

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського**  
**РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА**  
**РАДІОПРИЙМАННЯ ТА ОБРОБЛЕННЯ СИГНАЛІВ**

**Навчальна дисципліна: «МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ»**

**Навчальна група: РА - 61М**

**Викладач: професор кафедри РОС**

**ДРУЖИНІН ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ**

# **ЛЕКЦІЯ №10: «ОСНОВИ ПОБУДОВИ ТА МОДЕЛІ КАНАЛІВ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ»**

## **Навчальні питання:**

- 1. Основні поняття про канал електрозв'язку**
- 2. Причини спотворень сигналів в каналах електрозв'язку**
- 3. Математичні моделі каналів електрозв'язку**

# 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО КАНАЛ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ

**КАНАЛ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ** - сукупність технічних засобів, призначених для перенесення електричних сигналів між двома пунктами телекомунікаційної мережі, і який характеризується смугою частот та/або швидкістю передачі.

Інакше **каналом електрозв'язку** можна назвати сукупність засобів, що забезпечують передачу сигналу від деякої точки **А** до точки **Б**

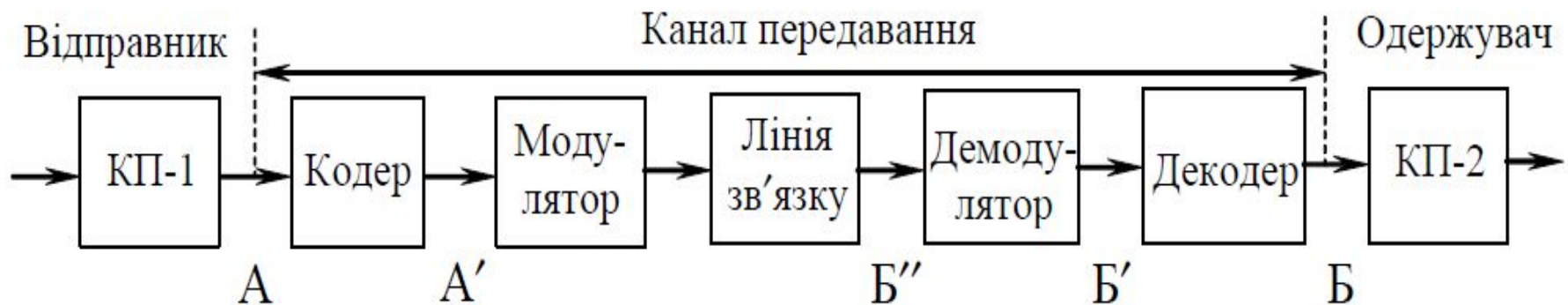


Рис. 1 Канал ЕЗ

**У залежності від характеру сигналів**, передачу яких вони забезпечують, розрізняють канали:

**НЕПЕРЕРВНІ;**

**ДИСКРЕТНІ;**

**ПІВНЕПЕРЕРВНІ** (дискретно-неперервні чи неперервно-дискретні).

Якщо сигнали, що надходять на вхід каналу і знімаються з його виходу є дискретними (**за рівнем**), то канал називається **ДИСКРЕТНИМ**.

Якщо вхідні і вихідні сигнали є неперервними (**за рівнем**), то і канал називається **НЕПЕРЕРВНИМ**.

Зустрічаються також **ПІВНЕПЕРЕРВНІ** канали, на вхід яких надходять дискретні сигнали, а з виходу знімаються неперервні, або навпаки.

**!!!** В одній і тій же системі зв'язку можна виділити як дискретний, так і неперервний канал. **Усе залежить від того, яким чином обрані точки А и Б входу і виходу каналу.**

## 2. ПРИЧИНИ СПОТВОРЕНЬ СИГНАЛІВ В КАНАЛАХ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ

У каналі електрозв'язку корисний сигнал  $A(t)$  піддається природному загасанню (ослабленню) і штучному посиленню.

Бажано мати канали, які б не спотворювали сигналів, що передаються.

**\*\*\*** З теорії електричних кіл відомо, що передачу сигналів без спотворень забезпечує лінійна система з рівномірною амплітудно-частотною і лінійною фазо-частотною характеристиками в смузі частот сигналу.

Зрозуміло, що сформульовані умови для реальних каналів передавання в основному не виконуються. Тому в процесі передачі сигнал  $A(t)$  спотворюється.

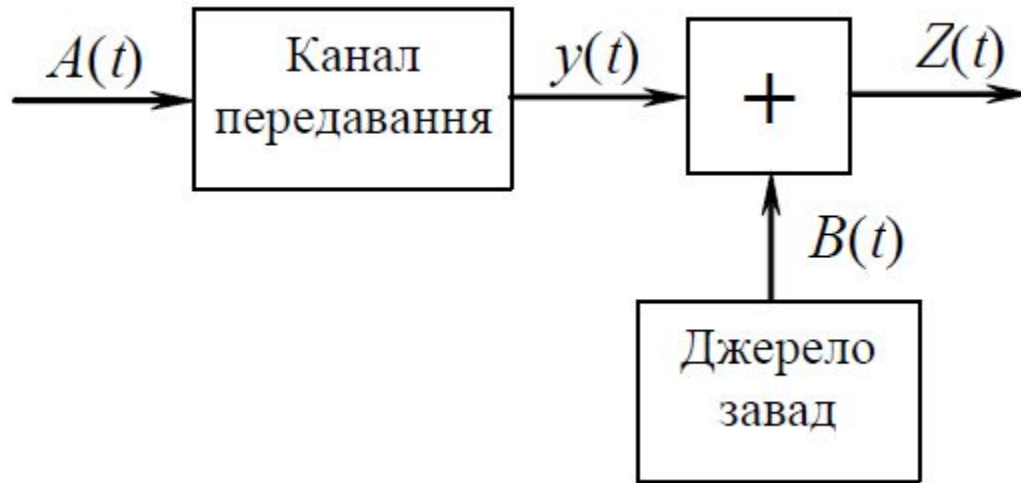


Рис. 2 Спотворення та ослаблення сигналу в каналі зв'язку

\*\*\* У загальному **випадку вплив каналу електрозв'язку** (як **сукупності технічних засобів і середовища поширення**) на корисний сигнал  $A(t)$ , **який полягає в його ослабленні і спотворенні**, може бути виражений оператором

$$y(t) = V_y[A(t)],$$

де  $V_y$  – символ оператора, що математично описує перетворення сигналу

$A(t)$  у процесі його проходження через канал передавання

Оператор може бути як **ЛІНІЙНИМ**, так і, у загальному випадку, **НЕЛІНІЙНИМ**.

