

## **Методичні матеріали до вивчення модуля 1 ТЕЗ**

### **“Сигнали електрозв'язку”**

Укладачі Іващенко П.В.  
Дирда В.Ю.

#### **ЗМІСТ**

1. Інформаційний лист до вивчення модуля 1	2
2. Індивідуальні завдання до модуля 1	4
3. Довідковий матеріал до вивчення модуля 1	5
3.1. Математичний опис випадкових величин і випадкових процесів	5
3.2. Найпоширеніші розподіли ймовірностей	6
3.3. Модульовані сигнали	8
3.4. Коди ліній у цифрових системах передавання	9

## 1. Інформаційний лист до вивчення модуля 1

**Характеристика модуля:** лекції – 32 ч., лабораторні заняття – 8 ч., індивідуальні завдання – 10 ч., самостійна робота – 20 ч., контрольні заходи (здача модуля) – 4 ч.

### Теми модуля:

Тема 1.2. Випадкові сигнали і їхній математичний опис [1, 3.6], [2, 2.1–2.4], [3, 2.5–2.8], [4, ЛР 1.1, ЛР 1.2];

Тема 1.3. Сигнали аналогових модуляцій [1, 4.1–4.3], [3, 3.1–3.4], [4, ЛР 1.4];

Тема 1.3. Сигнали цифрових модуляцій [1, 4.4], [3, 3.5, 6.9], [4, ЛР 1.5];

Тема 1.4. Модульовані сигнали при негармонічних переносниках [1, 4.5–4.6], [3, 3.6].

### Індивідуальні завдання:

ІЗ 1.1 Опис і розрахунки характеристик випадкових сигналів;

ІЗ 1.2 Опис і розрахунки характеристик сигналів цифрових модуляцій.

**Здача модуля** – 9 і 10 тижні 1-го семестру.

1. Екзамен з модуля проводиться в письмовій формі з наступною співбесідою.
2. У білеті 5 питань – теоретичне, схемне і три задачі за темами модуля, повна відповідь на кожне питання або рішення задачі оцінюється в 20 балів.
3. Модуль вважається зданим за умови одержання не менш 60 балів.

### Основна література до модуля 1

1. **Стеглов В.К., Беркман Л.Н.** Теорія електричного зв'язку: Підручник для студентів ВУЗів. За ред. В.К. Стеглова – К.: Техніка, 2006.
2. **Теория передачи сигналов:** Учебник для вузов / А.Г. Зюко и др. – М.: Радио и связь, 1986.
3. **Панфілов І.П., Дирда В.Ю., Капацін А.В.** Теорія електричного зв'язку: Підручник для студентів ВУЗів 1-го та 2-го рівнів акредитації. – К.: Техніка, 1998.
4. **Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Теорія електричного зв'язку”.** Перша частина / Іващенко П.В. та ін. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2004.
5. **Довідковий матеріал** до модуля 1 (наведений нижче).

### Перелік екзаменаційних питань по модулі 1

#### 1. Теоретичні, що потребують відповідних викладок

1. Дати визначення функції кореляції випадкового процесу (ВП)  $K_X(\tau)$ . Показати, що у стаціонарного ергодичного ВП  $K_X(0) \geq K_X(\tau)$ . Зобразити типовий графік  $K_X(\tau)$ .
2. Дати визначення функції кореляції ВП  $K_X(\tau)$ . Показати, що  $K_X(\tau)$  для стаціонарного ергодичного ВП – парна функція. Зобразити типовий графік  $K_X(\tau)$ .
3. Дати визначення спектральної густини потужності ВП. Вивести формулу обчислення спектральної густини потужності ергодичного ВП на виході лінійного електричного кола. Вихідні дані: спектральна густини потужності на вході кола й АЧХ кола.
4. Дати визначення функції кореляції СП  $K_X(\tau)$ . Вивести формулу обчислення функції кореляції ергодичного ВП на виході лінійного електричного кола. Вихідні дані: спектральна густини потужності ВП на вході кола й АЧХ кола.
5. Дати визначення й вивести формулу для обчислення шумової смуги лінійного електричного кола по його АЧХ.
6. Вивести формулу для обчислення густини ймовірності ергодичного ВП на виході нелінійного електричного кола. Вихідні дані: густина ймовірності ВП на вході кола й характеристика нелінійного кола.
7. Вивести формулу для обчислення функції розподілу ймовірностей ергодичного СП на виході нелінійного електричного кола. Вихідні дані: густина ймовірності ВП на вході кола й характеристика нелінійного кола.
8. Вивести формулу для обчислення мінімальної й максимальної віддалей між сигналами цифрової модуляції за середньою потужністю модульованого сигналу й швидкістю

