



Politechnika Wrocławska

Podstawy Techniki Mikroprocesorowej

wykład 10: Przetworniki A/C i C/A
w systemach mikroprocesorowych

Dr inż. Jacek Mazurkiewicz
Katedra Informatyki Technicznej
e-mail: Jacek.Mazurkiewicz@pwr.edu.pl

Przetwornik A/C i C/A

- Przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) i cyfrowo- analogowe (C/A) to układy elektroniczne umożliwiające przesyłanie informacji między systemami analogowymi, a systemami cyfrowymi i na odwrót.
- Sygnał wejściowy przetwornika A/C i sygnał wyjściowy przetwornika C/A mają postać analogową, natomiast odpowiadające im sygnały wejściowe przetwornika C/A i wyjściowy przetwornika A/C mają postać cyfrową.
- Działanie tych układów polega zatem, na przetwarzaniu sygnału analogowego na sygnał cyfrowy bądź odwrotnie.



Przykłady zastosowania przetworników

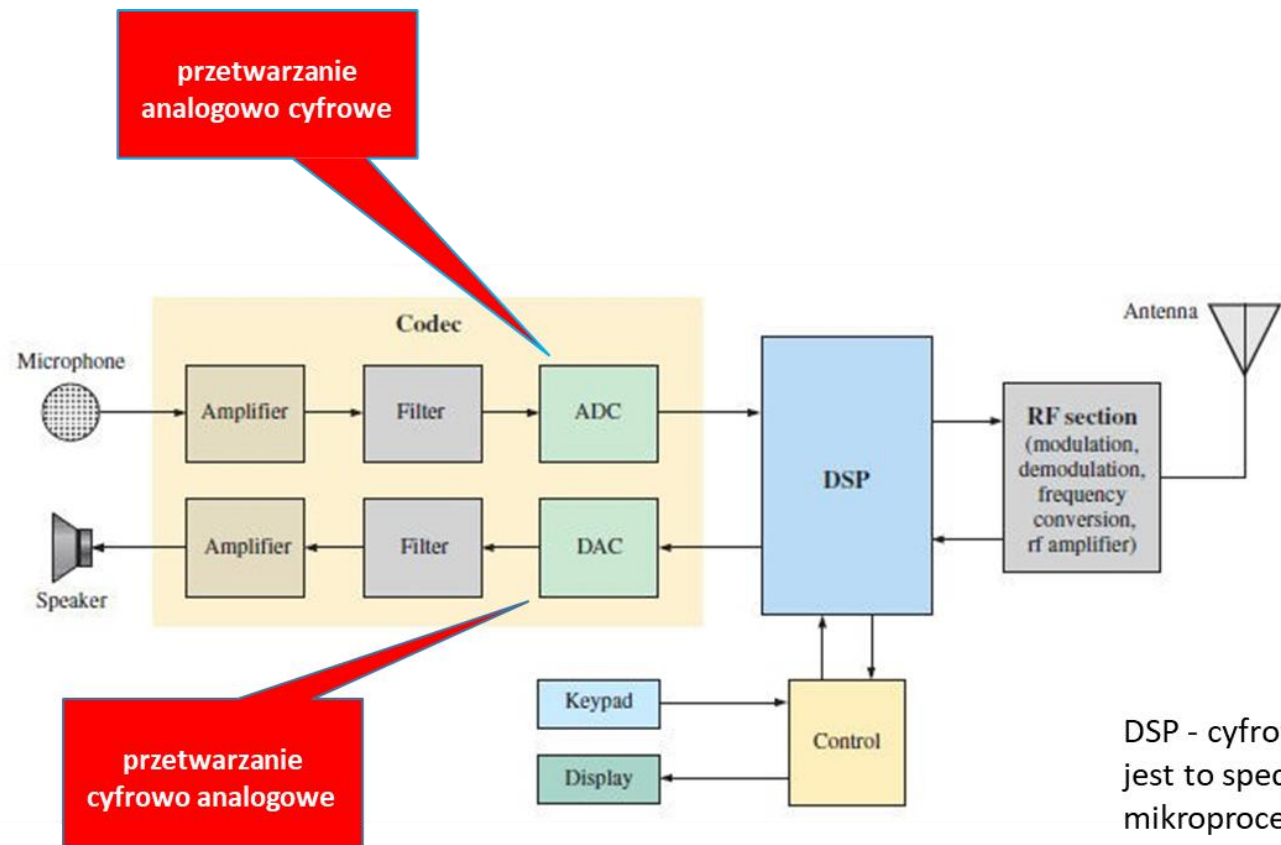
Przetworniki A/C

- Karta dźwiękowa
- Odtwarzacz MP3, MP4
- Monitory LCD z wejściem VGA
- Nagrywarki CD, DVD, Blue-Ray
- Modemy telefoniczne
- Telewizory
- Odbiorniki radiowe z DSP
- Telefon komórkowy
- Sprzęt medyczny
- Sprzęt pomiarowy
- Wagi elektroniczne
- Panele dotykowe
- Sterowniki PLC
- Regulatory temperatury
- Sprzęt AGD

Przetworniki C/A

- Karta dźwiękowa
- Karta graficzna
- Odtwarzacz MP3, MP4
- Odtwarzacz CD, DVD, Blue-Ray
- Telefon komórkowy
- Sprzęt medyczny i pomiarowy
- Sterowniki PLC
- Odbiorniki T-SAT

Przykłady zastosowania przetworników



DSP - cyfrowy procesor sygnałowy jest to specjalny typ mikroprocesora, który przetwarza dane w czasie rzeczywistym.



Przetwarzanie A/C

Przetwarzanie analogowo cyfrowe A/C polega na przekształceniu ciągłego w czasie sygnału analogowego na ciąg dyskretnych wartości liczbowych.

Funkcję tę realizują przetworniki analogowo cyfrowe (przetworniki A/C)

Przetwornik A/C umożliwia przedstawienie napięcia analogowego w postać liczby

$$Z = \frac{U_{in}}{U_{LSB}}$$

Z – liczba

U_{in} – napięcie wejściowe

U_{LSB} – napięcie odpowiadające najmniej znaczącemu bitowi

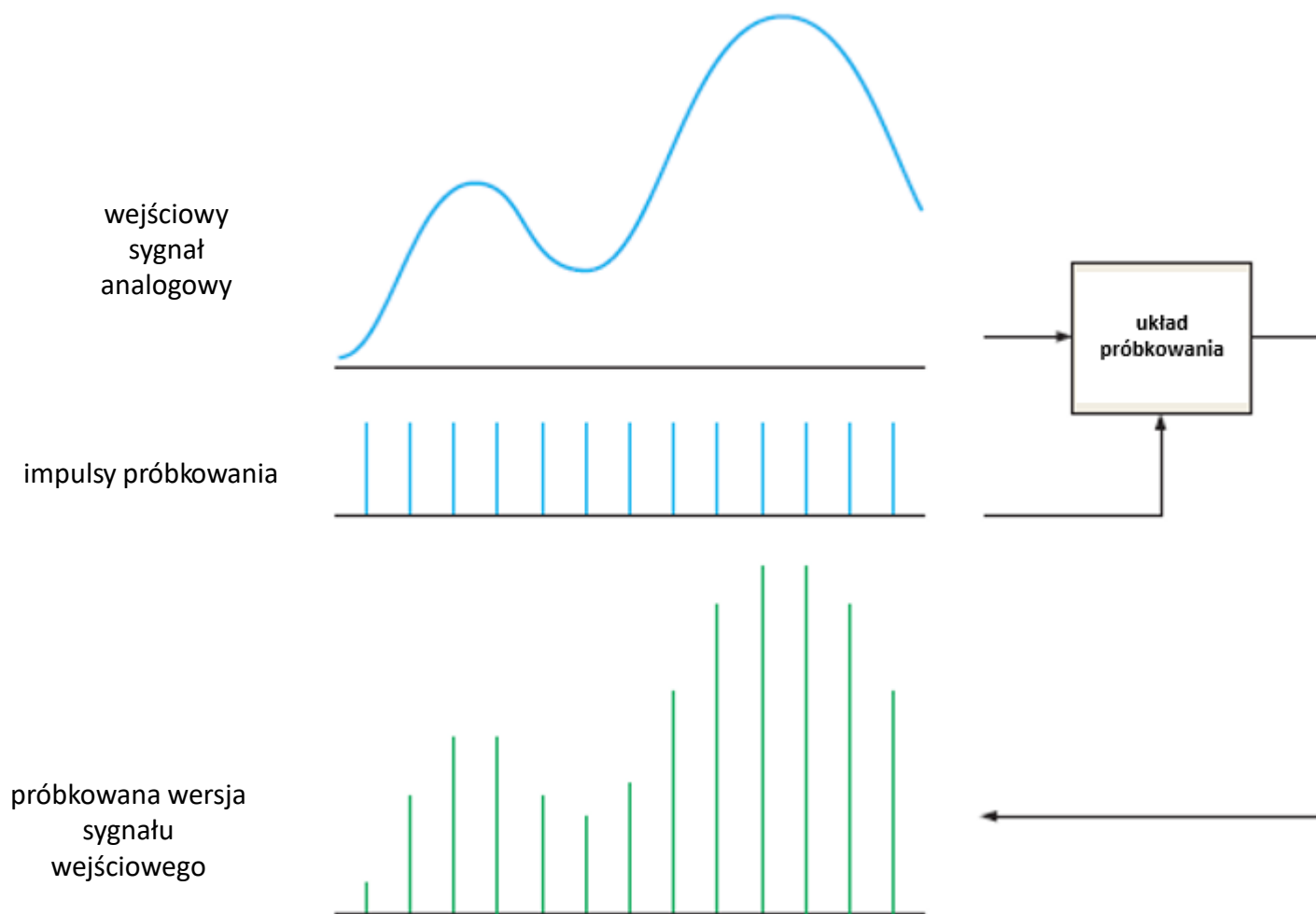
Próbkowanie (1)

Próbkowanie to proces polegający na pobieraniu wystarczającej liczby dyskretnych wartości w pewnych punktach wejściowego przebiegu analogowego, które definiują kształt tego przebiegu.

