

PRZETWARZANIE  
ANALOGOWO CYFROWE (A/C)  
|  
CYFROWO ANALOGOWE (C/A)

# Przetwarzanie analogowo cyfrowe 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 postaci liczby

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

Z – liczba

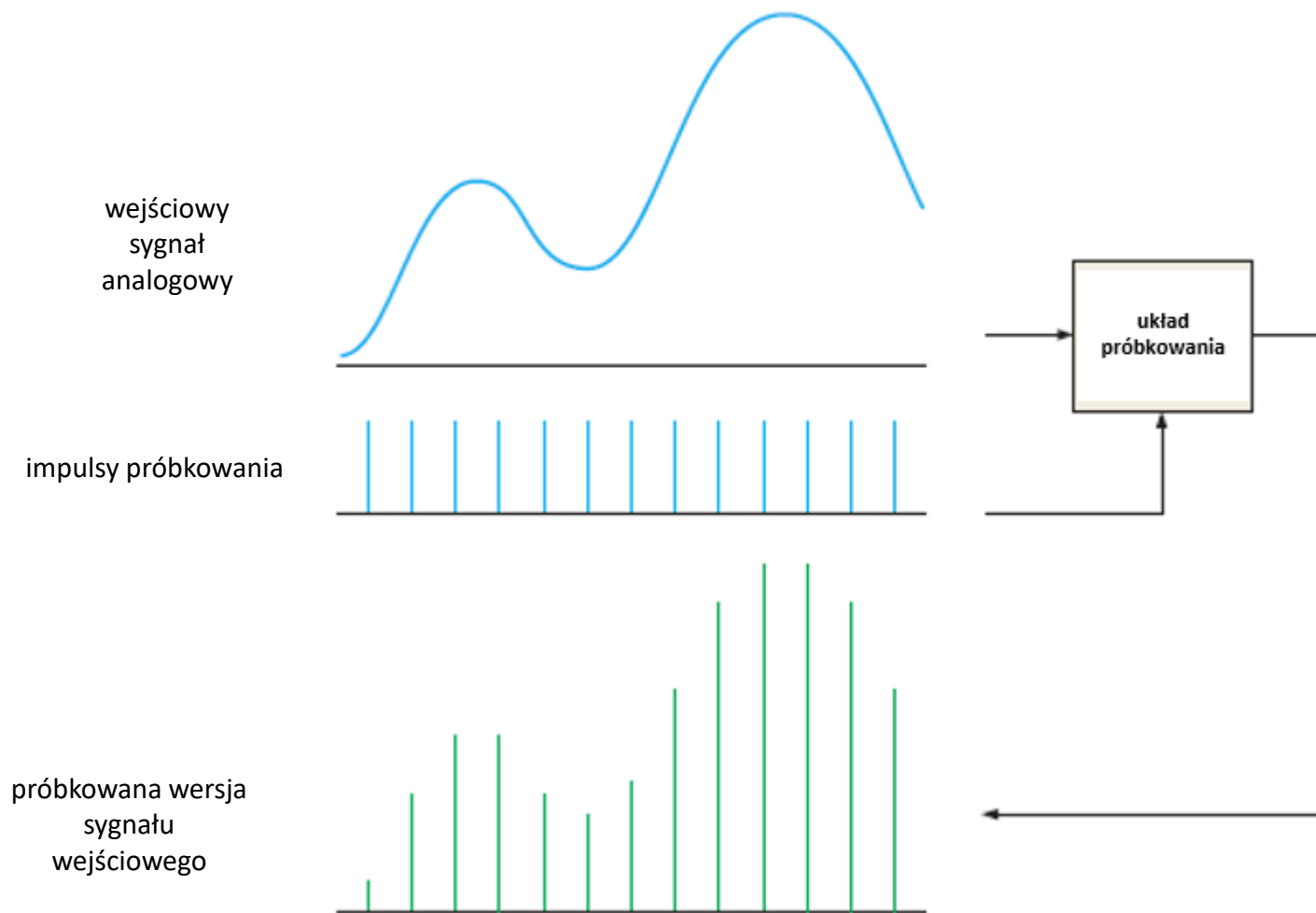
$U_{in}$  – napięcie wejściowe

$U_{LSB}$  – napięcie odpowiadające najmniej znaczącemu bitowi

## **Pierwszą operacją przy przetwarzaniu A/C jest próbkowanie**

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.



[\*]

Ilustracja procesu próbkowania

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

$$f_s \geq 2 f_N$$

## ***przykład dotyczący próbkowania***

### *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.

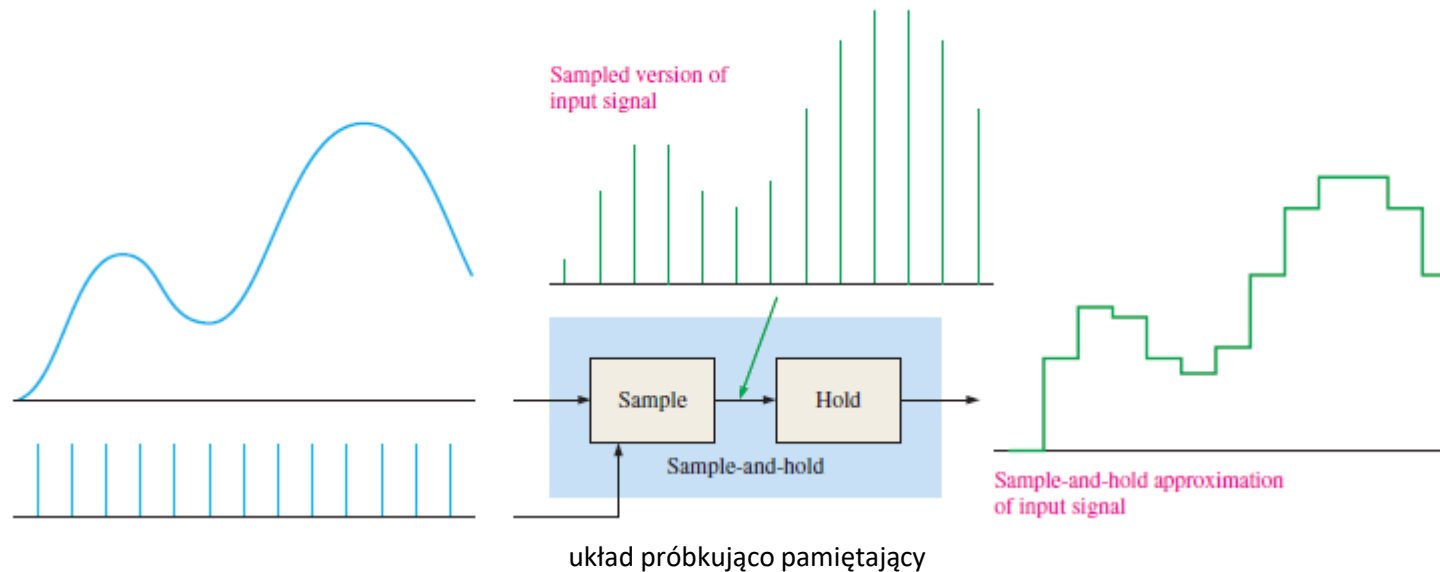
Częstotliwość próbkowania CD 44,1 kHz przetwarza częstotliwości sygnału do około 22 kHz, co przekracza specyfikację 20 kHz, która jest powszechna dla większości urządzeń audio.

