

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут інформаційних технологій  
Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій  
Вандьо Валерій Русланович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 535.317.2  
(індекс)

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**  
**УДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У МЕРЕЖАХ**

(назва роботи)

**"Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка "**

(назва освітньої програми)

**175 «Інформаційно-вимірювальні технології»**

(шифр і назва спеціальності)

Здобувач освітнього ступеня Вандьо Вандьо В.Р.  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Лютак Зіновій Петрович, к.т.н., професор кафедри  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри

О.Є.Середюк  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

В.Б.Білицук  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

**Івано-Франківськ 2024р**

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу**

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут Інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 175-Інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри** \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я  
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Вандьо Валерію Руслановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення передачі даних у мережах

керівник роботи Лютак Зіновій Петрович, к.т.н., професор кафедри \_\_\_\_\_,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від "03" 12 2024 року № 784/7

2. Строк подання студентом роботи 13.12.2024

3. Вихідні дані до роботи: Маршрут траси Івано-франківськ – Коломия - Косів з відстанню 91 км, світловід зі скляною ниткою, адаптерне з'єднання оптичних конекторів, передача Wavelength Division Multiplexing

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз сучасних систем для передачі даних

2. Розроблення основних частин телекомунікаційних мереж

3. Розрахунок основних експлуатаційних показників розроблювальної мережі

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Структурна схема ліній зв'язку;

2. Кабельне закінчення оптичних з'єднувачів;

3. Класифікація оптичних конекторів;

4. Світловід зі скляною ниткою;

5. Вигляд передачі Wavelength Division Multiplexing



## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: «Удосконалення передачі даних у мережах» 70 с., 23 рис., 16 джерела, 5 аркушів графічного матеріалу.

Мета роботи полягає у вивченні та аналізі волоконно-оптичних ліній зв'язку, дослідженні новітніх технологій і методів, які сприяють підвищенню ефективності й надійності оптичних систем, а також у розробці удосконаленої системи передачі даних із використанням оптичного волокна.

Об'єктом дослідження є оптичні волокна, їхні фізичні та технічні властивості, а також пристрої та компоненти, необхідні для створення і функціонування оптичних систем передачі даних.

Предметом дослідження є проектування та розробка оптичних систем передачі даних з використанням оптичних волокон, а також компонентів і пристроїв, які забезпечують їхню роботу.

В магістерській роботі детально досліджено характеристики та структуру волоконно-оптичних систем передачі. Розглянуто будову оптичних кабелів, методи їх з'єднання, обґрунтовано та обрано відповідні кабелі для проектування. Також Розглянуто аспекти проектування волоконно-оптичної системи передачі. Проведено аналіз географічних і економічних характеристик термінальних пунктів.

## **ABSTRACT**

Master's thesis: 'Improvement of data transmission in networks' 70 p., 23 figs., 16 sources, 5 sheets of graphic material.

The purpose of the work is to study and analyse fibre-optic communication lines, to investigate the latest technologies and methods that contribute to the efficiency and reliability of optical systems, as well as to develop an improved data transmission system using optical fibres.

The object of research is optical fibres, their physical and technical properties, as well as devices and components necessary for the creation and operation of optical data transmission systems.

The subject of the research is the design and development of optical data transmission systems using optical fibres, as well as components and devices that ensure their operation.

The characteristics and structure of fibre optic transmission systems are studied in detail in the master's thesis. The structure of optical cables, methods of their connection are considered, and appropriate cables for design are justified and selected. The aspects of designing a fibre-optic transmission system are also considered. The geographical and economic characteristics of terminal points are analysed.

## ЗМІСТ

	ст.
<b>ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....</b>	<b>7</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Оцінка параметрів ліній з передачі інформації.....	10
1.2 Компоненти обладнання з відправлення передачі сигналів.....	12
1.3 Технології комунікаційних магістралей.....	14
1.4 Особливості структури оптоволоконного кабелю.....	17
1.5 Оптимізація вибору магістральних ділянок.....	19
1.6 Технологія передач сигналів з використанням мультиплексорів.....	21
1.7 Вибір напівпровідникових складових обладнання.....	26
<b>2. РОЗРОБЛЕННЯ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>32</b>
2.1 Особливості оптично волокнистого зв'язку.....	32
2.2 Опис географічних характеристик прокладки магістралей.....	33
2.3 Оптимізація вибору маршрутних трас.....	35
2.4 Обчислення параметрів компонентів каналу зв'язку.....	37
2.5 Вибір довжини оптичного кабелю.....	40
<b>3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОЗРОБЛЮВАНОЇ МЕРЕЖІ.....</b>	<b>47</b>
3.1 Розрахунок показника заломлення компонентів оптичного волокна.....	47
3.2 Забезпечення надійності передачі даних.....	50
3.3 Оцінка негативних впливів в оптичному кабелі.....	52
3.4 Фактори впливу на оптичні мережі.....	54
3.5 Перевірка швидкодії перетворення інформації мультиплексором.....	56
3.6 Розрахунок працездатності системи.....	63
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>67</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>68</b>
<b>БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....</b>	<b>70</b>

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

**ОК** Оптоволоконні кабелі

**ВОМ** Волоконно-оптичні мережі

**ВОК** Волоконно-оптичний кабель

**Ерланг** (позначення Ерл) – безрозмірна одиниця інтенсивності навантаження (найчастіше телефонного навантаження) або одиниця навантаження

**РПО** Регенераційні пункти обслуговування

**ВОСП** Волоконно-оптична система передачі

**РВТ** Районні вузли телекомунікацій **ВОСП** Волоконно-оптична система передачі **АЦП** Аналого-цифровий перетворювач,

**ЦАП** Цифро-аналоговий перетворювач

**ВОЛЗ** Волоконно-оптична лінія зв'язку

## ВСТУП

У сучасному світі телекомунікаційні мережі займають ключову роль у передачі різноманітних видів інформації. Зростаючий попит на швидку, надійну та безпечну передачу даних ставить перед технологіями нові виклики. Одним із найефективніших способів вирішення цих завдань є використання оптичних волокон, які забезпечують передачу інформації на великі відстані зі швидкістю і стійкістю, недосяжними для традиційних технологій.

**Тема магістерської роботи: «Удосконалення передачі даних у мережах».**

Актуальність дослідження обумовлена нагальною потребою забезпечення високої швидкості та надійності інформаційного обміну в сучасних системах зв'язку. Основою функціонування оптичних систем передачі є використання світлових хвиль, які передаються через спеціалізовані оптичні волокна. Завдяки високій пропускній здатності та низькому рівню перешкод, оптичні волокна дозволяють передавати дані на значні відстані з мінімальними втратами якості. Водночас вони стійкі до впливу електромагнітних полів, що підвищує стабільність та надійність систем зв'язку.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Результати досліджень, які відображені в магістерській роботі, виконано автором відповідно до плану навчання на кафедрі інформаційно-вимірjuвальних технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти й газу. Ця робота виконана за безпосередньої участі автора як виконавця окремих розділів.

**Мета дослідження** полягає у вивченні та аналізі волоконно-оптичних ліній зв'язку, дослідженні новітніх технологій і методів, які сприяють підвищенню ефективності й надійності оптичних систем, а також у розробці удосконаленої системи передачі даних із використанням оптичного волокна.

**Об'єкт дослідження:** оптичні волокна, їхні фізичні та технічні властивості, а також пристрої та компоненти, необхідні для створення і функціонування оптичних систем передачі даних.

**Предмет дослідження:** проектування та розробка оптичних систем передачі даних з використанням оптичних волокон, а також компонентів і пристроїв, які забезпечують їхню роботу.

**Наукова новизна та практичне значення роботи :**

Запропоновано надійну і швидкісну систему передачі даних в мережах з використанням оптичних волокон, які відрізняються низьким енергоспоживанням, що робить їх важливим елементом у розробці енергоефективних технологій. Сфери застосування оптоволоконних систем є надзвичайно широкими: від телекомунікацій і медичних технологій до авіації, аерокосмічної галузі та систем моніторингу вуглеводневих ресурсів.

Таким чином, застосування оптичного волокна у сучасних мережах передачі даних сприяє досягненню таких ключових цілей, як забезпечення високої швидкості, надійності та енергоефективності передачі, а також захист інформації.

### **Основні завдання дослідження:**

1. Виконати аналіз сучасних технологій і стандартів оптоволоконної передачі даних, оцінити їхню ефективність у порівнянні з іншими методами. Визначити переваги й недоліки різних підходів.
2. Запланувати і розробити систему передачі даних на базі оптичних волокон, яка гарантуватиме високу швидкість, надійність і безпеку інформаційного обміну.
3. Провести необхідні технічні розрахунки для проектування системи в рамках кваліфікаційної роботи та перевірити отримані результати.
4. Обрати оптимальне обладнання для монтажу, налаштування, контролю та обслуговування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП).
5. Оцінити ефективність створеної системи передачі даних на основі аналізу отриманих результатів.

### **Результати першого розділу:**

У першому розділі роботи детально досліджено характеристики та структуру волоконно-оптичних систем передачі. Розглянуто будову оптичних кабелів (ОК), методи їх з'єднання, обґрунтовано та обрано відповідні кабелі для проектування. Проведено аналіз технологій мультиплексування сигналів, зокрема, для проектної частини обрано метод WDM (Wavelength Division Multiplexing).

### **Результати другого та третього розділу:**

Розглянуто аспекти проектування ВОСП. Проведено аналіз географічних і економічних характеристик термінальних пунктів, а також виконано розрахунки основних параметрів системи передачі даних.

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ), відповідно до стандарту ГКД 34.48.151-2003 «Проектування, будівництво та експлуатація волоконно-оптичних ліній зв'язку по повітряних лініях електропередачі», часто позначаються терміном волоконно-оптичні системи передачі (ВОСП). У таких системах, на відміну від традиційних мідних провідників, використовуються оптичні волокна як основний елемент передачі сигналу.

На сьогоднішній день ВОЛЗ є одним із найбільш досконалих фізичних середовищ для передачі інформації завдяки їхнім унікальним характеристикам.

## 1.1 Оцінка параметрів ліній з передачі інформації

Оптичні кабелі (ОК) забезпечують передачу великих обсягів даних із високою швидкістю, надійністю та захищеністю на значні відстані. Принцип дії оптоволоконних мереж (ОВМ) базується на передачі інформації за допомогою світлових сигналів, що забезпечує високий рівень захисту від несанкціонованого доступу, виключає вплив електромагнітних перешкод і дозволяє створювати якісне широкосмугове інтернет-з'єднання, а також надавати телефонний та телевізійний зв'язок.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) можуть використовуватися як для побудови нових мереж, так і для інтеграції вже існуючих. Таке об'єднання може відбуватися на фізичному рівні, коли з'єднуються магістральні ділянки оптичних волокон, або на логічному рівні, що реалізується через протоколи передачі даних.

Фізичне об'єднання здійснюється шляхом зварювання волокон або їх механічного з'єднання, що формує безпосереднє з'єднання між відправником і одержувачем сигналу. Такий підхід забезпечує високий рівень безпеки переданих даних.

Логічне об'єднання реалізується через використання протоколів маршрутизації, які працюють відповідно до стандартів обчислення векторів і комутації пакетів даних. На рис.1.1 представлено структурну схему ліній зв'язку.

Загальна структурна схема ліній зв'язку показана на рис.1.1[1]:



Рисунок 1.1 – Структурна схема ліній зв'язку.

Основними функціональними вузлами даної лінії є оптичне волокно, мультиплексор, демультимплексор і стандартні схеми аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), і цифро-аналогово перетворювача (ЦАП).

Для проектування волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) необхідно виконати такі кроки:

- Визначити ключові характеристики, необхідні для розрахунків.
- Обрати оптимальну топологію мережі.
- Здійснити вибір відповідного оптичного волокна і розрахувати його параметри.
- Обрати тип і конструкцію оптичного кабелю, які відповідають умовам експлуатації.
- Підібрати джерело оптичного випромінювання.
- Визначити найбільш підходящий фотодетектор.
- Розрахувати втрати в лінійному тракті передачі сигналу.
- Оцінити резервну потужність системи.
- Провести розрахунок енергетичного бюджету.
- Визначити довжину регенераційної ділянки та спроектувати схему розташування регенераторів або лінійних підсилювачів.
- Визначити швидкодію лінії передачі.
- Проаналізувати спроектовану систему ВОЛЗ, представити отримані розрахункові дані у вигляді таблиці.
- На основі проведених розрахунків сформулювати висновки.

#### Основні причини популярності волоконно-оптичних ліній зв'язку:

1. **Висока швидкість передачі даних.** Оптичні волокна здатні передавати інформацію зі швидкістю в мільйони бітів за секунду, що робить їх ідеальними для обробки великих обсягів даних.
2. **Надійність роботи.** Оптоволокну не піддається впливу зовнішніх електромагнітних перешкод, оскільки передача сигналу здійснюється не

електричним струмом, а світловими хвилями. Це забезпечує стабільність зв'язку навіть за несприятливих атмосферних умов.

3. **Економічність.** У порівнянні із супутниковими системами, міжнародні оптоволоконні лінії є набагато дешевшими.
4. **Мінімальні втрати сигналу.** Завдяки тому, що світловий сигнал рухається всередині волокна, а не розсіюється, інформація передається на великі відстані з незначними втратами якості.

## 1.2 Компоненти обладнання з відправлення передачі сигналів.

Побудова волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) вимагає використання як активних, так і пасивних компонентів, що забезпечують передачу, прийом і ретрансляцію сигналу. Активні пристрої підключаються до електричної мережі, тоді як пасивні компоненти працюють без необхідності в електроживленні, здійснюючи з'єднання і передачу даних. Активне обладнання відповідає за генерацію, ретрансляцію та прийом оптичних сигналів.

До основних видів активного обладнання відносяться:

- Підсилювачі, які використовуються для коригування потужності сигналу, забезпечуючи стабільну передачу даних на великі відстані.
- Регенератори, що відновлюють параметри сигналу, відновлюючи його якість і підсилюючи на магістральних лініях.
- Лазери, що перетворюють електричні сигнали на оптичні, формуючи початковий оптичний сигнал для подальшої передачі через кабель.
- Модулятори, що регулюють оптичну хвилю для коректної передачі сигналу.
- Маршрутизатори, що відповідають за маршрутизацію даних між різними абонентами і мережами.
- Комутатори, які здійснюють перерозподіл даних між великими групами кінцевих користувачів.
- Мультиплексори / демультиплексори, що дозволяють об'єднувати кілька каналів у одному потоці для передачі через оптоволоконно.
- Давачі, що використовуються для прийому сигналу на кінцях волоконно-оптичних кабелів.
- Фотоприймачі, що перетворюють оптичні сигнали у електричні.

Пасивне обладнання в основному складається з оптичних кабелів, чия якість і технічні характеристики визначають надійність захисту, пропускну здатність мережі та швидкість передачі даних.

Одномодові оптичні кабелі (ОК) з одним волокном застосовуються для магістральних трас, що з'єднують міста та країни, оскільки вони забезпечують високу пропускну здатність на великих відстанях.

Багатомодові кабелі з великою кількістю волокон використовуються для підключення численних груп кінцевих користувачів і забезпечують побудову складних структурованих кабельних систем (СКС) в різних галузях.

До пасивного обладнання відносяться всі компоненти, необхідні для монтажу волоконно-оптичних ліній зв'язку:

- Оптичний кабель складається з оптичних волокон, які захищені загальною оболонкою. Зовнішня оболонка може бути виготовлена з різних матеріалів, таких як полівінілхлорид, поліетилен, поліпропілен, тефлон та інші.
- Муфти та кроси використовуються для з'єднання окремих ділянок оптичних кабелів.
- Шнури, конектори, роз'єми та патч-корди служать для підключення активного обладнання та пристроїв кінцевих користувачів.
- Розподільні шафи та стійки — монтажні елементи, що застосовуються в мережах СКС.
- Адаптери — це пристрої, які забезпечують з'єднання ліній з різними технічними характеристиками.

