

Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo- analogowe

14.1. PRZETWORNIKI C/A

Przetwornik cyfrowo-analogowy (ang. *Digital-to-Analog Converter*) 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 (np. dla słowa trzybitowego – trzy wejścia a_1, a_2, a_3). Natomiast na jego wyjściu pojawia się informacja analogowa (np. w postaci napięcia). Napięcie na wyjściu przetwornika jest proporcjonalne do napięcia odniesienia oraz do liczby (n -bitowe słowo) 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, współczynniki $a_1, \dots, a_n$ – bity wejściowe przyjmujące wartość 0 lub 1.

Bit a_1 , jest nazywany najbardziej znaczącym bitem – **MSB** (ang. *Most Significant Bit*), bit a_n – najmniej znaczącym bitem – **LSB** (ang. *Least Significant Bit*). Znak napięcia wyjściowego zależy od tego, czy przetwornik C/A odwraca czy nie odwraca fazy.

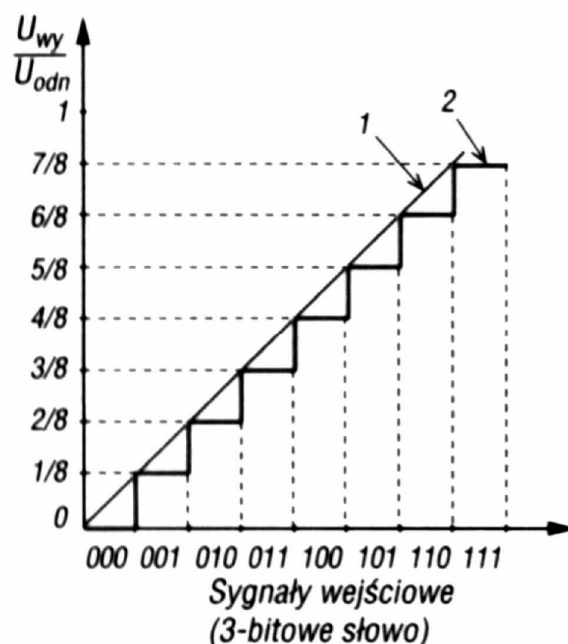
Najważniejszymi parametrami przetwornika C/A są:

- **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.

Na rysunku 14.1 przedstawiono idealną i rzeczywistą charakterystykę przetwornika C/A dla słowa trzybitowego.



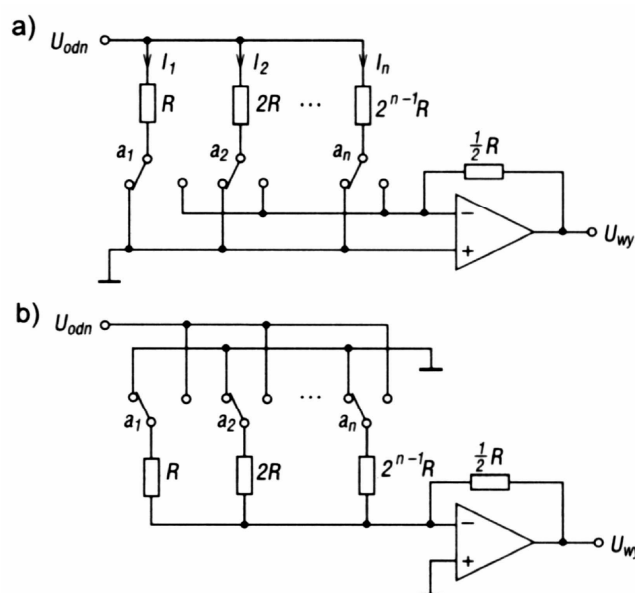
Rys. 14.1. Charakterystyka przejściowa przetwornika C/A.
1 – idealna, 2 – rzeczywista.

Najprostszą konstrukcją przetwornika C/A jest układ o przetwarzaniu prądowym. Jest to wzmacniacz sumujący zbudowany z użyciem wzmacniacza operacyjnego (rys. 14.2a).

Napięcie wyjściowe układu ma postać:

$$U_{wy} = -\frac{RU_{odn}}{2} \left(\frac{a_1}{R} + \frac{a_2}{2R} + \frac{a_3}{4R} + \dots + \frac{a_n}{2^{n-1}R} \right);$$

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 (kluczy). Pozycja lewa przełącznika odpowiada wartości **0** danego bitu wejściowego, natomiast pozycja prawa odpowiada wartości **1**. Jeżeli przełącznik jest ustawiony w lewej pozycji, to prąd płynący w tej gałęzi spływa do masy, natomiast jeżeli jest w prawej pozycji, 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 dołączone do kluczy płynie cały czas taki sam prąd, bez względu na ich pozycję.

