

Przetworniki A/C i C/A w systemach mikroprocesorowych

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.

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.

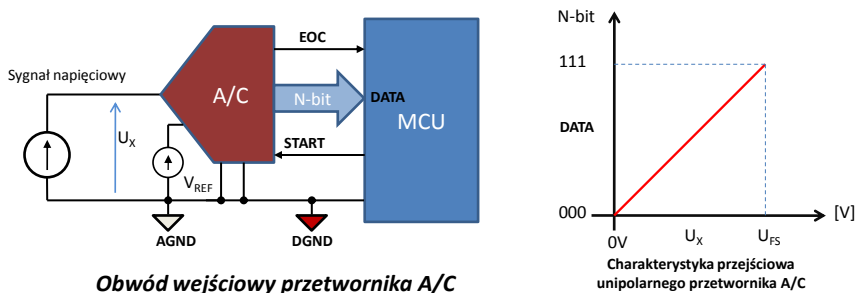
Takich metod wymagają w szczególności wszystkie systemy komputerowe. Obecnie bardzo szybkie przetworniki A/C są coraz powszechniej stosowane w różnych dziedzinach elektroniki, między innymi w analizie sygnałów telewizyjnych radarowych, w transmisji kodowej tych sygnałów, w układzie rejestracji i analizy 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.

E-3, WIEIK-PK

3

Przetwornik 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

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

E-3, WIEIK-PK

4

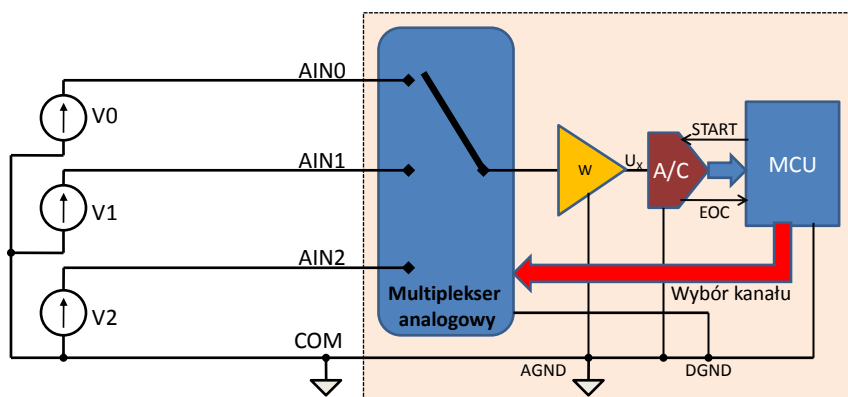
Przetwornik A/C

- 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.

E-3, WIEIK-PK

5

Wielokanałowy pomiar napięcia



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.

E-3, WIEIK-PK

7

Podstawowe parametry przetworników A/C

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

E-3, WIEIK-PK

8

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.

E-3, WIEIK-PK

9

Rozdzielczość przetwornika A/C

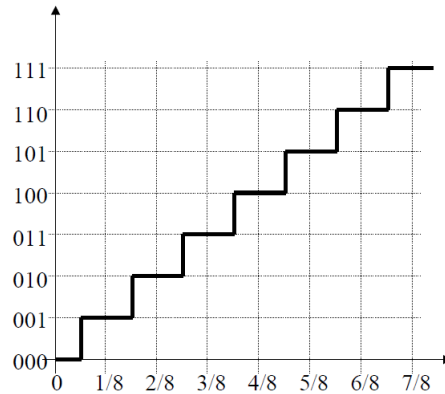
- Liczba przedziałów kwantowania, czyli liczba bitów słowa wyjściowego, określa podstawowy parametr przetwornika A/C, jakim jest rozdzielczość.
- Zdolność rozdzielcza (rozdzielczość), wyraża najmniejszą wartość sygnału wejściowego, która jest rozróżnialna przez przetwornik.
- Rozdzielczość może być wyrażana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

