

**ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ**

**Кафедра „Транспортний зв'язок”**

**ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО  
ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ З ХВИЛЬОВИМ РОЗПОДІЛОМ  
КАНАЛІВ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до курсового та дипломного проекту  
з дисципліни**

***«БАГАТОКАНАЛЬНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ»***

**Харків - 2011**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Транспортний зв'язок» 25 листопада 2010 р., протокол № 4.

У методичних вказівках викладені основні питання, які необхідно вирішити при курсовому та дипломному проектуванні волоконно-оптичного лінійного тракту з хвильовим розподілом каналів.

Для студентів усіх форм навчання факультету АТЗ спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі» та «Автоматизовані системи технологічного зв'язку на залізничному транспорті».

Укладачі:

проф. О.П. Батаєв,  
доц. К.А. Трубчанінова,  
старш. викл. С.В. Поляков

Рецензент:

доц. К.С. Клименко

ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО  
ТРАКТУ З ХВИЛЬОВИМ РОЗПОДІЛОМ КАНАЛІВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового та дипломного проекту  
з дисципліни

*«БАГАТОКАНАЛЬНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ»*

Відповідальний за випуск Батаєв О.П.

Редактор Еткало О.О.

---

Підписано до друку 25.01.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,75. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

КАФЕДРА «ТРАНСПОРТНИЙ ЗВ'ЯЗОК»

Методичні вказівки до курсового та дипломного проекту  
на тему:  
«ПРОЕКТУВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО  
ТРАКТУ З ХВИЛЬОВИМ РОЗПОДІЛОМ КАНАЛІВ»  
з дисципліни  
«Багатоканальні системи передачі інформації»

Декан факультету АТЗ  
Завідувач каф. ТЗ  
Голова науково-метод. комісії

О.М. Прогонний  
С.І. Приходько  
О.В. Єлізаренко

Автори:

О.П. Батаєв  
К.А. Трубчанінова  
С.В. Поляков

Харків 2011

Методичні вказівки розглянуті і схвалені на засіданні кафедри «Транспортний зв'язок», протокол № 4 від 25 листопада 2010 р.

У методичних вказівках викладені основні питання, які необхідно вирішити при курсовому та дипломному проектуванні волоконно-оптичного лінійного тракту з хвильовим розподілом каналів.

Для студентів всіх форм навчання факультету АТЗ спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі» та «Автоматизовані системи технологічного зв'язку на залізничному транспорті».

Укладачі:

О.П. Батаєв,  
К.А. Трубчанінова,  
С.В. Поляков

Рецензент:

доц. К.С. Клименко

## ЗМІСТ

	<b>Список скорочень .....</b>	4
	<b>Вступ .....</b>	6
<b>1</b>	<b>Склад курсового проекту. Завдання та вихідні дані на курсовий проект .....</b>	7
<b>2</b>	<b>Вибір і обґрунтування системи спектрального ущільнення .....</b>	8
2.1	Загальні відомості про системи спектрального ущільнення .....	8
2.2	Класифікація систем спектрального ущільнення .....	11
2.3	Блок-схема мережі з технологією WDM .....	12
2.4	Основні характеристики і параметри WDM систем .....	13
<b>3</b>	<b>Елементна база WDM систем .....</b>	15
3.1	Технічні дані синхронних транспортних модулів .....	15
3.2	Тип світловода і марки волоконного кабелю в WDM системах .....	17
3.3	Тип випромінювача в WDM системах .....	19
3.4	Тип фотоприймача в WDM системах .....	23
3.5	Тип квантового оптичного підсилювача в WDM системах .....	25
3.6	Тип оптичного мультиплексора і демультимплексора хвильових каналів .....	26
3.7	Тип оптичного мультиплексора вводу-виводу .....	28
<b>4</b>	<b>Енергетичний розрахунок волоконно-оптичного лінійного тракту з хвильовим розподілом каналів ..</b>	29
4.1	Вибір і обґрунтування архітектури лінійного тракту ...	30
4.2	Розрахунок дисперсії для каналу з максимальною швидкодією .....	31
4.3	Розрахунок довжини підсилювальної ділянки .....	32
4.4	Розрахунок завадозахищеності системи передачі .....	34
4.5	Розрахунок діаграми рівнів оптичної потужності .....	35
	<b>Список літератури .....</b>	37
	<b>Додатки .....</b>	38

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

- 3DO (3-D Optics WDM) - дискретна оптика на основі технології тривимірного оптичного мультиплексування
- APD (Avalanche Photodiode) - лавинний фотодіод
- ATM (Asynchronous Transfer Mode) - асинхронний режим передачі
- AWG (Arrayed Waveguide Grating) - решітка на основі масиву хвилеводів
- BER - відносний рівень помилок по бітам
- CG (Concave Grating) - решітка на основі ввігнутої дифракційної решітки
- CL (Coupling Links) - інтерфейс IBM зі швидкістю 1 Гбіт/с
- DMUX - демультимплексор WDM
- DFB (Distributed Feed Back) - лазер з розподіленим зворотним зв'язком
- DSF (Dispersion-Shifted Fiber) - волокно зі зміщеною дисперсією
- DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) - щільне хвильове мультиплексування (з розподілом по довжині хвилі)
- EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) - оптичний підсилювач на ОВ, легованому ербієм
- E (Ethernet) - стандартний інтерфейс LAN зі швидкістю 10 Мбіт/с
- En - Цифровий канал рівня n європейської ієрархії PDH
- ESCON (Enterprise System Connection) - інтерфейс IBM, швидкість 200 Мбіт/с
- FC (Fiber Channel) - оптичний інтерфейс вводу-виводу, швидкість до 4250 Мбіт/с
- FDDI (Fiber Distributed Data Interface) - волоконно-оптичний розподілений інтерфейс (передачі даних) - локальна мережа на основі FDDI (100 Мбіт/с) з ОК як середовищем передачі
- FE (Fast Ethernet) - Ethernet з швидкістю 100 Мбіт/с
- GE (Gigabit Ethernet) - Ethernet з швидкістю 1000 Мбіт/с
- HDTV (High Definition Television) - інтерфейс ТВ високої чіткості, швидкість OC-1
- HDWDM (High Density Wavelength Division Multiplexing) - багатосмугове хвильове мультиплексування (з розподіленням по довжині хвилі)
- IP (Internet Protocol) - протокол передачі Інтернет

LAN (Local Area Network) – локальна обчислювальна мережа  
 MUX – мультиплексор WDM  
 NRZ (Non Return to Zero) - дворівневий код без повернення до нуля  
 NZDSF (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber) – волокно з ненульовою зміщеною дисперсією  
 NZDSF- - волокно з ненульовою зміщеною від'ємною дисперсією  
 NZDSF+ - волокно з ненульовою зміщеною додатньою дисперсією  
 ODMUX (Optical Demultiplexer) – оптичний демультимплексор  
 OMUX (Optical Multiplexer) – оптичний мультиплексор  
 OCn (Optical Carrier of level n) – оптична несуча n-го рівня ієрархії SONET  
 PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) – плезіохронна цифрова ієрархія (ПЦІ)  
 SDH (Synchronous Digital Hierarchy) – синхронна цифрова ієрархія (СЦІ)  
 SLM (Single-Longitudinal Mode) – лазер з однією поздовжньою модою  
 SNMP (Simple Network Transfer Protocol) – простий протокол мережевого управління  
 SNR – відношення сигнал/шум  
 SONET (Synchronous Optical Network) – синхронна оптична мережа  
 SSF (Standard Step Index Fiber) - стандартне одномодове ступінчасте оптичне волокно  
 STM-N (Synchronous Transport Module N) – синхронний транспортний модуль SDH рівня N  
 TMN (Telecommunications Management Network) – мережа управління телекомунікаціями (мережа управління електрозв'язком)  
 Tn – цифровий канал рівня n американської ієрархії PDH  
 WDM (Wavelength Division Multiplexing) – хвильове мультиплексування (з розподілом по довжині хвилі)

ВКД – волокно з компенсацією дисперсії  
 ВОК – волоконно-оптичний кабель  
 ВОЛЗ – волоконно-оптичні лінії зв'язку  
 ВОСП – волоконно-оптичні системи передачі  
 ККД – коефіцієнт корисної дії  
 ЛД – лазерний діод

ЛП – лінійний підсилювач  
ЛФД – лавинний фотодіод  
ОВ – оптичне волокно  
ОК – оптичний кабель  
ОП – оптичний підсилювач  
ОПДП – оптичний передавальний пристрій  
ОПМП – оптичний приймальний пристрій  
ПпП – попередній підсилювач  
ПтП – підсилювач потужності  
СВД – світловипромінюючий діод  
ТБ – телебачення  
ФД – фотодіод  
ФТ – біполярний фототранзистор  
ФТР – фототиристор  
ЦСП – цифрові системи передачі

## **ВСТУП**

Упровадження волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) в Україні, як і у всьому світі, здійснюється швидкими темпами. Проте поява у світовій системі телекомунікацій мережі Інтернет і розвиток мережі абонентського доступу ставить на порядок денний питання різкого збільшення обсягу інформації, що передається, аж до потоків у декілька одиниць і десятків терабіт на секунду. Тим часом найсучасніші системи з максимальною швидкістю передачі STM-64 (10 Гбіт/с) і STM-256 (40 Гбіт/с) на 2-3 рівні поступаються тим можливостям, які може забезпечити оптичне волокно по пропускній здатності. До того ж електронні компоненти ВОСП накладають істотні обмеження на швидкість передачі. Радикальним рішенням проблеми в цьому випадку є розроблення і створення ВОСП з хвильовим ущільненням. Використовуючи набір світлових несучих можна забезпечити по одному волокну волоконно-оптичного кабелю (ВОК) передачу потоків до 1 Тбіт/с і більше.

Метою даних методичних вказівок є ознайомлення студентів старших курсів, що вивчають дисципліну "Багатоканальні системи передачі", з основами проектування лінійного тракту ВОСП з хвильовим розподілом каналів.



У цих методичних вказівках наводяться довідкові дані стосовно промислових систем із спектральним ущільненням, одномодових світлопроводів, випромінювачів і приймачів світлових хвиль, а також квантових оптичних підсилювачів, пристроїв вводу-виводу і мультиплексорів.

Процес проектування, що знайшов відображення в методичних вказівках, містить цілий ряд послідовно даних завдань, що стосуються вибору діапазону хвиль для спектрального ущільнення, вибору типу світлопроводів і частот каналів.

Також проводиться розрахунок дисперсії для каналу з максимальною швидкодією і з максимальною спектральною частотою, розрахунок згасання на ділянці між двома квантовими підсилювачами. Визначається завадозахищеність і проводиться побудова діаграми рівнів для магістралі.

## **1 СКЛАД КУРСОВОГО ПРОЕКТУ. ЗАВДАННЯ ТА ВИХІДНІ ДАНІ НА КУРСОВИЙ ПРОЕКТ**

Кожен студент виконує завдання за індивідуальними початковими даними, отриманими від викладача. Вихідні дані наведені у додатках А-П.

У ході роботи над завданням студент повинен виконати таке:

- обрати апаратуру для спектрального ущільнення;
- навести карту розподілу частот для обраного спектрального діапазону;
- обрати тип світлопроводів і частоти каналів відповідно до використовуваної карти каналів;
- зробити розрахунок дисперсії для каналу з максимальною швидкодією, а також з максимальною і мінімальною спектральною несучою;
- зробити розрахунок згасання ділянки між двома квантовими підсилювачами;
- визначити відношення сигнал/шум на вході приймача і побудувати діаграму рівнів для магістралі;
- побудувати структурну схему лінійного тракту з проміжними ділянками.

Для виконання розрахунків при проектуванні задаються такі початкові дані:

- $L$  - загальна довжина траси передачі, км;
- $L_1$  - довжина секції, км;
- $M$  - число каналів спектрального ущільнення;
- використовуваний тип електричної апаратури ущільнення (STM-N, АТМ, ІР та ін.) і відповідна кількість каналів для кожної системи ущільнення ( $M_1, M_2, M_3$  і т. ін.);
- наявність пунктів вводу-виводу;
- спектральний діапазон, у якому проводиться ущільнення;
- будівельна довжина волокна, км;
- тип волоконно-оптичного кабелю.

## **2 ВИБІР І ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ СПЕКТРАЛЬНОГО УЩІЛЬНЕННЯ**

### **2.1 Загальні відомості про системи спектрального ущільнення**

На сьогоднішній день залізничний транспорт є одним з ключових засобів переміщення вантажів та пасажирів. Система передачі інформації займає важливе місце в структурі транспорту. Одним з основних засобів для забезпечення обміну інформацією є волоконно-оптичні системи передачі.

Зараз відбувається інтенсивний ріст надання телекомунікаційних послуг і появи нових сервісів, які більш вимогливі до характеристик транспортних мереж, у порівнянні з традиційними. У той же час роль послуг передачі даних зросла й істотно збільшилась їх вага в загальному обсязі переданого трафіка. Збільшення числа користувачів Інтернет, будівництво корпоративних мереж і мереж зберігання даних, впровадження послуги «Відео за запитом» потребує розширення смуги пропускання транспортної мережі.

До недавнього часу технічною основою для побудови транспортної мережі були телекомунікаційні системи передачі цифрової ієрархії (SDH - Synchronous Digital Hierarchy), побудовані на базі часового мультиплексування TDM. Але дійшовши до швидкості передавання 10 Гбіт/с, зіткнулися з

проблемами хроматичної та поляризаційної дисперсії моди, котрі на швидкості, вищій від 10 Гбіт/с, починають суттєво впливати на якість передачі. Таким чином, розширення пропускної здатності за допомогою TDM виявляється досить проблематичним. Ця проблема і послужила поштовхом до створення систем ущільнення оптичних каналів по довжинах хвиль (WDM)) за рахунок розширення ширини смуги передачі шляхом збільшення числа каналів.

Зростання пропускної здатності при використанні технології WDM здійснюється без дорогої заміни оптичного кабелю. По одному волокну на різних довжинах хвиль можна одночасно передавати найрізноманітніший трафік. Як наслідок цього частину волокон в оптичному кабелі можна використовувати для резерву.

