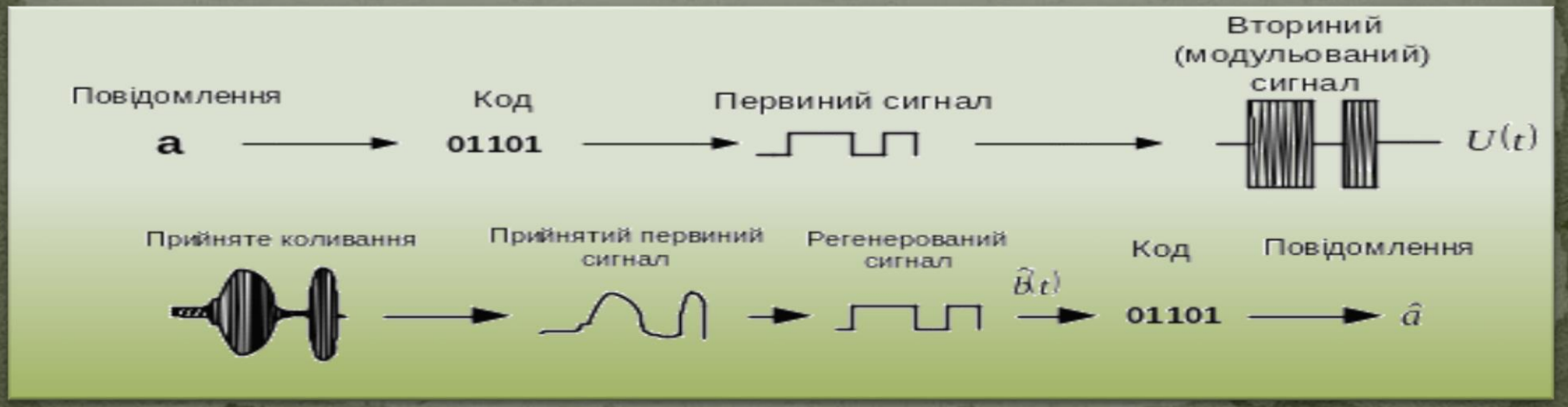
Лекція 7. Сигнали та їх моделі. Кодування сигналів у каналах зв'язку

1. Сигнали та їх класифікація.
2. Математичні моделі простих сигналів.
3. Математичні моделі складних неперервних сигналів.
4. Математичні моделі дискретних сигналів. Види модуляції.
5. Методи фізичного (лінійного)кодування цифрових сигналів у каналах зв'язку



1. Сигнали та їх класифікація

Інформація сприймається споживачем через сигнали, які генеруються або безпосередньо джерелом, або за допомогою генераторів, що не зв'язані з джерелом (локація). Сигнали мають енергетичну та матеріальну основу – світлові потоки, звукові хвилі, теплове випромінювання, зображення точок, неоднорідності електричного і магнітного полів. Сигналами можуть бути документи, книжки, графіки, таблиці і т. ін. Отже, сигнали різняться за фізичною природою. В електронних системах сприйняття сигналів різної фізичної природи здійснюється первинними перетворювачами, які перетворюють інформаційний параметр в сигнал, що є зручним для подальшої обробки.

Передача інформації здійснюється за допомогою переносників інформації. Матеріальну основу переносника інформації складає певний фізичний об'єкт або процес, який характеризується набором параметрів. Один із цих параметрів може стати інформаційним, якщо він змінюється під впливом джерела інформації (модуляція параметра). Власне, після модуляції переносник перетворюється в носія інформації.

В електронних системах знайшли поширення переносники у вигляді коливань електричного струму або напруги – електричні сигнали. Якщо частота коливань дорівнює нулю, є лише один інформаційний параметр – рівень струму або напруги. Якщо частота коливань відрізняється від нуля, інформаційними параметрами можуть бути амплітуда, частота або фаза коливань.

Сигнал – це матеріальне втілення інформації, процес зміни деякої фізичної величини, пов'язаної з енергією.

Електричні сигнали поділяють на два види:

–сигнали електричного струму;

–сигнали електромагнітного поля.

Для використання у системах автоматичного керування, телебачення та інших системах обробки сигнали вимірювальної, звукової та візуальної інформації перетворюють у сигнали електричного струму, а для безпровідної передачі на відстань – у сигнали електромагнітного поля – радіосигнали. Сигнали, які проходять каналами електрозв'язку поділяються на:

Аналогові або неперервні – сигнали, що представлені неперервними у часі фізичними процесами.

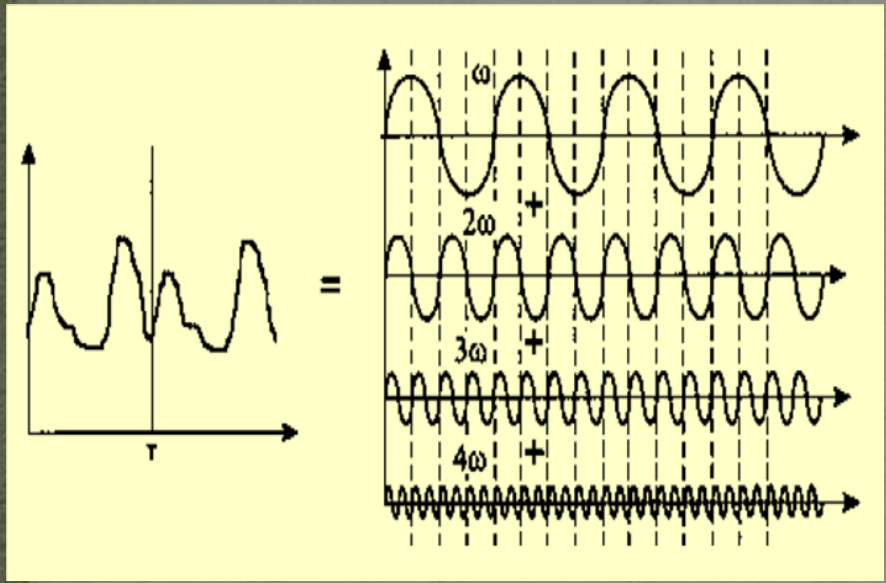
Дискретні – сигнали, представлені своїми значеннями у дискретні моменти часу

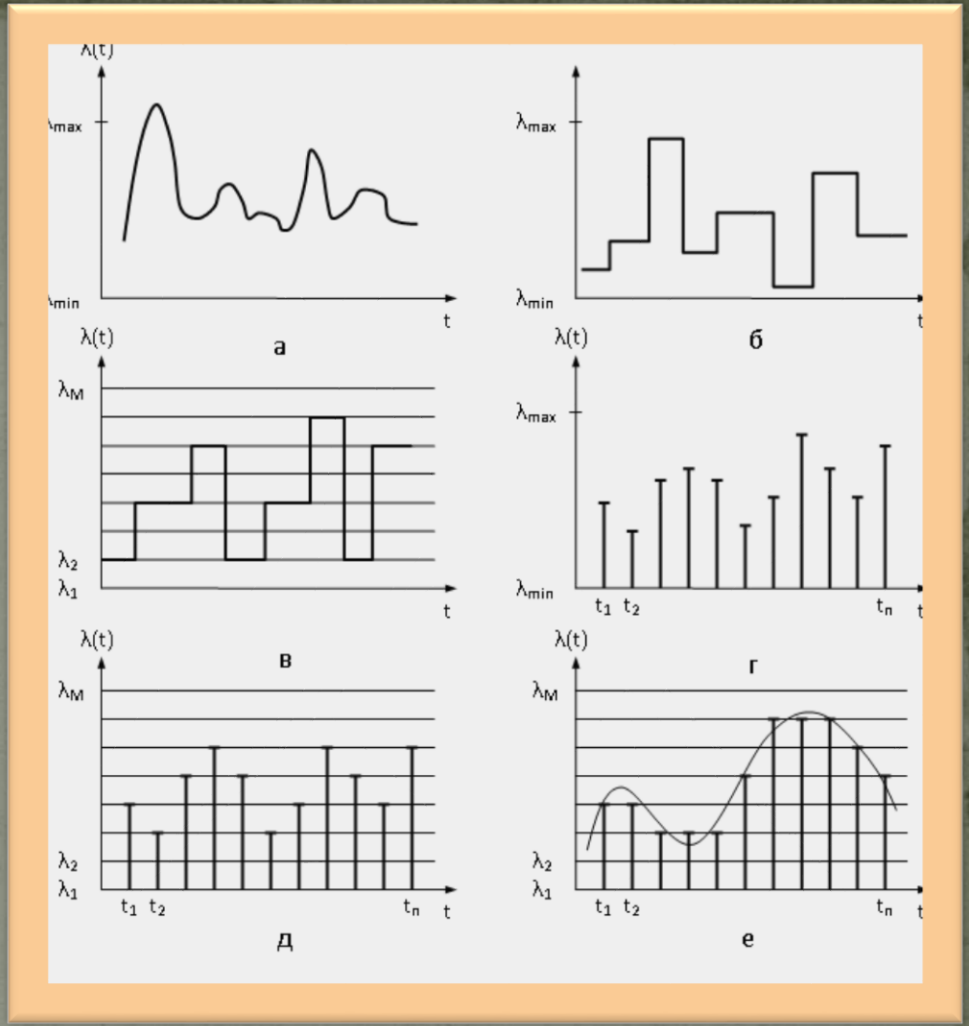
Дискретні сигнали поділяють на імпульсні та цифрові.

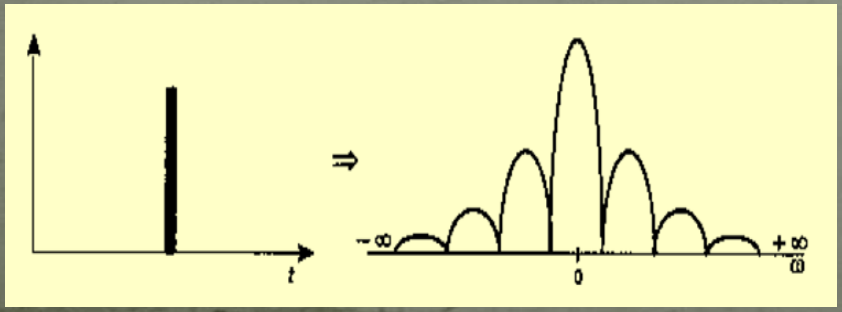
Імпульсний сигнал – це сигнал дискретний за часом і неперервний за рівнем.

Цифровий сигнал є дискретним і за часом і за рівнем.

