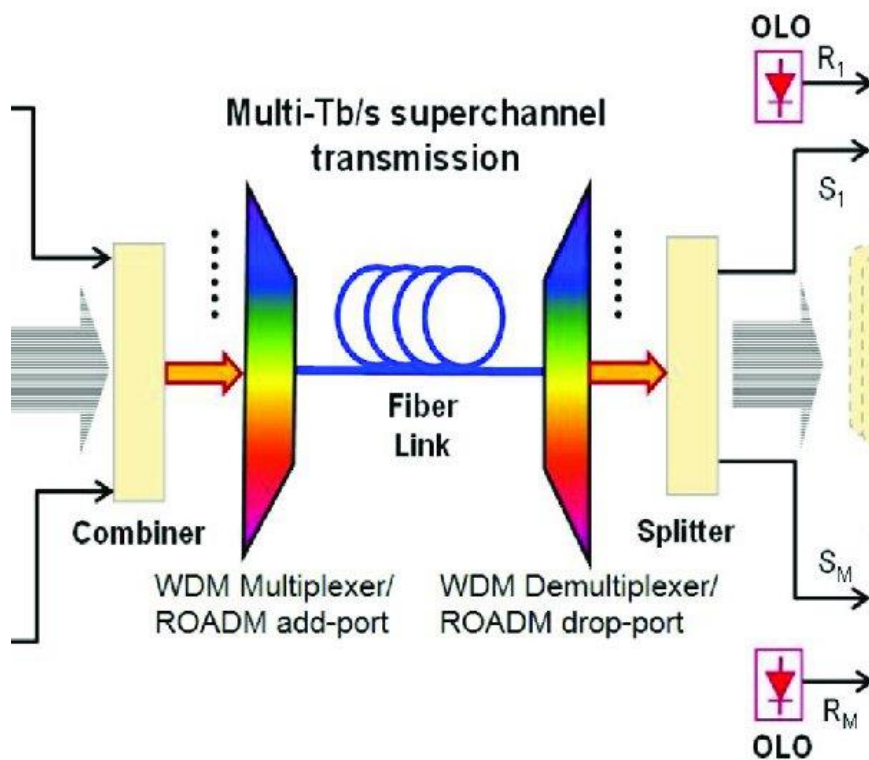


**Розрахунок функціональних параметрів  
оптичних систем та мереж  
Практикум  
для студентів спеціальності 172 –  
«Телекомунікації та радіотехніка»**



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Розрахунок функціональних параметрів  
оптичних систем та мереж  
Практикум  
для студентів спеціальності  
172 – «Телекомунікації та радіотехніка»**

**Електронний практикум  
комбінованого (локального та мережного) використання**

Вінниця  
ВНТУ  
2023

**УДК 621.0**  
**B90**

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 24.11.2022 р.)

Рецензенти:

**В. Г. Крижановський**, доктор технічних наук, професор  
**С. М. Захарченко**, кандидат технічних наук, професор  
**Д. Х. Штофель**, кандидат технічних наук, доцент

**Васильківський, М. В.**

**B90** Розрахунок функціональних параметрів оптичних систем та мереж. Практикум для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»: електронний практикум комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / М. В. Васильківський, Г. Г. Бортник, В. М. Кичак. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 75 с.

Практикум є частиною навчально-методичного комплексу та призначений для підготовки та проведення практичних занять. У практикумі міститься необхідний теоретичний матеріал, методичні рекомендації та методика виконання розрахунку параметрів оптичних систем та мереж.

**УДК 621.0**

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
1 ОПТИЧНІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ .....	9
1.1 Структура оптичної телекомунікаційної системи .....	9
1.2 Вимоги до компонентів оптичних систем .....	10
1.3 Технології мультиплексування та демультиплексування.....	11
1.4 Оптичні мультиплексори введення/виведення каналів.....	12
1.5 Технологія підсилення потужності оптичних сигналів .....	13
1.6 Основні параметри оптичного підсилювача .....	17
1.7 Визначення залежності коефіцієнта підсилення від зміни потужності вхідного сигналу.....	18
1.8 Пристрої передавання оптичних сигналів .....	20
1.9 Пристрої приймання оптичних сигналів .....	20
1.10 Волоконно-оптичні лінії передавання .....	21
2 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ .....	23
2.1 Розрахунок параметрів оптичних волокон .....	23
2.2 Оптичні кроси та параметри роз'ємних з'єднань .....	27
2.3 Визначення енергетичного потенціалу системи передавання та нормування експлуатаційного запасу .....	28
2.4 Розрахунок дисперсійних характеристик системи .....	33
2.5 Розрахунок бюджету потужності .....	37
2.6 Результати розрахунку основних характеристик оптичної телекомунікаційної системи.....	39
3 РОЗРАХУНОК ДОВЖИНИ РЕГЕНЕРАЦІЙНОЇ ТА ПІДСИЛЮВАЛЬНОЇ ДІЛЯНОК ТРАКТУ ПЕРЕДАВАННЯ.....	42
3.1 Визначення необхідної якості передачі системи зв'язку .....	42
3.2 Визначення максимальної довжини ділянки оптичного підсилення ...	42
3.3 Визначення максимальної довжини регенераційної ділянки .....	46
4 РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗВ'ЯЗКУ .....	50
4.1 Визначення оптичних інтерфейсів (стиків) на основі рекомендацій МСЕ-Т.....	50
4.2 Вибір топології сегмента транспортної мережі .....	53
4.3 Проектування ділянки транспортної мережі за енергетичними параметрами.....	55
4.4 Визначення завадозахищеності ділянки транспортної мережі .....	69
5 МОДЕЛЮВАННЯ СЕГМЕНТА ОПТИЧНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ .....	71
5.1 Особливості роботи в САПР OptiSystem .....	71
5.2 Результати моделювання 4-канальної волоконно-оптичної CWDM-системи передачі з каналом контролю потужності.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	74

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АРП – автоматичне регулювання підсилення  
ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку  
ВОП – волоконно-оптичний підсилювач  
ВОСП – волоконно-оптична система передачі  
ЕКД – елементарна кабельна ділянка  
ЗКЗІ – засіб криптографічного захисту інформації  
КЛЗ – кабельна лінія зв'язку  
КП – кінцевий пункт  
НЗІ – несанкціоноване знімання інформації  
НСД – несанкціонований доступ  
ОВ – оптичне волокно  
ОК – оптичний кабель  
ОТКС – оптична телекомунікаційна система  
ОЦТС – оптична цифрова телекомунікаційна система  
ПЕМВН – побічні електромагнітні випромінювання та наведення  
ПОМ – передавальний оптичний модуль  
ПП – підсилювальний пункт  
ПрОМ – приймальний оптичний модуль  
AES – стандарт симетричного алгоритму блокового шифрування  
BER – коефіцієнт бітових помилок  
CWDM – грубий спектральний поділ каналів з кроком між каналами 20 нм  
DCF – оптичне волокно для компенсації дисперсії  
DCM – модуль компенсації дисперсії  
DFB-LD – лазерний діод з розподіленням зворотним зв'язком  
DP-QPSK – квадратурна фазова маніпуляція з подвійною поляризацією  
DWDM – щільний спектральний поділ каналів з кроком між каналами в десяті частки нанометра  
EDFA – волоконно-оптичний підсилювач на оптичному волокні з домішками ербію  
EPON – пасивна оптична мережа, оптимізована для технології Ethernet  
FPLD – лазерний діод Фабрі-Перо  
FSO – система атмосферного оптичного зв'язку  
FTTB – оптичне волокно для бізнес-підключень  
GEPON – гігабітова пасивна оптична мережа, оптимізована для технології Ethernet  
GPON – гігабітова пасивна оптична мережа  
ITU – Міжнародний союз електрозв'язку – міжнародна організація, що визначає рекомендації в галузі телекомунікацій та радіо  
ITU-T – сектор стандартизації електрозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку  
NRZ – спосіб лінійного кодування цифрових сигналів

OCDMA – множинний доступ із кодовим поділом в оптичних каналах зв'язку  
ONMS – система керування оптичною мережею  
ONT – оптичний мережний термінал  
OSI – модель взаємозв'язку відкритих систем  
OSNR – відношення «сигнал – шум»  
OTAU – модуль доступу для тестування оптичного волокна  
OTDM – часове мультиплексування оптичних каналів  
OTDR – оптичний рефлектометр у часовій ділянці  
OTN – оптична транспортна мережа  
PMD – поляризаційна модова дисперсія  
PM-QPSK – квадратурна фазова маніпуляція з поляризаційним мультиплексуванням  
PON – пасивна оптична мережа  
QDK – квантове розподілення ключа  
QPSK – квадратурна фазова маніпуляція  
RIN – відносна інтенсивність шуму лазерного діода  
RSA – асиметричний криптографічний алгоритм  
Un – модуль дистанційного тестування  
RZ – спосіб лінійного кодування цифрових сигналів  
SAN – мережа зберігання даних  
SFP – промисловий стандарт модульних компактних оптичних трансиверів, що працюють на швидкості передачі до 2,5 Гбіт/с  
SFP+ – промисловий стандарт високошвидкісних модульних компактних оптичних трансиверів, що працюють на швидкості передачі до 10 Гбіт/с  
SMF – одномодове оптичне волокно  
SOA – напівпровідний оптичний підсилювач  
SONET – синхронна оптична мережа передачі даних  
TDM – часове мультиплексування оптичних каналів  
VLAN – віртуальна локальна мережа  
VPN – віртуальна приватна мережа  
WDM – спектральний поділ каналів  
XFP – промисловий стандарт високошвидкісних модульних компактних оптичних трансиверів, що працюють на швидкості передачі до 10 Гбіт/с

## ВСТУП

Нині волоконно-оптичні комунікації використовуються в мережах практично всіх масштабів: корпоративних мереж, мереж доступу, міських, регіональних мереж, у міжміських лініях зв'язку, трансконтинентальних лініях зв'язку. При збільшенні довжини тракту передавання та підвищенні швидкості передачі, підвищуються переваги технології волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) порівняно з іншими. Зростання швидкості передачі у довгих лініях зв'язку показує відсутність альтернативних варіантів ВОЛЗ. Застосування ербієвих підсилювачів відкрило нову еру ВОЛЗ. З'явилась можливість безрегенераційного передавання даних на відстані понад 1000 км [7]. Зараз можна стверджувати, що рішення на основі EDFA перевірені практикою, надійні, порівняно недорогі, досить ефективні і не мають кращих альтернатив під час будівництва довгих ВОЛЗ з відстанню між підсилювачами 60–120 км.

Системи з багатомодовими оптичними волокнами ММФ тривалий час були основою довгих ВОЛЗ, зокрема градієнтне багатомодове оптичне волокно (G.651), світлодіоди на основі арсеніду галію з робочою довжиною хвилі 850 нм. Оскільки втрати в оптичному волокні на цій довжині хвилі були значними (3 дБ/км) тому лінії зв'язку будувалися з великою кількістю щільно розташованих регенераторів. З появою одномодового оптичного волокна (яке сьогодні відоме як стандартне одномодове волокно, SSF або волокно G.652) стало зрозуміло, що значно перспективніше використовувати довжину хвилі 1300 нм з меншими втратами та дисперсією. Використання одномодового волокна дозволяє передавати оптичні сигнали з більшою швидкістю та на більші відстані. Спочатку було складно реалізувати практично перевагу нового типу волокна. Але покращення технологій зварювання одномодового волокна, серійне виробництво лазерів на довжині хвилі 1300 нм та розвиток технології виробництва одномодового волокна сприяли швидкому технологічному старінню систем довгих магістралей на основі багатомодового волокна. Мінімальні значення втрат у стандартному одномодовому волокні дорівнюють 0,2–0,25 дБ/км на довжині хвилі в діапазоні 1550 нм. Мінімальна хроматична дисперсія досягається на довжині хвилі 1310 нм. Для забезпечення високої швидкості передачі на значні відстані потрібно звести до мінімуму втрати та дисперсію, причому на одній і тій самій робочій довжині хвилі. В результаті було створено оптичне волокно зі змщеною дисперсією (DSF, G.653), яке має нульову дисперсію на довжині хвилі 1550 нм, що стало ефективним для організації одноканальної передачі даних. Однак технології, що згодом з'явилися, – DWDM і EDFA – виявили функціональні недоліки оптичного волокна DSF при використанні в багатоканальних системах, зокрема: чотирихвильове змішування, ефект появи додаткових паразитних сигналів на частотах, що є комбінацією

робочих частот, які також підсилюються, проходячи через каскади підсилювачів EDFA. Цей ефект стає помітним при багатохвильовому режимі передачі потоків даних. В технології WDM подолано багато обмежень і технологічних труднощів, що були присутні при використанні технології TDM. Для підвищення пропускної спроможності замість збільшення швидкості передачі в єдиному груповому каналі при використанні технології TDM технологія WDM дозволяє збільшувати кількість каналів (довжин хвиль), що застосовуються в системах передачі.

Технологія WDM застосовується переважно на лініях зв'язку великої довжини з широкою смугою пропускання. Мережі міського та регіонального масштабу та системи кабельного телебачення також є потенційними кандидатами для впровадження технології WDM. Потреба в ефективному використанні прокладеного кабелю привела до значного збільшення кількості каналів, що передаються по одному волокну, та зменшення відстані між ними. Теоретично можлива передача в будь-якому діапазоні довжин хвиль, проте практичні обмеження залишають для використання в системах WDM вузький діапазон навколо довжини хвилі 1550 нм. Але навіть цей діапазон надає величезні можливості для передачі даних. По-перше, стають винятково важливими багато властивостей оптичних компонентів і характеристики оптичного кабелю. По-друге, вимоги до архітектури мережі та вибору компонентів систем WDM є жорсткішими, ніж, наприклад, для систем TDM рівня STM-16. Спільне застосування технологій TDM і WDM дозволяє значно розширити спектр послуг, залишаючи практично без змін більшу частину станційного телекомунікаційного обладнання. Головною відмінністю систем WDM від систем TDM є те, що у системі WDM передача відбувається на кількох довжинах хвиль. Система WDM у загальному випадку складається з одного або декількох лазерних передавачів, мультиплексора, одного або декількох підсилювачів EDFA, мультиплексорів введення/виведення, оптичного волокна (кабелю), демультимплексора та відповідної кількості фотоприймачів, а також електронного обладнання, яке обробляє дані відповідно до задіяних протоколів зв'язку та системи мережного керування [7]. Для того, щоб компоненти систем WDM були взаємозамінними і могли взаємодіяти між собою, потрібно використовувати стандартний набір робочих частот джерел оптичних сигналів. Стандартизацією систем WDM займається міжнародний орган стандартизації – сектор стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку ITU-T (International Telecommunications Union, ITU) у рамках дослідницької групи SG15 з транспортних мереж, систем та обладнання (Study Group 15 on Transport Networks, Systems and Equipment). Специфікація ITU-T G.692 для оптичних інтерфейсів багатоканальних систем з оптичними підсилювачами визначає стандартний набір частот – частотний план систем WDM. Залежно від каналного плану, що використовується, в системах хвильового ущільнення, прийнято виділяти три типи мультиплексорів: WDM –



мультиплексування з поділом за довжиною хвилі; DWDM – щільне мультиплексування з розподілом за довжиною хвилі; HDWDM – високощільне мультиплексування з поділом за довжиною хвилі. Для кожного типу мультиплексорів характерні свої особливості.

Системи WDM з кроком (рознесенням) каналів за частотою  $\geq 200$  ГГц дозволяють здійснювати мультиплексування трохи більше 16 каналів.

Системи HDWDM з кроком (рознесенням) каналів за частотою  $\leq 50$  ГГц дозволяють здійснювати мультиплексування більше 64 каналів. Поява сучасної технології WDM, як і будь-якої нової технології, одночасно зі значними перевагами принесла нові проблеми. Основною проблемою для операторів систем WDM є забезпечення надійної та стабільної роботи станційного та лінійного телекомунікаційного обладнання. Дуже важливим стає контроль якості оптичних характеристик та поведінки системи, починаючи від виробництва компонентів та завершуючи етапом системної інтеграції. Такий контроль гарантує введення сучасної системи оптичного зв'язку в експлуатацію з запланованими параметрами та тривалу й стійку її роботу. Незважаючи на всі складнощі, що зустрічаються на шляху проектування та побудови сучасних систем зв'язку (наприклад, систем хвильового ущільнення), їх застосування економічно виправдане, і, на думку багатьох фахівців, саме в цьому напрямку збільшуватиметься пропускна спроможність мереж зв'язку.

Системи DWDM з кроком (рознесенням) каналів за частотою 100 ГГц, дозволяють здійснювати мультиплексування трохи більше 64 каналів.

# 1 ОПТИЧНІ КОМПОНЕНТИ СУЧАСНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1 Структура оптичної телекомунікаційної системи

Узагальнена структурна схема оптичної телекомунікаційної системи передачі на основі волоконно-оптичної лінії зв'язку (ВОЛЗ) показана на рис. 1.1 [2, 3].

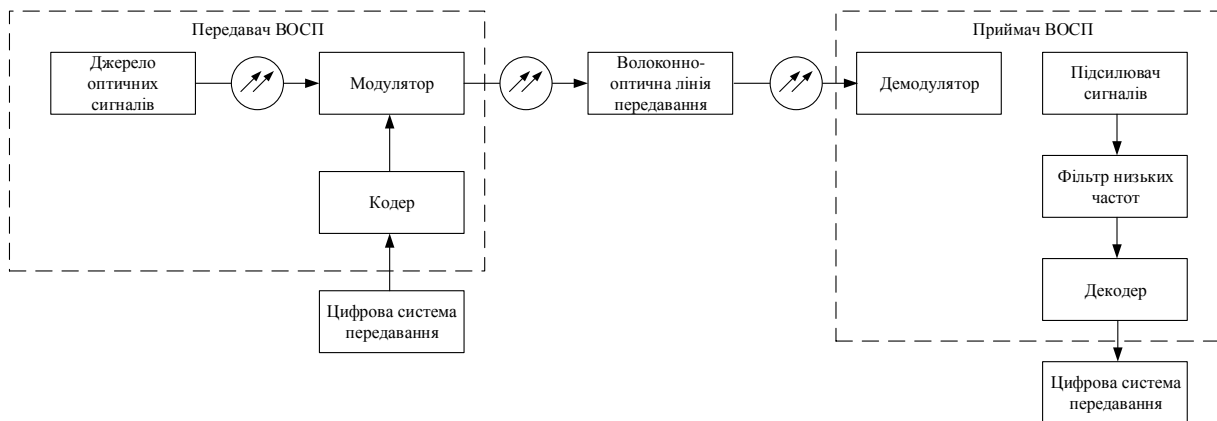


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема волоконно-оптичної системи передачі

Передавач волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) перетворює вхідний електричний сигнал цифрової системи передачі на вихідний оптичний сигнал. Передавач у загальному випадку складається з джерела оптичних сигналів (як правило, лазерний діод Фабрі-Перо або лазерний діод з розподіленим зворотним зв'язком), модулятора і кодувального пристрою (кодера). Лазерний діод є джерелом оптичного когерентного випромінювання. Модулятор здійснює модуляцію оптичної несучої, що генерується лазерним діодом. У низькошвидкісних системах передачі часто застосовують внутрішню модуляцію оптичного випромінювання. Кодувальний пристрій передавача (кодера) призначений для перетворення коду цифрової системи передачі на більш відповідний лінійний код оптичної телекомунікаційної системи.

В оптичних телекомунікаційних системах для передачі сигналу найчастіше використовується волоконнооптична лінія зв'язку на основі оптичних волокон у складі оптичного кабелю [2, 5]. Також можлива побудова атмосферних оптичних телекомунікаційних систем (FSO), в яких передавання даних здійснюється через відкритий простір (атмосферу) [4, 7].

Приймач волоконно-оптичної системи передачі перетворює оптичний сигнал, що надходить на його вхід, у вихідний електричний сигнал.

Приймач складається з фотодетектувального пристрою (як правило, рп-фотодіод або лавинний фотодіод), що безпосередньо перетворює потужність оптичного випромінювання в електричний струм; підсилювача слабких електричних сигналів; фільтра нижніх частот для усунення високочастотних шумів і декодувального пристрою (декодера), який виконує декодування інформаційних даних.

## **1.2 Вимоги до компонентів оптичних систем**

Основна вимога до компонентів сучасних оптичних мереж зв'язку полягає в тому, що вони мають однаково опрацьовувати всі канали вздовж усієї оптичної лінії передавання. Для цього потрібно ретельно здійснювати вибір оптичних передавачів, мультиплексорів, демультимплексорів, підсилювачів та волокна. Усі оптичні характеристики пасивних і активних компонентів мережі – втрати, що вносяться, втрати на відображення, дисперсія, поляризаційні ефекти і т. д., мають вимірюватися як функції довжини хвилі в усьому діапазоні довжин хвиль, що використовується для передачі в системі зв'язку. У системах WDM часто використовують значно складніші пристрої, ніж у системах з однією робочою довжиною хвилі, і проводити тестування характеристик таких пристроїв набагато складніше. У мультиплексорах, демультимплексорах, вузькосмугових фільтрах систем DWDM використовуються тонкоплівкові фільтри, зварні біконічні розгалужувачі BFT (Fused Biconic Tapered Coupler), ґратки на основі масиву хвилеводів AWG (Array Waveguide Grating), волоконні берегові ґратки [7]. Потрібно дослідити вплив активних компонентів (особливо оптичних підсилювачів) та взаємної інтерференції каналів на цілісність передаваних сигналів в тракці передавання для мінімізації потенційної можливості їх несприятливого впливу на якість роботи телекомунікаційного обладнання. Незважаючи на те, що всі матеріали та компоненти при виробництві тестуються на відповідність стандартам, також можливе погіршення їх характеристик при безпосередньому встановленні в польових умовах. При об'єднанні окремих компонентів в єдину систему невеликі відмінності їхніх характеристик можуть накопичуватися та непередбачуваним чином впливати на параметри мережі загалом. Для забезпечення гарантованої надійності мережі потрібно виконувати тестування не лише кожного компонента, а й усієї системи. Тестування компонентів може спричинити багато складнощів. Різниця довжин хвиль сусідніх каналів у системах WDM дуже мала, і параметри багатьох компонентів (наприклад, мультиплексорів) мають відповідати межах допустимих відхилень. При великій кількості каналів спектральний діапазон виходить досить широким, і підтримка близьких значень параметрів для всіх каналів (коефіцієнта підсилення, дисперсії, рівня шумів, що вносяться, тощо) стає досить складним завданням.

