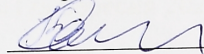


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Система волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускнуєї здатності

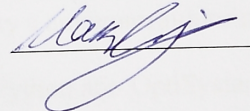
Виконав: студ. 2-го курсу, гр. ЛТО–23м
спеціальності 175 Інформаційно-
вимірювальні технології

 Солоденко К. І.

Керівник: зав. каф. БМІОЕС, доц.

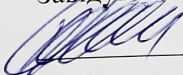
 Коваль Л. Г.

Опонент: к. т. н., ст. викл. каф. ІКСТ

 Макогон В. І.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри БМІОЕС

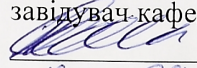
 К. т. н., доц. Коваль Л. Г.

« 19 » 01 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології
Освітньо-професійна програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри БМІОЕС

 Л. Г. Коваль

« 19 » 09 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
Солоденка Константина Ілліча

1. Тема роботи: Система волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускну здатності.

Керівник роботи: Коваль Л. Г., доцент,
затверджені наказом ВНТУ від «17» вересня 2024 року № 310.

2. Строк подання студентом роботи «29» листопада 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи:

- - аналіз технологій спектрального ущільнення для збільшення пропускну здатності (WDM, DWDM, CWDM);
- моделювання оптичного каналу з використанням програмного забезпечення;
- програмні засоби: MATLAB, Python або OptiSystem;
- обладнання: одномодові оптичні волокна, мультиплексори, оптичні підсилювачі, спектральний аналізатор.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

- - дослідити сучасні методи підвищення пропускну здатності волоконно-оптичних систем передачі даних;
- проаналізувати вплив нелінійних оптичних ефектів на якість передачі сигналу в системах WDM;
- розробити або вдосконалити модель волоконно-оптичної лінії зв'язку для аналізу її параметрів;

5. Перелік ілюстративного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів):

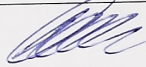
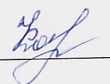
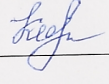
- спрощена структурна схема ВОСП
- фазова автомодуляція (SPM) сигналу на волокні
- схема запропонованої моделі мультиплексування

-схема передачі даних з використанням TDM та WDM

6. Зміст текстової частини:

- аналіз методів і технологій підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних систем передачі даних;
- вплив нелінійних оптичних ефектів на якість передачі сигналу в багатоканальних системах;
- проектування архітектури системи волоконно-оптичної передачі з підвищеною пропускною здатністю;
- дослідження ефективності запропонованих методів і систем передачі даних;
- економічна оцінка впровадження системи підвищеної пропускної здатності.

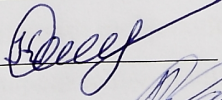
7. Консультанти розділів роботи

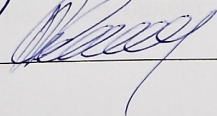
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Коваль Л. Г., доц, зав. каф. БМІОЕС		
Економічна частина	Кавецький В. В., к. е. н., доцент. каф. ЕП та ВМ		

8. Дата видачі завдання «18» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Прим.
Постановка задачі дослідження	до 17.09.2024	викон.
Розробка технічного завдання	до 30.09.2024	викон.
Аналіз методів і засобів визначення технічної чистоти	до 4.10.2024	
Розроблення методу визначення і класифікації зображень частинок	до 25.10.2024	викон.
Розроблення архітектури системи для контролю чистоти виробів електронної техніки	до 8.11.2024	викон.
Дослідження методу і системи контролю технічної чистоти	до 22.11.2024	
Виконання економічного розділу	до 29.11.2024	викон.
Попередній захист	29.11.2024	викон.
Нормоконтроль МКР	10.12.2024	викон.
Рецензування МКР	13.12.2024	викон.
Захист МКР	19-20.12.2024	викон.

Студент  Костянтин СОЛОДЕНКО

Керівник роботи  Леонід КОВАЛЬ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

APD (avalanche photodiode) – лавинний фотодіод

FDM – частотне мультиплексування (Frequency-Division Multiplexing)

PDH – плізіохронна цифрова ієрархія (Plesiochronous Digital Hierarchy)

PDM – поляризаційне мультиплексування (Polarization-Division Multiplexing)

TDM – часове мультиплексування (Time Division Multiplexing)

WDM – довжиннохвильове мультиплексування (Wavelength Division Multiplexing)

АТС – автоматична телефонна станція

АСП – аналогова система передачі

ВС – волоконний світловод

ВП – вікно прозорості

ВОЛЗ – волоконно-оптична лінія зв'язку

ВОСП – волоконно-оптична система передачі

ДОВ – джерело оптичного випромінювання

ІКМ – імпульсно-кодова модуляція

КЕМ – квантово-електронний модуль

ЛД – лазерний діод

М – модулятор

НРП – необслуговуваний ретрансляційний пункт

ОТр – оптичний тракт

ОВ – оптичне волокно

ОЛТ – оптичний лінійний тракт

ОК – оптичний кабель

ОТМ – оптична транспортна мережа

ОП – оптичний підсилювач

ОЦК – основний цифровий канал

ПрОМ – передавальний оптоелектронний модуль

ПОМ – приймальний оптоелектронний модуль

СВД – світловипромінюючий діод

СРК – спектральне розподілення каналів

ТТС – телекомунікаційна транспортна система

ТЧ – тональна частота

ТТМ – телекомунікаційна транспортна мережа

ФД – фотодіод

ФНЧ – фільтр нижніх частот

ХМ – хвильове мультиплексування

ЦСП – цифрова система передачі

ЦОЛТ – цифровий оптичний лінійний тракт

АНОТАЦІЯ

УДК 621.374

Солоденко К. І. Система волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускної здатності: магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох основних розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Укр. мовою. Бібліогр.: 33 найм.; 31 рис.; 21 табл.

Об'єкт дослідження є процес передачі інформації через оптоволоконний кабель у ВОСП. Предмет дослідження: підвищення пропускної здатності ВОСП. Мета роботи є вивчення шляхів підвищення пропускної здатності ВОСП та розробка методики розрахунку системи з покращеними характеристиками.

У першому розділі проведено огляд сучасного стану технологій передачі даних в оптоволоконних системах та аналіз методів покращення пропускної здатності на фізичному рівні.

Другий розділ присвячено порівнянню існуючих технологій для збільшення пропускної здатності передачі інформаційних потоків у ВОСП. Запропоновано альтернативний підхід до мультиплексування потоків даних із використанням технологій TDM та WDM.

У третьому розділі розроблено методику розрахунку ВОСП із підвищеною пропускною здатністю для передачі інформаційних потоків.

Матеріали дисертації можуть бути використані для покращення пропускної здатності існуючих оптоволоконних систем зв'язку без значних капіталовкладень, зокрема без необхідності заміни оптоволоконного кабелю.

ABSTRACT

UDC 621.374

Solodenko K. I. Fiber-optic data transmission system with increased bandwidth: master's qualification work consists of an introduction, three main sections, conclusions, a list of used sources and appendices.

In Ukrainian. Bibliography: 33 names; 31 figures; 21 tables.

The object of the study is the process of transmitting information via a fiber-optic cable in a fiber-optic cable. The subject of the study: increasing the bandwidth of a fiber-optic cable. The purpose of the work is to study ways to increase the bandwidth of a fiber-optic cable and develop a method for calculating a system with improved characteristics.

The first section reviews the current state of data transmission technologies in fiber-optic systems and analyzes methods for improving bandwidth at the physical level.

The second section is devoted to a comparison of existing technologies for increasing the bandwidth of information flow transmission in a fiber-optic cable. An alternative approach to multiplexing data flows using TDM and WDM technologies is proposed.

The third section develops a methodology for calculating VOSP with increased bandwidth for transmitting information flows.

The materials of the dissertation can be used to improve the bandwidth of existing fiber-optic communication systems without significant capital investments, in particular without the need to replace the fiber-optic cable.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ	12
1.1. Аналіз сучасного стану, модифікацій, ключових переваг та особливостей використання волоконно-оптичних систем передачі	12
1.2. Багатомодові оптичні волокна	14
1.3. Одномодові оптичні волокна	16
1.4. Основні типи волокон категорії G.65x	17
1.5 Особливості волоконно-оптичних магістралей підвищеної пропускної здатності.....	21
1.6 Фізичні обмеження у волоконно-оптичних системах.....	26
1.7 Перспективи впровадження новітніх технологій у волоконно-оптичних системах.....	33
1.8 Майбутні напрямки розвитку волоконно-оптичних систем.....	41
1.9 Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОЛТ	51
2.1. Формулювання проблеми та її вирішення	51
2.2. Технології мультиплексування цифрових потоків	52
2.3. Порівняльний аналіз методів збільшення пропускної здатності	55
2.4. Схема альтернативного мультиплексування сигналу	57
2.5. Нелінійні оптичні явища та їх вплив на пропускну здатність	59
2.5.1. Самофазова модуляція (SPM)	60
2.5.2. Перехресна фазова модуляція	61
2.5.3. Чотирихвильове змішування (FWM)	61
2.5.4. Раманівське розсіювання	62
2.5.5. Вимушене розсіювання Бріллюена-Мандельштама	64
Висновки до розділу 2	64
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ВОСП З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WDM.	65
3.1. Конструкція ОЛТ ВОСП із застосуванням WDM	65
3.2. Вибір джерела випромінювання та фотоприймача: їх характеристики	66
3.3. Аналіз параметрів оптичного волокна	69
3.3.1. Обґрунтування вибору робочої довжини хвилі	69

3.3.2. Розрахунок пропускної спроможності оптичного волокна	70
3.3.3. Розробка частотних планів для фотонного лінійного тракту	71
3.3.4. Оцінка параметрів передачі сигналів через оптичні волокна	73
Висновки до розділу 3	75
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	76
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки.....	76
4.2 Оцінювання рівня новизни розробки.....	79
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	81
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	92
4.5 Висновки до розділу.....	95
ВИСНОВКИ	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	100
ДОДАТКИ	102

ВСТУП

Актуальність. На сучасному етапі розвитку суспільства системи зв'язку стали ключовим чинником, який сприяє швидкому та ефективному прогресу. Обсяги переданої інформації зростають експоненційно, особливо з моменту відкриття у 1991 році Всесвітньої павутини для широкого загалу. Це створило безпрецедентний попит на збільшення пропускної здатності каналів зв'язку, що перевищив усі очікування. З огляду на це, актуальним є розвиток сучасних комунікаційних мереж, середовищ передачі даних і систем зв'язку.

Високошвидкісні волоконно-оптичні системи передачі (ВОСП) стали ключовою складовою магістральних і регіональних мереж зв'язку завдяки їхній здатності передавати дані в надширокому частотному діапазоні. Реалізація технології спектрального ущільнення дозволяє значно підвищити ефективність передачі даних, що робить ВОСП єдиним рішенням для задоволення зростаючих інформаційних потреб.

Об'єкт розробки: Волоконно-оптична система передачі, яка забезпечує функціонування магістральної системи зв'язку в умовах зростання обсягів інформаційних потоків.

Предмет розробки: Методи підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних систем передачі з використанням сучасних телекомунікаційних технологій та оптимізації параметрів оптичного лінійного тракту (ОЛТ).

Мета роботи: Розробка підходів до підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних систем передачі для задоволення сучасних і майбутніх потреб телекомунікаційних мереж.

Методи: Вибір найбільш ефективних методів збільшення пропускної здатності; Підбір телекомунікаційної технології для функціонування магістральних систем передачі; Розрахунок та оптимізація параметрів елементів оптичного лінійного тракту (ОЛТ).

Новизна: Робота пропонує нові підходи до використання спектрального ущільнення, що дозволяє значно збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних систем передачі. Дослідження сприяє систематизації інформації з

проектування та оптимізації ВОСП, що може бути використано для розвитку сучасних мереж зв'язку наступного покоління.

Актуальність: Матеріали роботи можуть бути інтегровані в навчальний процес для викладання дисципліни «Волоконно-оптичні системи передачі». Опубліковані ресурси надають фрагментарну інформацію, тому її систематизація має велике значення. Розвиток мереж наступного покоління (NGN) вимагає більшої пропускної здатності оптичних трактів, що інтегрують пакетні технології з оптичними каналами.

РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

1.1 Рівень розвитку, модернізація, ключові переваги та особливості використання волоконно-оптичних систем передачі

Сучасні цифрові системи передачі (ЦСП) мають перевагу у використанні волоконно-оптичних ліній зв'язку. Це зумовлено не лише загальними перевагами ЦСП перед аналоговими системами передачі (АСП), але й особливостями конструкції та функціонування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП). Головною відмінністю є те, що для забезпечення необхідної якості передачі інформації в АСП потрібні спеціальні засоби приймання та обробки оптичних сигналів. У той же час ЦСП досягають високої якості навіть за нижчого співвідношення сигнал/шум, що значно спрощує реалізацію ВОСП порівняно з АСП.

Переваги ЦСП включають:

- високу стійкість до перешкод;
- нечутливість до нелінійних викривлень сигналу;
- стабільність параметрів каналу передачі незалежно від довжини лінії;
- надійність роботи системи тощо.

ВОСП мають структуру, подібну до традиційних багатоканальних кабельних систем передачі, але використовують оптичне волокно як середовище передачі. Основні елементи ВОСП включають:

1. кінцеве обладнання для багатоканальної передачі;
2. апаратуру спряження;
3. передавальний оптоелектронний модуль (ПрОМ);
4. оптичний кабель (ОК);
5. приймальний оптоелектронний модуль (ПОМ);
6. електронний генератор.

На передавальній станції сигнал тональної частоти (ТЧ) об'єднується в груповий сигнал, який потім перетворюється у форму, придатну для передачі оптичним трактом. В ПОМ відбувається модуляція несучої оптичним сигналом, що далі передається по оптичному кабелю. Для компенсації загасання і спотворень сигналу вздовж лінії встановлюються регенератори, які відновлюють форму сигналу.

Сучасні тенденції розвитку ВОСП:

- перехід до оптичних регенераторів, які виключають необхідність перетворення оптичного сигналу в електричний;
- вдосконалення елементів оптичного тракту, таких як лазерні підсилювачі та оптичні транзистори;
- використання спектрального ущільнення каналів для підвищення ефективності передачі даних.

Класифікація ВОСП за середовищем поширення:

1. Системи з атмосферним оптичним каналом використовуються для зв'язку з рухомими об'єктами, у космосі та в робототехніці.
2. Системи з волоконно-оптичним каналом: використовуються для стаціонарних комунікаційних мереж.

За галуззю застосування ВОСП поділяються на магістральні, зонові, локальні мережі, системи інформаційно-обчислювальних мереж та кабельного телебачення.

- Напрями розвитку волоконно-оптичного зв'язку:
- збільшення дальності передачі сигналу без підсилення;
- освоєння інфрачервоного спектрального діапазону;
- розробка пристроїв для оптичної обробки сигналів.

Застосування ВОСП значно знижує витрати на передачу даних, що стає особливо актуальним у зв'язку з подорожчанням металевих кабелів. Оптичне волокно забезпечує високу пропускну здатність, що дозволяє передавати великі обсяги інформації на значні відстані. Завдяки цим перевагам ВОСП стали основним елементом сучасних телекомунікаційних систем.

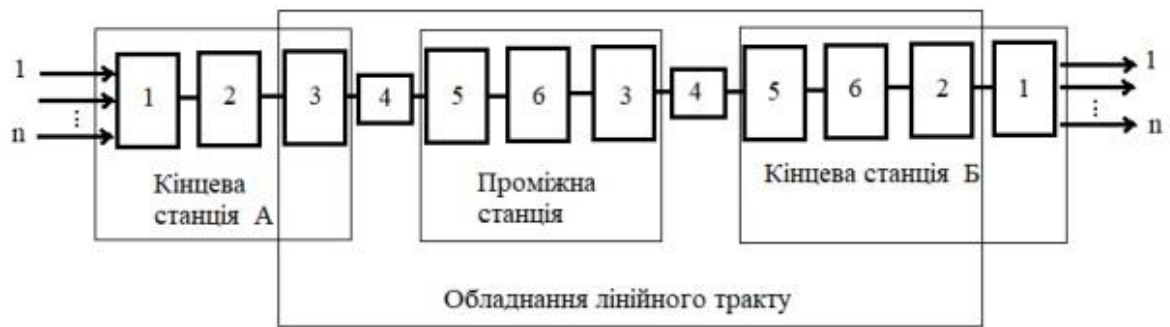


Рисунок 1.1.1 - Узагальнена структура схеми ВОСП (для одного напрямку передачі)

1.2 Багатомодові оптичні волокна

Оптичні волокна з серцевиною та оболонкою з кварцового скла є одними з найбільш поширених типів волокон. Завдяки здатності передавати світловий сигнал на великі відстані, ці волокна вже багато років активно використовуються в телекомунікаційній галузі. Кварцові волокна поділяються на одномодові (SM, single-mode) та багатомодові (MM, multimode) в залежності від кількості мод оптичного випромінювання, які вони можуть передавати.

Одномодові волокна використовуються для передачі даних на великих відстанях з високою швидкістю, в той час як багатомодові волокна зазвичай застосовуються для коротших ліній зв'язку. У цьому розділі розглядаються особливості, типи та сфери застосування багатомодових волокон. Крім кварцових, багатомодовими можуть бути волокна з інших матеріалів, наприклад, пластикові (POF) або кварцові волокна з полімерною оболонкою (HCS).

У багатомодових оптичних волокнах можуть одночасно поширюватися кілька мод оптичного випромінювання. Кількість цих мод залежить від геометричних характеристик волокна. Волокна, які передають більше однієї моди, відносяться до багатомодових. У телекомунікаційних системах зазвичай використовуються кварцові волокна з діаметром серцевини та оболонки 50/125 мкм або 62,5/125 мкм.

Багатомодові кварцові волокна виготовляються зі скла шляхом легування матеріалу домішками для формування потрібного профілю показника заломлення. Для зниження міжмодової дисперсії в багатомодових волокнах зазвичай використовується градієнтний профіль, у якому показник заломлення поступово зменшується від осі серцевини до оболонки.

Кварцові волокна мають спектральні характеристики загасання, включаючи три "вікна прозорості" на довжинах хвиль близько 850, 1300 та 1550 нм. Для багатомодових волокон зазвичай використовуються довжини хвиль 850 і 1300 (або 1310) нм, при цьому типові рівні загасання становлять 3,5 і 1,5 дБ/км відповідно.

Для захисту оптичної оболонки волокон використовується первинне полімерне покриття, зазвичай акрилове, яке фарбується у стандартні кольори. Діаметр волокна з покриттям зазвичай складає близько 250 мкм. Волоконно-оптичний кабель може містити одне або кілька волокон з первинним покриттям, а також елементи захисту та зміцнення, такі як кевларові нитки, а також зовнішню оболонку, яка часто має помаранчевий колір.

Через міжмодову дисперсію багатомодові волокна мають обмеження щодо швидкості передачі даних і дальності у порівнянні з одномодовими. Також вони характеризуються більшими втратами сигналу.

Розвиток технологій призвів до появи багатомодових волокон із серцевиною 62,5 мкм, що забезпечує кращу взаємодію зі світлодіодами. Однак збільшення кількості мод негативно впливає на якість передачі сигналу, тому з переходом на лазерні джерела популярними стали волокна 50/125 мкм із градієнтним профілем показника заломлення.

- Завдяки вдосконаленню технологій виготовлення з'явилися волокна, оптимізовані для роботи з лазерами (laser-optimized fiber), які класифікуються за стандартами OM:
- • OM1: стандартне багатомодове волокно (62,5/125 мкм);
- • OM2: стандартне волокно (50/125 мкм);
- • OM3: волокно (50/125 мкм), оптимізоване для лазерів;

- • OM4: волокно (50/125 мкм) з поліпшеними характеристиками для лазерів.

