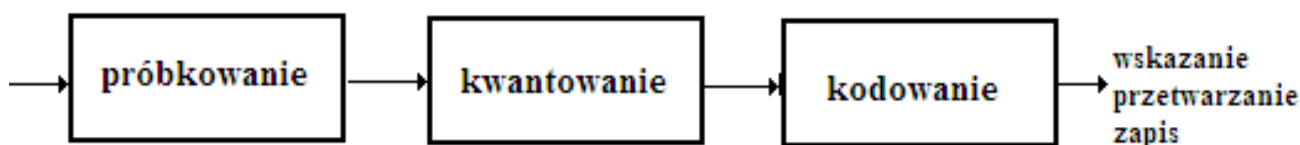


Przetworniki analogowe / cyfrowe (A/C)

Większość urządzeń pomiarowych (lub rejestratorów sygnałów w systemach pomiarowych) odbiera sygnały zmieniające się w sposób **ciągły** (nazywane sygnałami **analogowymi**). Aby te informacje mogły być wykorzystane przez system komputerowy muszą być przetworzone w **kodowane sygnały cyfrowe**. Rolę tę spełniają przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C), umieszczone na styku części analogowej i cyfrowej systemu.

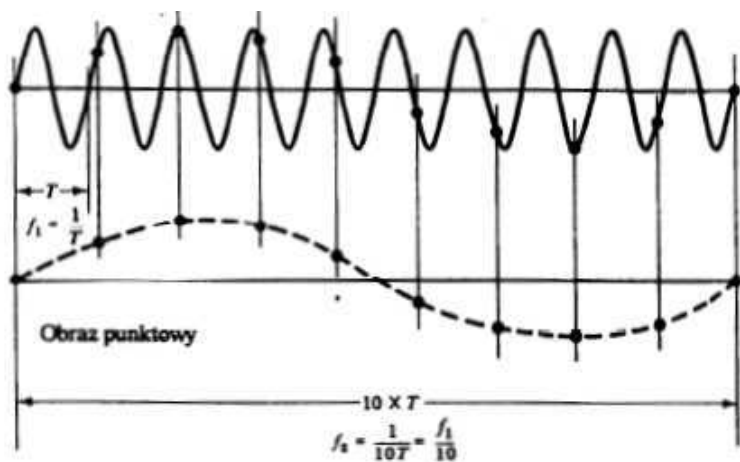
Przetwarzanie sygnału analogowego na sygnał cyfrowy polega na **dyskretyzacji sygnału w czasie** (czyli jego **próbkowaniu**) oraz **dyskretyzacji wartości** sygnału (czyli **kwantowaniu**), a także na **kodowaniu** uzyskanego sygnału dyskretnego.

Przetwornik analogowo/cyfrowy - układ elektroniczny, który zamienia wartości wielkości analogowej (ciągłej) na wartość cyfrową (dyskretną - kwantowaną), w określonych momentach czasu (próbkowaną - dyskretną w czasie).



Próbkowanie

Próbkowanie następuje przez kolejne pobieranie próbek wartości sygnału w pewnych odstępach czasu, w taki sposób, aby ciąg próbek umożliwiał jak najwierniejsze odtworzenie całego przebiegu funkcji. Częstotliwość próbkowania jest odwrotnością różnicy czasu pomiędzy dwiema kolejnymi próbkami. Zwykle nie jest możliwe odtworzenie dokładnie takiego samego sygnału na podstawie wartości



liczbowych, ponieważ dokładność jest ograniczona przez błąd kwantowania. Jednak wiarygodne odwzorowanie sygnału jest możliwe do osiągnięcia, gdy częstotliwość próbkowania jest większa niż podwojona, najwyższa składowa częstotliwość sygnału (twierdzenie Nyquista-Shannona).

Kwantowanie

Kwantowanie przebiegu analogowego polega na przyporządkowaniu każdej próbie skończonej liczby poziomów amplitudy, odpowiadającym dyskretnym wartościom od zera do pełnego zakresu.

