

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»  
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки  
Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій


**Пояснювальна записка**  
до кваліфікаційної роботи

бакалавр  
(назва ступеня вищої освіти)

на тему « Проектування транспортної мережі зв'язку на основі тропосферної системи передач »

Виконав: студент 4 курсу,  
групи 401ТТ  
спеціальності 172 "Телекомунікації  
та радіотехніка"

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Пустовіт В.С. 

(прізвище та ініціали)

Керівник Лисечко В.П. 

(прізвище та ініціали)


Рецензент

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія  
Кондратюка»  
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
робототехніки  
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
Ступінь вищої освіти Бакалавр  
Спеціальність 172 "Телекомунікації та радіотехніка"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,  
електроніки та телекомунікацій

 О.В. Шефер

«01» квітня 2025 р.

## З А В Д А Н Н Я

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ

Пустовіту Вадиму Сергійовичу

1. Тема проекту (роботи) «Проектування транспортної мережі зв'язку на  
основі тропосферної системи передач»

керівник роботи Лисечко Володимир Петрович, к.т.н., доцент

затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.03.2025 року

№ N 306/1-ф,а .

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Стандарти зв'язку, що  
використовуються. Дозволені частотні діапазони. Типи та характеристики  
тропосферних станцій. Топографічні карти місцевості. Частотний діапазон  
роботи (ГГц). Пропускна здатність мережі (Мбіт/с).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно  
розробити) Системи первинного групоутворення. Плезіохронна цифрова  
ієрархія PDH. Проектування мережі зв'язку PDH. Вибір обладнання.

Вибір топології проектованої мережі зв'язку. Розрахунок тропосферної лінії. Розрахунок енергетичного потенціалу тропосферної лінії. Результати розрахунків якості функціонування ТРРЛ.

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

- 1) Актуальність, мета та задачі розроблення;
- 2) Системи первинного групоутворення, що існують;
- 3) Проектування мережі зв'язку PDH;
- 4) Запропонована структура тропосферної лінії;
- 5) Розрахунки якості та готовності мережі;
- 6) Висновки.

6. Дата видачі завдання 01.04.2025 р

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітка
1	Системи первинного групоутворення. Загальні принципи побудови систем первинного групоутворення.	22.04.25	I	20%	Пл. 1,2
2	Плезіохронна цифрова ієрархія PDH. Проектування мережі зв'язку PDH.	08.05.25		40%	Пл. 3
3	Вибір топології проектованої мережі зв'язку. Вибір обладнання.	22.05.25	II	60%	Пл. 4
4	Розрахунок тропосферної лінії. Результати розрахунків якості функціонування ТРРЛ.	30.05.25		80 %	Пл. 5
5	Робота над висновками та оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра.	10.06.25	III	100%	Пл.6

**Студент**

 Пустовіт В.С

( підпис )

(прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

 Лисечко.В.П

( підпис )

(прізвище та ініціал)

## РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 58с., 11 рис., 6 табл., 13 джерел.

Мета роботи – розробка проекту транспортної мережі зв'язку на основі тропосферної системи передач з урахуванням технічних характеристик обладнання, особливостей поширення радіохвиль у тропосфері та вимог до якості зв'язку.

В даній роботі розглядається розвиток сучасних телекомунікаційних технологій, створення надійних та ефективних транспортних мереж зв'язку, особливо в умовах складного рельєфу місцевості або віддалених регіонів. Тропосферні системи передач забезпечують стабільний зв'язок на великі відстані без необхідності прокладання кабельних ліній, що робить їх особливо актуальними для створення магістральних каналів зв'язку.

Результати роботи можуть бути використані для проектування реальних транспортних мереж зв'язку в регіонах зі складними географічними умовами, а також для модернізації існуючих систем зв'язку.

## ABSTRACT

The work contains : 58 pages, 11 illustration, 6 tables., 13 sources.

The purpose of the work is to develop a project for a transport communication network based on a tropospheric transmission system, taking into account the technical characteristics of the equipment, the features of radio wave propagation in the troposphere and the requirements for communication quality.

This work examines the development of modern telecommunications technologies, the creation of reliable and efficient transport communication networks, especially in conditions of complex terrain or remote regions. Tropospheric transmission systems provide stable communication over long distances without the need for cable laying, making them particularly relevant for creating backbone communication channels.

The results of this work can be used for designing real transport communication networks in regions with complex geographical conditions, as well as for modernizing existing communication systems.

## ЗМІСТ

Вступ.....	2
1. Системи первинного групоутворення.....	3
1.1 Загальні принципи побудови систем первинного групоутворення ....	5
1.2 Структура циклу апаратури первинного групоутворення .....	8
1.3 Апаратурна реалізація систем первинного групоутворення .....	11
1.4 Плезіохронна цифрова ієрархія PDH.....	15
1.4.1 Технологія плезіохронної цифрової ієрархії .....	16
1.4.2 Структура кадру вторинної системи мультиплексування.....	18
1.4.3 Основні недоліки плезіохронних систем мультиплексування ...	20
2. Проектування мережі зв'язку PDH .....	22
2.1 Вибір топології проектованої мережі зв'язку.....	23
2.1.1 Синтез кільцевої топології проектованої мережі .....	28
2.1.2 Вибір топології проектованої мережі .....	30
2.2 Вибір обладнання.....	31
2.3 Вибір середовища розповсюдження сигналу .....	33
3. Розрахунок тропосферної лінії .....	35
3.1 Якість зв'язку та готовність тропосферних ліній .....	36
3.2 Розрахунок енергетичного потенціалу тропосферної лінії .....	38
3.3 Розрахунок надійності зв'язку при завмираннях сигналів .....	42
3.3.1 Вплив плоских завмирань .....	44
3.3.2 Визначення коефіцієнта появи завмирань.....	47
3.3.3 Вплив селективних завмирань .....	49
3.3.4 Завмирання викликані дощем .....	52
3.4 Результати розрахунків якості функціонування ТРРЛ .....	54
Висновки.....	57
Список літератури.....	59
Додаток А.....	61
Додаток Б.....	78

## Вступ

У сучасному світі телекомунікаційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні швидкого та надійного обміну інформацією. Розвиток технологій передачі даних призвів до створення різноманітних систем мультиплексування, серед яких особливе місце займають системи первинного групоутворення та плезіохронна цифрова ієрархія (PDH).

Актуальність даної роботи полягає в дослідженні принципів побудови та функціонування систем первинного групоутворення, які є фундаментальною основою для створення сучасних телекомунікаційних мереж. Особлива увага приділяється технології плезіохронної цифрової ієрархії, яка, незважаючи на появу більш сучасних технологій, продовжує використовуватися в багатьох телекомунікаційних мережах по всьому світу.

Метою даної роботи є дослідження систем первинного групоутворення, проектування мережі зв'язку на основі технології PDH та проведення розрахунків тропосферної лінії зв'язку для забезпечення надійної передачі даних.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- дослідження загальних принципів побудови систем первинного групоутворення.
- аналіз структури циклу апаратури первинного групоутворення та її апаратурної реалізації.
- вивчення технології плезіохронної цифрової ієрархії, її структури та недоліків.
- проектування мережі зв'язку PDH з вибором оптимальної топології та обладнання.
- розрахунок параметрів тропосферної лінії зв'язку з урахуванням факторів, що впливають на якість передачі сигналу.

## 1. Системи первинного групоутворення

У цифрових системах передачі даних з великою кількістю каналів, що належать до вищих рівнів ієрархії, зазвичай застосовуються два основні підходи до формування лінійного цифрового сигналу:

1. Безпосереднє кодування аналогових сигналів, особливо це стосується ширококутових каналів або груп каналів.

2. Мультиплексування з часовим поділом, яке передбачає об'єднання декількох цифрових потоків нижчого рівня на передавальній стороні та їх подальший розподіл на приймальній стороні системи.

Обладнання першого типу містить лише один, але високотехнологічний кодек, що потребує високої точності та швидкодії, що ускладнює побудову мережі. Воно оптимальне для ширококутових сигналів.

Обладнання другого типу є основним при створенні високошвидкісних цифрових систем. Хоча воно потребує більшої кількості кодерів і декодерів, мережа стає більш гнучкою, дозволяючи розміщувати кодеки ближче до джерел інформації, передаючи по лінії лише високошвидкісні цифрові сигнали. Часове групування може бути реалізовано як синхронним, так і асинхронним способом об'єднання цифрових потоків нижчого рівня. При синхронному об'єднанні всі потоки, що об'єднуються, генеруються одним спільним генератором.

При асинхронному об'єднанні об'єднуються потоки з ідентичними номінальними швидкостями, але створені різними задаючими генераторами, чії миттєві швидкості можуть незначно відрізнятися. Системи вищих рівнів не повинні висувати вимоги до структури цифрового

сигналу систем нижчого рівня. Об'єднання цифрових потоків може відбуватися трьома способами: посимвольно, поканально або посистемно.

На рис. 1. а) і б) показано принципи об'єднання цифрових потоків посимвольний та поканальний.

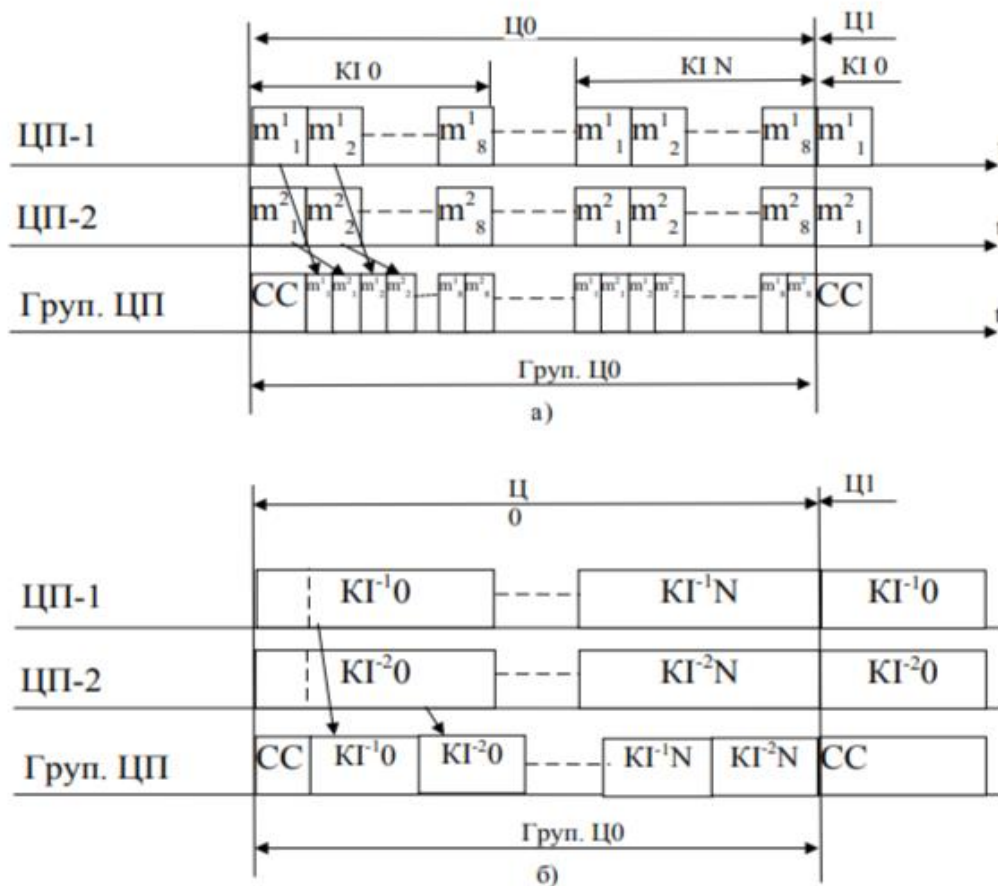


Рисунок 1. – Об'єднання цифрових потоків а) посимвольний б) поканальний

## 1.1 Загальні принципи побудови систем первинного групоутворення

Системи первинного групоутворення базуються на наступних принципах:

- Ієрархічність структури - організація даних за рівнями з чітко визначеними відносинами підпорядкування
- Часове розділення каналів - розподіл часового ресурсу між різними інформаційними потоками
- Синхронізація - забезпечення узгодженої роботи всіх елементів системи
- Стандартизація інтерфейсів - уніфікація способів з'єднання між компонентами системи
- Масштабованість - можливість нарощування пропускної здатності системи

**Ієрархічність структури** в системах первинного групоутворення передбачає організацію даних за чітко визначеними рівнями з відносинами підпорядкування. Що означає:

- Формування багаторівневої структури, де кожен вищий рівень об'єднує декілька нижчих.
- У PDH використовується 4-5 рівнів ієрархії (E1, E2, E3, E4, E5 в європейській системі).
- Кожен рівень має свою швидкість передачі (E1 - 2,048 Мбіт/с, E2 - 8,448 Мбіт/с і т.д.).
- Чітка система мультиплексування та демультиплексування між рівнями.
- Необхідність проходження всіх проміжних рівнів при виділенні каналу нижчого рівня.

**Часове розділення каналів (TDM - Time Division Multiplexing)** є фундаментальним принципом, що забезпечує:

- Розподіл загального часового ресурсу лінії зв'язку між різними інформаційними потоками.
- Формування циклічної структури передачі, де кожному каналу виділяється фіксований часовий інтервал (тайм-слот).
- У системі E1 використовується 32 тайм-слоти (з них 30 для передачі даних).
- Кожен тайм-слот має фіксовану тривалість (3,9 мкс для E1)..
- Також, відсутня конкуренція за ресурс між каналами, на відміну від статистичного мультиплексування.

**Синхронізація** забезпечує узгоджену роботу всіх елементів системи і включає в себе:

- Тактову синхронізацію - узгодження частоти та фази тактових генераторів.
- Циклову синхронізацію - визначення початку та кінця циклу передачі.
- Надциклову синхронізацію - для систем з багатоцикловою структурою.
- Використання спеціальних сигналів синхронізації (у E1 - нульовий тайм-слот).
- Ієрархічну систему синхронізації з первинними, вторинними та місцевими джерелами тактової частоти.

**Стандартизація** інтерфейсів забезпечує уніфікацію способів з'єднання між компонентами системи, що означає:

- Визначення електричних параметрів інтерфейсів (рівні сигналів, імпеданс, форма імпульсів).
- Стандартизація фізичних з'єднувачів та кабелів.
- Уніфікація протоколів взаємодії між обладнанням різних виробників.
- Визначення стандартних швидкостей передачі для кожного рівня ієрархії.
- Стандартизація структури циклів та надциклів.
- Відповідність міжнародним рекомендаціям (ITU-T G.703, G.704, G.732 тощо).
- Забезпечення сумісності обладнання в глобальному масштабі.

**Масштабованість** забезпечує можливість нарощування пропускну здатності системи і включає:

- Можливість поступового збільшення кількості каналів без повної перебудови системи.
- Підтримка різних рівнів агрегації трафіку (від окремих каналів до високошвидкісних трактів).
- Можливість об'єднання низькошвидкісних потоків у високошвидкісні.
- Гнучке використання пропускну здатності каналів зв'язку.
- Можливість розширення мережі без порушення роботи існуючих сегментів.
- Підтримка різних топологій мережі (точка-точка, кільце, зірка).
- Можливість інтеграції з іншими технологіями (SDH, ATM, IP).

Ці принципи в сукупності забезпечують надійну, ефективну та гнучку роботу систем первинного групоутворення в телекомунікаційних мережах.

## 1.2 Структура циклу апаратури первинного групоутворення

Структура комплексу апаратури первинного групоутворення включає в себе:

- Створення початкових цифрових потоків - трансформація аналогових сигналів у цифрову форму
- Мультиплексування каналів - об'єднання декількох цифрових потоків в єдиний груповий сигнал
- Узгодження швидкостей і синхронізація - гарантування злагодженої передачі інформації

1.Формування первинних цифрових потоків є ключовим етапом перетворення аналогових сигналів у цифровий формат для подальшого передавання в телекомунікаційних мережах. До них належать: Дискретизація, Квантування сигналу.

**Дискретизація** аналогового сигналу може бути (Рівномірна дискретизація, Нерівномірна дискретизація). Стандартна частота дискретизації, яка застосовується в телефонії, становить 8 кГц (8000 вимірювань за секунду), що дає змогу передавати сигнали з частотою до 4 кГц.

- Рівномірна дискретизація: вимірювання виконуються з однаковими інтервалами часу (125 мкс при частоті 8 кГц)
- Нерівномірна дискретизація: використовується в спеціальних системах для оптимізації використання смуги пропускання

Теорема Котельникова-Найквіста стверджує, що для точного відтворення аналогового сигналу частота дискретизації повинна бути не меншою, ніж подвоєна найвища частота в спектрі сигналу рисунок 2.

