

Przetworniki C/A i A/C

Cel ćwiczenia:

Zapoznanie się z zasadą działania przetworników A/C i C/A.

Bibliografia:

[1] B. Pióro, M. Pióro, *Podstawy Elektroniki*, WSiP, Warszawa 2009

Wiadomości wstępne:

Przetwornik C/A (cyfrowo-analogowy) jest to układ przetwarzający dyskretny sygnał cyfrowy na równoważny mu sygnał analogowy. Przetwornik ma n wejść i jedno wyjście. Liczba wejść zależy od liczby bitów słowa podawanego na wejście przetwornika. Natomiast na jego wyjściu pojawia się informacja analogowa. Napięcie na wyjściu przetwornika jest proporcjonalne do napięcia odniesienia oraz do liczby zapisanej w kodzie dwójkowym. Wartość tego napięcia można obliczyć, korzystając ze wzoru:

$$U_{wy} = \pm U_{odn} \left(\frac{a_1}{2^1} + \frac{a_2}{2^2} + \dots + \frac{a_n}{2^n} \right),$$

w którym:

U_{odn} – napięcie odniesienia, a_1, a_2, \dots, a_n – bity wejściowe przyjmujące wartość 0 lub 1 (a_1 jest najbardziej znaczącym bitem – MSB, a_n jest najmniej znaczącym bitem – LSB). Znak napięcia wyjściowego zależy od tego, czy przetwornik C/A odwraca, czy nie odwraca fazy.

Gdy wszystkie bity wejściowe są na poziomie jedynki logicznej, wówczas:

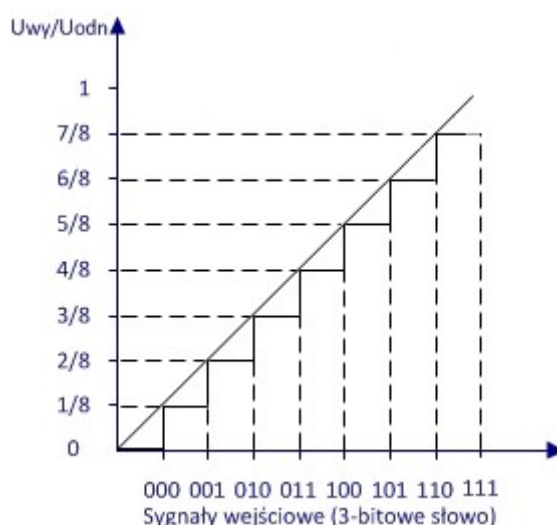
$$U_{wy} = \frac{2^n - 1}{2^n} U_{odn} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} U_{odn}.$$

Najważniejszymi parametrami przetwornika C/A są:

- rozdzielczość – najmniejsza zmiana sygnału wyjściowego

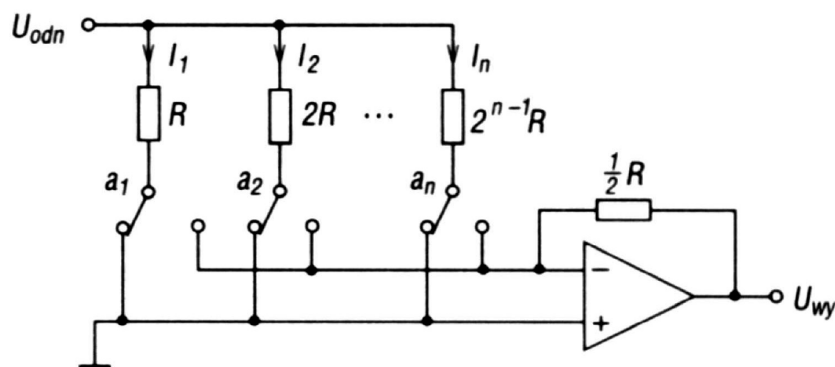
$$\Delta U = \frac{U_{odn}}{2^n}$$

- błąd bezwzględny – największa różnica między zmierzonym napięciem wyjściowym a obliczonym z powyższego wzoru,
- błąd względny – stosunek błędu bezwzględnego do wartości napięcia odniesienia.



Charakterystyka przejściowa przetwornika C/A

Najprostszą konstrukcją przetwornika C/A jest układ o przetwarzaniu prądowym. Jest to wzmacniacz sumujący zbudowany z użyciem wzmacniacza operacyjnego.