Для кожного класу визначаються параметри загасання та ширина смуги пропускання. Залежно від випромінювача і довжини хвилі багатомодові волокна використовуються зі світлодіодами (850/1300 нм), лазерами з резонатором Фабрі-Перо, або лазерами VCSEL (850 нм).

1.3 Одномодові оптичні волокна

Основні типи одномодових оптичних волокон (ООВ), їхні характеристики та параметри описані у двох основних групах стандартів:

1. Стандарти Міжнародної електротехнічної комісії (IEC).
2. Рекомендації Сектора стандартизації телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU-T) серії G.65x.

Рекомендації ITU-T розглядають одномодові волокна як направляючі системи для передачі інформації. У кожному документі детально описується певний тип ООВ, фізичне значення його параметрів та технічні вимоги, з урахуванням поділу на окремі види.

У цьому розділі аналізуються стандартизовані типи та види ООВ, їхні характеристики, а також надаються рекомендації щодо вибору оптимального волокна для конкретних завдань. Для кожного типу ООВ наведені спектральні характеристики ключових параметрів, таких як:

- коефіцієнт загасання,
- коефіцієнт хроматичної дисперсії.

Діапазони, що використовуються для передачі сигналів через одномодові оптичні волокна, визначені в Рекомендаціях ITU-T серії G.

1.4 Основні типи волокон серії G.65x

Одномодові волокна з ступінчастим профілем показника заломлення були вперше впроваджені в телекомунікаціях на початку 1980-х років як ефективна альтернатива багатомодовим волокнам. Зменшення діаметра серцевини до 8–10 мкм при використанні довжин хвиль 1310 нм і більше дозволило забезпечити одномодовий режим передачі.

Згодом ці волокна стали активно застосовуватися для передачі сигналів на довжині хвилі 1550 нм, зокрема в системах зі спектральним ущільненням (WDM) з обмеженою кількістю несучих. Розвиток таких систем стимулював інтерес до використання діапазону E (1360–1460 нм). Завдяки вдосконаленню технології дегідратації були створені волокна з зниженим "водним піком" (LWP, Low Water Peak), що підвищує ефективність передачі в цьому діапазоні.

Значною перевагою волокон типу G.652 є те, що довжина хвилі відсічення для них знаходиться поблизу основної робочої довжини хвилі 1310 нм. У сучасній редакції Рекомендації G.652 наведено параметри та характеристики чотирьох різновидів одномодових волокон, що відрізняються властивостями та сферами застосування.

Волокна типу G.652 широко використовуються в різноманітних зв'язкових мережах завдяки своїй технологічності, доступній вартості та здатності ефективно функціонувати у всіх спектральних діапазонах. Вони сумісні як із системами спектрального ущільнення, так і з традиційними методами передачі сигналів.

У 1980-х роках експлуатація кабелів з одномодовими оптичними волокнами (ООВ) виявила певні обмеження при роботі у другому (1310 нм) та третьому (1550 нм) вікнах прозорості. На довжині хвилі 1310 нм одномодові волокна забезпечували мінімальну дисперсію, що дозволяло досягти максимальної пропускної здатності. Водночас на довжині хвилі 1550 нм спостерігався мінімальний коефіцієнт загасання, що збільшувало максимальну довжину регенераційної ділянки в оптичних мережах.

Для оптимізації роботи волокон було розроблено волокна зі змінним профілем показника заломлення (наприклад, трикутного або трапецієподібного типу). Ці профілі дозволяли зменшити мінімальну дисперсію в області 1550 нм. Волокна такого типу, відомі як волокна зі зміщеною дисперсією (DSF), забезпечували широку смугу пропускання та значну дальність зв'язку в одному з вікон прозорості. Хоча такі волокна були дорогими у виробництві, їх використовували для створення мереж великої дальності, призначених для передачі значних обсягів даних.

Остання редакція Рекомендації G.653 представила два типи волокон цього класу. Оновлений стандарт G.653B пропонує не фіксоване значення коефіцієнта хроматичної дисперсії, а діапазон між двома обмежуючими кривими.

Волокна G.653A зазвичай використовуються в транспортних мережах для ділянок великої протяжності, підтримуючи системи передачі SDH до рівнів STM-64 і STM-256 для з'єднань всередині станцій. Волокна типу G.653B, завдяки зниженій поляризаційній дисперсії, також підходять для високошвидкісних систем передачі STM-256 (40 Гбіт/с) на відстанях понад 400 км.

Волокна типу G.657 були розроблені для використання в умовах міських мереж і доступу, де основним завданням є забезпечення ефективної передачі сигналу в умовах обмеженого простору і підвищених вимог до вигину кабелів. Цей тип волокон з'явився на ринку на початку 2000-х років і швидко став популярним у зв'язку зі зростаючим попитом на гнучкі рішення для оптичного доступу.

Особливістю волокон G.657 є їхня висока стійкість до макровигинів, що досягається завдяки оптимізованій структурі серцевини і оболонки. Такі волокна забезпечують мінімальні втрати при радіусах вигину до 15 мм, що робить їх незамінними в умовах щільної забудови, де кабелі часто прокладаються в обмеженому просторі, наприклад, в будівлях або під землею. Волокна G.657 доступні у кількох підкатегоріях, таких як G.657.A1, G.657.A2 і

G.657.B3, кожна з яких має свої специфічні характеристики, залежно від радіусу допустимого вигину та загасання.

Сучасні волокна G.657 демонструють коефіцієнт загасання на довжині хвилі 1550 нм у межах 0,18–0,20 дБ/км, що порівняно з іншими одномодовими волокнами є досить низьким показником для використання в міських мережах. Завдяки цьому вони підтримують передачу даних на швидкості до 10 Гбіт/с у системах CWDM і WDM. Крім того, оптимізована хроматична дисперсія цих волокон дозволяє використовувати їх у пасивних оптичних мережах (PON) із довжиною ділянок до 20 км без необхідності компенсації дисперсії.

Оновлена версія рекомендацій ITU-T для G.657 містить більш суворі вимоги до стійкості волокон до вигинів та їхньої сумісності з іншими типами одномодових волокон, такими як G.652. Це забезпечує просте інтегрування волокон G.657 у вже існуючі мережі, без необхідності заміни усього обладнання.

Волокна G.657.A1 підходять для широкого спектра застосувань, де потрібен радіус вигину до 10–15 мм, і забезпечують відмінну сумісність з волокнами G.652. Волокна G.657.A2 пропонують ще менший радіус вигину (до 7,5 мм), що робить їх придатними для прокладки в складних умовах, наприклад, у вузьких каналах або при щільному згортанні кабелів. Волокна G.657.B3 відрізняються найкращими показниками стійкості до вигинів і можуть використовуватися в надскладних умовах із радіусом вигину до 5 мм.

Таким чином, волокна G.657 стали важливим етапом у розвитку оптичних технологій, забезпечуючи підвищену гнучкість, надійність і ефективність передачі сигналів у міських та локальних мережах. Їхнє впровадження значно розширило можливості проектування та оптимізації сучасних мереж доступу.

Поява волокон типу G.656 в середині 2000-х років була викликана необхідністю створення універсального рішення для транспортних мереж, що поєднує в собі можливість роботи в розширених спектральних діапазонах (S, C, L) з мінімальними втратами на вигинах. Основною метою розробки стало забезпечення ефективності передачі сигналів у широкому спектрі довжин хвиль,

що особливо важливо для систем CWDM та DWDM із мінімальними канальними інтервалами.

Основні характеристики волокон G.656:

1. Хроматична дисперсія: Волокна цього типу мають позитивний коефіцієнт хроматичної дисперсії в діапазоні S-C-L, що становить 1–14 пс/(нм·км). Ця особливість дозволяє мінімізувати нелінійні ефекти, зокрема перехресні завади між каналами.

2. Коефіцієнт загасання: В діапазоні C (1530–1565 нм) загасання складає 0,2–0,25 дБ/км, а в діапазоні S (1460–1530 нм) та L (1565–1625 нм) – 0,25–0,3 дБ/км. Це робить G.656 універсальним рішенням для використання у системах з широким спектром довжин хвиль.

3. Стійкість до вигинів: Волокна розроблені з урахуванням зменшення втрат на макровигинах, що особливо актуально для сучасних мереж доступу та міських мереж із обмеженим простором для прокладки кабелів.

Застосування G.656:

Волокна G.656 активно використовуються в транспортних мережах для побудови систем CWDM та DWDM. Завдяки розширеному спектру довжин хвиль, вони дозволяють значно збільшити пропускну здатність мережі, підтримуючи передачу даних на швидкості до 10 Гбіт/с і вище. Такі волокна ідеально підходять для магістральних та регіональних мереж, де важливими є зниження втрат на довгих ділянках та ефективність спектрального мультиплексування.

Переваги волокон G.656:

- Підвищена універсальність у роботі з різними системами спектрального ущільнення.
- Оптимальна хроматична дисперсія для зменшення нелінійних ефектів.
- Низькі втрати на вигинах, що забезпечує їх використання у складних умовах прокладки.
- Висока сумісність із сучасними активними та пасивними компонентами мереж.

Перспективи розвитку:

Сучасні тенденції передбачають подальше вдосконалення G.656 із розширенням діапазону до E (1360–1460 нм). Це дозволить ще більше підвищити ефективність транспортних мереж і зменшити вартість модернізації інфраструктури. Очікується також створення нових варіантів волокон, оптимізованих для застосування в надщільних системах спектрального мультиплексування.

Таким чином, волокна типу G.656 займають важливе місце серед одномодових волокон для сучасних телекомунікаційних мереж, забезпечуючи високу гнучкість, надійність та ефективність у широкому спектрі застосувань..

1.5 Особливості проектування волоконно-оптичних магістралей підвищеної пропускної здатності

Високошвидкісні волоконно-оптичні мережі є основою сучасних телекомунікаційних систем, забезпечуючи передачу великих обсягів даних із високою швидкістю та надійністю. Ключовим принципом побудови таких мереж є використання одномодового оптичного волокна, яке мінімізує втрати та дисперсію сигналу, дозволяючи підтримувати високу якість передачі на довгих відстанях. Це є важливим для сучасних систем зв'язку, що обслуговують глобальні інформаційні потоки.

Значне підвищення пропускної здатності досягається за допомогою технології спектрального ущільнення каналів, зокрема WDM (Wavelength Division Multiplexing) і DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Ці технології дозволяють передавати кілька незалежних сигналів різних довжин хвиль через одне волокно, ефективно використовуючи його потенціал. Такий підхід зменшує витрати на побудову нових ліній зв'язку та забезпечує масштабованість мережі.

Для передачі даних на великі відстані важливу роль відіграють оптичні підсилювачі, наприклад, ербієві доповані волоконні підсилювачі (EDFA). Вони

підсилюють сигнал без його перетворення в електричний вигляд, що скорочує затримки та зменшує енергоспоживання. Крім того, для зменшення негативного впливу хроматичної та поляризаційної модової дисперсії застосовуються спеціальні волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією (NZDSF) та дисперсійні компенсатори, які забезпечують стабільність сигналу навіть за високих швидкостей передачі.

Іншим важливим принципом є когерентна оптична передача, що дозволяє використовувати фазову та амплітудну модуляцію. Це значно підвищує швидкість передачі даних та покращує чутливість приймачів. Завдяки цьому стає можливим передавати інформацію на значні відстані без значної деградації сигналу.

Розробка високошвидкісних мереж передбачає оптимізацію топології. Найпоширенішими є топології типу "кільце", "зірка" або "дерево", які забезпечують ефективну маршрутизацію, підвищують надійність і дозволяють створювати резервні маршрути у разі аварійних ситуацій.

Інтелектуальні системи управління, інтегровані в сучасні мережі, забезпечують моніторинг і оптимізацію використання ресурсів у реальному часі. Використання методів машинного навчання дозволяє прогнозувати збої та оперативно реагувати на зміни у трафіку. Одночасно з цим, під час проєктування враховується енергоефективність усіх компонентів мережі, що є критичним фактором з огляду на значні обсяги енергоспоживання сучасних телекомунікаційних систем.

Високошвидкісні мережі розробляються з урахуванням перспективи інтеграції з новими технологіями, такими як 5G, 6G та майбутні квантові мережі. Це забезпечує їхню довговічність і відповідність зростаючим вимогам до обсягів і швидкості передачі даних. Таким чином, ці принципи формують основу для побудови надійних, ефективних і масштабованих телекомунікаційних мереж, які є ключовими елементами сучасної цифрової інфраструктури.

Одним із ключових етапів створення системи волоконно-оптичної передачі даних є ретельний вибір обладнання для передачі та прийому сигналів.

Від правильності цього вибору залежить не лише пропускна здатність системи, але й її надійність, стабільність роботи, а також здатність масштабування у майбутньому. Основними елементами, які потребують уваги, є оптичні передавачі, приймачі, підсилювачі, мультиплексори/демультиплексори, а також кінцеві мережеві пристрої для обробки даних.

Оптичні передавачі виконують ключову функцію перетворення електричних сигналів у світлові для подальшої передачі по оптичному волокну. Сучасні системи волоконно-оптичного зв'язку використовують лазерні діоди, зокрема напівпровідникові лазери, які забезпечують високу точність і стабільність випромінювання. Вибір передавача залежить від кількох факторів, таких як робоча довжина хвилі (зазвичай 1310 нм або 1550 нм для мінімізації втрат у волокні), потужність випромінювання, тип модуляції сигналу (наприклад, OOK, QPSK або 16QAM) і сумісність із іншими елементами системи. Зокрема, у високошвидкісних системах, орієнтованих на передачу даних зі швидкістю до 400 Гбіт/с і більше, використовують передавачі з підтримкою спектрального ущільнення (WDM).

Оптичні приймачі відіграють не менш важливу роль у системі, оскільки саме вони відповідають за перетворення світлових сигналів назад в електричні. У сучасних системах приймачі оснащуються фотодіодами (зазвичай PIN або APD типу), які мають високу чутливість і здатність коректно обробляти сигнали навіть на великих відстанях. Вибір приймача залежить від його чутливості до слабких сигналів, здатності працювати на великих швидкостях, а також від наявності вбудованих механізмів компенсації шумів і нелінійних спотворень. Для багатоканальних систем (наприклад, у мережах із WDM) часто використовують спеціалізовані приймачі, які здатні одночасно розпізнавати кілька каналів з різними довжинами хвиль.

Підсилювачі оптичного сигналу застосовуються для зменшення втрат, які неминуче виникають під час передачі сигналу на великі відстані. Найпоширенішими є оптичні підсилювачі на основі волокна, легованого ербієм (EDFA). Вони ефективно працюють у діапазоні 1550 нм і забезпечують

підсилення сигналу без проміжного перетворення в електричну форму. Вибір підсилювача залежить від довжини тракту, типу оптичного волокна, а також вимог до рівня шуму в системі.

Мультиплексори та демультиплексори є ключовими елементами у системах зі спектральним ущільненням каналів (WDM). Вони дозволяють об'єднувати кілька оптичних сигналів різних довжин хвиль в один потік для передачі по одному волокну, а потім розділяти ці сигнали на приймальній стороні. Використання такого обладнання значно збільшує пропускну здатність системи без необхідності прокладати додаткові кабелі. При виборі цих пристроїв звертають увагу на їхню здатність працювати в умовах високої щільності каналів, коефіцієнт загасання та підтримувані стандарти.

Кінцеве обладнання включає оптичні термінали, маршрутизатори та комутатори, які забезпечують інтеграцію волоконно-оптичної системи з іншими мережевими компонентами. Це обладнання повинно підтримувати сучасні мережеві протоколи, такі як Ethernet або MPLS, і бути здатним обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу. Крім того, важливо враховувати можливість інтеграції з інтелектуальними системами моніторингу та управління.

Таким чином, вибір обладнання для волоконно-оптичних систем передачі даних є складним багатофакторним завданням, яке потребує врахування специфіки мережі, технічних характеристик компонентів і вимог до продуктивності. Грамотне проектування і підбір обладнання дозволяє забезпечити високу швидкість передачі даних, мінімізувати втрати та спотворення сигналів, а також створити основу для подальшого розвитку і масштабування системи.

Мережева топологія є фундаментальним аспектом проектування та функціонування будь-якої телекомунікаційної системи, зокрема волоконно-оптичних мереж. Топологія визначає, як вузли (обладнання та пристрої) системи з'єднані між собою, і безпосередньо впливає на продуктивність, надійність, ефективність передачі даних та можливість масштабування мережі. Залежно від

обраної конфігурації, топологія може забезпечувати високі показники пропускної здатності, швидкості передачі даних та мінімізації затримок.

Одна з найпоширеніших топологій — "зірка". У цій конфігурації всі вузли мережі з'єднані із центральним комутатором або маршрутизатором. Такий підхід забезпечує високу швидкість передачі даних між вузлами, оскільки кожен із них має прямий зв'язок із центральним вузлом. Волоконно-оптичні мережі, побудовані за цією топологією, особливо ефективні у корпоративних середовищах, де необхідно підтримувати високу швидкість і низькі затримки між пристроями. Проте центральна точка є потенційною "точкою відмови", тому необхідно впроваджувати додаткові механізми резервування для забезпечення надійності системи.

Кільцева топологія також має широке застосування у волоконно-оптичних мережах, особливо для магістральних і міських мереж (MAN). У такій конфігурації вузли з'єднані у вигляді замкнутого кільця, що дозволяє даним передаватися в обох напрямках. Основною перевагою цієї топології є стійкість до пошкоджень, оскільки при обриві лінії в одному місці сигнал може перенаправлятися в протилежному напрямку. Це забезпечує високу надійність і безперебійність роботи системи. Проте для кільцевої топології важливо ретельно проєктувати пропускну здатність кожного сегмента, щоб уникнути перевантаження вузлів у разі збоїв.

Топологія "дерево" часто використовується в розподілених мережах, таких як пасивні оптичні мережі (PON), які застосовуються для надання послуг "останньої милі". У цій конфігурації центральний вузол з'єднаний із групою підлеглих вузлів, які, у свою чергу, можуть мати власні підлеглі вузли. Це дозволяє ефективно обслуговувати велику кількість користувачів, використовуючи мінімальну кількість оптичного волокна. Проте дерево має певні обмеження щодо масштабування та резервування, оскільки обрив основного з'єднання може призвести до втрати зв'язку для всіх підлеглих вузлів.

Однією з найефективніших для великих мереж є топологія "сітка", яка забезпечує з'єднання кожного вузла з кількома іншими. Це створює високий

рівень надмірності та стійкості до відмов. У разі збою одного або кількох з'єднань система автоматично перенаправляє трафік альтернативними маршрутами. Топологія "сітка" забезпечує максимальну пропускну здатність і мінімальні затримки передачі даних, що робить її оптимальним вибором для магістральних мереж великого масштабу. Проте вона потребує значних фінансових вкладень і складної інженерії, що може бути недоцільним для менших мереж.

Ще одним важливим аспектом є використання гібридних топологій, які поєднують елементи декількох конфігурацій. Наприклад, у корпоративних середовищах часто використовується поєднання топологій "зірка" і "кільце" для досягнення балансу між високою швидкістю передачі даних і надійністю. Такий підхід дозволяє адаптувати мережу до специфічних потреб і забезпечує можливість її подальшого розширення.

Топологія також впливає на оптимізацію маршрутизації в мережі. У сучасних системах волоконно-оптичної передачі даних широко застосовуються алгоритми динамічної маршрутизації, які враховують завантаженість мережі, затримки, а також потенційні збої. Ефективна топологія дозволяє використовувати ці алгоритми для максимальної продуктивності системи.

Таким чином, правильний вибір мережевої топології є критично важливим для забезпечення високої пропускну здатності, стійкості до збоїв і оптимізації витрат на розгортання та експлуатацію волоконно-оптичної мережі. Кожна конфігурація має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при проектуванні системи, залежно від її масштабів, функціональних вимог і бюджету.