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.

## Drugą operacją przy przetwarzaniu A/C jest pamiętanie

Po przefiltrowaniu i pobraniu próbek sygnał próbki należy utrzymywać na stałym poziomie do momentu pojawienia się następczej 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.



[\*]

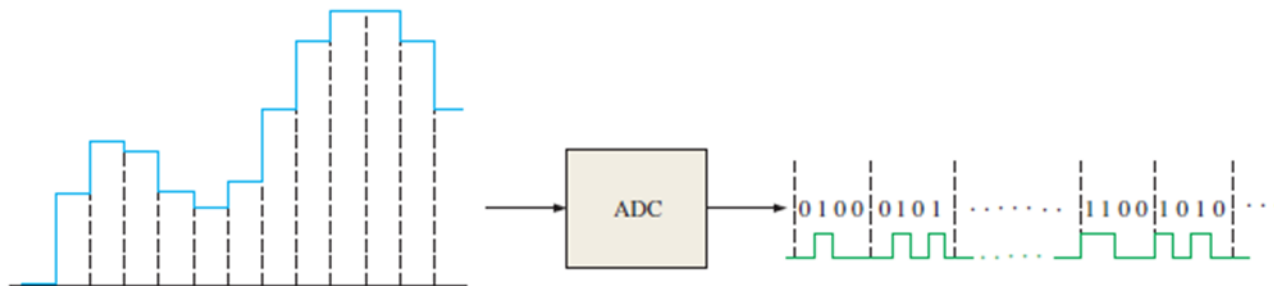
Ilustracja przedstawiająca operację próbkowania i pamiętania

## Trzecią operacją przy przekształcaniu A/C jest kwantyzacja

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.



[\*]



wykorzystanie czterech poziomów kwantyzacji

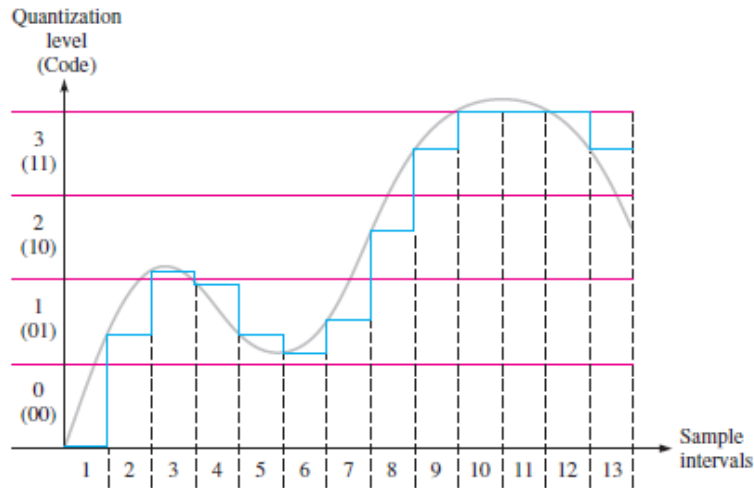


tabela kodowania

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

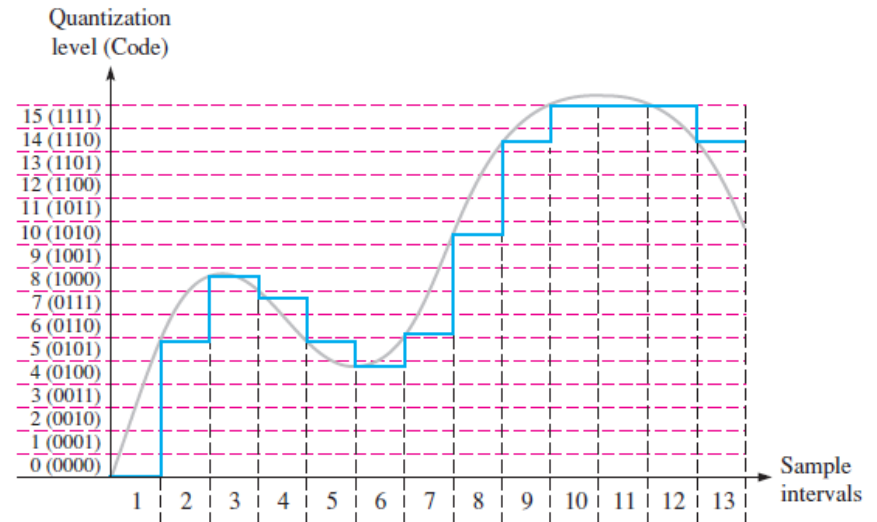


tabela kodowania

[\*]