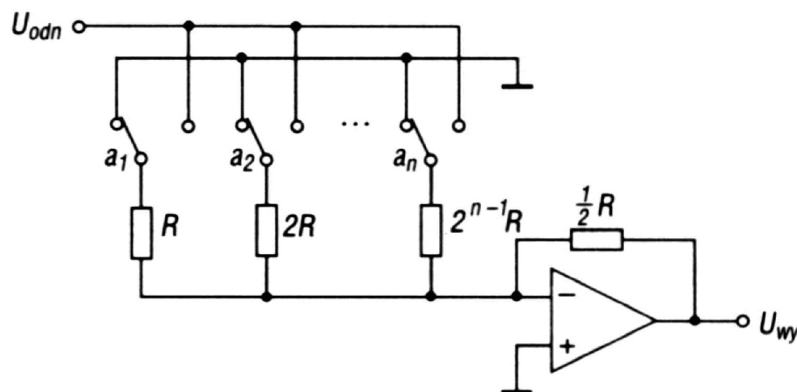
Przetwornik C/A o przetwarzaniu prądowym

Napięcie wyjściowe układu:

$$U_{wy} = -\frac{R U_{odn}}{2} \left(\frac{a_1}{R} + \frac{a_2}{2R} + \dots + \frac{a_n}{2^{n-1}R} \right).$$

Jest ono równe co do modułu spadkowi napięcia na rezystorze łączącym wyjście układu z wejściem odwracającym wzmacniacza operacyjnego. Wartość napięcia wyjściowego zależy od wartości prądu płynącego przez ten rezystor, regulowanej położeniem przełączników. Pozycja lewa przełącznika odpowiada wartości „0” danego bitu wejściowego, natomiast pozycja prawa – wartość „1”. Jeżeli przełącznik jest ustawiony w pozycji lewej, to prąd płynący w tej gałęzi spływa do masy, natomiast jeżeli jest w pozycji prawej, to prąd ten dodaje się do prądu płynącego przez rezystor w pętli sprzężenia, powodując zwiększenie spadku napięcia na nim, a tym samym zwiększenie (co do modułu) wartości napięcia wyjściowego. Przez rezystory dołączane do kluczy płynie cały czas taki sam prąd, bez względu na ich pozycję.

Modyfikacją tego rozwiązania jest układ o przetwarzaniu napięciowym.

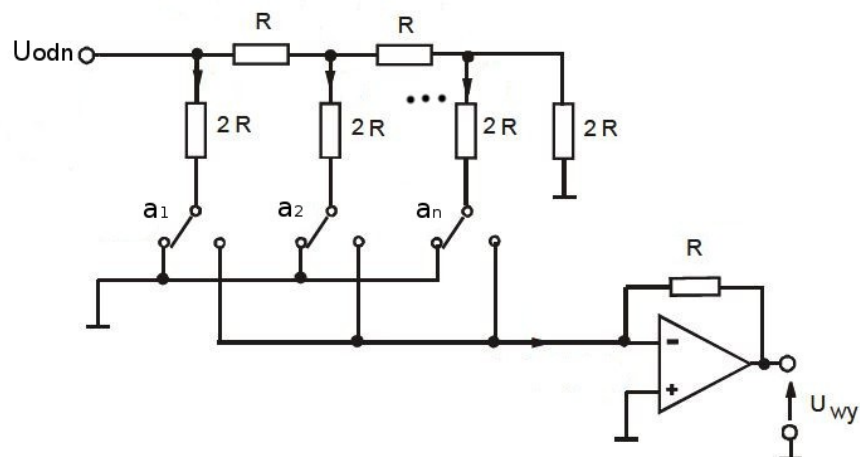


Przetwornik C/A o przetwarzaniu napięciowym

Działa on na podobnej zasadzie. Zmieniając położenie przełączników, ustala się wartość płynącego prądu płynącego w pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego. Gdy przełącznik jest dołączony do źródła napięcia odniesienia, wówczas przez rezystor płynie prąd (jak w układzie z przetwarzaniem prądowym). Gdy natomiast przełącznik jest połączony z masą, przez rezystor nie płynie prąd. Wartość napięcia wyjściowego oblicza się, korzystając ze wzoru obowiązującego dla układu z przetwarzaniem prądowym.

Wadą tego typu przełączników jest konieczność stosowania rezystorów o znacznie różniących się wartościach. Powoduje to, że przez rezystor o najmniejszej wartości płyną względnie duże prądy, co znacznie zmniejsza niezawodność działania układu.