двійкового цифрового сигналу. Методи модуляції АМ-2, ФМ-2, ЧМ-2, ММЗ, АМ-4, ЧМ-4, ФМ-4, АФМ-4, ФМ-8.

9. Дати визначення модуляції мінімального зсуву (ММЗ) і вивести формулу для обчислення мінімального рознесення частот між елементарними сигналами ММЗ.

10. Пояснити, що таке міжсимвольна інтерференція (МСІ) і чому вона виникає. Вивести формулу для обчислення частоти Найквіста спектра, що забезпечує відсутність МСІ. Пояснити, чому при спектрі Найквіста відсутня МСІ.

## **2. Схемні**

1. Привести структурну або функціональну схему коррелометра для вимірів функції кореляції ВП (або взаємної кореляції двох ВП) і пояснити принцип його роботи.

2. Дати математичний опис і привести структурну або функціональну схему формування сигналу аналогової модуляції, пояснити принцип роботи схеми. Методи модуляції – АМ, БМ, ОМ, КАМ, ЧМ, ФМ.

3. Привести сигнальне сузір'я й структурну (або функціональну) схему формування сигналу цифрової модуляції, пояснити принцип роботи схеми (фільтрація обов'язкова). Методи модуляції – АМ-2, ФМ-2, ЧМ-2, АМ-4, ЧМ-4, ФМ-4, АФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

### **За. Задачі (блок 1 – Математичний опис випадкових сигналів)**

1. Знайти ймовірність того, що значення випадкової величини (ВВ) (або миттєве значення випадкового процесу (ВП)), перевищить задане значення  $x_1$ , В (або не перевищить, або прийме значення в інтервалі від  $x_1$  до  $x_2$ ). Закон розподілу ВВ (ВП) і його параметри взяти із особистого ІЗ 1.1.

2. Задано функцію кореляції  $K_X(\tau)$  ергодичного випадкового процесу. Знайти спектральну густину потужності  $G(f)$  цього процесу. Зобразити графік  $G(f)$ .

3. За заданою спектральною густиною потужності  $G(f)$  ергодичного випадкового процесу визначити функцію кореляції процесу  $K_X(\tau)$ . Зобразити графік  $K_X(\tau)$ .

4. За спектральною густиною потужності ергодичного випадкового процесу  $G_{вх}(f)$  на вході лінійного електричного кола із заданої АЧХ (взяти із власного З 1.1) знайти спектральну густину потужності на виході кола й зобразити її графік.

### **Зб. Задачі (блок 2 -- Сигнали аналогових модуляцій)**

1. Задано параметри сигналу аналогової модуляції (АМ, БМ, ОМ, ЧМ, ФМ): амплітуда й частота гармонічного переносника  $u_{пер}(t)$ , параметри модулюючого сигналу  $b(t)$  (телефонний сигнал, сигнал звукового мовлення, гармонічне коливання). Необхідно:

- побудувати графік спектра модульованого сигналу;

- визначити максимальну й мінімальну частоти в спектрі модульованого сигналу, необхідну смугу пропускання каналу зв'язку для передавання цього сигналу.

2. Первинний сигнал  $b(t)$  із заданими параметрами може передаватися сигналом імпульсної модуляції (АІМ, ШІМ, ШІМ-АМ тощо). Вибрати параметри імпульсного переносника й визначити необхідну смугу пропускання каналу зв'язку для передавання модульованого сигналу.

