

# Przetworniki A/C i C/A w systemach mikroprocesorowych

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

1

## 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.

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

2

## Przetwornik A/C

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 analizie 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.

## Przykłady zastosowania przetworników A/C i C/A

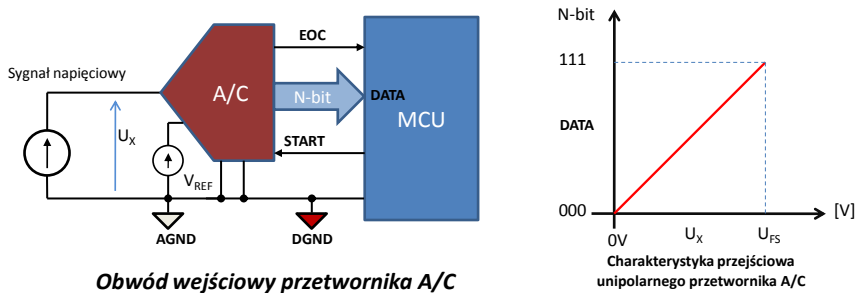
### Przetworniki A/C

- Karta dźwiękowa w PC
- Odtwarzacz MP3, MP4 z możliwością nagrywania
- Monitory LCD z wejściem VGA
- Nagrywarki CD, DVD, Blue-Ray
- Modemy telefoniczne
- Telewizory cyfrowe (LCD, LED, plazma)
- Odbiorniki radiowe z DSP
- Telefon komórkowy
- Sprzęt medyczny
- Sprzęt pomiarowy
- Wagi elektroniczne
- Panele dotykowe
- Sterowniki PLC
- Regulatory temperatury

### Przetworniki C/A

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

## Przetwornik A/C



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

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

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

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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

5

## Przetwornik A/C

- 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.

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

6

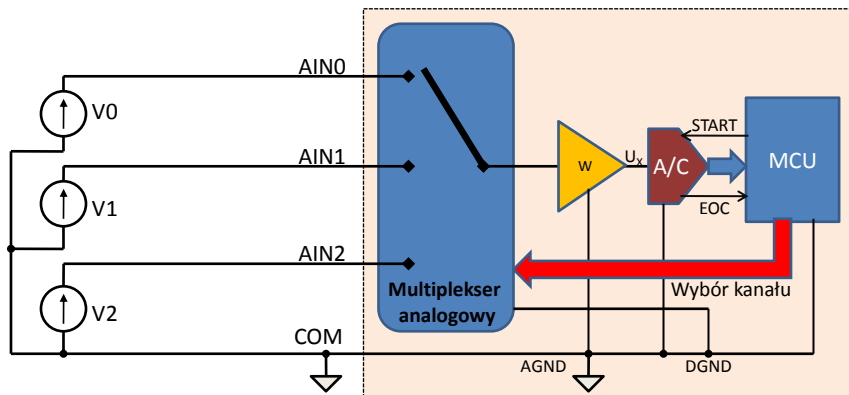
## Przetwornik A/C

- przy czym współczynnik  $a_1 \dots a_n$  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.

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

7

## Wielokanałowy pomiar napięcia



Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

8

## Podstawowe parametry przetworników A/C

- Rozdzielczość
- Czas przetwarzania
- Zakres napięcia wejściowego
- Dokładność przetwarzania
- Liniowość
- Kod wyjściowy
- Napięcie zasilania i pobór prądu

## Parametry przetwornika A/C

- Rozdzielczość jest własnością najbardziej związaną z cechami przetwornika A/C jako układu cyfrowego, ponieważ 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,
  - nieliniowość całkowania i różniczkowania
  - zmiany termiczne.