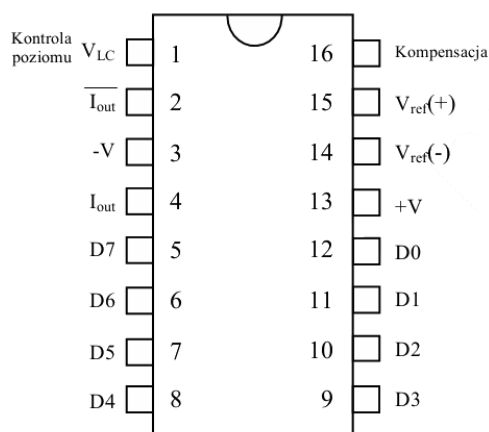
Praktyczniejszym rozwiązaniem jest przetwornik z drabinką rezystorową.



Przetwornik C/A z drabinką rezystorową

Stosunek największej do najmniejszej rezystancji wynosi w tym przypadku 2, a więc znacznie łatwiej je wykonać w postaci scalonej i uzyskuje się lepsze tolerancje względne i jednakowe zależności temperaturowe. Zasada działania układu polega na wykorzystaniu własności drabinki rezystancyjnej jako dzielnika napięcia. W każdym kolejnym węźle między rezystorami o wartości R napięcie jest dwa razy mniejsze, wobec tego prądy płynące przez kolejne rezystory w kierunku kluczy a są również dwa razy mniejsze.

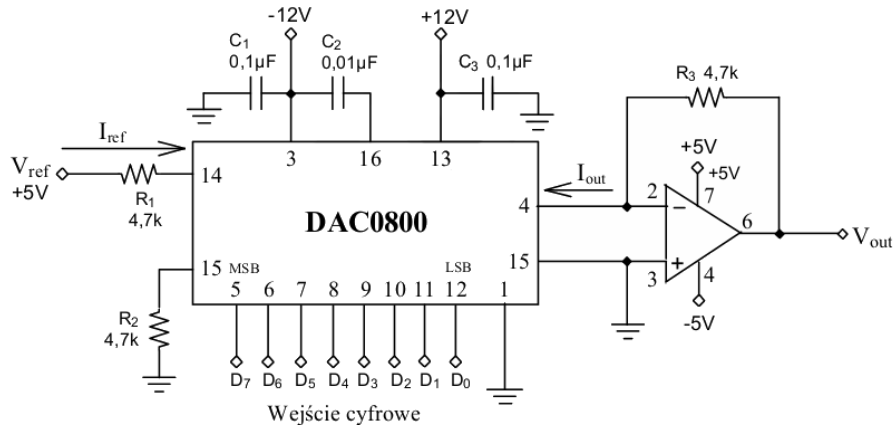
Scalony przetwornik C/A typu DAC0800 jest tanim monolitycznym 8-bitowym przetwornikiem C/A zawierającym źródło napięcia odniesienia, rezystorowy obwód drabinkowy R - $2R$ i układ kluczy tranzystorowych. Poniższy rysunek przedstawia układ jego wyprowadzeń.



Układ wyprowadzeń przetwornika DAC0800

Układ DAC0800 wymaga zasilania $\pm 4,5V$ do $\pm 18V$. Przy napięciu zasilania $\pm 5V_{DC}$ układ rozprasza $33mW$ mocy, a jego czas reakcji wynosi około $85ns$. Dzięki komplementarnym wyjściom I_{out} (pin 4) i $\overline{I_{out}}$ (pin 2) przetwornik pracować zarówno z wyjściem symetrycznym, jak i niesymetrycznym.

Na poniższym rysunku pokazano schemat elektryczny przetwornika C/A z niesymetrycznym wyjściem napięciowym opartego na układzie DAC0800 i wzmacniaczu operacyjnym $\mu A741$.



Obwód przetwornika DAC0800 z niesymetrycznym wyjściem napięciowym

Wyprowadzenie $V_{ref}(-)$ jest podłączone do masy przez rezystor R_2 , natomiast źródło dodatniego napięcia odniesienia $+5V$ jest podłączone do wejścia $V_{ref}(+)$ przez rezystor szeregowy R_1 , stąd prąd odniesienia płynący przez rezystor R_1 może być wyznaczony z zależności:

