

# ***Technika Pomiarowa***

## **Przyrządy i techniki analizy sygnałów pomiarowych**

**Rejestracja i analiza sygnałów w dziedzinie czasu - oscyloskopy**

**Analiza sygnałów w dziedzinie częstotliwości**

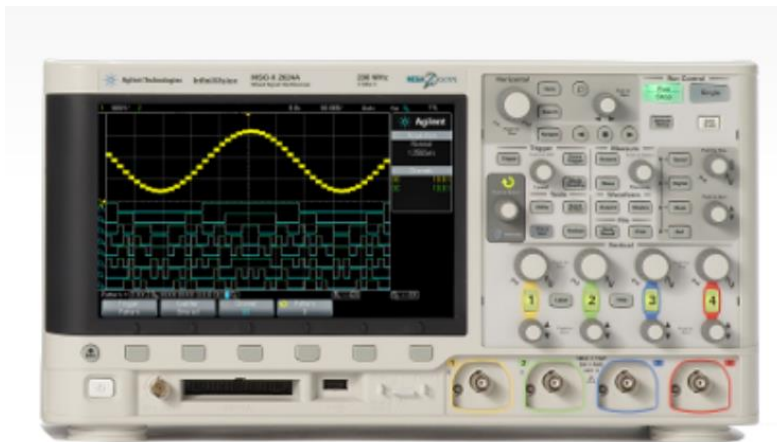
**Generacja i synteza sygnałów**

**Zagadnienia dodatkowe – przetwarzanie a/c metodami U/f i SAR**

**studia niestacjonarne I stopnia (tryb „na odległość”)**

## Wprowadzenie: przyrządy do analizy sygnałów

- **Oscyloskopy analogowe i cyfrowe**
- **Analizatory widma**
- **Analizatory stanów logicznych**

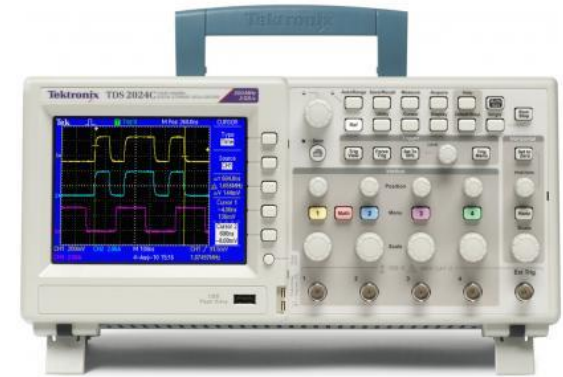


Współczesne przyrządy do analizy sygnałów są już w przeważającej większości przyrządami cyfrowymi. Relatywnie prosta w realizacji operacja szybkiej transformaty Fouriera pozwala na połączenie w jednym urządzeniu funkcji oscyloskopu i analizatora widma.

Oscyloskop cyfrowy standardowo wyposażony jest w dwa wejścia sygnałowe. Zwiększenie liczby wejść przy ograniczeniu rozdzielczości w osi pionowej do dwóch stanów (logiczne 0 i 1) stanowi podstawę działania analizatorów stanów logicznych. Takie analizatory są bardzo przydatne w badaniach układów cyfrowych umożliwiając szczegółową analizę zależności czasowych występujących np. na magistralach systemu mikroprocesorowego. Coraz częściej spotykanym rozwiązaniem jest połączenie wszystkich trzech przyrządów w jedno urządzenie typu MSO (Mixed Signal Oscilloscope). W module przedstawiono głównie właściwości oscyloskopu cyfrowego, zwracając uwagę na kluczowy w przyrządach do rejestracji i analizy sygnałów, problem próbkowania.

