

Лекція 1

Вступ в дисципліну. Засоби цифрової обробки сигналів . Принципи розробки та реалізації систем цифрової обробки сигналів

Цифрова обробка сигналу (ЦОС) – предмет, що вивчає процеси аналого-цифрового (АЦП) та цифро-аналогового перетворення (ЦАП) сигналів, а також обробки інформації про характеристики аналогового сигналу в цифровій формі (цифрового сигналу).

Цифровий сигнал – будь-яка пронумерована послідовність чисел (цифрових кодів), наприклад, 3, 7, 11, 9, ..., в тому числі значень оцифрованого аналогового сигналу, що є функцією деякого дискретного аргументу (наприклад, порядкового номера, відстані або часу), і відображає лише інформацію про певний процес чи його характеристику.

Задача дисципліни – вивчення процесів та принципів виділення та перетворення інформації про характеристики реальних сигналів, а також відтворення даних сигналів за наявності інформації про них у цифровій формі.

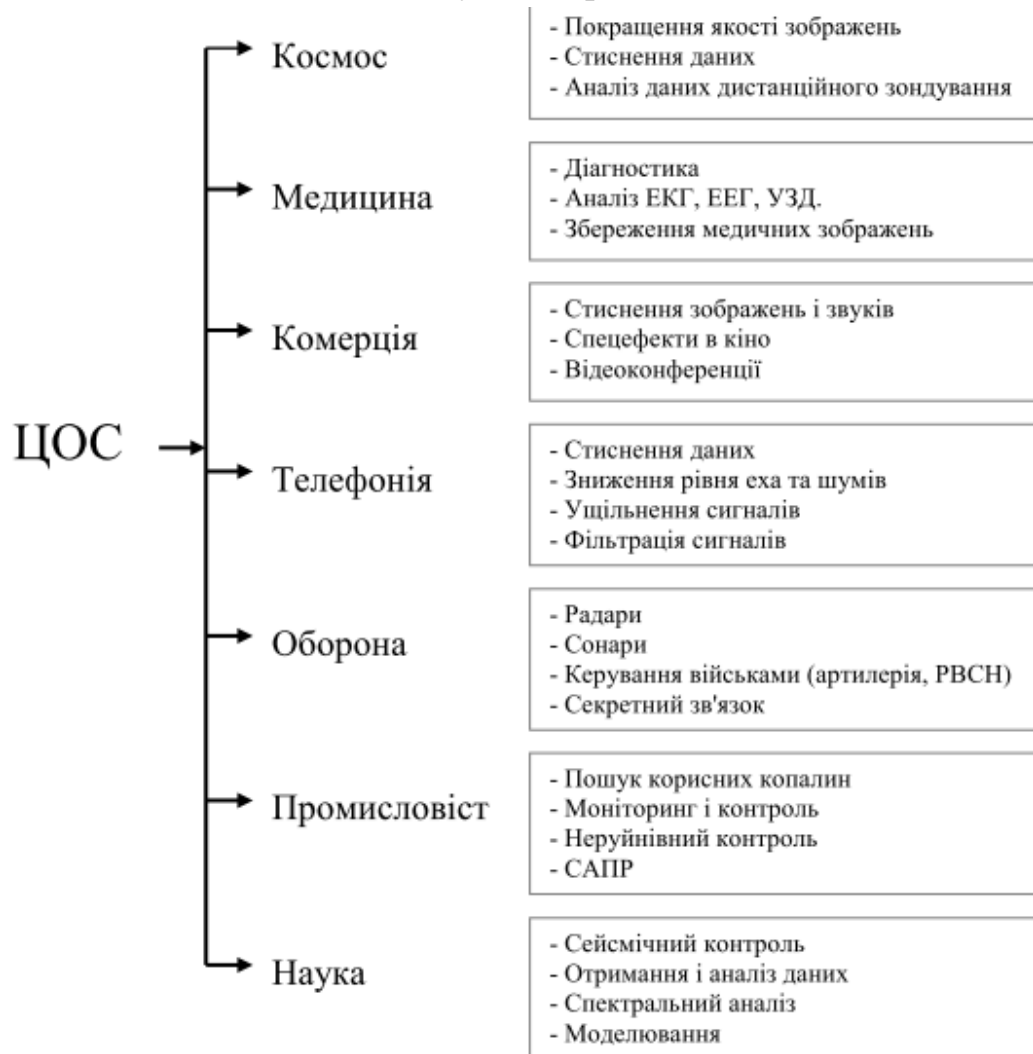
Методи ЦОС - математичні співвідношення або алгоритми, відповідно до яких виконуються обчислювальні операції над цифровими сигналами. Алгоритми ЦОС , на відміну від інших обчислень на ЕОМ, виконуються в реальному масштабі часу. На відміну від методів аналогової обробки математичні співвідношення в ЦОС можуть реалізувати будь-яку функцію не прив'язуючись до природи пристрою обробки і його пропускну характеристики.