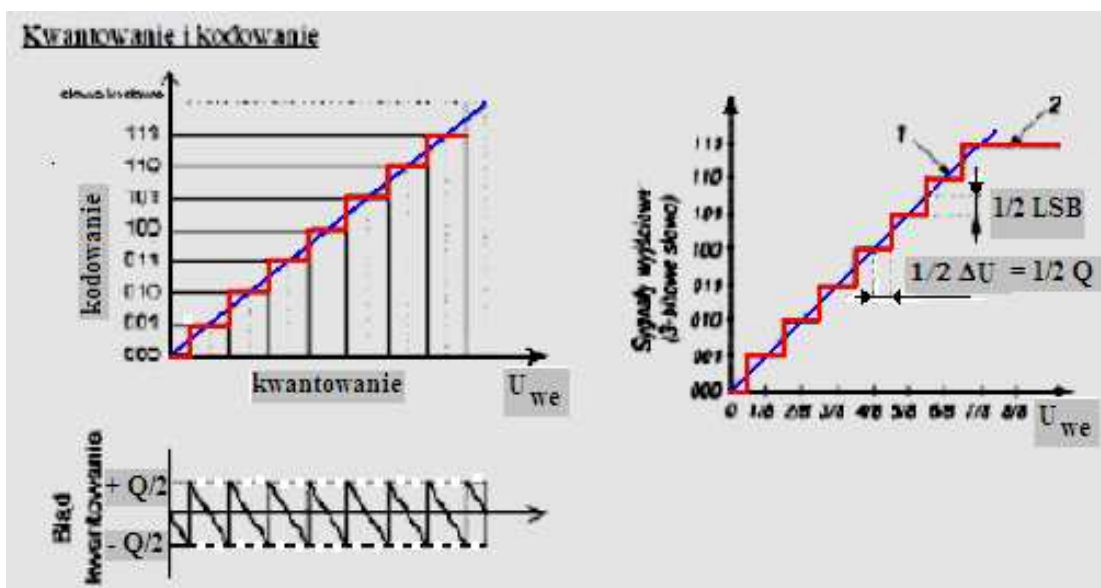
Parametry przetwornika A/C:

- n - rozdzielczość przetwornika (liczba bitów, liczba rozróżnianych stanów, długość słowa kodowego,)
- U_{FS} - zakres przetwornika unipolarnego (wartość maksymalna U_{max})
- Q - krok kwantowania (rozdzielczość napięciowa, czułość ΔU)

$$Q = \frac{U_{FS}}{2^n}$$

- δ to błąd kwantowania (wartość szczytowa szumu kwantowania, wartość średnia wynosi 0)

$$\delta = \pm \frac{Q}{2}$$



Proces kwantowania i kodowania w 3-bitowym przetworniku A/C

$$WY = Q \cdot Ei (U_{WE} / Q + 1/2)$$

Metody konwersji wartości napięcia na postać cyfrową – przetworniki A/C

Podział ogólny:

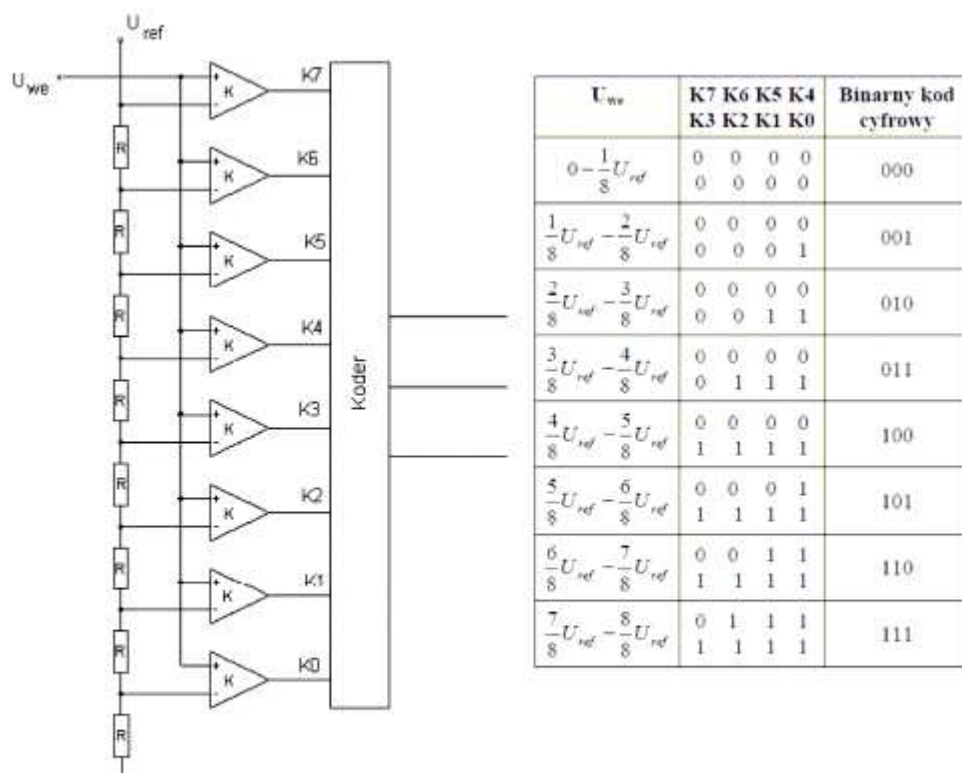
- metoda konwersji bezpośredniej (równoległa)
- metody całkowite (pośrednie)
- metody kolejnych przybliżeń (kompensacyjne)

