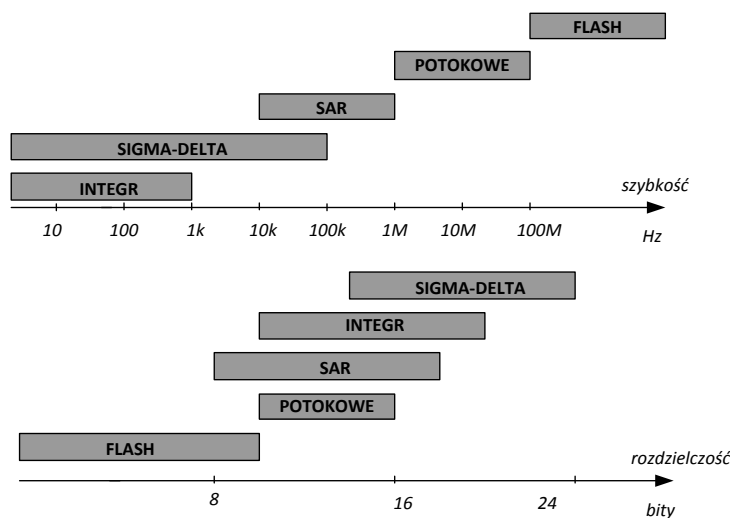


Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe



Rys. 1. Częstotliwość próbkowania i liczba bitów podstawowych przetworników A/D.

Największą popularnością cieszy się dziś przetwornik sigma-delta, tani przetwornik o bardzo dobrej dynamice i niezłej szybkości.

Na rynku jest obecnych pięć podstawowych typów przetworników A/D. Każdy z nich obsługuje inny segment rynku.

Przetwornikiem środka, a więc o dobrej szybkości i dobrej dokładności jest SAR. Przetworniki te stosowane są głównie w dokładnych kartach pomiarowych.

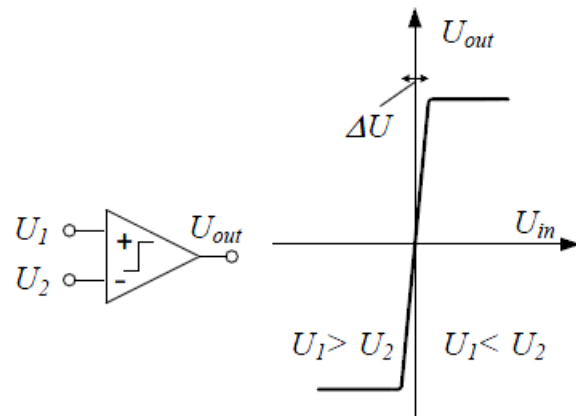
Przetwornik Flash stosowany jest tam gdzie zależy nam na dużej szybkości – w telekomunikacji, oscyloskopach cyfrowych. Duża szybkość osiągnięta jest kosztem kiepskiej dokładności.

Na drugim krańcu są przetworniki całkujące (dual slope) – osiąga się tu bardzo dużą dokładność ale kosztem szybkości. Stosowane są one w woltomierzach cyfrowych.

Przetwornik potokowy (pipeline) – jest przetwornikiem specjalnym o dużej szybkości i niezłej dokładności.

Komparator

Rys. 29. Zasada działania komparatora



Komparatory odgrywają bardzo dużą rolę w technice cyfrowej jak de facto cyfrowe detektory zera.

Realizują one funkcję:

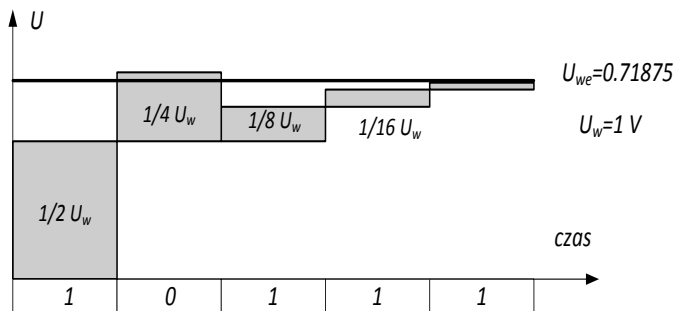
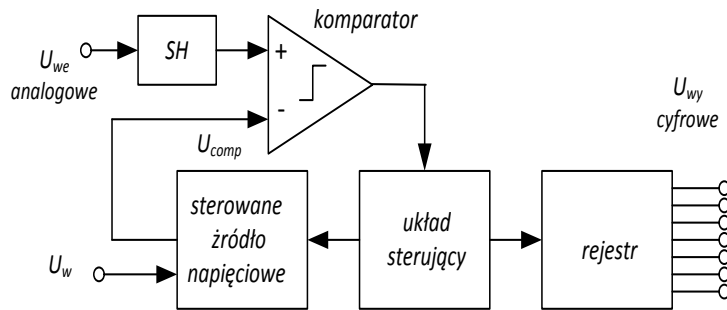
$$\begin{cases} U_{out} = 1 & \text{for } \varepsilon = U_+ - U_- > 0 \\ U_{out} = 0 & \text{for } \varepsilon = U_+ - U_- < 0 \end{cases}$$

A więc zmianę stanu z 0 na 1 przy przejściu sygnału przez zero.

Rolę komparatora spełnia każdy wzmacniacz operacyjny bez sprzężenia zwrotnego ale produkowane są specjalne układy charakteryzujące się szybkim przejściem między stanem 0 a 1.