З теорії гармонійного аналізу відомо, що будь-який періодичний процес можна представити у виді суми синусоїдальних коливань різних частот і різних амплітуд







спектральний поділ ідеального імпульсу (одиничної потужності і нульової тривалості) має складові всього спектру частот, від мінус нескінченності до плюс нескінченності

Розрізняють два види цифрових сигналів: ***потенційні*** та ***імпульсні***.

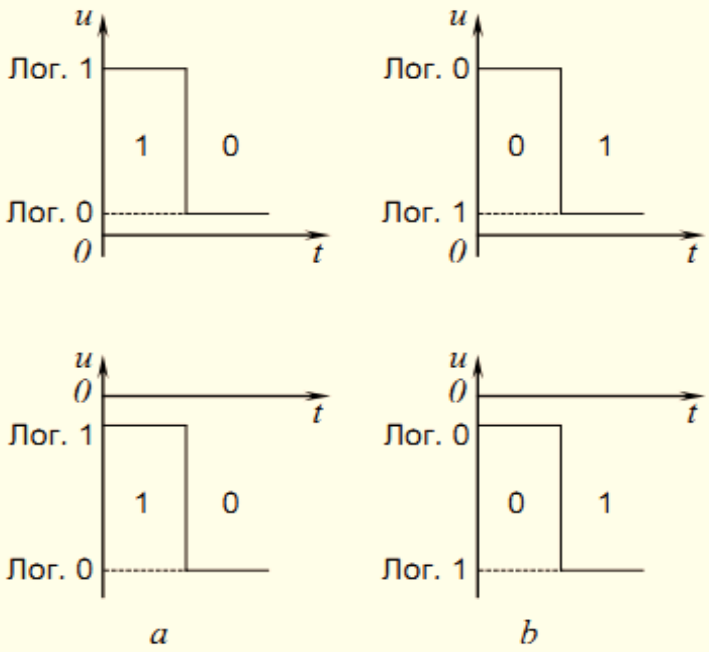


Рис. 2.1. Графіки потенційних сигналів.
a – позитивна логіка;
b – негативна логіка.

Потенційні двійкові сигнали мають два фіксованих рівні напруги: високий і низький. Ці сигнали діють в елементах логічних цифрових пристроїв, тому *дискретні рівні напруги* називають **логічними рівнями** і позначають «**логічна 1**» або «**логічний 0**».

Позитивна логіка – відповідність, при якій високому логічному рівню відповідає лог.1, а низькому – лог.0

Негативна логіка – відповідність, при якій низькому логічному рівню відповідає лог.1, а високому – лог.0

Під час передачі/прийому або перетворення цифрової інформації логічні рівні в одній і тій самій точці **л**огічного **е**лемента (**ЛЕ**) переходять з одного в інший за достатньо короткі проміжки часу.

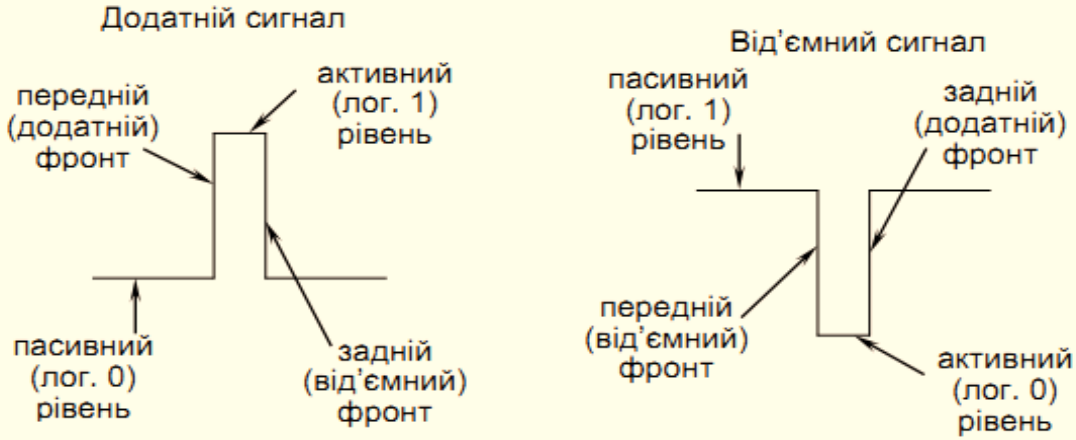
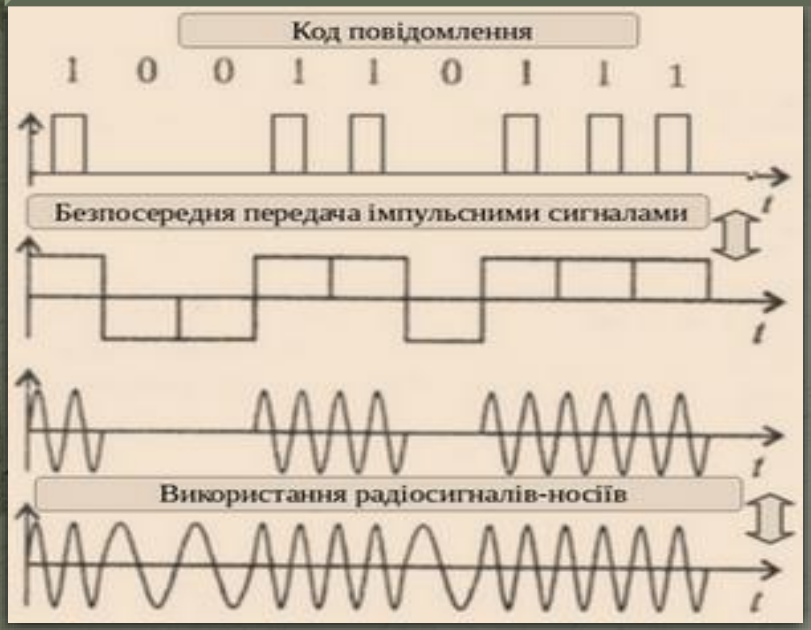
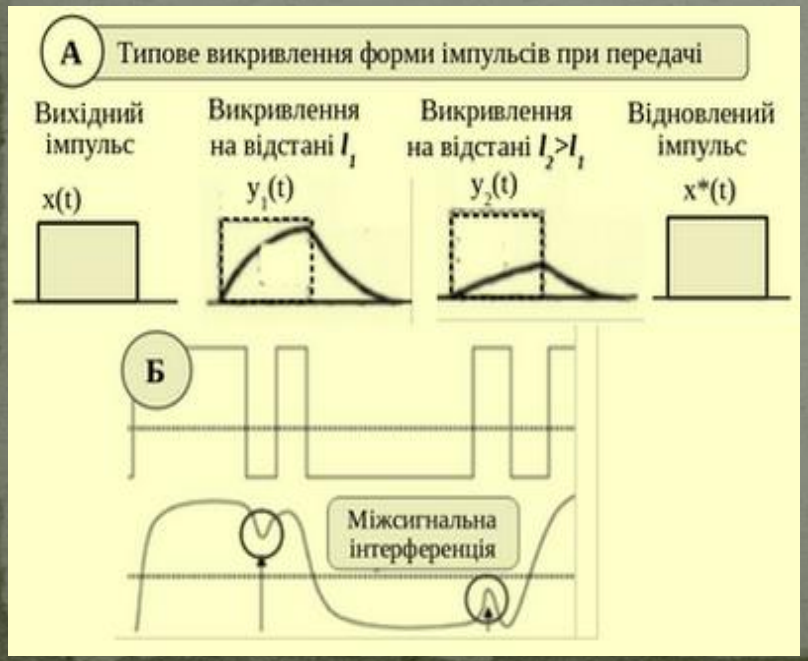


Рис. 2.5. Елементи цифрового сигналу

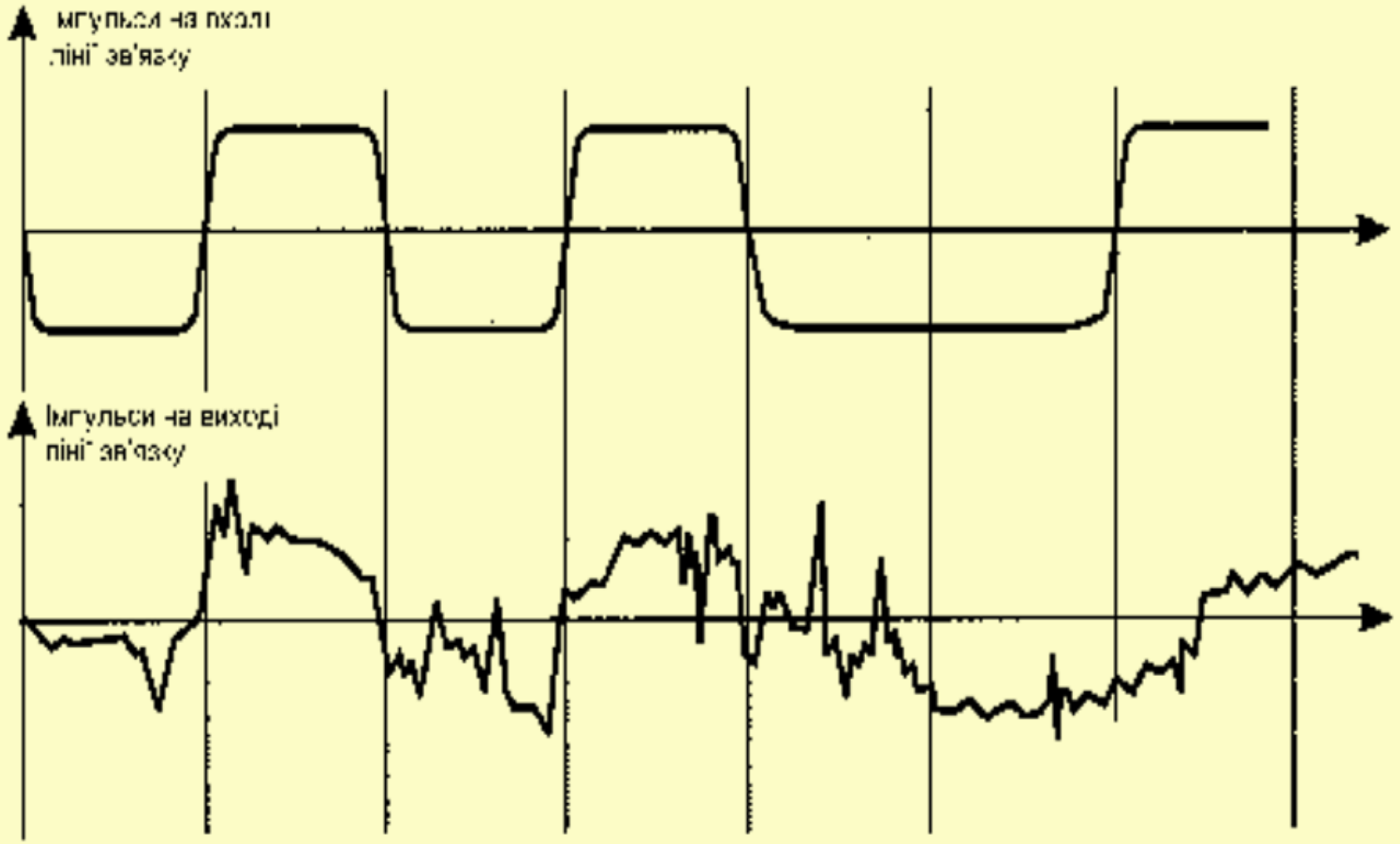
Для передачі двійкових даних використовуються імпульсні сигнали.