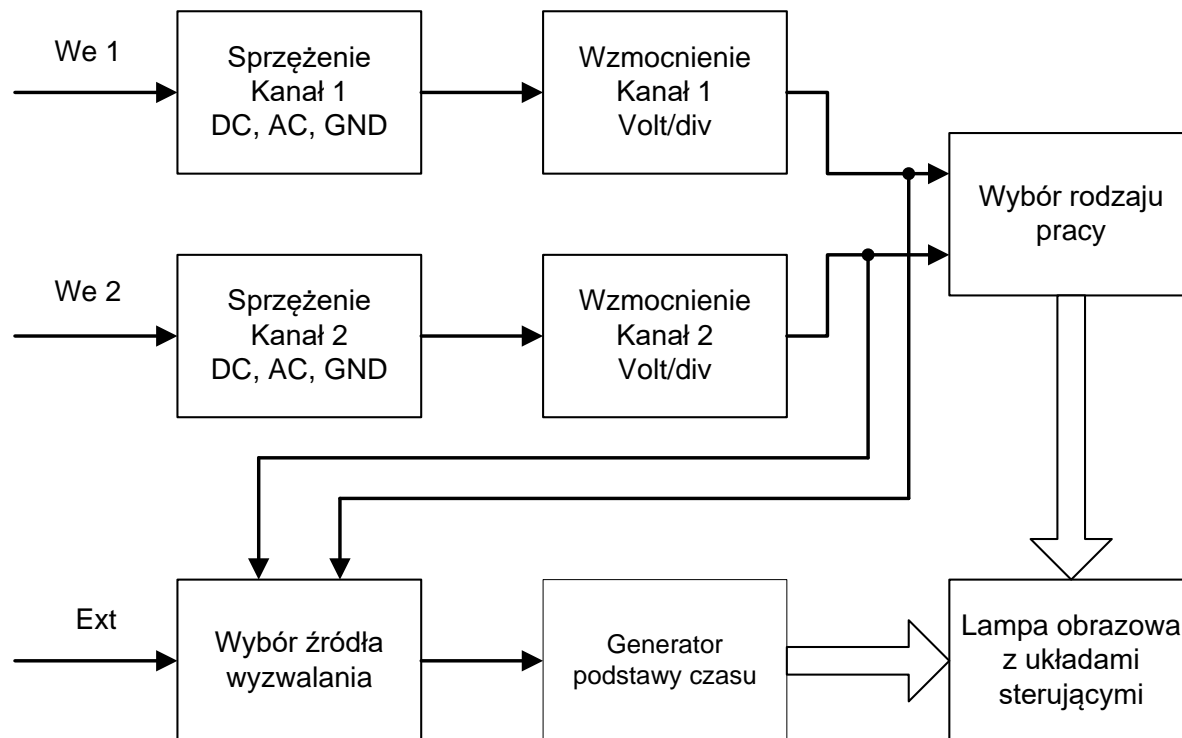
# Oscyloskop

## Oscyloskopy analogowe i cyfrowe



Oscyloskop jest jednym z najbardziej uniwersalnych urządzeń pomiarowych. Za pomocą oscyloskopu można obserwować kształt przebiegu oraz określić parametry, takie jak np.: amplituda, okres, przesunięcie fazowe między dwoma przebiegami, czasy narastania i opadania zboczy itp. Podstawowym elementem konstrukcyjnym oscyloskopu jest lampa oscyloskopowa, na której jest zobrazowany badany przebieg. W oscyloskopach cyfrowych stosuje się obecnie lampy kineskopowe i ekrany ciekłokrystaliczne. Oscyloskopy można podzielić na dwie podstawowe grupy: analogowe i cyfrowe. Podstawową różnicą pomiędzy tymi oscyloskopami jest sposób utrwalania przebiegu wejściowego. W oscyloskopie analogowym obraz jest bezpośrednio prezentowany na ekranie lampy i tym samym może być obserwowany tylko przez czas ekspozycji, natomiast w oscyloskopie cyfrowym próbki przebiegu są zapamiętywane w pamięci półprzewodnikowej, zatem mogą być przekazane do układu wyświetlania niezależnie od czasu akwizycji sygnału. Oczywiście w podstawowym trybie pracy oscyloskopu cyfrowego (tzw. pracy ciągłej) przebieg jest prezentowany bezpośrednio po zebraniu takiej liczby próbek, żeby zappełnić jeden ekran (dokładniej chodzi tu o zebranie liczby próbek odpowiadającej rozmiarowi rekordu zobrazowania, zazwyczaj mniejszego od rozmiaru całej pamięci). Względ na przyzwyczajenia użytkowników powoduje, że panel czołowy oscyloskopu cyfrowego często przypomina odpowiedni panel oscyloskopu analogowego. Wiele elementów regulacyjnych na panelu czołowym spełnia analogiczne funkcję w obu oscyloskopach pomimo, że są realizowane w technice analogowej lub cyfrowej. Stąd, z punktu widzenia użytkownika, obsługa oscyloskopu (rozumiana jako funkcje przycisków i pokręteł na panelu czołowym) jest podobna dla oscyloskopu cyfrowego i analogowego. Wrażenie łatwiejszej obsługi oscyloskopu cyfrowego powstaje dzięki zobrazowaniu znaczenia funkcji na ekranie i możliwości automatycznego doboru ustawień oscyloskopu do charakteru przebiegu wejściowego (funkcje Autoscale i AutoLevel). Należy jednak podkreślić, że stosowanie takich funkcji ma sens w przypadku standardowych sygnałów. Badanie przebiegów o złożonych kształtach wymaga znajomości działania zaawansowanych funkcji regulacyjnych i pomiarowych oscyloskopu cyfrowego.