Проектування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) вимагає ретельного розрахунку технічних параметрів і можливостей використаних компонентів, як активного, так і пасивного обладнання. У процесі проектування враховуються такі фактори, як ступінь згасання сигналу, сила і дисперсія світлового потоку, пропускну здатність мережі, кількість підключених абонентів і довжина лінії зв'язку.

На основі цих параметрів можна визначити основні переваги волоконно-оптичних систем, зокрема:

- здатність передавати великі обсяги інформації;
- можливість передачі даних на великі відстані без значних втрат;
- високий рівень захисту від несанкціонованого доступу;

- стійкість до перешкод і електромагнітних впливів;
- тривалий термін служби — до 25 років і більше.

Оптоволоконні системи є дуже надійними у плані безпеки, оскільки фізично практично неможливо зламати сигнал, що передається через оптичне волокно. Це пов'язано з тим, що світловий сигнал не випромінюється, і його важко перехопити. Однак, як і будь-яка технологія, ВОЛЗ мають певні недоліки, серед яких:

- Крихкість скловолокна. При сильному згинанні або механічному навантаженні кабелю можливе пошкодження волокон або їх замутнення через виникнення мікротріщин.
- Складність з'єднання при розриві. Якщо кабель рветься, для його відновлення потрібні спеціальні інструменти та кваліфікація виконавця, що додає складності в роботі.
- Складна технологія виготовлення. Як саме волокно, так і компоненти ВОЛЗ виготовляються за складними технологіями, що вимагає високих витрат та точності.
- Складність перетворення сигналу. Перетворення оптичного сигналу в електричний та навпаки вимагає використання спеціального інтерфейсного обладнання, що додає складності в налаштуваннях.
- Висока вартість оптичного кінцевого обладнання. Таке обладнання, зокрема фотодетектори та лазери, є досить дорогим у порівнянні з іншими технологіями.
- замутнення волокна під впливом радіації. Оптичне волокно може втрачати свої властивості через радіаційне опромінення, хоча для таких випадків існують спеціальні леговані волокна з високою радіаційною стійкістю.

Монтаж і налаштування ВОЛЗ вимагає високої кваліфікації спеціалістів, оскільки процеси, пов'язані з загортанням кабелю та налаштуванням маршрутизації, потребують особливої точності та майстерності. Неправильний монтаж чи неякісне налаштування можуть призвести до серйозних проблем у роботі системи. Тому важливо звертатися до професіоналів, не економити на кваліфікації та не боятися переплатити за якісні послуги, адже виправлення помилок може обійтися дорожче, ніж запобігання їм з самого початку.

### **1.3 Технології комунікаційних магістралей**

Довжина волоконно-оптичних магістралей може досягати сотень кілометрів, особливо при будівництві комунікацій між містами. Водночас

стандартна довжина окремих оптичних волокон зазвичай становить лише кілька кілометрів. Це обумовлено тим, що робота з надмірно довгими відрізками волокна може бути складною та незручною. З огляду на це, при проектуванні траси необхідно враховувати процес зрощування окремих світловодів для забезпечення безперервності лінії.

Залежно від методу з'єднання світловодів, розрізняють два основні типи з'єднань: роз'ємні та нероз'ємні.

- Роз'ємні з'єднання виконуються за допомогою оптичних конекторів. Такий підхід передбачає додаткові фінансові витрати, а також призводить до зростання оптичних втрат у випадках, коли кількість проміжних з'єднань є значною.
- Нероз'ємні з'єднання забезпечують постійний зв'язок між сегментами волокна шляхом їхнього зварювання або склеювання, що мінімізує втрати, але ускладнює подальше обслуговування.

Оптичний конектор (роз'єм) (рис. 1.2) – це кабельне закінчення, з'єднання 2-х оптичних з'єднувачів (конекторів) за допомогою адаптера [1]:

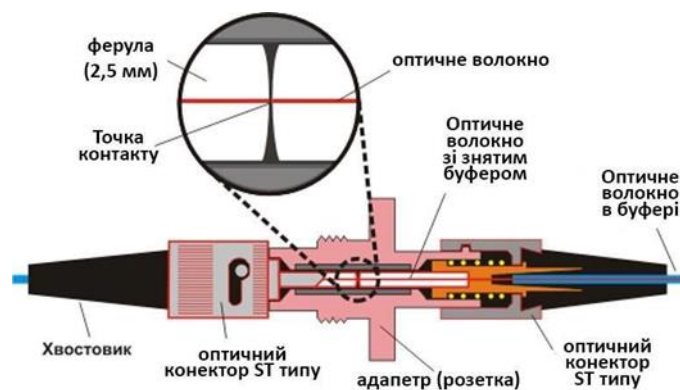


Рисунок 1.2–Кабельне закінчення оптичних з'єднувачів

Оптичне волокно на рис.1.2 показано як окремий елемент з точкою контакту.

Конектори встановлюються на обох кінцях будь-якого оптичного кабелю — магістрального, розподільного чи навіть з'єднувального патч-корду. Для забезпечення точного з'єднання використовується адаптер, який має наскрізний отвір, діаметр якого відповідає розміру ферули оптичного конектора. Така конструкція дозволяє досягти високої точності при з'єднанні волокон.

Одним із основних стандартів для оптичних волокон є сердечник діаметром 62,5 мкм та оболонка діаметром 125 мкм.

Ферула кабельного закінчення оптичних з'єднувачів (рис. 1.2) — це керамічний елемент циліндричної форми, у центрі якого закріплено оптичне волокно. Найчастіше використовуються ферули діаметром 2,5 мм (у конекторах типів FC, SC, ST) та 1,25 мм (у конекторах типу LC). На рис. 1.3 представлено класифікацію оптичних конекторів[2]:

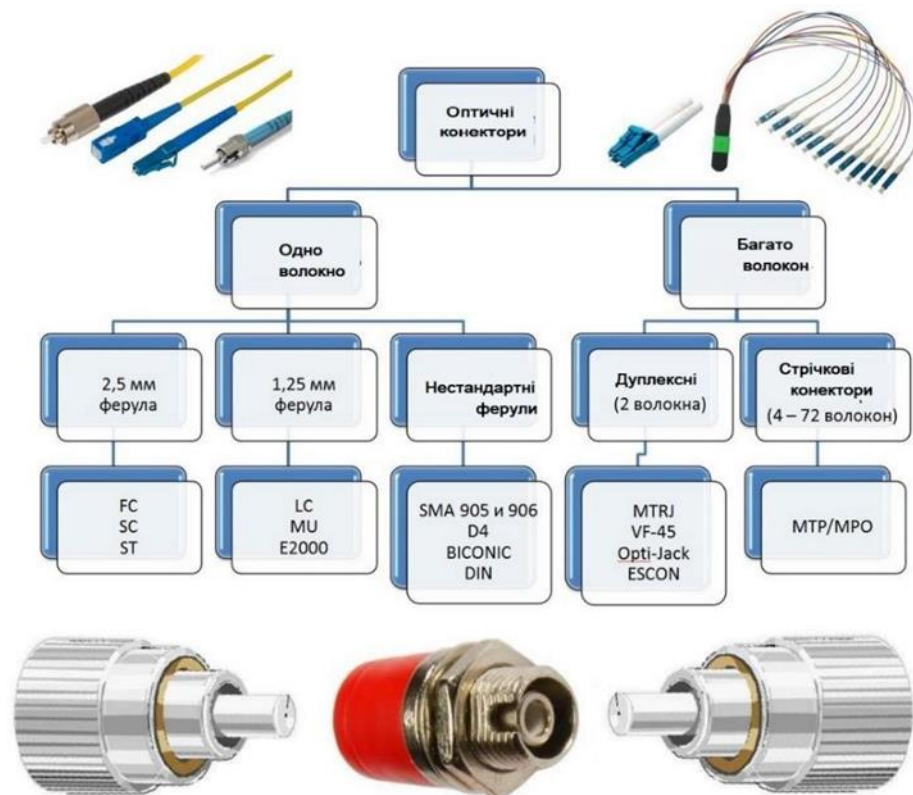


Рисунок 1.3—Класифікація оптичних конекторів

Для створення нероз'ємних з'єднань локальних ділянок (наприклад, при монтажі трас) використовують механічні з'єднувачі, клейове зрощування або зварювання волокон. Для останнього методу зазвичай застосовуються спеціалізовані апарати для зварювання оптичних волокон. Вибір способу з'єднання залежить від призначення та умов експлуатації волоконно-оптичної системи.

Зварювання волокон забезпечує найкраще з'єднання з мінімальними втратами сигналу, що робить його найкращим вибором для створення

високошвидкісних волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). У процесі зварювання відбувається оплавлення кінців світловодів. Для генерування теплової енергії можуть застосовуватися різні джерела: газовий пальник, електричний заряд або лазерне випромінювання.

Кожен із методів має свої переваги:

- Лазерне зварювання. Забезпечує отримання надзвичайно чистих сполук завдяки відсутності домішок у процесі.
- Газовий пальник. Найкраще підходить для міцного зварювання багатомодових волокон.
- Електричне зварювання. Найпоширеніший метод, який відрізняється високою швидкістю та якістю виконання робіт.

Тривалість плавлення та специфіка зварювання можуть відрізнятися залежно від типу оптичного волокна.

#### **1.4 Особливості структури оптоволоконного кабелю**

Оптичний кабель (ОК) слугує для передачі даних або голосових сигналів, які створюються за допомогою світлових імпульсів, генерованих лазерами чи світлодіодами.

Конструкція оптоволоконного кабелю є простою, але водночас високотехнологічною. Вона нагадує структуру коаксіального електричного кабелю, проте замість мідного провідника в центрі використовується надзвичайно тонке скловолокно діаметром усього 1–10 мкм. Ізоляцію, яка притаманна коаксіальним кабелям, замінює оболонка зі скла або пластику. Вона виконує функцію обмеження світлового сигналу всередині волокна, завдяки чому реалізується явище повного внутрішнього віддзеркалення світла на межі матеріалів із різними коефіцієнтами заломлення.

Металева обплетення, характерне для багатьох кабелів, в оптичному звичай не використовується, оскільки оптоволокно не потребує захисту від електромагнітних перешкод. Однак у певних випадках металевий захист може бути доданий для забезпечення додаткової механічної міцності або захисту від несприятливих впливів зовнішнього середовища. Світловід з скляною ниткою представлений на рис. 1.4[2]:

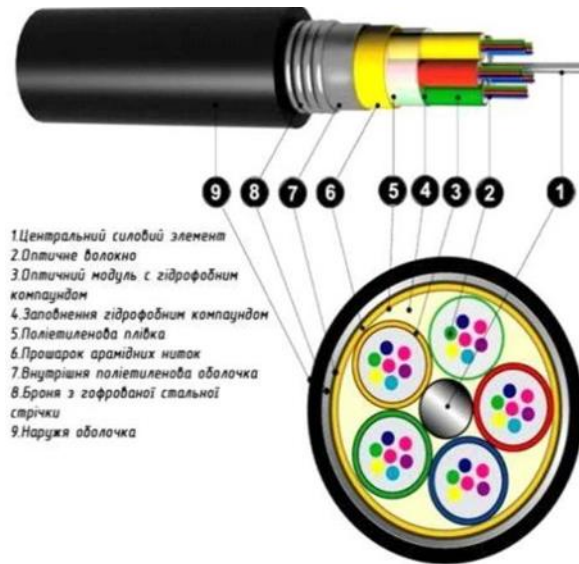


Рисунок 1.4 – Світловід зі скляною ниткою

Особливістю даного світловода є те, що оптичний модуль з спеціальним гідрофобним компаундом.

Світлопровід — це тонка нитка зі скла або пластику товщиною від 8,3 до 100 мкм, яка використовується для передачі сигналів. Оптичне волокно здатне передавати сигнал лише в одному напрямку, тому кабелі зазвичай складаються з двох волокон: одне для передачі, інше для прийому. На одному кінці оптичного кабелю електричний сигнал перетворюється у світловий, а на іншому — виконується зворотнє перетворення.

Внутрішня скляна оболонка світлопроводу забезпечує його жорсткість, стійкість до механічних пошкоджень, температурних коливань, таких як перегрів чи переохолодження. Гель та підсилюючі жили виконують додаткову захисну функцію, запобігаючи впливу зовнішніх факторів і механічних навантажень.

Оптичні кабелі поділяються на полегшені та посилені залежно від умов використання. Вони можуть мати одне або кілька світлопровідних волокон. Якщо в кабелі лише одне волокно, це одномодовий кабель; якщо декілька — багатомодовий.

Типи кабелів класифікують за кількістю волокон:

- Симплексні. Містять одне волокно.
- Дуплексні. Мають два волокна.
- Багатожильні. Включають від 6 і більше волокон.

У багатожильних кабелях зазвичай використовуються однакові типи волокон. Однак за бажанням замовника виробники можуть комбінувати в одному кабелі різні типи волокон, наприклад, багатомодові (ММ) і одномодові (SM).

Оптичні кабелі також класифікують за діаметром світлопровідного волокна. Найпоширенішим є багатомодове волокно з діаметром оболонки 62,5/125, однак його смуга пропускання на довжині хвилі 850 нм виявляється недостатньою для використання на довгих магістралях Gigabit Ethernet. Волокно з діаметром оболонки 100/140, яке згадується у специфікації Token Ring, має свої обмеження щодо практичного застосування. Серед одномодових волокон найбільш поширеним є варіант із діаметром 9,5/125.

При виготовленні волоконно-оптичних кабелів (ВОК) ключовими параметрами є умови експлуатації та пропускна спроможність мережі, для якої вони розробляються.

Класифікація кабелів за умовами експлуатації:

- Монтажні. Використовуються для короткочасного застосування під час встановлення мереж.
- Станційні. Призначені для експлуатації у межах станційних приміщень.
- Зонові. Використовуються у межах локальних зон, таких як квартали чи окремі території.
- Магістральні. Призначені для побудови довгих ліній зв'язку між населеними пунктами або регіонами.

Оптичні кабелі здебільшого застосовуються в мережах із топологією «зірка» або «кільце». У таких випадках відсутні проблеми із заземленням чи узгодженням, а кабель забезпечує чудову гальванічну розв'язку між пристроями мережі, що гарантує надійність і стабільність передачі даних.

## 1.5 Оптимізація вибору магістральних ділянок

Для реалізації практичної частини даної магістерської роботи було обрано магістральний одномодовий оптичний кабель для прокладання на ділянці Івано-Франківськ – Косів Івано-Франківської обл. Цей кабель оптимально підходить для передачі інформації на великі відстані завдяки низькому рівню загасання та дисперсії. Висока пропускна здатність кабелю є

критично важливою для організації зв'язку на магістральних ділянках великої протяжності.

Для забезпечення стабільної роботи мультиплексора, який працює за схемою STM-4 (1+1), необхідно 4 оптичні волокна: два основних і два резервних. Такий підхід також є стандартним для організації зоновому зв'язку.

У рамках розрахунків було обрано 12-волоконний кабель від компанії HELUCOM® з одномодовими волокнами типу A-DQ(ZN)2Y omE9/125 із ненульовою зміщеною дисперсією. Цей кабель здатен забезпечувати швидкість передачі даних 2,448 Мбіт/с на довжині хвилі  $\lambda=1550$  нм [5].

Структура кабелю передбачає використання 12 волокон. Шість волокон для передачі сигналів в одному напрямку ( $6 \times 7560 = 45360$  каналів). Шість волокон для передачі сигналів у зворотному напрямку (також 45360 каналів). Такий вибір забезпечує високу ефективність і надійність мережі, враховуючи її магістральне призначення.

Волоконно-оптичний кабель має сердечник, який виготовлено з матеріалу з підвищеним коефіцієнтом заломлення порівняно з його оболонкою. Оболонка створюється із двоокису кремнію ( $\text{SiO}_2$ ) з додаванням двоокису германію ( $\text{GeO}_2$ ), що покращує її оптичні характеристики[3].