Przetwornik SAR

Rys. 2. Przetwornik SAR (successive approximation register – kompensacyjno-wagowy)



Przetwornik ten realizuje ideę cyfrowego kompensatora z jego główną zaletą jaką jest dokładność.

W każdym kroku (z każdym kolejnym bitem) napięcie wzorcowe zmniejsza się o połowę. Napięcie wzorcowe podawane jest na jedno wejście komparatora, na drugie wejście podawane jest napięcie mierzone.

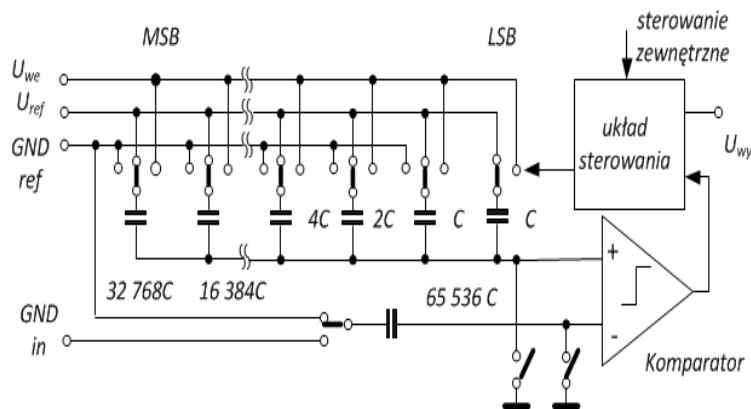
Komparator porównuje oba napięcia – jeśli napięcie mierzone jest większe to na wyjściu pojawia się stan 1 i krok zostaje zaakceptowany. Jeśli napięcie mierzone jest mniejsze to na wyjściu pojawia się stan 0 i krok jest anulowany.

Przy przetworniku 16 bitowym niezbędne jest więc przeprowadzenie 16 kroków co ogranicza szybkość działania przetwornika.

Typowe parametry tego przetwornika to częstotliwość próbkowania do 1 MHz, liczba bitów 8 – 16, a czas przetwarzania ok 10 μs .

Przetwornik SAR - cd

Rys. 3. W praktyce nie dołącza się kolejnych napięć wzorcowych – jest jedno napięcie które podłącza się do drabinki kondensatorów C , $2C$, $4C$ itd. Następnie kolejno dołączane do komparatora są różne kondensatory



Prześledźmy działanie przetwornika o zakresie 1 V mierzącego napięcie 0.7V.

W pierwszym kroku dołączane jest napięcie 0.5 V (połowa zakresu). Na wyjściu pojawia się stan 1 i krok jest zaakceptowany.

W drugim kroku dołączane jest napięcie 0.25V a więc razem 0.75V. Na wyciu pojawia się stan zero, a więc 10 i krok jest anulowany.

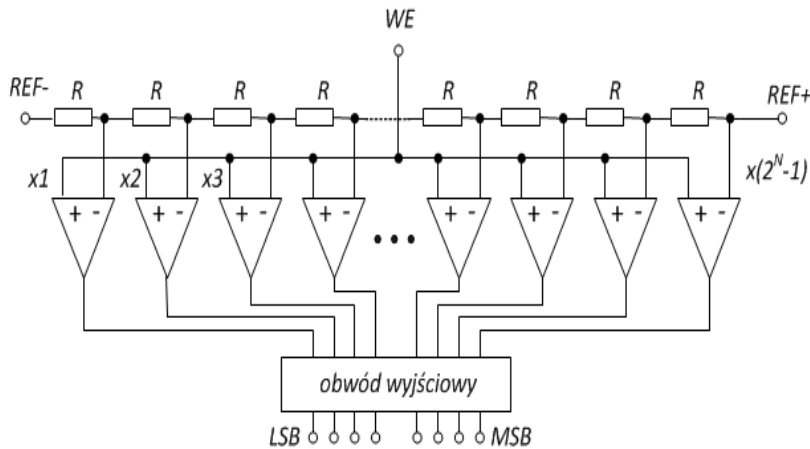
W trzecim kroku podawane jest napięcie 0.125V a więc 0.625 V. Ten krok jest zaakceptowany i mamy 101.

W czwartym kroku podajemy 0.0625 a więc razem 0.6875. Ten krok też jest zaakceptowany i mamy 1011.

I tak dalej na wyjściu mamy wynik w kodzie dwójkowym.

Przetworniki Flash

Rys.4. Przetwornik typu flash

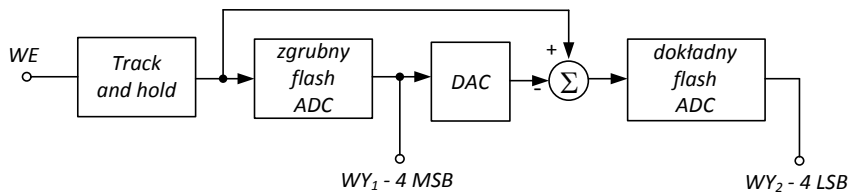


W przetworniku tym porównanie napięcia odbywa się w jednym kroku (stąd duża szybkość) Trzeba więc zastosować wiele komparatorów - każdy reprezentujący inny stan. Tak np. w przetworniku 8-bitowym jest możliwe 256 stanów (Schodków) i tyle komparatorów trzeba użyć. Nie jest więc możliwe zrobienie przetwornika 16-bitowego bo wymagałby on 65 000 komparatorów.