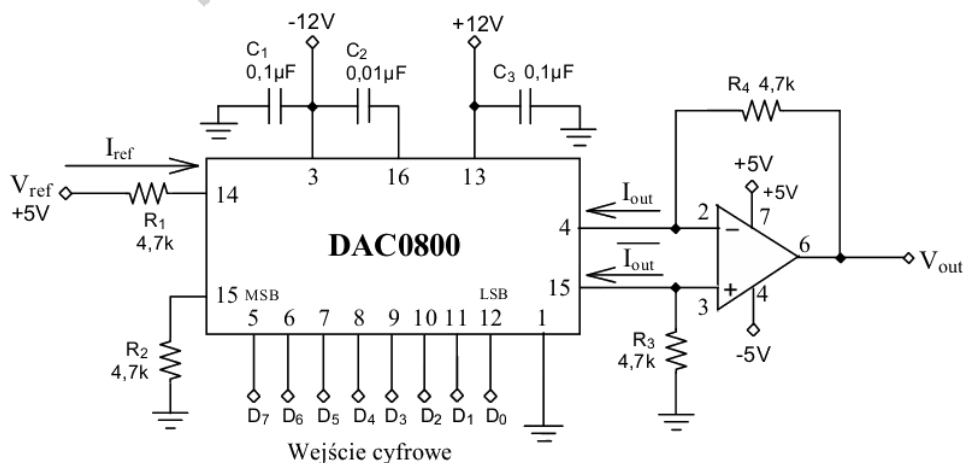
$$I_{ref} = \frac{V_{ref}}{R_1}.$$

Korzystając z tego równania, można obliczyć prąd wyjściowy I_{out} układu:

$$I_{out} \approx \frac{V_{ref}}{R_1} \left(\frac{D_7}{2} + \frac{D_6}{4} + \frac{D_5}{8} + \frac{D_4}{16} + \frac{D_3}{32} + \frac{D_2}{64} + \frac{D_1}{128} + \frac{D_0}{256} \right).$$

Prąd wyjściowy I_{out} układu jest następnie przetwarzany na napięcie wyjściowe we wzmacniaczu operacyjnym $\mu A741$. W takiej sytuacji napięcie wyjściowe V_{out} opisuje zależność:

$$V_{out} = I_{out} R_3.$$



Obwód przetwornika DAC0800 z symetrycznym wyjściem napięciowym

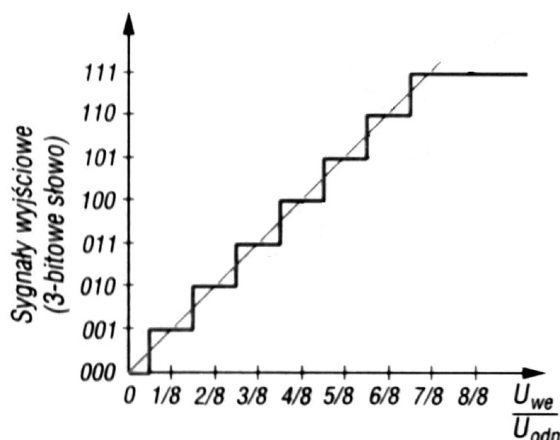
Na powyższym rysunku przedstawiono obwód przetwornika DAC0800 z napięciowym wyjściem symetrycznym. Wyprowadzenie I_{out} (pin 2) jest połączone z nieodwracającym wejściem wzmacniacza $\mu A741$ zamiast z ziemią. Napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego można obliczyć z równania:

$$V_{out} = (I_{out} - \overline{I_{out}}) R_4$$

gdzie I_{out} i $\overline{I_{out}}$ są komplementarnymi wyjściami prądowymi.

Przetwornik A/C przetwarza sygnał analogowy na odpowiadający mu dyskretny sygnał cyfrowy. Jest to układ o jednym wejściu i n wyjściach. Otrzymana w wyniku przetwarzania liczba dwójkowa jest proporcjonalna do wartości analogowego sygnału wejściowego

$$U_{we} = U_{odn} \left(\frac{a_1}{2^1} + \frac{a_2}{2^2} + \dots + \frac{a_n}{2^n} \right) .$$



Charakterystyka przejściowa przetwornika A/C

Przetworniki A/C charakteryzują trzy podstawowe parametry:

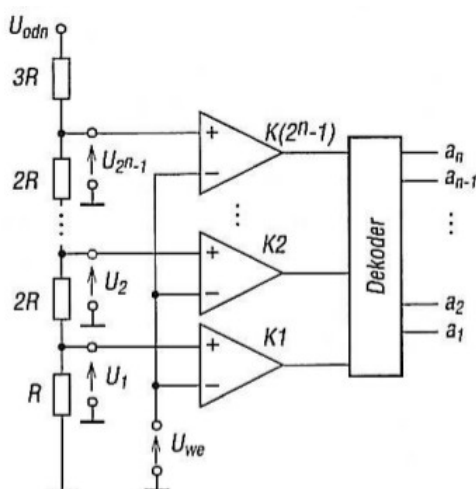
- czas konwersji (przetwarzania) – czas jaki upływa między podaniem sygnału wejściowego rozpoczynającego przetwarzanie, a pojawieniem się na wyjściu sygnału cyfrowego,
- rozdzielczość

$$\Delta U = \frac{U_{odn}}{2^n} ,$$

- błąd kwantyzacji ($\pm \Delta U/2$) – odchyłka rzeczywistej charakterystyki schodkowej od charakterystyki idealnej.

