

## Лекція 11. АНАЛОГО-ЦИФРОВІ (АЦП) І ЦИФРО-АНАЛОГОВІ (ЦАП)

### ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

#### 11.1 Аналого-цифрові перетворювачі.

#### 11.2 Цифро-аналогові перетворювачі.

Для узгодження цифрових пристроїв вимірювання і керування, що працюють з інформацією, представленою у двійковому коді, з давачами і виконавчими пристроями, що мають аналогові відповідно вихідні та вхідні сигнали, застосовують аналого-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі.

#### 11.1 Аналого-цифрові перетворювачі

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) є пристроями, що приймають вхідні аналогові сигнали та генерують відповідні їм цифрові сигнали, що придатні для обробки мікропроцесорами та іншими цифровими пристроями. Процедура аналого-цифрового перетворення безперервних сигналів у цифрову форму – є перетворення безперервної функції часу  $U(t)$ , що описує вхідний сигнал у послідовність чисел  $\{U'(t_j)\}$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots$ , що віднесені до деяких фіксованих моментів часу. Цю процедуру можна розділити на дві самостійні операції. Перша з них називається дискретизацією і є перетворенням безперервної функції часу у безперервну послідовність  $\{U(t_j)\}$ . Друга називається квантуванням і є перетворенням безперервної послідовності у дискретну  $\{U'(t_j)\}$ .

Найбільш поширеною формою дискретизації є рівномірна, у основі якої знаходиться теорема відліків. Згідно з цією теоремою у якості коефіцієнтів  $a_j$  потрібно використовувати миттєві значення сигналу  $U(t_j)$  у дискретні моменти часу  $t_j = j\Delta t$ , а період дискретизації вибрати з умови

$$\Delta t = 1/2F_m, \quad (11.1)$$

де  $F_m$  – максимальна частота спектру перетворюваного сигналу.

Спектри ж реальних сигналів прямують до нуля лише асимптотично. Застосування рівномірної дискретизації до таких сигналів призводить до виникнення у системах обробки інформації специфічних високочастотних спотворень. Для уникнення таких спотворень потрібно або підвищувати частоту дискретизації, або використовувати перед АЦП фільтр нижніх частот, що звужує спектр початкового сигналу перед його аналого-цифровим перетворенням.

Основними параметрами АЦП є: роздільна здатність; точність; швидкодія.

На рис.11.1 наведена класифікація АЦП за схемою реалізації.

В основу класифікації покладена ознака що вказує на те, як у часі розгортається процес перетворення аналогової величини у цифрову. Операції квантування та кодування можуть здійснюватись за допомогою або послідовної, або паралельної, або послідовно-паралельної процедур наближення цифрового еквівалента до перетворюваної величини. Так в АЦП паралельного типу квантування сигналів одночасно за допомогою набору компараторів, що включені паралельно джерелу вхідного сигналу.



Рис. 11.1 – Класифікація АЦП

В багатоступеневому АЦП процес перетворення вхідного сигналу розділений у просторі. На рис.11.2 наведена схема двохступеневого 8-розрядного АЦП.

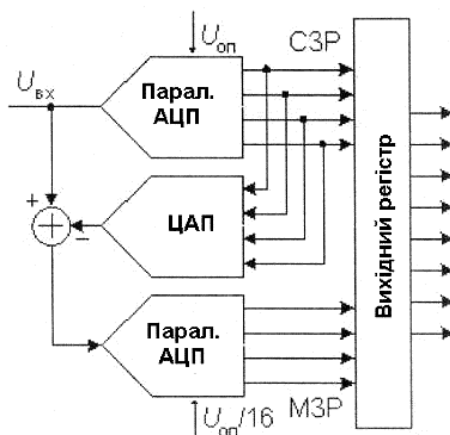


Рис.11.2 - Двохступеневий 8-розрядний АЦП

Верхній по схемі АЦП здійснює грубе перетворення сигналу у чотири старших розряди вихідного коду. Цифрові сигнали з виходу АЦП поступають на вихідний регістр та одночасно на вхід 4-розрядного швидкодіючого цифро аналогового перетворювача (ЦАП). Різниця від віднімання вихідної напруги ЦАП із вхідної напруги схеми поступає на другий АЦП (нижній по схемі). У цього АЦП опорна напруга у 16 разів менша за опорну напругу першого АЦП. Тому квант другого АЦП у 16 разів менший кванта першого АЦП. Цей залишок, що перетворений у другому АЦП у цифрову форму є чотирма молодшими розрядами. Різниця між двома АЦП в тому, що точність першого АЦП повинна бути такою, як у 8-розрядного АЦП.

