

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

Бакалаврська дипломна робота на тему:

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

Виконав: студент 4-го курсу, групи ПЗТ-206
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

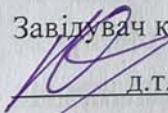
 Гайдамашко А. О.

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІКСТ
Кичак В.М.
« 11 » 06 2024 р.

Рецензент: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС
Семенов А.О.
« 11 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 11 » 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

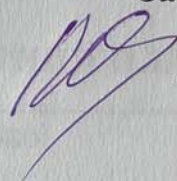
Вінницький національний технічний університет
 Факультет інформаційних електронних систем
 Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
 Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
 (шифр і назва)
 Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
 (шифр і назва)
 Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

«06» 05 2024 року



З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гайдамашку Артему Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Аналіз методів та засобів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж

керівник роботи Кичак Василь Мартинович, доктор. техн. наук, професор,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «11» березня 2024 року № 80

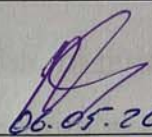
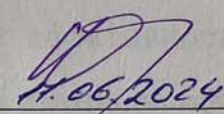
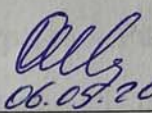
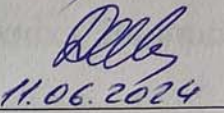
2. Строк подання студентом роботи: 07 червня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Провести аналіз різних шляхів підвищення ефективності та пропускну здатності. Порівняти різні варіації реалізації забезпечення роботи оптичних транспортних мереж. Розглянути сучасний розвиток OTM. Швидкість передавання інформації: до 20Гбіт/сек. Довжина хвилі: 1300 - 1550нМ. Максимальне значення модуля ДГЗ: до 25пс.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, загальна характеристика оптичних транспортних мереж, аналіз сучасного розвитку OTM, методи підвищення ефективності OTM, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): можливі джерела RFI, спрощена схема TDM, спрощена WDM, архітектура мереж OpenRAN, система передавання з спектральним ущільненням каналів.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Кичак В.М., професор кафедри ІКСТ	 06.05.2024	 11.06.2024
Охорона праці	Дембичук С.В. проф. каф. БЖДПБ	 06.05.2024	 11.06.2024

7. Дата видачі завдання «06» травня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

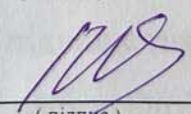
№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської дипломної роботи (БДР)	06.05.2024р.	
2	Огляд та аналіз літературних джерел	07.05.2024р.	
3	Виконання спеціальної частини БДР. Перший рубіжний контроль виконання БДР	11.05.2024р.	
4	Виконання спеціальної частини БДР. Другий рубіжний контроль виконання БДР	17.06.2024р.	
5	Розробка графічної частини БДР	18.05.2024р.	
6	Виконання розділу «Охорона праці»	19.05.2024р.	
7	Нормоконтроль БДР	05.06.2024р.	
8	Попередній захист БДР	06.06.2024р.	
9	Рецензування БДР	07.06.2024р.	
10	Захист БДР	12.06.2024р.	

Студент


(підпис)

Гайдамашко А.О.

Керівник роботи


(підпис)

Кичак В.М.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.371

Гайдамашко А.О. Аналіз методів та засобів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж. Бакалаврська дипломна робота зі спеціальності 172 - Телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – Радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2024. 72 с. Укр. мовою. Бібліогр.: 25 назв; рис.: 15; табл. 0.

Метою цієї бакалаврської дипломної роботи є аналіз та дослідження різних методів та шляхів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж за допомогою яких можливий розвиток телекомунікаційних систем, які повинні якісно обслуговувати зростаючий попит.

Бакалаврська дипломна робота присвячена аналізу методів та засобів, спрямованих на підвищення ефективності оптичних транспортних мереж. У роботі досліджується сучасний стан оптичних транспортних систем, а також оглядаються технологічні та методичні підходи до оптимізації їхньої ефективності. Зокрема, розглядаються методи підвищення пропускної здатності, зменшення затримок передачі даних, оптимізація маршрутизації та інші аспекти, що впливають на ефективність оптичних транспортних мереж.

Розділ охорони праці описує основні ризики, пов'язані з роботою в оптичних транспортних мережах, такі як небезпека впливу лазерного випромінювання та електричного струму. Наводяться заходи для мінімізації цих ризиків, зокрема використання захисних окулярів, організація безпечних робочих місць, регулярні інструктажі з техніки безпеки та дотримання нормативних вимог. Додатково, розглядається необхідність проведення регулярних перевірок та моніторингу умов праці для виявлення потенційних загроз та їх своєчасного усунення.

Результати досліджень можуть бути корисними для операторів зв'язку та виробників обладнання для підвищення якості та швидкості передачі даних в оптичних мережах. Ключові слова: Оптичні транспортні мережі, ефективність, пропускна здатність, затримки передачі даних, оптимізація.

ABSTRACT

UDC 621.371

Haidamashko A.O. Analysis of methods and means of increasing the efficiency of optical transport networks. Bachelor's thesis in specialty 172 - Telecommunications and Radio Engineering, educational program - Radio Engineering. Vinnytsia: VNTU, 2024. 72 p. In Ukrainian. Bibliography: 25 titles; Images: 15; Table 0.

The purpose of this bachelor's thesis is to analyse and research various methods and ways to improve the efficiency of optical transport networks, which can be used to develop telecommunication systems that must serve the growing demand.

The bachelor's thesis is devoted to the analysis of methods and tools aimed at improving the efficiency of optical transport networks. The work examines the current state of optical transport systems and reviews technological and methodological approaches to optimising their efficiency. In particular, the methods of increasing bandwidth, reducing data transmission delays, optimising routing and other aspects affecting the efficiency of optical transport networks are considered.

The occupational health and safety section describes the main risks associated with working in optical transport networks, such as the danger of exposure to laser radiation and electric current. Measures to minimise these risks are outlined, including the use of protective eyewear, safe workplaces, regular safety briefings and compliance with regulatory requirements. Additionally, the need for regular inspections and monitoring of working conditions to identify potential hazards and eliminate them in a timely manner is discussed.

The research results can be useful for telecommunications operators and equipment manufacturers to improve the quality and speed of data transmission in optical networks. Keywords: Optical transport networks, efficiency, throughput, data transmission delays, optimization.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ.....	10
1.1 Волоконно-оптичні системи передачі.....	10
1.2 Пропускна здатність лінійного тракту з TDM, WDM.....	21
2 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО РОЗВИТКУ OTM.....	27
2.1 Концепція 6G в OTM.....	27
2.2 Технології OTM наступного покоління з 6G.....	29
3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ OTM.....	34
3.1 Часове ущільнення WDM.....	34
3.2 Вплив поляризаційно-модової дисперсії на обмеження швидкості передавання і довжини регенераційної ділянки.....	38
3.3 Автоматизована система компенсації ПМД	48
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	57
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	58
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	60
4.3 Пожежна безпека.....	64
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	68
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративний матеріал.....	71
Додаток Б (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) роботи.....	74

ВСТУП

Актуальність теми Обумовлена кількома ключовими факторами. Сучасний розвиток інформаційних технологій та зростання обсягів переданих даних вимагають удосконалення мережевої інфраструктури. Оптичні транспортні мережі, як основа глобальних комунікацій, забезпечують високу пропускну здатність і надійність передачі даних. Зростання попиту на швидкий та якісний інтернет потребує нових методів оптимізації мереж, таких як удосконалення маршрутизації та впровадження технологій мультиплексування з поділом довжин хвиль (WDM). Зростання популярності потокових відеосервісів, онлайн-ігор та хмарних технологій також спричиняє додаткові навантаження на оптичні транспортні мережі, від чого залежить ефективність бізнесів у глобалізованому світі [1,2].

Крім того, впровадження технологій 6G та розвиток Інтернету речей (IoT) створюють додаткові виклики для мережевої інфраструктури, оскільки мільярди підключених пристроїв потребують надійної та безперервної передачі даних. Зростає потреба в безпеці передачі даних через поширення кіберзагроз, що вимагає впровадження новітніх криптографічних рішень та безпечних протоколів. Модернізація обладнання та впровадження нових стандартів забезпечують ефективніше використання ресурсів та енергоефективність, що є критично важливим у сучасному світі [3,4].

Таким чином, дослідження методів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж має велике значення для забезпечення надійних, швидких та економічних мережевих рішень.

Аналіз останніх досягнень. Методам підвищення ефективності ОТМ присвячені праці вітчизняних та закордонних авторів [4,5,6]. Ці методи направлені на покращення спектральної ефективності, пропускну здатності та оптимізації ресурсів. Використання передових модуляційних форматів, таких як 16-QAM та 64-QAM, разом з технологіями мультиплексування WDM та гнучким спектральним виділенням, дозволяють значно збільшити кількість переданих даних і ефективно використовувати доступний спектр.

Підвищення ефективності сприяє оптимізації маршрутизації та розподілу ресурсів через алгоритми динамічної маршрутизації та програмно-конфігуровані мережі (SDN), підвищення швидкодії забезпечується шляхом застосування адаптивного керування трафіком. Впровадження когерентної оптичної технології підвищує чутливість прийому сигналів, що збільшує дальність і пропускну здатність передачі, а також зменшує вплив шумів і спотворень [6,7].

Мета цієї роботи полягає в проведенні комплексного аналізу методів та засобів, спрямованих на підвищення ефективності оптичних транспортних мереж (ОТМ).

Задачі які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

- Провести огляд та класифікацію існуючих методів і засобів для підвищення ефективності ОТМ.
- Оцінити поточний стан та ефективність існуючих ОТМ.
- Визначити основні перешкоди ефективності ОТМ. Розглянути шляхи зменшення їх впливу.
- Дослідити існуючі ефективні методи та визначити перспективні напрями розвитку подолання перешкод ОТМ.

Об'єктом дослідження є оптичні транспортні мережі, що забезпечують високошвидкісну передачу даних на великі відстані та використовуються для інтеграції різноманітних видів телекомунікаційного трафіку. Ці мережі грають ключову роль у сучасних комунікаційних системах, дозволяючи здійснювати ефективну передачу великого обсягу інформації з високою швидкістю і мінімальними затримками.

Предметом дослідження виступають методи та засоби підвищення ефективності оптичних транспортних мереж, включаючи алгоритми, протоколи та архітектури, що сприяють оптимізації використання ресурсів мережі та підвищенню її надійності.

Для досягнення мети роботи використовуються різноманітні **методи дослідження**, зокрема, аналіз наукової та технічної літератури з теми дослідження. Це дозволяє ознайомитися з поточним станом досліджень у цій галузі та виявити ключові тенденції і виклики. Результати комп'ютерних моделювань і симуляцій роботи оптичних мереж дають змогу перевірити теоретичні моделі і оцінити їхню ефективність у віртуальному середовищі. Порівняльний аналіз різних методів і засобів підвищення ефективності ОТС допомагає визначити найбільш перспективні підходи. Статистичні методи обробки даних використовуються для оцінки ефективності запропонованих рішень, що забезпечує надійність та обґрунтованість висновків.

Новизна отриманих результатів полягає в ретельному аналізі сучасних методів та засобів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж з використанням новітніх технологій модуляції.

Досліджено вплив різних джерел на ефективність оптичних систем, та чутливість мережі. Проведено аналіз моделей прогнозування продуктивності оптимізованих мереж та виявлення потенційних обмежень на їхньому шляху.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

1.1 Волоконно-оптичні системи передачі

У будь-якій системі передачі інформації існують три основні компоненти: передавач, канал передачі та приймач (рис. 1.1).

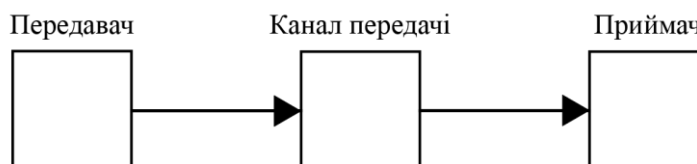


Рисунок 1.1 – Структурна схема системи передачі інформації

Повідомлення, яке має бути передане, перетворюється в форму, придатну для передачі через вибраний канал. Інформація передається від передавача до приймача через цей канал

Канали можуть бути розділені на дві основні категорії: направлені та ненаправлені. Атмосфера є прикладом ненаправленого каналу, через який поширюються електромагнітні хвилі, використовуючи його для ефірного телебачення, радіомовлення та радіорелейних систем. Направлені канали використовують провідні структури, такі як двожильний кабель, коаксіальний кабель та прямокутний хвилевід. Хоча такі канали можуть бути дорогими в області виробництва, монтажу та підтримки, вони мають переваги у забезпеченні конфіденційності, нечутливості до погодних умов і можливості передачі сигналів через фізичні перешкоди.

Прикладом направленої системи є волоконно-оптичні лінії зв'язку, які використовують прозорі волокна для передачі світлових сигналів.

Первинне повідомлення може бути різної природи, і часто його перетворюють за допомогою перетворювача у форму, яка підходить для передачі через канал. Наприклад, звукові хвилі можуть бути перетворені мікрофоном на електричні сигнали, а зображення можуть бути перетворені телевізійною камерою на такі самі сигнали.

У деяких ситуаціях, наприклад, при обміні даними між комп'ютерами або компонентами комп'ютерної системи, повідомлення вже може мати електричну форму. Це може відбуватися в разі використання оптичних волокон у складі більшої системи, наприклад, в земних структурах супутникового зв'язку або мережах розподілу сигналів кабельного телебачення. В будь-якому випадку інформація повинна бути перетворена у форму електричних сигналів перед її передачею через електричну або оптичну лінію зв'язку.

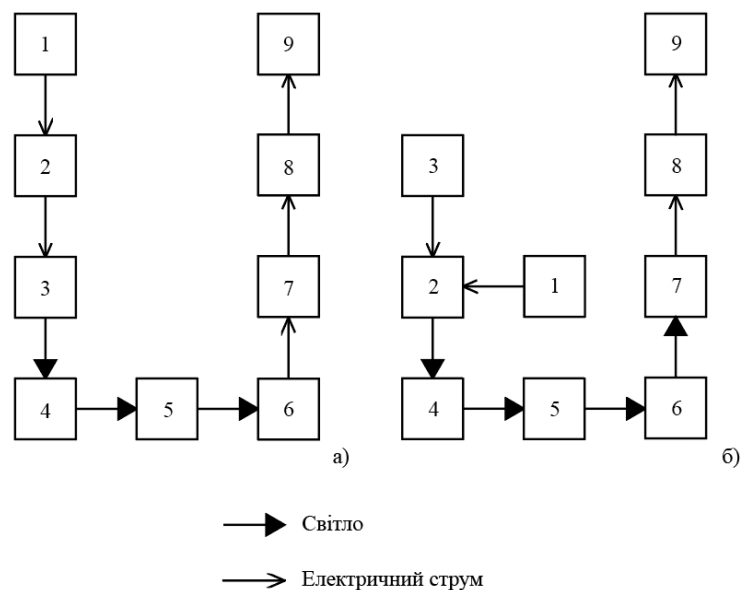


Рисунок 1.2 – Структурна схема загальної системи передачі з внутрішньою а) та зовнішньою б) модуляцією

де, 1 – початкове повідомлення; 2 – модулятор (внутрішній або зовнішній); 3 – джерело несучого коливання; 4 – пристрій введення в канал; 5 – канал передачі; 6 – пристрій виведення з каналу; 7 – фотоприймач; 8 – сигнальний процесор; 9 – прийняте повідомлення;

В системі на рис. 1.2 модулятор виконує дві важливі функції: перетворення електричного сигналу у відповідний формат і передачу цього сигналу на несучій хвилі.

Існують два основних типи модуляції: аналоговий і цифровий. У разі аналогової модуляції акустичний та електричний сигнал зберігає неперервний характер у часі (рис. 1.3), точно відтворюючи форму вихідного повідомлення.

Наприклад, мікрофон перетворює звукову хвилю в електричний сигнал, який має аналогічну форму.

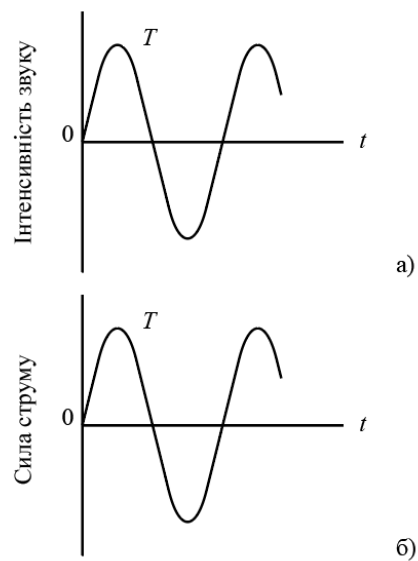


Рисунок 1.3 – Аналогові сигнали: а) акустичний та б) електричний

У цьому контексті модулятор не трансформує формат сигналу, але може підсилити його для ефективного управління певними параметрами джерела несучого колювання, такими як амплітуда, частота або фаза. У випадку цифрової модуляції, як зображено на рис. 1.4, інформація подається у дискретній формі, де сигнал приймає лише два стани: ввімкнено або вимкнено. Ввімкнено представляється як цифра 1, а вимкнено - як цифра 0. Ці стани відображають двійкові біти цифрової системи, і швидкість передачі вимірюється кількістю переданих бітів на секунду.