Покриття оптичного волокна також виготовляється з  $\text{SiO}_2$  (двоокису кремнію), а основним захисним шаром є UV-акрилат, який забезпечує додатковий захист волокна.

Умови прокладання кабелю [3]:

- У ґрунті: Кабель може бути укладений у траншеї будь-якого типу ґрунту з використанням кабелеукладача.
- У кабельних каналізаціях або шахтах: Монтаж виконується за умови високих механічних вимог до кабелю.

Потужність сигналу та втрати:

Потужність оптичного сигналу вимірюється в логарифмічних одиницях — децибел до мілліват (дБм). Потужність сигналу, що дорівнює 0 дБм, відповідає значенню 1 мВт. Згасання сигналу характеризує втрати енергії (loss) у певному елементі системи. Чим більше загасання, тим більші втрати сигналу, що негативно впливає на якість передачі даних.

Використання оптичних з'єднувачів:

У даному розрахунку особливу увагу приділено монтажу кабелів. Планується активне застосування оптичних з'єднувачів, які дозволяють швидко та надійно з'єднувати оптоволоконний кабель на місці розриву.

На проектованій магістральній ділянці ВОСП планується використання як роз'ємних, так і нероз'ємних оптичних з'єднувачів. Роз'ємні з'єднання застосовуватимуться на обслуговуваних пунктах для з'єднання оптоволокна з відповідним обладнанням. У межах магістралі Івано-Франківськ – Косів знаходяться кілька проміжних населених пунктів, зокрема Коломия. Для цих населених пунктів також передбачено виділення частини каналів, що дозволить забезпечити їх необхідними інформаційними ресурсами, зокрема зв'язок з більшими містами, що є однією з основних переваг даного проекту.

Для проекрованої магістральної ділянки ВОСП буде застосовано багато нероз'ємних з'єднувачів, оскільки довжина оптичних кабелів не перевищує 6 км, а загальна довжина ділянки становить 91 км. Як метод нероз'ємного з'єднання на ділянці Івано-Франківськ – Косів буде використано зварювання, яке є стандартним способом з'єднання волокон. Зварювання забезпечує мінімальні втрати на рівні 0,05 дБ і має зворотне відображення, що не перевищує 55-60 дБ[3]. Перед процесом зварювання оптичні волокна очищають від захисного покриття та за допомогою спеціального інструменту підготовляють кінці для з'єднання. Потім кінці волокон фіксуються в зварювальній пристрої, який забезпечує їх точне розташування за трьома координатами. Позиціонування може виконуватись автоматично або вручну під контролем мікроскопа. Після точного налаштування волокон відбувається їх зварювання електричною дугою. Серед основних недоліків цього методу — висока вартість необхідного обладнання та вимога наявності джерела електроживлення на місці виконання робіт.

## **1.6 Технологія передач сигналів з використанням мультиплексорів**

Серед актуальних технологій в галузі оптичних ліній зв'язку можна виділити такі[4]:

- Dense wavelength division multiplexing (DWDM) – удосконалена версія технології WDM, яка використовує значно більшу кількість ультратонких довжин хвиль, що дозволяє передавати набагато більше інформації на великі відстані.
- Wavelength-division multiplexing (WDM) – метод, що дозволяє одночасно передавати кілька потоків різних довжин хвиль через один оптичний кабель, що значно підвищує пропускну здатність та ефективність використання оптичних ліній зв'язку.

- Coherent optical communication – інноваційна технологія, яка дозволяє здійснювати складні маніпуляції з передачею інформації в оптичних лініях зв'язку, що забезпечує більш високу продуктивність та стабільність сигналу.
- Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) – метод, який дозволяє з високою точністю оцінювати характеристики і стан оптичних ліній зв'язку під час роботи, допомагаючи виявляти пошкодження та інші аномалії.
- Silicon Photonics – технологія, що забезпечує інтеграцію оптичних ліній зв'язку безпосередньо на чіпах і процесорах, що сприяє значному зменшенню розмірів і вартості обладнання.
- Plastic Optical Fiber (POF) – інноваційний підхід, який передбачає використання пластикових волокон замість традиційних оптичних. POF є набагато дешевшим, гнучкішим та простішим у використанні, а також більш стійким до механічних пошкоджень і зносу.

Ці технології дозволяють значно поліпшити ефективність та надійність оптичних ліній зв'язку, забезпечуючи високу пропускну здатність, стабільність передачі та зниження витрат при збільшенні гнучкості у використанні.

У багатьох сучасних технологіях передача інформації через оптичні волокна здійснюється за допомогою імпульсів, що кодується в дворівневій дискретній формі (існує сигнал чи його немає). У цьому випадку відсутня аналогія з полярністю електричного сигналу. Смуга пропускання, швидкість поширення сигналу та вибрана схема кодування є визначальними факторами, що визначають пропускну здатність лінії передачі.

Обмеження смуги пропускання волоконно-оптичної лінії зумовлені явищем дисперсії, що призводить до її залежності від довжини хвилі. Це особливо яскраво проявляється в багатомодових оптичних волокнах, де дисперсія значно впливає на характеристики передачі.

Однією з найбільш перспективних технологій, яка дозволяє створювати масштабовані та гнучкі розгалужені оптичні мережі з практично необмеженим потенціалом для розширення смуги пропускання, є технологія хвильового мультиплексування (WDM, Wavelength Division Multiplexing), що показано на рис.1.5 і представлено вигляд передачі Wavelength Division Multiplexing[4]:



Рисунок 1.5 – Вигляд передачі Wavelength Division Multiplexing

На стороні передавання WDM кілька напівпровідникових лазерів (LD), кожен з яких випромінює світло різної довжини хвилі, налаштовуються для генерування відповідного світлового сигналу. Ці сигнальні потоки передаються через одне оптичне волокно за допомогою мультиплексора (MUX). На приймальній стороні використовується демультиплексор (DeMux), який розділяє світло за довжинами хвиль, після чого фотоприймач (ПД) приймає сигнал.

У порівнянні з передачею сигналу однією довжиною хвилі, передача з двома довжинами хвиль дозволяє подвоїти обсяг переданої інформації, а використання трьох різних довжин хвиль ще більше збільшує кількість переданих сигналів, оскільки додаються нові хвильові канали.

МСЕ-Т (підрозділ стандартизації Міжнародного союзу електрозв'язку) визначив два інтервали хвиль для WDM. Один з них — це стандарт з вузьким інтервалом хвиль, відомий як DWDM, який ідеально підходить для високопродуктивних далеких передач з великою ємністю. Інший стандарт, що має ширший інтервал хвиль, називається CWDM. Цей стандарт застосовується для передач на відстань від 50 до 80 км, де вимоги до ємності менш суворі[5]:

На рис.1.6 представлено послідовність хвиль Wavelength Division Multiplexing з різною довжиною хвилі. Аналізуючи даний рисунок можна зробити висновок, що при даній довжині хвиль від 1271нм до 1611нм найбільш шумозахищеними є хвилі нижнього діапазону. Це пояснюється тим, що при підвищенні частоти шуми менш накладаються один на інший і їх можна розділити і далі провести фільтрацію.

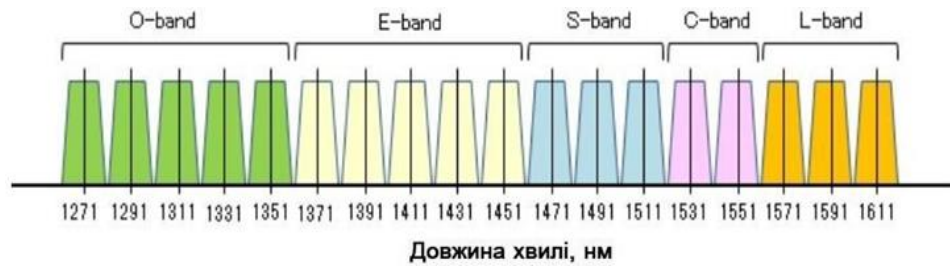


Рисунок 1.6 – Послідовність хвиль Wavelength Division Multiplexing

Центральна довжина хвилі складає 18 хвиль, які розподілені в діапазоні від 1271 нм до 1611 нм, охоплюючи такі групи, як O, E Band, S Band, C Band і L Band, з інтервалами по 20 нм між ними.

Використання технології WDM дозволяє орендувати не лише самі оптичні кабелі або волокна, а й окремі довжини хвиль. Це створює можливість реалізувати концепцію «віртуального волокна», що має значні комерційні переваги. Завдяки цьому в одному волокні можна одночасно передавати різні типи даних на різних довжинах хвиль.

Для ефективного використання оптичних волокон важливо мати можливість поступово збільшувати пропускну здатність мережі протягом тривалого часу та змінювати набір послуг без необхідності дорогого оновлення оптичного кабелю. Технологія WDM дає таку можливість[4]. Вона активно застосовується на великих міжміських лініях зв'язку, де потрібна висока смуга пропускання та мінімальні втрати сигналу. Мережі регіонального та міського рівнів, а також системи кабельного телебачення, мають великий потенціал для використання цієї технології.

На сьогоднішній день системи з частотними інтервалами між каналами 100 ГГц (~0,8 нм) та менше відомі як системи щільного хвильового мультиплексування DWDM. Практичні обмеження визначають вузький діапазон, який використовується в системах DWDM, розташований поблизу довжини хвилі 1550 нм, як найбільш ефективний для цієї технології.

На рис.1.7 представлено структурну схему з вузькою довжиною хвиль[5].

На даному рисунку показано що сигнал з ІТЕ-Т передавача GE поступає на транспондери ОЕО через оптичний мультиплексор на оптичний підсилювач, де отримує певну форму і поступає в лінію вводу, виводу. Основним блоком для приймання інформації є компенсатор хроматичної дисперсії, основна функція якого є виділення корисного сигналу.

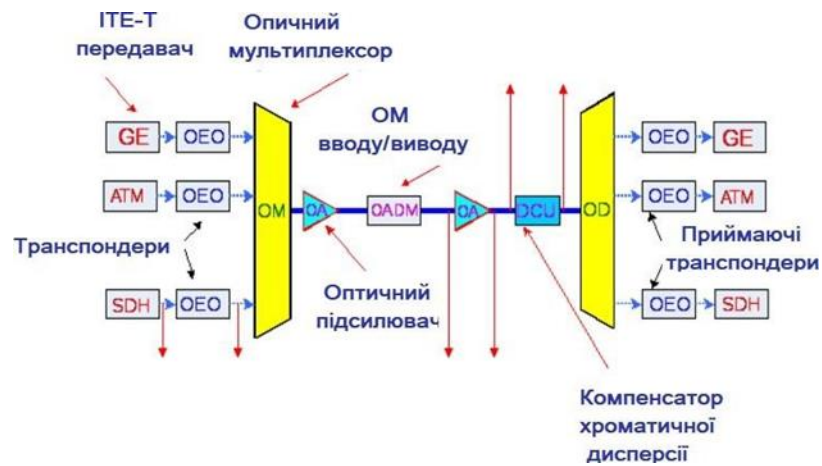


Рисунок 1.7 – Структурна схема з вузькою довжиною хвиль

Під час передачі через оптичні кабелі сигнал поступово слабшає. Для компенсації цього ефекту застосовуються оптичні підсилювачі, що дозволяють значно збільшити відстань передачі. Теоретично це дає можливість передавати дані на відстань до 4000 км без необхідності перетворення оптичного сигналу в електричний (для порівняння, для SDH ця відстань зазвичай не перевищує 200 км).

На даний момент технології WDM і DWDM є найбільш ефективними та економічними методами для значного збільшення смуги пропускання, доводячи свою надійність у реальних умовах експлуатації.

Завдяки застосуванню DWDM пропускна здатність оптичних ліній зв'язку часто зростає в сотні разів[5]. За прогнозами експертів, технологія DWDM ще не наблизилася до свого максимально можливого рівня пропускну здатності і має великий потенціал для подальшого розвитку.

Основною відмінністю між технологіями WDM і SDH є те, що WDM використовує різні довжини хвиль для передачі даних через окремі канали оптичного волокна. Це дозволяє значно збільшити пропускну здатність каналу шляхом збільшення кількості передавальних каналів. Технологія WDM застосовується для створення широкосмугових каналів зв'язку в телекомунікаційних системах, що дозволяє ефективно передавати велику кількість інформації.

З іншого боку, SDH використовує синхронну цифрову ієрархію для упакування даних у кадри та передачі їх через синхронну мережу[4]. SDH є стандартом для цифрової синхронної передачі даних через оптоволоконні лінії та розроблений для забезпечення ефективнішої передачі в порівнянні з традиційними аналоговими системами.

Вибір технології для проектування оптоволоконної системи передачі залежить від конкретних вимог і умов її застосування. Якщо потрібно передавати великі обсяги даних на високу швидкість на великі відстані, технологія WDM може бути більш ефективним вибором. Водночас, якщо основна вимога полягає в синхронізації та контролі передачі даних, а також у забезпеченні високої надійності системи, краще віддати перевагу технології SDH[4].

Також варто враховувати потенціал обладнання та можливості масштабування системи в майбутньому. Іншими важливими аспектами можуть бути витрати на установку та обслуговування, а також сумісність з іншими існуючими системами та стандартами.

### **1.7 Вибір напівпровідникових складових обладнання**

При проектуванні та створенні системи оптоволоконного зв'язку (ВОЛЗ) важливим етапом є вибір правильного обладнання, оскільки від цього залежить загальна ефективність і стабільність роботи всієї мережі. На стадії проектування потрібно ретельно визначити тип кабелів, оптичних з'єднувачів, волоконно-розподільних пристроїв, муфт та зварювальних апаратів, які будуть використовуватись.

Основними джерелами випромінювання в оптоволоконних системах є напівпровідникові лазери і світлодіоди. Світлодіоди (LED) генерують некогерентне світло в межах певної спектральної області шириною від 30 до 50 нм, що обмежує їх використання в багатомодових волокнах через широку дисперсію пучка. Найбільш доступні передавачі працюють на довжині хвилі 850 нм, що є стандартним для багатомодових волоконно-оптичних систем[5]. Однак для досягнення кращої ефективності передачі даних рекомендується використовувати більш довгі довжини хвиль, зокрема 1300 нм. Такий підхід зменшує втрати сигналу, але виготовлення випромінювачів для цих довжин хвиль є складнішим і значно дорожчим через високі вимоги до технології виробництва.

Лазери, на відміну від світлодіодів, є джерелами когерентного випромінювання з вузькою спектральною шириною (від 1 до 3 нм, в ідеалі монохроматичне). Завдяки такій характеристиці лазери генерують вузькі промені, що ефективно використовуються в одномодових оптичних волокнах. Для таких волокон зазвичай використовуються довжини хвиль 1300 або 1550 нм, хоча досліджуються також більш довгі довжини хвиль[5]. Швидкість

передачі інформації лазерами значно вища порівняно зі світлодіодами, що робить їх переважним вибором для високошвидкісних передач.

Однак лазери мають деякі обмеження: їх термін служби зазвичай коротший, ніж у світлодіодів, і вони складніші в плані проектування та експлуатації. Вихідна потужність лазерів сильно залежить від температури, тому для їх стабільної роботи необхідне впровадження системи зворотного зв'язку для регулювання струму. Крім того, лазерні джерела дуже чутливі до зворотного відбиття, що потребує додаткових заходів для захисту від цього ефекту.

Відбите світло, яке потрапляє на лазерну резонансну систему, може спричиняти як посилення, так і ослаблення вихідного сигналу внаслідок фазового зсуву. Нестабільність рівня сигналу може серйозно порушити функціональність оптичної лінії зв'язку, тому вимоги до величини зворотного відбиття в лазерних джерелах стають все більш суворими. Лазерні джерела також знаходять застосування в багатомодових оптичних волокнах, наприклад, у технології Gigabit Ethernet 1000Base-LX, де використовуються особливості лазерного випромінювання для забезпечення ефективної передачі даних на більші відстані[6]. Спектральні характеристики генераторів випромінювання показані на рисунку 1.8.