### 1.3 Технології мультиплексування та демуплексування

Сучасні оптичні мультиплексори створюються переважно на основі тонкоплівкових фільтрів і рідше – на матрицях хвилеводних дифракційних решіток та волоконних брегівських ґратках. При подальшому збільшенні щільності розміщення каналів у системах WDM і посиленні вимог до оптичних пристроїв MUX/DEMUX, мабуть, змінюватиметься і спектр використовуваних технологій. Тонкоплівковий фільтр складається з декількох шарів прозорого діелектричного матеріалу з різними показниками заломлення, послідовно нанесених один за одним на оптичну підкладку. На кожній межі поділу між шарами через різницю їх показників заломлення частина падаючого світлового пучка відбивається назад. Відбита оптична хвиля підсилює або зменшує падаючу хвилю (відбита хвиля інтерферує з падаючою) залежно від довжини хвилі. Належно підібравши показник заломлення і товщину кожного шару, можна отримати фільтр, який пропускатиме будь-який заданий діапазон довжин хвиль і відбиватиме всі інші [1]. Методи вибору параметрів та технологія нанесення діелектричних шарів добре відомі в оптичній промисловості десятки років. Вибір діелектричних матеріалів обмежений, оскільки багато матеріалів з потрібними оптичними властивостями мають низькі фізичні якості. У загальному випадку, чим жорсткіші вимоги до фільтра, тим більше шарів потрібно нанести на підкладку. Незважаючи на складності, незначно змінюючи процес виробництва, можна створювати недорогі фільтри з різними спеціальними спектральними властивостями [2].

У мультиплексорах і демуплексорах зазвичай використовуються одноступінчасті тонкоплівкові фільтри, кожен з яких виділяє з групового сигналу (або додає в нього) один канал. Фільтри розташовуються під нахилом до оптичної осі, щоб відбите світло не потрапляло назад у систему. Нахил розташування фільтрів змінює ефективну товщину шарів і змінює, таким чином, смугу пропускання, що потрібно враховувати при проектуванні фільтрів. Для обробки багатохвильових сигналів використовують багатоступінчасті системи фільтрів, в яких оптичні сигнали, відбиті від кожного фільтра, потрапляють на вхід наступного фільтра, що забезпечує вирівнювання їх частотної позиції [1]. Тонкоплівкові фільтри мають досить вузьку смугу пропускання та використовуються у системах WDM з 16 або 32 каналами [6]. У сучасних системах із більш щільним розташуванням каналів використовують інші технології на основі інтегральної оптики. Для того, щоб повністю використати її потенціал, потрібні подальші наукові дослідження та конструкторські розробки [9].

Нині інтегральна оптика використовується при виробництві оптичних розгалужувачів, комутаторів, модуляторів, ербієвих та легованих різними рідкісноземельними елементами хвилеводних підсилювачів, брегівських ґрат та інших компонентів систем WDM. Інтегральна оптика успішно застосовується для створення ґраток на основі масиву планарних хвилеводів

(понад 100) різної довжини між двома планарними лінзами-змішувачами AWG [1]. Вхідний сигнал, що містить випромінювання різних довжин хвиль, потрапляє у вхідний розгалужувач. Там він розщеплюється на  $N$  оптичних променів, кожен із яких потрапляє в окремий хвилеводний канал. Всі  $N$  хвилеводних каналів, що утворюють хвилеводну матрицю, мають різну довжину і вносять в сигнал різні фазові зсуви, що залежать від довжини хвилі. Після цього світлові пучки з окремих хвилеводних каналів знову об'єднуються у вихідному розгалужувачі та інтерферують таким чином, що випромінювання з різними довжинами хвиль потрапляє у різні вихідні хвилеводи [7].

Решітки на основі масиву хвилеводів AWG використовуються для того, щоб перерозподіляти сигнали різних довжин хвиль (канали) між двома наборами оптичних волокон [1] або виділяти (демультиплексувати) окремі канали групового сигналу в окремі волокна. Ця технологія зараз стає основною для виробників мультиплексорів та демультиплексорів систем WDM. Завдяки структурі, що легко масштабується, вона може широко застосовуватися в системах з сотнями каналів.

#### 1.4 Оптичні мультиплексори введення/виведення каналів

Мультиплексори та демультиплексори за допомогою різних методів хвильового поділу об'єднують кілька оптичних сигналів для передачі по одному волокну та розділяють ці сигнали після приймання. Однак часто потрібно додати до групового потоку сигнал або виділити з нього лише один канал, не змінюючи при цьому всю структуру сигналу. Для цього застосовують мультиплексори введення/виведення каналів OADM (Optical Add/Drop Multiplexer), які виконують цю операцію, не перетворюючи сигнали всіх каналів в електричну форму і потім навпаки (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Мультиплексор введення/виведення каналів

Для побудови мультиплексорів введення/виведення використовуються технології, описані в [3]. Сьогодні використовуються різноманітні пристрої, що дозволяють додавати та видаляти канали SDH із мереж WDM. Розробляються мультиплексори введення/виведення, конфігурацію яких можна змінювати дистанційно.

## 1.5 Технологія підсилення потужності оптичних сигналів

Підсилювачі на волокні, легованому ербієм, – EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) – за останні кілька років зробили революцію у телекомунікаційній промисловості. Підсилювачі EDFA забезпечують безпосереднє підсилення оптичних сигналів без їх перетворення в електричні сигнали і навпаки, мають низький рівень шумів, а їх робочий діапазон довжин хвиль практично точно відповідає вікну прозорості кварцового оптичного волокна (рис. 1.3, 1.4). Саме завдяки використанню підсилювачів у складі волоконно-оптичних ліній зв'язку мережі на основі систем WDM стали економічно привабливими. Звичайні електронні повторювачі для відновлення рівня сигналу на довгій лінії зв'язку зчитують сигнал з оптичного волокна, перетворюють його на електричні імпульси, підсилюють їх, перетворюють підсилений сигнал знову в оптичну форму і передають далі по лінії зв'язку. На відміну від них, підсилювачі EDFA повністю «прозорі» – не залежать від протоколів, форматів, робочої швидкості передачі та довжини хвилі оптичного сигналу, (у межах зазначених обмежень).

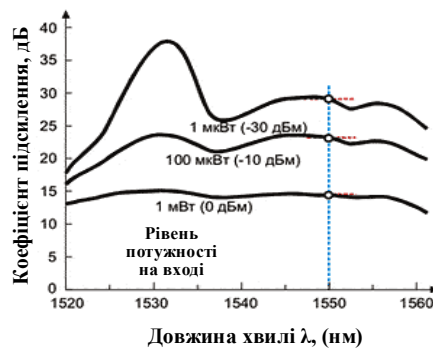


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта підсилення ОП EDFA від довжини хвилі вхідного сигналу за фіксованих значень потужності на вході підсилювача

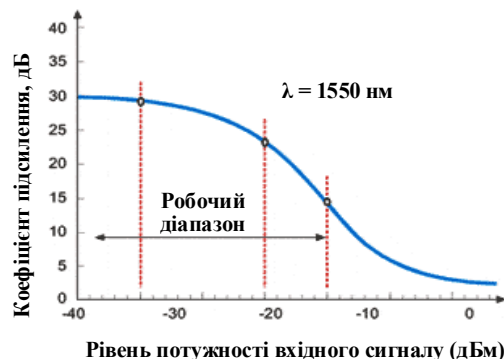


Рисунок 1.4 – Залежність коефіцієнта підсилення ОП EDFA від потужності вхідного сигналу за фіксованого значення довжини хвилі 1550 нм

Оскільки підсилювачі EDFA незалежні від мережного протоколу, їх можна підключати безпосередньо до різного обладнання, наприклад, до комутаторів ATM або компонентів протоколу IP, не побоюючись, що вони завадять один одному. Така гнучкість є одною з основних переваг використання їх у системах WDM. Поряд з цим під час використання підсилювачів EDFA потрібно обов'язково враховувати їх неоднорідне спектральне підсилення та внесений шум за рахунок підсиленої спонтанної емісії ASE (Amplified Spontaneous Emission). Мережі з підсилювачами EDFA мають численні переваги. Пропускнну спроможність таких мереж можна нарощувати економічно та поступово, додаючи нові канали за потреби. Застосування підсилювачів EDFA дозволяє створювати повністю оптичні мережі, в яких обробка сигналу електронними компонентами здійснюється тільки в початковій (де інформація вперше потрапляє в мережу) та кінцевій (де інформація досягає кінцевого одержувача) точках мережі. Кожна лінія зв'язку рівня STM-16 обробляється в системі WDM як окремий канал на окремій довжині хвилі, завдяки чому більшість існуючого мережного обладнання безпосередньо підключається до систем WDM. За рахунок цього початкова вартість введення систем WDM до експлуатації є досить низькою [7]. Найважливіший компонент підсилювача EDFA – лазер накачування, який є джерелом енергії, завдяки чому підсилюється оптичний сигнал. Енергія лазера накачування розподіляється у підсилювачі EDFA між усіма оптичними каналами. Чим більша кількість каналів, тим більша потрібна потужність накачування. У підсилювачах EDFA, розрахованих на велику кількість каналів, часто використовують кілька лазерів накачування. Підсилювач EDFA, показаний на рисунку 1.5, складається з двох активних елементів: активного волокна, легованого ербієм (Er<sup>3+</sup>), та відповідної системи накачування. Для подачі сигналу накачування у волокно потрібний, принаймні, один розгалужувач. Довжина хвилі накачування може бути 980 або 1480 нм. Крім цього, підсилювач типу EDFA може використовувати довжину хвиль накачування в діапазоні 600–700 нм. Для накачування переважно використовують GaAs лазерні діоди, які досягають ефективності накачування близько 11 дБ/мВт.

Існує кілька різних конфігурацій EDFA. На рисунку 1.5 показані три різні конфігурації, що використовуються для накачування.

Рисунок 1.5, а) ілюструє використання одного джерела накачування в прямому напрямку, коли потоки накачування і сигналу поширюються в тому самому напрямку (співспрямоване накачування). Рисунок 1.5, б) показує використання одного джерела накачування у зворотному напрямку (протиспрямоване накачування).

У режимі насичення ефективність перетворення зазвичай більша за використання протиспрямованого накачування, головним чином завдяки тому, що основну роль відіграє підсилена спонтанне випромінювання (ASE). За потреби забезпечення низького рівня шуму, краще використовувати співспрямоване накачування. Існує також двонаправлене

накачування (рис. 1.5, в), коли підсилювач накачується в обох напрямках одночасно. Зазвичай для зустрічного накачування використовується довжина хвилі 1480 нм, а співспрямованого – 980 нм. Це дозволяє використовувати сильні сторони кожного з них.

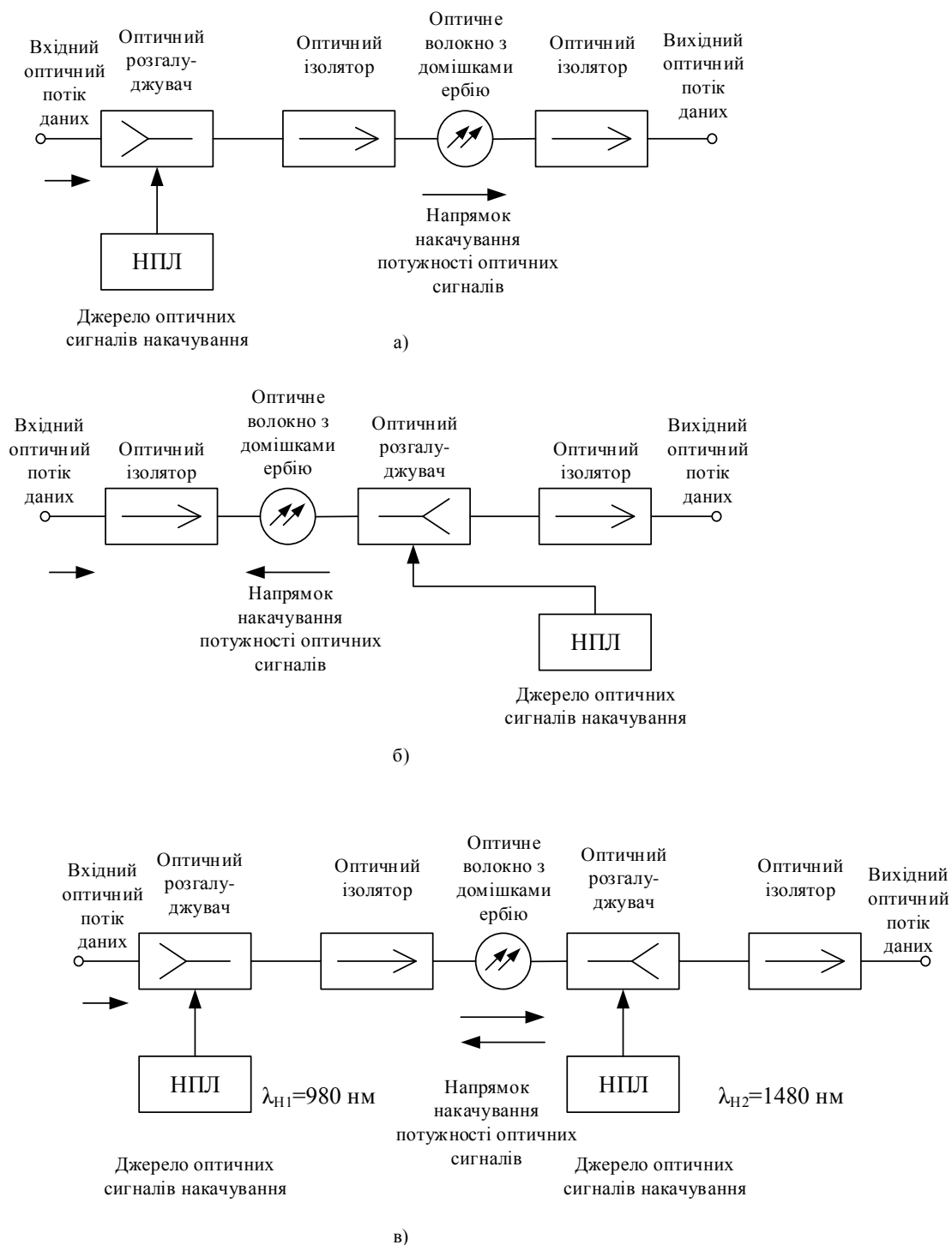


Рисунок 1.5 – Схеми використання підсилювачів типу EDFA:

а) – співспрямоване накачування;

б) – зустрічне накачування; в) – двоспрямоване накачування



Накачування на довжині хвилі 1480 нм має більш високу квантову ефективність, але й вищий коефіцієнт шуму, тоді як накачування на 980 нм може забезпечувати коефіцієнт шуму, близький до квантової межі. Зазвичай підсилювач типу EDFA з одним накачуванням забезпечує вихідну потужність порядку +16 дБм у режимі насичення та коефіцієнт шуму 5–6 дБ у режимі малосигнального підсилення.

Якщо одночасно використовуються два накачування, то можна очікувати збільшення вихідної потужності до +26 дБм. Низьке, близьке до квантової межі значення коефіцієнта шуму можна підтримувати при багатокаскадному варіанті підсилювача. При використанні такої схеми один ізолятор міститься відразу після першого каскаду підсилення (який, зазвичай, визначає коефіцієнт шуму) для захисту від погіршення показників першого каскаду під дією ASE, яка може поширюватися від другого каскаду у зворотному напрямку [7]. Дещо інший напрямок досліджень – підсилення за рахунок стимульованого ефекту розсіювання Рамана (також відомого як вимушене комбінаційне розсіювання) у звичайному кварцовому волокні. Цей метод через свою природу має низький шум і забезпечує широкий вибір робочого діапазону довжин хвиль. Раманівські підсилювачі (Raman amplifiers) дозволяють збільшувати кількість каналів в існуючих лініях зв'язку без заміни вже встановлених EDFA. Вони можуть успішно застосовуватись у підводних лініях середньої довжини без повторювачів (довжиною близько 300 км), де встановлення підсилювачів EDFA потребує великих витрат. Однак у раманівських підсилювачах виникає значна перехресна модуляція між робочими каналами, що обмежує їх застосування або одноканальними системами, або системами WDM з дуже великою кількістю каналів, де вплив такої модуляції усувається за рахунок усереднення. Крім того, раманівські підсилювачі мають певні недоліки, пов'язані з нелінійними ефектами та залежністю від поляризації. З урахуванням низького рівня перетворення сигналу та ефекту розсіювання Рамана в кварцовому волокні їх застосування обмежено вузьким колом специфічних областей, принаймні, на даний момент.

Нині розробляються напівпровідникові оптичні підсилювачі SOA (Semiconductor Optical Amplifiers), в яких випромінювання фотонів стимулюється рекомбінацією електронів і дірок у напівпровіднику за допомогою прямої інжекції струму (а не зовнішнім накачуванням оптичним випромінюванням, як у разі волокна, легованого ербієм). Такі підсилювачі становлять значний інтерес, оскільки дозволяють досягти високої ефективності підсилення та гнучкості робочої довжини хвилі, нехай і з досить високим коефіцієнтом шуму (зазвичай на 5–6 дБ більше, ніж у EDFA, в основному за рахунок неминучих втрат на стику активного шару з волокном). Як і в раманівських підсилювачах, у SOA виникає значна перехресна модуляція між робочими каналами, що перешкоджає їх застосуванню в системах DWDM. Однак ця ж перехресна модуляція може стати перевагою під час використання підсилювачів SOA для комутації або

перетворення довжин хвиль. Для підсилювачів SOA, як і для EDFA, характерною є проблема стикування з волокном, оскільки товщина активного шару напівпровідникового підсилювача значно відрізняється від діаметра осердя стандартного оптичного волокна.

## 1.6 Основні параметри оптичного підсилювача

Ключові параметри, що характеризують оптичний підсилювач, – це коефіцієнт підсилення, потужність насичення на виході підсилювача і шум-фактор. Коефіцієнт підсилення  $G$  (gain) визначається зі співвідношення

$$G = \frac{P_{c\text{вих}}}{P_{c\text{вх}}} \quad (1.1)$$

де  $P_{c\text{вх}}$  та  $P_{c\text{вих}}$  – потужності (корисних) сигналів на вході та виході підсилювача.

Логарифмічний еквівалент коефіцієнта підсилення (дБ)

$$g = 10 \lg G. \quad (1.2)$$

Коефіцієнт підсилення оптичного підсилювача EDFA залежить від довжини хвилі та потужності вхідного сигналу. Залежність від довжини хвилі має досить складну форму та визначається формою енергетичних рівнів іонів ербія, їх концентрацією, розподілом, довжиною хвилі лазера накачування та багатьма іншими параметрами. На рис. 1.3 наведено типові залежності від довжини хвилі для трьох фіксованих значень потужності. Простіший вид (монотонно спадної функції) має залежність коефіцієнта підсилення від потужності вхідного сигналу. Таку залежність для довжини хвилі 1550 нм наведено на рисунку 1.4. Потужність спаду на виході підсилювача  $P_{\text{спаду}}$  визначається як значення потужності сигналу на виході, при якому коефіцієнт підсилення  $G$  в два рази ( $g$  на 3 дБ) менший максимального значення коефіцієнта підсилення  $G_{\text{макс}}$ , що досягається при малому вхідному сигналі. При вхідних сигналах з високим рівнем потужності (підсилювач EDFA зазвичай більше 3 дБм) підсилювач виходить на режим глибокого насичення коефіцієнта підсилення. Вихідна потужність підсилювача, що дорівнює вхідній, називається вихідною потужністю насичення (при якій коефіцієнт підсилення дорівнює 1). Якість оптичного сигналу характеризують величиною, яка називається оптичним відношенням сигнал-шум (OSNR), яке дорівнює відношенню потужності корисного сигналу до потужності шуму в спектральному інтервалі  $D_n$ , що визначається вікном фільтра або демультіплексора на приймальній стороні:

$$OSNR = \frac{P_c}{P_{ш}} \quad (1.3)$$

Значення OSNR має бути досить великим, щоб забезпечити, згідно зі стандартом передачі, максимально допустиму частоту появи помилок BER. При поширенні сигналу між регенераторами значення OSNR може лише зменшуватися. Шум-фактор NF (noise figure) показує, наскільки зростає шум у підсилювачі порівняно з корисним сигналом, і визначається розподілом відношення сигнал-шум на вході ( $OSNR_{вх}$ ) на відношення сигнал-шум на виході ( $OSNR_{вих}$ ):

$$NF = \frac{P_{с вх}}{P_{ш вх}} \div \frac{P_{с вих}}{P_{ш вих}} = \frac{OSNR_{вх}}{OSNR_{вих}} \quad (1.4)$$

### 1.7 Визначення залежності коефіцієнта підсилення від зміни потужності вхідного сигналу

Для прикладу вважатимемо, що проєктується ділянка транспортної мережі з застосуванням обладнання хвильового ущільнення Lambda Driver 1600 із діапазоном довжин хвиль від 1536,6 до 1560,6 нм та кроком 200 ГГц. Для підсилення оптичного сигналу використовується підсилювач EDFA Lucent 1713 з робочим діапазоном довжин хвиль від 1536 нм до 1565 нм. Згідно з паспортними даними підсилювача коефіцієнт підсилення сигналу на довжині хвилі 1560,6 нм при потужності вхідного сигналу -30 дБм становить 30 дБ (режим підсилювача). Це значення наведено для «найгіршого» 16-го каналу, тому виконується розрахунок і побудова діаграми рівнів саме для цього каналу. Коефіцієнт підсилення інших каналів має дещо більше значення. Коефіцієнт підсилення сигналу на довжині хвилі 1560,6 нм за потужності вхідного сигналу -10 дБм становить 23 дБ, за потужності вхідного сигналу 0 дБм – 16 дБ. Залежність коефіцієнта підсилення підсилювача EDFA від довжини хвилі вхідного сигналу при фіксованих значеннях потужності наведено на рисунку 1.6.

Використовуючи паспортні значення коефіцієнта підсилення при заданій потужності вхідного сигналу, наведемо залежність коефіцієнта підсилення від потужності вхідного сигналу при фіксованому значенні довжини хвилі (рис. 1.7).

Таким чином, зміна коефіцієнта підсилення у робочому діапазоні становить близько 2 дБ. Для визначення коефіцієнта підсилення залежно від потужності вхідного сигналу для 16-го каналу використовується апроксимація багаточленом другого степеня на основі методу найменших квадратів.