Засоби ЦОС – цифрові логічні схеми, програмовані логічні інтегральні схеми (ПЛІС), мікропроцесори, мікроконтролери, цифрові сигнальні процесори. Їх сукупність – процесор ЦОС.

Задачі, що вирішує ЦОС:

- Виділення інформації про сигнал (амплітуда, фаза, частота, спектральні складові, часові співвідношення)
- Перетворення формату сигналу (передача даних з поділом каналів),
- Стиснення даних (модеми, мобільні телефони, телебачення HDTV, MPEG)
- Формування сигналів зворотного зв'язку (управління промисловими процесами)
- Виділення сигналу з шуму (фільтрація, автокореляція, згортка)
- Виділення та збереження сигналу в цифровому вигляді для наступної обробки

Галузі використання ЦОС



Найбільш поширені споживацькі напрямки ЦОС:

1. Обробка зображень:

- Розпізнавання образів;
- Машинний зір;
- Покращення якості зображень;
- Супутникові мапи, картографія;
- Анімація.

2. Інструментальні засоби, контроль:

- Контроль параметрів і характеристик процесу
- Спектральний аналіз
- Фільтрація від шуму
- Стиснення інформації

3. Мова/Аудіо:

- Розпізнавання мови;
- Синтез мови;
- Озвучування текстів;
- Цифрові аудіо системи (еквалайзери)

Переваги ЦОС:

- *Гарантована точність.* Точність визначається тільки числом задіяних бітів.
- *Досконала відтворюваність.* Можна ідентично відтворити кожен сигнал, оскільки відсутні відхилення, обумовлені стійкістю окремих складових засобів обробки і збереження сигналів. Наприклад, використовуючи методи ЦОС, цифрові записи можна копіювати або відтворювати багаторазово без погіршення якості сигналу.
- *Відсутність спотворення характеристик сигналу* при обробці під дією зовнішніх факторів (температури, вологи або старіння складових).
- Напівпровідникові технології дозволяють *підвищити надійність, зменшити розміри, знизити вартість, знизити енергоспоживання і збільшити швидкість роботи.*
- *Більша гнучкість.* Системи ЦОС можна запрограмувати і перепрограмувати на виконання різних функцій без зміни обладнання. Це, мабуть, одна з найважливіших переваг ЦОС.
- *Чудова продуктивність.* ЦОС можна використовувати для виконання функцій, які неможливі при аналоговій обробки сигналів. Наприклад, можна отримати лінійну фазову характеристику і реалізувати складні алгоритми адаптивної фільтрації.
- У деяких випадках інформація вже може бути записана у цифровому вигляді, і
- *обробляти її можна тільки методами ЦОС.*

У ЦОС є і свої недоліки. Однак завдяки новим технологіям значення цих недоліків постійно зменшується.

Недоліки ЦОС:

- *Швидкодія і витрати.* Проекти ЦОС можуть бути дорогими, особливо при великій ширині смуги сигналу, що оброблюється, через високу ціну сучасних і швидкісних АЦП/ЦАП та ЦСП. Необхідність високої швидкодії ЦСП викликана обробкою сигналу в реальному часі, тобто всі операції обробки повинні бути виконані за час інтервалу дискретизації.
- *Довготривалість і витрати розробки систем ЦОС,* що зв'язана з збільшенням кількості етапів розробки і фахівців, що їх виконуватимуть у порівнянні з системами аналогової обробки.
- *Проблеми скінченної розрядності та частотної смуги.* Сучасні АЦП/ЦАП, що володіють гарною роздільною здатністю і широкою смугою пропускання дорогі. З економічної точки зору доцільніше використовувати дані пристрої з меншими показниками, що погіршує якість обробки і перекладає частину функцій на вхідні/вихідні каскади ЦАП/АЦП, що здійснюють аналогову обробку.
- *Проблеми динамічного діапазону.* Оскільки характеристика перетворення АЦП/ЦАП дискретна, то деякі зміни слабого аналогового сигналу не будуть сприйняті і поглинуться шумом квантування, тому амплітуду сигналу треба узгоджувати спеціальними вхідними/вихідними

аналоговими каскадами АЦП/ЦАП, що складаються з підсилювачів та трансформаторів хвильового опору.

У наш час інженер стоїть перед вибором належної комбінації аналогових та цифрових методів для вирішення задачі обробки сигналів. Неможливо обробити фізичні аналогові сигнали, використовуючи тільки цифрові методи, так як всі датчики (мікрофони, термopари, тензорезистори, п'єзоелектричні кристали, головки накопичувача на магнітних дисках і т.д.) є аналоговими пристроями. Тому деякі види сигналів вимагають наявності ланцюгів узгодження для подальшої обробки сигналів аналоговим або цифровим методом.

В дійсності, ланцюги узгодження сигналу - це аналогові схеми, що виконують такі функції, як посилення, накопичення (у вимірювальних і попередніх (буферних) підсилювачах), виявлення сигналу на фоні шуму (високоточними підсилювачами синфазного сигналу, вирівнювача і лінійними приймачами), динамічне стиснення діапазону (логарифмічними підсилювачами, логарифмічними ЦАП і підсилювачами з програмованим коефіцієнтом підсилення) і фільтрація (пасивна та активна).

