

DIAGNOSTYKA PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Diagnostyka techniczna

Dziedzina wiedzy obejmująca całokształt zagadnień teoretycznych i praktycznych dotyczących identyfikacji i oceny przeszłych, aktualnych i przyszłych stanów obiektu technicznego, z uwzględnieniem jego otoczenia.

Diagnostyka procesów przemysłowych

Diagnostyka procesów przemysłowych jest częścią diagnostyki technicznej. Zajmuje się ona rozpoznawaniem zmian stanów procesów w trakcie ich eksploatacji. Przyczynami zmian stanów mogą być uszkodzenia lub inne zdarzenia destrukcyjne.

Zadaniem diagnostyki procesów przemysłowych jest wczesne wykrywanie i dokładne rozpoznawanie powstających uszkodzeń.

Stan obiektu

Najmniejszy zbiór wielkości, których znajomość w danym momencie czasu, wraz ze znajomością przyszłych przebiegów czasowych zmiennych wejściowych, umożliwia określenie przyszłych przebiegów czasowych zmiennych wyjściowych obiektu.

Uszkodzenie

Zdarzenie destrukcyjne powodujące przejście obiektu ze stanu zdatności do stanu niezdatności

Detekcja

Wykrycie, zauważenie powstania uszkodzenia w obiekcie i zdefiniowanie chwili detekcji

Identyfikacja

Wyznaczenie rozmiaru i charakteru zmienności uszkodzenia w czasie.

Sygnał

Przebieg dowolnej wielkości fizycznej, będącej nośnikiem Informacji.

Zmienne procesowe

Sygnały, których wartości są znane. Zmienne procesowe są bezpośrednio mierzone, wyliczane lub wypracowywane przez system automatyki.

Sygnał diagnostyczny

Przebieg dowolnej wielkości będącej nośnikiem informacji o stanie obiektu diagnozowania.

Monitorowanie

Przeprowadzane w czasie rzeczywistym zadania polegające na pomiarze, odczytywaniu i przeliczaniu wartości zmiennych procesu oraz na porównywaniu tak otrzymanych wartości z wcześniej przyjętymi ograniczeniami i ewentualne uruchamianie alarmów, tj. zadanie kontroli i sygnalizacji automatycznej.

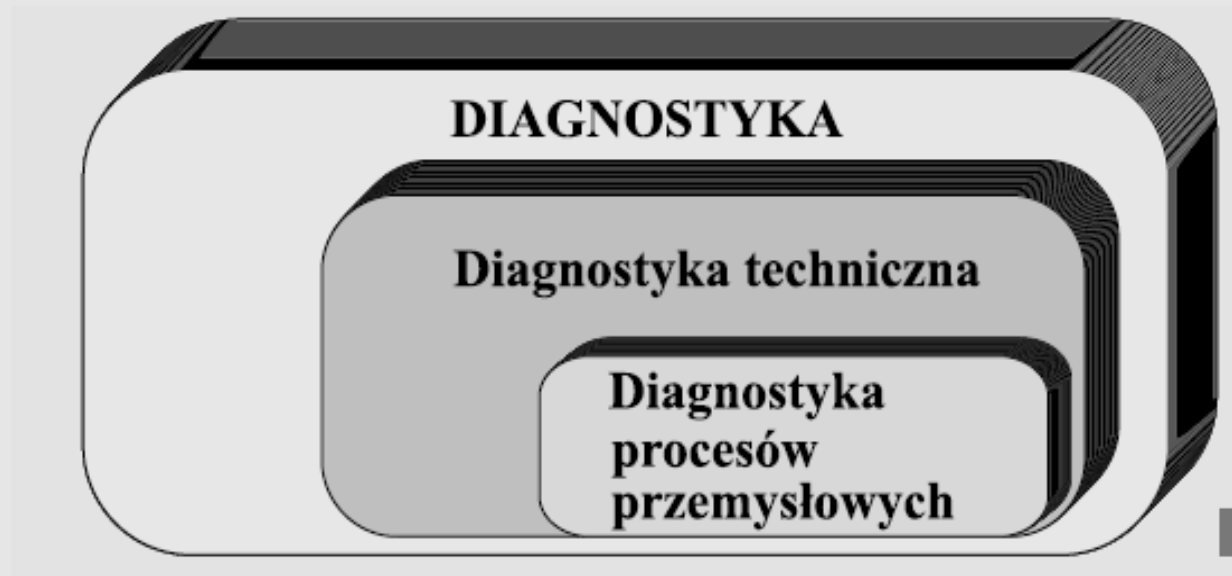
Zadania te obejmują również rejestracje danych.

Nadzór

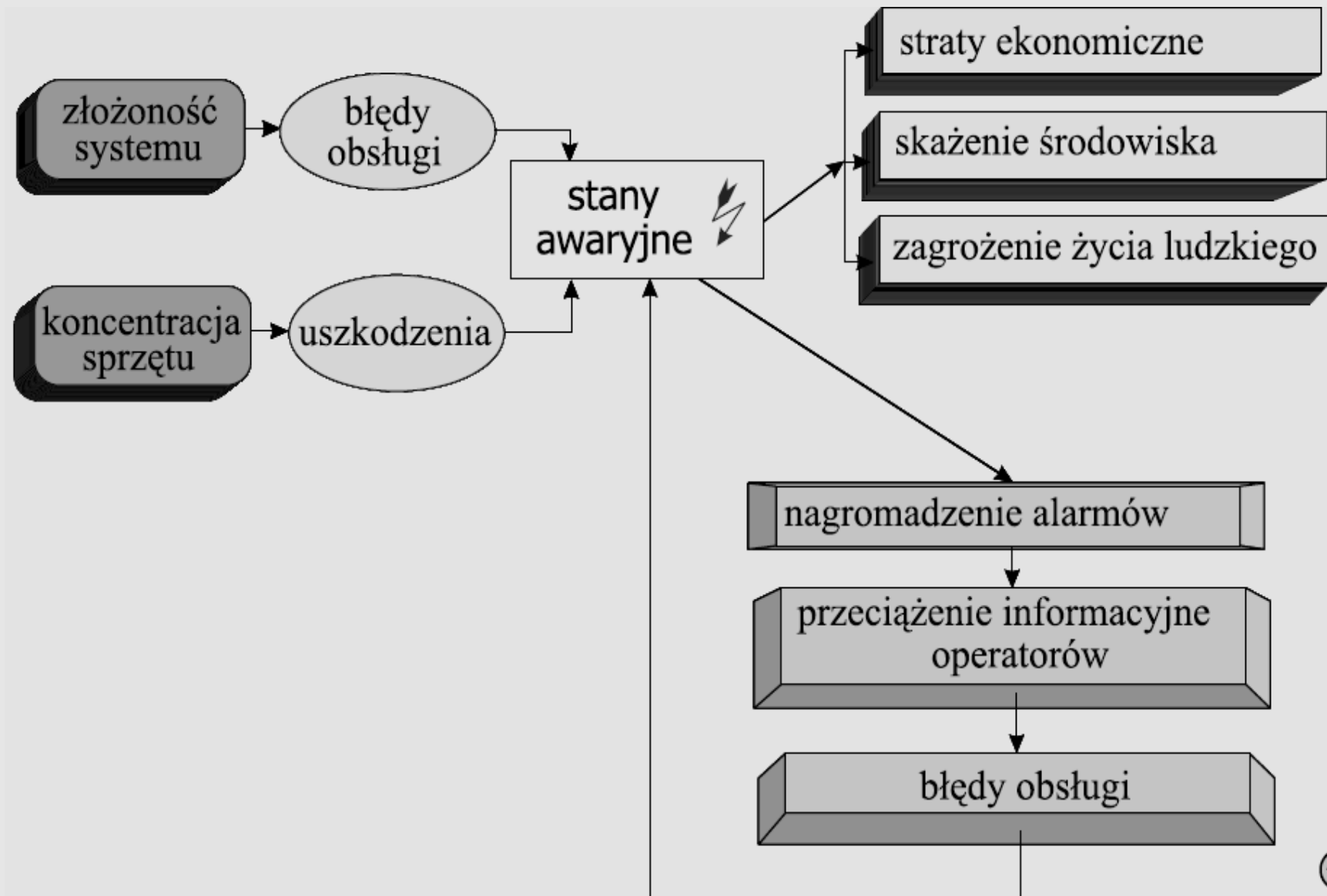
Monitorowanie obiektu i podejmowanie czynności dla utrzymania jego właściwego działania przy wystąpieniu defektów

Uwarunkowania diagnostyki procesów przemysłowych

- Wczesne wykrywanie awarii jest warunkiem możliwości zabezpieczenia innych podzespołów.
- Prowadzona jest na bieżąco.
- Funkcjonuje na sygnałach roboczych.
- Nie pozwala na stosowanie sygnałów testowych wprowadzających do procesu zakłócenia.

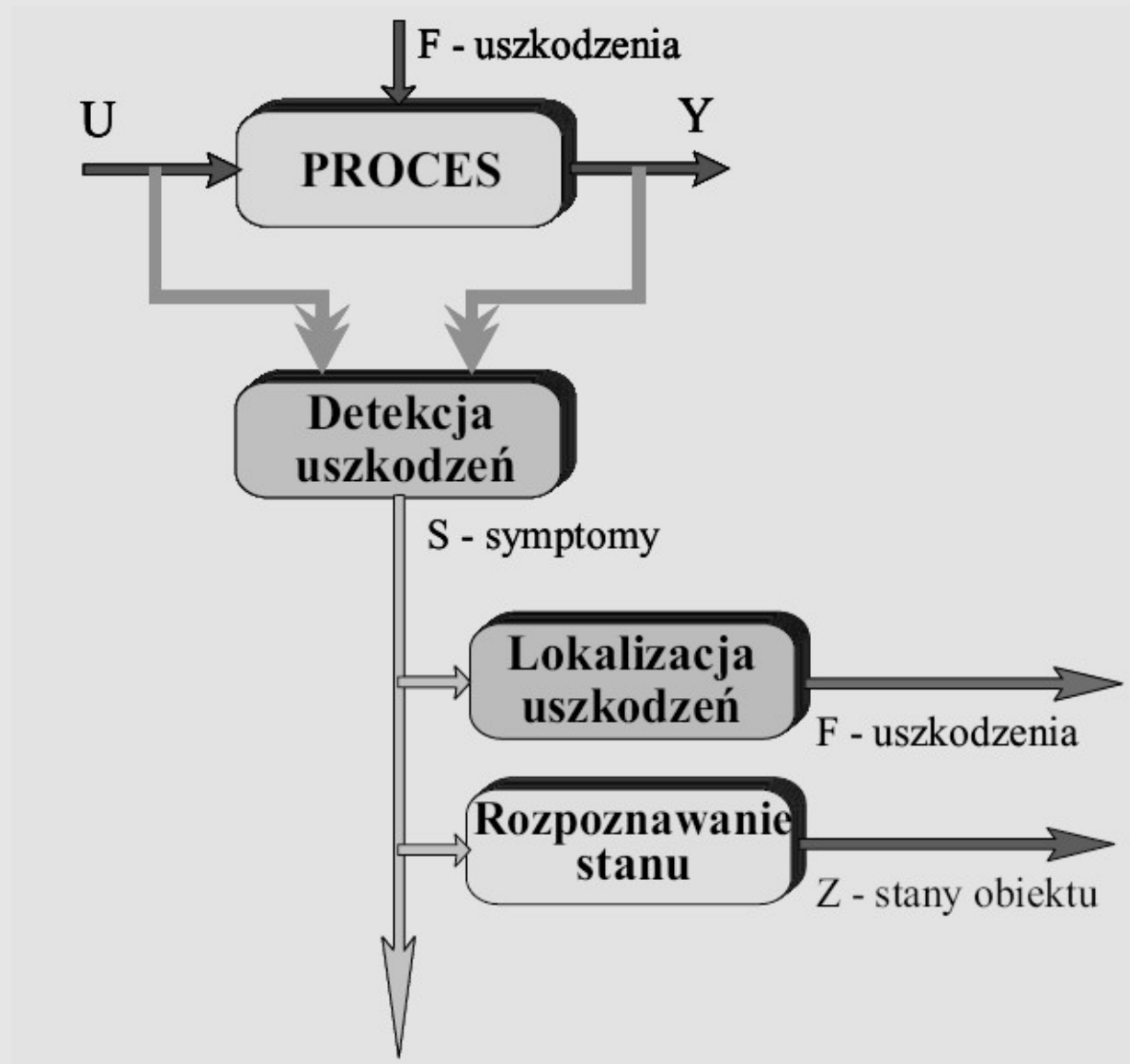


Diagnostyka - pojęcia podstawowe



Automatyczna realizacja działań diagnostycznych pozwala:

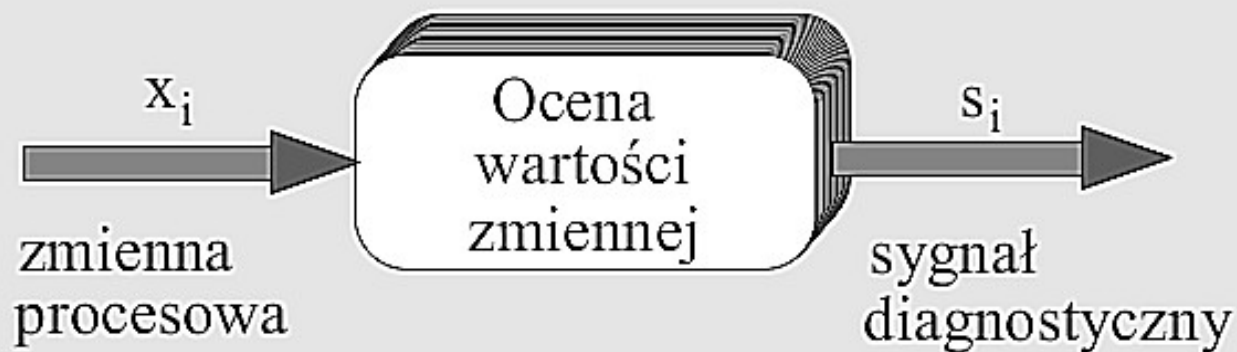
- skrócić czas wykrycia i lokalizacji uszkodzenia,
- zwiększyć niezawodność działania obiektu,
- zwiększyć efektywność ekonomiczną procesu,
- ograniczyć skutki awarii,
- uzyskać efekty tolerowania niektórych uszkodzeń,
- zmniejszyć koszty remontów.