**\*\*\*** Конкретний вид оператора визначається **технічною структурою апаратури, яка входить до складу каналу передавання, і властивостями середовища поширення.**

**ЗАВАДА** - випадкові процеси різноманітного походження, які заважають правильному прийманню сигналу.

**ВПЛИВ ЗАВАДИ**  $B(t)$ , чи декількох завад  $B_1(t), B_2(t), \dots, B_n(t)$  на корисний сигнал  $y(t)$  у загальному вигляді може бути виражений оператором

$$Z(t) = V[y(t), B(t)] = V\{V_y[A(t)], B(t)\},$$

де  $Z(t)$  – коливання, що представляє собою суміш ослабленого та спотвореного корисного сигналу і завади;  $V$  – символ оператора, який враховує комплексний вплив на переданий сигнал  $A(t)$  спотворень і завад

**!!! Через складність задачі конкретний вираз оператора (2) може бути отриманий тільки для деяких окремих випадків.**

**Вид оператора  $V$ , який встановлює взаємозв'язок між величинами  $Z(t)$ ,  $A(t)$  і  $B(t)$ , визначається властивостями апаратури і середовища поширення, що входять до складу каналу передавання, типом і характеристиками діючих завад, а також видом і характеристиками сигналу  $A(t)$ .**

## **ПРИЧИНИ ТИПОВИХ СПОТВОРЕНЬ СИГНАЛІВ**

1. Апаратурні спотворення, викликані технічною несправністю або неточністю налаштування і регулювання апаратури.

2. Спотворення сигналів, викликані відхиленням характеристик каналу передавання від припустимих норм. Внаслідок повільної зміни характеристик середовища поширення та окремих елементів каналу передавання.

3. Спотворення сигналів, що виникають через випадкові швидкі зміни характеристик і параметрів каналу передавання (перерви зв'



**КАНАЛИ ПЕРЕДАВАННЯ**, у яких **параметри спотвореного сигналу тривалий час залишаються постійними**, називають **КАНАЛАМИ ПЕРЕДАВАННЯ з ПОСТІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**. До них можна віднести канали ближнього наземного радіозв'язку, канали прямої видимості (радіорелейного і космічного зв'язку), канали некомутованих провідних, кабельних і хвилевідних систем передавання, оптичні канали.

**КАНАЛИ ПЕРЕДАВАННЯ**, які характеризуються **неперервною і випадковою швидкою зміною параметрів сигналу** називають **КАНАЛАМИ ПЕРЕДАВАННЯ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ (КАНАЛАМИ З ВИПАДКОВИМИ ПАРАМЕТРАМИ)**.

**ДО НИХ ВІДНОСЯТЬСЯ:**

канали передавання з тропосферним і іоносферним поширенням радіохвиль, канали передавання з відбиттям від метеоритних слідів, Місяця, Землі, гідроакустичні канали та інші канали з вільним середовищем поширення;

комутовані кабельні лінії і хвилевідні канали передавання.

**ВИСНОВОК.** Приймання сигналів в каналах з випадковими параметрами є більш складною задачею, ніж приймання в каналах з постійними параметрами.

Це пов'язано з тим, що при прийманні необхідно враховувати випадкові зміни параметрів сигналу.

Для дослідження процесів приймання сигналів зі змінними параметрами необхідно ВИЗНАЧИТИ МОДЕЛЬ каналу передавання (вигляд оператора  $V$ ), яка б враховувала основні особливості конкретної апаратури зв'язку і середовища поширення.

**!!!** Тільки при наявності такої моделі можуть вирішуватися задачі розробки пристроїв оптимального приймання сигналів в каналах зі змінними параметрами, а також оцінки їх завадостійкості.

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\*** Модель використовується для опису каналів **з закритим поширенням малої довжини** (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

$$Z(t) = \mu A(t - \tau) + B(t) \quad (3)$$

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямоївидимості.**

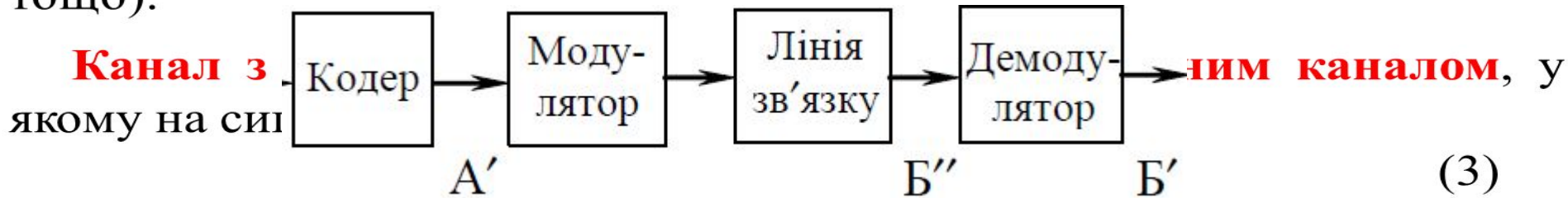
### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**



де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямоївидимості.**

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з гауссі**  $\epsilon$  **ідеальним каналом**, у якому на сигнал  $n$ : 
$$P(A_j/A_i) = \begin{cases} \frac{P_{\text{ПОМ}}}{m-1}, & i \neq j; \\ 1 - P_{\text{ПОМ}}, & i = j. \end{cases} \quad (3)$$

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямоївидимості.**

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для опису та синтезу систем зв'язу. При аналізі і синтезі систем зв'язу використовують ідеальні моделі каналів, які називаються ІДЕАЛЬНИЙ ТЕРМІНОВАНИ**

$$P(l) = C_n^l \left( \frac{P_{\text{пом}}}{m-1} \right)^l (1 - P_{\text{пом}})^{n-l},$$

де  $C_n^l = \frac{n!}{l!(n-l)!}$  – біноміальний коефіцієнт, який дорівнює кількості різних

сполучень  $l$  помилок у блоці з  $n$  символів.

поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  – коефіцієнт перелачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідності  $P_{\text{пом}l} = \sum_{l=1}^n C_n^l P_{\text{пом}}^l (1 - P_{\text{пом}})^{n-l}$  ацює у межах прямоївидимості.**