Застосування технології WDM дозволяє виключити додаткове прокладання оптичних кабелів в існуючій мережі. Навіть якщо в майбутньому вартість волокна зменшиться за рахунок використання нових технологій, волоконно-оптична інфраструктура (прокладене волокно і встановлене обладнання) завжди буде коштувати досить дорого. Для її ефективного використання необхідно мати можливість протягом довгого часу збільшувати пропускну здатність мережі і змінювати набір послуг, що надаються без заміни оптичного кабелю. Технологія WDM надає саме таку можливість.

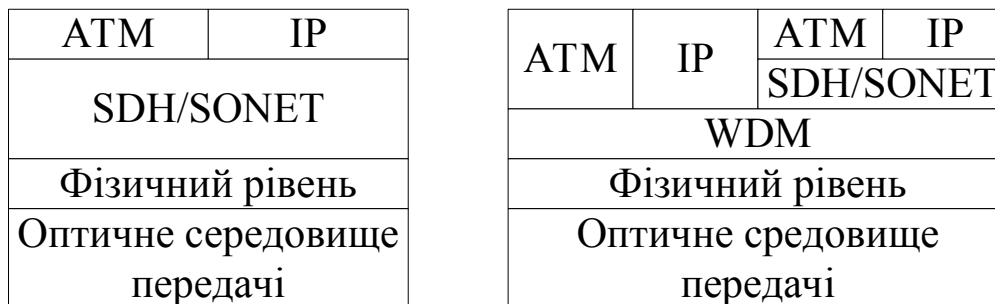
Технологія WDM поки застосовується в основному на лініях зв'язку великої протяжності, де потрібна велика смуга пропускання. Необхідність ефективно використовувати прокладений кабель призвела до значного збільшення числа каналів, що передаються по одному волокну, та зменшення відстані між ними.

У технології WDM канали повністю незалежні, а тому вона дає більшу гнучкість, ніж технологія TDM. Технологія WDM дозволяє без будь-яких труднощів передавати по лінії зв'язку безліч каналів, тип трафіка і швидкість передачі даних у кожному з яких може суттєво різнитися.

На відміну від систем SDH сигнал, який транспортується, не упаковується в контейнери і не піддається обробці відповідно до структури мультиплексування SDH для формування

транспортного модуля STM-N, який тільки й може бути переданий через фізичний рівень у канал зв'язку.

Якщо спрощено уявити багаторівневу модель взаємодії основних технологій SDH / SONET, ATM, IP, що здійснюють транспортування сигналу в глобальних цифрових мережах, і WDM, то до появи останньої вона мала вигляд, поданий на рисунку 2.1,а.



а)

б)

Рисунок 2.1 - Модель взаємодії основних транспортних технологій

Модель складалася з трьох рівнів та оптичного середовища передачі і показувала, що для транспортування трафіка верхнього рівня (ATM і IP) по оптичному середовищу передачі він повинен бути розміщений у транспортні модулі STM-N технологій SDH / SONET, здатні, використовуючи фізичний інтерфейс цих технологій, пройти через фізичний рівень в оптичне середовище передачі. Звідси була зрозуміла необхідність створення технологій інкапсуляції осередків ATM, наприклад у віртуальні контейнери SDH (ATM over SDH), або пакетів IP у віртуальні триби SONET (IP over SONET)

Після появи систем WDM модель набуває вигляду, який поданий на рисунку 2.1,б. Тепер модель має чотири рівні, не рахуючи оптичного середовища передачі. З'явився проміжний рівень WDM, який, як і SDH / SONET, забезпечує фізичний інтерфейс, що дозволяє

через фізичний рівень вийти в оптичне середовище передачі не тільки технології SDH / SONET, але і технологіям ATM і IP. В останньому випадку не потрібно інкапсуляції осередків ATM або пакетів IP у проміжний транспортний модуль технологій SDH / SONET, що не тільки спрощує процедуру обробки і транспортування трафіку, що генерується системами ATM і IP, підвищуючи відсоток, займаний інформаційною складовою трафіка, у загальній довжині переданого повідомлення, а отже, і ефективність передачі в цілому. Природно, що ATM і IP трафік може бути переданий і за традиційною схемою з використанням SDH / SONET, трафік яких може бути також переданий з допомогою систем WDM, що зберігає спадкоємність старих схем транспортування і збільшує гнучкість композитних систем WDM-SDH/SONET в цілому.

## **2.2 Класифікація систем спектрального ущільнення**

На даному етапі розвитку схема розширеного частотного плану дає можливість навести таку схему класифікації систем WDM:

а) звичайні (WDM), для яких рознесення каналів складає не менше 200 ГГц (0,4 нм), це дає можливість у вікні прозорості 1530-1560 нм отримати  $\geq 16$  спектральних каналів;

б) щільні (DWDM), для яких рознесення каналів складає не менше 100 ГГц (0,8 нм) і дає можливість мультиплексувати в спектрі 1530-1560 нм не більше 32-40 каналів (додаток А);

в) високощільні (HDWDM), для яких рознесення каналів складає 50 ГГц і дозволяє нині мультиплексувати в спектрі 1530-1560 нм до 80 каналів. Можна також додатково збільшити кількість каналів за рахунок використання вікна прозорості 1560-1620 нм (рисунок 2.2).

Нарешті, усунувши пік поглинання волокна на довжині хвилі  $\sim 1400$  нм (рисунок 2.3), можна забезпечити суцільний оптичний діапазон передачі від 1280 до 1620 нм (рисунок 2.3,б).

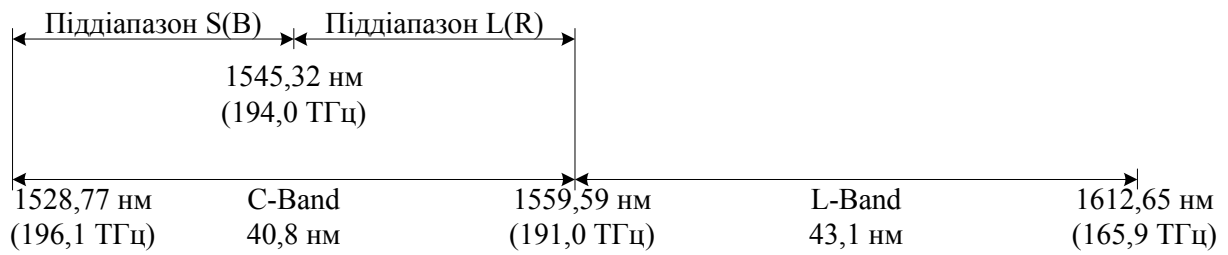
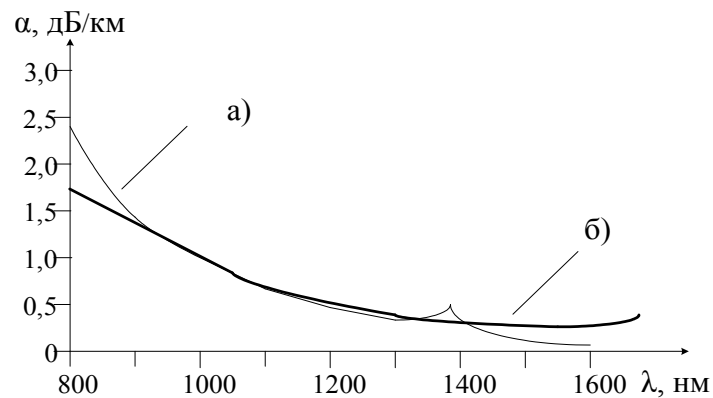


Рисунок 2.2 - Перспективна схема розширеного каналного плану

Частотний діапазон передачі складе в цьому випадку

$$\Delta\nu = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot (1620 - 1280) \cdot 10^{-9}}{(1,450 \cdot 10^{-6})^2} = 485 \cdot 10^{11} \text{ Гц} = 48,5 \text{ ТГц}.$$



а - SMF-28 (Corning) і Matched Cladding; б - All Wave (Lucent Technologies)

Рисунок 2.3 - Спектральні криві коефіцієнта згасання стандартних одномодових волокон з незміщеною дисперсією

### 2.3 Блок-схема мережі з технологією WDM

Система WDM (рисунок 2.4) багато в чому схожа на традиційну систему TDM. Сигнали різних довжин хвиль, що генеруються одним або декількома оптичними передавачами, поєднуються мультиплексором у багатоканальний збірний оптичний сигнал, що далі поширюється по оптичному волокну. При великих відстанях передачі на лінії зв'язку встановлюється один або кілька оптичних підсилювачів (EDFA). Демультиплексор

приймає складений сигнал, виділяє з нього вихідні канали різних довжин хвиль і направляє їх на відповідні фотоприймачі. На проміжних вузлах деякі канали можуть бути додані або виділені зі збірного сигналу за допомогою мультиплексорів вводу-виводу (OADM) або пристроїв крос-комутації.

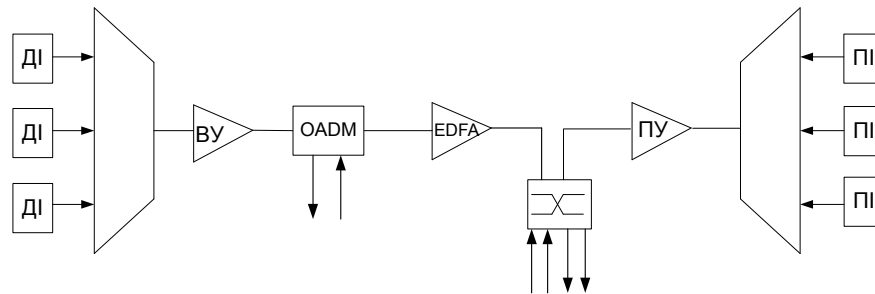


Рисунок 2.4 - Блок-схема мережі з технологією WDM  
**2.4 Основні характеристики і параметри WDM систем**

У додатках В і Г наводяться дані промислових систем, що отримали розвиток останніми роками.

Ряд фірм розробляли системи зі спектральним ущільненням для глобальних мереж SDH, у той же час інші компанії використовували їх для локальних мереж. До останніх відносяться OSICOM, ITC, IBM, EONIX, CIENA, CAMBRIAN, ADVA. Інтерфейси для перетворення форматів сигналів на вході і виході у них призначені для обробки сигналів даних. Компанії ALCATEL, ECI, LUCENT, NEC, NOKIA, NORTEL, PIRELLI, SIEMENS випускають апаратуру для глобального зв'язку. Швидкості передачі у цих компаній досягали 100-400 Гбіт/с.

За наведеними паспортними даними можна зробити висновок про ряд параметрів, властивих системам.

1 Тип системи - дуплексна або двонаправлена (D) - використовує дві оптичні несучі на канал і напівдуплексні (S) - одна несуча на канал у світлопроводі.

Якщо ж кількість каналів просто дається, то це напівдуплексна система з  $n$  - каналами, або дуплексна з  $n/2$  - каналами.

При створенні дуплексних систем канали одного напрямку можуть бути відділені від іншого захисним зазором у кілька каналів по довжині хвилі.

2 У високошвидкісних системах перевага віддається коду NRZ, для якого обсяг інформації, передаваної за одиницю часу, найвищий.

3 Кількість каналів вводу-виводу. З точки зору топології найлегше реалізується топологія "точка-точка", де ввід-вивід каналів, як електричних, так і оптичних, або не вимагається, або обмежений.

4 Топологія в системах спектрального ущільнення може бути така ж, як і у звичайних оптичних системах:

- а) "точка-точка" без можливості вводу-виводу трибів SDH;
- б) "лінійне коло" з можливістю вводу-виводу трибів SDH;
- в) "зірка" або "точка - багато точок", що реалізуються з допомогою концентратора;
- г) "кільце" одинарне, подвійне, зчетверене;
- д) комірчаста мережа з динамічною маршрутизацією.

5 Секція. Поняття "секція" - це відстань або між регенераторами, або термінальними (крайовими) мультиплексорами.

По суті, секція - ділянка, де дисперсія або завадозахищеність (коефіцієнт помилок) не виходить за межі допустимого. У межах секції можливе застосування тільки квантових підсилювачів. Секції можуть бути короткими (50-90 км, без оптичних підсилювачів), середніми (80-150 км, вони містять бустери - потужні підсилювачі ВУ і передпідсилювачі ПУ).

Дані свідчать, що довжина секції може досягати більше 1000 км.

6 Дистанція - максимальна відстань, на яку можуть бути передані дані або сигнали. Ця відстань визначається числом секцій і довжиною однієї секції. Очевидно, що використання кількох секцій призведе до появи регенераторів. Правда, може бути можливим і варіант використання стикування термінальних мультиплексорів.



7 Швидкість вхідних даних. Вона може змінюватися від швидкостей систем PDH і АТМ до максимальної швидкості STM-256 в 40 Гбіт/с у залежності від фірми виробника.

8 Канал управління організовується на додатковій несучій, яка лежить за межами використовуваної смуги. Основні стандартні несучі каналу управління: 1310, 1480, 1510, 1532, 1625 нм.

9 Управління. При використанні систем SDH управління базується на основі TMN за допомогою інтерфейсу Q і F, а також є можливим застосування спеціально розробленої системи управління мережею WDM, яка включає моніторинг волоконно-оптичних каналів.

## **3 ЕЛЕМЕНТНА БАЗА WDM СИСТЕМ**

### **3.1 Технічні дані синхронних транспортних модулів**

У додатках Д, Е, Ж наведені технічні дані апаратури STM-1, STM-4, STM-16, яка використовується в системах хвильового ущільнення. За заданими рівнями випромінювання, що вводиться у волокно, і рівнем потужності, що приймається, на прийомі визначається енергетичний потенціал:

$$\mathcal{E}_n = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} . \quad (3.1)$$

У залежності від рівня STM на заданій ділянці та типу джерела випромінювання використовується той чи інший тип оптичного інтерфейсу, до якого і під'єднується оптичне волокно. Кожний з оптичних інтерфейсів, у відповідності до рекомендацій ІТУ-Т G.957, має код застосування, класифікація за якими складається з трьох елементів, розділених знаками:

<тип з'єднання> <рівень STM> <індекс джерела випромінювання>

Розшифровка кодів наведена в таблиці 3.1.

