюється у дипломній роботі використовує персональну електронно-обчислювальну машину (ПЕОМ). Сучасні ПЕОМ являють собою складні електронні пристрої, що характеризуються наявністю визначених джерел забруднення навколишнього середовища.

Основними складовими частинами персонального комп'ютера (ПК) є: системний блок (процесор) і різноманітні пристрої вводу/виводу інформації: клавіатура, дискові накопичувачі, принтер, сканер, і т.п. Кожен персональний комп'ютер має засіб візуального відображення інформації - монітор. Як правило, у його основі є електронно-променева трубка. ПК часто оснащують мережевими фільтрами, джерелами безперебійного живлення та іншим допоміжним електроустаткуванням. Усі ці елементи при роботі ПК формують складну електромагнітну обстановку на робочому місці користувача, що вносить свій негативний внесок на навколишнє середовище.

4.3. Характеристика ПК як джерела забруднення

До основних факторів несприятливого впливу роботи з комп'ютером можна віднести наступні:

- Ергономічні параметри екрана монітора:
 - зниження контрасту зображення в умовах інтенсивного зовнішнього освітлення;
 - дзеркальні відблиски від передньої поверхні екранів моніторів;
 - мерехтіння зображення на екрані монітора;
- Випромінюючі характеристики монітора:
 - електромагнітне поле монітора в діапазоні частот 20 Гц- 1000 МГц;
 - статичний електричний заряд на екрані монітора;
 - ультрафіолетове випромінювання в діапазоні 200- 400 нм;
 - інфрачервоне випромінювання в діапазоні 1050 нм- 1 мм;

- рентгенівське випромінювання $> 1,2$ кеВ.

Електромагнітне поле, створюване персональним комп'ютером, має складний спектральний склад у діапазоні частот від 0 Гц до 3060 МГц. Електромагнітне поле має електричну (Е) і магнітну (Н) складові, причому взаємозв'язок їхній досить складний, тому оцінка Е і Н виробляється роздільно.

4.4. Вплив електромагнітних полів комп'ютера на здоров'я користувача

В даний час існує багато даних, що вказують на негативний вплив роботи з комп'ютером на всі життєво важливі системи людини. Крім того, біологічний ефект електромагнітних полів в умовах тривалого впливу може, накопичуючись, стати причиною важких захворювань.

Уперше значне комплексне дослідження можливої несприятливої дії електромагнітних полів на здоров'я користувачів було проведено в 1984 році в Канаді. У звіті за підсумками роботи був встановлений однозначний зв'язок захворюваності з одним з ведучих факторів зовнішнього впливу - електромагнітним полем, яке генерирує монітором комп'ютера [36].

По узагальненим даним, у працюючих за монітором від 2 до 6 годин на добу функціональні порушення центральної нервової системи відбуваються в середньому в 4,6 рази частіше, ніж у контрольних групах, хвороби серцевосудинної системи - у 2 рази частіше, хвороби верхніх дихальних шляхів - у 1,9 рази частіше, хвороби опорно-рухового апарата - у 3,1 рази частіше. Із збільшенням тривалості роботи на комп'ютері співвідношення здорових і хворих серед користувачів різко зростає.

Дослідження функціонального стану користувача комп'ютера, проведені в 1996 році Центром електромагнітної безпеки, показали, що навіть при короткочасній роботі (45 хвилин) в організмі користувача під впливом електромагнітного випромінювання монітора відбуваються значні зміни гормонального стану і специфічні зміни біострумів мозку.

Дослідження загальних закономірностей реакції організму людини на вплив ЕМП монітора проводяться і в Україні. Результати свідчать, що серед порушень у функціональному стані організму, найбільше яскраво виражені порушення з боку гормональної і імунної систем. Відхилення в імунному статусі, в однаковій мірі, як імунодефіцит, так і аутоімунність, є основними в дискоординації процесів, що підтримують гомеостаз в організмі в цілому.

За даними досліджень Інституту гігієни Мінздраву України при восьмигодинній роботі на протязі 4 місяців спостерігається зниження імунітету на 95%. На біологічну реакцію людини впливають такі параметри електромагнітних полів ЕОМ, як інтенсивність і частота випромінювання, тривалість опромінення і модуляція сигналу, частотний спектр і періодичність дії.