## Rozdzielczość przetwornika A/C

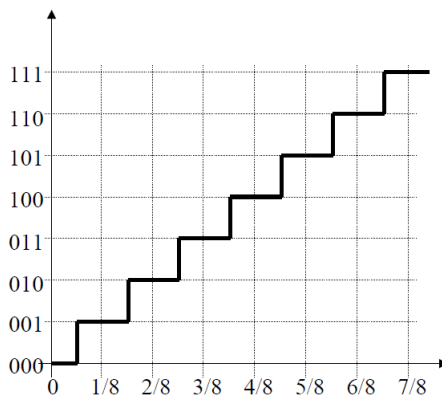
- Liczba przedziałów kwantowania, czyli liczba bitów słowa wyjściowego, określa podstawowy parametr przetwornika A/C, jakim jest rozdzielczość.
- Zdolność rozdzielcza (rozdzielczość), wyraża najmniejszą wartość sygnału wejściowego, która jest rozróżnialna przez przetwornik.
- Rozdzielczość może być wyrażana 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.

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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

11

## Parametry przetwornika A/C charakterystyka idealna



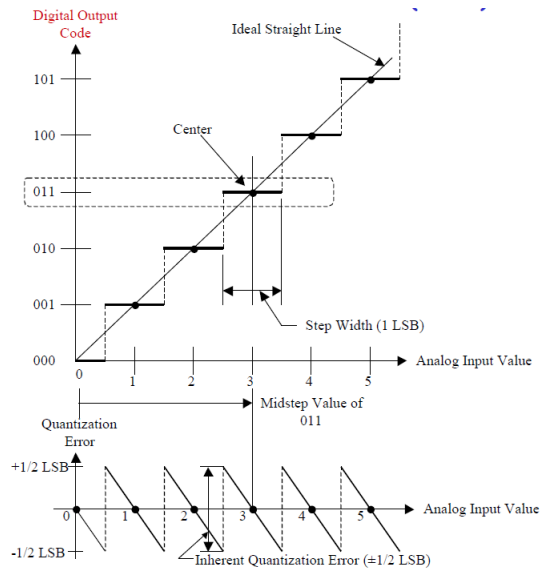
Charakterystyka wyjściowa 3-bitowego  
przetwornika A/C

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

12

## Błąd kwantyzacji

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



Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

13

## Wartość 1LSB dla idealnego przetwornika A/C

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 $\mu\text{V}$	61	0.0061	-84
16-bit	65,536	153 $\mu\text{V}$	15	0.0015	-96
18-bit	262,144	38 $\mu\text{V}$	4	0.0004	-108
20-bit	1,048,576	9.54 $\mu\text{V}$ (10 $\mu\text{V}$ )	1	0.0001	-120
22-bit	4,194,304	2.38 $\mu\text{V}$	0.24	0.000024	-132
24-bit	16,777,216	596 nV*	0.06	0.000006	-144

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

14

## Dokładność a rozdzielczość przetwornika A/C

- 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.

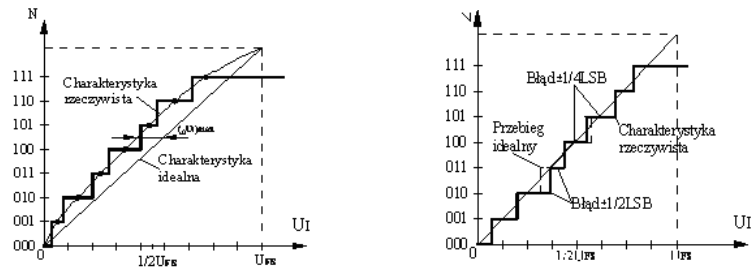
## Nieliniowość przetwornika A/C

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

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



## Błędy przetwornika A/C

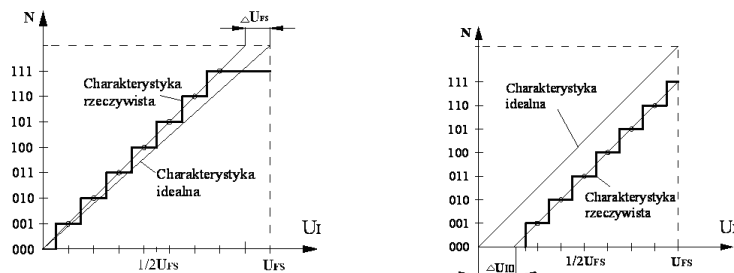


Charakterystyki przetworników A/C:  
a- z błędem nieliniowości całkowanej, b- różniczkowej