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

# przykładowa realizacja praktyczna

## równoległy przetwornik A/C

siedem poziomów kwantyzacji

sygnał z układu próbkującego pamiętającego

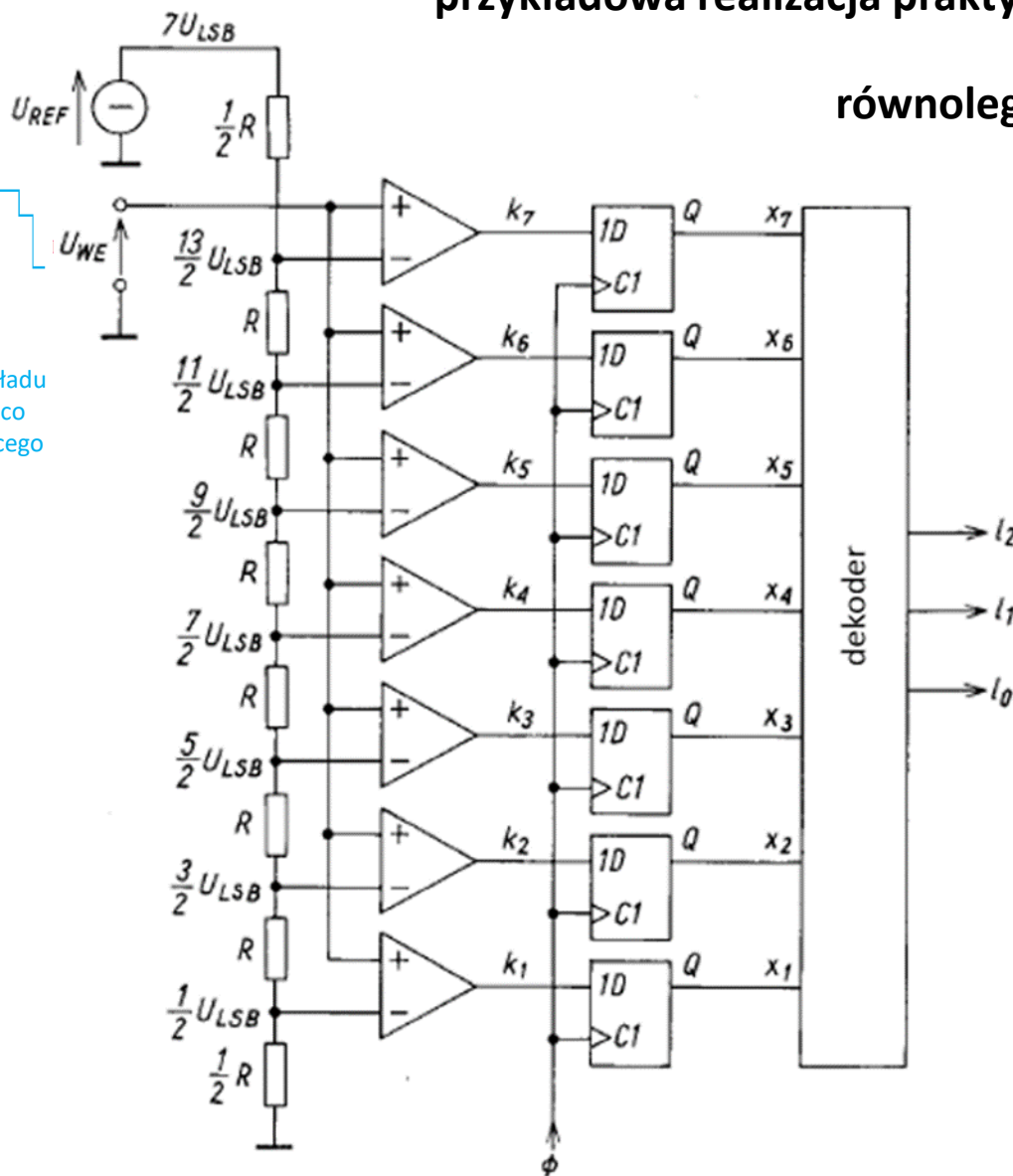
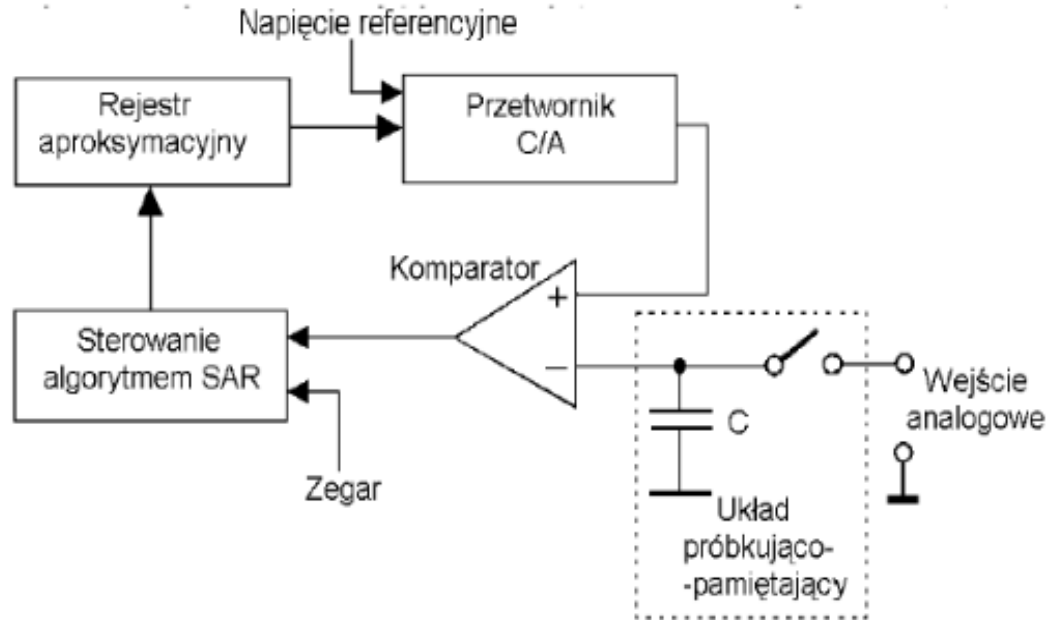


tabela kodowania

Napięcie wejściowe	Stany komparatorów	Liczba dwójkowa	Liczba dziesiętkowa
$U_{WE}/U_{LSB}$	$k_7 \ k_6 \ k_5 \ k_4 \ k_3 \ k_2 \ k_1$	$l_2 \ l_1 \ l_0$	$L$
0	0 0 0 0 0 0 0	0 0 0	0
1	0 0 0 0 0 0 1	0 0 1	1
2	0 0 0 0 0 1 1	0 1 0	2
3	0 0 0 0 1 1 1	0 1 1	3
4	0 0 0 1 1 1 1	1 0 0	4
5	0 0 1 1 1 1 1	1 0 1	5
6	0 1 1 1 1 1 1	1 1 0	6
7	1 1 1 1 1 1 1	1 1 1	7