1.6 Перспективи впровадження новітніх технологій у волоконно-оптичних системах

Когерентні оптичні системи відіграють ключову роль у сучасних волоконно-оптичних мережах передачі даних, особливо тих, які вимагають

підвищеної пропускної здатності та підтримки великої кількості користувачів. Їх застосування дозволяє значно покращити продуктивність і ефективність систем передачі, розширюючи можливості традиційних оптичних мереж. Основною особливістю когерентних систем є здатність використовувати як амплітуду, так і фазу оптичного сигналу для кодування даних, що суттєво підвищує щільність інформації в каналі зв'язку.

Однією з головних переваг когерентних оптичних систем є збільшення пропускної здатності без необхідності кардинальної модернізації фізичної інфраструктури. Замість розширення спектра сигналів, когерентні системи ефективно використовують уже існуючі частотні діапазони за рахунок вдосконаленого спектрального ущільнення. Це дозволяє передавати більше даних через той самий оптичний кабель, зменшуючи витрати на розширення мережі. Наприклад, завдяки технології когерентного мультиплексування можливо передавати сотні гігабіт даних на секунду через один оптичний канал.

Іншим важливим аспектом є покращення стійкості до спотворень та втрат сигналу. Когерентні системи використовують просунуті алгоритми цифрової обробки сигналів, такі як компенсація хроматичної та поляризаційної дисперсії, що є головними джерелами спотворень у волоконно-оптичних мережах. Завдяки цьому когерентні системи здатні передавати дані на великі відстані без необхідності частого використання регенераторів сигналу, що значно знижує експлуатаційні витрати.

Ключовим елементом когерентних оптичних систем є гетеродинний приймач, який дозволяє точно визначати як амплітуду, так і фазу сигналу. Використання когерентного детектування забезпечує високу точність відновлення сигналу, навіть за умов низького рівня оптичної потужності або наявності шумів. Це робить когерентні системи особливо актуальними для використання в магістральних мережах, де вимоги до надійності та якості сигналу є надзвичайно високими.

Когерентні оптичні системи також сприяють впровадженню новітніх технологій, таких як квадруплексна амплітудна модуляція (QAM) і багатоетапне

фазове кодування (PSK). Ці методи дозволяють ще більше підвищити щільність інформації в каналі, забезпечуючи передачу даних зі швидкістю понад 400 Гбіт/с. Це відкриває нові можливості для інтеграції когерентних систем із хмарними обчисленнями, системами інтернету речей (IoT) та іншими інноваційними технологіями.

Застосування когерентних систем також сприяє зниженню загального енергоспоживання мережі. Завдяки ефективнішому використанню спектра сигналів та оптимізації обробки даних когерентні оптичні системи дозволяють зменшити кількість активного обладнання, такого як підсилювачі та регенератори сигналу. Це не лише знижує вартість обслуговування, але й робить мережу екологічнішою, що є важливим у контексті сучасних трендів сталого розвитку.

Особливо слід зазначити роль когерентних оптичних систем у побудові міжнародних магістралей передачі даних. Завдяки здатності передавати великі обсяги інформації на тисячі кілометрів без суттєвих втрат сигналу, ці системи є незамінними для організації трансатлантичних та трансконтинентальних комунікаційних ліній. У таких мережах когерентні системи забезпечують стабільну роботу за умов високих навантажень, що дозволяє підтримувати надійний зв'язок між континентами.

Таким чином, когерентні оптичні системи є невід'ємною складовою сучасних високошвидкісних мереж передачі даних. Їх впровадження дозволяє суттєво підвищити ефективність, надійність і пропускну здатність волоконно-оптичних мереж, відповідаючи зростаючим потребам у передачі великих обсягів інформації. Завдяки своїм численним перевагам когерентні системи знаходять широке застосування в різних сферах, починаючи від корпоративних мереж і закінчуючи глобальними телекомунікаційними магістралями.

Квантові технології, зокрема квантова обробка та квантове шифрування, стають одними з найбільш перспективних напрямів у сфері телекомунікацій та передачі даних. Квантові технології обіцяють забезпечити новий рівень безпеки, ефективності та швидкості передачі даних, що є необхідними умовами для

розвитку сучасних глобальних мереж зв'язку, а також для обробки великих обсягів інформації в умовах постійно зростаючого попиту на пропускну здатність.

Основний потенціал квантових технологій у передачі даних полягає в можливості створення квантових мереж, де передача інформації здійснюється не за допомогою класичних методів кодування сигналів, а за допомогою квантових бітів — кубітів. Кубіти можуть знаходитися в декількох станах одночасно завдяки явищу суперпозиції, що дозволяє досягати більшої ефективності при передачі та обробці інформації порівняно з класичними бітами. Цей феномен значно розширює можливості для передачі даних на величезні відстані з меншою втратою інформації.

Квантова телекомунікація ґрунтується на принципах квантової механіки, зокрема, на феноменах суперпозиції та заплутаності. Заплутаність кубітів є однією з основних характеристик, що робить квантову передачу інформації надзвичайно потужною. У системах квантової передачі інформація, закодована на одному кубіті, може бути миттєво передана на великі відстані без втрат, оскільки її стан змінюється тільки після вимірювання, і це дозволяє передавати дані з високим рівнем безпеки. Квантове шифрування, зокрема алгоритм квантового розподілу ключів (QKD), дозволяє створювати абсолютно захищені канали зв'язку, де навіть теоретично неможливо перехопити передавану інформацію без того, щоб не змінити її стан. Це досягається завдяки закону квантової механіки, який встановлює, що будь-яке втручання в квантовий сигнал обов'язково змінює його властивості.

Іншим важливим аспектом застосування квантових технологій у передачі даних є здатність створювати квантові повторювачі, які дозволяють передавати інформацію на великі відстані без необхідності використання традиційних підсилювачів сигналу. Квантові повторювачі не спотворюють сигнал під час його передачі, як це часто трапляється в класичних волоконно-оптичних системах, де передача на великі відстані вимагає регулярної регенерації сигналу. Вони базуються на квантових алгоритмах і квантових заплутаних станах, що

дозволяє передавати дані через великі відстані без втрат якості сигналу. Це є важливим кроком для побудови квантових глобальних мереж, де інформація може передаватися між континентами за лічені мілісекунди.

Крім того, квантові комп'ютери також можуть значно вплинути на процеси обробки та передачі даних. Квантові обчислювальні потужності дозволяють обробляти величезні масиви даних набагато швидше, ніж класичні комп'ютери. Це відкриває нові горизонти для складних задач, таких як оптимізація маршрутизації в мережах, забезпечення безпеки даних, а також вдосконалення алгоритмів шифрування та декодування. Потужності квантових комп'ютерів також дозволяють досягти значно кращих результатів у вирішенні задач з обробки великих даних (Big Data) та штучного інтелекту, що сприяє розвитку квантових інтернет-технологій.

Ще одним значним напрямом є квантова акустика, яка дозволяє створювати нові типи сенсорних систем для передачі даних. Вони можуть використовувати акустичні хвилі для передачі інформації через водне середовище або в спеціалізованих оптичних системах. Технології квантової акустики використовуються для точних вимірювань та передавання інформації на великі відстані за допомогою акустичних хвиль, що дає змогу створювати нові типи мереж зв'язку для спеціалізованих потреб.

Технології квантової телекомунікації ще перебувають на етапі активного дослідження та розвитку, однак їхній потенціал уже дає розуміння того, що в майбутньому вони стануть невід'ємною частиною глобальних мереж зв'язку, де забезпечать безпечний, ефективний і швидкий обмін даними. Квантові комунікаційні системи можуть стати основою для побудови нового типу інтернету — квантового Інтернету, який дозволить не лише забезпечити новий рівень безпеки, але й значно підвищити ефективність передачі даних. Перехід від класичних методів до квантових технологій у комунікаціях обіцяє революцію в галузі телекомунікацій, що буде базуватися на принципах квантової механіки та квантової обробки інформації.

Використання квантових технологій дозволить не лише створювати високошвидкісні, безпечні та стійкі до атак мережі, але й вирішувати завдання, які на сьогодні є надзвичайно складними для традиційних систем. Зі збільшенням потужностей квантових комп'ютерів і технологій квантового шифрування, майбутнє телекомунікацій виглядає дуже перспективно, оскільки вони дозволять створювати глобальні системи, де інформація передається зі швидкістю світла, з максимальною безпекою та ефективністю.

Перехід до систем із швидкістю передачі даних 400G і вище є важливим кроком у розвитку сучасних телекомунікаційних мереж. Постійне зростання обсягів даних, обумовлене збільшенням числа користувачів Інтернету, розвитку Інтернету речей (IoT), відео-стримінгу, хмарних технологій та інших даних, що передаються в мережах, змушує операторів зв'язку шукати нові способи забезпечення високої пропускної здатності. Впровадження 400G-систем стає основною вимогою для задоволення потреб глобальних мереж у швидкісній передачі даних.

Технології 400G пропонують значно більшу пропускну здатність порівняно з попередніми поколіннями систем. Наприклад, у порівнянні з 100G та 200G, швидкість передачі даних у 400G-системах дозволяє значно зменшити навантаження на мережеву інфраструктуру та знизити витрати на обробку і транспортування інформації. Впровадження таких технологій дозволяє операторам створювати більш ефективні мережі, що здатні обробляти величезні обсяги даних в умовах постійно зростаючого попиту на передачу інформації.

Основними драйверами для переходу на системи з швидкістю 400G є розвиток технологій, які дозволяють досягати таких високих швидкостей. Наприклад, застосування мультиплексування за довжинами хвиль (WDM), використання більш ефективних модуляційних схем, а також впровадження нових матеріалів для виготовлення оптичних волокон і компонентів, які дозволяють зменшити втрати та збільшити пропускну здатність каналу. Системи, що використовують 400G, можуть комбінувати різні технології, включаючи стандартні одиничні канали 100G і 200G, що дає змогу зберегти

високу пропускну здатність на існуючих інфраструктурах і плавно адаптуватися до нових вимог.

Одним із найбільших викликів на шляху впровадження 400G-технологій є потреба в нових оптичних компонентах, таких як лазери, детектори та оптичні підсилювачі. Вони повинні відповідати вимогам високої ефективності, стійкості до температурних коливань та іншим критеріям для забезпечення стабільної роботи на великих відстанях. Проте, завдяки постійному розвитку технологій, таких як 400G-оптичні модулі, ці компоненти стають доступнішими і здатні забезпечити необхідні характеристики для побудови мереж з максимальною швидкістю передачі даних.

Зараз провідні телекомунікаційні компанії вже активно тестують і реалізують рішення на основі 400G-технологій. Оператори мереж використовують ці технології для побудови магістральних мереж зв'язку, а також для з'єднання дата-центрів, що дозволяє значно збільшити швидкість обміну даними між різними точками. У разі успішного впровадження 400G, вони можуть стати основою для створення більш потужних мереж, що підтримують нові технології, такі як 5G, доповнена реальність, штучний інтелект та інші.

У перспективі, з розвитком технологій 400G, не виключено, що ми побачимо значне зростання швидкості передачі даних до 800G і навіть 1T. Такі мережі будуть здатні підтримувати величезні обсяги трафіку, зокрема для застосувань в сфері хмарних технологій, відео-стримінгу, а також обробки великих даних та наукових обчислень. Завдяки прогресу в області оптики та електроніки, а також унікальним можливостям, які забезпечують новітні технології, будуть створюватися системи, здатні впоратися з обробкою та передачею даних на рівні, який ще недавно здавався неможливим.

Одним із аспектів розвитку систем передачі даних на швидкості 400G і вище є також необхідність удосконалення мережевих протоколів. Для того щоб підтримувати стабільну роботу таких систем, потрібні нові стандарти маршрутизації і керування трафіком, що дозволяють ефективно використовувати всю доступну пропускну здатність мережі. Важливим є також забезпечення

безпеки на такому високому рівні передачі даних, що вимагає розробки нових протоколів шифрування та аутентифікації.

Системи 400G і вище також відкривають нові можливості для реалізації віртуалізації та програмно визначених мереж (SDN). Вони дають змогу більш ефективно використовувати інфраструктуру, оперативно налаштовувати мережу відповідно до поточних потреб і зменшувати затримки при передачі даних. Це дуже важливо для забезпечення максимальної ефективності мереж у реальному часі, зокрема для обробки даних в умовах низьких затримок, що особливо важливо для застосувань в сфері 5G та Інтернету речей.

Висока пропускна здатність 400G-систем дозволяє створювати мережі, які здатні підтримувати сучасні вимоги до комунікацій в умовах зростаючого трафіку і розвитку нових технологій. У майбутньому ми можемо очікувати на впровадження більш швидких і ефективних мереж, здатних обробляти більші обсяги даних і забезпечувати високий рівень безпеки та надійності передачі інформації.

1.7 Фізичні обмеження у волоконно-оптичних системах

У волоконно-оптичних системах передачі даних три основні фактори – дисперсія, згасання і нелінійні ефекти – відіграють вирішальну роль у визначенні ефективності та якості зв'язку. Ці явища є наслідками фізичних властивостей оптичного волокна та можуть значно вплинути на пропускну здатність, стабільність і швидкість передачі сигналу. Розглянемо кожен з цих факторів детальніше.

Дисперсія в оптичних системах відноситься до явища, коли світлові імпульси, що передаються по оптичному волокну, розширюються з часом, втрачаючи свою форму. Це відбувається через різну швидкість поширення світлових хвиль з різними довжинами хвиль. Існують кілька типів дисперсії: матеріальна дисперсія, хвильова дисперсія та поляризаційна дисперсія.

Матеріальна дисперсія виникає через залежність швидкості поширення світла від довжини хвилі в матеріалі волокна. Наприклад, коротші хвилі світла поширюються швидше, ніж довші. Цей тип дисперсії може спричиняти спотворення сигналу, що важливо при передачі даних на великі відстані, де імпульси можуть зливатися або затримуватися.

Хвильова дисперсія залежить від геометрії та структури самого оптичного волокна. Вона виникає через різні шляхи, якими імпульси світла можуть рухатися через волокно (основний та високий моди). Це також може призводити до розширення сигналу і, як наслідок, до зменшення швидкості передачі даних.

Поляризаційна дисперсія пов'язана з різною швидкістю поширення світла в залежності від його поляризації. Це явище особливо важливе в високошвидкісних волоконно-оптичних системах, оскільки воно може призводити до значних спотворень сигналу, якщо не буде враховано під час проєктування і експлуатації системи.

Дисперсія може бути зменшена шляхом використання спеціальних типів оптичних волокон, таких як дисперсно-зрушене волокно, яке зменшує ефекти дисперсії в деяких діапазонах довжин хвиль, а також застосування технологій корекції дисперсії в системах зв'язку, зокрема в багатоканальних WDM (Wave Division Multiplexing) системах.

Затухання — це процес ослаблення сигналу, що поширюється через оптичне волокно. Основні фактори, що викликають затухання, — це поглинання і розсіяння світла в волокні. Поглинання виникає через взаємодію фотонів з атомами матеріалу волокна, внаслідок чого енергія переданого сигналу частково виводиться у вигляді тепла. Розсіяння пов'язане з неоднорідністю матеріалу волокна, що спричиняє відхилення світлових хвиль під час їх проходження через волокно.

Основним фактором, що обмежує дальність передачі в оптичних системах, є затухання сигналу, яке залежить від довжини хвилі світла. Для різних типів волокон існують оптимальні діапазони довжин хвиль, де затухання є мінімальним, що використовуються при передачі даних для забезпечення

високої ефективності. Наприклад, для стандартних одномодових волокон оптимальний діапазон передачі знаходиться в області 1550 нм, де затухання значно нижче, ніж в інших частинах спектра.

Для зменшення затухання використовуються високоякісні матеріали, такі як суміші кремнію з іншими елементами, які мають менше внутрішнього поглинання, а також застосування низько- та середньо- затухаючих волокон, які допомагають зберегти потужність сигналу на довгих відстанях.

Нелінійні оптичні ефекти виникають, коли інтенсивність світлового сигналу в оптичному волокні досягає високих значень. Вони є наслідком взаємодії оптичного поля з матеріалом волокна, що призводить до змін в його властивостях. Найбільш поширеними нелінійними ефектами є ефекти, такі як самофокусування, змішування сигналів, ефект Керра та четверте гармонічне спотворення.

Самофокусування — це явище, коли світловий пучок у високоякісному волокні змінює свою форму через нелінійні властивості матеріалу, що може призвести до локалізації сигналу в певних областях волокна. Цей ефект може спотворювати переданий сигнал, якщо не контролювати його інтенсивність.

Змішування сигналів відбувається, коли кілька оптичних сигналів взаємодіють між собою, що може призвести до появи нових частот, які не були заплановані у початковій схемі передачі. Це є проблемою в системах мультиплексування, таких як WDM, де кілька каналів використовуються для передачі різних частотних сигналів.

Ефект Керра — це нелінійний ефект, що виникає через зміну індексу заломлення матеріалу волокна в залежності від інтенсивності світла. Цей ефект може призводити до появи нових компонентів хвиль в сигналі, що можуть викликати додаткові спотворення або навіть втрату інформації.

Нелінійні ефекти можна контролювати шляхом зменшення інтенсивності переданих сигналів або за допомогою спеціальних технік компенсації, таких як корекція фази в багатоканальних системах.

Дисперсія, затування і нелінійні ефекти є невід'ємними характеристиками волоконно-оптичних систем передачі даних, які необхідно враховувати при проєктуванні і експлуатації таких систем. Вони можуть значно вплинути на ефективність передачі, зокрема на максимальні відстані і швидкість, на яких можна передавати дані. Врахування цих факторів при розробці нових технологій і матеріалів дозволяє зменшити їх вплив і створити більш ефективні системи для високошвидкісної передачі даних на великі відстані.

Пропускна здатність волоконно-оптичних систем є одним із найважливіших параметрів, які визначають їх ефективність і здатність задовольняти зростаючі потреби в передачі великих обсягів даних у сучасних телекомунікаційних мережах. На жаль, існують фізичні обмеження, які значно впливають на можливості цих систем, і для того, щоб подолати ці бар'єри, були розроблені різні методи та технології. Важливо відзначити, що ці обмеження мають фізичну природу і є неминучими при використанні традиційних волоконно-оптичних кабелів. Одним із найбільш суттєвих обмежень є дисперсія, яка зумовлює спотворення сигналів і призводить до зниження швидкості і точності їх передачі. Дисперсія з'являється через різну швидкість поширення різних компонентів оптичного сигналу, що спричиняє розширення імпульсів. Це, у свою чергу, знижує якість переданої інформації.

Ще однією серйозною проблемою є затування сигналу, яке виникає через поглинання та розсіювання світла в самому матеріалі волокна. Це затування обмежує максимальну відстань, на яку можна передавати сигнал без потреби в додаткових підсилювачах або повторювачах, що значно ускладнює інфраструктуру мереж і збільшує їх вартість. Крім того, високі швидкості передачі в оптичних системах спричиняють виникнення нелінійних ефектів. Ці ефекти, такі як самофокусування, взаємна модуляція та змішування сигналів, значно погіршують якість сигналу, особливо при високих інтенсивностях оптичного потоку. Нелінійні ефекти можуть призвести до перехресних спотворень, які складно контролювати і коригувати.

Однак сучасні технології дозволяють ефективно подолати ці обмеження, і одним з найважливіших методів є мультиплексування за довжиною хвилі (WDM). Технологія WDM дозволяє значно збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних систем, оскільки вона дозволяє передавати кілька сигналів різними довжинами хвиль на одному оптичному волокні. Завдяки цьому, можна одночасно передавати велику кількість інформації, що збільшує загальну пропускну здатність без необхідності використовувати додаткові волокна або складніші технології. Для досягнення ще більшої ефективності використовуються більш складні варіанти WDM, такі як Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), який дозволяє використовувати дуже близькі довжини хвиль для передачі даних. Ця технологія забезпечує набагато вищу пропускну здатність і дозволяє передавати величезні обсяги даних на одному каналі, що є надзвичайно важливим для забезпечення швидкого доступу до мережі.