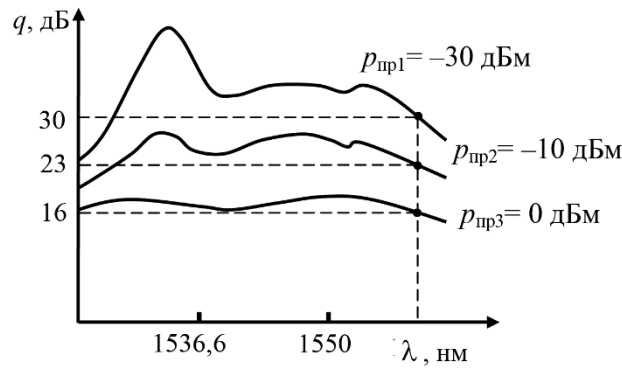


Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнта підсилення EDFA від довжини хвилі вхідного сигналу при фіксованих значеннях потужності для підсилювача Lucent 1713

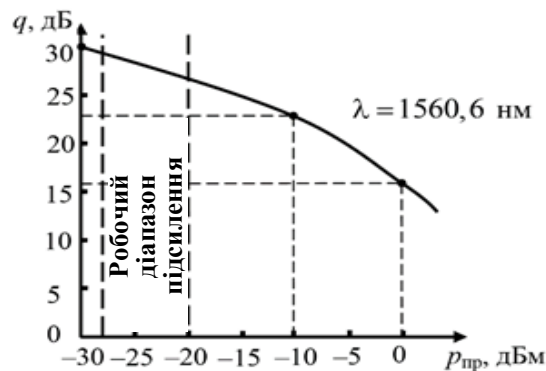


Рисунок 1.7 – Залежність коефіцієнта підсилення потужності вхідного сигналу при фіксованому значенні довжини хвилі для підсилювача Lucent 1713

Для отримання апроксимувальної функції складемо й розв'яжемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} q_1(p_{\text{вх}1}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot p_{\text{вх}1} + \alpha_2 \cdot p_{\text{вх}1}^2 \\ q_2(p_{\text{вх}2}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot p_{\text{вх}2} + \alpha_2 \cdot p_{\text{вх}2}^2 \\ q_3(p_{\text{вх}3}) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot p_{\text{вх}3} + \alpha_2 \cdot p_{\text{вх}3}^2 \\ \begin{cases} 30 = \alpha_0 - 30\alpha_1 + 900\alpha_2 \\ 23 = \alpha_0 - 10\alpha_1 + 100\alpha_2 \\ 16 = \alpha_0 \end{cases} \end{cases}$$

Розв'язок системи:  $\alpha_0 = 16, \alpha_1 = -0.816, \alpha_2 = -0.0116$

Таким чином, шукана апроксимувальна функція має вигляд

$$q = 16 - 0.816p_{\text{вх}} - 0.0116p_{\text{вх}}^2$$

В подальшому при визначенні коефіцієнта підсилення залежно від потужності вхідного сигналу для підсилювача Lucent 1713 будемо використовувати визначену функцію.

### **1.8 Пристрої передавання оптичних сигналів**

У перших волоконно-оптичних передавачах електричні та електронно-оптичні елементи являли собою окремі модулі. Сучасні передавачі мають гібридну конструкцію. Лазери та інтегральні мікросхеми, що модулюють випромінювання, об'єднані в компактний модуль, що дозволяє досягти більших частот модуляції та високої надійності. Такий модуль є насправді електронно-оптичним перетворювачем, в якому інтенсивність вихідного світлового сигналу модулюється вхідним цифровим електричним сигналом. При низьких швидкостях передачі модулюється струм керування (лазери з внутрішньою модуляцією), при високих – сам оптичний сигнал (лазери з зовнішньою модуляцією). Передавач для одного каналу зазвичай є лазером з розподіленим зворотним зв'язком DFB (Distributed Feed Back) з вихідною потужністю у волокні не менше 0 дБм (1 мВт) і модулятор [7]. При високих частотах модуляції модулятор зазвичай є зовнішнім. У системах DWDM найбільш широко застосовують DFB-лазери з резонатором типу Фабрі – Перо. При цьому дифракційні ґратки виконані на поверхні активної частини кристала лазера, що забезпечує за рахунок оптичного зворотного зв'язку точний вибір довжини хвилі лазерного випромінювання [1]. За допомогою дифракційних ґраток забезпечується підсилення випромінювання тільки однієї поздовжньої моди лазера таким чином, що вся потужність сигналу концентрується в дуже вузькій області спектра (ширина лінії на половині висоти менше 100 МГц). При цьому бічні моди заглушуються до рівня щонайменше 40 дБ [5].

DFB-лазери мають кілька недоліків. Через дуже вузьку ширину лінії генерації (та, відповідно, великі довжини когерентності) вони чутливі до відбитого в лінії сигналу, що потрапляє назад в активну область підсилення лазера. Потрапляючи в резонатор лазера, такий сигнал інтерферує з корисним сигналом і порушує стабільність генерації лазера. При цьому інтенсивність відбитого сигналу може мати максимум при певних температурах, що робить стохастичну і важковловлювану появу цього ефекту.

### **1.9 Пристрої приймання оптичних сигналів**

Оптичний фотоприймач перетворює вхідні оптичні сигнали в електричні і таким чином здійснює їх демодуляцію. Фотоприймач має бути повністю сумісний з передавачем як за спектральною чутливістю в межах номінальних довжин хвиль, так і за часовими характеристиками модуляції випромінювання. Крім того, фотоприймач має мати стійкість до помилок,

які можуть виникнути в сигналі при проходженні інших оптичних компонентів. Отриманий на виході фотоприймача електричний сигнал потрібно підсилювати до необхідного рівня, додаючи при цьому мінімум шумів. При цьому може знадобитися електронна фільтрація для згладжування ефективного частотного відгуку підсилювача. Всі ці операції зазвичай виконуються одним гібридним модулем (що містить модуль приймача), на який надходить вхідний оптичний сигнал з волокна. Модуль формує на виході відфільтрований електричний сигнал, який потім потрібно демодулювати відповідним чином. Складність процесу демодуляції залежить від використовуваної технології модуляції. Наприклад, при використанні технології TDM потрібно виділити з сигналу, що надійшов, сигнали синхронізації, для чого використовуються різні схеми виявлення та виправлення помилок. Зазвичай за фотоприймач використовуються два типи фотодіодів [2]: PIN-фотодіоди та лавинні фотодіоди APD (Avalanche Photodiode). PIN-фотодіоди працюють зі стандартними низьковольтними джерелами живлення (5 В), але вони менш чутливі та мають більш вузький діапазон спектральної чутливості порівняно з лавинними фотодіодами. До появи лавинних фотодіодів високошвидкісні PIN-фотодіоди використовувалися на лініях зв'язку зі швидкостями передачі 10 Гбіт/с та 40 Гбіт/с. Лавинні фотодіоди застосовуються, в основному, на лініях зв'язку великої довжини, де виправдано їх високу вартість і значно складніші схеми реєстрації оптичних сигналів [7]. Крім того, у багатьох випадках використання фотоприймача з лавинним фотодіодом дозволяє відмовитися від оптичного підсилювача, необхідного у фотоприймачі з PIN-фотодіод.

### **1.10 Волоконно-оптичні лінії передавання**

Оптичне волокно, укладене в кабель, є одним із найважливіших компонентів волоконно-оптичної мережі. Перші волокна, які стали широко використовуватися на лініях зв'язку значної довжини, – одномодові волокна зі ступінчастим показником заломлення та нульовою дисперсією на довжині хвилі 1310 нм (G.652 за класифікацією ITU), стандартні одномодові волокна. Незважаючи на зростання швидкостей передачі даних та появу технології DWDM, що дозволяє у багато разів збільшити пропускну спроможність вже прокладеного кабелю, інтенсивність прокладання кабелю в усьому світі в найближчому майбутньому не впаде. Хоча стандартне волокно G.652 має нульову хроматичну дисперсію на довжині хвилі 1310 нм, дисперсія на довжині хвилі 1550 нм досить висока (18 пс/нм/км). На перший погляд це несумісно з робочим діапазоном EDFA (діапазон 1550 нм). Проте дослідження показали, що передача каналів DWDM помірної швидкості через волокно G.652 може відбуватися на значні відстані без втрати якості сигналу за рахунок того, що висока дисперсія на довжині хвилі 1550 нм може бути компенсована за допомогою відрізка спеціального волокна або інших пристроїв компенсації дисперсії.

В подальшому розроблено волокно зі зміщеною дисперсією (G.653 за класифікацією ITU), яке має нульову дисперсію на довжині хвилі близько 1550 нм [1]. На цій довжині хвилі згасання нижче, ніж на 1310 нм, тому робота у вікні 1550 нм краща, особливо для ліній зв'язку великої довжини. Однак волокно зі зміщеною дисперсією не є, безумовно, кращим варіантом для передачі каналів DWDM. Показник дисперсії досить різко змінюється при віддаленні від довжини хвилі нульової дисперсії, через що доводиться окремо компенсувати дисперсію кожного каналу.

Волокно зі зміщеною дисперсією виявилось незадовільним варіантом для систем з DWDM, оскільки при передачі по каналу зв'язку групового сигналу DWDM потрібно вводити в волокно дуже великий рівень потужності, через що в волокні починають проявлятися нелінійні ефекти. У волокні зі зміщеною дисперсією вплив ефекту чотирьоххвильового змішування FWM обмежує використання довжин хвиль, близьких до довжини хвилі нульової дисперсії 1550 нм. Потрібно зазначити, що ефект FWM можна зменшити, якщо передавати груповий сигнал DWDM на довжинах хвиль, що досить віддалені від довжини хвилі 1550 нм в одну або іншу сторону. Однак при цьому неможливо використовувати будь-які довжини хвиль із частотного плану ITU.

Для уникнення нелінійних ефектів, і особливо FWM, були розроблені волокна, в яких довжина хвилі нульової дисперсії виведена з робочого діапазону підсилювачів EDFA (1530–1565 нм) за рахунок спеціальних профілів показника заломлення [1] – волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (G.655 за класифікацією ITU).

В межах робочого діапазону EDFA волокно G.655 має невелику, добре контрольовану хроматичну дисперсію (від більш ніж 3 пс/(нм × км) на 1530 нм до менш ніж 0,7 пс/(нм × км) на 1560 нм). Такого значення дисперсії цілком достатньо, щоб загасити FWM, при цьому ще можлива передача зі швидкістю щонайменше 2,5 Гбіт/с на канал. Волокна G.655 найкраще підходять для використання в системах DWDM.

## 2 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1 Розрахунок параметрів оптичних волокон

Розрахунок параметрів оптичних волокон потрібний для визначення нормованого згасання і питомої хроматичної дисперсії на робочих довжинах хвиль.

Тип одномодового оптичного волокна потрібно вибирати самостійно на основі аналізу вихідних даних та технічних характеристик сучасних оптичних волокон від провідних світових виробників – фірм Corning, Fujikura, Sumitomo, Lucent Technologies та ін. Для більшості випадків рекомендується використовувати стандартні одномодові оптичні волокна, що відповідають рекомендаціям ІТУ-Т G.652.D.

Результатами розрахунку параметрів оптичних волокон мають стати значення нормованого згасання і хроматичної дисперсії на всіх довжинах хвилі, що використовуються в розроблюваній системі. Потреба розрахунку параметрів оптичного волокна пояснюється тим, що в оптичних мережах і системах передачі часто застосовують такі довжини хвиль, для яких в технічних характеристиках волокна не наводяться значення основних параметрів волокна (нормованого згасання і хроматичної дисперсії).

Вихідні дані для розрахунку потрібно взяти з технічних характеристик вибраного волокна:

- опорна довжина хвилі спектрального діапазону «О»  $\lambda_{SO} = 1310$  нм;
- опорна довжина хвилі спектрального діапазону «Е» (довжина хвилі «водяного піку»)  $\lambda_{SE} = 1383$  нм;
- опорна довжина хвилі спектрального діапазону «С»  $\lambda_{SC} = 1550$  нм;
- максимальне нормоване згасання на опорній довжині хвилі спектрального діапазону «О»  $\alpha_{SO}$ , дБ/км;
- максимальне нормоване згасання на довжині хвилі «водяного піку» (опорної довжини хвилі діапазону «Е»)  $\alpha_{SE}$ , дБ/км;
- максимальне нормоване згасання на опорній довжині хвилі спектрального діапазону «С»  $\alpha_{SC}$ , дБ/км;
- максимальний приріст загасання щодо опорної довжини хвилі в робочому діапазоні  $\Delta\alpha_\lambda$ , дБ/км;
- довжина хвилі нульової дисперсії  $\lambda_0$ , нм;
- нахил спектральної характеристики дисперсії оптичного волокна в точці нульової дисперсії  $S_0$ , пс(нм<sup>2</sup>км)<sup>-1</sup>;
- максимальне значення поляризаційної модової дисперсії для довгої лінії PMD, пс.км<sup>-1/2</sup>



Наприклад, для стандартного одномодового оптичного волокна Corning SMF-28e+ [4] максимальне нормоване згасання на довжині хвилі  $\lambda_{SO} = 1310$  нм складає  $\alpha_{SO} = 0,35$  дБ/км, максимальне нормоване згасання на довжині хвилі «водяного піку»  $\lambda_{SE} = 1383$  нм становить  $\alpha_{SE} = 0,35$  дБ/км, максимальне нормоване згасання на довжині хвилі  $=1550$  нм становить  $\alpha_{SC} = 0,20$  дБ/км, максимальний приріст загасання відносно опорної довжини хвилі в робочому діапазоні довжини хвилі  $1550...1575$  нм становить  $\Delta\alpha = 0,02$  дБ/км; довжина хвилі нульової дисперсії  $\lambda_0$  лежить у межах  $1304...1324$  нм (може бути прийнята рівною середньому значенню –  $1314$  нм), нахил спектральної характеристики дисперсії волокна в точці нульової дисперсії становить  $S_0 = 0,092$  пс/(нм $\cdot$ км), максимальне значення поляризаційної дисперсії становить  $PMD = 0,06$  пс /км $^{-1/2}$

Інші типи сучасних оптичних волокон можуть забезпечити нижчі втрати у певних діапазонах довжин хвиль (наприклад, одномодове оптичне волокно Corning SMF-28 ULL [3] характеризується максимальним нормованим згасанням не вище  $0,17$  дБ/км на довжині хвилі  $1550$  нм). У випадку, якщо в технічних характеристиках обраного оптичного волокна відсутні деякі параметри, потрібні для розрахунку, то допускається взяти їх значення з характеристик стандартного одномодового оптичного волокна Corning SMF-28e+ (за умови збігу типу волокон відповідно до рекомендацій ІТУ-Т).

Якщо за вимогами технічного завдання потрібно розробити мережу доступу на основі групи технологій PON, то кінцеві ділянки мережі (задіяні для розведення мережі по будівлі та підключення абонентів) потрібно проектувати з використанням кабелю на основі волокон, не чутливих до втрат на вигині згідно з відповідними рекомендаціями ІТУ -Т G.657.B2 або G.657.B3 (наприклад, на основі оптичного волокна Corning ClearCurve ZBL [2]). Оскільки такі ділянки, як правило, мають малу довжину, тому допускається не проводити окремого розрахунку нормованого згасання та хроматичної дисперсії в таких волокнах, а довжини ділянок, що використовуються для розведення мережі по будівлі та підключення абонентів, враховувати в загальній довжині лінії зв'язку.

У випадку, якщо робоча довжина хвилі (або одна з робочих довжин хвиль) в системі передачі або мережі, що розробляється, точно відповідає одній з опорних довжин хвиль, для яких в технічних характеристиках волокна наводяться значення нормованого згасання, то проводити розрахунок нормованого згасання в волокні на цій довжині хвилі не потрібно.

Виходячи з вимог технічного завдання коли не ставиться завдання проектування системи передачі, що критична до значень нормованого згасання у задіяному волокні (при робочій довжині лінії зв'язку без застосування ретрансляції або регенерації сигналу), тоді допускається не проводити повний розрахунок нормованого загасання в волокні на робочих

довжинах хвиль, а дозволяється вибирати максимальне та середнє значення нормованого згасання, що зазначені в технічних характеристиках вибраного волокна в діапазоні робочих довжин хвиль. Наприклад, для оптичного волокна Corning SMF-28e+ [4] максимальне значення погонного згасання на довжині хвилі 1550 нм становить не більше 0,20 дБ/км, а максимальний приріст загасання в діапазоні 1525...1575 нм становить не більше 0,02 дБ/км, тобто, при використанні даного волокна й відсутності критичних вимог до довжини лінії зв'язку допускається для будь-якої довжини хвилі в діапазоні 1525 ... 1575 нм використовувати в наступних розрахунках максимальне значення нормованого згасання, що дорівнює  $0,20 + 0,02 = 0,22$  дБ/км.

У решті випадків потрібно провести розрахунок нормованого згасання на робочих довжинах хвилі за нижчезказаною методикою.

Підсумкове нормоване згасання у волокні (в дБ/км) визначається як сума складових втрат, зумовлених релєївським розсіюванням, інфрачервоним поглинанням та домішками гідроксидної групи ОН [3]:

$$\alpha_{\max} [\text{дБ} / \text{км}] = \alpha_{\text{app}} [\text{дБ} / \text{км}] + \alpha_{\text{икн}} [\text{дБ} / \text{км}] + \alpha_{\text{ОН}} [\text{дБ} / \text{км}] \quad (2.1)$$

де  $\alpha_{\text{app}}$  – складова втрат релєївського розсіювання;

$\alpha_{\text{икн}}$  – складова втрат інфрачервоного поглинання;

$\alpha_{\text{ОН}}$  – складова втрат, зумовлена домішками ОН.

Складова втрата релєївського розсіювання  $\alpha_{\text{app}}$  на довжині хвилі  $\lambda$  визначається такими співвідношеннями [4]:

$$\alpha_{\text{app}}(\lambda) [\text{дБ} / \text{км}] = (1 + \delta\alpha_{\text{app}}) \cdot \bar{\alpha}_{\text{app}}(\lambda) \quad (2.2)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{app}}(\lambda) [\text{дБ} / \text{км}] = \frac{6.3 \cdot 10^{11}}{(\lambda [\text{нм}])^4} \quad (2.3)$$

Складова втрат інфрачервоного поглинання  $\alpha_{\text{икн}}$  на довжині хвилі визначається таким чином [4]:

$$\alpha_{\text{икн}} [\text{дБ} / \text{км}] = (1 + \delta\alpha_{\text{икн}}) \cdot \bar{\alpha}_{\text{икн}} [\text{дБ} / \text{км}], \quad (2.4)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{икн}}(\lambda) [\text{дБ} / \text{км}] = 7.81 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(\frac{-4.85 \cdot 10^4}{\lambda [\text{нм}]}\right). \quad (2.5)$$

Складова втрат, зумовлена домішками іонів гідроксидної групи ОН, розраховується таким чином [3]:

$$\alpha_{OH} [\partial B / \kappa M] = \begin{cases} \bar{\alpha}_{OH}, \bar{\alpha}_{OH} \leq \alpha_{OH \max} \\ \bar{\alpha}_{OH \max}, \bar{\alpha}_{OH} > \alpha_{OH \max} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$\text{де } \alpha_{OH \max} [\partial B / \kappa M] = \alpha_{SE} [\partial B / \kappa M] - \alpha_{app}(\lambda_{SE}) - \alpha_{ikn}(\lambda_{SE}) [\partial B / \kappa M] \quad (2.7)$$

$$\bar{\alpha}_{OH} [\partial B / \kappa M] = \frac{7 \cdot \Delta \alpha_{OH} [\partial B / \kappa M]}{49 + (\lambda_{HM} - \lambda_{SE} [HM])^2} \quad (2.8)$$

Параметри  $\Delta \alpha_{OH}$ ,  $\delta \alpha_{ikn}$ ,  $\delta \alpha_{app}$  уточнюються для кожного конкретного типу оптичного волокна залежно від його технічних даних – значень максимальних втрат на опорних довжинах хвиль в діапазонах «О», «С» і на довжині хвилі «водяного піку» діапазону «Е». Розрахунки проводять у такому порядку.

Параметр  $\Delta \alpha_{OH}$  розраховується за формулою [3]

$$\Delta \alpha_{OH} [\partial B / \kappa M] = \alpha_{SE} [\partial B / \kappa M] - \bar{\alpha}_{app}(\lambda_{SE}) [\partial B / \kappa M]. \quad (2.9)$$

Параметр  $\delta \alpha_{app}$  розраховується за формулою [3]

$$\delta \alpha_{app} = \frac{\alpha_{SO} [\partial B / \kappa M] - \bar{\alpha}_{OH}(\lambda_{SO}) [\partial B / \kappa M]}{\bar{\alpha}_{app}(\lambda_{SO}) [\partial B / \kappa M]} - 1. \quad (2.10)$$

Параметр  $\delta \alpha_{ikn}$  розраховується за формулою [3]

$$\delta \alpha_{ikn} = \frac{\alpha_{SC} [\partial B / \kappa M] - \bar{\alpha}_{OH}(\lambda_{SC}) [\partial B / \kappa M] - \bar{\alpha}_{app}(\lambda_{SC}) [\partial B / \kappa M]}{\bar{\alpha}_{ikn}(\lambda_{SC}) [\partial B / \kappa M]} - 1. \quad (2.11)$$

Під час проектування потрібно розрахувати спектральну характеристику максимального значення коефіцієнта згасання оптичного волокна та побудувати графік залежності нормованого загасання від довжини хвилі для діапазону довжин хвиль 1200...1700 нм.

Відповідно до [3] в усьому спектральному діапазоні має виконуватися нерівність

$$\alpha_{\max} [\partial B / \kappa M] < \alpha_{SX} [\partial B / \kappa M] + \Delta \alpha_{\lambda} [\partial B / \kappa M], \quad (2.12)$$

де  $\alpha_{SX}$  – коефіцієнт загасання оптичного волокна на опорній довжині хвилі, найближчій до спектрального діапазону, в якому знаходиться центральна довжина хвилі оптичного каналу, що дорівнює, відповідно,  $\alpha_{SO}$ ,  $\alpha_{SE}$  чи  $\alpha_{SC}$ .

Якщо ця умова не виконується, потрібно визначати

$$\alpha_{\max} [\partial B / \text{км}] = \alpha_{\text{SX}} [\partial B / \text{км}] + \Delta\alpha_{\lambda} [\partial B / \text{км}]. \quad (2.13)$$

Середнє значення коефіцієнта загасання оптичного волокна можна приблизно оцінити за формулою (2.14)

$$\bar{\alpha} [\partial B / \text{км}] = (\alpha_{\max \text{нижн}} [\partial B / \text{км}] + \alpha_{\max \text{верх}} [\partial B / \text{км}]) / 2 \quad (2.14)$$

де  $\alpha_{\max \text{нижн}}$ ,  $\alpha_{\max \text{верх}}$  – розраховані значення на верхній та нижній довжинах хвиль робочого діапазону.