[\*\*]

## przetwornik A/C z sukcesywną aproksymacją



Działanie:

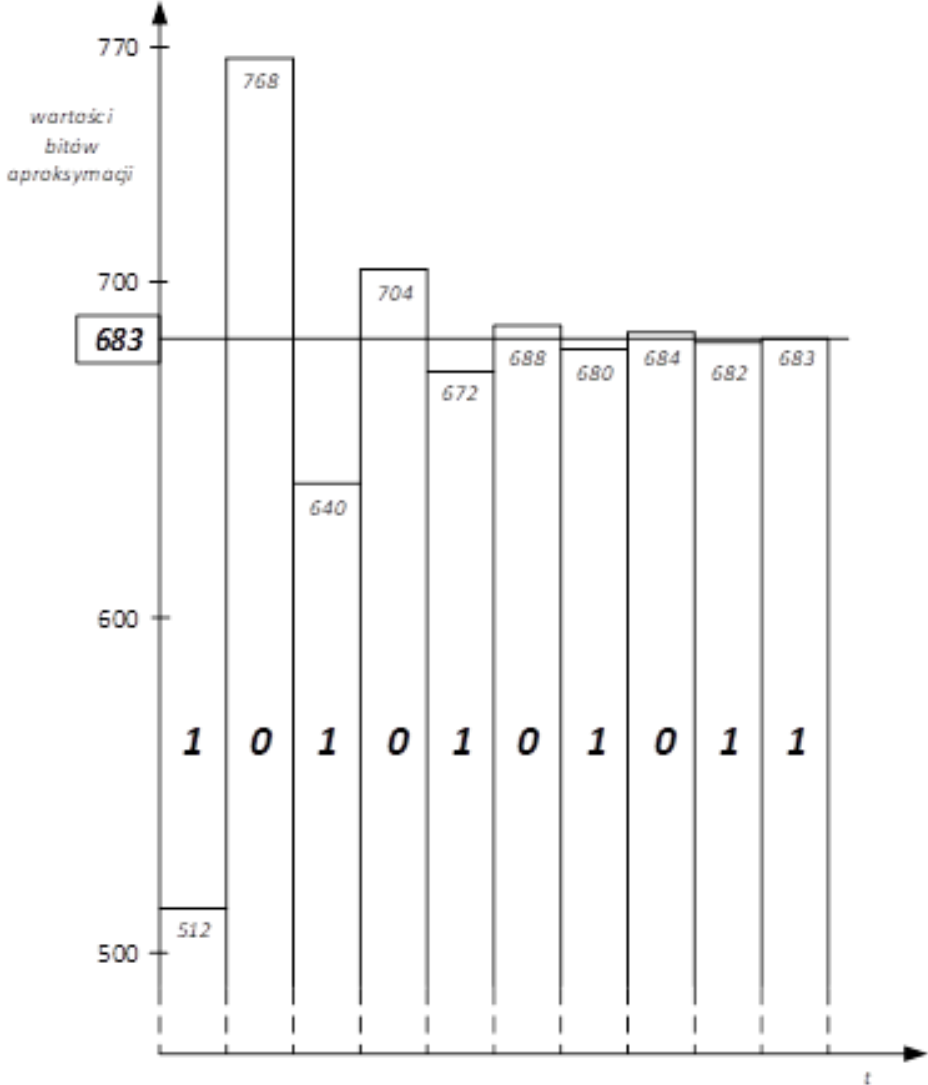
Na wejściu przetwornika znajduje się komparator.

Napięcie doprowadzane jest przez układ próbkująco pamiętający umożliwiającą chwilowy pobór wartości mierzonej.

Na drugie wejście komparatora dostarczana są kolejno wartości napięcia, które ulegając porównaniu z wartością mierzoną ustalają zapis cyfrowy odzwierciedlający wymuszenie wejściowe.

W działaniu przetwornika wykorzystywany jest algorytm zwany skrótowo SAR (*Successive Approximation Register*) podkreślając w swej nazwie rolę rejestru aproksymacji sukcesywnej będącego częścią składową układu przetwornika.

# przetwornik A/C z sukcesywną aproksymacją



**Prześledźmy to na przykładzie przetwornika 10-cio bitowego.**

Niech będzie zadana wartość wejściowa 683.

**Krok 1.**

Rejestr przetwornika jest zerowany.

Stan rejestru  $0000000000_2$

**Krok 2.1.**

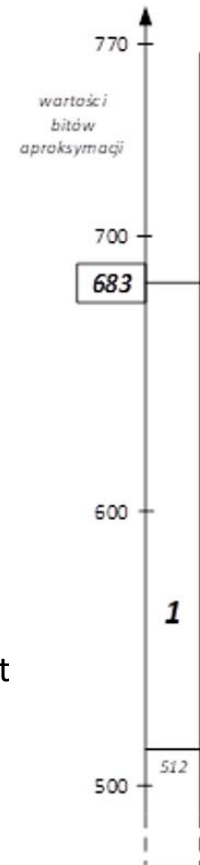
Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB to jest o wadze  $2^9$

$$2^9=512$$

Napięcie zadane jest mniejsze od mierzonego

Wynik porównania 1

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 1000000000<sub>2</sub> (w tym zapisie podkreślone bit oznaczają bity wpisane, pozostałe niepodkreślone mają stan wynikający z wyzerowania).