## Struktura oscyloskopu elektronicznego

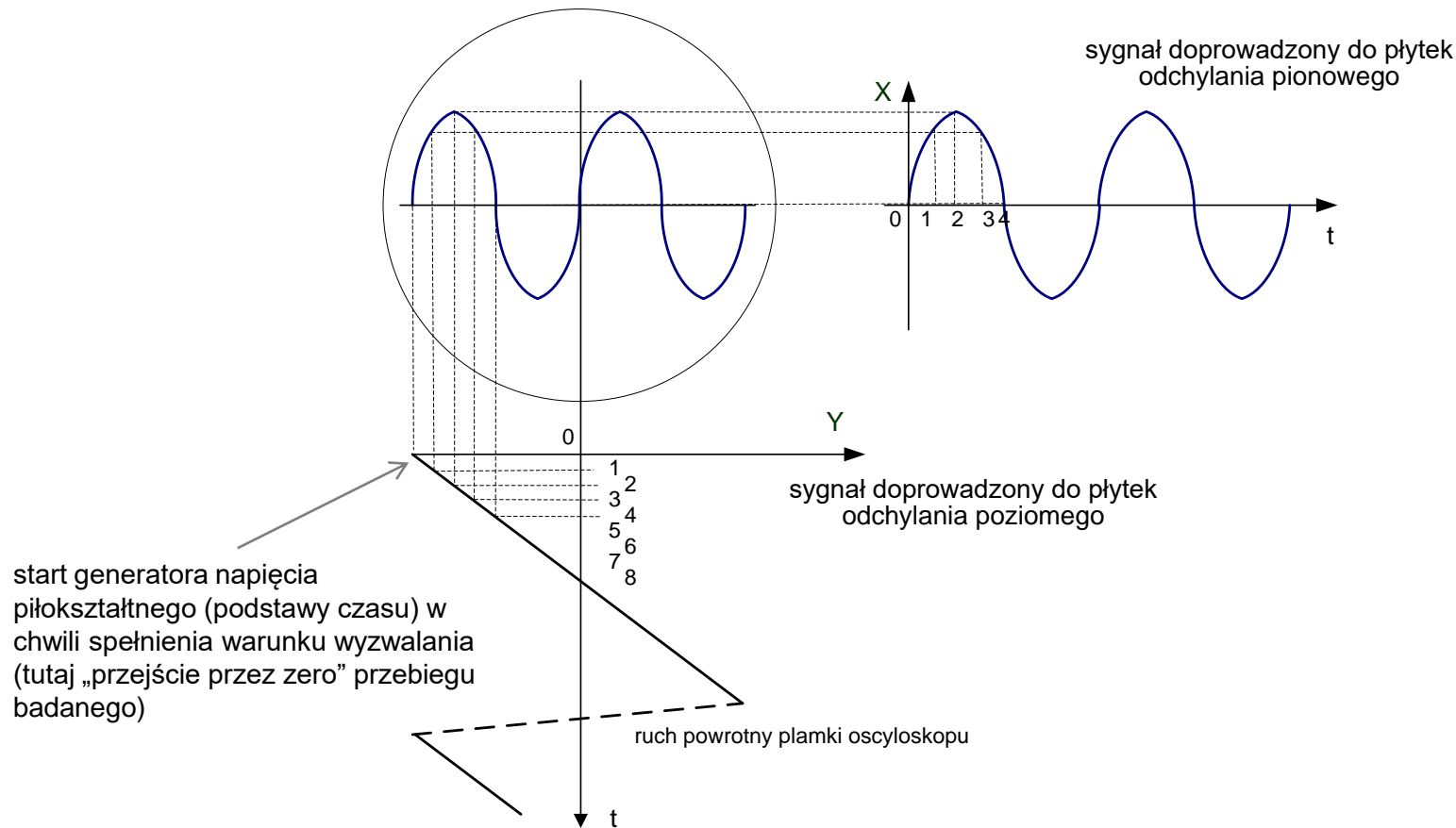


Podstawowymi parametrami opisującymi oscyloskop analogowy są:

- pasmo pomiarowe oscyloskopu,
- czas narastania,
- czułość odchyłania pionowego,
- czułość odchyłania poziomego,
- liczba torów wejściowych,
- rodzaj zasilania: sieciowe, bateryjne,
- parametry lampy oscyloskopowej,
- rodzaj konstrukcji: zwarta lub z  
możliwością wymiany paneli.