### **Зв. Задачі (блок 3 – Сигнали цифрових модуляцій)**

1. Задано параметри сигналу цифрової модуляції: вид модуляції, середня потужність сигналу, швидкість вхідного двійкового сигналу  $R$ . Зобразити сигнальне сузір'я й визначити мінімальну й максимальну віддалі між сигналами. Методи модуляції – АМ-2, ФМ-2, ЧМ-2, АМ-4, ЧМ-4, ФМ-4, АФМ-4, ФМ-8.

2. Задано, що первинний двійковий цифровий сигнал  $b(t)$  зі швидкістю  $R$  передається каналом зв'язку сигналом цифрової модуляції (ЦМ). Визначити необхідну смугу пропускання каналу зв'язку для передавання сигналу ЦМ. Методи модуляції – АМ-2, ФМ-2, ЧМ-2, АМ-4, ЧМ-4, ФМ-4, АФМ-4, ФМ-8, КАМ-16. Відповідь пояснити.

3. Закодувати лінійним кодом ЧПІ (АМІ) або КВГ-3 (HDB-3) (формат NRZ) задану послідовність двійкових символів. Пояснити призначення й особливості заданого коду.

## 2. Індивідуальні завдання до модуля 1

### Індивідуальне завдання 1.1

#### на тему “Опис і розрахунки характеристик випадкових сигналів”

##### Вихідні дані

1. Випадковий сигнал  $X(t)$  заданий розподілом імовірностей  $p(x)$  і  $F(x)$ , вид розподілу вибирається за варіантом з табл. 1, і дисперсією  $D\{X(t)\} = 0,1(n+m)$ ,  $B^2$ , де  $m$  – передостання цифра й  $n$  – остання цифра номера залікової книжки. Математичне сподівання  $M\{X(t)\}$  сигналів з нормальним і рівномірним розподілом імовірностей вибирається довільним.

2. Білий шум зі спектральною густиною потужності  $N_0 = 10^{-7}$   $B^2/Гц$  подається на вхід лінійного електричного кола (фільтр) з АЧХ, заданою в табл. 1.

**Таблиця 1 – Вихідні дані до ІЗ 1.1**

№ вар. $n$	Квадрат АЧХ лінійного кола (фільтра) $H^2(f)$		Розподіл імовірностей
	Математичний вираз	Параметр $\alpha$ , 1/Гц	
0 і 1	$1/[1 + (\alpha f)^2]^2$	$10^{-2}$	Нормальний (гауссів)
2 і 3	$\exp[-(\alpha f)^2]$	$4 \cdot 10^{-2}$	Релея
4 і 5	$1/[1 + (\alpha f)^2]$	$10^{-3}$	Рівномірний
6 і 7	$1/[1 + (\alpha f)^4]$	$4 \cdot 10^{-3}$	Арксинуса
8 і 9	$1/[1 + (\alpha f)^6]$	$10^{-4}$	Односторонній експоненційний

Для виконання індивідуального завдання 1.1 варто скористатися літературою [1, 3.6], [2, 2.2 - 2.4], [3, 2.5 - 2.7], [4, ЛР 1.2, ЛР 1.6], [5] і конспектом лекцій.

### Індивідуальне завдання 1.2

#### на тему “Опис і розрахунки характеристик сигналів цифрових модуляцій”

##### Вихідні дані:

- модулюючий сигнал – послідовність двійкових рівноймовірних символів;
- методи цифрової модуляції вибираються з табл. 2;
- швидкість цифрового сигналу  $R = 100(1+m)$ , біт/с, де  $m$  – передостання цифра номера залікової книжки;
- середня потужність модульованих сигналів  $P_s = 100(1+n) \cdot 10^{-3}$ ,  $B^2$ , де  $n$  – остання цифра номера залікової книжки.