Przetwornik jest bardzo szybki – częstotliwość próbkowania do 2GHz, ale dzieje się to kosztem dokładności – poniżej 8 bitów.

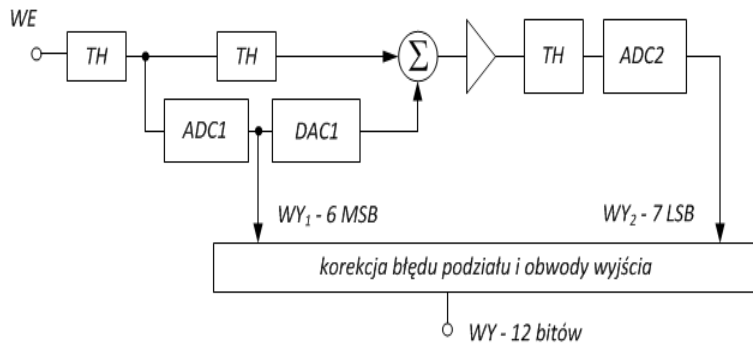
Pewną odmianą tego przetwornika jest half-flash. Zakres dzielimy na dwie połowy – zgrubną i dokładną. Każdą część przetwarza przetwornik 4-bitowy, mamy więc łącznie 8 bitów ale zamiast 256 komparatorów tylko 30. Przetwornik nie ma już tak dużej szybkości jak flash – bo nie więcej niż 100 MHz.

Rys. 5. Przetwornik half-flash

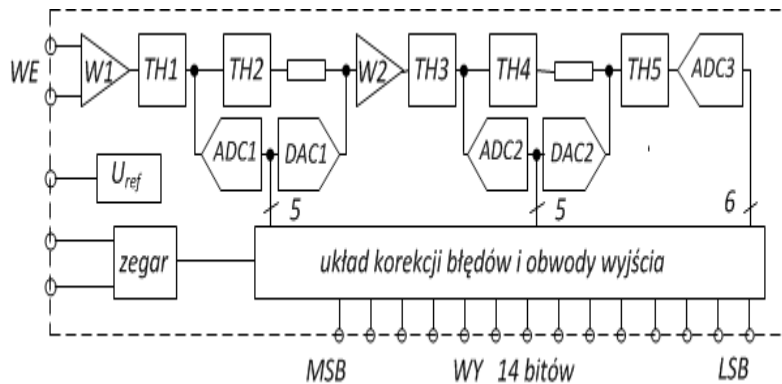


Przetwornik potokowy (pipeline)

6. Przykład dwuzakresowego przetwornika potokowego



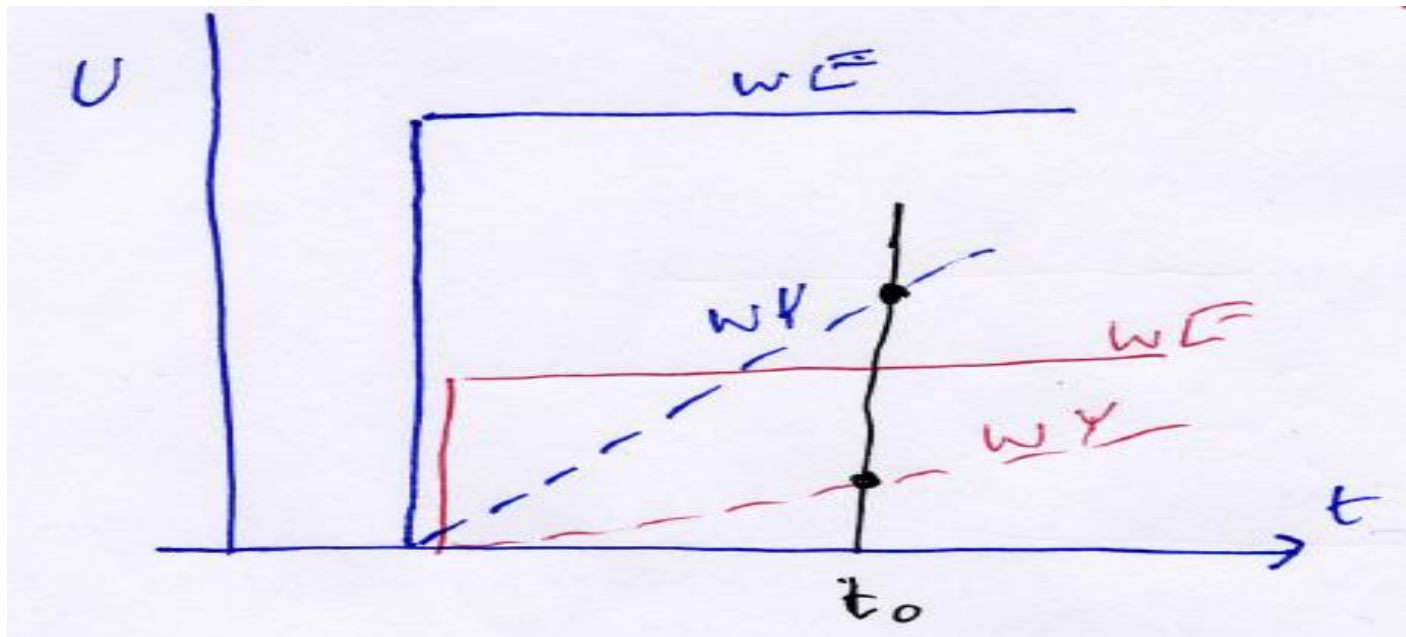
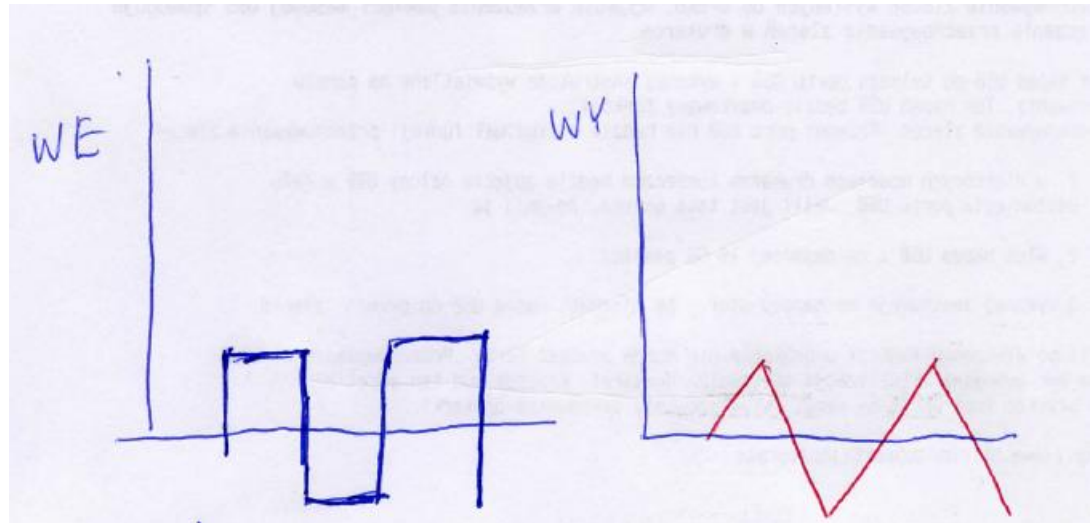
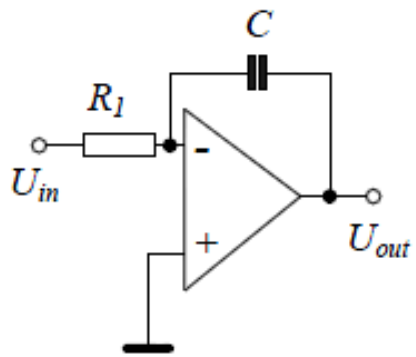
Rys. 7. Trzyzakresowy przetwornik potokowy