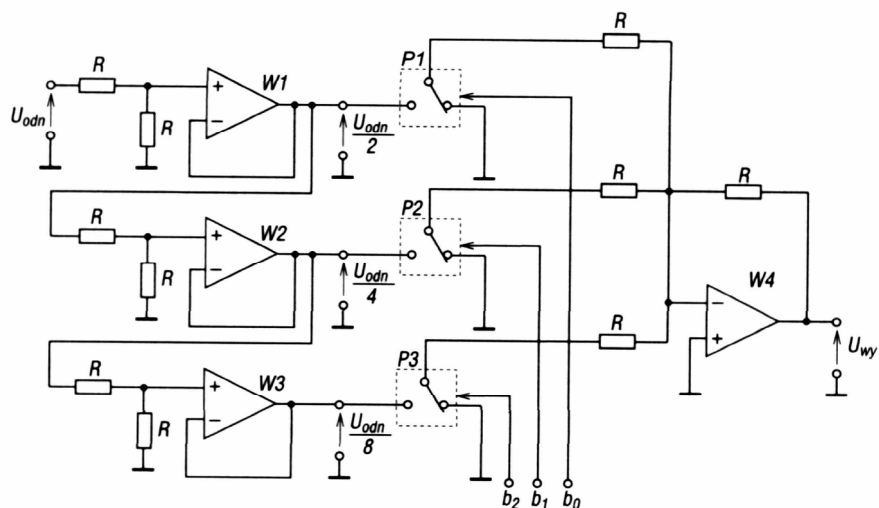


Rys. 14.2. Przetwornik C/A o przetwarzaniu:
a) prądowym, b) napięciowym.

Modyfikacją tego rozwiązania jest układ o przetwarzaniu napięciowym pokazany na rys. 14.2b. Działa on na podobnej zasadzie. Zmieniając położenie przełączników, ustala się wartość 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 rys. 14.2a.

Wadą tego typu przetworników jest konieczność stosowania rezystorów o znacznie różniących się wartościach, np. jeśli dla pierwszego bitu 8-bitowego słowa wejściowego rezystancja wynosi 100 Ω , to dla ostatniego – 12,8 Ω . Powoduje to, że przez rezystor o najmniejszej wartości płyną względnie duże prądy, co znacznie zmniejsza niezawodność działania układu (zwiększa jego awaryjność).

Wady tej nie ma przetwornik pokazany na rys. 14.3. Składa się on z układu wtórników (W1, W2, W3), układu sumującego (W4), źródła napięcia odniesienia oraz kluczy analogowych (P0, P1, P2) sterowanych wejściowym sygnałem cyfrowym. Ustawienie wartości (**0** lub **1**) bitu słowa sterującego powoduje dołączanie lub odłączanie układu sumującego od źródła napięcia U_{odn} . Pozycja lewa przełącznika odpowiada wartości **0** danego bitu wejściowego, natomiast pozycja prawa odpowiada wartości **1**. Wzmacniacze W1, W2 i W3, pracujące jako wtórnik, dają na wyjściu napięcia równe odpowiednio: połowie, jednej czwartej i jednej ósmej wartości napięcia odniesienia.



Rys. 14.3. Przetwornik C/A zbudowany z wtórników.

Omówimy działanie tego przetwornika dla trzech sygnałów wejściowych:

1. Gdy $b_0, b_1, b_2 = \mathbf{000}$, wszystkie przełączniki są połączone z masą, a zatem na wejściu układu sumującego pojawi się napięcie o wartości zero.

$$U_{wy} = 0.$$

2. Gdy $b_0, b_1, b_2 = \mathbf{010}$, na wejście układu sumującego jest podawane napięcie o wartości $U_{odn}/4$ poprzez przełącznik $P2$ oraz napięcie o wartości zero poprzez przełączniki $P1$ i $P3$.

$$U_{wy} = \frac{U_{odn}}{4}.$$

3. Gdy $b_0, b_1, b_2 = \mathbf{111}$, na wejścia układu sumującego jest podawane napięcie o wartości $U_{odn}/2$, poprzez przełącznik $P1$, napięcie o wartości $U_{odn}/4$, poprzez przełącznik $P2$ oraz napięcie o wartości $U_{odn}/8$, poprzez przełącznik $P3$.