Для визначення граничних швидкісних характеристик системи передачі або мережі, що розробляється, знадобляться значення питомої хроматичної дисперсії у волокні на робочих довжинах хвиль. У випадку, якщо робоча довжина хвилі (або одна з робочих довжин хвиль) в системі передачі або мережі, що розробляється, точно відповідає одній з опорних довжин хвиль, для яких в технічних характеристиках волокна наводяться значення хроматичної дисперсії, то проводити розрахунок хроматичної дисперсії в волокні на цій довжині хвилі не потрібно (потрібні дані беруться з технічних характеристик волокна).

У всіх інших випадках потрібно провести розрахунок значення питомої хроматичної дисперсії у волокні на робочих довжинах хвиль за формулою [3]

$$D_{\text{ОВ}}(\lambda) \left[ \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right] = \frac{1}{4} S_0 \left[ \frac{\text{пс}}{\text{нм}^2 \cdot \text{км}} \right] \left( \lambda_{\text{нм}} - \frac{(\lambda_0_{\text{нм}})^4}{(\lambda_{\text{нм}})^3} \right) \quad (2.15)$$

де  $\lambda_0$  – довжина хвилі нульової дисперсії,

$S_0$  – параметр нахилу характеристики хроматичної дисперсії оптичного волокна у точці нульової дисперсії.

При проектуванні потрібно розрахувати спектральну характеристику хроматичної питомої дисперсії оптичного волокна і побудувати графік залежності дисперсії від довжини хвилі для діапазону довжин хвиль 1200 ... 1700 нм. На графіку рекомендується позначити робочі довжини хвиль (або діапазон робочих довжин хвиль) проектованої системи передачі.

## 2.2 Оптичні кроси та параметри роз'ємних з'єднань

З'єднання лінійних (що стосується лінії зв'язку) і станційних (що стосується обладнання) оптичних волокон на оптичному кросі виконується за допомогою оптичних роз'ємів. У мережах зв'язку застосовують переважно оптичні роз'єми типів FC, SC і LC.

Оскільки бажано, щоб оптичні роз'єми вносили в оптичний тракт мінімальні спотворення сигналу, то, в першу чергу, намагаються мінімізувати втрати, що вносяться ними, і неоднорідності. Втрати на роз'ємному з'єднанні А1, РС визначаються як різниця рівнів середньої потужності оптичного випромінювання на вході та виході оптичного роз'єму, номінальне значення втрат для роз'ємних з'єднань становить 0,2 ... 0,3 дБ. При проведенні розрахунків для конекторів типу FC, SC, LC з поліруванням UPC та APC максимальне значення втрат у роз'ємному з'єднанні можна прийняти рівним

$$A_{1,PC} = 0.4 \text{ дБ.} \quad (2.16)$$

При розрахунку втрат на всіх роз'ємних з'єднаннях, що встановлюються вздовж лінії зв'язку (вхідна та вихідна крос-панелі, мультиплексори та демультимплексори, розгалужувачі, відгалужувачі, фільтри та ін.), потрібно помножити кількість роз'ємних з'єднань  $N_{PC}$  на втрати в одному з'єднанні:

$$A_{P3} = N_{P3} \times A_{1,PC}. \quad (2.17)$$

При побудові багатоканальних оптичних систем передачі та оптичних мереж, а також при введенні в розроблену систему передачі засобів захисту інформації потрібно також враховувати втрати, що вносяться різними пасивними елементами (мультиплексори і демультимплексори, спліттери, розгалужувачі, відгалужувачі, фільтри та ін.).

Потрібно звернути увагу, що на даному етапі розрахунків ще не розглядається розбиття ВОЛЗ на окремі сегменти (для ретрансляції або регенерації сигналу), тому при визначенні кількості роз'ємних з'єднань та розрахунку сумарних втрат, що вносяться пасивними елементами, вся ВОЛЗ розглядається у вигляді одного сегмента від її довжини.

### **2.3 Визначення енергетичного потенціалу системи передавання та нормування експлуатаційного запасу**

Для характеристики бюджету потужності ВОСП вводять поняття енергетичного потенціалу (загасання, що перебивається), який визначається як допустимі оптичні втрати оптичного тракту або елементарної кабельної ділянки (ЕКД) між точками нормування, при яких забезпечується потрібна якість передачі цифрового оптичного сигналу [4]. Оптичні втрати зумовлені втратами на згасання та додатковими втратами потужності, пов'язаними з впливом відбиття, дисперсії (хроматичної та поляризаційної модової дисперсії), модових шумів та чірп-ефекту.

Енергетичний потенціал розраховується як різниця між рівнем потужності оптичного випромінювання при передачі та рівнем чутливості приймача

$$W[\text{дБ}] = p_0[\text{дБм}] - p_R[\text{дБм}], \quad (2.18)$$

де  $W$  – енергетичний потенціал, дБ;

$p_0$  – рівень потужності оптичного випромінювання передавача ВОСП, дБм;

$p_R$  – рівень чутливості приймача ВОСП, дБм.

Рівень потужності оптичного випромінювання – це середня потужність оптичного випромінювання, виражена у дБм (децибелах відносно 1 мВт). При цьому під середньою потужністю оптичного випромінювання розуміють середнє значення потужності оптичного випромінювання при модуляції оптичної носійної цифровим сигналом. Рівнем чутливості приймача називають мінімальне значення рівня потужності оптичного випромінювання в точці нормування оптичного тракту на вході оптичного приймача, у якій забезпечується потрібна якість передачі цифрового оптичного сигналу.

Приймач ВОСП характеризується як рівнем чутливості, так і рівнем перевантаження – найбільшим значенням рівня потужності оптичного випромінювання у точці нормування оптичного тракту на прийомі, у якій забезпечується потрібна якість передачі цифрового оптичного сигналу. Різниця між рівнем перевантаження та рівнем чутливості приймача ВОСП визначає межі регулювання системи автоматичного регулювання підсилення (АРП) –  $\Delta A$ . Типове значення  $\Delta A = 20$  дБ. Точніше значення  $\Delta A$  можна отримати з технічних характеристик обраного обладнання.

Втрати на ЕКД ВОЛЗ нормуються таким чином, щоб різниця між енергетичним потенціалом ВОСП та сумарними втратами оптичної потужності на ЕКД спільно зі станційними кабелями, які охоплюють і додаткові втрати, зумовлені впливом відбиття, дисперсії (хроматичної та поляризаційної модової дисперсії), модових шумів та чірп- ефекту, була не менша допустимого експлуатаційного запасу [3]. Експлуатаційний запас на ЕКД визначається як сума експлуатаційного запасу на обладнання та експлуатаційного запасу на кабель. Норми на експлуатаційний запас вибираються так:

- експлуатаційний запас апаратури  $A_{\text{еза}} = 0,5 \dots 3$  дБ;
- експлуатаційний запас кабелю  $A_{\text{ЕЗК}} = 0,5 \dots 3$  дБ;
- максимальна похибка вимірювання згасання  $\delta\alpha = 5\%$ .

При виборі значень експлуатаційного запасу потрібно враховувати викладені нижче вимоги. Збільшення довжини ЕКД вимагає підвищення енергетичного потенціалу системи, і при цьому потрібно збільшувати експлуатаційний запас кабелю та телекомунікаційного обладнання. З

іншого боку, при будівництві захищених телекомунікаційних систем рекомендується використовувати мінімальне значення експлуатаційного запасу, щоб не збільшувати рівень потужності лінії зв'язку і тим самим полегшувати умови для несанкціонованого виведення частини випромінювання з неї.

Абсолютне значення максимальної похибки вимірювання згасання на ЕКД, виражене в дБ, можна визначити за виразом [3]

$$\Delta\alpha = \frac{\delta\alpha [\%] \cdot A_{ЕКД} [\text{дБ}]}{100\%}, \quad (2.19)$$

де  $A_{ЕКД}$  – сумарні вимірювані втрати оптичного лінійного тракту на ЕКД.

Оскільки для нормальної роботи ВОСП потрібно, щоб виконувалася умова  $A_{ЕКД} < W$ , то при оцінюванні максимальної похибки можна приймати значення

$$\Delta\alpha = \frac{\delta\alpha [\%] \cdot W [\text{дБ}]}{100\%} \quad (2.20)$$

Розподіл втрат у нероз'ємних з'єднаннях ЕКД, що визначається для кожного оптичного волокна окремо, має відповідати таким вимогам:

1 для діапазону довжин хвиль 1270...1430 нм:

- максимальне значення  $A_{нс.макс} = 0,2$  дБ;

- Середнє значення  $\bar{A}_{нз} = 0,1$  дБ;

2 для діапазону довжин хвиль 1431 ... 1650 нм:

- максимальне значення  $A_{нз.макс} = 0,1$  дБ;

- Середнє значення  $\bar{A}_{нз} = 0,05$  дБ.

При розрахунку довжини елементарної кабельної ділянки відповідно до вимог нормативно-технічної документації визначають значення номінальної, мінімальної та максимальної довжин елементарної кабельної ділянки. Ці довжини ЕКД визначаються бюджетом потужності ВОСП, втратами та дисперсією оптичного лінійного тракту.

Номінальне значення довжини ЕКД розраховується за формулою [3]

$$L_{НОМ} [\text{км}] = \frac{W - A_{ЕЗА} - A_{РЗ} - A_{ПАС} - A_{Д} + A_{НЗ\max} - A_{ЕЗК} - \Delta\alpha}{\alpha_{\max} + A_{НЗ\max} / \bar{l}}, \quad (2.21)$$

де  $W$  – енергетичний потенціал системи передачі, дБ;

$A_{ЕЗА}$  – експлуатаційний запас апаратури, дБ;

$A_{ЕЗК}$  – експлуатаційний запас кабелю, дБ;

$A_{РЗ}$  – втрати в усіх роз'ємних з'єднаннях вздовж лінії зв'язку, дБ;

$A_{ПАС}$  – втрати в пасивних елементах (мультиплексори та демультиплексори, розгалужувачі, відгалужувачі, фільтри та ін), дБ;

$A_D$  – експлуатаційний запас енергетичного потенціалу на дисперсію, що враховується на регенераційних ділянках граничної довжини з оптичними підсилювачами, дБ;

$A_{H3\max}$  – максимальне значення втрат нероз’ємного з’єднання, дБ;

$\Delta\alpha$  – похибка вимірювання згасання, дБ;

$\alpha_{\max}$  – максимальне значення нормованого згасання оптичного випромінювання у волокні, дБ/км;

$\bar{l}$  – середня будівельна довжина оптичного кабелю, км.

Оскільки спочатку передбачається, що на ЕКД немає лінійних оптичних підсилювачів та компенсаторів дисперсії, то довжини ЕКД обмежені і в першому наближенні при розрахунках вважатимемо  $A_D = 0$  дБ.

Мінімальне та максимальне допустимі значення довжини ЕКД розраховуються за формулами [4]

$$L_{\min} [\text{км}] = \frac{W - A_{\text{ПАС}} - \Delta A - A_{P3} + \bar{A}_{H3}}{\bar{\alpha} + \bar{A}_{H3} / \bar{l}}, \quad (2.22)$$

$$L_{\max} [\text{км}] = \frac{W - A_{E3A} - A_{P3} - A_{\text{ПАС}} - A_D - \beta \sqrt{L_{\text{НОМ}}} + \bar{A}_{H3} - A_{E3K} - \Delta\alpha}{\alpha_{\max} + A_{H3\max} / \bar{l}}, \quad (2.23)$$

де  $\bar{A}_{H3}$  – середнє значення втрат нероз’ємного з’єднання, дБ;

$\Delta A$  – межі регулювання АРП, дБ;

$\bar{\alpha}$  – середнє значення нормованого згасання оптичного випромінювання у волокні, дБ/км.

Параметр  $\bar{\beta}$  у виразі (2.23) визначається за формулою [3]

$$\bar{\beta} \left[ \frac{\text{дБ}}{\sqrt{\text{км}}} \right] = \frac{3.46 \cdot 10^{11}}{(\lambda [\text{нм}])^4} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\bar{l} [\text{км}]}}, \quad (2.24)$$

де  $\lambda$  – робоча довжина хвилі, нм.

Розраховане мінімальне значення довжини ЕКД  $L_{\min}$  показує таке значення довжини лінії зв’язку (для обраного обладнання), за якого втрати лінії зв’язку будуть мінімально допустимими. Використання при проектуванні довжини лінії зв’язку меншої за розраховане значення  $L_{\min}$  не допускається, оскільки це призведе до перевантаження фотоприймального модуля і можливого виходу його з ладу. За необхідності збільшення мінімально допустимої довжини лінії зв’язку можна використовувати додатковий атенюатор, втрати у якому потрібно врахувати в параметрі  $A_{\text{ПАС}}$ .

Розраховане максимальне значення довжини ЕКД  $L_{\max}$  показує таке значення довжини лінії зв’язку (для обраного обладнання), при якому втрати в лінії зв’язку будуть максимально допустимими. Використання при проектуванні довжини лінії зв’язку більшої розрахованого значення  $L_{\max}$  не



допускається, оскільки це призведе до падіння рівня потужності на вході фотоприймального модуля нижче рівня його чутливості та неможливості коректної роботи приймального обладнання.

На підставі результатів проведених розрахунків ( $L_{НОМ}$ ,  $L_{\min}$  та  $L_{\max}$ ) потрібно вибрати довжину регенераційної ділянки лінії зв'язку  $L_{ВОЛЗ1}$  (за енергетичними показниками). Якщо розраховане значення  $L_{\max}$  перевищує необхідну в технічному завданні довжину лінії зв'язку  $L_{ВОЛЗ}$ , то в системі передачі, що проєктується, не потрібна регенерація сигналу за потужністю, і довжину сегмента можна прийняти рівною довжині всієї лінії зв'язку

$$L_{ВОЛЗ.1} = L_{ВОЛЗ} \cdot \quad (2.25)$$

У разі якщо розраховане значення  $L_{\max}$  менше необхідної в технічному завданні довжини лінії зв'язку  $L_{ВОЛЗ}$ , то в системі, що проєктується, потрібна регенерація сигналу за потужністю (з використанням оптичних підсилювачів), і лінію зв'язку потрібно розбивати на два або більше сегментів, для кожного з яких буде виконуватися умова  $L_{\min} \leq L_{ВОЛЗ.х} \leq L_{\max}$ .

При поділі лінії зв'язку на сегменти рекомендується використовувати мінімальну кількість сегментів однакової довжини, причому довжина сегментів має бути якомога ближчою до розрахованого раніше значення  $L_{НОМ}$ . Для цього при визначенні кількості сегментів потрібно розділити задану в технічному завданні довжину лінії зв'язку  $L_{ВОЛЗ}$  на розраховане значення  $L_{НОМ}$  та округлити отриманий результат до найближчого цілого числа

$$N_{сегм} = \text{ceil}(L_{ВОЛЗ} / L_{НОМ}), \quad (2.26)$$

де  $\text{ceil}(x)$  – функція округлення до найближчого цілого числа.

Довжина кожного сегмента (регенераційної ділянки) в цьому випадку буде дорівнювати

$$L_{ВОЛЗ.1} [км] = L_{ВОЛЗ} [км] / N_{сегм}. \quad (2.27)$$

Для регенерації сигналу між сегментами вибраної довжини потрібно встановлювати оптичні підсилювачі. При виборі підсилювача рекомендується дотримуватися викладених нижче вимог.

*По-перше*, потрібно вибрати моделі оптичних підсилювачів, що працюють у режимі підтримки заданої потужності на виході, причому ця потужність має забезпечувати потужність оптичного сигналу на виході регенераційного вузла (з урахуванням, можливо, модулів компенсації хроматичної дисперсії, оптичних фільтрів та інших пасивних компонентів, що, можливо, встановлюються після підсилювача), приблизно відповідної

прийнятій в розрахунках потужності на виході передавального оптичного модуля.

По-друге, коефіцієнт підсилення оптичного підсилувача має компенсувати всі втрати на ділянці сегмента ВОЛЗ обраної довжини  $L_{\text{ВОЛЗ.1}}$ , а також втрати в додатковому обладнанні, що встановлюється в регенераційному вузлі (наприклад, В/Р-фільтри для поділу сигналу за напрямками розповсюдження, модулі компенсації хроматичної дисперсії, оптичні фільтри, додаткові роз'ємні з'єднувачі та інші пасивні компоненти). У разі, якщо в лінії зв'язку встановлюються два або більше підсилувачів, тоді компенсацію втрат у загальних для лінії зв'язку пасивних елементах (мультиплексори/демультиплексори на вході та виході тощо) можна розділити в рівних частках між усіма підсилувачами. Дотримання всіх зазначених вище вимог дозволяє прийняти припущення, що на виході кожного регенераційного вузла енергетичні характеристики сигналу будуть приблизно відповідати характеристикам сигналу на виході оптичного передавального модуля, що, у свою чергу, допускає проведення розрахунків тільки для одного сегмента лінії зв'язку довжиною  $L_{\text{ВОЛЗ.1}}$ .

При виборі підсилувачів, крім коефіцієнта підсилення та вихідної потужності, потрібно також звертати увагу на діапазон робочих довжин хвиль і мінімально допустиму потужність вхідного сигналу. Також потрібно розуміти, що оптичний підсилувач здатний, як правило, підсилувати сигнал тільки в одному напрямку, тому при організації двоспрямованої передачі даних по одному волокну потрібно додаткове введення в регенераційний вузол або спрямованих відгалужувачів (або циркуляторів), або спеціальних В/Р-фільтрів для поділу сигналу за напрямками поширення з урахуванням робочих довжин хвиль каналів передачі.

Остаточне рішення щодо довжини регенераційної ділянки потрібно приймати з урахуванням результатів розрахунку дисперсійних характеристик системи передачі, особливо у випадку високошвидкісних систем передачі (40 Гбіт/с і вище).

Після обґрунтованого вибору довжини регенераційної ділянки  $L_{\text{ВОЛЗ.1}}$  усі подальші розрахунки потрібно проводити саме для такої довжини сегмента (при цьому потрібно врахувати, що кількість нероз'ємних зварних з'єднань волокна оптичного кабелю на ділянці довжиною  $L_{\text{ВОЛЗ.1}}$  може виявитися меншою, ніж раніше використовувана у розрахунках кількість нероз'ємних з'єднань по всій заданій довжині лінії зв'язку).

## **2.4 Розрахунок дисперсійних характеристик системи**

Довжина регенераційної ділянки ВОСП обмежується не лише згасанням, а й дисперсією лінії передачі. Допустимі значення хроматичної та поляризаційної дисперсій моди на регенераційній ділянці ВОСП залежать від швидкості передачі лінійної кодової послідовності. При застосуванні кодування NRZ та модуляції без чірпа, відповідно до рекомендацій ITU-T,

максимально допустимі значення хроматичної дисперсії  $D_{рд}$  у пікосекундах на нанометр (пс/нм) та поляризаційної модової дисперсії  $PMD_{рд}$  у пікосекундах (пс) при погіршенні відношення сигнал-шум не більше, ніж на 1,0 дБ, визначаються за формулами:

$$D_{рд} [пс / нм] \leq \frac{10.4 \cdot 10^3}{(B [Гбіт / с])^2}, \quad (2.28)$$

$$D_{рд\max} [пс] \leq \frac{140}{(B [Гбіт / с])}, \quad (2.29)$$

де  $B$  – швидкість передачі, Гбіт/с.

З виразу (2.28) випливає, що, наприклад, при швидкості передачі 1 Гбіт/с на довжині хвилі 1550 нм (питоме значення хроматичної дисперсії стандартного одномодового волокна становить близько 17,5 пс/(нм×км)) максимальна довжина регенераційної ділянки хроматичної дисперсії складе близько 600 км, а при швидкості 10 Гбіт/с – всього близько 6 км. Тому на високих швидкостях передачі (порядку 10 Гбіт/с і вище) практично завжди виникає потреба встановлювати в лінії зв'язку компенсатори хроматичної дисперсії (як правило, встановлюються вони в одному регенераційному вузлі після оптичного підсилювача).

Для перевірки відсутності потреби в компенсації дисперсії потрібно провести розрахунок гранично допустимих значень хроматичної дисперсії  $D_{рд\max}$  і поляризаційної модової дисперсії  $PMD_{рд\max}$  за виразами (2.28) і (2.29) і порівняти отримані результати зі значеннями дисперсії  $D_{волз}$  і  $PMD_{волз}$ , отримуваних для всієї довжини лінії зв'язку, що задана в технічному завданні  $L_{волз}$  при використанні обраного типу волокна

$$D_{волз} [пс / нм] = D_{об} \left[ \frac{пс}{нм \cdot км} \right] L_{волз} [км], \quad (2.30)$$

$$PMD_{волз} [пс] = PMD \left[ \frac{пс}{\sqrt{км}} \right] \sqrt{L_{волз} [км]}. \quad (2.31)$$

У випадку коли  $D_{волз} \leq D_{рд\max}$ ,  $PMD_{волз} \leq PMD_{рд\max}$  дисперсія оптичного волокна не накладає обмежень на побудову системи передачі з заданими характеристиками.

При  $PMD_{волз} \geq PMD_{рд\max}$  проєктовану систему передачі рекомендується створювати лише з використанням поляризаційного ущільнення каналів (DP-QPSK), оскільки засоби компенсації поляризаційної модової дисперсії в класичних системах передачі (з використанням модуляції за потужністю оптичного сигналу) відсутні.

При  $D_{\text{ВОЛЗ}} > D_{\text{рД макс}}$  та  $PMD_{\text{ВОЛЗ}} \leq PMD_{\text{рД макс}}$  у проєктованій системі передачі доцільно використовувати компенсацію хроматичної дисперсії, розбиваючи лінії зв'язку на регенераційні ділянки та встановлюючи між ними модулі компенсації дисперсії (DCM Dispersion Compensating Module).

При необхідності компенсації хроматичної дисперсії регенераційні вузли мають доповнюватися модулями компенсації дисперсії, розрахованими на довжину лінії зв'язку, максимально близьку до  $L_{\text{ВОЛЗ}\cdot 1}$ . У випадку відсутності комерційних пропозицій відносно модулів компенсації дисперсії на довжину  $L_{\text{ВОЛЗ}\cdot 1}$  допускається або чергування модулів з меншими та більшими значеннями компенсаційної довжини лінії зв'язку (у випадку двох та більше регенераційних вузлів) або часткова компенсація хроматичної дисперсії.

Якщо при заданій технічній задачі довжини лінії зв'язку  $L_{\text{ВОЛЗ}}$  умова (2.28) не виконується, але  $D_{\text{ВОЛЗ}}$  не перевищує  $D_{\text{рД макс}}$  більше, ніж у 10 разів, можна спробувати обійтися без компенсації дисперсії, проте потрібно мати на увазі, що при цьому виникатимуть значні додаткові втрати через міжсимвольну інтерференцію, які мають бути враховані у розрахунках та при виборі обладнання.