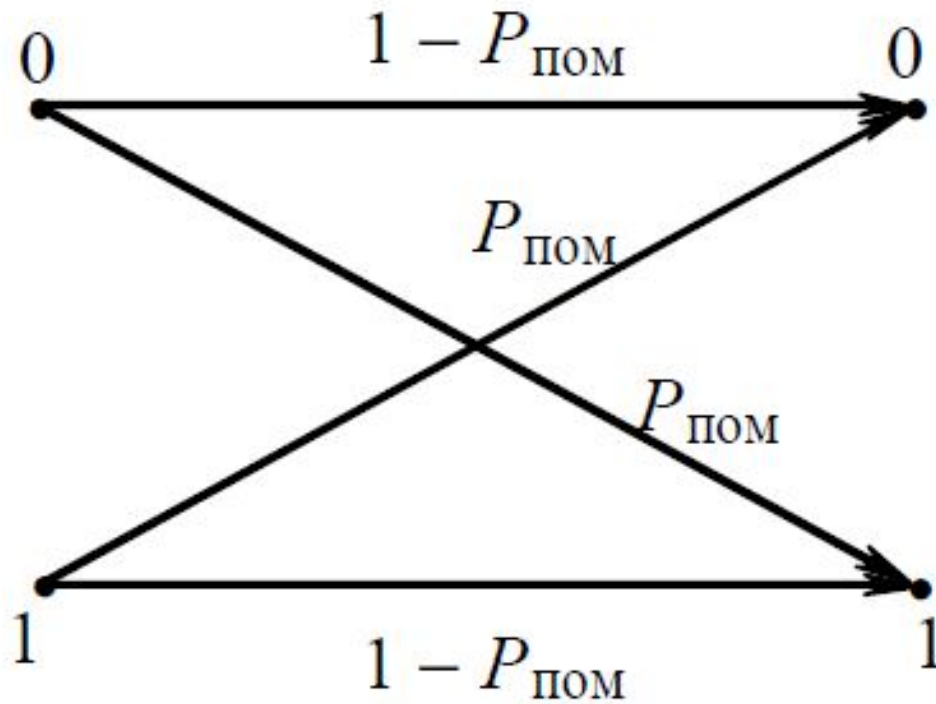


Рис. 4 Ймовірності переходів у двійковому симетричному каналі



### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

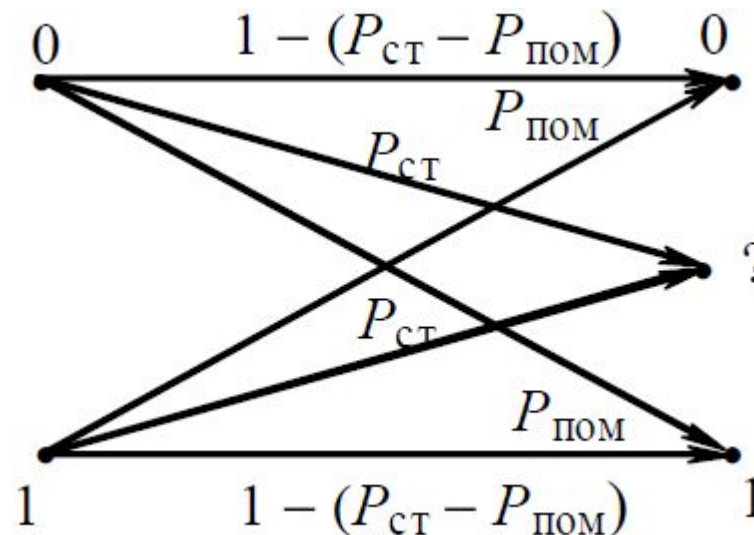
**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\*** Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої тощо).

**Канал з гауссівським шумом** на сигнал накладено шум

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнти шуму, відомі в точці прийому.



**свод, світловод**

**им каналом, у**

(3)

зання постійні і

# ДИСКРЕТНИЙ КАНАЛ З ПАМ'ЯТТЮ

**!!!** Більшість реальних каналів мають «пам'ять», що проявляється в тому, що імовірність помилки в символі залежить від того, які символи передавалися до нього (1) і як вони були прийняті (2).

1. **Перший факт обумовлений міжсимвольними спотвореннями, які є результатом розсіювання сигналу в каналі.**

2. **Другий – зміною відношення сигнал/шум у каналі або характеру завад.**

**Відхилення закону розподілу помилок від біноміального (каналу без пам'яті) у реальних каналах викликається різними причинами, а саме:**

1. **Наявністю завмирань переданого сигналу, а також атмосферних і взаємних завад.**

2. **Особливостями методу модуляції і демодуляції (наприклад, при використанні методу ВФМ-2).**

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

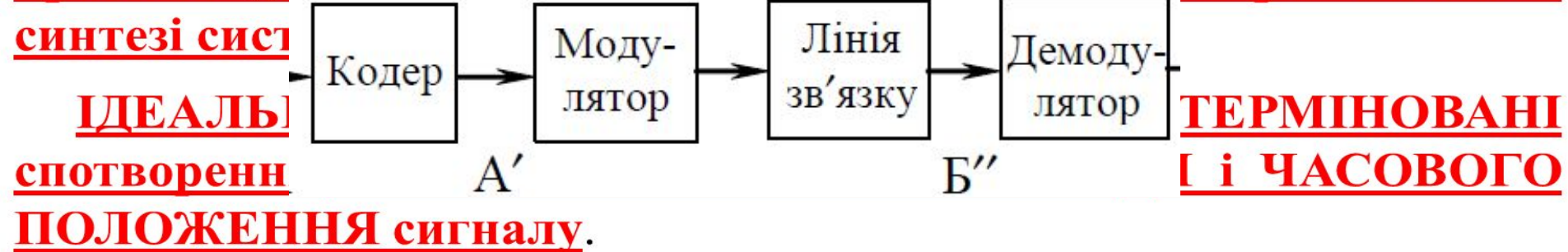
**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі сист**



**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\*** Модель використовується для опису каналів **з закритим поширенням малої довжини** (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $P(A_i/Z) = \frac{P(A_i)p(Z/A_i)}{p(Z)} = \frac{P(A_i)p(Z/A_i)}{\sum_m P(A_m)p(Z/A_m)}$ ,  $i = 1, \dots, m$ , постійні і **межах**

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель вик у каналів з закритим поширенням мало**  $y(t) = \int_{-\infty}^t h(t, \tau) \cdot A(t - \tau) d\tau$  **від, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

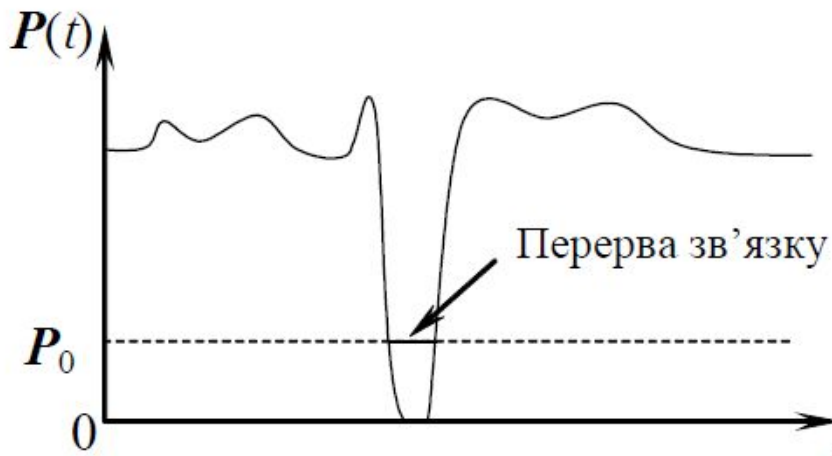
**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\*** Модель використовується для опису каналів з **закритим поширенням малої довжини** (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).