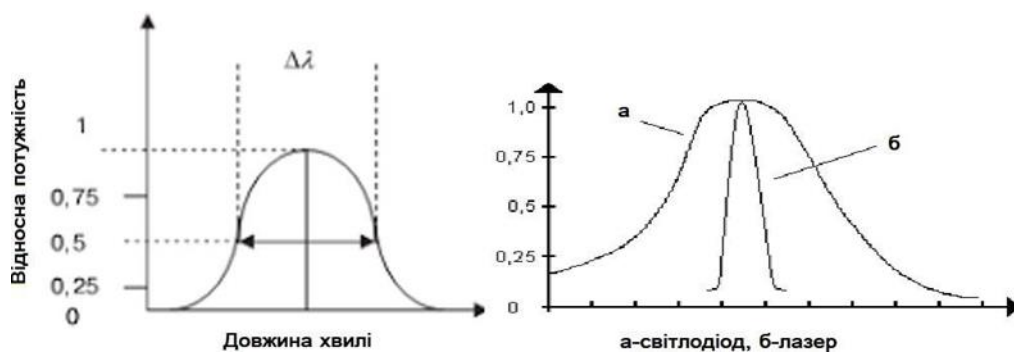


Рисунок 1.8 – Спектральні характеристики генераторів випромінювання

З даних характеристик видно що відносна потужність генераторів залежить від довжини хвилі. Із збільшенням довжини хвилі відносна потужність підвищується. На наступному рисунку, де показано характеристики лазерного і світлодіодного випромінювання видно, що спектр частот вужчий лазерного випромінювача.

Фотодіоди використовуються для виявлення радіації, оскільки вони швидко реагують на зміну сигналу. Вони характеризуються малим часом

відгуку, який вимірюється в наносекундах, і можуть працювати при напрузі від одного до кількох десятків вольт. Лавинні діоди є найбільш чутливими серед усіх типів, але для їхньої роботи необхідна висока напруга, що може досягати кількох сотень вольт. Крім того, їхні характеристики значно залежать від температури навколишнього середовища.

Характеристики діодів вибираємо згідно їх характеристик [5]. Чутливість фотодіода до різних довжин хвиль змінюється в залежності від використовуваного напівпровідникового матеріалу, демонструючи максимуми на різних ділянках спектра. Найбільш економічними є кремнієві фотодіоди, які мають максимальну чутливість в діапазоні довжин хвиль 800–900 нм, однак їх чутливість різко знижується при досягненні довжин хвиль 1000 нм. Для виявлення на більш довгих хвилях застосовують матеріали, такі як германій, арсенід індію та галій.

На основі детекторів і випромінювачів створюють готові компоненти, такі як приймачі, передавачі та трансивери. Ці пристрої мають електричний інтерфейс, наприклад TTL або ESL, і оптичний інтерфейс у вигляді роз'єму, зазвичай прикріпленого до оптоволоконної смужки, яка безпосередньо з'єднана з кристалом випромінювача або детектора [6].

В мережах SDH використовуються чотири основні типи функціональних модулів: термінальні мультиплексори, регенератори, мультиплексори вводу/виводу та крос-з'єднання. На рис. 1.9. представлено будову систем SDH [4].

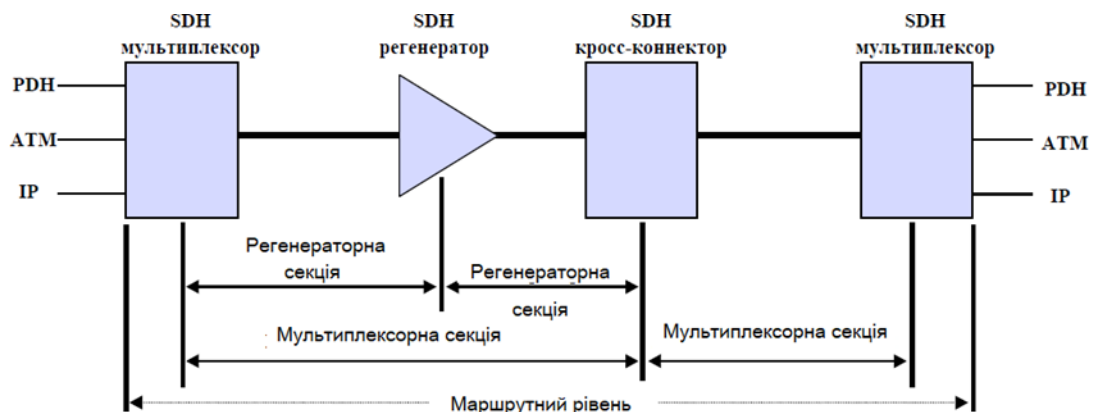


Рисунок 1.9 – Будова систем SDH

Термінальні мультиплексори (ТМ) є кінцевими пристроями в системах передачі, які обслуговують декілька каналів доступу, як електричних, так і

оптичних. Вони оснащені одним або двома оптичними входами та виходами, які часто називають колекторами. Два входи/виходи зазвичай реалізуються для забезпечення високої надійності і включають 100% лінійне та підсумовуюче резервування. Така схема резервування отримала назву 1+1. Для каналів доступу можливо як часткове, так і повне резервування окремих групових трактів. На рис. 1.10 представлено входи і виходи термінальних мультиплексорів[3]:

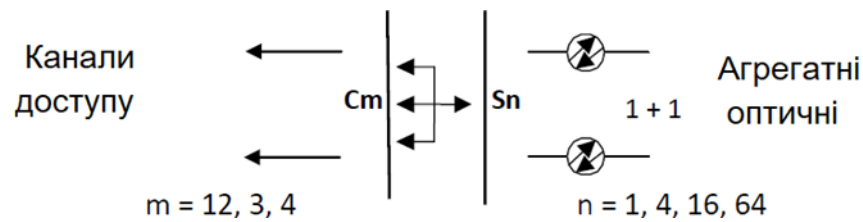


Рисунок 1.10 – Входи і виходи термінальних мультиплексорів

Мультиплексор Add/Drop (ADM) має суттєві відмінності від термінального мультиплексора (ТМ), зокрема наявністю двох або чотирьох оптичних загальних входів/виходів. Кількість каналів доступу в ADM відповідає такій же кількості, як і у ТМ, але в ADM інтерфейси (порти) поділяються на східні та західні. Крім того, мультиплексор Add/Drop здатний виконувати роль крос-комутатора для цифрових потоків, що належать до певного рівня мультиплексування (VC12, VC3, VC4). Процес перемикання відбувається або через зміну цифрового тракту, або через корекцію синхронізації[7]. Канали доступу мультиплексорів представлено на рис.1.11.

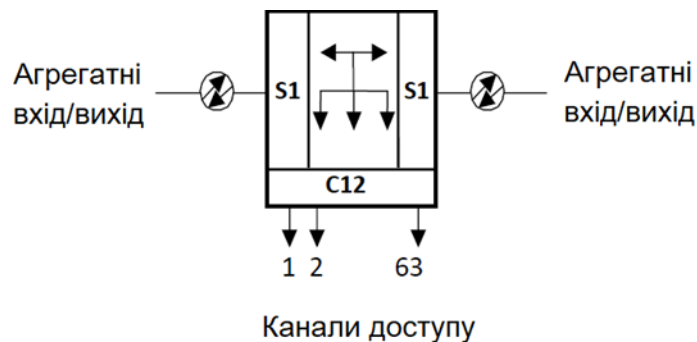


Рисунок 1.11 – Канали доступу мультиплексорів

Регенератори — це тип мультиплексорів, що мають два або чотири агреговані входи/виходи, зазвичай із застосуванням спеціальних службових каналів для доступу. Вони призначені для збільшення максимальної відстані між мережевими вузлами, дозволяючи ефективно посилювати сигнал і забезпечувати стабільну передачу даних на великі відстані. Агрегатні комутатори представлено на рисунку 1.12[8]:

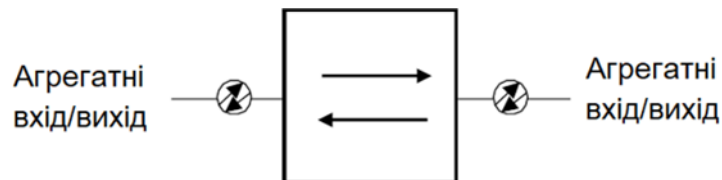


Рисунок 1.12 – Агрегатні комутатори

Цифрові комутатори крос-коннекту (DXC) — це пристрої, що виконують функцію перехресного з'єднання каналів, що можуть бути як постійними, так і тимчасовими (напівпостійними). Вони застосовуються в мережах із високою пропускну здатністю, де потрібно забезпечити гнучке та ефективне управління трафіком і напрямками передачі для різних користувачів. Така функціональність дозволяє оптимізувати навантаження і налаштовувати з'єднання за потребою в режимі реального часу. Комутатор з гнучкою системою управління на рис. 1.13[8]:

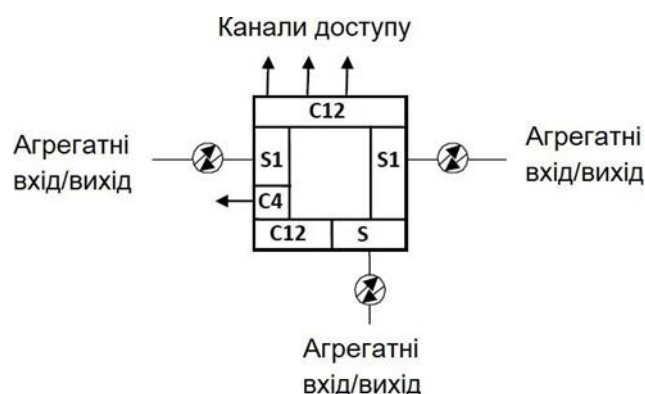


Рисунок 1.13 – Комутатор з гнучкою системою управління

Мультиплексор STM-16 FlexGain FOM2.5GL2 є одним з найбільш ефективних рішень для побудови оптичних мереж, що підтримують SDH ієрархію на рівнях STM-1, STM-4 та STM-16. Він дозволяє організовувати мультисервісні оптичні лінії з високою пропускнуою здатністю, підходить для мереж різної складності та інтегрується в мультисервісні транспортні платформи (MSTP). Це обладнання ідеально підходить для створення сучасних транспортних мереж, де важлива гнучкість і ефективність у роботі з різними типами трафіку.

У першому розділі магістерської роботи детально розглянуто основні аспекти оптоволоконних систем передачі (ВОСП), їх характеристики, структуру та переваги. Окремо було вивчено будову оптичних кабелів (ОК) та технології їх з'єднання, а також проведено обґрунтування вибору ОК для проекту. Крім того, здійснено аналіз різних технологій мультиплексування сигналів в оптоволоконних лініях зв'язку. В результаті аналізу було здійснено вибір відповідного обладнання, що відповідає вимогам проекту.

## 2. РОЗРОБЛЕННЯ ОСНОВНИХ ЧАСТИН ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

### 2.1 Особливості оптично волокнистого зв'язку

Лінійні споруди є однією з найбільш дорогих і складних частин телекомунікаційної мережі. Тому при проектуванні ВОСП необхідно особливу увагу приділяти мінімізації витрат на будівництво та експлуатацію телекомунікаційних ліній зв'язку. Крім того, важливо забезпечити, щоб система працювала не тільки економічно ефективно, але й надійно, гарантувавши безперервну та якісну передачу даних.

Оптично-волоконний зв'язок (ВОСП) є однією з найновіших технологій у сфері телекомунікацій, яка набирає популярності завдяки своїм численним функціональним та економічним перевагам. Серед основних переваг можна виділити високу несучу частоту, високу пропускну здатність, можливість мультиплексування сигналів, низький рівень втрат при передачі, складність несанкціонованого доступу, а також здатність передавати дані на великі відстані без необхідності в підсилювачах.

Однак, незважаючи на численні переваги, ВОСП мають і низку складнощів у експлуатації, пов'язаних з їх фізико-механічними властивостями, хвильовими характеристиками волокон, вимогами до захисту кабелів, а також специфікою комутаційних, розподільних і захисних пристроїв. Усе це вимагає особливої уваги, професіоналізму та ретельності при проектуванні, реалізації та подальшому обслуговуванні таких систем.

Проектна документація містить специфікації компонентів системи, кошторис, а також всі необхідні регламентні документи для реалізації проекту. Вона включає розрахунки технічних параметрів і характеристик обладнання, схеми прокладки кабелів і плани монтажу. Важливим етапом є також обґрунтування вибору топології мережі та архітектури внутрішньо-об'єктної системи.

Для успішного проектування ВОСП необхідно врахувати такі основні умови:

- Проведення експертних висновків щодо технічних можливостей для прокладки лінії, монтажу обладнання та їх подальшої експлуатації в конкретних умовах.
- Підбір типу та довжини оптоволоконного кабелю, виконання технічних розрахунків, включаючи коефіцієнт загасання сигналу, врахування інших

показників, які можуть змінюватися залежно від умов прокладки і експлуатації.

- Вибір обладнання та додаткових технічних ресурсів для забезпечення безперервної роботи мережі та захисту переданої інформації, а також для відповідності міжнародним стандартам обміну даними.
- Визначення способу прокладки оптоволоконного кабелю (повітряним методом на опорах або підземним). Цей вибір залежить від таких факторів, як кліматичні, атмосферні умови, рельєф, тип кабельної лінії, ґрунтові характеристики, а також інших потенційних ризиків.
- Підготовка та узгодження «скелетних схем», що визначають кількість точок підключення, структуру розгалужень і загальні принципи трасування.
- Створення специфікацій і переліків апаратного забезпечення, програмного забезпечення та пасивних компонентів, таких як підсилювачі, трансивери, муфти, термінали тощо.
- Обґрунтування проекту, консультування з замовником, контролюючими органами та підприємствами, а також узгодження всіх етапів і вимог.
- Проведення монтажних та пуско-налагоджувальних робіт із використанням спеціалізованих інструментів, техніки, вимірювальних приладів для точності і належного виконання.

Однією з ключових характеристик установки є те, що оптоволоконні лінії зв'язку в проекті мають значну протяжність, яка може досягати десятків кілометрів. Це дозволяє використовувати одну лінію зв'язку для з'єднання між різними сегментами кабелю, що є важливим аспектом для зниження витрат на прокладку додаткових ліній і підвищення ефективності експлуатації мережі.

## **2.2 Опис географічних характеристик прокладки магістралей.**

У цих розрахунках розглядається приклад прокладання волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) на магістральній ділянці між містами Івано-Франківськ і Косів.

Івано-Франківськ є одним із 425 міст України та посідає 28-е місце за чисельністю населення в країні. Дані про кількість жителів цього міста були

взяті з відкритих джерел. На ресурсі PopulationHUB можна знайти інформацію про населення кожного регіону світу, включаючи українські міста.

Транспортна інфраструктура обох міст розвинена і включає автомобільні дороги, залізничне сполучення, а також авіатранспорт, що забезпечує зручний зв'язок між ними.

Події, пов'язані з війною в Україні, яка розпочалася 24 лютого 2022 року, спричинили значне переміщення населення як всередині країни, так і за її межі. Це зумовило додатковий попит на ефективні системи зв'язку, включаючи магістральні волоконно-оптичні лінії, які можуть забезпечити надійну передачу інформації в умовах змін. Згідно з даними Аналітичного центру Cedos, що займається дослідженням впливу війни на міграцію населення як всередині країни, так і за її межами, внутрішнє переміщення населення у західні регіони України досягло значних масштабів. Ця тенденція залишається актуальною, особливо в контексті трагедії на Каховській ГЕС, що призвела до збільшення кількості людей, які змушені шукати нове місце проживання.

Ці обставини також спричинили значну релокацію бізнесу з постраждалих східних і південних регіонів до західної частини країни. Найбільш привабливими для підприємців стали Львівська та Івано-Франківська області.