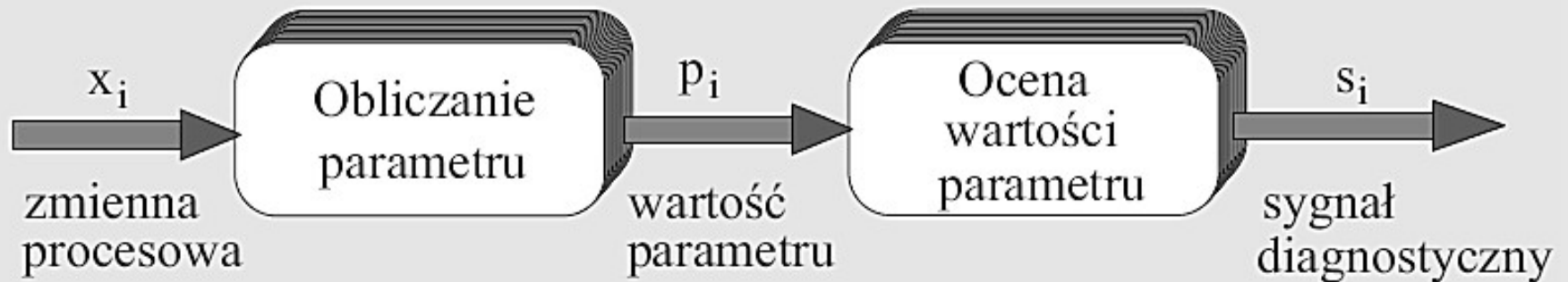
Schematy uzyskiwania sygnałów diagnostycznych

a. Ocena wartości zmiennej procesowej,

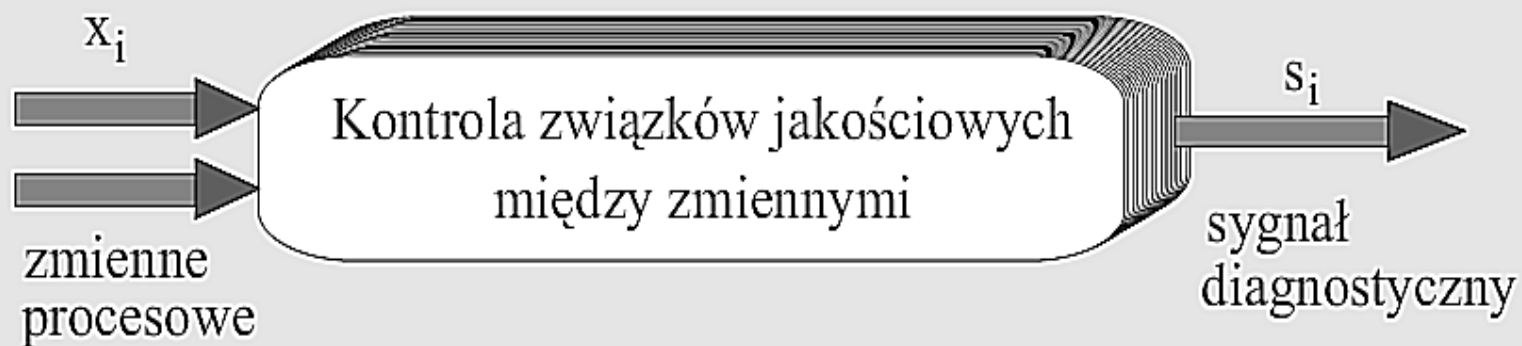
Przykład: kontrola granic alarmowych zmiennej:



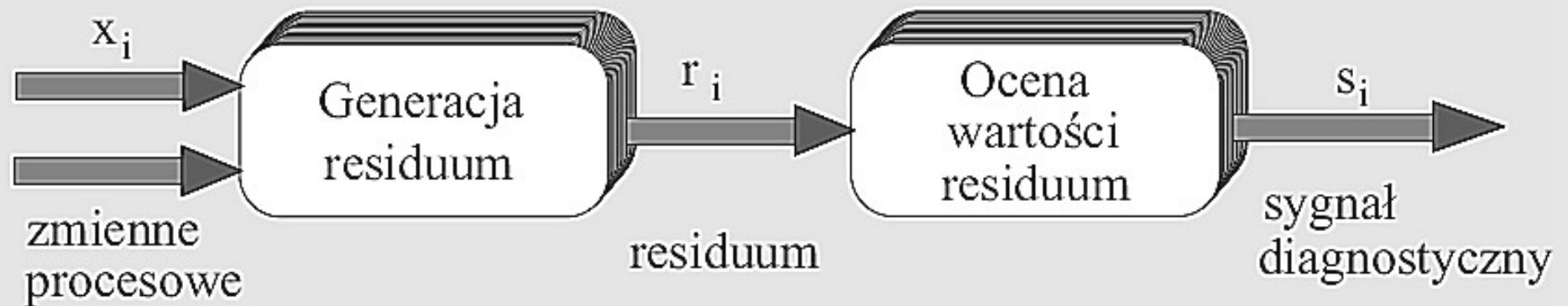
Ocena lub wyliczanie parametru zmiennej procesowej,
Przykład: szybkość zmian, średnia ...:



Kontrola związków jakościowych między zmiennymi procesowymi:



d. Algorytm testu zawierający dwa etapy:
w pierwszym wyznacza się residuum,
w drugim dokonuje się analizy wartości residuum.



Metody bazujące na kontroli związków między zmiennymi procesowymi:

Metody wykorzystujące proste związki między sygnałami:

- wykorzystanie redundancji sprzętowej czujników pomiarowych,
- kontrola sygnałów sprzężeń zwrotnych,
- kontrola relacji między wartościami zmiennych procesowych,
- kontrola związków statystycznych między zmiennymi procesowymi.

Metody wykorzystujące modele analityczne:

- detekcja z wykorzystaniem modeli fizycznych (bilansowych, równań ruchu itp.),
- detekcja z wykorzystaniem modeli liniowych typu wejście-wyjście (równania zgodności),
- detekcja z wykorzystaniem obserwatorów stanu,
- detekcja na podstawie identyfikacji on-line.

Metody bazujące na kontroli związków między zmiennymi procesowymi:

Metody wykorzystujące modelowanie jakościowe i neuronowe:

- detekcja z wykorzystaniem modeli rozmytych,
- detekcja z wykorzystaniem modeli neuronowych.

Zalety:

- możliwość wykrywania uszkodzeń urządzeń pomiarowych, wykonawczych i komponentów procesu.

Wady:

- wymagana wiedza o obiekcie w postaci modeli ilościowych lub jakościowych.

Kontrola wiarygodności sygnałów,

- wykrywanie uszkodzeń torów pomiarowych,
- sprawdzanie przekroczeń dopuszczalnych wartości,
- sprawdzanie przekroczeń szybkości zmian sygnału,
- wykrywanie braku zmienności sygnału.



Kontrola trendów,

$$y(t) - y(t-1) > Y_{dop}$$

zasada podobna jak przy sprawdzaniu szybkości zmian,
Celem jest wykrycie zbyt szybkich zmian.

Kontrola zmiennych binarnych,

$$y = Y_N$$

wyznacza nieprawidłowy stan (np. wyłącznik krańcowy) lub wykrywa zanik sygnału.

Kontrola relacji między zmiennymi procesowymi

Stosuje się tam gdzie nieznany jest model procesu (obiektu),
Bazuje na związkach technologicznych, wiedzy operatorów (ekspertów),

Związki dotyczą sygnałów lub kierunków ich zmian.

Zalety:

- bardzo proste algorytmy detekcyjne,
- skuteczne przy wykrywaniu wielu uszkodzeń,
- prawie wszystkie uszkodzenia katastroficzne są wykrywane.

Wada: nie wykrywają uszkodzeń parametrycznych.

Kontrola związków statystycznych między zmiennymi procesowymi

Przykłady zastosowań:

- do analizy paleniska z zastosowaniem dwóch czujników - optycznego i akustycznego,
- do wykrywania zaniku płomienia,
- analiza sygnałów obarczonych dużym szumem i zakłóceniami.

Analityczne metody detekcji uszkodzeń

„ Komputerowe karty pomiarowe ”

Literatura do wykładu

- Waldemar Nawrocki,
„Rozproszone systemy pomiarowe”,
Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006,
- Dariusz Świsulski,
„Komputerowa technika pomiarowa”,
Agenda Wydawnicza „Pomiary, Automatyka, Kontrola”,
Warszawa 2005,
- Waldemar Nawrocki,
„Komputerowe systemy pomiarowe”,
Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002

Plan wykładu

1. Określenia, definicje...
2. Podstawowe funkcje realizowane przez komputerowe karty pomiarowe
3. Budowa i architektura komputerowej karty pomiarowej
4. Parametry charakterystyczne
5. Zalety korzystania z komputerowych kart pomiarowych
6. Prezentacja przykładowych kart pomiarowych
7. Oprogramowanie dla komputerowych kart pomiarowych
8. Podsumowanie

Określenia

Komputerowe karty pomiarowe

są specjalizowanymi układami pomiarowymi współpracującymi z komputerem i tworzącymi wraz z nim oraz odpowiednim oprogramowaniem tzw.

wirtualne przyrządy pomiarowe.

Ze względu na rozbudowane funkcje akwizycji danych przyjął się skrót

DAQ od **Data AcQuisition card**, czyli karty pozyskującej dane.

Komputerowa karta pomiarowa może być zamontowana w obudowie komputera lub też znajdować się poza nią.

Podstawowe funkcje realizowane przez komputerowe karty pomiarowe (1)

- przetwarzanie analogowo-cyfrowe „pojedynczego” sygnału (napięcia lub prądu) z jednego z wielu wejść analogowych karty pomiarowej,
- przetwarzanie analogowo-cyfrowe wielu sygnałów doprowadzonych do wejść analogowych karty pomiarowej,
- filtracja analogowa (antyaliasingowa) sygnałów wejściowych,
- wytwarzanie żądanych sygnałów (napięcia lub prądu) na wyjściach analogowych karty pomiarowej,

Podstawowe funkcje realizowane przez komputerowe karty pomiarowe (2)

- odczytywanie sygnałów cyfrowych z wejść cyfrowych karty pomiarowej (jeśli występują),
- przypisywanie sygnałów cyfrowych do portów wyjściowych karty pomiarowej (jeśli występują),
- generowanie sygnałów cyfrowych o zadanej częstotliwości i czasie trwania na wyjściach cyfrowych,
- synchronizacja z liniami wyzwalania systemów czasu rzeczywistego (RTSI) w komputerze,
- przechowywanie danych pomiarowych i konfiguracyjnych karty w jej pamięci wewnętrznej

Budowa komputerowej karty pomiarowej (1)

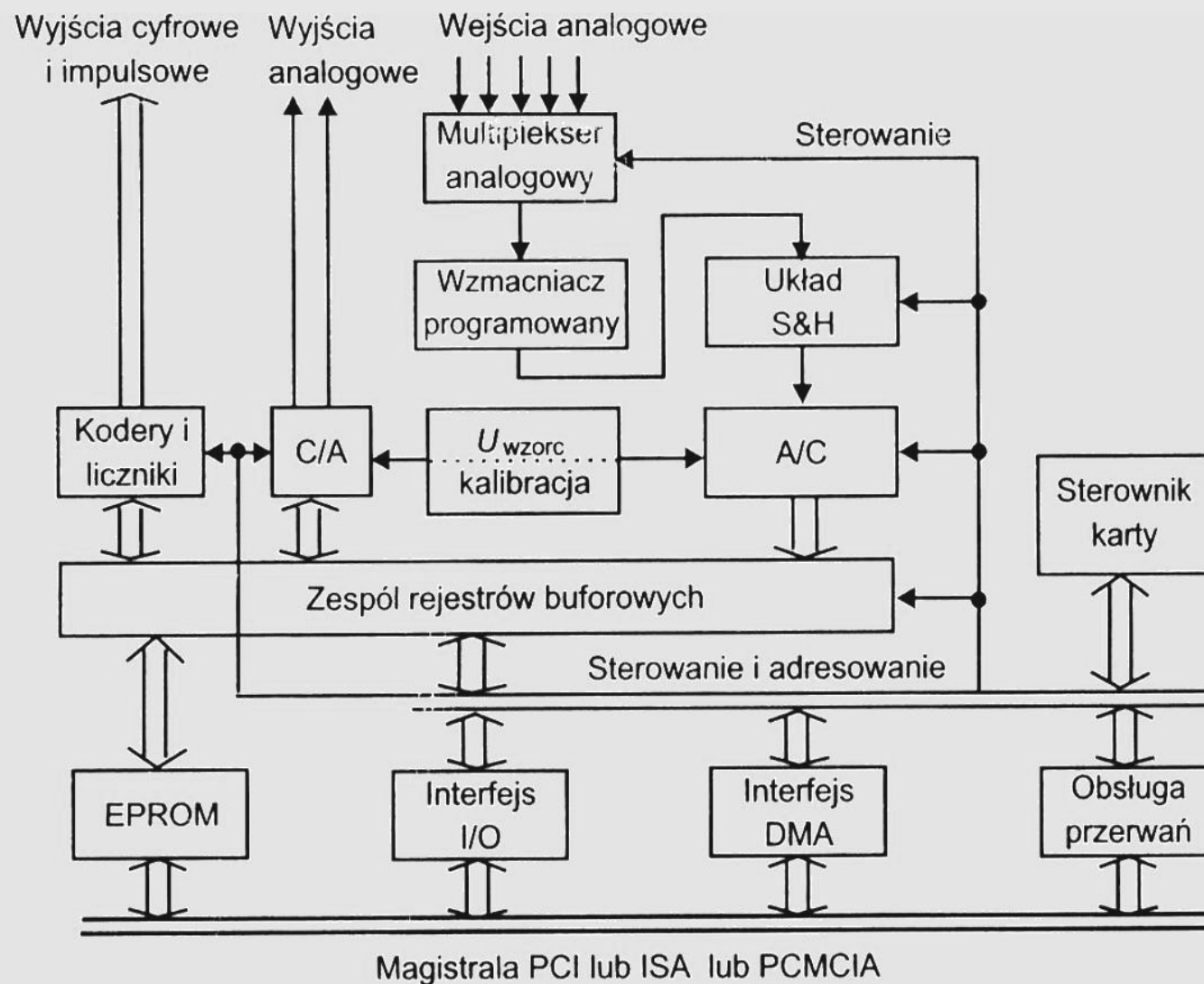
W skład typowej karty pomiarowej wchodzi następujące komponenty:

- multiplekser analogowy, przełączający sygnały z wielu kanałów pomiarowych,
- wzmacniacz programowany, dostosowujący poziom sygnałów zgodnie z wybranym zakresem pomiarowym,
- układ próbkująco-pamiętający (S&H) lub próbkująco-śledzący (S&T),
- przetwornik analogowo-cyfrowy,

Budowa komputerowej karty pomiarowej (2)

- przetwornik cyfrowo-analogowy (jeśli są wyjścia analogowe),
- kodery i liczniki (jeśli są wyjścia cyfrowe),
- precyzyjne źródło napięcia odniesienia,
- układ autokalibracji,
- blok sterujący,
- zespół rejestrów buforowych,
- układy pamięci.

Architektura komputerowej karty pomiarowej



Parametry charakterystyczne karty pomiarowej (2)

- **rozdzielczość bitowa przetwornika analogowo-cyfrowego**
 - typowo od 8 do 24 bitów => może znacznie przewyższyć rozdzielczość przyrządów cyfrowych wysokiej klasy,
- **rozdzielczość bezwzględna**
 - określana dla wybranego zakresu pomiarowego:

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^N}, \quad N - \text{liczba bitów},$$

- **dokładność pomiaru**
 - podawana w formie tabelarycznej, w zależności od zakresu pomiarowego, czasu obserwacji, temperatury i in. czynników; zwykle od 2 do 10 razy gorsza od rozdzielczości,

Zalety korzystania z komputerowych kart pomiarowych

- możliwość prowadzenia pomiarów wielokanałowych z bardzo dużą dokładnością,
- generacja analogowych lub cyfrowych sygnałów sterujących, jak również sygnałów testowych dla systemu pomiarowego,
- realizacja podstawowych funkcji multimetru cyfrowego, generatora funkcyjnego i oscyloskopu (zależnie od wyboru trybu pracy),
- współpraca z zazwyczaj bardzo rozbudowanym oprogramowaniem, służącym wizualizacji, analizie oraz archiwizacji rejestrowanych sygnałów,
- nie zabierają miejsca, jeśli osadzone w obudowie komputera

Producenci komputerowych kart pomiarowych

Komputerowe karty pomiarowe są produkowane przez wiele firm. Do najbardziej znanych należą:

- Advantech,
- Computer Board,
- IO-tech,
- Keithley,
- **National Instruments,**
- RK-system.