### Krok 2.2.

Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^8$

$$2^9 + 2^8 = 512 + 256 = 768$$

Napięcie zadane jest większe od mierzonego

Wynik porównania 0.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 100000000<sub>2</sub>

### Krok 2.3.

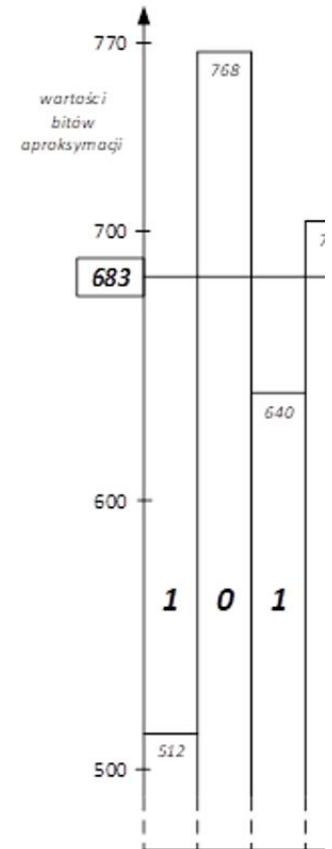
Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj o wadze  $2^7$

$$2^9 + 2^7 = 512 + 128 = 640$$

Napięcie zadane jest mniejsze od mierzonego

Wynik porównania 1

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 1010000000<sub>2</sub>



### Krok 2.4.

Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitowi który miał wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^6$

$$2^9+2^7+2^6=512+128+64=704$$

Napięcie zadane jest większe od mierzonego

Wynik porównania 0.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 101000000<sub>2</sub>

### Krok 2.5.

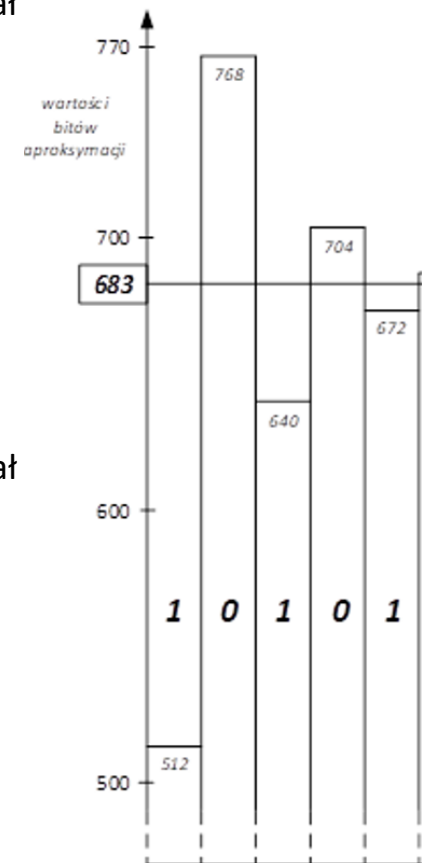
Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitowi który miał wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^5$

$$2^9+2^7+2^5=512+128+32=672$$

Napięcie zadane jest mniejsze od mierzonego

Wynik porównania 1

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 1010100000<sub>2</sub>



### Krok 2.6.

Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitom które miały wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^4$

$$2^9+2^7+2^5+2^4=512+128+32+16=688$$

Napięcie zadane jest większe od mierzonego

Wynik porównania 0.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 101010000<sub>2</sub>

### Krok 2.7.

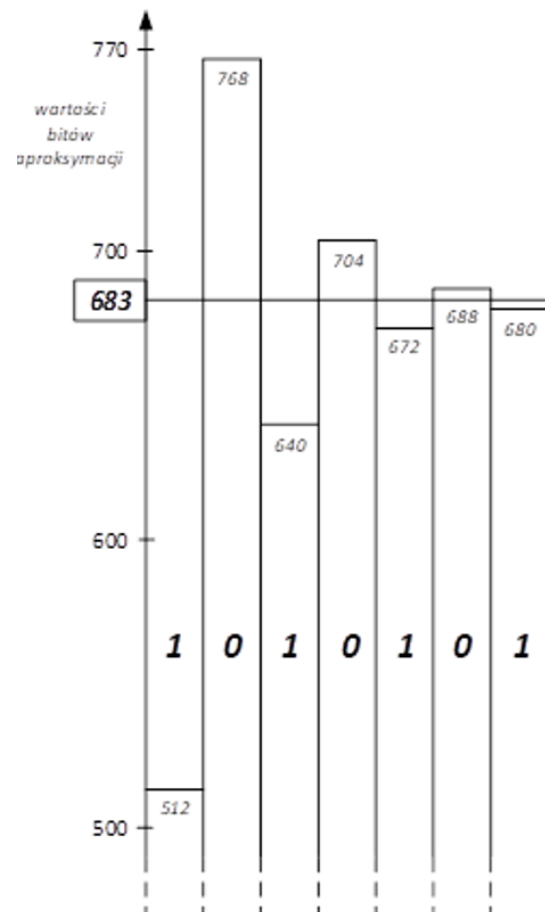
Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitom które miały wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^3$

$$2^9+2^7+2^5+2^3=512+128+32+8=680$$

Napięcie zadane jest mniejsze od mierzonego.

Wynik porównania 1.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 1010101000<sub>2</sub>





### Krok 2.8.

Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitom które miały wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^2$

$$2^9+2^7+2^5+2^3+2^2=512+128+32+8+4=684$$

Napięcie zadane jest większe od mierzonego.

