

POLITECHNIKA OPOLSKA

INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI



LABORATORIUM METROLOGII ELEKTRONICZNEJ

**6. PRZETWORNIK A/C z
KOMPENSACJĄ RÓWNOMIERNĄ**

Przetwornik analogowo-cyfrowy kompensacyjny

1. Zasada przetwarzania analogowo-cyfrowego metodami kompensacyjnymi.

Przetwarzanie analogowo-cyfrowe metodą kompensacyjną polega na sukcesywnym równoważeniu (czyli kompensowaniu) napięcia przetwarzanego U_1 za pomocą odpowiednio generowanego napięcia kompensującego U_k w taki sposób, aby wartość różnicy ($U_1 - U_k$) doprowadzić w przypadku idealnym do zera, uzyskując zrównanie napięć $U_1 = U_k$. W praktyce różnicę napięć doprowadza się do pewnej minimalnej wartości, uwarunkowanej zdolnością rozdzielczą przetwornika. Charakterystyczną cechą wszystkich kompensacyjnych przetworników a/c jest istnienie w pętli sprzężenia zwrotnego przetwornika cyfrowo - analogowego, wytwarzającego napięcie kompensujące.

Istnieją dwie główne odmiany metody kompensacyjnej, różniące się sposobem wytwarzania napięcia kompensującego. Są to: metoda kompensacji wagowej i metoda kompensacji równomiernej.

1.1. Metoda kompensacji wagowej

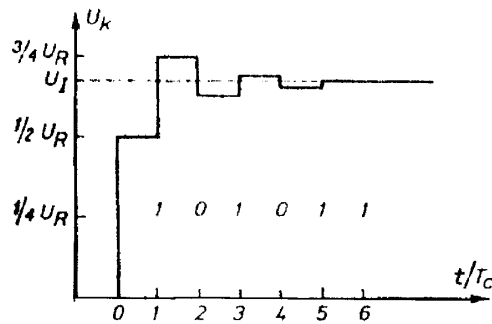
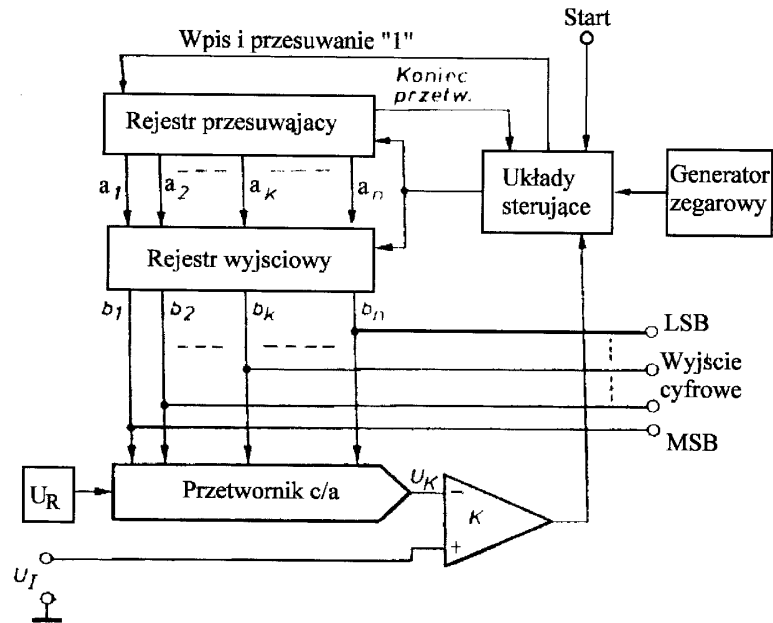
Metoda kompensacji wagowej jest jedną z najczęściej stosowanych metod przetwarzania analogowo - cyfrowego.