Експерти KSE (Київська школа економіки) проаналізували фактори, які роблять ці регіони привабливими для бізнесу. До ключових критеріїв віднесено:

- відносну безпеку у порівнянні з іншими регіонами;
- сприятливі умови для соціокультурного й економічного розвитку.

Івано-Франківська область, зокрема, відзначається своїми унікальними рекреаційними ресурсами та соціокультурним потенціалом. Це створило можливість малому та середньому бізнесу (МСБ) сформуванню позитивне уявлення про території, куди вони планують переміститися для продовження своєї діяльності.

Івано-Франківщина є специфічним гірським районом, з достатньою чисельністю населення та ресурсним потенціалом, має добре розвинену мережу міських і сільських поселень. Ці населені пункти ефективно поєднані з обласним центром за допомогою автомобільних та залізничних шляхів.

Регіон також відіграє важливу роль у транзитній торгівлі між Україною та країнами Європейського Союзу. На території області функціонує декілька великих пунктів перетину автомобільних і залізничних магістралей. Особливу перевагу створює широка залізнична колія з Чернівців до Львова і далі до

польських Катовиць, яка розширює експортні можливості як для місцевих, так і для переміщених підприємств. Особливу увагу Івано-Франківська область приділяється відпочинковим базам, таким як Буковель.

Попри недостатню забезпеченість Івано-Франківської області енергетичними й водними ресурсами, до цих регіонів перемістилося чимало підприємств. Серед них представники таких галузей, як металообробка, приладобудування, легка та харчова промисловість, виробництво будівельних матеріалів, деревообробка та інші галузі промисловості.

Це стало можливим завдяки іншим важливим факторам, які вплинули на вибір бізнесу. Зокрема, вирішальну роль відіграли розвинена транспортна інфраструктура регіону та його близькість до міжнародних ринків збуту.

### **2.3 Оптимізація вибору маршрутних трас**

Прокладання кабелю залежить від розташування термінальних точок і потребує врахування низки вимог. Основними критеріями вибору траси є:

- мінімізація капітальних витрат на будівництво;
- зниження експлуатаційних витрат;
- забезпечення простоти обслуговування системи.

Маршрут кабелю повинен мати найкоротшу можливу відстань між термінальними точками та мінімальну кількість перешкод, які можуть ускладнювати і здорожувати процес будівництва. Зазвичай за межами густонаселених районів траси обираються вздовж смуг, відведених під автомагістралі, або вздовж сільських доріг.

Оптоволоконні системи передачі підтримують різні топології підключення пристроїв. Кожен пристрій із оптичним портом зазвичай оснащений окремими приймачем і передавачем, кожен із яких має власний роз'єм.

Однією з найпоширеніших і найпростішою у реалізації є топологія точка-точка. Вона передбачає підключення виходу передавача одного порту до входу приймача іншого порту через окреме оптичне волокно. Цей тип з'єднання забезпечує простоту налаштування і надійність передачі даних. Таким чином, для організації дуплексного з'єднання необхідно використовувати два волокна. Більш складні варіанти топології зазвичай базуються на принципі двоточкових з'єднань, що дозволяє забезпечити стабільну і надійну передачу даних у мережі.

Найпростішу схему топології магістральних ліній «крапка – крапка», котру буде використано для реалізації проектної частини даної магістерської роботи, оскільки ця топологія використовується для відрізків магістральних ліній, представлено на рис. 2.1[9].

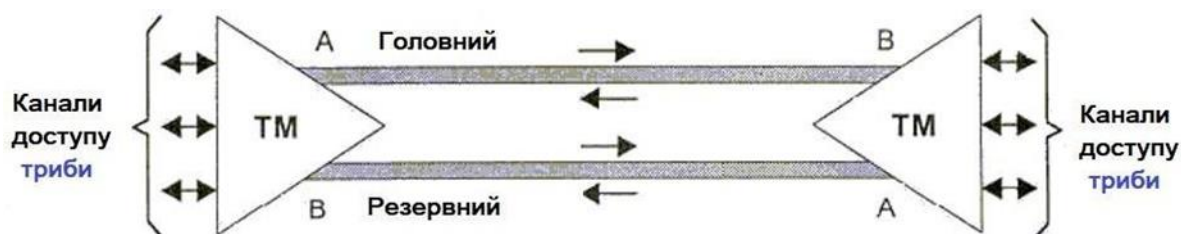
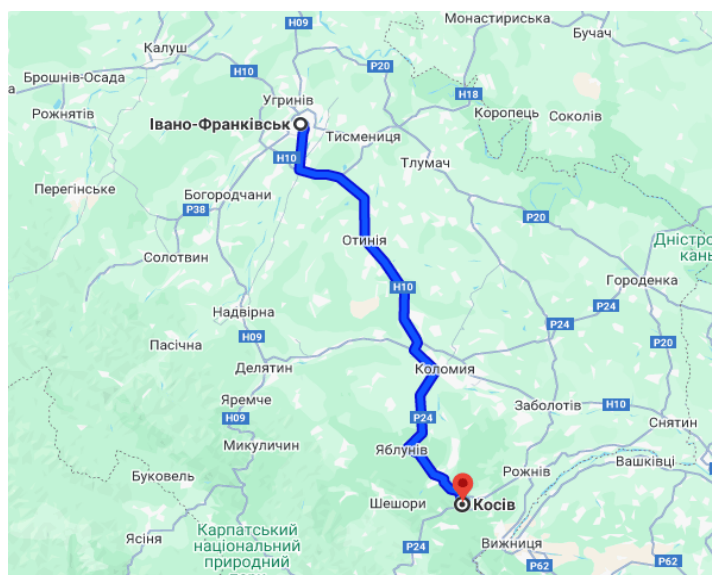


Рисунок 2.1 – Топологія магістральних ліній «крапка–крапка»

Вибір маршруту для прокладання волоконно-оптичних кабелів залежить від кількох ключових факторів, серед яких найбільш важливим є перетин маршрутом автомагістралі. Це рішення забезпечує зручний доступ технічного персоналу до місць прокладання кабелю, що полегшує встановлення регенераційних пунктів і дозволяє оперативно усувати несправності у разі пошкодження телекомунікаційної лінії.

Крім того, близькість населених пунктів уздовж траси створює сприятливі умови для розміщення регенераційних пунктів обслуговування (РПО). Використання наявних споруд, таких як районні вузли телекомунікацій (РВТ), дає змогу зменшити обсяг будівельних робіт. Це значно скорочує витрати на облаштування магістральної лінії зв'язку та підвищує ефективність будівництва. На рис.2.2. Представлено приклад маршруту траси.



## Рисунок 2.2 – Приклад маршруту траси

### 2.4 Обчислення параметрів компонентів каналу зв'язку

Кількість каналів зв'язку, які необхідно прокласти між обраними населеними пунктами, визначається переважно чисельністю населення цих пунктів, а також рівнем зацікавленості їхніх мешканців у взаємозв'язку. Рік перспективного проектування для магістерської роботи обирається залежно від економічного становища досліджуваного району.

Рівень зацікавленості населення у взаємозв'язку залежить від таких чинників, як політичні, економічні, культурні та соціальні відносини між населеними пунктами. Практично ця зацікавленість виражається через коефіцієнт тяжіння  $f_1$ , значення якого варіюються в певних межах. Для розрахунків використано коефіцієнт  $f_1 = 3\%$ . Для розрахунку каналів телефонного зв'язку користуються наближеним розрахунком згідно формул [7]:

$$n_{\text{тф}} = \alpha_1 \times f_1 \times y \frac{m_A m_B}{m_A + m_B} + \beta_1 \quad (2.1),$$

Формула (2.1) служить основою для подальших розрахунків. Розрахунки враховують такі параметри:

- $\alpha_1$  і  $\beta_1$  — коефіцієнти, що визначають фіксовану доступність послуг та допустимий рівень втрат. При допустимих втратах у 5%, ці параметри набувають значень  $\alpha_1 = 1,2$  та  $\beta_1 = 5,0$ .
- $y$  — питома навантаження, яке створюється одним абонентом. Для цих розрахунків приймається значення  $y = 0,06$  Ерл.
- $m_A$  і  $m_B$  — загальна кількість абонентів, які підключені до кінцевих станцій системи.

Середній рівень телефонізації населення прийнято рівним 0,3, що означає: на кожні 50 мешканців припадає 32 телефонних апарата.

На основі цих даних обчислюється загальна кількість абонентів у зоні дії автоматичної міжміської телефонної станції (АМТС). Для цього використовується формула (2.2) :

$$m = 0,4 \times Ht \quad (2.2).$$

Таким чином, підставивши значення в рівняння (2.1), можна визначити загальну кількість каналів.

Беручи до уваги, що первинний цифровий канал на 2 Мб/с складається з 30 стандартних каналів, формуємо 60 каналів.

Наступним кроком розрахунків є визначення кількості телефонних каналів і потоку, що проходять через проміжні пункти, згідно з наведеними таблицями, враховуючи задану кількість населення[8].

Кількість населення Івано-Франківська складає 273000 осіб

$$m_B = 91132 (\text{абонентів});$$

$$n_{\text{тф}} = 16 (\text{кількість каналів}).$$

Кількість населення Косова 32000 осіб.

$$m_B = 11228 (\text{абонентів});$$

$$n_{\text{тф}} = 9 (\text{каналів}).$$

Кількість населення Коломиї 61350 осіб

$$m_B = 18765$$

$$n_{\text{тф}} = 12 (\text{каналів}).$$

Також слід врахувати, що кабельна магістраль включає не тільки телефонні канали, а й канали інших типів зв'язку, які також повинні проходити через транзитні канали. Загальну кількість каналів між населеними пунктами можна визначити за формулою (2.3)[8]:

$$n_{\text{аб}} \gg 2n_{\text{тф}} \quad (2.3).$$

Також важливо враховувати канали для транзитного зв'язку, оренди та Інтернету. У результаті загальна кількість каналів розраховується за формулою (2.4)[8]:

$$n_{\text{загал}} = 2n_{\text{тф}} + n_{\text{оренд}} + n_{\text{internet}} + n_{\text{транзит}} \quad (2.4),$$

$де n_{\text{транзит}} = n_{\text{аб}} \cdot 0,4 = 2 \cdot 579 \cdot 0,4 = 463$  (канали) – кількість каналів для транзиту;

$n_{\text{оренд}} = n_{\text{аб}} \cdot 0,5 = 2 \cdot 579 \cdot 0,5 = 579$  (каналів) – кількість каналів для оренди;

$n_{\text{int}} = n_{\text{тф}} \cdot 0,8 = 579 \cdot 0,8 = 463$  (канали) – кількість каналів інтернет;

$n_{\text{заг.}} = 2 \times 579 + 463 + 579 + 463 = 2663$  (каналів).

Для розрахунку у формулі 2.4 приймаємо кількість абонентів 579 згідно таблиці і знаходимо кількість каналів для транзиту, оренди інтернету [8].

Загальна кількість каналів 2663. На основі отриманих розрахунків, кількість потоків E1 можна визначити за формулою (2.5)[8]:

$$n_{\text{заг}} = \frac{n_{\text{заг}}}{30} = \frac{2663}{30} \approx 79 \text{ (каналів)} \quad (2.5),$$

або 79x2Мбіт/с (потоки).

Таким чином, враховуючи необхідність забезпечення 79 потоків по 2 Мбіт/с або 2370 каналів на магістралі Івано-Франківськ – Косів, можна використовувати технології STM-1 і STM-4 для ефективною передачі даних.

- STM-1 містить 63 потоки по 2 Мбіт/с, що забезпечує 1890 каналів.
- STM-4 забезпечує 252 потоки по 2 Мбіт/с, що відповідає 7560 каналам.

Зважаючи на величину вимог до кількості каналів, STM-4 є більш підходящим варіантом для покриття потреб цього зв'язку, оскільки його пропускна здатність значно перевищує кількість необхідних каналів для цієї магістралі.

Отже, з урахуванням вимог до кількості каналів та пропускної здатності, STM-4 є оптимальним варіантом для реалізації зв'язку між Івано-Франківськом і Косовом через Коломию в рамках цього проекту.

Специфікація STM-4 передбачає:

- Можливість передачі 7680 8-бітних «голосових» кадрів кожні 125 мікросекунд.
- Загальна швидкість передачі даних становить 622,08 Мбіт/с.

Це дозволяє не лише покрити вимоги до кількості каналів, але й забезпечити високу якість передачі даних, що є критично важливим для зв'язку в таких масштабах, як між двома великими містами. STM-4 дозволяє ефективно обробляти великі об'єми даних і підтримувати різні типи зв'язку, такі як голосовий і інтернет-трафік.

## 2.5 Вибір довжини оптичного кабелю

Одним із ключових етапів проектування волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) є визначення довжини регенераційної ділянки (РД). Цей параметр визначає оптимальні відстані між пунктами регенерації сигналу, що забезпечують якісну передачу даних.

При використанні стандартного обладнання для лінійних трактів у поєднанні з рекомендованими оптичними кабелями максимальна довжина регенераційної ділянки обмежується кількома факторами:

- Енергетичними характеристиками системи, які включають енергетичний потенціал, рівні передачі та прийому сигналу, а також допустиме загасання на ділянці.
- Дисперсійними характеристиками оптичного кабелю, такими як групова затримка та хроматична дисперсія, що впливають на якість сигналу.

У процесі проектування довжина РД спочатку визначається на основі енергетичних характеристик. Цей параметр називають довжиною ділянки регенерації, обмеженою загасанням. Після цього виконують розрахунок максимальної довжини, з урахуванням впливу дисперсії, яка називається довжиною ділянки регенерації, обмеженою дисперсією.

Таким чином, підсумкова довжина РД визначається найменшим із отриманих значень, щоб забезпечити оптимальну роботу системи передачі даних. Для визначення максимальної проектної довжини волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) обирають найменше з двох отриманих значень. При проектуванні необхідно виконати два розрахунки, щоб встановити довжину регенеративної ділянки  $L_p$ , яка повинна бути меншою за отримані результати.

Регенеративна ділянка — це сегмент між двома оптичними регенераторами, що забезпечують відновлення сигналу. Для визначення довжини цієї ділянки необхідно врахувати ключові характеристики оптичного кабелю, зокрема:

- коефіцієнт загасання;
- питому дисперсію.

Загасання сигналу на регенеративній секції залежить від організації лінійного тракту. На цей параметр впливають не лише властивості самого кабелю, але й інші фактори, такі як:

- роз'ємні та нероз'ємні з'єднання, які застосовуються на ділянці;
- інші пасивні пристрої, включені в кабельну систему.

Оптимальний вибір довжини регенеративної ділянки забезпечує мінімізацію втрат сигналу та підвищення ефективності роботи всієї системи.

Загасання оптичного кабелю безпосередньо впливає на зниження потужності переданого сигналу, що, у свою чергу, обмежує максимальну довжину регенеративної ділянки. Іншим важливим фактором є дисперсія кабелю, яка спричиняє накладання переданих імпульсів, що призводить до їх спотворення.

Чим довша оптична лінія, тим значніші спотворення сигналу, викликані дисперсією. Це явище накладає додаткові обмеження на пропускну здатність кабелю, оскільки зі збільшенням довжини передача даних стає менш ефективною.

Сумарні втрати сигналу на регенеративній ділянці розраховуються у децибелах (дБ) за формулою (2.6)[8].

$$a_{\Sigma} = n_{p.z.} \times a_{p.z.} + n_{n.z.} \times a_{n.z.} + a_t + a_{ch.}, \quad (2.6),$$

де:

- $n_{p.z.}$  — кількість роз'ємних з'єднувачів. Для цього розрахунку приймаємо  $n_{p.z.} = 10$ .
- $a_{p.z.}$  — втрати в роз'ємних з'єднаннях. Приймаємо значення, рівне 0,25 дБ, що відповідає середньому рівню втрат у некаліброваних роз'ємах.
- $n_{n.z.}$  — кількість нероз'ємних з'єднань.