Іншим важливим досягненням у збільшенні пропускну здатності волоконно-оптичних систем є використання оптичних підсилювачів. Поглинання сигналу на великих відстанях є однією з головних причин, чому передачу даних потрібно підсилювати або повторювати. Однак оптичні підсилювачі, зокрема ербієвмодульовані оптичні підсилювачі (EDFA), дозволяють значно збільшити ефективність передачі даних, підвищуючи рівень сигналу без його перетворення в електричний вигляд. Ці підсилювачі дозволяють компенсувати згасання сигналу на великих відстанях, зберігаючи при цьому високу якість зв'язку. Вони дозволяють використовувати волокно без необхідності встановлення додаткових електричних підсилювачів, що спрощує конструкцію і робить її більш надійною.

Додатково, для покращення якості сигналу і підвищення пропускну здатності використовуються методи корекції дисперсії. Такі методи дозволяють зменшити спотворення сигналу, спричинені дисперсією, і забезпечити більш точну передачу даних на великих відстанях. Це досягається за допомогою спеціальних оптичних матеріалів, які компенсують розширення імпульсів, що

спричиняється дисперсією. Однак ефективність таких методів залежить від багатьох факторів, таких як тип використовуваного волокна та частота сигналу, тому для досягнення максимального результату необхідно вибирати відповідні матеріали і технології, які найбільш підходять для конкретної системи.

Важливо також зазначити, що для подолання нелінійних ефектів активно використовуються методи модуляції сигналів. Серед них можна виділити фазову модуляцію, яка дозволяє знизити інтенсивність світла і, відповідно, зменшити нелінійні ефекти. Це дозволяє досягти кращого балансу між швидкістю передачі і якістю сигналу, мінімізуючи спотворення при високих рівнях інтенсивності. Інші методи модуляції, такі як амплітудна та частотна, також широко застосовуються для оптимізації передачі даних і зменшення впливу нелінійних ефектів.

Ще одним важливим напрямком для покращення пропускної здатності є використання когерентних оптичних систем. Когерентні системи дозволяють використовувати більш ефективні методи детекції сигналів, оскільки вони дають змогу використовувати більше параметрів модуляції, таких як фаза, амплітуда та частота, для передачі інформації. Це дозволяє зменшити вплив спотворень і значно збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних мереж. Завдяки цьому можна досягти вищих швидкостей передачі та зменшити кількість помилок, що є критичними для сучасних мереж, де обсяги даних значно зросли.

Загалом, розвиток оптичних технологій та методів подолання обмежень пропускної здатності є важливим кроком у розвитку телекомунікаційних мереж. Проблеми, такі як дисперсія, затухання та нелінійні ефекти, можуть значно ускладнити процес передачі даних на великі відстані або на високих швидкостях. Однак завдяки постійному розвитку нових технологій, таких як WDM, оптичні підсилювачі, фазова модуляція та когерентні системи, можливо значно підвищити ефективність волоконно-оптичних систем і створювати високошвидкісні мережі, що здатні задовольняти потреби сучасних користувачів у передачі великих обсягів даних.

Волоконно-оптичні системи передачі даних є важливим елементом сучасних телекомунікаційних технологій, і ефективність таких систем значною мірою залежить від характеристик оптичного сигналу, зокрема від довжини хвилі та типу джерела випромінювання. Ці параметри відіграють важливу роль у визначенні якості сигналу, тому що впливають на його загальні властивості, такі як потужність, затухання, дисперсія та чутливість до зовнішніх впливів. У цьому контексті важливо розглядати, як довжина хвилі і вибір джерела випромінювання впливають на передачу інформації через оптичне волокно, зокрема на такі фактори, як спотворення сигналу, затухання і ефективність модуляції.

Довжина хвилі є одним з основних параметрів, що визначають поведінку світла при його проходженні через волоконно-оптичне середовище. Вона визначає частоту світла, а отже, і енергетичний рівень фотонів. Одним із найважливіших аспектів при виборі довжини хвилі є її вплив на дисперсію, яка виникає в оптичних волокнах. Дисперсія описує розсіювання світла в часі, що призводить до спотворення сигналу, особливо при передачі даних на великих відстанях. Вона залежить від конкретної довжини хвилі, і тому для різних типів волоконних кабелів та використовуваних довжин хвиль дисперсія може суттєво змінюватися. Наприклад, для стандартного одномодового волокна найбільш оптимальна довжина хвилі знаходиться в діапазоні від 1,3 до 1,55 мкм, оскільки в цих діапазонах дисперсія є мінімальною, що дозволяє забезпечити максимальну ефективність передачі даних.

Також важливо зазначити, що вибір довжини хвилі може впливати на затухання сигналу. Затухання — це процес ослаблення сигналу на відстані, і воно також змінюється в залежності від довжини хвилі. Наприклад, в волоконно-оптичних системах, що працюють у діапазоні довжин хвиль 1,3 мкм і 1,55 мкм, спостерігається мінімум затухання, оскільки в цих діапазонах матеріали оптичних волокон (наприклад, кремнієві) мають найменше поглинання світла. Тому при передачі даних на великих відстанях використання цих довжин хвиль

є оптимальним для забезпечення високої пропускної здатності та мінімізації втрат сигналу.

Вибір джерела випромінювання для волоконно-оптичної системи також має значний вплив на якість сигналу. Джерела випромінювання можуть бути різними за своїми характеристиками, зокрема, можуть бути лазерними або світлодіодними (LED). Лазери, як правило, мають вузьку спектральну лінію, що забезпечує високу когерентність і точність передачі сигналу. Лазери з довжиною хвилі, що відповідає оптимальним діапазонам (наприклад, 1,55 мкм), використовуються в більшості сучасних високошвидкісних оптичних систем. Вони дозволяють досягати великих відстаней передачі без значних втрат, оскільки їх спектр є мінімально ширшим і, отже, менш схильним до спотворень, зумовлених дисперсією.

Світлодіоди (LED) використовуються для передачі сигналів на коротші відстані або в системах з низькою пропускною здатністю. Їхня основна перевага полягає в дешевизні і простоті використання, однак вони мають більш широкий спектр випромінювання, що може призвести до більшої дисперсії і значних спотворень сигналу на великих відстанях. Це обмежує їх застосування в тих випадках, де потрібна висока точність і якість передачі даних на значні відстані.

Ще одним важливим фактором є коефіцієнт корисної дії джерела випромінювання, що визначає ефективність перетворення енергії в оптичний сигнал. Лазери мають більшу ефективність у порівнянні з світлодіодами, що також сприяє їхньому застосуванню у високошвидкісних системах передачі даних, де важливо зменшити енергетичні витрати та збільшити ефективність передачі сигналів.

Загалом, довжина хвилі та тип джерела випромінювання мають суттєвий вплив на ефективність волоконно-оптичних систем. Для забезпечення високої якості сигналу та мінімізації спотворень необхідно правильно вибирати довжину хвилі відповідно до характеристик волокна та вимог до пропускної здатності системи. Лазери з оптимальними довжинами хвиль (1,3-1,55 мкм) є найбільш ефективним вибором для сучасних оптичних мереж, в той час як світлодіоди

можуть бути корисними для коротших відстаней або менш вимогливих застосувань. Врахування цих факторів дозволяє створювати високоякісні та ефективні системи передачі даних, що відповідають сучасним вимогам до швидкості та надійності зв'язку.

1.8 Висновки та майбутні напрямки розвитку волоконно-оптичних систем

Аналіз існуючих систем волоконно-оптичної передачі даних дозволяє виділити основні тенденції, проблеми та досягнення, які визначають ефективність таких технологій у сучасних телекомунікаційних мережах. Розглянуті системи різних поколінь, від перших волоконно-оптичних ліній до новітніх високошвидкісних рішень, продемонстрували суттєві зміни у технологічному розвитку, але й виявили кілька ключових аспектів, які залишаються важливими для подальшого вдосконалення.

Один з основних аспектів, на який звертається увага при аналізі існуючих систем, — це пропускна здатність. За останні десятиліття, завдяки розвитку технологій, вдалося досягти значних успіхів у збільшенні пропускної здатності волоконно-оптичних каналів. Сучасні системи дозволяють досягти швидкості передачі даних до 400 Гбіт/с і навіть вище, використовуючи методи мультиплексування, зокрема, WDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), що дозволяє передавати кілька сигналів на різних довжинах хвиль одночасно. Це дозволяє значно збільшити загальну пропускну здатність одного оптичного каналу, однак проблема ефективного використання наявних ресурсів все ще залишається актуальною, оскільки інфраструктура багатьох мереж побудована на старих технологіях з обмеженими можливостями.

Іншим важливим аспектом є вплив фізичних факторів на якість сигналу, таких як дисперсія, затухання та нелінійні ефекти. Дисперсія, зокрема, є однією з основних причин спотворень сигналу на великих відстанях, особливо в одномодових волокнах. Для подолання цих проблем активно використовуються технології, що компенсують дисперсію, наприклад, технології компенсації

дисперсії в частотному або часовому доменах, а також використання оптичних матеріалів з мінімальними втратами на затухання.

Незважаючи на великі досягнення у збільшенні пропускної здатності, не можна ігнорувати проблему затухання сигналу в оптичному волокні. Затухання є результатом поглинання світла матеріалом волокна, і для зменшення його ефекту розробляються нові типи волокон з мінімальними втратами. Деякі новітні технології, як-от оптичні волокна з модифікованою дисперсією або зниженою температурною чутливістю, показують значні переваги в умовах тривалих передач і високих швидкостей.

Ще однією суттєвою проблемою є забезпечення стабільності сигналу в умовах високих швидкостей передачі та великої кількості підключених пристроїв. Нелінійні ефекти, такі як самотимулювання Раманівського розсіяння або самогенерація, можуть призводити до спотворення сигналу при високих щільностях потоку. Для вирішення цих проблем досліджуються нові технології, зокрема когерентні оптичні системи, що дають змогу значно зменшити нелінійні спотворення і дозволяють зберігати високу якість передачі навіть на великих відстанях.

Існуючі системи передачі даних також стикаються з проблемами, пов'язаними з масштабованістю і управлінням великими мережами. Для того, щоб підтримувати високу швидкість і надійність зв'язку в умовах великої кількості користувачів, необхідно розробляти інтегровані рішення для моніторингу і управління мережами. Це включає в себе використання інтелектуальних алгоритмів для виявлення проблем на ранніх етапах і автоматичну настройку мережевих елементів з метою забезпечення максимальної ефективності.

Крім того, в процесі аналізу існуючих систем важливо відзначити тенденцію до інтеграції оптоволоконних технологій із іншими типами зв'язку, такими як бездротові та радіочастотні технології. Це дозволяє створювати гібридні мережі, які можуть більш ефективно обробляти великі обсяги даних, покращувати мобільність користувачів і знижувати затримки передачі сигналу.

Загалом, існуючі системи волоконно-оптичної передачі даних продемонстрували значний прогрес у досягненні високих швидкостей і високої якості сигналу, але залишаються певні проблеми, що потребують вирішення для забезпечення стабільності, надійності і масштабованості систем. Для подальшого вдосконалення технологій в майбутньому необхідно зосередитись на розробці нових методів компенсації спотворень, покращенні матеріалів для волокон та удосконаленні управління мережами на базі сучасних цифрових технологій.

Оптимізація телекомунікаційних мереж є невід'ємною частиною забезпечення ефективної роботи сучасних інформаційних систем, особливо з урахуванням стрімкого зростання обсягів передаваних даних та вимог до їх якості. Існує кілька стратегій, спрямованих на покращення роботи таких мереж. Вони включають як технічні, так і організаційні підходи, що дозволяють досягти високих результатів за мінімальних витрат. Серед найважливіших заходів оптимізації мереж можна виділити вдосконалення інфраструктури, впровадження новітніх технологій, а також вдосконалення системи моніторингу та управління.

Одним із основних шляхів оптимізації є впровадження сучасних методів мультиплексування, таких як Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). Ця технологія дає змогу значно збільшити пропускну здатність волоконно-оптичних каналів без необхідності прокладання додаткових ліній. Вона передбачає використання декількох довжин хвиль для одночасної передачі кількох потоків даних через одне оптоволокно, що дозволяє значно знизити витрати на фізичну інфраструктуру. Такий підхід дозволяє значно збільшити ефективність існуючих каналів зв'язку, зменшуючи при цьому витрати на оновлення інфраструктури. У зв'язку з цим DWDM стає незамінним інструментом у зростаючих телекомунікаційних мережах, де необхідно забезпечити високу швидкість передачі даних при мінімальних витратах.

Один з важливих аспектів оптимізації мережі — це енергоефективність. З урахуванням зростання навантаження на мережі та необхідності безперебійного

надання послуг споживачам, зниження енергоспоживання стає важливим завданням. Використання нових технологій, таких як оптичні підсилювачі з низьким енергоспоживанням і розробка інтелектуальних систем керування енергоспоживанням, дозволяє значно скоротити витрати на енергію. Це особливо важливо для великих мереж, де постійна робота великої кількості устаткування потребує значних енергетичних витрат. У той же час зниження споживання енергії без втрати якості послуг допомагає значно знизити витрати на експлуатацію мереж.

Іншою важливою стратегією є впровадження технологій програмно-орієнтованих мереж (SDN) і віртуалізації функцій мереж (NFV). Це дозволяє централізовано управляти мережею, забезпечуючи автоматичне налаштування параметрів в залежності від поточного навантаження і запитів користувачів. Технології SDN надають змогу динамічно змінювати топологію мережі та маршрути, адаптуючи її до поточних умов, що дозволяє мінімізувати затримки та підвищити загальну ефективність мережі. Віртуалізація мережевих функцій дозволяє значно знизити витрати на фізичне обладнання, створюючи віртуальні мережі для різних сегментів користувачів. Це також дає змогу легко масштабувати мережу без необхідності значних капітальних витрат на нові сервери чи комутатори.

Крім того, важливим аспектом оптимізації є покращення якості обслуговування (QoS). Це стосується не тільки забезпечення стабільної і швидкої передачі даних, але й пріоритетного оброблення критичних типів трафіку, таких як голосові дзвінки, відеоконференції та інші види даних, що вимагають мінімальних затримок. Впровадження систем, що дозволяють забезпечити високу QoS для різних типів трафіку, є необхідним для покращення досвіду користувачів і забезпечення належної якості телекомунікаційних послуг. Це включає в себе не тільки забезпечення достатньої пропускної здатності, а й ефективне керування потоком даних, щоб уникнути їх перевантаження в пікові періоди.

Важливою частиною оптимізації є також інтеграція бездротових технологій. З розвитком 5G і майбутнім переходом до 6G телекомунікаційні мережі повинні забезпечувати не тільки високі швидкості передачі даних, а й низькі затримки для задоволення потреб мобільних користувачів. Інтеграція бездротових мереж із проводовими волоконно-оптичними лініями дозволяє створювати гібридні мережі, що забезпечують більш високу гнучкість і надійність, а також покращує доступ до високошвидкісного інтернету в районах, де прокладання оптоволокна є складним чи економічно не вигідним.

Відповідно до постійного збільшення обсягу трафіку і зростаючих вимог до пропускної здатності, важливим кроком для оптимізації мереж є прогнозування навантаження. Використання аналітики даних і алгоритмів машинного навчання дозволяє передбачити пікові навантаження і відповідно адаптувати мережу до майбутніх вимог. Це дозволяє більш ефективно управляти ресурсами, оптимізувати використання наявних каналів і мінімізувати ризики перегрузки мережі, що можуть призвести до зниження якості обслуговування.

Насамкінець, зважаючи на зростаючу складність і масштаб телекомунікаційних мереж, регулярна модернізація та оновлення мережевого обладнання є необхідними для підтримання високої продуктивності систем. Замінюючи застаріле обладнання на сучасне, яке підтримує більш високі швидкості передачі даних, можна значно підвищити ефективність роботи мережі. Важливою частиною цього процесу є також інвестування в нові технології, які дозволяють забезпечити не тільки високу швидкість, але й знизити енергоспоживання та підвищити надійність мережі.

Таким чином, оптимізація телекомунікаційних мереж є багатогранним процесом, що включає в себе вдосконалення інфраструктури, інтеграцію нових технологій, а також підвищення ефективності управління і моніторингу. Завдяки використанню сучасних рішень і підходів можна значно підвищити продуктивність, знизити витрати та забезпечити високоякісні послуги для користувачів.

Зростаючі вимоги до обсягу переданих даних, високої пропускної здатності та надійності мереж стали основними факторами, які стимулюють розвиток нових технологій у сфері передачі даних. Інноваційні підходи, що з'являються в цій сфері, здатні значно покращити продуктивність телекомунікаційних систем і задовольнити вимоги швидкості, гнучкості і масштабованості. Нові технології обіцяють революціонізувати спосіб передачі даних, підвищуючи ефективність існуючих систем і відкриваючи нові можливості для розвитку інфраструктури.

Однією з найбільш перспективних технологій є волоконно-оптична передача даних, яка продовжує залишатися основним рішенням для високошвидкісних з'єднань. Застосування методів мультиплексування, таких як Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM), дозволяє значно збільшити пропускну здатність існуючих волоконних каналів. У поєднанні з новими типами волокон, такими як багатоканальне оптоволокно, що дозволяє передавати кілька потоків даних одночасно, ці технології забезпечують здатність передавати величезні обсяги даних на великі відстані з мінімальними втратами. Вдосконалення технологій підсилювачів сигналу також сприяє збільшенню пропускної здатності та дальності передачі без необхідності додаткових ретрансляторів, що знижує витрати на підтримку інфраструктури.

Ще однією важливою інновацією є когерентні оптичні системи. Ці системи використовують більш складні технології модуляції сигналу, що дозволяють ефективно використовувати більше спектру, що надається оптоволокном. Когерентні системи забезпечують високу ефективність і надійність при передачі даних на великі відстані, а також зменшують затухання сигналу і знижують потребу в додаткових підсилювачах. Завдяки цьому вони здатні значно підвищити пропускну здатність і оптимізувати використання мережевих ресурсів, що є критичним в умовах постійного зростання обсягів переданих даних.

Не менш важливими є новітні технології обробки даних, зокрема, використання штучного інтелекту (ШІ) і машинного навчання для управління

мережевими потоками та оптимізації ресурсів. ШІ може автоматично налаштовувати параметри мережі в реальному часі, передбачати пікові навантаження та коригувати маршрути передачі даних, забезпечуючи більш стабільне та ефективне функціонування мережі. Це дає змогу знизити затримки, зменшити втрати даних та підвищити якість обслуговування в умовах швидко зростаючого трафіку.

Розвиток 5G і майбутній перехід до 6G також відкривають нові можливості для передачі даних. Ці мережі нададуть високошвидкісні з'єднання, що підтримують низькі затримки, високу щільність підключених пристроїв і забезпечують значно більшу пропускну здатність порівняно з попередніми поколіннями мобільних мереж. Особливо важливим є розвиток малих базових станцій і технологій пікосистем, які дозволяють значно зменшити відстань між пристроєм і мережею, що забезпечує стабільну передачу даних навіть у найбільш перевантажених умовах.

Системи на основі квантових технологій є ще однією захоплюючою інновацією, яка може революціонізувати підхід до передачі даних. Квантові комунікації здатні забезпечити абсолютно новий рівень безпеки і швидкості передачі, завдяки використанню квантових бітів (кубитів), які можуть передаватися та зберігатися без втрат даних. Прогрес у квантових обчисленнях і квантовій криптографії обіцяє нові можливості для швидкого та безпечного обміну даними на великі відстані, що є надзвичайно важливим для розвитку високошвидкісних телекомунікаційних систем.