Wynik porównania 0.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 1010101000<sub>2</sub>

### Krok 2.9.

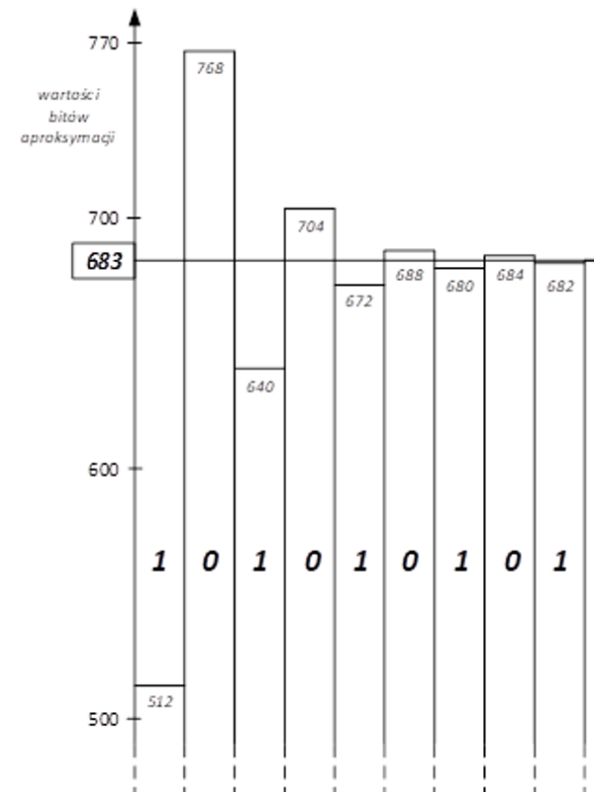
Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitom które miały wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^1$

$$2^9+2^7+2^5+2^3+2^1=512+128+32+8+4=682$$

Napięcie zadane jest mniejsze od mierzonego.

Wynik porównania 1.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 1010101010<sub>2</sub>



## Krok 2.10.

Na komparator podawana jest wartość odpowiadająca bitowi MSB, bitom które miały wynik porównania 1 i kolejnemu bitowi mniej znaczącemu tj. o wadze  $2^0$  (jest to bit najmniej znaczący LSB).

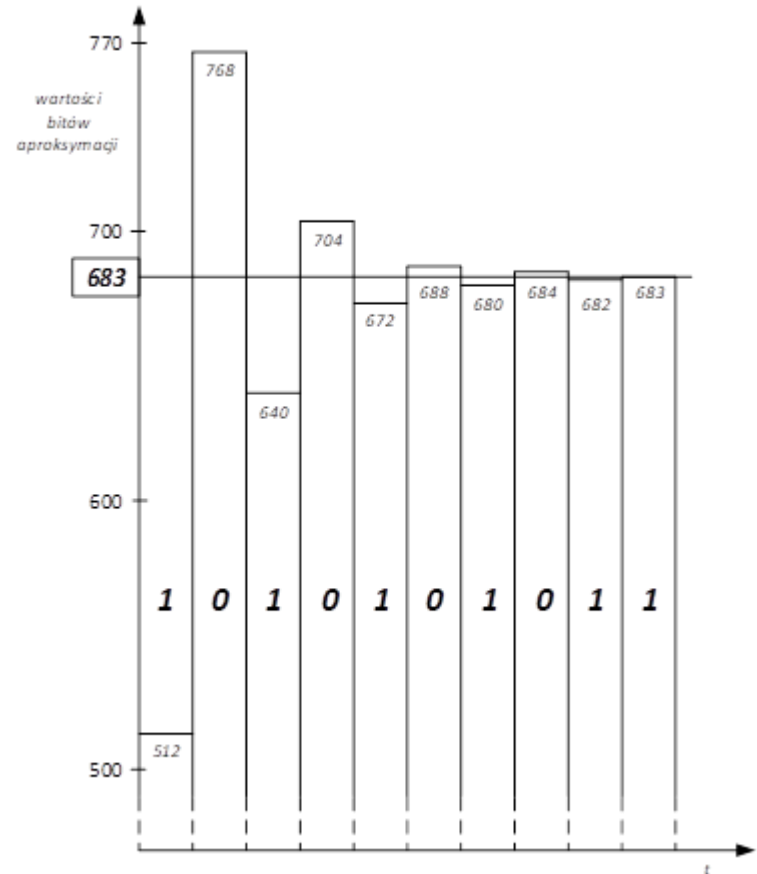
$$2^9+2^7+2^5+2^3+2^1+2^0=512+128+32+8+4+1=683$$

Napięcie zadane jest równe mierzonemu.

Wynik porównania 1.

Wynik jest wpisywany do rejestru. Stan rejestru 10101011<sub>2</sub>

Koniec procesu przetwarzania.