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

E-3, WIEIK-PK

10

Parametry przetwornika A/C charakterystyka idealna

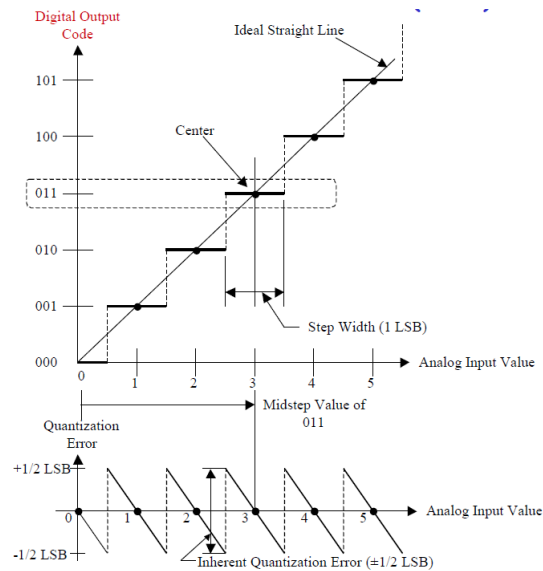


Charakterystyka wyjściowa 3-bitowego przetwornika A/C

E-3, WIEIK-PK

11

Błąd kwantyzacji



E-3, WIEIK-PK

12

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 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

E-3, WIEIK-PK

13

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.

E-3, WIEIK-PK

14

Nieliniowość przetwornika A/C

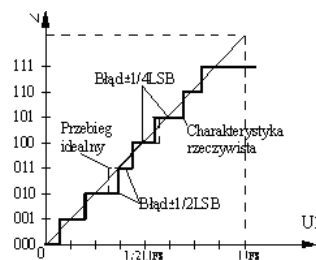
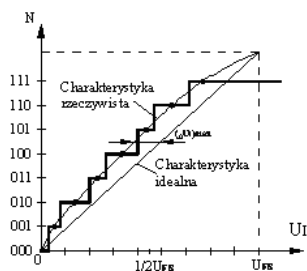
- Nieliniowość całkowita stanowi maksymalne względne odchylenie rzeczywistej charakterystyki przetwarzania od linii prostej łączącej dwa krańcowe punkty zakresu przetwarzania.

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

E-3, WIEIK-PK

15

Błędy przetwornika A/C

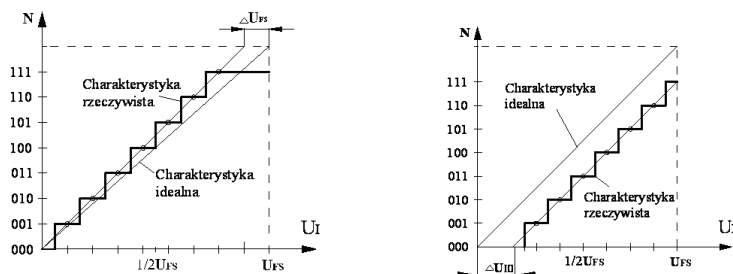


Charakterystyki przetworników A/C:
a- z błędem nieliniowości całkowanej, b- różniczkowej

E-3, WIEIK-PK

16

Błędy przetwornika A/C



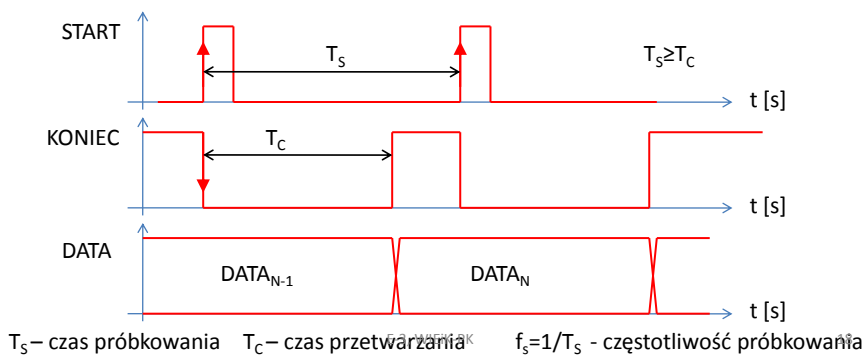
Charakterystyka przetwarzania A/C:
a- z błędem wzmacnienia, b- z błędem przesunięcia zera.