Не можна також забувати про важливість розвитку бездротових технологій. Вони мають важливе значення для забезпечення високошвидкісного доступу в інтернет у віддалених районах, де неможливо прокласти традиційні волоконно-оптичні канали. Технології, такі як Li-Fi (оптичний зв'язок) і 5G, значно покращують якість передачі даних у мобільних умовах, дозволяючи забезпечити високу пропускну здатність навіть у мобільних середовищах, де раніше були обмеження.

Інтеграція новітніх технологій обробки даних і комунікацій дозволить створити високопродуктивні, стійкі та масштабовані телекомунікаційні мережі, що зможуть задовольнити зростаючі вимоги до пропускної здатності. Враховуючи тенденції до зростання обсягу даних і високих вимог до швидкості та надійності, потенціал нових технологій є величезним і обіцяє значні досягнення в галузі телекомунікацій. Технології, що активно розвиваються, дозволять створити високошвидкісні системи, які здатні ефективно передавати великі обсяги даних з мінімальними затримками і втратами, що відкриває нові горизонти для розвитку інформаційних технологій.

1.9 Висновки розділу 1

У розвитку оптичних волокон існують кілька важливих напрямків, які зумовлені необхідністю збільшення пропускної здатності і швидкості передачі сигналів у ВОСП. Зокрема, на найближчі десятиліття передбачається досягнення швидкості до 50-100 Тбіт/с та більше завдяки розширенню спектральних каналів у діапазоні від 1300 до 1610 нм. Для цього розробляються нові типи оптичних волокон, що повинні мати більший діаметр серцевини для одномодового режиму або матеріал із низькою нелінійністю. Одним із таких інноваційних рішень є мікроструктуроване оптичне волокно, а також волокна на основі фотонних кристалів (PCF).

Існують кілька видів порожнистих волокон, серед яких:

- одномодове порожнисте волокно, що містить гексагональне розміщення повітряних порожнин без центральної;
- багатомодове волокно з кільцем повітряних порожнин на зовнішньому шарі;
- активне волокно для волоконних лазерів, що включає леговане скло;
- порожнисте волокно з фотонним кристалом, яке має заборонену зону для певних довжин хвиль.

Мікроструктуроване оптоволокно, на відміну від звичайного, виготовляється повністю з однорідного скла, а замість зовнішнього шару з низьким показником заломлення використовуються циліндричні порожнини, заповнені газом або повітрям. Завдяки такій структурі вдається знизити ефективний показник заломлення, що сприяє підтримці одномодового режиму передачі. Порожнисте волокно має властивості, які дозволяють працювати з високими потужностями світла і характеризується низькою нелінійністю. Волокна на основі фотонних кристалів використовують інтерференційні ефекти на періодичних структурах, що дозволяє локалізувати світло в серцевині волокна через так звану заборонену зону для певних довжин хвиль.

Виготовлення таких волокон зазвичай базується на використанні тонкостінних капілярів, що дозволяє створювати порожнини, зменшуючи загасання сигналу та підвищуючи ефективність передачі. Перші дослідження з фотонними кристалами датуються 1995 роком, коли було отримано волокно з гексагональною структурою капілярів.

Сучасні волоконно-оптичні системи потребують спеціальних волокон для різних завдань, таких як підвищена радіаційна стійкість або використання новітніх технологій, зокрема наноструктур, що зменшують втрати при вигинах. Для оптичних підсилювачів розроблені волокна з домішками, такими як ербій (Er^{3+}), що підвищують ефективність сигналу в діапазоні близько 1550 нм.

Особливу увагу приділяють створенню Брегівських решіток, що використовуються в оптичних мультиплексорах, а також фоточутливих волокон, які здатні змінювати свої властивості під впливом ультрафіолетового світла. Окрім традиційних кварцових волокон, активно розвиваються пластикові волокна (POF), які застосовуються в локальних мережах, для підключення до FTTH та в інших специфічних застосуваннях. Пластикові волокна характеризуються низькою вартістю та стійкістю до механічних пошкоджень, хоча вони мають більші втрати сигналу, що обмежує їхнє використання на великих відстанях.

Загалом, розвиток нових типів волокон, таких як полімерні волокна і волокна з фотонними кристалами, дає нові можливості для покращення характеристик оптичних мереж.

У двадцять першому столітті людство адаптувалося до високошвидкісних систем передачі даних, що спричинило постійне зростання вимог до швидкості передачі. Відмовившись від металевих кабелів, усе частіше застосовуються оптоволоконні технології, які забезпечують високу пропускну здатність каналу і зменшують кількість ретрансляторів, що, в свою чергу, знижує внутрішні перешкоди. Оптичний зв'язок є стійким до електромагнітних та радіочастотних перешкод, що гарантує високу якість, надійність і безпеку передачі даних.

У цьому розділі був здійснений загальний аналіз мереж, побудованих на основі оптоволоконних кабелів, а також розглянуті різні типи оптичних кабелів. Оцінено переваги та недоліки одномодових і багатомодових волокон, а також обґрунтовано їх застосування в різних структурованих кабельних системах. Використання нових типів оптичних кабелів дозволить покращити технічні характеристики мереж, збільшити кількість оптичних каналів, підвищити максимальну швидкість передачі та кількість оптичних волокон. Однак прокладання нових оптичних кабелів пов'язане з високими витратами та не завжди є можливим, тому необхідно шукати альтернативні рішення для забезпечення необхідних характеристик мережі.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ЗБІЛЬШЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ВОЛТ

2.1 Постановка проблеми та можливі рішення

Завдання полягає в значному збільшенні пропускної здатності магістральної ВОСП. Для цього розглянемо, що собою являє стандартна ВОСП. Оптичний лінійний тракт може містити підсилювачі та регенератори оптичного сигналу.

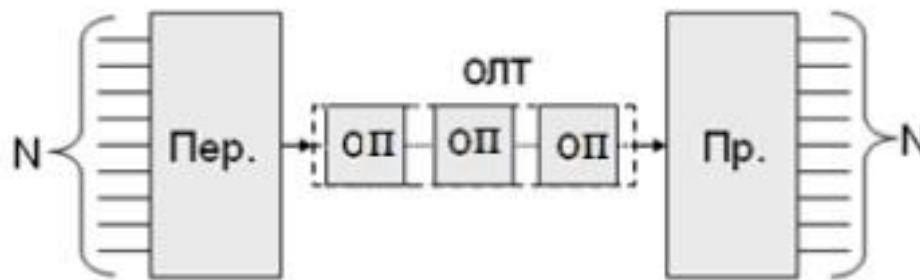


Рисунок 2.1 - Структурна схема багатоканальної ВОСП.

Пропускна здатність оптичного кабелю визначається як добуток кількості волокон, кількості оптичних каналів та максимальної швидкості в кожному каналі на конкретній ділянці лінії передачі: $C = N_{\text{ов}} * N_{\text{опт.кан.}} * V_{\text{пред}}$, де: C — пропускна здатність ВОСП; $N_{\text{ов}}$ — кількість оптичних волокон у кабелі, що має бути максимальною для підвищення пропускної здатності; $N_{\text{опт.кан.}}$ — кількість оптичних каналів (оптичних несучих, що передаються за технологією WDM, на даний момент $N_{\text{опт.кан.}} = 32$); $V_{\text{пред}}$ — максимальна швидкість передачі, визначена рівнем SDH, при цьому планується перехід на STM-256 (40 Гбіт/с).

Важливо зазначити, що окрім максимальної швидкості передачі та кількості оптичних каналів, слід врахувати кількість основних цифрових каналів (ОЦК) (64 кбіт/с), які можуть бути передані через ВОЛЗ, а також можливість

коригування цього числа для різних додатків. З допомогою цієї ВОСП здійснюється передача NISX каналів ОЦК, і необхідно досягти НППС каналів з підвищеною пропускною здатністю, тобто: $\text{НППС} = k * N_{\text{вих}}$. Реалізовані ВОСП мають коефіцієнт k (коефіцієнт збільшення пропускної здатності, що збільшує кількість каналів) в межах значень: $k = 2, 4, 8, 16, 32 \dots n$, що дає висновок: k знаходиться в інтервалі $1 < k < 64$. Мета полягає в значному підвищенні пропускної здатності, як зазначено в темі дипломного проекту, де k має бути більше 100.

Однак виникає питання, який саме коефіцієнт k необхідно визначити і який реальний коефіцієнт k може бути, наприклад: 10, 50, 100, 150 або 200. Хоча це здається простим, насправді підвищення пропускної здатності вимагає детального аналізу, оскільки обсяг переданої інформації постійно зростає, що впливає на коефіцієнт k .

На сьогоднішній день на основних магістральних лініях країни працюють ВОЛЗ, що використовують стандартне оптичне волокно (G.652) та системи часової мультиплексії (TDM) з пропускною здатністю до 2,5 Гбіт/с. Збільшити пропускну здатність таких систем можна за допомогою нових високошвидкісних електронних систем модуляції, комутації та прийому лазерного випромінювання, що призведе до необхідності заміни кінцевого обладнання. Однак для підвищення пропускної здатності лише заміна кінцевого обладнання недостатня — потрібна установка ретрансляційних пунктів, які не потребують обслуговування, а також інтеграція різних компенсаторів. Крім того, заміна кабелю виявляється економічно не вигідною.

Далі розглянемо існуючі методи підвищення пропускної здатності магістральних ВОСП.

2.2 Методи мультиплексування цифрових потоків

Принцип роботи методу TDM полягає в тому, що процес передачі даних розподіляється на кілька тимчасових циклів, кожен з яких ділиться на N

субциклів, де N — кількість каналів для ущільнення. Кожен субцикл поділяється на тимчасові позиції (тайм-слоти), у межах яких передається частина інформації з одного з цифрових потоків. Частина цих позицій також виділяється для синхроімпульсів, вставок і сигналів службового зв'язку. У часовому мультиплексуванні кожному інформаційному каналу системи, що використовує одну оптичну несучу (одне джерело випромінювання), надається певний часовий інтервал для передачі інформації. В першому інтервалі цей сигнал модулюється даними одного каналу, в наступному — іншого, і так далі. Тривалість інтервалів залежить від швидкості перетворення електричних сигналів в оптичні та від швидкості передачі по лінії.

На передавальній стороні розміщується часовий мультиплексор, який визначає черговість і час передачі даних на лінії. На приймальній стороні встановлюється демультимплексор, який розпізнає номер каналу та декодує його. Метод TDM поділяється на два види: асинхронне (плезіохронне) і синхронне мультиплексування. Це відображено в цифрових ієрархіях PDH та SDH, визначених рекомендаціями ITU-T. Структура первинної мережі передбачає об'єднання та розподіл потоків інформації, тому мережі будуються на основі ієрархії, де кількість каналів на більш високому рівні ієрархії перевищує кількість каналів попереднього рівня в кілька разів.

Метод WDM дозволяє збільшити швидкість передачі даних у ВОЛЗ за рахунок одночасної передачі кількох TDM каналів на різних довжинах хвиль через одне волокно. В системах WDM вимоги до кінцевого обладнання аналогічні вимогам у TDM системах, але пропускна здатність обмежена лише кількістю каналів. Повна пропускна здатність лінії не залежить від електронних компонентів і може бути збільшена шляхом додавання або видалення оптичних несучих. Кожен канал у WDM обробляється як окремий канал на своїй довжині хвилі.



Рисунок 2.2.1 - Схема передачі оптичних сигналів по ВОЛЗ з тимчасовим мультиплексуванням TDM

Принцип цього методу полягає в об'єднанні кількох цифрових потоків (2, 4, 8, 32 тощо), кожен з яких передається на своїй окремій довжині хвилі λ_m , за допомогою оптичних мультиплексорів (ОМ) у єдиний потік $\lambda_1.. \lambda_m$. Цей об'єднаний потік потім передається через оптичне волокно. На приймальній стороні цей потік обробляється демультиплексором, який розподіляє потоки за окремими оптичними несучими. Потік посилюється та детектується для відновлення вихідних цифрових сигналів.

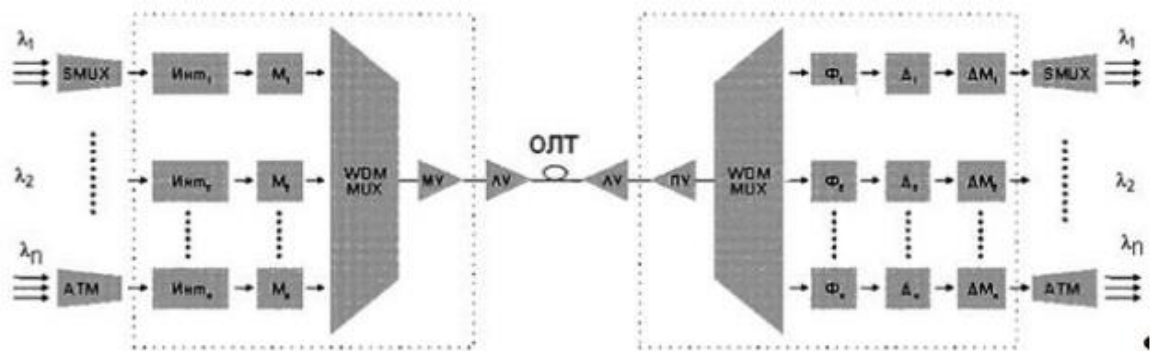


Рисунок 2.2.3 - Структурна схема ВОСП зі спектральним мультиплексуванням WDM з пристроєм вводу/виводу OADM

Частотне мультиплексування (FDM) передбачає передачу кожного інформаційного потоку через фізичний канал на окремій частоті — піднесучій $f_{пн}$. Якщо фізичний канал — це оптичне випромінювання, то воно модулюється груповим сигналом, спектр якого включає кілька піднесучих частот, що

відповідають кількості потоків. Вибір частоти піднесучої визначається умовою: $f_{\text{пн}} \geq 10f_{\text{вчп}}$, де $f_{\text{вчп}}$ — максимальна частота спектра потоку. Інтервал між піднесучими частотами визначається умовою: $\Delta f_{\text{пн}} \geq f_{\text{вчп}}$.

Мультиплексування за допомогою лінійно поляризованих оптичних несучих називається поляризаційним мультиплексуванням (PDM). У цьому випадку кожна несуча передається з певним кутом поляризації. Мультиплексування здійснюється за допомогою спеціальних оптичних пристроїв, таких як призма Рошона. Поляризаційне мультиплексування може бути використано лише за умови відсутності оптичної анізотропії в середовищі передачі, що обмежує його застосування. Цей метод використовують, зокрема, в оптичних ізоляторах і волоконних підсилювачах для накачування ербієвих волокон.

2.3 Порівняння методів підвищення пропускної здатності лінійних трактів

Основною метою порівняння є оцінка ефективності застосування методів хвильового мультиплексування (WDM) та часового мультиплексування (TDM) для збільшення пропускної здатності ВОСП, використовуваних в лінійних трактах одномодових оптичних волокон.

Необхідність порівняння таких методів, як частотне мультиплексування (FDM) і поляризаційне мультиплексування (PDM), відсутня, оскільки ці методи не застосовуються в телекомунікаційних транспортних системах (ТТС). Технології хвильового мультиплексування (WDM) та TDM передбачають об'єднання кількох "низькошвидкісних" каналів у один високошвидкісний. Для WDM використовуються різні довжини хвиль ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$), а для TDM — одна єдина довжина хвилі (λ).

Для збільшення кількості трактів у технології TDM ієрархії PDH перехід на вищий рівень ієрархії здійснюється за принципом $30 \times 4 \times 4 \times 4 \times 4$, що дає змогу збільшити пропускну здатність на кожному рівні в 4 рази. В технології

WDM збільшення пропускної здатності досягається додаванням нових оптичних несучих або зменшенням відстані між центральними довжинами хвиль.

У технології TDM ієрархії SDH збільшення швидкості передачі здійснюється за принципом $4 \times 4 \times 4 \times 4$, досягаючи швидкості 40 Гбіт/с (STM-256), в той час як для WDM можна додавати нові несучі або зменшувати відстань між ними.

При високих швидкостях передачі значний вплив на якість сигналу мають такі параметри, як поляризаційна модова дисперсія та хроматична дисперсія. Це також призводить до ускладнення обладнання та збільшення вартості проекту.

Технологія WDM дозволяє використовувати k потоків технології TDM, кожен з яких модуляційно передається на окремій довжині хвилі. Потоки об'єднуються в оптичному мультиплексорі в єдиний сигнал, що значно підвищує пропускну здатність лінії зв'язку. Технологія WDM знижує обмеження, які виникають при використанні TDM, і може бути застосована разом з TDM для підвищення ефективності існуючих систем.

Порівняння двох методів мультиплексування показує, що WDM є більш економічно вигідною технологією порівняно з TDM. Наприклад, при використанні TDM в ієрархії PDH для виділення складних цифрових потоків необхідно велике обладнання, в той час як при WDM достатньо кількох пасивних елементів.

Обидві технології, WDM і TDM, використовуються для збільшення пропускної здатності ВОСП і не є взаємовиключними, а доповнюють одна одну. Технологія TDM дозволяє передавати різні типи трафіку по одному каналу, що робить її простою в реалізації, але обмеженою у гнучкості. У свою чергу, WDM надає більшу гнучкість для створення складних мереж.

Щодо швидкості передачі, TDM дозволяє збільшувати пропускну здатність лінії, але її обмеження визначаються можливостями електронних компонентів. В технології WDM швидкість передачі по окремому каналу не обмежена швидкістю використовуваних електронних пристроїв, що дає змогу передавати дані з високою швидкістю без обмежень за пропускну здатністю.

Таким чином, технологія WDM має значні переваги перед іншими методами, застосовуваними в ТТС, завдяки більшій гнучкості і високій пропускній здатності.

2.4 Структурна схема альтернативної системи мультиплексування сигналів

Аналізуючи наявні методи мультиплексування та частотного розділення сигналів в оптоволоконних кабелях, було розроблено новий альтернативний метод мультиплексування. Цей підхід передбачає зміни на рівні обладнання системи передачі інформації, що дає змогу використовувати вже існуючі лінії зв'язку.

Основою методу є поєднання технологій хвильового мультиплексування (WDM) та часового мультиплексування (TDM). У WDM системах кожна несуча хвиля є окремим каналом передачі, що може знижувати ефективність у моменти, коли канал не використовується. Водночас при TDM кожен пакет передається в чітко визначений часовий інтервал. У запропонованій схемі всі хвилі об'єднуються в один канал передачі даних, де використовується принцип TDM. Таким чином, пакети даних користувача будуть поділені на частини, що передаватимуться одночасно через різні канали, що дозволяє значно збільшити пропускну здатність лінії.