##### Необхідно:

1. Привести конкретні вихідні дані заданого варіанту.
2. Зобразити на одному рисунку часові діаграми:
  - а) реалізації цифрового модулюючого сигналу (10 двійкових символів – кодові комбінації перших букв Вашого прізвища в коді МТК-2);
  - б) модульованого сигналу для одного із заданих методів цифрової модуляції; прийняти, що обвідна радіоімпульсів прямокутна.
3. Побудувати сигнальні сузір'я; привести модуляційний код.
4. Записати аналітичні вирази модульованих сигналів.
5. Обчислити для заданих методів модуляції:
  - а) мінімальну й максимальну віддалі між елементарними сигналами;
  - б) смуги пропускання каналу зв'язку, необхідні для передавання заданих модульованих сигналів (із вказівкою коефіцієнтів ската спектра).
6. Зобразити структурну або функціональну схему модулятора для одного із заданих методів цифрової модуляції й пояснити принцип його роботи.
7. У висновках до виконаного завдання вказати переваги заданого Вам методу багатопозиційної модуляції в порівнянні із двійковим методом.

**Таблиця 2 – Вихідні дані до ІЗ 1.2**

№ вар. <i>n</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Метод модул.	АМ-2, ФМ-4	АМ-2, ФМ-8	ММЗ, АМ-4	ММЗ, ФМ-4	ММЗ, ФМ-8	ММЗ, АФМ-4	ФМ-2, АМ-4	ФМ-2, ФМ-4	ФМ-2, ФМ-8	ФМ-2, АФМ-4

Для виконання індивідуального завдання 2.2 варто скористатися літературою [1, 3.5, 6.9], [4, ЛР 1.5] і конспектом лекцій.

При оформленні виконаного завдання (ІЗ 1.1 і ІЗ 1.2) необхідно обов'язково вказувати, з якого літературного джерела взята конкретна інформація для виконання кожного пункту завдання (вказувати номер джерела за списком, номери підрозділів або сторінок).

### 3. Довідковий матеріал до вивчення модуля 1

#### 3.1. Математичний опис випадкових величин і випадкових процесів

Для математичного опису випадкової величини (ВВ)  $X$  використовуються такі статистичні характеристики.

##### 1. Функція розподілу ймовірностей

$$F(x) = P\{X \leq x\}. \quad (3.1)$$

##### 2. Густина ймовірності

$$p(x) = dF(x)/dx. \quad (3.2)$$

##### 3. Математичне сподівання

$$M\{X\} = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx = \sum_{i=1}^n x_i P(x_i), \quad (3.3)$$

де  $p(x)$  – густина ймовірності неперервної ВВ;  $P(x_i)$  – ймовірність значення  $x_i$  дискретної ВВ.

4. Дисперсія розраховується як математичне сподівання квадрата відхилень випадкової величини від свого математичного сподівання

$$D\{X\} = M\{[X - M\{X\}]^2\} = M\{X^2\} - M^2\{X\}. \quad (3.4)$$

**Таблиця 3 – Властивості функцій  $F(x)$  і  $p(x)$** 

	$p(x)$	$F(x)$
1	$P\{x < X(t) \leq x + dx\} = p(x)dx$	$F(x) = P\{X(t) \leq x\}$
2	$P\{x_1 < X(t) \leq x_2\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x)dx$	$P\{x_1 < X(t) \leq x_2\} = F(x_2) - F(x_1)$
3	$\int_{-\infty}^{\infty} p(x)dx = 1$	$F(\infty) = 1; \quad F(-\infty) = 0$
4	$p(x) \geq 0$	$F(x_2) \geq F(x_1) \quad \text{при} \quad x_2 > x_1$
5	$p(x) = \frac{dF(x)}{dx}$	$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x)dx$

**Стационарний випадковий процес  $X(t)$  (ВП)** також описується математичним сподіванням (3.3) і дисперсією (3.4). У довільний фіксований момент часу ВП описується функцією розподілу ймовірностей (3.1) і густиною ймовірності (3.2). Крім цих характеристик для опису ВП використовуються: функція кореляції  $K_X(\tau)$  і спектральна густина потужності  $G_X(f)$ .