Кілька методів реалізації процесу обробки сигналів показано на рис. 1. Перша схема відображає чисто аналоговий підхід. Інші три схеми відображають реалізацію ЦОС. Великий вплив на обсяг і якість реалізації ЦОС завдає місцеположення АЦП в тракці обробки сигналу. Друга схема відображає реалізацію ЦОС з ланками попереднього узгодження. В схемах три та чотири АЦП переміщений ближче до датчика, тому велика частина обробки аналогового сигналу тепер проводиться за допомогою АЦП, що вимагає збільшення його можливостей. Збільшення можливостей АЦП може виражатися у збільшенні частоти дискретизації, розширенні динамічного діапазону, підвищенні роздільної здатності, відсіканні вхідного шуму, використанні вхідної фільтрації і програмованих підсилювачів (PGA), наявності джерел опорної напруги на кристалі і т.д. Всі згадані доповнення підвищують функціональний рівень і спрощують систему. При наявності сучасних технологій виробництва ЦАП і АЦП з високими частотами дискретизації і роздільними здатностями істотний прогрес досягнутий в інтеграції все більшого числа ланцюгів безпосередньо в АЦП / ЦАП. У сфері вимірювань, наприклад, компанією Analog Devices випущено 24-бітові АЦП з вбудованими програмованими підсилювачами (PGA), які дозволяють оцифровувати повномасштабні мостові сигнали 10 mV безпосередньо, без попереднього узгодження (наприклад, серія AD773x). Щоб керувати голосовими та звуковими сигналами є комплексні пристрої кодування-декодування - кодеки (Analog Front End, AFE), що відображені на схемі чотири, які мають вбудовану в чіп аналогову схему, що дає змогу вимагати мінімум вимог до зовнішніх компонентів узгодження (AD1819B і AD73322). Існують також відеокодеки (AFE) для таких завдань, як обробка зображення за допомогою ПЗЗ (CCD), та інші (наприклад, серії AD9814, AD9816, і AD984X, все продукція Analog Devices).

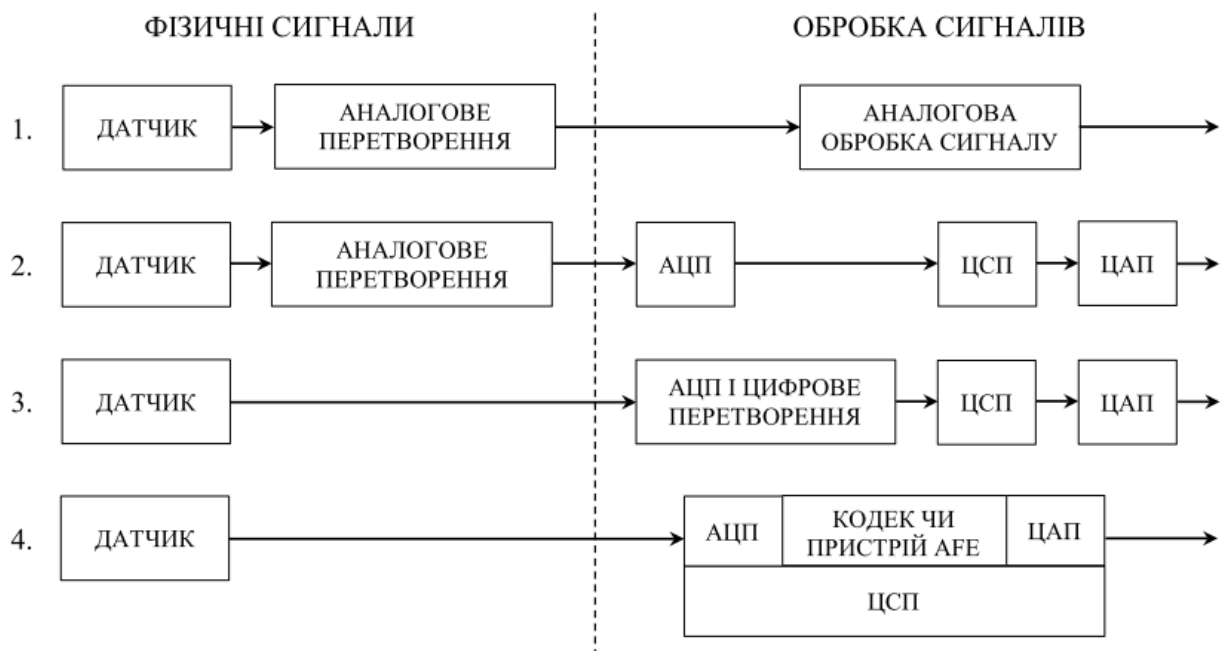


Рисунок 1 Схеми обробки аналогових та цифрових сигналів

В якості практичного прикладу використання ЦОС порівняємо аналоговий і цифровий фільтри низької частоти (ФНЧ), кожен з частотою зрізу 1 кГц, що мають однакові габарити в реалізації. Цифровий фільтр реалізований у вигляді типової дискретної системи, показаної на рис. 2.