Наприклад, інтерфейс має код L-4.3.

Перший символ визначає тип з'єднання:

- внутрішньостанційне з'єднання довжиною до 2 км (I);
- коротке міжстанційне з'єднання довжиною до 15 км (S);
- довге міжстанційне з'єднання довжиною від 15 до 40 км або від 40 до 80 км (L).

Другий символ визначає рівень мультиплексування, наприклад, 1, 4, 16.

Третій символ визначає тип джерела випромінювання й оптичного волокна:

1 – джерело випромінювання з номінальною довжиною хвилі 1310 нм для одномодових оптичних волокон (G.652);

2 – джерело випромінювання з номінальною довжиною хвилі 1550 нм для одномодових оптичних волокон, для використання на коротких міжстанційних з'єднаннях і для одномодових волокон з мінімізованими втратами (G.654), для використання на довгих міжстанційних з'єднаннях;

3 – джерело випромінювання з номінальною довжиною хвилі 1550 нм для одномодових оптичних волокон зі зсунутою дисперсією (G.653).

Таблиця 3.1 - Типи оптичних інтерфейсів обладнання SDH

Використання		Міжстанційні інтерфейси
--------------	--	-------------------------

		Внутрішньо-станційні інтерфейси	Коротка секція		Довга секція		
Номінальна довжина хвилі джерела, нм			1310	1310	1550	1310	1550
Тип волокна		G.652	G.652	G.652	G.652	G.652, G.654	G.653
Довжина секції, км		≤ 2	~15		~40	~80	
Рівень мультиплексування	STM-1	I-1	S-1.1	S-1.2	L-1.1	L-1.2	L-1.3
	STM-4	I-4	S-4.1	S-4.2	L-4.1	L-4.2	L-4.3
	STM-16	I-16	S-16.1	S-16.2	L-16.1	L-16.2	L-16.3

Указані в таблиці 3.1 довжини секцій використовуються тільки для класифікації. Реальна довжина регенераційних секцій обумовлюється параметрами апаратури (рівень передачі, чутливість), а також параметрами кабелю (згасання, дисперсія) і може бути набагато більше, особливо при використанні оптичних підсилювачів.

### **3.2 Тип світловода і марки волоконного кабелю в WDM системах**

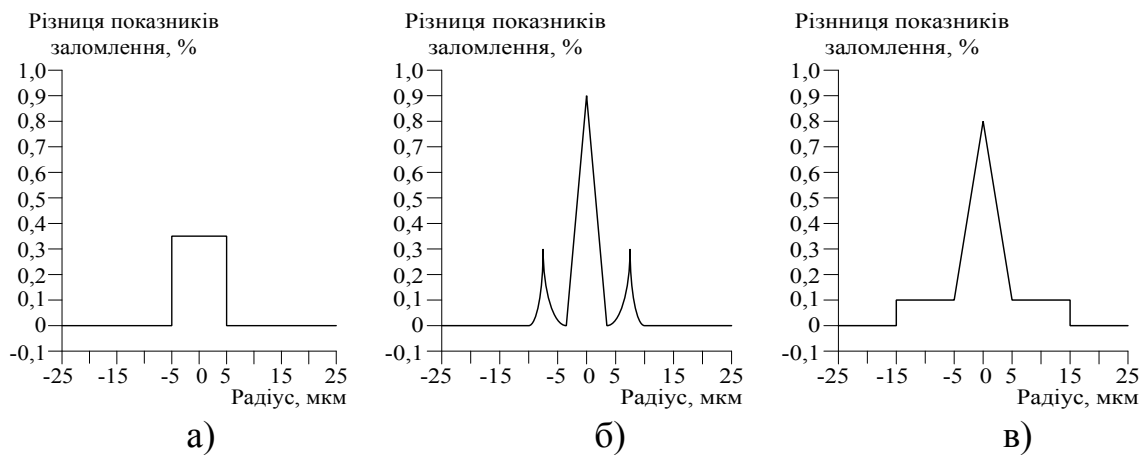
Через значну дисперсію багатомодові волокна не використовуються в сучасних мережах SDH і WDM.

Стандартні волокна зі ступінчастим показником заломлення-SSF (рисунок 3.1) використовувалися до теперішнього часу дуже широко.

Їхнє згасання на  $\lambda = 1,55$  нм було знижене до 0,22-0,19 дБ/км, але вони мали істотний недолік - на довжині хвилі  $\lambda = 1,55$  мкм їхня хроматична дисперсія складала  $17 \div 20$  пс/нм×км.

При сучасному використанні їхня дисперсія може компенсуватися вставками з волокна для компенсації дисперсії (ВКД). У додатку І дані параметри таких вставок. Застосування вставок дає можливість використовувати такий кабель в системах WDM.

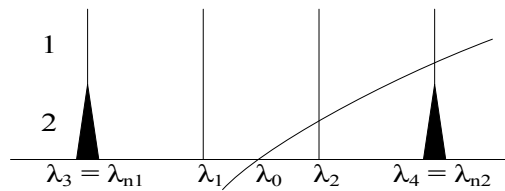
Дисперсія волокна SSF була нульовою на  $\lambda = 1,31$  мкм. Волокна зі зміщеною дисперсією DSF мають нульову дисперсію на  $\lambda = 1,55$  мкм, що досягається зміною показника заломлення волокна (рисунок 3.1,б, в), але при їхньому використанні для систем спектрального ущільнення виникають нелінійні ефекти, що призводять до появи паразитних оптичних каналів (чотирихвильовий ефект).



а - з незміщеною дисперсією; б - із зміщеною дисперсією (Corning);  
в - зі зміщеною дисперсією (Lucent Technologies)

Рисунок 3.1 - Профілі показника заломлення одномодових оптичних волокон

Цей ефект найсильніше проявляється поза точкою нульової дисперсії. Для корисних сигналів з довжиною хвилі  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  виникають сигнали перешкод  $\lambda_3$  і  $\lambda_4$  (рисунок 3.2).



1 - спектральні сигнали;

2 - сигнали завади:  $\lambda_{n1} = 2\lambda_1 - \lambda_2$ ;  $\lambda_{n2} = 2\lambda_2 - \lambda_1$

Рисунок 3.2 - Нелінійний чотиривхвильовий ефект

Усе вищесказане привело до створення волокна з ненульовою зміщеною дисперсією NZDSF, для яких зсув нуля дисперсії здійснений до початку або до кінця вікна прозорості 1530-1560 нм. Це досягається незначною зміною W-подібного або трикутного профілю показника заломлення (рисунок 3.1,б, в). Відповідні криві дисперсії показані на рисунку 3.3.

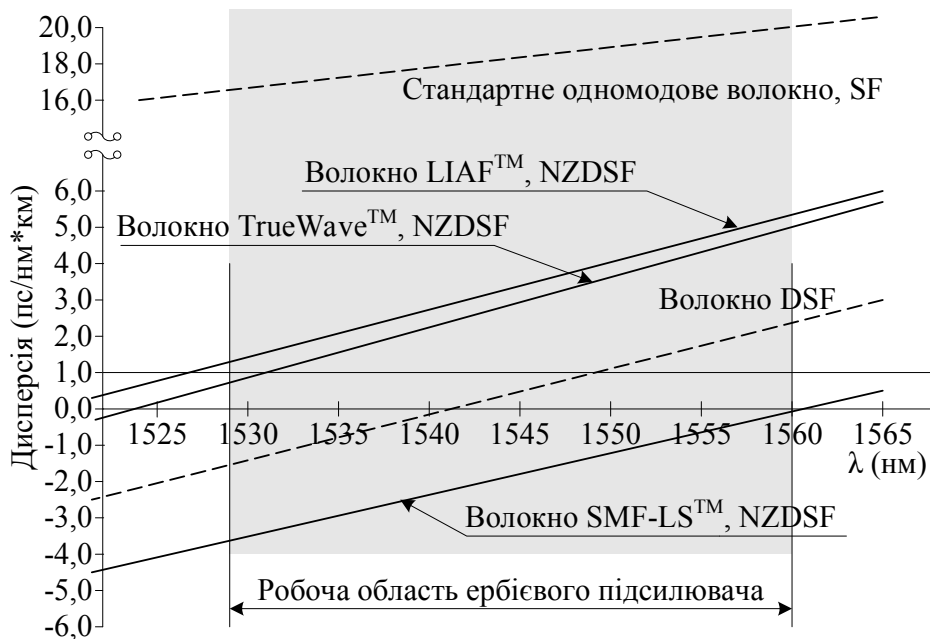


Рисунок 3.3 - Хроматична дисперсія одномодових волокон у вікні 1550 нм

Дисперсія таких волокон у вікні прозорості складає 2-4 пс/нм×км. Поєднання волокон такого типу NZDSF і NZDSF - дає можливість досягти мінімальних хроматичних дисперсій без появи сигналів завад. При цьому ділянки між квантовими

підсилювачами по черзі реалізуються на волокнах NZDSF і NZDSF-. Основні параметри усіх видів одномодових волокон наведені в додатку Л.

При використанні систем STM-64 і STM-256 зі швидкостями передачі 10-40 Гбіт/с важливим показником стає поляризаційна модова дисперсія (ПМД). ПМД виникає в одномодових ОВ у тому випадку, якщо їх форма відрізняється від осесиметричної, тобто внаслідок овальності (а не ідеального кола) профілю серцевини одномодового волокна, що виникає в процесі виготовлення або експлуатації волокна. За рахунок цього дві взаємно ортогональні поляризаційні складові переданого оптичного випромінювання (електрична та магнітна) мають дещо відмінні умови поширення (у ідеальному волокні, в якому відсутні неоднорідності по геометрії, дві моди поширювалися б з однією і тією ж швидкістю).

ПМД має істотно меншу величину в порівнянні з хроматичною дисперсією і починає відігравати помітну роль тільки при передачі на великих швидкостях. Процес накопичення ПДМ відбувається за законами теорії вірогідності, оскільки неоднорідності, які її викликають, розподілені випадково уздовж волокна. Таким чином, можливі лише ймовірнісні оцінки вимірювання ПДМ.

### **3.3 Тип випромінювача в WDM системах**

Перспективи впровадження волоконно-оптичних систем передачі інформації на залізничному транспорті багато в чому обумовлені перевагами волоконно-оптичних кабелів, а також розширеним впровадженням на мережі зв'язку цифрових систем передачі.

Формування цифрового сигналу для передачі і зворотне перетворення сигналу при прийманні здійснюється в стандартному кінцевому устаткуванні ЦСП. Сформований на передавальній станції сигнал передається на приймальну станцію у вигляді світлової енергії через устаткування волоконно-оптичного лінійного тракту.

Перетворення електричних сигналів в оптичні відбувається в оптичному передавальному пристрої (ОПДП). Основним його елементом є джерело оптичного випромінювання.

ОПДП призначений для перетворення електричних сигналів в оптичні. Він складається з джерела випромінювання, схеми управління і вузла оптичного сполучення.

Напівпровідниковий випромінювач - це оптоелектронний напівпровідниковий прилад, що перетворює електричну енергію в енергію електромагнітного випромінювання у видимій, інфрачервоній і ультрафіолетовій областях спектра.

Напівпровідникові випромінювачі можуть випромінювати як когерентні, так і некогерентні електромагнітні коливання. До некогерентних випромінювачів відносять - світлодіоди видимої частини спектра та інфрачервоні світлодіоди, а також напівпровідникові знакові індикатори.

Когерентні напівпровідникові випромінювачі - це напівпровідникові лазери з різними видами збудження. Вони можуть випромінювати електромагнітні хвилі з певною амплітудою, частотою, фазою, напрямком розповсюдження і поляризацією, що і відповідає поняттю когерентності.

За видом використовуваної активної речовини розрізняють твердотілі, газові, рідинні і напівпровідникові пристрої. Подальший розподіл здійснюється вже за конкретно використовуваними речовинами. Так, наприклад, газові лазери можуть бути аргоновими, гелій-неоновими та ін. Твердотілі лазери можуть бути рубіновими, скляними та ін.

Існують три типи газорозрядних лазерів : атомарні (на нейтральних атомах), іонні і молекулярні.

Іонні лазери генерують коливання у видимому та ультрафіолетовому діапазоні хвиль. Атомарні лазери забезпечують випромінювання видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів. Молекулярні лазери працюють у ближньому і дальньому інфрачервоному, у видимому та ультрафіолетовому діапазонах. Таким чином, газові лазери працюють в усьому оптичному діапазоні хвиль (від 0,16 до 800 мкм).

Потужності газових лазерів у безперервному режимі також різні: вони складають від десятків кіловат до міліват і менше.

Найбільша імпульсна потужність отримана понад 1МВт (лазер на N<sub>2</sub>,  $\lambda=0,337$  мкм).

Гелій-неоновий лазер - найширше використовуваний атомарний лазер.

Джерело випромінювання, призначене для дослідження в оптичній системі передач, повинне задовольняти ряд вимог. Воно повинне мати випромінювання на довжині хвилі, що відповідає мінімуму згасання оптичного волокна, ефективно перетворювати електричний сигнал в оптичний, мати малий власний шум, досить малу ширину спектра випромінювання, великий термін служби і високу надійність. Крім того, джерело випромінювання повинне забезпечувати потрібні високу лінійність і швидкість модуляції.

Найбільшою мірою такі вимоги задовольняють джерела випромінювання, побудовані на основі світловипромінюючих діодів та інжекційних лазерних діодів.

Світловипромінюючі діоди, призначені для оптичних систем передачі, мають конструкцію, що забезпечує введення і поширення генерованого випромінювання перпендикулярно площині р-n-переходу, розташованого між шарами напівпровідників з провідністю різного типу. Важливою при цьому є ефективність введення випромінювання СВД в оптичне волокно.