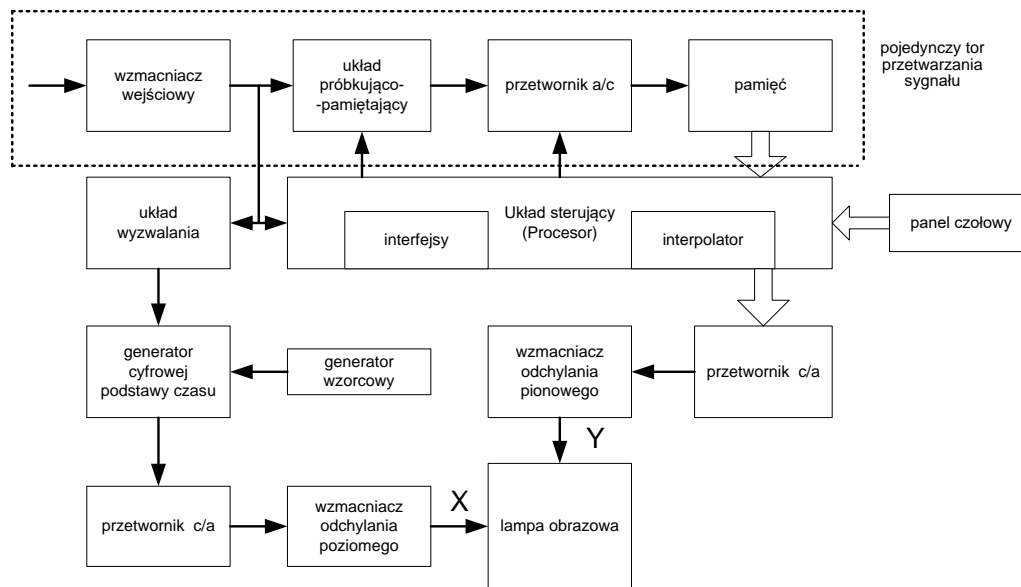
Pasma pomiarowe i czas narastania zależą od właściwości układów wejściowych oscyloskopu. Kształt charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej wzmacniacza wejściowego oraz jego właściwości inercyjne ograniczają możliwości zastosowania oscyloskopu przy badaniach przebiegów szybkozmiennych i impulsowych o bardzo krótkich czasach narastania zboczy. Czułość odchyłania pionowego (stała odchyłania) oscyloskopu jest wyrażana w V/dz (zazwyczaj 1 dz = 1 cm na ekranie). Czułość odchyłania poziomego określa jak szybkie i krótkie przebiegi można mierzyć (oczywiście ograniczone pasmem przenoszenia). Wyrażona jest w s/dz (ms/dz,  $\mu$ s/dz). Oscyloskopy posiadające dwa tory pomiarowe umożliwiają jednoczesny pomiar dwóch różnych przebiegów. Uzyskuje się to przez zastosowanie przełącznika elektronicznego, który przełącza sterowanie lampy oscyloskopowej z jednego toru na drugi. Na rysunku przedstawiono schemat blokowy oscyloskopu analogowego.

# Zasada generowania obrazu



Na rysunku zilustrowano zasadę powstawania na ekranie obrazu przebiegu doprowadzonego do jednego z wejść oscyloskopu. Warunkiem uzyskania stabilnego obrazu jest proporcjonalność okresu pilokształtnego sygnału z generatora podstawy czasu i okresu przebiegu badanego. Precyzyjne ustalenie chwili startu generatora podstawy czasu jest zadaniem układu wyzwiania.