Podział przetworników ze względu na (niektóre) sposoby realizacji:

- przetworniki z liniowo narastającym napięciem wzorcowym,
- przetworniki kompensacyjne
- przetworniki napięcia na częstotliwość,
- przetworniki z dwukrotnym całkowaniem.

Metoda konwersji bezpośredniej:

Przetwornik o przetwarzaniu bezpośrednim (nazywany także **Flash**) działa na zasadzie bezpośredniego i zazwyczaj jednoczesnego porównania wartości napięcia wejściowego z szeregiem napięć odniesienia reprezentujących poszczególne poziomy kwantowania za pomocą szeregu komparatorów analogowych. Rezultat tego porównania wprowadzany jest na specjalny enkoder który wyprowadza wartość cyfrową sygnału wejściowego w stosownej formie binarnej. Podstawową zaletą takich przetworników jest szybkość działania (czas przetworzenia), na którą składają się wyłącznie dwa czynniki: opóźnienie na komparatorze analogowym oraz opóźnienie na enkoderze cyfrowym. Uzyskiwane szybkości przetwarzania są nawet od kilku razy do kilku rzędów wielkości większe od pozostałych typów przetworników A/C. Niestety ogromna szybkość okupiona jest relatywnie małą rozdzielczością oraz dokładnością. Zwiększenie rozdzielczości o kolejny bit wymaga podwojenia ilości elementów i zwiększenia precyzyjności napięć odniesienia uzyskiwanych zazwyczaj z dzielnika rezystorowego wysokostabilnego napięcia odniesienia. Dodatkowo zwiększanie ilości komparatorów, czyli poziomów kwantowania lub inaczej rozdzielczości bitowej przetwornika, powoduje zwiększenie jego pojemności wejściowej a co za tym idzie ograniczenia pasma wejściowego sygnału co niekorzystnie wpływa na jego parametry funkcjonalne. Przetworniki tego typu stosowane są wszędzie tam gdzie wymagana jest bardzo duża częstotliwość próbkowania i jednocześnie nie jest wymagana bardzo duża dokładność przetwarzania (najczęściej nie większa niż 8- lub 9-bitowa).



**Idea przetwornika konwersji bezpośredniej (przetwarzanie równoległe).
Konwersja analogowo - cyfrowa w przetworniku trzybitowym**