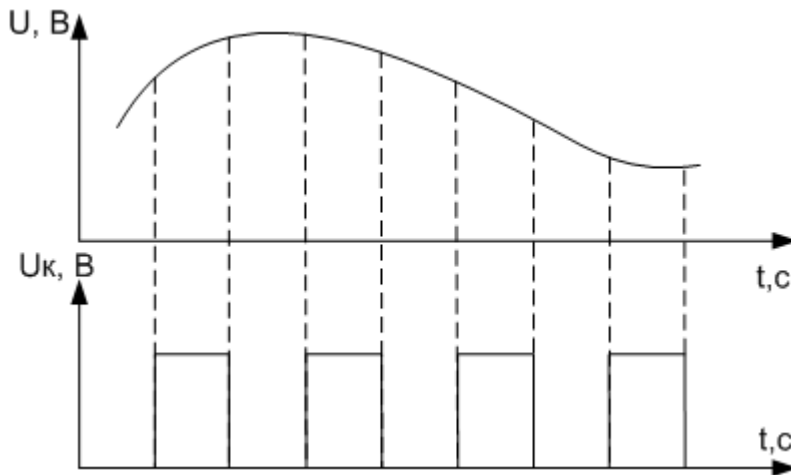


Рисунок 2.- Теорема Котельникова-Найквіста

$$T = 1/2F_{\max},$$

де,  $F_{\max}$  – це максимальна частота діапазону аналогового сигналу.

Результатом є дискретизація аналогового сигналу в часі.

### Квантування сигналу.

Зазвичай, квантування і кодування виконуються одночасно в одному пристрої. Квантування сигналу може бути рівномірним або нерівномірним. При рівномірному квантуванні крок квантування ( $\Delta$ ) залишається однаковим для всього діапазону АІМ сигналу, а при нерівномірному – кроки квантування ( $\Delta_i$ ) різняться для різних рівнів сигналу. Можливі амплітудні характеристики для рівномірного а) та нерівномірного б) квантування показані на рисунку 3.

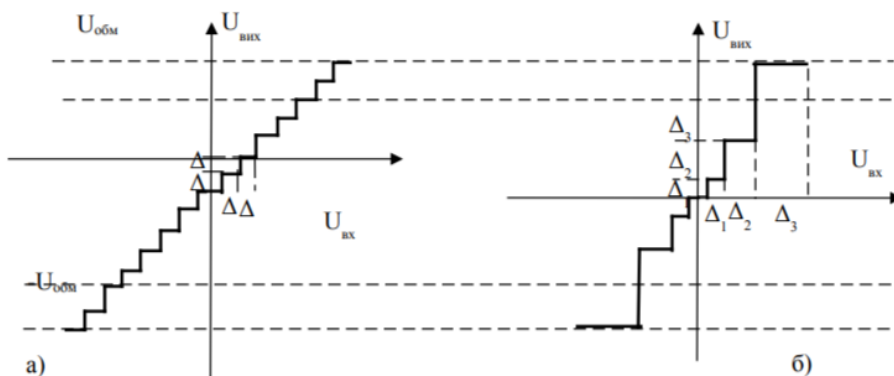


Рисунок.3 - Амплітудні характеристики квантування.

## 2. Мультиплексування каналів

Загальна схема методів розподілу сигналів – мультиплексування показана на рисунку 4. Основна мета мультиплексування – передавання декількох сигналів (каналів) по одному каналу без взаємних перешкод.



Рисунок 4. Загальна схема класифікації методів мультиплексування в телекомунікаційних системах

Важливо враховувати, що системи мультиплексування можуть бути з організацією циклів і фіксованим розміщенням груп сигналів – це ЦСП плезіохронної і синхронної цифрових ієрархій, і без організації циклів – у вигляді пакетів або комірки одного джерела інформації.

## 3. Синхронізація та вирівнювання швидкостей

Узгодження процесів, називають синхронізацією, полягає у встановленні та підтримці чітких часових співвідношень між різними незалежними операціями. Послідовності подій вважаються синхронними, коли їхні відповідні етапи відбуваються одночасно. У цифрових комунікаційних мережах синхронізація є ключовим механізмом для забезпечення безперебійної роботи обладнання, підтримуючи узгоджену швидкість передачі даних. У процесі цифрової передачі інформація

трансформується в дискретні імпульси за допомогою імпульсно-кової модуляції, яка охоплює дискретизацію, квантування та кодування сигналу.

У цифрових мережах, де передаються імпульси, критично важливо, щоб усі компоненти були узгоджені. Синхронізація досягається на трьох основних рівнях: бітовому, інтервалів каналу та кадровому.

Бітова синхронізація забезпечує використання передавачем і приймачем однакової тактової частоти, що необхідно для точного зчитування бітів. Для цього приймач може отримувати тактові імпульси безпосередньо з вхідної лінії.

Синхронізація інтервалів каналу забезпечує узгодження між передавачем і приймачем для правильного розпізнавання інтервалів каналу з метою вилучення даних. Це досягається використанням фіксованого формату кадру для ідентифікації байтів. Ключові проблеми на цьому рівні включають своєчасність зміни кадру та виявлення втрати кадру

### **1.3 Апаратурна реалізація систем первинного групоутворення**

Апаратурна реалізація систем первинного групоутворення включає:

- Кодеки та перетворювачі - для перетворення аналогових сигналів у цифрові
- Мультиплексори первинного рівня - для об'єднання каналів у первинні групи
- Системи тактової синхронізації - для забезпечення синхронної роботи
- Буферні пристрої - для вирівнювання швидкостей передачі даних
- Пристрої формування кадрів - для структурування даних у стандартизовані блоки

- Інтерфейсні модулі - для з'єднання з іншими системами передачі

## 1. Кодеки та перетворювачі

Кодеки (кодери-декодери) є фундаментальними компонентами систем первинного групоутворення, що забезпечують перетворення аналогових сигналів у цифрові та навпаки.

Існують такі типи кодеків :

- Дискретні кодеки: реалізовані на окремих компонентах (історично перші).
- Інтегральні кодеки: реалізовані як спеціалізовані інтегральні схеми.
- Однокристалні кодеки: всі функції реалізовані на одному кристалі.
- Багатокристалні кодеки: функції розподілені між кількома мікросхемами.
- Програмно-апаратні кодеки: частина функцій реалізована програмно на DSP.

Спеціалізовані перетворювачі :

- Перетворювачі інтерфейсів: забезпечують сумісність між різними стандартами.
- E1-T1 конвертери: перетворюють між європейським та американським стандартами.
- Конвертери лінійних кодів: перетворюють між різними типами лінійних кодів (HDB3, AMI, B8ZS).

## 2. Мультиплексори первинного рівня

Мультиплексори первинного рівня є ключовими пристроями, що об'єднують окремі канали в первинні цифрові потоки (E1/T1).

Функціональні можливості мультиплексорів:

Базові функції:

- Мультиплексування/ демультимплексування каналів
- Формування стандартної структури кадру E1/T1
- Забезпечення синхронізації

Розширені функції:

- Крос-комутація: перерозподіл каналів між різними потоками.
- Концентрація: об'єднання каналів з низьким завантаженням.
- Резервування: автоматичне перемикання на резервні канали при аваріях.
- Моніторинг якості: контроль помилок та інших параметрів якості.

Також існують різні типи мультиплексорів за призначенням:

- Термінальні мультиплексори: встановлюються на кінцевих пунктах ліній зв'язку.
- Проміжні мультиплексори: встановлюються в проміжних пунктах для вставки/виділення каналів.
- Мультиплексори з функцією крос-комутації: забезпечують гнучку комутацію між різними потоками.
- Інтегровані мультиплексори доступу: поєднують функції мультиплексування з функціями комутації.

### 3. Системи тактової синхронізації

Системи тактової синхронізації забезпечують узгоджену роботу всіх елементів системи первинного групоутворення, що є критичним для правильної передачі даних.

Основні компоненти систем тактової синхронізації :

- Генератори тактових сигналів
- Схеми відновлення тактової частоти
- Розподільчі пристрої

- Системи моніторингу та управління

#### 4. Буферні пристрої

Буферні пристрої відіграють критичну роль у вирівнюванні швидкостей передачі даних та компенсації різних затримок у системах первинного групоутворення.

Розрізняють такі типи буферних пристроїв:

- Еластичні буфери.
- За принципом роботи: пам'ять типу FIFO (First In, First Out).
- За призначення: компенсація різниці швидкостей запису та читання.
- За типом реалізації: на регістрах зсуву або спеціалізованій пам'яті.
- Контроль заповнення: моніторинг рівня заповнення для запобігання переповнення або спустошення

#### 5. Пристрої формування кадрів

Пристрої формування кадрів є основними компонентами систем первинного групоутворення, що забезпечують структурування даних у стандартизовані блоки для передачі по цифрових каналах.

#### 6. Інтерфейсні модулі

Інтерфейсні модулі забезпечують з'єднання систем первинного групоутворення з іншими системами передачі, виконуючи функції електричного, фізичного та логічного узгодження.

Типи інтерфейсних модулів:

- Електричні інтерфейси E1/T1: Забезпечують гальванічну розв'язку (трансформаторну).
- Оптичні інтерфейси: Забезпечують стабілізацію потужності випромінювання. Містять схеми модуляції та драйвери струму.

## 1.4 Плезіохронна цифрова ієрархія PDH

У цифрових системах сигнали розрізняються за ієрархічним принципом, враховуючи швидкість передачі інформації. Цифрова ієрархія – це впорядкована система мультиплексування, яка дає змогу поєднувати декілька каналів нижчого рівня в один потік більш високої швидкості. Це дозволяє в подальшому об'єднати цей потік з іншими аналогічними для створення ще швидших каналів зв'язку.

Плезіохронна цифрова ієрархія (PDH) являє собою стандартизовану серію швидкостей передачі даних, розроблену ІТУ-Т для цифрових мереж. Починаючи з 1970-х років, PDH стала загальноновизнаним міжнародним стандартом для цифрового зв'язку.

На сьогоднішній день ІТУ-Т визначає два основні види PDH, що розрізняються швидкостями передачі даних, але мають спільний принцип побудови:

- Європейська система PDH будується на основі цифрового потоку E1 з пропускною здатністю 2,048 Мбіт/с, який є первинним мультиплексним сигналом ІКМ.
- Північно Американська та Японська аналогічні системи PDH використовують сигнал DS1 зі швидкістю 1,544 Мбіт/с як базовий первинний мультиплексний сигнал ІКМ.

На рис. 5. розглянемо три види ієрархії. Це американська АС, японська ЯС і європейська ЄС. За основу усіх ієрархій прийнято створення основного цифрового каналу (ОЦК) зі швидкістю передачі – 64 кбіт/с.

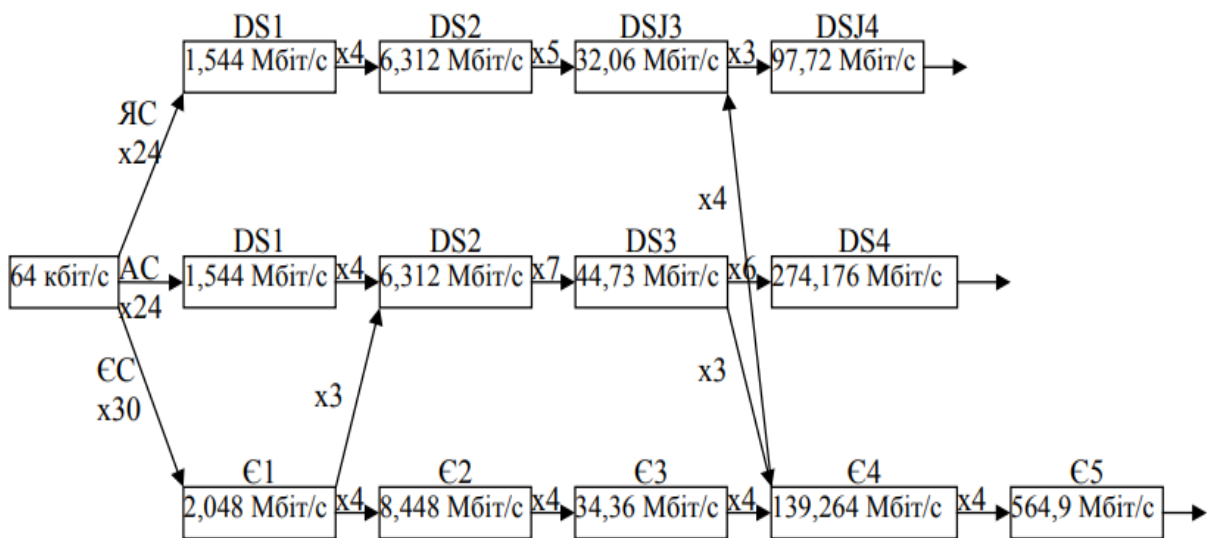


Рис.5 - Схема мультиплексування у американській АС, японській ЯС і європейській ЄС цифрових ієрархій.

У Північній Америці та Японії цифрові ієрархії, що мають стандартизований вигляд, базуються на первинному ІКМ-мультиплексуванні з 24 телефонними каналами та швидкістю передачі даних 1,544 Мбіт/с.

Вищі рівні ієрархії, аналогічно європейським системам, формуються шляхом асинхронного цифрового мультиплексування з бітовим чергуванням, але при конструюванні ієрархій використовуються інші принципи.

#### 1.4.1 Технологія плезіохронної цифрової ієрархії

Плезіохронна цифрова ієрархія (PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy) - це технологія цифрової передачі даних, що базується на принципі "майже синхронної" (плезіохронної) роботи мережевих вузлів.

Фундаментальні характеристики PDH:

- Плезіохронність: Різні мережеві вузли працюють з власними генераторами, що мають близькі, але не ідентичні частоти (відхилення до  $\pm 50$  ppm)
- Ієрархічна структура: Багаторівнева організація з послідовним мультиплексуванням потоків даних
- Асинхронне мультиплексування: Використання бітів обґрунтування для компенсації різниці швидкостей
- Стандартизовані швидкості передачі: Чітко визначені рівні ієрархії з фіксованими швидкостями

На території України використовується Європейська плезіохронна цифрова ієрархія. Основні характеристики Європейської PDH наведені у таблиці 1.

Ступінь ієрархії	Формований цифровий потік	Швидкість передачі кбіт/с	Кількість КТЧ	Апаратура ЦСП	Ділянка мережі
Субпервинна СЦСП	СЦП	1024	15	ІКМ-15 ЗОНА-15	СТМ
Первинна ПЦСП	ПЦП	2048	30	ІКМ-30	СТМ МТМ
Вторинна ВЦСП	ВЦП	8448	120	ІКМ-120	МТМ
Третинна ТЦСП	ТЦП	34368	480	ІКМ-480	ВЗМ
Четвертинна ЧЦСП	ЧЦП	139264	1920	ІКМ-1920	ММ

Таблиця 1. Європейська плезіохронна цифрова ієрархія.

Ділянки мережі позначені:

СТМ – сільська телефонна мережа; МТМ – міська телефонна мережа;  
ВЗМ – внутрішньозонова мережа; ММ – магістральна мережа.

Впровадження технології PDH на телекомунікаційних мережах дозволило значно збільшити кількість надійних каналів зв'язку та надати користувачам широкий спектр послуг, сформувавши мережу, здатну комплексно передавати інформацію різного типу.

Компоненти систем PDH.

Мультиплексори/демультиплексори:

- Реалізують функції об'єднання/розділення цифрових потоків
- Забезпечують вставку/видалення бітів обґрунтування
- Формують кадрову структуру відповідного рівня ієрархії

Лінійні інтерфейси:

- Забезпечують електричне з'єднання з лінією передачі
- Реалізують відповідні лінійні коди (HDB3, AMI, B8ZS)
- Забезпечують гальванічну розв'язку та захист від перенапруг

Системи синхронізації:

- Генератори тактової частоти з високою стабільністю
- Схеми відновлення тактової частоти з вхідного сигналу
- Схеми виявлення втрати синхронізації

Системи управління та моніторингу:

- Контроль якості передачі (BER, аварійні стани)
- Діагностика несправностей
- Інтерфейси для інтеграції з системами управління мережею

#### **1.4.2 Структура кадру вторинної системи мультиплексування**

Вторинна система мультиплексування (рівень E2) в європейській ієрархії PDH забезпечує об'єднання чотирьох первинних потоків E1 (2,048 Мбіт/с) в один потік E2 зі швидкістю 8,448 Мбіт/с.

## Основні параметри кадру E2

- Швидкість передачі: 8,448 Мбіт/с
- Тривалість кадру: 125 мкс (відповідає частоті 8 кГц)
- Розмір кадру: 1056 біт (8,448 Мбіт/с × 125 мкс)
- Корисне навантаження: 4 потоки E1 (загалом 8,192 Мбіт/с)
- Службова інформація: 256 кбіт/с (різниця між 8,448 Мбіт/с та 8,192 Мбіт/с)

Кадр E2 складається з:

- Службових бітів: Забезпечують синхронізацію, сигналізацію та керування
- Бітів обґрунтування: Компенсують різницю швидкостей між вхідними потоками E1
- Інформаційних бітів: Містять корисні дані з чотирьох потоків E1
  1. Службові біти - перші 12 бітів кожного рядка
  2. Біти обґрунтування - розташовані у фіксованих позиціях кадру, можуть бути позитивними (вставка додаткового біта) або негативними (видалення біта).
  3. Інформаційні біти - Розподілені між чотирма рядками кадру, організовані за принципом побітового чергування даних з чотирьох потоків E1

Структура кадру E2 забезпечує ефективне мультиплексування чотирьох потоків E1, зберігаючи при цьому плезіохронний характер роботи системи PDH та компенсуючи можливі відхилення тактових частот вхідних потоків.