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

17

## Błędy przetwornika A/C



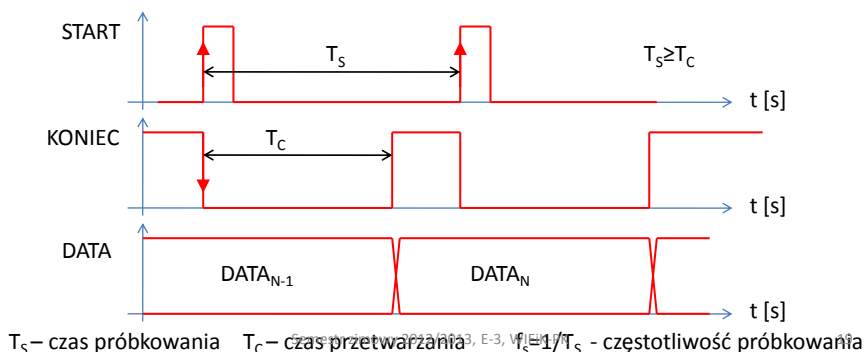
Charakterystyka przetwarzania A/C:  
a- z błędem wzmocnienia, b- z błędem przesunięcia zera.

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

18

## Szybkość przetwarzania A/C

- 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.



## Szybkość przetwarzania A/C

- 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 jest w przybliżeniu równa odwrotności czasu przetwarzania, 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 ( $\Sigma\text{-}\Delta$ )

### Metody bezpośrednie

#### Bezpośredniego porównywania

- równoległa
- szeregowo
- szeregowo równoległa
- wielokrotnego składania sygnałów

#### Kompensacyjna

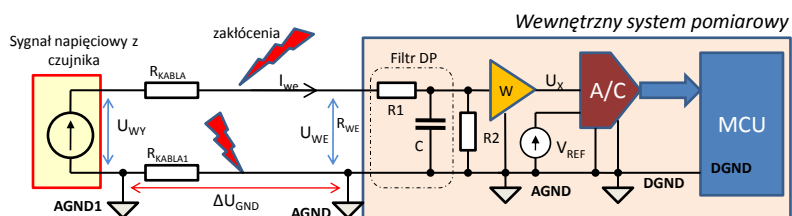
- wagowa
- równomierna

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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

21

## Zasada pomiaru – wejście napięciowe pojedyncze



### Obwód pomiarowy z wejściem pojedynczym

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

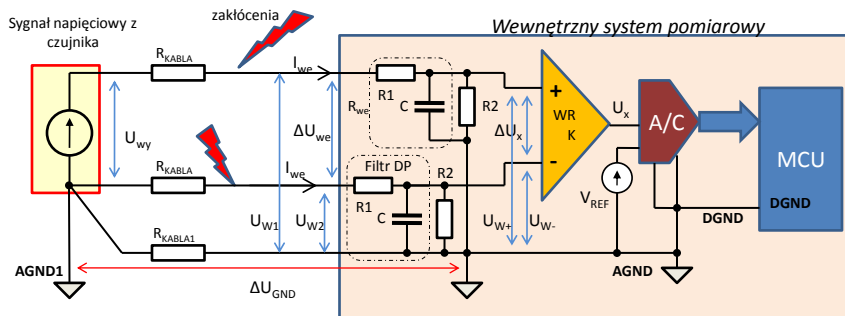
#### Zalety i wady wejścia pojedynczego:

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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