Im więcej pobranych próbek, tym dokładniej można odwzorować przebieg.

Próbkowanie przekształca sygnał analogowy w serię impulsów, z których każdy reprezentuje amplitudę sygnału w danej chwili.

Próbkowanie (2)





Próbkowanie (3)

W procesie próbkowania istnieją pewne kryteria, które muszą zostać spełnione, aby dokładnie przedstawić oryginalny sygnał.

Wszystkie sygnały analogowe (z wyjątkiem czystej fali sinusoidalnej) zawierają spektrum częstotliwości składowych. Częstotliwości te pojawiają się jako harmoniczne.

Zanim sygnał będzie mógł być próbkowany, musi zostać przepuszczony przez filtr dolnoprzepustowy (filtr antyaliasingowy) w celu wyeliminowania częstotliwości harmonicznych powyżej pewnej wartości określonej przez częstotliwość Nyquista.

Częstotliwość Nyquista – maksymalna częstotliwość składowych widmowych sygnału poddawanego procesowi próbkowania, które mogą zostać odtworzone z ciągu próbek bez zniekształceń.

Częstotliwość Nyquista jest równa
połowie częstotliwości próbkowania

$$f_N = \frac{f_s}{2}$$

f_s - częstotliwość próbkowania (s - *sampling*)

f_N - częstotliwość Nyquista

Praktycznie
częstotliwość
próbkowania spełnia
zależność

$$f_s \geq 2 f_N$$



Próbkowanie (4)

Próbkowanie w cyfrowym sprzęcie audio

Stosowane częstotliwości próbkowania to 32 kHz, 44,1 kHz lub 48 kHz (liczba próbek na sekundę).

Częstotliwość 48 kHz jest najpopularniejsza, ale częstotliwość 44,1 kHz jest używana w przypadku płyt audio CD i nagranych taśm.

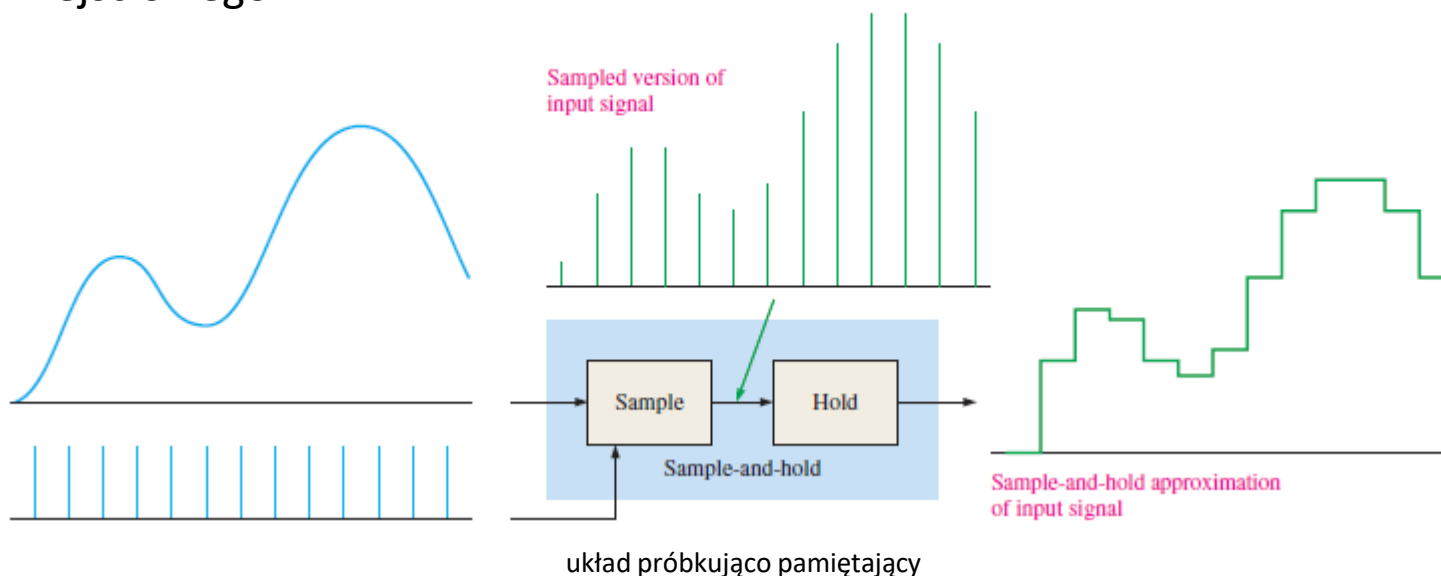
Częstotliwość próbkowania CD 44,1 kHz przetwarza częstotliwości sygnału do około 22 kHz, co przekracza specyfikację 20 kHz, która jest powszechna dla większości urządzeń audio.

Wiele aplikacji nie wymaga szerokiego zakresu częstotliwości, aby uzyskać akceptowalny reprodukowany dźwięk. Na przykład ludzka mowa zawiera częstotliwości w pobliżu 10 kHz, a zatem wymaga częstotliwości próbkowania co najmniej 20 kHz.

Jeśli jednak odtwarzane są tylko częstotliwości do 4 kHz (wymagającej minimalnej częstotliwości próbkowania 8 kHz), głos jest już zrozumiały.

Zapamiętanie

Po przefiltrowaniu i pobraniu próbek sygnał próbki należy utrzymywać na stałym poziomie do momentu pojawienia się następnej próbki. Jest to konieczne, aby przetwornik A/C miał czas na przetworzenie próbkowanej wartości. Ta operacja próbkowania i pamiętania daje w wyniku przebieg „schodkowy”, który jest przybliżeniem przebiegu analogowego sygnału wejściowego.



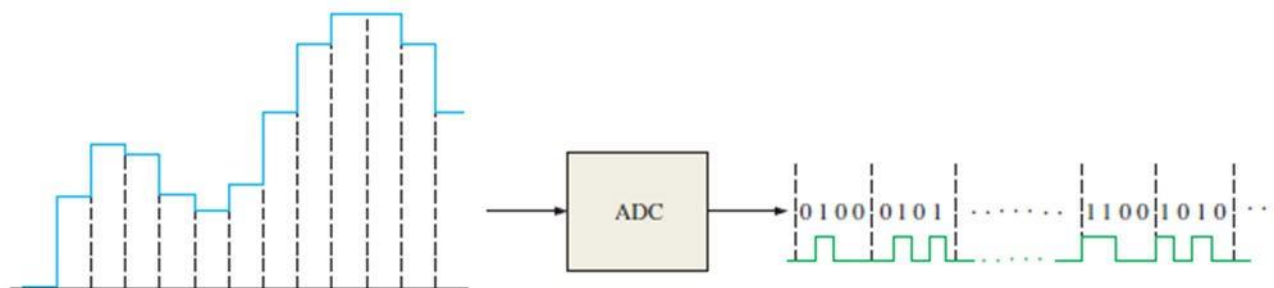
Ilustracja przedstawiająca operację próbkowania i pamiętania

Kwantyzacja (1)

Kwantyzacja jest procesem przyporządkowania zapamiętanym wartościom próbkowanego sygnału analogowego zapisu cyfrowego w wybranym kodzie.

Podczas procesu kwantyzacji konwertuje się każdą próbkowaną wartość sygnału analogowego na kod binarny.

Im więcej bitów jest używanych do reprezentowania wartości próbkowanej, tym dokładniejsza jest reprezentacja.





Kwantyzacja (2)

wykorzystanie czterech poziomów kwantyzacji

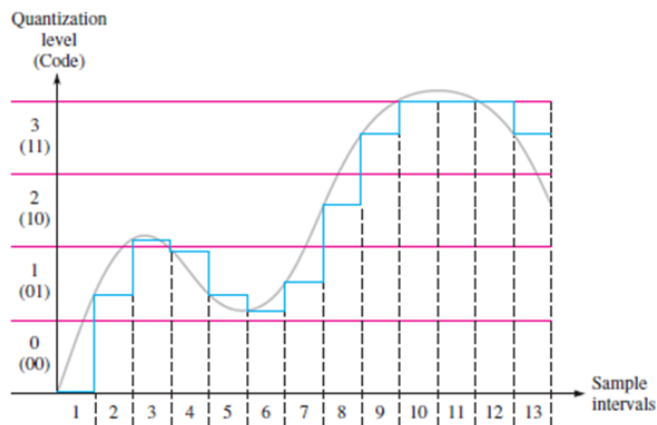


tabela kodowania

| Sample Interval | Quantization Level | Code |
|-----------------|--------------------|------|
| 1 | 0 | 00 |
| 2 | 1 | 01 |
| 3 | 2 | 10 |
| 4 | 1 | 01 |
| 5 | 1 | 01 |
| 6 | 1 | 01 |
| 7 | 1 | 01 |
| 8 | 2 | 10 |
| 9 | 3 | 11 |
| 10 | 3 | 11 |
| 11 | 3 | 11 |
| 12 | 3 | 11 |
| 13 | 3 | 11 |