Функція кореляції  $K_X(\tau)$  є мірою взаємозв'язку між значеннями випадкового процесу в моменти часу  $t$  і  $t + \tau$ . Для ергодичних випадкових процесів  $K_X(\tau)$  визначається усередненням за часом добутку значень  $k$ -ї реалізації ВП  $x_k(t)$  і  $x_k(t + \tau)$ :

$$K_X(\tau) = \int_0^{T_{\text{сп}}} x_k(t)x_k(t + \tau) dt, \quad (3.5)$$

де  $T_{\text{сп}}$  – час спостереження (або тривалість) реалізації випадкового процесу  $X(t)$ . Одиниця виміру  $K_X(\tau)$  збігається з одиницею виміру потужності.

Спектральна густина потужності  $G_X(f)$  характеризує розподіл потужності випадкового процесу по частоті й на будь-якій частоті  $f$  визначається як відношення

$$G_X(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta f}, \quad (3.6)$$

де  $\Delta P$  – потужність випадкового процесу, що зосереджена в смузі частот  $\Delta f$  навколо частоти  $f$ . Одиниця виміру –  $\text{В}^2/\text{Гц}$ .

Відповідно до теореми Хінчина-Вінера функція кореляції  $K_X(\tau)$  і спектральна густина потужності  $G_X(f)$  ергодичного випадкового процесу зв'язані між собою парою перетворень Фур'є, які записуються

$$K_X(\tau) = 2 \int_0^{\infty} G_X(f) \cos 2\pi f \tau df; \quad G_X(f) = 2 \int_0^{\infty} K_X(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau. \quad (3.7)$$

### 3.2. Найпоширеніші розподіли ймовірностей

#### Гауссів (нормальний) розподіл

Густина ймовірності ВВ  $X$  або ВП  $X(t)$  описується формулою

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3.8)$$

у яку входять два числових параметри  $m$  і  $\sigma^2$ , що мають сенс математичного сподівання й дисперсії:

$$m = M\{X\}; \quad \sigma^2 = D\{X\}.$$

Графік густини ймовірності  $p(x)$  являє собою дзвіноподібну криву з одним максимумом у точці  $x = m$ . На графіку привертає увагу те, що зі зменшенням  $\sigma$  крива усе більше локалізується навколо точки  $x = m$ . У флуктуаційного шуму  $M\{X\} = 0$ .

Функція розподілу ймовірностей ВВ  $X$  або ВП  $X(t)$  описується формулою

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] dx. \quad (3.9)$$

Функцію  $F(x)$  представляють через інтеграл імовірностей однієї з форм:

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi\left(\frac{x-m}{\sigma}\right) \right]; \quad F(x) = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{x-m}{\sigma}\right); \quad F(x) = 1 - Q\left(\frac{x-m}{\sigma}\right), \quad (3.10)$$

де  $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ ;  $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ ;  $Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$

– форми запису інтегралів імовірностей.

Для спрощення розрахунків з похибкою не гіршою 3–5% використовують апроксимуючі функції

$$\begin{aligned}\Phi(z) &\cong 1 - 1,3 \exp[-0,44(z + 0,75)^2] \text{ при } z > 0; \\ \Phi(z) &= -\Phi(|z|) \text{ при } z < 0, \quad \Phi(0) = 0, \quad \Phi(\infty) = 1; \\ \Phi_0(z) &\cong 0,5 - 0,65 \exp[-0,44(z + 0,75)^2] \text{ при } z > 0; \\ \Phi_0(z) &= -\Phi_0(|z|) \text{ при } z < 0, \quad \Phi_0(0) = 0, \quad \Phi_0(\infty) = 0,5; \\ Q(z) &\cong 0,65 \exp[-0,44(z + 0,75)^2] \text{ при } z > 0; \\ Q(z) &= 1 - Q(|z|) \text{ при } z < 0, \quad Q(0) = 0,5, \quad Q(\infty) = 0.\end{aligned}$$

### Розподіл Релея

Густина імовірності описується виразом

$$p(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma_x^2} \exp[-x^2 / (2\sigma_x^2)] & \text{при } x \leq 0, \\ 0 & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

Функція розподілу ймовірностей

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \exp[-x^2 / (2\sigma_x^2)] & \text{при } x \leq 0, \\ 0, & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (3.12)$$