Przetwornik ten jest rozwinięciem idei half-flashu. Zamiast dwóch zakresów tych podzakresów może być nawet pięć. Przy pięciu przetwornikach 4-bitowych osiągniesz łącznie nawet 14-16 bitów.

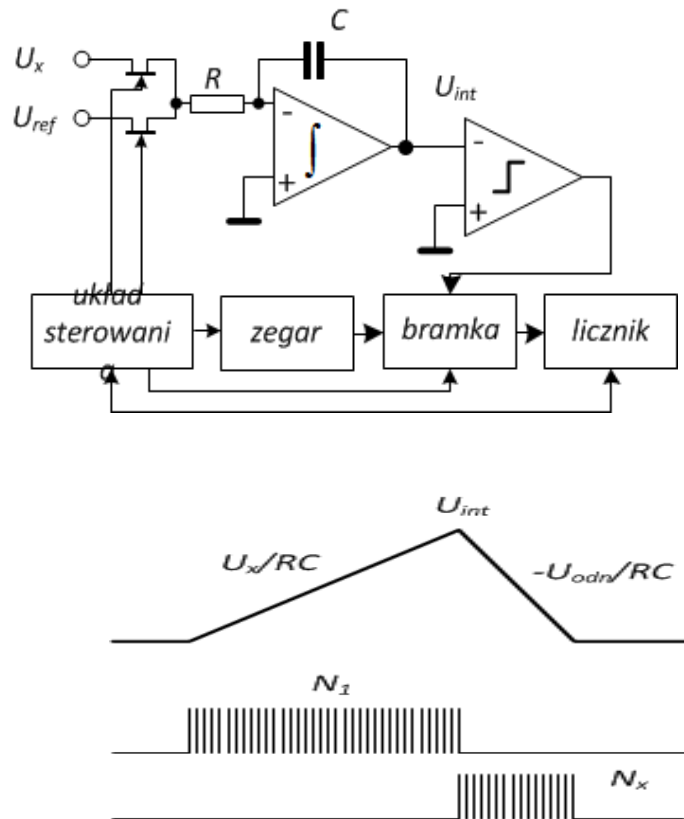
Wiele podzakresów wymaga innego podejścia niż jest to w half-flashu. Każdy podzakres poprzedzony jest wzmacniaczem w celu doprowadzenia napięć do podobnego poziomu. Każdy podzakres ma wspólny bit z sąsiadem dla lepszego dopasowania podzakresów. Dodatkowo stosuje się specjalny układ korekcyjny dopasowujący podzakresy.

Jest to przetwornik wyczynowy dlatego dość drogi. Pozwala uzyskać szybkości do 100 MHz przy nieźle dokładności 14 bitów.



Przetwornik całkujący (dual slope)

Rys. 8. Przetwornik całkujący



Przetwornik ten realizuje zupełnie inną zasadę niż poprzednio omówione – przetwarza sygnał analogowy nie na cyfrę dwójkową tylko na czas (a właściwie liczbę impulsów).