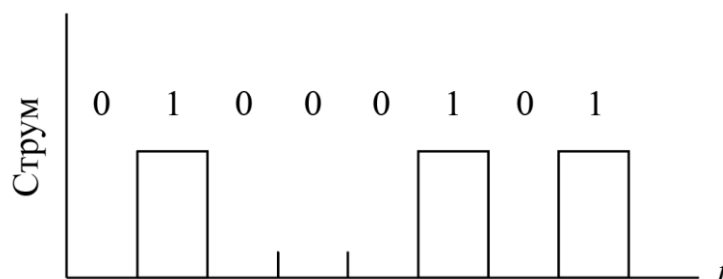


Рисунок 1.4 – Цифровий сигнал

Послідовність бітів (імпульсів) може бути кодовим еквівалентом аналогового повідомлення. Аналого-цифровий перетворювач змінює аналогове повідомлення на цифрову послідовність, а приймальний пристрій здійснює зворотний процес, перетворюючи цифровий сигнал назад у аналоговий. Для передачі цифрового сигналу на несучу хвилю модулятор просто перемикає джерело несучого коливання між станами ввімкнено і вимкнено в відповідні моменти часу. Простота побудови цифрових модуляторів робить цей формат відповідним для волоконних систем.

На початкових етапах проектування будь-якої системи виконується вибір формату передачі.

Також, в цій системі генератор несучого коливання створює хвилю, яка передає інформацію, відому як несуча хвиля. У радіосистемах така несуча хвиля генерується радіочастотним генератором, а в волоконно-оптичних системах використовуються лазерні діоди (ЛД) або світлодіоди (СД) як джерела несучого коливання.

Для ефективної роботи джерело світла повинно генерувати стабільні одночастотні хвилі з достатньою потужністю для передачі на великі відстані. Хоча реальні лазерні діоди та світлодіоди можуть випромінювати групу частот з середньою потужністю в кілька міліватт, цього зазвичай достатньо для багатьох застосувань, оскільки приймальні пристрої мають достатню чутливість. Втрати в тракті передачі зменшують рівень потужності світла, що поширюється по волокну, обмежуючи довжину передавання на низьких рівнях потужності. Також відсутність ідеального одночастотного джерела несучої може погіршити параметри системи та обмежити кількість передаваної інформації на великі відстані.

Світлодіоди та лазерні діоди мають перевагу малих розмірів, маси та помірної споживаної потужності. Вони також досить прості для модуляції, тобто для передачі інформації через них. Принцип роботи цих приладів полягає в зміні струму прямого зміщення через них, що призводить до відповідних змін вихідної оптичної потужності, що повторює форму вхідного струму.

Нарешті, епюри, що відповідають аналоговій та цифровій модуляції оптичної несучої, можуть бути представлені на графіках, які демонструють залежність між вхідним струмом і вихідною оптичною потужністю (рис. 1.5).

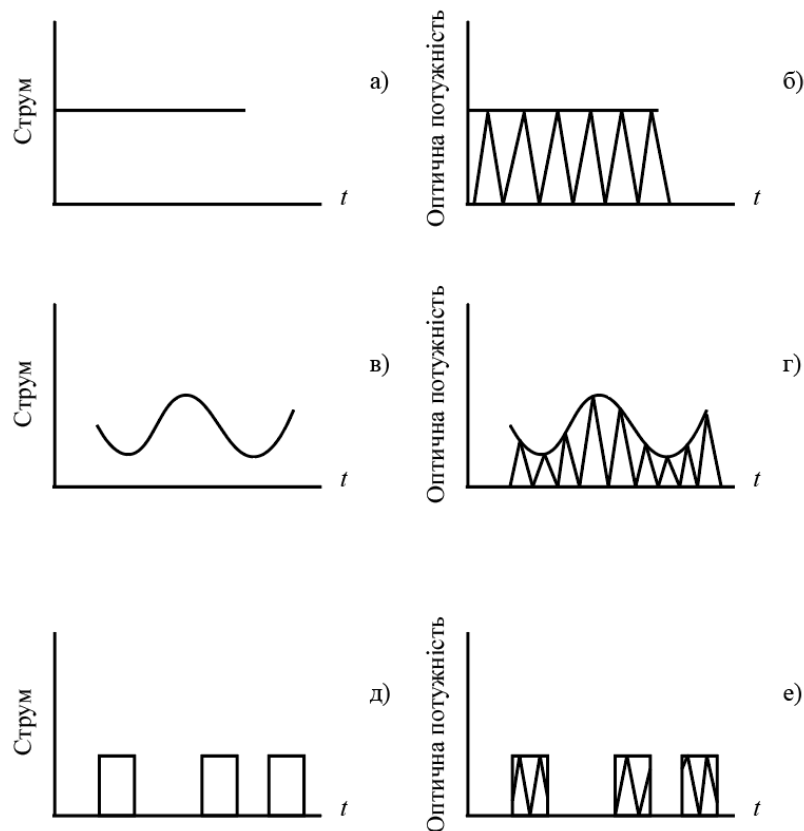


Рисунок 1.5 – Аналогова (в,г) та цифрова (д,е) модуляції інтенсивності оптичної несучої (б)

Важливо відзначити, що передана інформація міститься у зміні оптичної потужності. Цей тип модуляції називається модуляцією інтенсивності (МІ). Незважаючи на те, що струм сигналу, має як позитивні, так і негативні значення, вихідна потужність джерела світла завжди є позитивною. Для забезпечення лінійності, модуляційний струм у аналоговій системі повинен мати лише позитивні значення. Це можна забезпечити, додаючи постійний струм зміщення до струму інформаційного сигналу.

З тієї ж причини модуляційний струм (струм накачки) для цифрової системи завжди є позитивним. Лазерний діод випромінює світло лише після досягнення струмом накачки порогового значення.

Отже, модуляційний струм повинен містити постійну складову, яка дорівнює пороговому значенню струму. При цифровій передачі струм, що відповідає двійковій 1, перевищує поріг, і діод випромінює світло. При отриманні двійкового 0 струм обирається меншим за пороговий, і випромінювання світла не відбувається. Світлодіод не має порога і вмикається кожен раз при протіканні струму через нього в прямому напрямку. Лазерні діоди та світлодіоди розроблені для випромінювання на частотах, де кварцові волокна ефективно передають світло, тобто на частотах, де волокна мають низьке згасання. Слід відзначити, що забезпечення випромінювання джерел на довільних частотах ускладнено.

Без відповідності між частотою (довжиною хвилі) джерела випромінювання і областю спектра, де волокно має малі втрати, волоконно-оптичний зв'язок був би неможливий.

У системах телерадіомовлення роль з'єднувача, через який потужність випромінювання подається в канал передачі, виконує антена. Ця антена передає сигнали передавача в канал передачі, який у даному випадку є атмосферним.

У системах з провідними каналами передачі, таких як телефонні лінії, для підключення передавача до лінії використовується простий роз'єм. У випадку атмосферної оптичної лінії зв'язку, з'єднувачем є лінза, яка використовується для колімації світла, що випромінюється джерелом, та направлення цього світла до приймача. У волоконно-оптичних системах з'єднувач повинен ефективно передавати промодульований пучок світла від джерела в оптичне волокно. Проте це складно виконати без значних втрат потужності, що змушує використовувати складні конструкції вхідних пристроїв.

Однією з причин труднощів є малий розмір стандартних волокон, які мають діаметр приблизно 50 мікрометрів. Однак основні втрати відбуваються через те, що джерела світла випромінюють світло в широкому кутовому діапазоні, тоді як волокна можуть приймати (і передавати) світло лише в обмеженому кутовому діапазоні.

Джерело світла з'єднується напряму з волокном. Навіть у випадку, коли волокно має достатній діаметр для того, щоб захопити всі промені світла від джерела, не весь світловий потік буде зібраний через різницю у кутових розмірах конуса променів, які випромінюються джерелом, і конуса променів, які приймаються волокном. Були розроблені більш ефективні (і складніші) пристрої вводу. З'єднувач з каналом - це один з ключових елементів при проектуванні волоконно-оптичних систем через його потенційні великі втрати.

У волоконно-оптичних системах каналом є волокно із скла або пластику. Основними характеристиками волоконного каналу передачі є низька втрата сигналу та широкий кут у вершині конуса, яким вводиться та направляється світло. Низька втрата та ефективний збір світла особливо важливі для систем передачі на великі відстані. Хоча використовується високочутливий приймальний пристрій, потужність, яка надходить на його приймач, повинна перевищувати певне значення для забезпечення необхідної якості прийому повідомлення.

Кінцевим етапом розгляду системи передавання сигналу можна наголосити на виводі сигналу із каналу, а саме те, що у атмосферній системі радіозв'язку приймальна антена збирає сигнал з інформаційного каналу та спрямовує його до приймального пристрою. У волоконній системі вихідний з'єднувач просто направляє світло з торця волокна на фотоприймач. Це світло випромінюється у формі, ідентичній конусу променів, що приймається волокном.

Оскільки фотоприймачі мають великі світлочутливі площі, а отже, і великі кути прийому, світло може бути ефективно (з малими втратами) виведено з волокна простим з'єднанням встик.

Перед розглядом переваг оптичних волокон, важливо врахувати їх технічні та економічні обмеження. Порівняння з металевими кабелями потребує уважної оцінки кількісних параметрів. Оптичні волокна виготовляються з двоокису кремнію або прозорого полімеру, що робить їх доступними матеріалами. Хоча

вартість є ключовим параметром, порівняння повинне враховувати вартість на одиницю передачі інформації, а не просто вартість за метр.

При розгляді волоконних кабелів важливо врахувати їх переваги у транспортуванні та прокладці через менші розміри та масу. Волоконні кабелі також стійкі до хімічних впливів, вологи та гризунів, і мають більшу інформаційну ємність.

Порівняно з металевими кабелями, оптичні волокна мають менше затухання, що дозволяє їм передавати сигнали на більші відстані без необхідності в регенерації. Вони також менше схильні до електромагнітних перешкод і мають більший термін служби. Обслуговування волоконно-оптичних кабелів відрізняється від того, що потрібно для мідних кабелів. Ремонт або реконфігурація системи зазвичай вимагає зварювання волокон або установки нових роз'ємів, що потребує більше часу та кваліфікації персоналу.

Волоконні кабелі мають високу міцність та гнучкість, що дозволяє їм бути зберіганими у вигляді намотки на бобіні з малим радіусом кривизни. Ця гнучкість полегшує прокладку по звивистій траєкторії. Однак при занадто малому радіусі вигину можуть виникнути додаткові втрати.

Захисна пластмасова оболонка підвищує міцність волоконно-оптичного кабелю, а сталеві троси або кевлар можуть використовуватися для збільшення його стійкості до розриву. Оптичні кабелі виявляються міцними та надійними в експлуатації. Технології виробництва волокон постійно вдосконалюються, що дозволяє отримувати волокна з низьким коефіцієнтом затухання. Це робить можливим створення дуже довгих ліній зв'язку без необхідності часткої регенерації сигналів.

Порівнюючи стандартний телефонний кабель (рис. 1.6) з мідними провідниками та волоконно-оптичний кабель (рис. 1.7), можна побачити значні переваги останнього.

Телефонний кабель, містить 900 пар мідних провідників і має діаметр 70 мм. По кожній парі передається 30 каналів ТЧ зі швидкістю Е1, тому загальна інформаційна ємність цього кабелю становить 21600 каналів ТЧ.

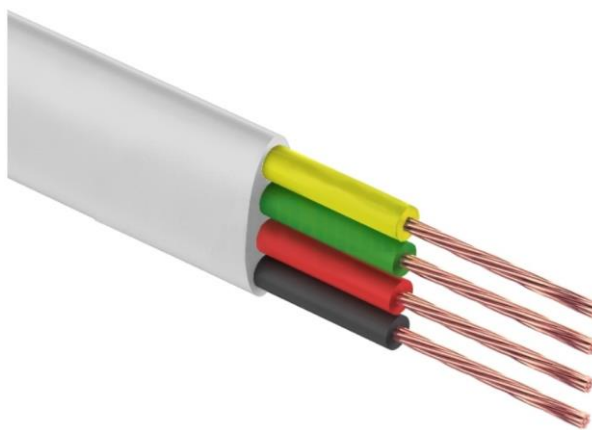


Рисунок 1.6 – Спрощена ілюстрація телефонного кабелю

Волоконно-оптичний телефонний кабель має діаметр 12,7 мм і містить 144 волокна, кожне з яких використовується на швидкості Е3 (480 каналів ТЧ). Інформаційна ємність цього кабелю становить 69120 каналів ТЧ.



Рисунок 1.7 – Спрощена ілюстрація волоконно-оптичного телефонного кабелю

Волоконний кабель має майже в 2,56 рази більшу ємність порівняно з мідним кабелем і в 30 разів меншу площу поперечного перерізу. Ще більш вигідні порівняння можуть бути зроблені, якщо волоконно-оптична система працює на більш високій швидкості (скажімо, 622 Мбіт/с або 2,5 Гбіт/с).

Оптичні, кварцеві або пластмасові волокна є діелектриками. Тому електричні струми в них не протікають, ні внаслідок переданого сигналу, ні через зовнішнє електромагнітне випромінювання, що пронизує волокно. Крім того, оптичні хвилі поширюються лише всередині волокна (не випромінюються назовні), а значить, не можуть інтерферувати з сигналами, що передаються по інших волокнах. Відповідно, світло не може потрапити з одного волокна в інше.

Можна зробити висновок, що волокна добре захищені від впливів (не мають зв'язку з іншими каналами передачі як електричними, так і оптичними).

З вищезазначених причин волокна мають низьку чутливість до радіочастотних (RFI - radio-frequency interference) та електромагнітних перешкод (EMI - electromagnetic interference).

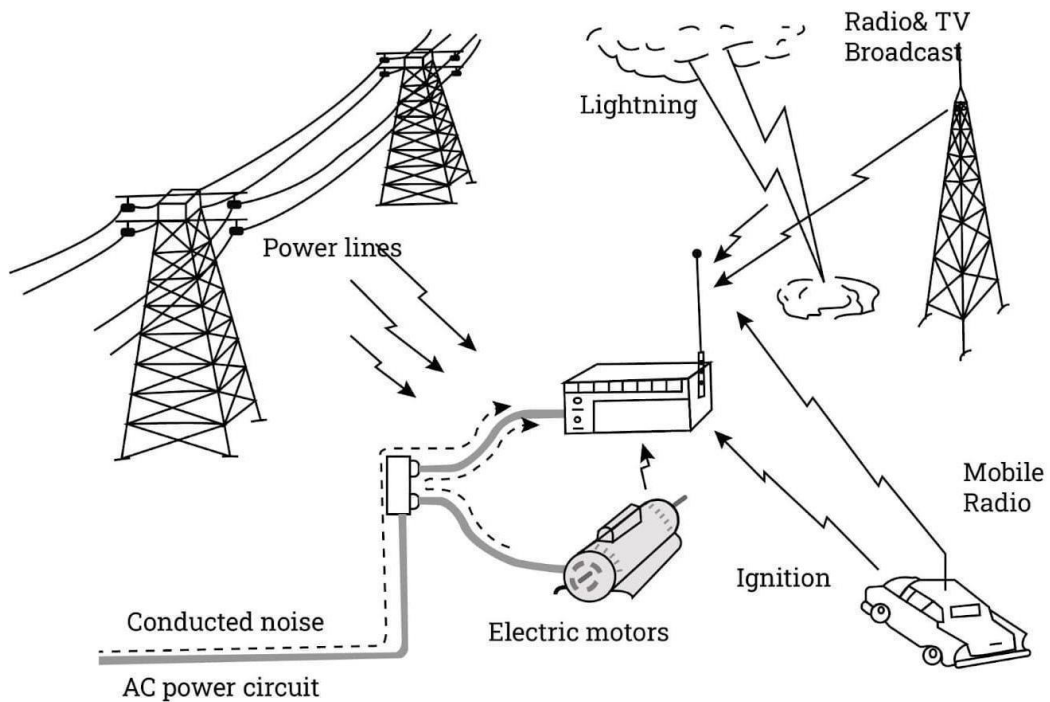


Рисунок 1.8 – Можливі джерела RFI

Термін RFI відноситься до перешкод, викликаних передавальними радіо- та телевізійними станціями, радаром та іншими джерелами сигналів в електронному обладнанні як зображено на рис. 1.8. Термін EMI відповідає перешкодам, викликаним природними (блискавка) або технічними (електрозварювання) явищами. Якщо від них немає захисту, то ці перешкоди можуть збільшувати рівень шуму системи вище допустимої межі. Волокно не піддається впливу зовнішніх електромагнітних впливів. Властивість волокна не взаємодіяти з навколишнім середовищем дозволяє щільно пакувати волокна в кабелі.