Для волоконно-оптичних систем передачі як джерела випромінювання частіше використовують інжекційні лазерні діоди. Вони мають ряд переваг перед світловипромінюючими діодами за рядом параметрів (випромінюваною потужністю, когерентністю випромінювання, швидкодією та ін.). Проте ЛД мають і свої недоліки. Основним з них є обмежений термін служби, обумовлений поступовою або різкою деградацією. Поступова деградація залежить від щільності струму і скважності імпульсів. Причиною різкої деградації є перегрівання лазерного діода, що призводить до руйнування торців. Основні параметри джерел випромінювання наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Основні параметри джерел оптичного випромінювання

Параметри джерела випромінювання	Світлодіод	Лазер
Потужність, мВт	1 - 5	Одномодові - 5...10



		Багатомодові - 40
Ефективність випромінення, %	0,03	2 - 4
Модуляція, швидкість передачі інформації, Гбіт/с	ІКМ до 0,1	ІКМ до 5
Ширина спектральної лінії, нм	30 - 50	0,1 - 0,5
Довжина хвилі, мкм	0,85	1,3
Діаграма направленості	60...80	4...20
Термін служби, год	$10^5 \dots 10^6$	$10^4$

У таблиці 3.3 наведені основні параметри застосовуваних у даний час лазерів. Порівнюючи напівпровідникові лазери з іншими типами лазерів, можна виділити такі переваги напівпровідникових лазерів:

- 1) малі малогабаритні показники і велике оптичне підсилення;
- 2) високий ККД;
- 3) простота накачування лазера: інжекція не вимагає високої живлячої напруги і потужностей;
- 4) висока швидкодія;
- 5) можливість генерації випромінювання заданої довжини хвилі в широкому діапазоні, що досягається вибором напівпровідника з необхідною шириною забороненої зони;
- 6) технологічна і експлуатаційна сумісність з елементами інтегральної оптики.

Таблиця 3.3 - Основні параметри

Тип	Розмір, см	ККД, %	Потужність накачування $P_n$ , мВт	$\theta_p$	$E_{пит}$ , В
Газовий	10	$10^{-1}-10^{-2}$	0,1-10	0,03-0,15	$10^3-10^4$
Твердотілий	1	1-2	$10-10^4$	1	до $10^3$
Напівпровідниковий	0,1	20-50	10-100	10	1,5-3

Але сучасним напівпровідниковим лазерам властиві і такі недоліки:

1) відносно низькі параметри когерентності випромінювання  $\theta_p$ , що пояснюється високою щільністю активної речовини, малою довжиною резонатора і малою вихідною апертурою;

2) низька довговічність, що дорівнює для промислових зразків 103-104 год; у той же час теоретичні розрахунки показують, що довговічність інжекційних лазерів може бути вищою 105 год.

### **3.4 Тип фотоприймача в WDM системах**

Для приймання (детектування) і перетворення оптичних сигналів в електричні служить фотоприймач. Як оптоелектронний перетворювач, фотоприймач має оптичний вхід (управляюче коло) і електричний вихід (сигнальне коло), параметри яких мають бути узгоджені з джерелом вимірювання й оптичною лінією, з одного боку, і з електричним навантаженням, що включає будь-який необхідний перетворювач електричних сигналів - підсилювач, декодер, - з іншого боку. Залежно від типу і режиму детектування елемент оптичного кола фотоприймача може працювати як в аналоговому, так і в цифровому режимах, що визначається формою оптичного сигналу, який надходить на його вхід. Фотоелектричне перетворення дозволяє здійснювати подальшу обробку інформації на основі електронних схем, можливості яких за всіх інших рівних умов обмежені відношенням сигналу до шуму на вході електронного тракту.

Особливості ВОЛЗ визначають вибір принципу оптичного детектування, його приладову й апаратурну реалізацію. Для некогерентних і багатокодових систем приймання переважно використовується принцип прямого детектування, основу якого складають напівпровідникові фотоприймачі. Йому властиві простота реалізації, схемна мінімізація, можливість мікромініатюризації та інтеграції на рівні фотоперетворювачів, висока швидкодія.

Майже вся різноманітність напівпровідникових фотоприймачів визначається двома структурами:

фоторезисторними (гомогенні структури) і фотодіодними (гетерогенні структури).

Структура фоторезистора - універсальний параметричний елемент оптоелектронних кіл з керуванням у функції освітленості імпедансом. Проте відомі фоторезистори не задовольняють за своїми параметрами сучасні вимоги обробки оптичних сигналів. Фоточутливі структури, що є входними елементами приймачів з посиленням сигналів, підрозділяються на фотодіоди (ФД), лавинні фотодіоди (ЛФД), біполярні фототранзистори (ФТ), фототиристри (ФТР) та ін.

Фотодіоди є напівпровідниковими приладами з обернено-зміщеним р-n-переходом. До основних параметрів ФД відносяться: струм фотодіода, квантова ефективність, спектральна чутливість, швидкодія (час релаксації) та еквівалентна потужність власних шумів.

Лавинні фотодіоди (ЛФД) мають структуру р-і-n діода з великим зворотним зміщенням ( $E_{см} = 250...500 \text{ В}$ ), яке викликає лавинне помноження збуджених носіїв заряду. У результаті помноження виникає внутрішнє підсилення струму.

Біполярні та уніполярні фототранзистори ФТ можуть виконувати функції фотодетекторів і забезпечувати високе посилення сигналів. Фототранзистор у порівнянні з фотодіодом складніший у виготовленні і поступається йому у швидкодії внаслідок більшої площі переходів.

При розрахунку енергетичного потенціалу лінії передачі необхідно враховувати поріг чутливості обраного фотоприймача, що визначається його внутрішніми шумами, забезпечивши при цьому  $P > P_{пор}$ . Основні параметри фотодіодів і фототранзисторів наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Основні параметри фотодіодів і фототранзисторів

Параметри	ФД (p-i-n)	ЛФД	ФТ
Напруга зміщення, В	10...100	250... 350	12...24
Поріг чутливості при 1МГц, дБ	-58	-70	-50...-60
Чутливість у максимумі спектральної характеристики при $\lambda_0$ , А/Вт	0,4... 0,7	10...70	12...80
Темновий струм, мкА	3	15	50
Робочий діапазон по потужності вхідних сигналів, дБ	60	20	30...50
Гранична частота, МГц	1000..2000	90...150	150...200
Час релаксації, пс	39	70	50...80
Довжина хвилі, мкм	0,87	0,88	1,5...1,8
Коефіцієнт підсилення	0,2...0,3	3...5	6,5 ...12
Термін служби, $\times 10^4$ год	1...50	1... 50	1...60

### 3.5 Тип квантового оптичного підсилювача в WDM системах

Квантові підсилювачі розроблялися для довжини хвилі 1,55 мкм, де згасання оптичного кабелю мінімальне. Їх переваги, окрім посилення - широка смуга частот пропускання, низький рівень шумів.

Використання квантових підсилювачів у системах спектрального ущільнення виправдане тим, що вони дають можливість посилити сигнали всіх оптичних несучих без необхідності регенерації сигналу кожної несучої окремо.

У додатку М наведені параметри оптичних підсилювачів різних типів. Але нині в основному використовуються в системах WDM квантові підсилювачі на волокнах легованих ербієм, причому тільки у вікні прозорості 1530-1560 нм. Параметри оптичних квантових підсилювачів указанного типу різних компаній виробників дані в додатку Н. У таблиці 3.5 наведені дані квантових оптичних підсилювачів компанії OPTOCOM.

**Таблиця 3.5 - Параметри квантових оптичних підсилювачів компанії ОРТОСОМ**

Параметри	Модель 1	Модель 2
<b>Оптичні характеристики</b>		
Вихідна потужність насичення ( $p_{вх} = 0$ дБм), дБм	21	30
Коефіцієнт підсилення, дБ	>35	45
Коефіцієнт шуму, дБ	<5	<6,5
Поляризаційна чутливість, дБ	0,2	0,3
Діапазон довжин хвиль, нм	1535-1565	1535-1565
Нерівномірність характеристики підсилення в робочому діапазоні довжин хвиль, дБ	< ±0,5	< ±0,7
Довжина хвилі накачування, нм	980	980
<b>Електричні характеристики</b>		
Напруга живлення (47-67 Гц), В	85-264	85-264
Споживана потужність, Вт	<20	<50

### **3.6 Тип оптичного мультиплексора і демультимплексора хвильових каналів**

Для об'єднання і роз'єднання оптичних хвильових каналів служать пасивні пристрої, основані на використанні дифракційних решіток. Параметри мультиплексорів, виконаних на основі інтегральної оптики (AWG і GG) і на основі дискретної мікрооптики (3 - DO), наведені в таблиці 3.6.

У таблицях 3.7 і 3.8 дані параметри мультиплексорів/ демультимплексорів (ці пристрої обернені), що виробляються окремими компаніями. Мультиплексорні пристрої потребують температурної стабілізації дифракційних решіток для забезпечення заданих параметрів, наведених у таблицях. Через значне згасання при передачі сигналів вони можуть поєднуватися з квантовими оптичними підсилювачами.

Таблиця 3.6 - Порівняння різних технологій оптичного мультиплексування

Технологія	Максимальна кількість каналів	Рознесення каналів, нм	Внесені втрати, дБ	Перехід-незгасання, дБ	Чутливість до поляризації, %	Температурний коефіцієнт, 0,01 нм/°С
AWG	32-64	0,1-15	6-8	-5...-29	2	0,01
CG	78	1-4	10-16	-7...-30	2-50	нд
3-DO	262	0,4-250	2-6	-30...-55	0	нд

Таблиця 3.7 - Мультиплексори/демультиплексори фірми Lightwave Microsystems

Параметри	Значення параметра		
	типове	максимальне	за специфікацією ITU
Частотний інтервал, ГГц	100	100	100
Ширина смуги на рівні 1 дБ, нм	0,2	0,4	Інтервал 100 ГГц
Ширина смуги на рівні 3 дБ, нм	0,3	0,6	Інтервал 100 ГГц
Ізоляція між сусідніми каналами, дБ	>25	>25	Відхилення від центра смуги ±0,1 нм
Ізоляція між несусідніми каналами, дБ	>30	>30	Відхилення від центра смуги ±0,1 нм
Внесені втрати, дБ	<6,0	<8,0	16 каналів
	<7,0	<9,0	32 канали
Поляризаційна залежність втрат, дБ	<0,5	<0,5	На центральній λ
Зворотні втрати, дБ	>50	>50	Без з'єднувача

Таблиця 3.8 - Мультиплексори фірми NEL Photonics Devices

Параметри	Величини	Примітки
Діапазон довжин хвиль,	1500...1600	

нм		
Кількість каналів	8, 16, 24, 32, 40, 48	
Частотний інтервал між каналами, нм	0,4, 0,8, 1,6	
Внесені втрати, дБ	<6 (стандартний тип)	На рівні 3 дБ центральної хвилі
	<9 (плоский тип)	
Ширина смуги (стандартний тип)	30% канального інтервалу	На рівні 1 дБ
	60% канального інтервалу	На рівні 3 дБ
Ширина смуги (плоский тип)	50% канального інтервалу	На рівні 1 дБ
	75% канального інтервалу	На рівні 3 дБ
Ізоляція між сусідніми каналами, дБ	<-39	
Поляризаційно-залежні втрати, дБ	<0.5	На рівні 3 дБ центральної довжини хвилі
Зворотні втрати, дБ	>35	3 РС- роз'ємом

### 3.7 Тип оптичного мультиплексора вводу-виводу

Оптичні мультиплексори вводу-виводу дозволяють здійснити ввід-вивід частини оптичних каналів на проміжних пунктах, а основну частину оптичних каналів передати далі в тракт без яких-небудь перетворень.

Мультиплексор вводу-виводу складається з демультиплексора та мультиплексора і для компенсації згасання цих пасивних пристроїв він поєднується з квантовим підсилювачем (рисунок 3.4). При цьому до користувачів на проміжному пункті можуть подаватися як окремі виділені оптичні канали, так і перетворені в електричну форму сигнали вводу. Відповідно і виводяться можуть з проміжного пункту

електричні сигнали з перетворенням в оптичну форму та оптичні сигнали.

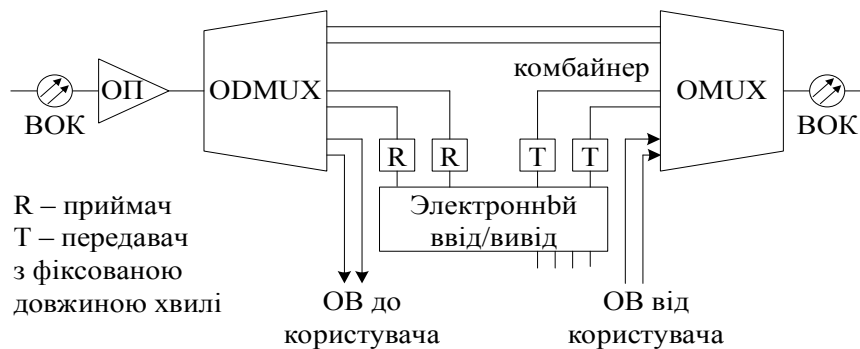


Рисунок 3.4 - Схема оптичного мультиплексора вводу-виводу

Разом з указаними елементами в оптичних мережах можуть бути використані оптичні комутатори, оптичні фільтри, хвильові конвертори, оптичні комбайнери і розгалужувачі, але для використання лінійного тракту досить описаних у роботі елементів.

#### **4 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ З ХВИЛЬОВИМ РОЗПОДІЛОМ КАНАЛІВ**

Початкові дані подані в додатках А, Б, Д, Л та Н.

Усі розрахунки повинні робитися для каналу з максимальною швидкодією, а також для каналу, у якого абсолютне значення дисперсії максимальне. Розрахунки проводяться за трьома показниками: згасанням, дисперсією і співвідношенням сигнал/шум; і за найгіршим з варіантів визначається довжина.

##### **4.1 Вибір і обґрунтування архітектури лінійного тракту**



В основу розрахунків покладено хвильовий лінійний тракт з архітектурою "точка-точка" трьох видів - два види представляють повністю оптичний тракт (фотонна система передачі) і третій вид - лінійний тракт, де встановлені регенератори. Перші два випадки відповідають лінійному тракту, де дисперсія і завадозахищеність по всій довжині траси не виходять за рамки допусків і досить тільки компенсації згасання за допомогою квантових оптичних підсилювачів. Два представлені види відрізняються між собою наявністю (або відсутністю) пристроїв вводу-виводу (рисунки 4.1, 4.2) за наявності повністю фотонної передачі.