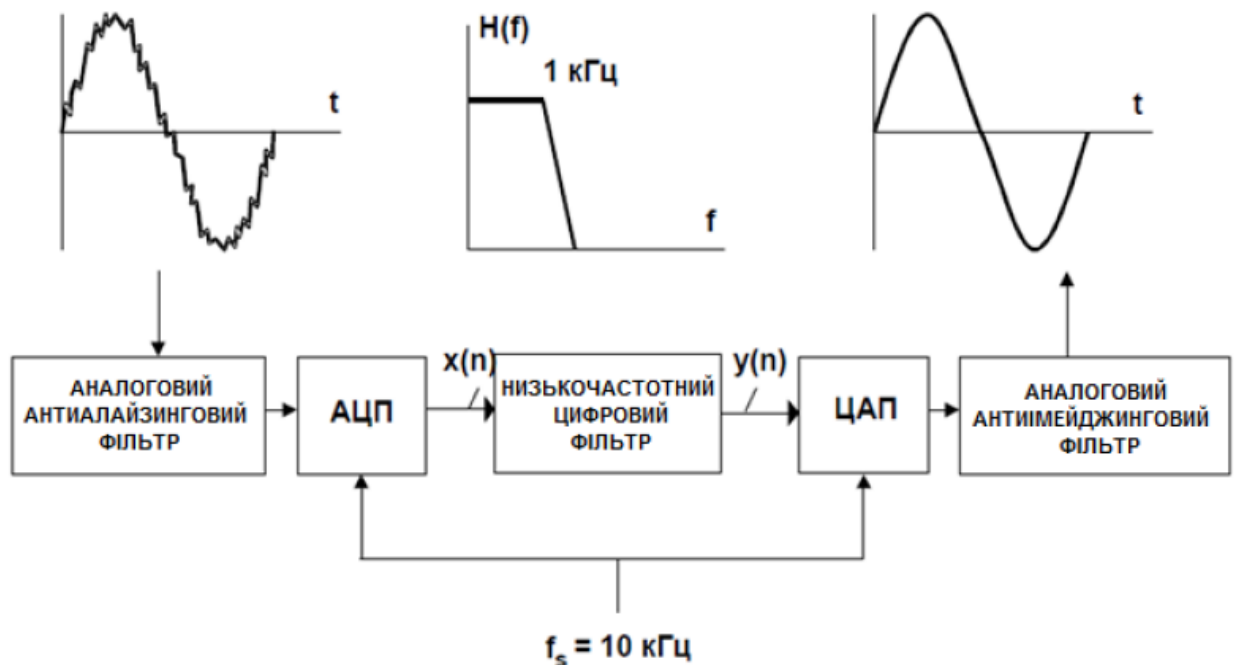


Рисунок 2 Схеми типової дискретної системи

При побудові системи прийнято кілька неявних припущень. По-перше, щоб точно обробити сигнал, приймається, що тракт АЦП / ЦАП володіє достатніми значеннями частоти дискретизації, роздільної здатності та динамічного діапазону. По-друге, для того, щоб закінчити всі свої обчислення в межах інтервалу дискретизації ($1/f$), пристрій ЦОС повинен

мати достатню швидкодiю. По-третє, на входi АЦП i виходi ЦАП зберiгається потреба в аналогових фiльтрах низької частоти (anti-aliasing filter i anti-imaging filter), хоча вимоги до їх продуктивностi невеликi.

Аналогове перетворення реалiзується фiльтром Чебишева першого роду шостого порядку (характеризується наявностiю пульсацiй коефiцiєнта передачі в смузі пропускання i відсутностiю пульсацiй поза смугою пропускання). Його характеристики представленi на рис. 3.