wykorzystanie szesnastu poziomów kwantyzacji

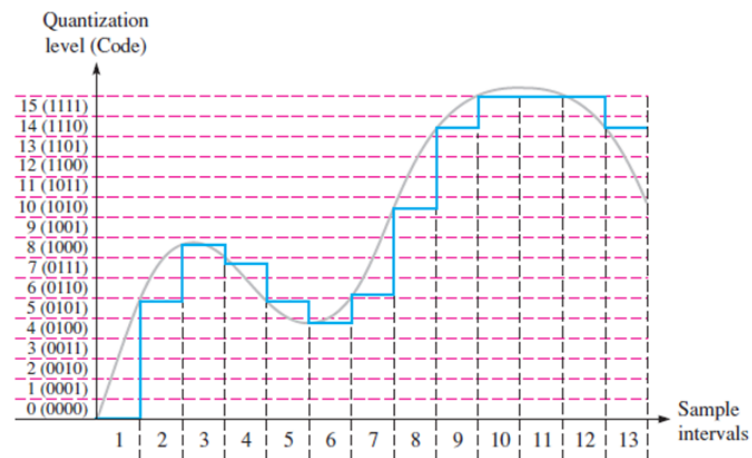


tabela kodowania

| Sample Interval | Quantization Level | Code |
|-----------------|--------------------|------|
| 1 | 0 | 0000 |
| 2 | 5 | 0101 |
| 3 | 8 | 1000 |
| 4 | 7 | 0111 |
| 5 | 5 | 0101 |
| 6 | 4 | 0100 |
| 7 | 6 | 0110 |
| 8 | 10 | 1010 |
| 9 | 14 | 1110 |
| 10 | 15 | 1111 |
| 11 | 15 | 1111 |
| 12 | 15 | 1111 |
| 13 | 14 | 1110 |

[*]

Przetwornik A/C (1)

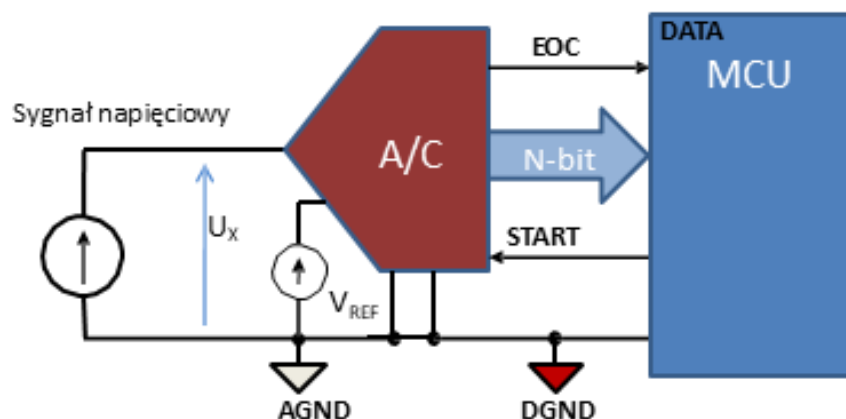
Przetwornik analogowo-cyfrowy służy do zamiany sygnału analogowego w cyfrowy, w celu dalszego przetwarzania, czyli:

- zapisu,
- obróbki sygnału,
- przesyłania na dalszą odległość,
- prezentacji.

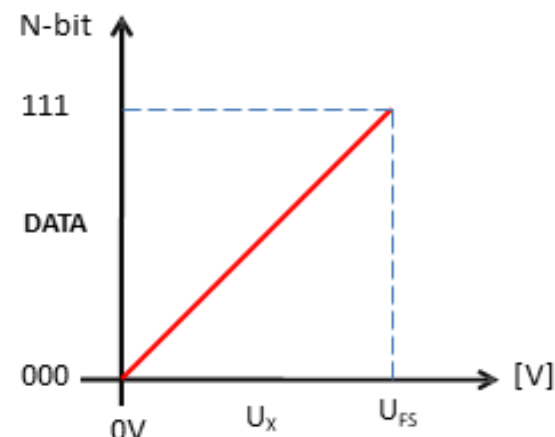
Obecnie bardzo szybkie przetworniki A/C są coraz powszechniej stosowane w różnych dziedzinach elektroniki, między innymi w analizie sygnałów telewizyjnych, radarowych, w transmisji kodowej tych sygnałów, w układzie rejestracji i analizy bardzo szybkich przebiegów elektrycznych.

Coraz większe zapotrzebowanie na przesyłanie, rejestrowanie, odtwarzanie dźwięku i obrazu w postaci cyfrowej wymaga coraz szybszych i dokładnych przetworników A/C i C/A.

Przetwornik A/C (2)



Obwód wejściowy przetwornika A/C



Charakterystyka przejściowa unipolarnego przetwornika A/C

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

Rozdzielczość może być wyrażana w jednostkach napięcia (najczęściej w miliwoltach), jako wielkość przedziału kwantowania q , czyli przez wartość napięcia wejściowego odpowiadającą najmniej znaczącemu bitowi (1 LSB) słowa wyjściowego

Jeśli na wyjściu przetwornika A/C uzyskuje się n -bitowe słowo wyjściowe: a_1, a_2, \dots, a_n , to napięcie wejściowe U_x odpowiadające takiemu wynikowi przetwarzania można obliczyć ze wzoru:

U_x – napięcie wejściowe, U_{FS} – napięcie pełnej skali

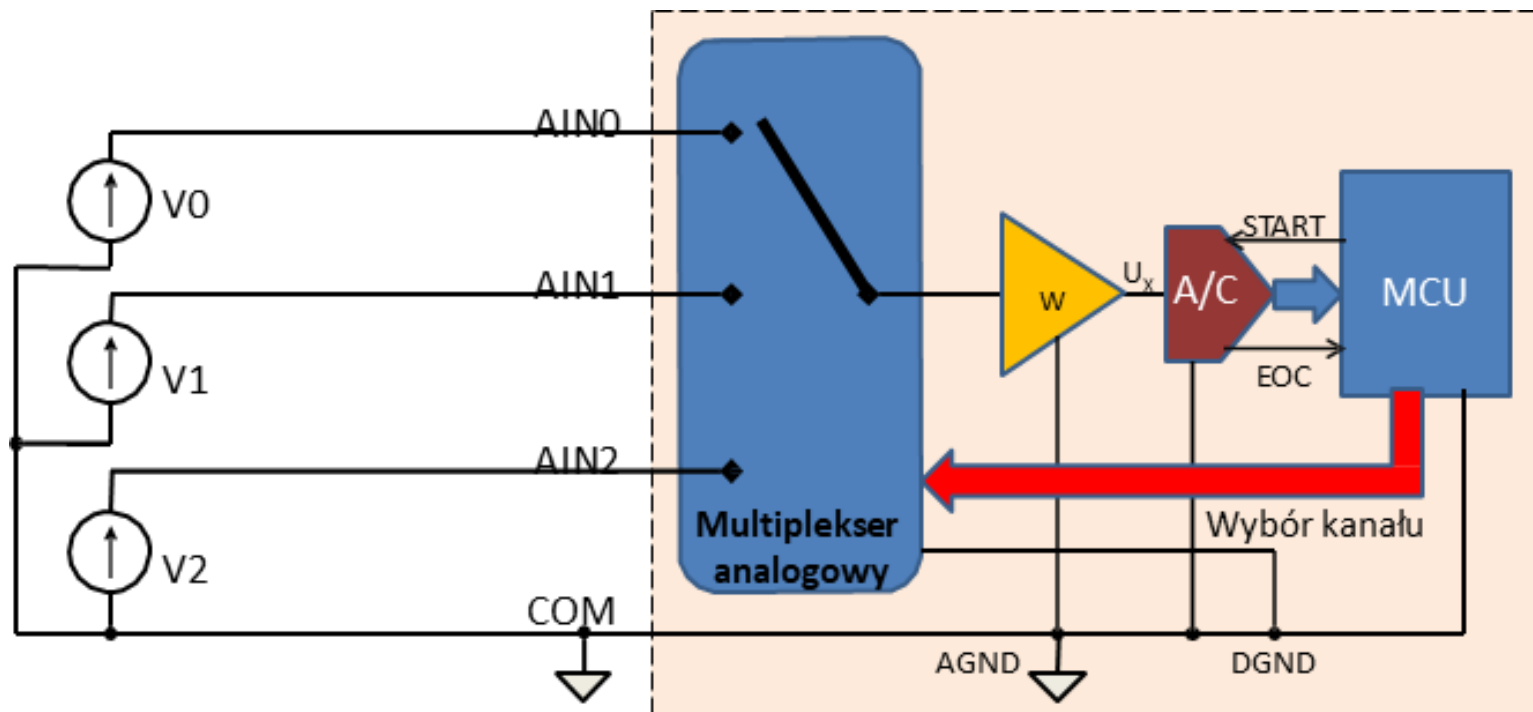
$$U_x = (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + \dots + a_n 2^{-n}) U_{FS}$$

Przetwornik A/C (3)

- Na wejściu przetwornika analogowo-cyfrowego występuje sygnał analogowy, w którym istotna informacja jest zawarta w wartości i znaku napięcia lub prądu, a na wyjściu – sygnał cyfrowy reprezentowany jest przez odpowiednio zakodowaną liczbę wyrażaną zwykle w zapisie dwójkowym.
- Istotą przetwarzania A/C jest więc przyporządkowanie każdej wartości napięcia wejściowego U_x odpowiedniej wartości cyfrowej N_x na wyjściu przetwornika w postaci kombinacji stanów logicznych 0 lub 1.
- Taka kombinacja o określonej liczbie n -bitów nazywa się słowem wyjściowym przetwornika i stanowi wynik przetwarzania zakodowany na ogół w naturalnym kodzie dwójkowym.