**Канал з г**  
якому на сигн

де  $\mu, \tau$  -  
відомі в точці п



**реальним каналом, у**

(3)

апізнювання постійні і

**\*\*\*** М

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

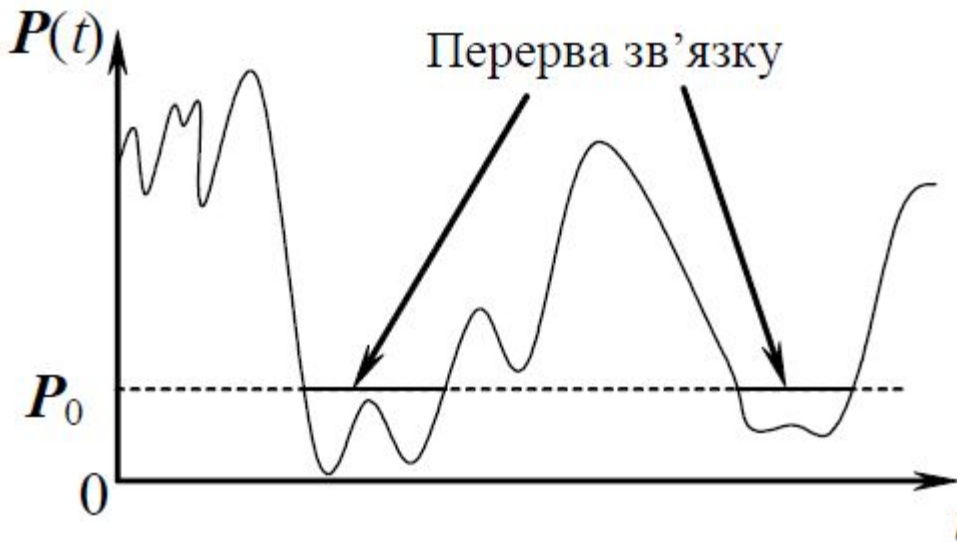
**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальній**

**\*\*\*** Моде поширенням тощо).

**Канал з і** якого на сиг.

де  $\mu, \tau$  - відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямої видимості.**



каналів **з закритим** зилевод, світловод

**ьним каналом, у**

(3)

нювання постійні і

У механізмі завмирання сигналів розрізняють **ПОВІЛЬНІ** і **ШВИДКІ** завмирання.

**ПОВІЛЬНІ** завмирання відображають процеси поглинання сигналу й обумовлені змінами макроструктури середовища поширення, які відбуваються під впливом метеорологічних умов, пори року, клімату, геомагнітної активності, ядерних вибухів і інших факторів.

**!!!** При цьому характеристики середовища поширення змінюються повільно. **Їх середній квазіперіод складає десятки хвилин, години, дні, місяці і навіть роки.**

Шкідливий вплив повільних завмирань неможливо усунути вибором визначеного виду сигналу чи шляхом використання оптимальних методів приймання.

**ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ** таких завмирань **необхідне збільшувати потужність випромінюваного сигналу або використовувати спеціальні способи приймання сигналів.**



**ШВИДКІ ЗАВМИРАННЯ** обумовлені змінами мікроструктури середовища поширення.

**Мікроструктура відображає місцеві (локальні) особливості будови середовища, обумовлені вихровими, а також фізико-хімічними процесами в окремих ділянках неоднорідного середовища.**

**Середній квазіперіод швидких завмирань складає одиниці і частки секунди.**

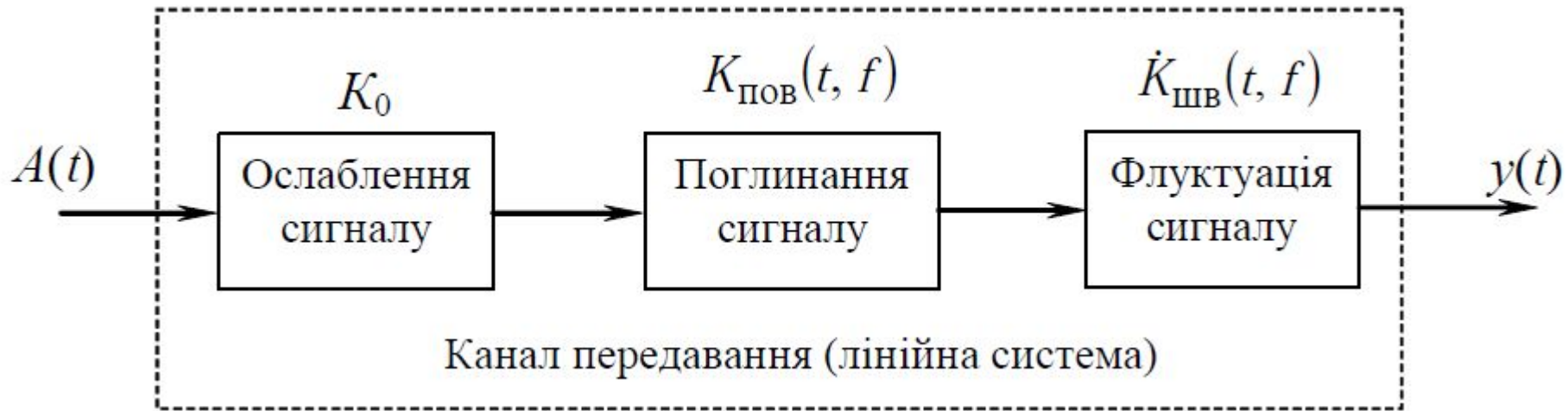


Рис. 9 Модель каналу передачі

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

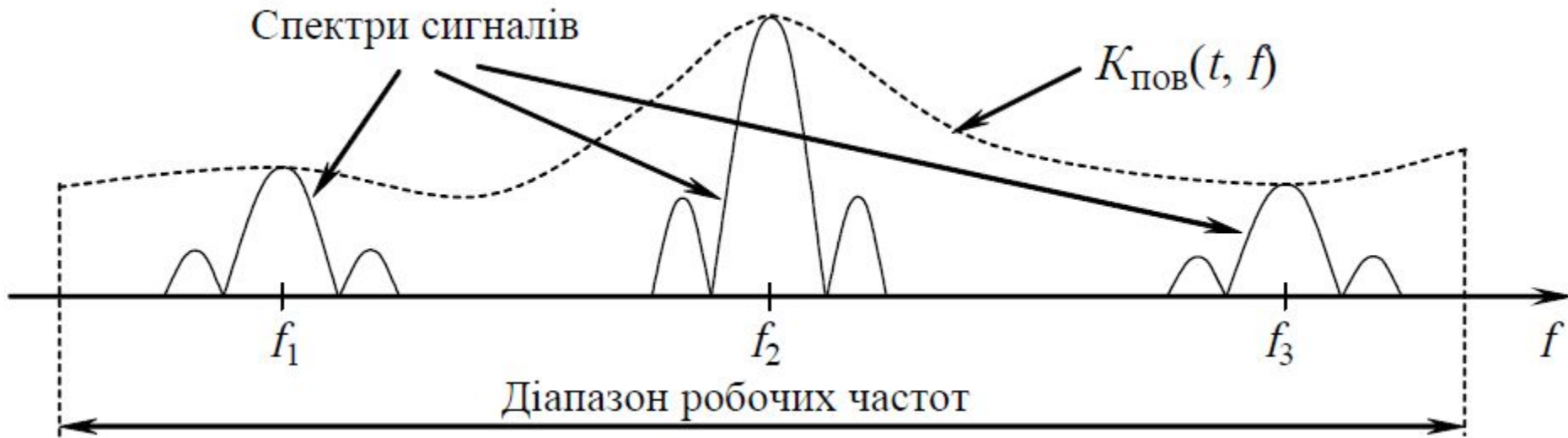
**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямоївидимості.**

## 2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ



переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.