Istnieje wiele metod przetwarzania sygnału analogowego na cyfrowy. Dzieli się je na dwie grupy: metody bezpośrednie (bezpośredniego porównania i kompensacyjne) oraz metody pośrednie (czasowe i częstotliwościowe).

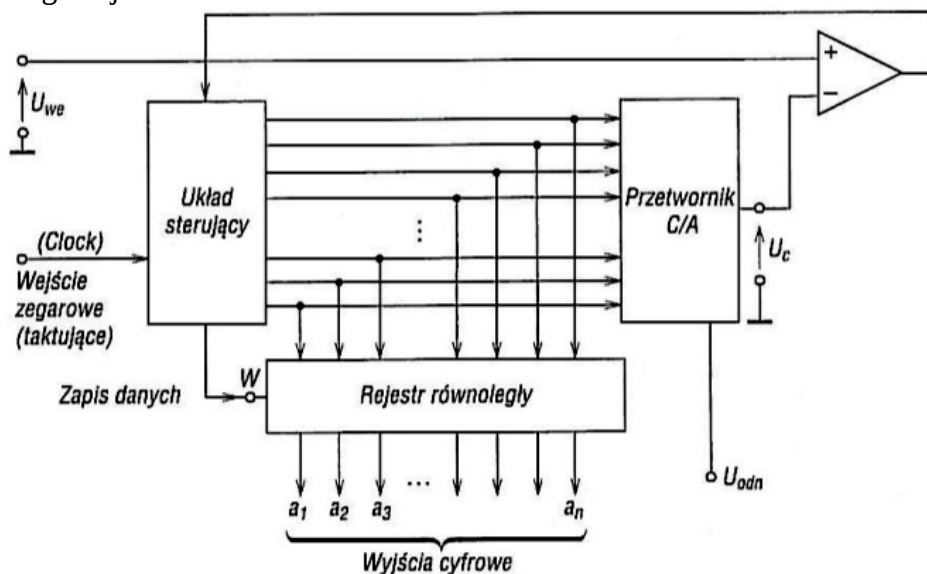
Na poniższym rysunku przedstawiono ogólny schemat układu przetwarzania sygnału metodą bezpośredniego porównania. Napięcie wejściowe jest porównywane z kolejnymi napięciami wzorcowymi (od U_1 do U_{2^n-1}).



Schemat ogólny przetwornika A/C przetwarzającego sygnał metodą bezpośredniego porównania.

Przetworniki tego typu charakteryzują się bardzo krótkim czasem pomiaru, czyli bardzo dużą szybkością przetwarzania. Stosuje się je między innymi do pomiarów impulsowych. Podstawową wadą tych przetworników jest konieczność stosowania dużej liczby komparatorów, co wiąże się z dużym kosztem takiego przetwornika.

Nieco wolniejsze są układy przetwarzające sygnały analogowe na sygnały cyfrowe metodą kompensacji wagowej.

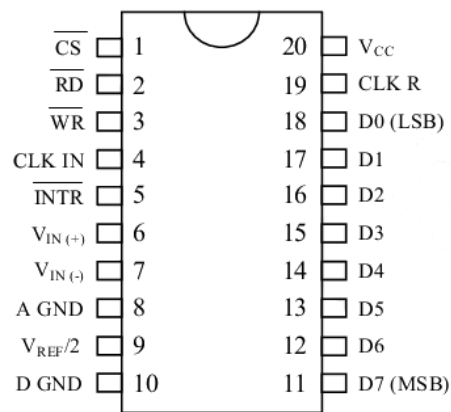


Przetwornik A/C przetwarzający sygnał metodą kompensacji wagowej

Układ taki składa się z przetwornika C/A, komparatora i układu sterującego. Układ sterujący ustawia dane na wejściu przetwornika C/A. Są one przetwarzane na sygnał napięciowy i w tej postaci porównywane z napięciem wejściowym. Jeżeli przyjmimy, że maksymalnym napięciem przetwarzanym przez przetwornik jest napięcie U_{odn} , to poziomowi „1” na najbardziej znaczącym bicie a_1 przypisuje się napięcie $2^{-1}U_{odn}$, poziomowi „1” na pozycji a_2 – napięcie $2^{-2}U_{odn}$, a poziomowi „1” na pozycji a_n – napięcie $2^{-n}U_{odn}$. Układ sterujący działa według następującego algorytmu:

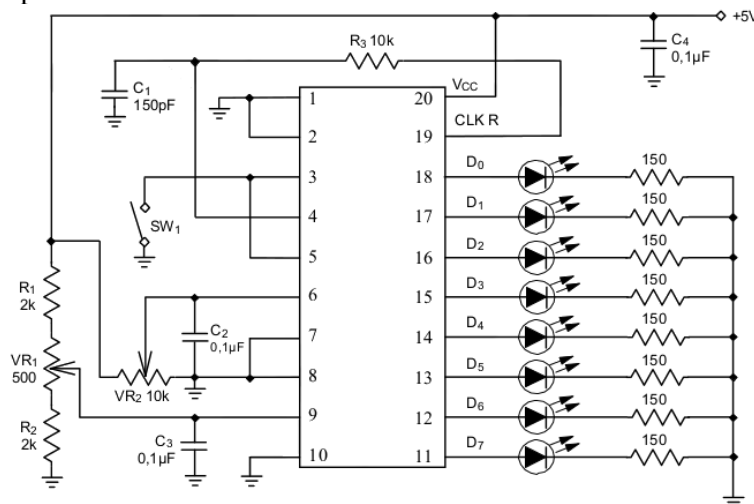
1. Na wejściu a_1 ustawia stan „1”, a na innych wejściach – stan „0”. Jeżeli napięcie na wyjściu przetwornika C/A jest większe od napięcia wejściowego, to na wejściu a_1 zmienia stan na „0”, w przeciwnym wypadku pozostaje na nim stan „1”.
2. Na wejściu a_2 ustawia stan „1”, a na pozostałych nie zmienia stanu. Jeżeli napięcie na wyjściu przetwornika C/A jest większe od napięcia wejściowego, to stan wejścia a_2 zmienia stan na „0”.
3. Na wejściu a_3 ustawia stan „1”, a na pozostałych nie zmienia stanu. Jeżeli napięcie na wyjściu przetwornika C/A jest większe od napięcia wejściowego, to stan wejścia a_3 zmienia stan na „0”.
4. itd.

Scalony przetwornik analogowo-cyfrowy typu ADC0804 jest 8-bitowym przetwornikiem A/C. Podstawowymi parametrami układu są: zasilanie niesymetryczne +5V, zakres analogowego napięcia wejściowego 0V do 5V, moc rozpraszana 15mW i 100μs czas konwersji. Ponieważ rozdzielczość układu ADC0804 wynosi 8 bitów, analogowy zakres wejściowy jest dzielony na 256 (28) dyskretnych przedziałów kwantyzacji, zatem przy zakresie napięcia wejściowego wynoszącym 5V, szerokość przedziału jest równa $5/256 = 0,01953V$. Wyjściowe słowo cyfrowe 00000000 (00H) odpowiada zatem napięciu 0,00V, natomiast słowo 11111111 (FFH) – napięciu 4,9805V. Bezwzględny (nie podlegający regulacji) błąd przetwarzania układu, zawierający błąd kwantyzacji, błąd przesunięcia i błąd nieliniowości wynosi ± 1 LSB lub 0,01953V.



Układ wyprowadzeń przetwornika ADC0804

Poniższy rysunek przedstawia schemat elektryczny obwodu przetwornika A/C z układem ADC0804. Sygnał analogowy podawany jest na wejście $V_{IN(+)}$, a jego amplituda regulowana jest potencjometrem VR_2 . Wejście $V_{IN(-)}$ podłączone jest do masy układu. Napięcie odniesienia doprowadzane jest do wejścia $V_{REF/2}$ (pin 9) z zasilania +5V przez dzielnik napięcia złożony z rezystorów R_1 i R_2 oraz potencjometru VR_1 . Iloczyn pojemności C_1 i rezystancji R_3 ustala częstotliwość zegara układu. Wyprowadzenia \overline{CS} (pin 1) i \overline{RD} (pin 2) są bezpośrednio zwarte do masy, aby uaktywnić przetwornik.