# Przetwarzanie cyfrowo analogowe 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

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

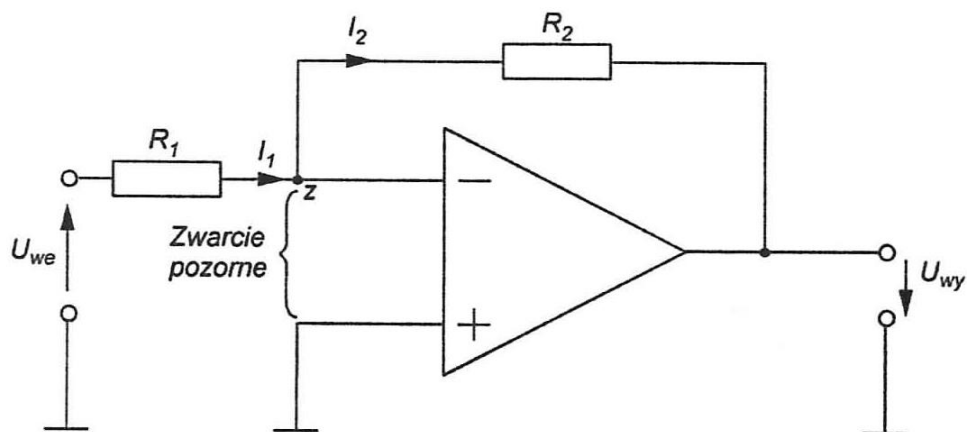
Z – liczba

$U_{\text{out}}$  – napięcie wyjściowe

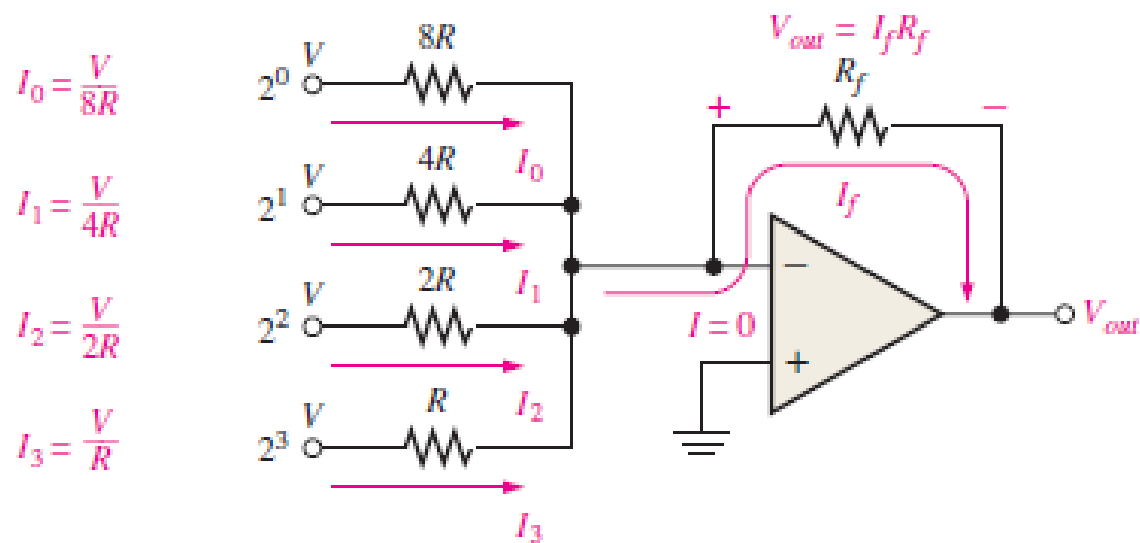
$U_{\text{LSB}}$  – napięcie odpowiadające najmniej znaczącemu bitowi

przypomnienie z wykładu Podstawy elektroniki I temat: Wzmacniacze operacyjne

### wzmacniacz odwracający



$$k_u = -\frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{R_2}{R_1}$$



[\*]

4-bitowy przetwornik cyfrowo-analogowy z ważonymi wejściami binarnymi

$$V_{out} = I_f R_f$$

## Przetwornik cyfrowo-analogowy z ważonymi wejściami binarnymi

### *opis działania*

Przetwornik wykorzystuje sieć rezystorów o wartościach rezystancji, które reprezentują wagi binarne bitów wejściowych kodu cyfrowego.

Przez każdy z rezystorów wejściowych będzie płynął prąd lub nie będzie płynął prąd. Zależy to od doprowadzanego napięcia wejściowego.

Jeśli napięcie wejściowe jest doprowadzane (binarne 1), wartość prądu zależy od wartości rezystora wejściowego i jest różna dla każdego rezystora. Jeśli napięcie wejściowe nie jest doprowadzane (binarne 0) to wtedy jest brak wymuszenia przepływu prądu.

Wszystkie prądy wejściowe sumują się i przechodzą przez  $R_f$ . Ponieważ wejście odwracające ma potencjał 0 V (zwarcie pozorne wzmacniacza operacyjnego), spadek na  $R_f$  jest równy napięciu wyjściowemu, więc  $V_{out} = I_f R_f$ .

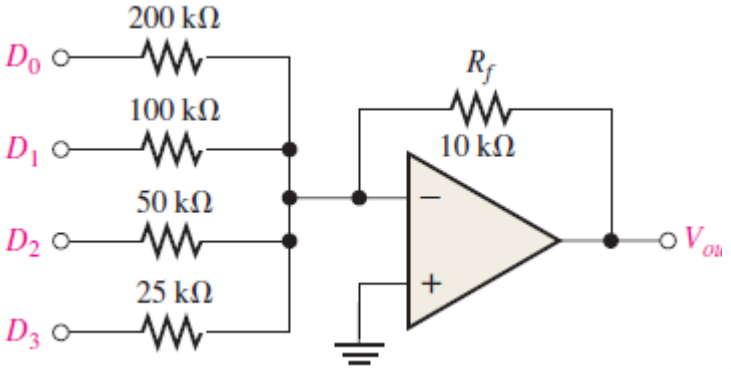
Wartości rezystorów wejściowych są tak dobrane, aby były odwrotnie proporcjonalne do binarnych wag odpowiednich bitów wejściowych.

Rezystor o najniższej wartości ( $R$ ) odpowiada najwyższemu ważonemu wejściu binarnemu ( $2^3$ ). Pozostałe rezystory są wielokrotnościami  $R$  (to jest  $2R$ ,  $4R$  i  $8R$ ) i odpowiadają binarnym wagom, odpowiednio,  $2^2$ ,  $2^1$  i  $2^0$ .

Prądy wejściowe są również proporcjonalne do wag binarnych.

Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do sumy wag binarnych, ponieważ suma prądów wejściowych płynie przez  $R_f$ .