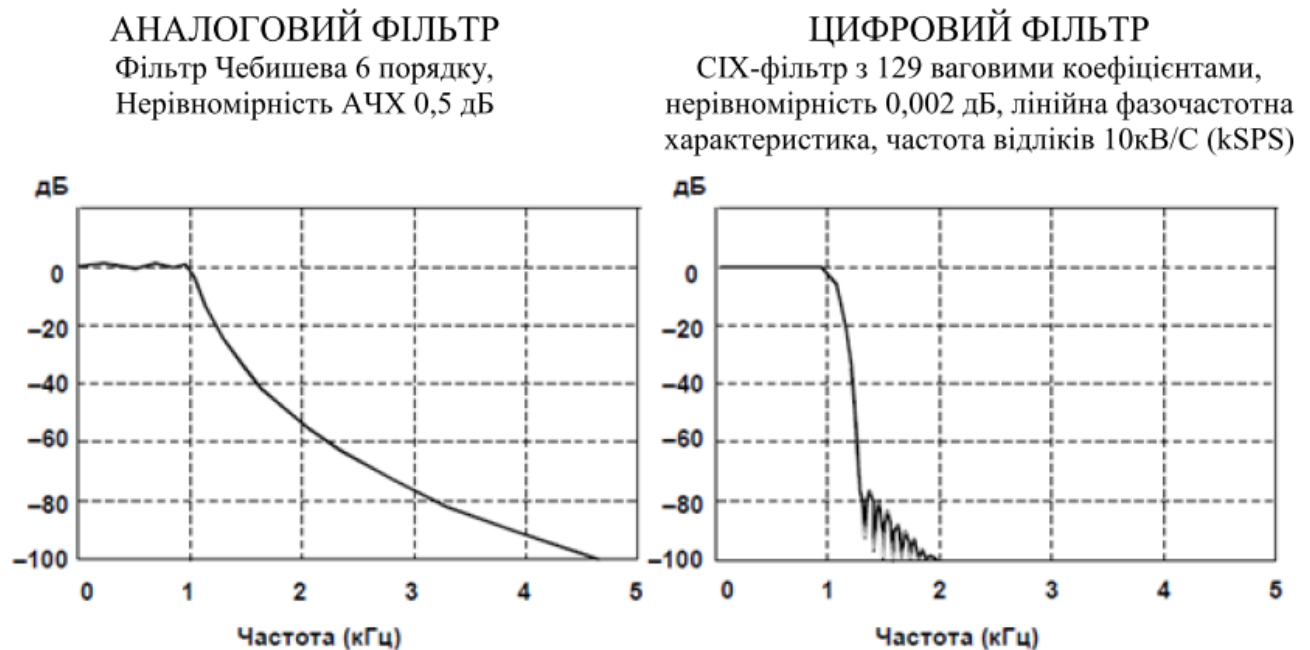


Рисунок 3 Порівняння амплітудно-частотних характеристик аналогового та цифрового фільтрів

Представлений на рис. 3 цифровий СІХ-фільтр з 129 ваговими коефiцiєнтами має нерiвномiрностi характеристики всього 0,002 дБ в смузі пропускання, лiнiйну фазову характеристику i набагато бiльш крутий спад. На практицi такi характеристики неможливо реалiзувати з використанням одних тiльки аналогових методiв. Iнша очевидна перевага схеми полягає в тому, що цифровий фiльтр не вимагає чiткого пiдбору компонентiв i не чутливий до дрейфу частоти, так як вона стабiлiзована на кристалi. Фiльтр з 129 коефiцiєнтами вимагає 129 операцiй множення з накопиченням (MAC) для обчислення кожного вихiдного вiдлiку. Ця обробка повинна бути закинчена в межах iнтервалу дискретизацiї $1/f$, щоб забезпечити роботу в реальному масштабі часу. У цьому прикладі частота дискретизації дорiвнює 10 кГц, тому для обробки достатньо 100 мкс. Тодi такий фiльтр вимагає швидкодiї бiльше $129/100 \text{ мкс} = 1,3$ мiльйона операцiй в секунду (MIPS). Iснуючі ЦСП мають набагато бiльшу швидкодiю, тобто така реалiзацiя не обмежується нiяким фактором.

Загальна схема цифрової обробки сигналiв наведена на рис. 4.