Zasadę przetwarzania a/c metodą kompensacji wagowej zilustrowano na rys. 1 gdzie podano schemat blokowy przetwornika oraz przebieg czasowy napięcia kompensującego. W pętli sprzężenia zwrotnego układ zawiera przetwornik cyfrowo - analogowy, połączony ze źródłem napięcia odniesienia U_R . Proces przetwarzania w przetworniku n - bitowym składa się z n kolejnych kroków. W każdym kroku przetwarzania impuls z generatora zegarowego powoduje przesunięcie w rejestrze przesuwającym „1” o jedno miejsce począwszy od najstarszego bitu. Stan ten jest wpisywany następnie do odpowiedniego przerzutnika rejestru wyjściowego ($b_k - 1$), powodując przyrost napięcia kompensującego na wyjściu przetwornika o wartość

$$\Delta U_k = U_R \cdot 2^k,$$

przy czym napięcie odniesienia U_R jest równe pełnemu zakresowi przetwarzania. W każdym kroku przetwarzania aktualna wartość napięcia kompensującego jest porównywana z napięciem U_1 i w zależności od wyniku porównania zostaje ustalony stan przerzutnika b_k w rejestrze wyjściowym. Po n krokach przetwarzania cyfrowa zawartość rejestru wyjściowego jest z dokładnością $U_R \cdot 2^n$ równoważnikiem analogowej wartości napięcia U_1 i może zostać przekazana do urządzeń zewnętrznych.

Zaletą metody kompensacji wagowej jest krótki czas przetwarzania. Ponieważ przetwornik n-bitowy wymaga tylko n kroków przetwarzania, więc czas równy nT_c (gdzie T_c czas trwania jednego kroku) jest niezależny od wartości napięcia przetwarzanego. Wadą metody mającą znaczenie w niektórych dziedzinach zastosowań jest duża nieliniowość różniczkowa, uwarunkowana właściwościami przetwornika a/c. Niemonotoniczność charakterystyki przetwornika a/c może być przyczyną brakujących kodów (czyli tzw. dziur kodowych) w charakterystyce całego przetwornika a/c. Metodą kompensacji wagowej jest oprócz metody podwójnego całkowania najpowszechniej stosowaną metodą przetwarzania a/c. Główną przyczyną popularności metody kompensacji wagowej jest poza krótkim czasem przetwarzania, łatwość jej realizacji w układach monolitycznych.



Rys. 1 Przetwornik a/c z kompensacją wagową

1.2 Metoda kompensacji równomiernej

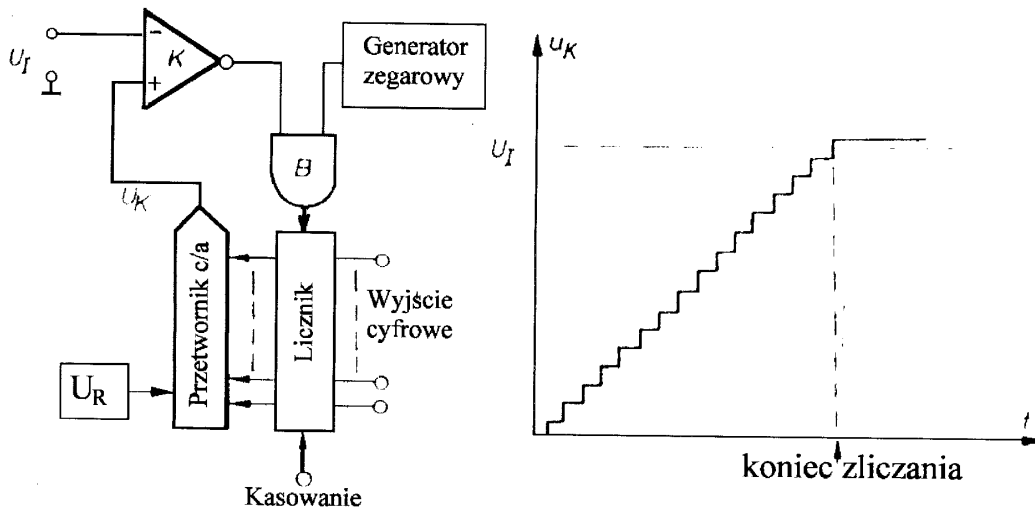
Przetwornik z kompensacją równomierną działa podobnie jak układ z kompensacją wagową z tą różnicą, że zrównoważenie U_I odbywa się za pomocą równomiernych przyrostów ΔU_K o wadze najmniej znaczącego bitu (rys. 2).