\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

\*\*\* Модель прямоївидимості  $\dot{K}(t, f) = K \cdot K_{\text{ПОВ}}(t, f) \cdot \dot{K}_{\text{ПВР}}(t, f)$ . у межах

**\*\*\*** Швидкі завмирання впливають на властивості каналу передачі, причому ступінь цього впливу визначається співвідношенням параметрів середовища поширення і параметрів сигналу.

**!!!** Тому шкідливий вплив швидких завмирань може бути ослаблений вибором виду сигналу і відповідною структурою побудови апаратури каналу передавання.

**У КАНАЛАХ З ІОНОСФЕРНИМ ПОШИРЕННЯМ РАДІОХВИЛЬ** сигнал поширюється декількома шляхами. На антену приймача впливають кілька променів

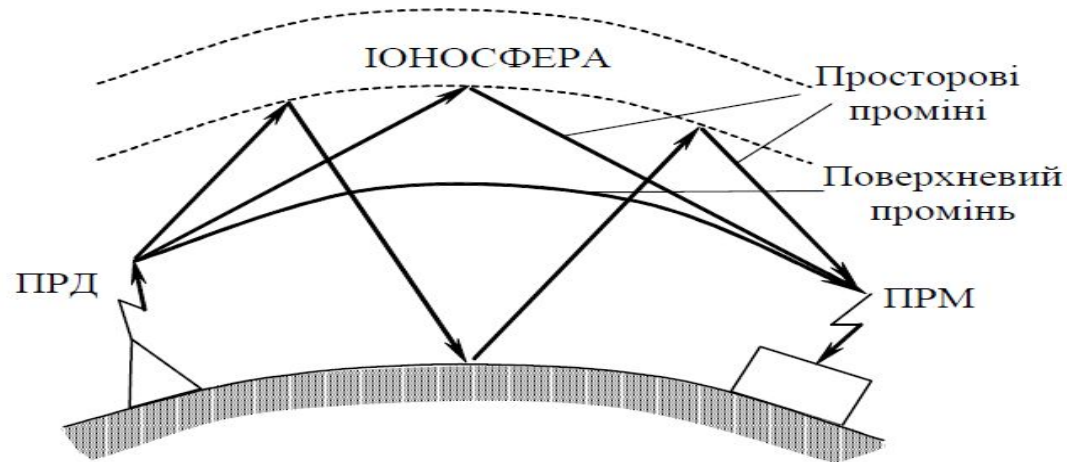


Рис. 11 Багатопроменеве розповсюдження РХ.

**!!! Якщо через багатопроменевий канал передавання передати короткий імпульс, то прийнятий сигнал буде являти собою послідовність затриманих за часом імпульсів, кількість яких дорівнює кількості затриманих променів**

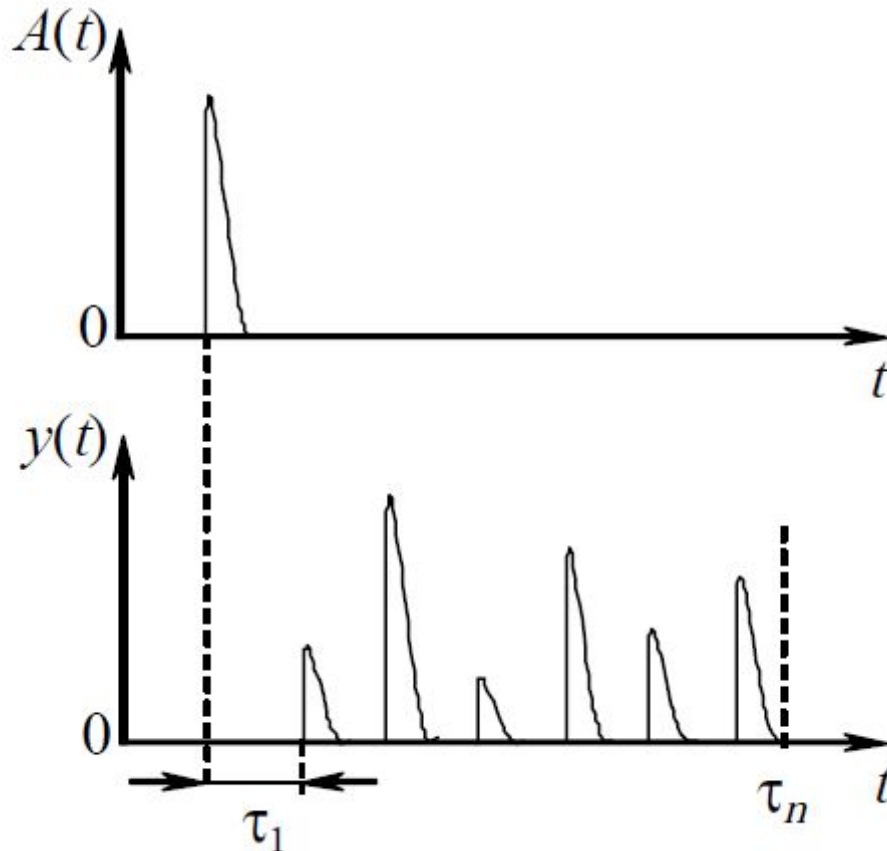


Рис. 12 Часова діаграма прийому сигналу при багатопроменевому розповсюдженні РХ

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в нове відліку.**

**\*\*\* Модель використо  $\Delta T_L = \tau_n - \tau_1$  опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\* Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямої видимості.**