Оскільки перетворення у цифрову форму здійснюється за два такти, то доцільно на вході використовувати пристрій вибірки та збереження, щоб значення вхідної напруги за час двох тактів не змінювалось.

Швидкодію багатоступеневого АЦП можна підвищити за допомогою конвеєрного принципу багатоступеневої обробки. У звичайному багатоступеневому АЦП спочатку формуються старші

розряди вихідного слова першим АЦП, потім іде встановлення вихідного сигналу ЦАП. На цьому інтервалі другий АЦП простоює. Тому треба ввести елементи затримки між першою та другою ступенями і одержимо конвеєрний АЦП, схема якого показана на рис.11.3.

Роль аналогового елемента затримки виконує пристрій вибірки та збереження ПВ32, а цифрового – чотири D-тригери. Ці тригери затримують передачу старшого полу байту у вихідний регістр на один період тактового сигналу.

Сигнали вибірки, що формуються з тактового сигналу, поступають на ПВ31 та ПВ32 у різні моменти часу (рис.11.4).

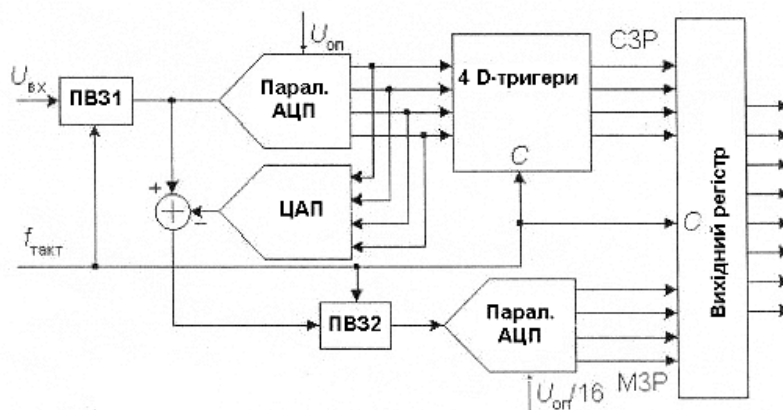


Рис.11.3. Конвеєрний АЦП

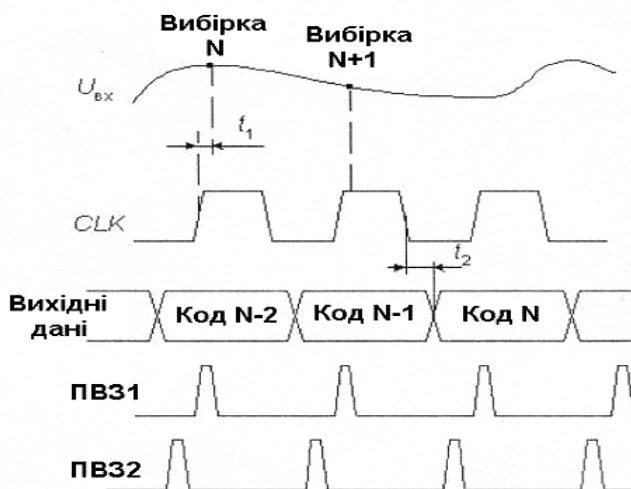


Рис.11.4. Діаграма вибірок конвеєрного АЦП

ПВ32 переходить у режим збереження пізніше, ніж ПВ31 на час, що дорівнює сумарній затримці розповсюдження сигналу по АЦП1 та ЦАП. Задній фронт тактового сигналу керує записом кодів в D - тригери та вихідний регістр. Повна обробка вхідного сигналу займає біля двох періодів тактових імпульсів CLK, але частота появлення нових значень вихідного коду дорівнює частоті тактового сигналу. Таким чином, конвеєрна архітектура дозволяє суттєво (в декілька разів) збільшити максимальну частоту вибірок багатоступеневого АЦП. Те, що при цьому зберігається сумарна затримка проходження сигналу, що відповідає звичайному багатоступеневому АЦП з такою ж кількістю ступенів, не має суттєвого значення, так як час наступної цифрової обробки цих сигналів

все одно набагато більше цієї затримки. За рахунок цього можна без програшу у швидкодії збільшити кількість ступенів АЦП, зменшивши розрядність кожної ступені. В свою чергу, збільшення числа ступенів перетворення зменшує складність АЦП. Дійсно, наприклад, для побудови 12-розрядного АЦП з чотирьох 3-розрядних потрібно 28 компараторів, тоді як його реалізація з двох 6-розрядних потребує 126 компараторів.