E-3, WIEIK-PK

17

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.

E-3, WIEIK-PK

19

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

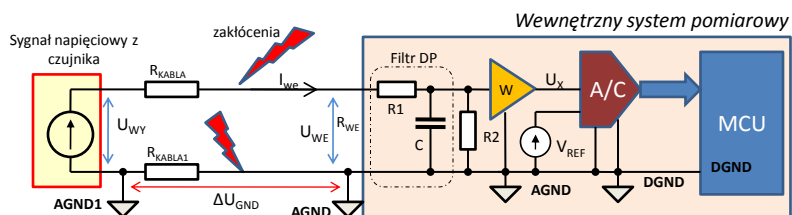
- wagowa
- równomierna

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

E-3, WIEIK-PK

20

Zasada pomiaru – wejście napięciowe pojedyncze



Obwód pomiarowy z wejściem pojedynczym

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

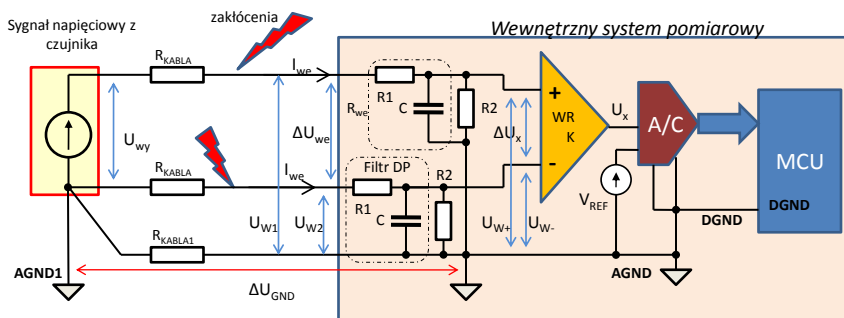
Zalety i wady wejścia pojedynczego:

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

E-3, WIEIK-PK

21

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

$$U_x = K \cdot (U_{w1} - U_{w2})$$

E-3, WIEIK-PK

22

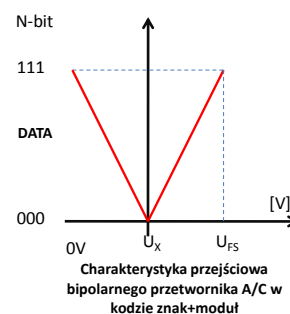
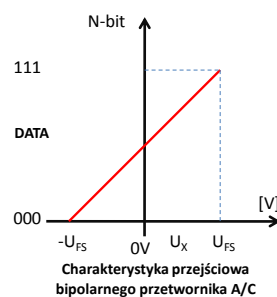
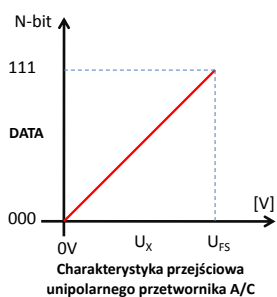
Kody wyjściowe przetworników A/C

- 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).

E-3, WIEIK-PK

23

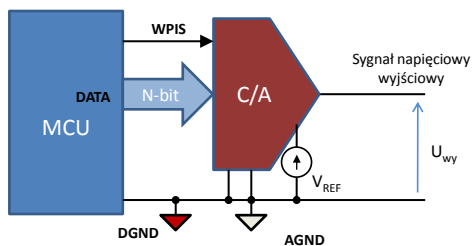
Kody wyjściowe przetworników A/C



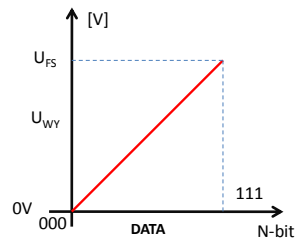
E-3, WIEIK-PK

24

Przetwornik C/A



Obwód wyjściowy przetwornika C/A



Charakterystyka wyjściowa unipolarnego przetwornika C/A

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

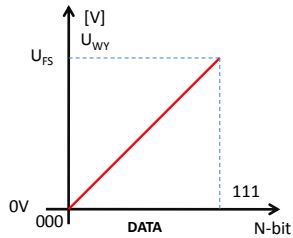
Rozdzielczość może być wyrażana w jednostkach napięcia (najczęściej w miliwoltach), jako wielkość przedziału kwantowania q , czyli przez wartość napięcia wyjściowego odpowiadającą najmniej znaczącemu bitu (1 LSB) słowa wejściowego