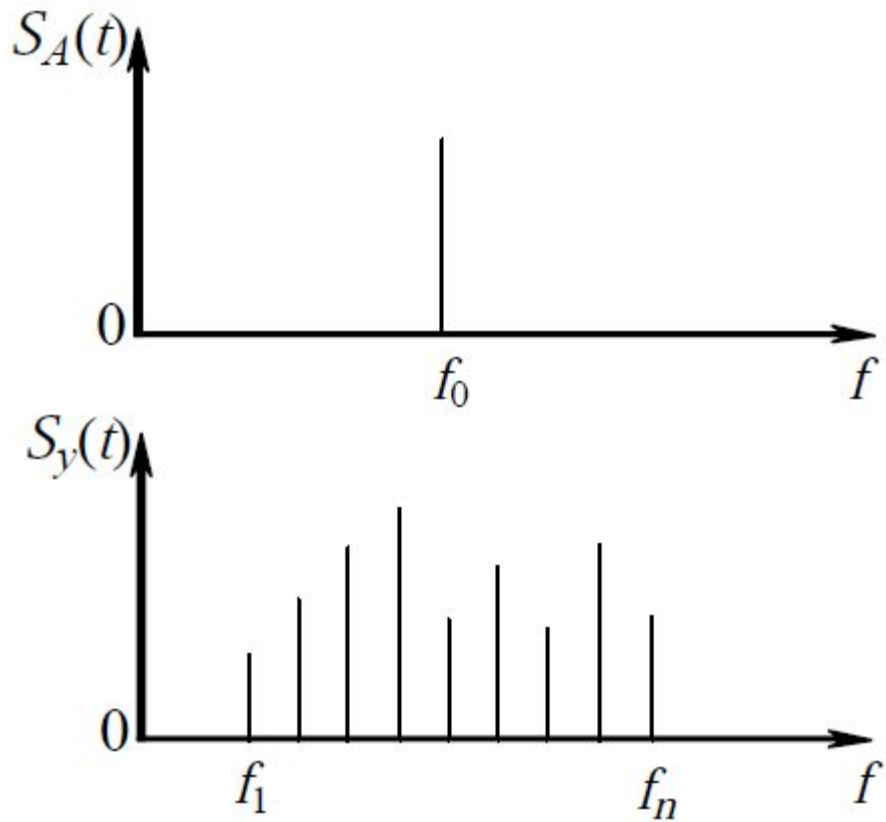


Рис. 13 Зміщення частоти в багатопроменовому каналі

Величину «розмиття» (розширення) спектра, усереднену за багатьма реалізаціями, називають **ВЕЛИЧИНОЮ ДОПЛЕРІВСЬКОЇ ЗОНИ.**

$$\Delta F = \overline{f - f_0}$$

\*\*\* Канали, у яких різниця ходу окремих променів відрізняється незначно, а число променів дуже велике (10...1000) і внесок кожного окремого променя в результуючий сигнал малий називають **КАНАЛАМИ З РОЗСІЮВАННЯМ**.

*До них можна віднести тропосферні канали, канали з відбиттям від метеорних слідів, Землі, Місяця і гір, гідроакустичні канали.*

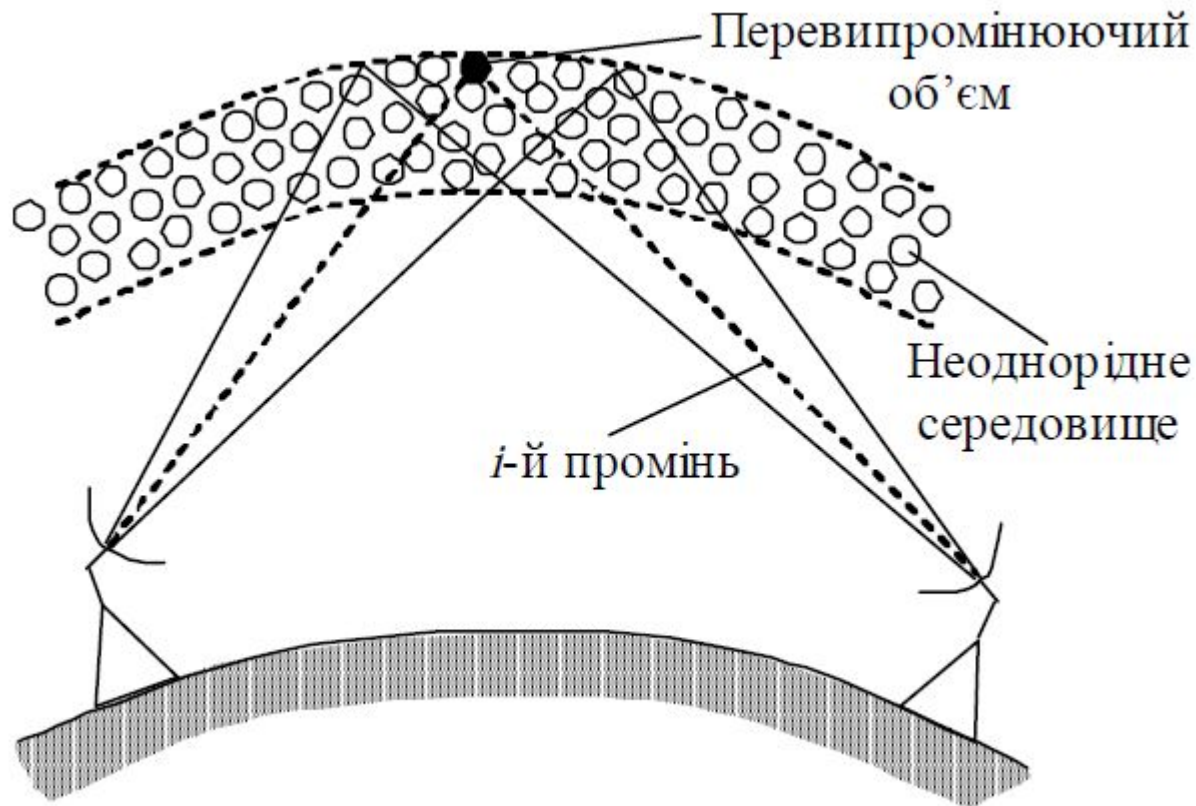


Рис. 14 Принцип тропосферного поширення сигналу в каналі РЗ



Сигнал на виході багатопроменевого каналу передавання можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} y(t) &= A_p \cos(\omega_0 t + \Theta_p) + \sum_{i=1}^n \mu_i a_0 \cos[(\omega_0 + \Omega_i)(t - \tau_i) + \Theta_i] = \\ &= A_p(t) + A_{\text{фл}}(t), \end{aligned}$$

де  $n$  – кількість променів,  $\tau_i$  – час запізнювання (затримки)  $i$ -го променя,  $\mu_i$  – статистично незалежний випадковий коефіцієнт, який характеризує ефективне поперечне розсіювання ( $\mu_i^2$  – частка відбитої енергії  $i$ -м розсіювачем),  $\Theta_i$  – статистично незалежна фаза сигналу, який пройшов  $i$ -м шляхом.

Відповідно до означення  $\Delta T_L$  і  $\Delta F_D$

$$-\frac{\Delta T_L}{2} \leq \tau_i \leq \frac{\Delta T_L}{2}, \quad -\frac{\Delta F_D}{2} \leq \frac{\Omega_i}{2\pi} \leq \frac{\Delta F_D}{2}.$$

**ПЕРШИЙ ДОДАНОК** (вираз 12) – регулярна складова сигналу (з постійними параметрами). Вона створюється поверхневим променем (рис. 11) або групою променів, які мають майже однакові умови відбиття (від гладкої поверхні або від чітко вираженого «дзеркального» шару).

**ДРУГИЙ ДОДАНОК** - флуктуюча (змінна) або завмираюча складова, яка створюється усіма відбитими променями.

Миттєве значення обвідної  $A_{\text{фл}}(t)$  флуктуючого сигналу розподілено за законом Релєя

$$p(A_{\text{фл}}) = \frac{A_{\text{фл}}}{\sigma_{\text{фл}}^2} \cdot e^{-\frac{A_{\text{фл}}^2}{2\sigma_{\text{фл}}^2}},$$

де  $\sigma_{\text{фл}}^2$  – дисперсія швидкого завмирання.