Для оцінювання впливу хроматичної та поляризаційної модової дисперсій на енергетичні характеристики проєктованої системи передачі потрібно розрахувати значення експлуатаційного запасу на дисперсію  $A_d$  (за рахунок збільшення рівня шумів міжсимвольної інтерференції  $\alpha_{\text{ISI}}$ ).

Наведене на один кілометр довжини лінії передачі значення хроматичної дисперсії оптичного волокна визначається за формулою

$$D_{ch} [nc / нм] = D_{OB} \left[ \frac{nc}{нм \cdot км} \right] \cdot \Delta\lambda [нм], \quad (2.32)$$

де  $D_{OB}$  – значення параметра дисперсії оптичного волокна на робочій довжині хвилі, пс/(нмхкм);

$\Delta\lambda$  – ширина лінії випромінювання лазера оптичного передавача, що використовується за рівнем половинної потужності, нм.

При визначенні ширини лінії випромінювання лазера потрібно враховувати, що для вузькосмугових лазерів у технічних характеристиках задається, зазвичай, ширина лінії випромінювання за рівнем мінус 20 дБ, а не за рівнем половинної потужності (мінус 3 дБ). У цьому випадку потрібно перерахувати ширину лінії випромінювання за рівнем половинної потужності (або використовувати в розрахунках типове значення ширини лінії випромінювання лазера з розподілим зворотним зв'язком (DFB-LD – Distributed FeedBack Laser Diode), що дорівнює  $\Delta\lambda = 0,001$  нм).

Для багаточастотних лазерів Фабрі-Перо (FP-LD – Fabry-Perot Laser Diode) значення ширини лінії випромінювання за рівнем половинної

потужності вказується у технічних характеристиках і становить, як правило,  $\Delta\lambda = 2 \dots 3$  нм.

Значення хроматичної дисперсії на обраній раніше довжині сегмента ВОЛЗ (довжині регенераційної ділянки)  $L_{\text{ВОЛЗ.1}}$  визначають за формулою

$$D_{\text{ВОЛЗ.1}} [\text{нс}] = D_{\text{ch}} [\text{нс} / \text{нм}] \cdot L_{\text{ВОЛЗ.1}} [\text{км}]. \quad (2.33)$$

У формулах (2.21)–(2.23) обмеження, що накладаються дисперсією, на довжину регенераційної ділянки враховуються за допомогою параметра  $A_d$ . Значення експлуатаційного запасу на дисперсію дорівнює додатковим втратам (збільшенню рівня завад) через шуми міжсимвольної інтерференції (ISI)  $\alpha_{\text{ISI}}$ , що охоплюють перехресні завади та шуми синхронізації. Ці додаткові втрати визначаються за формулою [3]

$$A_d [\text{дБ}] = \alpha_{\text{ISI}} [\text{дБ}] = -10 \lg \left( 1 - 1.425 \cdot \exp \left( -1.28 \cdot \left[ \frac{T_0 [\text{нс}]}{T_L [\text{нс}]} \right] \right) \right), \quad (2.34)$$

де  $T_0$  – час наростання фронту оптичного імпульсу на виході джерела випромінювання від 10% до 90% його максимального значення, пс;

$T_L$  – час зростання фронту оптичного імпульсу на виході оптичного приймача від 10% до 90% його максимального значення, пс.

Час наростання фронту оптичного імпульсу на виході джерела випромінювання визначається за формулою [3]

$$T_0 [\text{нс}] = \frac{0.48 \cdot 10^3}{B [\text{Гбіт} / \text{с}]} \cdot \quad (2.35)$$

Час наростання фронту оптичного імпульсу на виході оптичного приймача розраховується за формулою [3]

$$T_L [\text{нс}] = \sqrt{(T_0 [\text{нс}])^2 + \left( \frac{0.35 \cdot 10^3}{BW_R [\text{ГГц}]} \right)^2 + (\sigma_{\text{ВОЛЗ.n}} [\text{нс}])^2}, \quad (2.36)$$

де  $BW_R$  – смуга пропускання фотоприймача, ГГц;

$\sigma_{\text{ВОЛЗ.n}}$  – середньоквадратичне значення некомпенсованої дисперсії, пс.

Смуга пропускання фотоприймача під час прямого детектування вибирається з умови  $BW_R [\text{ГГц}] \geq 0.75 \cdot B [\text{Гбіт} / \text{с}]$ .

Середньоквадратичне значення некомпенсованої дисперсії розраховується за формулою

$$\sigma_{\text{ВОЛЗ.n}} [\text{нс}] = \sqrt{(D_{\text{ВОЛЗ.n}} [\text{нс}])^2 + (\text{PMD}_{\text{ВОЛЗ}} [\text{нс}])^2}, \quad (2.37)$$

де  $D_{\text{ВОЛЗ},n} [nc]$  – значення некомпенсованої хроматичної дисперсії.

У разі, якщо в кожному регенераційному вузлі (за їх наявності) встановлюється модуль компенсації хроматичної дисперсії з компенсаційною довжиною в точності, що дорівнює довжині сегмента  $L_{\text{ВОЛЗ},1}$ , то некомпенсоване значення хроматичної дисперсії дорівнюватиме значенню хроматичної дисперсії на довжині останнього сегмента ВОЛЗ (якщо всі сегменти рівні між собою, – на довжині регенераційної ділянки  $L_{\text{ВОЛЗ},1}$ ). Якщо компенсаційна довжина модулів компенсації хроматичної дисперсії відрізняється від довжини сегментів, то в параметрі  $D_{\text{ВОЛЗ},n}$  необхідно врахувати всю некомпенсовану хроматичну дисперсію вздовж усієї лінії зв'язку.

## 2.5 Розрахунок бюджету потужності

Передача інформаційних даних з потрібною якістю на регенераційній ділянці ВОСП, враховуючи втрати і дисперсійні спотворення, забезпечується за рахунок запасу потужності (чистого бюджету потужності), рівного різниці між енергетичним потенціалом ВОСП (загасанням, що перекривається) і витратами оптичної потужності на втрати і придушення завад у лінії [3]

$$A_{E3} [\partial B] = W [\partial B] - A_{\text{ВОЛЗ},1} [\partial B] - A_{\text{ПАС}} [\partial B] - \sum a_{\text{ШИ}} [\partial B], \quad (2.38)$$

де  $A_{\text{ВОЛЗ},1}$  – усереднене значення згасання на регенераційній ділянці;

$A_{\text{ПАС}}$  – згасання пасивних елементів лінії зв'язку;

$\sum a_{\text{ШИ}}$  – сумарне значення додаткових шумових втрат, дБ.

Для нормальної роботи ВОСП потрібно, щоб експлуатаційний запас на регенераційній ділянці  $A_{E3}$  перевищував нормоване мінімально допустиме значення, що дорівнює

$$A_{E3\text{дон}} [\partial B] = A_{E3A} [\partial B] + A_{E3K} [\partial B]. \quad (2.39)$$

Тобто потрібно, щоб виконувалася умова балансу бюджету потужності на регенераційній ділянці  $A_{E3} > A_{E3\text{дон}}$ .

Усереднене значення згасання на регенераційній ділянці, що використовується у виразі (2.38) для розрахунку експлуатаційного запасу, розраховується за формулою [4]

$$A_{\text{ВОЛЗ},1} [\partial B] = \alpha_{\text{max}} [\partial B / \text{км}] L_{\text{ВОЛЗ},1} [\text{км}] + N_{\text{НЗ}} A_{\text{НЗmax}} [\partial B] + A_{\text{PЗ}} [\partial B], \quad (2.40)$$

де  $A_{\text{НЗ,max}}$  – максимальне значення втрат нероз'ємного з'єднання, дБ;

$N_{H3}$  – кількість нероз’ємних з’єднань на регенераційній ділянці;

$A_{P3}$  – загальні втрати у роз’ємних з’єднаннях на регенераційній ділянці.

Якщо нероз’ємні з’єднання (зварювання волокон) використовуються тільки для зрощування ділянок кабелю будівельної довжини, то на ділянці регенерації потрібно використовувати визначену кількість нероз’ємних з’єднань, яка обчислюється за виразом

$$N_{H3} = \text{ceil} \left( \frac{L_{\text{ВОЛЗ.1}} [\text{КМ}]}{\bar{l} [\text{КМ}]} \right) - 1, \quad (2.41)$$

де  $\text{ceil}(x)$  – функція округлення до найближчого цілого числа.

У випадку, якщо вхідне та вихідне з’єднання з волокном регенераційної ділянки будуть виконуватися нероз’ємними, то розраховане значення  $N_{H3}$  потрібно збільшити на 2.

Сумарне значення додаткових шумових втрат  $\sum a_{\text{шл}}$  складається з додаткових втрат за рахунок власних шумів джерела випромінювання  $\alpha_{\text{RIN}}$ , за рахунок шумів через випромінювання лазером деякого рівня оптичної потужності при передачі логічного «нуля»  $\alpha_E$ , з шумів міжсимвольної інтерференції та дорівнює

$$\sum a_{\text{шл}} [\text{дБ}] = \alpha_{\text{RIN}} [\text{дБ}] + \alpha_E [\text{дБ}] + \alpha_{\text{ISI}} [\text{дБ}]. \quad (2.42)$$

Додаткові втрати через власні шуми джерела випромінювання розраховуються за такими формулами [3]:

$$\alpha_{\text{RIN}} [\text{дБ}] = 10 \lg \left( \frac{1}{\sqrt{1 - (Q \cdot \sigma_{\text{RIN}})^2}} \right), \quad (2.43)$$

$$\sigma_{\text{RIN}} = 2 \sqrt{BW_R [\text{Гц}] \cdot 10^9 \cdot 10^{\frac{\text{RIN} [\text{дБ/Гц}]}{10}}}. \quad (2.44)$$

Значення параметра RIN власних шумів джерела випромінювання (RIN – Relative Intensity Noise, відносна інтенсивність шуму) зазвичай лежить у межах  $-110 \leq \text{RIN} [\text{дБ/Гц}] \leq -140$  (точне значення параметра RIN зазвичай вказується у технічних характеристиках лазера передавального обладнання, типові значення становить -130 дБ/Гц).

Параметр якості  $Q$  (інакше  $Q$ -фактор) визначається залежно від заданого максимально допустимого коефіцієнта бітових помилок BER з таких рівнянь:

$$BER = \frac{1}{Q \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \exp\left(\frac{-Q^2}{2}\right), \quad (2.45)$$

$$Q = \sqrt{\text{LambertW}\left(\frac{1}{2\pi^2 Q^2}\right)}. \quad (2.46)$$

Типове значення BER, у якому нормуються показники якості багатьох систем передачі, становить  $10^{-12}$ , що відповідає значенню параметра якості  $Q = 7,0$ .

Додаткові втрати через вплив шумів випромінювання оптичної потужності під час передачі логічного «нуля» визначаються за формулою

$$\alpha_E [\text{дБ}] = 10 \lg\left(\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1}\right). \quad (2.47)$$

Тут  $\varepsilon$  – відношення потужності оптичного випромінювання джерела під час передачі «одиниці» до потужності оптичного випромінювання під час передачі «нуля». Параметр пов'язаний з коефіцієнтом екстинкції (гасіння), що дорівнює відношенню потужності оптичного випромінювання при передачі логічної «одиниці» цифрового сигналу до потужності оптичного випромінювання при передачі логічного «нуля», вираженим у децибелах. Як правило, значення цієї величини лежить у межах  $6 < \varepsilon < 100$  (типове значення  $\varepsilon = 6.3$ , що відповідає 8 дБ).

Якщо в результаті попередніх розрахунків виявиться, що вимоги до запасу потужності  $A_{Ez} > A_{Ez\text{дон}}$  не виконуються, потрібно проаналізувати причини, визначити фактори, що найбільше впливають на погіршення відношення сигнал – шум і усунути їх.

## 2.6 Результати розрахунку основних характеристик оптичної телекомунікаційної системи

Отримані результати проведеного розрахунку основних характеристик оптичної телекомунікаційної системи, що проєктується, або мережі потрібно звести в табл. 2.1:



Таблиця 2.1 – Результати розрахунку основних характеристик оптичної телекомунікаційної системи

Найменування параметра	Умовне позначення	Значення (з вказанням одиниць виміру )
Максимальне значення нормованого згукання в оптичному волокні в робочому діапазоні довжини хвиль	$\alpha_{\max}$	
Середнє значення нормованого згукання в оптичному волокні в робочому діапазоні довжини хвиль	$\bar{\alpha}$	
Максимальне значення питомої хроматичної дисперсії в оптичному волокні в робочому діапазоні довжини хвиль	$D_{OB}$	
Рівень потужності оптичного випромінювання передавача	$P_0$	
Рівень чутливості приймача	$P_R$	
Енергетичний потенціал системи передачі	$W$	
Межі регулювання системи АРП	$\Delta A$	
Втрати на одному роз'ємному з'єднанні	$A_{1.P3}$	
Загальна кількість роз'ємних з'єднань	$N_{P3}$	
Втрати в усіх роз'ємних з'єднаннях лінії зв'язку	$A_{P3}$	
Середнє значення втрат в одному нероз'ємному з'єднанні	$A_{H3}$	
Втрати, які вносяться всіма пасивними елементами, які встановлюються в лінії зв'язку	$A_{ПАС}$	
Потрібна довжина ВОЛЗ	$L_{ВОЛЗ}$	
Номінальна довжина регенераційної ділянки ВОЛЗ	$L_{НОМ}$	
Мінімальна довжина регенераційної ділянки ВОЛЗ	$L_{\min}$	
Максимальна довжина регенераційної ділянки ВОЛЗ	$L_{\max}$	
Вибрана ділянка регенераційної ділянки ВОЛЗ	$L_{ВОЛЗ.1}$	
Згукання на регенераційній ділянці	$A_{ВОЛЗ.1}$	
Втрати на додаткових пасивних елементах регенераційного вузла	$A_{ПАС.1}$	
Максимально допустиме значення хроматичної дисперсії на регенераційній ділянці	$D_{PD.\max}$	

Продовження таблиці 2.1

Найменування параметра	Умовне позначення	Значення (з вказанням одиниць виміру )
Максимально допустиме значення поляризаційної модової дисперсії на регенераційній ділянці	$PMD_{PD,max}$	
Значення хроматичної дисперсії ВОЛЗ	$D_{VOLZ}$	
Значення поляризаційної модової дисперсії всієї ВОЛЗ	$PMD_{VOLZ}$	
Значення хроматичної дисперсії на регенераційній ділянці	$D_{VOLZ,1}$	
Середньоквадратичне значення некомпенсованої дисперсії	$\sigma_{VOLZn}$	
Середньоквадратичне значення на регенераційній ділянці	$\sigma_{VOLZ,1}$	
Швидкість передачі інформації	$B$	
Швидкість пропускання фотоприймача	$BW_R$	
Час наростання фронту імпульсу оптичного сигналу на виході лазера	$T_0$	
Час наростання фронту імпульсу сигналу на виході фотоприймача	$T_L$	
Коефіцієнт бітових помилок	$BER$	
Параметр якості	$Q$	
Відношення оптичних потужностей при передачі «одиниці» і «нуля»	$\xi$	
Додаткові втрати за рахунок шумів через випромінення потужності при передачі «нуля»	$a_\xi$	
Експлуатаційний запас на дисперсію (додаткові втрати через шуми міжсимвольної інтерференції)	$A_D(\alpha_{ISI})$	
Відносний рівень інтенсивності власних шумів лазера	$RIN$	
Параметр власних шумів лазера	$\sigma_{RIN}$	
Додаткові втрати через власні шуми лазера	$\alpha_{RIN}$	
Сумарне значення додаткових шумових втрат	$\sum a_{ui}$	
Потрібний експлуатаційний запас	$A_{E3don}$	
Чистий бюджет потужності	$A_{E3}$	

## 3 РОЗРАХУНОК ДОВЖИНИ РЕГЕНЕРАЦІЙНОЇ ТА ПІДСИЛЮВАЛЬНОЇ ДІЛЯНОК ТРАКТУ ПЕРЕДАВАННЯ

### 3.1 Визначення необхідної якості передачі системи зв'язку

Робота цифрових систем зв'язку вважається нормальною тільки в тому випадку, якщо коефіцієнт бітових помилок BER не перевищує допустимий рівень, що залежить від використовуваного мережного стандарту. Сучасні лінії зв'язку будуються так, щоб задовольнити будь-який стандарт мережі. Тому при їх розрахунку та будівництві закладаються досить жорсткі обмеження рівня помилок (від  $BER = 10^{-11}$  до  $BER = 10^{-15}$ ). Розглянемо роботу фотоприймача. Синхронізований з прийнятим оптичним сигналом, фотоприймач періодично, в оптимальні моменти часу, обробляє прийнятий сигнал, реєструє інтенсивність оптичного сигналу і за пороговим значенням визначає, який сигнал прийнятий – 0 або 1. До зниження якості цифрової передачі призводить багато факторів: дисперсія, нелінійні ефекти в волокні, нестабільність таймерів, підсилене спонтанне випромінювання та ін. Для розрахунку BER потрібне знання лише одного параметра –  $Q$ -фактора, який аналітично виражається через функцію помилок

$$BER(Q) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q \cdot \sqrt{2\pi}}. \quad (3.1)$$

Задамо досить жорстке обмеження рівня помилок  $BER = 10^{-12}$  і, використовуючи вираз (3.1), знайдемо необхідне значення  $Q$ -фактора:

$$10^{-12} = \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q \cdot \sqrt{2\pi}}$$

$$Q = 7.03$$

### 3.2 Визначення максимальної довжини ділянки оптичного підсилення

При визначенні довжини підсилювальної ділянки вважаємо, що втрати складаються з загасання оптичного кабелю, загасання роз'ємних оптичних з'єднувачів, втрат у місцях зрощування будівельних довжин, втрат, що вносяться волокном для компенсації дисперсії, втрат, що вносяться атенюаторами, які встановлюються при значенні сигналу більше максимально допустимого значення на вході приймального модуля тощо.

Визначимо допустиме відношення сигнал – шум, яке забезпечує задане значення  $Q$ -фактора:

$$\frac{C}{Ш} = \frac{Q^2 \cdot \Delta f_E}{\Delta f_0}, \quad (3.2)$$

де  $\Delta f_E$  – смуга пропускання електричного фільтра фотоприймача. Для систем WDM, при забезпеченні передачі потоків інформації до 2,5 Гбіт/с,  $\Delta f_E = 2.5$  ГГц,  $\Delta f_0$  – вихідна спектральна смуга в оптичному діапазоні, яку можна прийняти рівною ширині спектра вузькосмугового лазера. Зазвичай ця ширина трохи більше 0,1 нм, що відповідає  $\Delta f_0 = 12.5$  ГГц. Звідси і знаходимо

$$\left( \frac{C}{Ш} \right)' = \frac{(7.03)^2 \cdot 2.5}{12.5} = 9.88.$$

Для наступних розрахунків відношення сигнал – шум зручно виразити в децибелах. Ця величина в техніці зв'язку зазвичай називається завадозахищеністю і визначається за формулою

$$A'_3 = 10 \cdot \lg \left( \frac{C}{Ш} \right)'. \quad (3.3)$$

Підставляючи у формулу (3.3) значення відношення сигнал шум, отримуємо

$$A'_3 = 10 \cdot \lg 9.88 = 9.95 \text{ дБ.}$$

Для розрахунків приймемо  $A'_3 = 10$  дБ.

Дане значення справедливе для ідеального фотоприймача. Зважаючи на погіршення захищеності сигналу в реальному фотоприймачі, а також з урахуванням деградації характеристик передавального та приймального оптоелектронних модулів на практиці потрібно ввести експлуатаційний запас від 5 до 10 дБ. Приймемо  $A_{зан} = 5$  дБ, тоді

$$A_3 = A'_3 + A_{зан}. \quad (3.4).$$

Таким чином, потрібне значення завадозахищеності сигналу складає  $A_3 = 10 + 5 = 15$  дБ.

У курсовій роботі рекомендується використовувати кабель, який відповідає рекомендації МСЕ-Т G.652. Для цього кабелю коефіцієнт загасання приймемо  $\alpha_\kappa = 0.2$  дБ/км.

Згасання роз'ємного оптичного з'єднувача приймемо [6]

$$A_p = 0,5 \text{ дБ.}$$

На кожній підсилювальній ділянці застосовуються трохи більше двох роз'ємних з'єднань, тобто.  $n_p = 2$ .

Втрати в точках зрощування будівельних довжин (затухання зварного з'єднання) прийmemo [7]

$$A_{зв} = 0.03 \text{ дБ}$$

Будівельна довжина кабелю становить 2–4 км, прийmemo  $l_{буд} = 2$  км.

На регенераційній ділянці через її велику довжину (порядка 700–1000 км) і досить велике значення дисперсійного параметра  $D = 18$  пс/нм/км загальна дисперсія становитиме [7]

$$\Delta T = DL \cdot \Delta \lambda, \quad (3.5)$$

де  $L$  – довжина регенераційної ділянки;

$\Delta \lambda$  – ширина спектра оптичного джерела (приймемо  $\Delta \lambda = 0,1$  нм).

При довжині 700 км отримаємо

$$\Delta T = 18 \cdot 700 \cdot 0,1 = 1,26 \text{ нс,}$$

що значно більше максимально допустимого значення, визначеного для коду NRZ як [7]

$$\Delta T_M = \frac{0.7}{B},$$

де  $B$  – швидкість передачі.

Підставляючи до цієї формули  $B = 2,5$  Гбіт/с, отримуємо

$$\Delta T_M = \frac{0.7}{2.5 \cdot 10^9} = 0.28 \text{ нс.}$$

Звідси видно, що  $\Delta T > \Delta T_M$ .

Отже, на цій лінії передавання потрібно компенсувати дисперсію. Один із шляхів компенсації – застосування волокна, що компенсує дисперсію (DCF). При проектуванні для компенсації дисперсії виберемо волокно Fujikura 15DS-340. Дисперсійний параметр такого волокна має зворотний від'ємний знак  $D = -340$  пс/нм км. Це волокно вносить чималі втрати, що становлять  $\alpha_{к.д.} = 1,56$  дБ/км.

Довжина волокна DCF  $L_2$  може бути розрахована за формулою [7]

$$L_2 = \frac{D_1 L_1}{D_2}, \quad (3.6)$$

де  $L_1$  – довжина лінії зі звичайним волокном;

$D_1$  та  $D_2$  – дисперсійні параметри звичайного волокна та волокна DCF, відповідно.