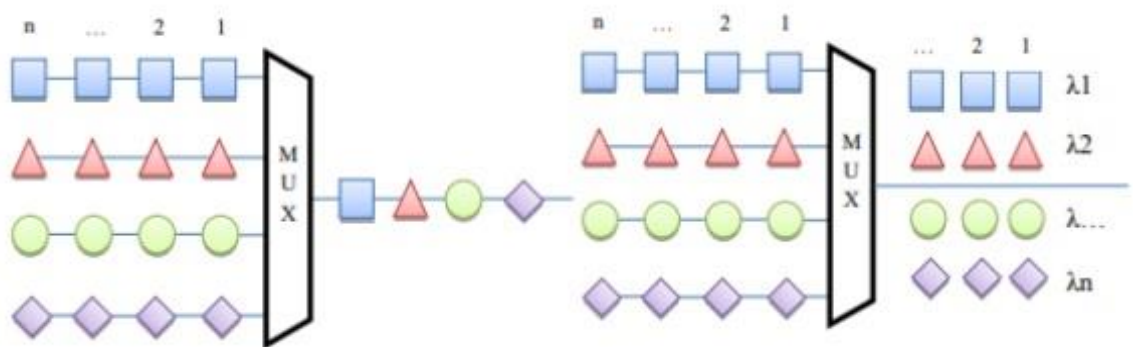


Рисунок 2.4.1 – Передача даних з використанням TDM та WDM

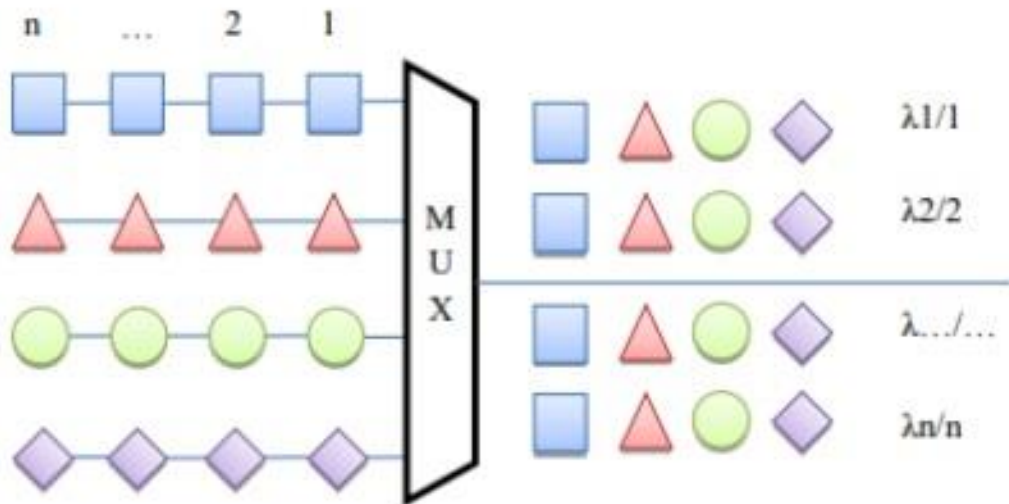


Рисунок 2.4.2 - Схема WDM

У запропонованій схемі кожен термінал підключається до лазера мультиплексора для передачі даних на своїй частоті через оптоволокну. Система має деякі відмінності, зокрема введення додаткового елемента – контрольного модуля (СМ), до якого підключається термінальне обладнання.

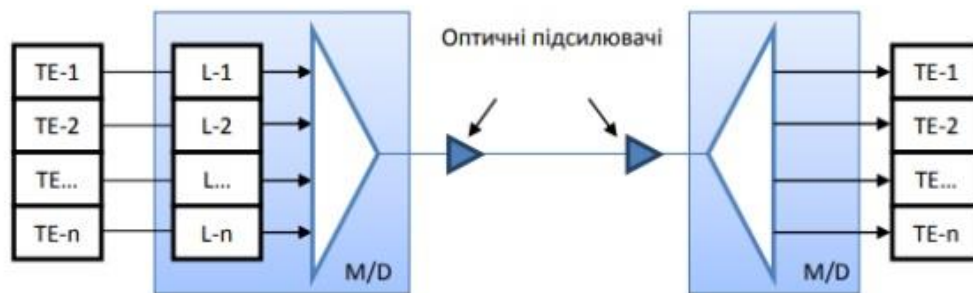


Рисунок 2.4.3 - Схема запропонованої моделі мультиплексування.

Для коректного об'єднання розділених даних до їх початкового вигляду, в процесі розподілення між передавачами, використовується метод інкапсуляції. Кожен пакет має містити два додаткових поля: послідовний номер частини та загальну кількість частин, на які розділені дані. Вибір методу хвильового ущільнення залежить від кількості необхідних

передавачів у системі. Для зниження вартості можна застосувати елементи CWDM систем. У разі потреби в більшій пропускній здатності можна використовувати DWDM, що є більш ефективною технологією ущільнення інформаційних потоків.

CWDM і DWDM обидві займаються ущільненням каналів, однак основна різниця полягає у частотному розподілі несучих хвиль і діапазонах роботи. CWDM зазвичай працює в діапазоні 1270-1610 нм з 18 каналами, тоді як DWDM використовує два основні діапазони – C і L, що дає можливість створити до 61 каналу в діапазоні C та 48 в діапазоні L. Часове ущільнення в даній системі може бути організоване за принципом черги, подібно до технології GEAPON. Кожен новий користувач отримує порядковий номер у черзі, що дозволяє більш ефективно використовувати лінію зв'язку. Передача інформації здійснюється методом паралелізму, де одночасно використовуються як хвильове, так і часове ущільнення. Максимальна швидкість групового потоку буде визначатися як 10 Гбіт/с помноженою на кількість передавачів, хоча для досягнення цієї швидкості слід враховувати час, що витрачається на інкапсуляцію та декапсуляцію даних. Система має можливість для подальшого вдосконалення, зокрема, за рахунок збільшення кількості передавачів або додавання контрольного модуля для підвищення пропускної здатності та кількості користувачів.

2.5 Нелінійні оптичні явища та проблеми, пов'язані зі збільшенням пропускної здатності

З метою збільшення довжин пасивних ділянок оптоволоконних ліній зв'язку (ВОЛЗ) виникла потреба в подачі високої оптичної потужності в волокно. Однак було виявлено, що при потужності випромінювання кілька мВт і більше виникають нелінійні оптичні явища, які можуть значно вплинути на якість зв'язку. Зміни коефіцієнта заломлення в залежності від інтенсивності світла призводять до різноманітних ефектів. При збільшенні потужності та

кількості оптичних каналів ці нелінійні явища можуть стати серйозною проблемою для ефективності системи передачі даних.

2.5.1 Самомодуляція фази (SPM)

Фазова автомодуляція (Self-Phase Modulation - SPM) — це явище, яке виникає, коли сигнал впливає на свою власну фазу. При високих рівнях потужності випромінювання світло змінює коефіцієнт заломлення оптичного волокна, що є проявом ефекту Керра. Зміна коефіцієнта заломлення в часі призводить до модуляції фази передаваної хвилі, що спричиняє розширення спектра оптичного імпульсу. Це веде до зсуву до коротших хвиль у задньому фронті імпульсу (синій зсув) та зсуву до довших хвиль у передньому фронті (червоний зсув).

Зсув довжини хвилі через SPM зменшується при позитивній хроматичній дисперсії, тому хроматичну дисперсію можна використовувати для часткової компенсації ефекту SPM при проектуванні оптоволоконних мереж. Таким чином, контроль за хроматичною дисперсією може бути важливим аспектом для мінімізації негативного впливу фазової автомодуляції на якість переданої інформації в оптичних системах.

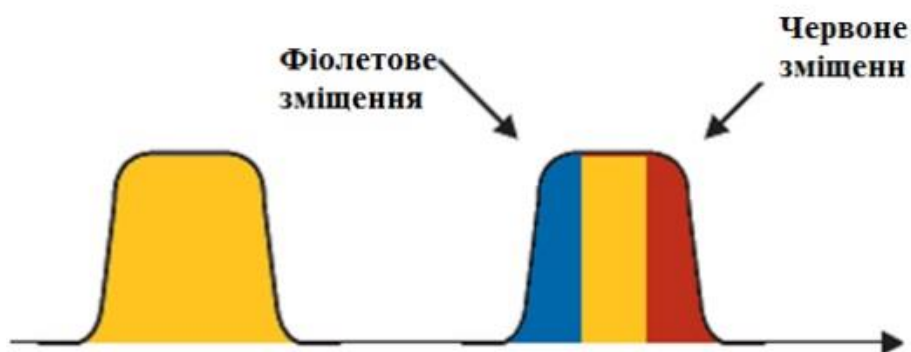


Рисунок 2.5 - Фазова автомодуляція (SPM) сигналу на волокні

2.5.2 Перехресна фазова модуляція

Перехресна фазова модуляція (Cross-Phase Modulation - CPM) — це явище, при якому сигнал в одному каналі впливає на фазу в іншому каналі. Як і в випадку з фазовою автомодуляцією (SPM), CPM виникає через ефект Керра. Однак перехресна фазова модуляція проявляється лише при передачі кількох каналів через одне оптичне волокно.

Коли два світлові імпульси одночасно поширюються через оптичне волокно, їх взаємодія відбувається через нелінійні властивості середовища. CPM, як і SPM, викликається залежністю показника заломлення від інтенсивності світла. Це призводить до виникнення нелінійної зміни фази одного імпульсу, яку викликає оптичне поле іншого імпульсу, що поширюється одночасно з ним.

Цей ефект може призвести до порушень синхронності між каналами, що в свою чергу знижує якість передачі сигналів у багатоканальних системах.

2.5.3 Чотирихвильове взаємодія (FWM)

Розглядаючи це нелінійне оптичне явище, припустимо, що в оптичне волокно вводяться два коливання з початковими частотами f_1 та f_2 , де $f_1 > f_2$. Фотони цих коливань взаємодіють з молекулами середовища, що має певну частоту власних коливань. Під час цієї взаємодії фотони передають молекулам частину своєї енергії, що призводить до зниження енергії фотонів та, відповідно, зменшення їх частоти. У результаті цього в середині волокна з'являються нові компоненти з частотами, що виникають як комбінації початкових частот. Частотний спектр розсіяного сигналу буде містити чотири компоненти частот: f_1 , f_2 , f_3 та f_4 . Якщо $f_1 > f_2$, то можуть виникати ситуації, коли $f_3 = f_4 = f_2$, що може сприяти підсиленню деяких складових, одночасно подавляючи інші. Це явище, яке проявляється у вигляді додаткових частотних компонентів, отримало назву чотирихвильового змішування (Four Wavelength Mixing, FWM). FWM є широкопasmовим процесом,

і його вплив на якість передачі мультиплексних сигналів залежить від дисперсійних властивостей волокна. Найбільш виражений цей ефект у волокнах типу DSF (розширеної з нульовою дисперсією), де всі частоти мультиплексного сигналу поширюються з однаковою швидкістю, що призводить до постійної присутності всіх складових спектра в будь-якому перерізі волокна.

2.5.4 Розсіювання світла за Раманівським ефектом

Вимушене комбінаційне розсіяння (ВКР), або розсіяння Рамана-Мандельштама, виникає в оптичному волокні, коли потужність сигналу досягає певного порогового рівня. Цей ефект обумовлений взаємодією фотонів з молекулами та атомами середовища, через яке проходить оптичне випромінювання. Внаслідок цієї взаємодії молекули можуть поглинати частину енергії, що переноситься фотонами.

Однією з ключових характеристик ВКР є широкий частотний діапазон, оскільки розсіяння взаємодіє з молекулами та атомами середовища на різних частотах. Процес Рамана-Мандельштама є широкосмуговим і призводить до розширення спектра. Коли потужність накачки, введена у волокно, досягає певного порогу, вся енергія, що передається через волокно, може бути перенаправлена в стоксові компоненти на виході, враховуючи коефіцієнт згасання.

Ця умова виконуватиметься, якщо потужність накачки перевищить поріг, що можна описати рівнянням, де порогова потужність залежить від інтенсивності випромінювання та ефективної площі поперечного перерізу волокна. Відповідно, порогова потужність накачки пропорційна площі поперечного перерізу волокна, що робить цей параметр важливим при виборі одномодових волокон для лінійних трактів ПТС в сучасних системах передачі оптичних мультиплексних сигналів.

2.5.5 Вимушене Бріллюенівсько-Мандельштамове розсіювання

Вимушене розсіювання Брілюєна-Мандельштама (SBS) — це явище зворотного розсіювання, що призводить до втрат потужності. Коли потужність досягає високих значень, енергетичні стани молекул і атомів змінюються, що викликає коливання молекул і флуктуації щільності середовища, відомі як акустичні фонони. Ці фонони взаємодіють з фотонами, передаючи їм частину енергії, що призводить до появи нових компонентів у спектрі випромінювання, які називаються стоксовими, подібно до ВКР. Однак на відміну від ВКР, SBS проявляється при значно нижчих потужностях і має зворотній напрямок розповсюдження, протилежний до напрямку інформаційного сигналу. У системах ВОЛЗ SBS викликає збільшення затухання оптичного сигналу і виникнення низькочастотної модуляції. Основний вплив SBS полягає в тому, що розсіяне випромінювання, яке йде в напрямку джерела, створює паразитну модуляцію, що проявляється у вигляді шуму, впливаючи на лазер і погіршуючи якість сигналу.

2.6 Висновки по розділу 2

У цьому розділі було детально розглянуто методи збільшення пропускної здатності в оптоволоконних системах зв'язку. Здійснено аналіз та оцінку різних методів мультиплексування даних, що дозволяє ефективно використовувати обмежену смугу пропускання оптоволокна. Окрім цього, вивчено застосування багатохвильових каналів для ущільнення інформаційних потоків, що дозволяє значно збільшити пропускну здатність без необхідності збільшення швидкості передачі в окремому каналі.

Особливу увагу приділено нелінійним оптичним явищам, що виникають при високих потужностях сигналу, та методам їх компенсації, таким як корекція хроматичної та поляризаційної дисперсії. Це дозволяє підтримувати високу якість передачі сигналів при великих швидкостях передачі.

У результаті аналізу методів мультиплексування було встановлено, що в технології WDM пропускну здатність можна збільшувати не через підвищення швидкості передачі, як у системах TDM, а через додавання нових каналів, що працюють на різних довжинах хвиль. Це дозволяє значно збільшити ефективність використання оптоволоконного каналу, а також забезпечити двосторонню передачу даних через одне волокно.

Технологія WDM є особливо корисною в складних мережах, де є багато вузлів. Вона дозволяє додавати або виділяти спектральні канали через мультиплексори введення/виводу без необхідності перетворення сигналів у електричний вигляд, що суттєво підвищує ефективність та знижує витрати на обладнання.

Усі розглянуті підходи демонструють високу ефективність і можуть бути успішно застосовані для вирішення завдань збільшення пропускну здатності та покращення якості передачі в сучасних оптоволоконних системах зв'язку.

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО ЛІНІЙНОГО ТРАКТУ ВОСП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ WDM.

3.1 Структура ОЛТ ВОСП з WDM

Передавач в оптоволоконній системі відповідає за перетворення електричного сигналу в світловий. Для сучасних систем синхронної цифрової ієрархії, де швидкість передачі варіюється від 2,5 до 40 Гбіт/с, необхідна тривалість імпульсу джерела оптичного випромінювання, яка не повинна перевищувати 0,2 - 0,05 нс. Це обумовлює використання когерентних джерел випромінювання, таких як лазери.

Зазвичай передавач складається з лазерного діода (ЛД), модулятора (М) і кодека, який отримує кодову послідовність від центрального системного процесора (ЦСП). Модулятор здійснює модуляцію оптичної несучої, що генерується лазером, а кодек відповідає за перетворення сигналу з аналогового формату ЦСП у лінійний код для оптичної системи і навпаки.

Приймач ВОСП виконує зворотне перетворення оптичних імпульсів в електричні. Він складається з фотодіода (ФД), оптичного приймача (ОП), фільтра нижніх частот (ФНЧ) та кодека. Основним компонентом є фотодіод, який може бути типу PIN або лавинного типу, що мають низьку інерційність. Оптичний крос забезпечує гнучке з'єднання та роз'єднання оптичних волокон на станціях і в лінійних оптоволоконних кабелях під час технічного обслуговування системи.

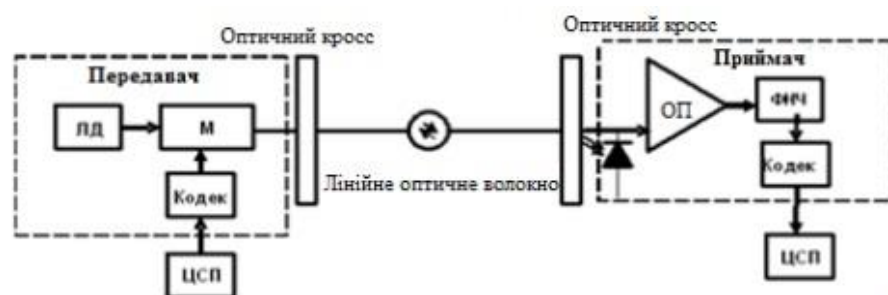


Рисунок 3.4 - Спрощена структурна схема ВОСП

3.2 Вибір типу джерела випромінювання та фотоприймача, їх параметри

До джерел випромінювання для ВОСП висуваються кілька ключових вимог: довжина хвилі випромінювання повинна відповідати мінімуму спектральних втрат оптоволокна; конструкція джерела повинна забезпечувати високу потужність випромінювання та ефективне введення в оптоволокно; джерело має бути надійним і володіти тривалим терміном служби, а також мати мінімальні розміри, масу та споживану потужність. Технологічні особливості виготовлення повинні забезпечувати низьку вартість і стабільність характеристик.

У високошвидкісних ВОСП особливо важливі динамічні характеристики джерел світла. Найбільш підходящими є оптичні випромінювачі, здатні здійснювати пряму модуляцію інтенсивності, частоти або фази випромінювання, без значних змін інших параметрів (наприклад, модового складу або діаграми спрямованості).

Джерелами випромінювання в оптичних передавачах є напівпровідникові світловипромінюючі діоди (СВД) або лазери. Передавачі на базі світлодіодів застосовуються в низькошвидкісних системах передачі з багатомодовим волокном на короткі відстані, однак вони мають низьку швидкість передачі, малу вихідну потужність, широку спектральну смугу і велику розсіюваність випромінювання. Для вибору оптимальної пари джерела випромінювання і фотодіода враховуються швидкість передачі (В) та енергетичний потенціал (Е).

Для систем зі швидкістю передачі менше 2,5 Гбіт/с використовують лазери з резонатором Фабрі-Перо і прямою модуляцією. Для більш високих швидкостей (від 2,5 Гбіт/с і вище) необхідні лазери з розподіленим зворотним зв'язком (DFB), які забезпечують ефективну селекцію мод і зменшують спектр випромінювання. VCSEL (вертикально інтегровані лазери на поверхні) відрізняються можливістю масового виробництва, що знижує їх вартість.

Для проектування оптичної системи на 10 Гбіт/с з довжиною хвилі $\lambda = 1550$ нм оптимальним вибором є лазер DFB, оскільки він працює в необхідному діапазоні і забезпечує потужність 1 дБм з вузьким спектром випромінювання ($<0,1$ нм), високим рівнем придушення бічних мод (35 дБ) та максимальною швидкістю передачі до 10 Гбіт/с.

Щодо фотодетекторів, то найбільш поширеними є PIN-фотодіоди та лавинні фотодіоди (APD). PIN-фотодіоди можуть бути на основі кремнію або InGaAs. Чутливість таких фотодіодів визначається співвідношенням вихідної електричної потужності до світлової потужності, що падає на їх поверхню. Для коротших хвиль (850 нм) використовуються кремнієві фотодіоди, а для довших хвиль (1310 та 1550 нм) — InGaAs.

APD-фотодіоди є більш потужними завдяки додатковій підсилювальній зоні, що дозволяє досягти високого рівня посилення. Однак їх основним недоліком є підвищений рівень шуму через надлишкове посилення сигналу.

Для досягнення високої якості зв'язку в системах ВОСП важливо контролювати коефіцієнт помилок (BER), що визначається через відношення числа помилок до загальної кількості переданих символів. Причиною помилок є шум, що викликає флуктуації струму і може привести до неправильної інтерпретації символів.

При високій швидкості передачі чутливість фотоприймачів знижується. Вибір між PIN-фотодіодами та APD залежить від швидкості та вартості системи. Для високошвидкісних систем зазвичай вибираються PIN-фотодіоди через їх простоту, вартість і надійність.

3.3 Оцінка характеристик оптичного волокна

3.3.1 Вибір робочої довжини хвилі

Оптичний імпульс можна описати за допомогою залежності: $P(t) = P_0 F(t)$. Тривалість імпульсу зазвичай визначають за повною тривалістю TFWHM, яка є

часом, протягом якого потужність імпульсу перевищує половину від максимального значення (Full Width at Half Maximum). Для оцінки тривалості імпульсу використовують також корінь із його часової дисперсії.