Оскільки волокна є діелектриками, вони не сприймають або поширюють електромагнітні імпульси (EMP), які можуть виникати внаслідок ядерних вибухів або інших подій, що створюють високі напруги в металевих лініях

передачі. Такі імпульси можуть призвести до перенапруження та вивести з ладу електронне обладнання на проміжних та кінцевих станціях зв'язку. Діелектрична природа волокон має інші практичні наслідки. Наприклад, коли високовольтна лінія електропередачі проходить близько (паралельно) з лінією зв'язку, може виникати висока наведена напруга на металевих елементах останньої. Це може призвести до короткого замикання при перетині трас таких ліній, що може спричинити значні пошкодження обладнання зв'язку. Проте волоконно-оптичні кабелі не піддаються цим проблемам. Волоконно-оптичні кабелі також усувають потребу в проводі заземлення, що з'єднує передавальний та приймальний пристрої. Це зменшує громіздкість конструкцій станційного заземлення. Крім того, волокна можуть бути відновлені під час роботи системи без ризику короткого замикання в електронних блоках, що неможливо у випадку металевого кабелю.

Волоконні кабелі мають підвищену безпеку та секретність, оскільки не випромінюють енергію. Вони можуть бути фізично зруйновані для вилучення сигналу, проте це призведе до зниження потужності прийому, що може бути виявлене приймальним пристроєм як несанкціонований доступ. Багатоволоконні кабелі також дозволяють об'єднувати волокна групами, що спрощує структуру та підтримку міської телефонної мережі. Це робить оптичну систему більш прозорою для користувачів і забезпечує сумісність з існуючими елементами передачі. Волоконні кабелі є ефективним і безпечним рішенням для передачі сигналів у зв'язку, що дозволяє уникнути багатьох проблем, пов'язаних з металевими лініями передачі та забезпечити стабільну та безперебійну роботу мережі зв'язку.

Корозія, спричинена водою або хімічними сполуками, менш серйозна для скляних волокон, ніж для мідних провідників. Однак важливо зазначити, що вода не повинна проникати в скло. Для застосувань у вологому середовищі волокна герметизуються всередині кабелів, що мають спеціальні конструкції для захисту від вологи та корозії. Скляні волокна можуть витримувати надзвичайно високі температури без погіршення їх параметрів. Температури, що досягають 800°C, є

безпечними для скляних волокон, що робить їх відмінними для застосувань у вимогливих умовах.

Проте інші компоненти волоконної системи, такі як пластмасова оболонка кабелю, можуть бути чутливішими до високих температур. Наприклад, пластмаса може плавитися або деформуватися при високих температурах, що може призвести до радіаційних втрат та пошкодження волокна.

Волоконні кабелі, які працюють у діапазоні температур від -25 до $+65^{\circ}\text{C}$, зазвичай мають помірні ціни і можуть успішно функціонувати в різних кліматичних умовах. Однак великі зміни температури можуть призвести до розширення та стискання всередині кабелю, що порушує співвісність волокон у з'єднувачі та збільшує втрати сигналу. У довгих лініях волоконні кабелі зазвичай з'єднуються за допомогою великої кількості з'єднувачів. Зазвичай кабелі мають будівельну довжину близько 1 км, але також існують багатоволоконні кабелі з будівельною довжиною кілька кілометрів.

Залишаючись об'єктивними, важливо відзначити один із недоліків волоконно-оптичних трактів, а саме - оптичні з'єднувачі. Вартість і установка оптичних з'єднувачів можуть бути високими через потребу в точності та складнощі їх виготовлення. Оптичні з'єднувачі повинні мати дуже низькі втрати сигналу, що може підвищувати їх вартість. Також важливо мати на увазі, що деякі дешевші пластикові з'єднувачі можуть мати вищі втрати сигналу, що обмежує їхню ефективність у деяких застосуваннях.

1.2 Пропускна здатність лінійного тракту з TDM, WDM

Мережевий аналіз має вирішальне значення у проектуванні та оптимізації транспортних інформаційних мереж. Використовуючи аналітичний підхід, можна визначити ефективність різних мережних рішень та вдосконалити наявні транспортні оптичні системи. Сучасні інфокомунікаційні мережі, зазвичай, ґрунтуються на складних багатоканальних оптичних трактах, які представляють собою вже достатньо складні системи. Тому необхідно використовувати

інтеграційний підхід, який починається з аналізу критичних елементів мережної структури та подальшого узагальнення їх властивостей.

Оптичні тракти мають безліч параметрів, які важливо враховувати при аналізі. Серед них можна виділити дисперсійні ефекти, які виникають через розповсюдження різних компонентів світла з різною швидкістю, що може спричиняти розмиття сигналу та затримки в часі. Нелінійні явища є ще одним важливим аспектом, оскільки вони можуть призводити до спотворень сигналу через нелінійну залежність інтенсивності світла від його власних властивостей. Шуми та перешкоди також відіграють важливу роль, оскільки вони можуть впливати на якість передачі даних та спричиняти помилки у прийомі сигналу.

Ефективний мережевий аналіз також повинен враховувати топологічні властивості мережі. Кожен вид топології (рис. 1.9) визначає, як взаємодіють між собою вузли та з'єднання в мережі, що впливає на її продуктивність та масштабованість. Такий комплексний підхід дозволяє краще розуміти та оптимізувати транспортні інформаційні системи, забезпечуючи їхню відповідність потребам сучасного світу.

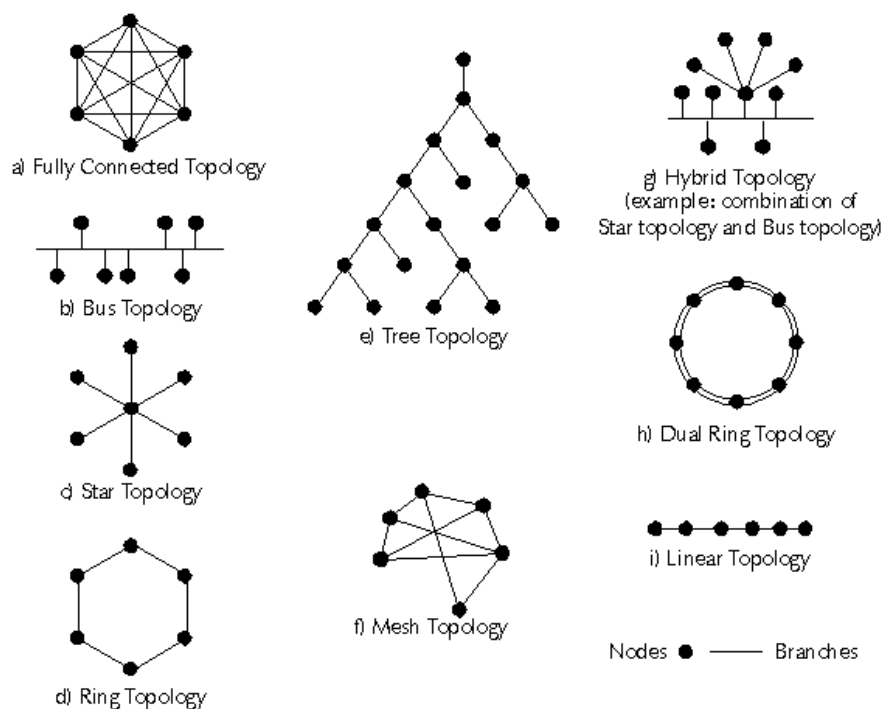


Рисунок 1.9 – Основні види топології мереж

Мережевий тракт є ключовим елементом будь-якої інформаційної мережі, і від його характеристик в значній мірі залежать ефективність та надійність всієї системи. Пропускна здатність мережних трактів є основним технічним показником, який визначає максимальний обсяг даних, які можуть бути передані через мережу за одиницю часу. З огляду на стрімке зростання вимог до обсягів передаваних даних, сучасні магістральні мережі відмовляються від використання менш ефективних технологій, таких як радіорелейні лінії, мідні симетричні та коаксіальні кабелі, і все більше спираються на оптичні тракти.

Однак, разом зі зростанням обсягів передаваної інформації збільшуються і вимоги до надійності передачі даних. Тому аналіз пропускної спроможності мережних трактів стає важливою технічною задачею, оскільки від його результатів залежить якість інформаційного обміну в мережі. Особливу увагу слід звернути на дисперсійні властивості оптичних волокон, які можуть стати перешкодою для передачі високошвидкісних сигналів. Для подолання цих проблем розробляються методи компенсації та боротьби з дисперсією, а також застосовуються спеціальні технології, спрямовані на підвищення ефективності передачі даних.

Крім того, при використанні методів спектрального ущільнення необхідно враховувати нелінійні ефекти, що можуть виникати у оптичних волокнах.

Це може вплинути на якість передачі сигналів у мережі з використанням DWDM технологій.

Для ефективного розрахунку та планування мережі важливо використовувати методики аналізу завантаженості та топології мережі. Ці методики дозволяють не лише визначити рівень перешкод у мережі, але й оптимізувати її структуру з урахуванням специфіки передачі даних та потреб користувачів.

В цілому, інтеграція цих аспектів в аналіз мережевого тракту дозволяє забезпечити максимальну ефективність та надійність інформаційної мережі, що є важливим для сучасних вимог до телекомунікаційних систем.

Застосування тимчасового ущільнення, відомого як Time Division Multiplexing (TDM) яке зображення на рис. 1.10, у цифрових системах передачі дозволило значно підвищити пропускну спроможність та зайняти провідне положення в телекомунікаційному секторі. Цей метод передачі даних полягає у використанні одного каналу з розподілом часу між різними сигналами. Кожен сигнал відбувається в певний час, що дозволяє об'єднувати різні дані в один сигнал для передачі через канал.

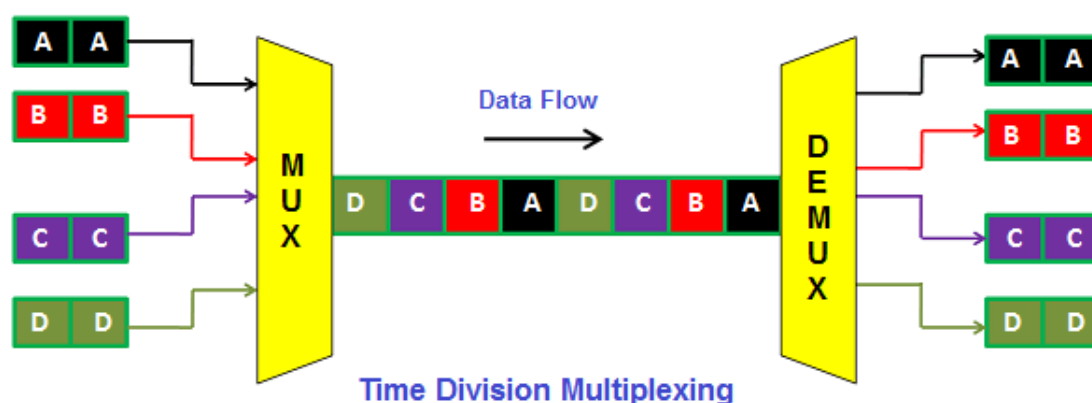


Рисунок 1.10 – Спрощена схема TDM

Проте, однією з ключових проблем застосування цього принципу у інфокомунікаційних оптичних мережах є дисперсія оптичних волокон. Зменшення тривалості символу може призвести до дисперсійних ефектів, які вимагають компенсації як матеріальною, так і поляризаційно-модовою. Зокрема, компенсація поляризаційно-модової дисперсії може значно підвищити пропускну здатність тракту.

При розгляді швидкостей передачі інформації необхідно враховувати і якісні показники оптичного каналу, оскільки формування спектра оптичного сигналу впливає на тривалість інформаційного імпульсу. Таким чином, оптимізація та підтримка якості передачі інформації вимагає ретельного вивчення та урахування різних аспектів технологій тимчасового ущільнення, включаючи й метод TDM.

Спектральне ущільнення WDM, зображене на рис. 1.11, є ключовою технологією для створення високопродуктивних оптичних мереж. Ця технологія не лише дозволяє підвищити пропускну здатність, але й відкриває можливості

для гнучкого конфігурування мережі та надає різноманітні властивості оптичної мережевої структури.

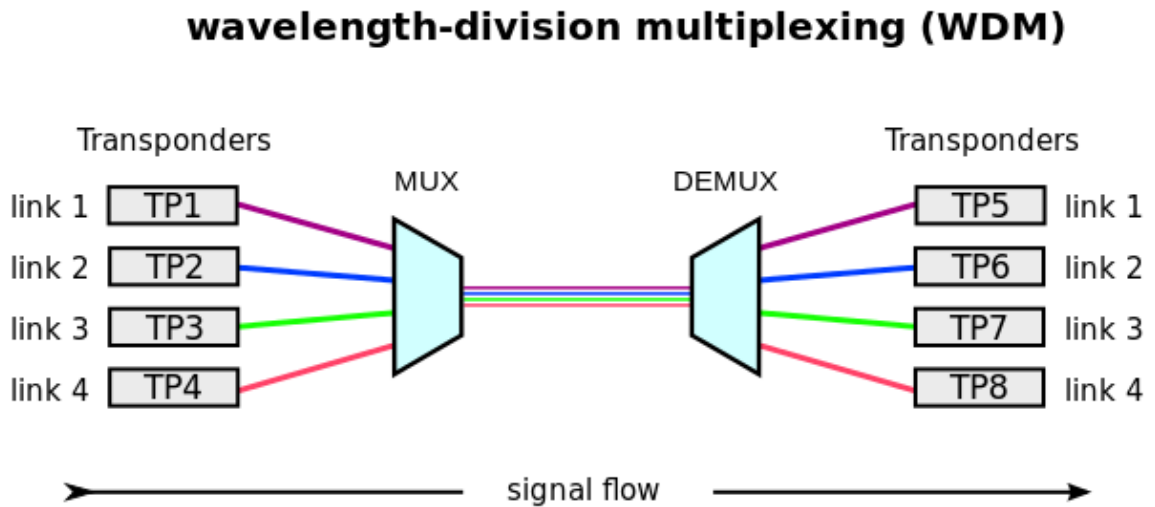


Рисунок 1.11 – Спрощена схема WDM

Інженери фірм, що розробляють та експлуатують оптичні мережі, зазвичай оптимізують свою роботу, фокусуючись переважно на кількості каналів у волокні. Однак стандартне обладнання зазвичай має обмежені можливості регулювання потужності в каналі, що може стати перешкодою при роботі з екстремально високим ущільненням каналів у мережі H-DWDM.

Для вирішення цієї проблеми було вигідно застосувати математичний апарат для аналізу якості передачі в оптичному каналі. Один зі способів вирішення полягає у визначенні співвідношення сигнал/шум після проходження всіх компонентів системи. Однак, складність нелінійних фізичних ефектів у волокнах може ускладнити точне оцінювання негативних міжканальних впливів. Але завдяки запропонованій моделі, яка була алгоритмізована та перетворена на програмне забезпечення, тепер можливо аналізувати та оптимізувати реальні системи передачі із DWDM. Це дозволяє вибирати найкраще обладнання з оптимальними характеристиками передачі в оптичному каналі та визначати оптимальну кількість компонентів для такого обладнання.

Хоча проведення подібних досліджень на реальних прототипах систем є економічно недоцільним, аналіз технології спектрального ущільнення дозволяє визначити можливу кількість каналів і потужності при введенні у волокно.

Підбір параметрів волокна важливий етап роботи, тому враховуються різні типи волокон з рекомендаціями їх застосування.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

Загальна характеристика оптичних транспортних мереж включає в себе використання волоконно-оптичних систем передачі, які є основою сучасних телекомунікаційних інфраструктур. Ці системи передачі дозволяють передавати дані шляхом світлових сигналів через волоконно-оптичні кабелі, забезпечуючи велику пропускну здатність та високу якість зв'язку. Додатково, пропускну здатність лінійного тракту з TDM (Time Division Multiplexing) та WDM (Wavelength Division Multiplexing) використовується для ефективного використання пропускну здатності оптичних мереж, дозволяючи передавати одночасно кілька сигналів через один канал і підвищуючи загальну ефективність мережі.

2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ОТМ

2.1 Концепція 6G в ОТМ

У міру того як починають формуватися мережі наступного покоління, стає все більш очевидною важливість оптичних транспортних мереж (ОТМ) для задоволення вимог до продуктивності, які висувають майбутні мережі. Ці майбутні мережі характеризуються орієнтацією на передачу великих обсягів даних та передбачають повсюдну інтеграцію і широкомасштабне використання штучного інтелекту. У цьому контексті ефективне та своєчасне транспортування даних від виробника до споживача набуває вирішального значення.

Оптичні транспортні мережі є основою для забезпечення високошвидкісного та надійного зв'язку, що необхідно для підтримки сучасних вимог до пропускної здатності та швидкості передачі даних. Вони забезпечують необхідну інфраструктуру для обробки зростаючих обсягів трафіку, викликаного зростанням кількості підключених пристроїв та впровадженням нових технологій. Штучний інтелект, який відіграє ключову роль у розвитку майбутніх мереж, потребує швидкого та безперебійного доступу до великих обсягів даних для обробки і аналізу. Оптичні транспортні мережі здатні забезпечити необхідну продуктивність і низькі затримки, що є критично важливими для роботи систем штучного інтелекту в реальному часі. Крім того, ОТМ дозволяють значно знизити операційні витрати та підвищити ефективність мережі за рахунок автоматизації та оптимізації процесів управління трафіком. Це забезпечує більш гнучке і адаптивне управління мережею, що є необхідним для адаптації до змінних умов і нових вимог, які постійно виникають у зв'язку з розвитком технологій. Таким чином, роль оптичних транспортних мереж у формуванні і підтримці мереж наступного покоління є надзвичайно важливою. Вони не тільки сприяють задоволенню зростаючих вимог до продуктивності, але й забезпечують основу для подальшого розвитку та інтеграції нових технологій, таких як штучний інтелект, що робить їх ключовим елементом у майбутньому розвитку інфраструктури зв'язку.