Основним фактором, що обмежує довжину ретрансляційної ділянки лінії зв'язку, у більшості випадків є втрати випромінювання, а не дисперсія сигналу [6].

Основні параметри втрат приймаємо згідно[9]:

- Втрати у волокні. Приймаємо значення ан.з. = 0,2 дБ/км.
- ат. Допустима зміна загасання через температурні коливання. Приймаємо ат = 1 дБ.
- ач. Допустима зміна характеристик компонентів ретрансляційної ділянки (РД) з часом. Приймаємо ач = 5 дБ.

Кількість нероз'ємних з'єднань у лінії визначається за формулою (2.7).

$$n_{\text{н.з.}} = \frac{L_{\text{max}\alpha}}{l_{\text{буд}}} - 1 \quad (2.7),$$

де:

- $L_{\text{буд}}$ . — будівельна довжина кабелю. У межах цього розрахунку приймаємо значення  $L_{\text{буд}} = 2$  км.
- $l_{\text{мах}}$  — відстань між регенераційними пунктами, які здійснюють обслуговування лінії.

Інформація про кожен із регенераційних пунктів представлена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Регенераційні пункти, що обслуговуються на зазначеній ділянці

Обслуговуваний пункт	Відстань між наступним пунктом, км
ОП-1	
ОРП-2	57
ОРП-3	34

$$n_{\text{н.з.ОП-2}} = \frac{24}{2} - 1 = 11;$$

$$n_{\text{н.з.ОП-3}} = \frac{17}{2} - 1 = 8;$$

$$n_{\text{н.з.ОП-4}} = \frac{18}{2} - 1 = 8;$$

$$n_{\text{н.з.ОП-5}} = \frac{42}{2} - 1 = 20;$$

$$n_{\text{н.з.ОП-6}} = \frac{32}{2} - 1 = 15;$$

$$\Sigma n_{\text{н.з.}} = 11 + 8 + 8 + 20 + 15 = 62$$

$$a_{\Sigma} = 10 \times 0,3 + 62 \times 0,2 + 1 + 5 = 21,4 \text{ дБ}$$

Наступним етапом є визначення довжини регенераційної ділянки (у кілометрах) з урахуванням втрат потужності сигналу. Розрахунок довжини виконується за формулою (2.8):

$$l_{\text{РД}} = \alpha \frac{E_{\text{п.}} - \alpha_{\Sigma}}{\alpha} = \frac{40 - 21,4}{0,22} = 85 \text{ км} \quad (2.8),$$

Де:

- $\alpha$  — коефіцієнт загасання оптичного волокна, для цього розрахунку прийнято  $\alpha = 0,22$  дБ.
- $E_{\text{п.}}$  — енергетичний потенціал волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП).

Енергетичний потенціал визначається як різниця між рівнем оптичного сигналу на виході передавача і мінімальним рівнем сигналу, який може прийняти оптичний приймач.

Чутливість приймального оптичного модуля (ПРОМ) — це найнижчий рівень оптичного сигналу, при якому забезпечується заданий коефіцієнт помилок (BER).

При проектуванні лінії передачі необхідно враховувати запас надійності, який забезпечує стабільну роботу системи у випадку зниження потужності передавача через старіння обладнання або появу додаткових втрат у системі.

Додаткові фактори втрат:

- Внесення нероз'ємних з'єднувачів у лінію.
- Вплив вигинів і механічного навантаження на кабель.

Типовий запас надійності становить від 3 до 6 дБ, що дозволяє компенсувати втрати потужності та забезпечити стабільність роботи системи протягом тривалого часу.

Хроматична дисперсія (CD) виникає внаслідок того, що світловий сигнал складається з хвиль різної довжини, кожна з яких рухається оптичним волокном із власною швидкістю. Цей ефект спричиняє розтягування імпульсів у часі під час їх поширення. Коли імпульси досягають приймача, відбувається погіршення співвідношення сигнал/шум (SNR), що збільшує ймовірність виникнення бітових помилок.

Даний ефект є критичним для систем високошвидкісного зв'язку, оскільки знижує їх ефективність. Провідні виробники одномодових волокон розробляють матеріали з оптимальними дисперсійними характеристиками. Залежність параметрів хроматичної дисперсії від довжини хвилі для сучасних одномодових волокон наведено на графіку (рис. 2.4).

Хроматична дисперсія (CD) є результатом того, що світлові імпульси складаються з хвиль різної довжини, кожна з яких рухається крізь оптичне волокно із власною швидкістю. Це призводить до того, що імпульси поширюються неоднорідно, розтягуючись у часі. У приймачі цей процес викликає зниження співвідношення сигнал/шум (SNR), що, своєю чергою, збільшує ймовірність виникнення помилок у передачі бітів.

У системах передачі даних хроматична дисперсія є важливим фактором, який необхідно враховувати, оскільки вона значно впливає на якість і надійність зв'язку. Провідні виробники одномодових оптичних волокон оптимізують свої продукти для мінімізації дисперсійного ефекту, що особливо важливо для високошвидкісних мереж. Графік, що ілюструє залежність дисперсійних параметрів сучасних одномодових волокон від довжини хвилі, наведено на рисунку 2.4[9]:

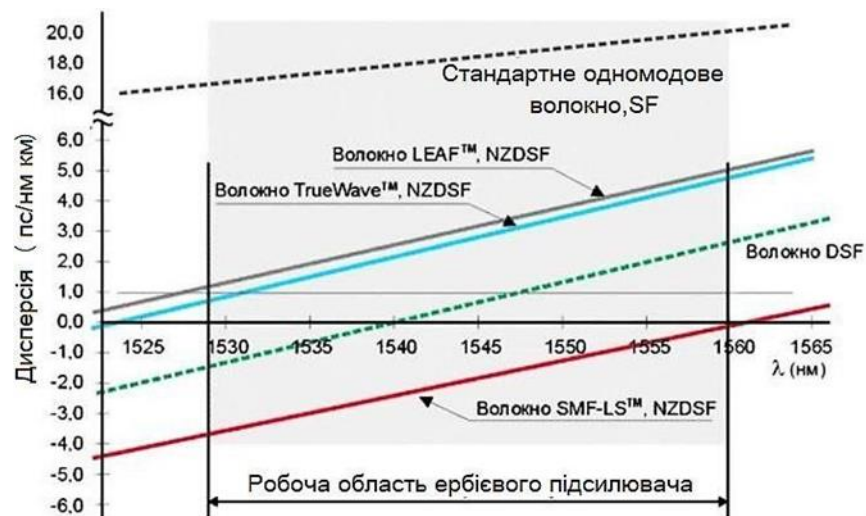


Рисунок 2.4 – Дисперсійні параметри одномодових волокон

Аналіз графіка дає змогу оцінити дисперсійні параметри для різних типів оптичних волокон. Стандартне одномодове волокно (SMF) зі ступінчастим профілем показника заломлення вирізняється високою технологічністю та порівняно низькою вартістю. Це робить його оптимальним вибором для роботи на довжині хвилі  $\lambda = 1,55$  мкм, де рівень оптичних втрат є мінімальним.

Дане волокно характеризується коефіцієнтом хроматичної дисперсії  $D(\lambda) = 18$  ps/(нм·км), що забезпечує ефективну передачу сигналу за умови врахування дисперсійних обмежень.

Волокна зі складнішою геометрією профілю показника заломлення, наприклад, W-подібним або трикутним, розроблені для зниження спектральної дисперсії. Завдяки такій конструкції мінімальне значення дисперсії досягається на довжині хвилі  $\lambda = 1,55$  мкм, де оптичні втрати є найменшими. Ці волокна належать до класу DSF (Dispersion Shifted Fiber) і забезпечують високу пропускну здатність та велику дальність передачі даних в межах одного з "вікон прозорості" кварцових волокон.

Дисперсійний параметр волокон DSF на хвилі  $\lambda = 1,55$  мкм складає приблизно  $D(\lambda) \approx 1$  ps/(нм·км)[9].

Проте використання таких волокон у системах спектрального ущільнення WDM і DWDM стикається зі складнощами через посилення нелінійних ефектів під час високощільного мультиплексування сигналів. Попри це, DSF-волокна ефективно застосовуються у звичайних високошвидкісних лініях телекомунікації, де такі обмеження не є критичними.

Дисперсійні характеристики оптичного волокна також впливають на визначення максимальної довжини регенераційної ділянки. Цей параметр обчислюється з урахуванням дисперсійного коефіцієнта відповідно до [10]:

$$l_{P_{Dmax}} = 47,6(\text{км}) \quad (2.9),$$

Де:

$B_{VV}$  — швидкість передачі даних, біт/с;

$\tau$  — середньоквадратичне питоме розширення імпульсу, яке для цього розрахунку становить 1,5 пс/км[10].

$$\tau = \frac{\tau_{xp}}{l} = \frac{3}{2} = 1,5(\text{пс/км}),$$

Де  $l = 2 \text{ км}$  — довжина будівельного кабелю.

Таким чином, довжина регенераційної ділянки ( $l_{рд}$ ), обчислена за формулою (2.9), повинна відповідати наступній умові [10]:

$$l_{рдmax} \geq l_{рд}$$

$$47,6 \text{ км} \geq 31,3 \text{ км.}$$

Результати проведених розрахунків показують, що довжина регенераційної ділянки становить  $l_{рд} = 31,3$  км, і жодна з окремих трас не перевищує цього значення. Таким чином, при проектуванні волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) на зазначених ділянках немає необхідності встановлювати оптичні підсилювачі. Це значно знижує витрати на закупівлю додаткового обладнання, а також на виконання монтажних робіт, що є суттєвою перевагою запропонованого розрахунку.

Крім того, для систем із спектральним ущільненням (WDM і DWDM) рекомендовано використовувати комбінації волокон NZDSF+ та NZDSF-. Таке поєднання дозволяє забезпечити високу швидкодію ВОСП, зводячи до мінімуму загасання сигналу, що підвищує ефективність і стабільність системи.

### 3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ РОЗРОБЛЮВАНОЇ МЕРЕЖІ

#### 3.1 Розрахунок показника заломлення компонентів оптичного волокна

Одним із найважливіших характеристик оптичних волокон є числова апертура. Ця величина визначає показник заломлення всіх компонентів оптичного каналу, включаючи середовище, в якому функціонують світловод, джерело світла та приймач випромінювання.

Для забезпечення мінімальних втрат енергії важливо, щоб отвори з'єднувальних елементів були точно узгоджені. Апертура характеризується кутом між оптичною віссю волокна і краєм світлового конуса, що потрапляє в торець світловода, за умови виконання повного внутрішнього відбиття.

Для визначення показника заломлення оболонки  $n_2$  використовуються оптичні параметри кабелю. Розрахунки виконуються для числової апертури  $NA = 0,12$  за формулою (2.10)[11].

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.10),$$

де  $n_1$  — показник заломлення сердцевини,  $n_1 = 1,4781$ . Показник  $n_2$  визначається за формулою (2.11):

$$n_2 = \sqrt{n_1^2 - NA^2} \quad (2.11),$$

$$n_2 = \sqrt{1,4781^2 - 0,12^2} = 1,4729.$$

Знаючи значення показників заломлення оболонки  $n_2$  та сердцевини  $n_1$ , можна обчислити відносну різницю показників заломлення за формулою (2.12):

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.12),$$

$$\Delta = \frac{1,4781+1,4729}{1,4781} \approx 2,47$$

Основним параметром, що використовується для характеристики оптичних волокон, є нормована частота  $V$ , яка розраховується за формулою (2.13)[12]:

$$V = \frac{2 \times \pi \times a \times NA}{\lambda} \quad (2.13),$$

де  $a$  – є радіус серцевини оболонки,  $a = 5$  мкм;

$n_1$  – показник заломлення серцевини,  $n_1 =$

1,4781;  $n_2$  – показник заломлення оболонки,

$n_2 = 1,4729$ .

$$V = 2 \times 3,4 \times 5 \times 10^{-6} \times \frac{0,12}{1,55 \times 10^{-6}} = 2,43$$

Наступним етапом наших розрахунків буде обчислення параметрів кабелю, виходячи наявності одномодових волокон зі ступінчастим профілем показника заломлення з діаметром серцевини  $2_a = 10$  мкм та критичної довжини хвилі  $2_{\omega_0} = 1250$  нм, діаметр поля моди 20 при довжині хвилі 1550 нм. Розрахунок проводимо за формулою (2.14).

$$2_{\omega_0} = \frac{2,6 \times \lambda}{V_c \times \lambda_c} \times 2a \quad (2.14),$$

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

$\lambda_c$  – це критична довжина хвилі, вище якої у світловоді може спрямовуватися лише основна мода;

$V_c$  – критична нормована частота, для одномодового режиму відповідає  $V_c = 2,405$ .

Для довжини хвилі  $l = 1550$  нм:

$$\omega_0 = \frac{2,6 \times 1550}{2,405 \times 1250} \times 10 = 13 \text{ мкм}$$

Це дає можливість вибору оптичних волокон з діаметром серцевини, що не перевищує 13 мкм. Умови для ефективної передачі оптичного світла на вхідному торці волоконного світловода визначаються принципом повного внутрішнього відображення. Такий світловод пропускає тільки те світло, яке знаходиться в межах певного тілесного кута  $\theta_a$ , величина якого залежить від кута повного внутрішнього відображення  $\theta_v$

Тілесний кут  $\theta_a$ , що визначається числовою апертурою, обчислюється за допомогою формули (2.18):

$$NA = \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(1,4781^2 - 1,4729^2)} = 0,12 \quad (2.15)$$

Кут повного внутрішнього відображення  $\theta_v$  і апертура кута падіння оптичного променя  $\theta_a$  а взаємопов'язані. Чим більше значення кута  $\theta_v$ , тим менше апертура волокна  $\theta_a$ . Отже, потрібно прагнути, щоб кут падіння променя на межу сердечник – оболонка  $w_p$  був більший за кут повного внутрішнього відображення  $\theta_v$  і знаходився в межах від  $\theta_v$  до 90 градусів, а кут введення променя в торець світловоду  $w$  укладався в апертурний кут  $\theta_a$  ( $w < \theta_a$ ).

Розрахуємо критичний кут  $\theta_c$ , для якого ще виконується умова повного внутрішнього відображення, за формулою (2.16):

$$\theta_c = \sqrt{\left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (2.16),$$

$$\theta_c = \sqrt{\left(1 - \frac{1,4729}{1,4881}\right)^2} = 3,518 \times 10^{-3} \text{ рад.} \approx 0,202^\circ$$

### 3.2 Забезпечення надійності передачі даних

Для забезпечення стабільної роботи STM-4 за схемою 1+1 оптимальним вибором є оптичний кабель з двома незалежними волокнами. Це рішення гарантує високу надійність передачі даних завдяки резервуванню. Надійність є ключовим фактором для реалізації схеми 1+1, оскільки оптичні кабелі повинні мати високий рівень захисту від зовнішніх впливів, таких як волога та пил. У цій схемі оптичний сигнал передається через два різні шляхи, використовуючи два окремі кабелі, що забезпечує безперебійну роботу системи, навіть якщо один з кабелів відключений. Одномодовий кабель, з меншим рівнем дисперсії і вузьким спектром, дозволяє здійснювати більш надійну передачу сигналів на великих відстанях, знижуючи втрати в кабелі. Крім того, при виборі оптичного кабелю важливо враховувати маршрут його прокладання, наявність океанських переходів та загальну довжину кабелю.

Для цього розрахунку було вибрано оптичний кабель A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125, який повною мірою задовольняє встановлені вимоги до надійності та захисту. Цей кабель забезпечує подвійний рівень захисту від механічних пошкоджень і від проникнення води та інших зовнішніх факторів, що гарантує довговічність і стабільність роботи системи.

Модель A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 має подвійний захисний шар з матеріалів HDPE та LLDPE, що робить його ідеальним для передачі оптичних сигналів на великі відстані.