Przetwornik wykorzystuje właściwość wzmacniacza całkującego polegającą na tym że po dołączeniu na wejściu skoku napięcia na wyjściu napięcie narasta liniowo.

Przetwornik pracuje w dwóch cyklach (dual slope). W pierwszym cyklu na wejście dołącza się napięcie mierzone i na wyjściu wzmacniacza narasta napięcie liniowo. Ten cykl trwa stały czas (lub np. po dołączeniu generatora do licznika stałą liczbę impulsów N_1). Oczywiście im większe napięcie wejściowe tym stromość narastania większa i tym większe napięcie pod koniec cyklu.

W drugim cyklu na wejście dołącza się napięcie wzorcowe i przeciwnej polaryzacji. Jednocześnie do licznika dołączamy generator). Napięcie opada do zera i stan ten wykrywany jest przez komparator.

Przetwornik całkujący - cd

Oczywiście im większe było napięcie po pierwszym cyklu tym dłużej trwa drugi cykl i liczba impulsów N_x jest miarą napięcia wejściowego.

W stanie równowagi jest

$$\frac{U_x}{RC} \frac{1}{f_{cl}} N_1 = \frac{U_{ref}}{RC} \frac{1}{f_{cl}} N_x$$

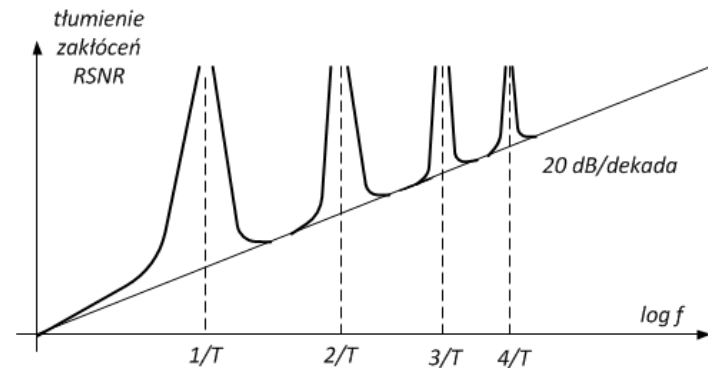
A więc wynik

$$N_x = \frac{N_1}{U_{ref}} U_x$$

Nie zależy od RC ani od częstotliwości generatora a tylko od Napięcia wzorcowego – stąd wielka dokładność tego przetwornika.

W rzeczywistości jakość przetwarzania znacząco zależy od jakości kondensatora (efekt pamięciowy). Stąd przetwornik ten jest dość drogi bo wymaga drogiego kondensatora.

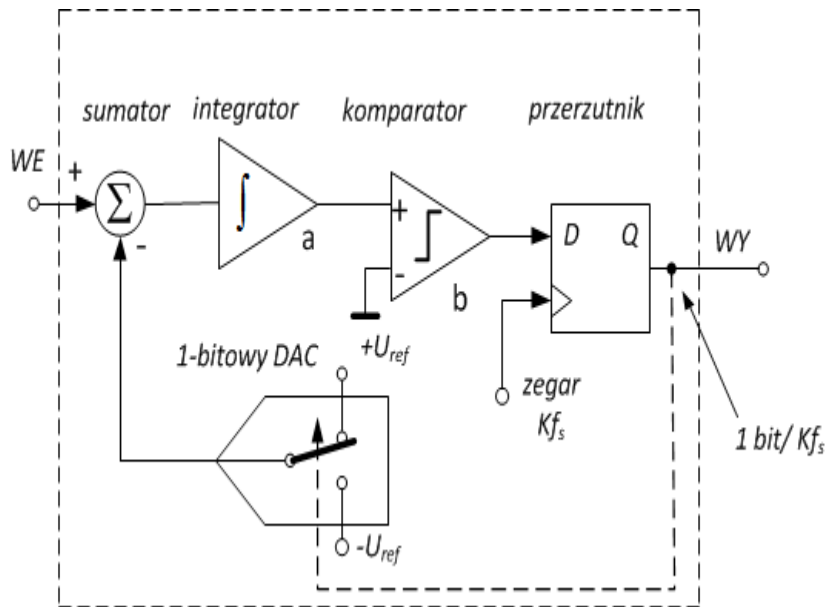
Rys. 9. Tłumienie sygnału w funkcji częstotliwości



Przetwornik całkujący ma ciekawą cechę – jak wynika z rys. 9 tłumie wszystkie sygnały o częstotliwości $1/T$. A T jest okresem całkowania w pierwszym cyklu. Jeśli więc dobierzemy $T = 20$ ms to układ wytłumi pasożytnicze sygnały 50 Hz i ich harmoniczne.