Математичне сподівання  $M\{X\}$  і дисперсія  $D\{X\}$  визначаються:

$$M\{X\} = \sqrt{\pi/2} \sigma_x = 1,253 \sigma_x; \quad D\{X\} = (2 - \pi/2) \sigma_x^2. \quad (3.13)$$

### Розподіл «арксинус»

Це розподіл імовірностей гармонічного коливання  $X(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi)$ , де  $A$  і  $f$  – постійні величини, а  $\varphi$  – випадкова величина. Густина ймовірності й функція розподілу описуються виразами:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{A^2 - x^2}}, & \text{при } |x| \leq A, \\ 0, & \text{при } |x| > A; \end{cases} \quad (3.14)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0,5 + \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{x}{A}, & \text{при } |x| \leq A, \\ 0, & \text{при } |x| > A. \end{cases} \quad (3.15)$$

Середнє значення (математичне сподівання) гармонічного коливання дорівнює нулю, а середньоквадратичне відхилення –  $A/\sqrt{2}$ .

### Рівномірний розподіл

Цей розподіл записується так:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{x_{\max} - x_{\min}}, & \text{при } x_{\min} < x \leq x_{\max}, \\ 0, & \text{при } x \leq x_{\min}, \quad x > x_{\max}; \end{cases} \quad (3.16)$$

$$F(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, & \text{при } x_{\min} < x \leq x_{\max}, \\ 0, & \text{при } x \leq x_{\min} \text{ и } 1, \text{ при } x > x_{\max}; \end{cases} \quad (3.17)$$

де  $x_{\min}$  і  $x_{\max}$  – межі інтервалу, на якому ВВ приймає значення.

Середнє значення ВВ із рівномірним розподілом дорівнює  $(x_{\min} + x_{\max})/2$ , а дисперсія –  $D\{X\} = (x_{\max} - x_{\min})^2 / 12$ .

### Експоненційний односторонній розподіл

Такий розподіл має квадрат ВВ із розподілом імовірностей Релея. Цей розподіл записується так:

$$p(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{при } x \geq 0, \\ 0 & \text{при } x \leq 0; \end{cases} \quad (3.18)$$

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{при } x \geq 0, \\ 0 & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (3.19)$$

Математичне сподівання  $M\{X\}$  і дисперсія  $D\{X\}$  дорівнюють:

$$M\{X\} = 1/\lambda, \quad D\{X\} = 1/\lambda^2. \quad (3.20)$$

### 3.3. Модульовані сигнали

**Таблиця 4 - Математичний опис сигналів аналогової модуляції**

Метод модуляції	Математичний опис сигналу $s(t)$
Амплітудна	$s(t) = A_0 (1 + 0,8 b(t)) \cos 2\pi f_0 t$
Балансова	$s(t) = A_0 b(t) \cos 2\pi f_0 t$
Односмугова	$s(t) = A_0 b(t) \cos 2\pi f_0 t + A_0 \tilde{b}(t) \sin 2\pi f_0 t$
Частотна	$s(t) = A_0 \cos (2\pi f_0 t + 2\pi \Delta f_d \int b(t) dt)$
Фазова	$s(t) = A_0 \cos (2\pi f_0 t + \Delta \phi_d b(t))$

*Пояснення:*  $b(t)$  – модулюючий сигнал;  $\tilde{b}(t)$  – перетворення Гільберта сигналу  $b(t)$

**Таблиця 5 – Ширина спектра сигналів аналогових і імпульсних модуляцій**

Метод модуляції	Ширина спектра	Метод модуляції	Ширина спектра
АМ	$2F_{\max}$	АІМ	$\approx 1/T_i$
БМ	$2F_{\max}$	ШІМ	$\approx 1/T_i$
ОМ	$F_{\max}$	ЧІМ	$\approx 1/T_i$
ЧМ	$2F_{\max}(m_{\text{ЧМ}} + 1)$	ФІМ	$\approx 1/T_i$
ФМ	$2F_{\max}(m_{\text{ФМ}} + 1)$		

*Пояснення:*  $F_{\max}$  – максимальна частота спектра модулюючого сигналу;  $m$  – індекс модуляції ЧМ і ФМ сигналів відповідно;  $T_i$  – тривалість імпульсу переносника.