Викривлення сигналів при передачі





Спотворення імпульсу в лінії зв'язку

ПЕРЕВАГИ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ:

- допустимий складний багатоступеневий обробіток;
- тривале зберігання без втрат з можливістю багатократного копіювання без спотворень;
- якісна передача на великі відстані без спотворення;
- цифрові пристрої менш схильні до старіння, їх простіше налаштовувати;
- поведінку цифрових пристроїв можна точно розрахувати і завжди передбачити.

НЕДОЛІКИ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ:

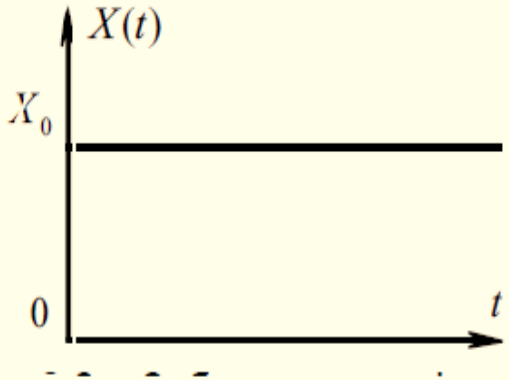
- принципово менша гранична швидкодія цифрових пристроїв в порівнянні з аналоговими;
- інформаційна місткість цифрового сигналу суттєво менша, ніж аналогового, тому для заміни одного аналогового сигналу необхідно кілька цифрових сигналів (від 4 до 16) – код;
- для використання в реальних умовах необхідне перетворення аналогових сигналів у цифрові (на вході, АЦП) та цифрових сигналів у аналогові (на виході, ЦАП);
- при простому алгоритмі обробітку цифрові пристрої набагато складніші за аналогові.

2. Математичні моделі простих сигналів

До елементарних сигналів належать східчастий сигнал, одиничний імпульс і гармонічний синусоїдний сигнал.

1. ***Східчастий сигнал*** (або сигнал вмикання):

$$x(t) = 0 \quad при \ t < 0; \qquad x(t) = X_0 \quad при \ t > 0. \qquad (2.3)$$



Інформативним параметром сигналу є його рівень. Числове значення рівня X_0 є інформацією. В системах передачі інформації представлений електричним сигналом постійного струму або напруги. Застосовується для передачі вимірювальної інформації в системах керування. За міжнародним стандартом для вводу вимірювальної інформації в системи керування застосовують уніфіковані сигнали постійного струму, які при зміні вимірюваної фізичної величини в заданому діапазоні змінюються в межах $0 \ldots 5 \ мА$; $0 \ldots 20 \ мА$; $4 \ldots 20 \ мА$; та сигнали напруги постійного струму, які змінюються в межах $0 \ldots +10 \ В$, або $0 \ldots -10 \ В$.

2. *Одиничний імпульс*:

$$x(t) = \delta(t - \tau) \qquad (2.4)$$

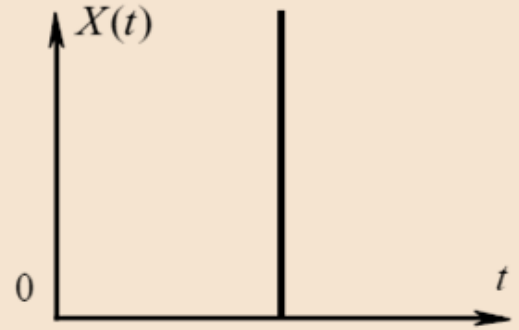


Рис. 2.9. Зображення одиничного імпульсного сигналу.

Для аналітичного вираження імпульсного сигналу використовують $\delta(t)$-функцію Дірака, яка є аналітичним виразом абстрактного сигналу-імпульсу необмеженої амплітуди, тривалість якого дорівнює нулю, а площа $S = 1$.

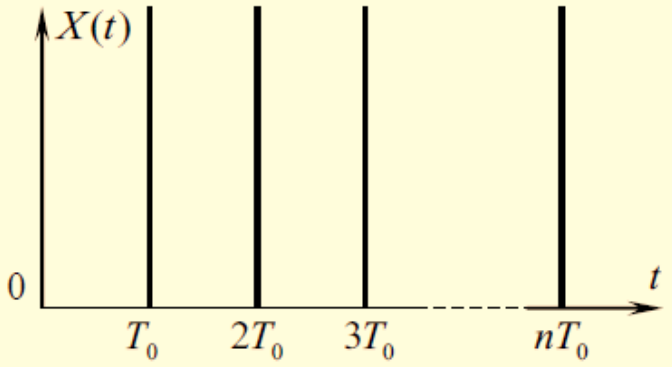
$$\delta(t - \tau) = \begin{cases} 0 \ \ при \ \ t \neq \tau; \\ \infty \ \ при \ \ t = \tau \end{cases} \qquad (2.5)$$

$$\int_{-\infty}^{=\infty} \delta(t - \tau)dt = 1(t - \tau) \qquad 0 < \tau < t$$

Єдиним інформативним параметром сигналу є його положення на осі часу – τ. Модель аналітичного виразу дискретизованих сигналів використовується в імпульсних та цифрових схемах.

3. ***Послідовність одиночних імпульсів*** можна подати математичною моделлю:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t - nT_0) \qquad (2.6)$$



4. ***Гармонічний сигнал*** можна подати математичною моделлю:

$$x(t) = A_m \cos(\omega t + \varphi) = A_m \cos(\frac{2\pi}{T} + \varphi) \qquad (2.7)$$

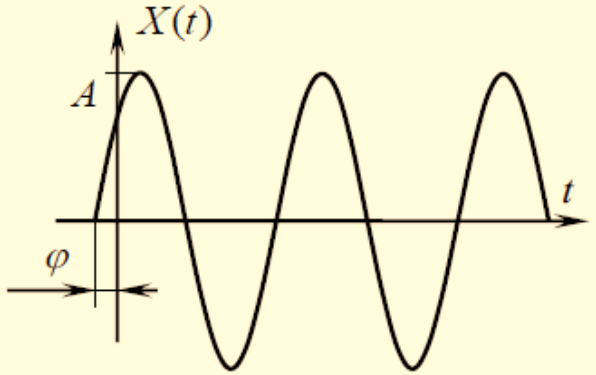


Рис. 2.10. Зображення гармонічного синусоїдального сигналу.

Гармонічний сигнал має три інформативних параметри – амплітуду A_m, частоту $1/T$, початкову фазу φ. Інформацію можна передавати кожним з них.

3. Математичні моделі складних неперервних сигналів

Складні сигнали – це такі сигнали, для математичного опису яких важко знайти просту математичну формулу. Більшість реальних сигналів техніки зв'язку, інформаційних технологій, автоматичного керування рухомими об'єктами, медичної діагностики, техніки геологічної та електронної розвідки тощо, є складними квазідетермінованими сигналами.

Квазідетермінованим називають такий сигнал, у якому на детермінований у часі сигнал накладається випадковий процес. При цьому випадковість обумовлена не тільки завадами, але й самим джерелом інформації.

Будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий за допомогою ряду Фур'є як сума простих гармонічних коливань. Сукупність простих гармонічних коливань, на які може бути розкладений складний періодичний сигнал, називається його спектром.

Розподіл амплітуд гармонік за частотою називають амплітудно-частотним спектром або скорочено амплітудним спектром, а розподіл їхніх початкових фаз за частотою – фазочастотним спектром або фазовим спектром.

Лінії дискретного спектра мають розмірність амплітуди сигналу. Безперервний спектр указує на розподіл амплітуд по всьому спектрі й має розмірність щільності амплітуд сигналу.

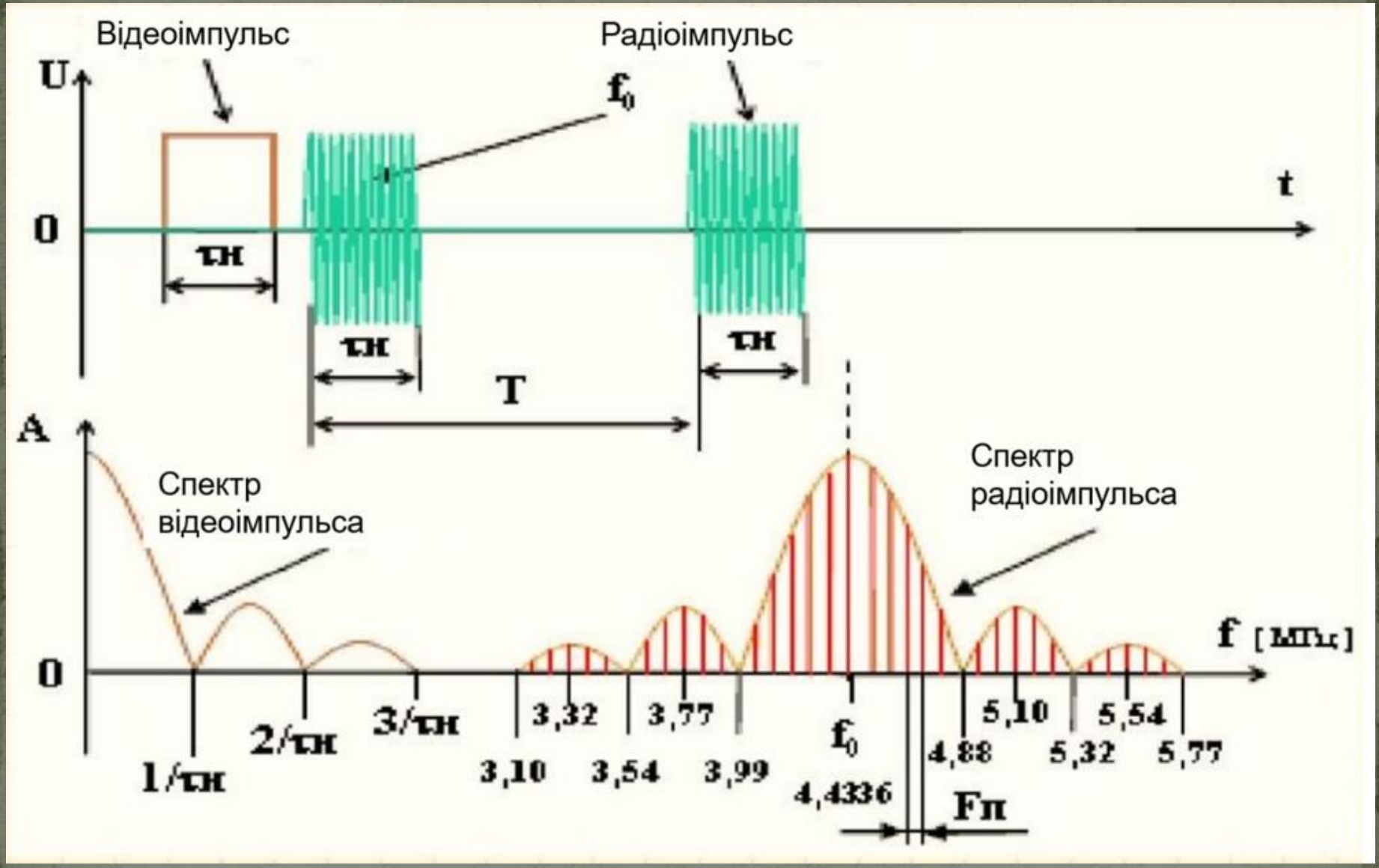
Безперервне спектральне перетворення Фурьє