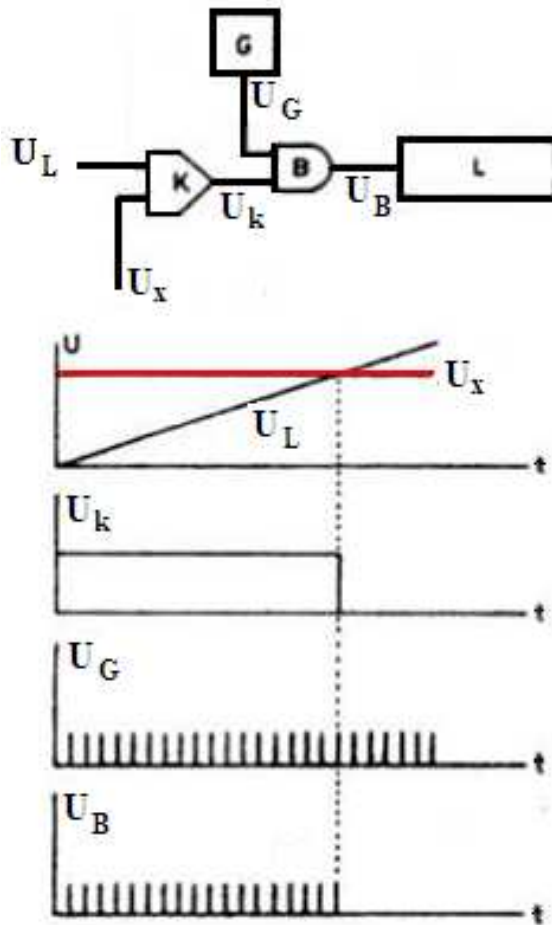
W N – bitowym przetworniku równoległym przetwarzane napięcie U_{we} porównywane jest jednocześnie za pomocą $2^N - 1$ komparatorów z częściami napięcia odniesienia U_{ref} wytworzonymi przy pomocy drabinki oporowej. Sygnały z komparatorów przetwarzane są w konwerterze kodu na sygnał cyfrowy. Przetworniki równoległe (bezpośrednie) są najszybsze z wszystkich przetworników A/C, wymagają jednak rozbudowanego układu.

W skrócie:

- klasyfikacja napięcia wejściowego do jednego z 2^N przedziałów napięć
- każdemu przedziałowi przypisane jest słowo kodowe
- realizacja techniczna bardzo trudna – wymaga dużej liczby dokładnych komparatorów napięcia
- przetwarzanie równoległe (równoczesne porównanie sygnału wejściowego z odpowiednimi częściami napięcia odniesienia)
- stosowana w przetwornikach o małej rozdzielczości
- krótki czas konwersji – kilkadziesiąt nanosekund
- częstotliwość przetwarzania większa od 5 MHz.

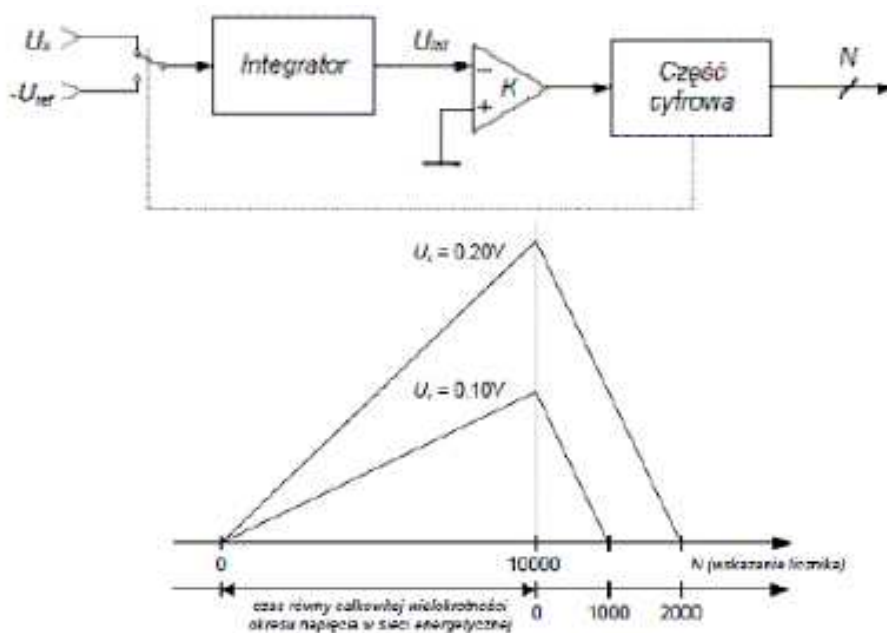
Metody całkowe

Przetwarzanie napięcie/czas (pojedyncze całkowanie) - przetworniki z liniowo narastającym napięciem wzorcowym.