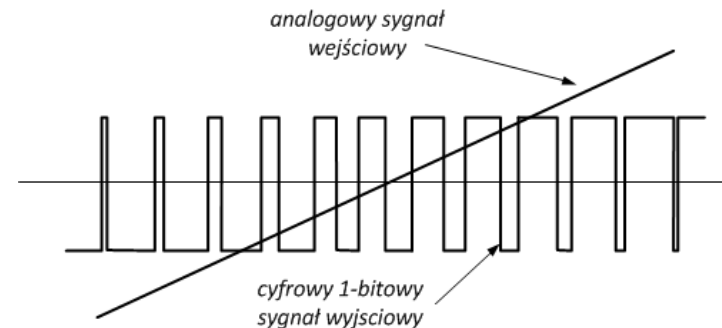
Przetwornik sigma-delta

Rys. 10. Przetwornik sigma-delta



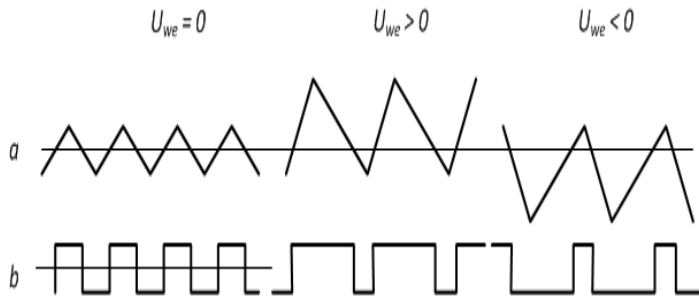
Rys.11. Szerokość impulsu zależy od wartości napięcia wejściowego

Przetwornik ten podobnie jak przetwornik całkujący wykorzystuje właściwość wzmacniacza całkującego polegającą na tym że napięcie wyjściowe narasta liniowo po skokowej zmianie wejścia – a więc jeśli sygnał wejścia jest prostokątny to na wyjściu mamy sygnał trójkątny. Nazwa sigma delta pochodzi od tego że na wejściu jest element sumujący (sigma) realizujący sprzężenie zwrotne a cały przetwornik wykorzystuje modulację delta polegającą na tym że wartość sygnału zapisana jest w szerokości impulsu:



Przetwornik sigma delta – zasada działania

Rys. 12. Zasada pracy przetwornika sigma-delta



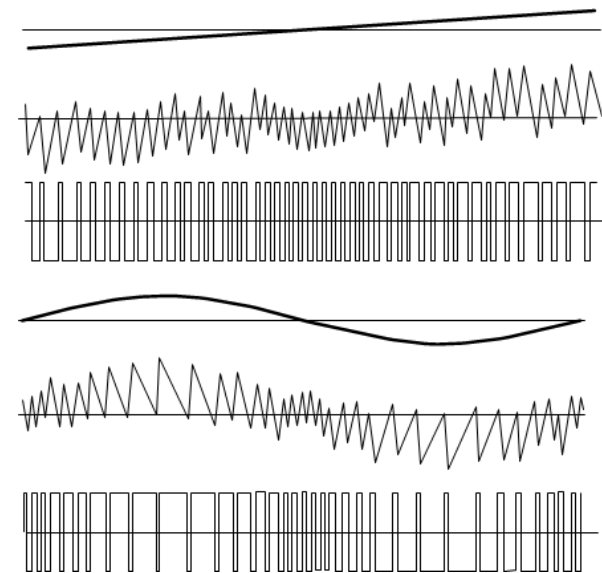
Jeśli na wejściu nie ma napięcia to na wyjściu wzmacniacza całkującego mamy przebieg piżozębny wynikający ze scałkowania prostokątnego przebiegu 1-bitowego DAC. Komparator zamieni więc ten sygnał na sygnał prostokątny w którym obie połowki mają tę samą szerokość (średnia wartość zero).

Jeśli na wejściu pojawi się napięcie dodatnie to po sumatorze sygnał piżozębny zostanie przesunięty w górę. Punkty przejścia przez zero zmieniają się

i na wyjściu komparatora będzie sygnał w którym połowki dodatnie są szersze.

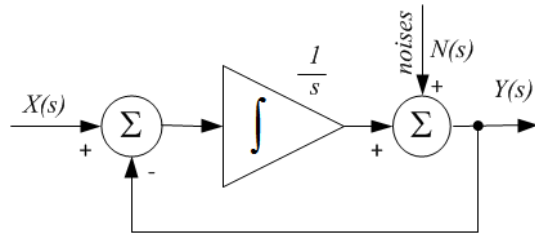
I odwrotnie gdy sygnał wejściowy jest ujemny piża przesunie się w dół i połowki ujemne będą szersze.

Rys. 13. Sygnał wyjściowy przy narastającym liniowo i sinusoidalnie sygnale wejściowym



Przetwornik sigma-delta – właściwości szumowe

Rys. 14. Schemat zastępczy przetwornika



Zgodnie z rys. 14 transmitancja przetwornika jest opisana jako

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{s+1}$$

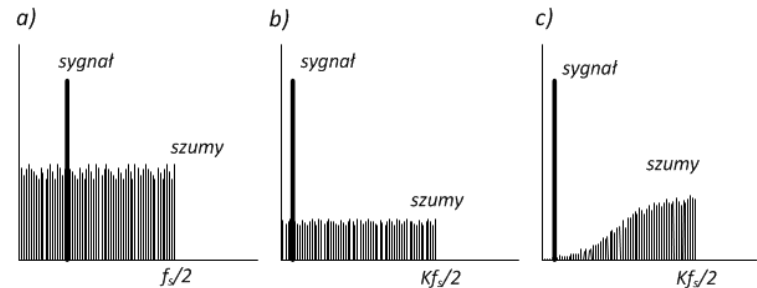
A więc jest to filtr dolnoprzepustowy. Jednocześnie transmitancja szumu jest opisana jako

$$\frac{Y(s)}{N(s)} = \frac{s}{1+s}$$

A więc jest to filtr górnoprzepustowy.