$$X(f) = \int x(t)\, e^{-i2\pi f t}\, dt \quad \leftrightarrows \quad x(t) = \int X(f)\, e^{i2\pi f t}\, df$$

пряме

зворотнє




Відеоімпульс
Радіоімпульс
U
f_0
t
0
$\tau_н$
$\tau_н$
$\tau_н$
T
A
Спектр відеоімпульса
Спектр радіоімпульса
f [МГц]
0
1/$\tau_н$
2/$\tau_н$
3/$\tau_н$
3,10
3,32
3,54
3,77
3,99
f_0
4,4336
4,88
5,10
5,32
5,54
5,77
Fп

4. Математичні моделі дискретних сигналів. Види модуляції.

2.4. Математичні моделі дискретних сигналів у цифрових системах.

Для математичного опису цифрових систем автоматичного керування використовують періодичний імпульсний сигнал, який у часовій області можна подати математичною моделлю виду:

$$x^*(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot \delta(t - nT_0) \cdot s(t - nT_0) \qquad (2.15)$$

де T_0 – період імпульсів;

$x(nT_0)$ – функція зміни амплітуди імпульсів;

$\delta(t - nT_0)$ – послідовність елементарних імпульсів, коливання-носій;

$s(t - nT_0)$ – функція, яка задає форму імпульсів.

Для коротких прямокутних імпульсів $S(t - nT_0) = 1$, з (2.14) маємо:

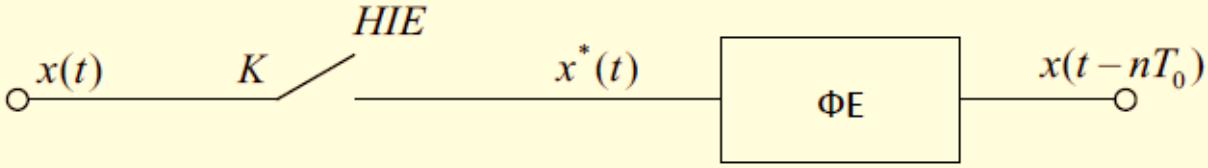
$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(nT_0) \cdot \delta(t - nT_0) \qquad (2.16)$$

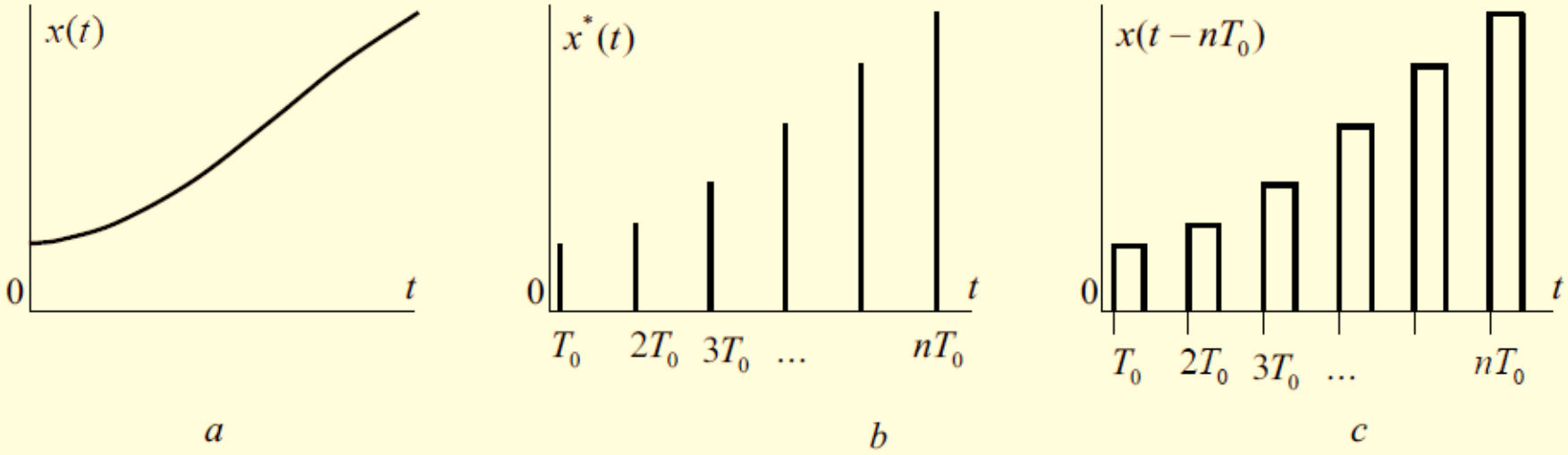
Наведений аналітичний вираз є моделлю сигналу, який є послідовністю коротких прямокутних імпульсів. Модель використовується для математичного опису імпульсних і цифрових систем керування.

Перетворення сигналу імпульсним елементом

– найпростіший імпульсний елемент (НІЕ) – це перемикач К, який вмикається на дуже короткий час з періодом T_0 і видає послідовність коротких імпульсів, амплітуда яких змінюється за законом вхідного сигналу $x(t)$.

– формуючий елемент (ФЕ) – це елемент, який формує з послідовності модульованих за амплітудою імпульсів імпульси заданої форми – прямокутної, експоненціальної, трикутної чи т.п. В іншому прикладі це імпульси прямокутні з малою щільністю.





a *b* *c*

Квантування неперервних сигналів по амплітуді



Аналого - цифрове перетворення (АЦП)

Fmax - максимальна частота спектра аналогового (*неперервного*) сигналу

Тд ≤ 1/(2Fmax) або fд ≥ 2Fmax - *умова повного відновлення неперервного сигналу*

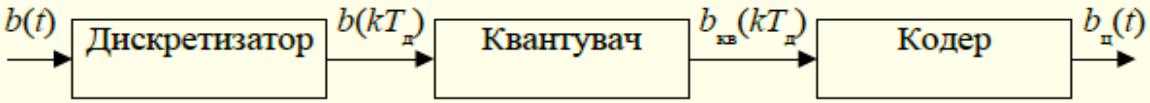


Рисунок 2.25 – Функціональна схема АЦП

Отже, в АЦП виконуються наступні перетворення:
дискретизація – *подання неперервного сигналу відліками*;
квантування – *округлення відліків до найближчих рівнів квантування*;
кодування – *подання квантованих відліків (номерів рівнів квантування) кодовими комбінаціями*.

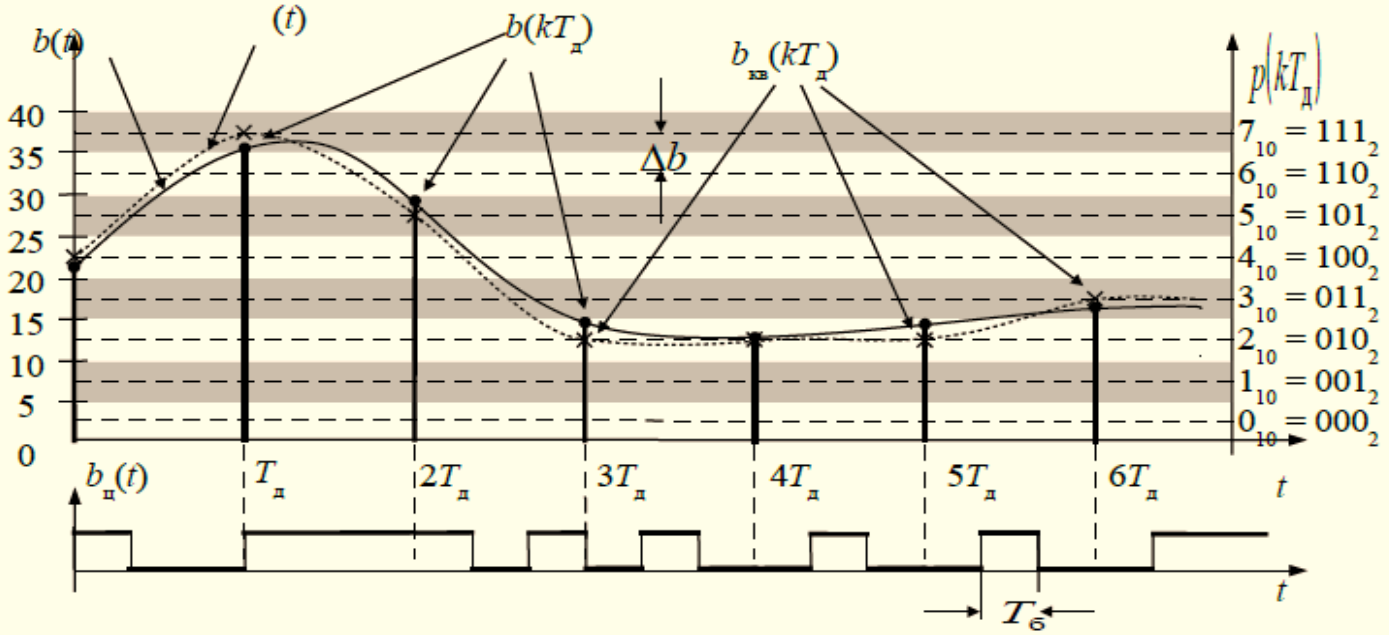


Рисунок 2.26 – Перетворення неперервного сигналу у цифровий

Відповідно до теореми Котельникова для можливості повного відновлення аналогового сигналу інтервал дискретизації має задовольняти умові $T_д \le 1/2F_{max}$, а частота дискретизації, відповідно, $f_д \ge 2F_{max}$.