Досягнення в галузі мережевих технологій 5G привернули увагу промисловості, наукових кіл та організацій зі стандартизації до наступного покоління мереж – 6G. Мережі 6G обіцяють значно підвищити швидкість передачі даних, забезпечити повсюдний зв'язок і задовольнити жорсткіші вимоги до продуктивності порівняно з 5G та попередніми поколіннями.

Однією з визначних характеристик мереж 6G стане набагато глибша інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН). Ці технології відіграватимуть ключову роль у забезпеченні ефективного управління мережею, дозволяючи автоматизувати та оптимізувати процеси, пов'язані з обробкою трафіку, моніторингом мережі та адаптацією до змінних умов. Щоб повною мірою розуміти вимоги до мереж 6G, необхідно враховувати різні фактори. Наприклад, зміна поведінки користувачів, яка може включати збільшення споживання даних і вимогу до безперебійного зв'язку, впливатиме на проектування та функціонування майбутніх мереж. Крім того, впровадження нових і вдосконалених варіантів використання, таких як розширена реальність (AR), віртуальна реальність (VR), автономні транспортні засоби та інтернет речей (IoT), вимагатиме високої пропускної здатності, низької затримки та високої надійності.

Розвиток мереж 6G також буде стимульований необхідністю підтримувати більш складні та ресурсомісткі додатки, що потребують значних обчислювальних потужностей і миттєвого доступу до даних. Це означає, що інфраструктура мереж 6G повинна бути не тільки високопродуктивною, але й адаптивною, щоб швидко реагувати на мінливі потреби користувачів і технологій.

Очікується, що мережі 6G розширять межі і перевірять можливості наших мереж. Збільшення кількості користувачів, еволюція сценаріїв використання і дедалі жорсткіші вимоги до продуктивності свідчать про те, що мережі 5G не зможуть задовольнити майбутній попит. Крім того, через свою орієнтованість на передачу даних, обсяг даних, що генеруються, транспортуються і споживаються, буде безпрецедентним. Як уже згадувалося, AoI є критично важливим

показником для мереж 6G і наступних поколінь, що покладаються на інтелект і автоматизацію. У зв'язку з цим необхідно враховувати фактори, що впливають на цей показник, в тому числі затримку в зондуванні навколишнього середовища, обробці інформації, генерації інформації, передачі інформації та споживанні інформації. Більшість згаданих факторів, що впливають на метрику AoI, стосуються обчислювальних ресурсів вузла і ефективності алгоритмів; однак, якщо розглядати затримку передачі інформації, то умови і ефективність транспортної мережі мають вирішальне значення для мінімізації цієї затримки.

Теперішній стан наших магістральних транспортних мереж докорінно змінили такі технології, як оптичні транспортні мережі (OTN) і мультиплексування з ущільненням по довжині хвилі (DWDM). Завдяки цим інноваціям значно збільшилася пропускна здатність і ефективність передачі даних, що є критично важливим для задоволення потреб сучасних і майбутніх мереж. Подальший розвиток OTN і DWDM відіграватиме ключову роль у майбутніх поколіннях мереж. Вони забезпечать необхідну інфраструктуру для передачі великих обсягів даних, яка буде здатна обслуговувати всі регіони мережі. Ці технології не тільки покращують фізичні можливості мереж, але й створюють умови для більш гнучкого та адаптивного управління трафіком.

Таким чином, оптичні транспортні мережі і технології, пов'язані з ними, є фундаментом для створення мереж наступного покоління. Їх розвиток і інтеграція забезпечують високу продуктивність, гнучкість і надійність, необхідні для підтримки зростаючих потреб у передачі даних і впровадження нових технологій, таких як штучний інтелект і Інтернет речей (IoT).

2.2 Технології OTM наступного покоління з 6G

З огляду на зростаючі вимоги до продуктивності, пов'язані з мережами 6G, роль OTN є критично важливою для реалізації мережевих систем наступного покоління. Оскільки складність мережі та обсяг даних, які вона генерує, зростають, оператори транспортних мереж повинні адаптувати і вдосконалювати свої мережі і технології, щоб відповідати все більш жорстким вимогам. З цією

метою в цьому розділі будуть розглянуті деякі з ключових особливостей і якостей OTN в мережах 6G і наступних поколінь, які в даний час не враховуються в мережах 5G, а також перераховані деякі з найважливіших технологій, які розглядаються для реалізації мереж 6G і наступних поколінь.

Основними якостями OTN наступного покоління в мережах 6G і вище є висока пропускна здатність магістральних і транзитних мереж, віддалений зв'язок на великі відстані і глибока інтеграція штучного інтелекту і машинного навчання. Оскільки мережі переходять від традиційно аналітичних моделей до мереж, заснованих на даних, значно збільшується обсяг мережевого трафіку даних, який необхідно швидко і ефективно транспортувати по всій мережі. Відповідно до конвенції OpenRAN, магістральна мережа - це зв'язок між центральним вузлом (CU) і опорною мережею (CN). На противагу цьому, мережа фронтального зв'язку - це зв'язок між розподіленим блоком (DU) і радіопристроєм (RU). Основним фактором, що сприяє необхідному збільшенню пропускної здатності магістральної мережі, є експоненціальне зростання темпів генерації і споживання мережевих даних. І навпаки, в магістральних мережах збільшення кількості веж стільникового зв'язку, щільності користувачів і поява малих стільників є мотивуючим фактором для збільшення пропускної здатності.

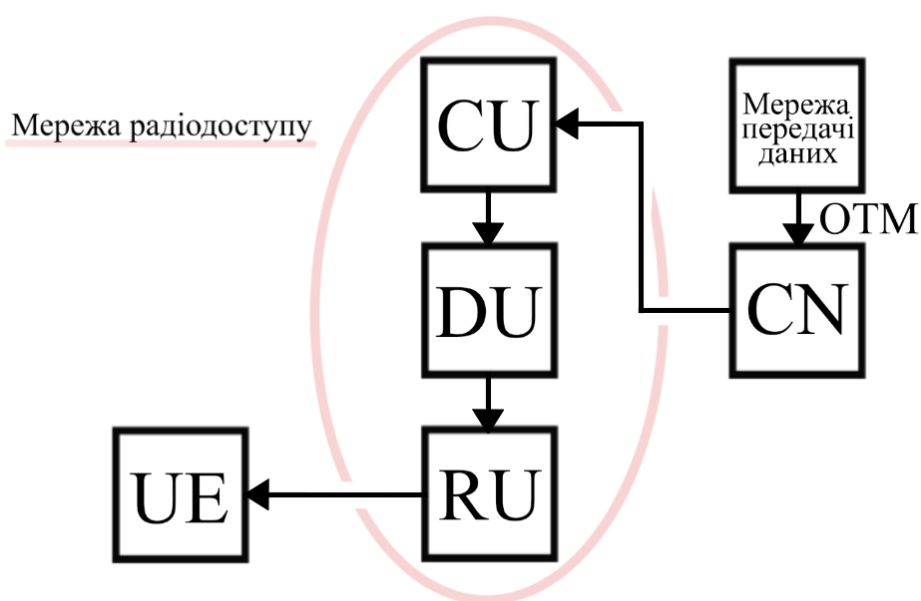


Рисунок 2.1 – Архітектура мереж OpenRAN

На рис. 2.1 показана сучасна мережа радіодоступу з використанням архітектури OpenRAN, конфігурації транспортної мережі і базової мережі, а також шлях приєднання користувачького обладнання (UE) в мережах 5G і наступних поколіннях.

Однією з головних переваг мереж 6G над мережами 5G є їх повсюдне покриття. Наразі передбачається, що 6G забезпечить мережевим зв'язком дуже віддалені райони, де прокладання оптоволоконних транзитних мереж іноді неможливе. Крім того, завдяки розвитку підводних і космічних мереж покриття 6G вийде далеко за будь-які мислимі межі попередніх поколінь мереж завдяки розвитку підводних і космічних мереж. З цією метою були запропоновані оптичні мережі вільного космосу (FSO) як альтернатива традиційним оптоволоконним ОТМ. Деякі переваги мереж FSO включають простоту встановлення, обслуговування і реконфігурації; підвищену мобільність; і порівнянну швидкість передачі. Щодо недоліків, то FSO є менш безпечною, оскільки вона схильна до перехоплення. Кінцевою якістю OTN наступного покоління є глибока інтеграція ШІ та машинного навчання на всіх рівнях мережі. Деякі початкові плани щодо застосування ШІ в 6G включають класифікацію трафіку, прогнозування попиту і проектування топології.

Розглядаючи майбутні можливі шляхи розвитку ОТМ можливо виділити декілька наступних нових технологій:

Пасивні оптичні мережі (PON). Вони широко застосовуються для надання послуг "домашнє оптоволокно". На відміну від активних оптичних мереж, PON використовують оптичні розгалужувачі для поділу одного вхідного сигналу на кілька вихідних. Ці розгалужувачі називаються пасивними, оскільки не потребують живлення. PON активно розглядаються як рішення для мереж 6G та інших, щоб задовольнити зростаючі вимоги до пропускної здатності магістральних мереж, спричинені збільшенням кількості користувачів та щільності стільникового зв'язку. У поєднанні з технологіями мультиплексування з поділом по довжині хвилі (WDM) або по часу (TDM), оптичні розгалужувачі PON можуть ефективно агрегувати попит від зростаючої кількості користувачів.

Крім того, завдяки відсутності необхідності в живленні, PON є більш енергоефективними порівняно з традиційними оптичними мережами.

Еластичні оптичні мережі (EON) були розглянуті як потенційне рішення для подолання обмежень традиційних систем на основі WDM. Гнучкість EON полягає в їх здатності динамічно регулювати основні мережеві ресурси, такі як відстань між каналами і формат модуляції, щоб відповідати актуальному попиту. Це дозволяє оптимізувати використання оптичного спектра та забезпечувати відповідність вимогам користувачів до якості обслуговування. Крім того, EON можуть адаптувати швидкість передачі даних, забезпечуючи масштабовану пропускну здатність в залежності від потреб користувачів.

Програмно-визначені мережі (SDN) відзначаються інноваційним підходом, який радикально перетворює звичайну модель управління мережами. Цей підхід передбачає розподіл функцій мережі на площини управління та передачі даних, зі зосередженим контролером, що керує усією мережевою інфраструктурою. Використання SDN у сфері оптичних мереж відкриває широкі можливості оптимізації та управління, формуючи нове поняття програмно-визначеної оптичної мережі (SDON). SDON дозволяє ефективно керувати великими об'ємами даних в швидкісних оптичних мережах зі складною структурою комутації. Існує безліч сфер застосування SDON, включаючи управління інфраструктурою, моніторинг продуктивності за допомогою когнітивних технологій та забезпечення якості обслуговування на всіх рівнях мережі. Крім того, SDON може бути використаний для віртуалізації доступу до мереж, що розширює можливості мережевої інфраструктури та сприяє покращенню її ефективності.

Мережі з еластичним оптичним трактом (SLICE) використовують ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів (OFDM) та можливість тонкого налаштування градації для створення еластичного оптичного тракту. За допомогою OFDM вони організовують кластери суб-несучих частот для відповіді на попит. Оскільки деталізація цих суб-несучих частот дрібніша, ніж у системах на основі WDM, мережі SLICE краще

пристосовані до обробки багатьох менших запитів. У таких мережах важливо враховувати обмеження спектральної безперервності та послідовності піднесучих, що забезпечують доступність піднесучих від джерела до призначення, а також спектральну суміжність обраних піднесучих.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

Звіт про сучасний розвиток оптичних транспортних мереж відображає важливість швидкості, ефективності та масштабованості в мережевих інфраструктурах. Концепція 6G укладається в цей контекст, враховуючи вимоги майбутнього та прагнучи до ще більшої швидкості передачі даних, низької затримки та високої надійності. Технології наступного покоління в оптичних транспортних мережах зорієнтовані на вдосконалення пропускну здатності, оптимізацію енергоефективності та реалізацію інноваційних функцій, які сприятимуть розвитку Інтернету речей, віртуальної реальності та інших передових технологій.

3. МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОТМ

3.1 Часове ущільнення TDM

У середині 90-х років минулого століття з'явилися системи із спектральним ущільненням WDM (Wavelength Division Multiplexing), які значно підвищили ефективність ВОСП (волоконно-оптичні системи передачі) за рахунок можливості незалежної передачі по одному волокну на різних довжинах хвиль. Фізико-технічні засади спектрального ущільнення оптичних каналів були розроблені у 1970-1980 рр. Використання хвильового мультиплексування у своєму початковому етапі об'єднувало дві основні несівні хвилі 1310 нм і 1550 (2-ге та 3-тє вікна прозорості, рознесені за довжиною хвилі на 240 нм) нм в одному оптичному волокні, що дозволяло подвоїти ємність системи.

Подальший розвиток області привів до розробки оптичних підсилювачів, мультиплексорів/демультиплексорів, а також інших компонентів, таких як OADM (Optical add drop Multiplexer), комутаторів і хвильових конверторів. Це відкрило можливості для побудови повністю оптичних транспортних мереж на основі систем WDM.

Перші магістральні ВОСП в Україні збудовані були в середині 90-х років. Нині, окрім магістральних DWDM Укртелекому, введено в експлуатацію першу лінію Київ-Дніпропетровськ компанією Welcom спільно з компанією Оптіма-Телеком, а також планується подальше розширення DWDM мережі. У зв'язку зі зростанням кількості користувачів широкосмугового доступу, важливо постійно модернізувати елементну базу ВОСП та покращувати параметри оптичних мереж зв'язку, включаючи оптичні мережі доступу.

Одним із важливих аспектів є пропускна здатність усіх ділянок мережі, включаючи абонентські. Збільшити пропускну здатність можна шляхом заміни обладнання в центральних оптичних вузлах (ОЦВ) на апаратуру більш високих ієрархій швидкості передачі, проте цей підхід може бути дорогим та вимагати значних витрат часу та коштів.

Технології, що застосовуються поверх DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), включають наступне:

Технологія SDH (Synchronous Digital Hierarchy) ґрунтується на двох основних принципах:

1) Вона використовує та підтримує лише стандартизовані швидкості вхідних сигналів. Для PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) ці швидкості становлять: 2,048 Мбіт/с ± 102.4 біт/с; 8,448 Мбіт/с ± 253.4 біт/с; 34,368 Мбіт/с ± 688 біт/с; 139,264 Мбіт/с ± 2089 біт/с, а для SDH - 155,52 Мбіт/с ± 3111 біт/с; 622,08 Мбіт/с; 2488,32 Мбіт/с; 9953,28 Мбіт/с; 39813,12 Мбіт/с.

Відхилення швидкості визначається згідно з рекомендацією ITU G.703. Ці значення відхилення залежать від типу генераторного обладнання для синхронізації. Наприклад, для сигналу зі швидкістю 155,52 Мбіт/с відхилення відповідає другому типу за рекомендаціями G.825 та G.813.

2) Вхідні сигнали з системи PDH об'єднуються у віртуальні контейнери та мультиплексуються у STM-1 (Synhronous Transport Module) - перший рівень ієрархії SDH (Синхронного транспортного модуля), який відповідає вхідному сигналу SDH зі швидкістю 155,52 Мбіт/с. Крім того, інші вхідні сигнали SDH мультиплексуються у синхронні транспортні модулі вищих рівнів, такі як 4STM-1=STM-4; 4STM-4=STM-16; 4STM-16=STM-64; 4STM-64=STM-256. Це відповідає вхідним сигналам SDH зі швидкістю 622,08 Мбіт/с; 2488,32 Мбіт/с; 9953,28 Мбіт/с та 39813,12 Мбіт/с відповідно.

* Технологія SDH описана рекомендаціями ITU, такими як G.691, G.693, G.707, G.774, G.780, G.781, G.783, G.784, G.803, G.805, G.813, G.825, G.826, G.829, G.841, G.842, G.957, M.1301, M.2101, а також частково доповненням G.Sup39.

* У технології SDH використовується принцип TDM (Time Division Multiplexing), де кожне вхідне повідомлення від різних користувачів має свій проміжок часу для передачі, що дозволяє здійснювати комутацію каналів.

* Натомість, технологія АТМ (Asynchronous Transfer Mode) використовує принцип швидкої комутації пакетів, де повідомлення від різних користувачів передаються у вигляді пакетів фіксованої тривалості (комірок).

Кожна комірка в технології АТМ має тривалість 53 байти, із яких 48 байтів призначені для даних користувача, а 5 байтів - для заголовка

* Технологія АТМ описана стандартами ІТУ, включаючи ІТУ 1356, 1.361, 1.363.x, 1.365.x, 1.326, 1.371.x, 1.381, 1.431, 1480, 1630, 1.731, 1.732, 1.74, 1.751, 1.761, 1.762, G.983.x, M.2201.