przykład obliczeniowy przetwornika C/A z ważonymi wejściami binarnymi



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

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

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

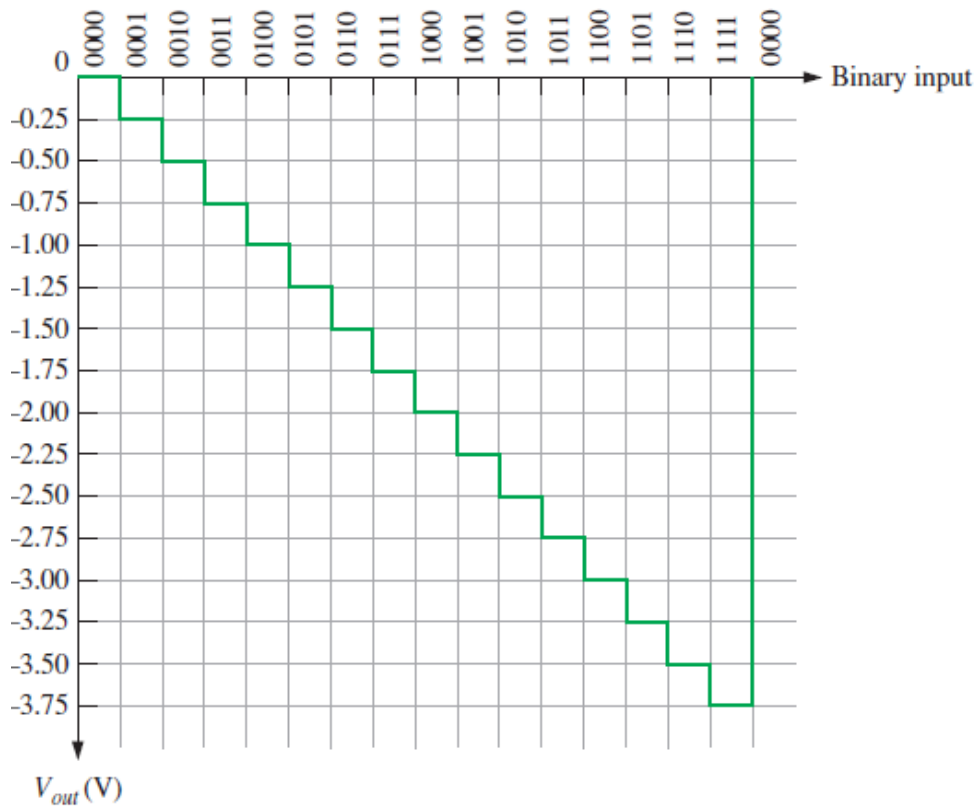
$$I_3 = \frac{5 \text{ V}}{25 \text{ k}\Omega} = 0.2 \text{ mA}$$

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

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

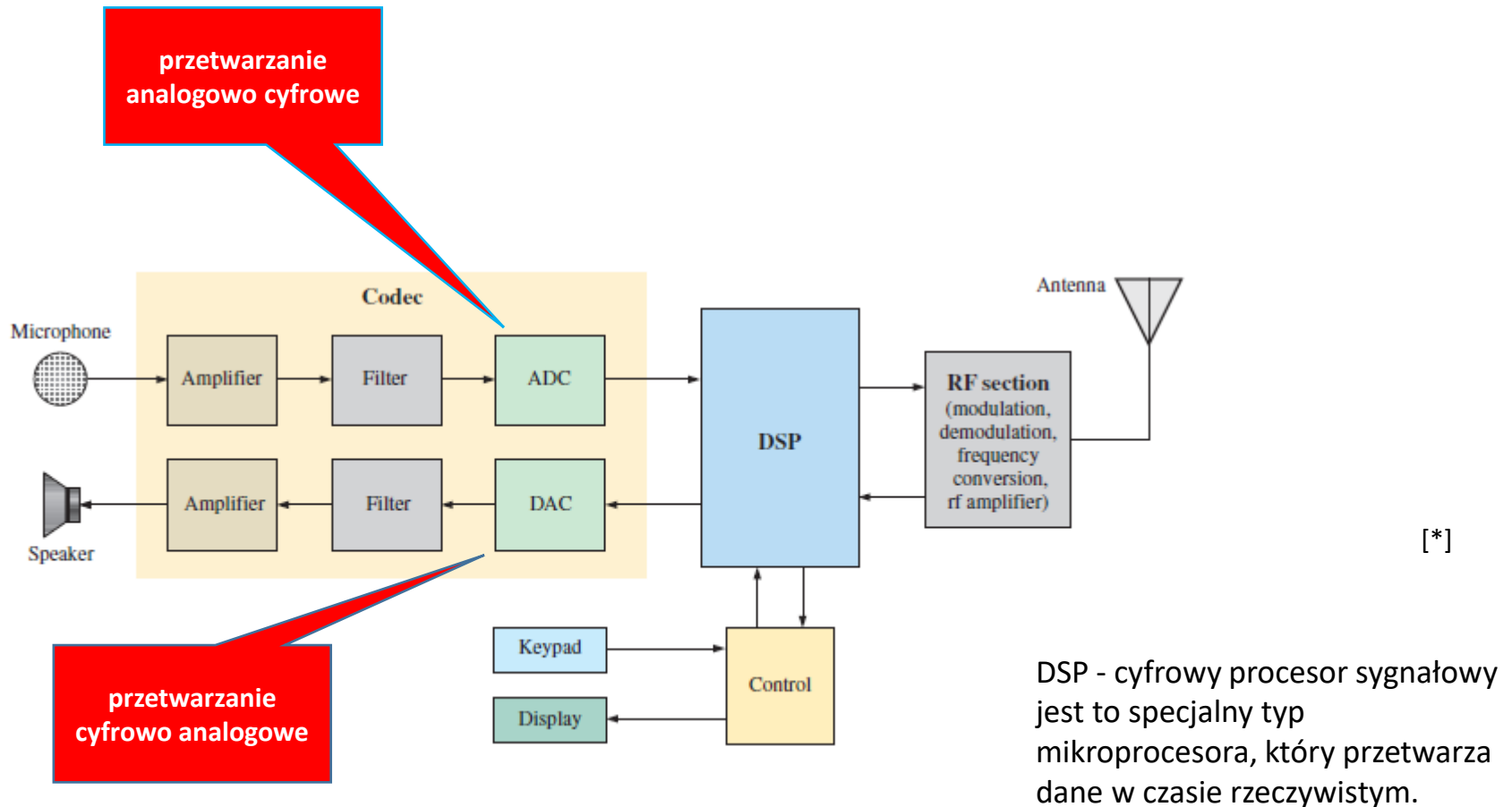
$$V_{out(D2)} = (10 \text{ k}\Omega)(-0.1 \text{ mA}) = -1 \text{ V}$$

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



[\*]

## przykład zastosowania przetwarzania A/C i C/A – telefon komórkowy



Uproszczony schemat blokowy cyfrowego telefonu komórkowego



# PRZETWARZANIE ANALOGOWO CYFROWE (A/C) | CYFROWO ANALOGOWE (C/A)

# KONIEC

[\*] Floyd T. L.: Digital Fundamentals. PEARSON

[\*\*] Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe. WNT