Основні технічні характеристики кабелю включають: – кількість волокон: 2; – діаметр волокон: 9/125 мкм; – пропускна здатність на кожне волокно: 12,5 Гбіт/с; – тип оболонки: подвійна оболонка з HDPE/LLDPE; – максимальна довжина кабелю: до 4 км; – робоча температура: від -25°C до +70°C; – ступінь захисту: IP68.

Вигляд зовнішнього кабелю A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 з подвійною оболонкою HDPE/LLDPE в розрізі представлено на рис. 2.5[11]



Рисунок 2.5 – Зовнішній кабель A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 з подвійною оболонкою HDPE/LLDPE

Цей кабель також відзначається високою пропускнуою здатністю волокон, що дозволяє здійснювати передачу даних на великій швидкості, відповідно до стандарту STM-4. Робочий температурний діапазон (-25°C до +70°C) гарантує ефективну експлуатацію кабелю в різних кліматичних умовах, що забезпечує його надійність у різноманітних середовищах.

Крім того, варто підкреслити, що зовнішній кабель A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 має підвищений рівень захисту, що дає можливість використовувати його на великих відстанях та в умовах інтенсивних зовнішніх впливів.

Обґрунтування вибору кабелю A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 для забезпечення належної роботи STM-4 за схемою 1+1 обумовлено кількома важливими факторами[13]:

- Наявність подвійної оболонки з HDPE/LLDPE забезпечує надійний захист кабелю від зовнішніх впливів, таких як волога, механічні пошкодження та зміни температури.
- Оптичні волокна кабелю характеризуються низькою дисперсією та мінімальною атенюацією, що забезпечує стійкість сигналу на великих відстанях.
- Кабель відповідає міжнародним стандартам ITU-TG.652D, IEC60793-2-50 Type B1.1 та Telcordia GR-20-CORE, що підтверджує його якість та придатність для використання в системах передачі даних на великих відстанях.

- Робоча температура кабелю в межах від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$  дозволяє експлуатувати його в різних умовах навколишнього середовища.

З огляду на зазначені технічні характеристики та переваги, оптичний кабель А-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 з подвійною оболонкою з HDPE/LLDPE є найбільш підходящим вибором для забезпечення стабільної роботи STM-4 за схемою 1+1.

Таким чином, завдяки високій надійності, відмінній пропускну здатності та високому рівню захисту, зовнішній кабель А-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 є ідеальним рішенням для успішної реалізації системи STM-4 в схемі 1+1.

### 3.3 Оцінка негативних впливів в оптичному кабелі на похибку передачі даних у мережах

Світловоди, які розміщені в загальному сердечнику оптичного кабелю, можуть взаємодіяти з сусідніми волокнами. Рівень взаємних перешкод у оптичному кабелі визначається конструкцією сердечника кабелю, зокрема, від взаємного розташування оптичних волокон. Ступінь впливу між оптичними волокнами можна оцінити шляхом розрахунку вторинних параметрів взаємодії двох сусідніх волокон. Захищеність від перешкод обчислюється за допомогою формули (2.17):

$$A_z = 20 \log \left| \frac{2}{N^2 mL} \right| \quad (2.17).$$

Перехідне загасання на кінцевому відрізку визначається за допомогою формули (2.18):

$$A_1 = A_z + \alpha L \quad (2.18),$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт загасання оптичного волокна [дБ/км];

$L$  – це довжина регенераційної ділянки оптичного кабелю (км);

$m$  – є коефіцієнт зв'язку між волокнами,  $m = 0,6 \div 0,7$ ;

$N$  – є коефіцієнт проникнення поля через оболонку оптичного волокна, який розраховують за формулою (2.19)[13]:

$$N = \frac{g_{12}g_{23} \times e^{-kt}}{(1 - P_{12}P_{23} \times e^{-2kt})} \quad (2.19),$$

де  $k$  – коефіцієнт втрат в оболонці, що розраховується за формулою (2.20):

$$K = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} \quad (2.20),$$

де  $t$  – оболонки,  $t = 1 \div 3$  мкм;

$g_{12}$  і  $g_{23}$  – є коефіцієнти заломлення на межі сердечника ( $n_1$ ), оболонки ( $n_2$ ), повітря ( $n_3$ ).

$$g_{12} = 2n_1(n_1 + n_2),$$

$$g_{23} = 2n_2(n_2 + n_3).$$

При параметрах оптичного волокна:

$$t=3, \text{ мкм}; \alpha=0,22, \text{ дБ/км}; L = 85 \text{ км};$$

$$f=1, 935 \times 10^{14} \text{ Гц}.$$

Вибираємо коефіцієнт проникнення поля через оболонку волокна згідно[12]

$$N = 6,67 \times 10 \quad .$$

Після цього знаходимо захищеність від перешкод згідно [12]

$$= 220 \text{ (дБ)}.$$

Перехідне згасання на дальньому кінці отримуємо[12]

$$A_l = 220 + 0,2 \times 85 = 237 \text{ (дБ)} .$$

Коефіцієнт  $N$  характеризує частку просочування енергії через оболонку оптичного волокна і, якщо його значення менше  $10^{-5} \div 10^{-6}$ , то для використовуваних на практиці ОВ і величин  $L-A_0 > 120$  дБ;  $A_3 > 90$  дБ,  $A_1 > 100 \div 120$  дБ; та їх взаємним впливом можна знехтувати

### 3.4 Фактори впливу на оптичні мережі

Ключовим завданням під час розрахунків волоконно-оптичних мереж є не лише задоволення сучасних потреб, а й забезпечення умов для майбутнього розширення та інтеграції вже існуючих фрагментів у загальну структуру мережі. Водночас мережа повинна демонструвати високу ступінь надійності.

Основні чинники, які впливають на надійність таких мереж, включають: топологію мережі, показники надійності волоконно-оптичного обладнання та стабільність функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Надійність визначається як здатність мережі виконувати свої функції, що полягають у передачі даних із встановленою точністю на визначених напрямках протягом заданого проміжку часу.

Надійність волоконно-оптичних систем передачі визначається стабільністю роботи їх компонентів, таких як мультиплексори, комутатори, маршрутизатори тощо. Важливу роль відіграє також вибір схеми захисту, який може включати[14]:

- резервування окремих ділянок мережі шляхом прокладки альтернативних трас (схеми 1+1 і 1:1);
- створення самовідновлюваних кільцевих структур мережі із застосуванням схем 1+1 та 1:1;
- резервування термінального обладнання за схемами 1:1 та 1:N;
- відновлення функціональності мережі за рахунок обходу пошкодженого вузла;
- впровадження систем оперативного перемикання для мінімізації часу відновлення.

в пасивному режимі. У разі збою в роботі основного кільця трафік автоматично перенаправляється на резервне. Рівень надійності волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) значною мірою залежить від якості її компонентів — оптичних кабелів, муфт, а також кінцевих пристроїв, а також від ефективності технічного обслуговування.

У процесі розрахунку ВОСП необхідно враховувати характеристики різних типів оптичних кабелів, конструкції оптичних муфт і можливості кінцевого обладнання.

Для забезпечення високої надійності мереж зв'язку важливо суворо дотримуватися технологічних стандартів під час будівництва волоконно-оптичних ліній.

Процес усунення відмов на ВОСП характеризує показник – час відновлення ( $t_B$ ), значення якого в даному проекті приймаємо рівним 0,4 год. Час безвідмовної роботи становить  $T_{Б.Р.} \gg t_B$  і  $T_{Б.Р.} = 7,72 \times 10^4$  год.

З цього випливає, що інтенсивність потоку відмов буде рівна (2.18):

$$V = \frac{1}{T_{Б.Р.}} \quad (2.18),$$

$$V = \frac{1}{7,72 \times 10^4} = 12,95 \times 10^{-6} (\text{год}^{-1}).$$

На наступному етапі розрахунків буде виконано визначення інтенсивності відмов для волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) з довжиною  $L = 57L = 34L = 91$  км, що відповідає відстані між містами Івано-Франківськ і Косів. Обчислення проводиться за формулою (2.20):

$$\lambda = \frac{V}{L} \quad (2.20),$$

$$\lambda = \frac{12,95 \times 10^{-6}}{133} = 97,4 \times 10^{-9} \text{ год}^{-1}/\text{км}.$$

Одним із ключових показників, що характеризує якість функціонування волоконно-оптичної лінії зв'язку (ВОЛЗ), є щільність пошкоджень мережі. Цей параметр показує кількість несправностей, що припадають на кожні 100 км траси за один рік. Його значення розраховують за допомогою формули (2.21):

$$\mu = \lambda \times 100 \times 8760 \quad (2.21),$$

де 8760 – кількість годин на рік; 100 – оптимальна довжина траси, коли визначається значення  $m_1$ :

$$m_1 = 97,4 \times 10^{-9} \times 100 \times 8760 = 85,3 \times 10^{-3}.$$

### 3.5 Перевірка швидкодії перетворення інформації мультиплексором

Мультиплексор є пристроєм, який дозволяє поєднувати кілька сигналів у єдиний потік. Завдяки цьому, навіть за обмеженої кількості оптоволоконних кабелів можна забезпечити одночасну передачу кількох потоків у режимі реального часу. Таке обладнання є незамінним у випадках, коли кількість доступних кабелів недостатня.

Відповідно до інформації, наведеної в технічному завданні, розрахунок необхідної швидкості цифрового потоку для заданої кількості потоків E1E1E1 здійснюється за формулою (2.22):

$$S_{\text{котр.}} = 2,048 \times N_{\text{кцт}} \quad (2.22),$$

де 2,048 Мбіт/с – швидкість одного ПЦТ (первинного цифрового тракту);  
 $N_{\text{ПЦТ}}$  – кількість необхідних ПЦТ.

$$S_{\text{потр}} = 2,048 \times 79 = 162 \text{ Мбіт/с.}$$

Кожен кадр стандарту E1E1E1 містить 256 біт, які розподілені між 32 часовими інтервалами (таймслотами). Кожен із цих таймслотів складається з 8

біт, що використовуються для передачі інформації. Частота передачі даних становить 8000 кадрів за секунду. Таким чином, для кожного окремого каналу даних (таймслоту) забезпечується пропускна здатність у 64 кбіт/с.

Вибір швидкості цифрового потоку здійснюється відповідно до стандартної сітки швидкостей SDH. Обрана швидкість має відповідати наступній умові:

$$S_K \geq S_{\text{котр}} \times K_p,$$

де  $K_p$  – коефіцієнт запасу в розвитку мережі, значення її коливається 1,4 ÷ 1,5;

$$S_K = 162 \times 1,5 = 243 \text{ Мбіт/с.}$$

Враховуючи розраховану швидкість цифрового потоку, оптимальним рішенням є використання рівня STM-4 із пропускною здатністю до 622 Мбіт/с. Цей вибір забезпечує не тільки відповідність поточним вимогам розрахунку, але й створює резерв для майбутнього масштабування мережі.

У рамках проекту доцільно використовувати мультиплексор STM-4 ADM-1/4 SDH, який забезпечує необхідну швидкість передачі даних та підтримує інтеграцію з існуючими мережевими рішеннями. Такий підхід гарантує надійність роботи мережі та гнучкість її подальшого розвитку.

Зовнішній вигляд мультиплексора STM-4 ADM-1/4 SDH наведено на рис. 2.6[14].



Рисунок 2.6 – Конструкція мультиплексора ADM-1/4 SDH

Устаткування серії SparkLight представляє собою сучасні компактні, потужні та високощільні мультисервісні SDH-вузли, які призначені для роботи

з різними типами сигналів, такими як PCM (голос, дані), PDH (E1, E3), SDH (STM-1, STM-4, STM-16) та Ethernet (FE, GbE). Це обладнання також підтримує технології SDH/xWDM, забезпечуючи високу ефективність передачі даних.

Мультиплексор SparkLight ADM-1/4 нового покоління відрізняється своєю універсальністю та компактністю. Його багатофункціональна платформа дозволяє надавати широкий спектр високоефективних послуг, включаючи:

- міжмережеве з'єднання локальних мереж (LAN);
- доступ до глобальної мережі Інтернет;
- передачу голосу, даних і мультимедійного контенту.

Такі технічні можливості роблять SparkLight ADM-1/4 ідеальним вибором для реалізації розрахунків, спрямованих на створення надійної, швидкої та масштабованої інфраструктури зв'язку.

Використовуючи мультиплексор SparkLight ADM-1/4 в якості вводу/виводу в кільцевих мережах або як віддалений термінальний мультиплексор, забезпечується значне підвищення ефективності використання смуги пропускання Ethernet. Це досягається завдяки підтримці протоколів GFP, VCAT і LCAS, які дозволяють оптимізувати трафік та зберігати високу продуктивність на всіх етапах передачі. Крім того, цей мультиплексор підтримує тимчасовий поділ каналів (TDM), що забезпечує можливість підключення в будь-якій точці мережі SDH.

Однією з головних переваг SparkLight ADM-1/4 є наявність вбудованих додаткових інтерфейсів, що дозволяє легко адаптувати систему до конкретних вимог користувачів. Можливість простого конфігурування через встановлення інтерфейсних модулів робить це обладнання надзвичайно гнучким і простим в експлуатації.

Крім того, вбудований Ethernet комутатор другого рівня OSI забезпечує передачу Ethernet-трафіку за схемами "крапка-крапка" (P2P) та "крапка-багато крапок" з багатьма можливостями захисту трафіку на рівнях SDH або L2 комутатора, що забезпечує високий рівень надійності та безперервної роботи мережі.

Мультиплексор ADM-1/4 SDH володіє рядом ключових характеристик, що робить його оптимальним вибором для установки STM-1 мікрохвильового з'єднання за схемою "крапка-крапка". Основні технічні властивості включають:

- Вбудований комутатор L2: забезпечує ефективне управління Ethernet трафіком на другому рівні OSI, що дозволяє покращити якість та ефективність з'єднань.

- Радіорелейний захист: підтримка різних механізмів захисту на базі радіорелейних систем та SDH, що забезпечує безперебійну роботу мережі, навіть у разі пошкодження ліній зв'язку.
- Комплексне управління: управління мережею за допомогою Java WebStart та SNMP, що дозволяє здійснювати моніторинг і налаштування в реальному часі.
- xWDM ущільнення: застосування технології WDM для підвищення пропускної здатності мережі шляхом комбінування кількох оптичних каналів на одному оптоволоконному лінії.

Ці характеристики дозволяють пристрою ADM-1/4 SDH бути дуже універсальним і ефективним в організації надійного з'єднання на великих відстанях, що особливо важливо для мікрохвильових систем STM-1.

(рис.2.7)[15] Використання мультиплексора ADM-1/4 SDH для кільцевої топології

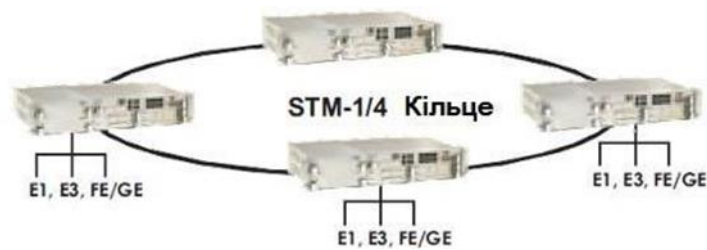
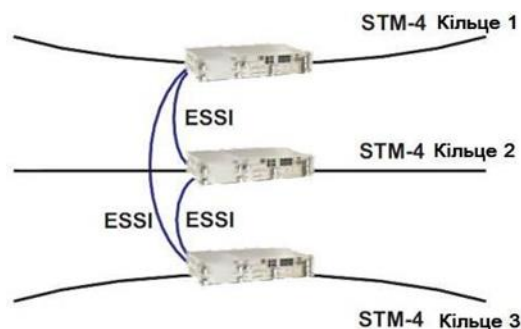


Рисунок2.7 – Використання мультиплексора ADM-1/4 SDH для кільцевої топології

Для побудови кільцевої топології досить використовувати центральний модуль SMADM розміром 1U, що дозволяє комутувати ADMSTM-4 ідо8E1 та 6E1 другорядних портів.