Стосовно підсилювальної ділянки довжиною  $L_{nd}$  формула (3.6) має вигляд

$$L_2 = -\frac{D_1 L_{nd}}{D_2}.$$

Згасання, що вноситься волокном DCF, складатиме

$$A_{K.D.} = \alpha_{K.D.} \cdot L_2$$

$$A_{K.D.} = \frac{\alpha_{K.D.} \cdot D_1 \cdot L_{nd}}{D_2}. \quad (3.7)$$

З урахуванням усіх наведених міркувань запишемо формулу для визначення довжини підсилювальної ділянки, обмеженої втратами,

$$L_{nd} = \frac{q + \alpha_{K.D.} \frac{L_{nd} \cdot D_1}{D_2} - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cpr}}},$$

$$L_{nd} = \frac{q - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cpr}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}}, \quad (3.8)$$

де  $q$  – коефіцієнт підсилення оптичного підсилювача на основі волокна, легованого ербієм.

У курсовій роботі рекомендується використовувати підсилювач Lucent з мінімальною потужністю вхідного сигналу  $P_{np.min} = -30$  дБм. Зважаючи на деградацію з часом характеристик оптичного кабелю введемо експлуатаційний запас, що дорівнює 2 дБ. Таким чином, мінімальний рівень потужності, що надходить на вхід оптичного підсилювача, становить

$$P_{np} = -30 + 2 = -28 \text{ дБм.}$$

Методика визначення коефіцієнта підсилення наведена у підрозділі 1.7, де отримано вираз

$$q = 16 - 0.816 p_{BX} - 0.0116 p_{BX}^2$$

Звідки, для вхідного рівня  $P_{BX} = -28$  дБм

$$q = 29,6 \text{ дБ.}$$

Таким чином, потужність сигналу на виході оптичного підсилювача становить

$$P_{пер} = P_{пр} + q. \quad (3.9)$$

Підставимо числові значення

$$P_{пер} = -28 + 29.6 = 1.6 \text{ дБм.}$$

Скориставшись формулою (3.8), знаходимо

$$L_{но} = \frac{29.6 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 96 \text{ км}$$

### 3.3 Визначення максимальної довжини регенераційної ділянки

Процес накопичення шуму відбувається вздовж усієї довжини регенераційної ділянки. За аналогією з електронними підсилювачами введемо поняття рівня шуму  $P_{ш.вх}$ , наведеного до входу волоконно-оптичного підсилювача (ВОП). Потужність шуму на виході ВОП складається з потужності підсиленої спонтанної емісії  $P_{ASE} = (NF \cdot G - 1)h\nu \cdot \Delta\nu$  та потужності квантового шуму  $P_{ш.кв} = h\nu \cdot \Delta\nu$

Таким чином,

$$P_{ш.кв} = (NF \cdot G - 1)h\nu \cdot \Delta\nu + h\nu \cdot \Delta\nu, \quad (3.10)$$

де  $h$  – постійна Планка ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);

$\nu$  – частота сигналу вузькосмугового лазера, що подається на вхід лінії передавання;

$\Delta\nu$  – ширина спектра оптичного фільтра демультиплексора;

$NF$  – шум-фактор оптичного підсилювача.

Відповідно до [7] прийемо  $\Delta\lambda = 0.1$  нм. За паспортними даними ВОП, що використовується,  $NF = 6$  дБ.

Визначимо частоту  $\nu$ , що відповідає довжині хвилі  $\lambda = 1550$  нм:

$$v = \frac{c}{\lambda},$$

де  $c = 299792458$  м/с (таке точне значення прийнято в рекомендації МСЕ-Т G.692 для перетворення частоти в довжину хвилі і навпаки [5]). Підставляючи числові значення, отримаємо

$$v = \frac{299792458}{1550 \cdot 10^{-9}} = 193.4 \cdot 10^{12} = 193.4 \text{ ТГц.}$$

Ширині смуги пропускання оптичного фільтра  $\Delta\lambda = 0.1$  нм відповідає значення, виражене через  $\Delta v$  [6],

$$\Delta v = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{299792458 \cdot 0.1}{(1559 \cdot 10^{-9})^2} = 12.5 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 12.5 \text{ ГГц}$$

Враховуючи, що  $NF \cdot G \gg 1$ , після простих перетворень виразу (3.10) отримаємо

$$P_{ш.вх} = -69 + 10 \lg \Delta v + NF, \quad (3.11)$$

де частота  $\Delta v$  виражена ГГц.

Таким чином, рівень шумів, наведений на вході оптичного підсилувача, становить

$$P_{ш.вх} = -69 + 10 \cdot \lg 12.5 \cdot 10^9 + 6 = -52 \text{ дБм.}$$

Розглянемо методику знаходження підсумкової заводо захищеності на ділянці регенерації, що складається з  $n$  підсилувальних ділянок.

На рисунку 3.1 наведено фрагмент діаграми рівнів, що містить  $N$  оптичних підсилувачів. Як впливає з цього рисунка, заводо захищеність від шуму на  $i$ -й ділянці можна визначити за формулою

$$A_{zi} = P_{нpi} - P_{ш.вх}, \quad (3.12)$$

де  $P_{нpi}$  – рівень сигналу на вході  $i$ -ї підсилувальної ділянки, що визначається за формулою

$$P_{нpi} = P_{нperi} - \alpha l_i, \quad (3.13)$$

де  $\alpha l_i$  – згасання  $i$ -ї підсилувальної ділянки.

Таким чином,

$$A_{zi} = P_{нperi} - \alpha l_i - P_{ш.вх}. \quad (3.14)$$



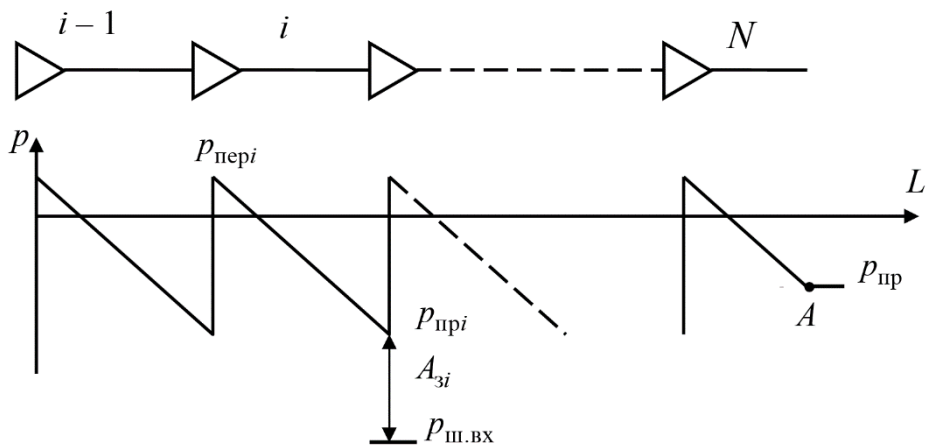


Рисунок 3.1 – Діаграма рівнів сигналу

У довільній точці на виході ланцюжка ВОП з рівнем сигналу  $p_{np}$  (очевидно, що за таку точку потрібно прийняти вхід фотоприймача регенераційного пункту) заводозахищеність від шуму, що вноситься цією ділянкою, не зміниться і складе

$$A'_{zi} = p_{np} - p_{ш.i}, \quad (3.15)$$

де  $p_{ш.i}$  – рівень шуму від  $i$ -ї підсилювальної ділянки.

Вочевидь, що  $A_{zi} = A'_{zi}$ . Звідси випливає

$$\begin{aligned} p_{пері} - \alpha l_i - p_{ш.вх} &= p_{np} - p_{ш.i} \\ p_{ш.i} &= p_{np} + p_{ш.вх} - p_{пері} + \alpha l_i \end{aligned} \quad (3.16)$$

Отже, потужність завод від  $i$ -тої підсилювальної ділянки складе (у точці  $A$ )

$$p_{ш.i} = 10^{0.1 p_{ш.i}} \text{ мВт.}$$

Шуми, що виникають на окремих підсилювальних ділянках, мають незалежний характер, тому сумарна потужність шуму в точці  $A$  складе

$$p_{ш.\Sigma} = \sum_{i=1}^N 10^{0.1 p_i} = \sum_{i=1}^N 10^{0.1(p_{np} + p_{ш.вх} - p_{пері} + \alpha l_i)}. \quad (3.17)$$

За умови, що кожна підсилювальна ділянка має однакові параметри (довжину, згасання, потужність сигналу на вході та виході оптичного підсилювача), у формулі (3.17) підсумовування можна замінити на множення. Даний підхід дозволяє досить точно знайти максимальну довжину регенераційної ділянки, але вимагає після побудови мережі та визначення основних параметрів кожної підсилювальної ділянки

розрахувати похибку спроектованої регенераційної ділянки. Отже, знаходимо сумарну потужність шуму

$$P_{u\Sigma} = N \cdot 10^{0.1(p_{np} + P_{u.ox} - p_{nep} + \alpha l)}, \quad (3.18)$$

$$P_{u\Sigma} = 10 \lg N + p_{np} + P_{u.ox} - p_{nep} + \alpha l. \quad (3.19)$$

Захищеність в точці  $A$  складає

$$A_{3.A} = p_{np} - P_{u\Sigma}.$$

Підставимо вираз формулу (3.19)

$$\begin{aligned} A_{3.A} &= p_{np} - 10 \cdot \lg N - p_{np} - P_{u.ox} + p_{nep} - \alpha l \\ A_{3.A} &= p_{nep} - 10 \cdot \lg N - P_{u.ox} - \alpha l \end{aligned} \quad (3.20)$$

Формулу (3.20) можна перетворити, скориставшись зв'язком підсилення в підсилювачі з довжиною ділянки  $l$  між підсилювачами і питомим загасанням ділянки  $\alpha$  та зв'язком кількості підсилювальних ділянок з довжиною регенераційної ділянки  $L$  та підсилювальної ділянки  $L_{yc}$

$$q = \alpha l, \quad (3.21)$$

$$n = \frac{L}{L_{yc}}. \quad (3.22)$$

Таким чином, формула (3.20) набуде вигляду

$$A_{3.A} = p_{nep} - q - P_{u.ox} - 10 \lg \frac{L}{L_{yc}} \quad (3.23)$$

Прийнявши в точці  $A$  необхідну заводозахисність сигналу 15 дБ, запишемо формулу (3.23) з урахуванням розрахованих параметрів

$$15 = 1.6 - 29.6 + 52 - 10 \lg \frac{L}{96}.$$

Звідси  $L = 794$  км.

Сьогодні довжини регенераційних ділянок ліній зв'язку становлять 700–1000 км.

## 4 РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗВ'ЯЗКУ

### 4.1 Визначення оптичних інтерфейсів (стиків) на основі рекомендацій МСЕ-Т

Розглянемо методика вибору оптичних інтерфейсів рівня STM-4 з прикладу умовної схеми організації зв'язку (рис. 4.1). На цій схемі вузли 1, 6 і 7 з'єднуються послідовною лінійною ланкою, а вузли 1, 2, 3, 4 і 5 з'єднуються кільцем. Відстань між пунктами зазначено в таблиці 4.1, де наведено відповідні цим відстаням та попередньо вибрані коди застосування. При виборі коду застосування враховано, що найпоширенішими, доступними та найбільш економічними є ОК з волокнами G.652.

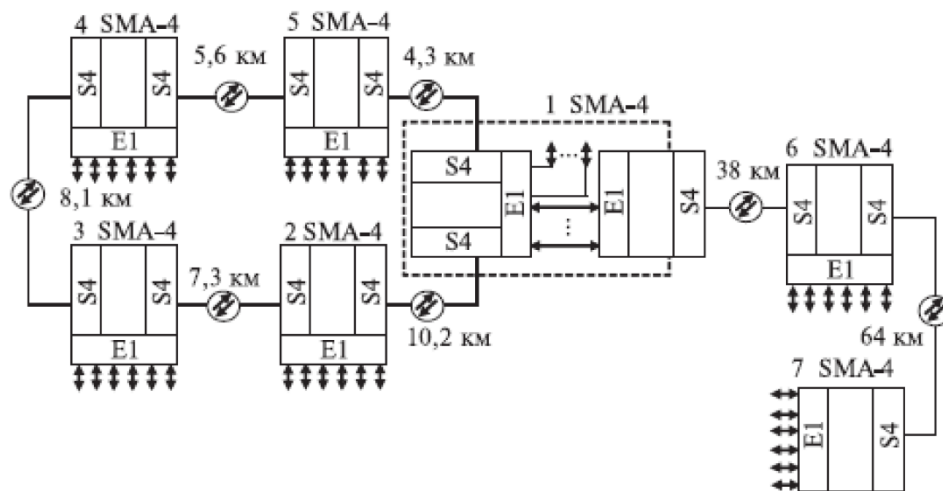


Рисунок 4.1 – Схема організації зв'язку з використанням мережних структур «кільце» та «лінійний послідовний ланцюг»

Таблиця 4.1 – Відстань між пунктами

Пункти	1-2	2-3	3-4	4-5	1-5	1-6	6-7
Відстань, км	10.2	7.3	8.1	5.6	4.3	38	64
Код застосування	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1	S-4.1

Виходячи з параметрів оптичного інтерфейсу STM-4 та параметрів оптичного кабелю, виконаємо оцінювання застосовності вибраних кодів. З цією метою для кожного обраного коду застосування потрібно визначити максимальну та мінімальну довжини регенераційних секцій (довжину ділянки регенерації).

Максимальна  $L_{max}$  і мінімальна  $L_{min}$  довжини, що визначаються допустимими втратами між точками S і R, знаходяться за формулами:

$$L_{\max_a} = \frac{A_{\max}}{a} \quad (4.1)$$

$$L_{\min_a} = \frac{A_{\min}}{a} \quad (4.2)$$

де  $A_{\max}$  і  $A_{\min}$  – максимальне і мінімальне значення загасання, що перекривається, відповідно;

$a$  – кілометрове загасання (коефіцієнт загасання) в оптичному кабелі.

Значення  $A_{\max}$  і  $A_{\min}$  для цього прикладу та величину  $a$  приймемо:

$A_{\max} = 12$  дБ,  $A_{\min} = 0$  дБ та  $a = 0,5$  дБ/км для ОК за рекомендацією G.652 на довжині хвилі 1310 нм (код застосування S-4.1);

$A_{\max} = 24$  дБ,  $A_{\min} = 12$  дБ та  $a = 0,5$  дБ/км для ОК за рекомендацією G.652 на довжині хвилі 1310 нм (код застосування L-4.1);

$A_{\max} = 24$  дБ,  $A_{\min} = 12$  дБ та  $a = 0,4$  дБ/км для ОК за рекомендацією G.652 на довжині хвилі 1550 нм (код застосування L-4.2).

За формулою (4.1) знаходимо максимальну довжину регенераційної секції вибраних інтерфейсів:

для коду застосування S-4.1

$$L_{\max_a} = \frac{A_{\max}}{a} = \frac{12}{0.5} = 24 \text{ км};$$

для коду застосування L-4.1

$$L_{\max_a} = \frac{A_{\max}}{a} = \frac{24}{0.5} = 48 \text{ км};$$

для коду застосування L-4.2

$$L_{\max_a} = \frac{A_{\max}}{a} = \frac{24}{0.4} = 60 \text{ км}.$$

Мінімальна довжина регенераційної секції обраних інтерфейсів визначається за формулою (4.2):

для застосування коду S-4.1

$$L_{\min_a} = \frac{A_{\min}}{a} = \frac{0}{0.5} = 0 \text{ км};$$

для коду застосування L-4.1

$$L_{\min_a} = \frac{A_{\min}}{a} = \frac{12}{0.5} = 24 \text{ км}$$

для коду застосування L-4.2

$$L_{\min_a} = \frac{A_{\min}}{a} = \frac{12}{0.4} = 30 \text{ км.}$$

Вибраний інтерфейс L-4.2, як впливає з таблиці 4.1, на ділянці 6–7 не задовольняє вимогу максимальної протяжності. Допустиму величину кілометричного загасання  $a_{\text{доп}}$  для такої секції визначимо з рівняння  $L_{\max_a} = \frac{A_{\max}}{a}$ , розв'язавши його щодо  $a$ . Для значень  $A_{\max} = 24$  дБ і  $L_{\max} = 64$  км отримуємо

$$a_{\text{доп}} = \frac{A_{\max}}{L_{\max}} = \frac{24}{64} = 0.375 \text{ дБ/км/}$$

Кілометричне загасання менше  $a_{\text{доп}}$  має покращене ОВ за рекомендацією G.652, яке потрібно застосувати.

З іншого боку, максимальна довжина оптичної секції залежить від дисперсії ОВ і визначається за формулою

$$L_{\max\sigma} = E \cdot 10^6 / (BD_{xp} \sigma_{\lambda}),$$

де  $B$  – швидкість передачі, Мбіт/с;

$D_{xp}$  – питома хроматична дисперсія ОВ, пс/нм·км;

$\sigma_{\lambda}$  – середньоквадратична ширина спектра (СШС) джерела випромінювання, нм

Якщо ширина спектра визначена на рівні -20 дБ ( $\Delta_{\lambda-20}$ ), то СШС

$$\sigma_{\lambda} = \frac{\Delta_{\lambda-20}}{6.07}.$$

Величина  $E$  приймається рівною:

- 0,306 для СД та одномодових лазерів (додаткові втрати в тракці 1 дБ);
- 0,491 для тракту STM-16 (додаткові втрати в тракці 2 дБ);
- 0,115 для багатомодових лазерів (врахування шуму поділу мод).

Для коду застосування S-4.1 (джерело випромінювання MLM:  $E = 0,115$ ,  $\sigma_{\lambda} = 4$  нм,  $B = 622.08$  Мбіт/с,  $D_{xp} = 3,5$  пс/нм·км) маємо

$$L_{\max\sigma} = \frac{0.115 \cdot 10^6}{622.08 \cdot 3.5 \cdot 4} \approx 13.2 \text{ км.}$$

Для коду застосування L-4.1 (джерело випромінювання SLM:  $E = 0,306$ ,  $\Delta_{\lambda-20} = 1$  нм,  $B = 622.08$  Мбіт/с,  $D_{xp} = 3,5$  пс/нм·км) маємо

$$L_{\max \sigma} = \frac{0.306 \cdot 10^6 \cdot 6.07}{622.08 \cdot 3.5 \cdot 1} \approx 853 \text{ км.}$$

Для коду застосування L-4.2 (джерело випромінювання SLM:  $E = 0,306$ ,  $\Delta_{\lambda-20} = 1$  нм,  $B = 622,08$  Мбіт/с,  $D_{xp} = 18$  пс/нм·км) маємо

$$L_{\max \sigma} = \frac{0.306 \cdot 10^6 \cdot 6.07}{622.08 \cdot 18 \cdot 1} \approx 165.9 \text{ км.}$$

Отже, для ділянок проєктованої мережної структури можна застосувати оптичний кабель з ОВ за рекомендацією G.652. Вибір системи передачі можна виконати, керуючись технічними даними обладнання СЦІ. Основні критерії при виборі обладнання: швидкість передачі лінійних інтерфейсів, дальність передачі, різноманітність інтерфейсів користувача, способів резервування, інтерфейси до систем і мережі управління TMN, наявність додаткових інтерфейсів для станційної сигналізації та ін. Остаточне рішення про вибір типу обладнання та ОК приймається після проведення економічних розрахунків.

#### **4.2 Вибір топології сегмента транспортної мережі**

Розглянемо докладно приклад, в якому потрібно спроектувати ділянку транспортної мережі, яка з'єднає два міста. На заданій ділянці мережі, що побудована за топологією «точка – точка», передбачається виконати процедуру введення/виведення по два потоки рівня STM-16 у проміжних вузлах. Споживачами мережі зв'язку, що проєктується, будуть підприємства, населення, частина каналів надаватиметься для передачі даних, телевізійних сигналів, сигналів телеконтролю в медичних установах і здаватиметься в оренду комерційним операторам зв'язку. Транспортна мережа має бути орієнтована на будь-який вид інформації користувача, зокрема сигнали PDH, ATM, Frame Relay, Ethernet. Крім того, спроектована ділянка може бути початком проєктування та побудови потужної високошвидкісної магістральної транспортної мережі. Однією з особливостей цієї мережі є використання технології хвильового мультиплексування. Саме ця технологія, на думку багатьох експертів, є найбільш перспективною і вже сьогодні дозволяє досягти рекордних сумарних швидкостей передачі по одному оптичному волокну. Крім того, технологія хвильового мультиплексування дозволяє найбільш повно використовувати величезну пропускну спроможність оптичного волокна. Будемо використовувати систему хвильового мультиплексування Lambda Driver 1600. Система Lambda Driver 1600 забезпечує передачу до 16 незалежних потоків інформації зі швидкістю до 2,5 Гбіт/с, кожен із них передається у повнодуплексному режимі по одній парі оптичних волокон.

Максимальна пропускна спроможність системи сягає 40 Гбіт/с. Система Lambda Driver забезпечує прозору передачу кількох незалежних потоків даних оптичного волокна. Lambda Driver дозволяє одночасно мультиплексувати по довжинах хвиль потоки SDH, ATM, Fast/Gigabit Ethernet, Fibre Channel та ін. Є два види шасі Lambda Driver (LD800 та LD1600). Обидва види шасі Lambda Driver використовують однакові універсальні транспондери. Управління та моніторинг Lambda Driver здійснюється локально через порт RS-232 (DB9) або дистанційно за протоколами SNMP або Telnet через порт Ethernet 10/100 Мбіт/с (RJ-45). Дистанційне керування здійснюється через спеціальний канал (OSC), який передається разом з даними WDM/DWDM по тому ж оптичному кабелю. Кожен модуль мультиплексора/демультиплексора DWDM має інтерфейс системи моніторингу оптичного каналу. Типовою конфігурацією мережі під час використання Lambda Driver є топологія «точка – точка». Реалізація кільцевої топології вимагає використання модулів мультиплексорів введення/виведення у кожному з вузлів кільця. Серед модулів для платформи LD800 – мультиплексори, демультиплексори та OADM для 1, 2, 4 чи 8 довжин хвиль. Така гнучкість дає операторам можливість зменшити початкові вкладення – спочатку придбати систему, що працює з кількома довжинами хвиль, а потім модернізувати її (за необхідності). Для системи передачі буде використовуватися обладнання SDH (СЦІ) компанії Lucent Technologies. Марка обладнання – WaveStar® ADM 16/1. Дана система передачі 3-го покоління з високою пропускною спроможністю може мультиплексувати стандартні швидкості PDH та SDH до більш високих рівнів, аж до 2,5 Гбіт/с (STM-16).