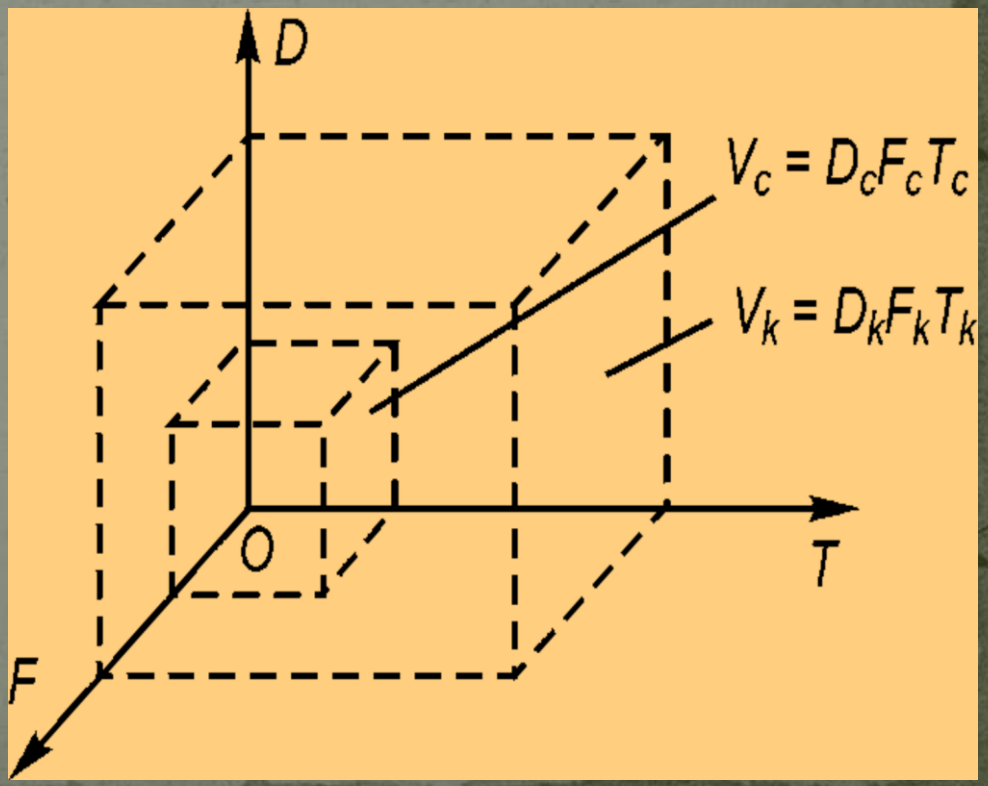
Основними параметрами сигналу , що визначають його властивості як переносника інформації в системах зв'язку, є тривалість сигналу (Tc), смуга частот, займана спектром сигналу (*Fc*), і динамічний діапазон (*Dc*). Динамічний діапазон *Dc* – це енергетична міра сигналу, яка визначається логарифмом відношення середньої потужності сигналу до середньої потужності завад на вході лінії зв'язку:

$$Dc = \log Pc/Pз$$

Добуток основних параметрів сигналу

$$Vc = TcFcDc$$

називають *об'ємом сигналу*. Об'єм сигналу є узагальненою характеристикою сигналу як носія інформації. На практиці іноді використовується геометричне зображення об'єму сигналу у вигляді прямокутного паралелепіпеда в тривимірному просторі з координатами ***T,F*** *і* ***D***



За аналогією з сигналами канал зв’язку, застосовуваний для передавання сигналів, характеризують наступними основними параметрами: часом роботи каналу зв’язку $T_к$, смугою частот пропускання каналу зв’язку $F_к$ і динамічним діапазоном $D_к$ (перевищенням середньої потужності сигналу над середньою потужністю завад на виході каналу зв’язку):

$$D_к = \log \frac{P_с}{P_з}$$

Добуток основних параметрів каналу зв’язку

$$V_к = T_к F_к D_к$$

називають *об’ємом* (*ємністю*) *каналу зв’язку*.

Основна умова узгодження каналу зв’язку з сигналом, виконання якої забезпечує можливість неспотвореного передавання сигналу, така:

$$T_к \geq T_с; \quad F_к \geq F_с; \quad D_к \geq D_с.$$

Повідомлення має бути перетворено в сигнал так, щоб об'єм сигналу в тривимірному просторі T, F, D відповідав об'єму каналу в тому самому тривимірному просторі, тобто: час передавання сигналу має збігатися з часом роботи каналу зв'язку; смуга частот сигналу має збігатися зі смугою частот каналу зв'язку; динамічні діапазони на вході і виході каналу зв'язку мають дорівнювати один одному. Тільки в цьому випадку канал зв'язку може забезпечити неспотворене передавання сигналу.

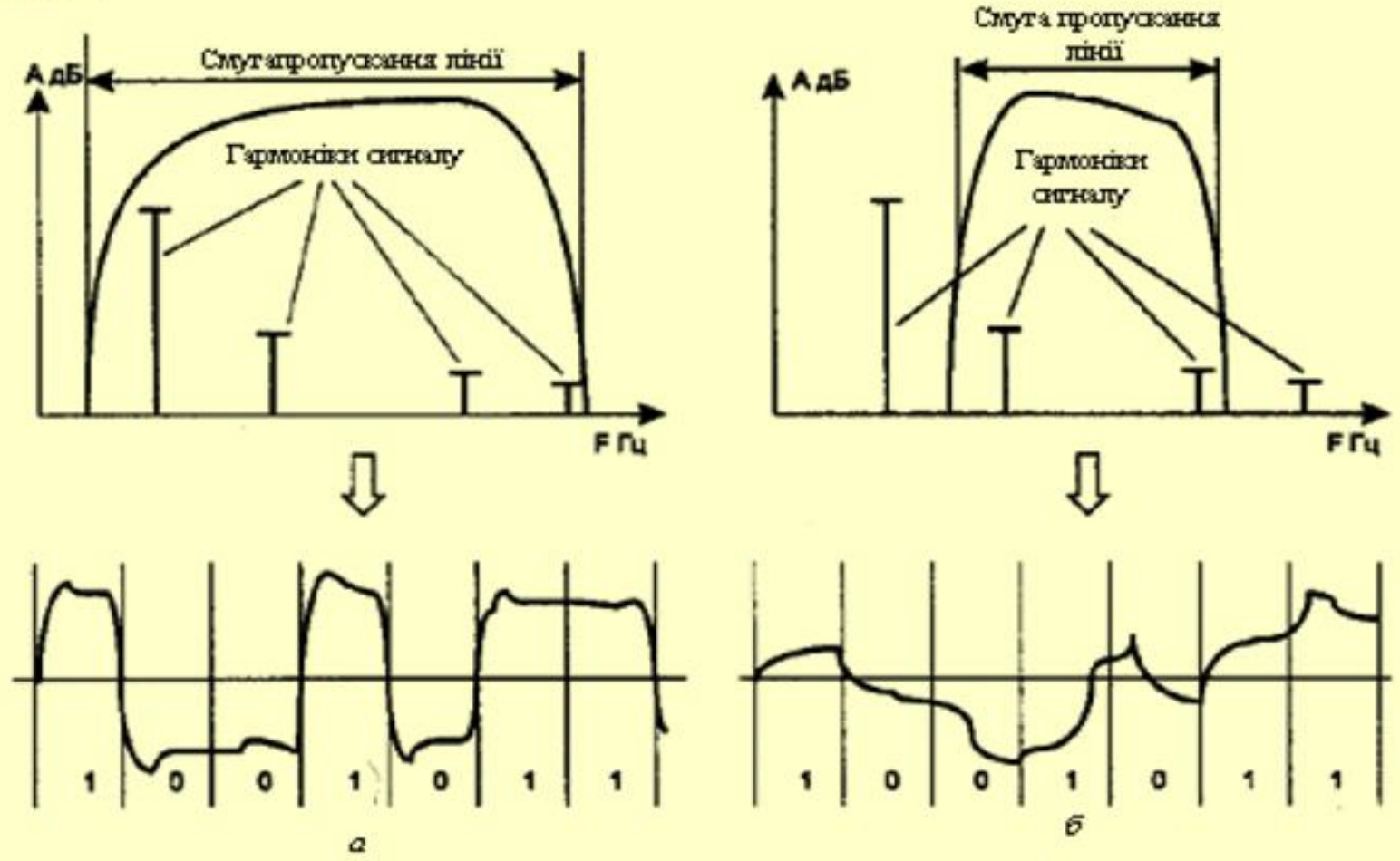
Якщо об'єм сигналу менший за об'єм каналу зв'язку або дорівнює йому, то завжди можна здійснити таке перетворення сигналу, при якому виконуватимуться указані умови. Отже, умова можливості узгодження сигналу і каналу зв'язку