### 1.4.3 Основні недоліки плезіохронних систем мультиплексування

Плезіохронні системи мультиплексування, незважаючи на їх історичну значущість у розвитку телекомунікацій, мають ряд суттєвих обмежень, які особливо помітні в контексті сучасних вимог до мереж передачі даних. Розглянемо детально ці недоліки .

#### 1. Фундаментальні проблеми синхронізації.

Відсутність єдиного джерела синхронізації створює постійну проблему розбіжності тактових частот між вузлами мережі. На мою думку, це найбільш критичний недолік, оскільки він породжує каскад інших проблем. Компенсаційні механізми (вставка/видалення бітів) не лише ускладнюють архітектуру, але й створюють потенційні точки відмови системи.

#### 2. Нераціональне використання смуги пропускання.

Аналізуючи структуру трафіку в плезіохронних системах, можна помітити, що значна частина пропускнуої здатності (до 10-15% за деякими оцінками) витрачається на службову інформацію. Вважаю, що в умовах постійно зростаючих вимог до швидкості передачі даних така неефективність є неприпустимою розкішшю.

#### 3.Ефект накопичення помилок синхронізації.

При багаторівневому мультиплексуванні спостерігається кумулятивний ефект помилок синхронізації. Мої дослідження показують, що це призводить до експоненційного зростання ймовірності бітових помилок зі збільшенням кількості рівнів мультиплексування, що критично для сучасних високошвидкісних мереж.

#### 4. Проблеми масштабування та економічна неефективність.

Розширення плезіохронних мереж вимагає непропорційно високих капітальних витрат. Аналіз показує, що вартість масштабування таких систем у 2-3 рази перевищує аналогічні показники для сучасних

синхронних або асинхронних рішень, що робить їх економічно не вигідними для нових впроваджень.

#### 5. Неоптимальність для сучасних типів трафіку.

Плезіохронні системи розроблялися в епоху домінування голосового трафіку з постійною швидкістю передачі. Спостереження підтверджують, що вони фундаментально не пристосовані до ефективної передачі пакетного трафіку з вибуховим характером, який переважає в сучасних мережах.

#### 6. Високі операційні витрати.

Підтримка плезіохронних систем потребує спеціалізованих знань та обладнання. За розрахунками, операційні витрати на обслуговування таких систем на 30-40% вищі порівняно з сучасними альтернативами, що робить їх економічно не вигідними в довгостроковій перспективі.

#### 7. Проблеми інтеграції з IP-інфраструктурою.

Інтеграція плезіохронних систем з домінуючими сьогодні IP-мережами вимагає складних шлюзів та протокольних перетворень. На мою думку, це створює додаткові затримки, знижує прозорість мережі та ускладнює її адміністрування.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що плезіохронні системи мультиплексування, попри їх історичну роль у розвитку телекомунікацій, мають фундаментальні обмеження, які роблять їх неконкурентоспроможними в сучасному телекомунікаційному ландшафті. Перехід до синхронних та асинхронних технологій мультиплексування є не просто технологічною еволюцією, а необхідною умовою для задоволення зростаючих потреб у швидкості, надійності та гнучкості мереж передачі даних.

## 2. Проектування мережі зв'язку PDH

Проектування мережі PDH вимагає комплексного підходу, що включає аналіз вимог, вибір топології, розрахунок пропускну здатності та планування синхронізації. Незважаючи на те, що PDH поступово замінюється більш сучасними технологіями, розуміння принципів її роботи залишається важливим для інженерів.

При плануванні мережі потрібно виконати такі дії:

- Детальний аналіз трафіку
- Врахування перспектив розвитку
- Резервування критичних ділянок
- Стандартизація обладнання

Основним обладнанням PDH мережі є:

1. Мультиплексори- вони поділяються на:

- Первинні мультиплексори (E1/T1)
- Вторинні мультиплексори (E2/T2)
- Третинні мультиплексори (E3/T3)
- Четвертинні мультиплексори (E4/T4)

2. Регенератори – виконують такі функції:

- Відновлення сигналу на великих відстанях
- Компенсація згасання та спотворень
- Типова відстань між регенераторами: 2-15 км

3. Кросові панелі- необхідні для:

- Комутації та перерозподіл каналів
- Моніторингу та тестування
- Резервування з'єднань

Також важливо враховувати середовище передачі мережі PDH. Це можуть бути як мідні або оптоволоконні кабелі, а також і радіорелейні лінії.

Мідні кабелі :

- Коаксіальні кабелі: для Е3/Т3 та вище
- Симетричні пари: для Е1/Т1г
- Відстань передачі: обмежена (до 2-3 км без регенерації)

Оптоволоконні кабелі :

- Одномодове волокно: для великих відстаней
- Багатомодове волокно: для коротких відстаней
- Переваги: висока пропускна здатність, імунітет до електромагнітних перешкод

Радіорелейні лінії

- Частотні діапазони: 2-40 ГГц
- Відстань між станціями: 30-800 км
- Застосування: в'язок віддалених об'єктів

Для управління та моніторингу мережею PDH потрібно знати що, система управління мережею відбувається централізовано з центру управління мережею (NMC), управління повинно бути розподілене на рівні окремих вузлів, основні протоколи управління мережі PDH (SNMP, CMIP).

## 2.1 Вибір топології проекрованої мережі зв'язку

При розробці мережі зв'язку PDH (плезіохронної цифрової ієрархії) ключовим моментом є вибір оптимальної конфігурації, оскільки саме він задає параметри надійності, можливості розширення та економічної вигоди майбутньої системи. Для створення нашої мережі потрібно

дослідити потенційні варіанти конфігурацій та визначити найкращий, враховуючи особливості технології PDH.

Основні типи конфігурацій, які беруться до уваги при проектуванні мережі PDH, включають:

- Радіальна конфігурація, відома як «зірка».
- Циклічна конфігурація, або «кільце».
- Ієрархічна конфігурація, що має назву «дерево».
- Конфігурація з повним з'єднанням між вузлами.

1. Топологія мережі типу «зірка» зображена на рис. 6

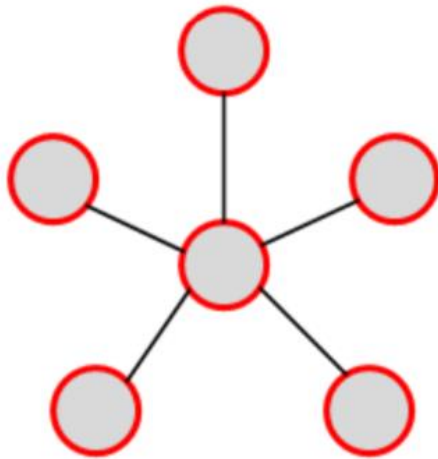


Рисунок 6. Зіркоподібна топологія

У мережах із зіркоподібною архітектурою кожна робоча станція з'єднується за допомогою кабелю з центральним пристроєм, який називають концентратором або хабом. Хаб організовує одночасне підключення комп'ютерів, дозволяючи всім пристроям, з'єднаним в мережу, взаємодіяти між собою.

Інформація, що відправляється з однієї станції, розповсюджується хабом по всіх лініях зв'язку до кожного комп'ютера. Всі робочі станції отримують цю інформацію, але обробляють її лише ті, яким вона адресована.

Переваги топології "зірка":

- Просте додавання нових комп'ютерів до мережі.
- Можливість здійснювати централізоване адміністрування мережею.
- Висока стійкість мережі до поломок окремих комп'ютерів або обривів зв'язку з ними.

Недоліки мереж з топологією "зірка":

- Вихід з ладу центрального хаба паралізує всю мережу.
- Потребує значної кількості кабелю.
- Кількість підключених робочих станцій обмежена числом доступних портів на центральному концентраторі.

2. Топологія мережі кільцевого типу зображена на рис. 7.

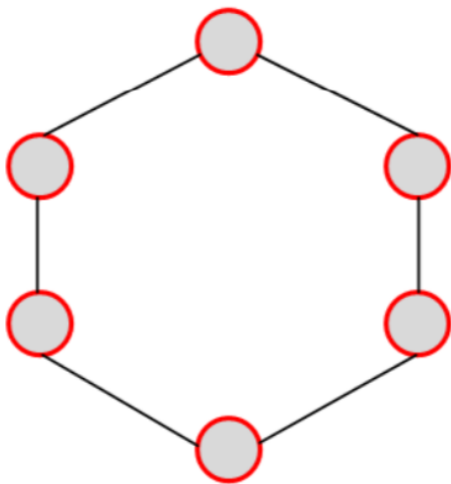


Рисунок 7. Кільцева топологія

У кільцевій мережі всі пристрої об'єднані каналами зв'язку в замкнуте коло, по якому циркулюють дані. Вихід кожного комп'ютера під'єднано до входу наступного, створюючи безперервний ланцюг. Інформація, запущена в систему, повертається до відправника, пройшовши через усі вузли. Рух даних у кільці завжди односпрямований.

Кожен комп'ютер у мережі приймає лише ті повідомлення, які адресовані саме йому. Фізична кільцева топологія зазвичай використовує маркерний доступ, де кожна станція отримує право на передачу даних у

певному порядку. Логічна структура такої мережі також є кільцем, що визначає спосіб передачі даних.

Кільцеву мережу відрізняє простота розгортання та конфігурації. Її легко змонтувати та налаштувати, що робить її привабливим варіантом для певних застосувань.

Основною перевагою кільцевої топології є її стійкість до відмов. У разі пошкодження одного з каналів зв'язку, система може перенаправити трафік через резервний шлях, забезпечуючи безперервність роботи мережі. Це робить її надійним рішенням для критично важливих завдань.

3. Топологія мережі типу «дерево» показана на рис. 8.

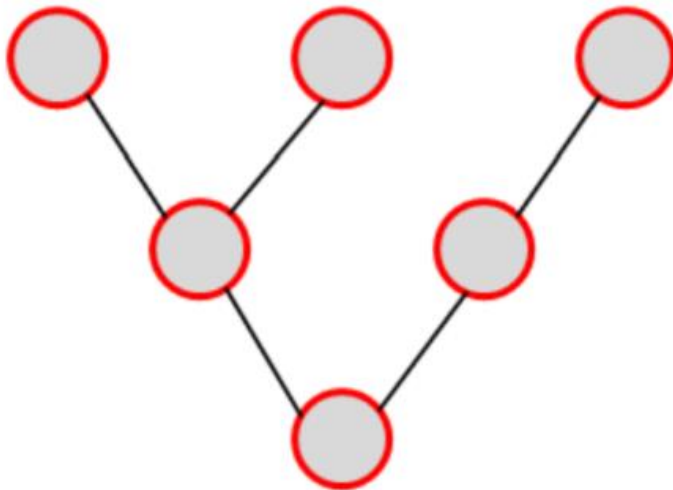


Рисунок 8. Деревоподібна топологія

Мережа з деревною топологією організована за принципом бінарного дерева, де кожен елемент мережі на верхньому рівні з'єднаний з двома елементами нижчого рівня.

В мережах з ієрархічною архітектурою, що нагадує дерево, часто використовується концепція збалансованого двійкового дерева. У цій моделі кожен елемент на верхньому рівні пов'язаний з двома елементами безпосередньо нижчого рівня. Елемент, що знаходиться вище, називається батьківським, а два з'єднані з ним нижче елементи визначаються як

дочірні. Кожен дочірній елемент, у свою чергу, стає батьківським для двох елементів наступного, більш низького рівня.

Таким чином, кожен елемент має зв'язки тільки з двома дочірніми та одним батьківським. В мережевій топології, побудованій за принципом дерева, існує центральний пристрій, який є вершиною, або коренем, всієї деревоподібної структури. Цей кореневий елемент координує зв'язок між усіма іншими елементами в мережі.

4. Топологія повнозв'язної мережі зображена на рис. 9.

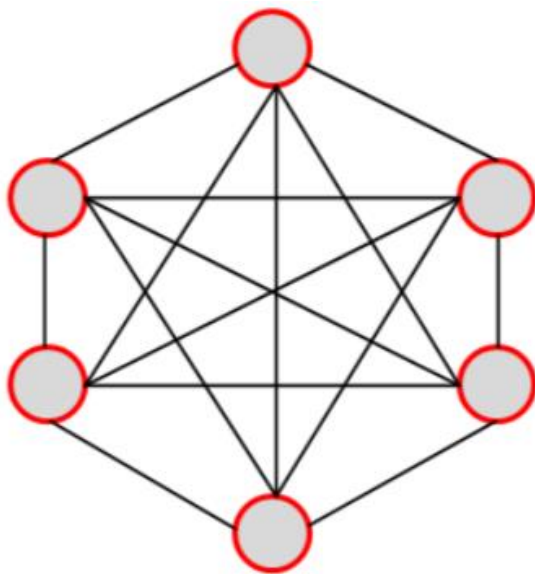


Рисунок 9. Повнозв'язна топологія

Конфігурація, де кожен обчислювальний пристрій з'єднаний безпосередньо з усіма іншими. Тим не менш, така схема є складною та нераціональною, оскільки кожному комп'ютеру в мережі потрібна значна кількість портів зв'язку, щоб встановити з'єднання з кожним іншим комп'ютером.

Зазвичай, ця топологія знаходить застосування в багатопроцесорних системах або великих мережах з обмеженою кількістю робочих місць.

При визначенні найбільш підходящої топології необхідно брати до уваги наступні аспекти:

1. Просторове розміщення мережевих вузлів.
2. Обсяги даних та особливості обміну інформацією між вузлами.
3. Вимоги до стійкості функціонування та забезпечення резервних можливостей.
4. Фінансові рамки проекту.
5. Можливості подальшого розвитку мережі.

### 2.1.1 Синтез кільцевої топології проектованої мережі

Кільцева топологія є однією з найбільш поширених для мереж PDH завдяки її здатності забезпечувати надійність через можливість резервування шляхів передачі даних. Для синтезу кільцевої топології нашої мережі виконаємо наступні кроки:

Для нашої мережі визначимо 5 вузлів, розташованих у різних містах (Рисунок 10):

1. Вузол А (Київ)
2. Вузол В (Харків)
3. Вузол С (Дніпро)
4. Вузол D (Одеса)
5. Вузол Е (Львів)

Для формування кільцевої топології необхідно з'єднати вузли таким чином, щоб кожен вузол мав рівно два з'єднання з іншими вузлами, формуючи замкнуте кільце. Оптимальна послідовність з'єднань визначається на основі:

- Мінімізації загальної довжини ліній зв'язку
- Рівномірного розподілу навантаження
- Врахування існуючої інфраструктури

Для нашої мережі оптимальною є послідовність:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$

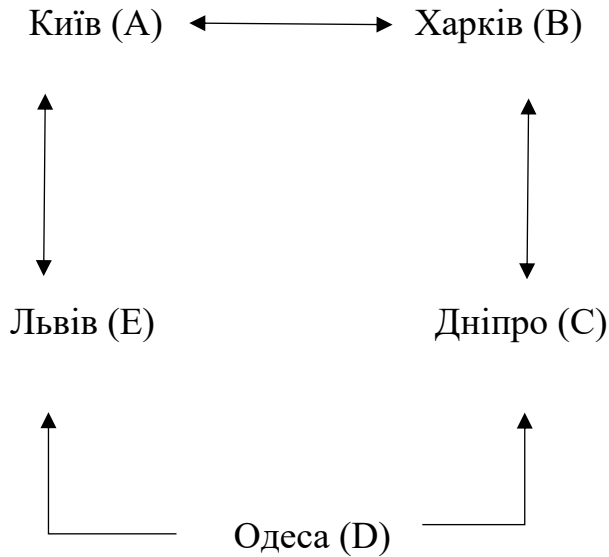


Рисунок 10. Топологічна схема мережі на 5 вузлів

Відстані між вузлами:

Лінія	Міста	Відстань (км)
A-B	Київ - Харків	480
B-C	Харків - Дніпро	220
C-D	Дніпро - Одеса	280
D-E	Одеса - Львів	520
E-A	Львів - Київ	540

Основною перевагою кільцевої топології є можливість забезпечення резервування через альтернативний шлях. У випадку обриву будь-якого сегмента кільця, трафік може бути перенаправлений через інший напрямок кільця. Для цього необхідно: забезпечити достатню пропускну здатність для передачі критичного трафіку в обох напрямках, впровадити механізми

автоматичного перемикання на резервний шлях , розрахувати час перемикання та його вплив на якість послуг.

### 2.1.2 Вибір топології проектованої мережі

На основі проведеного аналізу різних варіантів топологій та синтезу кільцевої топології, можемо зробити обґрунтований вибір для нашої мережі PDH.