Przetworniki z podwójnym całkowaniem

Napięcie wejściowe jest najpierw przetwarzane na odcinek czasu lub częstotliwość, a następnie, za pomocą licznika, na postać cyfrową. Na rysunku pokazano schemat blokowy przetwornika integracyjnego realizującego prostą metodę podwójnego całkowania. Zbudowany jest z integratora, komparatora, źródła napięcia referencyjnego oraz części cyfrowej (bramki, licznika, zegara i układu sterującego pracą przetwornika). Metoda podwójnego całkowania jest jednym z najdokładniejszych sposobów na przetwarzanie sygnału analogowego na cyfrowy. Przetworniki A/C z podwójnym całkowaniem są stosowane w większości multimetrów cyfrowych.



Przebieg napięcia na wyjściu integratora w przetworniku A/C z podwójnym całkowaniem.

Rysunek przedstawia charakterystyczny przebieg napięcia na wyjściu integratora. Przetwornik podwójnie całkujący zamienia wartość średnią napięcia mierzonego na czas T_x . W pierwszym cyklu całkowania do integratora doprowadzone jest napięcie mierzone U_x . Skutkiem tego jest liniowe narastanie napięcia na wyjściu integratora, które trwa przez ściśle określony czas T_1 , wyznaczany przez licznik, najczęściej 20 ms. W drugiej fazie całkowania do wejścia integratora dołączone jest napięcie wzorcowe o biegunowości przeciwnej do napięcia U_x . Licznik cały czas zlicza impulsy z generatora zegarowego. Kiedy napięcie wejściowe z integratora osiągnie wartość zero, układ sterujący blokuje bramkę i kończy się zliczanie impulsów, które trwało czas T_2 . Stosunek T_1 czasu całkowania napięcia U_x do czasu T_2 całkowania napięcia U_{ref} odpowiada stosunkowi napięć U_{ref}/U_x .

W skrócie:

- krok 1. – przetworzenie napięcia wejściowego na wartość pośrednią (czas lub częstotliwość)
- krok 2. – pomiar wartości pośredniej za pomocą dokładnych metod cyfrowych (na zasadzie zliczania impulsów)
- wynik zliczania reprezentuje słowo kodowe odpowiadające napięciu wejściowemu
- **długi czas konwersji – od kilku do kilkudziesięciu milisekund**
- **bardzo duża dokładność.**

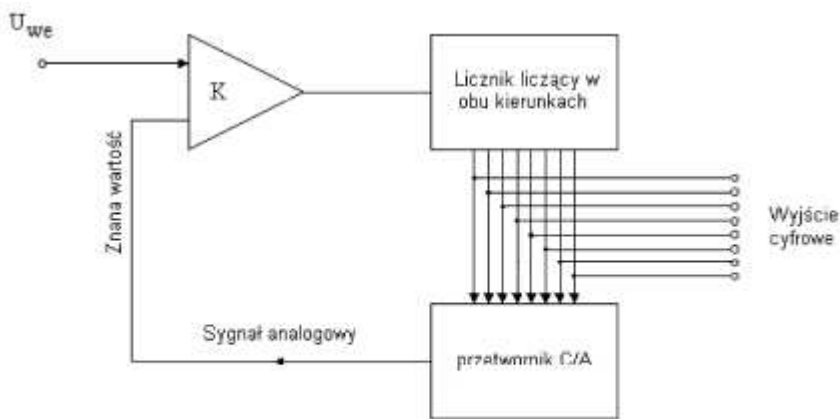
Tłumienie zakłóceń okresowych nałożonych na mierzone napięcie

Multimetry zbudowane przy wykorzystaniu przetworników całkujących mają naturalne właściwości tłumienia zakłóceń periodycznych, pod warunkiem odpowiedniego dobrania czasu całkowania. Każdy nałożony na mierzone napięcie sygnał zakłócający jest uśredniany w czasie pierwszego całkowania, co umożliwia tłumienie zakłóceń periodycznych, na przykład o częstotliwości sieci energetycznej. W tym celu konieczne jest dopasowanie czasu pierwszego całkowania do okresu zakłóceń lub jego wielokrotności. Od dokładności tego dopasowania zależy skuteczność tłumienia zakłóceń.