$$V_к \geq V_с.$$

Відношення

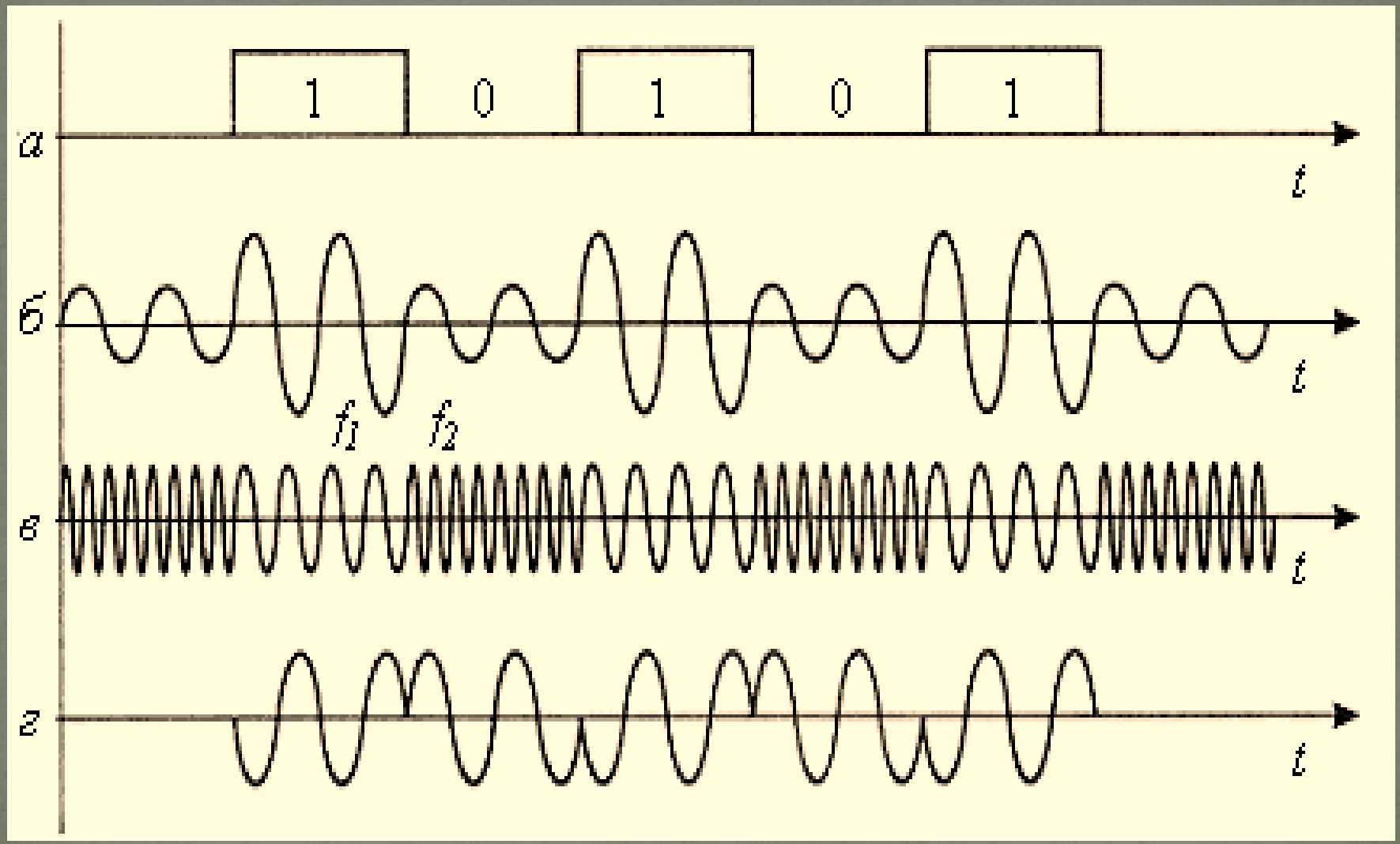
$$r_к = \frac{V_к}{V_с}$$

називається *резервом ємності каналу зв'язку, який* характеризує можливості підвищення надійності каналу зв'язку.



Співвідношення між смугою пропускання лінії зв'язку і спектром сигналу

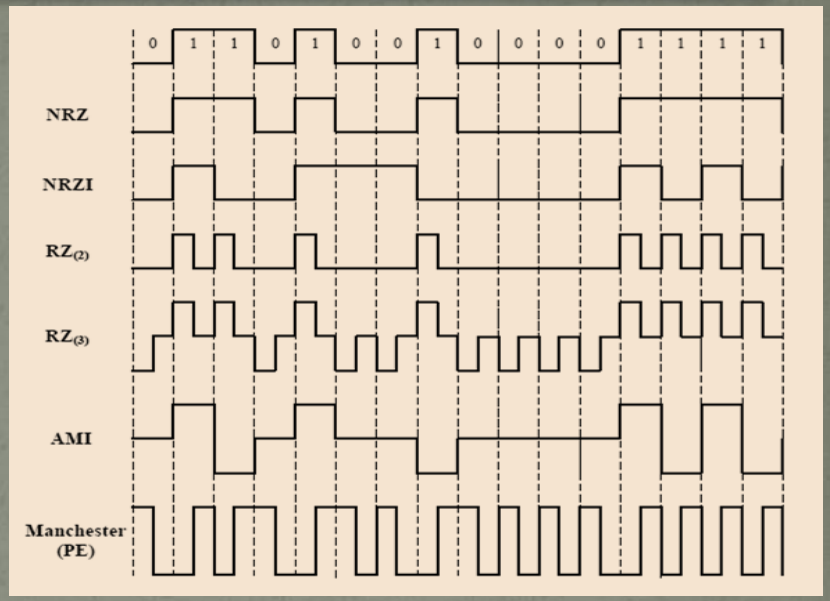
Різні види модуляції:
амплітудна *б*), частотна *в*), фазова *г*)



5. Методи фізичного (лінійного)кодування цифрових сигналів у каналах зв'язку



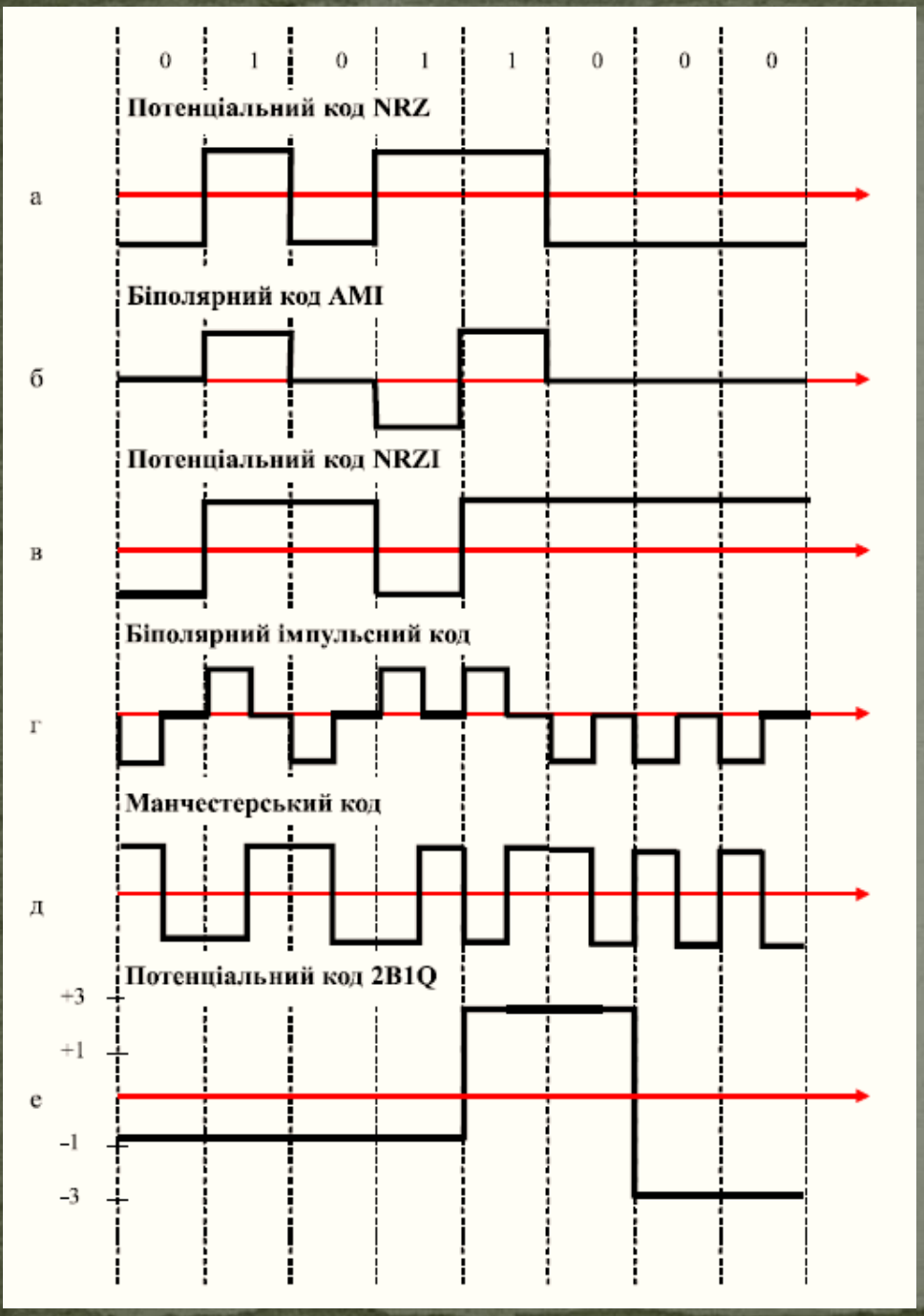
Узагальнена класифікація способів кодування сигналів в електронних системах



Основні вимоги до методів кодування

1. Мінімальна ширина спектра сигналу.
2. Синхронізація передавача і приймача.
3. Низький рівень помилок.
4. Енергоефективність.
5. Мінімізація постійної складової сигналу

КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ Частина 1 НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК [Електронний ресурс]: навч. посіб./ Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,6 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 336с.



Метод NRZ (Non-Return to Zero)

(без повернення до нуля)

Біт передається постійним рівнем напруги протягом всього інтервалу біта.