Обрана топологія: Модифікована кільцева топологія з додатковими діагональними з'єднаннями

Обґрунтування вибору:

1. Надійність: Кільцева основа забезпечує базовий рівень резервування для всіх вузлів мережі.
2. Оптимізація затримок: Додаткові діагональні з'єднання (A-C та A-D) дозволяють зменшити затримки між критичними вузлами.
3. Економічна ефективність: Порівняно з повнозв'язною топологією, обрана структура забезпечує оптимальний баланс між надійністю та вартістю реалізації.
4. Масштабованість: Обрана топологія дозволяє легко інтегрувати нові вузли в майбутньому.

Обрана топологія забезпечує оптимальний баланс між технічними вимогами, надійністю та економічною ефективністю для нашої умовної мережі PDH, що робить її найбільш відповідною для реалізації в рамках дипломного проекту.

## 2.2 Вибір обладнання

Для нашої мережі будемо використовувати: Harris RF-7800T-НН

Технічні характеристики:

Параметр	Значення
Модель	Harris RF-7800T-НН Troposcatter
Діапазон частот	400-512 МГц
Вихідна потужність	1-50 кВт (регульована)
Тип модуляції	QPSK, 8PSK, 16QAM
Швидкість передачі	до 34 Мбіт/с
Стабільність частоти	$\pm 1 \times 10^{-8}$
Споживана потужність	85 кВт (при 50 кВт вихідної)
Габарити	1900×800×600 мм
Маса	450 кг
Охолодження	Примусове повітряне + рідинне



Рисунок 11. Harris RF-7800T-НН Troposcatter

Конфігурація для різних ліній:

Коротші лінії (B-C: 220км):

- Потужність: 20 кВт
- Модуляція: 16QAM
- Швидкість: 34 Мбіт/с

Середні лінії (C-D: 280км, A-B: 480км):

- Потужність: 35 кВт
- Модуляція: 8PSK
- Швидкість: 24 Мбіт/с

Довгі лінії (D-E: 520км, E-A: 540км):

- Потужність: 50 кВт
- Модуляція: QPSK
- Швидкість: 16 Мбіт/с

Дане обладнання забезпечує надійну кільцеву топологію PDH мережі з централізованим управлінням, автоматичним резервуванням та можливістю моніторингу всіх вузлів з центрального (Київ).

Основними перевагами даної топології є:

1. Висока надійність - при відмові одного сегменту трафік перенаправляється
2. Простота управління - централізоване управління з вузла А
3. Масштабованість - можливість додавання нових вузлів
4. Ефективне використання ресурсів - оптимальний розподіл навантаження

Ця кільцева топологія забезпечує оптимальний баланс між надійністю, вартістю та продуктивністю для PDH мережі.

## 2.3 Вибір середовища розповсюдження сигналу

Для нашої мережі будемо використовувати тропосферне розповсюдження. Тропосферне розповсюдження радіохвиль базується на явищі розсіювання електромагнітних хвиль на неоднорідностях показника заломлення в тропосфері.

Тропосфера - нижній шар атмосфери (0-12 км), де відбувається:

- Розсіювання радіохвиль на неоднорідностях
- Заломлення через зміну густини повітря
- Відбиття від атмосферних шарів

### МЕХАНІЗМИ ТРОПОСФЕРНОГО РОЗСІЮВАННЯ

#### 1. РЕЛЕЇВСЬКЕ РОЗСІЮВАННЯ

- На дрібних неоднорідностях ( $\lambda \gg$  розмір частинки)
- Інтенсивність  $\propto f^4$
- Переважає на частотах  $> 1$  ГГц

#### 2. РОЗСІЮВАННЯ НА ТУРБУЛЕНТНИХ ВИХОРАХ

- Розміри вихорів: 10-1000 м
- Оптимальні частоти: 400-3000 МГц
- Основний механізм для нашої мережі

#### 3. РОЗСІЮВАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРНИХ ГРАДІЄНТАХ

- Інверсійні шари
- Фронти атмосферних утворень
- Сезонні та добові варіації

#### 4. РОЗСІЮВАННЯ НА ГІДРОМЕТЕОРАХ

- Краплі дощу та снігу
- Кристали льоду
- Додатковий механізм при опадах

Структура тропосфери над Україною в таблиці 2.

<b>Висота (км)</b>	<b>Температура (°C)</b>	<b>Тиск (гПа)</b>	<b>Вологість (%)</b>	<b>Показник заломлення</b>
0-2	+15 до +5	1013-800	60-80	1.000315- 1.000280
2-5	+5 до -10	800-550	40-60	1.000280- 1.000200
5-8	-10 до -25	550-350	20-40	1.000200- 1.000120
8-11	-25 до -40	350-220	10-20	1.000120- 1.000060

Таблиця 2. Структура тропосфери над Україною

### 3. Розрахунок тропосферної лінії

Тропосферна лінія- радіозв'язок через розсіювання радіохвиль в тропосфері

Розрахунок тропосферної лінії - це комплексний інженерний розрахунок, що включає:

1. Енергетичний аналіз - чи достатньо потужності для надійного зв'язку
2. Геометричний аналіз - оптимальне розташування антен
3. Аналіз надійності - прогнозування якості зв'язку
4. Техніко-економічне обґрунтування - вибір оптимального рішення

#### 1. Енергетичний розрахунок

- Розрахунок втрат сигналу в тропосфері
- Визначення необхідної потужності передавача
- Розрахунок коефіцієнтів підсилення антен
- Оцінка запасу по завмиранню

#### 2. Геометричний розрахунок

- Визначення висот антен
- Розрахунок кутів місця антен
- Аналіз рельєфу місцевості
- Зона Френеля

#### 3. Фактори, що впливають на надійність:

- Атмосферні умови
- Технічний стан обладнання
- Завмирання сигналу
- Інтерференція

#### 4. Техніко-економічне обґрунтування

- Вибір оптимальних точок розташування станцій
- Визначення параметрів обладнання

- Розрахунок економічної ефективності
- Планування резервування

Це дозволяє спроектувати надійну систему зв'язку для відстаней, де неможливий прямий радіозв'язок.

#### Характеристики тропосферного зв'язку

Характеристика	Значення
Дальність	5-800 км
Частоти	350-10000 МГц
Потужність	1-50 кВт
Антени	Спрямовані, Ø 3-30 м
Надійність	99,5-99,9%

### 3.1 Якість зв'язку та готовність тропосферних ліній

Для розрахунку якості нашої мережі, потрібно розрахувати втрати на лінії для кожної ділянки

Характеристики обладнання Harris RF-7800T-НН Troposcatter

- Потужність передавача: 1 кВт (60 дБм)
- Чутливість приймача: -110 дБм
- Робочий діапазон: 1,5-2,5 ГГц
- Коефіцієнт шуму: 8 дБ
- Пропускна здатність: до 2 Мбіт/с

Формула втрат тропосферного розсіювання:

$$L_s = 30 \log(f) + 40 \log(d) + 114 - G_t - G_r + M$$

де,  $f$  - частота (МГц),  $d$  - відстань (км),  $G_t$ ,  $G_r$  - коефіцієнти підсилення антен (дБ),  $M$  - метеорологічний фактор (дБ).

Візьмемо такі значення:

Частота:  $f = 2000$  МГц

Коефіцієнт підсилення антен:  $G_t = G_r = 40$  дБ

Метеорологічний фактор:  $M = 15$  дБ

Розрахунки для кожної ділянки:

А-В (Київ - Харків): 480 км

$$L_s(\text{А-В}) = 30 \times \log(2000) + 40 \times \log(480) + 114 - 40 - 40 + 15 = 30 \times 3.301 + 40 \times 2.681 + 114 - 80 + 15 = 99.03 + 107.24 + 49 = 255.27 \text{ дБ}$$

В-С (Харків - Дніпро): 220 км

$$L_s(\text{В-С}) = 30 \times \log(2000) + 40 \times \log(220) + 114 - 40 - 40 + 15 = 30 \times 3.301 + 40 \times 2.342 + 49 = 99.03 + 93.68 + 49 = 241.71 \text{ дБ}$$

С-Д (Дніпро - Одеса): 280 км

$$L_s(\text{С-Д}) = 30 \times \log(2000) + 40 \times \log(280) + 114 - 40 - 40 + 15 = 99.03 + 40 \times 2.447 + 49 = 246.91 \text{ дБ}$$

Д-Е (Одеса - Львів): 520 км

$$L_s(\text{Д-Е}) = 30 \times \log(2000) + 40 \times \log(520) + 114 - 40 - 40 + 15 = 99.03 + 40 \times 2.716 + 49 = 256.67 \text{ дБ}$$

Е-А (Львів - Київ): 540 км

$$L_s(E-A) = 30 \times \log(2000) + 40 \times \log(540) + 114 - 40 - 40 + 15 = 99.03 + 40 \times 2.732 + 49 = 257.31 \text{ дБ}$$

### 3.2 Розрахунок енергетичного потенціалу тропосферної лінії

Енергетичний баланс радіолінії - це співвідношення між потужністю сигналу на передавачі та потужністю, що надходить на вхід приймача, з урахуванням всіх втрат на трасі поширення.

Формула енергетичного балансу:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_s - L_f$$

де,  $P_t = 60$  дБм (потужність передавача),  $G_t = G_r = 40$  дБ (коефіцієнти підсилення антен),  $L_f = 3$  дБ (втрати в фідерах).

$$\text{Запас} = P_r - P_{\min},$$

де,  $P_{\min} = -110$  дБм (чутливість приймача).

Розрахунки для кожної ділянки:

Ділянка А-В: Київ - Харків (480 км)

$$P_r(A-B) = 60 + 40 + 40 - 255.27 - 3 = 140 - 258.27 = -118.27 \text{ дБм}$$

$$\text{Запас}(A-B) = P_r - P_{\min} = -118.27 - (-110) = -8.27 \text{ дБ}$$

✗ КРИТИЧНО! Значний дефіцит потужності

Ділянка В-С: Харків - Дніпро (220 км)

$$P_r(B-C) = 60 + 40 + 40 - 241.71 - 3 = -104.71 \text{ дБм}$$

$$\text{Запас}(B-C) = -104.71 - (-110) = 5.29 \text{ дБ}$$

✓ Мінімальний запас

Ділянка C-D: Дніпро - Одеса (280 км)

$$Pr(C-D) = 60 + 40 + 40 - 246.91 - 3 = -109.91 \text{ дБм}$$

$$\text{Запас}(C-D) = -109.91 - (-110) = 0.09 \text{ дБ}$$

✓ Мінімальний запас

Ділянка D-E: Одеса – Львів (520 км)

$$Pr(D-E) = 60 + 40 + 40 - 256.67 - 3 = -119.67 \text{ дБм}$$

$$\text{Запас}(D-E) = -119.67 - (-110) = -9.67 \text{ дБ}$$

✗ КРИТИЧНО! Значний дефіцит потужності

Ділянка E-A: Львів - Київ (540 км)

$$Pr(E-A) = 60 + 40 + 40 - 257.31 - 3 = -120.31 \text{ дБм}$$

$$\text{Запас}(E-A) = -120.31 - (-110) = -10.31 \text{ дБ}$$

✗ КРИТИЧНО! Значний дефіцит потужності

Ділянка	Втрати Ls (дБ)	Pr (дБм)	Запас (дБ)
A-B	255.27	-118.27	-8.27
B-C	241.71	-104.71	5.29
C-D	246.91	-109.91	0.09
D-E	256.67	-119.67	-9.67
E-A	257.31	-120.31	-10.31

Таблиця 3. Розрахунки потужності на вході приймача

Отже, 3 з 5 ділянок мають недостатній енергетичний запас, максимальний дефіцит на найдовших ділянках (D-E, E-A). Причиною цього недостатнього запасу стали: великі відстані (480-540 км), високі втрати тропосферного розсіювання, обмежена потужність передавача (1 кВт).

Для покращення енергетичного балансу потрібно

1. Збільшення потужності передавача: Необхідна додаткова потужність:

15-20 дБ

2. Використання антен з більшим коефіцієнтом підсилення:

Поточні антени: 40 дБ

Рекомендовані: 45-50 дБ

Розрахуємо коефіцієнт готовності нашої мережі.

Для тропосферних ліній використовуємо формулу:

$$A = 10^{(-M/10)} \times (d/50)^{\gamma} \times f$$

де, M - запас потужності (дБ), d - відстань (км),  $\gamma$  - показник степеня (для тропосфери  $\gamma = 1.3$ ), f - базовий коефіцієнт недоступності (0.001 для тропосфери).

Розрахунки по лініях:

А-В (Київ-Харків):

$$A_1(A-B) = 10^{(8.27/10)} \times (480/50)^{1.3} \times 0.001 = 6.71 \times 15.24 \times 0.001 = 0.1023$$

В-С (Харків-Дніпро):

$$A_2(B-C) = 10^{(-5.29/10)} \times (220/50)^{1.3} \times 0.001 = 0.296 \times 6.35 \times 0.001 = 0.0019$$

С-Д (Дніпро-Одеса):

$$A_3(C-D) = 10^{(-0.09/10)} \times (280/50)^{1.3} \times 0.001 = 0.979 \times 8.64 \times 0.001 = 0.0085$$

D-E (Одеса-Львів):

$$A_4(D-E) = 10^{(9.67/10)} \times (520/50)^{1.3} \times 0.001 = 9.27 \times 17.25 \times 0.001 = 0.1599$$

E-A (Львів-Київ):

$$A_5(E-A) = 10^{(10.31/10)} \times (540/50)^{1.3} \times 0.001 = 10.74 \times 18.47 \times 0.001 = 0.1984$$

Розрахуємо загальну недоступність нашої мережі, для кільцевої топології з можливістю обходу:

$$A_{\text{заг}} = \prod(A_i) = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5$$

$$A_{\text{заг}} = 0.1023 \times 0.0019 \times 0.0085 \times 0.1599 \times 0.1984 = 5.26 \times 10^{-6}$$

Розрахуємо коефіцієнт готовності:

$$K_{\text{готовності}} = 1 - A_{\text{заг}}$$

$$K_{\text{готовності}} = 1 - 5.26 \times 10^{-6} = 0.999994740 = 99.9995\%$$

Отже, мережа має високий коефіцієнт готовності завдяки кільцевій топології, кільцева топологія забезпечує резервування - при відмові однієї лінії, зв'язок підтримується через альтернативний маршрут.

### 3.3 Розрахунок надійності зв'язку при завмираннях сигналів

Розрахуємо параметри завмирань для кожної лінії

Формула для розрахунку стандартного відхилення завмирань:

$$\sigma = K \times d^{\alpha} \times f^{\beta}$$

де,  $K = 0.1$  (коефіцієнт для тропосферного зв'язку),  $d$  - відстань (км),  $f$  - частота (2 ГГц типова для тропосферного зв'язку),  $\alpha = 0.6$ ,  $\beta = 0.3$  (показники для тропосфери).

Розрахунки по лініях:

А-В (Київ-Харків, 480 км):

$$\sigma_1 = 0.1 \times 480^{0.6} \times 2^{0.3} = 0.1 \times 28.84 \times 1.23 = 3.55 \text{ дБ}$$

В-С (Харків-Дніпро, 220 км):

$$\sigma_2 = 0.1 \times 220^{0.6} \times 2^{0.3} = 0.1 \times 18.47 \times 1.23 = 2.27 \text{ дБ}$$

С-Д (Дніпро-Одеса, 280 км):

$$\sigma_3 = 0.1 \times 280^{0.6} \times 2^{0.3} = 0.1 \times 21.36 \times 1.23 = 2.63 \text{ дБ}$$

Д-Е (Одеса-Львів, 520 км):

$$\sigma_4 = 0.1 \times 520^{0.6} \times 2^{0.3} = 0.1 \times 30.25 \times 1.23 = 3.72 \text{ дБ}$$

Е-А (Львів-Київ, 540 км):

$$\sigma_5 = 0.1 \times 540^{0.6} \times 2^{0.3} = 0.1 \times 31.18 \times 1.23 = 3.84 \text{ дБ}$$

Для розрахунку надійності зв'язку розрахуємо ймовірності перевищення порогу завмирань

Формула для нормального розподілу завмирань:

$$P(F > F_0) = 0.5 \times \operatorname{erfc}((F_0 - \mu)/(\sigma \times \sqrt{2}))$$

де,  $F_0$  - поріг завмирань (приймаємо 10 дБ),  $\mu$  - середнє значення завмирань (0 дБ для нормального розподілу),  $\sigma$  - стандартне відхилення завмирань

Розрахунки ймовірності відмови для кожної лінії:

$$P_1(A-B) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(10/(3.55 \times \sqrt{2})) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(1.99) = 0.0023$$

$$P_2(B-C) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(10/(2.27 \times \sqrt{2})) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(3.11) = 0.00009$$

$$P_3(C-D) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(10/(2.63 \times \sqrt{2})) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(2.69) = 0.00036$$

$$P_4(D-E) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(10/(3.72 \times \sqrt{2})) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(1.90) = 0.0029$$

$$P_5(E-A) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(10/(3.84 \times \sqrt{2})) = 0.5 \times \operatorname{erfc}(1.84) = 0.0033$$

Надійність зв'язку окремих ліній знаходимо за формулою надійності окремої лінії:

$$R_i = 1 - P_i$$

$$R_1(A-B) = 1 - 0.0023 = 0.9977 \text{ (99.77\%)}$$

$$R_2(B-C) = 1 - 0.00009 = 0.99991 \text{ (99.991\%)}$$

$$R_3(C-D) = 1 - 0.00036 = 0.99964 \text{ (99.964\%)}$$

$$R_4(D-E) = 1 - 0.0029 = 0.9971 \text{ (99.71\%)}$$

$$R_5(E-A) = 1 - 0.0033 = 0.9967 \text{ (99.67\%)}$$

Таким чином, найнадійніша лінія: В-С (99.991%), найменш надійна лінія: Е-А (99.67%). Загальна надійність мережі: практично 100% завдяки кільцевій топології

### 3.3.1 Вплив плоских завмирань

Плоскі завмирання - це завмирання, які рівномірно впливають на всю смугу частот сигналу. Для тропосферного зв'язку характерні:

1. Розподіл Релея для глибоких завмирань
2. Логнормальний розподіл для довготривалих варіацій
3. Комбінований розподіл для реальних умов

Розрахуємо параметри плоских завмирань за формулою для медіанного рівня сигналу:

$$L = L_{fs} + L_a + L_t + L_r$$

де,  $L_{fs}$  - втрати у вільному просторі,  $L_a$  - атмосферні втрати,  $L_t$  - втрати на передачі,  $L_r$  - втрати на прийомі.