4.5. Комп'ютер як джерело електростатичного поля

При роботі монітора на екрані кінескопа накопичується електростатичний заряд, що створює електростатичний потенціал (ЕСтП). У різних дослідженнях, при різних умовах виміру значення ЕСтП коливалися від 8 до 75 кв/м. При цьому люди, що працюють з монітором, здобувають електростатичний потенціал.

4.6. Комп'ютер як джерело рентгенівського випромінювання

Монітори комп'ютерів є джерелом рентгенівського, бета - і гамма-випромінювань. Рентгенівське випромінювання присутнє тільки при роботі монітора. Воно виникає при гальмуванні пучка електронів і як характеристичне випромінювання атомів матеріалів кінескопа. Спектр рентгенівського випромінювання є безперервним з набором моноенергетичних ліній. Максимальна енергія спектра -20 кэВ. Бета-, гамма-випромінювання присутні і при включеному і при виключеному моніторі. Джерелом цих випромінювань є радіоактивний розпад ядер сімейств урану і торія, а також ядер калію-40. Спектральний склад гамма-випромінювання переважно складається з набору моноенергетичних ліній [37].

Бета - випромінювання монітора визначається головним чином радіоактивним розпадом ядер калію-40; спектральний склад бета- випромінювання безперервний, а його максимальна енергія -1.3 МэВ. За певних умов ці іонізуючі випромінювання здатні заподіяти шкоду здоров'ю людини, зокрема, викликати помутніння кришталика ока. Для зменшення шкідливої дії іонізуючих випромінювань у моніторах була знижена анодна напруга, а в скло моніторів доданий свинець. Як технічні стандарти безпеки моніторів широко відомі шведські ТСО-92, 95, 99, 01, 03 та MPR-II. Вони обмежують параметри випромінювання монітора, споживання електроенергії, візуальні параметри і т.д.

Основним джерелом шуму в приміщеннях, обладнаних комп'ютерами, є принтери, множна техніка й устаткування для кондиціонування повітря, у самих ПЕОМ - вентилятори систем охолодження і трансформатори. Рівень шуму в таких приміщеннях іноді досягає 85 дБ [38].

4.7. Еколого-економічне обґрунтування

Використовуючи систему зв'язку на базі технології PON, що розглядається у даній дипломній роботі ми досягаємо надшвидкісного широкосмугового доступу до комунікаційної мережі. Максимальна швидкість одного підключення складає 40 Гбіт/с.

Визначимо W_{PON} — витрату електроенергії при використанні системи зв'язку, побудованою за технологією PON.

$$W_{PON} = M_{PON} \cdot \Phi \cdot K_3 \cdot K_o / (\eta \cdot K_b) \quad (4.1)$$

де

M_{PON} – загальні витрати електроенергії, кВт/год;

Φ – дійсний фонд часу, год;

K_3 – коефіцієнт завантаження ПЕОМ;

K_o – коефіцієнт оновлення;

η - коефіцієнт корисної дії;

K_b – коефіцієнт втрат у ланцюгах.

Виберемо вихідні дані для розрахунку:

$$M_{PON} = 0,261 \text{ кВт/год};$$

$$\Phi = 8760 \text{ год};$$

$$K_z = 1;$$

$$K_o = 0,95;$$

$$\eta = 0,95;$$

$$K_B = 0,95.$$

Отже:

$$W_{PON} = 0,261 \cdot 8760 \cdot 1 \cdot 0,95 / (0,95 \cdot 0,95) = 2406,7 \text{ кВт}.$$

Визначимо W_{OTN} — витрату електроенергії при використанні системи зв'язку, побудованою за технологією OTN.

$$W_{OTN} = M_{OTN} \cdot \Phi \cdot K_z \cdot K_o / (\eta \cdot K_B) \quad (4.2)$$

де

M_{OTN} – загальні витрати електроенергії, кВт/год;

Φ – дійсний фонд часу, год;

K_z – коефіцієнт завантаження ПЕОМ;

K_o – коефіцієнт оновлення;

η – коефіцієнт корисної дії;

K_B – коефіцієнт втрат у ланцюгах.