Przykłady komputerowych kart pomiarowych (1)

PenScopeDaq – oscyloskop jednokanałowy z łączem USB

- szeroki zakres pomiarowy
– od 20 mV/dz do 5 V/dz,
- regulowana szybkość próbkowania
– od 1 kpróbek/s do 100 Mpróbek/s,
- zasilany bezpośrednio
- z gniazda USB,
- wygodny w użytkowaniu,
- do zastosowań serwisowych,
laboratoryjnych,
edukacyjnych



Przykłady komputerowych kart pomiarowych (2)

ScopeLogicDaq – system akwizycji danych z oscyloskopem dwukanałowym i analizatorem stanów logicznych

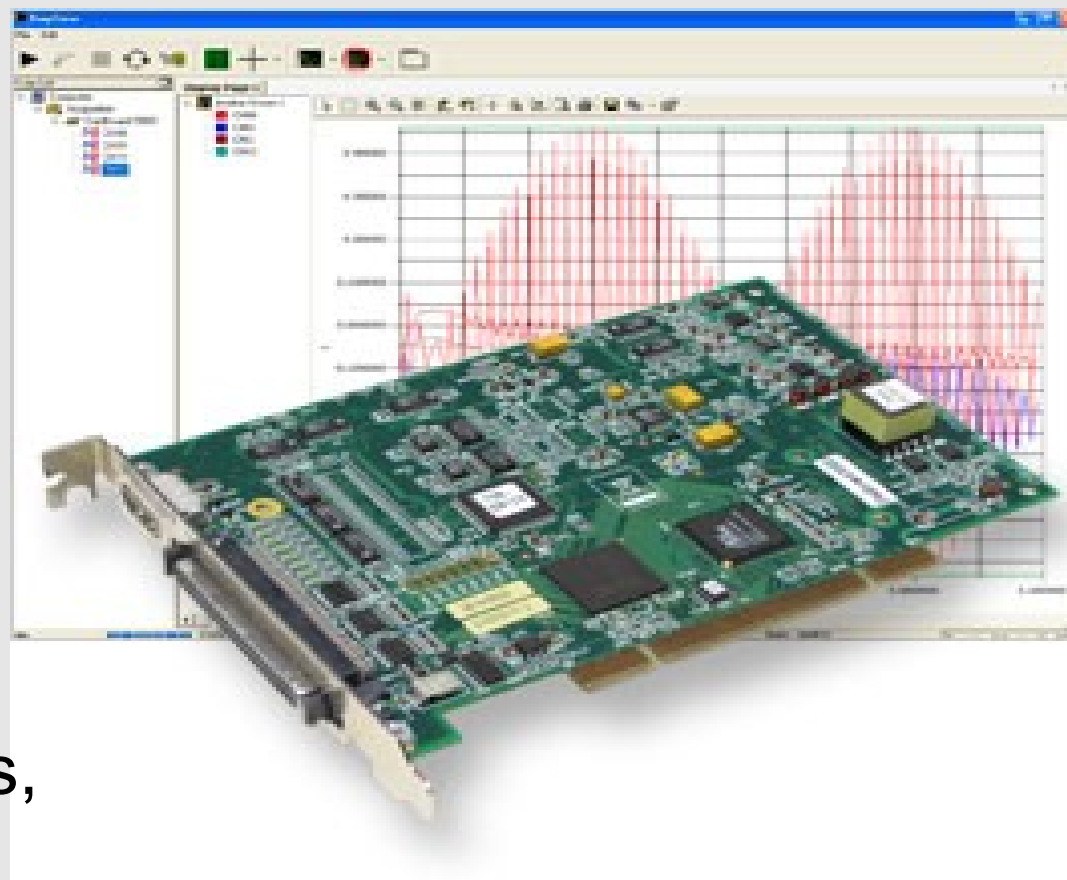
- szybkość próbkowania
 - do 200 Mpróbek/s przy akt. jednym kanale,
 - do 100 Mpróbek/s przy dwóch kanałach,
- 16 kanałów cyfrowych,
- umożliwia dokładną analizę sygnałów analogowo-cyfrowych oraz badanie zależności między nimi



Przykłady komputerowych kart pomiarowych (3)

DaqBoard 3000 (IO-tech)

- 16 wejść analogowych (8 w trybie różnicowym),
- wejścia/wyjścia cyfrowe – 24 linie,
- przetwornik analogowo-cyfrowy – 16-bitowy,
- maksymalna szybkość
- Próbkowania – 1 Mpróbek/s,
- 4 liczniki 32-bitowe



Przykłady komputerowych kart pomiarowych (4)

PCI 6120 (National Instruments)

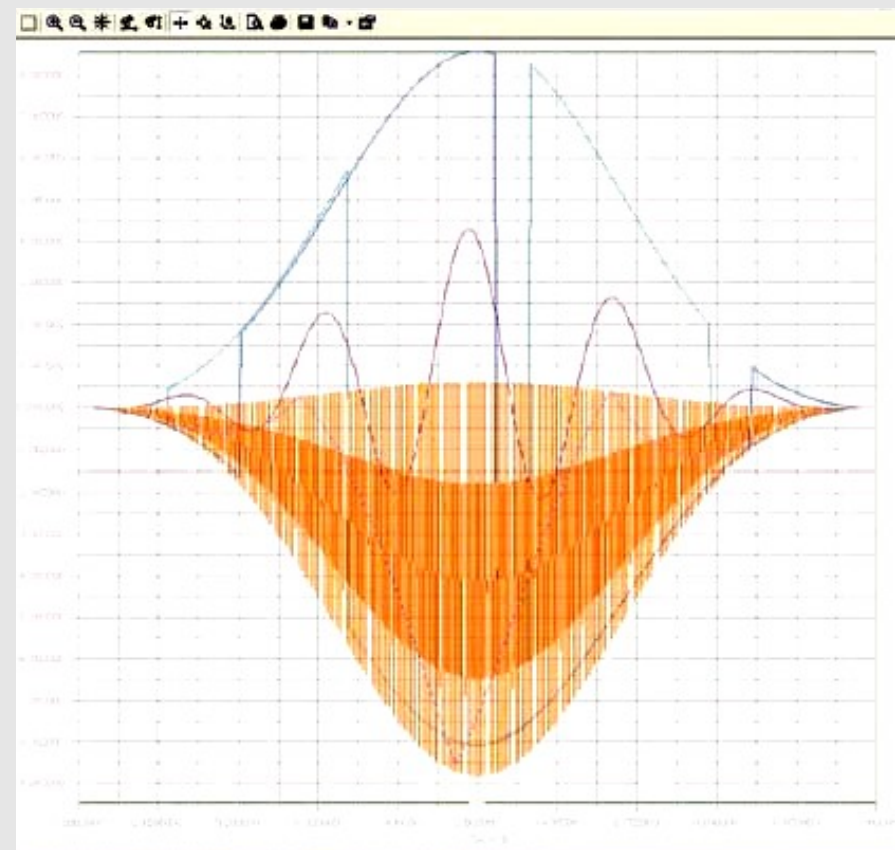
- 4 wejścia analogowe,
- zakres napięć wejściowych – do 42 V,
- 2 wyjścia analogowe,
- 8 cyfrowych linii wejścia/wyjścia,
- dedykowany przetwornik A/C dla każdego kanału (16-bitowy),
- 2 liczniki 24-bitowe,
- przerzutniki analogowe i cyfrowe



Oprogramowanie komputerowych kart pomiarowych (1)

DaqVIEW – „bezpłatne” oprogramowanie firmy IO-tech, obsługujące wszystkie karty pomiarowe tego producenta

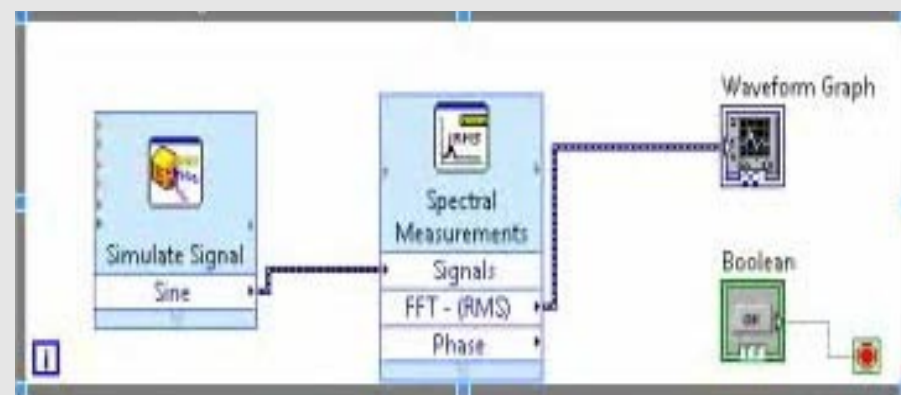
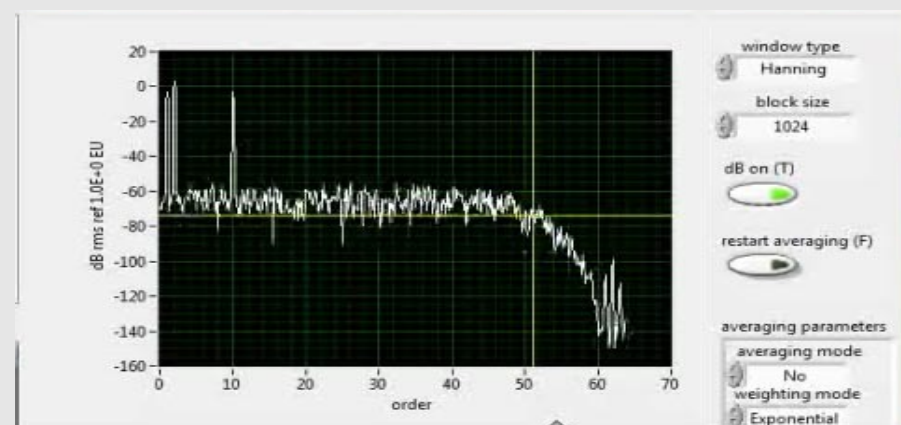
- wbudowane analizatory różnego typu, oscyloskop,
- wyświetlanie w czasie rzeczywistym,
- funkcje skalujące,
- współpraca z Matlabem, Excelem



Oprogramowanie komputerowych kart pomiarowych (2)

LabVIEW - graficzne środowisko pomiarowe i programistyczne opracowane przez firmę National Instruments

- graficzny język programowania,
- łączenie bloków graficznych, odpowiadających za realizację różnych funkcji,
- uruchomienie programu determinuje przepływ sygnałów/danych pomiędzy blokami



Podsumowanie

- Komputerowe karty pomiarowe są głównym ogniwem wirtualnych przyrządów pomiarowych.
- Umożliwiają wielokanałowy pomiar sygnałów doprowadzanych do wejść analogowych, a także generują żądane sygnały analogowe/cyfrowe na odpowiednich portach wyjściowych.
- Zależnie od trybu pracy, ta sama karta może pełnić różne funkcje (multimetru, generatora funkcyjnego, oscyloskopu).
- Oferują najlepsze parametry przetwarzania, jak chodzi o rozdzielczość pomiarową oraz szybkość próbkowania.
- Niektórych zadań pomiarowych nie sposób wykonać inaczej lub lepiej niż przy zastosowaniu komputerowych kart pomiarowych.

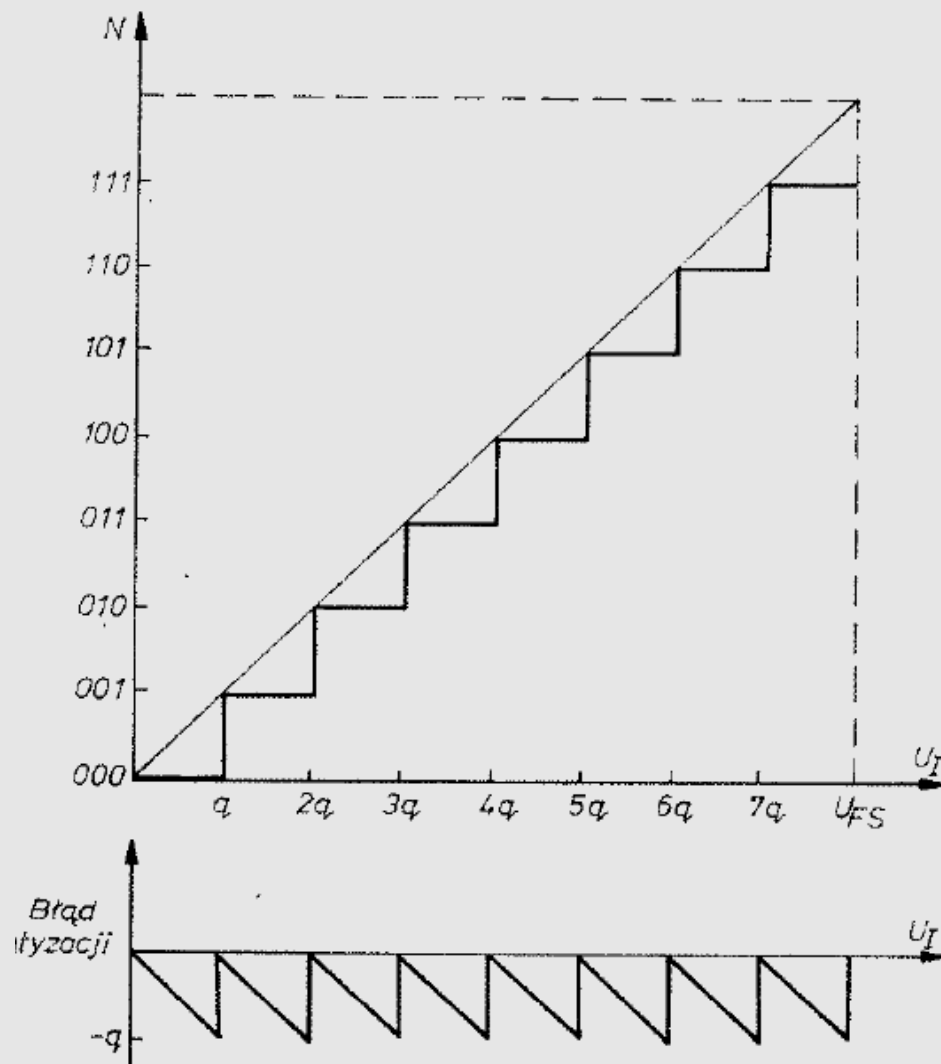
Parametry przetworników analogowo cyfrowych

Podstawowe parametry przetworników wpływające na ich dokładność i szybkość przetwarzania (statyczne i dynamiczne):

- Rozdzielczość (determinuje błąd kwantyzacji)
- Błędy analogowe (nieliniowości, przesunięcia i wzmocnienia)
- Czas przetwarzania
- Częstotliwość przetwarzania
- Współczynniki cieplne
- Współczynniki tłumienia wpływu zmian zasilania

Błąd dyskretyzacji (kwantyzacji)

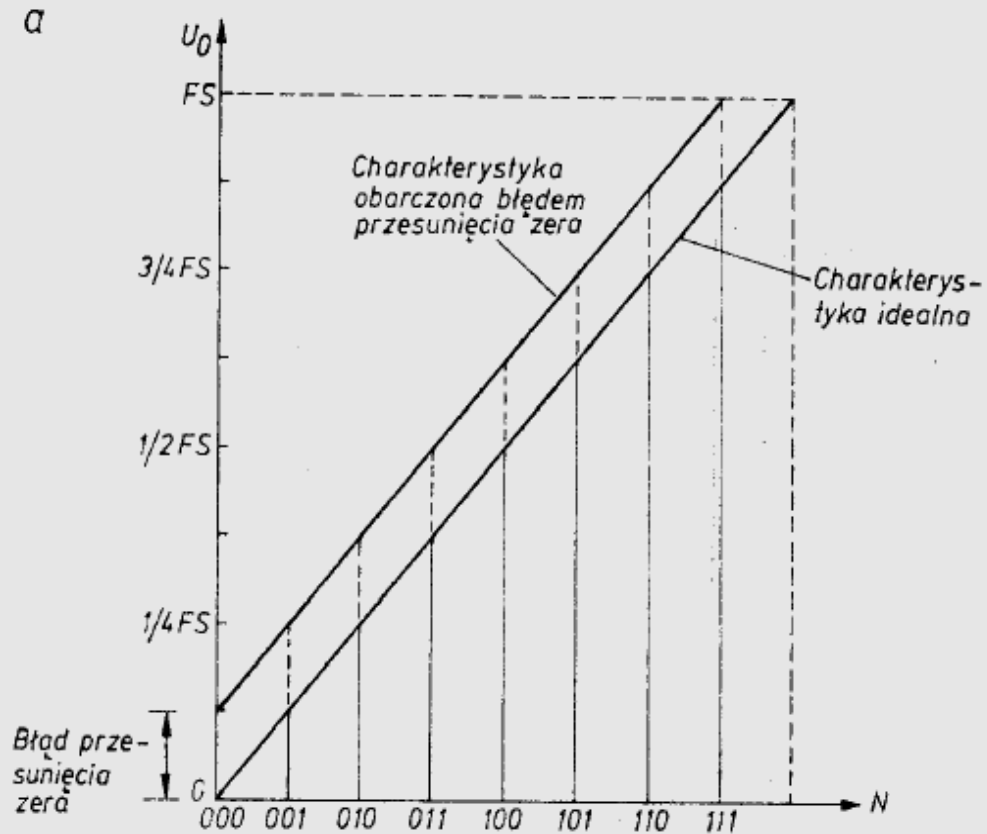
Błąd wynika z samej istoty procesu kwantowania sygnału analogowego przy przetwarzaniu go na postać cyfrową.