Napięcie kompensujące jest generowane w przetworniku cyfrowo-analogowym przez przetwarzanie na wartość analogową cyfrowej zawartości licznika. Zliczanie impulsów zegarowych rozpoczyna po skasowaniu licznika sygnałem zewnętrznym i trwa aż do chwili, gdy napięcie kompensujące U_K przekroczy wartość napięcia przetwarzanego U_I . Wówczas następuje zmiana stanu komparatora K , zamknięcie bramki B i zakończenie przetwarzania. Przebieg napięcia kompensującego w funkcji czasu ma kształt schodkowy o wartości napięciowej schodka odpowiadającego wartości napięcia najmłodszego bitu :

$$\Delta U_K = U_R / 2^n$$

i czasie trwania schodka równym okresowi generatora t_c . Stan licznika po zamknięciu bramki B jest cyfrowym równoważnikiem chwilowej wartości napięcia U_I w momencie zakończenia przetwarzania.

Wadą tej metody jest długi czas przetwarzania o wartości maksymalnej równej $2^n t_c$ w przypadku napięcia U_I , równego pełnemu zakresowi przetwarzania.



Rys. 2 Przetwornik a/c z kompensacją równomierną

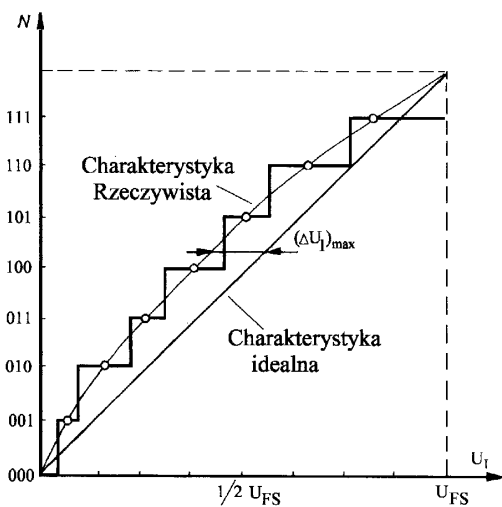
2. Parametry statyczne przetworników a/c.

2.1. Dokładność bezwzględna - określana jako różnica między teoretyczną i rzeczywistą wartością napięcia U_I , powodująca powstanie na wyjściu określonej wartości cyfrowej, przy czym wartości U_I wyznacza się jako punkty środków przedziałów kwantowania na idealnej i rzeczywistej charakterystyce przetwarzania.

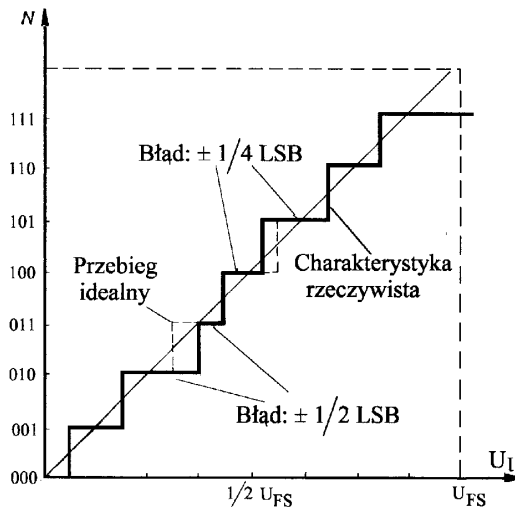
2.2. Dokładność względna - określona jako wartość dokładności bezwzględnej odniesiona do pełnego nominalnego zakresu przetwarzania i najczęściej wyrażona w procentach.

2.3. Nieliniowość całkowita - maksymalne względne odchylenie $(\Delta U_I)_{\max}$ rzeczywistej charakterystyki przetwarzania $N=f(U_I)$ od charakterystyki idealnej, będącej prostą łączącą skrajne punkty zakresu przetwarzania.