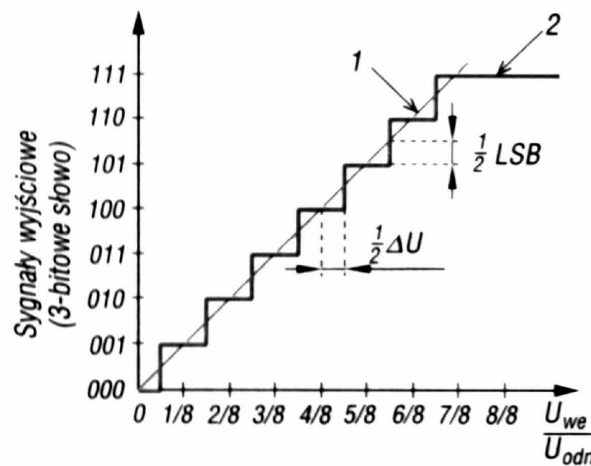
$$U_{wy} = \frac{7}{8}U_{odn}.$$

14.2. PRZETWORNIKI A/C

Przetwornik analogowo-cyfrowy (ang. *Analog-to-Digital Converter*) 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

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

Charakterystykę bezpośredniego przetwornika A/C przedstawiono na rys. 14.4.



Rys. 14.4. Charakterystyka przejściowa przetwornika A/C.
1 – idealna, 2 – rzeczywista.

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** – definiowana tak jak dla przetwornika C/A

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

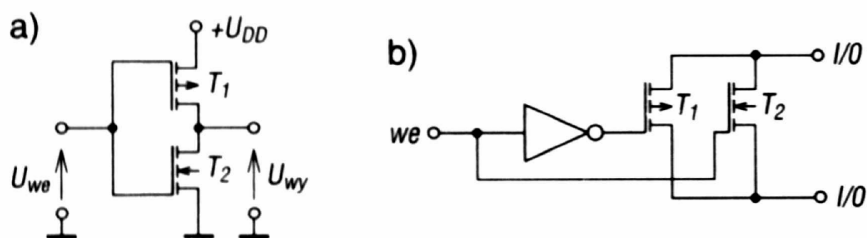
n – liczba bitów słowa wyjściowego;

- błąd kwantyzacji ($\pm \frac{\Delta U}{2}$ lub $\frac{LSB}{2}$) – odchyłka rzeczywistej charakterystyki schodkowej od charakterystyki idealnej.

14.3. PODSTAWOWE CZŁONY PRZETWORNIKÓW

Źródła napięcia odniesienia. Stabilność napięcia odniesienia decyduje o dokładności i stabilności przetwarzania. Są to źródła zawierające diody Zenera lub tranzystory o temperaturowej kompensacji napięcia baza-emiter.

Klucze analogowe. Ich liczba zależy od rozdzielczości przetwornika, tzn. od liczby bitów słowa przetwarzanego (przetworniki C/A) lub od liczby bitów słowa wyjściowego (przetworniki A/C). Od parametrów przełączników (rezystancja w stanie włączenia i wyłączenia, czas włączenia) zależy szybkość i dokładność działania układu. Istnieje wiele rozwiązań przełączników. Jedno z nich przedstawiono na rys. 14.5a. Jeżeli napięcie wejściowe jest dostatecznie małe (mniejsze od napięcia progowego), to tranzystor T_1 przewodzi, a T_2 jest zablokowany.



Rys. 14.5. Schematy kluczy analogowych

Napięcie wyjściowe jest wówczas równe napięciu zasilania. Natomiast, jeżeli napięcie wejściowe jest duże (większe od napięcia progowego), to tranzystor T_2 przewodzi, a T_1 jest zablokowany. Napięcie wyjściowe jest wówczas równe zeru (masa układu). Klucz ten może zatem służyć do przyłączania (poprzez swoje wyjście) innego układu do źródła napięcia U_{DD} lub do masy (w zależności od wartości napięcia sterującego). Inne rozwiązanie pokazano na rys. 14.5b. Układ ten pełni funkcję klucza łączącego lub rozłączającego dwa punkty I/O w zależności od wartości napięcia sterującego. Gdy osiąga ona poziom wysoki, bramki tranzystorów T_1 i T_2 są takysterowane, że rezystancja „widziana” między tymi punktami jest rzędu dziesiątek omów. Natomiast, gdy napięcie sterujące ma poziom niski, tu rezystancja ta jest rzędu megaomów. Tranzystory T_1 i T_2 odgrywają rolę sterowanych rezystancji.

Wzmocniacze operacyjne. W przetwornikach są one stosowane jako stopnie separujące, wzmacniające, człony dodające i odejmujące, integratory, konwertery prąd-napięcie.

Komparatory (w przetwornikach A/C). Decydują one o szybkości i dokładności przetwarzania. Graniczną liczbę poziomów porównania w danym

zakresie napięć wejściowych determinuje zakres wzmocnienia komparatora (ΔU).

Układy cyfrowe (bramki logiczne, przerzutniki, liczniki, rejestry, pamięci).

Układy próbkująco-pamiętające (głównie w przetwornikach A/C).
Ich zadaniem jest pamiętanie wartości chwilowej napięcia wejściowego przez czas potrzebny do pomiaru tego napięcia w przetworniku A/C .