**Таблиця 6 – Основні характеристики первинних сигналів**

Вид сигналу	$F_{\min}$ , Гц	$F_{\max}$ , Гц	$\rho_{с-з}$ , дБ	$K_A$
Розмовний Радіомовлення:	300	3400	26	5
Першого класу	50	$10^4$	48	8
Вищого класу	30	$1,5 \cdot 10^4$	56	8
Факсимільний напівтоновий	0	1405	35	1,67
Телевізійний (сигнал яскравості)	50	$6 \cdot 10^6$	48	1,71

*Пояснення:*  $\rho_{с-з}$  – відношення сигнал-завада, за якого забезпечується якісне відтворення первинного сигналу;  $K_A$  – коефіцієнт амплітуди первинного сигналу

**Ширина спектра** сигналів цифрових модуляцій  $\Delta F_s$  обчислюється за формулами: сигналів АМ-М, ФМ-М, АФМ-М, КАМ-М

$$\Delta F_s = \frac{R(1 + \alpha)}{\log_2 M}, \quad (3.21)$$

сигналів ЧМ-М

$$\Delta F_s = \frac{R(1 + \alpha)}{\log_2 M} + (M - 1)\Delta f, \quad (3.22)$$

де  $R$  – швидкість модулюючого цифрового сигналу, біт/с;  $M$  – кількість рівнів модульованого сигналу;  $\alpha$  – коефіцієнт ската спектра модульованого сигналу,  $0 \leq \alpha \leq 1$ ;  $\Delta f$  – рознесення частот; ширина спектра сигналу ММС  $\Delta F_s = 1,5 \cdot R$ .

**Таблиця 7 - Віддалі між сигналами цифрових модуляцій**

Но- мер	Метод модуляції	Розмірність простору сигналів	Віддаль між сигналами	
			Мінімальна, $d_{\min}$	Максимальна, $d_{\max}$
1	АМ-2	Одномірний	$\sqrt{2E_b}$	$d_{\max} = d_{\min}$
2	АМ-4	Одномірний	$\sqrt{0,8E_b}$	$d_{\max} = 3d_{\min}$
3	ЧМ-2	Двовимірний	$\sqrt{2E_b}$	$d_{\max} = d_{\min}$
4	ЧМ-4	Чотиривимірний	$2\sqrt{E_b}$	$d_{\max} = d_{\min}$
5	ФМ-2	Одномірний	$2\sqrt{E_b}$	$d_{\max} = d_{\min}$
6	ФМ-4	Двовимірний	$2\sqrt{E_b}$	$d_{\max} = \sqrt{2} d_{\min}$
7	ФМ-8	Двовимірний	$\sqrt{1,76E_b}$	$\sqrt{12E_b}$

*Пояснення:*  $E_b$  – середнє значення енергії сигналу, що витрачається на передавання одного біта;  $E_b = P_s T_b$ ;  $P_s$  – середня потужність сигналу;  $T_b$  – тривалість біта.

### 3.4. Коди ліній у цифрових системах передавання

**1 Формати кодів.** Формат коду – це подання символів коду  $1$  і  $0$  певними електричними імпульсними низькочастотними сигналами. Застосовувані нині в телекомунікаціях формати кодів надані в табл. 8.

#### 2 Коди ліній

Ці коди використовуються для полегшення роботи й підвищення точності роботи систем тактової синхронізації шляхом збільшення кількості границь (переходів) між кодовими символами  $1$  і  $0$ . Приклади деяких кодів ліній наведені нижче.