Конвеєрну структуру має багато АЦП, що виготовляються зараз. Так двохступеневий 10-розрядний AD9040 виконує до 40 мільйонів перетворень за секунду, 12-розрядний AD9220 виконує до 10 мільйонів перетворень за секунду. При роботі з конвеєрним АЦП треба знати, що багато з них не допускають низьких частот вибірок, бо внутрішні ПВЗ мають велику швидкість розряду конденсаторів.

## 11.2 Цифро-аналогові перетворювачі

Цифро-аналоговими перетворювачами називають пристрої, що виконують зворотну функцію, тобто перетворюють вхідні цифрові сигнали у вихідні аналогові.

Схемотехніка цифро-аналогових перетворювачів дуже різноманітна. На рис. 11.5 наведена класифікаційна схема ЦАП за схемотехнічними ознаками. Крім цього, ІМС цифро-аналогових перетворювачів класифікуються за наступними ознаками:

- за видом вихідного сигналу: з стумовим виходом та виходом у виді напруги
- за типом цифрового інтерфейсу: з послідовним уведенням та з паралельним уведенням вхідного коду
- за кількістю ЦАП на кристалі: одноканальні та багатоканальні
- за швидкодією: помірної та високої швидкодії.

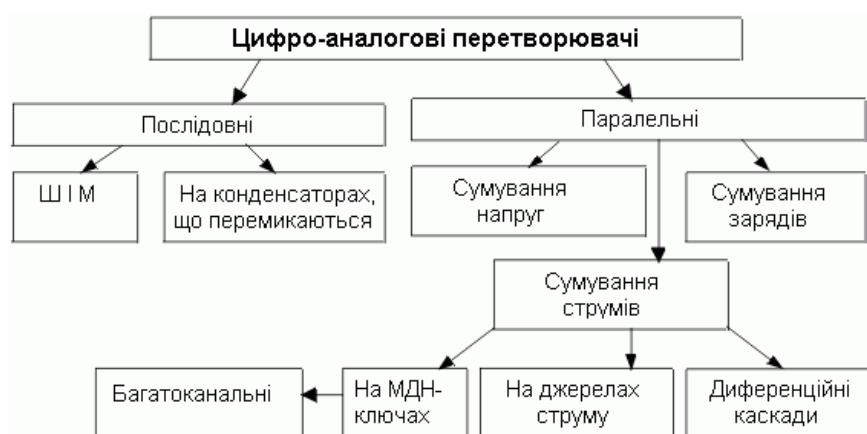


Рис. 11.5. Класифікація ЦАП

ІМС ЦАП як правило являють собою резистивні матриці, елементи яких мають співвідношення опорів дільника напруги  $R-2R-4R-8R-16R$  і т.д. (застосовують рідко, бо технологічно важко виконувати точні значення великих опорів, що відповідають старшим розрядам) або співвідношення опорів дільника струмів  $R-2R$ . Також до ІМС зазвичай входять транзисторні (частіше на польових МОН-транзисторах) ключі, що забезпечують вмикання потрібної комбінації резисторів за сигналами двійкового коду.

Матриця  $R-2R$  підмикається до операційного підсилювача (ОП), утворюючи з ним інвертуючий підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення. Вхідним сигналом підсилювача є опорна напруга, що визначає величину напруги, яка відповідає молодшому двійковому розряду.

У результаті кожному значенню двійкового коду на входах керування ЦАП відповідає деяке значення напруги на виході ОП:

$$U_{вих} = \frac{U_{мак}}{N_{мак}} N_{вх} \quad (11.2)$$

де  $U_{вих}$  - значення вихідної напруги, що відповідає цифровому коду  $N_{вх}$ , що подається на входи ЦАП;

$U_{мак}$  - максимальна вихідна напруга, відповідне подачі на входи максимального коду  $N_{мак}$ .

Розглянемо побудову простого ЦАП з виваженим сумуванням струмів.