Виберемо вихідні дані для розрахунку:

$$M_{OTN} = 3,028 \text{ кВт/год};$$

$$\Phi = 8760 \text{ год};$$

$$K_z = 1;$$

$$K_o = 0,95;$$

$$\eta = 0,95;$$

$$K_B = 0,95.$$

Отже:

$$W_{OTN} = 3,028 \cdot 8760 \cdot 1 \cdot 0,95 / (0,95 \cdot 0,95) = 27921,3 \text{ кВт}.$$

Розрахуємо витрати електроенергії на освітлення:

$$W_o = (P \cdot F \cdot \Phi \cdot K) / 1000 \quad (4.3)$$

де

$P = 15 \text{ Вт}$ – питома витрата електроенергії на 1 м^2 площі;

$F = 15 \text{ м}^2$ – площа ділянки;

$\Phi = 1820 \text{ год}$ – кількість годин освітлення;

$K = 1,05$ – коефіцієнт втрат.

Загальні витрати електроенергії на освітлення:

$$W_0 = (15 \cdot 15 \cdot 1820 \cdot 1.05) / 1000 = 430 \text{ кВт}$$

Таким чином, збиток навколишньому середовищу при використанні технології PON визначимо за формулою:

$$Z_{\text{PON}} = W_{\text{PON}} \cdot Y + W_0 \cdot Y \quad (4.4)$$

$$Z_{\text{PON}} = 2406,7 \cdot 0,2 + 430 \cdot 0,2 = 481,34 + 86 = 567,34 \text{ грн.}$$

Аналогічно визначимо збиток навколишньому середовищу при використанні технології OTN:

$$Z_{\text{OTN}} = W_{\text{OTN}} \cdot Y + W_0 \cdot Y \quad (4.5)$$

$$Z_{\text{OTN}} = 27921,3 \cdot 0,2 + 430 \cdot 0,2 = 5584,26 + 86 = 5670,26 \text{ грн.}$$

У результаті ми бачимо, що з точки зору екології та охорони навколишнього середовища технологія PON краще технології OTN у 10 разів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Ступінь небезпеки для людини іонізуючих випромінювань, що випускаються моніторами комп'ютерів, залежить від рівнів іонізуючих випромінювань, що попадають в очі користувачів.

В Україні безпека рівнів іонізуючих випромінювань комп'ютерних моніторів регламентується нормами НРБУ-97. Стандарти обмежують потужність дози рентгєнівського випромінювання величиною 100 мкР/година на відстані 5 см від поверхні екрана монітора і встановлюють для населення межа річної еквівалентної дози випромінювань на хрусталик ока рівний 15 мЗв . Рівень гамма-випромінювання залежить від концентрацій природних радіонуклідів у склі монітора, що для калію-40 складають $3\text{-}10\%$, для торія - $(0.3\text{-}1) \times 10^{40}\%$, для урану- $(1\text{-}3) \times 10^{40}\%$.

Розрахунок потоків бета-випромінювання - важка задача, однак ці потоки можуть бути легко розраховані бета-лічильником. Подібні виміри показують, що на відстані 5 див від екрана монітора щільність потоку бета-випромінювання може складати 0.2-0.5 частий/см². Вимір рівнів рентгенівського випромінювання найбільш важкий. Для таких вимірів зазвичай застосовуються сцинтиляційні спектрометри з тонкими кристалами Ка(Т1) або Сз1(Т1) і з досить великою поверхнею.

Отримані з їхньою допомогою результати показують, що максимальна потужність дози рентгенівського випромінювання на відстані 5 див від екрана монітора порівнянна з тлом і не перевищує 5-15 мкР/годину. Виходячи з цього, потужність еквівалентної дози випромінювань для несприятливого випадку, коли ока оператора комп'ютера розташовані на відстані 5 див від екрана монітора складе 0.3-0.4 мкЗв/година. Цей результат свідчить про радіаційну безпеку комп'ютерних моніторів, оскільки накопичена хрусталиком ока річна еквівалентна доза (~0.7 мЗв) у 20 разів менше припустимого нормами НРБУ-97 значення.

Була також розрахована доцільність використання технології PON при її порівнянні з технологією OTN саме з точки зору заощадливості електроенергії.

ВИСНОВКИ

NG-PON2 — це перша в галузі стандартизована пасивна оптична мережева система з кількома довжинами хвиль (в кожному напрямку), сумісна з розподільними оптичними мережами з розподіленою потужністю.