# Struktura oscyloskopu cyfrowego

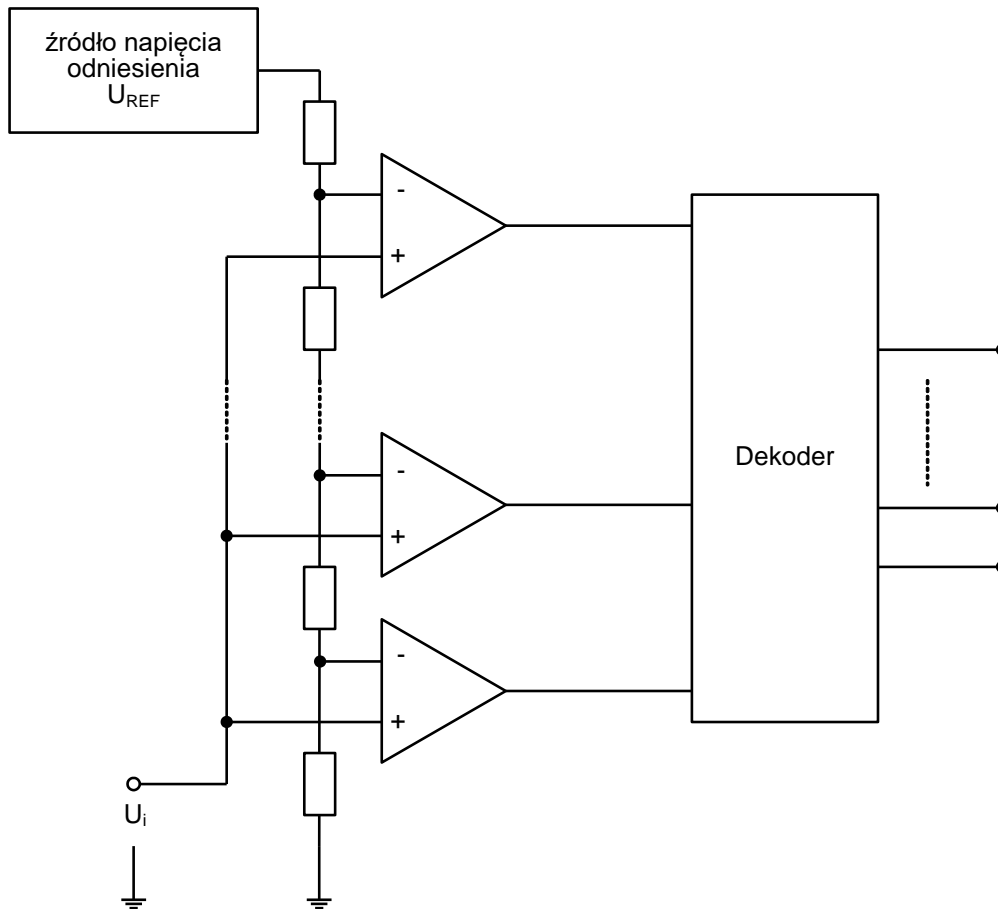


Zasadniczym podzespołem podstawy czasu jest bardzo dokładny generator z oscylatorem kwarcowym, dzięki czemu błąd podstawy czasu jest mniejszy od 0,01%. Impulsy z generatora są wzmacniane przez wzmacniacz podstawy czasu (wzmacniacz odchylenia poziomego), który z kolei steruje układem odchylenia poziomego lampy obrazowej. Obraz, jaki otrzymujemy na ekranie składa się z kropek, o położeniu których decyduje wzmacniacz Y w pionie i wzmacniacz X w poziomie. Zapisem do pamięci, przesyłem danych, pracą układów synchronizacji, pracą przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych steruje kontroler, którym obecnie jest najczęściej mikroprocesor. W odróżnieniu od oscyloskopów analogowych, w oscyloskopach cyfrowych jako lampy obrazowe stosuje się lampy kineskopowe (monochromatyczne i kolorowe). Obecnie najczęściej są stosowane rozwiązania, w których ekran jest zbudowany przy wykorzystaniu wyświetlacza ciekłokrystalicznego LCD. Zaletą wyświetlaczy jest to, że nie wymagają dużych napięć i nie potrzebują dużych mocy, tak jak to jest w przypadku lamp oscyloskopowej i kineskopowej. Pozwala to na ograniczenie gabarytów oscyloskopu i zastosowanie zasilania bateryjnego. A to z kolei pozwala zastosować oscyloskop jako urządzenie przenośne.

Do wzmacniacza wejściowego zostaje doprowadzony sygnał pomiarowy. Następnie z wyjścia wzmacniacza wejściowego sygnał zostaje podany na układ próbkująco-pamiętający. Tu zostaje pobrana próbka sygnału i zapamiętana analogowa wartość chwilowa sygnału (w chwili pobierania próbki). Następnie wartość ta zostaje zamieniona na odpowiednią wartość cyfrową, zwaną słowem. Ta operacja zostaje wykonana w układzie przetwornika analogowo - cyfrowego. Rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego decyduje o rozdzielczości cyfrowej oscyloskopu. Oznacza to, że przy zastosowaniu 8-bitowego przetwornika, rozdzielczość w osi Y wynosić będzie 1:256. To znaczy, że ciągły przebieg analogowy zostaje podzielony na 256 dyskretnych przedziałów. Po tej zamianie wartość cyfrowa próbki zostaje zapamiętane w pamięci oscyloskopu. Zestaw próbek zarejestrowanych w pamięci oscyloskopu nazywa się rekordem. We współczesnych oscyloskopach cyfrowych rekordy mogą wynosić do kilku milionów próbek. Zapamiętanie wartości cyfrowych przebiegu w pamięci, umożliwia dokonanie wielu pomiarów i ciągłe wyświetlanie przebiegu na ekranie (funkcja zamrożenia obrazu). Występuje również możliwość zachowania (zapamiętania) przebiegu w pamięci oscyloskopu przez dowolnie długi okres czasu i ponowne odtworzenie tego przebiegu na ekranie w celu porównania z innym przebiegiem. Jednak, żeby obejrzeć przebieg na ekranie oscyloskopu należy go odtworzyć z danych znajdujących się w pamięci. W tym celu dane te zostają przesłane do układu przetwornika cyfrowo-analogowego. Układ ten zamienia wartość cyfrową próbki sygnału na odpowiadającą jej wartości analogową napięcia. Z kolei ten odtworzony przebieg analogowy steruje wzmacniaczem odchylenia pionowego Y lampy obrazowej.