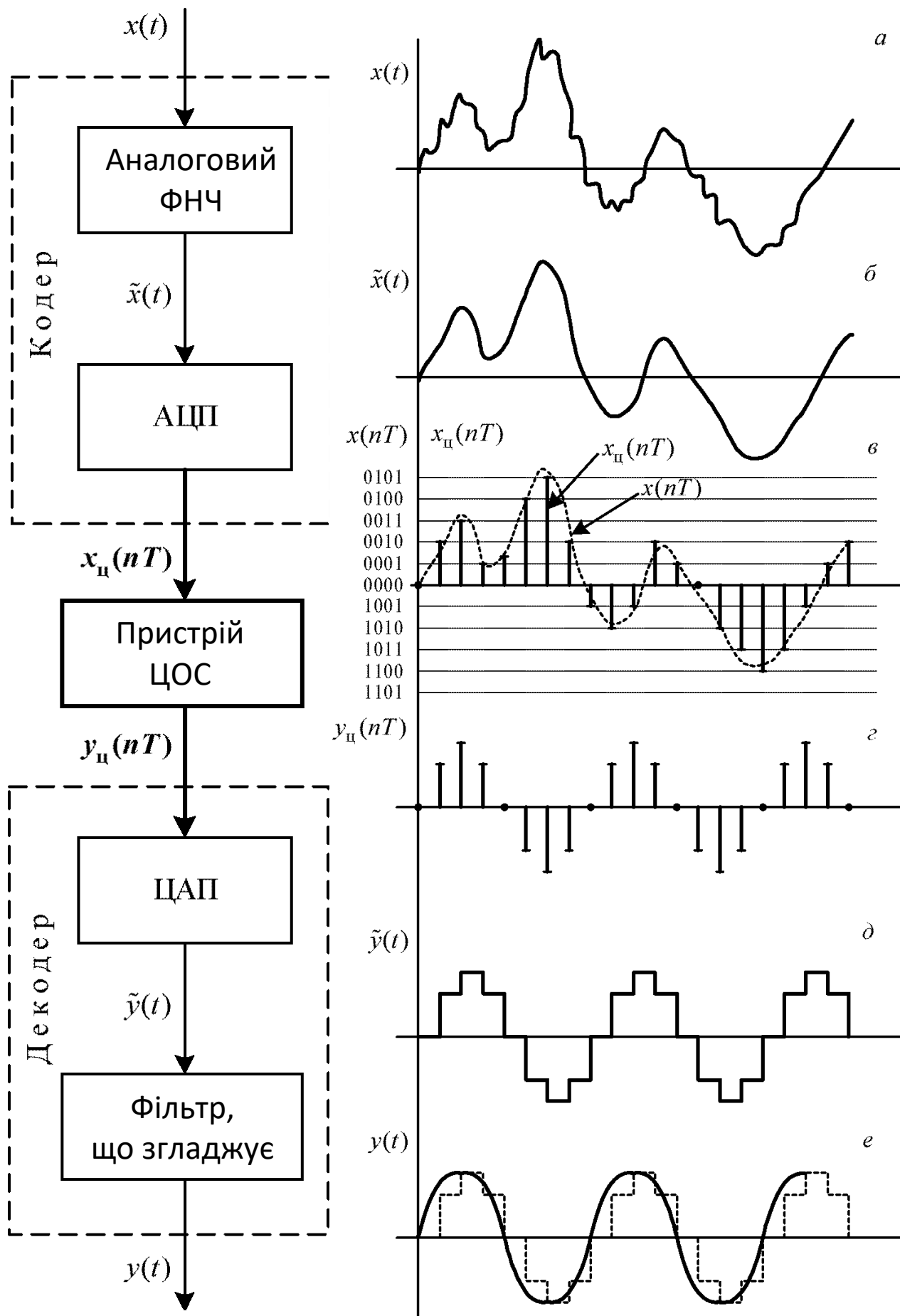


Рис. 4. Загальна схема цифрової обробки сигналів

Теорема Котельникова

частота дискретизації f_δ вибирається із умови:
 $f_\delta > 2f_e$, де f_e — верхня частота спектру сигналу

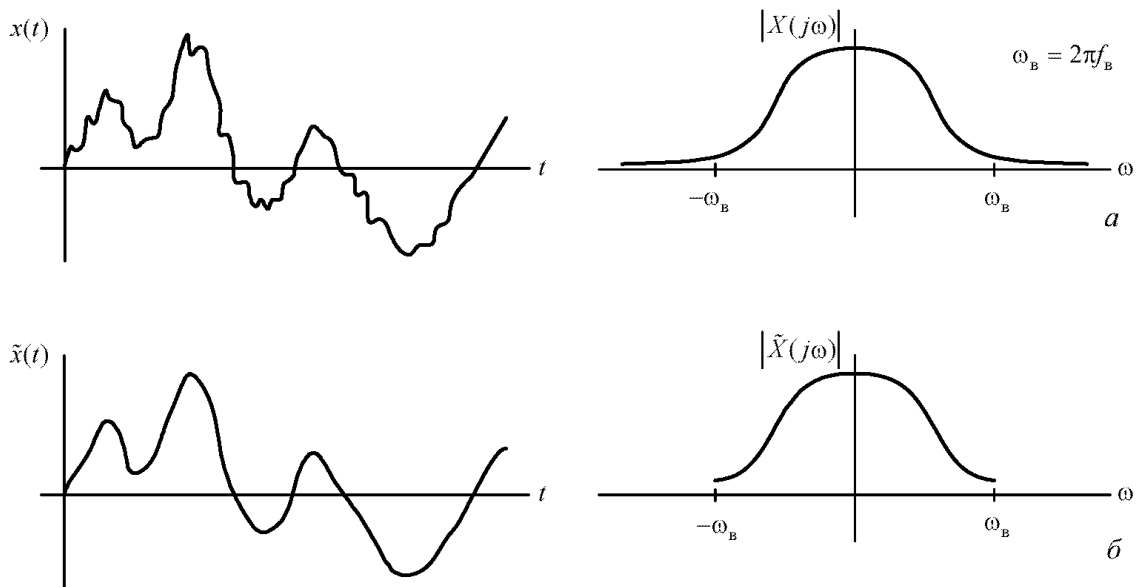


Рис. 5. Сигнали та їх амплітудні спектри на вході (а) і виході (б) ФНЧ

Рівні квантування кодуються двійковими числами розрядності b , ка залежить від числа рівнів квантування R :

$$R \leq 2^b, \text{ звідки } b = \text{int}(\log_2 R) .$$

Пристрої ЦОС можуть працювати в реальному або нереальному часу.