Przetwornik A/C (4)

- przy czym współczynnik $a_1...a_n$ może przyjmować wartości 0 lub 1, a oznaczenie U_{FS} określa pełny zakres napięcia przetwarzania. Współczynnik a_1 określa stan najbardziej znaczącego bitu (MSB), a współczynnik a_n – najmniej znaczącego bitu (LSB) wyniku przetwarzania.





Parametry przetwornika A/C

- Rozdzielczość
- Czas przetwarzania
- Zakres napięcia wejściowego
- Dokładność przetwarzania
- Liniowość
- Kod wyjściowy
- Napięcie zasilania i pobór prądu
- Rozdzielczość jest własnością najbardziej związaną z cechami przetwornika A/C jako układu cyfrowego, wiąże się z liczbą bitów słowa wyjściowego.
- Dokładność przetwornika jako układu analogowego zależy, poza rozdzielczością od kilku rodzajów błędów, z których główny wpływ mają:
 - błędy wzmocnienia i przesunięcia zera,
 - błąd nieliniowości całkowitej,
 - błąd nieliniowości różniczkowej,
 - zmiany termiczne.

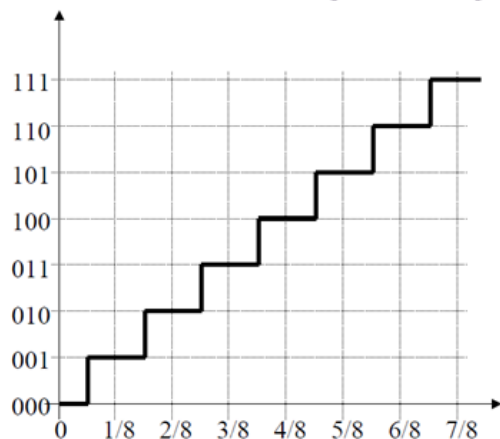
Rozdzielczość przetwornika A/C

- Liczba przedziałów kwantowania, czyli liczba bitów słowa wyjściowego, określa podstawowy parametr przetwornika A/C, jakim jest rozdzielczość.
- Zdolność rozdzielcza (rozdzielczość), wyraża najmniejszą wartość sygnału wejściowego, która jest rozróżnialna przez przetwornik.
- Rozdzielczość może być wyrażana w jednostkach napięcia (najczęściej w miliwoltach), jako wielkość przedziału kwantowania q , czyli przez wartość napięcia wejściowego odpowiadającą najmniej znaczącemu bitu (1 LSB) słowa wyjściowego:
- Często określa się rozdzielczość jako liczbę bitów słowa wyjściowego.

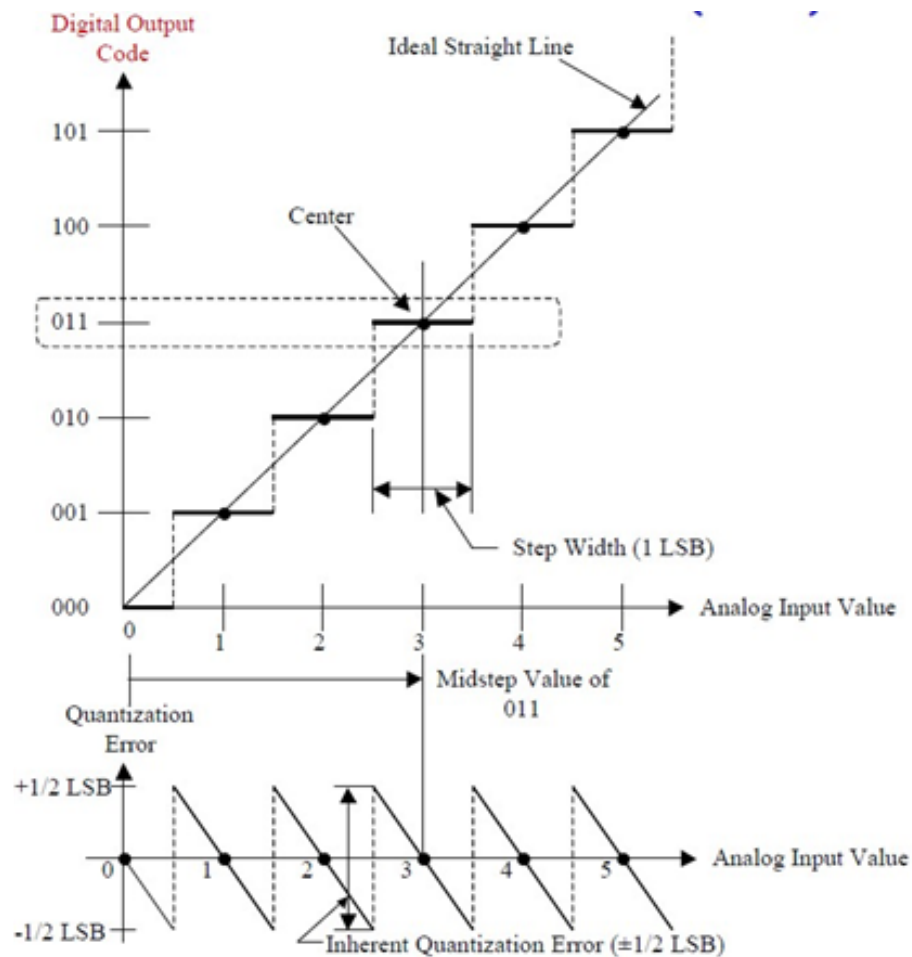
$$q = \frac{U_{FS}}{2^n}$$

Charakterystyka przetwornika A/C

Błąd kwantyzacji dla idealnego przetwornika A/C wynosi $\pm 1/2 \text{ LSB}$



Charakterystyka wyjściowa 3-bitowego przetwornika A/C





Wartość 1 LSB - idealny przetwornik

| RESOLUTION N | 2^N | VOLTAGE (10V FS) | ppm FS | % FS | dB FS |
|-----------------|------------|---------------------------|---------|----------|-------|
| 2-bit | 4 | 2.5 V | 250,000 | 25 | -12 |
| 4-bit | 16 | 625 mV | 62,500 | 6.25 | -24 |
| 6-bit | 64 | 156 mV | 15,625 | 1.56 | -36 |
| 8-bit | 256 | 39.1 mV | 3,906 | 0.39 | -48 |
| 10-bit | 1,024 | 9.77 mV (10 mV) | 977 | 0.098 | -60 |
| 12-bit | 4,096 | 2.44 mV | 244 | 0.024 | -72 |
| 14-bit | 16,384 | 610 μ V | 61 | 0.0061 | -84 |
| 16-bit | 65,536 | 153 μ V | 15 | 0.0015 | -96 |
| 18-bit | 262,144 | 38 μ V | 4 | 0.0004 | -108 |
| 20-bit | 1,048,576 | 9.54 μ V (10 μ V) | 1 | 0.0001 | -120 |
| 22-bit | 4,194,304 | 2.38 μ V | 0.24 | 0.000024 | -132 |
| 24-bit | 16,777,216 | 596 nV* | 0.06 | 0.000006 | -144 |

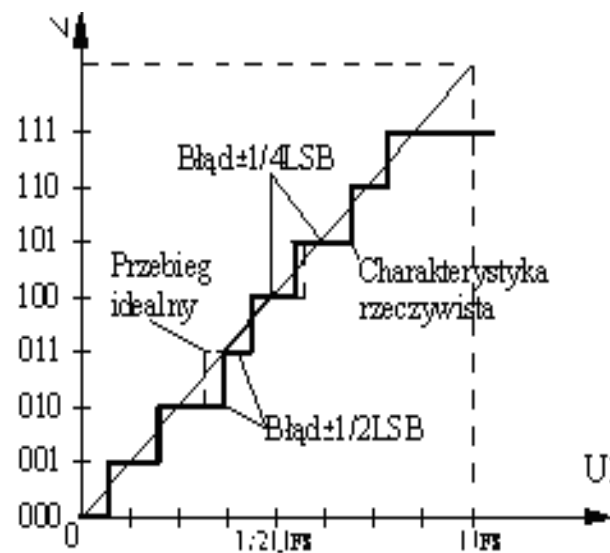
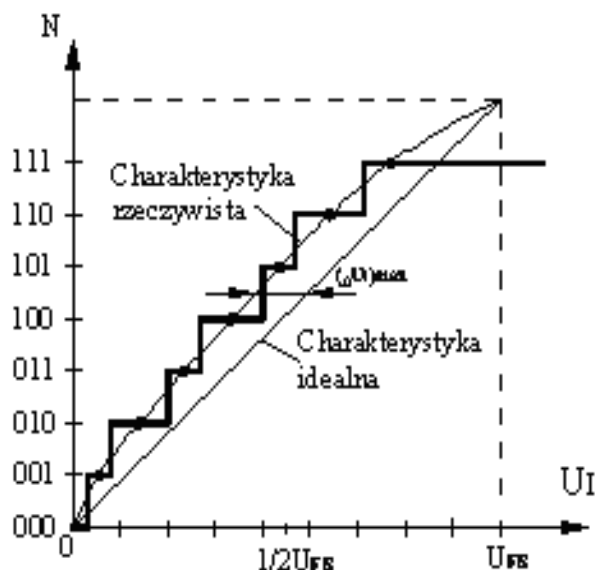
Dokładność a rozdzielczość

- Suma wszystkich błędów analogowych – dokładność przetwornika, w całym zakresie temperatury pracy powinna się mieścić w granicach określonych rozdzielczością (wartością przedziału kwantowania) odpowiadająca 1 LSB.
- W prawidłowo zaprojektowanym przetworniku A/C liczba bitów wyniku przetwarzania jest dobrana tak, że wartość błędu analogowego wyrażona przez dokładność jest mniejsza od kwantyzacji wynikającego z rozdzielczości.
- Zwiększanie zdolności rozdzielczej ponad granicę wynikającą z wielkości błędu analogowego, jest niecelowe, ponieważ nie poprawia dokładności przetwarzania. Więc przy prawidłowo wyznaczonych parametrach przetwornika A/C wartość katalogowej zdolności rozdzielczej powinna również określać jego dokładność.