Przetwornik działa więc jak filtr szumu. Te znakomite właściwości szumowe zwane noise shaping pozwalają na uzyskanie dużej dynamiki a więc zgodnie z zasadą sześć decybeli na bit dużą liczbę bitów – nawet 32.

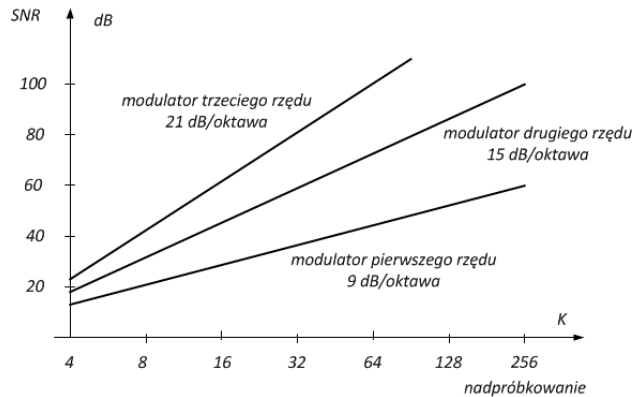
Jednocześnie częstotliwość zegara może być rzędu MHz a więc łatwo realizujemy nadpróbkowanie. To jeszcze dodatkowo wzmacnia efekt zwiększania stosunku sygnału do szumu a więc dynamiki:



Rys. 15. Wpływ nadpróbkowania i filtrowania na właściwości szumowe

Przetworniki sigma delta wyższego rzędu

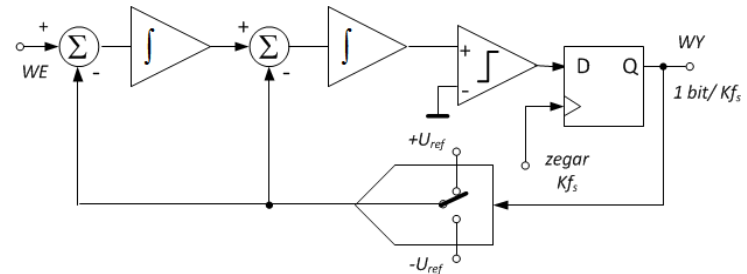
Rys. 16. Zależność stosunku sygnału do szumu od wartości nadpróbkowania i rzędu przetwornika



Jeśli przetwornik działa jak filtr to jego właściwości filtrujące można poprawiać zwiększając rząd filtru i zwiększając nadpróbkowanie jak to ilustruje rys. 16.

Przetwornik wyższego rzędu wymaga tylko zwiększania liczby układów całkujących – rys.17

Rys. 17. Przetwornik sigma delta drugiego rzędu



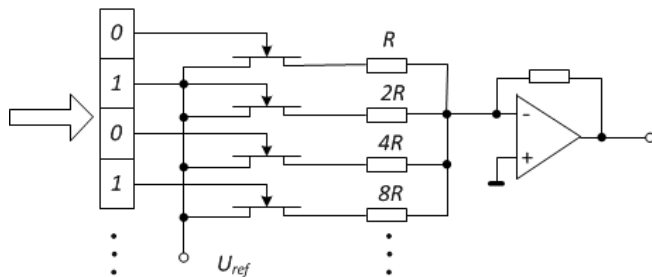
Przetworniki sigma delta przebojem zdobywają rynek. Ich najważniejsze zalety to:

- Prostota i i bardzo niska cena
- Możliwość realizacji nadpróbkowania
- Bardzo dobre właściwości szumowe a więc dobra dynamika.

To powoduje że przetworniki te są dużą konkurencją dla przetworników całkujących a także SAR.

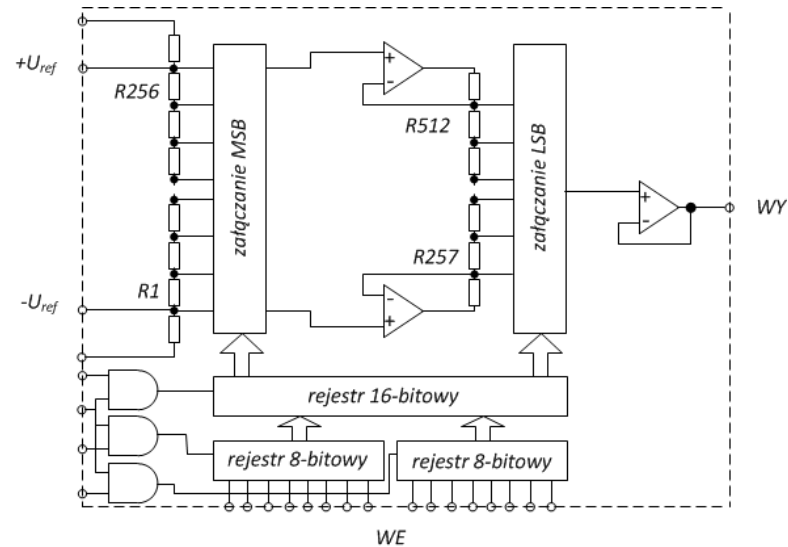
Przetworniki D/A – przetworniki typu string

Rys. 18. Zasada zamiany cyfry na sygnał analogowy



Przedstawiona na poprzednim wykładzie idea zamiany cyfry na sygnał analogowy (rys. 18) jakkolwiek prosta nie jest w praktyce realizowana. Technologicznie jest bowiem bardzo trudno wykonać w obwodzie scalonym precyzyjne oporniki o bardzo szerokim zakresie od omów do megaomów. Zamiast tego producentom jest łatwiej zamiast 16 oporników o różnej wartości wykonać 512 oporników ale za to o jednakowej wartości.