Przetworniki kompensacyjne (metoda kolejnych przybliżeń):

W przetwornikach kompensacyjnych napięcie przetwarzane U_{we} porównywane jest w komparatorze K kolejno z szeregiem napięć wzorcowych, z których każde następne jest 2 razy mniejsze od poprzedniego. Jeżeli napięcie przetwarzane jest większe od wzorcowego, napięcie wzorcowe jest od niego odejmowane i generowany jest stan 1, jeżeli jest mniejsze – generowany jest 0. Z kolei porównanie następuje z napięciem wzorcowym dwukrotnie mniejszym i generowany jest następny bit. Ilość porównań równa jest ilości bitów przetwornika. Ze względu na iteracyjny charakter pracy przetwornika jego częstotliwość próbkowania jest znacząco mniejsza od uzyskiwanej w przetwornikach o przetwarzaniu bezpośrednim i w znacznym stopniu zależy od wielkości słowa danych – rozdzielczości przetwornika, szybkości pracy przetwornika C/A i w końcu komparatora i układu sterującego. Ta metoda przetwarzania A/C wykorzystywana jest we współczesnej telekomunikacji.

Rysunek prezentuje 8-bitowy przetwornik kompensacyjny A/C. Metoda kolejnych przybliżeń stosowana jest w przyrządach wymagających dużej dokładności przetwarzania. Podstawowa trudność w ich budowie to generacja odpowiednio dokładnych napięć wzorcowych.



Przetwornik kompensacyjny.

- porównanie napięcia przetwarzanego z N różnymi napięciami wzorcowymi (spośród 2^N możliwych)
- wybór kolejnego napięcia wzorcowego zależy od wyniku porównania w poprzednim kroku
- pełny cykl przetwarzania obejmuje N porównań (dla przetwornika N -bitowego)
- **czas konwersji – od kilku do kilkudziesięciu mikrosekund**

Podstawowe parametry metrologiczne

Rozdzielczość (resolution)

Jest to zdolność rozróżniania przez przyrząd (przetwornik A/C) pewnej **liczby stanów**.

Dla multimetrów cyfrowych

jest to pełna liczba cyfr odpowiadająca liczbie pozycji dziesiętnych, na których multimetr wyświetla pełen zestaw cyfr od "0" do "9".

np. 1 cyfra - 10 stanów
2 cyfry - 100 stanów

3 cyfry - 1000 stanów

Większość multimetrów dopuszcza przekroczenie zakresu i dodanie do wyniku "1/2" cyfry (0 lub 1). Są też przyrządy wskazujące na najbardziej znaczącej pozycji dziesiętnej „3/4 cyfry” (0, 1, 2 lub 3). Stąd:

3 1/2 cyfry - 2000 stanów (na ogół)
3 3/4 cyfry - 4000 stanów

W przypadku przyrządów **bipolarnych** (mierzących zarówno wartości dodatnie jak i ujemne) liczba rozróżnianych stanów ulega **podwojeniu**.

Przykłady wskazań przyrządu bipolarnego o rozdzielczości 3 1/2 cyfry:

+ 12.34 mV
- 17.78 mV

Skrajne wskazania to: -19.99 mV do +19.99 mV. Zatem liczba rozróżnianych stanów wynosi 3999, a czułość wynosi 0.01 mV.

Dla przetworników A/C

zwykle jest to liczba bitów np.
8 bitów (2^8) odpowiada 256 stanom
10 bitów (2^{10}) 1024
12 bitów (2^{12}) 4098
itd..

Przykład 1

Zakres przetwornika A/C: 0 do 10 V
Rozdzielczość przetwornika: 12 bitów, czyli $2^{12} = 4096$ **stanów** (poziomów kwantowania)

Wtedy **czułość** (rozdzielczość napięciowa) wynosi:

$$(10-0)/4096 = 0,00244 \text{ V} = 2,44 \text{ mV}$$

Przykład 2

Zakres przetwornika A/C: -10 do 10 V
Rozdzielczość przetwornika: 14 bitów, czyli $2^{14} = 16384$

Czułość wynosi:

$$(10-(-10))/16384 = 20/16384 = 0,00122 \text{ wolta} = 1,22 \text{ mV}$$