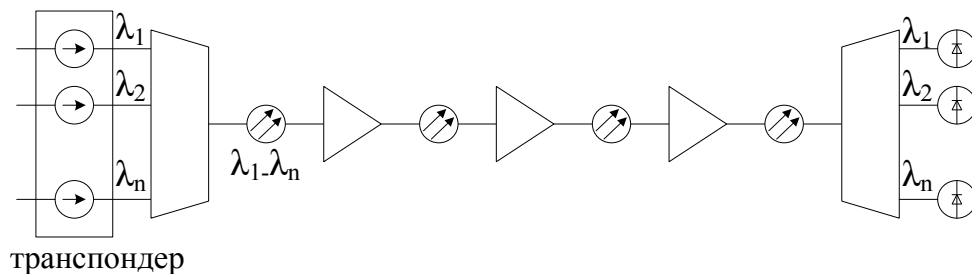


Рисунок 4.1 - Багатохвильова лінія зв'язку з архітектурою «точка-точка»

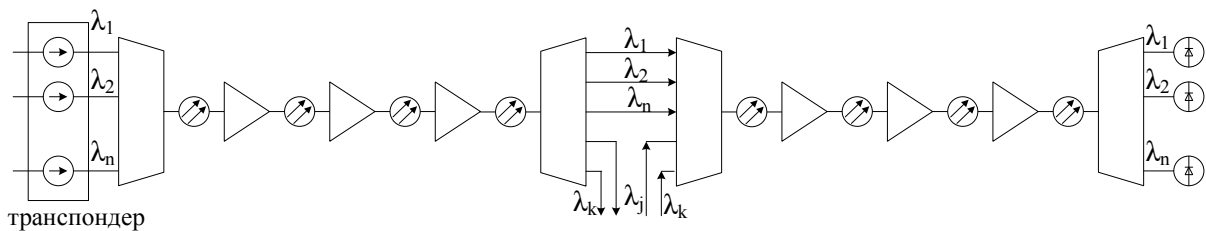


Рисунок 4.2 - Багатохвильовий тракт з архітектурою «точка-точка» і пристроєм вводу-виводу

На рисунку 4.3 зображено лінійний тракт, де використані регенератори.

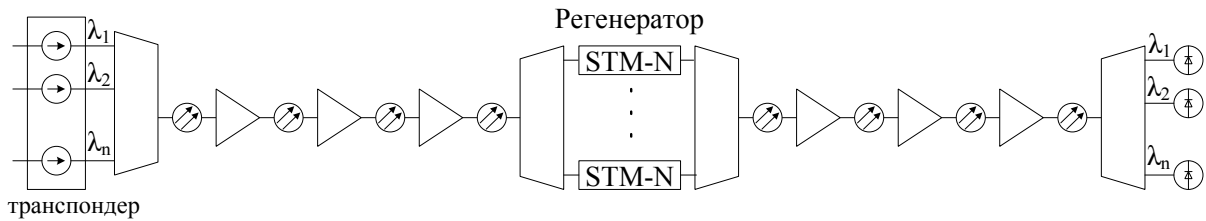


Рисунок 4.3 - Багатохвильовий лінійний тракт з архітектурою «точка-точка» і регенераторами між секціями

Можливе поєднання в лінійному тракті пристроїв вводу-виводу і регенераторів.

#### 4.2 Розрахунок дисперсії для каналу з максимальною швидкодією

Для розрахунку поляризаційної дисперсії необхідно враховувати, що максимально допустима поляризаційна модова дисперсія для системи з максимальною швидкодією не повинна перевищувати 640 пс для STM-1; 160 пс для STM-4; 40 пс для STM-16 і 10 пс для STM-64.

Розрахунок поляризаційної модової дисперсії ведеться за формулою

$$\tau_{\text{пмд}} = T\sqrt{L}, \quad (4.1)$$

де:  $T$  - питома поляризаційна модова дисперсія, пс/ $\sqrt{\text{км}}$ ;  
 $L$  - відстань, км.

За хроматичною дисперсією визначимо максимальну відстань для даної системи без регенераторів:

$$L_c = \frac{0,25}{\sigma B}, \quad (4.2)$$

$$\sigma = \Delta\lambda D(\lambda), \quad (4.3)$$

де  $B$  - швидкість передачі для каналу з максимальною швидкодією;

$\Delta\lambda$  - ширина смуги оптичного випромінювання. Усі сучасні напівпровідникові лазери, що використовуються в системах щільного хвильового ущільнення, мають  $\Delta\lambda = 0,1$  нм;

$D(\lambda)$  - хроматична дисперсія для обраного діапазону, пс/нм\*км:

$$D(\lambda) = S_0(\lambda - \lambda_0), \quad (4.4)$$

де  $S_0$  - нахил кривої дисперсії для кабелю;

$\lambda$  - довжина хвилі каналу з максимальним абсолютним значенням дисперсії;

$\lambda_0$  - довжина хвилі нульової дисперсії.

Оцінювання  $L_c$  проводиться двічі: для каналу з максимальною швидкодією і для каналу з максимальним абсолютним значенням дисперсії.

### 4.3 Розрахунок довжини підсилювальної ділянки

Відстань між квантовими підсилювачами з урахуванням згасання визначається за формулою

$$L_{yy} \leq \frac{E_n - a_{pz} * n_{pz} - a_{nz} - a_t}{\alpha + \frac{a_{nz}}{l_{од}}}, \quad (4.5)$$

де  $E_n = p_{пер} - p_{пр}$  - енергетичний потенціал, що визначається за різницею рівня оптичного випромінювання, яке вводить у волокно, і рівнем номінальної потужності, що приймається;

$\alpha$  - коефіцієнт згасання оптичного волокна;

$n_{pz}$  - кількість роз'ємних з'єднань (вони встановлюються на вводі і виводі оптичного волокна, на кінцевих станціях при переході від апаратури до оптичної лінії зв'язку, на стиках з мультиплексорами і демультіплексорами);

$a_{pz}$  - втрати в роз'ємному з'єднувачі,  $a_{pc} = 0,25$  дБ;

$n_{nz}$  - кількість нероз'ємних з'єднань на ділянці регенерації;

$a_{нз}$  - втрати в нероз'єднаному з'єднанні,  $a_{нс}=0,05$  дБ;

$a_t$  - допуск на згасання, пов'язаний з погіршенням характеристик компонентів ділянки регенерації (кабель, приймачі і джерела випромінення) з часом і з урахуванням температурних змін. Величина  $a_t=6$  дБ;

$l_{б\gamma\delta}$  – будівельна довжина кабелю.

На ділянках між кінцевими станціями і проміжними квантовими підсилювачами, у місцях установлення мультиплексорів, демультимплексорів, мультиплексорів вводу-виводу потрібне урахування згасання цих пристроїв. У ряді випадків для компенсації їхнього загасання встановлюються квантові підсилювачі. Загальна формула розрахунку при встановленні цих пристроїв виглядає таким чином:

$$L_{yy} \leq \frac{E_n - a_{пз} * n_{пз} - a_{нз} - a_t - a_{wm} - a_{wd}}{\alpha + \frac{a_{нз}}{l_{б\gamma\delta}}}, \quad (4.6)$$

де  $a_{wm}$  – згасання мультиплексора;

$a_{wd}$  – згасання демультимплексора.

Знаючи довжину кожної ділянки та максимальну відстань між квантовими підсилювачами, знайдемо кількість підсилювачів на кожній ділянці за формулою:

$$N_n = \left\lceil \frac{L_d}{L_{yy}} \right\rceil - 1, \quad (4.7)$$

де  $L_d$  – довжина ділянки;

$L_{yy}$  – максимальна відстань між підсилювачами.

Довжину підсилювальних ділянок задамо довільну, зважаючи на згасання в мультиплексорах. Таким чином, суміжна з мультиплексором підсилювальна ділянка, повинна бути коротшою, ніж ділянка, розташована між двома підсилювачами.

Визначимо згасання, що вноситься на кожній підсилювальній ділянці, за такою формулою:

$$a_{nd} = \alpha l_{yy} + 2a_{pz} + \frac{l_{yy}}{l_{\delta\delta}} a_{nz}, \quad (4.8)$$

де  $l_{yy}$  – довжина підсилювальної ділянки.

#### 4.4 Розрахунок заводо захищеності системи передачі

Кожен підсилювач здійснює підсилення сигналу  $G$  і вносить певний рівень шумів  $N$ . Рівень шумів на виході кожного квантового підсилювача визначається виразом

$$N_{out} = hv * \Delta v * G * (NF), \quad (4.9)$$

де  $hv$  - потужність шумів, що вносяться спонтанним переходом одного фотона на 1 Гц смуги;  
 $\Delta v$  - смуга передачі в одному оптичному каналі, Гц;  
 $NF$  – шум-фактор квантового підсилювача.

Як правило, визначають рівень шумів у децибелах:

$$N_{out} = 10 \lg \frac{hv}{P_0} + 10 \lg \Delta v + 10 \lg G + 10 \lg (NF). \quad (4.10)$$

Візьмемо  $10 \lg (hv/P_0) = -158,3$  дБ для  $\lambda = 1,55$  мкм і відповідно  $\Delta v = 193,3 \cdot 10^{12}$  Гц.

Урахувавши накопичення шумів на квантових підсилювачах заводо захищеність буде визначатися за формулою

$$A_z = P_{out} - N_{out} - 10 \lg k,$$

де  $P_{out}$  – потужність сигналу на виході кожного підсилювача і кінцевої апаратури,  $P_{out} = 0$  дБ;

$k$  – порядковий номер оптичного квантового підсилювача.

На основі отриманого значення  $N_{out}$  визначимо заводо захищеність на виході  $k$ -го підсилювача.

Отримані дані наведемо у вигляді таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Результати розрахунку заводо захищеності

Ділянка	$L_{\text{пд } i},$ км	$a_{\text{пд}},$ дБ	Номер підсилювача k	$G_i,$ дБ	$10 \lg k$	$N_{\text{out } k},$ дБм	$A_z,$ дБм

#### 4.5 Розрахунок діаграми рівнів оптичної потужності

За набутими розрахунковими значеннями можна побудувати діаграму рівнів оптичної потужності (рисунок 4.4) і визначити рівні шумів у лінійному тракті і заводозахищеність. Якщо заводозахищеність впаде до величини  $\sim 22$  дБ (що відповідає коефіцієнту помилок  $10^{-10}$ - $10^{-11}$ ), то потрібне установлення регенераторів, щоб відновити початкові сигнали.

При побудові діаграми рівнів передачі вважають, що до каналу в крайових пунктах підводиться рівень  $p_{\text{пер}}$ . Далі знаходять рівень на виході оптичного мультиплексора. Для цього проти центра оптичного мультиплексора відкладають вертикальний відрізок, причому довжина відрізка повинна представити в прийнятому масштабі згасання мультиплексора  $a_{\text{вм}}$ . Далі сигнал, проходячи по лінії зв'язку, поступово зменшуватиметься, що відображається на діаграмі похилої кривої. Різниця між рівнями на виході мультиплексора і на вході першого оптичного підсилювача характеризуватиме згасання лінії на підсилювальній ділянці  $a_{\text{нд}1}$ , при цьому рівень сигналу не має бути нижчим за чутливість підсилювача (інакше, збільшуємо підсилення підсилювача). Оптичний підсилювач підніме рівень на  $G_1$ , при цьому рівень сигналу не повинен перевищити потужність насичення підсилювача (інакше зменшуємо підсилення підсилювача). Таким чином роблять і далі, поки не дійдуть до кінця кола. Набуте при цьому значення рівня приймання не повинне бути нижчим за чутливість приймача  $p_{\text{пр}}$ .

Діаграму рівнів будують для обох напрямів передачі. Приклад побудови діаграми рівнів для системи оптичного мультиплексування з трьома оптичними підсилювачами наведено на рисунку 4.4.

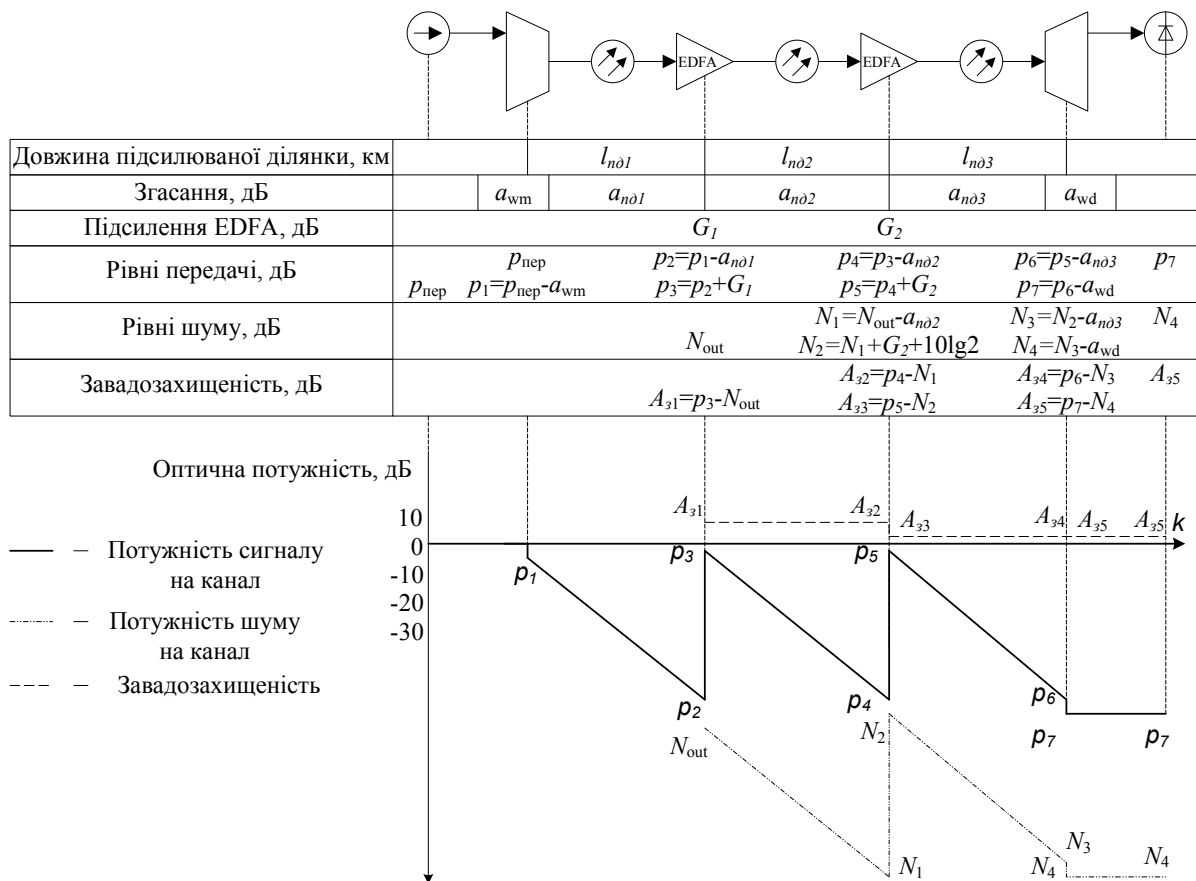


Рисунок 4.4 - Діаграма рівнів

За отриманими результатами будується структурна схема багатохвильової лінії зв'язку з усіма елементами вздовж магістралі (див. рисунки 4.1 - 4.3). Позначення елементів даються відповідно у додатку П.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Слепов, Н.Н. Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны [Текст] / Н.Н. Слепов. - М.: Сети, 1999. - 144 с.