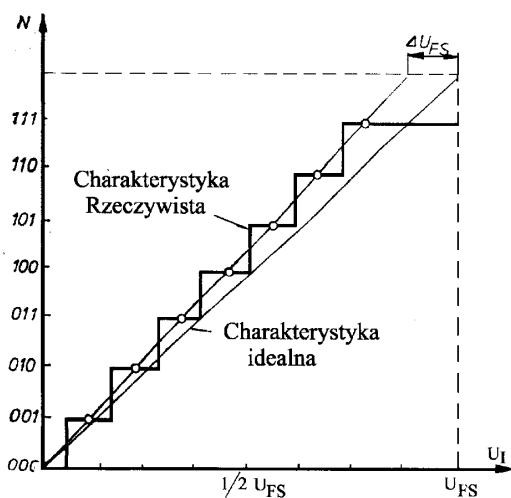
$$\varepsilon_c = (\Delta U_I)_{\max} / U_{FS} * 100\%$$



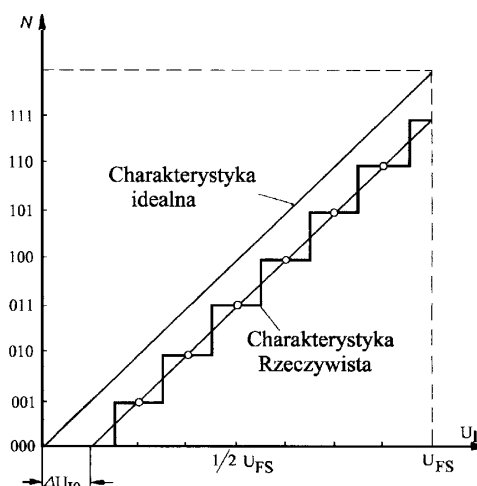
a) błąd nieliniowości całkowitej



b) błąd nieliniowości różniczkowej



c) błąd wzmocnienia

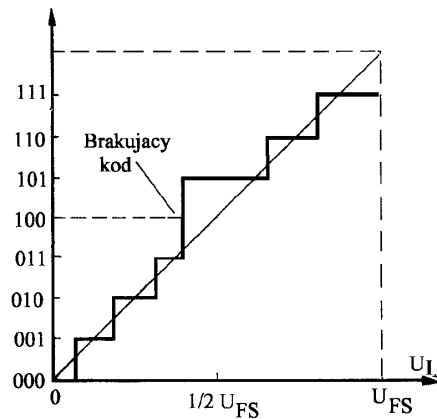


d) błąd przesunięcia zera

Rys. 3 Błędy przetworników a/c

2.4. Nieliniowość różniczkowa jest określana przez wyznaczenie różnic między sąsiednimi wartościami napięcia wejściowego U_I , powodującymi zmianę słowa wyjściowego o wartość najmniej znaczącego bitu (1 LSB). Nieliniowość różniczkowa podawana jest najczęściej w procentach jako maksymalne względne odchylenie tej różnicy od jej wartości średniej w całym zakresie przetwarzania.

Jeśli błąd nieliniowości różniczkowej przekracza wartość ± 1 LSB, to w przebiegu charakterystyki przetwarzania mogą wystąpić brakujące kody (tzw. dziury kodowe) - rys. 4.



Rys. 4 Przykład charakterystyki przetwornika a/c z brakującym kodem

2.5. Błąd wzmocnienia lub skalowania wynika ze zmiany nachylenia rzeczywistej charakterystyki przetwarzania w stosunku do charakterystyki idealnej i jest określony przez odchylenie ΔU_{FS} rzeczywistej wartości pełnego nominalnego zakresu przetwarzania od wartości idealnej. Błąd ten jest wyrażany jako procentowa wartość względna.

2.6. Błąd przesunięcia zera (błąd niezrównoważenia) jest określany przez wartość przesunięcia ΔU_{I0} rzeczywistej charakterystyki w stosunku do charakterystyki idealnej przechodzącej przez punkt zerowy. Błąd jest wyrażany w jednostkach napięcia wejściowego lub jako procentowa wartość względna odniesiona do pełnego zakresu przetwarzania.

3. Przetwarzanie cyfrowo-analogowe

Przetworniki cyfrowo-analogowe (czyli **c/a**), oznaczane w nomenklaturze międzynarodowej skrótem **DAC** (**D**igital-**t**o-**A**nalog **C**onverter), służą do rekonstrukcji sygnałów analogowych występujących pod postacią sygnałów cyfrowych. Sygnałom analogowym nadaje się postać cyfrową m.in. ze względu na wygodę, dokładność i szybkość obróbki cyfrowej, łatwość gromadzenia i przechowywania danych cyfrowych oraz małą wrażliwość na zakłócenia podczas transmisji. Niestety kwantyzacja sygnału analogowego jest procesem nieodwracalnym, gdyż zawsze powoduje pewną utratę części informacji. Tak więc proces przetwarzania c/a nie jest prostym odwróceniem procesu a/c.