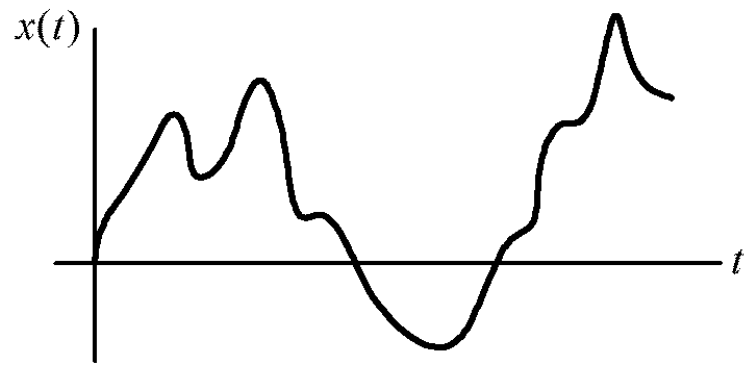
У реальному часі обробка сигналів повинна виконуватися в темпі надходження відліків вхідного сигналу $x_u(nT)$, $n = 0, 1, \dots$ і відповідати наступним вимогам:

- час циклу Δt_u при обчисленні відліку $y_u(nT)$ не повинен перевищувати інтервалу між двома сусідніми відліками $x_u(nT)$, (періода дискретизації T)

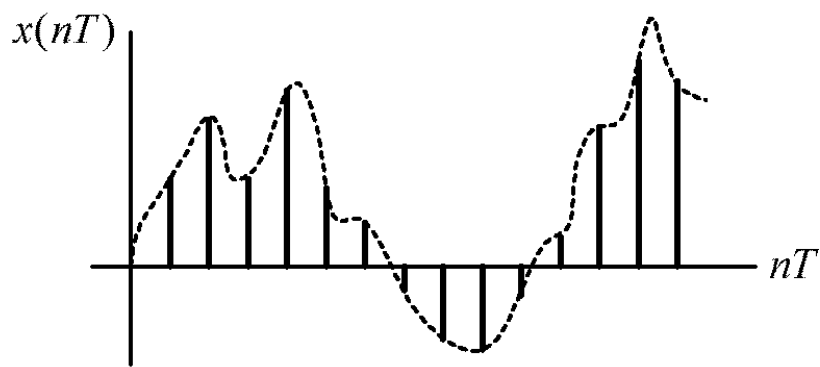
$$\Delta t_u < T ;$$

- тактова частота f_T процесора повинна бути набагато вище частоти дискретизації f_d сигналу $x_u(nT)$

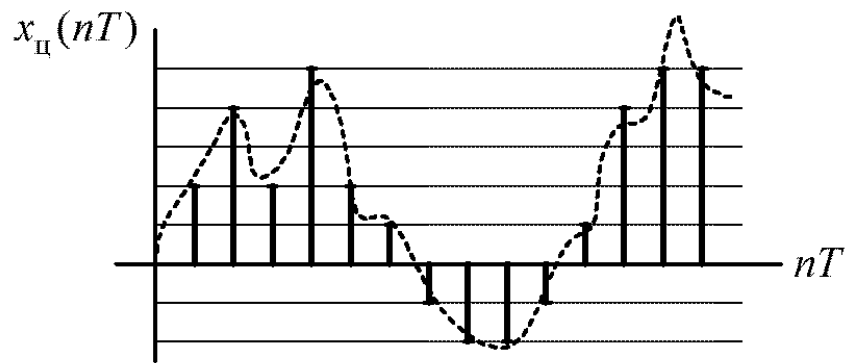
$$f_T \gg f_d .$$



a



б



в

Рис. 6. Основні типи сигналів: аналоговий (а), дискретний (б) і цифровий (в)

Типові дискретні сигнали

1. Цифровий одиничний імпульс (рис. 7, а),

$$u_0(n) = \begin{cases} 1, & n = m; \\ 0, & n \neq m. \end{cases} \quad (1.1)$$

Затриманий цифровий одиничний імпульс, (рис. 7, б).

$$u_0(n - m) = \begin{cases} 1, & n = m; \\ 0, & n \neq m. \end{cases} \quad (1.2)$$

$$x(n) = \sum_{m=0}^{\infty} x(m)u_0(n - m). \quad (1.3)$$

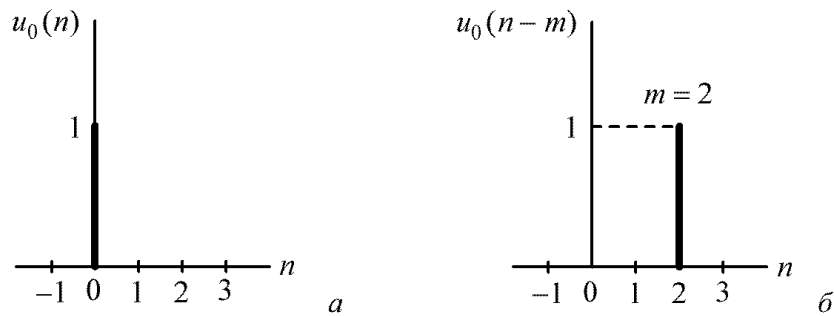


Рис. 7. Цифровий одиничний (а) і затриманий цифровий одиничний (б) імпульси

2. Цифровий одиничний стрибок (рис. 8, а).