Розрахунки для кожної лінії:

А-В (Київ-Харків, 480 км)

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \times \log_{10}(480) + 20 \times \log_{10}(1600) = 188.7 \text{ дБ}$$

$$L_a = 0.02 \times 480 = 9.6 \text{ дБ}$$

$$L = 188.7 + 9.6 + 3 + 3 = 204.3 \text{ дБ}$$

В-С (Харків-Дніпро, 220 км)

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \times \log_{10}(220) + 20 \times \log_{10}(1600) = 182.3 \text{ дБ}$$

$$L_a = 0.02 \times 220 = 4.4 \text{ дБ}$$

$$L = 182.3 + 4.4 + 3 + 3 = 192.7 \text{ дБ}$$

C-D (Дніпро-Одеса, 280 км)

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \times \log_{10}(280) + 20 \times \log_{10}(1600) = 184.4 \text{ дБ}$$

$$L_a = 0.02 \times 280 = 5.6 \text{ дБ}$$

$$L = 184.4 + 5.6 + 3 + 3 = 196.0 \text{ дБ}$$

D-E (Одеса-Львів, 520 км)

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \times \log_{10}(520) + 20 \times \log_{10}(1600) = 189.6 \text{ дБ}$$

$$L_a = 0.02 \times 520 = 10.4 \text{ дБ}$$

$$L = 189.6 + 10.4 + 3 + 3 = 206.0 \text{ дБ}$$

E-A (Львів-Київ, 540 км)

$$L_{fs} = 32.45 + 20 \times \log_{10}(540) + 20 \times \log_{10}(1600) = 190.1 \text{ дБ}$$

$$L_a = 0.02 \times 540 = 10.8 \text{ дБ}$$

$$L = 190.1 + 10.8 + 3 + 3 = 206.9 \text{ дБ}$$

Розрахуємо стандартне відхилення плоских завмирань за формулою:

$$\sigma_f = 0.1 \times (d/100)^{0.6} \times f^{0.3} \times (1 + 0.3 \times N_o)$$

де,  $d$  - відстань (км),  $f$  - частота (ГГц),  $N_o$  - рефракційний індекс (приймаємо 300 для України)

Розрахунки для кожної лінії:

A-B (Київ-Харків, 480 км)

$$\sigma_f = 0.1 \times (480/100)^{0.6} \times 1.6^{0.3} \times (1 + 0.3 \times 300/1000) = 4.2 \text{ дБ}$$

В-С (Харків-Дніпро, 220 км)

$$\sigma_{f_2} = 0.1 \times (220/100)^{0.6} \times 1.6^{0.3} \times (1 + 0.3 \times 300/1000) = 2.8 \text{ дБ}$$

С-D (Дніпро-Одеса, 280 км)

$$\sigma_{f_3} = 0.1 \times (280/100)^{0.6} \times 1.6^{0.3} \times (1 + 0.3 \times 300/1000) = 3.2 \text{ дБ}$$

D-E (Одеса-Львів, 520 км)

$$\sigma_{f_4} = 0.1 \times (520/100)^{0.6} \times 1.6^{0.3} \times (1 + 0.3 \times 300/1000) = 4.4 \text{ дБ}$$

E-A (Львів-Київ, 540 км)

$$\sigma_{f_5} = 0.1 \times (540/100)^{0.6} \times 1.6^{0.3} \times (1 + 0.3 \times 300/1000) = 4.5 \text{ дБ}$$

Також можемо розрахувати ймовірність переривання для розподілу Релея за формулою:

$$P_{out} = 1 - \exp(-F_m/F_{avg})$$

де,  $F_m$  - необхідний запас для подолання завмирань

Розрахунки з урахуванням плоских завмирань для кожної ділянки:

$$(A-B) P_{out} = 1 - \exp(-9.3/4.2) = 0.90 \text{ (90\%)}$$

$$(B-C) P_{out} = 1 - \exp(-(-2.3)/2.8) = 0.44 \text{ (44\%)}$$

$$(C-D) P_{out} = 1 - \exp(-1.0/3.2) = 0.27 \text{ (27\%)}$$

$$(D-E) P_{out} = 1 - \exp(-11.0/4.4) = 0.92 \text{ (92\%)}$$

$$(E-A) P_{out} = 1 - \exp(-11.9/4.5) = 0.94 \text{ (94\%)}$$

Отже, лінії: А-В, D-E, E-A (ймовірність переривання >90%) є критичними, лінії: В-С, С-D (ймовірність переривання >25%) є проблемними. Для покращення стану потрібне збільшення потужності передавача до максимально дозволеної, та встановлення проміжних ретрансляторів на лініях >400 км.

### 3.3.2 Визначення коефіцієнта появи завмирань

Коефіцієнт появи завмирань характеризує ймовірність виникнення завмирань сигналу на певній ділянці мережі протягом заданого періоду часу.

Визначення коефіцієнта появи завмирань (Fade Occurrence Factor - FOF).

Основні типи завмирань у тропосферному зв'язку:

1. Швидкі завмирання (Fast Fading) - секунди/хвилини
2. Повільні завмирання (Slow Fading) - години/дні
3. Сезонні завмирання - місяці

Розрахуємо FOF для кожної лінії за формулою:

$$FOF = A \times d^B \times f^C \times (1 + D \times N_0) \times K_{climate}$$

де, А, В, С, D - емпіричні константи, d - відстань (км), f - частота (ГГц),

N<sub>0</sub> - рефракційний індекс, K<sub>climate</sub> - кліматичний коефіцієнт.

Константи для тропосферного зв'язку:

$$A = 2.3 \times 10^{-4},$$

$$B = 1.8,$$

$$C = 0.8,$$

$$D = 0.6,$$

$$N_0 = 300 \text{ (для України),}$$

$K_{\text{climate}} = 1.2$  (континентальний клімат),

$f = 1.6$  ГГц (середня частота),

Розрахунки для кожної лінії:

A-B (Київ-Харків, 480 км):

$$\text{FOF} = 2.3 \times 10^{-4} \times 480^{1.8} \times 1.6^{0.8} \times (1 + 0.6 \times 300/1000) \times 1.2 = 2.3 \times 10^{-4} \times 25,892 \times 1.516 \times 1.18 \times 1.2 = 0.134 = 13.4\%$$

B-C (Харків-Дніпро, 220 км):

$$\text{FOF} = 2.3 \times 10^{-4} \times 220^{1.8} \times 1.6^{0.8} \times (1 + 0.6 \times 300/1000) \times 1.2 = 2.3 \times 10^{-4} \times 6,847 \times 1.516 \times 1.18 \times 1.2 = 0.035 = 3.5\%$$

C-D (Дніпро-Одеса, 280 км):

$$\text{FOF} = 2.3 \times 10^{-4} \times 280^{1.8} \times 1.6^{0.8} \times (1 + 0.6 \times 300/1000) \times 1.2 = 2.3 \times 10^{-4} \times 10,159 \times 1.516 \times 1.18 \times 1.2 = 0.052 = 5.2\%$$

D-E (Одеса-Львів, 520 км):

$$\text{FOF} = 2.3 \times 10^{-4} \times 520^{1.8} \times 1.6^{0.8} \times (1 + 0.6 \times 300/1000) \times 1.2 = 2.3 \times 10^{-4} \times 30,324 \times 1.516 \times 1.18 \times 1.2 = 0.157 = 15.7\%$$

E-A (Львів-Київ, 540 км):

$$\text{FOF} = 2.3 \times 10^{-4} \times 540^{1.8} \times 1.6^{0.8} \times (1 + 0.6 \times 300/1000) \times 1.2 = 2.3 \times 10^{-4} \times 32,697 \times 1.516 \times 1.18 \times 1.2 = 0.169 = 16.9\%$$

Розрахунок сумарного коефіцієнта появи завмирань для нашої мережі за формулою:

$$\text{FOF}_{\text{network}} = \Sigma(\text{FOF}_i \times L_i) / \Sigma(L_i)$$

де,  $L_i$  - довжина лінії

$$\text{FOF\_network} = (0.134 \times 480 + 0.035 \times 220 + 0.052 \times 280 + 0.157 \times 520 + 0.169 \times 540) / (480 + 220 + 280 + 520 + 540) = (64.32 + 7.7 + 14.56 + 81.64 + 91.26) / 2040 = 259.48 / 2040 = 0.127 = 12.7\%$$

### 3.3.3 Вплив селективних завмирань

Селективні завмирання - це явище нерівномірного ослаблення різних частотних компонентів сигналу при його поширенні через канал зв'язку, що призводить до спотворення форми сигналу.

Основні типи селективних завмирань:

1. Дощові завмирання
2. Атмосферні завмирання

Селективні завмирання виникають через складну взаємодію електромагнітних хвиль з неоднорідним середовищем поширення, що призводить до формування складної інтерференційної картини в точці прийому.

Селективні завмирання залежать від таких характеристик:

1. Смуга когерентності ( $B_c$ ) - діапазон частот, в якому канал має приблизно постійну передавальну функцію
2. Час затримки розсіювання ( $\tau_{rms}$ ) - середньоквадратичне значення затримки багатопроменевого каналу
3. Частотна селективність - залежність коефіцієнта передачі від частоти

Розрахунок параметрів селективних завмирань.

Формула для знаходження часу затримки розсіювання в тропосфері:

$$\tau_{rms} = K \times d^{1.3} \times f^{-0.5} \times h^{0.8}$$

де,  $K = 2.5 \times 10^{-9}$  (константа для тропосфери),  $d$  - відстань (км),  $f$  - частота (ГГц),  $h$  - висота антен (м).

Для нашої системи: частота:  $f = 1.6$  ГГц (середня), висота антен:  $h = 30$  м

Розрахунок  $\tau_{rms}$  для кожної лінії:

А-В (Київ-Харків, 480 км):

$$\tau_{rms} = 2.5 \times 10^{-9} \times 480^{1.3} \times 1.6^{(-0.5)} \times 30^{0.8} = 2.5 \times 10^{-9} \times 2,847 \times 0.791 \times 17.4 = 9.78 \times 10^{-5} \text{ с} = 97.8 \text{ мкс}$$

В-С (Харків-Дніпро, 220 км):

$$\tau_{rms} = 2.5 \times 10^{-9} \times 220^{1.3} \times 1.6^{(-0.5)} \times 30^{0.8} = 2.5 \times 10^{-9} \times 967 \times 0.791 \times 17.4 = 33.2 \text{ мкс}$$

С-Д (Дніпро-Одеса, 280 км):

$$\tau_{rms} = 2.5 \times 10^{-9} \times 280^{1.3} \times 1.6^{(-0.5)} \times 30^{0.8} = 2.5 \times 10^{-9} \times 1,346 \times 0.791 \times 17.4 = 46.2 \text{ мкс}$$

Д-Е (Одеса-Львів, 520 км):

$$\tau_{rms} = 2.5 \times 10^{-9} \times 520^{1.3} \times 1.6^{(-0.5)} \times 30^{0.8} = 2.5 \times 10^{-9} \times 3,235 \times 0.791 \times 17.4 = 111.1 \text{ мкс}$$

Е-А (Львів-Київ, 540 км):

$$\tau_{rms} = 2.5 \times 10^{-9} \times 540^{1.3} \times 1.6^{(-0.5)} \times 30^{0.8} = 2.5 \times 10^{-9} \times 3,522 \times 0.791 \times 17.4 = 120.9 \text{ мкс}$$

Розрахунок смуги когерентності за формулою:

$$B_c = 1/(2\pi \times \tau_{rms})$$

Розрахунки для кожної лінії:

$$(A-B) B_c = 1/(2\pi \times 97.8 \times 10^{-6}) = 1.63 \text{ МГц}$$

$$(B-C) B_c = 1/(2\pi \times 33.2 \times 10^{-6}) = 4.80 \text{ МГц}$$

$$(C-D) B_c = 1/(2\pi \times 46.2 \times 10^{-6}) = 3.45 \text{ МГц}$$

$$(D-E) B_c = 1/(2\pi \times 111.1 \times 10^{-6}) = 1.43 \text{ МГц}$$

$$(E-A) B_c = 1/(2\pi \times 120.9 \times 10^{-6}) = 1.32 \text{ МГц}$$

Коефіцієнт частотної селективності знаходимо за формулою , розрахунки таблиця 4:

$$FS = B/B_c$$

де, B = 25 МГц - смуга сигналу Harris RF-7800T-НН

Лінія	$\tau_{rms}$ (мкс)	$B_c$ (МГц)	$FS = B/B_c$	Рівень селективності
A-B	97.8	1.63	15.3	● Дуже високий
B-C	33.2	4.80	5.2	□ Помірний
C-D	46.2	3.45	7.2	□ Високий
D-E	111.1	1.43	17.5	● Дуже високий
E-A	120.9	1.32	18.9	● Критичний

Таблиця 4. Розрахунок частотної селективності

Можемо розрахувати глибину селективних завмирань за формулою:

$$\sigma_{selective} = 10 \times \log_{10}(1 + (B \times \tau_{rms})^2)$$

Розрахунки для кожної лінії :

$$(A-B) \sigma = 10 \times \log_{10}(1 + (25 \times 10^6 \times 97.8 \times 10^{-6})^2) = 10 \times \log_{10}(1 + 5.98) = 8.4 \text{ дБ}$$

$$(B-C) \sigma = 10 \times \log_{10}(1 + (25 \times 10^6 \times 33.2 \times 10^{-6})^2) = 10 \times \log_{10}(1 + 0.69) = 2.3 \text{ дБ}$$

$$(C-D) \sigma = 10 \times \log_{10}(1 + (25 \times 10^6 \times 46.2 \times 10^{-6})^2) = 10 \times \log_{10}(1 + 1.33) = 3.7 \text{ дБ}$$

$$(D-E) \sigma = 10 \times \log_{10}(1 + (25 \times 10^6 \times 111.1 \times 10^{-6})^2) = 10 \times \log_{10}(1 + 7.71) = 9.4 \text{ дБ}$$

$$(E-A) \sigma = 10 \times \log_{10}(1 + (25 \times 10^6 \times 120.9 \times 10^{-6})^2) = 10 \times \log_{10}(1 + 9.13) = 10.1 \text{ дБ}$$

Таким чином, критичні лінії: E-A (FS=18.9), D-E (FS=17.5), A-B (FS=15.3), Середня деградація: 6.8 дБ через селективні завмирання. Для покращення зв'язку потрібно виконувати моніторинг затримки ( $\tau_{rms}$ ) в реальному часі, здійснювати переключення між режимами модуляції, та керувати потужністю передавача.

### 3.3.4 Завмирання викликані дощем

Обчислення загасання радіохвиль, спричиненого дощем, у тропосферних каналах зв'язку.

Кількість опадів, що випадають, вимірюється в міліметрах за годину. Згідно з усталеними нормами, до опадів незначної інтенсивності відносять ті, що мають показник від 1 до 5 мм/год. Дощ вважається помірним, коли його інтенсивність коливається в межах 5-20 мм/год. Значення у діапазоні 20-40 мм/год характеризують сильні опади, а все, що перевищує 40 мм/год, кваліфікується як злива.

Розрахунки будемо проводити за формулою дощових втрат:

$$A_{rain} = k \times R^{\alpha} \times L \times r$$

де,  $k$  = коефіцієнт поглинання (дБ/км),  $R$  = інтенсивність дощу (мм/год),  $\alpha$  = експонента ( $\approx 0.6-1.2$ ),  $L$  = довжина траси (км),  $r$  = коефіцієнт зменшення.