3.1. Zasada przetwarzania.

Jeśli do wejścia zostanie doprowadzone n-bitowe słowo cyfrowe, to na wyjściu uzyskuje się pojedynczą wartość analogową (prądu lub napięcia), proporcjonalną do wartości wejściowego słowa cyfrowego. Wyjściowa wartość analogowa reprezentuje wartość sygnału oryginalnego, do którego jest dodany szum kwantyzacji. Tak więc, sygnał analogowy wytwarzany na wyjściu przetwornika c/a w odpowiedzi na kolejne wartości wejściowego słowa cyfrowego ma przebieg schodkowy obciążony szumem, w którym dominują zakłócenia w postaci tzw. szpilek o różnych, często dość dużych amplitudach. W celu uzyskania ciągłego (wygładzonego) i nie zakłóconego przebiegu wyjściowego, za przetwornikami c/a umieszcza się różnego rodzaju filtry z pamięcią o strukturze układów próbkująco-pamiętających i działaniu podobnym do działania filtrów dolnoprzepustowych.

3.2. Parametry statyczne przetworników c/a.

Parametry statyczne obejmują grupę parametrów opisujących statyczne odchylenia od właściwości idealnych. Uwzględniają m.in. takie czynniki, jak temperatura (współczynniki termiczne), czas (dryfy długoczasowe) czy wpływ zmian napięć zasilających. Do zasadniczych parametrów statycznych przetworników c/a należą :

3.2.1. Rozdzielczość - określana liczbą n-bitów słowa wejściowego.

Na przykład rozdzielczość 10-bitowego przetwornika c/a jest równa 10 bitów lub

$$\frac{1}{2^{10}} * 100\% \approx 0,1\%.$$

Rozdzielczość nie decyduje o dokładności przetwornika, przeciwnie to dokładność - a w szczególności - dokładność względna może ograniczyć rozdzielczość do tzw. **rozdzielczości użytecznej**.

3.2.2. Dokładność bezwzględna (błąd dokładności bezwzględnej) jest określona jako największa różnica pomiędzy przewidywaną a mierzoną wartością napięcia wyjściowego dla danej wartości wejściowego słowa cyfrowego, odniesiona do napięcia pełnego zakresu przetwarzania i wyrażona w procentach. Błąd dokładności bezwzględnej jest zwykle spowodowany: błędem przesunięcia zera, błędem skalowania (zwanym również błędem wzmocnienia) lub nieliniowością. Pomiar dokładności bezwzględnej przeprowadza się po ustaleniu standardowych warunków pracy przetwornika przy użyciu generatorów i mierników zalecanych przez normy międzynarodowe.

3.2.3. Dokładność względna (błąd dokładności względnej) - największe odchylenie zmierzonej wartości napięcia wyjściowego od wartości teoretycznej dla danej wartości wejściowego słowa cyfrowego, odniesiona do napięcia pełnego zakresu przetwarzania. Pomiar dokładności względnej przeprowadza się po odpowiednim doborze pełnego zakresu przetwarzania, czyli po skorygowaniu

błędu skalowania. Tak więc błąd dokładności względnej reprezentuje sumaryczny udział wszystkich błędów z wyłączeniem wcześniej skorygowanego (za pomocą regulacji zewnętrznej) błędu skalowania.

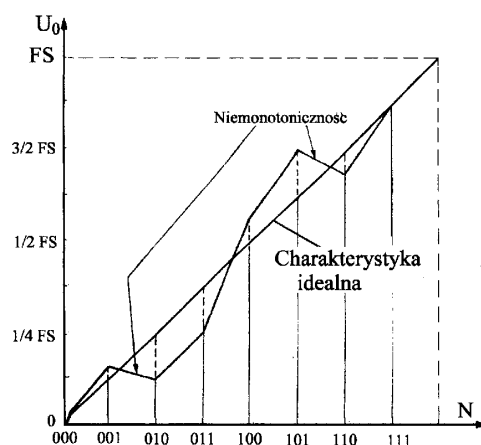
3.2.4. Błąd przesunięcia zera stanowi różnicę pomiędzy napięciem wyjściowym dla minimalnej wartości wejściowego słowa cyfrowego (np. w naturalnym kodzie binarnym NKB wszystkie bity =0), teoretycznie odpowiadającym zeru, i napięciem „zera” rzeczywistego. Błąd ten może mieć znaczącą wartość w przetworniku c/a o wyjściu napięciowym, zawierającym wzmacniacz wyjściowy w układzie konwertera prąd-napięcie. Jest on spowodowany wejściowym napięciem lub prądem niezrównoważenia wzmacniacza i może być skorygowany do zera przez kompensację tego napięcia. Błąd ten jest wyrażalny najczęściej w mV lub μV .