Obwód przetwornika A/C z układem ADC0804

Zadania do wykonania:

- Wymagane wyposażenie

Moduł KL-96001

Moduł KL-94001

Multimetr cyfrowy

- Badanie przetwornika C/A z wejściem niesymetrycznym:
 - W module KL-94001 zlokalizować obwód przetwornika cyfrowo-analogowego DAC0800 z wyjściem niesymetrycznym. Wpiąć zworę do punktu J1, aby połączyć wyjście I_{out} (pin 4) układu DAC0800 z wejściem wzmacniacza operacyjnego $\mu A741$ (pin 2).
 - Obliczyć i wpisać wartość rozdzielczości przetwornika.
 - Przełącznikami od D_0 do D_7 ustawić słowo wejściowe na 0000 0000. („0” = GND; „1” = +5V)

- Obliczyć i zanotować w poniższej tabeli prąd wyjściowy I_{out} i napięcie wyjściowe V_{out} przetwornika.
- Usunąć zworkę z punktu J1. Zmierzyć prąd I_{out} , włączając multimetr między wyjście układu DAC0800 i wejście układu $\mu A741$ (w miejsce zworki J1). Wyniki zanotować w tabeli.
- Odłączyć multimetr i ponownie wpiąć zworkę do punktu J1. Zmierzyć multimetrem napięcie V_{out} na wyjściu wzmacniacza operacyjnego (O/P) i wyniki zanotować w tabeli.
- Zgodnie z kodami wejściowymi wyszczególnionymi w tabeli zmieniać położenie kluczy D_0 do D_7 i dla każdego słowa wejściowego powtórzyć pomiary prądu I_{out} i napięcia V_{out} . Wyniki wpisać do tabeli.

Rozdzielczość przetwornika =

Wejście cyfrowe $D_7 D_6 D_5 D_4 D_3 D_2 D_1 D_0$	Wyjście analogowe			
	V_{out} [V]		I_{out} [μA]	
	obliczone	zmierzone	obliczone	zmierzone
0 0 0 0 0 0 0 0				
0 0 0 0 0 0 0 1				
0 0 0 0 0 0 1 0				
0 0 0 0 0 1 0 0				
0 0 0 0 1 0 0 0				
0 0 0 1 0 0 0 0				
0 0 1 0 0 0 0 0				
0 1 0 0 0 0 0 0				
1 0 0 0 0 0 0 0				
1 1 1 1 1 1 1 1				

- Badanie charakterystyki przetwornika C/A z wejściem niesymetrycznym:
 - Zgodnie z powyższą procedurą przeprowadzania obliczeń i pomiarów uzupełnić poniższą tabelę:

$D_7 D_6 D_5 D_4 D_3 D_2 D_1 D_0$	Wyjście analogowe	
	V_{out} [V]	
	obliczone	zmierzone
0 0 0 0 0 0 0 0		
0 0 0 0 0 0 0 1		
0 0 0 0 0 0 1 0		
0 0 0 0 0 0 1 1		
0 0 0 0 0 1 0 0		
0 0 0 0 0 1 0 1		
0 0 0 0 0 1 1 0		
0 0 0 0 0 1 1 1		

- Na podstawie powyższej tabeli narysować na jednym wykresie fragmenty charakterystyk przejściowych przetwornika C/A – idealnej i rzeczywistej.
- Badanie przetwornika C/A z wejściem symetrycznym:
 - W module KL-94001 zlokalizować obwód przetwornika cyfrowo-analogowego DAC0800 z wyjściem symetrycznym. Wpiąć zworki do punktów J1 i J2.
 - Obliczyć i wpisać wartość rozdzielczości przetwornika.
 - Przełącznikami od D0 do D7 ustawić słowo wejściowe na 0000 0000. („0” = GND; „1” = +5V)
 - Obliczyć i zanotować w poniższej tabeli wartości napięcia wyjściowego V_{out} przetwornika.
 - Za pomocą multimetru zmierzyć napięcie wyjściowe V_{out} układu. Wynik pomiaru zanotować w tabeli.
 - Usunąć zworkę z punktu J1. Zmierzyć prąd I_{out} , włączając multimetr między gniazda wężła J1. Wynik pomiaru zanotować w tabeli.
 - Usunąć zworkę z punktu J2 i wpiąć go do punktu J1. Zmierzyć prąd $\overline{I_{out}}$, włączając multimetr między gniazda wężła J2. Wynik pomiaru zanotować w tabeli.
 - Obliczyć wartość sumy I_{out} i $\overline{I_{out}}$ i wynik obliczenia wpisać do tabeli.
 - Zgodnie z kodami wejściowymi wyszczególnionymi w tabeli zmieniać położenie kluczy D₀ do D₇ i dla każdego słowa wejściowego powtórzyć prądów I_{out} oraz $\overline{I_{out}}$ i napięcia V_{out} . Wyniki wpisać do tabeli.