# Przetwarzanie równoległe



Oscylloskopy cyfrowe jako przyrządy do rejestracji sygnałów wymagają zastosowania przetworników analogowo-cyfrowych o bardzo dużej szybkości działania. Chodzi o to, żeby zarejestrować maksymalnie dużo szczegółów badanego sygnału, nawet kosztem zmniejszenia rozdzielczości w osi pionowej. Największą szybkości działania oferują przetworniki równoległe (czasem używane jest spolszczone określenie nazwy angielskiej – przetworniki flesztowe od flash converter). Liczba komparatorów w układzie jest równa  $2^n$ , gdzie  $n$  jest liczbą bitów przetwornika. Każdy komparator porównuje napięcie wejściowe  $U_i$  z jednym z  $2^n$  poziomów napięcia odpowiadających wszystkim stanom przetwornika. Określone poziomy napięć progowych dla komparatorów są wytwarzane w układzie precyzyjnego dzielnika napięcia odniesienia  $U_{REF}$  przy wykorzystaniu sieci precyzyjnych rezystorów. Zastosowanie dekodera jest konieczne ze względu na to, że na wyjściu komparatorów pojawia się kod termometryczny np. 0000111. Taki kod jest przetwarzany na kod 1 z  $n$  za pomocą funkcji Ex-OR dla sąsiednich bitów.

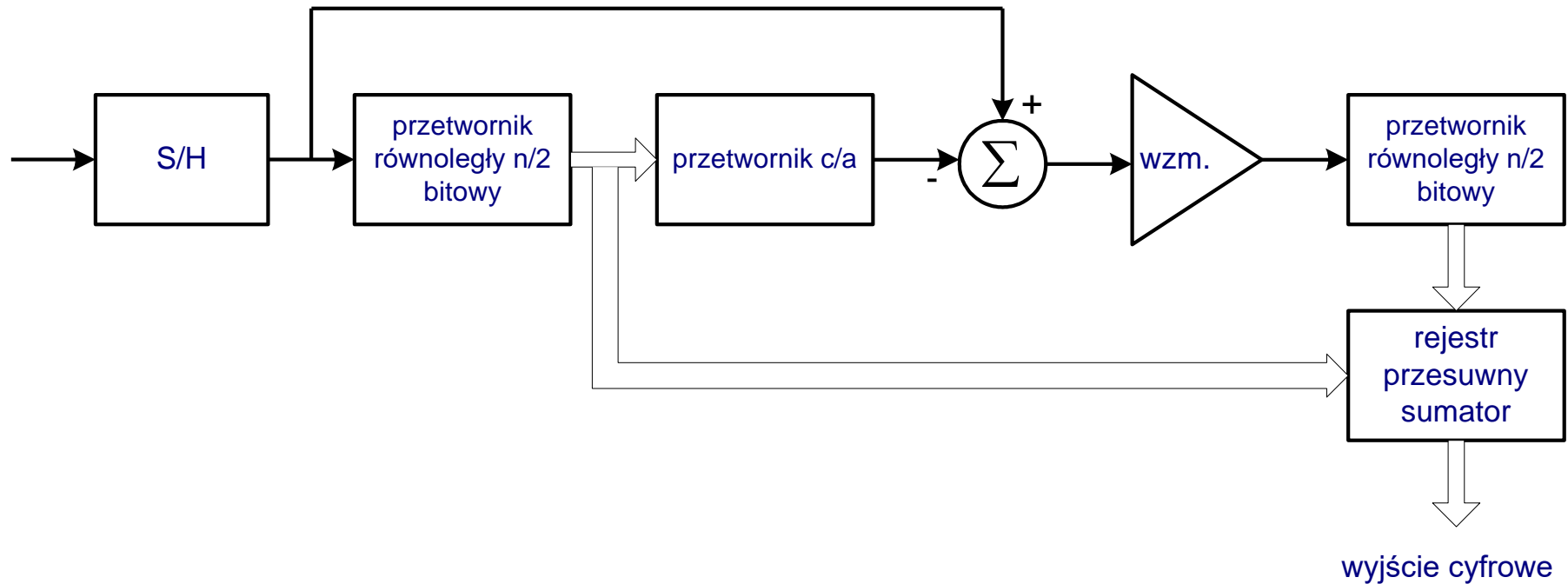
## Właściwości przetwarzania równoległego

- mała rozdzielczość ( $8 \div 12$  bitów)
- krótki czas przetwarzania
- rozbudowa układu ze wzrostem rozdzielczości
- relatywnie duży pobór mocy, problem z równoczesnością zadziałania komparatorów