Часова дисперсія імпульсу розраховується за формулою:

$$\sigma_t^2 = (\int t^2 P(t) dt / \int P(t) dt) - (\int t P(t) dt / \int P(t) dt)^2, \quad (3.3.1)$$

де $\int P(t) dt$ — це енергія імпульсу, а $\int t P(t) dt / \int P(t) dt$ — координата центру імпульсу, що визначає момент його прибуття. Кутові дужки вказують на усереднення за часом.

При аналізі роботи оптичних систем використовуються стандартні форми імпульсів:

1. Гаусів імпульс: $F(t) = \exp(-t^2/T_0^2)$, $TFWHM = 2\sqrt{\ln 2} T_0 \approx 1.665 T_0$.

2. Супергаусів імпульс: $F(t) = \exp[-(t/T_0)^{2m}]$. При $m = 1$, імпульс має форму звичайного гаусового. Зі збільшенням m , крутизна фронтів зростає. Тривалість переднього фронту T_N визначається як: $T_N = (\ln 9 \cdot T_0)/(2m)$.

У випадку необмеженого зростання m , супергаусівський імпульс наближається до прямокутного імпульсу, форма якого описується як:

$$F(t) = \{1/\sqrt{T}, |t| \leq T/2; 0, |t| > T/2\}. \quad (3.3.2)$$

Оптичний імпульс — це короткотривалий сплеск електромагнітного випромінювання, який поширюється вздовж осі z . Його можна повністю описати часовою залежністю напруженості електричного поля $E(t)$, оскільки $E(t, x, y) = e(x, y)A(x, y)E(t)$, де $e(x, y)$ та $A(x, y)$ характеризують моду оптичного волокна.

Для коротких імпульсів використовують комплексне подання поля: $\tilde{E}(t) = A(t)e^{i\varphi(t)}$, де $A(t)$ — дійсна амплітуда, а $\varphi(t)$ — фазовий множник. Інтенсивність оптичного імпульсу визначається потужністю: $P(t) = I(t)$, де $I(t)$ — потужність, а площа ефективного перерізу волокна.

Спектр імпульсу визначається через перетворення Фур'є:

$$\tilde{E}(\omega) = \int E(t)e^{(-i\omega t)}dt \quad (3.3.3),$$

а енергетичний спектр сигналу — через квадрат модуля:

$$S(\omega) = |\tilde{E}(\omega)|^2. \quad (3.3.4)$$

Критична довжина хвилі оптичного волокна (λ_{crit}) визначається як:

$$\lambda_{\text{crit}} = \pi d / (n_1 - n_2), \quad (3.3.5)$$

де d — діаметр сердцевини, n_1 і n_2 — показники заломлення сердцевини та оболонки. Оптичне волокно передає хвилі лише з довжиною, меншою за діаметр сердцевини ($\lambda < d$).

Нормована частота V задається як:

$$V = (2\pi a/\lambda)\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}, \quad (3.36)$$

де a — радіус сердцевини. Для одномодового режиму $V \leq 2.405$. Профіль показника заломлення залежить від виду мережі й визначається для магістральних мереж згідно зі специфікаціями.

3.3.2 Розрахунок пропускної здатності оптичного волокна

Основна мета цього розділу полягає у визначенні проміжних частот та відстані між сусідніми каналами для забезпечення ефективного використання спектра оптичного волокна.

Третє вікно прозорості охоплює діапазони довжин хвиль, в яких оптичне волокно має мінімальне загасання сигналу. Особливу увагу звернемо на робочі

діапазони С (1530–1560 нм) та L (1575–1615 нм), які використовуються в сучасних системах зв'язку.

Для визначення центральних частот і відстані між сусідніми каналами необхідно врахувати ширину діапазонів С (30 нм) та L (40 нм). Загальна ширина спектра становить 70 нм.

Припустимо, що тривалість імпульсу світла $\eta_i = 10^{-9} \text{ с}^{-1}$, довжина хвилі $\lambda_{12} = 1.551 \text{ мкм}$, а швидкість світла $c = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$.

Центральні частоти обчислюються за формулами:

$$f_1 = c / \lambda_{12}, \quad (3.3.1)$$

$$f_2 = f_1 + \Delta f, \quad (3.3.2)$$

де Δf — відстань між сусідніми каналами.

Для визначення цієї відстані використовується формула:

$$\Delta \lambda = 2(\lambda_3 + \lambda_2) + \lambda_1, \quad (3.3.3)$$

де значення $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ підставляються відповідно до умов розрахунку.

Знайдена відстань між сусідніми каналами становить приблизно 0.3 нм. Для забезпечення надійності та захисту каналів додається резервний інтервал у 0.1 нм, що у підсумку дає відстань між каналами 0.4 нм. Це дозволяє розмістити до 160 каналів у третьому вікні прозорості для діапазонів С та L.

Порогова чутливість фотоприймача з р-і-п фотодетектором визначається за виразом:

$$P_{\text{чутливість}} = A_{\lambda} \cdot \eta, \quad (3.3.4)$$

де $A_{\lambda} = (hc / e\lambda)$ — коефіцієнт, пропорційний енергії падаючого фотона, η — квантова ефективність фотоприймача.

Для довжин хвиль $\lambda = 1.3$ мкм та $\lambda = 1.55$ мкм коефіцієнти A_λ дорівнюють 5.7 Вт/А та 4.8 Вт/А відповідно. Енергія, необхідна для створення фотоструму, зменшується зі збільшенням довжини хвилі.

Шумову потужність приймального модуля можна визначити за формулою:

$$P_{\text{шум}} = \eta \cdot A_\lambda, \quad (3.3.5)$$

де враховуються параметри оптичного модуля, такі як температура T , ємність фотодіода C , та інші конструктивні характеристики.

У системах з мультиплексуванням (WDM) втрати, спричинені мультиплексорами та демультимплексорами, розраховуються за формулою:

$$\alpha_m = R_m \cdot \log(N), \quad (3.3.6)$$

де R_m — коефіцієнт загасання, N — кількість каналів.

Системний бюджет визначається як різниця між потужністю передавача та чутливістю приймача. Для мультиплексорів інтерференційного типу загасання на канал коливається від 1.5 до 5.2 дБ залежно від кількості каналів і довжини хвилі. При збільшенні кількості каналів чутливість приймача зменшується, що вимагає врахування додаткових втрат у системі.

Наведені розрахунки дозволяють визначити параметри магістральної лінії для роботи з WDM-системами та забезпечення максимальної пропускної здатності.

3.3.3 Розробка частотних планів фотонних лінійних трактів

Частотний план лінійного тракту (ЧПЛТ) для будь-якої фотонної транспортної системи, незалежно від технології (CWDM, WDM, DWDM), є стандартною послідовністю оптичних довжин хвиль, що використовуються для передачі модульованих сигналів через оптичні трактори. Важливість рознесення

по довжині хвилі між сусідніми тракторами та стандартизація цього параметра полягає в кількох аспектах. По-перше, стандартні ЧПЛТ дозволяють класифікувати фотонні транспортні системи. По-друге, це дає можливість тестувати сумісність обладнання різних виробників. По-третє, без чіткого розуміння характеристик кожного плану частот оператори зв'язку можуть зіткнутися з проблемами та зайвими витратами при розширенні пропускної здатності мереж.

Реалізація конкретного плану частот залежить від таких факторів:

Наявність робочого діапазону довжин хвиль в використовуваному оптичному волокні;

Вибір типу волоконно-оптичних підсилювачів (TDFA, EDFA, YDFA, розподілені романові підсилювачі) або їх комбінацій.

Розглянемо частотні плани для технологій CWDM і WDM. План частот CWDM включає два варіанти. Перший має середнє рознесення по частоті між сусідніми тракторами 1250 ГГц, що відповідає рознесенню довжин хвиль 10 нм, і дозволяє утворити 4 тракти в С-діапазоні одного волокна. Другий план має рознесення 2500 ГГц (20 нм) і дозволяє утворити 8 трактів у діапазоні S + C + L.

Технологія WDM має кілька варіантів частотних планів. У С-діапазоні існують 6 різних варіантів планів з рознесенням між тракторами 200, 400, 500/400, 600 і 1000 ГГц, включаючи варіанти для 25, 8, 5, 4 трактів з різними рознесеннями. Серед цих варіантів нерівномірний план, де рознесення чергується між 400 і 500 ГГц, є менш оптимальним, оскільки рівномірний розподіл частот значно спрощує виробництво і роботу обладнання, а також дозволяє ефективно збільшувати пропускну здатність.

Плани з рознесенням 600 ГГц і 1000 ГГц не отримали широкого поширення, хоча технології для них були розроблені.

Для технологій DWDM і HDWDM, план частот з рознесенням 100 ГГц (0,8 нм) є широко використовуваним у діапазонах С, L і S, що дозволяє формувати від 16 до 80 трактів залежно від конкретних параметрів. Для HDWDM це дозволяє подвоїти кількість трактів порівняно з DWDM.

Технологія NWDM з рознесенням 25 ГГц (0,2 нм) дозволяє створювати значно більше трактів, до 160 у С-діапазоні одного волокна.

3.3.4 Розрахунок параметрів передачі оптичних волокон

Розрахунок коефіцієнта загасання

Коефіцієнт загасання розраховується для центральної довжини хвилі λ оптичного каналу, попередньо визначивши діапазон її розташування. Результируючий коефіцієнт загасання оптичного волокна ($\alpha_{\text{макс}}$) у дБ/км визначається як сума:

$$\alpha_{\text{макс}} = \alpha_{\text{PP}} + \alpha_{\text{IKП}} + \alpha_{\text{ОН}}, \quad (3.3.7)$$

де: α_{PP} — втрати через релєївське розсіювання; $\alpha_{\text{IKП}}$ — втрати через інфрачервоне поглинання; $\alpha_{\text{ОН}}$ — втрати через домішки OH^- .

Складова втрат через релєївське розсіювання

Втрати через релєївське розсіювання на довжині хвилі λ визначаються за формулою:

$$\alpha_{\text{PP}}(\lambda) = \alpha_{\text{PP,ref}} \cdot (\lambda_{\text{ref}} / \lambda)^4, \quad (3.3.8)$$

де: $\alpha_{\text{PP,ref}}$ — втрати на довжині хвилі λ_{ref} ; λ_{ref} — опорна довжина хвилі.

Складова втрат через інфрачервоне поглинання

Втрати через інфрачервоне поглинання на довжині хвилі λ розраховуються як:

$$\alpha_{\text{IKП}}(\lambda) = \alpha_{\text{IKП,ref}} \cdot \exp(-k_{\text{IKП}} \cdot (\lambda - \lambda_{\text{ref}})), \quad (3.3.9)$$

де: $\alpha_{\text{IKП,ref}}$ — втрати на опорній довжині хвилі; $k_{\text{IKП}}$ — коефіцієнт поглинання.

Складова втрат через домішки OH^-

Втрати, обумовлені домішками OH^- , обчислюються за формулою:

$$\alpha_{\text{OH}} = \Delta\alpha_{\text{OH}} \cdot \exp(-k_{\text{OH}} \cdot (\lambda - \lambda_{\text{OH}})), \quad (3.3.10)$$

де: $\Delta\alpha_{\text{OH}}$ — амплітуда втрат домішок OH^- ; k_{OH} — коефіцієнт залежності втрат від довжини хвилі; λ_{OH} — довжина хвилі водяного піку.

Розрахунок середнього коефіцієнта загасання

Середнє значення коефіцієнта загасання оптичного волокна визначається як:

$$\bar{\alpha} = (\alpha_{\text{макс}} + \alpha_{\text{мін}}) / 2, \quad (3.3.11)$$

де $\alpha_{\text{мін}}$ і $\alpha_{\text{макс}}$ — мінімальне та максимальне значення коефіцієнта загасання відповідно.

Хроматична дисперсія

Параметр хроматичної дисперсії стандартного ступінчастого волокна в пс/(нм·км) розраховується за формулою:

$$D(\lambda) = S_0 \cdot (\lambda - \lambda_0)^2, \quad (3.3.12)$$

де:

λ_0 — довжина хвилі нульової дисперсії, нм;

λ — центральна довжина хвилі, нм;

S_0 — параметр нахилу спектральної характеристики дисперсії у точці нульової дисперсії.

Ці розрахунки дозволяють визначити основні параметри оптичного волокна, що впливають на його ефективність у системах передачі даних.

3.4 Висновки до розділу 3

У цьому розділі були зібрані та організовані початкові дані, необхідні для створення та впровадження магістральної волоконно-оптичної системи передачі, що використовує спектральне ущільнення. Проведено розрахунки параметрів оптичного лінійного тракту ВОСП зі спектральним ущільненням, розглянуті особливості структури цього тракту, а також обрані робочі довжини хвиль. Крім того, здійснена оцінка характеристик оптичного волокна.

Розроблено методику для розрахунку ділянок ретрансляції, вибрано обладнання для джерела випромінювання та фотоприймача, а також проведено порівняння їх параметрів з іншими типами обладнання. Окремо розраховано підвищення пропускної здатності в третьому вікні прозорості.

Створена узагальнена структурна схема ВОСП без компенсаційних пристроїв та лінійних підсилювачів. Завершено розрахунок основних параметрів передачі сигналу через оптичне волокно.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 4.1 [11, 12].

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування

10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	3	3
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	5	4	5
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	5	2	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	2	3	5
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	4	4	2
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	4	5	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	4	4	3
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	2	4	4
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	5	2	5
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	5	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	2	5	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	5	4	4
Сума балів	48	44	45

Середньоарифметична сума балів CB_c	45,6
---------------------------------------	------

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 4.3 [19].

Таблиця 4.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів CB розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» становить 40,3 бала, що, відповідно до таблиці 4.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [19]:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (4.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом

і при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (4.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (4.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
Середня швидкість обробки даних	с	200	180	1,3	0,2
Точність аналізу сигналу	%	90	85	1,15	0,35

Чутливість системи	Лк	0,4	0,2	2.8	0,25
Розрядність аналізованого сигналу	біт	7	9	1.1	0,15
Відношення сигнал/шум	-	5	10	1.8	0,3

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 2.2 \cdot 0.15 + 2.57 \cdot 0.25 + 2.17 \cdot 0.26 + 1.18 \cdot 0.15 + 2.1 \cdot 0.23 = 2.1967$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,72 рази.

4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.3.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ($З_o$) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [21, 22]:

$$З_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.4)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=24$ дні.

$$З_o = 19000,00 \cdot 24 / 24 = 18545,52 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	19000,00	772,73	24	18545,52
Ст. науковий співробітник	17500,00	750,00	24	18000,00
Інженер-програміст	18500,00	681,82	12	8181,84
Інженер-проектувальник біомедичних систем	17000,00	708,33	24	17000,00
Технік 1-ї категорії	8500,00	354,17	15	5312,50
Консультант-аналітик обробки біометричних даних	18500,00	770,83	5	3854,17
Всього				70894,03

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» розраховуємо за формулою:

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.5)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.6)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [20, 21];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 24$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,15 / (24 \cdot 8) = 52,71 \text{ грн.}$$

$$З_{рл} = 52,71 \cdot 10,00 = 527,08 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
Встановлення мережевого обладнання	10,00	2	1,15	54,00	540,00
Налаштування серверного обладнання	8,00	4	1,55	74,25	594,00
Розгортання віртуальних машин	5,00	5	1,75	83,50	417,50
Оптимізація конфігурацій мережі	3,50	5	1,75	83,50	292,25
Розробка системи моніторингу	6,50	4	1,50	72,00	468,00
Тестування системи безпеки	11,00	3	1,40	66,00	726,00
Розробка документації для системи	12,00	3	1,40	66,00	792,00
Узгодження технічних параметрів	4,50	5	1,80	86,40	388,80
Тренування системи	3,50	4	1,50	71,88	251,56
Всього					4116,04

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.7)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (4116,04 + 7501,01) \cdot 100/10 = 11617,05 \text{ грн.}$$

4.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_n}{100\%} \quad (4.8)$$

де H_n – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (4116,04 + 7501,01 + 11617,05) \cdot 22/100 = 33041,13 \text{ грн.}$$

4.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{сж}}, \quad (4.9)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 220,00 \cdot 1,11 - 0 \cdot 0 = 732,60 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір канцелярський офісний (A4)	220,00	3,0	0	0	732,60
Папір для заміток (A5)	100,00	4,0	0	0	444,00
Папір креслярський (A1)	32,00	3,0	0	0	106,56
Папір креслярський (A3)	16,00	3,0	0	0	53,28
Начиння канцелярське	245,00	4,0	0	0	1087,80
Органайзер офісний	165,00	4,0	0	0	732,60
Картридж для плотера (HP-2106)	890,00	3,0	0	0	2963,70
Картридж для принтера (HP-2002)	1850,00	2,0	0	0	4107,00
Диск оптичний (CD-R)	25,00	3,0	0	0	83,25
Диск оптичний (CD-RW)	25,00	3,0	0	0	83,25
FLASH-пам'ять (64 ГБ)	300,00	1,0	0	0	333,00
Всього					10727,04

4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_e), які використовують при проведенні НДР на тему «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.10)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_e = 1 \cdot 1500,00 \cdot 1,11 = 1665,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Преампліфікатор	1	1500,00	1665,00
Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)	1	2100,00	2331,00
Фільтри	1	460,00	510,60
Процесор обробки сигналів (DSP)	1	1890,00	2097,90
Блок демодуляції	1	850,00	943,50
Блок тимчасової затримки	1	560,00	621,60
Пам'ять для зберігання даних	1	1800,00	1998,00
Інтерфейс користувача (зовнішні систем виведення результатів)	1	1299,00	1441,89
Контролер інтерфейсу введення-виведення	1	999,00	1108,89
Всього			12718,38

4.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.11)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 28399,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 19338,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Управляючий комп'ютер електронної експертної системи ARTLINE X48 v36 (X48v36) AMD Ryzen 5 3600 / RAM 16ГБ / HDD 1ТБ + SSD 480ГБ / AMD Radeon RX 6600 8ГБ	1	28399,00	19338,00
Всього			43978,00

4.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{инрг}} \cdot C_{\text{прог.і}} \cdot K_i, \quad (4.12)$$

де $C_{\text{инрг}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прг.і}}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прг}} = 360,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 399,60 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	360,00	399,60
Програмний засіб IDE - Visual Studio Code	1	9830,00	10911,30
База даних МСУТ-330	1	10400,00	11544,00
Всього			22854,90

4.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{Ц_{\text{б}}}{T_{\text{в}}} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12}, \quad (4.13)$$

де $Ц_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{\text{вик}}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{\text{в}}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{\text{обл}} = (28300,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 786,11 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Програмно-аналітичний комплекс	28300,00	3	1	786,11
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	26400,00	3	1	733,33
Програмні засоби реалізації Python	16200,00	3	1	450,00
Обладнання виводу графічної інформації	10250,00	4	1	213,54
Місце оператора спеціалізоване	9100,00	5	1	151,67
Офісна оргтехніка	9600,00	5	1	160,00
Дослідницька лабораторія	300000,00	20	1	1250,00
Всього				3744,65

4.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{gni}}{\eta_i}, \quad (4.14)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{gni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{gni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,35 \cdot 240,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 922,32 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Програмно-аналітичний комплекс	0,35	240,0	922,32
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	0,25	200,0	549,00
Обладнання виводу текстової інформації	0,13	3,2	4,57
Обладнання виводу графічної інформації	0,15	1,4	2,31
Місце дослідника спеціалізоване	0,08	240,0	210,82
Офісна оргтехніка	0,40	1,2	5,27
Управляючий комп'ютерелектронної експертної системи ARTLINE X48 v36 (X48v36) AMD Ryzen 5 3600 / RAM 16ГБ / HDD 1ТБ + SSD 480ГБ / AMD Radeon RX 6600 8ГБ	0,22	100,0	241,56
Компоненти електронної експертної системи	0,21	100,0	230,58

4.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (70894,03 + 4116,04) \cdot 20 / 100\% = 15002,01 \text{ грн.}$$

4.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 30\%$.

$$B_{cn} = (70894,03 + 4116,04) \cdot 30 / 100\% = 22503,02 \text{ грн.}$$

4.3.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_g = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ig}}{100\%}, \quad (4.17)$$

де H_{ig} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ig} = 50\%$.

$$I_g = (70894,03 + 4116,04) \cdot 50 / 100\% = 37505,03 \text{ грн.}$$

4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків;

витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.18)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (70894,03 + 4116,04) \cdot 100 / 100\% = 75010,07 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = З_o + З_p + З_{доо} + З_n + M + K_{\epsilon} + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_{\epsilon} + B_{нзв}. \quad (4.19)$$

$$B_{заг} = 70894,03 + 4116,04 + 7501,01 + 18152,44 + 10727,04 + 12718,38 + 43978,00 + 22854,90 + 3744,65 + 2166,42 + 15002,01 + 22503,02 + 37505,03 + 75010,07 = 346873,04 \text{ грн.}$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.20)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$ЗВ = 346873,04 / 0,95 = 365129,52 \text{ грн.}$$

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів

тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	150	150	150	150

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 4500 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 38500,00 грн;

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 2566,00 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [19]:

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{g}{100}\right), \quad (4.21)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2024 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).
Прийmemo $\rho = 40\%$;

ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2024 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (2566,00 \cdot 4500,00 + 41066,00 \cdot 150) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 4820526,46 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (2566,00 \cdot 4500,00 + 41066,00 \cdot 300) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 6497497,63 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (2566,00 \cdot 4500,00 + 41066,00 \cdot 450) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 8174468,81 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (2566,00 \cdot 4500,00 + 41066,00 \cdot 600) \cdot 0,83 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 9851439,98 \text{ грн.}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $\Pi\Pi$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \quad (4.22)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,1$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} \Pi\Pi &= 4820526,46/(1+0,1)^1 + 6497497,63/(1+0,1)^2 + 8174468,81/(1+0,1)^3 + \\ &+ 9851439,98/(1+0,1)^4 = 4382296,78 + 5369832,75 + 6141599,40 + 6728666,06 = \\ &= 22622395,00 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки:

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (4.23)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв}=2$;

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 365129,52 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 365129,52 = 730259,03 \text{ грн.}$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме:

$$E_{абс} = III - PV \quad (4.24)$$

де III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 22622395,00 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 730259,03 грн.

$$E_{абс} = III - PV = 22622395,00 - 730259,03 = 21892135,97 \text{ грн.}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій $E_е$, які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$E_е = T_{жс} \sqrt[1]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (4.25)$$

де $E_{абс}$ – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 21892135,97 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 730259,03 грн;

$T_{жс}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримування позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_е = T_{жс} \sqrt[1]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1 = (1 + 21892135,97/730259,03)^{1/4} = 1,36.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій $\tau_{мін}$:

$$\tau_{\min} = d + f, \quad (4.26)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2024 році в Україні $d = 0,1$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо 0,3.