На ділянці транспортної мережі, що проєктується, відстань становить 674 км. У сучасних волоконно-оптичних мережах довжина регенераційної ділянки 700–1000 км. Тобто, організація зв'язку між містами можлива без проміжної регенерації сигналу. Це дозволяє обійтися без процедури оптоелектронного перетворення, яке значно ускладнює мережу. Загасання, яке вносить кабель та інші елементи, передбачається компенсувати підсилювачами на волокні, легованому ербієм (EDFA). Незважаючи на пізніший винахід, EDFA першими проникають на телекомунікаційний ринок і сьогодні домінують на ньому. Оптичний підсилювач має три істотні переваги перед регенератором. По-перше, оптичний підсилювач конструктивно простіший. По-друге, оптичний підсилювач, на відміну регенератора, не прив'язаний до протоколу чи швидкості передачі, може підсилювати вхідний сигнал будь-якого формату. По-третє, він здатний одночасно підсилювати велику кількість незалежних спектрально розділених каналів, тоді як регенератор може обробляти лише один канал, одну довжину хвилі. Перераховані переваги оптичного підсилювача настільки великі, що дозволяють миритися з головним недоліком – додатковим шумом, який він вносить. При проєктуванні ділянки мережі доводиться враховувати багато економічних чинників. Звичайно,

оптимальною стратегією було б якнайчастіше розміщення підсилювачів і відповідне зменшення їх коефіцієнтів підсилення. Ціна диктує протилежну стратегію. На практиці економічно не вигідно розміщувати оптичні підсилювачі близько, оскільки кожен вузол, в якому знаходиться оптичний підсилювач, потребує певної інфраструктури, а саме: наявності джерела живлення, приміщення, захищеності вузла, обслуговувального персоналу. Типові відстані між підсилювачами становлять 40–100 км і більше. Кожен підсилювач потрібно встановлювати поблизу міської зони, оскільки для його роботи потрібна наявність джерела живлення. Крім того, у разі виходу його з ладу це скоротить час прибуття обслуговувального персоналу. Траса прокладання вибирається з урахуванням топографічних труднощів, щоб уникнути перешкод. Вона розташовується головним чином уздовж автомагістралей, чим підвищується її доступність обслуговування і швидкість будівництва. Для підвищення надійності та якості передачі використовується метод резервування каналу 1+1. В архітектурі 1+1 основний блок підключається до робочого, інший – до резервного каналу, що забезпечує більш високу якість передачі. Крім того, у подальшому при побудові між містами нової ділянки транспортної мережі можлива організація резервного спрямування передачі, щоб значно збільшує надійність ВОЛЗ. При цьому потрібно врахувати, що вихідна потужність системи хвильового мультиплексування з резервуванням дещо нижча, ніж без резервування:  $p_{\text{пер}} = -5$  дБм. Чутливість використовуваного у проєкті підсилювача EDFA компанії Lucent у режимі лінійного підсилювача та у режимі передпідсилювача

$$P_{\text{пр.мін}} = -30 \text{ дБм.}$$

У зв'язку з деградацією (погіршенням у часі) характеристик оптичного кабелю та станційного обладнання потрібно ввести експлуатаційний запас рівня потужності прийому підсилювача EDFA. При проєктуванні довжин підсилювальних ділянок врахуємо експлуатаційний запас  $A_{\text{зан}} = 2,4$  дБ.

### 4.3 Проєктування ділянки транспортної мережі за енергетичними параметрами

Енергетичний потенціал підсилювальної ділянки з урахуванням експлуатаційного запасу визначається за формулою

$$E_i = P_{\text{пр.мін}} + P_{\text{пері-1}} - A_{\text{зан}}, \quad (4.3)$$

де  $i$  – номер підсилювальної ділянки.

Вихідна потужність системи Lambda Driver 1600 з урахуванням резервування



$$p_{пер} = -5 \text{ дБм.}$$

Чутливість EDFA у режимі лінійного підсилювача

$$p_{пр.мін} = -30 \text{ дБм.}$$

Відповідно, енергетичний потенціал першої підсилювальної ділянки

$$E_1 = p_{пер} - p_{пр.мін} - A_{зан} = -5 - (-30) - 2 = 23 \text{ дБм.}$$

Максимальна довжина підсилювальної ділянки визначається за формулою

$$L_{ус.маxi} = \frac{E_i - A_p n_p}{\alpha_k + \frac{A_{CB}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K,D} D_1}{D_2}} \quad (4.4)$$

Вважаємо, що роз'ємні з'єднання встановлені тільки в місцях підключення мультиплексорів хвильового ущільнення та введення/виведення каналів.

Відповідно, максимальна довжина першої підсилювальної ділянки

$$L_{нд.маx1} = \frac{23 - 0.5 \cdot 1}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 74 \text{ км.}$$

Виходячи з максимальної довжини першої підсилювальної ділянки, для встановлення першого підсилювача EDFA найбільш оптимально вибрати населений пункт на відстані  $L_{ycl} = 72 \text{ км.}$

Загасання, яке вноситься підсилювальною ділянкою, визначається за формулою

$$A_i = L_{ндi} \left( \alpha_K + \frac{A_{ЗВ}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K,D} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p. \quad (4.5)$$

Визначимо загасання, яке вноситься першою підсилювальною ділянкою,

$$A_1 = L_{\text{нод}} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{\text{ср}}} - \frac{\alpha_{K,D} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$72 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 1 = 22.4 \text{ дБ}$$

Рівень потужності на виході  $i$ -ї ділянки

$$P_{\text{пр}i} = P_{\text{пер}i-1} - A_i \quad (4.6)$$

Для першої ділянки

$$P_{\text{пр}1} = P_{\text{пер}} - A_1 = -5 - 22.4 = -27.4 \text{ дБм.}$$

Для визначення коефіцієнта підсилення підсилювача EDFA, що залежить від потужності вхідного сигналу, будемо користуватися апроксимувальним поліномом, отриманим за допомогою методу найменших квадратів. Апроксимувальний поліном має вигляд (виведення даної функції наведено в підрозділі 1.7)

$$q = 16 - 0.816 p_{\text{пр}} - 0.0116 p_{\text{пр}}^2.$$

Таким чином, при  $p_{\text{пр}1} = -27.4$  дБм отримаємо

$$q_1 = 16 + 0.816 \cdot 27.4 - 0.0116 \cdot (-27.4)^2 = 29.5 \text{ дБ.}$$

Зазначимо, що похибка щодо значення коефіцієнта підсилення становить 0,1 дБ.

Потужність на виході  $i$ -го підсилювача EDFA (або на вході  $(i+1)$ -ї підсилювальної ділянки)

$$P_{\text{пер}i} = P_{\text{пр}i} + q_i. \quad (4.7)$$

Для першої підсилювальної ділянки

$$P_{\text{пер}1} = P_{\text{пр}1} + q_1 = -27.4 + 29.5 = 2.1 \text{ дБм.}$$

Аналогічно, користуючись формулами (4.3)–(4.7), зробимо розрахунок для інших підсилювальних ділянок

$$E_2 = p_{\text{пр.min}} + P_{\text{пер}1} - A_{\text{зан}} = 30 + 2.1 - 2 = 30.1 \text{ дБм;}$$

$$L_{\text{ндс.маx2}} = \frac{E_2 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{\text{стp}}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{30.1 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 101 \text{ км.}$$

Місцем розташування другого підсилювального пункту виберемо населений пункт на відстані від попереднього  $L_{\text{нд2}} = 99$  км. Тоді

$$\begin{aligned} A_2 &= L_{\text{нд2}} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{\text{стp}}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p = \\ 99 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 &= 29.5 \text{ дБ} \\ p_{\text{нр2}} &= p_{\text{нр1}} - A_2 = 2.1 - 29.5 = -27.4 \text{ дБм} \\ q_2 &= 16 + 0.816 \cdot 27.4 - 0.0116 \cdot (-27.4)^2 = 29.5 \text{ дБ} \\ p_{\text{нр2}} &= p_{\text{нр2}} + q_2 = -27.4 + 29.5 = 2.1 \text{ дБм} \end{aligned}$$

У другому місті потрібно встановити оптичний мультиплексор введення/виведення (OADM), що вносить загасання

$$A_{\text{OADM}} = 1.5 \cdot \log_2 8 = 4.5 \text{ дБ.}$$

Методика розрахунку втрат наведена у [7]. Також необхідно врахувати, чи відповідає рівень сигналу на вході OADM1 динамічному діапазону приймача, який становить від -3 до -20 дБм. Якщо рівень сигналу виявиться вищим за динамічний діапазон, то доведеться встановити на виході приймача атенюатор, який вносить необхідне загасання, в іншому випадку – перед підсилювачем.

Визначимо потужність на виході OADM1  $L'_{\text{нд}} = 20$  км.

Величини  $A'_3$ ,  $L'_{\text{нд}}$  стосуються другої ділянки;  $A''_3$ ,  $L''_3$  – третьої ділянки. Повна довжина підсилювальної ділянки  $L_{\text{нд3}} = L'_{\text{нд3}} + L''_{\text{нд3}}$ . Виконаємо розрахунки:

$$A'_3 = L'_{\text{нд3}} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{\text{стp}}} \right) + A_p n_p = 20 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} \right) + 0.5 \cdot 2 = 5.3 \text{ дБм,}$$

$$p'_{\text{нр3}} = p_{\text{нр2}} - A'_3 = p'_{\text{нр2}} = 2.1 - 5.3 = -3.2 \text{ дБм.}$$

Отримана величина вхідного рівня повністю відповідає динамічному діапазону приймача. Отже, ніяких додаткових пристроїв не потрібно встановлювати. З урахуванням загасання, що вноситься OADM, визначимо:

$$p'_{\text{нр2}} = p'_{\text{нр2}} - A_{\text{OADM}} = -3.2 - 4.5 = -7.7 \text{ дБ;}$$

$$E'_3 = p_{np.min} + p'_{nep2} - A_{зан} = 30 - 7.7 - 2 = 20.3 \text{ дБм};$$

$$L''_{nod.max3} = \frac{E'_3 - A_p n_p + L'_{nod3} \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cpr}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} =$$

$$\frac{20.3 - 0.5 \cdot 2 - 20 \cdot \frac{1.56 \cdot 18}{340}}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 59 \text{ км}$$

Місцем розташування третього підсилювального пункту виберемо населений пункт на відстані від попереднього пункту  $L''_{nod3} = 59$  км.

Таким чином, загальна довжина третьої підсилювальної ділянки

$$L_{nod3} = L'_{nod3} + L'' = 20 + 59 = 79 \text{ км};$$

$$A''_3 = L''_{nod3} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cpr}} \right) - L_{nod3} \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} + A_p n_p =$$

$$20 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} \right) + 79 \cdot \frac{1.56 \cdot 18}{340} + 0.5 \cdot 2 = 20.3 \text{ дБ};$$

$$p'_{nep3} = p'_{nep2} - A''_3 = -7.7 - 20.3 = -28 \text{ дБм};$$

$$q_3 = 16 + 0.816 \cdot 28 - 0.0116 \cdot (-28)^2 = 29.6 \text{ дБ};$$

$$p_{nep3} = p'_{nep3} - q_3 = -28 + 29.6 = 1.6 \text{ дБм};$$

$$E_4 = p_{np.min} + p_{nep3} - A_{зан} = 30 + 1.6 - 2 = 29.6 \text{ дБм};$$

$$L_{nod.max4} = \frac{E_4 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cpr}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{29.6 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 99 \text{ км}.$$

Місцем розташування четвертого підсилювального пункту виберемо на відстані від попереднього вузла  $L_{nod4} = 98$  км.

Виконаємо обчислення:

$$A_4 = L_{нд4} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{ср}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$95 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 29.2 \text{ дБ}$$

$$p_{np4} = p_{np4} - A_4 = 1.6 - 29.2 = 27,6 \text{ дБм};$$

$$q_4 = 16 + 0.816 \cdot 27.6 - 0.0116 \cdot (-27.6)^2 = 29.5 \text{ дБ};$$

$$p_{nep4} = p_{np4} + q_4 = -27.6 + 29.5 = 1.9 \text{ дБм};$$

$$E_5 = p_{np.min} + p_{nep4} - A_{зан} = 30 + 1.6 - 2 = 29.4 \text{ дБм};$$

$$L_{ндmax5} = \frac{E_5 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{ср}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{29.4 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 95 \text{ км.}$$

Наступний підсилювач EDFA розмістимо на відстані від попереднього вузла  $L_{нд5} = 65 \text{ км}$ .

Крім того, у цьому пункті потрібно виконати процедуру введення/виведення двох потоків STM-16. Розрахуємо:

$$A_5 = L_{нд5} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{ср}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$65 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 20.3 \text{ дБ}$$

$$p'_{np5} = p_{nep4} - A_5 = 1.9 - 20.3 = -18.4 \text{ дБм.}$$

Отриманий вхідний рівень потужності відповідає мінімальній чутливості приймального OADM модуля. З урахуванням загасання, що вноситься OADM, визначимо

$$p_{np5} = p'_{np5} - A_{OADM} = -18.4 - 4.5 = -22.9 \text{ дБм.}$$

При  $p'_{np5} = -22.9 \text{ дБм}$  обчислимо інші параметри:

$$q_5 = 16 + 0.816 \cdot 22.9 - 0.0116 \cdot (-22.9)^2 = 28.5 \text{ дБ};$$

$$p_{nep5} = -22.9 + 28.9 = 5.6 \text{ дБ};$$

$$E_6 = p_{np.min} + p_{nep5} - A_{зан} = 30 + 5.6 - 2 = 33.6 \text{ дБм}$$

$$L_{нд\max 6} = \frac{E_6 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cnp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{33.6 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 109 \text{ км}$$

Місцем розташування шостого підсилювального пункту виберемо населений пункт на відстані від попереднього вузла  $L_{нд6} = 105$  км.

Тоді

$$A_6 = L_{нд6} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cnp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$105 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 32.5 \text{ дБ}$$

$$p_{np6} = p_{nep5} - A_6 = 5.6 - 32.5 = -26.9 \text{ дБм};$$

$$q_6 = 16 + 0.816 \cdot 26.9 - 0.0116 \cdot (-26.9)^2 = 29.4 \text{ дБ};$$

$$p_{nep6} = p_{np6} + q_6 = -26.9 + 29.4 = 2.5 \text{ дБм};$$

$$E_7 = p_{np.min} + p_{nep6} - A_{зан} = 30 + 2.5 - 2 = 30.5 \text{ дБм};$$

$$L_{нд\max 7} = \frac{E_7 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cnp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{30.5 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 102 \text{ км}$$

Місцем розташування сьомого підсилювального пункту беремо населений пункт на відстані від попереднього  $L_{yc7} = 98$  км.

Розрахуємо:

$$A_7 = L_{нд7} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{cnp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$98 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 29.2 \text{ дБ}$$

$$p_{np7} = p_{nep6} - A_7 = 2.5 - 29.2 = -26.7 \text{ дБм};$$

$$q_7 = 16 + 0.816 \cdot 26.7 - 0.0116 \cdot (-26.7)^2 = 29.4 \text{ дБм};$$

$$p_{nep7} = p_{np7} + q_7 = -26.7 + 29.4 = 2.7 \text{ дБм}.$$

Визначимо рівень сигналу в кінцевому пункті призначення:

$$L_{\text{но8}} = 58 \text{ км}$$

$$A_8 = L_{\text{но8}} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{\text{стр}}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$58 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.58 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 1 = 18.3 \text{ дБ}$$

$$P_{\text{пр8}} = P_{\text{пер7}} - A_8 = 2.7 - 18.3 = -15.4 \text{ дБм};$$

Цей рівень потужності відповідає діапазону приймального модуля апаратури Lambda Driver 1600. Тому в кінцевому пункті немає необхідності ставити підсилювач. Розрахунок показує, що для побудови прямого напрямку ділянки мережі знадобиться 7 підсилювачів EDFA. Більше зручне відображення розрахованих величин наведено в таблиці 4.2. Схема організації зв'язку та діаграма рівнів ВОЛЗ показані на рисунку 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні параметри ВОЛЗ

Населений пункт	Мультиплексор 1	ОП1	ОП2	OADM	ОП3
Підсилювальна ділянка	-	1	2	3	
$L_{\text{но}}$ , км	-	72	99	79	
$L$ , км	-	72	99	20	59
$A$ , дБ	-	22.4	29.5	5.3	20.3
$P_{\text{пр}}$ , дБм	-	-27.4	-27.4	-3.2	-28
$P_{\text{пер}}$ , дБм	-5	2.1	2.1	-7.7	1.6
$q$ , дБ	-	29.5	29.5	-4.5	29.6

Продовження таблиці 4.2

Населений пункт	ОП4	OADM	ОП5	ОП6	Демультимплексор 1
Підсилювальна ділянка	4	5	6	7	8
$L_{\text{но}}$ , км	98	65	105	98	58
$L$ , км	98	65	105	98	58
$A$ , дБ	29.2	20.3	32.3	29.2	18.3
$P_{\text{пр}}$ , дБм	-27.6	-22.9	-26.9	-26.7	15.4
$P_{\text{пер}}$ , дБм	1.9	5.6	2.5	2.7	-
$q$ , дБ	29.5	28.5	29.4	29.4	-

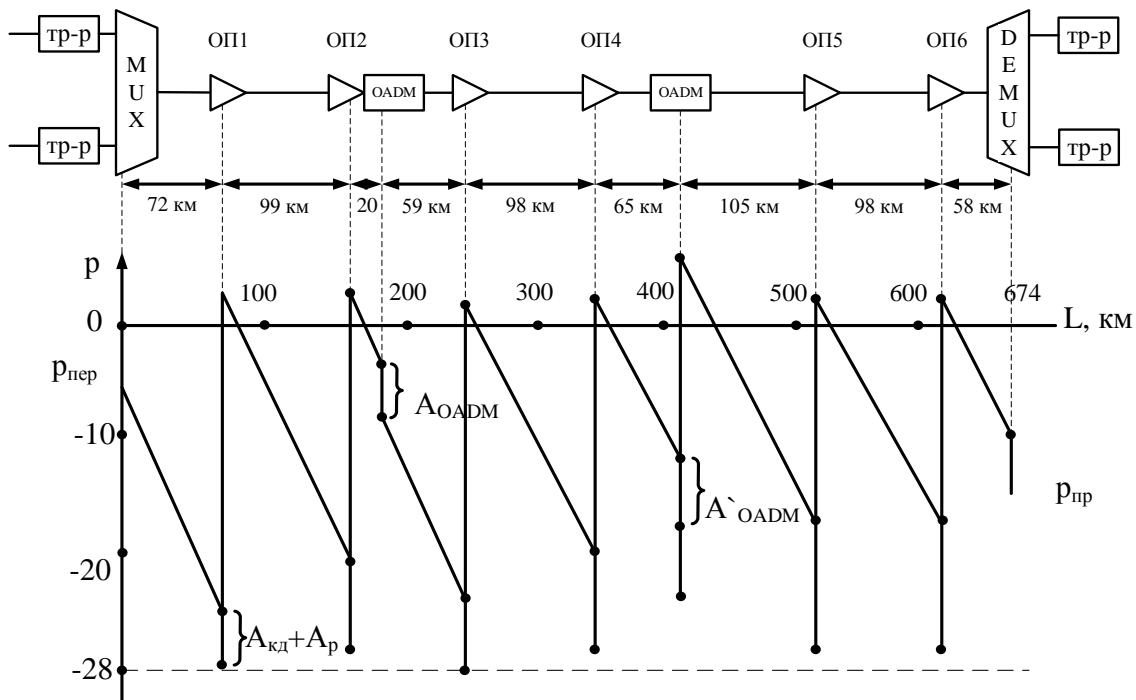


Рисунок 4.2 – Схема організації зв'язку та діаграма рівнів ВОЛЗ

Розрахунок при проектуванні зворотного напрямку проводиться аналогічно прямому

$$p_{пер} = -5 \text{ дБм};$$

$$E_1 = p_{пр.min} + p_{пер} - A_{зан} = 30 - 5 - 2 = 23 \text{ дБм};$$

$$L_{ндmax1} = \frac{E_1 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{К.D.} D_1}{D_2}} = \frac{23 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 74 \text{ км}.$$

Отримане значення енергетичного потенціалу дозволяє розмістити перший підсилювальний пункт у населеному пункті на відстані  $L_{ус8} = 58 \text{ км}$ .

Виконаємо обчислення для цієї ділянки:

$$A_1 = L_{нд1} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{К.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$58 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 1 = 18.3 \text{ дБ};$$

$$p_{пр1} = p_{пер} - A_1 = -5 - 18.3 = -23.3 \text{ дБм};$$

$$q_1 = 16 + 0.816 \cdot 23.3 - 0.0116 \cdot (-23.3)^2 = 28.6 \text{ дБ};$$



$$P_{nep1} = P_{np1} + q_1 = -23.3 + 28.6 = 5.3 \text{ дБм};$$

$$E_2 = P_{np.min} + P_{nep1} - A_{зан} = 30 + 5.3 - 2 = 33.3 \text{ дБм};$$

$$L_{nod\max2} = \frac{E_2 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{ctp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{33.3 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 112 \text{ км.}$$

Отже, другий підсилювальний пункт можна розмістити у населеному пункті на відстані від попереднього  $L_{yc2} = 98$  км.

Розрахуємо параметри:

$$A_2 = L_{nod2} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{ctp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$98 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 29.2 \text{ дБ};$$

$$P_{np2} = P_{nep1} - A_2 = 5.3 - 29.2 = -23.9 \text{ дБм};$$

$$q_2 = 16 + 0.816 \cdot 23.9 - 0.0116 \cdot (-23.9)^2 = 28.7 \text{ дБ};$$

$$P_{nep2} = P_{np2} + q_2 = -23.9 + 28.7 = 4.8 \text{ дБм};$$

$$E_3 = P_{np.min} + P_{nep2} - A_{зан} = 30 + 4.8 - 2 = 32.8 \text{ дБм};$$

$$L_{nod\max3} = \frac{E_3 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{ctp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{32.8 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 106 \text{ км.}$$

Отримане значення енергетичного потенціалу дозволяє розмістити третій підсилювальний пункт на відстані від попереднього  $L_{yc3} = 105$  км. Тоді

$$A_3 = L_{nod3} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{ctp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$105 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 32.5 \text{ дБ};$$

$$P_{np3} = P_{nep2} - A_3 = 4.8 - 32.5 = -27.7 \text{ дБм.}$$

У даному вузлі потрібно виконати процедуру введення/виведення двох потоків STM-16 за допомогою оптичного мультиплексора OADM. Динамічний діапазон приймального модуля OADM становить від -3 до 20 дБм. Таким чином, потрібно встановити підсилювач EDFA, що підсилює сигнал з коефіцієнтом

$$q_3 = 16 + 0,816 \cdot 27,7 - 0,0116(-27,7)^2 = 29,5 \text{ дБ},$$

після чого встановити атенюатор, який послаблює сигнал до  $p'_{неp3} = -3$  дБм. З урахуванням загасання, що вноситься OADM, отримаємо:

$$p_{неp3} = p'_{неp3} - A_{OADM} = -3 - 4,5 = -7,5 \text{ дБм}$$

$$E_4 = p_{np.min} + p_{неp3} - A_{зан} = 30 - 7,5 - 2 = 20,5 \text{ дБм}$$

$$L_{ндmax4} = \frac{E_4 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{20,5 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 65,5 \text{ км.}$$

Отже, четвертий підсилювальний пункт можна розмістити у населеному пункті на відстані від попереднього  $L_{yc4} = 65$  км.