Фаза завмираючого сигналу  $\Theta_{\text{фл}}$  розподілена за рівномірним законом в інтервалі  $[0, 2\pi]$ .

У каналах передавання, **які характеризуються наявністю регулярної складової**, статистичні властивості обвідної сумарного сигналу описуються щільністю розподілу ймовірності Райса

$$p(A_{\text{фл}}) = \frac{A_{\text{фл}}}{\sigma_{\text{фл}}^2} \cdot e^{-\frac{A_{\text{фл}}^2 + A_{\text{р}}^2}{2\sigma_{\text{фл}}^2}} \cdot I_0\left(\frac{A_{\text{фл}} \cdot A_{\text{р}}}{\sigma_{\text{фл}}^2}\right),$$

де  $I_0(\bullet)$  – функція Бесселя,  $A_{\text{р}}$  – амплітуда регулярної складової.

**!!! На трасах великої довжини регулярна складова відсутня і розподіл (14) переходить у розподіл Релея.** Такі завмирання називають релеєвськими. Глибина завмирань залежить від рівня регулярної складової, при відсутності якої (релеєвські завмирання) вона максимальна.

**!!! Для вирішення ряду технічних задач необхідно знати, ЯК ШВИДКО ЗАВМИРАЮТЬ У ЧАСІ СИГНАЛИ.**

Для цього використовується **КОРЕЛЯЦІЙНА ФУНКЦІЯ ОБВІДНОЇ ЗАВМИРАЮЧОГО СИГНАЛУ.**

Для більшості реально існуючих каналів передачі (наприклад, іоносферних і тропосферних) вона добре апроксимується виразом

$$r_0(\Delta t) = \exp \left[ - \left( \frac{|\Delta t|}{\Delta \tau_{\text{кор}}} \right)^\alpha \right], \quad (15)$$

де  $r_0(\Delta t)$  – нормована кореляційна функція;  $\alpha = 1..2$ ;  $\Delta \tau_{\text{кор}}$  – інтервал часо-

вої кореляції каналу передачі, який визначає середній квазіперіод завмирань.

Доведено, що **інтервал часової кореляції однозначно пов'язаний з величиною доплерівської зони виразом**

$$\Delta \tau_{\text{кор}} = \frac{1}{\Delta F_D}$$

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути аналізі і**

$$r_0(\Delta f) = \exp \left[ - \left( \frac{|\Delta f|}{\Delta f_{\text{кор}}} \right)^\beta \right], \quad \beta = 1 \dots 2,$$

**ІНОВАЦІЙНОГО**

де  $\Delta f_{\text{кор}}$  – інтервал частотної кореляції.

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\*** Модель використовується для опису каналів **з закритим поширенням малої довжини** (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).

**Канал з гауссівським бі**  $\Delta f_{\text{кор}} = \frac{1}{\Delta T_L}$ . **є ідеальним каналом**, у якому на сигнал накладається:

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

**\*\*\*** **Модель відповідає радіоканалу, який працює у межах прямої видимості.**

**!!! ЗНАЧЕННЯ ІНТЕРВАЛІВ ЧАСОВОЇ І ЧАСТОТНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ КАНАЛІВ** передавання з інтерференційними завмираннями різного типу (наприклад, в іоносферних, тропосферних та інших каналах) можуть змінюватися в різних межах і залежать від багатьох факторів (пори року, часу доби, довжини траси, спрямованих властивостей антен, значення несучої частоти тощо).

Можна вказати найбільш ймовірні значення цих параметрів для деяких каналів передачі, які представляють найбільший інтерес для систем зв'язку.

1. Для каналів передавання з дальнім іоносферним поширенням радіохвиль ( $R > 1500 \dots 4000 \text{ км}$ ) інтервал часової кореляції може приймати значення  $(0,1 \dots 2) \text{ с}$ , а інтервал частотної кореляції не перевищує, як правило, величини  $500 \text{ Гц}$  і лежить у межах  $(200 \dots 500) \text{ Гц}$ .

2. Для каналів передавання з тропосферним розсіюванням в частотному діапазоні  $(400 \dots 10000) \text{ МГц}$  і дальністю зв'язку до  $300 \text{ км}$  величина інтервалу часової кореляції може приймати

## **ВИДИ ЗАВМИРАНЬ В КАНАЛАХ ЕЛЕКТРОЗВ'ЯЗКУ**

У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД співвідношення між швидкістю передавання (тривалістю) сигналів, шириною їх спектра і спектрально-кореляційними властивостями каналу розрізняють завмирання двох видів: **ЗАГАЛЬНІ** (або гładкі) і **СЕЛЕКТИВНІ**.

**ЗАГАЛЬНІ ЗАВМИРАННЯ** в каналах передавання дискретних повідомлень мають місце, якщо тривалість елемента сигналу і його ширина спектра значно менші відповідно інтервалів часової і частотної кореляції

$$\tau_i \ll \Delta\tau_{\text{кор}}, \quad \Delta f_c \ll \Delta f_{\text{кор}}$$

Для каналів передавання неперервних повідомлень **ЗАГАЛЬНІ ЗАВМИРАННЯ** спостерігаються, якщо

$$\frac{1}{\Delta F_c} \ll \Delta\tau_{\text{кор}}, \quad \frac{1}{\Delta T_c} \ll \Delta f_{\text{кор}},$$

де  $\Delta F_c$  – ширина спектра первинного сигналу,  $\Delta f_c$  – ширина спектра модульованого сигналу,  $\Delta T_c$  – тривалість сигналу.

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

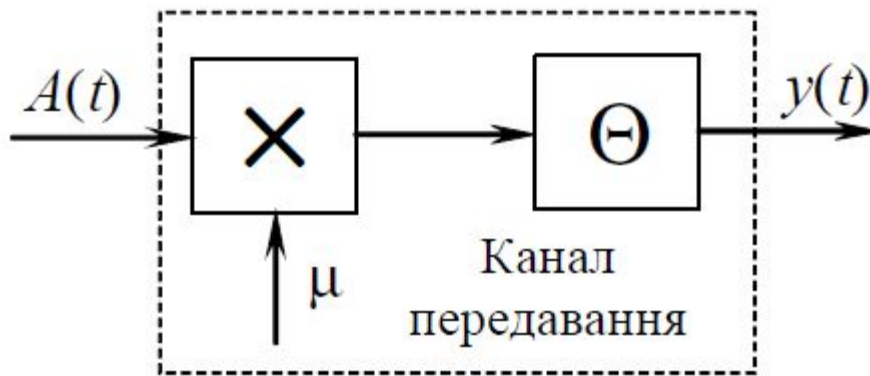
**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці в новому часовому відліку.**

**\*\*\* Модель використовується для опису каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з  $\mu$**

якому на виході

де  $\mu, \tau$  -  
відомі в точці



**альним каналом, у**

(3)

ізнювання постійні і

**\*\*\* Модель**

**працює у межах**



При надходженні на вхід каналу передавання корисного сигналу

$$A(t) = a(t) \cdot \cos[\omega_0 t + y(t)]$$

(21)

Спотворений сигнал на виході має вигляд (рис. 15):

$$y(t) = \mu A(t) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \Theta]$$

Коефіцієнт передачі (множник ослаблення)  $\mu$  і величина зсуву по фазі  $\Theta$  є випадковими величинами, постійними під час даного сеансу зв'язку (якщо тривалість сеансу  $t_{\text{сеанс}} < \Delta\tau_{\text{кор}}$ ).