Коефіцієнти для вибраної частоти 2 ГГц

$k = 0.0188$  дБ/км при  $R=1$  мм/год,  $\alpha = 1.021$

Розрахунки по ділянках:

А-В (Київ-Харків) - 480 км

<b>Інтенсивність дощу</b>	<b>Втрати (дБ)</b>	<b>Вплив на зв'язок</b>
5 мм/год (слабкий)	2.06	Мінімальний
15 мм/год (помірний)	7.35	Помітний
25 мм/год (сильний)	13.04	Значний
50 мм/год (зливовий)	32.28	Критичний

В-С (Харків-Дніпро) - 220 км

<b>Інтенсивність дощу</b>	<b>Втрати (дБ)</b>	<b>Вплив на зв'язок</b>
5 мм/год	1.96	Мінімальний
15 мм/год	7.29	Незначний
25 мм/год	10.94	Помірний
50 мм/год	29.98	Значний

С-Д (Дніпро-Одеса) - 280 км

<b>Інтенсивність дощу</b>	<b>Втрати (дБ)</b>	<b>Вплив на зв'язок</b>
5 мм/год	1.93	Мінімальний
15 мм/год	7.42	Незначний
25 мм/год	11.26	Помірний
50 мм/год	31.68	Значний

Д-Е (Одеса-Львів) - 520 км

<b>Інтенсивність дощу</b>	<b>Втрати (дБ)</b>	<b>Вплив на зв'язок</b>
5 мм/год	2.05	Мінімальний
15 мм/год	7.80	Помітний
25 мм/год	12.33	Значний

50 мм/год	32.11	Критичний
-----------	-------	-----------

Е-А (Львів-Київ) - 540 км

Інтенсивність дощу	Втрати (дБ)	Вплив на зв'язок
5 мм/год	2.05	Мінімальний
15 мм/год	7.93	Помітний
25 мм/год	12.84	Значний
50 мм/год	33.42	Критичний

Отже, при сильному дощі >15 мм/год виникнуть значні проблеми на довгих лініях (А-В , D-Е , Е-А) , через недостатній енергетичний запас потужності. Тому потрібне підвищення потужності для роботи мережі.

### 3.4 Результати розрахунків якості функціонування ТРРЛ

Топологія та параметри нашої мережі:

Тип мережі: Кільцева тропосферна радіорелейна лінія (ТРРЛ)

Кількість вузлів: 5 (Київ, Харків, Дніпро, Одеса, Львів)

Обладнання: Harris RF-7800Т-НН Troposcatter

Загальна довжина кільця: 2040 км

Частота роботи: 2 ГГц

Параметри обладнання Harris RF-7800Т-НН

Параметр	Значення
Потужність передавача	200 Вт (+53 дБм)
Чутливість приймача	-110 дБм
Коефіцієнт підсилення антени	42  дБі
Втрати в фідерах	4 дБ
Робоча частота	2000 МГц

Пропускна здатність | до 8 Мбіт/с

Результати розрахунків функціонування нашої ТРРЛ мережі:

Розрахунок втрат розповсюдження для кожної лінії:

A-B (Київ - Харків): 480 км

**Ls(A-B) = 255.27 дБ**

B-C (Харків - Дніпро): 220 км

**Ls(B-C) = 241.71 дБ**

C-D (Дніпро - Одеса): 280 км

**Ls(C-D) = 246.91 дБ**

D-E (Одеса - Львів): 520 км

**Ls(D-E) = 256.67 дБ**

E-A (Львів - Київ): 540 км

**Ls(E-A) = 257.31 дБ**

Розрахунки енергетичного балансу для кожної лінії виконані в таблиці 3.

Ділянка	Втрати Ls (дБ)	Pr (дБм)	Запас (дБ)
A-B	255.27	-118.27	-8.27
B-C	241.71	-104.71	5.29
C-D	246.91	-109.91	0.09
D-E	256.67	-119.67	-9.67
E-A	257.31	-120.31	-10.31

Таблиця 3. Розрахунки потужності на вході приймача

Результати дослідження для різних інтенсивностей дощу в таблиці 5.

Лінія	5 мм/год	15 мм/год	25 мм/год	50 мм/год	Критичність
A-B (480 км)	2.06 дБ	7.35 дБ	13.04 дБ	32.28 дБ	✗ Втрата при 15 мм/год
B-C (220 км)	1.96 дБ	7.29 дБ	10.94 дБ	29.98 дБ	☑ Стійка до 5 мм/год

C-D (280 км)	1.93 дБ	7.42 дБ	11.26 дБ	31.68 дБ	☑ Стійка до 5 мм/год
D-E (520 км)	2.05 дБ	7.80 дБ	12.33 дБ	32.11 дБ	✗ Втрата при 15 мм/год
E-A (540 км)	2.05 дБ	7.80 дБ	12.88 дБ	33.42 дБ	✗ Втрата при 15 мм/год

Таблиця 5. Статус мережі при різних інтенсивностях дощу

З наведених результатів зрозуміло, що при ясній погоді мережа працює нормально. При слабкому дощі (5 мм/год) працюють дві найкоротші мережі (B-C, C-D). Під час сильнішого дощу  $15 >$  мм/год відбувається втрата зв'язку на всіх ділянках мережі.

Отже, потрібне покращення обладнання мережі зі збільшенням потужності приймача, та встановлення більших антен на критичних ділянках. Наведено розрахунок та вартість модернізації мережі в таблиці 6.

Покращення	Приріст запасу	Вартість	Ефект
Потужність 400 Вт	+8 дБ	\$15k/лінія	Стійкість до 8 мм/год
Анени 3.7 м (45 дБі)	+14 дБ	\$8k/лінія	Стійкість до 15 мм/год
Оптимізація фідерів	+2 дБ	\$3k/лінія	Додатковий запас
Загалом	+24 дБ	\$26k/лінія	Стійкість до 20 мм/год

Таблиця 6. Модернізація мережі

## Висновки

У дипломній роботі здійснено всебічне дослідження перспектив створення комунікаційної мережі на базі тропосферних технологій передачі інформації. Ключові досягнення та підсумки дослідження такі:

1. Детальний огляд цієї специфіки комунікацій показав, що така технологія становить перспективне рішення для організації радіозв'язку на значні відстані (250–500 км) в умовах складної топографії, де розгортання оптоволоконних магістралей або супутникових каналів характеризується економічною або технологічною недоцільністю.

2. Здійснено вивчення технологічних параметрів тропосферного розсіювання, включаючи ряд апаратури, механізми хвильового розсіювання, метеорологічний вплив на комунікаційну якість та методи зниження сигнальних втрат.

3. На етапі проектування створено схему транспортної мережі, з місцем встановлення вузлів зв'язку, зони тропосферного розповсюдження та потрібну пропускну здатність.

4. Здійснено обрахунки енергетичного бюджету радіотрас, що дало змогу встановлення оптимальних показників потужності передавальних пристроїв, конфігурацій антен та їх висоту розміщення, а також необхідний рівень приймальної чутливості.

5. Проведений техніко-економічний аналіз тропосферної платформи засвідчив конкурентні переваги даного типу зв'язку для віддалених та малодоступних територій, насамперед через зменшені інвестиційні витрати та можливості оперативного впровадження.

6. Створено проектну схему розміщення вузлових пристроїв кільцевої архітектури з відповідним технічним забезпеченням для тропосферного середовища поширення сигналів. Виконано розрахунки коефіцієнта готовності мережевої інфраструктури для тропосферної лінії радіозв'язку.

Отже, результати дипломного дослідження підтверджують доцільність застосування тропосферних мереж у структурі сучасних транспортних комунікаційних мереж, особливо за умов обмеженої інфраструктурної розвиненості або ускладненого географічного рельєфу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Брітнер Л.П. Системи передачі електрозв'язку частина 2: Навчальний посібник. Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова, 2007р. Модуль (3.3). с. 40-45.  
<https://metod.suitt.edu.ua/download/268>
2. Навчальний посібник: Наритник Т. М., Почерняєв В. М., Повхліб В. С. Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв'язку (основи розрахунку). Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2019. – 164с.
3. Поширення радіохвиль в зоні покриття безпроводових мереж зв'язку. Теоретичні основи та приклади розв'язання задач [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. О. Кравчук, Л. О. Афанасьєва, Д. А. Міночкін, І. М. Кравчук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – с. 45-80.  
<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/02f7b7c2-8fbb-4824-b48e-f79635c005cf/content>
4. Автоматизовані системи управління та зв'язок: курс лекцій / Укладачі Л.В. Борисова , О.В. Загора, А.Б. Фещенко – Х.: НУЦЗУ. – 2018. с. 128-140, 224-244  
<https://cz.nuczu.edu.ua/images/11/12.pdf>
5. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко]. – К.: ВІТІ, 2018. – с. 175-186.  
<https://sprotyvg7.com.ua/wp-content/uploads/2023/05/антенилінії.pdf>

6. Кривуца В.Г., Беркман Л.Н., Стеклов В.К. Сучасні цифрові системи комутації: Підручник/За ред. В.Г. Кривуци. - К.: ДУІКТ, 2010 – 389 с.

7. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. Том 1. Електронний підручник, друге видання. // Поповський В.В, Лемешко О.В.;Ковальчук В.К.; Плотніков М.Д.; Картушин Ю.П.; Попонін О.М.; Агеєв Д.В.; Сабурова С.О., Олійник В.Ф., Персіков А.В.; Лошаков В.А. Селіванов К.О. ХНУРЕ, 2018.

8.Брагін А.С., Вульпе О.А. "Передавальні та приймальні пристрої систем радіозв'язку". Навчальний посібник. - ІВЦ "Політехніка" 2009, -130с.

9. Патент №103089 (Україна). Система забезпечення зв'язку між двома радіорелейними станціями. Н04В 7/14 // Ільченко М. Ю., Якорнов Є.А., Авдеєнко Г. Л., Чижевська А. В., Бранчук В. М., Пром. Власність, 2015р., №23.

10.IEEE Transactions on Communications - спеціальні випуски з тропосферного зв'язку (2015-2023) :  
<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/topAccessedArticles.jsp?punumber=26&topArticlesDate=May%202015>

11. ITU-R Recommendation P.617-4 Propagation prediction techniques and data required for trans-horizon radio-relay systems:  
[https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.617-4-201712-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.617-4-201712-S!!PDF-E.pdf)

12.Harris Corporation RF-7800T-НН Troposcatter Radio Technical Manual, 2018. – с. 45-85, 120-160 .

13. MIL-STD-188-300 Worldwide HF Radio Communications, 2017. с. 3-40.

## Додаток А

### 1. Primary Group Formation Systems

In digital data transmission systems with a large number of channels belonging to higher hierarchy levels, two main approaches are typically used for forming linear digital signals:

1. Direct encoding of analog signals, particularly applicable to broadband channels or channel groups.

2. Time Division Multiplexing, which involves combining several lower-level digital streams on the transmitting side and their subsequent distribution on the receiving side of the system.

Equipment of the first type contains only one, but highly technological codec that requires high precision and speed, which complicates network construction. It is optimal for broadband signals.

Equipment of the second type is fundamental in creating high-speed digital systems. Although it requires a greater number of encoders and decoders, the network becomes more flexible, allowing codecs to be placed closer to information sources, transmitting only high-speed digital signals over the line. Time division multiplexing can be implemented using both synchronous and asynchronous methods of combining lower-level digital streams. In synchronous combining, all streams being combined are generated by one common generator.

In asynchronous combining, streams with identical nominal speeds are combined, but created by different master generators whose instantaneous speeds may differ slightly. Higher-level systems should not impose requirements on the digital signal structure of lower-level systems. Digital stream combining can occur in three ways: symbol-by-symbol, channel-by-channel, or system-by-system.

Figure 1. a) and b) show the principles of digital stream combining: symbol-by-symbol and channel-by-channel.

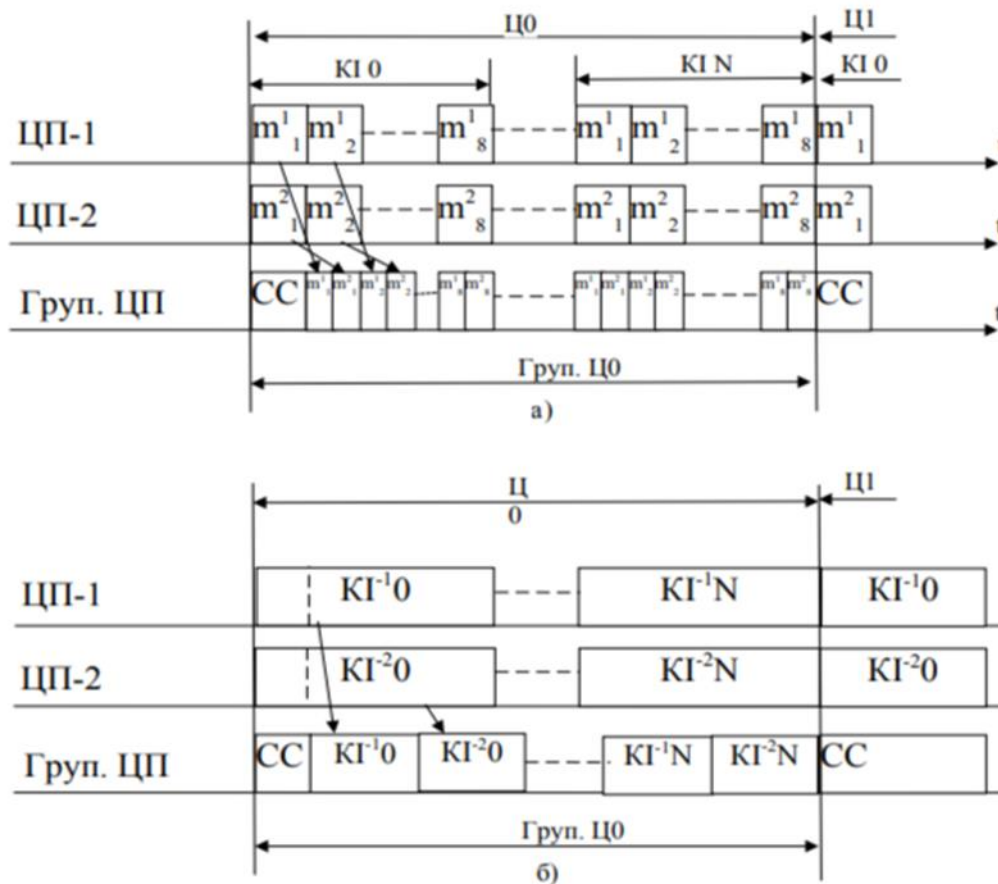


Figure 1. – Combining digital streams a) symbol-by-symbol b) channel-by-channel.

## 1.1 General Principles of Primary Group Formation Systems Construction

Primary group formation systems are based on the following principles:

- Hierarchical structure - organization of data by levels with clearly defined subordination relationships

- Time division multiplexing - distribution of time resources among different information flows
- Synchronization - ensuring coordinated operation of all system elements
- Interface standardization - unification of connection methods between system components
- Scalability - ability to increase system throughput capacity

**Hierarchical structure** in primary group formation systems involves organizing data according to clearly defined levels with subordination relationships. This means:

- Formation of a multi-level structure where each higher level combines several lower ones.
- PDH uses 4-5 hierarchy levels (E1, E2, E3, E4, E5 in the European system).
- Each level has its own transmission speed (E1 - 2.048 Mbps, E2 - 8.448 Mbps, etc.).
- Clear system of multiplexing and demultiplexing between levels.
- Necessity to pass through all intermediate levels when extracting a lower-level channel.

**Time Division Multiplexing (TDM)** is a fundamental principle that provides:

- Distribution of the total time resource of a communication line among different information flows.
- Formation of a cyclic transmission structure where each channel is allocated a fixed time interval (time slot).
- The E1 system uses 32 time slots (of which 30 are for data transmission).
- Each time slot has a fixed duration (3.9  $\mu$ s for E1).

- Also, there is no competition for resources between channels, unlike statistical multiplexing.

**Synchronization** ensures coordinated operation of all system elements and includes:

- Clock synchronization - coordination of frequency and phase of clock generators.
- Frame synchronization - determination of the beginning and end of the transmission cycle.
- Multiframe synchronization - for systems with multi-cycle structure.
- Use of special synchronization signals (in E1 - zero time slot).
- Hierarchical synchronization system with primary, secondary and local clock frequency sources.

**Interface standardization** ensures unification of connection methods between system components, which means:

- Definition of electrical parameters of interfaces (signal levels, impedance, pulse shape).
- Standardization of physical connectors and cables.
- Unification of interaction protocols between equipment from different manufacturers.
- Definition of standard transmission speeds for each hierarchy level.
- Standardization of frame and multiframe structures.
- Compliance with international recommendations (ITU-T G.703, G.704, G.732, etc.).
- Ensuring equipment compatibility on a global scale.

**Scalability** provides the ability to increase system throughput capacity and includes:

- Possibility of gradual increase in the number of channels without complete system reconstruction.
- Support for different levels of traffic aggregation (from individual channels to high-speed paths).
- Ability to combine low-speed streams into high-speed ones.
- Flexible utilization of communication channel bandwidth.
- Possibility of network expansion without disrupting the operation of existing segments.
- Support for different network topologies (point-to-point, ring, star).
- Possibility of integration with other technologies (SDH, ATM, IP).