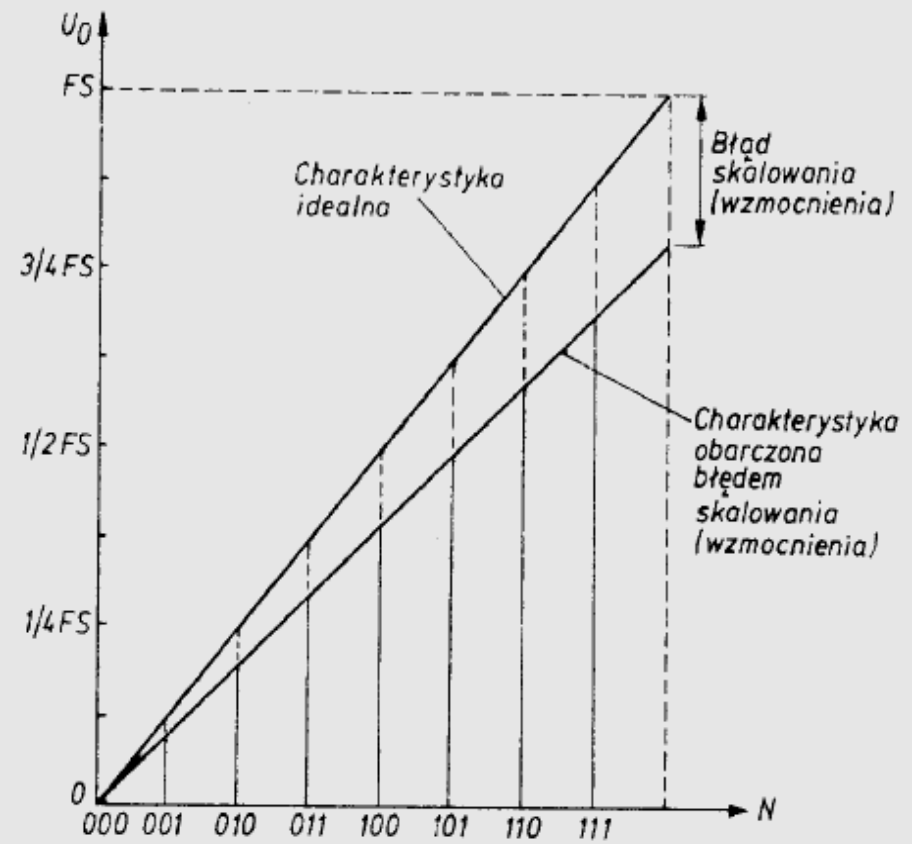
| <i>Bity</i> | <i>Liczba poziomów</i> | <i>S/N [dB]</i> | <i>Przedział kwantowania [mV], fs=10V</i> |
|-------------|------------------------|-----------------|---|
| 8 | 256 | 58,9 | 39,1 |
| 12 | 4096 | 72,2 | 2,44 |
| 16 | 65536 | 107,1 | 0,15 |

Błędy przetwarzania A/C

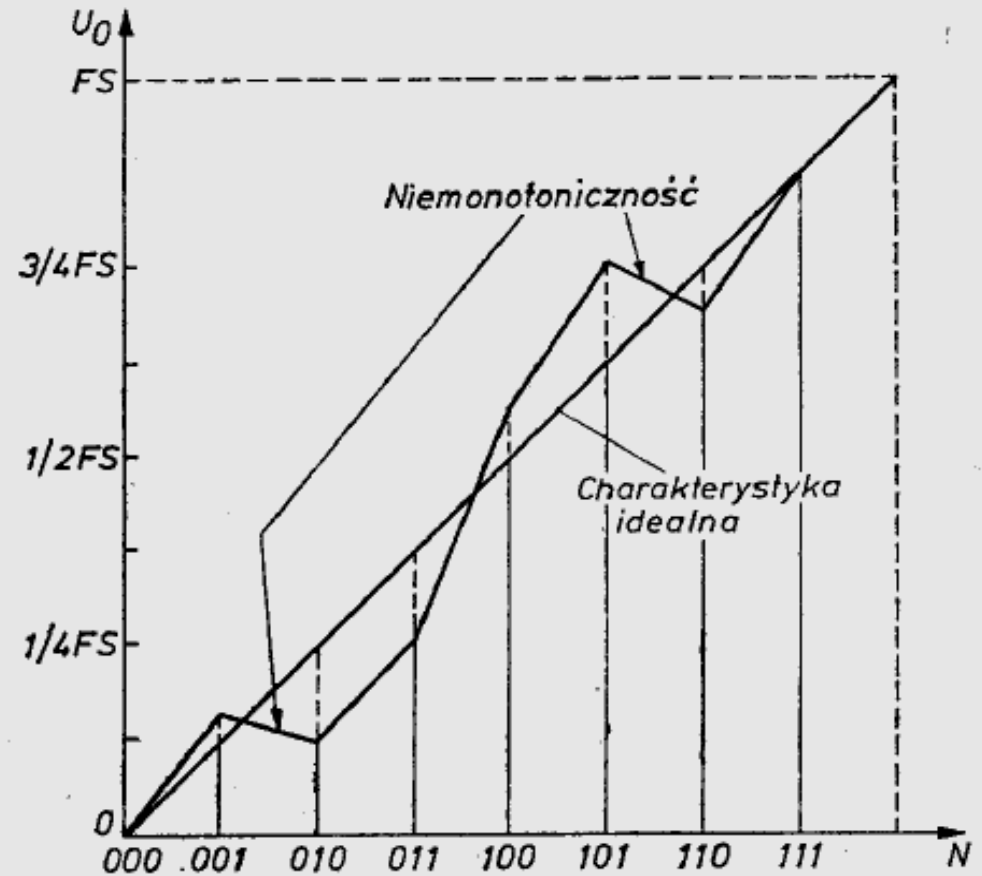
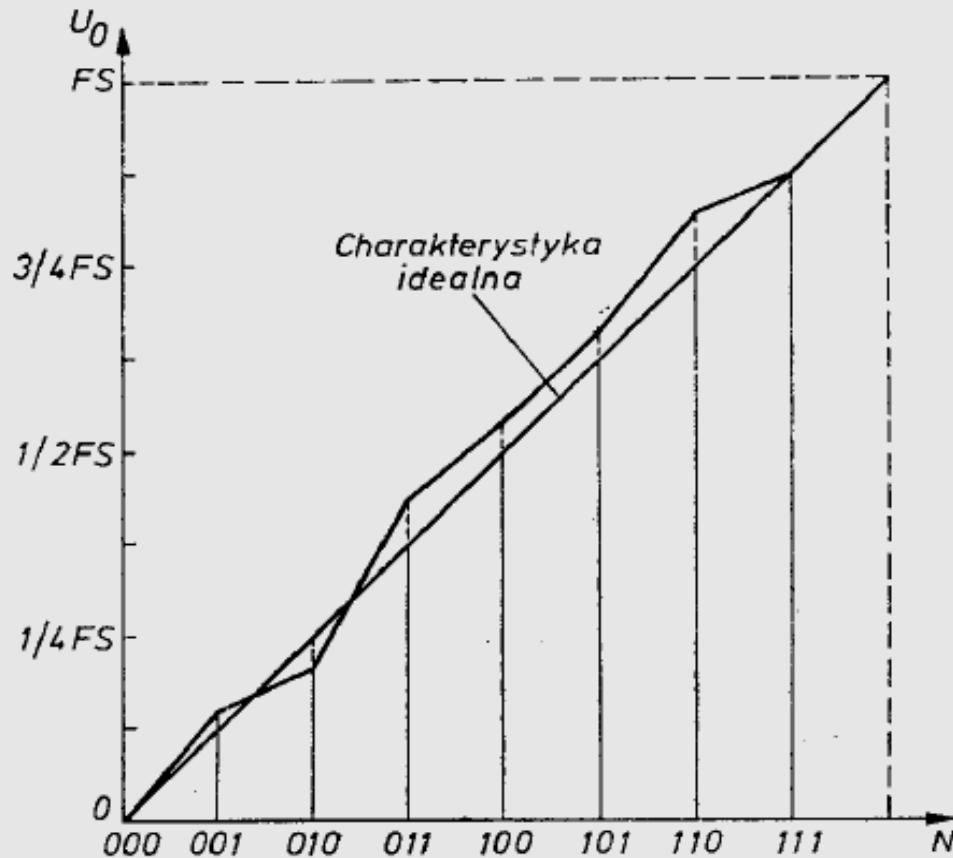
Błąd przesunięcia zera



Błąd skalowania (wzmocnienia)

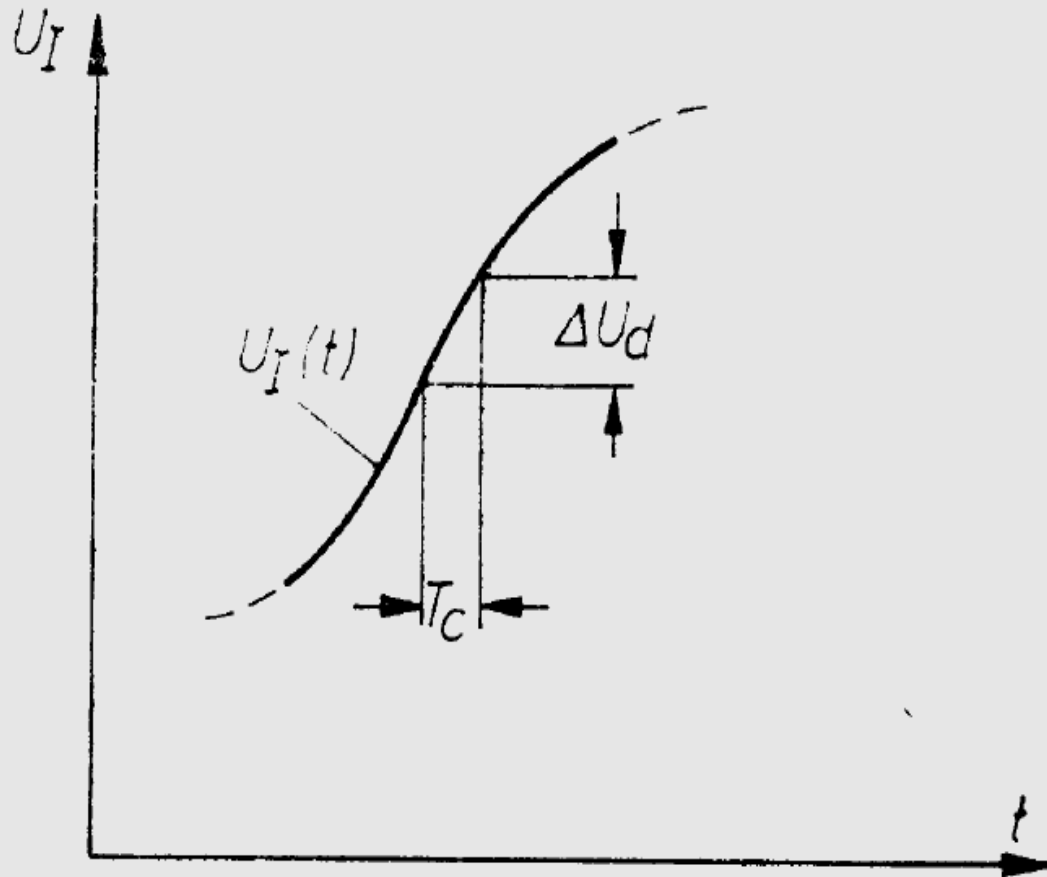


Błędy przetwarzania A/C



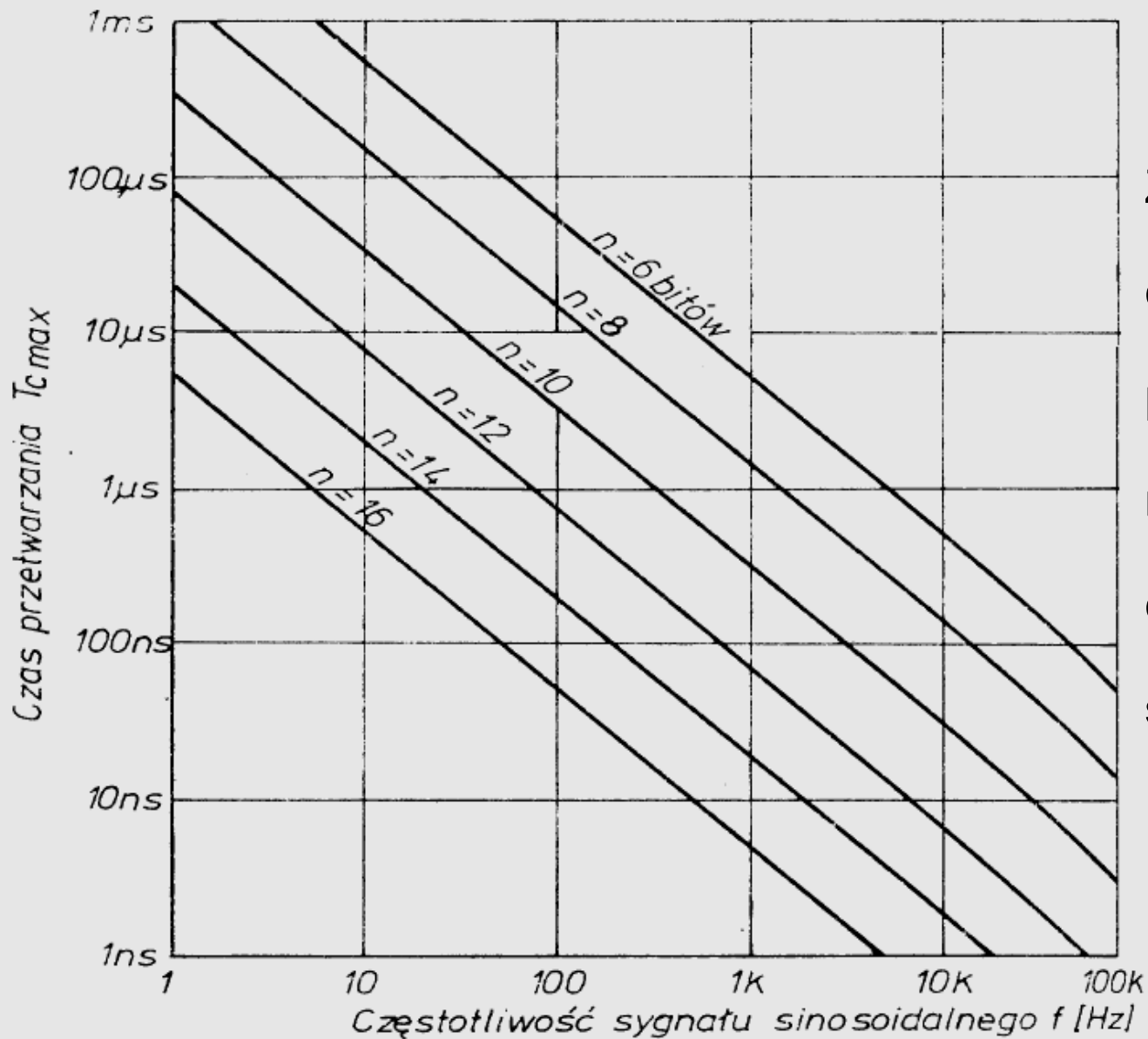
Charakterystyka przetworników z mniejszym i większym błędem nieliniowości różniczkowej. W drugim przypadku doszło już do zaburzenia monotoniczności przetwornika, co w wielu zastosowaniach może być nie do przyjęcia.