2 Жирар, А. Технология и тестирование систем WDM [Текст]: пер. с англ. / А. Жирар. М.: EXFO, 2001. – 284 с.

3 Однорог, П.М. WDM [Текст]: навч. посібник / П.М. Однорог, О.Б. Омецинська, Є.В. Михайленко; під редакцією В.Б. Катка. - К., 2005. – 99 с.

4 Потапов, В.Т. Технологии DWDM призваны обеспечивать бурное развитие волоконно-оптических систем связи (ВОСС) [Текст] / В.Т. Потапов. - М.: Фотон-Экспресс, 1999. – 54 с.

5 Слепов, Н.Н. Особенности современной технологии WDM [Текст] / Н.Н. Слепов - М.: Электроника, 2004. – 76 с.

6 Бакланов, И.Г. Технологии измерений первичной сети [Текст] Ч. 1. Системы E1, PDH, SDH. / И.Г. Бакланов. М.: Эко-Трендз, 2000. – 245 с.

7 Убайдулаев, Р.Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р.Р. Убайдулаев. - М.: Эко – трендз, 2000. – 487 с.

8 Батаев, О.П. Цифровые системы передачи по ВОЛС [Текст]: учеб. пособие / О.П. Батаев, В.И. Кравченко, Н.Ф. Швачка. – Харьков: ХарГАЖТ, 1998. – 63 с.

## ДОДАТОК А

Таблиця А.1 - Частотне розподілення з кроком 100 і 200 ГГц для діапазону 1528-1560 нм

Частота, ГГц	100 ГГц (8 каналів і більше)	200 ГГц (4 канали і більше)	Довжина хвилі, нм
--------------	---------------------------------	--------------------------------	----------------------



196,1	*	*	1528,77
196,0	*		1529,55
195,9	*	*	1530,33
195,8	*		1531,12
195,7	*	*	1531,90
195,6	*		1532,68
195,5	*	*	1533,47
195,4	*		1534,25
195,3	*	*	1535,04
195,2	*		1535,82
195,1	*	*	1536,61
195,0	*		1537,40
194,9	*	*	1538,19
194,8	*		1538,98
194,7	*	*	1539,77
194,6	*		1540,56
194,5	*	*	1541,35
194,4	*		1542,14
194,3	*	*	1542,94
194,2	*		1543,73
194,1	*	*	1544,53
194,0	*		1545,32
193,9	*	*	1546,12
193,8	*		1546,92
193,7	*	*	1547,72
193,6	*		1548,51
193,5	*	*	1549,32
193,4	*		1550,12
193,3	*	*	1550,92
193,2	*		1551,72
193,1	*	*	1552,52
193,0	*		1553,33
192,9	*	*	1554,13
192,8	*		1554,94
192,7	*	*	1555,75
192,6	*		1556,55
192,5	*	*	1557,36
192,4	*		1558,17
192,3	*	*	1558,98
192,2	*		1559,79
192,1	*	*	1560,61

**ДОДАТОК В**  
**Промислові системи з WDM**

Таблиця В.1

Компанія	Модель	Вхідний сигнал, нм	Кількість каналів даних	Тип	Код	Ємність волокна, Гбіт/с
ADVA (Cisco)	AbraXas	нд	4	D	нд	1,25
	4/8 OCM	нд	4, 8	D	нд	20
Alcatel	1640 WM	нд	40	S	нд	100/400
	1686 WM	нд	16	S	нд	40
	1690 WM	1260-1570	16/32	S	нд	40/80
	1610 OA LTH	нд	16	S	нд	40
Cambrian (Nortel)	OPTera Metro	нд	8/32/64	D, S	нд	20/80/160
	OPTera LH	нд	32-80/160	D/S	нд	До 1600
Ciena	Multiwave 1600	1290-1560	16	S	NRZ/RZ	40
	Sentry 1600	1250-1600	16	S	нд	40
	Sentry 4000	1250-1600	40	S	нд	100
	Firefly	1290-1560	24	S	нд	60
ECI	Metro	нд	24	S	нд	60
	LumiNet-SR	нд	8/16/32/40	S	нд	20-100
	LumiNet-MR	нд	8/16/32/40	S	нд	20-100
	LumiNet-LR	нд	8/16/32/40	S	нд	20-100
Eonyx	SM 9600	нд	16	S	нд	1,25
Ericsson	Erion Networker	1250-1580	16	D,S	нд	20/40
Fujitsu	Flashwave Metro	нд	4/8/16	S	нд	40/80/160
	Flashwave 320	нд	1-16/32	S	нд	10-320
IBM Corp.	9729-001	нд	10	D	нд	20
	9729-041	нд	4	D	нд	4
ITC	OM/9000/ 25-8/16	нд	8/16	D	нд	10/20
Lucent	OLS 40G	нд	8	S	нд	20/80
	OLS 80G	нд	16	S	нд	40/160
	OLS 400G	нд	40/80	S	нд	200/400
Marconi	PLT 16/40	нд	16/40	S	нд	160/400/700
	PMA 8/32	нд	8/32	S	нд	80/320
NEC	SpectralWave	нд	40/80	S	нд	400/800
	SpectralWave	нд	160	S	нд	1600
Nokia	STM-16/WDM	нд	4/8/16	S	нд	40
Nortel	S/SDMS TN	нд	8	S	нд	80
	S/SDMS TN-DM	нд	16/32	S	нд	160/320
Osicom	Gigamux	нд	8,16	D,S	нд	40
	Gigamux EPC	нд	32	S	NRZ	80
Pirelly	T31-BDS	нд	4	D	NRZ	40
	T31-MWS	нд	4,8	D,S	NRZ	20
	T31-OMDS 16	нд	16	S	NRZ	40
	WaveMux	нд	32/64	S	NRZ	80/160
Siemens	WL8/16/32*	нд	8/16/32	S	нд	20-320
	WLS	нд	8/16/32	S	нд	20-320
	MTS	нд	16/32/160	S	нд	40-1600

Таблиця В.2

Компанія	Модель	Кількість каналів вв/вив	Топологія	Секція-прольоти		
				Кількість макс.	Втрати, дБ	Довжина, км
	AbraXas	нд	нд	1	нд	5

ADVA (Cisco)	4/8 OCM	нд	нд	1	нд	50
Alcatel	1640 WM	4	Т-Т,Т-МТ,К2	8	нд	25, 120
	1686 WM	4	нд	нд	нд	25, 120
	1690 WM	8	Т-Т,Т-МТ,К2	1	нд	48
	1610 OA LTH	нд	нд	нд	нд	нд
Cambrian (Nortel)	OPTera Metro	нд	П-П, К, З	1	нд	50
	OPTera LH	2-16	Т-Т, К, З, Я	нд	нд	нд
Ciena	Multiwave 1600	4	Т-Т, Т-МТ	5	30	120
	Sentry 1600	4	Т-Т, Т-МТ	4/5/10	33/30/25	120-100
	Sentry 4000	8	Т-Т, Т-МТ	2/5	33/25	120/90
	Firefly	нд	нд	1	19	65
ECI	Metro	1-24	Т-Т, К, З, Я	нд	нд	нд
	LumiNet-SR	8	Т-Т	1	нд	60-95
	LumiNet-MR	8	Т-Т	1	нд	140-160
	LumiNet-LR	8	Т-Т	3/5/8	нд	140-90
Eonyx	SM 9600	нд	Т-Т, К, З	1	нд	40
Ericsson	Erion Networker	нд	Т-Т,Т-МТ,К2	1	17/14	нд
Fujitsu	Flashwave Metro	нд	Т-Т	1	нд	60
	Flashwave 320	нд	Т-Т, Т-МТ	нд	нд	нд
IBM Corp.	9729-001	нд	Т-Т	1	нд	40, 50
	9729-041	нд	Т-Т	1	нд	40, 50
ITC	OM/9000/ 25-8/16	нд	нд	1	нд	50
Lucent	OLS 40G	На заказу	Т-Т, К	3, 8	нд	120, 80
	OLS 80G	На заказу	Т-Т, К, К2	3, 8	нд	120, 80
	OLS 400G	8	Т-Т, К2, К4	8	нд	80
Marconi	PLT 16/40	4/8	Т-Т,Т-МТ,К2	1/ нд	нд	нд
	PMA 8/32	нд	Т-Т,Т-МТ,К2	1/ нд	нд	нд
NEC	SpectralWave	4	Т-Т	1/2/5/8	22-40	80-160
	SpectralWave	8	Т-Т	1/2/5/8	22-40	80-160
Nokia	STM-16/WDM	0	Т-Т, К, К2	нд	нд	нд
Nortel	S/SDMS TN	нд	Т-Т, К2	нд	нд	нд
	S/SDMS TN-DM	нд	Т-Т, К2, К4	нд	нд	нд
Osicom	Gigamux	нд	Т-Т	1	нд	80
	Gigamux EPC	нд	Т-Т	1	нд	80
Pirelly	T31-BDS	нд	Т-Т, К	3, 4	нд	100
	T31-MWS	нд	Т-Т, К	5	нд	100
	T31-OMDS 16	нд	Т-Т	1	нд	88
	WaveMux	12	Т-Т, К, Я	5, 80	нд	120
Siemens	WL8/16/32*	нд	Т-Т, К2	5	нд	120-140
	WLS	нд	Т-Т	8/5	нд	120-140
	MTS	нд	Т-Т	нд	нд	120

Таблиця В.3

Компанія	Модель	Секція- дистанція	Швидкість на вході, (М/Г) біт/с	Рознесення сучасних, ГГц	Діапазон або смуга, ТГц або нм	Допуск по дисперсії, пс/нм
ADVA (Cisco)	Abraxas	5	45-155М	нд	нд	нд
	4/8 OCM	50	10 М-1,25Г	нд	нд	нд
Alcatel	1640 WM	640	100М-10Г	100	196,0-192,1	12800
	1686 WM	640	100 М-2,5Г	200	196,0-192,1	12800
	1690 WM	48	100 М-2,5Г	200	195,7-192,3	нд
	1610 OA LTH	нд	до 2,5 Г	200	195,7-192,3	нд
Cambrian (Nortel)	OPTera Metro	50	до 2,5 Г	нд	нд	нд
	OPTera LH	нд	0,622/2,5/10Г	50/100	1528-1603	нд
Ciena	Multiwave 1600	600	50 М-2,5 Г	100	1540-1560	нд
	Sentry 1600	480-1000	140 М-2,5 Г	100	193,7-192,1	нд
	Sentry 4000	450-500	2,5 Г	50	нд	нд
	Firefly	65	155 М-2,5 Г	100	нд	нд
ECI	Metro	Змінна	140 М-2,5 Г	200	нд	нд
	LumiNet-SR	60-95	34 М-2,5 Г	100/200	1529-1960	1800
	LumiNet-MR	140-160	34 М-2,5 Г	100/200	1529-1560	3000
	LumiNet-LR	420-720	34 М-2,5 Г	100/200	1529-1560	14000
Eonyx	SM 9600	40	100-155 М	нд	нд	нд
Ericsson	Erion Networker	нд	140 М-2,5 Г	100	192,3-193,8	10200
Fujitsu	Flashwave Metro	60	100 М-10 Г	нд	нд	нд
	Flashwave 320	400	100 М-10 Г	нд	нд	нд
IBM Corp.	9729-001	40, 50	16 М-1 Г	125	194,7-192,3	нд
	9729-041	40, 50	16 М-1 Г	125	нд	нд
ITC	OM/9000/ 25-8/16	50	10 М-622 М	нд	нд	нд
Lucent	OLS 40G	360, 640	155 М-10 Г	200	193,5-192,1	нд
	OLS 80G	360, 640	155 М-10 Г	100	193,6-192,1	нд
	OLS 400G	640	2,5-10 Г	100	195,6-187,6	нд
Marconi	PLT 16/40	160/840	155 М-10 Г	100/200	нд	нд
	PMA 8/32	80/ нд	34 М-2,5/10 Г	100/200	нд	нд
NEC	SpectralWave	160-640	2,5-10 Г	100	C/C+L	нд
	SpectralWave	160-640	2,5-10 Г	50	C+L	нд
Nokia	STM-16/WDM	300	2,5 Г	нд	нд	нд
Nortel	S/SDMS TN	нд	2,5 Г-10 Г	200	нд	нд
	S/SDMS TN-DM	нд	2,5 Г-10 Г	100	нд	нд
Osicom	Gigamux	80	51 М-2,5 Г	нд	нд	нд
	Gigamux EPC	80	51 М-2,5 Г	нд	нд	нд
Pirelly	T31-BDS	300-400	140 М-10 Г	200	195,5-192,5	нд
	T31-MWS	500	140 М-2,5 Г	200	1534-1561	нд
	T31-OMDS 16	88	140 М-2,5 Г	100	195,3-192,1	1600
	WaveMux	600-6000	2,5 Г	100	196,0-192,1	10000
Siemens	WL8/16/32*	1200	2,5-10 Г	100	нд	нд
	WLS	1200	2,5-10 Г	00	нд	нд
	MTS	600-1000	2,5-10 Г	50/100	нд	нд