* Технологія Ethernet описана стандартами IEEE 802.x та рекомендаціями ІТУ, зокрема ІТУ G.985, G.7041, G.8010/Y.1306, G.8011/Y.1307, G.8012/Y.1308-1, G.8021/Y.1341. Ethernet є домінуючою технологією у локальних мережах і забезпечує передачу даних на короткі та середні відстані. Інтеграція Ethernet у мережеві елементи, такі як мультиплексори введення/виводу SDH та оптичні лінійні системи WDM, дозволяє економити витрати. Сучасні оптичні інтерфейси Ethernet в обладнанні SDH підтримують швидкості 100 Мбіт/с, 1 Гбіт та 10 Гбіт/с. Для об'єднання оптичних потоків Ethernet у стандартні транспортні модулі SDH використовують комбайнери. WDM є найкращою технологією для передачі 10 Гбіт/с потоків Ethernet.

Стандарти Ethernet, такі як 1000Base-SX, 1000Base-LX та 1000Base-ZX, використовують різні хвильові довжини та типи оптичних волокон для передачі даних на різні відстані:

1000Base-SX: Цей стандарт працює на довжині хвилі 850 нм та використовує багатомодові оптичні волокна. Він призначений для зв'язку на невеликі відстані.

1000Base-LX: Цей стандарт працює на довжині хвилі 1310 нм та використовує одномодові оптичні волокна. Він призначений для зв'язку на відстані до 10 км.

1000Base-ZX: Цей стандарт працює на довжині хвилі 1550 нм та використовує одномодові оптичні волокна. Він призначений для зв'язку з відривом до 80 км.

Розробники оптичного обладнання стараються максимально ефективно використовувати пропускну здатність вже наявних оптичних волокон, щоб економити кошти на прокладці нових кабелів. Використання технології DWDM може допомогти досягти цієї мети, але вона пов'язана з високими витратами на саме обладнання спектрального ущільнення, що є головним фактором обмеження для застосування DWDM на всіх трасах. Однак, при відповідному економічному обґрунтуванні та врахуванні високої вартості прокладки нових кабелів, системи DWDM можуть стати ефективною альтернативою для підвищення пропускну здатності мережі.

Для побудови мережі зв'язку необхідно мати набір ланок, кожна з яких відповідає окремому оптичному тракту і з'єднує певні пункти на географічній карті. При проектуванні кожної ланки важливо враховувати довжину тракту, швидкість інформаційних потоків та умови, такі як наявність підводів оптичного кабелю до приміщень та оптичних підсилювачів.

Швидкість передачі інформації повинна бути достатньою для задоволення поточних і майбутніх потреб мережі. Таким чином, оптичні тракти DWDM повинні забезпечувати можливість нарощування швидкості передачі в кожному оптичному каналі з ростом числа оптичних каналів. Збільшення швидкості передачі в кожному каналі може вимагати зміни оптичного обладнання, такого як оптичні випромінювачі та оптичні приймачі. Для збільшення числа каналів може бути необхідна заміна DWDM-мультиплексорів та DWDM-демультиплексорів. Також можуть виникнути проблеми з перекриттям спектрів у груповому оптичному сигналі та відсутністю необхідної частотної селективності в оптичних приймачах, що може вимагати заміни обладнання.

Отже, при розширенні мережі DWDM необхідно ретельно розглядати можливість зміни оптичного обладнання для забезпечення потрібних характеристик передачі.

3.2 Вплив поляризаційно-модової дисперсії на обмеження швидкості передавання і довжини регенераційної ділянки

Зростання інформаційних потоків у волоконно-оптичних системах передачі (ВОСП), впровадження устаткування SDH з інтерфейсами STM-16/64/256 (2,4 10 Гбіт/с і 40 Гбіт/с), роблять актуальним вивчення такого явища як поляризаційна модова дисперсія, що стає одним з головних обмежуючих факторів швидкості передачі

Ефект ПМД став критичним у міру досягнення високих швидкостей в оптичному каналі зв'язку. Крім цього, внаслідок накопичувального характеру поляризаційної модової дисперсії її негативний вплив посилюється зі зростанням довжини лінії.

Головна фізична причина появи ПМД – нециркулярність (анізотропія профілю) серцевини одномодового волокна. Електричне поле завжди може бути представлено у вигляді суперпозиції двох ортогональних векторів або станів поляризації, причому зробити це можна різними способами (наприклад, дві лінійні поляризації з ортогональними векторами поляризації або дві кругові поляризації із протилежними напрямками обертання). В ідеальному ізотропному волокні за будь-якого поділу обидва компоненти поширюються з однаковою швидкістю та внаслідок проходження такого середовища тривалість вихідного імпульсу залишається такою самою, як і на вході у волокно. У волокні з анізотропним профілем з'являються два різні ефективні показники заломлення для ОСП, що відповідають двом певним перпендикулярним лінійним поляризаціям. Це призводить до різних групових швидкостей поширення сигналів або мод з такими поляризаціями та появою затримки сигналів на приймальній стороні Δt , яку прийнято називати диференціальною груповою затримкою (ДГЗ). Стани поляризації, що задають найшвидший і повільне поширення сигналу, називаються швидким та повільним (основними) станами поляризації ПСП. Оскільки у традиційних ОСП фотоприймач не оснащується поляризатором – це нераціонально через втрату потужності, а також через

ускладнення та подорожчання системи зв'язку та приймає сигнал одночасно від обох ОСП, то диференціальна групова затримка призводить до розширення результуючого сигналу. Осі лінійної поляризації швидкого та повільного ПСП називаються "швидкою" та "повільною" осями анізотропного середовища.

У волоконній оптиці знайшли спеціалізоване застосування так звані волокна з сильно вираженим двозаломленням HiBi (Hi Birefringence), тобто волокна, що підтримують стан поляризації РМ (Polarization Maintaining) волокна. У таких волокнах ПСП значно відрізняються один від друга за швидкістю поширення і слабо пов'язані між собою. Слабкий зв'язок мод зменшує биття, викликані перекачуванням енергії з моди в моду. Критерієм зв'язку мод у межах окремого сегмента волокна може бути довжина биття якщо $h \gg L$ (h , L - відповідно довжина биття мод і довжина безперервного сегмента волокна), то зв'язок мод слабка, якщо $h < L$, то зв'язка мод сильна.

Якщо у волокно вводять випромінювання, представлене в обох ПСП, то імпульс розширюватиметься. Середньоквадратичну ширину імпульсу σ^2 на виході з волокна можна визначити за співвідношенням

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 + r(1 - r) \cdot \Delta\tau^2, \#(1.1)$$

Де σ_0^2 – середньоквадратична ширина імпульсу на вході сигналу у волокно. Тут r і $(1 - r)$ – частки потужності випромінювання в різних ПСП, а $\Delta\tau$ – затримка між імпульсами на виході з волокна. Максимальне розширення імпульсу виникає при $r = 1/2$. Тільки в цьому випадку випромінювання, що вводиться у волокно, поляризовано вздовж однієї осі ($r=0$, $r=1$), волокно підтримуватиме цю поляризацію на виході, і не відбуватиметься розширення імпульсу. У більшості додатків лінійно поляризоване світло вирівнюють з однією з осей ПСП волокна РМ, як правило, вводять світло лінійно поляризованим уздовж повільної осі.

У стандартних комерційних волокнах, що застосовуються у ВОСП, зв'язок між модами різних ПСП більше, ніж у РМ-волокнах. Контролювати напрямок поляризації на виході волокна практично не представляється можливим. Однак до сегменту стандартного волокна можна також використати формулу (1.1).

У загальному випадку пасивна частина ВОСП є складною системою, що складається з сегментів волокон, з'єднаних послідовно певних точках зварювання або "сухими" стиками. У кожній з таких точок відбувається неконтрольований та стрибкоподібний кутовий поворот осей ПСП_{1,2}, що веде до перерозподілу енергії між ПСП на початку кожного наступного сегменту волокна. У результаті протяжної лінії зв'язку відбувається багаторазовий перерозподіл енергії між модами швидкого та повільного ПСП. Це називається зв'язуванням мод. На відміну від РМ-волокон, стандартні волокна, що застосовуються у ВОСП, намагаються виготовляти із найменшою нециркулярністю. Однак досягти ідеального профілю волокна неможливо. Є статичні та динамічні фактори зростання анізотропії профілю волокна:

статичні фактори:

- недосконалість заводського процесу вилучення волокон;
- скручування волокон під час виготовлення волоконно-оптичного кабелю (ВОК);
- згини ВОК та, як наслідок, механічні деформації волокон прокладеного кабелю;

динамічні чинники:

- варіації температури навколишнього середовища, опади, зсуви для ВОК, прокладених у ґрунт;
- динамічні деформації волокон (вітрові навантаження, варіації температури навколишнього середовища, деформації внаслідок заledenіння кабелю) для підвісних ВОК.

Через наявність динамічних факторів навіть у межах окремого сегменту волокна неможливо визначити напрямок поляризації сигналу після проходження цього сегмента (при використанні РМ-волокна зберігається певний напрямок поляризації на виході з волокна; при зварюванні РМ-волокон необхідно вирівнювати один щодо одного ПСП-волокна). Тим паче неможливо визначити пропорцію, в якій розподілиться енергія між ПСП на наступній ділянці

волокна. Отже, диференціальна групова затримка $\Delta\tau$ не постійна величина, а змінюється з часом, причому випадково.

Усереднена в часі диференціальна групова затримка між двома ортогональними ОСП в лінії зв'язку описується співвідношенням:

$$\langle\Delta\tau\rangle = D_{PMD}\sqrt{L}, \#(1.2)$$

де $\Delta\tau$ - усереднена за часом диференціальна групова затримка, L - довжина волокна, D_{PMD} - PMD - параметр волокна, який вимірюється в $ps/\sqrt{km}$.

ПМД типового волокна зазвичай становить від 0.5 до 2 $ps/\sqrt{km}$, проте в ретельно спроектованих нових лініях зв'язку це значення може бути знижене приблизно до 0.1 $ps/\sqrt{km}$.

Водночас D_{PMD} визначається виразом

$$D_{PMD} = 0.5|\Delta\tau \sin(2\theta)|, \#(1.3)$$

де 2θ - кут між вектором Стокса, що представляє стан поляризації (SOP) імпульсу, що передається, і напрямком вхідного поляризаційного стану (ПСП) в просторі Стокса, де $\theta=0$ або $\theta=90^\circ$ відповідає ситуації, коли вхідний лінійно поляризований стан (ОСП) збігається з одним з вхідних ПСП, і $\theta=45^\circ$, коли обидва вхідних ПСП однакові. На практиці $\Delta\tau$ відповідає максимальній затримці, яка може виникнути між ПСП переданого імпульсу.

З метою оцінки помилок прийому бітової інформації, викликаних ПМД, використовують метод наближення, за допомогою якого отримують задовільний збіг між теоретичними та експериментальними результатами. Розглянемо вплив ПМД докладніше.

Нехай електричне поле світлової хвилі $E_t(t)$, що направляється у волокно, представлено як

$$E_t(t) = \sqrt{P_t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - kT)(c_1 e_1 + c_2 e_2), \#(1.4)$$

де, P_t – максимальне значення оптичної потужності на вході у волокно;
 $b_k=[0,1]$ – передаваний біт, T – бітовий інтервал; $g(t)$ – форма бітового імпульсу;
 $e_j = (e_{jx}x + e_{jy}y)$ при $j = 1,2$ – вектори, що представляють ПСП на вході в оптичне

волокно; c_1 і c_2 – складні коефіцієнти, що визначають ОСП передаваного поля, причому $(|c_1|^2 + |c_2|^2) = 1$

Ігноруючи хроматичну дисперсію, узгоджену з вихідними ПСП, поле $E(t)$ матиме вигляд:

$$E_t(t) = \sqrt{P_t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k [\cos\theta g(t - kT)x + \sin\theta g(t - kT - \Delta\tau)e^{-i}], \#(1.5)$$

Де p – максимальна потужність оптичного випромінювання, що приймається

В останньому рівнянні затримка $\tau - \tau/2$, пов'язана з груповою затримкою τ , була виключена, оскільки не відноситься до даного питання, крім того, прийнято, що смуга пропускання оптичного сигналу Δf_s , значно менше ніж ПСП смуга пропускання Δf_{PSP} , накладаючи тим самим обмеження на бітову швидкість і ширину лінії передаючого лазера. Так, якщо смугу пропускання оптичного сигналу представити, як

$$\Delta f_s = 2(v + K\Delta f_2), \#(1.6)$$

Де v – бітова швидкість, Δf_L - ширина лінії лазера і $K \approx 10$, ПСП смуга пропускання буде рівна $\Delta f_{PSP} \approx 0,8/\Delta\tau$. Це обмеження дійсно для всіх практичних значень бітової швидкості, якщо як передавач використовується стандартний DFB або DBR лазер. На стороні приймача імпульси $h(t)$ з виходу оптичного волокна поступають на фотодіод, причому для отримання сигналу, відповідного кожному бітовому інтервалу, ці імпульси фільтруються за допомогою смугового фільтру, реалізованого синхронізацією приймального пристрою з базовим генератором. Припустивши, що вибірка здійснюється в моменти

$$t_k = (kT + \Delta\tau \sin^2\theta), \#(1.7)$$

І взявши до уваги ортогональність ПСП, чисельний розв'язок по k має вигляд

$$j_k = R_p P G b_k [\cos^2\theta h(\Delta\tau \sin^2\theta) + \sin^2\theta h(\Delta\tau \sin^2\theta - \Delta\tau)] +$$

$$+R_pPG \sum_{h \neq k} b_h [\cos^2 \theta \hbar(t_k - hT) + \sin^2 \theta \hbar(t_k - kT - \Delta\tau)] + n(t_k), \#(1.8)$$

де R_p є чутливістю фотодіода, G – середнє значення посилення фотодіода, якщо використовується APD (якщо використовується PIN, $G=1$) і $n(t_k)$ – вибірка шуму

Функція $\hbar(t)$ представляє відфільтрований імпульс прямокутної форми. Потужності шуму σ_k^2 , яка залежить від сигналу, що приймається, і може бути легко розрахована без врахування шуму темнового струму

$$\sigma_k^2 = \sigma_T^2 + 2q\langle j_k \rangle RG^{2+\xi}, \#(1.9)$$

де, σ_T^2 - потужність теплового шуму приймача в смузі пропускання сигналу, ξ - типовий параметр фотодіода.

З останнього виразу видно, що основний вплив поляризаційної модової дисперсії був пов'язаний з генерацією міжсимвольних перешкод і може бути обчислений шляхом визначення наближеного значення суми тільки при $h = k-1$ і $h = k+1$. Це означає, що в першому наближенні враховуються тільки перешкоди в суміжних бітах, тому ймовірність помилки буде рівна.

$$P_e = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 P_e(i), \#(1.10)$$

де, $P_e(i)$ – імовірність помилки для центрального біта i -й сукупності з трьох суміжних біт, яка, визначається виразом

$$P_e(i) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{|\langle j_i \rangle - j_{th}|}{\sqrt{2\sigma_i^2}} \right), \#(1.11)$$

де j_{th} - оптимальне порогове значення і σ_i – стандартне відхилення вибірки для шуму, відповідне даній схемі.

Природно, значення j_{th} залежить від різних умов, таких, як форма імпульсу, характер шуму, форма фільтру і ін.

Дані рівняння дозволяють визначити імовірність помилки, якщо відомі такі параметри, як форма переданого імпульсу, ОСП світлової хвилі і т.д

Детальний аналіз динамічної поведінки $\Delta\tau$ показує, що ця випадкова найкраще підпадає під розподіл Максвелла, а середньоквадратичне відхилення $\langle\Delta r^2\rangle$ зв'язано із середнім значенням диференціальної затримки співвідношенням

$$\langle\Delta r^2\rangle = \frac{3\pi}{8}\langle\Delta r^2\rangle_{Max}, \#(1.12)$$

де Max - усереднене за функцією розподілу Максвелла (середнє значення).

Насправді-ж ОСП повільно змінюється з часом, і тому диференціальна групова затримка $\Delta\tau$ також довільно змінюється. Зазвичай припускається, що вона описується функцією розподілу Максвелла, згідно з якою ймовірність того, що дійсна затримка буде в 3 рази більшою за середню затримку, яка становить приблизно $4 \cdot 10^{-5}$

Якщо диференціальна групова затримка суттєво змінюється протягом дня, дійсна затримка перевищуватиме середню в 3 рази за 70 років. Тим не менше, деякі волокна мають значно більше швидких змін диференціальної групової затримки. У цьому випадку, наприклад, якщо вона суттєво змінюється кожен хвилину, реальна затримка перевищуватиме середню затримку втричі один раз на 17 днів.

Для диференціальної групової затримки в $0.3T$, де T - тривалість біта, запас потужності для приймача, обмеженого тепловим шумом, становить приблизно 0.5 дБ, а для приймача з шумом, залежним від сигналу, - 1 дБ. Це означає, що для отримання запасу, що дорівнює 1 дБ або менше, диференціальна затримка не має перевищувати $0.1T$, тобто

$$\langle\Delta\tau\rangle = D_{PMD}\sqrt{L} < 0.1T, \#(1.13)$$

Поляризаційною модовою дисперсією називають середньоквадратичне значення диференціальної групової затримки, яке визначається за формулою

$$PMD = \sqrt{\langle\Delta r^2\rangle}, \#(1.14)$$

Усереднення виконують, обчислюючи $\Delta\tau$ у різні вибіркові моменти часу $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ у межах часу Δt з наступним визначенням середньоквадратичного значення. Якщо окремі параметри ВОСП повільно змінюються в часі, масштаб

якого ΔT значно більший за Δt , то можна говорити про залежність ПМД від часу в цьому більшому масштабі.