Błąd dynamiczny



Jeżeli podczas przetwarzania zmienia się wartość sygnału wejściowego, to Podczas przetwarzania przez przetworniki reagujące na wartość Chwilową sygnału powstaje błąd Dynamiczny, będący funkcją szybkości zmian przebiegu wejściowego i czasu przetwarzania.

Błąd dynamiczny



Zależność maksymalnego czasu przetwarzania, przy którym błąd dynamiczny nie przekracza 1 LSB od częstotliwości wejściowego sygnału sinusoidalnego.

Inne parametry przetworników A/C

Parametry wejścia i wyjścia:

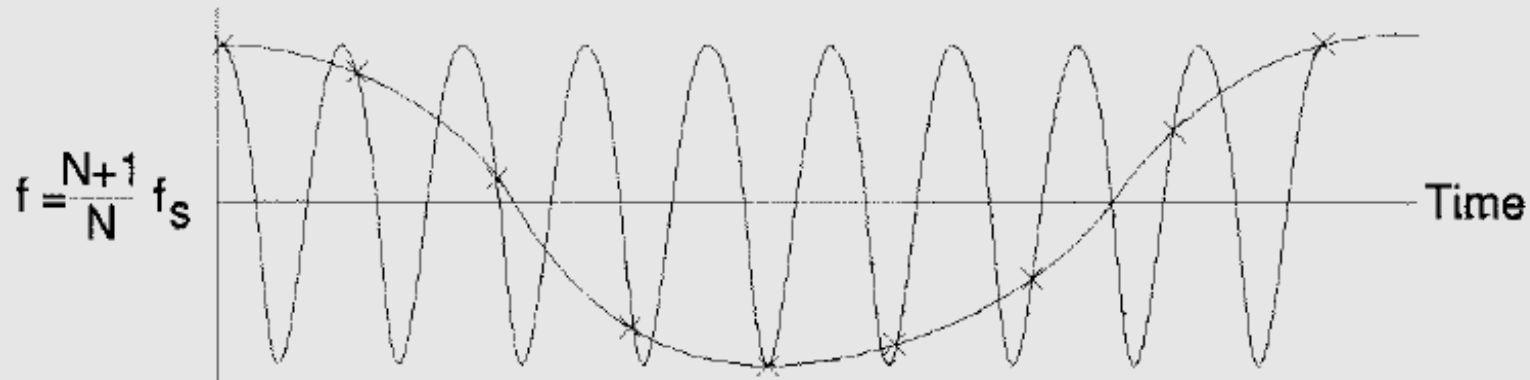
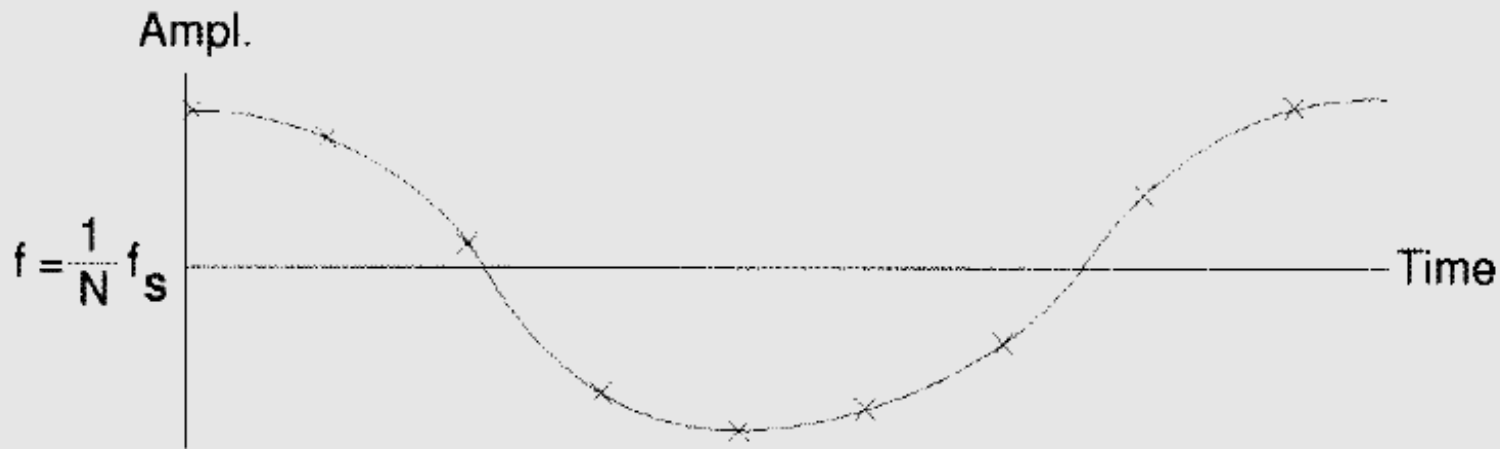
- Zakres i polaryzacja napięć wejściowych
- Impedancja wejściowa
- Przeciężalność wejścia (maksymalne dopuszczalne napięcie)
- Kod i poziomy logiczne sygnału wyjściowego
- Obciążalność wyjścia

Pozostałe parametry:

- Rodzaj zasilania, pobór mocy
- Zakres temperatury pracy
- Inne wymagania klimatyczne

Błąd aliasingu

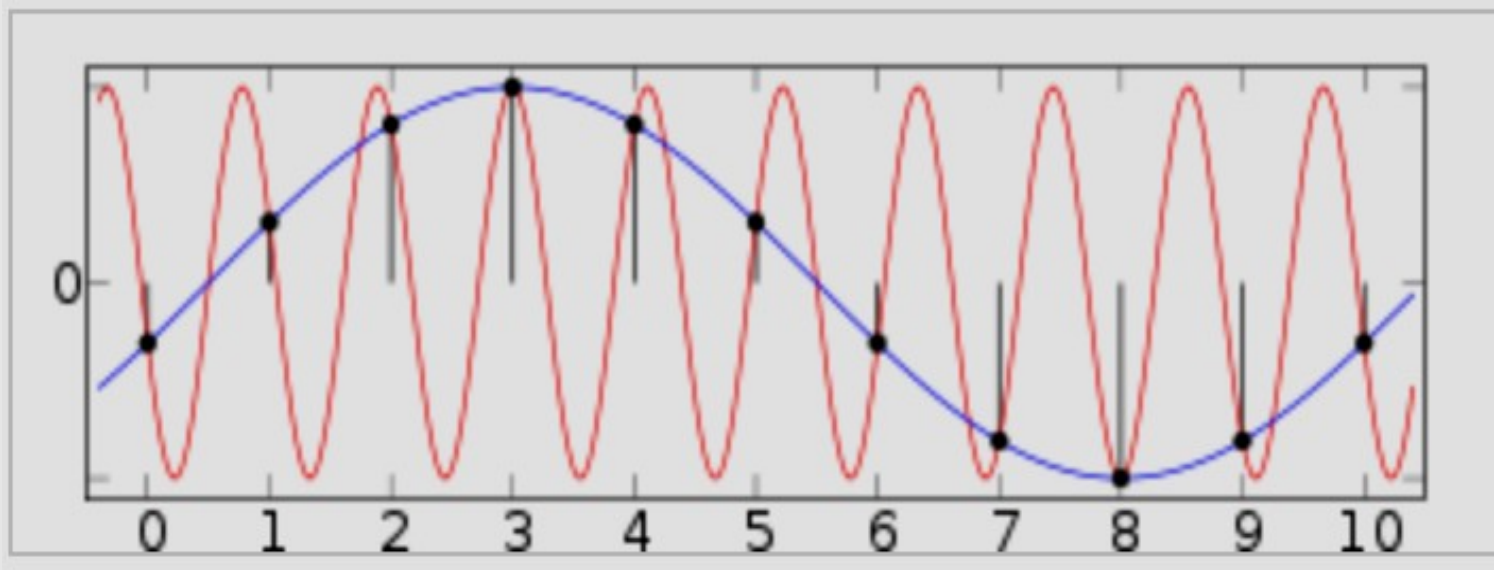
Błąd aliasingu nie jest błędem samego przetwornika, ale skutkiem błędnego doboru częstotliwości przetwarzania.



Minimalna częstotliwość przetwarzania powinna być dwa razy większa od maksymalnej częstotliwości harmoniczných obecnych w sygnale wejściowym.

Błąd aliasingu

By uniknąć aliasingu konieczne jest stosowanie wejściowych filtrów dolnoprzepustowych.



Zadanie może być bardzo ułatwione gdy zastosujemy zwiększoną częstotliwość przetwarzania, nadpróbkiwanie (oversampling).

Klasyfikacja metod przetwarzania analogowo cyfrowego (A/C, A/D)

Metody pośrednie

- czasowa częstotliwościowa

Metody bezpośrednie

- kompensacyjna bezpośredniego porównania

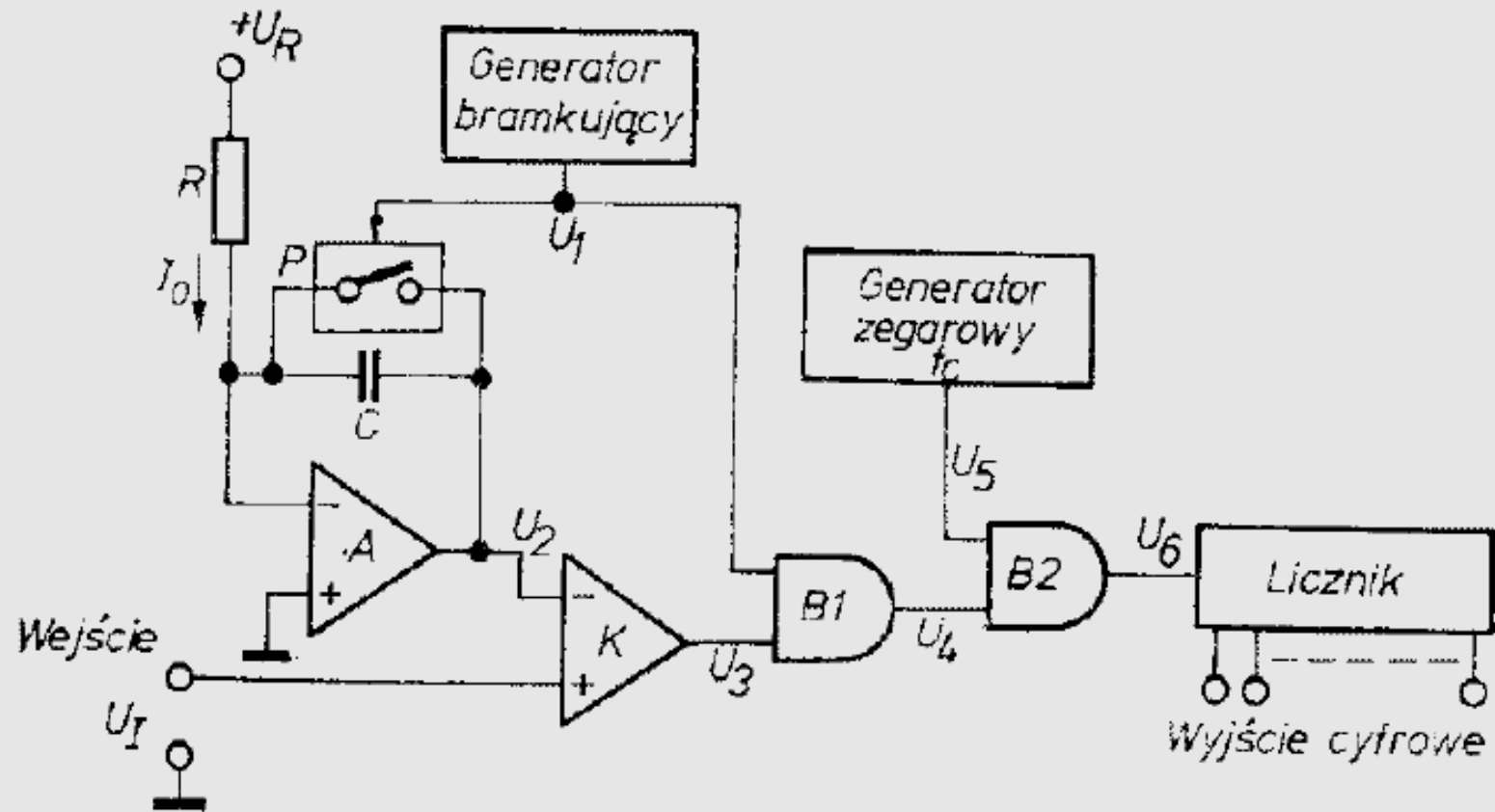
Prosta

- z podwójnym całkowaniem
- z potrójnym całkowaniem
- z poczwórnym całkowaniem

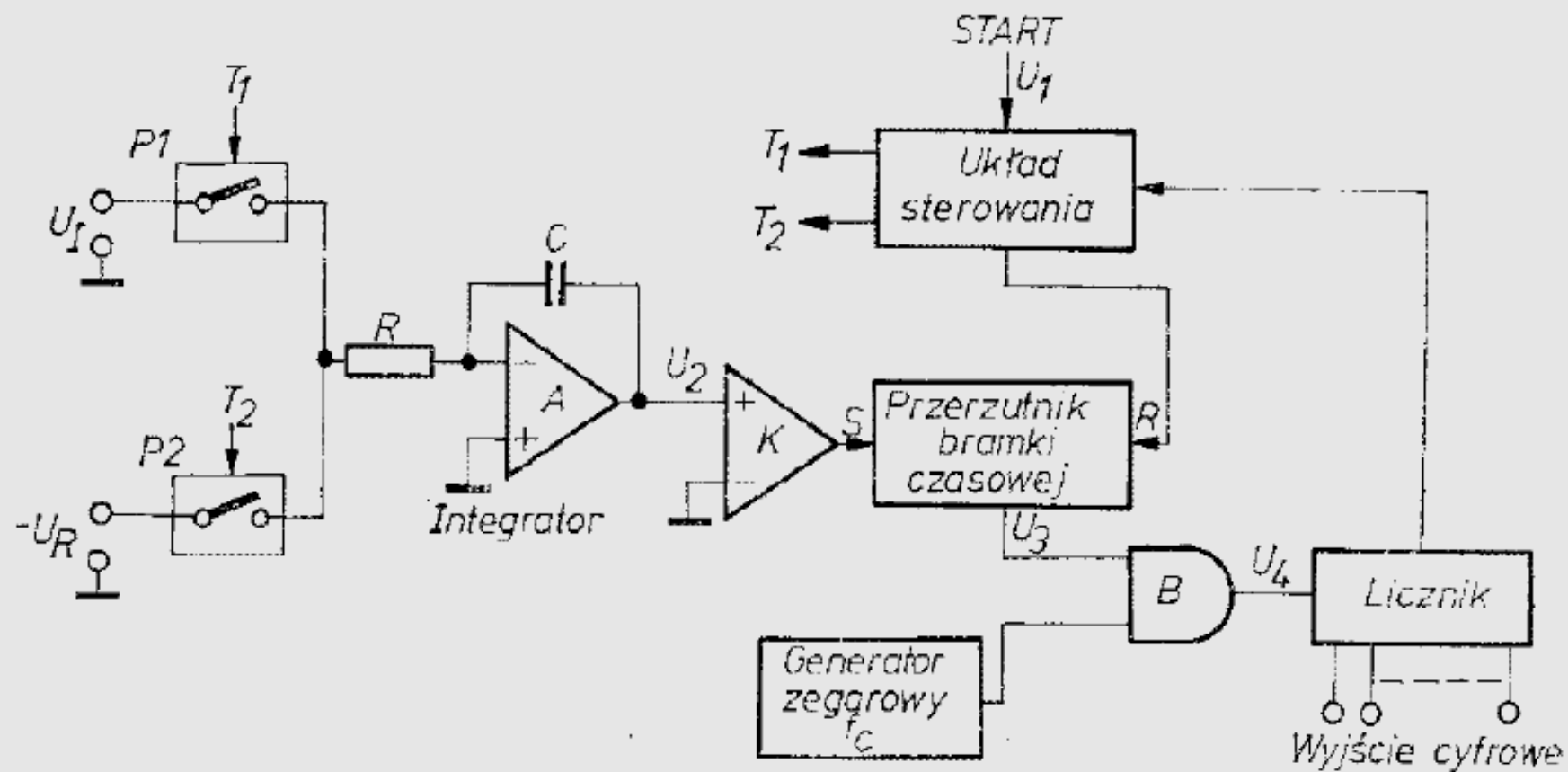
Prosta z równoważeniem ładunków Deltasigma