Існують два варіанти:

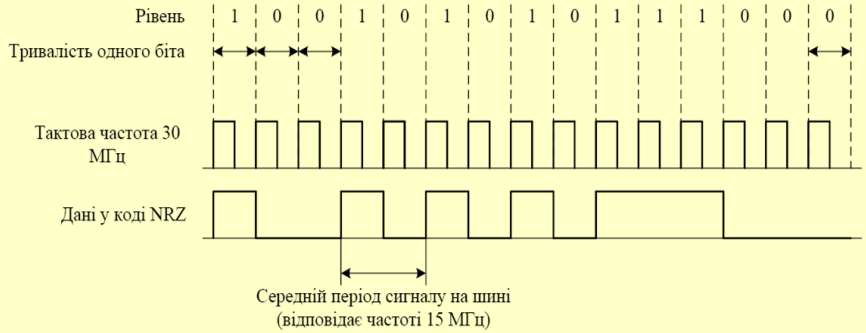
- NRZ-L (Level)
- NRZ-I (Invert)

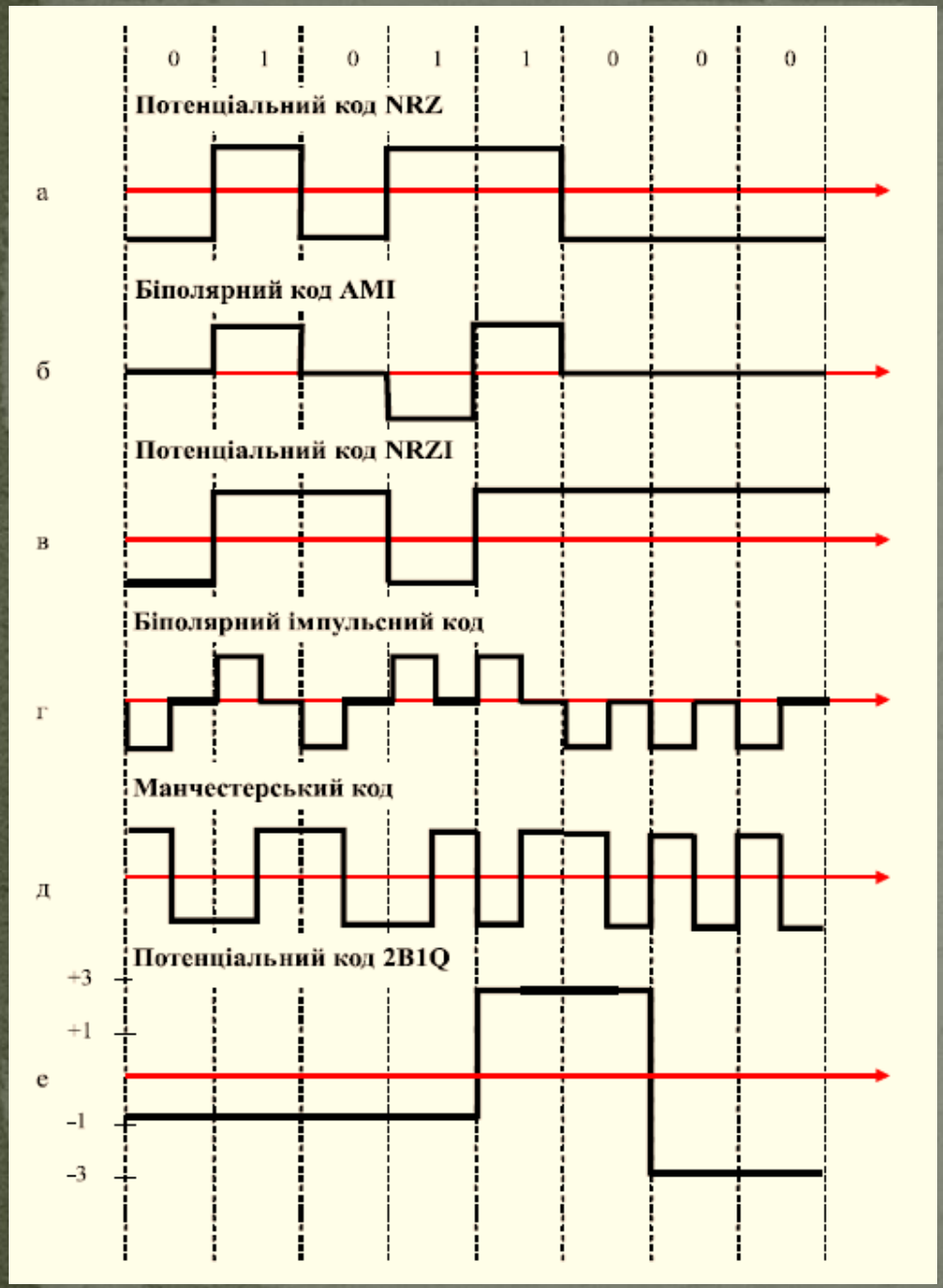
Переваги

- простота реалізації
- мала смуга частот

Недоліки

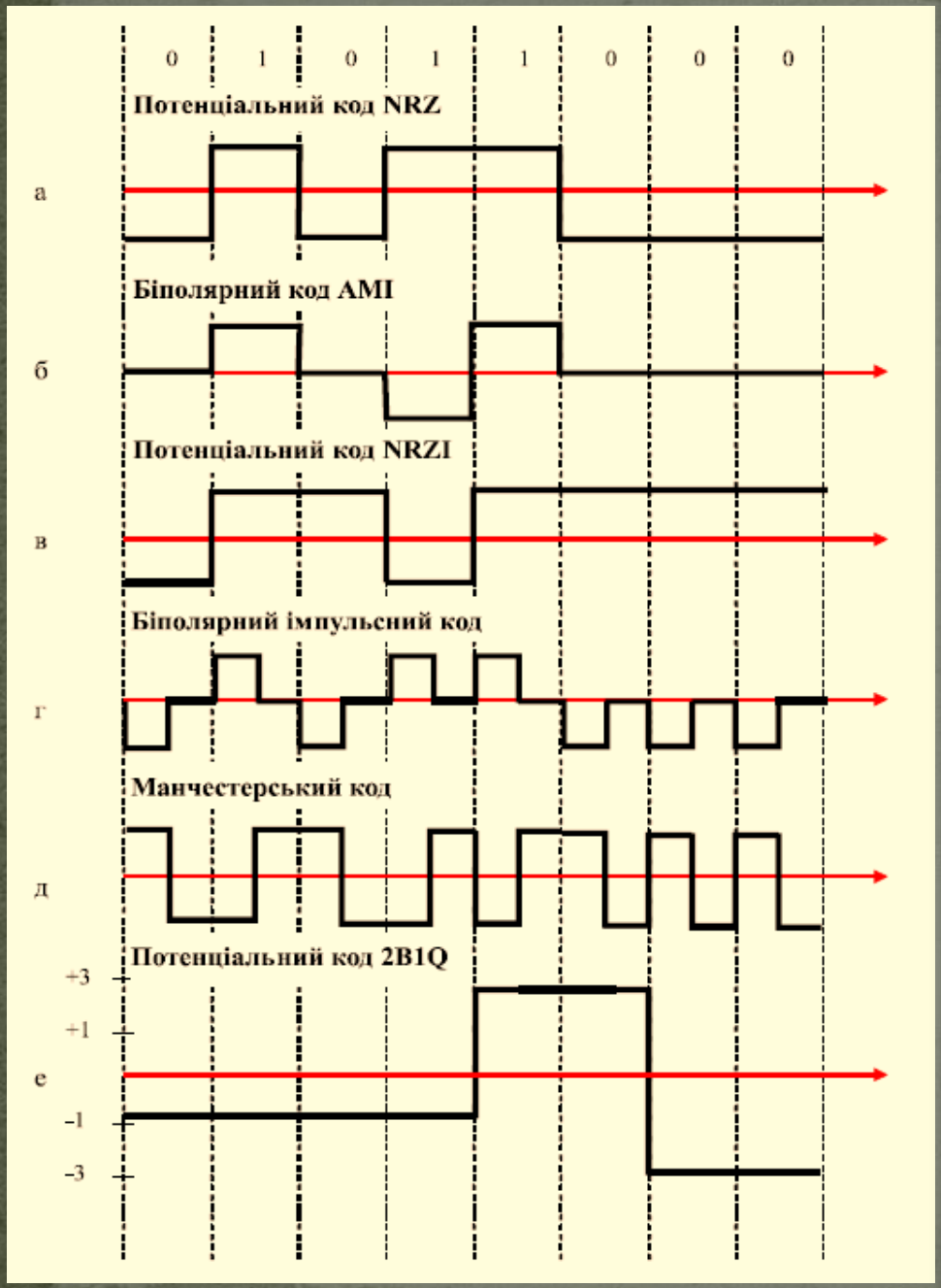
- проблема синхронізації при довгих послідовностях однакових бітів
- можливість появи постійної складової



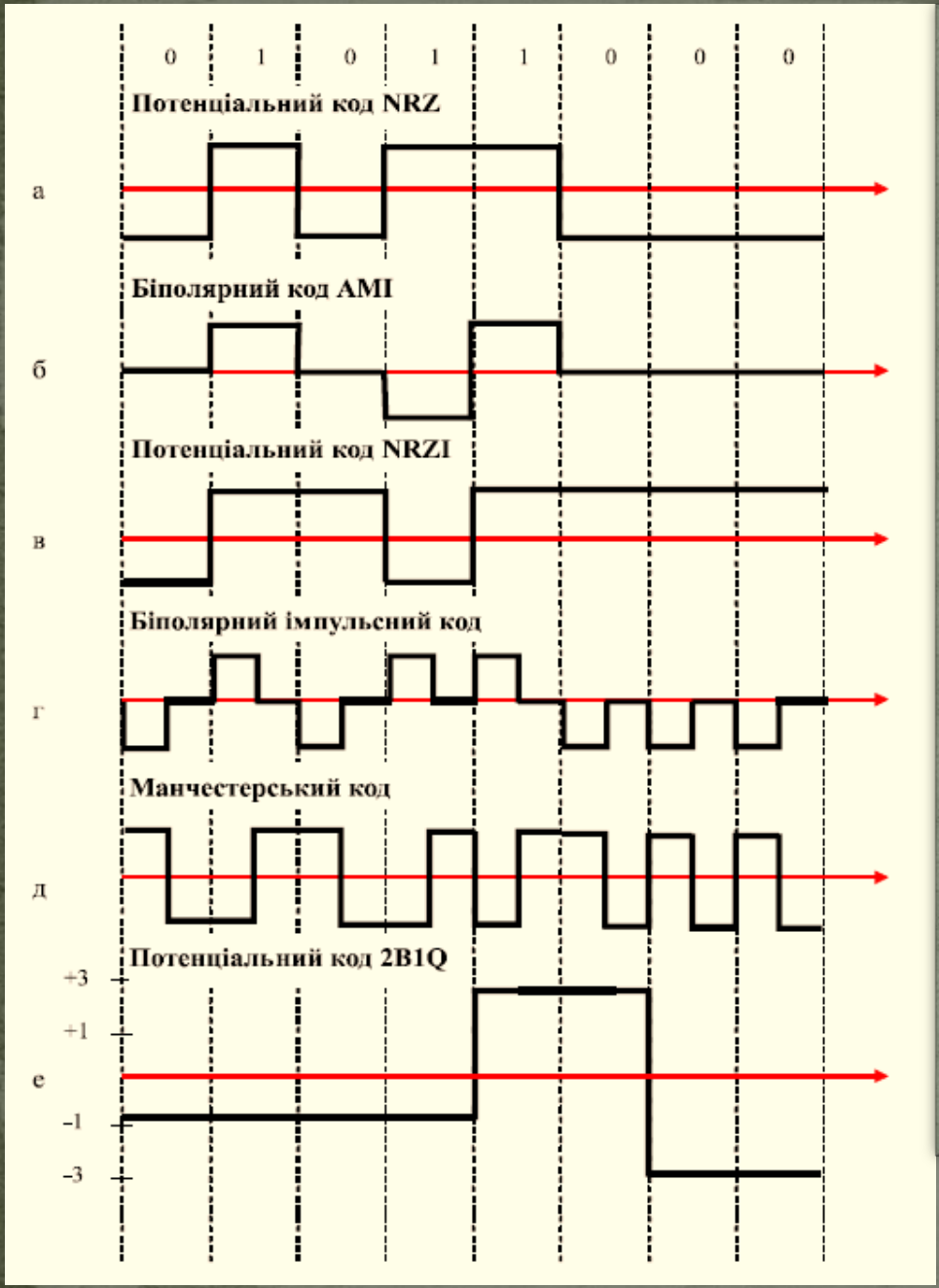


AMI (Alternate Mark Inversion — інверсія маркерів, що чергується) — це метод лінійного кодування, що використовує три рівні сигналу (позитивний, негативний та нульовий) для передачі цифрових даних. Логічний «0» передається нульовим рівнем, а логічна «1» (маркер) — імпульсами почергово позитивної та негативної полярності, що виключає постійну складову в сигналі AMI-код володіє хорошими синхронізуючими властивостями при передачі серій
одиниць і порівняно простий в реалізації.