Внесок у ПМД можуть давати різні компоненти ВОСП. Параметр ПЗВ (Поляризаційно залежні втрати) показує максимальну відмінність у згасанні сигналу для двох ортогональних станів ОСП. З розвитком технології щільного хвильового мультиплексування DWDM вимірювання параметра ПЗВ стає також важливо, гарантувати високі характеристики та своєчасно виявляти критичні ділянки та вузли ВОСП.

Незважаючи на те, що джерелом ПМД можуть бути й інші активні та пасивні компоненти ВОСП, волокно (протяжних сегментів ВОК) вносить вирішальний внесок у ПМД. Якщо лінія складається з N сегментів ВОК, дисперсія кожного з яких дорівнює $ПМД_i$, то результуюча поляризаційна модова дисперсія визначається за формулою:

$$ПМД^2 = ПМД_1^2 + ПМД_2^2 + \dots + ПМД_N^2, \#(1.15)$$

відповідно до закону суми незалежних випадкових величин.

Зміна Δt в часі – головна відмінна риса поляризаційної модової дисперсії від хроматичної та модової дисперсії. Це значною мірою ускладнює методи і пристрої компенсації ПМД. Таке устаткування сьогодні знаходилось в стадії лабораторного тестування. Відзначимо, що пристрої компенсації ПМД повинні враховувати дрейф станів поляризації і відповідно автоматично підстроюватися.

У лінії з великою кількістю сегментів існує випадковий енергетичний зв'язок мод. Для такої лінії $ПМД$ залежить від сумарної відстані за формулою:

$$PMD = D_{pmd} \sqrt{L}, \#(1.16)$$

де PMD – поляризаційна модова дисперсія, L – довжина оптичної лінії зв'язку, км, D_{pmd} – коефіцієнт ПМД волокна, пс/км^{1/2}. Максимальна швидкість B_{max} (біт/с) зв'язана з коефіцієнтом ПМД співвідношенням:

$$B_{max} = \frac{\varepsilon}{D_{pmd}} L^{-1/2}, \#(1.17)$$

де параметр ε (частка бітового інтервалу) вибирається залежно від того, який коефіцієнт помилок BER (без залучення методів корекції помилок) є прийнятним. Так, теоретичний аналіз з урахуванням тимчасових флуктуацій $\delta\tau$ дає $\varepsilon = 0.1$ при $BER = 10^{-12}$.

Значення коефіцієнта D_{pmd} для типових волокон знаходиться в межах від 0,05 до 1,5 пс/км^{1/2}. У сучасних ВОСП, що використовують волокна нових стандартів, значення коефіцієнта D_{pmd} знаходиться в межах від 0,05 до 0,1 пс/км^{1/2}.

На основі (1.17) було проаналізовано залежність максимальної швидкості передачі інформації та довжини регенераційної ділянки від дисперсії ПМД (при її індивідуальному впливі) Рис 3.1.

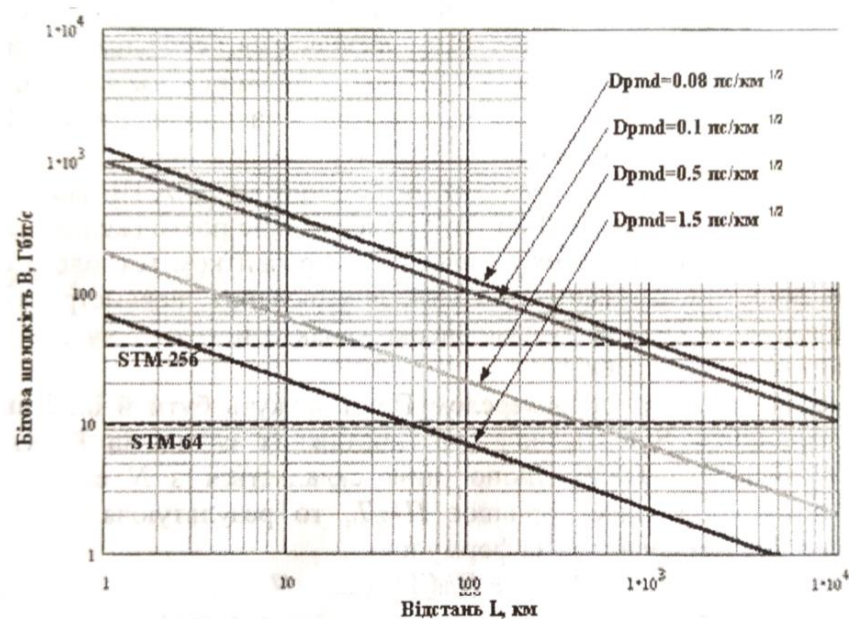


Рисунок 3.1 – Вплив ПМД на максимальну швидкість передачі (якщо $BER = 10^{-12}$)

Звичайно, в даному випадку виготовляються оптичні волокна з $D_{pmd} = 0,5$ пс/√км, але прокладення таких кабелів в ґрунт, а також вплив динамічних факторів, таких як коливання температури чи вологості ґрунту призводить до суттєвого збільшення коефіцієнта поляризаційно-модової дисперсії оптичного волокна, і як наслідок – до збільшення ПМД. Як видно з рисунка 3.1, для оптичного волокна

з коефіцієнтом ПМД більше $1 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ для швидкостей передавання більше 10 Гбіт/с довжина регенераційної ділянки менше 100 км.

Розробка техніки ослаблення впливу ПМД дає можливість збільшення довжини оптоволоконних зв'язків для швидкостей передачі від 10 до 40 Гбіт/с. На сьогоднішній день найпоширенішим є використання електронних пристроїв компенсації ПМД після декодера приймача (регенераторів оптичного сигналу), але вирішення оптичних проблем в електричній області є складним і вимагає додаткових оптоелектронних і електронно-оптичних перетворень. Механічні пристрої компенсують ПМД через фізичний тиск, проте цей метод не забезпечує необхідну точність та стабільність роботи, а також має високу ймовірність відмови. Перспективне використання адаптивної оптики у кожному каналі системи зі спектральним ущільнення каналів, але це робить компенсацію дорожчою. Також кожне з таких рішень має враховувати змінну у часі природу ПМД.

Одним із шляхів зменшення впливу ПМД першого порядку використання тільки одного вхідного основного стану поляризації, але випадкова зміна двозаломлення та зв'язок мод у довгих волокнах практично усувають весь ефект від цього методу.

Найбільш поширені методи зменшення ПМД реалізуються на приймальному кінці волоконної лінії зв'язку.

Протяжне оптичне волокно, що підтримує стан поляризації, часто використовується як компенсатор ДОС, хоча це волокно майже не використовується у волоконно-оптичних системах із спектральним ущільненням каналів.

Інтенсивні роботи ведуться над розробкою пристроїв компенсації ПМД, хоча жоден з розроблених пристроїв не набув широкого використання. Основні вимоги до компенсатора поляризаційно-модової дисперсії – це висока надійність функціонування, стабільність роботи, однакова ефективність компенсації ПМД на кожній із довжин хвилі системи зі спектральним ущільнення каналів, а також невисока вартість реалізації та експлуатації компенсатора.

3.3 Автоматизована система компенсації ПМД

Останніми роками на більшості магістральних транспортних оптичних мереж широко використовуються різновиди систем передачі з спектральним ущільнення каналів (WDM). При збільшенні швидкості передачі на одній несучій до 10 Гбіт/с і більш вирішальним, що обмежує фактором є модифікація поляризаційної дисперсії (ПМД). На сьогоднішній день ведуться інтенсивні роботи над створенням компенсаторів ПМД, хоча випадкова зміна ПМД робить процес компенсації достатньо складним. Компенсатор має динамічно реагувати на зміну ПМД. Кожна із запропонованих схем компенсації має переваги та недоліки. У цьому розділі розроблені методи компенсації ПМД. На рис. 3.2. показано структурну схему системи зі спектральним ущільненням каналів.

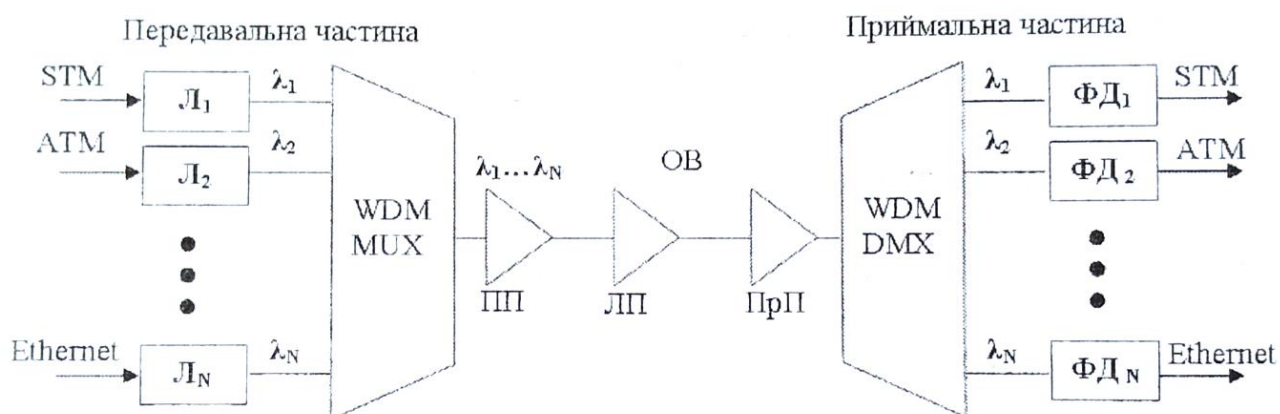


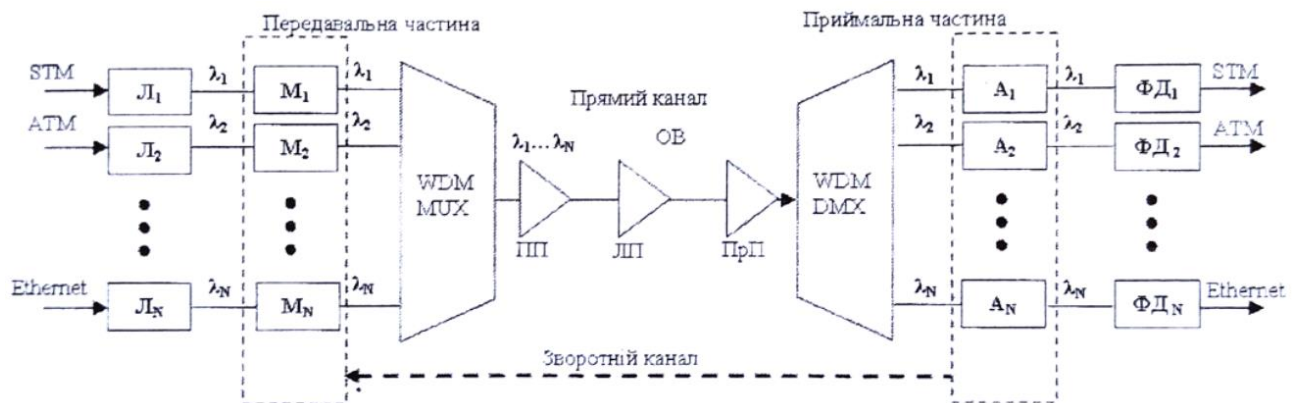
Рисунок 3.2 – Система передавання з спектральним ущільненням каналів

Л – одномодовий лазер; ПП – підсилювач потужності; ЛП – лінійний підсилювач; ПрП – попередній підсилювач потужності; ФД – фотодетектор; ОВ – оптичне волокно; WDM MUX – мультиплексор спектрального ущільнення; WDM DMX – демultipлексор спектрального ущільнення; STM, ATM, Ethernet – можливі види трафіка; ОВ – оптичне волокно;

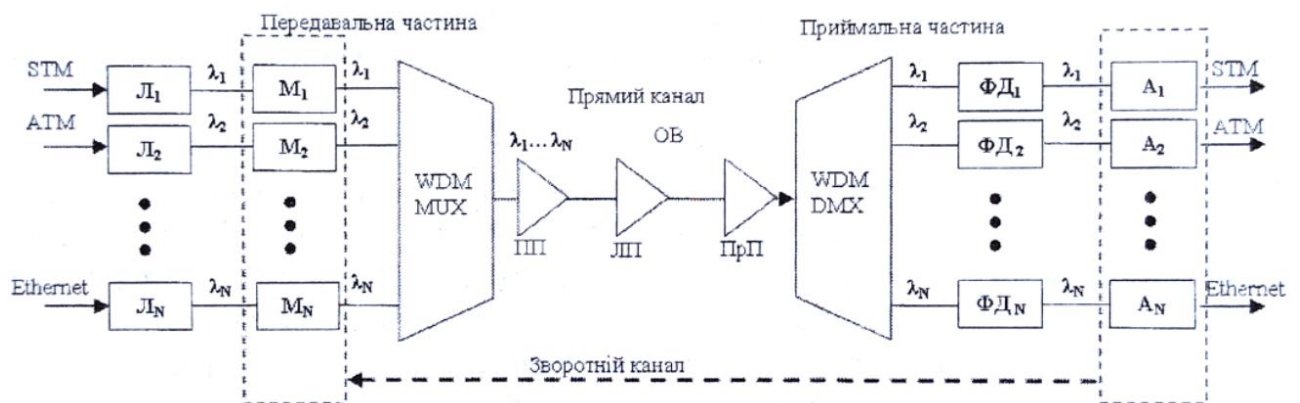
Оптичне волокно – сукупність двозаломлюючих сегментів сумарною довжиною L.

Введені припущення – ПП, ЛП, ПрП не є двозаломлюючими елементами і не міняють (не обертають) еліпс поляризації.

Схема волоконно-оптичної системи передавання інформації з спектральним ущільненням каналів і мінімізацією поляризаційної модової дисперсії з використанням зворотнього каналу показано на рис 3.3.



а) Аналізатор визначає ПМД перед детектуванням каналу



б) Аналізатор визначає ПМД по коефіцієнту помилок в системі

Рисунок 3.3 – Схема ВОСП з мінімізацією ПМД

Умовні позначення на схемі співпадають з рис 3.3, крім цього:

М – модулятор, пристрій, що використовується для зміни еліпса поляризації вхідного випромінювання;

А – аналізатор, пристрій, що використовується для визначення ДГЗ і для керування модулятором через зворотній канал;

Алгоритм роботи схеми компенсації ПМД:

Одномодовий лазер Л випромінює лінійно-поляризоване світло, причому може використовуватися як лазер з внутрішньою модуляцією інтенсивності, так

і передавальний оптичний модуль з зовнішнім модулятором. Лінійно-поляризоване випромінювання попадає на модулятор М.

Далі сигнали всіх спектральних каналів попадають на оптичний WDM мультиплексор, на виході якого підключено широкосмуговий підсилювач потужності, після якого груповий сигнал k спектральних каналів потрапляє до оптичного волокна. За рахунок впливу статичних та динамічних факторів, що викликають анізотропію серцевини оптичного волокна, ОВ стає сукупністю двозаломлюючих сегментів з випадковими затримками та азимутами, що і викликає виникнення дисперсії групової затримки (ДГЗ).

Схема представлена на рис. 3.3. є більш раціональна, оскільки вона дозволяє оперативніше реагувати на зміну ДГЗ. Модулятор використовує кристал, що має електрооптичні властивості. Під дією керуючого напруження кристал виявляє двозаломлення, причому різниця показника заломлення швидкої та повільною осею залежить від величини прикладеної напруги. Для схеми компенсації ПМД потрібно, щоб модулятор дозволяв реалізувати різницю часу поширення швидкої та повільної складових у межах від 0 до $2\pi \cdot \omega$, де ω - кутова частота оптичного сигналу. Для різної довжини оптичної хвилі несучою буде й різне значення прикладеної напруги для отримання однакової різниці ходу (Наприклад π).

Ідея компенсації описана наступним чином: Аналізатор на виході ОВ визначає миттєве значення ДГЗ. Якщо це значення ДГЗ перевищує максимально допустиме значення, зворотним каналом передається сигнал на зміну вхідному еліпсу поляризації. На модуляторі в покроковому режимі подаються фіксовані значення напруги, але в виході і далі визначається миттєве значення ДГЗ. Після проходження одного кола вимірів (зміна різниці ходу кристала від нуля до 2π) на модуляторі встановлюється таке значення напруги, при якому ДГОС на виході волокна набуває мінімального значення, і цей вхідний стан поляризації зберігається до того моменту, коли значення ДГЗ знову не перевищить допустиме значення. Такий алгоритм компенсації використовується для кожного спектрального каналу окремо, незалежно один від одного.

Сучасні аналізатори ДГЗ дозволяють визначати тимчасову різницю поширення двох ортогональних компонентів зі швидкістю близько 100 вимірів на секунду, а динаміка зміни ДГЗ для протяжних волоконно-оптичних ліній зв'язку набагато менше (у середньому одна зміна на півгодини).