Розрахуємо:

$$A_4 = L_{нд4} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$65 \cdot \left( 0,2 + \frac{0,03}{2} - \frac{1,56 \cdot 18}{340} \right) + 0,5 \cdot 2 = 20,3 \text{ дБ};$$

$$p_{np4} = p_{неp3} - A_4 = -7,5 - 20,3 = -27,8 \text{ дБм}$$

$$q_4 = 16 + 0,816 \cdot 27,8 - 0,0116 \cdot (-27,8)^2 = 29,6 \text{ дБ};$$

$$p_{неp4} = p_{np4} + q_4 = -27,8 + 29,6 = 1,8 \text{ дБм}$$

$$E_5 = p_{np.min} + p_{неp4} - A_{зан} = 30 + 1,8 - 2 = 29,8 \text{ дБм}$$

$$L_{ндmax5} = \frac{E_5 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{29,8 - 0,5 \cdot 2}{0,2 + \frac{0,03}{2} + \frac{1,56 \cdot 18}{340}} = 100 \text{ км.}$$

Розраховане значення енергетичного потенціалу дозволяє розмістити п'ятий підсилювальний пункт у населеному пункті на відстані від попереднього  $L_{нд5} = 98$  км.

Тоді

$$A_5 = L_{нд5} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$98 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 29.2 \text{ дБ};$$

$$p_{np5} = p_{пер4} - A_5 = 1.8 - 29.2 = -27.4 \text{ дБм};$$

$$q_5 = 16 + 0.816 \cdot 27.8 - 0.0116 \cdot (-27.4)^2 = 29.5 \text{ дБ};$$

$$p_{пер5} = p_{np5} + q_5 = -27.4 + 29.5 = 2.1 \text{ дБм};$$

У заданому пункті потрібно встановити оптичний мультиплексор введення/виведення OADM. Відстань до попереднього вузла  $L'_{нд6} = 59$  км.

Величини  $A'_6$ ,  $L'_{нд6}$  стосуються попередньої ділянки;  $A''_6$ ,  $L''_{нд6}$  – наступної ділянки підсилення. Повна довжина підсилювальної ділянки становить  $L_{нд6} = L'_{нд6} + L''_{нд6}$ . Виконаємо розрахунок для цієї ділянки:

$$A'_6 = L'_{нд6} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} \right) + A_p n_p = 59 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} \right) + 0.5 \cdot 2 = 13.7 \text{ дБ};$$

$$p'_{np6} = p_{пер6} - A'_6 = 2.1 - 13.7 = -11.6 \text{ дБм}.$$

Отримана величина вхідного рівня відповідає динамічному діапазону приймача. Тому ніяких додаткових пристроїв встановлювати не потрібно. З урахуванням загасання, яке вноситься OADM, визначимо:

$$p'_{пер6} = p'_{np6} - A_{OADM} = -11.6 - 4.5 = -16.1 \text{ дБ};$$

$$E'_6 = p_{np \min} + p'_{пер6} - A_{зан} = 30 - 16.1 - 2 = 11.9 \text{ дБм};$$

$$L''_{нд \max 6} = \frac{E'_6 - A_p n_p + L'_{нд6} \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{11.6 - 0.5 \cdot 2 - 59 \cdot \frac{1.56 \cdot 18}{340}}{0.2 + \frac{0.03}{2} - \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 20 \text{ км}.$$

Шостий підсилювальний пункт можна розташувати в населеному пункті на відстані від попереднього вузла  $L''_{нд6} = 20$  км.

Таким чином, загальна довжина третьої підсилювальної ділянки

$$L_{нд6} = L'_{нд6} + L''_{нд6} = 20 + 59 = 79 \text{ км}$$

З огляду на це отримаємо:

$$A''_6 = L''_{нд6} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} \right) - L_{нд6} \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} + A_p n_p =$$

$$20 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} \right) - 79 \cdot \frac{1.56 \cdot 18}{340} + 0.5 \cdot 2 = 11.9 \text{ дБ};$$

$$p_{нр6} = p'_{нр6} - A''_6 = -16.1 - 11.9 = -28 \text{ дБм}$$

$$q_6 = 16 + 0.816 \cdot 28 - 0.0116 \cdot (-28)^2 = 29.6 \text{ дБ};$$

$$p_{нр6} = p_{нр6} + q_6 = -28 + 29.6 = 1.6 \text{ дБм};$$

$$E_7 = p_{нр.min} + p_{нр6} - A_{зан} = 30 + 1.6 - 2 = 29.6 \text{ дБм}$$

$$L_{ндmax7} = \frac{E_7 - A_p n_p}{\alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2}} = \frac{29.6 - 0.5 \cdot 2}{0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340}} = 99.5 \text{ км}$$

Отже, сьомий підсилювальний пункт можна розмістити в населеному пункті на відстані від попереднього  $L_{нд7} = 99$  км.

Обчислимо параметри для цієї ділянки:

$$A_7 = L_{нд7} \left( \alpha_K + \frac{A_{3B}}{l_{стр}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$99 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 2 = 29.5 \text{ дБ};$$

$$p_{нр7} = p_{нр6} - A_7 = 1.6 - 29.5 = -27.9 \text{ дБм};$$

$$q_7 = 16 + 0.816 \cdot 27.9 - 0.0116 \cdot (-27.9)^2 = 29.6 \text{ дБ};$$

$$p_{нр7} = p_{нр7} + q_7 = -27.9 + 29.6 = 1.7 \text{ дБм}$$

Визначимо рівень сигналу у кінцевому пункті призначення  $L_{нд8} = 72$  км:

$$A_8 = L_{yc8} \left( \alpha_K + \frac{A_{CB}}{l_{cnp}} - \frac{\alpha_{K.D.} D_1}{D_2} \right) + A_p n_p =$$

$$72 \cdot \left( 0.2 + \frac{0.03}{2} + \frac{1.56 \cdot 18}{340} \right) + 0.5 \cdot 1 = 22.4 \text{ дБ};$$

$$P_{np8} = P_{пер7} - A_8 = 1.7 - 22.4 = -20.7 \text{ дБм}$$

Цей рівень потужності відповідає діапазону приймального модуля обладнання Lambda Driver 1600. Тому в кінцевому пункті немає необхідності ставити попередній підсилювач.

Розрахунок показує, що для побудови зворотної ділянки мережі також знадобиться 7 підсилювачів EDFA. Для зручності зведемо розраховані величини в таблицю 4.3.

Діаграма рівнів ВОЛЗ наведена на рисунку 4.3.

Таблиця 4.3 – Основні параметри ВОЛЗ

Населений пункт	Мульти-плексор2	ОП1	ОП2	ОADM	ОП3
Підсилювальна ділянка	-	1	2	3	4
$L_{нд}$ , км	-	58	98	105	65
$L$ , км	-	58	98	105	65
$A$ , дБ	-	18.3	29.5	32.5	20.3
$P_{np}$ , дБм	-	-23.3	-23.9	-27.7	-27.4
$P_{пер}$ , дБм	-5	5.3	4.8	-7.5	1.8
$q$ , дБ	-	28.6	28.7	29.5	29.6

Продовження таблиці 4.3

Населений пункт	ОП4		ОADM	ОП5	ОП6	Демультимплексор2
Підсилювальна ділянка	5		6	7	8	
$L_{нд}$ , км	98		79	99	72	
$L$ , км	98		59	20	99	72
$A$ , дБ	29.2		13.7	11.9	29.5	22.4
$P_{np}$ , дБм	-27.4		-11.6	-28	-27.9	-20.7
$P_{пер}$ , дБм	2.1		-16.1	1.6	1.7	-
$q$ , дБ	29.5		-4.5	29.6	29.6	-

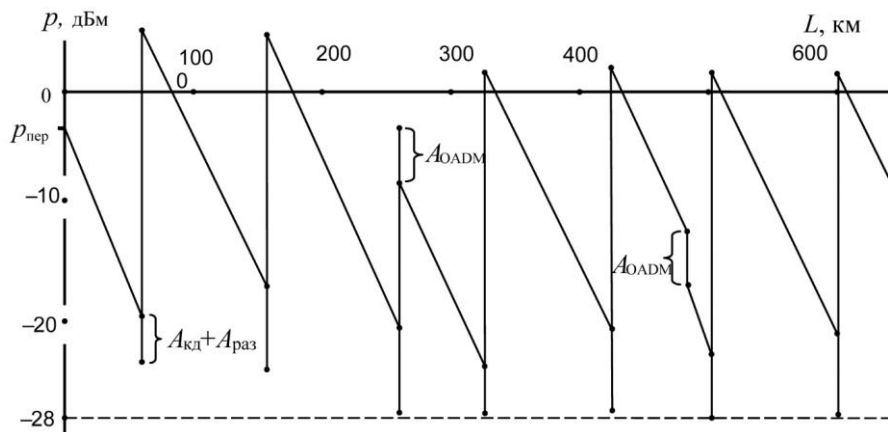


Рисунок 4.3 – Діаграма рівнів ВОЛЗ

Загальна кількість компонентів, що використовуються, і необхідна інфраструктура для даного варіанта ВОЛЗ:

- кількість систем хвильового мультиплексування – 2;
- кількість оптичних мультиплексорів введення/виведення – 4;
- кількість підсилювачів EDFA – 14;
- кількість територіальних центрів – 10.

#### 4.4 Визначення заводозахищеності ділянки транспортної мережі

Визначимо заводозахищеність прямого напрямку транспортної мережі. Відповідно до формули (3.12) заводозахищеність  $i$ -ї ділянки становить

$$A_{zi} = p_{npi} - p_{ш.вх},$$

де  $p_{npi}$  – рівень сигналу на вході  $i$ -го підсилювальної ділянки;

$p_{ш.вх}$  – рівень шумів, наведений до входу оптичного підсилювача,

$$p_{ш.вх} = -52 \text{ дБм.}$$

Визначимо заводозахищеність кожної ділянки. Результати розрахунків для прямого напрямку та зворотного зведені в таблиці.

Потужність завод (мВт) від  $i$ -ї підсилювальної ділянки, наведена до точки  $A$  (див. рис. 3.1), визначається як

$$P_{ши} = 10^{0.1(p_{np} - A_{zi})}, \quad (4.8)$$

де  $p_{np}$  – рівень сигналу в точці  $A$ .

За цією формулою визначимо потужність завод, приведену до точки  $A$ , що вноситься кожною ділянкою. Результати розрахунків наведено у таблицях 4.2, 4.3.

Сумарна потужність завад

$$p_{u\Sigma} \sum_{i=1}^8 p_{ui} = 10^{-4} + 10^{-4} + 1.15 \cdot 10^{-4} + 1.05 \cdot 10^{-4} + 3.55 \cdot 10^{-5} + \\ + 8.91 \cdot 10^{-5} + 7.94 \cdot 10^{-5} + 6.3 \cdot 10^{-6} = 6.3 \cdot 10^{-4} \text{ мВт} \quad (4.9)$$

Сумарний рівень завад

$$p_{u\Sigma} = 10 \cdot \lg(6.3 \cdot 10^{-4}) = -32 \text{ дБм}$$

Захищеність сигналу в точці  $A$  визначається як

$$A'_3 = p_{np} - p_{u\Sigma}$$

Тобто, захищеність сигналу для прямого напрямку ділянки транспортної мережі складе

$$A'_3 = -15.4 + 32 = 16.6 \text{ дБм.}$$

Визначимо сумарну потужність завад, приведену до точки  $A$  для зворотного напрямку

$$p_{u\Sigma} = 1.15 \cdot 10^{-5} + 1.32 \cdot 10^{-5} + 3.16 \cdot 10^{-5} + 3.24 \cdot 10^{-5} + \\ + 2.95 \cdot 10^{-5} + 3.39 \cdot 10^{-5} + 3.31 \cdot 10^{-5} + 6.3 \cdot 10^{-6} = 1.92 \cdot 10^{-5} \text{ мВт}$$

Сумарний рівень завад

$$p_{u\Sigma} = 10 \cdot \lg(1.92 \cdot 10^{-5}) = -37.2 \text{ дБм.}$$

Захищеність сигналу в точці  $A$  складатиме

$$A'_3 = -20.7 + 37.2 = 16.5 \text{ дБм.}$$

Таким чином, мінімальна завадозахищеність мережі буде не нижчою за

$$A_{\text{зв'язку}} = 16.5 \text{ дБм.}$$

Отримане значення завадозахищеності сигналу відповідає визначеним нормам. Отже, на спроектованій ділянці транспортної мережі, задане значення якості передачі буде виконано.

## 5 МОДЕЛЮВАННЯ СЕГМЕНТА ОПТИЧНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

### 5.1 Особливості роботи в САПР OptiSystem

З метою підтвердження правильності проведених розрахунків та фізичної реалізованості спроектованої системи передачі потрібно провести моделювання оптичного тракту в пакеті OptiSystem виробництва компанії Optiwave Systems Inc. (<https://optiwave.com>) [10], [11].

Програмне забезпечення OptiSystem нині є одним із найпопулярніших пакетів моделювання оптичних телекомунікаційних систем. Створений для дослідників і проєктувальників систем оптичного зв'язку, студентів та широкого кола інших користувачів, пакет OptiSystem задовольняє попит ринку фотоніки, що розвивається, на потужний, але простий у використанні інструмент для проєктування оптичних систем.

Пакет моделювання OptiSystem дозволяє [11]:

- проєктувати, тестувати та моделювати (як у часовій, так і в спектральній областях) оптичні мережі та системи передачі різних технологій (CWDM, DWDM, PON, FTTH, SONET, OTDM, OCDMA, системи атмосферної оптики (FSO) та ін);
- дослідити одномодові та багатомодові системи передачі;
- застосовувати лазери та підсилювачі різних типів (EDFA, SOA, Raman, Hybrid, волоконні лазери);
- застосовувати різні формати модуляції та кодування (RZ, NRZ, DPSK, QPSK, DP-QPSK, PM-QPSK, QAM-16, QAM-64 та ін.);
- проводити аналіз ефективності та якості систем передачі (Eye Diagram, Q-factor, BER, стану поляризації, діаграми сузір'їв та ін.).

Пакет моделювання OptiSystem має графічний інтерфейс і належить до класу компонентних імітаційних систем моделювання.

Всі елементи, що використовуються у схемах моделювання OptiSystem, можна умовно розділити на чотири групи:

- 1) активні елементи (лазери, модулятори, генератори, фотодетектори) – елементи, що використовуються для формування та перетворення сигналів і потребують, як правило, в реальних умовах джерел живлення;
- 2) пасивні елементи – волокна, фільтри, мультиплексори, демультимплексори, відгалужувачі, розгалужувачі, циркулятори, атенюатори, конектори та ін;
- 3) контрольно-вимірювальне обладнання – осцилографи, спектроаналізатори, вимірювачі потужності та ін.;
- 4) допоміжні інструменти.

Основні лінії зв'язку моделі передачі завжди відображаються суцільними лініями, підключення контрольно-вимірювального обладнання завжди відображаються пунктирними лініями [2].



Лінії, якими передаються цифрові сигнали (умовні послідовності нулів і одиниць), в схемах моделювання OptiSystem відображаються темно-червоним кольором; лінії, якими передаються електричні сигнали, відображаються синім кольором; лінії, якими передаються оптичні сигнали, відображаються зеленим кольором.

Для завантаження актуальної демонстраційної версії пакета OptiSystem (Full Version 30-day Evaluation License) із сайту виробника потрібно зареєструватися за посиланням <https://optiwave.com/register>. Після підтвердження реєстрації та заповнення профілю користувача будуть доступні посилання на завантаження різних програмних пакетів виробництва Optiwave Systems Inc., також і OptiSystem.

## **5.2 Результати моделювання 4-канальної волоконно-оптичної CWDM-системи передачі з каналом контролю потужності**

При проведенні моделювання розробленої мережі чи системи передачі потрібно визначити параметри сигналів у всіх основних ключових точках системи передачі чи мережі. До таких параметрів належать: форма електричного та оптичного сигналів, середня потужність оптичного сигналу, спектр оптичного сигналу, глазкова діаграма, параметри BER та  $Q$ -фактор.

Допускається проведення моделювання лише одного напрямку передачі. У багатоканальних системах передачі та мережах допускається проведення моделювання для одного з каналів, але інфраструктура системи передачі або мережі (мультиплексори та демультиплексори, розгалужувачі, відгалужувачі, фільтри тощо) має бути задана в повному обсязі.

Нижче наведено приклад моделювання 4-канальної волоконно-оптичної CWDM-системи передачі з додатковим каналом контролю потужності (1650 нм).

Повна схема моделювання наведена на рис. 5.1. Передавальна частина системи контролю в схемі, що моделюється, складається з лазера CW Laser, що працює на довжині хвилі 1650 нм.

Основна чотириканальна частина системи передачі в схемі, що моделюється, подана чотирма CWDM – передавачами CWDM Laser1–CWDM Laser4 і мультиплексором CWDM Mux 4×1. Довжини хвиль передавачів задані відповідно до канальної сітки з кроком 20 нм–1550, 1570, 1590 та 1610 нм.

Для прикладу моделювання розглянуто чотириканальну волоконно-оптичну CWDM-систему передачі з каналом контролю потужності для виявлення несанкціонованого доступу до лінії зв'язку.

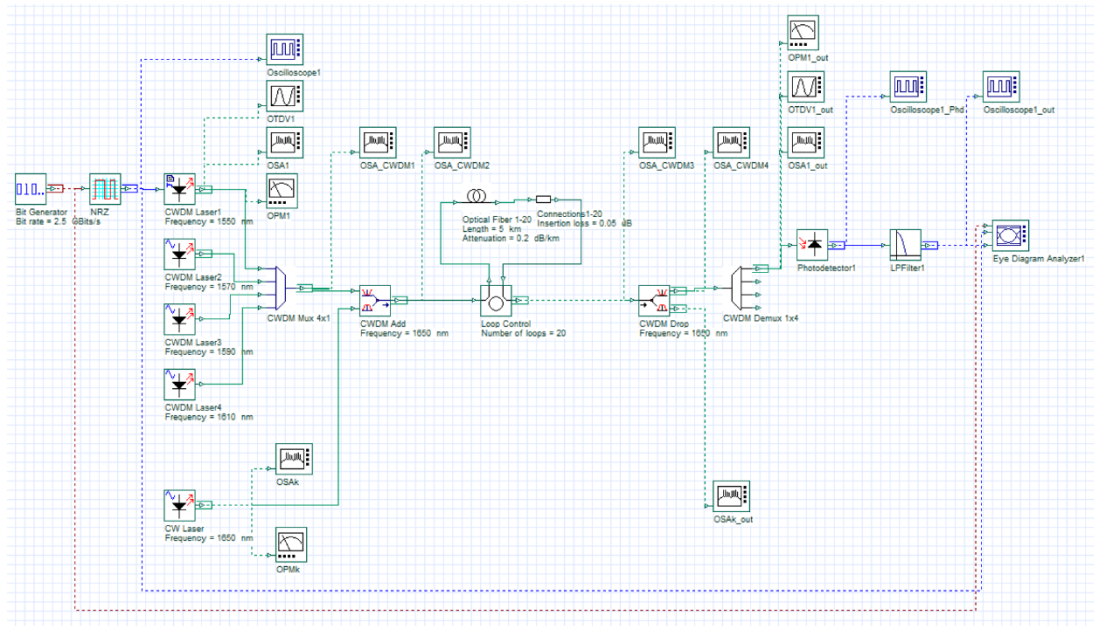


Рисунок 5.1 – Схема моделювання у пакеті OptiSystem чотириканальної волоконно-оптичної CWDM-системи передачі з каналом контролю потужності

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Напрямні телекомунікаційні системи : лабораторний практикум. В. : ВНТУ, 2021. 104 с.
2. Бортник, Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Напрямні телекомунікаційні системи : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2018. 121 с.
3. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Транспортні інфокомунікаційні системи : лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2019. 139 с.
4. Бондаренко О. В. Розрахунок конструкції та визначення параметрів передачі кабелю електрозв'язку. Методичні вказівки до виконання комплексної роботи з дисципліни «Напрямні системи електричного та оптичного зв'язку». Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2014. 78 с.
5. Бондаренко О. В. Проектування однохвильової волоконно-оптичної лінії передачі Методичні вказівки з курсового проектування з дисципліни «Напрямні системи електричного та оптичного зв'язку». Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2015. 117 с.
6. Кись О. М, Корнійчук В. І. Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі : навчальний посібник з курсового та дипломного проектування. Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2014. 92 с.
7. Бортник Г. Г., Васильківський М. В., Кичак В. М. Транспортні телекомунікаційні технології. Вінниця : ВНТУ, 2017. 162 с.
8. Shiva Kumar and M. Jamal Deen Fiber Optic Communications Fundamentals and Applications - Department of Electrical and Computer Engineering, McMaster University, Canada, 2014.
9. Herbert Venghaus, Norbert Grote Fibre Optic Communication - Springer Series in Optical Sciences, 2017.
10. Xiang Zhou Chongjin Xie Enabling Technologies for High SpectralEfficiency Coherent Optical Communication Networks - Wiley, 2016.
11. Інформаційні ресурси Розорінов Г. М., Соловійов Д. О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку : навч. посіб. К., 2012. 344 с.

*Навчальне електронне видання  
комбінованого використання.  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Микола Володимирович Васильківський  
Геннадій Григорович Бортник  
Василь Мартинович Кичак**

**Розрахунок функціональних параметрів  
оптичних систем та мереж  
Практикум  
для студентів спеціальності  
172 – «Телекомунікації та радіотехніка»**

**Практикум**

*Рукопис оформлено М. Васильківським*

*Редактор В. Дружиніна*

*Оригінал-макет виготовлено Т. Старічек*

Підписано до видання 25.01.2023 р.  
Гарнітура Times New Roman.  
Зам. № P2023-007.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 65-18-06.  
**press.vntu.edu.ua;**

*Email: irvc.vntu@gmail.com*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.