3.2.5. Błąd skalowania (błąd wzmocnienia) jest określany odchyłką napięcia wyjściowego do wartości przewidywanej dla maksymalnej wartości wejściowego słowa cyfrowego (np. NKB wszystkie bity=1). Błąd skalowania jest najczęściej spowodowany efektami termicznymi w poszczególnych częściach przetwornika c/a. Błąd skalowania może być skorygowany przez regulację wzmocnienia wzmacniacza wyjściowego lub przez regulację napięcia lub prądu odniesienia.

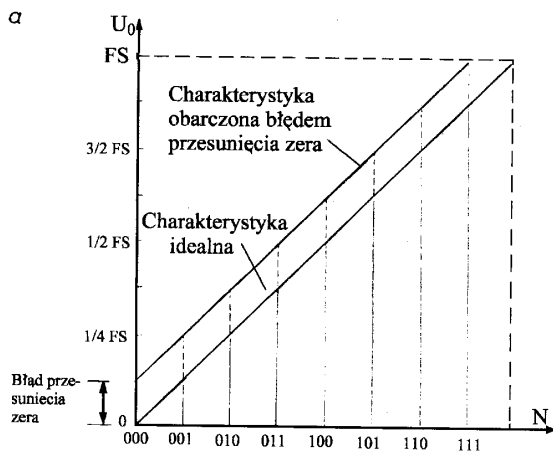
3.2.6. Współczynniki termiczne zera i skali są definiowane jako średnie odchylenia przypadające na określony zakres zmian temperatury. Wyrażane najczęściej w $\mu V/^{\circ}C$ określają stabilność zera dla odpowiednich zakresów temperatur.

3.2.7. Nieliniowość całkowita (błąd liniowości całkowitej) jest maksymalnym odchyleniem rzeczywistej charakterystyki przetwarzania od linii prostej.

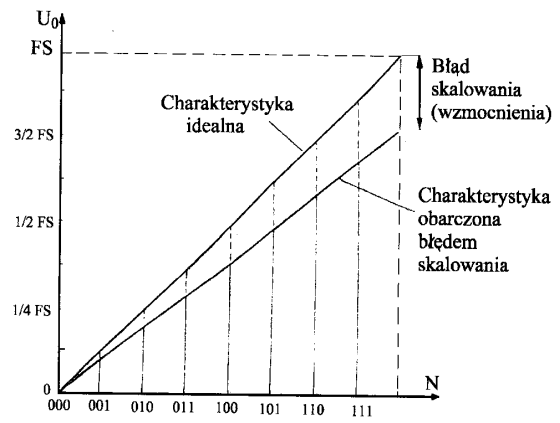
3.2.8. Nieliniowość różniczkowa (błąd liniowości różniczkowej) opisuje odchylenie wartości rzeczywistej przedziału kwantowania, czyli różnicy pomiędzy dwiema wartościami napięcia wyjściowego odpowiadającym dwóm sąsiednim wartościom cyfrowego słowa wejściowego, od wartości idealnej przedziału kwantowania.