22

## Zasada pomiaru – 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

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

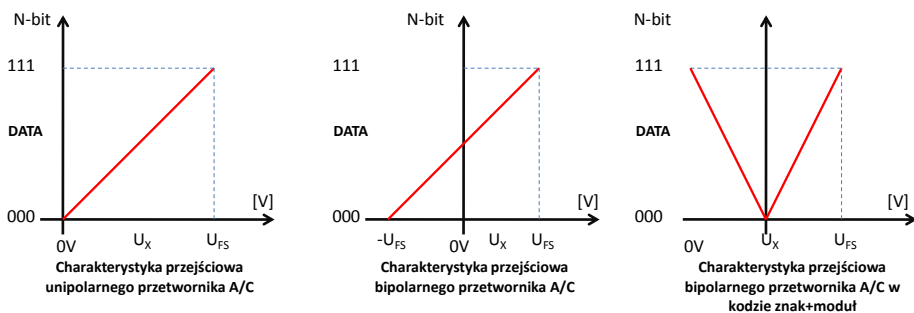
### Wejściowe Napięcie dla przet. A/C

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

## 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).

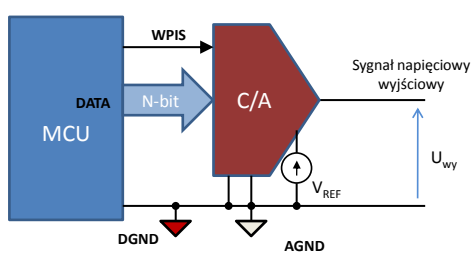
## Kody wyjściowe przetworników A/C



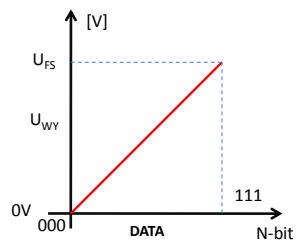
Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

25

## Przetwornik C/A



Obwód wyjściowy przetwornika C/A



Charakterystyka wyjściowa unipolarnego przetwornika C/A

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

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

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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

26

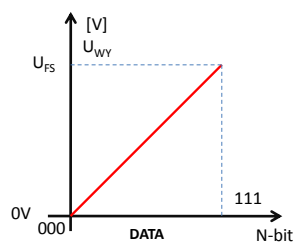
## Podstawowe parametry przetwornika C/A

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

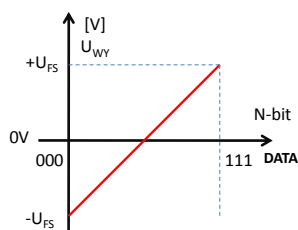
Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

27

## Parametry przetwornika C/A charakterystyka idealna



Charakterystyka wyjściowa  
unipolarnego przetwornika C/A



Charakterystyka wyjściowa  
bipolarnego przetwornika C/A

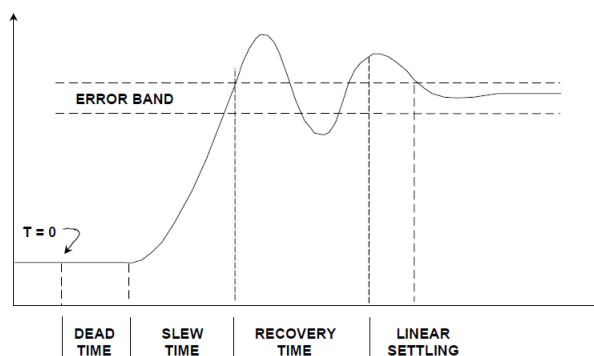
Zakresy napięć wyjściowych przetworników C/A:

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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

28

## Czas ustalania przetwornika C/A



Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

29

## 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 ( $\Sigma$ - $\Delta$ )

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

30

## Podłączenie przetworników A/C i C/A do systemu mikroprocesorowego

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.