Charakterystyka przetwornika A/C

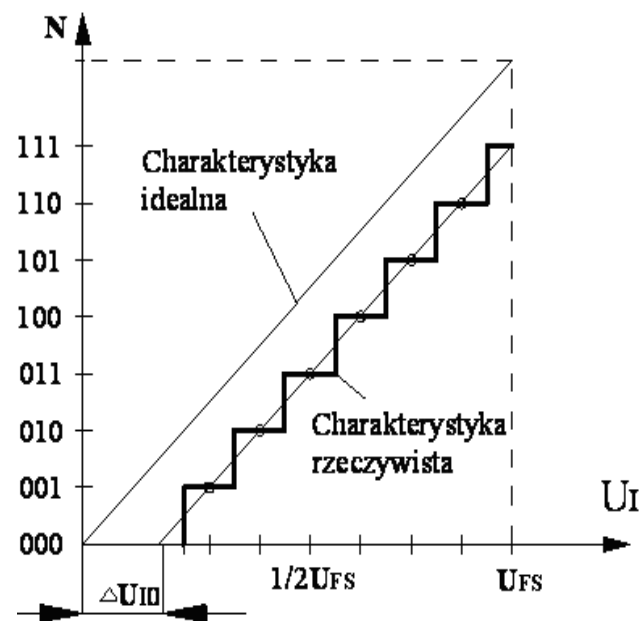
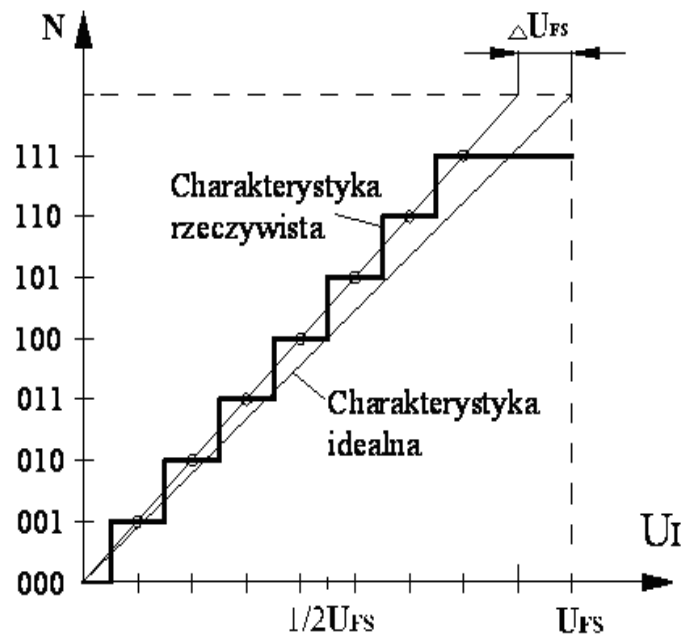
- Nieliniowość całkowita stanowi maksymalne względne odchylenie rzeczywistej charakterystyki przetwarzania od linii prostej łączącej dwa krańcowe punkty zakresu przetwarzania.

$$E_c = \frac{(\Delta U_X)_{MAX}}{U_{FS}} 100\%$$



Charakterystyki przetworników A/C:
a- z błędem nieliniowości całkowanej, b- różniczkowej

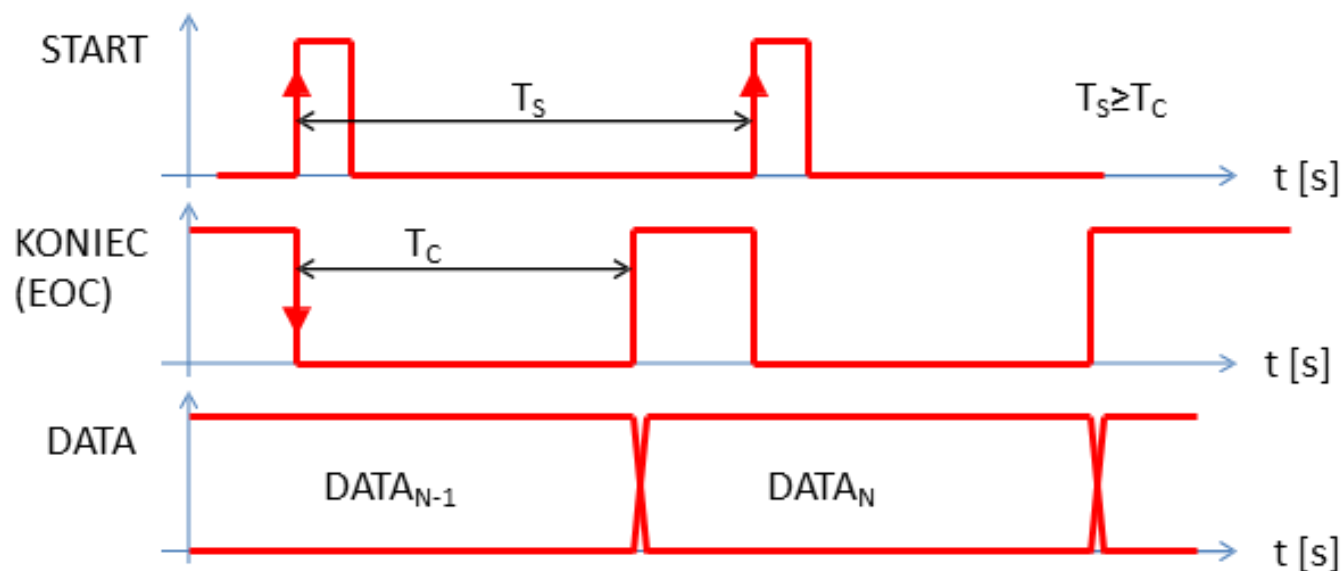
Charakterystyka przetwornika A/C



Charakterystyka przetwarzania A/C:
a- z błędem wzmocnienia, b- z błędem przesunięcia zera.

Szybkość przetwarzania (1)

- Proces przetwarzania analogowo-cyfrowego odbywa się z pewną określoną szybkością, którą można wyrazić przez **czas przetwarzania**, **częstotliwość przetwarzania** lub tzw. szybkość bitową.
- Czas przetwarzania T_c to czas konieczny do jednego całkowitego przetworzenia na wielkość cyfrową sygnału analogowego o wartości równej pełnemu zakresowi przetwarzania.
- Jest to więc czas upływający od chwili podania sygnału inicjującego do pojawienia się pełnej wartości cyfrowej wyniku przetwarzania.



T_s – czas próbkowania T_c – czas przetwarzania $f_s = 1/T_s$ – częstotliwość próbkowania

Szybkość przetwarzania (2)

- Częstotliwość przetwarzania f_c jest to maksymalna częstotliwość, z jaką mogą następować kolejne przetworzenia sygnału wejściowego z zachowaniem określonej dokładności i rozdzielczości w pełnym zakresie przetwarzania.
- Przyjmuje się, że częstotliwość przetwarzania f_c jest w przybliżeniu równa odwrotności czasu przetwarzania T_c , chociaż istnieją odchylenia od tej zasady.
- Przy obliczaniu częstotliwości przetwarzania powinno się bowiem uwzględnić nie tylko czas przetwarzania, lecz także niezbędny czas ustalania się warunków pracy układu przed następnym cyklem przetwarzania. Z tego powodu częstotliwość przetwarzania jest z reguły nieco mniejsza od odwrotności czasu przetwarzania.



Metody przetwarzania A/C

Metody pośrednie

Czasowe

- z pojedynczym całkowaniem
- z podwójnym całkowaniem
- z potrójnym całkowaniem
- z poczwórnym całkowaniem

Częstotliwościowe

- prosta
- z równoważeniem ładunków
- metoda sigma-delta (Σ - Δ)

Metody bezpośrednie

Bezpośredniego porównywania

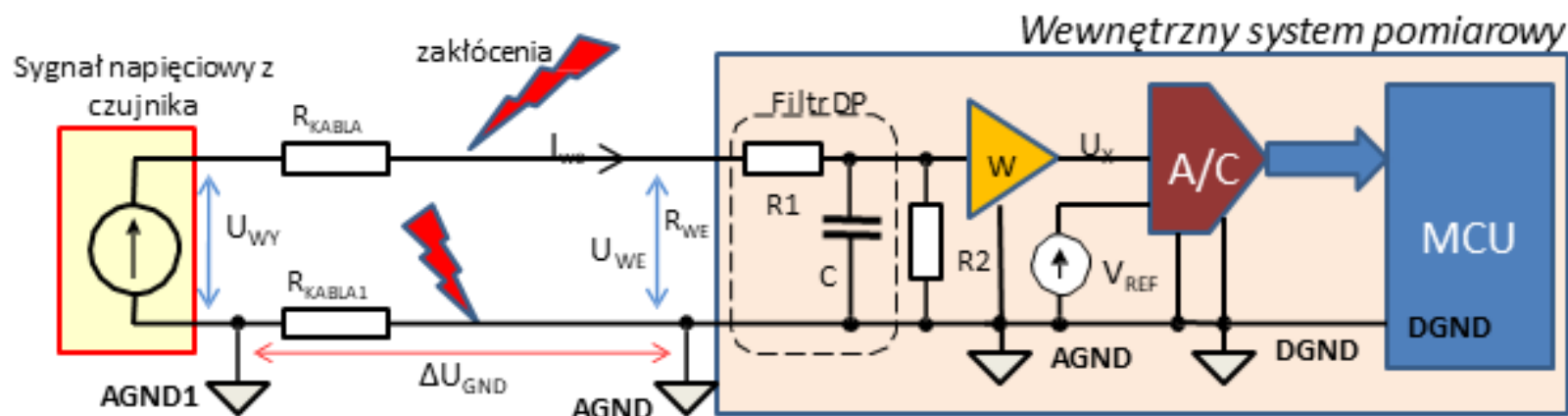
- równoległa
- szeregowo
- szeregowo równoległa
- wielokrotnego składania sygnałów

Kompensacyjna

- wagowa
- równomierna

- Metody pośrednie są wolne (T_c ok. [ms]) ale bardzo dokładne (10-22 bitów).
- Metoda kompensacyjna jest szybka (T_c ok. [μ s]) i dokładna (10-16 bitów).
- Metody bezpośrednie są najszybsze (T_c ok. [ns], [μ s]) ale mniej dokładne (6-8 bitów).