NG-PON2, як зазначено в Рекомендаціях серії ITU-T G.989, є наступником стандартів G-PON і XG-PON1, які втілюють стандарти ITU-T 1 і 10 Гбіт/с на основі технологій PON відповідно. Стандарт Physical Environment Dependent Level (PMD) застосовується до Рекомендації G.989.2. Ключовою особливістю, яка відрізняє систему NG-PON2 від її попередниць, є специфікація першого в галузі стандарту PON, що підтримує декілька довжин хвиль у кожному напрямку та сумісність з оптичними мережами розподілу (ODN) на основі розгалужувачів потужності. Багато існуючих функцій G-PON і XG-PON1, таких як класи втрат на оптичному тракті, підтримка ВЧ-відео та вимоги до обслуговування, зберігаються в системі NG-PON2, щоб забезпечити максимальне повторне використання існуючих технологій, встановленої оптоволоконної інфраструктури та співіснування з встановленою спадщиною системами PON.

Кваліфікаційна робота стосується питань проектування оптичних ліній, включаючи властивості оптичної розподільчої мережі, планування довжини хвилі, нелінійність волокна, пов'язану з комбінаційним розсіюванням, і стійкість до перехресних перешкод між каналами. У роботі також описується можливість налаштування довжини хвилі блоків оптичної мережі та її вплив на специфікацію рівня, яка залежить від фізичного середовища.

У роботі наведено технічний аналіз та обґрунтування рекомендації ITU-T G.989.2: Специфікація рівня в залежності від фізичного середовища для пасивних оптичних мереж із пропускною здатністю 40 Гбіт/с (NG-PON 2). У цей час обговорюються теми, пов'язані з проектуванням оптичних ліній зв'язку, з акцентом також на управлінні довжиною хвилі, технологічній здійсненності, управлінні та проектуванні

каналів керування та потенційних майбутніх напрямках стандартизації такої багатохвильової системи PON. У міру розвитку системи NG-PON2 також обговорюватимуться технологічні удосконалення, щоб надати рекомендації для майбутніх досліджень.

Системи NG-PON2 можуть підтримувати ODN з розділенням потужності та довжини хвилі та їх гібриди. ODN підтримує чотири класи втрат на оптичному шляху (OPL - optical шлях втрата), раніше визначений для XG-PON1, без обмежень щодо кількості, географічного розподілу (в діапазоні) або кількості портів концентратора.

Системи NG-PON2 підтримують як однорівневе поділ, так і багаторівневе поділ WS-ODN з вимогою підтримувати максимальний коефіцієнт поділу принаймні 1:64. Звичайно, можна використовувати нижчі коефіцієнти поділу. Таким чином, усі успадковані ODN можна повторно використовувати з класами OPL.

У другому розділі NG-PON2 були висвітлені теми, пов'язані з аспектом проектування системи, такі як: управління довжиною хвилі, технологічна здійсненність і функції командування та контролю.

Специфікація MSE важлива для управління довжинами хвиль ONU Tx у межах дозволеного спектрального інтервалу, щоб мінімізувати перехресні перешкоди та оптимізувати продуктивність каналу.

Точність калібрування довжини хвилі настроюваного передавача ONU безпосередньо впливає на вартість. Стандарт NG-PON 2 PMD включає новий метод синхронізації довжини хвилі для послаблення вимог до точності та стабільності довжини хвилі ONU Tx .

Основне питання, пов'язане з доцільністю ONU Tx, полягає в тому, як досягти поєднання настроюваності, високого бюджету потужності та мінімального енергоспоживання при використанні найменш дорогих технологій. ONU Tx на основі EML і недорогий DML можуть бути ефективними варіантами, коли метод зменшення дисперсії застосовується до DML.

Мультиплексор з розділенням по довжині хвилі OLT може базуватися на технології AWG або TFF, і конкретний вибір залежить від постачальника. Для TWDM циклічні AWG можуть дозволити використовувати недорогий термічно регульований

лазер ONU. Було описано приклади конфігурацій OLT на основі AWG або TFF.

Оскільки PtP WDM розроблено для надання клієнтських послуг з мінімальною зміною корисного навантаження, канал АМСС потрібен для забезпечення основних функцій керування. Можливі дві реалізації: прозора та перекодована, залежно від того, як передається вміст АМСС. Для TWDM АМСС використовується для ONU для зв'язку US на етапі активації через функцію багатохвильової системи NG-PON2.