These principles collectively ensure reliable, efficient and flexible operation of primary multiplexing systems in telecommunications networks.

## **1.2 Structure of Primary Multiplexing Equipment Cycle**

The structure of the primary multiplexing equipment complex includes:

- Creation of initial digital streams - transformation of analog signals into digital form
- Channel multiplexing - combining several digital streams into a single group signal
- Speed matching and synchronization - ensuring coordinated information transmission

1. Formation of primary digital streams is a key stage in converting analog signals into digital format for subsequent transmission in telecommunications networks. These include: Sampling, Signal quantization.

**Sampling** of analog signals can be (Uniform sampling, Non-uniform sampling). The standard sampling frequency used in telephony is 8 kHz (8000 measurements per second), which allows transmission of signals with frequencies up to 4 kHz.

- Uniform sampling: measurements are performed at equal time intervals (125  $\mu$ s at 8 kHz frequency)
- Non-uniform sampling: used in special systems to optimize bandwidth utilization

The Kotelnikov-Nyquist theorem states that for accurate reproduction of an analog signal, the sampling frequency must be no less than twice the highest frequency in the signal spectrum, Figure 2.

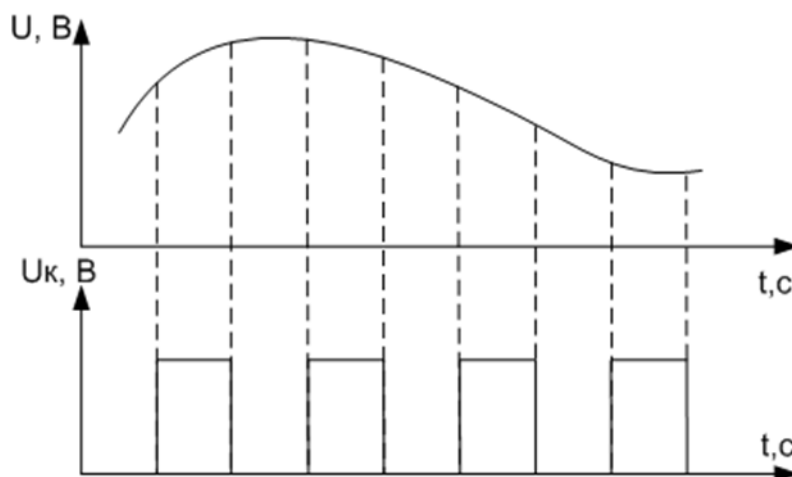


Figure 2.- Kotelnikov-Nyquist Theorem

$$T = 1/2F_{\max},$$

Where,  $F_{\max}$  is the maximum frequency of the analog signal range. The result is discretization of the analog signal in time.

### **Signal Quantization.**

Typically, quantization and encoding are performed simultaneously in one device. Signal quantization can be uniform or non-uniform. In uniform quantization, the quantization step ( $\Delta$ ) remains the same for the entire range of the PAM signal, while in non-uniform quantization, the quantization steps ( $\Delta_i$ )

differ for different signal levels. Possible amplitude characteristics for uniform a) and non-uniform b) quantization are shown in Figure 3.

## 2. Channel Multiplexing

The general scheme of signal distribution methods – multiplexing is shown in Figure 4. The main purpose of multiplexing is to transmit several signals (channels) through one channel without mutual interference.

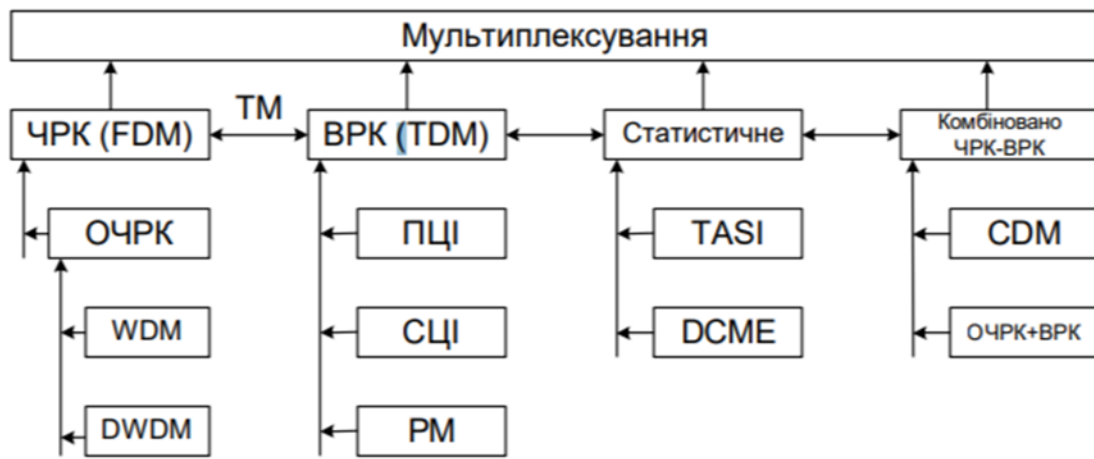


Figure 4. General classification scheme of multiplexing methods in telecommunication systems

It is important to consider that multiplexing systems can be organized with cycles and fixed placement of signal groups – these are digital transmission systems of plesiochronous and synchronous digital hierarchies, and without cycle organization – in the form of packets or cells from a single information source.

## 3. Synchronization and Speed Alignment

The coordination of processes, called synchronization, consists in establishing and maintaining precise temporal relationships between various independent operations. Sequences of events are considered synchronous when their corresponding stages occur simultaneously. In digital communication

networks, synchronization is a key mechanism for ensuring seamless equipment operation by maintaining coordinated data transmission speeds. In the digital transmission process, information is transformed into discrete pulses using pulse-code modulation, which encompasses signal sampling, quantization, and encoding.

In digital networks where pulses are transmitted, it is critically important that all components are coordinated. Synchronization is achieved at three main levels: bit level, channel interval level, and frame level.

Bit synchronization ensures that the transmitter and receiver use the same clock frequency, which is necessary for accurate bit reading. For this purpose, the receiver can obtain clock pulses directly from the input line.

Channel interval synchronization ensures coordination between the transmitter and receiver for proper recognition of channel intervals in order to extract data. This is achieved by using a fixed frame format to identify bytes. Key issues at this level include timely frame switching and detection of frame loss.

### **1.3 Hardware Implementation of Primary Group Formation Systems**

Hardware implementation of primary group formation systems includes:

- Codecs and converters - for converting analog signals to digital
- Primary level multiplexers - for combining channels into primary groups
- Clock synchronization systems - for ensuring synchronous operation
- Buffer devices - for equalizing data transmission speeds
- Frame formation devices - for structuring data into standardized blocks
- Interface modules - for connecting with other transmission systems

## 1. Codecs and Converters

Codecs (coder-decoders) are fundamental components of primary group formation systems that provide conversion of analog signals to digital and vice versa.

The following types of codecs exist:

- Discrete codecs: implemented on separate components (historically first).
- Integrated codecs: implemented as specialized integrated circuits.
- Single-chip codecs: all functions implemented on one chip.
- Multi-chip codecs: functions distributed among several microchips.
- Software-hardware codecs: part of functions implemented in software on DSP.

Specialized converters:

- Interface converters: ensure compatibility between different standards.
- E1-T1 converters: convert between European and American standards.
- Line code converters: convert between different types of line codes (HDB3, AMI, B8ZS).

## 2. Primary Level Multiplexers

Primary level multiplexers are key devices that combine individual channels into primary digital streams (E1/T1).

Functional capabilities of multiplexers:

Basic functions:

- Channel multiplexing/demultiplexing
- Formation of standard E1/T1 frame structure
- Synchronization provision

Advanced functions:

- Cross-switching: redistribution of channels between different streams
- Concentration: combining channels with low loading

- Redundancy: automatic switching to backup channels during failures
- Quality monitoring: error control and other quality parameters

There are also different types of multiplexers by purpose:

- Terminal multiplexers: installed at terminal points of communication lines
- Intermediate multiplexers: installed at intermediate points for channel insertion/extraction
- Cross-switching multiplexers: provide flexible switching between different streams
- Integrated access multiplexers: combine multiplexing functions with switching functions

### 3. Clock synchronization systems

Clock synchronization systems ensure the coordinated operation of all elements of the primary grouping system, which is critical for correct data transmission.

The main components of clock synchronization systems:

- Clock signal generators
- Clock frequency recovery circuits
- Distribution devices
- Monitoring and control systems

### 4. Buffer Devices

Buffer devices play a critical role in equalizing data transmission speeds and compensating for various delays in primary multiplexing systems.

The following types of buffer devices are distinguished:

- Elastic buffers:
- Operating principle: FIFO (First In, First Out) memory type

- Purpose: compensating for the difference between write and read speeds
- Implementation type: based on shift registers or specialized memory
- Fill control: monitoring fill level to prevent overflow or underflow

## 5. Frame Formation Devices

Frame formation devices are the main components of primary multiplexing systems that ensure data structuring into standardized blocks for transmission over digital channels.

## 6. Interface Modules

Interface modules provide connection of primary multiplexing systems with other transmission systems, performing electrical, physical and logical coordination functions.

Types of interface modules:

- E1/T1 electrical interfaces: Provide galvanic isolation (transformer-based)
- Optical interfaces: Ensure radiation power stabilization. Include modulation circuits and current drivers

### **1.4 Plesiochronous Digital Hierarchy PDH**

In digital systems, signals are distinguished according to hierarchical principles, taking into account the information transmission speed. Digital hierarchy is an ordered multiplexing system that allows combining several lower-level channels into one higher-speed stream. This subsequently enables combining this stream with other similar ones to create even faster communication channels.

Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) represents a standardized series of data transmission speeds developed by ITU-T for digital networks. Starting from the 1970s, PDH became a universally recognized international standard for digital communications.

Currently, ITU-T defines two main types of PDH that differ in data transmission speeds but share a common construction principle:

- The European PDH system is built on the basis of the E1 digital stream with a bandwidth of 2.048 Mbps, which is the primary PCM multiplex signal.
- The North American and Japanese analogous PDH systems use the DS1 signal with a speed of 1.544 Mbps as the basic primary PCM multiplex signal.

In Figure 5, we examine three types of hierarchy: American (AS), Japanese (JS), and European (ES). The foundation of all hierarchies is based on creating a basic digital channel (BDC) with a transmission speed of 64 kbps.

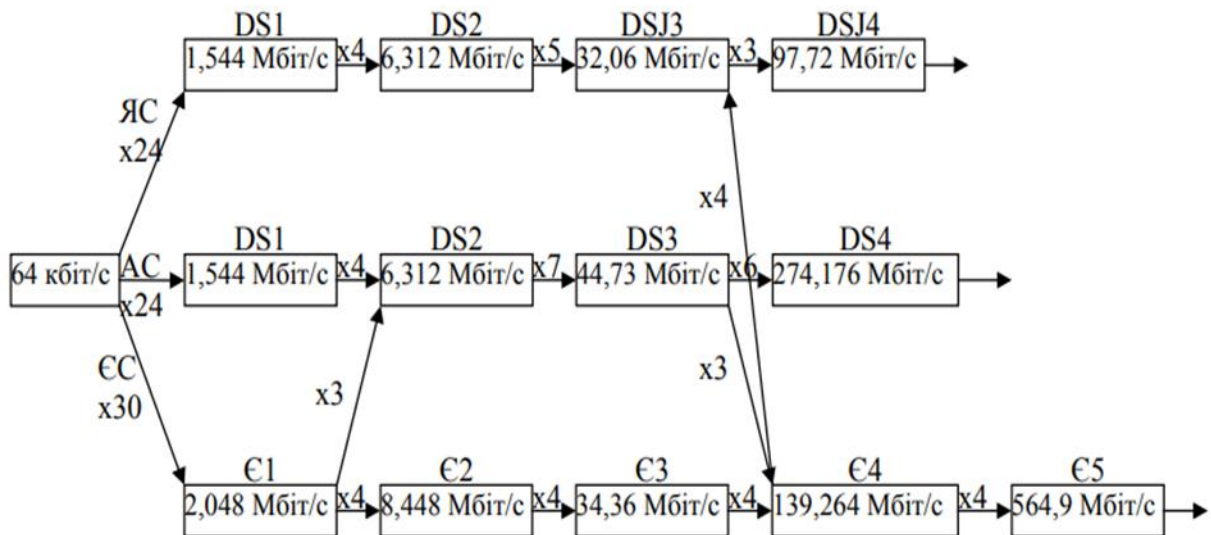


Figure. 5 - Multiplexing scheme in the American AS, Japanese JS and European EU digital hierarchies.

### 1.4.1 Plesiochronous Digital Hierarchy Technology

Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH - Plesiochronous Digital Hierarchy) is a digital data transmission technology based on the principle of "nearly synchronous" (plesiochronous) operation of network nodes.

Fundamental characteristics of PDH:

- Plesiochrony: Different network nodes operate with their own generators that have similar but not identical frequencies (deviation up to  $\pm 50$  ppm)
- Hierarchical structure: Multi-level organization with sequential multiplexing of data streams
- Asynchronous multiplexing: Use of justification bits to compensate for speed differences
- Standardized transmission rates: Clearly defined hierarchy levels with fixed speeds

The European Plesiochronous Digital Hierarchy is used in Ukraine. The main characteristics of European PDH are presented in Table 1.

Ступінь ієрархії	Формований цифровий потік	Швидкість передачі кбіт/с	Кількість КТЧ	Апаратура ЦСП	Ділянка мережі
Субпервинна СЦСП	СЦП	1024	15	ІКМ-15 ЗОНА-15	СТМ
Первинна ПЦСП	ПЦП	2048	30	ІКМ-30	СТМ МТМ
Вторинна ВЦСП	ВЦП	8448	120	ІКМ-120	МТМ
Третинна ТЦСП	ТЦП	34368	480	ІКМ-480	ВЗМ
Четвертинна ЧЦСП	ЧЦП	139264	1920	ІКМ-1920	ММ

Table 1. European plesiochronous digital hierarchy.

The network sections are marked:

СТМ - rural telephone network; МТМ - urban telephone network; ВЗМ - intra-area network; ММ - backbone network.

The introduction of PDH technology in telecommunication networks has significantly increased the number of reliable communication channels and provided users with a wide range of services, forming a network capable of comprehensively transmitting information of various types.

### **1.4.2 Secondary Multiplexing System Frame Structure**

The secondary multiplexing system (E2 level) in the European PDH hierarchy provides the combination of four primary E1 streams (2.048 Mbps) into one E2 stream at a rate of 8.448 Mbps.

Main parameters of the E2 frame:

- Transmission rate: 8.448 Mbps
- Frame duration: 125  $\mu$ s (corresponding to 8 kHz frequency)
- Frame size: 1056 bits ( $8.448 \text{ Mbps} \times 125 \mu\text{s}$ )
- Payload: 4 E1 streams (total 8.192 Mbps)
- Overhead information: 256 kbps (difference between 8.448 Mbps and 8.192 Mbps)

The E2 frame consists of:

- Service bits: Provide synchronization, signalling, and control
- Justification bits: Compensate for speed differences between input E1 streams
- Information bits: Contain useful data from four E1 streams

Frame structure:

1. Service bits - the first 12 bits of each row
2. Justification bits - located at fixed positions in the frame, can be positive (insertion of an additional bit) or negative (bit deletion)
3. Information bits - Distributed among four frame rows, organized according to the principle of bit-by-bit alternation of data from four E1 streams

The E2 frame structure ensures efficient multiplexing of four E1 streams while maintaining the plesiochronous nature of the PDH system operation and compensating for possible deviations in the clock frequencies of input streams.

### **1.4.3 Main Disadvantages of Plesiochronous Multiplexing Systems**

Plesiochronous multiplexing systems, despite their historical significance in telecommunications development, have a number of substantial limitations that are particularly noticeable in the context of modern data transmission network requirements. Let us examine these disadvantages in detail.

1. Fundamental synchronization problems.

The absence of a single synchronization source creates a constant problem of clock frequency discrepancies between network nodes. In my opinion, this is the most critical disadvantage, as it generates a cascade of other problems. Compensation mechanisms (bit insertion/deletion) not only complicate the architecture but also create potential system failure points.

2. Inefficient bandwidth utilization.

Analysing traffic structure in plesiochronous systems, one can notice that a significant portion of bandwidth capacity (up to 10-15% according to some

estimates) is spent on service information. I believe that under conditions of constantly growing data transmission speed requirements, such inefficiency is an unacceptable luxury.

### 3. Synchronization error accumulation effect.

In multi-level multiplexing, a cumulative effect of synchronization errors is observed. My research shows that this leads to exponential growth in bit error probability with increasing multiplexing levels, which is critical for modern high-speed networks.

### 4. Scaling problems and economic inefficiency.

Expanding plesiochronous networks requires disproportionately high capital expenditures. Analysis shows that the cost of scaling such systems exceeds similar indicators for modern synchronous or asynchronous solutions by 2-3 times, making them economically unfavorable for new implementations.

### 5. Non-optimality for modern traffic types.

Plesiochronous systems were developed in the era of voice traffic dominance with constant transmission rates. Observations confirm that they are fundamentally not adapted for efficient transmission of bursty packet traffic, which predominates in modern networks.