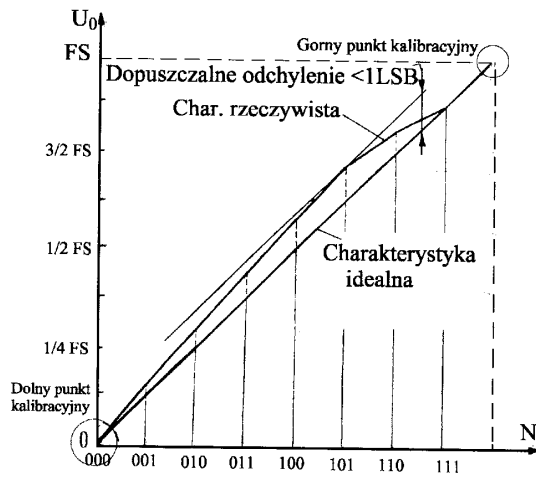
Rys. 5 Niemonotoniczność w charakterystyce przetwornika c/a



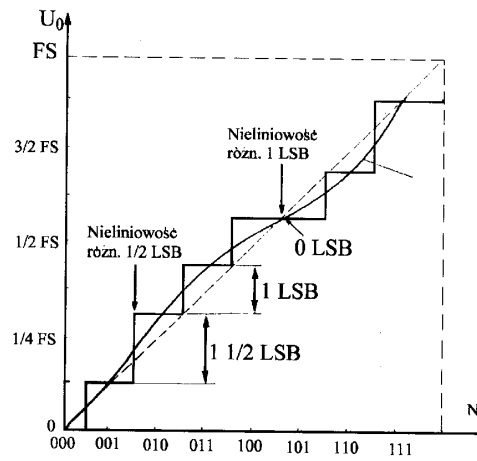
a) błąd przesunięcia zera



b) błąd skalowania (wzmocnienia)



c) błąd liniowości całkowitej

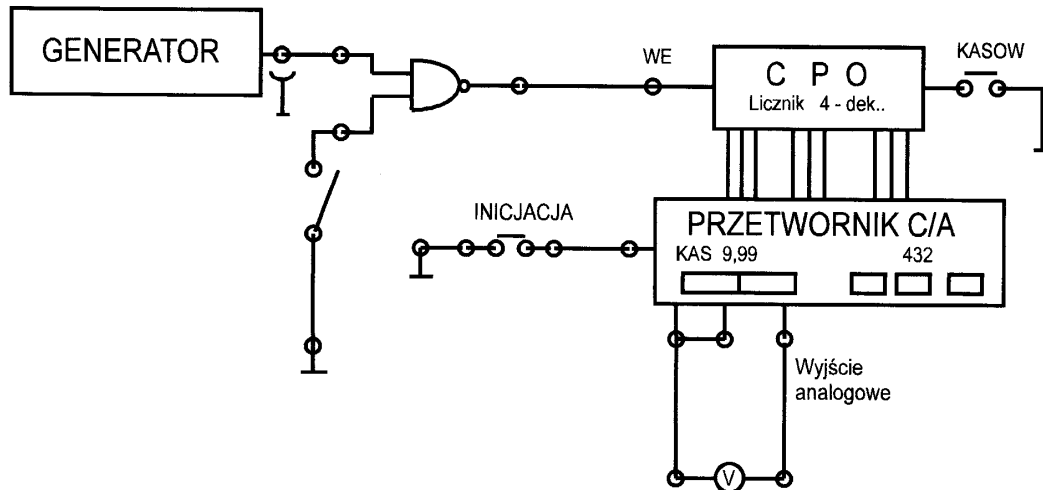


d) błąd liniowości różniczkowej

Rys. 6 Błędy przetworników c/a

4. Program ćwiczenia

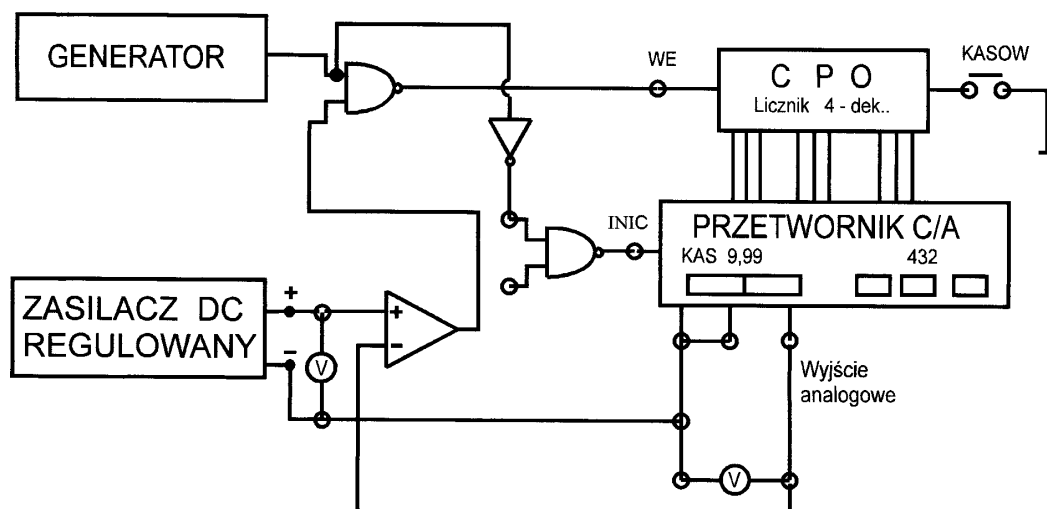
4.1 Wyznaczanie charakterystyki statycznej przetwornika cyfrowo-analogowego