Кілька проектів NG-PON2 нещодавно були створені та протестовані в польових умовах. Технологічні інновації продовжуються з метою різкого зниження витрат. Очікується, що майбутні вдосконалення дизайну системи NG-PON2 виграють від технологічних досягнень в інших сферах застосування (наприклад, при використанні 5G) і, ймовірно, матимуть форму більших довжин хвиль, вищих швидкостей передачі даних або використання передових лінійних кодів. Завдяки унікальній здатності забезпечувати гнучке двонаправлене з'єднання зі швидкістю 40 Гбіт/с і багатохвильовим зв'язком для житлових і комерційних послуг в рамках однієї інфраструктури PON, система NG-PON2 має хороші можливості для підтримки нових можливостей у майбутніх оптичних мережах доступу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мережа з повним доступом до послуг (FSAN). Доступно: <http://www.fsan.org>.
2. P. Chancelou, A. Cui, F. Geilhardt, H. Nakamura, D. Nessel, «Вимоги оператора мережі до наступного покоління мереж оптичного доступу», IEEE Netw. Mag., Vol. 26, no. 2, стор 8-14, 2012.
3. «Пасивні оптичні мережі з пропускною здатністю 40 Гбіт/с (NG-PON2)», Рекомендації серії ITU-T G.989: G.989.1: Загальні вимоги (2013р.); G.989.2: Специфікація рівня, що залежить від фізичного середовища (2014р.); G.989.3: Специфікація рівня конвергенції передачі.
4. Д. Нессет, "Технологія та стандарти NG-PON2", J. Lightwave Technol., Vol. 33, no. 5, стор. 1136 – 1143, 2015.
5. «Пасивні оптичні мережі з пропускною здатністю гігабіт (GPON)», Рекомендація серії ITU-T G.984, 2008
6. «Пасивні оптичні мережі з пропускною здатністю 10 гігабіт (XG-PON)», Рекомендація серії ITU-T G.987, 2012 р.
7. Ю. Луо, С. Чжоу, Ф. Еффенбергер, С. Ян, Г. Пен, Ю. Цянь та Ю. Ма, Пасивна оптична мережа з мультиплексуванням за часом і довжиною хвилі (TWDM-PON) для етапу PON наступного покоління 2 (NG-PON2), J. Lightwave Technol., Vol. 31, no. 4, стор 587 - 593, 2013.
8. «Додатки DWDM з багатоканальним заповненням з одноканальними оптичними інтерфейсами», Рекомендація ITU-T G.698.3, 2012 р.
9. Н. Woesner і М. Maier, «Маршрутизація та відмовостійкість у мережах WDM на основі AWG», в TransiNet Workshop, ННІ, 2002.
10. К. Хедлі та Г. Агравал, ред., Раманівське посилення у волоконно-оптичних системах зв'язку. Academic, 2004.
11. Ф. Лю, С. Дж. Расмуссен та Р. Дж. С. Педерсен, «Експериментальна перевірка нової моделі, що описує вплив коефіцієнта неповного послаблення сигналу на

погіршення чутливості через множинні інтерферометричні перехресні перешкоди», *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 11, no. 1, стор 137-139, 1999.

12. «Пасивні оптичні мережі з пропускною здатністю 40 гігабіт (NG-PON2): Специфікація рівня, що залежить від фізичного середовища (PMD)», Рекомендація ІТУ-T G.989.2, 2014 р.

13. Н. Фудзівара, Х. Ісії, Х. Окамото, Ю. Кавагуті, Ю. Кондо та Х. Оохаші, «Придушення теплового дрейфу довжини хвилі в лазері з розподіленим бреггівським відбивачем (SSG-DBR) з надструктурною решіткою та компенсатором теплового дрейфу», *IEEE J. Sel Top. Quantum Electron.*, Vol. 13, no. 5, стор 1164 – 1169, 2007.

14. В. Пельманн, Д. ван Він, Р. Фарах, Т. Пфайффер та П. Веттер, "Дрейф довжини хвилі DML у пакетному режимі для TWDM-PON", *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 7, no. 1, стор. A44 – A51, 2015

15. С. Ентоні, Г. Таллі, П.Д. Таунсенд, Дж. Баувелінк, Д.В. Сміт та І. Лілман, "Високе згасання перемикачів SOA для внутрішньосмугового зменшення перехресних перешкод у PON", *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 14, стор 872-873, 2008.