Rozdzielczość przetwornika =

Wejście cyfrowe								Wyjście analogowe				
D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀	obliczone	zmierzone			
								V _{out} [V]	V _{out} [V]	I _{out} [μA]	$\overline{I_{out}}$ [μA]	I _{out} + $\overline{I_{out}}$ [μA]
0	0	0	0	0	0	0	0					
0	0	0	0	0	0	0	1					
0	0	0	0	0	0	1	0					
0	0	0	0	0	1	0	0					
0	0	0	0	1	0	0	0					
0	0	0	1	0	0	0	0					
0	0	1	0	0	0	0	0					
0	1	0	0	0	0	0	0					
1	0	0	0	0	0	0	0					
1	1	1	1	1	1	1	1					

- Badanie przetwornika A/C:
 - W module KL-94001 zlokalizować obwód przetwornika A/C z układem ADC0804 i włączyć zasilanie.
 - Multimetrem mierzyć napięcie na wejściu $V_{ref}/2$ (pin 9), powoli regulując potencjometrem VR₁ do uzyskania wartości 2,5V. W ten sposób zostaje ustawiony zakres analogowego napięcia wejściowego 0V do 5V.
 - Mierzając napięcie na wejściu analogowym układu (pin 6), powoli regulować

potencjometrem VR_2 do uzyskania odczytu 0V.

- Wpiąć zworkę do punktu J1, aby zablokować stan wyjść cyfrowych. Odczytać stan wyjść na podstawie obserwacji diod LED i wynik wpisać do poniższej tabeli.
- Wyjąć zworkę z punktu J1. Stan wyjść cyfrowych będzie się zmieniał w zależności od analogowego napięcia wejściowego.
- Precyzyjnie regulując potencjometrem VR_2 , ustawiać kolejno wartości napięcia wejściowego zgodnie z tabelą. Wyniki wpisać do tabeli.

Rozdzielczość przetwornika =

Analogowe napięcie wejściowe [V]	Wyjście cyfrowe			
	Wartość przewidywana		Wartość zmierzona	
	Binarna	Heksadecymalna	Binarna	Heksadecymalna
0,0				
0,5				
1,0				
1,5				
2,0				
2,5				
3,0				
3,5				
4,0				
4,5				
5,5				

- Badanie charakterystyki przetwornika A/C:
 - Multimetrem mierzyć napięcie na wejściu $V_{ref}/2$ (pin 9), powoli regulując potencjometrem VR_1 do uzyskania wartości 2,5V. W ten sposób zostaje ustawiony zakres analogowego napięcia wejściowego 0V do 5V.
 - Mierzając napięcie na wejściu analogowym układu (pin 6), powoli regulować potencjometrem VR_2 do uzyskania odczytu 0V.
 - Wpiąć zworkę do punktu J1, aby zablokować stan wyjść cyfrowych. Odczytać stan wyjść na podstawie obserwacji diod LED i wynik wpisać do poniższej tabeli.
 - Wyjąć zworkę z punktu J1. Stan wyjść cyfrowych będzie się zmieniał w zależności od analogowego napięcia wejściowego.
 - Precyzyjnie regulując potencjometrem VR_2 , ustawiać kolejno wartości wyjściowe podane w tabeli. Zmierzyć najniższe napięcie wejściowe i wpisać do tabeli.

Wejście analogowe		Wyjście cyfrowe							
Vout [V]									
obliczone	zmierzone	D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀
		0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	1
		0	0	0	0	0	0	1	0
		0	0	0	0	0	0	1	1
		0	0	0	0	0	1	0	0
		0	0	0	0	0	1	0	1
		0	0	0	0	0	1	1	0
		0	0	0	0	0	1	1	1

- Na podstawie powyższej tabeli narysować na jednym wykresie fragmenty charakterystyk przejściowych przetwornika C/A – idealnej i rzeczywistej.

Sprawozdanie powinno zawierać:

- Opracowanie wyników pomiarów przetwornika C/A;
- Przykładowe obliczenia;
- Charakterystykę przejściową, idealną oraz rzeczywistą, przetwornika C/A z niesymetrycznym wejściem z analizą wyników;
- Omówienie błędów skalowania, przesunięcia oraz nieliniowości na podstawie charakterystyki przejściowej przetwornika C/A z niesymetrycznym wejściem;
- Opracowanie wyników pomiarów przetwornika A/C;
- Przykładowe obliczenia;
- Charakterystykę przejściową, idealną oraz rzeczywistą, przetwornika A/C z analizą wyników;
- Omówienie błędów skalowania, przesunięcia oraz nieliniowości na podstawie charakterystyki przejściowej przetwornika A/C;
- Omówienie etapów przetwarzania analogowo-cyfrowego (próbkowania, kwantyzacji i kodowania);
- Omówienie definicji częstotliwości próbkowania;
- Zastosowania przetworników C/A i A/C.