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

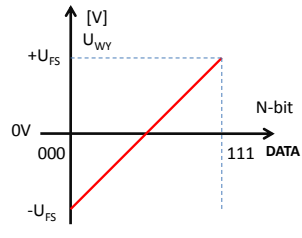
Podstawowe parametry przetwornika C/A

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

Parametry przetwornika C/A charakterystyka idealna



Charakterystyka wyjściowa
unipolarnego przetwornika C/A



Charakterystyka wyjściowa
bipolarnego przetwornika C/A

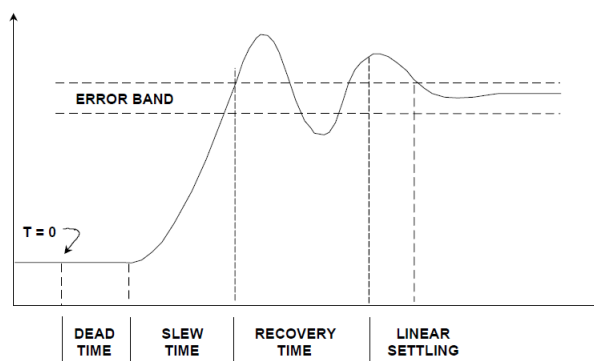
Zakresy napięć wyjściowych przetworników C/A:

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

E-3, WIEIK-PK

27

Czas ustalania przetwornika C/A



E-3, WIEIK-PK

28

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)

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.

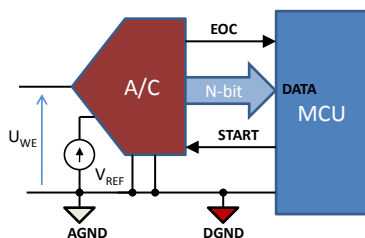
Przetwornik A/C i C/A w systemie mikroprocesorowym

- 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 μs .
- Rzadziej się spotyka mikrokontrolery z przetwornikami C/A. Można do tego celu zastosować wyjściowy kanał PWM.