16. Р.А. Кумар, Р. Мурано, М.Дж. Л.Кехілл, Дж.М. Ауф'єро та Г.Д. Бартоліні, «Аналіз характеристик перехресних перешкод недорогого приймача, що налаштовується 8 x 10 Гбіт/с для TWDM», *Optical Fiber Communication Conf. and the Nat. Fiber Optic Engineers Conf. (OFC/NFOEC)*, 2013, NTh3F.5.

17. «Високочутливий копланарний приймач підсилювача APD 10 Гбіт/с для поверхневого монтажу AT10XGC», Аркуш даних Bookham, BN12852, версія 2.0, січень 2007 р.

18. К. Гробе, М. Х. Ейзелт, С. Пачніке та Ж.-П. Елберс, «Мережі доступу на основі лазерів, що перебудовуються», *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, no. 16, стор. 2815–2823, серпень 2014 р.

19. «Специфікація для SFP+ 10 Гбіт/с та низькошвидкісного електричного інтерфейсу», SFF Committee SFF-8431, ред. 4.1 та доповнення, 15 вересня 2013 р.

20. "Обмеження швидкості приймача APD 10 Гбіт/с AT10XGC", технічний опис D00010-PB, випуск 06, Oclaro, січень 2013.

21. Сісак М.М., Рарінг Дж.В., Моррісон Г.П., Блюменталь Д.Дж., Колдрен Л.А.

Монолітно інтегрований лазерний передавач DBR з вибірковими ґратами та асиметричним модулятором електропоглинання з квантовою ямою//Int. Semiconductor Laser Conf., Sept. 2006, paper TuB6.

22. М. Гокхале, Дж. Джонсон та Дж. Чжан, «Характеристики джерел 10G з оптичним посиленням», IEEE P802.3av 10GEPON, Монтерей, Каліфорнія, січень 2007 р.

23. С. Caillaud, Р. Chanclou, F. Blache, Р. Angelini, В. Duval, Р. Charbonnier, D. Lanteri, G. Glastre та М. Acouche, "Інтегрований детектор SOA-PIN для високошвидкісних додатків з малим радіусом дії". , *J. Lightwave Technol.* , vol. 33, no. 8, стор. 1596–1601 , квітень 2015 р.

24 . Мацуї Ю., Махгерейфт Д., Чжен С., Ляо С., Фан З. Ф., Маккалліон К., Тайєбаті П., «Лазер з прямою модуляцією, керований Chirp», *Photon. Technol. Lett.*, Vol. 18, no. 2, стор 385-387 , 2006.

25. Ст Пельманн, Б. Демпіш, Т. Пфайффер, К. Феррарі, М. Ерншоу, А. Дуке, Р.Л. Фарах, Дж. Галаро, Дж. Котч, М.Ф. Лау, Д.Т. ван Він та П. Веттер, «Недорогий TWDM за допомогою мультиплексування з поділом по довжині хвилі», *Белл Лабораторія Тех. Дж.*, vol. 18, no. 3, стор. 173–193 , грудень 2013 р.

26. Л. Бертіньоно, В. Ферреро, М. Вальво та Р. Гаудіно, «Фотонне ранжування для передачі сигналів активації ONU у висхідному напрямку в TWDM-PON», *J. Lightwave Technol.*, 2019 р.

27. ДСанПіН 3.3.2-007-98 «Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин»

28. ГН 3.3.5-8-6.6.1-2002 «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»

29. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»

30. ДБН В.2.5-28-2006 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення»

31. НПАОП 0.00-1.29-97 «Правила захисту від статичної електрики»

32. ДСТУ 12.1.005-88 «ССБП. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони»

33. ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом»
34. ДСТУ 8604:2015 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги»
35. НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні»
36. Конахович Г.Ф., Чуприн В.М., Мачалін І.О., Ткаліч О.П. Експлуатація телекомунікаційних систем— К. : Центр учбової літератури, 2014.
37. Екологія та охорона навколишнього природного середовища: навч. посібник для вузів / В. С. Джигирей. - 6-те вид., випр. і доп. - К.: Знання, 2017. - 422 с
38. Боротьба з шумом на виробництві: Довідник / Під ред. О. Я. Юдіна. – М: Машинобудування, 2015. – 297 с