Таблиця В.4

Компанія	Модель	Тип волокон	Канал управління, нм/МГц	Тип підтримуваних логічних інтерфейсів	Управління	
					SNMP IP	TMN
ADVA (Cisco)	Abraxas	нд	нд	ATM, E, FE, FDDI, OC3, T3	+	-
	4/8 OCM	нд	нд	ATM, E, FE, FDDI, OC3-OC24	+	-
Alcatel	1640 WM	нд	нд	FDDI, OC-48, 192; STM-16, 64	-	Q,F
	1686 WM	нд	нд	FDDI, OC-48, STM-16	-	Q,F
	1690 WM	SF	нд	ATM/GE/FC/FDDI/ESCON/IP/STM-1/4/16	+	Q,F
	1610 OA LTH	нд	нд	Нд	нд	нд
Cambrian (Nortel)	OPTera Metro	нд	нд	FC,FE,GE,OC-3,12,48	-	-
	OPTera LH	нд	1510/1625	ATM/GE/IP/OC-48/192;STM-1/4/16/64	+/+	Q3
Ciena	Multiwave 1600	SF	2 М, фрейм	OC-3,12,48,48c; STM-16;PDH-1,2; 1.7 Г	+/+	Q3
	Sentry 1600	SF	1310/2	OC-3,12,48,48c; STM-16;PDH;Fast IP	+/+	Q3
	Sentry 4000	нд	1310/2	OC-48,48c; STM-16	+	Q3
	Firefly	нд	1310/2	OC-3,3c,12,12c,48,48c;STM-1,16;PDH;IP	+	Q3
ECI	Metro	нд	1310	OC-3,12,48,48c;STM-1,4,16;PDH	+	+
	LumiNet-SR	SF	1510	ATM;CATV;IP;OC-12,48;PDH;STM-4,16	-	+
	LumiNet-MR	SF	1510	ATM;CATV;IP;OC-12,48;PDH;STM-4,16	-	+
	LumiNet-LR	SF	1510/2	ATM;CATV;IP;OC-12,48;PDH;STM-4,16	-	+
Eonyx	SM 9600	нд	нд	FDDI, ATM, OC-3	-	-
Ericsson	Erion Networker	SF	1510/2	OC-3,12,48;STM-1,4,16;PDH-140	+/+	+
Fujitsu	Flashwave Metro	SF	нд	ATM/FDDI/STM-16,64	+	+
	Flashwave 320	SF	нд	ATM/FDDI/STM-1/4/16,64	+	+
IBM Corp.	9729-001	нд	нд	CL,Escon,FDDI,FE,OC-3,ST	+	-
	9729-041	нд	нд	CL,Escon,FDDI,FE,OC-3,ST	+	-
ITC	OM/9000/ 25-8/16	нд	нд	ATM-OC3,12; ESCON,E,FC,FDDI	+	-
Lucent	OLS 40G	SF/NZDF	1532	OC-3,12,48,192;STM-1,14,16,64	-	+
	OLS 80G	SF/NZDF	1532	OC-3,12,48;STM-1,4,16,64	-	+
	OLS 400G	SF	нд	OC-48,192;STM-1,4,16,64	-	+
Marconi	PLT 16/40	SF	нд	STM-1,4,16,64	нд	нд
	PMA 8/32	SF	нд	ESCON/FC/FDDI/FE/GE/PDH/STM-1,4,16	нд	нд
NEC	SpectralWave	нд	нд	OC-48,192;STM-1,4,16,64	+	+
	SpectralWave	нд	нд	OC-48,192;STM-1,4,16,64,256	+	+
Nokia	STM-16/WDM	нд	нд	PDH-140;STM-1,4,16	-	+
Nortel	S/SDMS TN	нд	нд	OC-48,192;STM-16,64	-	+
	S/SDMS TN-DM	нд	нд	OC-48,192;STM-16,64	-	+-
Osicom	Gigamux	нд	нд	ATM/SONET-OC-3,12,48;FG,GE,HDTV	+	-
	Gigamux EPC	нд	нд	ATM/SONET-OC-3,12,48;FG,GE,HDTV	+	+
Pirelly	T31-BDS	нд	1310	PDH,OC-48,192;STM-16,64	-	+
	T31-MWS	нд	1310	PDH,OC-48;STM-16	-	-
	T31-OMDS 16	нд	нд	PDH,ATM/SDH-OC-3,12,48;STM-1,4,16	-	-
	WaveMux	нд	1480/2	OC-48,STM-16	-	+
Siemens	WL8/16/32*	SF	1480/2	OC-48,192;STM-16,64	-	Q3
	WLS	SF	1480/2	OC-48,192;STM-16,64	-	Q3
	MTS	SF	1480/2	OC-48,192;STM-16,64	-	нд

## Примітки

ADVA (придбана компанією Cisco)  
Cambrian Cambrian Systems Corporatin (придбана компанією NORTEL)  
Ciena Ciena Corporation  
ITC Inrange Technologies Corporation  
Lucent Lucent technologies  
NEC Nippon Electric Corporation  
Nortel Northern Telecom  
Osicom Osicom Technologies Inc.  
Siemens Siemens Telecom Networks

## Позначення

\* TransXpress Infinity WL 8/16/32 допускає 48каналів для STM-16  
\*\* Відстань подвоюється встановленням регенератора  
\*\*\* Використовується електронна система SDH SL256  
з - Топологія «зірка»  
к - Топологія «кільце»  
к2 - Топологія «подвійне кільце із захистом»  
к4 - Топологія «здвоєне подвійне кільце із захистом»  
т-т - Топологія «точка-точка»  
т-мт - Топологія «точка-багато точок»  
я - Топологія «комірка»  
вв/вив - Ввід/вивід каналів на проміжних вузлах  
допуск по дисперсії - Максимально допустиме значення накопиченої дисперсії секції ВОЛЗ





## ДОДАТОК Д

Таблиця Д.1 - Параметри оптичних інтерфейсів апаратури STM-1, STM-4

Параметри	Одиниця вимірювання	Величина			
		WaveStar	Siemens		
Код застосування		L-1.2/L-1.3	L-4.1	L-4.2/L-4.3	JE-4.2/JE-4.3
Діапазон довжин хвиль	нм	1530...1560	1280...1320	1510...1560	1535...1555
Швидкість передачі	Мбіт/с	155,52	622,08		
Лінійний код	Бінарний NRZ, скрембльований				
Передавальний пристрій (еталонна точка S (G.957))					
Тип джерела випромінювання		SLM	Фабрін-Перо з номінальною потужністю випромінювання	Лазерний діод з розподіленим зворотним зв'язком номінальною потужністю випромінювання	Лазерний діод з розподіленим зворотним зв'язком підвищеною потужністю випромінювання
Спектральні характеристики					
Максимальна ширина смуги випромінювання	нм	1	<1,7	<0,5	<0,5
Мінімальний коефіцієнт заглушення бічних мод	дБ	30		>30	>30
Середній рівень оптичного випромінювання, що вводиться у волокно	дБм	+2 ÷ -5	-3 ÷ 0	-3 ÷ +2	+3 ÷ +6 +13 ÷ +16 (з оптичним підсилювачем)
Приймальний пристрій (еталонна точка R (G.957))					
Тип фотоприймача			InGaAs-APD у режимі номінальної чутливості	InGaAs-APD у режимі підвищеної чутливості	InGaAs-APD у режимі номінальної чутливості і з оптичним підсилювачем приймання
Рівень номінальної потужності, що приймається при 10 <sup>-10</sup> BER	дБ	-34	-36	-39	-45
Рівень перевантаження	дБ	-3	-8	-17	-15

## ДОДАТОК Е

Таблиця Е.1 - Параметри оптичних інтерфейсів устаткування SL-16

фірми Siemens

Пара-метри	Одиниця вимірювання	Величина				
Швид-кість передачі	Мбіт/с	2488,32				
Лінійний код	Бінарний NRZ					
Передаючий пристрій (еталонна точка S (G.957, G.691))						
Тип джерела випромінювання		DFB з номінальною потужністю випромінювання		DFB з підвищеною потужністю випромінювання		DFB із зовнішнім модулятором і підвищеною потужністю випромінювання
Діапазон довжин хвиль випромінювання	нм	1293...1328	1510...1560	1293...1328	1510...1560	1530...1560
Спектральні характеристики						
Максимальна ширина смуги випромінювання	нм	<1	<0,6	<1	<0,6	<0,1
Коефіцієнт заглушення бічних мод	дБ	>30	>30	>30	>30	>30
Рівень оптичного випромінювання, що вводиться у волокно	дБм	-3 , 0	-3 , 0	-1 , +2	-1 , +2	+13 , +16 (з оптичним підсилювачем передачі)
Код застосування		L-16,1/S-16,1	L-16,2/L-16,3	JE-16.1	JE-16,2/JE-16,3	LE-16,2/JE-16,3
Приймальний пристрій (еталонна точка R (G.957, G.691))						
Тип фотоприймача		Ge-APD у режимі номінальної чутливості	InGaAs-APD у режимі номінальної чутливості	InGaAs-APD у режимі номінальної чутливості	InGaAs-APD у режимі підвищеної чутливості	InGaAs-APD у режимі підвищеної чутливості
Код застосування		L-16,1/S-16,1	L-16,2/S-16,3	L-16,1/S-16,1	L-16,2/S-16,3	L-16,2/S-16,3
Рівень мінімальної потужності, що приймається	дБм	-27	-28	-27	-29.5	-29,5 -37 (з оптичним підсилювачем приймання)
Рівень перевантаження	дБм	0	-6	-6	-6	-6 -15 (з оптичним підсилювачем приймання)

**ДОДАТОК Ж**

Таблиця Ж.1 - Параметри оптичних інтерфейсів 3AL36.494AA компанії Alcatel

Параметри	Одиниця вимірювання	Величина			
Швидкість передачі	Мбіт/с	STM-16 відповідає G.70 b 7G.958 2488.32			
Діапазон довжин хвиль	нм	1280...1335	1530...1560	1530...1560	1530...1560
Передавальний пристрій (еталонна точка R (G.957))					
Тип джерела випромінювання		SML	SML	SML	SML
Спектральні характеристики					
Максимальна ширина смуги випромінювання на рівні -20 дБ	нм	1	0,5	0,5	0,5
Мінімальний коефіцієнт заглушення бічних мод	дБ		30	30	30
Середній рівень оптичного випромінювання, що вводиться у волокно					
Максимальний	дБм	+2	+4	+4	+2
Мінімальний	дБм	-2	+1	-1	-5
Мінімальний коефіцієнт екстинкції	дБ	10	8,2	8,2	8,2
Приймальний пристрій (еталонна точка R (G.957))					
Рівень номінальної потужності, що приймається при $10^{-10}$ BER	дБм	-27	-29	-29	-29
Рівень перевантаження	дБм	-8	-8	-8	-8

**Примітка** - Для підвищення енергетичного потенціалу системи в апаратурі передбачено застосування волоконно-оптичних підсилювачів (OFA) : на передавальній стороні- підсилювача потужності (Booster) з рівнем вихідної потужності 10; 13; 15 дБм; на приймальній стороні- попереднього підсилювача з коефіцієнтом посилення до 17 дБ при коефіцієнті шуму  $\approx 7$  дБ.





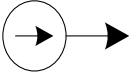
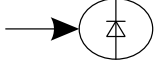
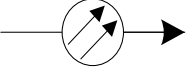

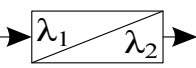
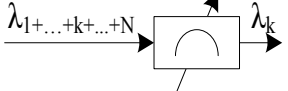
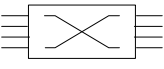

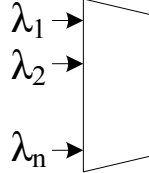
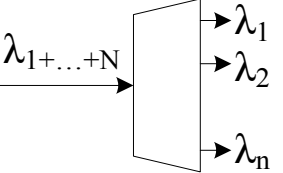
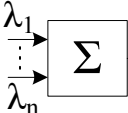
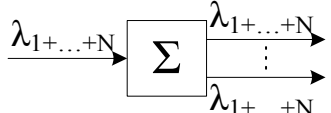
## **ДОДАТОК Н**

Таблиця Н.1 - Основні параметри оптичних підсилювачів типу EDFA

Параметри	Lucent 1712	Lucent 1713	Alcatel 1664	Ciena	IRE-Polus EAU- 200
Діапазон швидкостей модулюючого сигналу, Гбіт/с	2,5-10,0	2,5-10,0	0,6-2,5	0,05-10,0	нд
Діапазон підсилюваних довжин хвиль, нм	1530-1560	1535-1565	1530-1565	1540-1560	1530-1570
Смуга підсилення УСИ, нм	35	35	Нд	нд	нд
Нерівномірність АВХ, дБ	нд	Нд	Нд	±1	нд
Діапазон підсилюваних сигналів, дБм	нд	Нд	Нд	-30...0	нд
Діапазон підсилюваних вхідних сигналів у режимі бустера, дБм	≥-6,0	≥-6,0	-6,0 ... +4,0	нд	нд
Вихідна потужність у режимі бустера, дБм	12, 14, 16	12, 14, 16	10, 13, 15	14, 17	нд
Потужність насичення, дБм	12	10.75	10	11	23
Коефіцієнт малосигнального підсилення, дБ	33, 30, 38	30, 35	Нд	35	42
Чутливість у режимі лінійного підсилювача, дБм	нд	Нд	-29	нд	нд
Чутливість у режимі передпідсилювача, дБм	-30	-30	-37	-30	-30
Поляризаційна чутливість, дБ	0.2-0.5	0.2-0.5	Нд	нд	0.2
Хвильова чутливість, дБ	<1,5	0,6-1,5	Нд	нд	нд
Температурна чутливість, дБ	0,4-1,0	0,4-1,0	Нд	нд	нд
Коефіцієнт шуму, дБ	7,5	8,5	6	5	5,5
Довжина хвилі накачування, нм	980 (1-2)	1480 (1-2)	Нд	980	965
Діапазон робочих температур, °С	0...+65	0...+65	Нд	нд	-30...+65