Podstawową zaletą metody przetwarzania równoległego jest szybkość przetwarzania. Uzyskanie dużej rozdzielczości wymaga jednak zastosowania dużej liczby komparatorów (np. 1024 dla przetwornika 10-bitowego). Konsekwencją rozbudowy układu jest wzrost poboru mocy i większa wartość pojemności wejściowej układu. Pojemność wejściowa (spowodowana dużą liczbą złącz półprzewodnikowych) ma charakter nieliniowy co powoduje powstanie dynamicznych błędów przetwarzania (przy skończonej impedancji wyjściowej źródła sygnału, na wejściu przetwornika powstaje nieliniowy układ całkujący). Ponadto, z uwagi na szybkość działania, wszystkie komparatory powinny zadziałać w ściśle określonej chwili czasowej, a w dużym układzie zaczyna odgrywać rolę czas propagacji sygnału. Skalę problemu ilustruje spostrzeżenie, że przy przejściu przez 0, wartość chwilowa przebiegu sinusoidalnego o częstotliwości 1GHz, zmienia się o 3% w czasie 10ps. Problem określania chwili czasowej zadziałania komparatorów ma istotne znaczenie w przypadku stosowania techniki przetwarzania z przeplotem. Technika taka pozwala zwiększyć efektywne pasmo przetwarzania przez celowe wprowadzenie przesunięcia w czasie impulsów wyzwalaających działanie komparatorów (kolejne próbki sygnału wejściowego są przetwarzane przez inną grupę komparatorów). Praktycznie pozwala to na kilkukrotne zwiększenie pasma przetwarzania przy ograniczeniu rozdzielczości do liczby komparatorów w każdej grupie. Nawet niewielkie opóźnienie w czasie (impulsu wyzwalającego lub sygnału przetwarzanego) może wprowadzić kilku procentowy błąd dynamiczny. Metodą eliminacji wymienionych wad przetworników równoległych jest powszechne stosowanie na wejściu tych przetworników układów próbkująco-pamiętających. Ograniczona rozdzielczość przetworników równoległych zawęża zakres ich stosowania do przyrządów i układów pomiarowych, w których częstotliwość próbkowania jest parametrem o podstawowym znaczeniu. Uzyskanie wysokiej rozdzielczości przy niższej częstotliwości próbkowania jest możliwe w układach o przetwarzaniu wieloprzebiegowym.



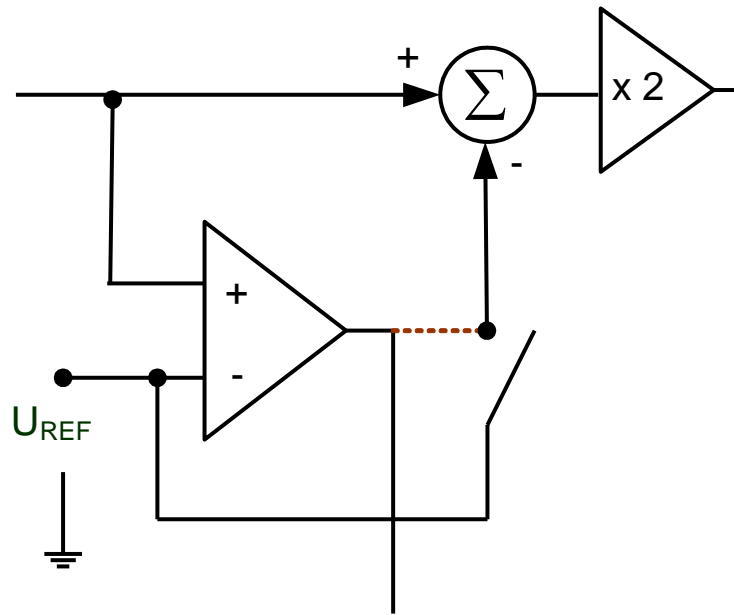
# Przetwarzanie wieloprzebiegowe



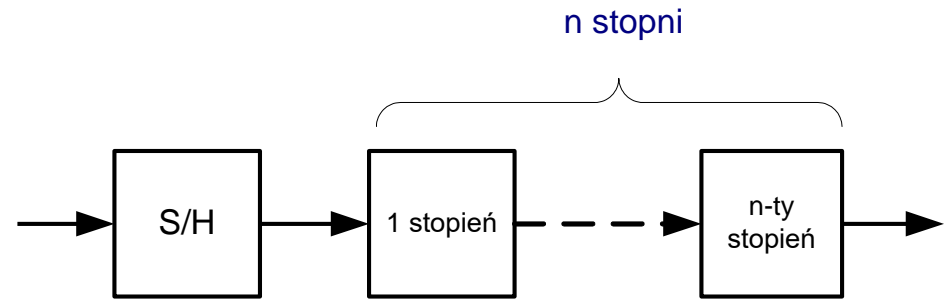
Przetwarzanie wieloprzebiegowe (wielokrokowe, potokowe) występuje w odmianach różniących się liczbą etapów przetwarzania. Na rysunku pokazano przetwarzanie składające się z dwóch etapów.

W pierwszym etapie sygnał wejściowy jest przetwarzany z rozdzielczością  $n/2$  bitową i zapisywany w rejestrze wyjściowym. Jednocześnie wynik przetwarzania jest podawany na przetwornik c/a i odejmowany w drugim etapie od napięcia wejściowego. Wzmacniacz zapewnia pracę przetwornika a/c w pełnym zakresie napięć wejściowych. Wzmocnienie sygnału zależy od rozdzielczości i powinno wynosić  $2^{n/2}$  (np. 32 dla przetwornika 10-bitowego, 64 dla 12-bitowego). Uzyskanie wyniku w pełnej rozdzielczości wymaga przesunięcia i zsumowania wyników przetwarzania z obu etapów. Zastosowany w układzie przetwornik cyfrowo-analogowy powinien pracować z rozdzielczością  $n$ -bitową. Podobnie jak w przetwornikach równoległych także przetwornik wieloprzebiegowy powinien być poprzedzony układem próbkująco-pamiętającym. Zastosowanie w opisywanym układzie równoległych przetworników o rozdzielczości  $n/2$ -bitowej redukuje liczbę komparatorów  $2^{(n/2)-1}$  razy (np. dla 12-bitowego przetwornika z 4096 do 128).