Wejście napięciowe pojedyncze



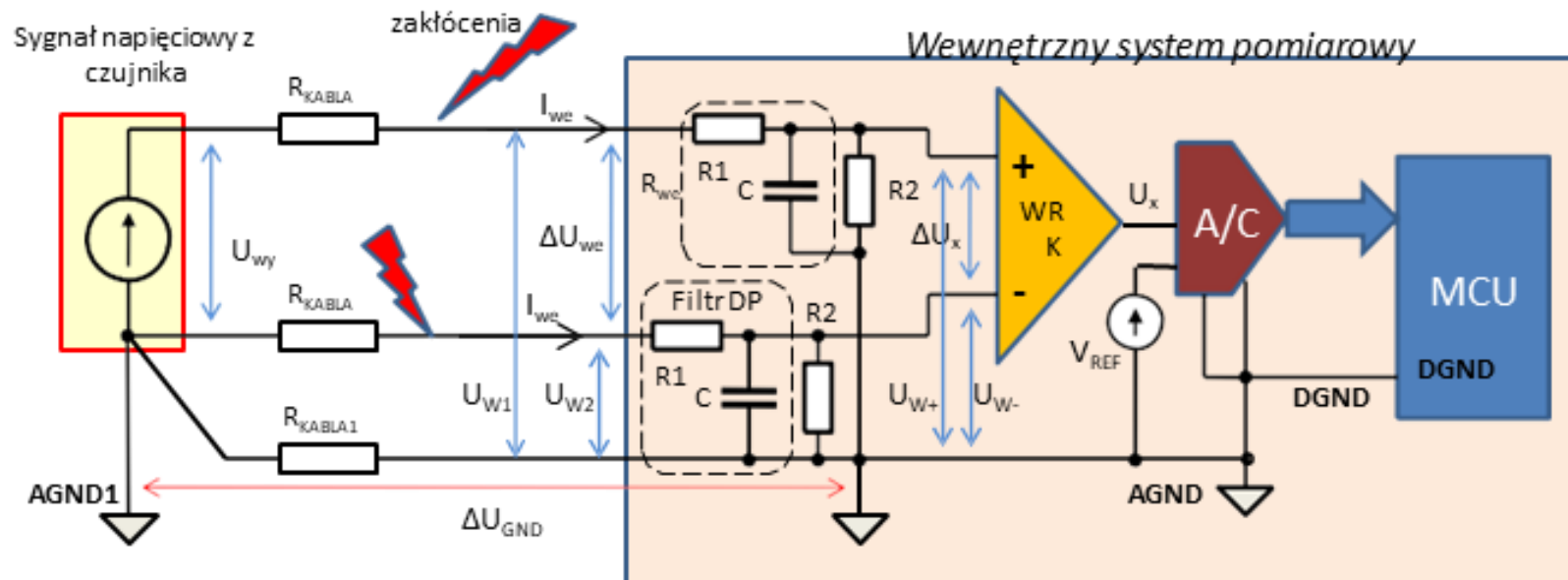
Obwód pomiarowy z wejściem pojedynczym

Dzielnik wejściowy, filtr DP, wzmacniacz pojedynczy, przetwornik A/C i mikrokontroler

Zalety i wady wejścia pojedynczego:

- mała liczba przewodów,
- małe koszty przy krótkich odległościach,
- małe koszty i prostota układu pomiarowego,
- słaba odporność na zakłócenia,
- słabe tłumienie sygnałów tzw. wspólnych

Wejście napięciowe różnicowe



Obwód pomiarowy z wejściem różnicowym

Dzielnik wejściowy, filtr DP, wzmacniacz różnicowy, przetwornik A/C i mikrokontroler

Zalety i wady wejścia pojedynczego:

- dobra odporność na zakłócenia,
- silne tłumienie sygnałów tzw. wspólnych
- większa liczba przewodów,
- większe koszty przy dużych odległościach,
- większe koszty i bardziej skomplikowany układ pomiarowy,

Wejściowe Napięcie Różnicowe

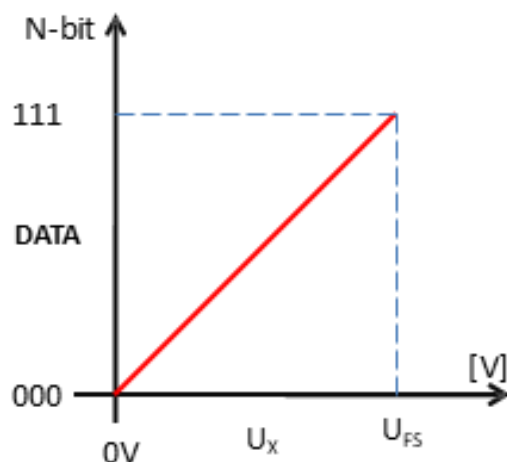
$$\Delta U_{we} = U_{W1} - U_{W2}$$

Wejściowe Napięcie dla przet. A/C

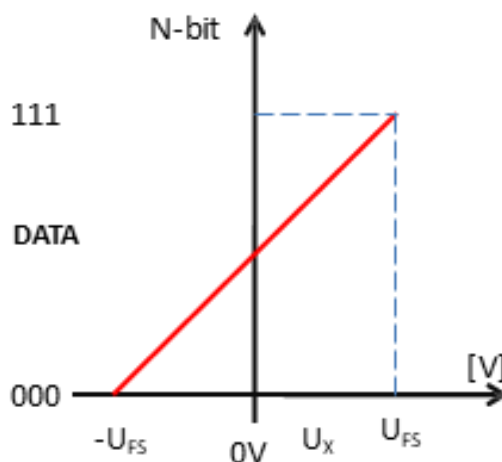
$$U_x = K \cdot (U_{W1} - U_{W2})$$

Kody wyjściowe przetworników A/C

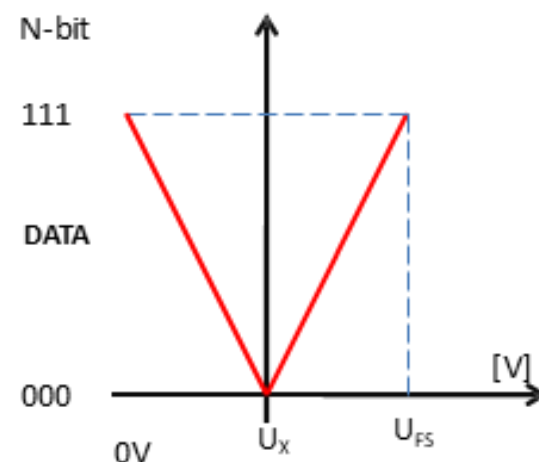
- Kod naturalny binarny BIN
- Kod dziesiętny BCD
- Kod uzupełnień do dwóch (U2)
- Kod znak + moduł w kodzie BIN
- Kod Graya
- W systemach mikroprocesorowych najczęściej stosuje się kod naturalny binarny (BIN).



Charakterystyka przejściowa
unipolarnego przetwornika A/C



Charakterystyka przejściowa
bipolarnego przetwornika A/C



Charakterystyka przejściowa
bipolarnego przetwornika A/C w
kodzie znak+moduł



Przetwarzanie C/A

Przetwarzanie cyfrowo analogowe C/A polega na przekształceniu liczby w postać napięcia o określonej wartości wynikającej z zapisu cyfrowego.