## ДОДАТОК П

Позначення елементів оптичної мережі

Лазер		Прийомний оптикоелектронний модуль	
Оптичне волокно		Оптичний підсилювач EDFA	
Хвильовий конвертер		Оптичний фільтр	
Оптичний комутатор		Атенюатор	
Пристрій хвильового мультиплексування (MUX), демультиплексування (DEMUX)		 WDM MUX  WDM DMUX	
Оптичний комбайнер, розгалужувач		 	





## ДОДАТОК К

Таблиця К.1 - Параметри модулів (волокна) для компенсації дисперсії

Параметри	Компанія									
	Corning					Lucent Technologies			Fujikura Ltd.	
	DCM-20	DCM-40	DCM-60	DCM-80	DCM-95	DK-40	DK-60	DK-80	15DC-340	15DC-680
Тип модуля										
Довжина лінії <sup>4</sup> , що компенсується км	20	40	60	80	95	40	60	80	20	40
Дисперсія волокна модуля, пс/нм×км	-329±5	-658±10	-988±10	-1317±15	-1564±15	-680±21	-1020±31	-1360±41	-340±10	-680±10
Нахил дисперсії (D), пс/нм <sup>2</sup>	нд	нд	нд	нд	нд	<-1,2	<-1,9	<-2,5	<0,336	<0,726
Внесене згасання, дБ	<3,2	<5,0	<6,8	<8,6	<10,0	<5,2	<7,0	<8,9	<3,1	<5,0
Ефективність волокна (FOM), пс/нм×дБ	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	>180	>180
Ефективність модуля (FOM)*, пс/нм×дБ	102,8	131,6	145,3	153,2	156,4	130,82	145,72	152,82	>110	>140
Середнє значення PMD, пс	<0,8	<1,1	<1,4	<1,5	<1,6	<0,6	<0,75	<0,9	<1,0	<1,4
Значення PDL, дБ (розмах)	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд	нд
Типи модулів, що випускаються	B, C	B, C	B, C	D, C	D, C	107993297	107993305	107993313	F <sup>5</sup>	F <sup>5</sup>
	Sumitomo Electric Industries					Fujikura Ltd.				
Тип модуля	P-DCFM-20	P-DCFM-40	P-DCFM-60	P-DCFM-80	15DC-1020	15-DC1360	15DSC-340	15DSC-680	15DSC-1020	15DSC-1360
Довжина лінії <sup>4</sup> , що компенсується, км	20	40	60	80	60	80	20	40	60	80
Дисперсія волокна модуля, пс/нм×км	-340	-680±11	-1020±16	-1360±21	-1020±20	-1360±20	-340±10	-680±10	-1020±20	-1360±20
Нахил дисперсії (D), пс/нм <sup>2</sup>	нд	<1,2/0,8	<1,8/1,2	<2,4/1,6	<1,086	<1,446	<-0,6	<-1,2	<1,8	<-2,4
Внесене згасання, дБ	нд	<4,4/3,7	<6,1/5,1	<7,8/6,7	<6,9	<8,8	<3,7	<5,9	<8,0	<10,1
Ефективність волокна (FOM), пс/нм×дБ	нд	нд	нд	нд	>180	>180	>160	>160	>160	>160
Ефективність модуля (FOM)*, пс/нм×дБ	нд	>155	>167	>174	>150	>155	>92	>115	>128	>135
Середнє значення PMD, пс	нд	<1,0/0,6	<1,2/0,7	<1,4/0,8	<1,7	<2,0	<1,2	<1,7	<2,0	<2,3
Значення PDL, дБ (розмах)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	нд	нд	нд	нд	нд	нд
Типи модулів, що випускаються	S <sup>3</sup>	S <sup>3</sup>	S <sup>3</sup>	S <sup>3</sup>	F <sup>5</sup>	F <sup>5</sup>	F <sup>5</sup>	F <sup>5</sup>	F <sup>5</sup>	F <sup>5</sup>

**Примітки**

\*- ефективність модуля визначається відношенням дисперсії волокна модуля до внесеного згасання;

1-за індивідуальним замовленням можуть поставлятися модулі з дисперсією волокна до -2040 пс/нм×км (DK-120);

2-параметри, обчислені для номінальних значень внесеного згасання;

3-розміри модуля S-228×202×41 мм;

4-припущення, що використане волокно типу G.652;

5-розміри модуля F-230×250×40 мм

6-параметри, реконструйовані за кривою дисперсії.

## ДОДАТОК Л

**Таблиця Л.1 - Параметри промислових і рекомендованих стандартом ОМ волокон**

Тип волокна	Робоча довжина хвилі, нм	Довжина хвилі нульової дисперсії, нм	Довжина хвилі відсічення кабелю, нм	Дисперсія, пс/(нм.км), не більше, на хвилі		Коефіцієнт згасання, дБ/ км, на хвилі		Крутизна дисперсії, пс/(нм <sup>2</sup> ·км)	Коефіцієнт PMD, пс/√км
				1300 нм	1550 нм	1300 нм	1550 нм		
G.652.A	1310	1310	1260	3,5	18	0,5	0,4	0,093	0,5
G.652.B	1310	1310	1260	3,5	18	0,4	0,35	0,093	0,2
G.652.C	1310	1310	1260	3,5	18	0,4	0,3	0,093	0,5
G.652.D	1310	1310	1260	3,5	18	0,4	0,3	0,093	0,2
G.653.A	1550	1540	1270	-	3,5	-	0,35	0,085	0,5
G.653.B	1550	1540	1270	-	3,5	-	0,35	0,085	0,2
G.654.A	1550	1550	1530	-	20	-	0,22	0,070	0,5
G.654.B	1550	1550	1530	-	22	-	0,22	0,070	0,2
G.654.C	1550	1550	1530	-	20	-	0,22	0,070	0,2
G.655.A	1550	1520	1450	-	3	-	0,35	0,085	0,5
G.655.B	1550	1520	1450	-	5,5	-	0,35	0,085	0,5
G.655.C	1550	1520	1450	-	5,5	-	0,35	0,085	0,2
G.655.D	1550	1520	1450	-	6	-	0,35	0,085	0,2
G.655.E	1550	1520	1450	-	6	-	0,35	0,085	0,2
G.656.A	1550	1560	1450	-	5,5	-	0,35	0,085	0,2
G.657.A	1310	1310	1260	3,5	18	0,4	0,3	0,093	0,2
G.657.B	1310	1310	1260	3,5	18	0,5	0,3	0,093	0,2

## ДОДАТОК М

Таблиця М.1 - Параметри оптичних підсилювачів

Параметри	ВКР-підсилювачі	ВРМБ-підсилювачі	Напівпровідникові ОУ	ОУ, легований ербієм	Параметричні ОУ
Підсилення при малому входному сигналі, дБм	>40	>40	15-30	15-40	16
Нерівномірність АВХ	Низька	Висока	Низька	±1-1- дБ	нд
Ефективність, дБм/мВт	0,08	5.5	28	11	10 <sup>-4</sup>
Вихідна потужність	1 мВт	1 мВт	>0,1 мВт	>0,5 мВт	нд
Потужність насичення	нд	нд	~12 дБм	нд	нд
Перехресні завади	Незначні	Незначні	Значні	Незначні	нд
Динамічні показники	>20 Гбіт/с	<100	20-30 Гбіт/с	>200 Гбіт/с	нд
Широкопasmовість	Десятки нанометрів	<100 МГц	60-100 нм	30-50 нм	5000 ГГц
Коефіцієнт шуму, дБ	~3	>15	5-8	3-4	нд
Чутливість підсилення до поляризації	Значна	Відсутня	0,5-5 дБ	<0,1 дБ	<3-5 дБ
Втрати, що вносяться, дБ	<1	<1	<3-5	<1	нд

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 - Вихідні дані до курсового проектування

Тип оптичного інтерфейсу (код застосування) (додаток Д)	Кількість каналів спектрального ущільнення	Загальна довжина траси L, км	Частотний інтервал, ГГц	Тип волокна	Тип підсилювача	Система WDM
1 WaveStar (L-1.2)	16	250	100	G.652.A	Lucent 1712	Lightwave Microsystems
2 WaveStar (L-1.3)	10	300	200	G.652.B	Lucent 1713	NEL Photonics Devises
3 Siemens (L-4.1)	12	250	100	G.652.C	Alcatel 1664	Lightwave Microsystems
4 Siemens (L-4.2)	14	200	200	G.652.D	Ciena	NEL Photonics Devises
5 Siemens (L-4.3)	10	290	100	G.653.A	IRE-Polus EAU-200	Lightwave Microsystems
6 Siemens (JE-4.2)	8	240	200	G.653.B	Lucent 1712	NEL Photonics Devises
7 Siemens (JE-4.3)	9	210	100	G.654.A	Lucent 1713	Lightwave Microsystems
8 WaveStar (L-1.2)	11	280	200	G.654.B	Alcatel 1664	NEL Photonics Devises
9 WaveStar (L-1.3)	13	230	100	G.654.C	Ciena	Lightwave Microsystems
10 Siemens (L-4.1)	15	220	200	G.655.A	IRE-Polus EAU-200	NEL Photonics Devises
11 Siemens (L-4.2)	17	270	100	G.655.B	Lucent 1712	Lightwave Microsystems
12 Siemens (L-4.3)	18	260	200	G.655.C	Lucent 1713	NEL Photonics Devises
13 Siemens (JE-4.2)	7	300	100	G.655.D	Alcatel 1664	Lightwave Microsystems
14 Siemens (JE-4.3)	6	250	200	G.655.E	Ciena	NEL Photonics Devises
15 WaveStar (L-1.2)	19	200	100	G.656.A	IRE-Polus EAU-200	Lightwave Microsystems
16 WaveStar (L-1.3)	16	290	200	G.657.A	Lucent 1712	NEL Photonics Devises
17 Siemens (L-4.1)	10	240	100	G.657.B	Lucent 1713	Lightwave Microsystems
18 Siemens (L-4.2)	12	210	200	G.652.A	Alcatel 1664	NEL Photonics Devises
19 Siemens (L-4.3)	14	280	100	G.652.B	Ciena	Lightwave Microsystems
20 Siemens (JE-4.2)	10	230	200	G.652.C	IRE-Polus EAU-200	NEL Photonics Devises
21 Siemens (JE-4.3)	8	220	100	G.652.D	Lucent 1712	Lightwave Microsystems
22 WaveStar (L-1.2)	9	270	200	G.653.A	Lucent 1713	NEL Photonics Devises
23 WaveStar (L-1.3)	11	260	100	G.653.B	Alcatel 1664	Lightwave Microsystems
24 Siemens (L-4.1)	13	290	200	G.654.A	Ciena	NEL Photonics Devises
25 Siemens (L-4.2)	15	240	100	G.654.B	IRE-Polus EAU-200	Lightwave Microsystems
26 Siemens (L-4.3)	17	210	200	G.654.C	Lucent 1712	NEL Photonics Devises
27 Siemens (JE-4.2)	18	280	100	G.655.A	Lucent 1713	Lightwave Microsystems
28 Siemens (JE-4.3)	7	230	200	G.655.B	Alcatel 1664	NEL Photonics Devises
29 WaveStar (L-1.2)	6	220	100	G.655.C	Ciena	Lightwave Microsystems
30 WaveStar (L-1.3)	19	270	200	G.655.D	IRE-Polus EAU-200	NEL Photonics Devises

## ДОДАТОК Г

Таблиця Г.1

Характеристика	Alcatel		Ciena		Cisco	Ericsson	Lucent	Marconi	Nortel Networks
	Optinex 1686 WM	Optinex 1640 WM	MultiWave Sentry 1600 і 4000	MultiWave CoreStream	Cisco ONC 15800 Series	Erion linear	WaveStar OLS 400G, 800G и 1.6T	SmartPhotonix PLT40, 80 и 160	OPTera Long Haul 160
	Вхідні інтерфейси								
OC-192/STM-64	.	.	o	.	.	.	.	.	.
OC-48/STM-16	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Інші	Від 100 до 1250 Мбіт/с	Від 100 Мбіт/с	Від 50 Мбіт/с до 1.7 Гбіт/с	OC-12/STM-4	OC-12/STM-4	Від 100 Мбіт/с, включаючи Gigabit Ethernet	Від 45 Мбіт/с, включаючи Gigabit Ethernet	Від 50 Мбіт/с, включаючи Gigabit Ethernet	OC-12/STM-4, Gigabit Ethernet
Підтримувані сервіси (основні)	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH	IP, ATM, SDH
Максимальна кількість спектральних каналів (на одне волокно)	32 (планується до 64)	80 (планується до 240)	16 (модель 1600) 40 (модель 4000, планується до 96)	192	64	32	160 (по 10 Гбіт/с) 640 (по 2,5 Гбіт/с)	160	160
Максимальна ємність (на одне волокно)	320 Гбіт/с	800 Гбіт/с	100 Гбіт/с	До 2 Тбіт/с	640 Гбіт/с	320 Гбіт/с	1,6 Тбіт/с	1,6 Тбіт/с	1,6 Тбіт/с
Використовуваний спектр	C і (при розширенні до 64 каналів) L діапазони	1260-1575 нм	1250-1600 нм	1250-1600 нм	1529-1602 нм	1260-1580 нм	C і L діапазони	C і L діапазони	C і L діапазони
Частотний план (рознесення несучих)	100 і 200	50	50 і 100	25 і 50	100	50 і 100	50 і 100	50 і 100	50 і 100
Дальність безрегенераційної передачі, км	900-1000	Більше 900	800 (модель 1600) 560 (модель 4000)	500	До 500	600	1000 (при 800 Гбіт/с), 700 (при 1,6 Тбіт/с)	До 700 (40 каналів ємністю 10 Гбіт/с)	До 4000