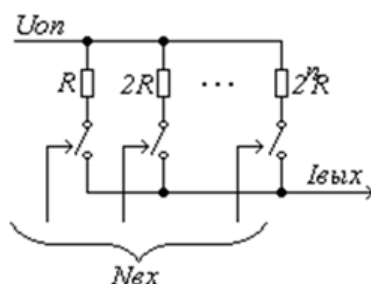


Рис. 11.6 - Схема ЦАП з виваженим сумуванням струмів.

Цей ЦАП складається з набору резисторів і набору ключів. Число ключів і число резисторів дорівнює кількості розрядів  $n$  вхідного коду. Номінали резисторів вибираються у відповідності з двійковим законом. Якщо  $R=3$  Ом, то  $2R=6$  Ом,  $4R=12$  Ом, і так далі, тобто кожний наступний резистор більше попереднього в 2 рази. При приєднанні джерела напруги і замиканні ключів, через кожен резистор потече струм. Значення струмів по резистори, завдяки відповідному вибору їх номіналів, теж будуть розподілені по двійковому закону. При подачі вхідного коду  $N_{вх}$  включення ключів проводиться у відповідності зі значенням відповідних їм розрядів вхідного коду. Ключ замикається, якщо відповідний йому розряд дорівнює одиниці. При цьому сайті підсумовуються струми, пропорційні ваг цих розрядів і величина впливає з сайту струму в цілому буде пропорційна значенню вхідного коду  $N_{вх}$ .

Опір резисторів матриці вибирають досить велика (десятки кОм). Тому для більшості практичних випадків для навантаження ЦАП відіграє роль джерела струму. Якщо на виході перетворювача необхідно отримати напруга, то на виході такого ЦАП встановлюється перетворювач "струм-напруга", наприклад, на операційному підсилювачі, рис.11.7.

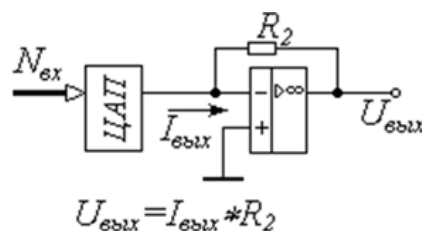


Рис. 11.7 – Структурна схема ЦАП на операційному підсилювачі

АЦП може бути побудований на основі ЦАП, лічильника імпульсів і компаратора. Спрощена структурна схема такого АЦП наведена на рис. 11.8.

Цикл перетворення аналогового сигналу, представленого у вигляді напруги  $U_{вх}$  у двійковий код складається із таких операцій.

Напруга  $U_{вх}$  подається на вхід пристрою – один із входів компаратора  $K$ . Сигнал з виходу компаратора дозволяє роботу генератора імпульсів  $ГІ$ .

Сигнал *Пуск* встановлює нульовий стан і дозволяє роботу лічильника імпульсів  $ЛІ$ , що починає заповнюватися імпульсами  $ГІ$ .

Код з виходу  $ЛІ$  подається на цифрові входи ЦАП (входи керування ключами). У результаті з виходу ЦАП ступінчасто зростаюча напруга надходить на другий вхід компаратора. Після досягнення цієї напругою значення  $U_{вх}$  компаратор забороняє роботу генератора, а на виході  $ЛІ$  маємо код, що відповідає величині  $U_{вх}$ .

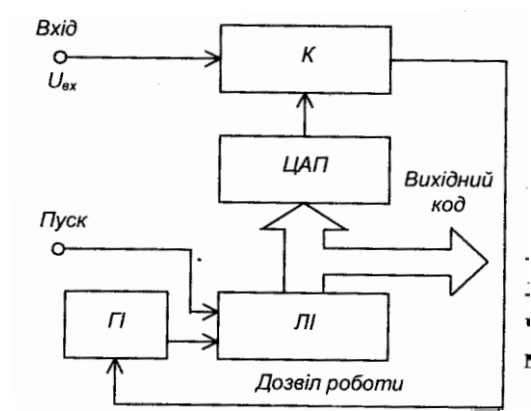


Рис. 11.8 – Структурна схема АЦП

Слід зазначити, що елементарним пристроєм перетворення аналогової величини у дискретну є компаратор, що фіксує факт перевищення однієї напруги іншою і може мати на виході сигнали, що відповідають 0 або 1.