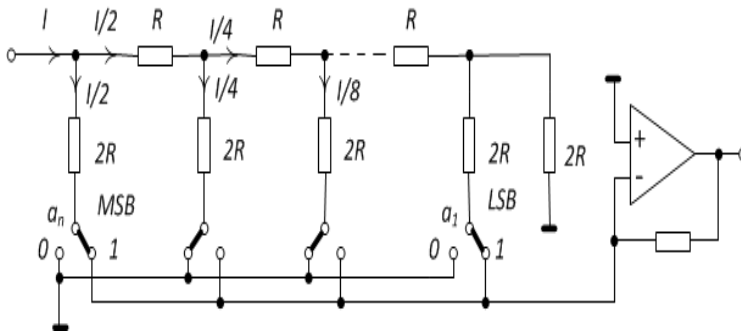
Rys. 19. Przetwornik typu string (segmented)



Na rys. 19 przedstawiono przetwornik realizujący ideę z rys. 18 ale wykorzystujący 256 oporników (pierwsze osiem bitów) i drugie 256 oporników (drugie 8 bitów)

Przetworniki R-2R oraz current steering

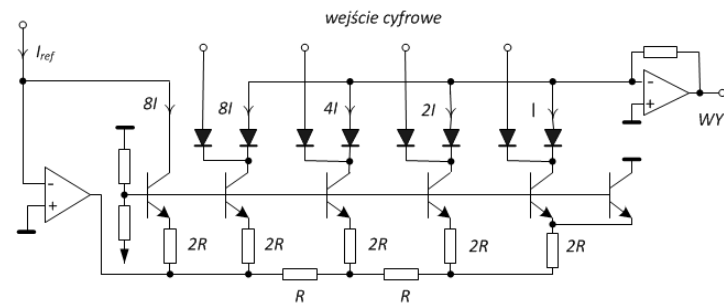
Rys. 20. Przetwornik R-2R



Zamiast stosowania tak wielkiej liczby oporników ten sam efekt osiąga się w układzie R-2R gdzie tych oporników (o tej samej wartości) jest znacznie mniej.

Jak pokazano na rys. 20 przy takim połączeniu oporników prąd w każdej następnej gałęzi jest o połowę mniejszy $1/2, 1/4, 1/8$ itd. Można więc łatwo zamienić kod dwójkowy na sumę spadków napięcia na oporniku.

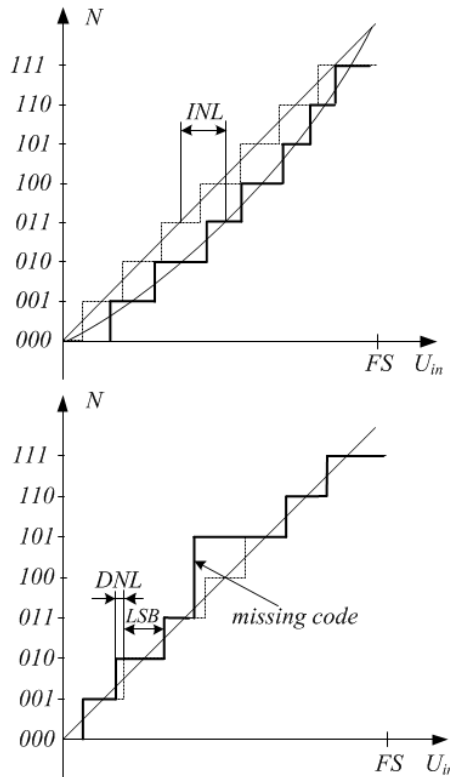
Rys. 21. | Przetwornik current steering



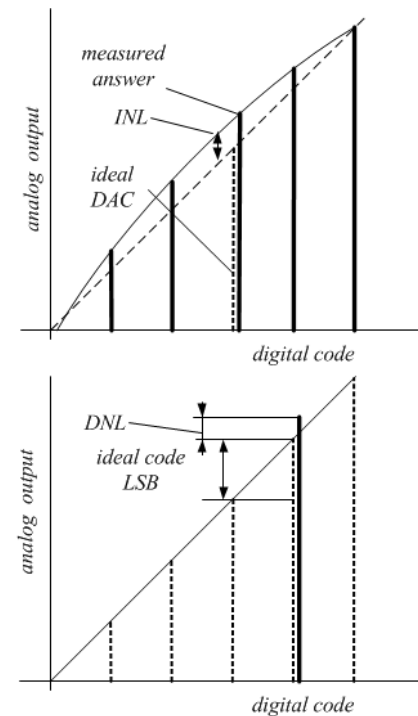
Zamiast stosowania drabinki oporników ten sam efekt można osiągnąć stosując w kolejnych gałęziach źródła prądu o wartościach $1/2, 1/4, 1/8$ itd..

Nieliniowość całkowita i różniczkowa przetworników A/D i D/A

Rys. 22. Nieliniowość całkowita INL (integrated nonlinearity) i różniczkowa (DNL – differential nonlinearity) przetworników A/D



Rys. 23. Błąd INL i DNL przetwornika D/A



Cztery najważniejsze parametry przetworników to częstotliwość próbkowania f_s , liczba bitów N oraz Nieliniowość INL i DNL