$\tau_{\min} = 0,1 + 0,3 = 0,4 < 1,36$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_{ϵ} , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{ок}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_{\epsilon}}, \quad (4.27)$$

де E_{ϵ} – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 1,36 = 0,74 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

4.5 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу» становить 40,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 1,72 рази.

Також термін окупності становить 0,74 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Система обробки цифрового ультразвукового сигналу».

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації було досліджено вплив різних факторів на передачу світлових сигналів через оптоволоконні середовища. Аналіз методів мультиплексування та частотного розділення сигналів показав, що для покращення якості оптичного каналу передачі інформації на фізичному рівні необхідно вдосконалювати технології виготовлення оптоволоконних кабелів і створювати нові лінії зв'язку. Однак цей процес вимагає значних фінансових вкладень та довгострокового планування, а також стикається з обмеженнями через використання одномодових кабелів, у яких дисперсія у вікні прозорості на довжині хвилі 1550 нм є занадто високою.

Для забезпечення ефективної передачі даних було запропоновано використання кабелів з дисперсією протилежного знаку або нові типи волокон, такі як NZDSF (волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією), що дозволяють значно знизити вплив дисперсії та покращити параметри передачі на великих відстанях. Окрім того, було розглянуто вплив технології компенсації дисперсії та нелінійних оптичних ефектів, що дозволяє збільшити стабільність і швидкість передачі сигналу.

Збільшення швидкості передачі даних призводить до підвищення щільності потоку випромінювання, що, у свою чергу, викликає нелінійні оптичні ефекти, здатні спотворювати форму хвилі. У результаті численних експериментів було виявлено, що за умов інтенсивної оптичної хвилі в деяких випадках можуть виникати ефекти, які призводять до зменшення якості сигналу на відстанях більше 100 км, що знижує загальну ефективність передачі.

Було встановлено, що для підвищення пропускної здатності ліній зв'язку доцільно використовувати технології мультиплексування, які дозволяють максимально ефективно використовувати наявні оптоволоконні лінії. Порівняння різних методів мультиплексування показало, що системи WDM є найбільш оптимальними для значного збільшення пропускної здатності зв'язку. Зокрема, реалізація технології WDM дозволяє підвищити пропускну здатність на

75% в порівнянні з традиційними методами, що дає можливість передавати до 100 Гбіт/с через одну оптоволоконну лінію.

Ця технологія забезпечує двосторонню передачу даних через одне волокно, при цьому нарощування пропускної здатності можливе на існуючих волоконно-оптичних кабелях. У системах WDM сигнали різних довжин хвиль, генеровані одним або кількома оптичними передавачами, комбінуються мультиплексором в багаточастотний сигнал, який передається по одномодовому оптоволокну. Результати моделювання показали, що при оптимальній конфігурації системи WDM можливо зменшити затримки на 15% порівняно з іншими методами.

Результати дослідження підтверджують, що вирішення проблеми обмеженої пропускної здатності оптоволоконних магістралей залишатиметься актуальним для операторів зв'язку. Враховуючи економічні та технологічні переваги систем WDM, впровадження таких технологій дозволить значно покращити ефективність та стійкість сучасних оптичних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кучеренко, О. К. Волоконна і інтегральна оптика : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 215 с.
2. Бердников О.М., Хмельов К.П. Застосування технології WDM на телекомунікаційних мережах. / Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ». 2003. № 3. С. 5...11.
3. Каток В.Б., Руденко І.Е., Ранський Є.Г., Однорог П.М. Волоконно-оптичний зв'язок / Під ред. Катка В.Б. К.: Логос, 2015. 383 с.:іл
4. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки побільшування швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 75...77.
5. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. 3-є вид., перероб. і допов. К.: Кафедра, 2019. 324 с.
6. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. Київ, 2005. 194с.
7. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Котенко М. О., Омецінська О. Б. Оптичні мережі доступу (xPON) під редакцією Катка В. Б. Київ, 2006. 65с.
8. Кожем'яко В.П. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник / В.П. Кожемяко, С.В. Павлов, Т.Б. Мартинюк, Г.Л. Лисенко. Вінниця: ВДТУ, 2002. 106 с.
9. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2005. 225 с.
10. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чіжмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ, 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.

11. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

12. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с

ДОДАТКИ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: Система волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускну́ї здатності

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
(МКР, БДР)

Підрозділ: кафедра БМІОЕС, ФІЕС, група ЛТО-23м

Керівник: Коваль Л. Г., завідувач каф. БМІОЕС, доцент.

Показники звіту подібності

Turnitin	
Оригінальність	75 %
Загальна схожість	25 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

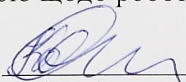
У 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату

☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на дорацювання.

☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень

Заявляю, що ознайомлений з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

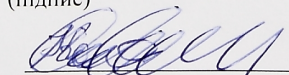
Автор


(підпис)

Солоденко К. І.

(прізвище, ініціали)

Керівник


(підпис)

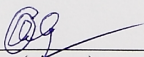
Коваль Л. Г.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Допущено до захисту

Особа, відповідальна за перевірку


(підпис)

Тужанський С. Є.
(прізвище, ініціали)

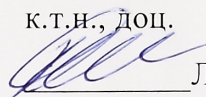
ДОДАТОК Б

ВНТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. каф. БМІОЕС,

к.т.н., доц.

 Л. Г. Коваль

«01» грудня 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

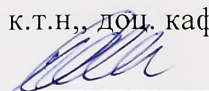
на магістерську кваліфікаційну роботу

«Система волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускну
здатності»

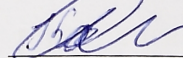
08-41.МКР.007.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц. кафедри БМІОЕС

 Коваль Л. Г.

Виконавець: ст. гр. ЛТО-23м

 Солоденко К. І.

1 ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Робота проводиться на підставі наказу ректора по Вінницькому національному технічному університету від 17.09.2024 р., № 310 та індивідуального завдання на магістерську кваліфікаційну роботу.

Дата початку роботи: 17.09.2024 р.

Дата закінчення: 29.11.2024 р.

2 МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розроблення та вдосконалення системи волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускної здатності з використанням новітніх методів мультиплексування та оптичних технологій, що забезпечують оптимізацію передачі даних на великих відстанях з мінімальними втратами.

В магістерській кваліфікаційній роботі для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати існуючі методи та технології підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних систем;

- розробити методи боротьби з нелінійними ефектами, що виникають при високих щільностях потоку сигналів;

- спроектувати систему волоконно-оптичної передачі даних з підвищеною пропускною здатністю, яка враховує технології мультиплексування та використання оптичних підсилювачів;

- провести дослідження ефективності запропонованої системи та оцінити її технічні характеристики, зокрема, рівень втрат сигналу та стійкість до нелінійних спотворень.

Об'єкт дослідження – процес передачі даних через волоконно-оптичні лінії зв'язку підвищеної пропускної здатності.

Предмет дослідження – методи та технології підвищення пропускної здатності волоконно-оптичних систем, включаючи мультиплексування та застосування оптичних підсилювачів для забезпечення ефективної передачі інформації на великих відстанях.

3 ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ МКР

1. Кучеренко, О. К. Волоконна і інтегральна оптика : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 215 с.
2. Бердников О.М., Хмельов К.П. Застосування технології WDM на телекомунікаційних мережах. / Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». 2003. № 3. С. 5...11.
3. Каток В.Б., Руденко І.Е., Ранський Є.Г., Однорог П.М. Волоконно-оптичний зв'язок / Під ред. Катка В.Б. К.: Логос, 2015. 383 с.:іл
4. Бердников О.М., Щирий А.В. Напрямки побільшування швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 75...77.
5. Розорінов Г.М., Соловйов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. 3-е вид., перероб. і допов. К.: Кафедра, 2019. 324 с.
6. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Омецінська О. Б. WDM під редакцією Катка В. Б. Київ, 2005. 194с.
7. Однорог П. М., Михайленко Є. В., Котенко М. О., Омецінська О. Б. Оптичні мережі доступу (xPON) під редакцією Катка В. Б. Київ, 2006. 65с.
8. Кожем'яко В.П. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації. Навчальний посібник / В.П. Кожемяко, С.В. Павлов, Т.Б. Мартинюк, Г.Л. Лисенко. Вінниця: ВДТУ, 2002. 106 с.
9. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно-оптичні системи передачі. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2005. 225 с.
10. Бердников О. М. Варіанти побудови мінімальної граничної дисперсії в оптичному волокні для багатохвильових систем передачі // Бердников О. М. Позняк А.А. Чіжмодій О.Я.// Сучасні інформаційні технології та кібербезпека (Київ, 15-16 листопада) 2018. с. 98-99.

11. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

12. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с

4 ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ МКР

Основними вимогами є:

1. Функціональне призначення системи: забезпечення високошвидкісної передачі даних через волоконно-оптичні лінії зв'язку підвищеної пропускної здатності з використанням мультиплексування та оптичних підсилювачів.

2. Волокно: одномодове волокно типу G.652 або G.655 з коефіцієнтом загасання не більше 0,25 дБ/км на довжині хвилі 1550 нм, мінімізація хроматичної дисперсії.

3. Оптичний підсилювач: EDFA (оптичний підсилювач на основі ербієвого волокна), з коефіцієнтом підсилення не менше 30 дБ, підвищена стабільність підсилення на різних довжинах хвиль.

4. Мультиплексування: технологія DWDM або CWDM для передачі кількох несучих сигналів через одне волокно, з канальним інтервалом не більше 100 ГГц.

5. Оцінка ефективності системи: мінімальні втрати сигналу та нелінійні ефекти, дослідження ефективності в умовах високих щільностей потоку сигналів, забезпечення надійності та стійкості сигналу на великих відстанях.

5 ЕТАПИ МКР І ТЕРМІНИ ЇХ ВИКОНАННЯ

№	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	закінчення	
1.	Розробка, погодження та затвердження технічного завдання (ТЗ) на систему волоконно-оптичної передачі даних підвищеної пропускної здатності.	17.09.2024	30.09.2024	Розроблене ТЗ
2.	Аналіз існуючих методів і засобів волоконно-оптичної передачі даних, зокрема методів мультиплексування та підсилення сигналу.	17.09.2024	4.10.2024	Розділ 1
3.	Розроблення методів визначення і класифікації оптичних волокон для забезпечення високошвидкісної передачі даних з мінімальними втратами.	4.10.2024	25.10.2024	Розділ 2
4.	Розроблення архітектури системи волоконно-оптичної передачі даних, включаючи вибір типу волокон, оптичних підсилювачів та	15.10.2024	08.11.2024	Розділ 3

	мультиплексуючих технологій.			
5.	Дослідження ефективності вибраних методів та систем для підвищення пропускної здатності, оцінка надійності та стійкості системи на великих відстанях.	08.11.2024	22.11.2024	Розділ 4
6.	Економічна частина: оцінка вартості розробки і впровадження системи, аналіз витрат та економічної доцільності.	09.11.2024	29.11.2024	Розділ 5
7.	Оформлення необхідної технічної документації для реалізації системи волоконно-оптичної передачі даних.	29.11.2024	19.12.2043	МКР

6 ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ І ПРИЙМАННЯ

Контроль за виконанням МКР та її етапів покладається на керівника. Приймання МКР здійснюється шляхом публічного захисту перед екзаменаційною комісією, призначеною наказом ректора ВНТУ.

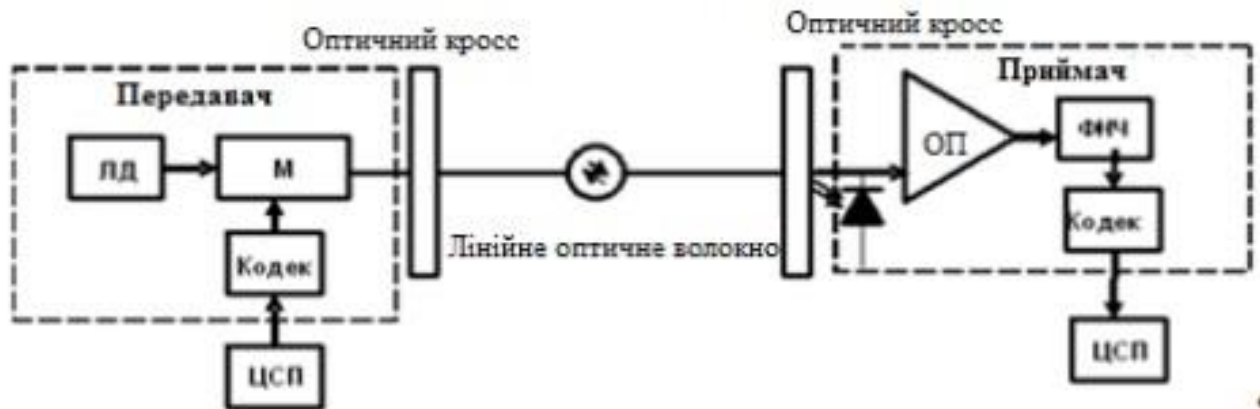
7 ВИМОГИ ЩОДО ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

У зв'язку з тим, що інформація не є конфіденційною, заходи з її технічного захисту не передбачаються.

Додаток В

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

Спрощена структурна схема ВОСП



Фазова автомодуляція (SPM) сигналу на волокні

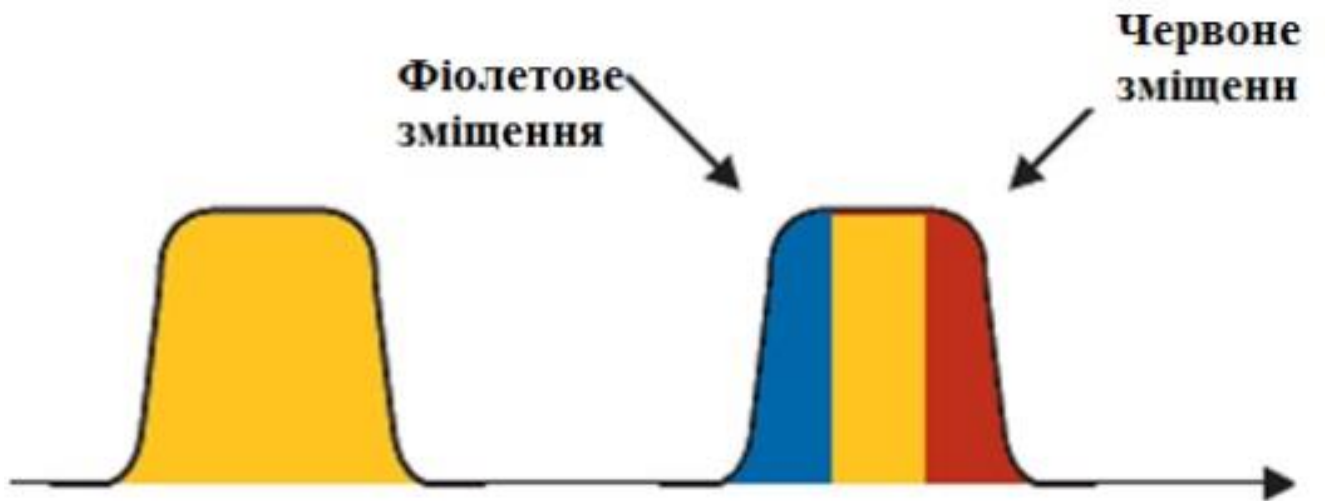


Схема запропонованої моделі мультиплексування

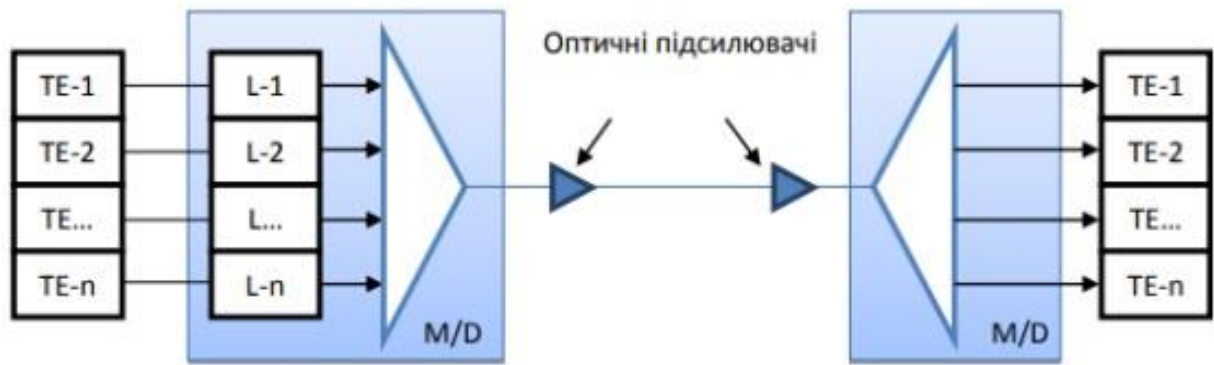


Схема передачі даних з використанням TDM та WDM