- z kompensacją wagową
- z kompensacją równomierną
- z porównaniem równoległym

Metoda czasowa prosta



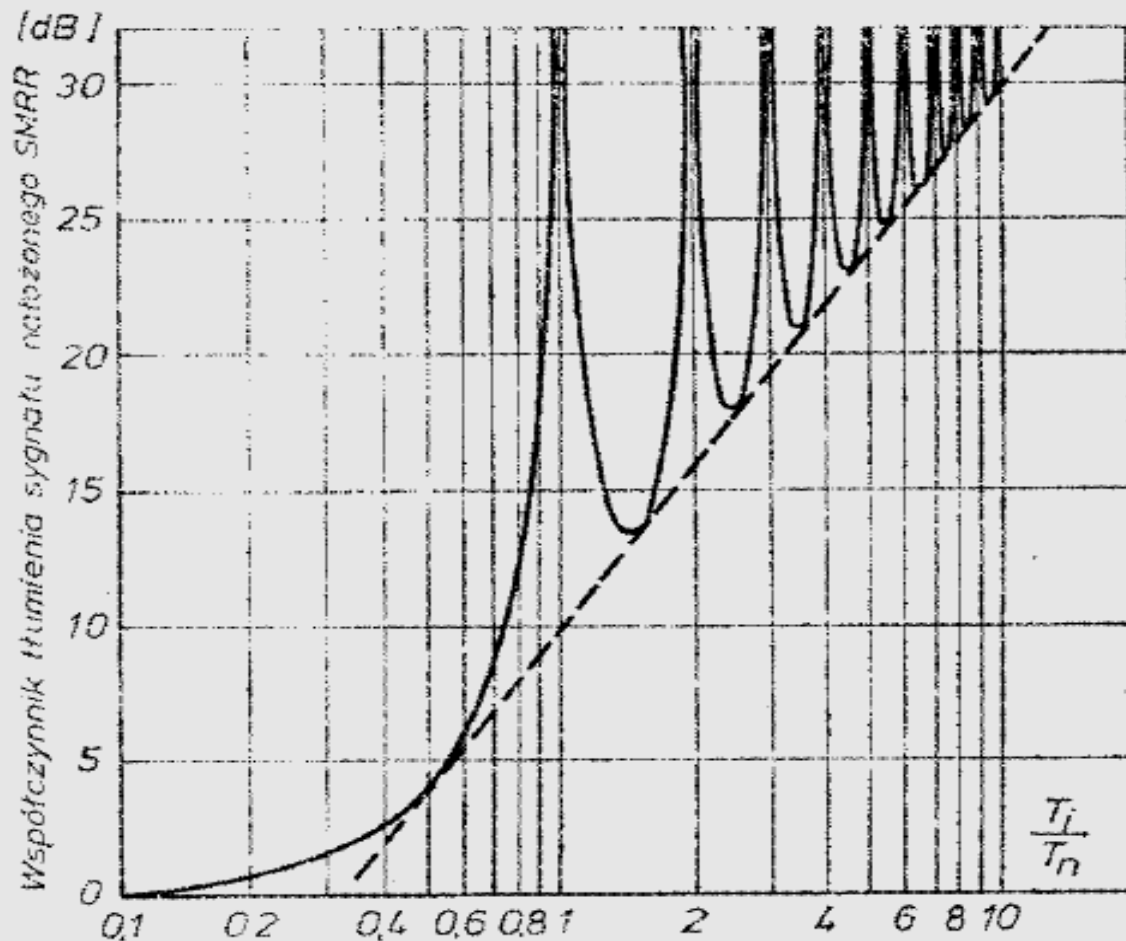
Przetwornik z podwójnym całkowaniem



Przetwornik z podwójnym całkowaniem

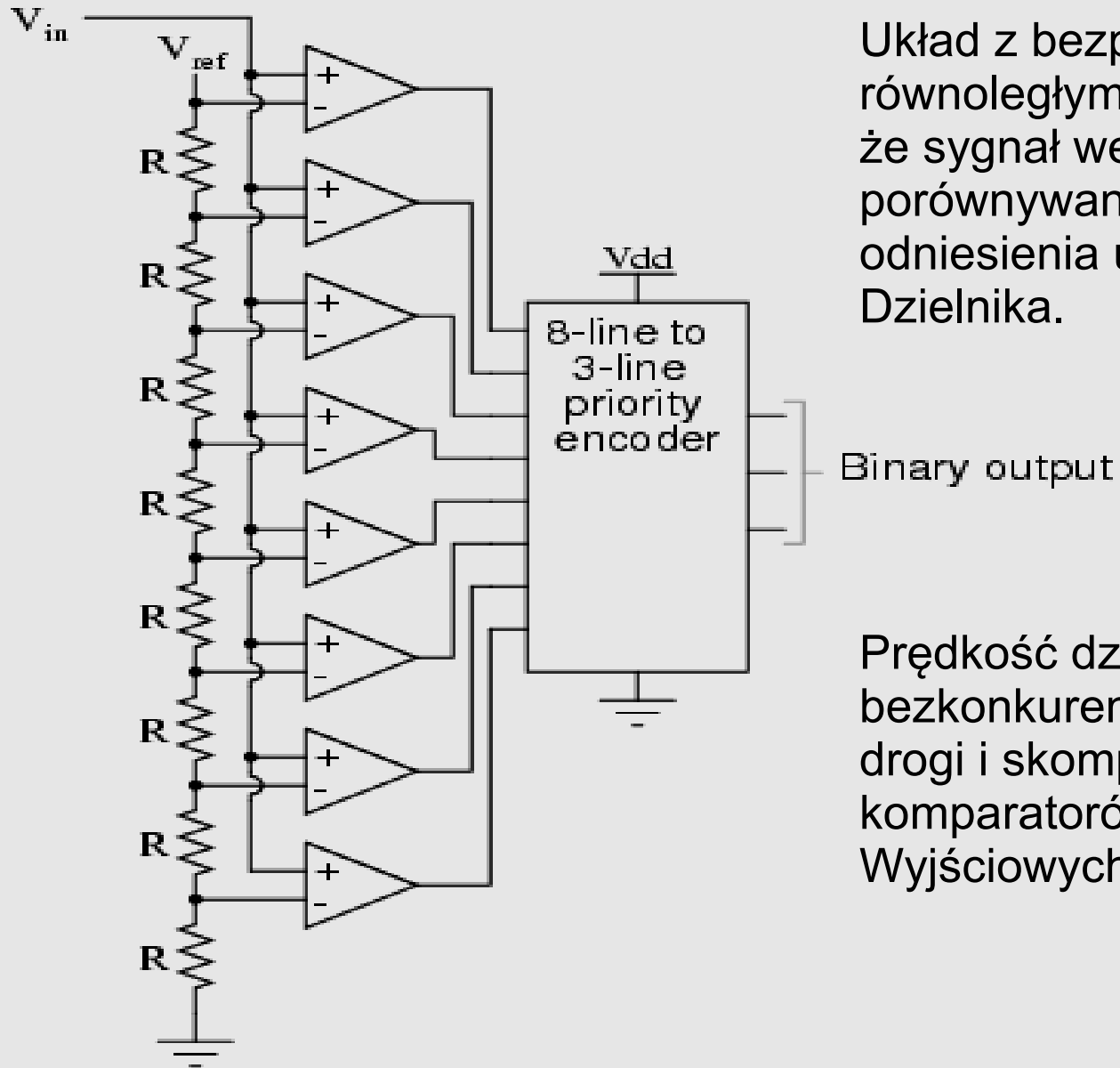
Przetwornik całkuje szумы i zakłócenia sygnału wejściowego.

Jest zatem mało wrażliwy na szумы wielkiej częstotliwości, a szczególnie na zakłócenia o częstotliwości będącej wielokrotnością odwrotności okresu całkowania.



Rysunek przedstawia tłumienie zakłóceń sygnału wejściowego w zależności od okresu tych zakłóceń.

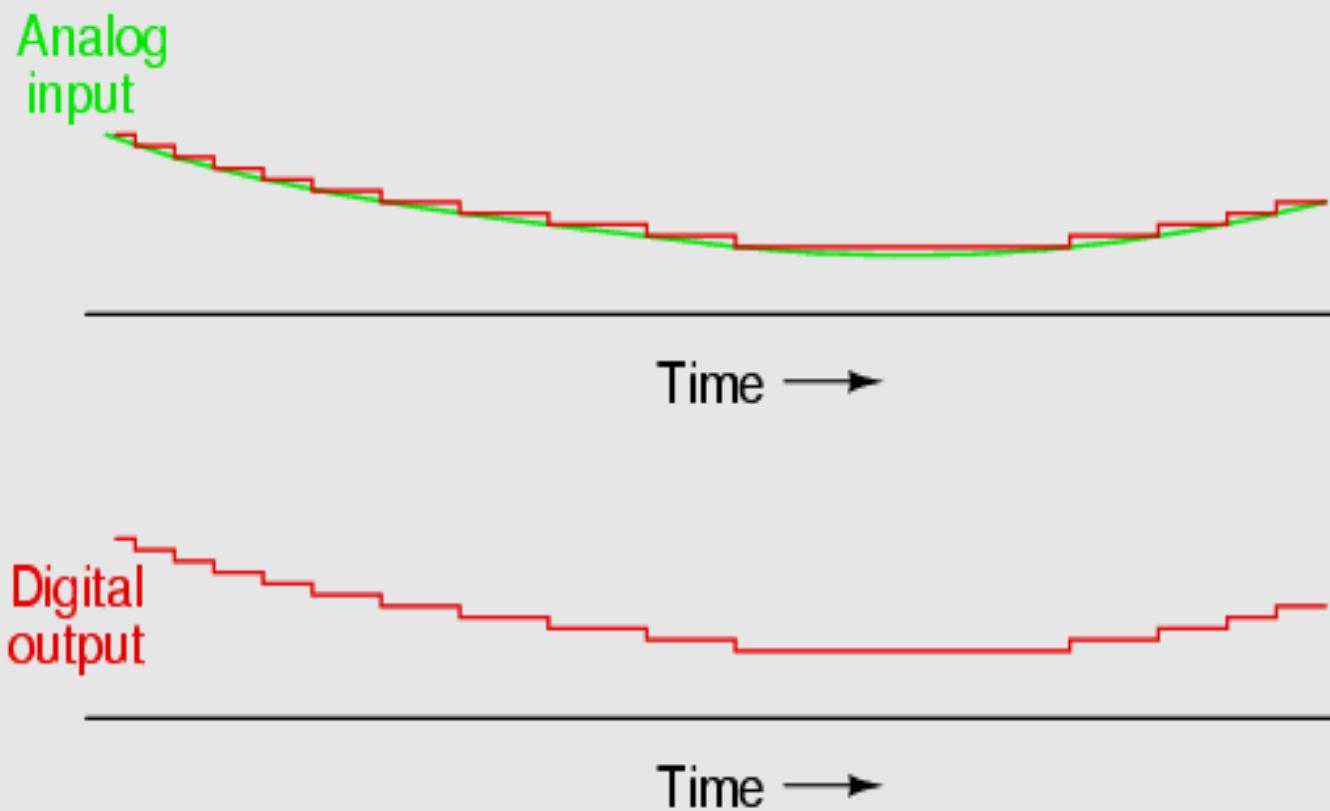
Przetwornik z bezpośrednim porównaniem



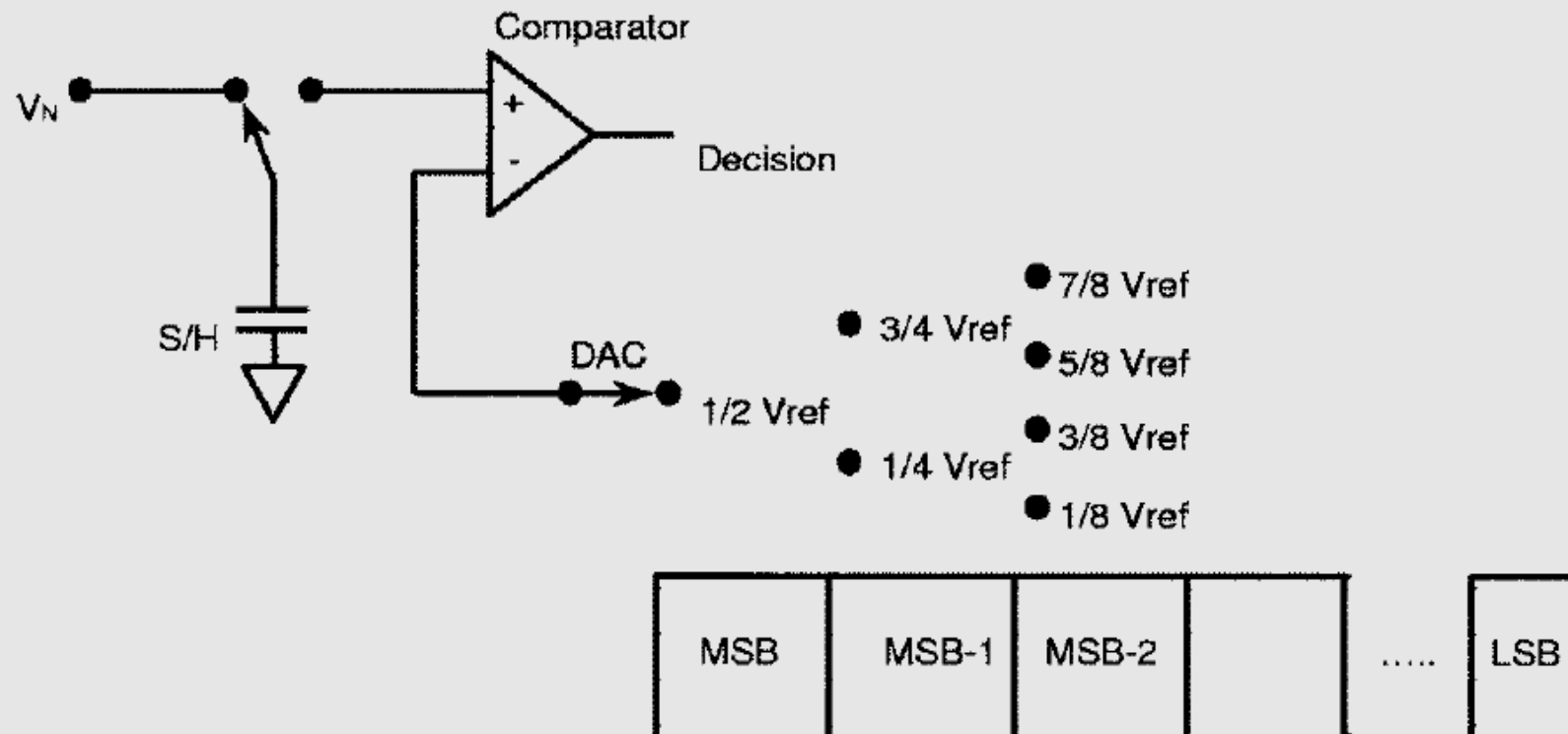
Układ z bezpośrednim porównaniem równoległym charakteryzuje się tym, że sygnał wejściowy jest jednocześnie porównywany z całym szeregiem napięć odniesienia ustalonych za pomocą Dzielnika.