Перевагою такої схеми компенсації є те, що вона не вимагає будь-яких- або додаткових пристроїв компенсації ПМД, а недоліком є використання зворотного каналу.

Наступним варто розглянути та проаналізувати нелінійні ефекти які обмежують пропускну здатність оптичних компонентів тракту.

При проектуванні волоконно-оптичних систем вважають, що розробник працює в діапазоні оптичних потужностей, що не викликає нелінійних спотворень у матеріалі, через який поширюється оптичне випромінювання.

Перевищення певної порогової потужності стає причиною нелінійних змін вищих порядків оптичного сигналу багатьох каналів тракту. Тобто перехресні перешкоди погіршують відношення/сигнал шуму каналів. Явище має складний системний характер та може призвести до зриву передачі інформації системою DWDM.

Отже, з принципу надійності передачі, слід дотримуватися дозволеного допорогового діапазону оптичних потужностей сигналів. Цього можна досягти, обмежуючи максимальну потужність, що вводиться в оптичний тракт шляхом вибору допустимої потужності випромінювача та загального числа оптичних частотних каналів

Розглянемо 3 основні нелінійні явища:

1) Стимульоване Брілюєнівське Розсіювання (SBS - Stimulated Brillouin Scattering) встановлює верхню межу на рівень оптичної потужності, який може бути переданий оптичним волокном. При перевищенні певного рівня оптичної потужності, що називається порогом SBS, в оптичному волокні (ОВ) виникає акустична хвиля, під впливом якої змінюється величина індексу рефракції n .

Зміни n викликають розсіювання світла, призводячи до додаткового генерування акустичних хвиль.

Для збудження РМБ спектральна щільність вихідного випромінювання має бути значно більше, ніж для раманівського розсіювання 10 мВт у смузі частот 10-50 МГц. Зрештою внаслідок цього ефекту виникає хвиля зі зміщеною частотою, що поширюється у зворотному напрямку до джерела світла, внаслідок чого корисна передана оптична потужність послаблюється. Тим самим обмежується гранично досяжна потужність, яка може бути передана передавачем у лінію. Наприклад, при довжині хвилі 1550 нм розсіяне світло зсувається праворуч приблизно на 11 ГГц. Це розсіювання (SBS) має найнижчу граничну потужність. Було показано, що поріг SBS може змінюватись в залежності від типу волокна і навіть залежно від конкретного волокна.

2) Раманіське розсіювання (SRS - Stimulated Raman Scattering) є значно меншою проблемою порівняно зі стимульованим Брілюєнівським розсіюванням (SBS). Реальні волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) допускають використання оптичного підсилювача (EDFA) з рівнем близько 25 дБп або кількох підсилювачів з меншим рівнем вихідний сигнал. SRS за своєю природою близький до SBS, але викликається іншими фізичними явищами.

SRS є частотно-залежним і проявляється більш виражено на коротких хвилях у порівнянні з довгохвильовими (тобто на більш високих частотах). Можна зауважити, що короткохвильові канали мають набагато меншу амплітуду, в порівнянні з довгохвильовими каналами, тобто спостерігається зміна амплітуд сигналів по кожному каналу. При цьому, більшому згасанню піддаються саме більш короткохвильові (високочастотні) канали. У системах WDM вплив цього типу розсіювання полягає у перерозподілі потужності з короткохвильові в довгохвильові канали. У цьому випадку це явище працює як підсилювач і довгохвильові канали посилюються за рахунок короткохвильових доти, доки різниця в довжинах хвиль лежить у смузі раманівської частоти посилення. Це явище може виникнути в кварцовому волокні, де посилення може стати результатом використання кроку між каналами 200 нм.

3) Чотирихвильове змішування (ЧХЗ) виникне, якщо ввести два сигнали з різними частотами, з досить великою інтенсивністю у спектрі розсіяного сигналу будуть компоненти з чотирма частотами (з урахуванням розсіювання Релея-Мандельштама), причому у разі накладання двох із частот одна на одну, що практично можливо, виникають фотони з частотами, які відрізняються від несучої $\nu_{c3} = \nu_n - 2\omega_c$. Частотний спектр розсіяного випромінювання розширюється, причому деякі з складових можуть посилюватися з допомогою придушення інших.

Найбільший паразитний вплив ЧХЗ має на ВОСПІ, в яких оптичний тракт побудований на оптичному волокні зі зміщеною нульовою дисперсією G.653 DSF практично не впливає при одномодовому стандартному волокні G.652 SMF. Досліди показали, що для волокон G.653 ці перешкоди практично неприйнятні (до 20 дБп), тоді як для G.652 вони практично відсутні.

Отже, під час розрахунків систем DWDM важливо розрахувати потужність оптичних передавачів та їх кількість з урахуванням бюджету оптичного тракту таким чином, щоб загальна оптична потужність не перевищувала жодного з порогів вищенаведених нелінійних явищ оптичних волокон.

Слід зазначити, що використання великої кількості оптичних підсилювачів не є розумним виходом із такої ситуації, оскільки шуми підсилювачів у тракті підсумовуються та зменшують ймовірність правильного прийому символу стає необхідною повна регенерація. Тому оптимізація кількості каналів найбільш прийнятна за умови незмінної, однакової потужності кожного із оптичних випромінювачів.

Отже, при великих довжинах регенераційних ділянок пропускна здатність оптичного тракту визначається допустимою кількістю оптичних каналів із заданими потужностями джерел випромінювання, як добуток кількості каналів на швидкість одного з каналів. При цьому не можна нехтувати дисперсією волокна.

- Джерела випромінювання, що використовуються на оптичних трактах зв'язку, повинні мати якомога менші шуми і відповідно значення відносної

інтенсивності шумів лазера – RIN. Слід врахувати той факт, що з розширенням смуги оптичного каналу шуми оптичного передавача зростають, а відношення сигнал/шум на вході оптичної лінії падає. Тому на високошвидкісних магістралях виправдано застосування більш дорогої, але якісної системи, джерело постійної інтенсивності (спрощення стабілізації частоти та схем управління накачуванням) + зовнішній модулятор (високошвидкісна електрооптична комірка). Що стосується фотодетектора, то перевагу слід віддавати пристроям з максимальною селективністю (але не менше ширини смуги оптичного каналу для запобігання падінню рівня корисної оптичної потужності та рівня сигнал/шум каналу) та меншими власними шумами.

Якщо розглядати лінійну швидкість передачі в оптичному каналі, то ефекти поляризаційної модової дисперсії на швидкостях більше 2,4 Гбіт/сек завдяки системі автоматичної компенсації гарантовано можна зменшити у 1,4-3 рази, що відповідно призведе до якісного прориву у збільшенні пропускної здібності на таких швидкостях.

Проаналізувавши фактори, що впливають на якість передачі інформації, можемо поділити їх на дві групи:

- шумоутворюючі фактори
- завадоутворюючі фактори.

Шумоутворюючі та завадоутворюючі фактори відносно подібні, якщо врахувати велику кількість оптичних каналів у волокні, оскільки перехресні завади стають подібними до псевдо випадкових шумів, особливо при високих швидкостях передачі та фазових варіацій в оптичних каналах.

Таким чином, для забезпечення номінальної пропускної спроможності слід задатися певним коефіцієнтом помилок – критерієм оцінки якості роботи каналу системи передавання.

Маючи необхідні дані, необхідно визначити конфігурацію обладнання тракту, тобто кількість регенераторів, оптичних підсилювачів, тип волокна на сполучних ділянках ВОСП.

Далі вибирається тип джерел випромінювання, а саме оптична платформа, на основі якої буде реалізовано кінцеві станції оптичної траси. При цьому слід врахувати за відповідними формулами:

- лінійну швидкість
- вибраний тип волокна
- тип підсилювачів на лінії
- обов'язково врахувати довжину лінії з урахуванням методики розрахунку параметрів згасання та дисперсії (у тому числі поляризаційно модової) оптичного волокна отримати рівень потужності на вході.

Маючи рівень потужності на вході лінії та конфігурацію активного обладнання траси (кількість підсилювачів, регенераторів) можна звернути увагу на можливість компенсації дисперсії за допомогою спеціальних волоконних пристроїв, проте не слід забувати про внесені ними додаткові шуми. Величину цих додаткових шумів регламентує виробник.

Наступним кроком є оцінка порогів потужності нелінійних явищ у системі передачі з обраною конфігурацією згідно із залежностями. Якщо лінійна оптична потужність на трасі перевищить допустимий поріг, необхідно оцінити негативний вплив відповідного оптичного явища в вигляді так званого "штрафу" (в дБп) відношення сигнал/шум на виході частини системи, в якій виникає спотворення.

Необхідно відзначити, що перевищення порогу для розсіювання SBS є неприпустимим за жодних умов, це веде до спотворень с/ш порядку 10 дБ на кожний частотний канал. Загальна потужність, що передається, обмежується цим фактором. Перевищення порога SBS свідчить про неминучість змін у конфігурації оптичного тракту (потужності активних компонентів їх кількості у складі активного обладнання, кількості оптичних частотних каналів).

Наприкінці розрахунку враховують шуми приймачів, отримане загальне значення рівня шумів у вигляді співвідношень перетворюють на значення першого наближення Q фактора і очікуваний коефіцієнт помилок, пов'язаний з

очікуваним рівнем шумів на виході оптичного каналу системи передачі. Якщо рівень коефіцієнта помилок перевищує допустимий, за допомогою даної методики відразу можна оцінити компонент ВОСПІ, який є критичним для даного варіанту конфігурації та вивести або замінити його шляхом рекомпозиції (з наступним можливим подорожчанням системи загалом, але покращить якість роботи). Причому якщо розрахунки здійснюються з метою модернізації на вже прокладених волокнах, то слід замінити найактивніше обладнання, звичайно, якщо необхідні енергетичні та дисперсійні показники забезпечуватимуться волокном.

У жодному разі не слід сподіватися, що система, яка погано показала себе ще при розрахунках, краще функціонуватиме при експлуатації, тому неточності у конфігурації необхідно усунути ще на стадії проектування, причому важливим елементом є перспектива розвитку проекрованої системи.

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

Підвищення пропускної здатності мережі є ключовим завданням для забезпечення ефективної передачі даних. Дослідження в сфері технологій передачі сигналів виокремлюють кілька напрямків у цьому контексті. Часове ущільнення (TDM) відіграє важливу роль у збільшенні пропускної здатності, дозволяючи ефективно об'єднувати різні сигнали в часові інтервали. Поляризаційно-модова дисперсія (ПМД) може стати фактором, що обмежує швидкість передавання сигналів та впливає на довжину регенераційних ділянок. Компенсація ПМД з використанням зворотного зв'язку є одним із методів покращення пропускної здатності, забезпечуючи оптимальну якість передачі сигналів. Такі дослідження розвивають нові технології та системи управління, спрямовані на забезпечення оптимальної пропускної здатності мереж телекомунікацій.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори можуть мати вплив на дослідника аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж наступні: підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; недостатнє освітлення робочої зони; недостатність природного освітлення; підвищений рівень шуму на робочому місці; відсутність чи нестача природнього світла; фізичні перевантаження (статичні); нервово - психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, емоційні навантаження).

Відповідно до визначених факторів формуємо рекомендації щодо безпечних умов праці під час дослідження аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж.

4.1. Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

Відповідно до встановлених гігієнічно-санітарних вимог (ДСН 3.3.6.042-99) роботодавець зобов'язаний забезпечити в приміщеннях з ПК допустимі параметри виробничого середовища.

Робоче місце обладнане ПК повинне бути розташовані на відстані не менше 1,5 м від стіни з вікнами, від інших стін – на відстані 1 м, від інших користувачів – на відстані не менше 1,5 м. Відносно вікон робоче місце доцільно розташувати таким чином, щоб природне світло падало на нього збоку, переважно зліва.

При розташуванні елементів робочого місця користувача ПК слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- розміщення документації і матеріалів, які використовуються користувачем.

Для забезпечення точного та швидкого зчитування інформації в зоні найкращого бачення площина екрана монітора повинна бути перпендикулярною нормальній лінії зору. При цьому повинна бути передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні.

Клавіатура повинна бути розташована так, щоб на ній було зручно працювати двома руками. Клавіатуру слід розміщати на поверхні столу на відстані 100...300 мм від краю. Кут нахилу клавіатури до столу повинен бути в межах від 5° до 15° , зап'ястя на долонях рук повинні розташовуватись горизонтально до площини столу.

Для запобігання світлових відблисків від екрана, клавіатури в напрямку очей користувача від освітлювачів загального призначення або сонячних променів необхідно застосовувати антивідблискові сітки, спеціальні фільтри,

захисні козирки, на вікнах регульовані жалюзі.

Принтер повинен бути розміщений у зручному для користувача положенні, так, що максимальна відстань від користувача до клавіш управління принтером не перевищувала довжину витягнутої руки користувача.

Конструкція робочого стола повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на робочій поверхні обладнання, що використовується, з врахуванням його кількості та конструктивних особливостей (розмір монітора, клавіатури, принтера, ПК та ін.) і документів, а також враховувати характер роботи, що виконується.

Згідно з вимог електробезпеки, під час проектування та експлуатації систем електропостачання для ПК необхідно дотримуватись вимог.

Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження ПК під час проектування виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – без підвищеної небезпеки, у зв'язку з відсутністю факторів підвищеної та особливої небезпеки.

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;
- 3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

Вимоги безпеки перед початком роботи:

1. Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі.
2. Перевірити загальний стан апаратури, справність проводки електромережі, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок та розеток, заземлення захисного екрана.

3. Відрегулювати освітленість робочого місця.
4. Відрегулювати і зафіксувати висоту стільця (крісла), зручний для користувача нахил його спинки.
5. Увімкнути апаратуру ПК вмикачами на корпусах в такій послідовності: стабілізатор (або блок безперервного живлення), ВДТ, системний блок, принтер (якщо передбачається друкування).
6. Відрегулювати яскравість світіння екрану ВДТ, контрастність.
7. При появі несправностей комп'ютерної техніки повідомити керівника.

4.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

За енерговитратами дослідження аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж згідно Гігієнічної класифікація праці відноситься до категорії I б. Нормовані значення параметрів мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.2.1

Таблиця 2.1 - Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Легка I б	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний		20-24	75	0,2

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату здійснюються такі заходи:

1. Температура в приміщенні в холодний період року підтримується за допомогою системи центрального опалення.

2. Використовується передбачається припливна вентиляційна система.
3. Здійснюється систематичне вологе прибирання.

4.2.2. Склад повітря робочої зони

Шкідливі речовини – речовини, які при контакті з організмом людини внаслідок порушення технологічного процесу викликають професійні захворювання, виробничі травми або відхилення стану здоров'я.

Шкідливі речовини у повітря робочої зони поступають у вигляді пару, газів та пилу. Вплив на організм людини залежить від хімічного складу, розміру (дисперсності), форми часток та їх кількості у одиниці об'єму. Найбільш небезпечний високодисперсний пил (розміром < 5 мкм), а також гострокрайовий пил. Високодисперсний пил найбільш глибоко проникає та затримується у легенях.

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Для забезпечення складу повітря робочої зони під час дослідження аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж слід використовувати механічну вентиляцію та забезпечити регулярне прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Природне освітлення повинно бути боковим, бажано одностороннім. Для уникнення засліплюючої дії сонячних променів найкраще, коли світлові отвори (вікна) зорієнтовані на північ чи північний схід. Коефіцієнт природної освітленості (КПО) повинен бути не нижче 1,5%.

У приміщенні, де проводиться дослідження аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж використовується штучне та природне освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 2.3:

Таблиця 2.3 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Штучне освітлення в приміщенні забезпечується світильниками типу РСР08×250 (однолампові) з лампами ДРЛ-250.

4.2.4 Виробничий шум

У приміщеннях з ПК рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку на робочих місцях повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99.

Рівні шуму на робочих місцях осіб, що працюють з ПК, визначені ДСанПіН 3.3.2-007-98. Допустимі значення звукового тиску під час дослідження аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж наведені в табл.2.4.

Таблиця 2.4 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.2.6 Виробничі випромінювання

В умовах, що розглядаються, діють електромагнітні випромінювання. Джерелами електромагнітних випромінювань являються ПК, дослідницькі установки та вимірювальні пристрої.

Рівні електромагнітного випромінювання та магнітних полів повинні відповідати вимогам. Рівні інфрачервоного випромінювання не повинні

перевищувати граничних. Рівні ультрафіолетового випромінювання не повинні перевищувати допустимих.

Гранично допустима напруженість електростатичного поля на робочих місцях не повинна перевищувати рівнів.

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення технологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

4.3. Пожежна безпека

Приміщення, де здійснюється дослідження аналізу методів та засобів підвищення пропускної здатності оптичних транспортних мереж відноситься до категорії пожежної безпеки В (табл.3.1).

Таблиця 3.1. Категорія приміщення за вибухопожежною і пожежною небезпекою

Категорія приміщення	Характеристика речовин і матеріалів, що знаходяться (обертаються) у приміщенні
В Пожежонебезпечна	Тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться, не відносяться до категорій А, Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легкозаймистих та горючих речовин на окремих ділянках площею не менше 10 м ² кожна перевищує 180 МДж/м ² .