$$u_1(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0; \\ 0, & n < 0. \end{cases} \quad (1.4)$$

Затриманий цифровий одиничний стрибок (рис. 1.5, б)

$$u_1(n - m) = \begin{cases} 1, & n \geq m; \\ 0, & n < m. \end{cases} \quad (1.5)$$

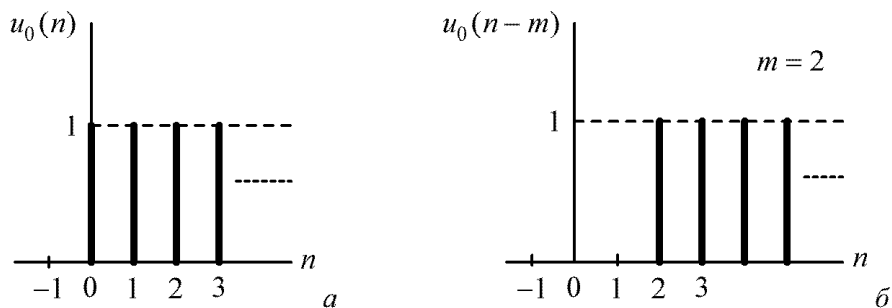


Рис. 8. Цифровий одиничний (а) і затриманий цифровий одиничний (б) стрибки

Дискретна експонента,

$$x(n) = \begin{cases} a^n, & n \geq 0; \\ 0, & n < 0, \end{cases} \quad (1.6)$$

де a – дійсна константа. В залежності від величини та знаку a дискретна експонента буде:

$|a| < 1$ і $a > 0$ – спадаюча знакопостійна (рис. 9, а);

$|a| < 1$ і $a < 0$ – спадаюча знакозмінна (рис. 9, б);

$|a| > 1$ – зростаюча;

$|a| = 1$ і $a > 0$ – цифровим одиничним стрибком;

$|a| = 1$ і $a < 0$ – знакозмінна послідовність одиниць.

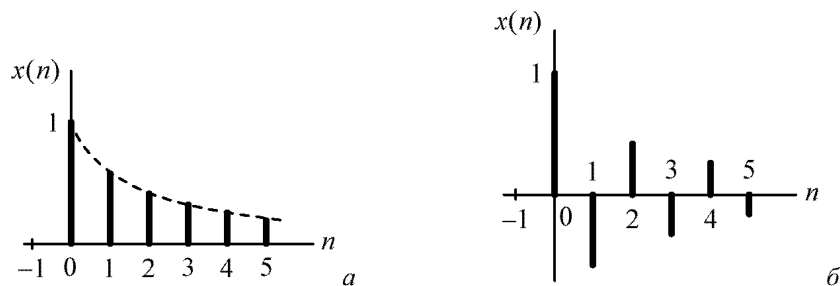


Рис. 9. Знакопостійна (а) і знакозмінна (б) дискретні експоненти

Дискретний гармонічний сигнал, наприклад, дискретна косинусоїда,

$$x(nT) = A \cos(2\pi f n T) = A \cos(\omega n T), \quad (1.7)$$

де T – період дискретизації; A – амплітуда; ω – кругова частота,

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.8)$$

Дискретна косинусоїда отримується із аналогової

$$x(t) = A \cos(2\pi f t) = A \cos(\omega t)$$

в результаті заміни неперервного часу дискретним (рис. 10)

$$x(nT) = x(n) = A \cos(\omega t) \Big|_{t=nT} = A \cos(\omega T n).$$

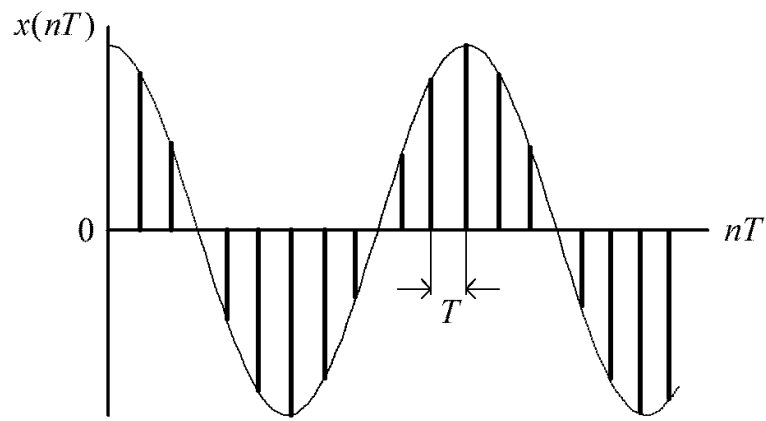


Рис. 10. Дискретна косинусоїда

Дискретний комплексний гармонічний сигнал, що описується комплексною послідовністю

$$x(n) = Ae^{j\omega Tn}$$

або двома дійсними послідовностями: косинусоїдою (дійсна частина) и синусоїдою (уявна частина)

$$x(nT) = A\cos(\omega Tn) + jA\sin(\omega Tn).$$