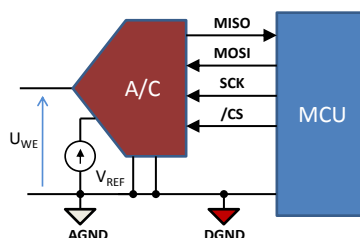
E-3, WIEIK-PK

31

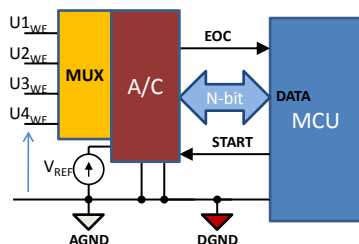
Interfejsy przetworników A/C



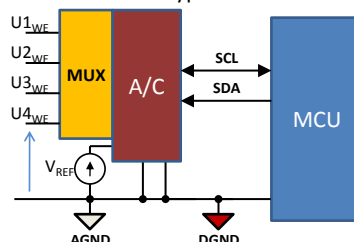
Przetwornik A/C z wyjściem równoległym



Przetwornik A/C z wyjściem szeregowym, typu SPI



Czterokanałowy przetwornik A/C z wyjściem równoległym

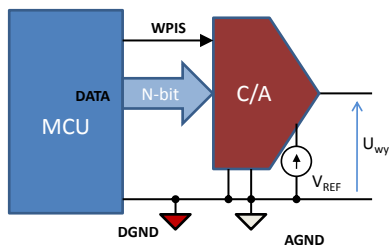


Czterokanałowy przetwornik A/C z wyjściem szeregowym typu I2C

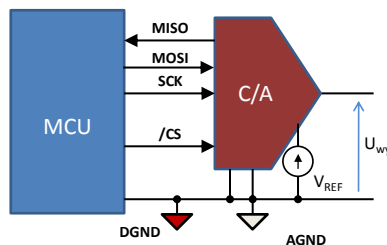
E-3, WIEIK-PK

32

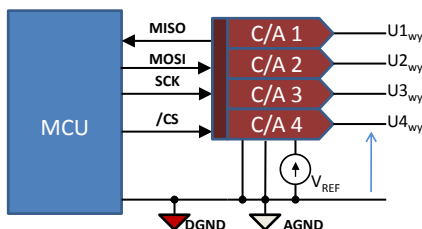
Interfejsy przetworników C/A



Przetwornik C/A z wejściem równoległym



Przetwornik C/A z wejściem szeregowym typu SPI



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

E-3, WIEIK-PK

33

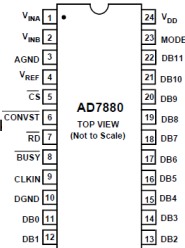
Przykłady przetworników A/C



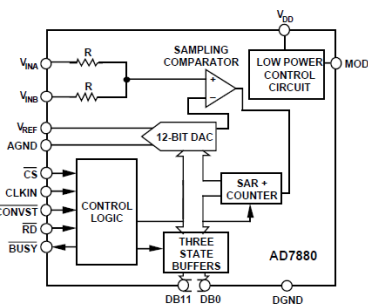
LC²MOS Single +5 V Supply,
Low Power, 12-Bit Sampling ADC

AD7880

- FEATURES**
 12-Bit Monolithic A/D Converter
 66 kHz Throughput Rate
 12 μ s Conversion Time
 3 μ 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 Pacel
- APPLICATIONS**
 Battery Powered Portable Systems
 Digital Signal Processing
 Speech Recognition and Synthesis
 High Speed Modems
 Control and Instrumentation



FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



E-3, WIEIK-PK

34

Przykłady przetworników A/C

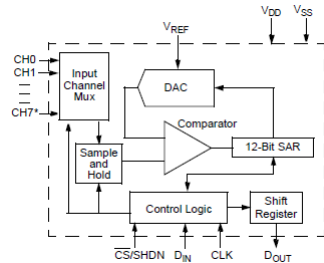


MCP3204/3208

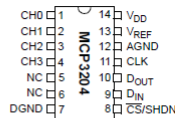
2.7V 4-Channel/8-Channel 12-Bit A/D Converters with SPI™ Serial Interface

Features

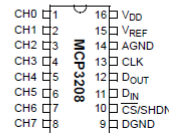
- 12-bit resolution
- ± 1 LSB max DNL
- ± 1 LSB max INL (MCP3204/3208-B)
- ± 2 LSB max INL (MCP3204/3208-C)
- 4 (MCP3204) or 8 (MCP3208) input channels
- Analog inputs programmable as single-ended or pseudo-differential pairs
- On-chip sample and hold
- SPI serial interface (modes 0,0 and 1,1)
- Single 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 μA max.
 - 400 μA 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



E-3, WIEIK-PK

35

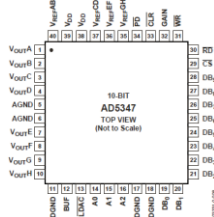
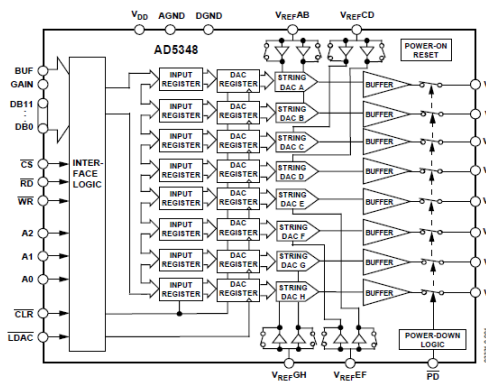
Przykłady przetworników C/A



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: 0V to V_{REF} or 0V to $2 \times V_{REF}$
- Power-on reset to 0V
- 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°C to +105°C



E-3, WIEIK-PK

36