Prędkość działania takiego układu jest bezkonkurencyjna, ale jest on bardzo drogi i skomplikowany – potrzeba tyle komparatorów, ile jest stanów Wyjściowych przetwornika

Przetwornik z bezpośrednim porównaniem

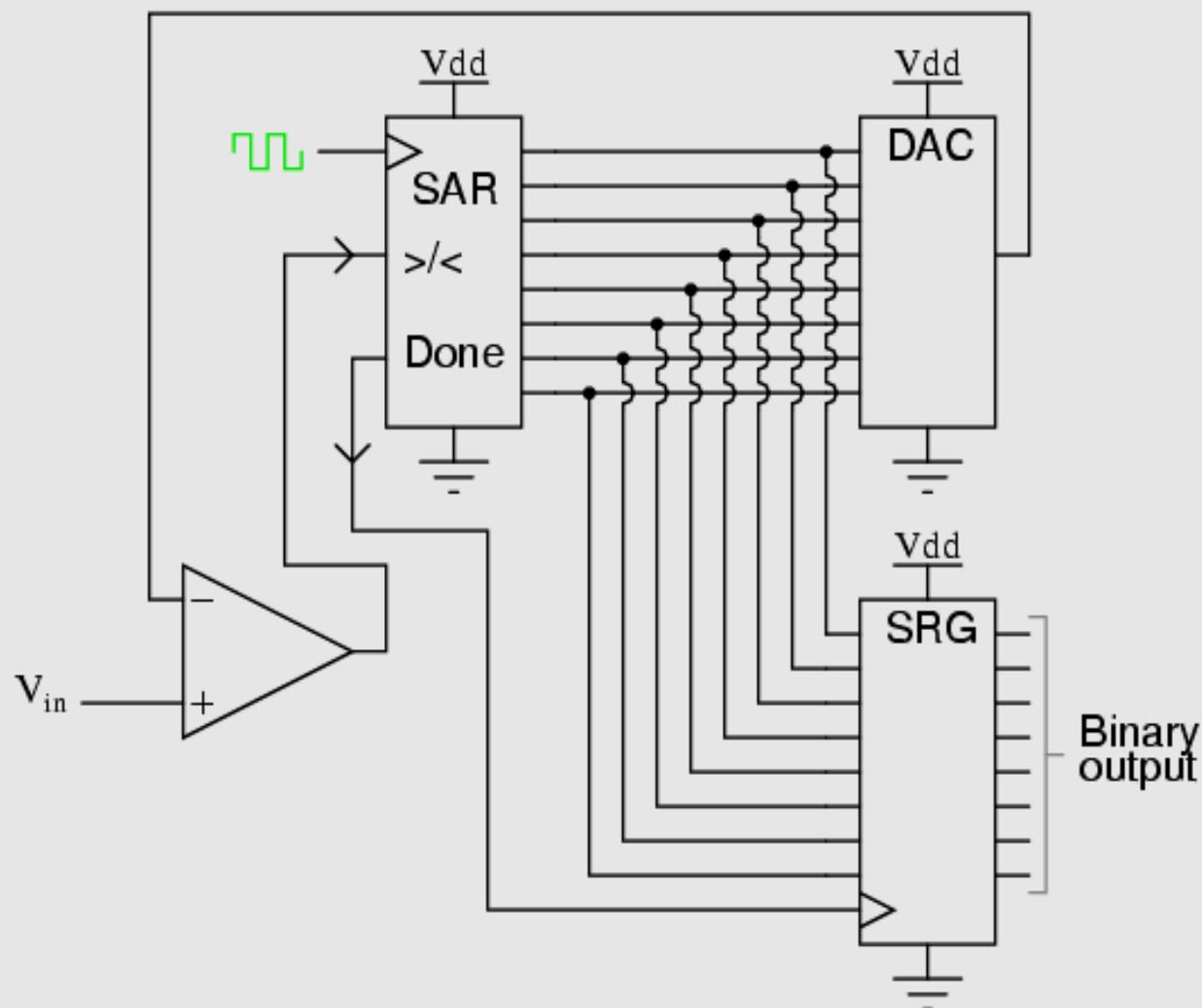


Przetworniki z kompensacją wagową



Przetworniki z kompensacją wagową działają metodą kolejnych porównań sygnału wejściowego z coraz gęściej (zwykle z dwukrotnym skokiem) podzielony napięciem odniesienia.

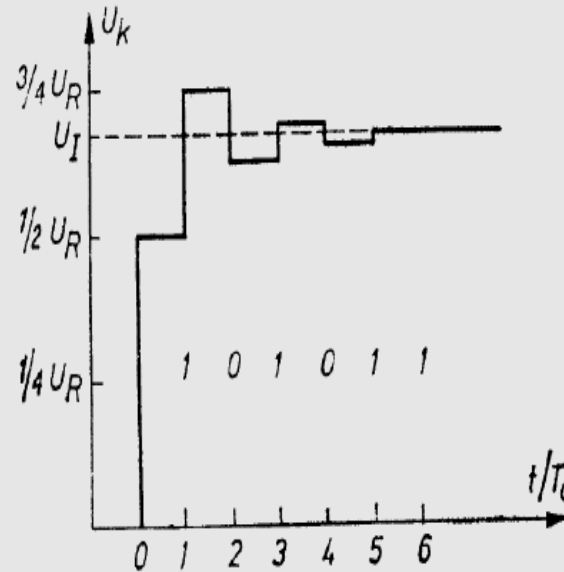
Przetworniki z kompensacją wagową



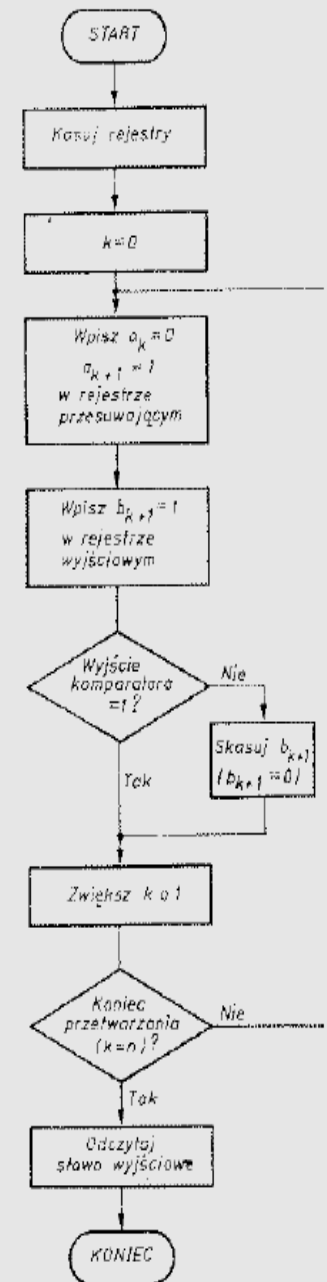
Kluczowym elementem przetwornika z kompensacją wagową jest specjalny rejestr przesuwający (SAR). Układy sterujące wpisują do niego częściowy wynik aproksymacji. Liczba kroków aproksymacji jest równa liczbie bitów przetwornika.

Przetworniki z kompensacją wagową

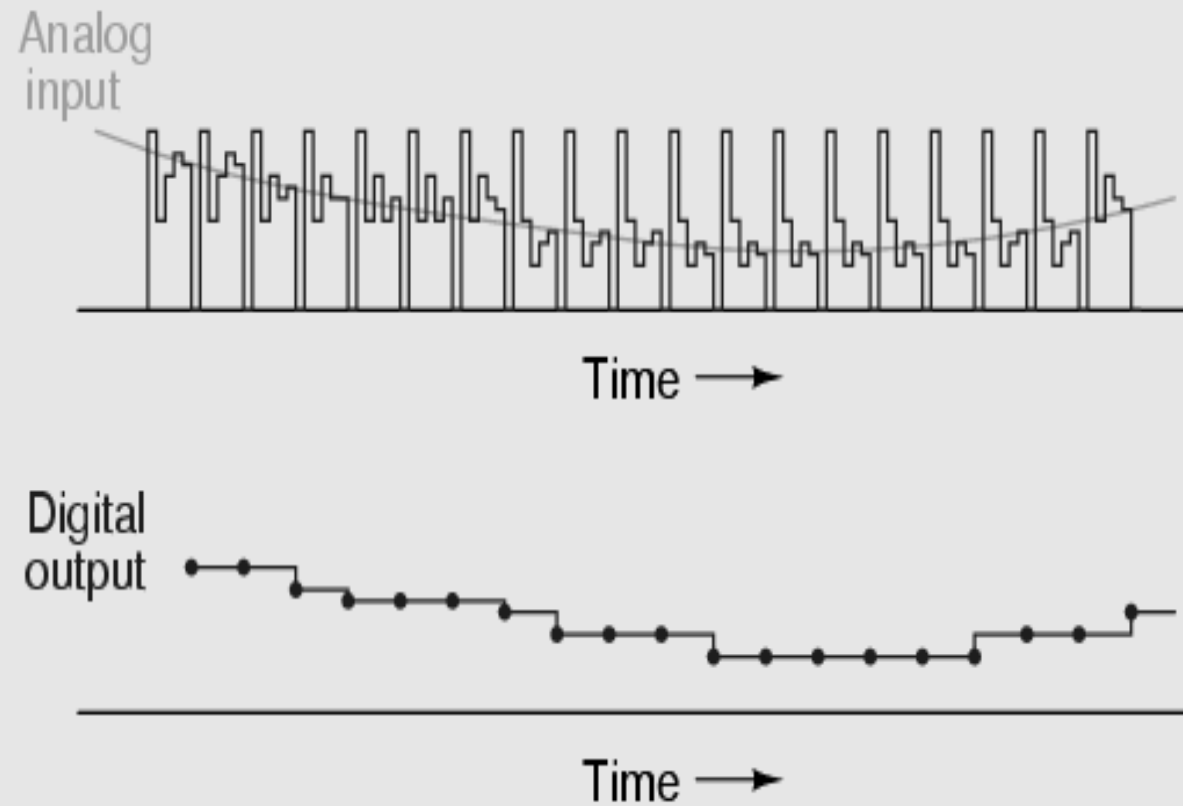
Rysunek przedstawia poziom napięcia porównywanego z wejściowym w kolejnych krokach przetwarzania.



Przetwarzanie metodą kompensacji wagowej jest łatwe do realizacji programowej.



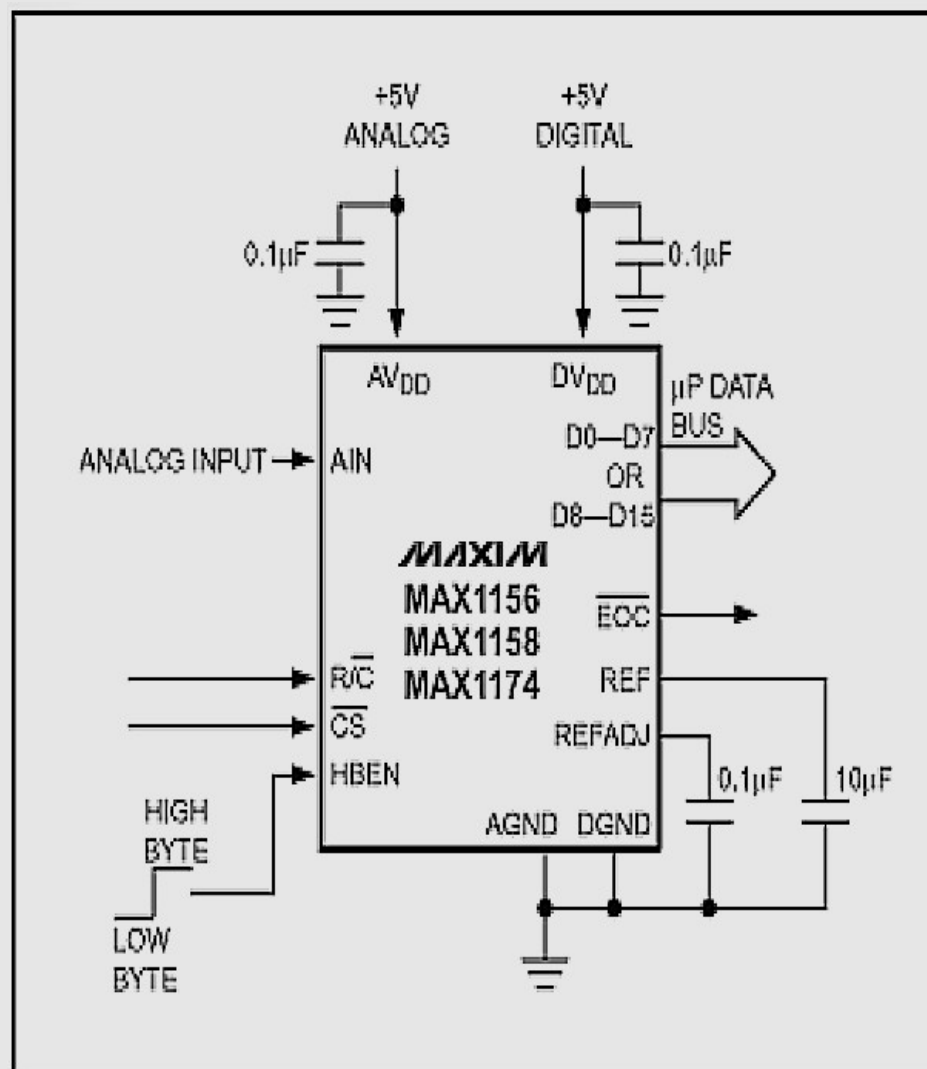
Przetworniki z kompensacją wagową



Przetworniki z kompensacją wagową

Przykład: MAX1156

- 115 ks/ps
- 14 bitów
- bipolarne wejście
- zintegrowane odniesienie



Przetworniki z kompensacją wagową

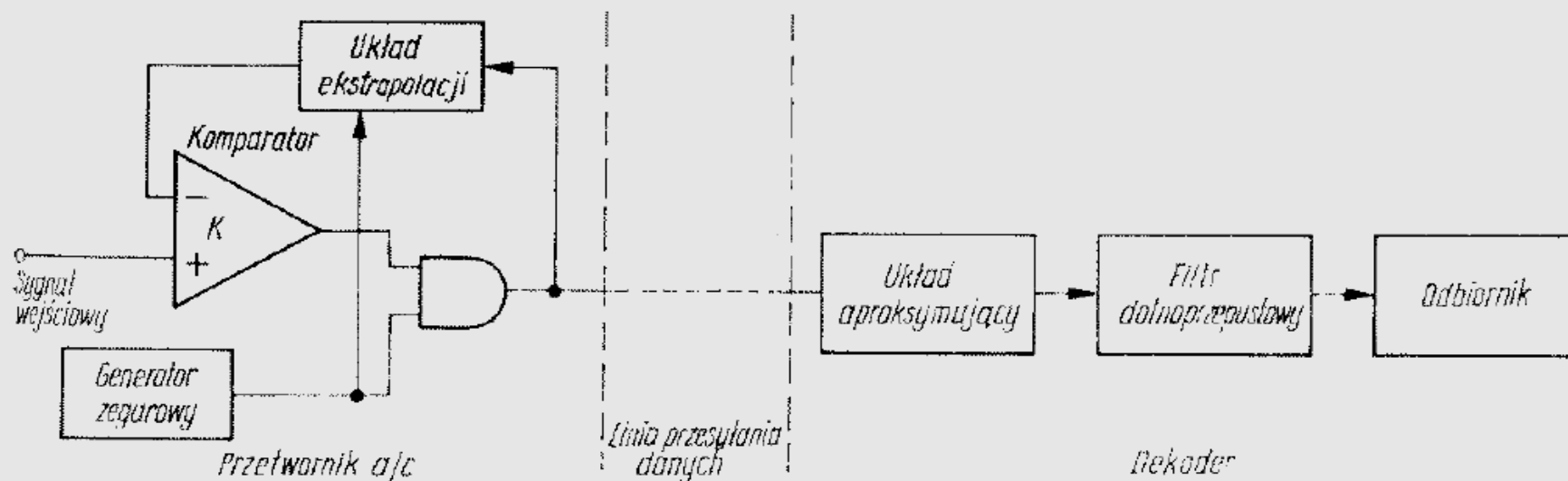
Przetworniki z kompensacją wagową i zdobyły dużą popularność, szczególnie w przemysłowych i laboratoryjnych układach Pomiarowych.