Funkcję tę realizują przetworniki cyfrowo analogowe (przetworniki C/A)

Przetwornik C/A umożliwia przedstawienie liczby w postaci napięcia o określonej wartości

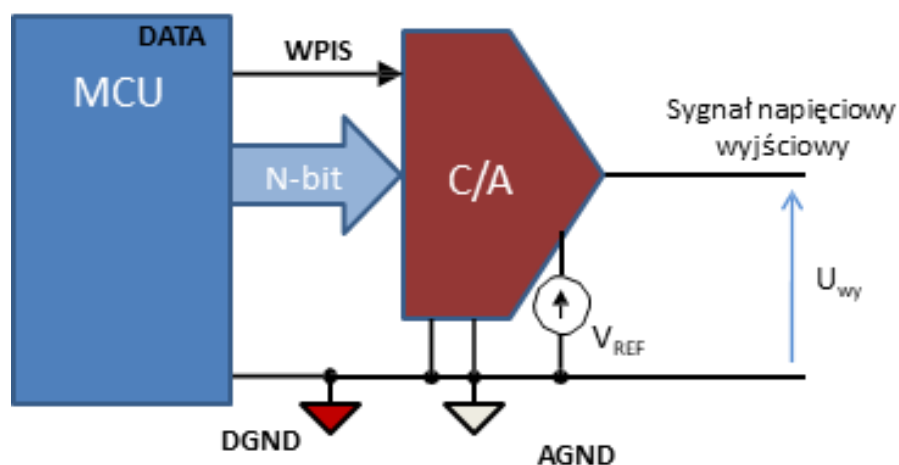
$$U_{\text{out}} = U_{\text{LSB}} Z$$

Z – liczba

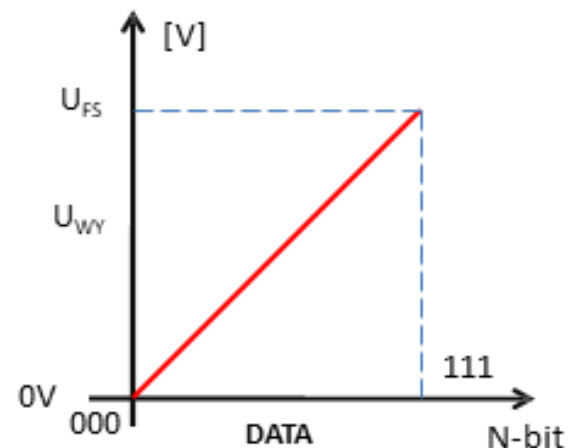
U_{out} – napięcie wyjściowe

U_{LSB} – napięcie odpowiadające najmniej znaczącemu bitowi

Przetwornik C/A



Obwód wyjściowy przetwornika C/A



Charakterystyka wyjściowa unipolarnego przetwornika C/A

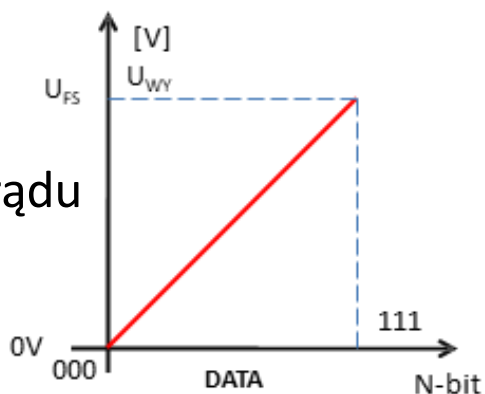
$$q = \frac{U_{FS}}{2^n}$$

Rozdzielczość może być wyrażana w jednostkach napięcia (najczęściej w miliwoltach), jako wielkość przedziału kwantowania q , czyli przez wartość napięcia wyjściowego odpowiadającą najmniej znaczącemu bitu (1 LSB) słowa wejściowego

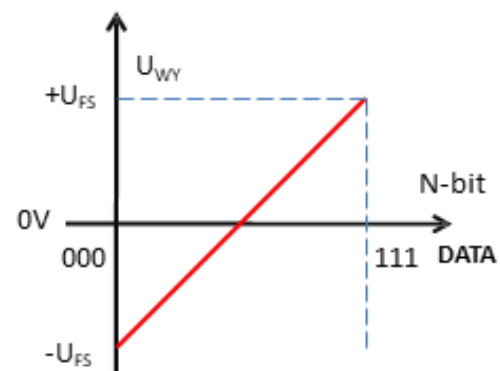
$$U_{wy} = q * Dn$$

Parametry przetwornika C/A

- Rozdzielczość
- Dokładność przetwarzania
- Czas ustalania napięcia na wyjściu (czas przetwarzania)
- Zakres napięcia wyjściowego
- Liniowość
- Kod wejściowy
- Napięcie zasilania i pobór prądu



Charakterystyka wyjściowa
unipolarnego przetwornika C/A

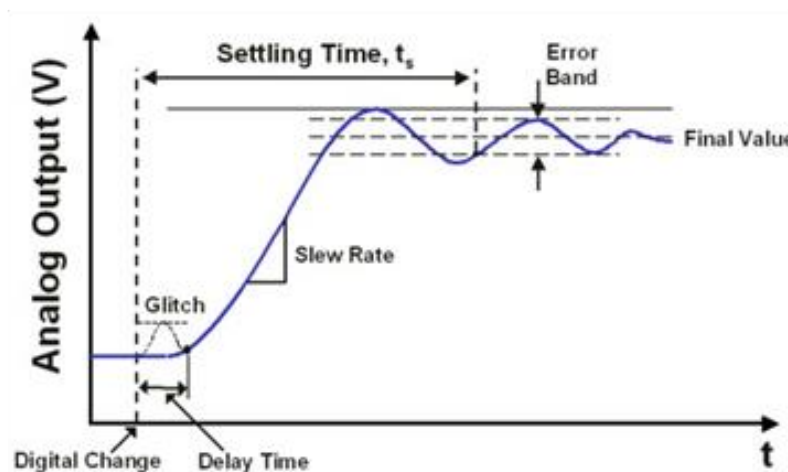
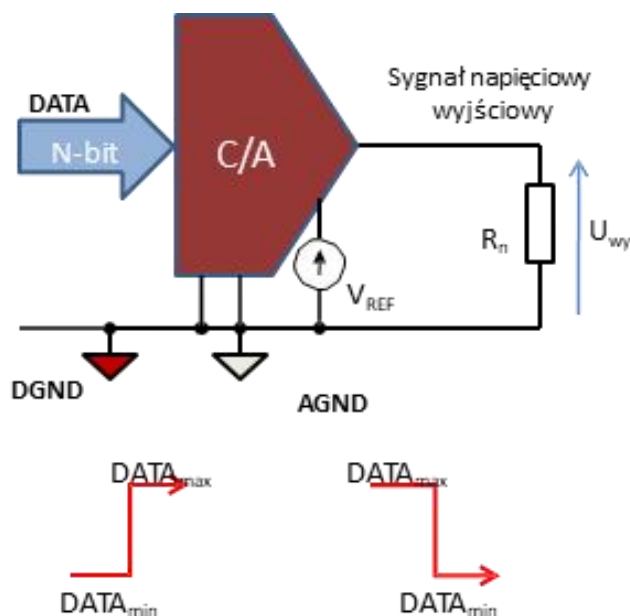


Charakterystyka wyjściowa
bipolarnego przetwornika C/A

Zakresy napięć wyjściowych przetworników C/A:

- Unipolarne **+2.5V, +5V, +10V**
- Bipolarne $\pm 2.5V, \pm 5V, \pm 10V$

Czas ustalania przetwornika C/A



Czas ustalania napięcia na wyjściu (*ang. settling time*) C/A sprawdza się dla:

- maksymalnej zmiany sygnału wejściowego (słowa wejściowego), z wartości minimalnej do maksymalnej i na odwrót.
- Np. dla przetwornika 10-bitowego C/A z wejściem w kodzie BIN, stan minimalny to wartość 000 (0x00), stan maksymalny to 1023 (0x3FF).
- Przetwornik ma dołączone nominalne obciążenie

Metody przetwarzania C/A

Metody bezpośrednie

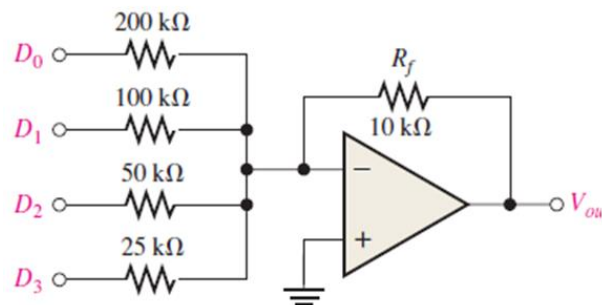
- Metody sumowania prądów (drabinka 2^N lub R-2R)
- Metoda sumowania napięć (drabinka 2^N lub R-2R)

Metody pośrednie

- PWM – Pulse Width Modulation (modulacja szerokości impulsu)
- PDM - Pulse-Density Modulation (modulacja gęstością impulsów)
- metoda sigma-delta (Σ - Δ)



Przetwornik C/A z ważonymi wejściami binarnymi



$$I_0 = \frac{5 \text{ V}}{200 \text{ k}\Omega} = 0.025 \text{ mA}$$

$$I_1 = \frac{5 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 0.05 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{5 \text{ V}}{50 \text{ k}\Omega} = 0.1 \text{ mA}$$