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КАНАЛІВ

**!!! МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ каналу повинна точно описувати основні особливості реального каналу та бути простою для одержання кінцевих результатів при аналізі і синтезі систем передавання.**

**ІДЕАЛЬНИЙ КАНАЛ без завад вносить ДЕТЕРМІНОВАНІ спотворення, пов'язані зі зміною АМПЛІТУДИ і ЧАСОВОГО ПОЛОЖЕННЯ сигналу.**

**Переданий сигнал може бути цілком відновлений на приймальному боці р новому часовому відпіку.**

**\*\*\* Модель викор  $\tau_i \ll \Delta\tau_{\text{кор}}$ ,  $\Delta f_c > \Delta f_{\text{кор}}$  каналів з закритим поширенням малої довжини (кабель, провід, хвилевод, світловод тощо).**

**Канал з гауссівським білим шумом є ідеальним каналом, у якому на сигнал накладається завада**

(3)

де  $\mu, \tau$  - коефіцієнт передачі та величина запізнювання постійні і відомі в точці прийому.

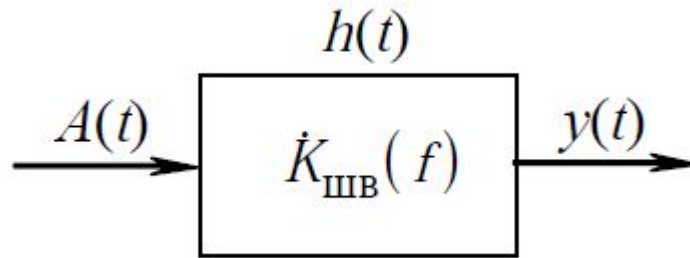


Рис. 16 Модель каналу з частотно-селективними завмираннями

Спотворений сигнал на виході такого каналу має вигляд

$$y(t) = \int_{-\infty}^t h(t) \cdot a(t - \tau) d\tau ,$$

де  $h(t)$  – випадкова для даного сеансу зв'язку імпульсна характеристика каналу передавання.

Розглянутий вид завмирань є характерним **ДЛЯ**  
**високошвидкісних іоносферних і тропосферних каналів**  
**передавання**, ширина спектрів яких перевищує інтервал частотної  
кореляції ( $\Delta f_c > \Delta f_{\text{кор}}$  ).

**ЧАСОВО-СЕЛЕКТИВНІ ЗАВМИРАННЯ** мають місце, якщо виконуються умови

$$\tau_i > \Delta\tau_{\text{кор}}, \quad \Delta f_c \ll \Delta f_{\text{кор}}$$

Такі канали характеризуються істотною зміною своїх параметрів у межах однієї чи декількох (2..3) тривалостей елементів сигналу. При цьому всі частотні складові спотвореного сигналу завмирають однаково.

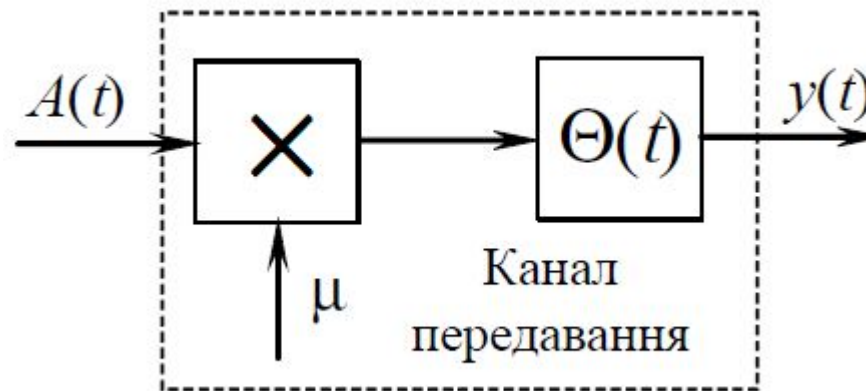


Рис. 17 Модель каналу з часово-селективними завмираннями

Амплітуда і фаза спотвореного сигналу виявляються додатково модульованими випадковими функціями  $\mu(t)$  і  $\Theta(t)$

Вираз для спотвореного сигналу має вигляд

$$y(t) = \mu(t) \cdot a(t) \cdot \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \Theta(t)]$$

**!!! ЧАСОВО-СЕЛЕКТИВНІ ЗАВМИРАННЯ Є ХАРАКТЕРНИМИ ДЛЯ НИЗЬКОШВИДКІСНИХ КАНАЛІВ РАДІОЗВ'ЯЗКУ.**

**ЧАСТОТНО-ЧАСОВО-СЕЛЕКТИВНІ ЗАВМИРАННЯ  
(ЗАГАЛЬНИЙ ВИПАДОК) МАЮТЬ МІСЦЕ, ЯКЩО**

$$\tau_i > \Delta\tau_{\text{кор}}, \quad \Delta f_c > \Delta f_{\text{кор}}.$$

**!!! ЦЕЙ ВИД ЗАВМИРАНЬ ХАРАКТЕРИЗУЄТЬСЯ ТИМ,  
ЩО РІЗНІ ЧАСТОТНІ І ЧАСОВІ СКЛАДОВІ СИГНАЛУ  
ЗАВМИРАЮТЬ НЕОДНАКОВО.**

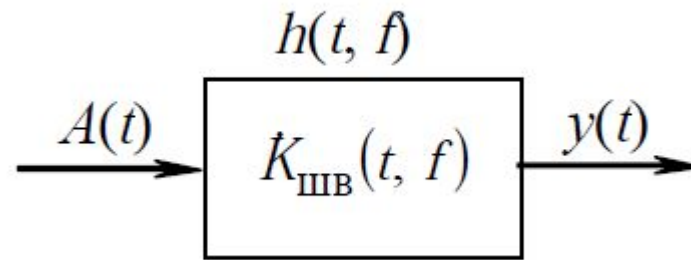


Рис. 18 Модель каналу з частотно-часово-селективними завмираннями

Вираз для спотвореного сигналу має вигляд

$$y(t) = \int_{-\infty}^t h(t, \tau) \cdot A(t - \tau) d\tau$$

**!!! Частотно-часово-селективні завмирання спостерігаються в низькошвидкісних системах передавання, у яких використовуються широкосмугові складні сигнали.**