Недоліком коду є обмеження на щільність нулів в потоці даних, оскільки довгі послідовності нулів ведуть до
втрати синхронізації.

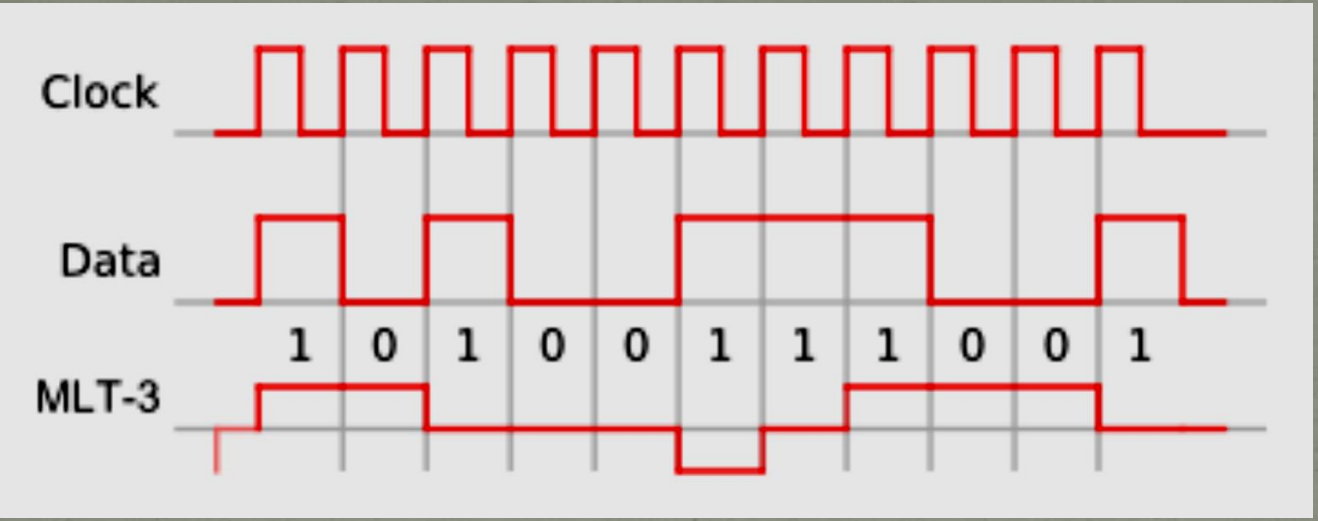


При манчестерському кодуванні кожен такт ділиться на дві частини. Інформація кодується перепадами потенціалу в середині кожного такту. Одиниця кодується перепадом від низького рівня сигналу до високого, а нуль - зворотнім перепадом. На початку кожного такту спостерігають службовий перепад сигналу, якщо потрібно представити кілька одиниць чи нулів підряд. Оскільки сигнал змінюється принаймні один раз за такт передавання одного біта даних, то манчестерський код володіє високими самосинхронізуючими властивостями. Смуга пропускання манчестерського коду вужча, ніж у біполярного імпульсного. Манчестерський код має ще одну перевагу перед біполярним імпульсним кодом. В останньому для передавання даних використовують три рівні сигналу, а в манчестерському – два.



Код 2B1Q передає одну пару біт за один бітовий інтервал. Кожній можливій парі у відповідність ставиться свій рівень з чотирьох можливих рівнів потенціалу; кожні два біти (2B) передаються за один такт сигналом, що має чотири стани (1Q). Парі бітів 00 відповідає потенціал -2,5 В; парі 01 – потенціал -0,833 В; парі 11 – потенціал +0,833 В; парі 10 – потенціал +2,5 В. Цей спосіб кодування вимагає додаткових заходів по боротьбі з довгими послідовностями однакових пар бітів. При випадковому чергуванні бітів спектр сигналу в два рази вужчий, ніж у коду NRZ. Таким чином, за допомогою коду 2B1Q можна по одній лінії передавати дані в два рази швидше, ніж за допомогою коду AMI чи NRZ

Метод MLT-3 (Multi Level Transmission – 3 багаторівнева передача) - метод кодування, що використовує три рівні сигналу. Метод грунтується на циклічному перемиканні рівнів -U, 0, +U. Одиниці відповідає перехід з одного рівня сигналу на наступний



Так само як і в методі NRZI при передачі «нуля» сигнал не змінюється. У разі найбільш частого перемикання рівнів (довга послідовність одиниць) для завершення циклу необхідно чотири переходи. Це дозволяє вчетверо знизити частоту несучої щодо тактової частоти, що робить MLT-3 зручним методом при використанні мідних проводів в якості середовища передачі. Метод розроблений Cisco Systems для використання в мережах FDDI на основі мідних проводів, відомих як CDDI. Також використовується в Fast Ethernet 100BASE-TX.

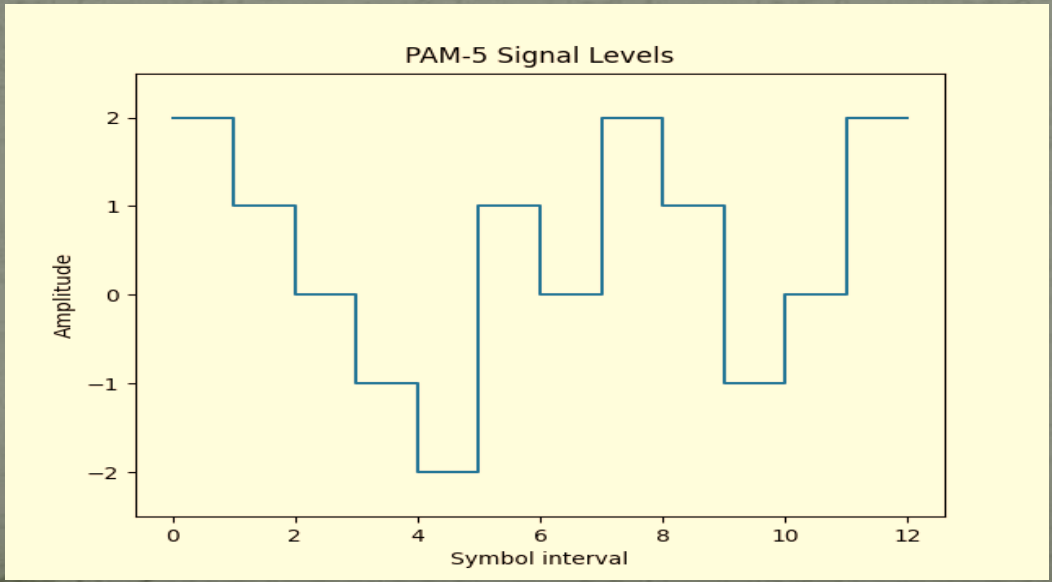
PAM-5 (Pulse Amplitude modulation) — метод п'ятирівневої амплітудно-імпульсної модуляції, використовує 5 різних рівнів амплітуди для передачі даних, PAM-5 є вдосконаленням технології 2B1Q (яка використовує 4 рівні) за рахунок додавання додаткового нульового рівня.

PAM-5 є стандартом для високошвидкісних мереж, зокрема **1000BASE-T (Gigabit Ethernet)**, що дозволяє передавати дані по крученій парі на швидкості 1 Гбіт/с.

Переваги : 1. Підвищення швидкості: Використання 5 рівнів дозволяє кодувати більше інформації в одному імпульсі (зазвичай 2 біти + додаткові біти для виправлення помилок).

2. Ефективність смуги пропускання: PAM-5 дозволяє передавати вищий обсяг даних у вужчій смузі частот порівняно з простішими методами модуляції.

Недоліки: складна обробка сигналу; необхідність фільтрації шуму



Метод 4B/5B (**блокове кодування**, яке використовується разом з MLT-3, **PAM-5)** - метод лінійного кодування, який використовується в мережевих технологіях (зокрема Fast Ethernet та FDDI) для перетворення 4-бітових груп даних у 5-бітові коди

Переваги:

покращення синхронізації; обмеження довжини нульових послідовностей; підвищення надійності передачі.

Недоліки: надлишковість 25%

Число	Двійковий код	Код 4B/5B	Число	Двійковий код	Код 4B/5B
0	0000	11110	8	1000	10010
1	0001	01001	9	1001	10011
2	0010	10100	10	1010	10110
3	0011	10101	11	1011	10111
4	0100	01010	12	1100	11010
5	0101	01011	13	1101	11011
6	0110	01110	14	1110	11100
7	0111	01111	15	1111	11101

Висновки:

- передача інформації здійснюється за допомогою переносників інформації. Матеріальну основу переносника інформації складають сигнали;
- інформаційними параметрами сигналів можуть бути амплітуда, частота або фаза коливань;
- будь-який складний періодичний сигнал може бути поданий за допомогою ряду Фур'є як сума простих гармонічних коливань. Сукупність простих гармонічних коливань, на які може бути розкладений складний періодичний сигнал, називається його спектром;
- Основні операції аналого-цифрового перетворення (АЦП): дискретизація, квантування та кодування;
- умова повного відновлення аналогового сигналу: $f_д \geq 2F_{max}$
- використовуючи різні методи кодування та представлення сигналів можна отримати результуючий сигнал з меншою шириною спектру, забезпечити синхронізацію між передавачем і приймачем, а також покращити завадостійкість сигналу. У сучасних мережах використовуються **комбіновані методи кодування** (наприклад, **4B/5B + MLT-3** або **PAM-5**), що забезпечує ефективну передачу інформації.