Rys. 7 Schemat układu do wyznaczania charakterystyki statycznej przetwornika C/A

Połączyć układ wg schematu z rys. 7 i wyznaczyć zależność $U_{wy}=f(N)$, gdzie N - liczba impulsów zliczona przez licznik. Przelącznikiem P przerywać zliczanie impulsów po czym na wejście oznaczone INIC podać sygnał O inicjujący przetwarzanie cyfrowo-analogowe. Wykonać pomiary dla N z zakresu $50 \div 950$ impulsów co 50 impulsów. Sygnały **KASOW** i **KAS** służą do zerowania licznika i przetwornika c/a.

4.2 Wyznaczanie charakterystyki statycznej przetwornika analogowo-cyfrowego z kompensacją równomierną.



Rys. 8 Schemat przetwornika A/C kompensacyjnego

Połączyć układ wg schematu z rys. 8 i wyznaczyć zależność $N=f(U_{WE})$ dla napięcia U_{WE} z zakresu 0,5 - 5,0 V co 0,25 V notując również wartość U_K .

4.3 Sprawdzenie wpływu doboru częstotliwości impulsów zliczanych, na wynik przetwarzania a/c.

Zdjąć charakterystykę częstotliwościową ustawiając stałe napięcie z przedziału 3,5 - 4,5 V zmieniając częstotliwość generatora w zakresie 10 Hz - 5 kHz wg ciągu : 10,15,20,30,50,80,100, ... Hz.

5. Zadania do opracowania na podstawie pomiarów.

- Wykreślić charakterystyki statyczne przetwornika c/a i a/c , wyznaczyć błędy i nieliniowości, przesunięcia zera i wzmocnienia.
- Obliczyć współczynniki równania przetwarzania metodą najmniejszych kwadratów dla przetwornika c/a oraz a/c .

Dla przetwornika c/a równanie to ma postać:

$$U_{wy} = a \cdot n + b \quad ,$$

gdzie

$$\begin{cases} a * \sum_{i=1}^k n_i^2 + b * \sum_{i=1}^k n_i = \sum_{i=1}^k n_i * U_{wy_i} \\ a * \sum_{i=1}^k n_i + b * k = \sum_{i=1}^k U_{wy_i} \end{cases} \quad , k - \text{liczba pomiarów}$$

- Narysować zależność błędu przetwarzania ε w funkcji częstotliwości, obliczając ε wg wzoru :

$$\varepsilon = \frac{N_f - N_{popr}}{N_{popr}} * 100\%$$

przyjmując za $N_{poprawne}$ wynik przetwarzania dla częstotliwości $f = 10$ Hz.

BADANIE PRZETWORNIKA ANALOGOWO-CYFROWEGO Z KOMPENSACJĄ RÓWNOMIERNĄ

1. Badanie przetwornika c/a

- a). wyznaczenie charakterystyki statycznej (przejsiowej) przetwornika PCA-1
 $U_{wyj} = f(N_I)$,
- b). wyznaczenie błędów przesunięcia zera , nieliniowości i wzmocnienia przetwornika .

2. Badanie przetwornika a/c kompensacyjnego

- a). montaż układu
- b). wyznaczenie charakterystyki statycznej przetwornika a/c
- c). określenie błędów przesunięcia zera , nieliniowości i wzmocnienia .

Literatura :

1. Kulka Z. , Libura A. , Nadachowski M. Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe WKł W-wa 1987