Схема центрального модуля SDHSTM-4 (рис.2.8)



## Рисунок 2.8 – Схема центрального модуля SDHSTM-4

Оскільки для забезпечення зв'язку використовується кабель з одномодовим оптичним волокном, яке характеризується тільки хроматичною дисперсією, при роботі з таким волокном застосовуються значення дисперсії, які нормуються на ширину спектра джерела в нанометрах та на кілометр довжини волокна. Це значення отримують, називаючи питомою хроматичною дисперсією.

Дисперсія може виникати через дві основні причини: некогерентність джерела випромінювання та наявність великої кількості мод. Хроматична дисперсія (або частотна) складається з двох складових: матеріальної дисперсії та хвилеводної дисперсії (внутрішньомодової).

Будь-яке джерело випромінює спектр довжин хвиль, що мають незначні відмінності і розповсюджуються з різними швидкостями. Хвильова хроматична дисперсія обумовлена властивостями матеріалу, зокрема, залежністю показника заломлення від довжини хвилі випромінювання.

Коефіцієнт хроматичної дисперсії (пс/(нм·км)) може бути як позитивним (коли спектральні компоненти з більшою довжиною хвилі поширюються швидше), так і негативним (коли це відбувається навпаки). Існує також конкретна довжина хвилі, для якої дисперсія дорівнює нулю.

Залежність хроматичної дисперсії (с/км) від питомої хроматичної дисперсії визначається за допомогою формули (2.23)[14]:

$$r_{xp} = D(\lambda) \times \Delta\lambda \quad (2.23),$$

де  $D(\lambda)$  – є питома хроматична дисперсія, пс/(нм·км);

$\Delta\lambda$  – ширина спектра випромінювання джерела, одиниця виміру – нм.

Значення питомої хроматичної дисперсії  $D(\lambda)$  до розрахунку хроматичної дисперсії  $\tau_{xp}$  згідно з формулою (2.24) беремо з таблиці 2.1.

$$D_\lambda = 6kc / (\text{нм} \cdot \text{км}) \quad (2.24),$$

де  $\Delta\lambda = 1,2$  нм.

Параметри повної сукупності елементів кабельної системи повинні задовольняти наступну нерівність (2.25)[14]:

$$\Sigma l_{рд}\alpha + n_{н.з.}\alpha_{н.з.} + n_{р.з.}\alpha_{р.з.} + Z \leq E_k \quad (2.25),$$

де  $l_{рд}$  – довжина регенераційної ділянки;  
 $\alpha$  – коефіцієнт загасання оптичного кабелю;  
 $n_{н.з.}$  – кількість нероз'ємних з'єднань;

$Z$  — енергетичний запас, який варіюється в межах  $2 \div 3$  дБ і використовується протягом експлуатації волоконно-оптичного каналу зв'язку. Це запаси витрачаються на старіння елементів, а також на впровадження нових з'єднувачів, які не підлягають роз'ємному ремонту, під час ремонтних робіт або модернізацій.

Перевіряємо, чи виконується нерівність для довжини регенераційної ділянки:

$$85 \times 0,22 + 62 \times 0,02 + 10 \times 0,25 + 2 \leq 30, \\ 24,44 \leq 30.$$

Нерівність виконується.

Для проведення розрахунків було висунуто гіпотезу, що використовуються наступне:

– автоматичний зварювальний апарат – Inno Instrument View 5 класу core alignment нового покоління «View» з типовими втратами на стику 0.02 дБ (рис. 2.9)[15]



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд зварювального апарату Inno Instrument View 5 для з'єднання волокон

– роз'ємні з'єднання типу SC (кераміка) (рис. 2.10)[15] із середніми втратами на довжині хвилі 1,5 мкм для одномодового волоконного світловоду зі значенням 0,25 дБ.

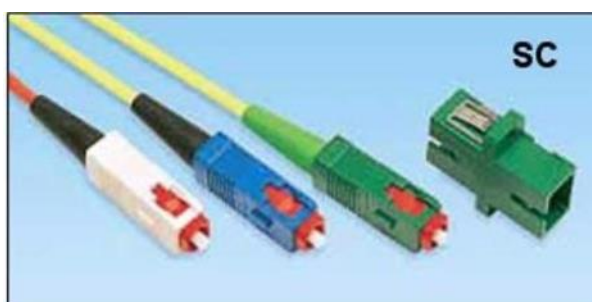


Рисунок 2.10 – Вигляд оптичних з'єднувачів: SC

### 3.6 Розрахунок працездатності системи

Загальний енергетичний потенціал, що враховує як втрати, так і подачу енергії в оптичне волокно, визначається як повний запас потужності системи у децибелах, за допомогою формули (2.26):

$$\Pi = P_{кер} - a_{вх} - a_{вих} - P_{кр \text{ мін}} \quad (2.26),$$

$$\Pi = -3 - 0,5 - 0,5 - (-31) = 27 \text{ дБ.}$$

Отримана величина відповідає встановленій нормі.

Енергетичний запас системи передачі обчислюється як різниця між повним запасом потужності та сумарним згасанням. Для працездатної системи значення енергетичного запасу має бути додатним.

Надійність є однією з основних характеристик сучасних магістралей та мереж зв'язку. Основні показники надійності включають:

- Інтенсивність відмов ХХХ (години);
- Можливість безвідмовної роботи для заданого інтервалу часу  $P(t_0)P(t_0)P(t_0)$ ;
- Середнє напрацювання на відмову  $T_0T_0T_0$  (години);
- Середній час відновлення  $T_vT_vT_v$  (години);
- Коефіцієнт готовності  $K_gK_gK_g$ ;
- Інтенсивність відновлення МММ (1/год).

Розрахунок показників надійності магістралі базується на таких умовах: відмови елементів магістралі є раптовими, незалежними один від одного, а їх інтенсивність постійна протягом усього періоду експлуатації.

Інтенсивність відмов визначається за формулою (2.28)[15]:

$$X_{\text{сум}} = n \times X_1 + L X_2 \quad (2.28),$$

де  $n$  – кількість кінцевих пунктів,  $n=6$ ;

$L$  – довжина лінії,  $L= 91$  км;

$X_1$  – інтенсивність відмов кінцевого пункту,  $X_1 = 1/\text{час}$  ( $10^{-7}$ );

$X_2$  – інтенсивність відмов одного кілометра лінійно-кабельних споруд,  $X_2 = 1/\text{км}$  ( $5 \times 10^{-8}$ ).

$$X_{\Sigma} = n \times X_1 + L \times X_2 = 6 \times 10^{-7} + 91 \times 5 \times 10^{-8} = 7,15 \times 10^{-6}$$

Середнє напрацювання на відмову визначається за формулою (2.29) [13]:

$$T_{0X_{\Sigma}}^{-1} \quad (2.29),$$

$$T_0 = \frac{1}{7,17 \times 10^{-6}} = 13,9 \times 10^3.$$

Середній час відновлення для системи вказується в довідкових даних на певну апертуру, і для цього розрахунку становить 0,4 год. [13]

Коефіцієнт готовності системи визначається за формулою (2.30) [15]:

$$K_{\text{гот}} = \frac{T_0}{T_0 + T_B} \quad (2.30),$$

$$K_{\text{гот}} = \frac{13,9 \times 10^3}{13,9 \times 10^3 + 0,4} = 0,97.$$

Коефіцієнт простою системи передачі визначаємо за формулою (2.31) і становитиме:

$$K_k = 1 - K_{\text{гот}} \quad (2.31),$$

$$K_k = 1 - 0,97 = 0,03.$$

Інтенсивність відновлення системи визначаємо за формулою (2.32):

$$M = \frac{1}{T_B} \quad (2.32),$$

$$M = \frac{1}{0,4} = 0,6.$$

Ймовірність безвідмовної роботи за різні інтервали часу можна розрахувати за формулою(2.33)[14]:

$$P(t_0) = e^{(-X_{\Sigma}T_0)} \quad (2.33),$$

Результати розрахунків зведені у таблиці 2.2

Таблиця 2.3 – Можливість безвідмовної роботи

Ймовірність безвідмовний роботи P(t)	Інтервал часу t, год				
	0	1	72	86	40
	1	0.9999	0.989	0.877	0.269

У цьому розділі магістерської роботи були визначені ключові аспекти проектування волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП), здійснений аналіз географічних та економічних характеристик термінальних пунктів. Крім того, проведено розрахунки основних параметрів системи. Згідно з результатами розрахунків для даного проекту була обрана проста топологічна схема «крапка – крапка», що є типовою для магістральних ліній зв'язку. Розрахункове з'єднання має протяжність 91 км і проходить вздовж автошляху, що є оптимальним варіантом з огляду на зручність будівництва та технічного обслуговування. Вибір цього маршруту обумовлений важливим критерієм, що забезпечує легкий доступ до траси для прокладання оптичного кабелю і мінімізацію витрат на інфраструктуру при підтримці надійності мережі.

Розроблено структурну схему, яка визначає відстані між населеними пунктами, а також обрано оптимальну кількість каналів для передачі даних. Для цього було розраховано необхідну кількість каналів: 79 каналів по 2 Мбіт/с. Ця технологія повністю задовольняє технічні вимоги розрахунку,

забезпечуючи необхідну кількість каналів для передачі даних між населеними пунктами.

Згідно з проведеними розрахунками, довжина регенераційної ділянки становить 91 км, і жодна з окремих ділянок не перевищує це значення. Це означає, що при проектуванні ВОСП на зазначених ділянках не потрібно встановлювати оптичні підсилювачі. Такий підхід дозволяє знизити витрати на придбання додаткового обладнання та монтажні роботи, що є важливою перевагою розробки.

Для реалізації розробки було обрано кабель A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125, який відповідає технічним вимогам, а також мультиплексор STM-4 ADM-1/4 SDH, що повністю задовольняє вимоги щодо пропускної здатності та ефективності роботи мережі.

Була проведена оцінка похибки для розробленої мережі. Дані похибок взяті з літератури.[14] Передача даних оцінена з основних складових:

$$\Delta\epsilon = \Delta_T + \Delta_{\text{шв}} + \Delta_z + \Delta_\phi + \Delta_{\text{вз}} + \Delta_{\text{вт.о}}, \quad \text{де}$$

$\Delta_T$  – температура

$\Delta_{\text{шв}}$  – швидкість перетворення інформації мультиплексора

$\Delta_z$  – показники заломлення компонентів оптичного волокна

$\Delta_\phi$  – похибка зміни форми сигналів

$\Delta_{\text{вз}}$  – похибка взаємодії сусідніх волокон

$\Delta_{\text{вт.о}}$  – коефіцієнт втрат в оболонці

$$\Delta\epsilon = 0.001 + 0.011 + 0.0013 + 0.03 + 0.0013 + 0.0015 = 0.046\%$$

З розрахунку видно, що найбільша похибка становить 0.03% від зміни передачі форми сигналів, зокрема фази і амплітуди.

## ВИСНОВКИ

Магістерська робота виконана на тему: Удосконалення передачі даних у мережах. У процесі виконання роботи було досягнуто поставлену мету, а також отримано наступні результати:

У першому розділі магістерської роботи детально розглянуто основні аспекти оптоволоконних систем передачі (ВОСП), їх характеристики, структуру та переваги. Окремо було вивчено будову оптичних кабелів (ОК) та технології їх з'єднання, а також проведено обґрунтування вибору ОК для проекту. Крім того, здійснено аналіз різних технологій мультиплексування сигналів в оптоволоконних лініях зв'язку. В результаті аналізу було здійснено вибір відповідного обладнання, що відповідає вимогам розробки.

1. Проведено комплексний аналіз тенденцій розвитку телекомунікаційних мереж. За результатами цього аналізу були визначені географічні та економічні характеристики термінальних пунктів для проєктованої ВОСП, зокрема маршруту між містами Івано-Франківськ та Косів.
2. Виявлено ключові аспекти технологій мультиплексування сигналів, що дозволило вибрати метод мультиплексування DWDM як оптимальний для реалізації в даному проєкті.
3. Здійснено необхідні технічні розрахунки для проєктування ВОСП. За результатами цих розрахунків були визначені кількість зв'язкових каналів, довжина регенераційних ділянок, апертури, надійність обладнання та інші параметри для оптичного волокна.
4. Оцінено варіанти траси для прокладання ВОСП, і в результаті було обрано тип прокладки — вздовж існуючої автодороги.
5. Розроблено схему організації зв'язку з урахуванням довжин регенераційних ділянок ВОСП. При виборі обладнання були також враховані потреби в наданні послуг зв'язку для проміжних населених пунктів.

Всі отримані показники якості зв'язку, засновані на результатах розрахунків та аналізу, відповідають міжнародним стандартам та вимогам і взяті з відповідної технічної літератури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ВОЛЗ (волоконно-оптичні лінії зв'язку) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/hxvai> – (дата звернення до ресурсу: 01.12.2024 р.).
2. ВОЛС [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/hxway> – (Дата звернення до ресурсу: 01.12.2024 р.).
3. Монтаж ВОЛС [Електронний ресурс] // Типи (види) оптичних роз'ємів – Режим доступу: <http://surl.li/hxwrg> – (Дата звернення до ресурсу: 02.12.2024 р.).
4. Що таке мультиплексування з довжиною хвилі (WDM, CWDM, DWDM) [Електронний ресурс] // Фосс – Режим доступу: <http://surl.li/hyaae> – (Дата звернення до ресурсу: 02.12.2024 р.).
5. Волоконно-оптичний кабель HELUCOM® A-DQ(ZN)2Y [Електронний ресурс] // Sivax – Режим доступу: <http://surl.li/hxujl> – (Дата звернення до ресурсу: 03.12.2024 р.).
6. А. Ліствін, В. Листвин. [Електронний ресурс] // Вимірювання втрат у волоконно-оптичних лініях зв'язку – Режим доступу: <http://surl.li/huwor> – (Дата звернення до ресурсу: 04.12.2024 р.).
7. Чисельність населення Івано-Франківськ [Електронний ресурс] // Population – Режим доступу: <http://surl.li/htvul> – (Дата звернення до ресурсу: 04.12.2024 р.).
8. Вимушена міграція і війна в Україні (24 лютого — 24 березня 2022) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/gmyru> – (Дата звернення до ресурсу: 01.12.2024 р.).
9. Google maps [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/kmzx> – (Дата звернення до ресурсу: 04.12.2024 р.).
10. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СВІТЛОВОДІВ НА ДОВЖИНУ [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/hu9ao> – (Дата звернення до ресурсу: 05.12.2024 р.).
11. Волоконно-оптичний кабель Corning A-DF(ZN)2Y(ZN)2Y 2x12E9/125 HDPE/LLDPE A-DF(ZN)2Y [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://surl.li/hwolw> – (Дата звернення до ресурсу: 02.12.2024 р.).
12. Сергій Кабиш [Електронний ресурс] // Надійність – насамперед – Режим доступу: <http://surl.li/hvnma> – (Дата звернення до ресурсу: 07.12.2024 р.).

13. ADM-1/4 SDH мультиплексор вводу-виводу [Електронний ресурс] // Енергомир звязок в енергетиці – Режим доступу: <http://surl.li/hwoqr> – (Дата звернення до ресурсу: 07.12.2024 р.).
14. Хроматична дисперсія складається із складових. Дисперсія оптичних волокон. Інші методи вимірювання ХД [Електронний ресурс] // Інформаційний журнал Саморозвиток – Режим доступу: <http://surl.li/hvraz> – (Дата звернення до ресурсу: 05.12.2024 р.).
15. Автоматичний зварювальний апарат [Електронний ресурс] // Inno Instrument View 5 – Режим доступу: <http://surl.li/hwozt>, Deps – (Дата звернення до ресурсу: 05.12.2024 р.).
16. Грищенко Г. Світ роз'ємів СКС на долонях. Оптика // Мережі та телекомунікації. – 2002.