Конструкція будівлі, де розміщено приміщення, відноситься до II-го ступеня вогнестійкості (будівля з несучою конструкцією з природних матеріалів або штучного каменю, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів).

Згідно з правилами улаштування електроустановок, приміщення відноситься до класу II-IIa пожежної небезпеки (приміщенні, у якому знаходяться тверді горючі речовини та матеріали).

4.3.1. Технічні рішення системи запобігання пожежі

До причин, що можуть спричинити пожежу в приміщенні, відносяться:

- короткі замикання;
- перевантаження електромережі і перегріву струму несучих частин та з'єднань;
- порушення правил техніки безпеки.

При виникненні аварійних ситуацій відбувається різке виділення теплової енергії, яка може стати причиною виникнення пожежі.

Заходи щодо запобігання пожежі:

- систематична перевірка на справність струмоведучих частин обладнання;
- систематичне проведення протипожежного інструктажу;
- дотримання вимог пожежної безпеки на робочому місці.

4.3.2. Технічні рішення системи протипожежного захисту

У приміщенні можливе використання системи автоматичного пожежогасіння. Також потрібно використовувати установку порошкового пожежогасіння, що використовує у якості вогнегасної речовини спеціальний порошок, який є нетоксичним. Для подачі сигналів про пожежу у приміщенні встановлено пожежну сигналізацію.

Після закінчення роботи від усіх електроприладів, а також з мереж їх живлення повинна бути відключена напруга (за винятком протипожежних та охоронних установок). Електропроводи для підключення комп'ютерів, приладів повинні прокладатися по негорючих конструктивних елементах.

Згідно норм на кожні 20 м² площі приміщення вказаних категорії та класу пожежовибухонебезпеки та можливих класів пожеж – А, В і Е розміщується один порошковий або вуглекислотний вогнегасник з масою заряду від 3 до 5 кг. Крім

того на поверсі, де знаходиться приміщення слід забезпечити наявність двох порошкових вогнегасників з масою заряду 10 кг.

Тому в приміщенні буде розташовуватися два порошкових вогнегасники, які будуть розміщуватись в різних його кінцях, на висоті не більше 1,5 м від рівня підлоги до нижнього торця вогнегасника і на відстані від дверей, достатній для їх повного відчинення. Підходи до місця розташування вогнегасників мають бути завжди вільними. Для зазначення місцезнаходження вогнегасників буде встановлений вказівний знак. Знак розташовують на видних місцях на висоті 2,0 - 2,5 м від рівня підлоги.

ВИСНОВКИ

У ході бакалаврської дипломної роботи було проведено аналіз методів та засобів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж. Основною метою було визначення оптимальних стратегій для поліпшення продуктивності та надійності цих мереж.

Аналізуючи методи підвищення ефективності оптичних транспортних мереж, варто відзначити різноманітність застосовуваних підходів. Одним із ключових аспектів є використання волоконно-оптичних систем передачі, які забезпечують широку пропускну здатність і мінімальну втрату сигналу. Крім того, методи передачі даних з використанням часового ущільнення (TDM) і мультиплексування хвильоводів (WDM) дозволяють оптимізувати використання доступних ресурсів і забезпечувати ефективне передавання інформації.

З урахуванням швидкого розвитку технологій та зростання обсягу передаваної інформації виникає потреба у постійному вдосконаленні оптичних транспортних мереж. Концепція 6G в оптичних мережах відкриває нові можливості для вдосконалення засобів передачі даних і підвищення їх продуктивності. Технології наступного покоління з 6G дозволять забезпечити ще більший об'єм передаваної інформації і підвищити ефективність оптичних транспортних мереж для відповіді на вимоги сучасного світу.

Підвищення пропускну здатності оптичних мереж можна досягти за допомогою різних технологій і методів. Також важливим аспектом є компенсація поляризаційно-модової дисперсії (ПМД), яка може обмежувати швидкість передавання і довжину регенераційної ділянки. Розробка автоматизованих систем компенсації ПМД сприяє підвищенню ефективності оптичних мереж і забезпечує стабільність передачі сигналу.

Отже, проведений аналіз методів та засобів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж є важливим кроком для проектування та ефективного впровадження мережних систем з урахуванням їхньої ефективності та стійкості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Albanese, I. Big File Protocol for OTN and Ethernet Transport Systems / I. Albanese, Y. O. Yazır, S. W. Neville, S. Ganti, T. E. Darcie // *Journal of Optical Communications and Networking*. – 2015. – Vol. 7, Issue 2. – P. 96-108
2. Телекомунікаційні системи та мережі наступного покоління: конспект лекцій. Модуль 5.2 / Педяш В.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2017.
1. Телекомунікаційні системи передавання інформації: навч. посіб. / М. М. Климаш, Р. С. Колодій. — Львів: Львівська політехніка, 2018
2. D. Arci, D. Petecchi, G. Maier, A. Pattavina and M. Tornatore, "Availability models for protection techniques in WDM networks", *Proc. Int. Workshop Design Reliable Commun. Netw. (DRCN)*, pp. 158-166, 2003
3. Jinno, M., Miyamoto, Y. & Hibino, Y. Optical-transport networks in 2015. *Nature Photon* 1, 157–159 (2007)
4. Дрючин О. О. Оптичні транспортні мережі. Синхронна цифрова ієрархія: Навчальний посібник. – Вінниця. : ВНТУ, 2017.
5. Le Nguyen Binh *Advanced Digital Optical Communications*. – European Research Center, Huawei Technologies, Munich, Germany, CRC Press London New York, 2015.
6. Телекомунікаційні системи передачі : підручник / В. М. Кичак, О. М. Шинкарук, Г. Г. Бортник, І. І. Чесановський, О. В. Стальченко. - Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2016. - 424 с.
7. Войтович І.А., Яковлев В.М., Сірош С.І. Оптичні транспортні мережі. - К.: НТУУ «КПІ», 2014. - 424 с.
8. Телекомунікаційні системи передачі : навчальний посібник ТЗ1 Г.Г. Бортник, В.М.Кичак, Н.О. Пунченко, О. В. Стальченко. - Вінниця : ВНТУ, 2015. - 145 с.
9. Цифрова обробка сигналів в телекомунікаційних системах : підручник / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак. - Вінниця : ВНТУ, 2014. - 232 с.
10. Експлуатація телекомунікаційних систем [текст] : підручник. / Г.Ф.

- Конахович, В.М. Чуприн, І.О. Мачалін, О.П. Ткаліч - К. : «Центр учбової літератури», 2014. - 372 с.
11. Експлуатація телекомунікаційних систем [текст] : підручник. 2 том / Г.Ф. Конахович, В.М. Чуприн, І.О. Мачалін, О.П. Ткаліч - К. : «Центр учбової літератури», 2015. - 424 с.
 12. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИИУЦ», 2016. 21 с.
 13. ДСНіП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>
 14. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>
 15. ДСТУ EN 62305:2012 Блискавкозахист (європейський стандарт IEC 62305:2010). URL: <https://tdsb.com.ua/ru/dstu-en-62305/>
 16. ДСТУБ В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с
 17. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.
 18. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf
 19. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
 20. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta->

infrazvuku-nor4878.html

21. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. -
[Електронний ресурс] - Режим доступу:
<http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
22. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим
доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
23. НАКАЗ №248 від 8.04.2014 Про затвердження Державних санітарних
норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості
та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та
напруженості трудового процесу» URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14>

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ
назва бакалаврської дипломної роботи

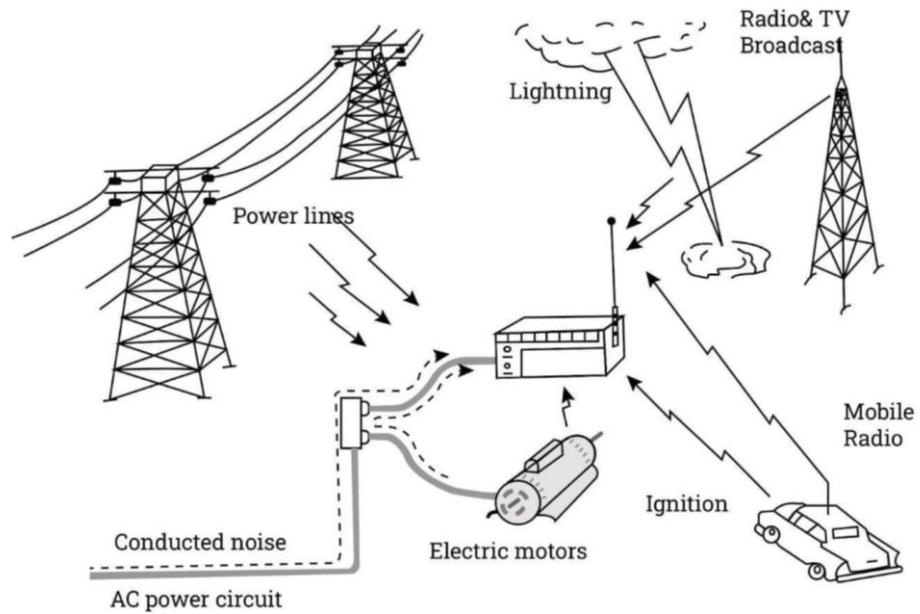


Рисунок 1 – Можливі джерела RFI

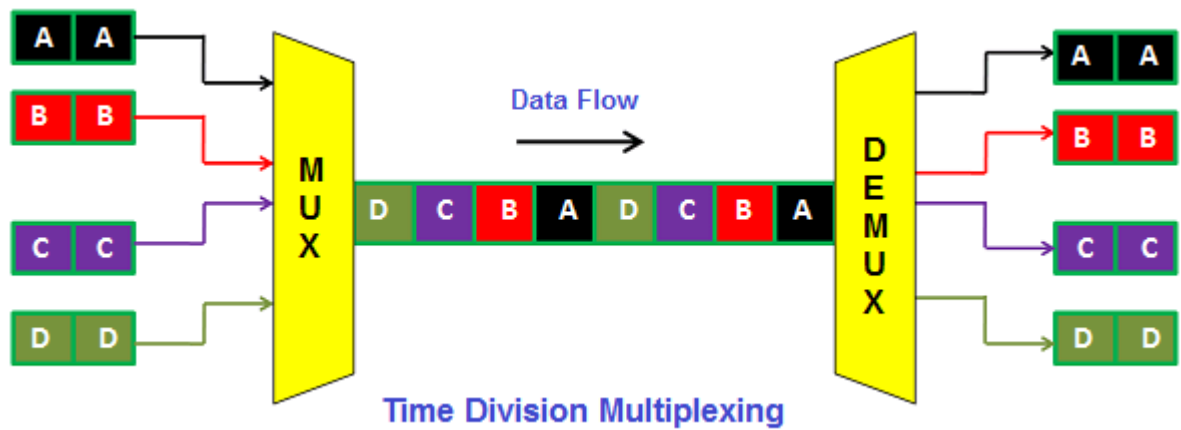


Рисунок 2 – Спрощена схема TDM

wavelength-division multiplexing (WDM)

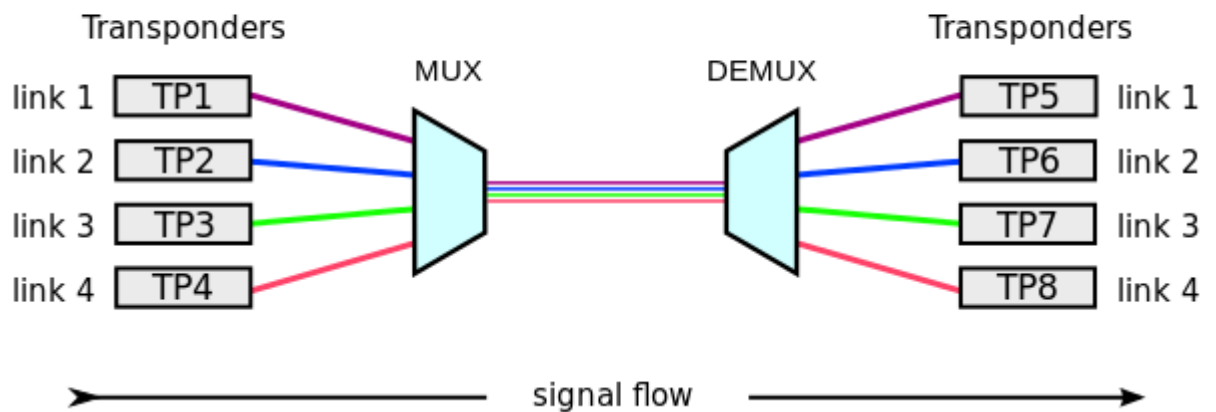


Рисунок 3 – Спрощена схема WDM

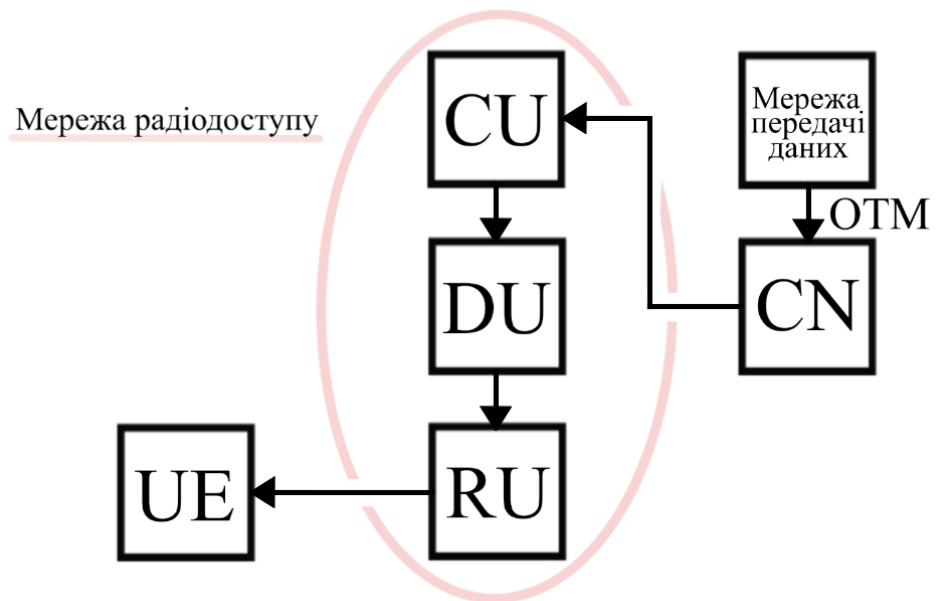


Рисунок 4 – Архітектура мереж OpenRAN

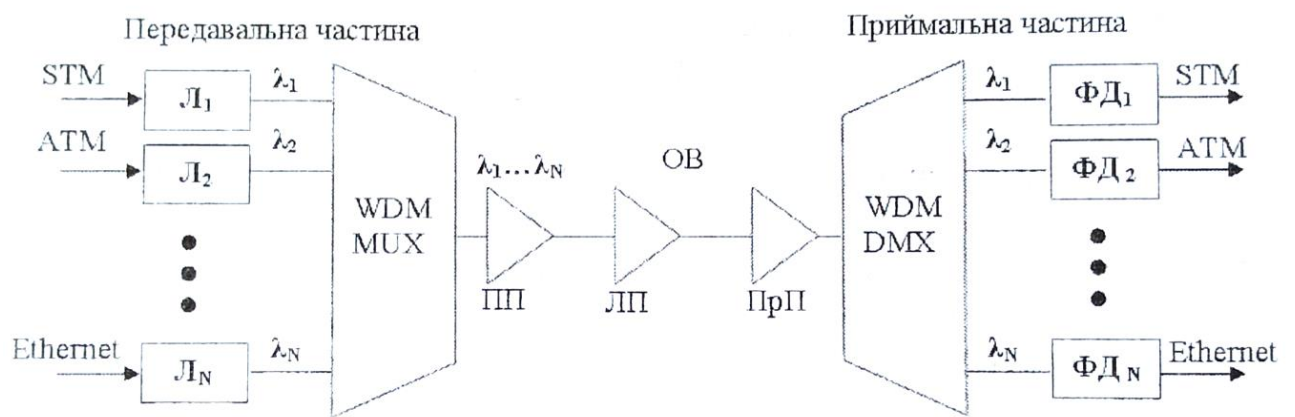


Рисунок 5 – Система передавання з спектральним ущільненням каналів

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Аналіз методів та засобів підвищення ефективності оптичних транспортних мереж

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра Інфокомунікаційних систем і технологій, факультет Інформаційних електронних систем
(кафедра, факультет)

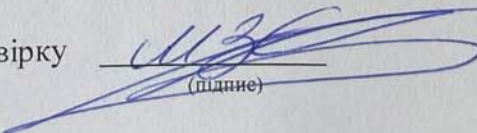
Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 80,2 % Схожість 19,8 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 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 розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 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.

Особа відповідальна за перевірку


(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

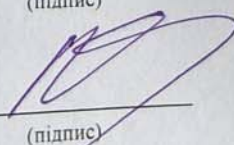
Ознайомлені з повним звітом, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Гайдамашко А.О.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Кичак В.М.
(прізвище, ініціали)