Ich cechy charakterystyczne to:

Względna prostota

- Łatwość realizacji w układach scalonych
- Niezła dokładność
- Niezła prędkość działania

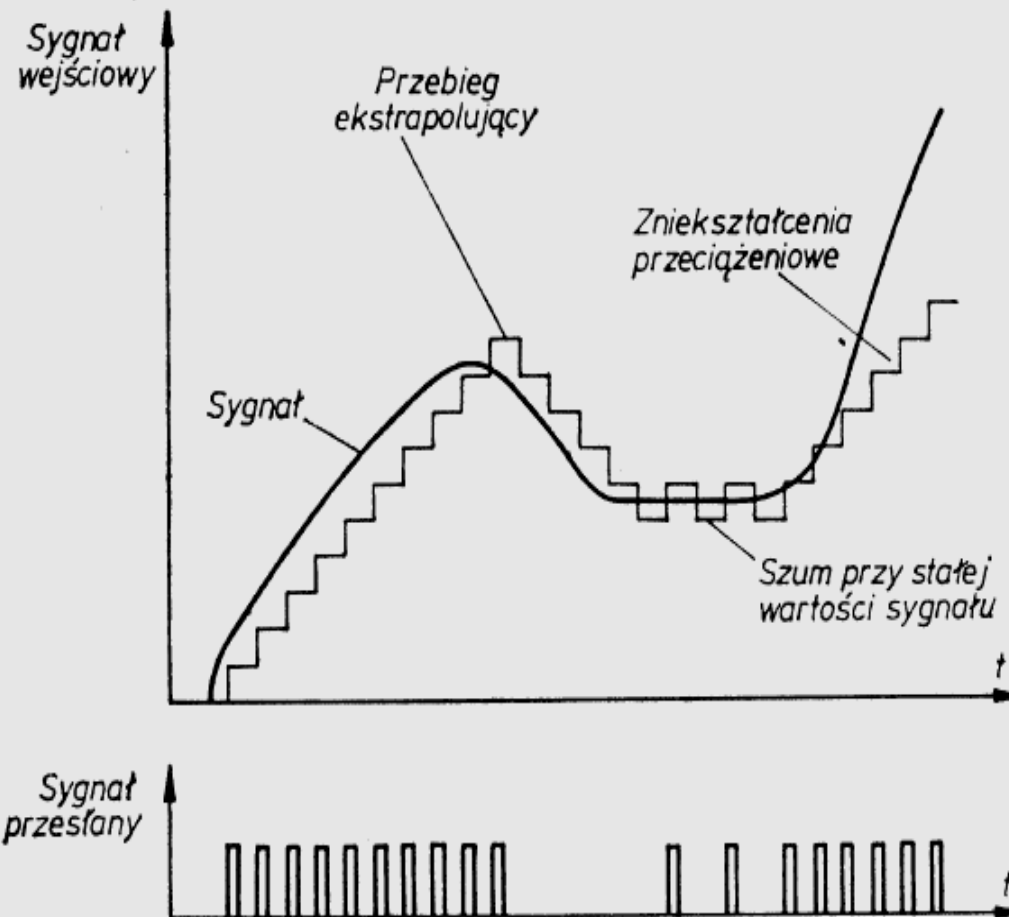
Przetworniki delta



Przetworniki delta charakteryzują się prostotą układową, wynikającą z faktu, że zamiast kolejnych próbek przetwarzana jest tylko różnica, dając jednobitową informację o charakterze przyrostowym.

Układ ekstrapolujący określa spodziewaną wartość próbki na podstawie próbek poprzednich.

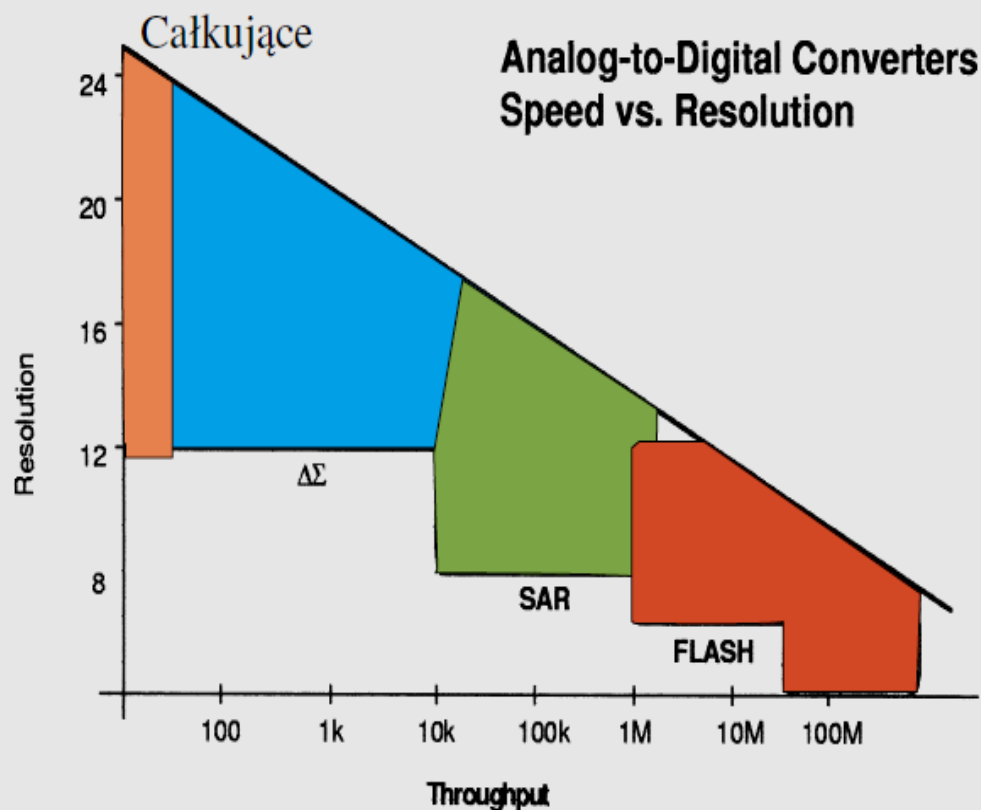
Przetworniki delta



Przetworniki delta charakteryzują się błędami przy szybkich zmianach sygnału wejściowego i szumami przy stałym sygnale

Ponieważ są proste i dobrze nadają się do przekazywania Mowy przetworniki delta znalazły zastosowanie w telekomunikacji.

Obszar zastosowań



W praktyce najczęściej stosowane są przetworniki:

- Z wielokrotnym całkowaniem – szczególnie w precyzyjnej aparaturze pomiarowej
- Delta sigma – szczególnie w sprzęcie powszechnego użytku, ale popularność bardzo rośnie
- Z kolejnymi aproksymacjami – szczególnie w sprzęcie pomiarowym i przemysłowym
- Z bezpośrednim porównaniem – przy dużych prędkościach, również w sprzęcie video.

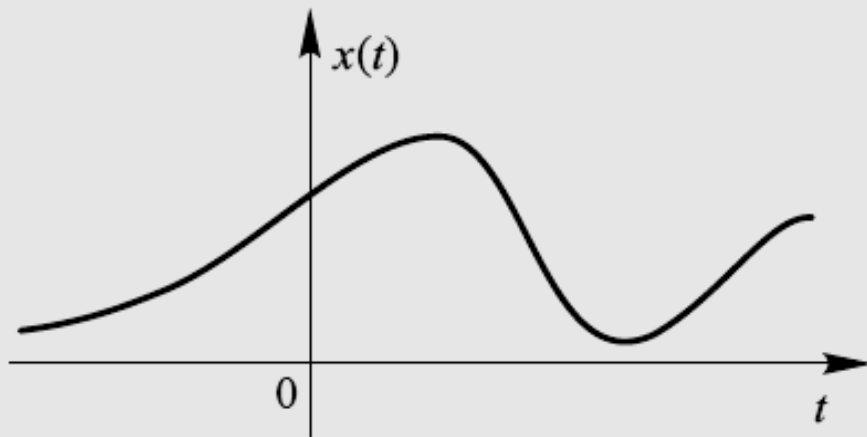
Klasyfikacja sygnałów

Kryterium jest związane ze zdolnością do przewidywania wartości Sygnału w dowolnej chwili t . Prowadzi ono podziału sygnałów na Deterministyczne i stochastyczne (losowe). Jeżeli w każdej chwili potrafimy przewidzieć wartość sygnału, a jego zachowanie opisać jednoznacznie formułą matematyczną, przedstawić za pomocą wykresu lub tablicy jego wartości, to sygnał uważamy za deterministyczny. Jeżeli prognozy takiej nie możemy dokonać, a znamy jedynie ogólne prawa statystyczne, według których sygnał ewoluuje w czasie, to traktujemy go jako losowy.

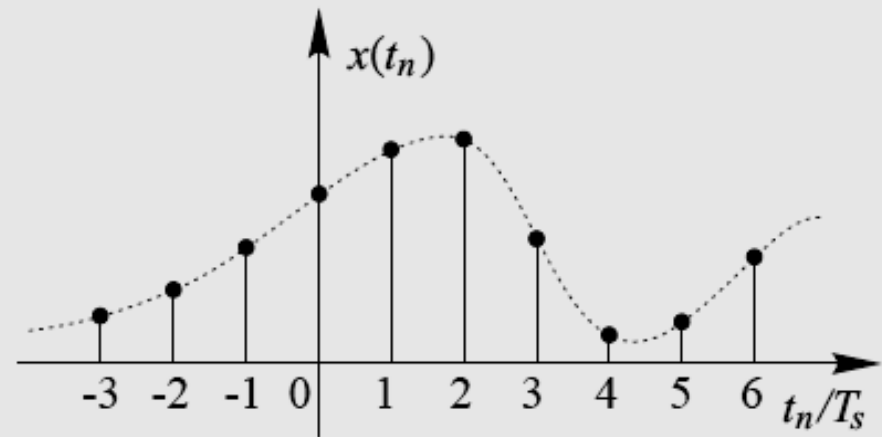
Klasyfikacja sygnałów

Ważna linia podziału sygnałów dotyczy dziedziny ich określoności. Sygnały określone w zbiorze ciągłym osi czasu są nazywane sygnałami ciągłymi w czasie lub krótko sygnałami ciągłymi (rys. 1.1). Najczęściej dziedziną takich sygnałów jest cała oś $(-1, 1)$, dodatnia półoś $[0, 1)$ lub odcinek $[t_1, t_2]$ osi czasu.

Sygnały określone w dyskretnym (przeliczalnym lub skończonym) zbiorze punktów osi czasu $(\dots, t_{-1}, t_0, t_1, t_2, \dots)$ i nieokreślone w pozostałych punktach są nazywane sygnałami dyskretnymi w czasie lub krótko sygnałami dyskretnymi (rys. 1.2).



Rys. 1.1. Sygnał ciągły w czasie



Rys. 1.2. Sygnał dyskretny w czasie

Energia analogowego sygnału deterministycznego $x(t)$ nazywamy wielkość:

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt.$$

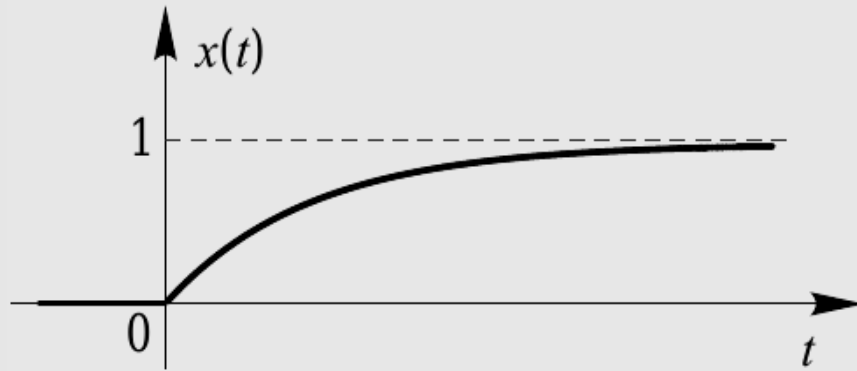
Mocą (średnią) analogowego sygnału deterministycznego $x(t)$ nazywamy wielkość graniczną:

$$P_x = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x^2(t) dt,$$

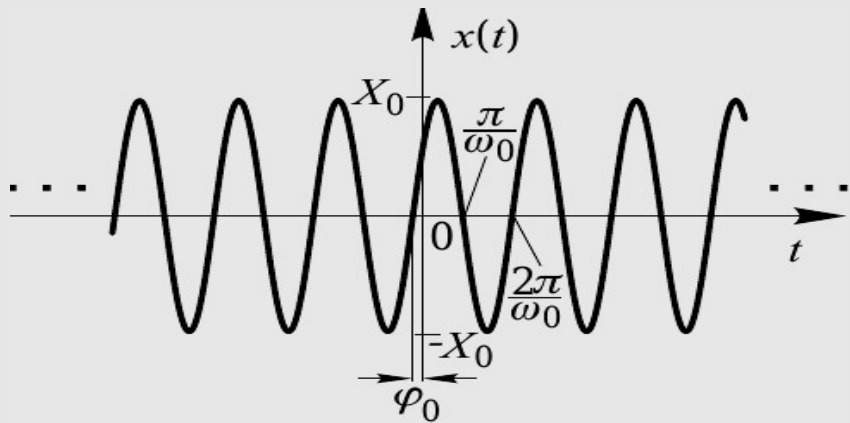
Wartością skuteczną sygnału jest nazywany pierwiastek z jego mocy.

$$x_{sk} = \sqrt{P_x}$$

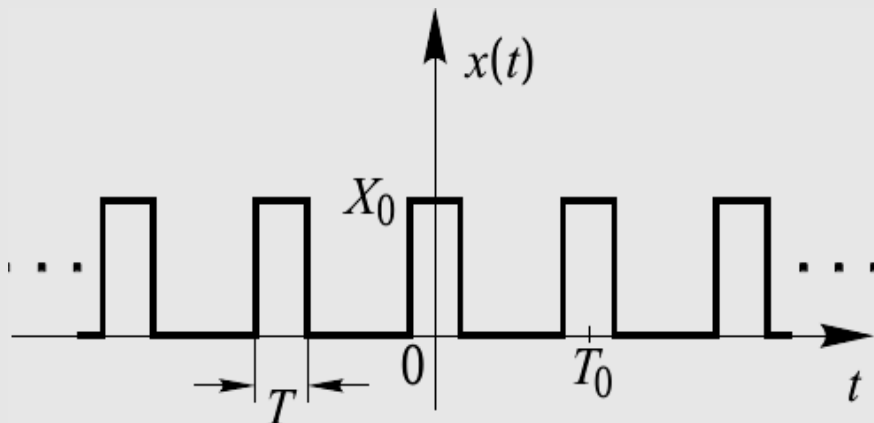
Przykłady typowych sygnałów



Sygnał wykładniczy narastający



Sygnał harmoniczny



Fala prostokątna unipolarna