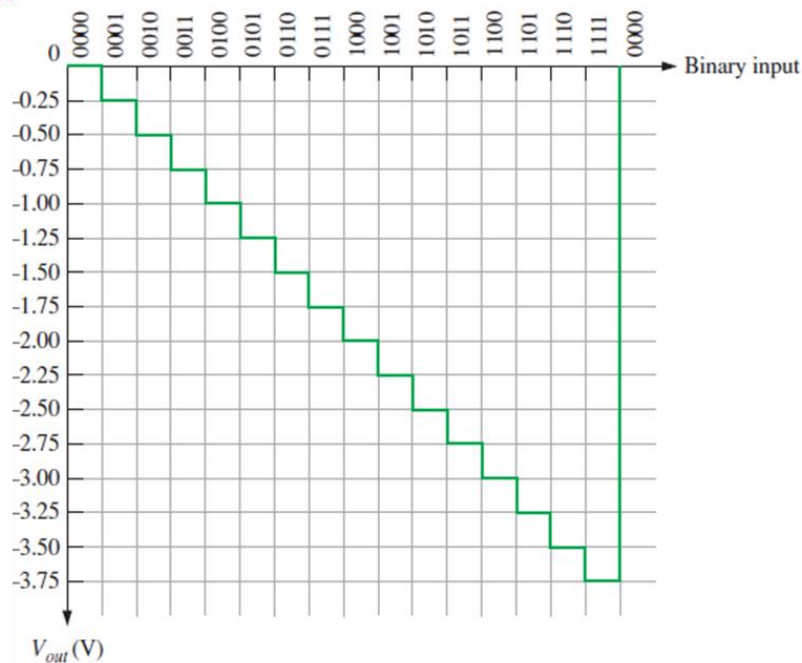
$$I_3 = \frac{5 \text{ V}}{25 \text{ k}\Omega} = 0.2 \text{ mA}$$

$$V_{out(D0)} = (10 \text{ k}\Omega)(-0.025 \text{ mA}) = -0.25 \text{ V}$$

$$V_{out(D1)} = (10 \text{ k}\Omega)(-0.05 \text{ mA}) = -0.5 \text{ V}$$

$$V_{out(D2)} = (10 \text{ k}\Omega)(-0.1 \text{ mA}) = -1 \text{ V}$$

$$V_{out(D3)} = (10 \text{ k}\Omega)(-0.2 \text{ mA}) = -2 \text{ V}$$





Przetwornik - system mikroprocesorowy

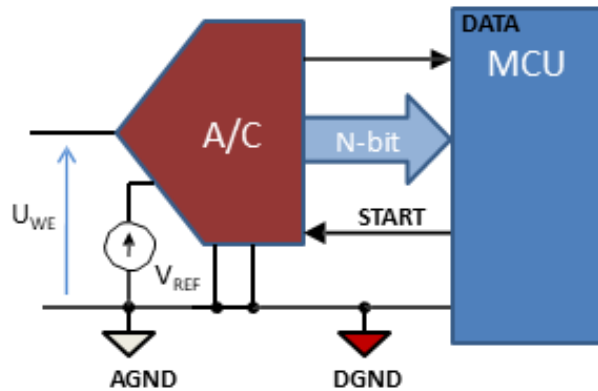
Do systemu mikroprocesorowego można podłączyć przetwornik A/C lub C/A na kilka sposobów:

1. Za pomocą sprzętowej zewnętrznej szyny danych, szyny adresowej i szyny sterującej. Wtedy do zapisu lub odczytu danych używa się gotowych rozkazów mikroprocesora. Przetwornik A/C może być podłączony jeszcze do systemu przerwań sprzętowych.
2. Za pomocą programowej zewnętrznej szyny danych, zewnętrznej szyny adresowej i zewnętrznej szyny sterującej zrealizowanej za pomocą równoległych portów I/O. Wtedy do zapisu lub odczytu danych należy napisać procedury.
3. Za pomocą równoległych portów I/O, zapis lub odczyt poprzez odpowiednie sterowanie poszczególnych końcówek portu.
4. Za pomocą interfejsów szeregowych sprzętowych lub interfejsów szeregowych programowych. Np. typu SPI, I2C, 1-Wire. Tylko wtedy przetwornik musi być wyposażony w taki interfejs szeregowy.

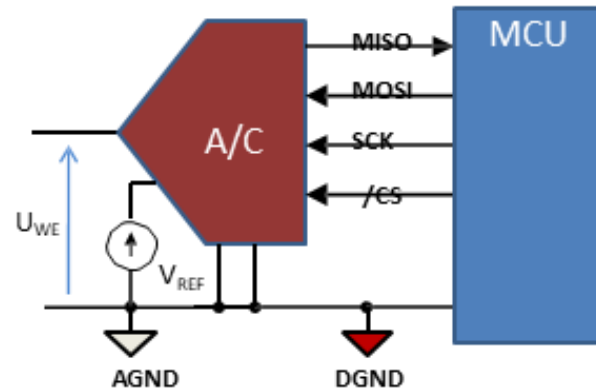
Przetwornik - system mikroprocesorowy

- Najlepszym sposobem uniknięcia problemów z podłączeniem przetworników A/C i C/A do systemu jest zastosowanie mikrokontrolera, która ma wewnętrzne układy A/C i C/A. Wtedy przetworniki są traktowane jako wewnętrzne układy wejścia/wyjścia.
- W takim przypadku musimy zapewnić odpowiednią obsługę programową takiego układu.
- Obecnie większość mikrokontrolerów 8, 16 i 32 bitowych ma wewnętrzny wielokanałowy system pomiarowy (4, 8, 12 kanałów) z przetwornikiem np. 10-bitowym o czasie przetwarzania kilkunastu μs .
- Rzadziej się spotyka mikrokontrolery z przetwornikami C/A. Można do tego celu zastosować wyjściowy kanał PWM.

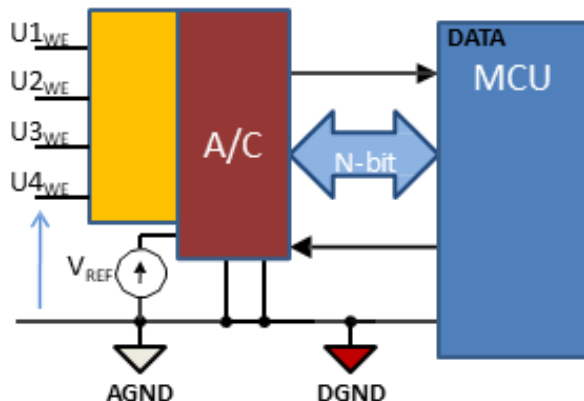
Interfejsy przetworników A/C



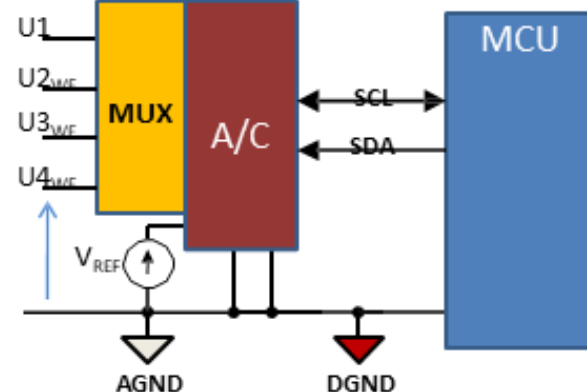
Przetwornik A/C z wyjściem równoległym



Przetwornik A/C z wyjściem szeregowym,
typu SPI

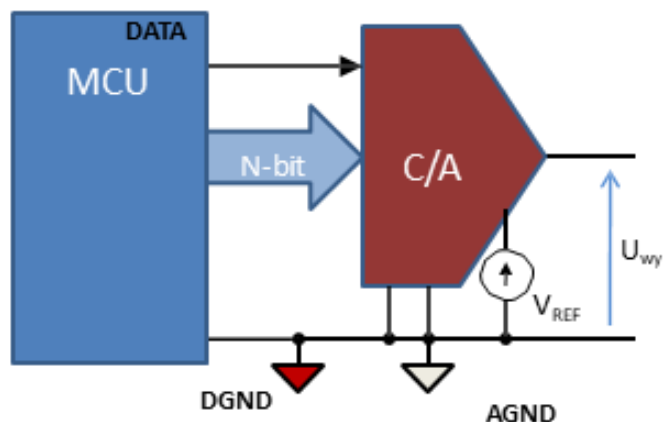


Czterokanałowy przetwornik A/C
z wyjściem równoległym

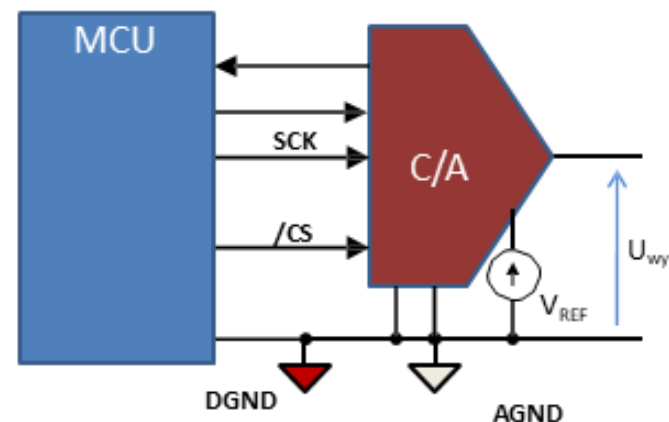


Czterokanałowy przetwornik A/C
wyjściem szeregowym typu I2C

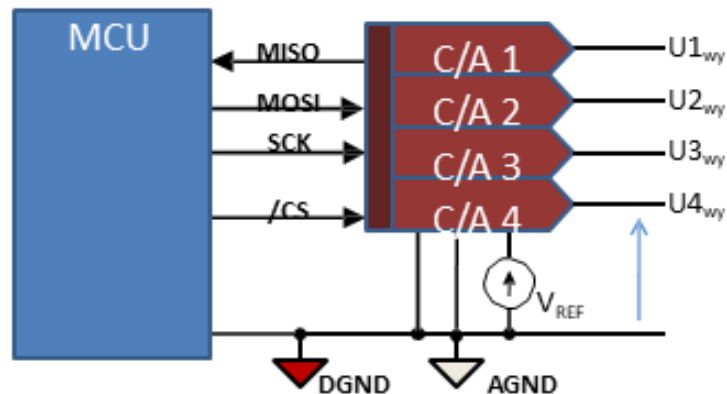
Interfejsy przetworników C/A



Przetwornik C/A z wejściem równoległym



Przetwornik C/A z wejściem szeregowym typu SPI



Cztero-kanalowy przetwornik C/A z wejściem szeregowym typu SPI