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

31

## Przetwornik A/C i C/A w systemie mikroprocesorowym

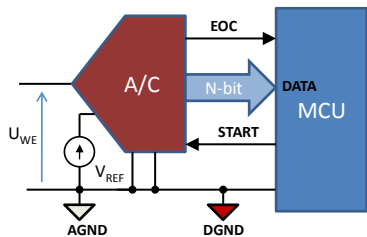
- Najlepszym sposobem uniknięcia problemów z podłączeniem przetworników A/C i C/A do systemu jest zastosowanie mikrokontrolera, która ma wewnętrzne układy A/C i C/A. Wtedy przetworniki są traktowane jako wewnętrzne układy wejścia/wyjścia.
- W takim przypadku musimy zapewnić odpowiednią obsługę programową 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  $\mu$ s.
- Rzadziej się spotyka mikrokontrolery z przetwornikami C/A. Można do tego celu zastosować wyjściowy kanał PWM.

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

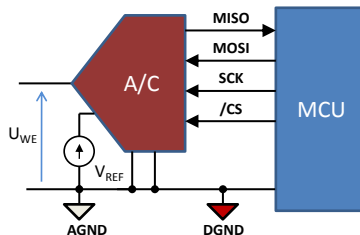
32



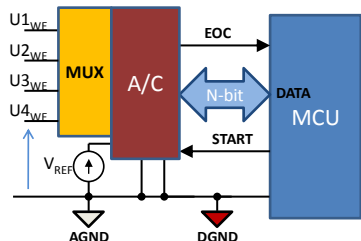
## Interfejsy przetworników A/C



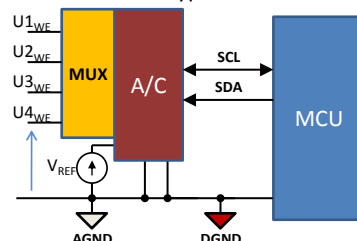
Przetwornik A/C z wyjściem równoległym



Przetwornik A/C z wyjściem szeregowym, typu SPI



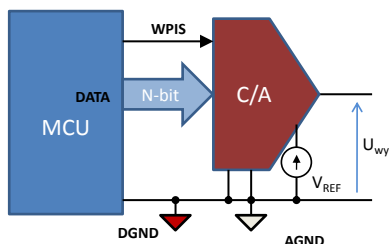
Czterokanałowy przetwornik A/C z wyjściem równoległym



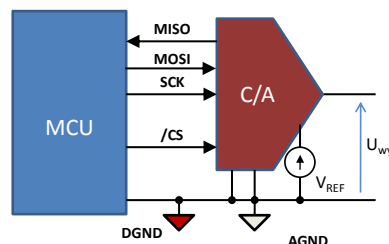
Czterokanałowy przetwornik A/C z wyjściem szeregowym typu I2C

Semestr zimowy 2012/2013, 33

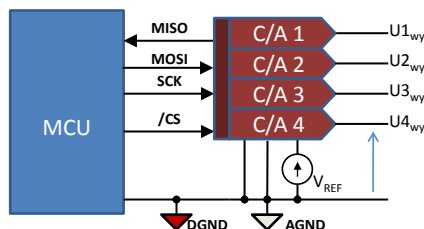
## Interfejsy przetworników C/A



Przetwornik C/A z wejściem równoległym



Przetwornik C/A z wejściem szeregowym typu SPI



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

Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

34

## Przykłady przetworników A/C

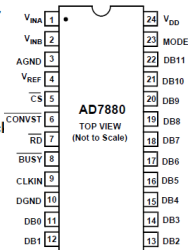


**LC<sup>2</sup>MOS Single +5 V Supply,  
Low Power, 12-Bit Sampling ADC**

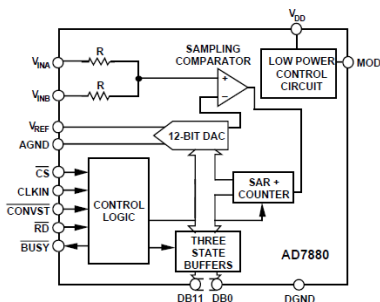
### AD7880

- FEATURES**  
 12-Bit Monolithic A/D Converter  
 66 kHz Throughput Rate  
 12  $\mu$ s Conversion Time  
 3  $\mu$ s On-Chip Track/Hold Amplifier  
**Low Power**  
 Power Save Mode: 2 mW typ  
 Normal Operation: 25 mW typ  
 70 dB SNR  
 Fast Data Access Time: 57 ns  
 Small 24-Lead SOIC and 0.3" DIP Pac!