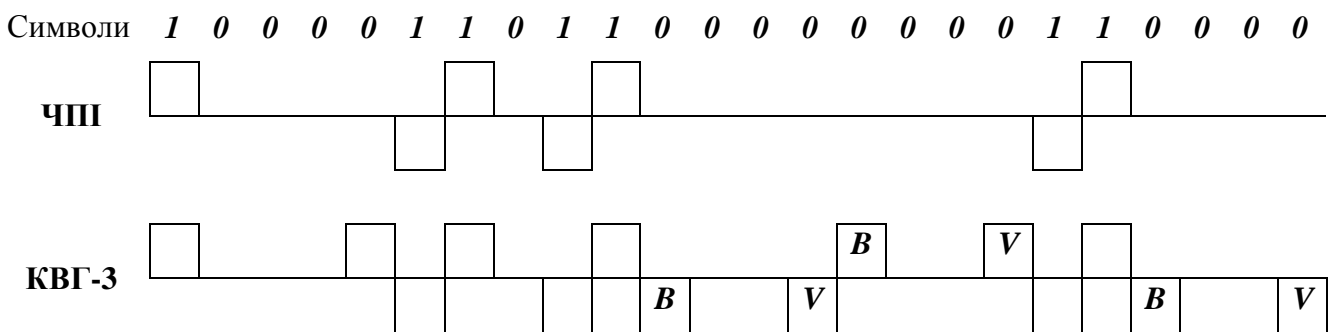
**Код ЧПІ** (чергування полярності імпульсів) (англ. **АМІ** – Alternate Mark Inversion) є *квасітріюковим* кодом. Кодування кодом ЧПІ виконується за наступним *правилом*: усякий раз, коли символ **1** надходить на вхід кодера, на його виході з'являється імпульс додатної або від'ємної полярності, але із протилежною полярністю відносно полярності попереднього імпульсу. Якщо ж вхідний символ **0**, рівень на виході кодера залишається рівним нулю.

**Код КВГ-3** (код високої густини) (англ. **НДВ-3** – High Density Bipolar) є *модифікацією коду ЧПІ* (теж є *квасітріюковим* кодом), але забезпечує у послідовності на виході кодера не більше **трьох** нулів підряд. Кодування цим кодом виконується за *наступними правилами*.

1. Якщо у послідовності на вході кодера зустрічається підряд **чотири** символи **0**, то вони замінюються кодовою послідовністю **000V** або **B00V** (**B**, **V** – це символи **1**). Символ **V** (*Violation* – порушення) позначає імпульс, що порушує правило кодування ЧПІ, тобто, його полярність збігається з полярністю попереднього імпульсу. Символ **B** (*Balancing pulse* – балансовий імпульс) не порушує правило кодування ЧПІ й вводиться для того, щоб код КВГ-3 був балансним, тобто, щоб кількості імпульсів додатної та від'ємної полярностей були однаковими.

2. Вибір однієї із цих двох «заготовок» (**000V** або **B00V**) такий:

- якщо після останньої заміни поступила непарна кількість **1**, то вибирається послідовність **000V**;
- якщо після останньої заміни поступила парна кількість **1**, то вибирається послідовність **B00V**.



**Рисунок 1** – Коды ліній ЧПІ й КВГ-3

**Таблиця 8 - Формати кодів**

Но- мер	Символи		Назва формату	Особливості спектра лінійного сигналу
	<b>1</b>	<b>0</b>		
1			Однополярний	Спектр сигналу цього формату зосереджений у смузі частот $0 \leq f \leq 1/T_c$ і має постійну складову
2			Двополярний БПН – Без Повернення до Нуля (англ. NRZ – Non Return to Zero)	Спектр сигналу цього формату зосереджений у смузі частот $0 < f \leq 1/T_c$ , але не має постійної складової
3			Двополярний ПН – з Поверненням до Нуля (англ. RZ – Return to Zero)	Спектр сигналу цього формату зосереджений у смузі частот $0 < f \leq 2/T_c$ , тобто він розширюється у двічі
4			Біімпульсний Сигнал цього формату називають також “Манчестер-2”	Спектр сигналу цього формату максимальний на частоті $f_0 = 1/T_c$ й не має постійної складової

*Пояснення:*  $T_c$  – тривалість двійкових символів **1** і **0** (тривалість тактового інтервалу); жирними точками показані границі тактових інтервалів