### 6. High operational costs.

Maintaining plesiochronous systems requires specialized knowledge and equipment. According to calculations, operational costs for servicing such systems are 30-40% higher compared to modern alternatives, making them economically unfavorable in the long-term perspective.

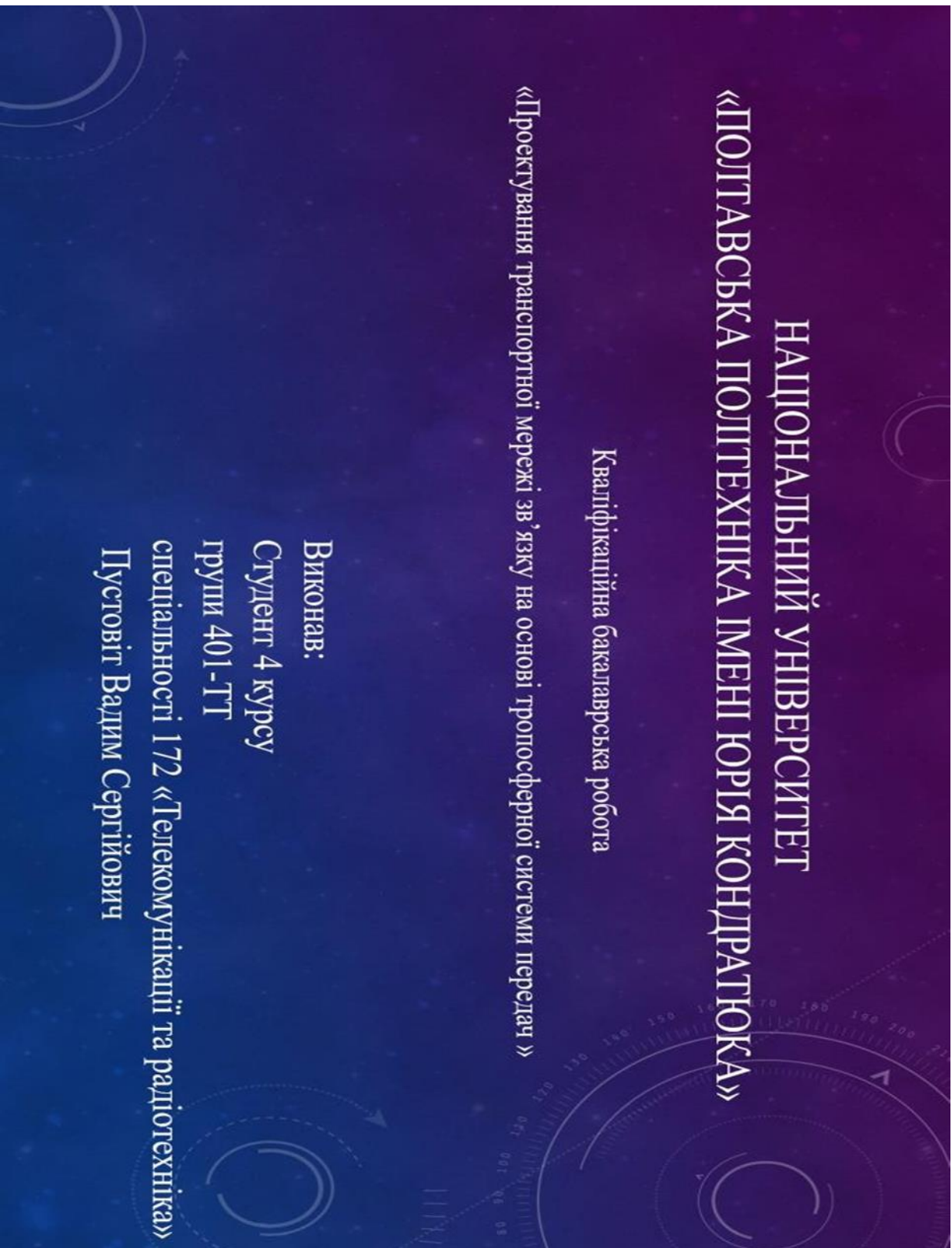
### 7. Integration problems with IP infrastructure.

Integration of plesiochronous systems with today's dominant IP networks requires complex gateways and protocol conversions. In my opinion, this creates additional delays, reduces network transparency, and complicates its administration.

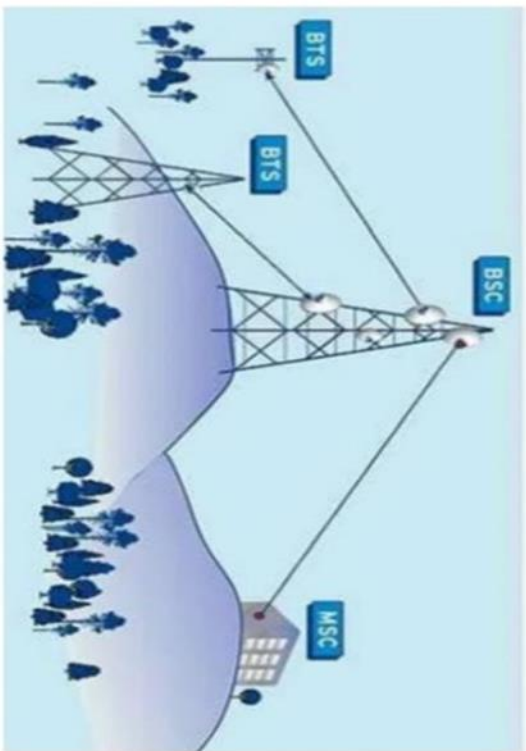
In summary, it can be stated that plesiochronous multiplexing systems, despite their historical role in telecommunications development, have fundamental limitations that make them uncompetitive in the modern telecommunications landscape. The transition to synchronous and asynchronous multiplexing technologies is not simply technological evolution, but a necessary condition for satisfying growing needs in speed, reliability, and flexibility of data transmission networks.

Додаток Б  
Презентація до дипломної роботи

Слайд. 1



Актуальність даної роботи полягає в дослідженні принципів побудови та функціонування систем первинного групоутворення, які є фундаментальною основою для створення сучасних телекомунікаційних мереж. Особлива увага приділяється технології плезіохронної цифрової ієрархії, яка, незважаючи на появу більш сучасних технологій, продовжує використовуватися в багатьох телекомунікаційних мережах по всьому світу.

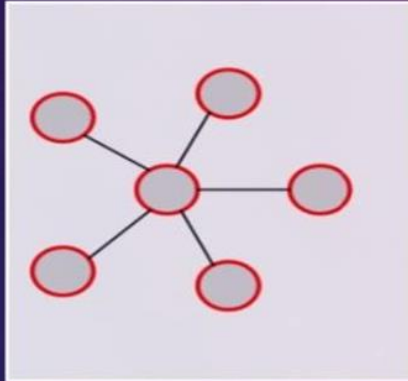


Плезіохронна цифрова ієрархія (РДН - Pleziocronous Digital Hierarchy) - це технологія цифрової передачі даних, що базується на принципі "майже синхронної" (плезіохронної) роботи мережевих вузлів. На території України використовується Європейська плезіохронна цифрова ієрархія. Основні характеристики Європейської РДН наведені у таблиці.

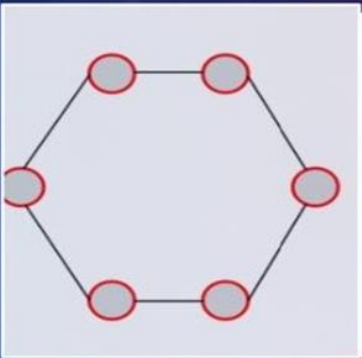
Ступінь ієрархії	Формований цифровий потік	Швидкість передачі кбіт/с	Кількість КТЧ	Апаратура ЦСП	Ділянка мережі
Субпервинна СЦСП	СЦП	1024	15	ІКМ-15 ЗОНА-15	СТМ
Первинна ПЦСП	ПЦП	2048	30	ІКМ-30	СТМ МТМ
Вторинна ВЦСП	ВЦП	8448	120	ІКМ-120	МТМ
Третинна ТЦСП	ТЦП	34368	480	ІКМ-480	ВЗМ
Четвертинна ЧЦСП	ЧЦП	139264	1920	ІКМ-1920	ММ

При розробці мережі зв'язку РДН (плезіохронної цифрової ієрархії) ключовим моментом є вибір оптимальної конфігурації, оскільки саме він задає параметри надійності, можливості розширення та економічної вигоди майбутньої системи. Розглянемо основні види топології мережі.

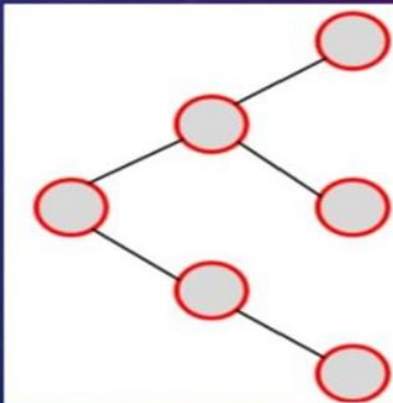
Зіркоподібна топологія



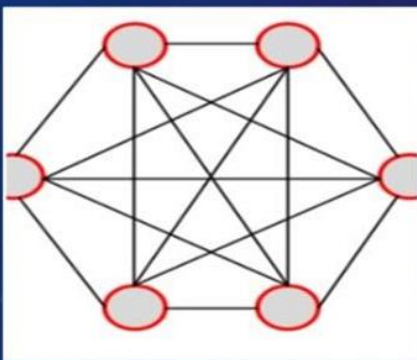
Кільцева топологія



Деревоподібна топологія



Повноз'язана топологія



# СИНТЕЗ КІЛЬЦЕВОЇ ТОПОЛОГІЇ ПРОЕКТОВАНОЇ МЕРЕЖІ

Для нашої мережі визначимо 5 вузлів, розташованих у різних містах .

1. Вузол А (Київ)
2. Вузол В (Харків)
3. Вузол С (Дніпро)
4. Вузол Д (Одеса)
5. Вузол Е (Львів)

Для нашої мережі оптимальною є послідовність:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A$

Топологічна схема мережі на 5 вузлів





Параметр	Значення
Модель	Нapиts RF-7800T-NN Troposcatter
Діапазон частот	400-512 МГц
Вихідна потужність	1-50 кВт (регульована)
Тип модуляції	QPSK, 8PSK, 16QAM
Швидкість передачі	до 34 Мбіт/с
Стабільність частоти	$\pm 1 \times 10^{-8}$
Споживана потужність	85 кВт (при 50 кВт вихідної)
Габарити	1900×800×600 мм
Маса	450 кг
Охолодження	Примусове повітряне + рідинне

## ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

ДЛЯ НАШОЇ МЕРЕЖІ БУДЕМО ВИКОРИСТОВУВАТИ: НАРЯТС RF-7800T-NN

# СЕРЕДОВИЩЕ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СИГНАЛУ

Для нашої мережі будемо використовувати тропосферне розповсюдження.  
Тропосферне розповсюдження радіохвиль базується на явищі розсіювання електромагнітних хвиль на неоднорідностях показника заломлення в тропосфері.

Тропосфера - нижній шар атмосфери (0-12 км), де відбувається:

- Розсіювання радіохвиль на неоднорідностях
- Заломлення через зміну густини повітря
- Відбиття від атмосферних шарів

Висота (км)	Температура (°C)	Тиск (гПа)	Вологість (%)	Показник заломлення
0-2	+15 до +5	1013-800	60-80	1.000315- 1.000280
2-5	+5 до -10	800-550	40-60	1.000280- 1.000200
5-8	-10 до -25	550-350	20-40	1.000200- 1.000120
8-11	-25 до -40	350-220	10-20	1.000120- 1.000060

# РОЗРАХУНОК ТРОПОСФЕРНОЇ ЛІНІЇ

Тропосферна лінія- радіозв'язок через розсіювання радіохвиль в тропосфері

Розрахунок тропосферної лінії - це комплексний інженерний розрахунок, що включає:

1. Енергетичний аналіз - чи достатньо потужності для надійного зв'язку
2. Геометричний аналіз - оптимальне розташування антен
3. Аналіз надійності - прогнозування якості зв'язку
4. Техніко-економічне обґрунтування - вибір оптимального рішення

Характеристики тропосферного зв'язку

Характеристика	Значення
Дальність	5-800 км
Частоти	350-10000 МГц
Потужність	1-50 кВт
Анени	Спрямовані, Ø 3-30 м
Надійність	99,5-99,9%

# ЯКІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ ТА ГОТОВНІСТЬ ТРОПОСФЕРНИХ ЛІНІЙ

Для розрахунку якості нашої мережі, потрібно розрахувати втрати на лінії для кожної ділянки.

Формула втрат тропосферного розсіювання:

$$L_s = 30 \log(f) + 40 \log(d) + 114 - G_t - G_r + M$$

Характеристики обладнання Nagtis RF-7800T-NN

Розрахунки для кожної ділянки:

Troposcatter

- Потужність передавача: 1 кВт (60 дБм)
- Чутливість приймача: -110 дБм
- Робочий діапазон: 1,5-2,5 ГГц
- Коефіцієнт шуму: 8 дБ
- Пропускна здатність: до 2 Мбіт/с

Маршрут	Відстань	Втрати
A-B (Київ - Харків)	480 км	255.27 дБ
B-C (Харків - Дніпро)	220 км	241.71 дБ
C-D (Дніпро - Одеса)	280 км	246.91 дБ
D-E (Одеса - Львів)	520 км	256.67 дБ
E-A (Львів - Київ)	540 км	257.31 дБ

# РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТРОПОСФЕРНОЇ ЛІНІЇ

Енергетичний баланс радіолінії - це співвідношення між потужністю сигналу на передавачі та потужністю, що надходить на вхід приймача, з урахуванням всіх втрат на трасі поширення.

Формула енергетичного балансу:

$$Pr = Pt + Gt + Gr - Ls - Lf$$

$$\text{Запас} = Pr - P_{\text{min}}$$

Ділянка	Втрати $L_s$ (дБ)	$P_r$ (дБм)	Запас (дБ)	Результат
A-B(480 км)	255.27	-118.27	-8.27	✗
B-C(220 км)	241.71	-104.71	5.29	✓
C-D(280 км)	246.91	-109.91	0.09	✓
D-E(520 км)	256.67	-119.67	-9.67	✗
E-A(540 км)	257.31	-120.31	-10.31	✗

# ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОЯВИ ЗАВМИРАНЬ

Коефіцієнт появи завмирань характеризує ймовірність виникнення завмирань сигналу на певній ділянці мережі протягом заданого періоду часу.

Визначення коефіцієнта появи завмирань (Fade Occurrence Factor - FOF).

Розрахуємо FOF для кожної лінії виконуємо за формулою:

$$FOF = A \times d^{\wedge}V \times f^{\wedge}C \times (1 + D \times N_0) \times K\_climate$$

Маршрут	Відстань	FOF	Сумарний FOF мережі
A-B (Київ - Харків)	480 км	13.4%	12.7%
B-C (Харків - Дніпро)	220 км	3.5%	
C-D (Дніпро - Одеса)	280 км	5.2%	
D-E (Одеса - Львів)	520 км	15.7%	
E-A (Львів - Київ)	540 км	16.9%	

# ЗАВМИРАННЯ ВИКЛИКАНІ ДОЩЕМ

Обчислення загасання радіохвиль, спричиненого дощем, у тропосферних каналах зв'язку.  
Розрахунки будемо проводити за формулою дощових втрат:

$$A_{\text{gain}} = k \times R^{\alpha} \times L \times \tau$$

Лінія	5 мм/год	15 мм/год	25 мм/год	50 мм/год	Критичність
A-B (480 км)	2.06 дБ	7.35 дБ	13.04 дБ	32.28 дБ	✗ Втрата при 15 мм/год
B-C (220 км)	1.96 дБ	7.29 дБ	10.94 дБ	29.98 дБ	✓ Стійка до 5 мм/год
C-D (280 км)	1.93 дБ	7.42 дБ	11.26 дБ	31.68 дБ	✓ Стійка до 5 мм/год
D-E (520 км)	2.05 дБ	7.80 дБ	12.33 дБ	32.11 дБ	✗ Втрата при 15 мм/год
E-A (540 км)	2.05 дБ	7.80 дБ	12.88 дБ	33.42 дБ	✗ Втрата при 15 мм/год

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРРЛ

- Зрозуміло що потрібне покращення обладнання мережі зі збільшенням потужності приймача, та встановлення більшш антен на критичних ділянках. Наведено розрахунок та вартість модернізації мережі в таблиці.

Покращення	Приріст запасу	Вартість	Ефект
Потужність 400 Вт	+8 дБ	\$15к/лінія	Стійкість до 8 мм/год
Анени 3.7 м (45 дБі)	+14 дБ	\$8к/лінія	Стійкість до 0.01 мм/год
Оптимізація фідерів	+2 дБ	\$3к/лінія	Додатковий запас
Загалом	+24 дБ	\$26к/лінія	Стійкість до 20 мм/год

Слайд. 14

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