- APPLICATIONS**  
 Battery Powered Portable Systems  
 Digital Signal Processing  
 Speech Recognition and Synthesis  
 High Speed Modems  
 Control and Instrumentation



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



## Przykłady przetworników A/C

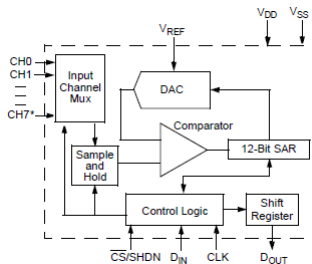


### MCP3204/3208

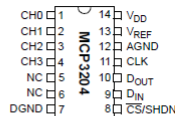
**2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters  
with SPI™ Serial Interface**

**Features**

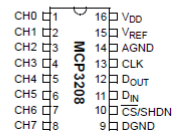
- 12-bit resolution
- $\pm 1$  LSB max DNL
- $\pm 1$  LSB max INL (MCP3204/3208-B)
- $\pm 2$  LSB max INL (MCP3204/3208-C)
- 4 (MCP3204) or 8 (MCP3208) input channels
- Analog inputs programmable as single-ended or pseudo-differential pairs
- On-chip sample and hold
- SPI serial interface (modes 0,0 and 1,1)
- Single supply operation: 2.7V - 5.5V
- 100 ksp/s max. sampling rate at  $V_{DD} = 5V$
- 50 ksp/s max. sampling rate at  $V_{DD} = 2.7V$
- Low power CMOS technology:
  - 500 nA typical standby current, 2  $\mu$ A max.
  - 400  $\mu$ A max. active current at 5V
- Industrial temp range: -40°C to +85°C
- Available in PDIP, SOIC and TSSOP packages



PDIP, SOIC, TSSOP



PDIP, SOIC



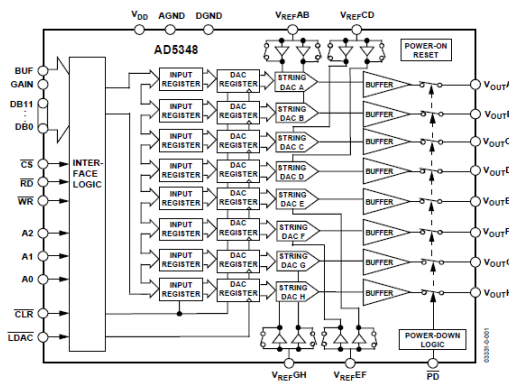
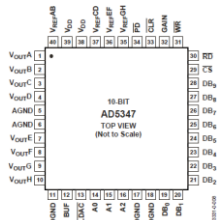
# Przykłady przetworników C/A



2.5 V to 5.5 V, Parallel Interface  
Octal Voltage Output 8-/10-/12-Bit DACs

**AD5346/AD5347/AD5348**

- AD5346: octal 8-bit DAC
- AD5347: octal 10-bit DAC
- AD5348: octal 12-bit DAC
- Low power operation: 1.4 mA (max) @ 3.6 V
- Power-down to 120 nA @ 3 V, 400 nA @ 5 V
- Guaranteed monotonic by design over all codes
- Rail-to-rail output range: 0 V to  $V_{REF}$  or 0 V to  $2 \times V_{REF}$
- Power-on reset to 0 V
- Simultaneous update of DAC outputs via LDAC pin
- Asynchronous CLR facility
- Readback
- Buffered/unbuffered reference inputs
- 20 ns WR time
- 38-lead TSSOP/6 mm  $\times$  6 mm 40-lead LFCSP packaging
- Temperature range:  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+105^{\circ}\text{C}$



Semestr zimowy 2012/2013, E-3, WIEIK-PK

37