# Przetwarzanie wieloprzebiegowe



wyjście cyfrowe k-ty bit

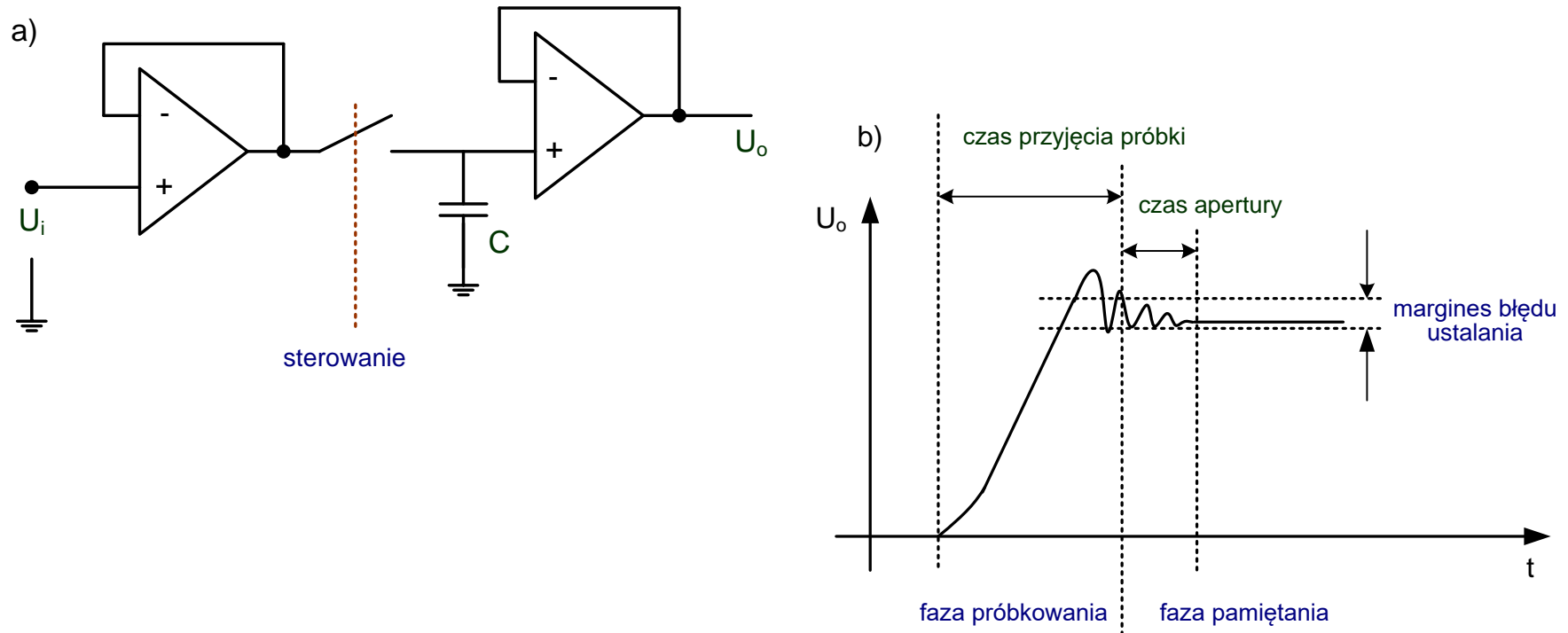


Kontynuując podział procesu przetwarzania na etapy można otrzymać przetwornik o rozdzielczości  $n$ -bitowej złożony z  $n$  przetworników 1-bitowych. Przetwarzanie będzie wówczas realizowane w  $n$  krokach (etapach). Strukturę pojedynczego stopnia klasycznego układu przetwornika szeregowego z podwajaniem napięcia przedstawiono na rysunku.

Przetwornikiem 1-bitowym jest komparator porównujący napięcie w każdym stopniu z napięciem odniesienia  $U_{REF} = \frac{1}{2} U_{i\max}$ , gdzie  $U_{i\max}$  – zakres przetwarzania. Jako przetwornik c/a występuje tutaj klucz załączający napięcie  $-U_{REF}$  w zależności od stanu wyjścia komparatora. Czas przetwarzania stanowi sumę czasów propagacji sygnału przez poszczególne stopnie układu (uwzględniając komparator, przełącznik, sumator i wzmacniacz w każdym stopniu).

Metodą umożliwiającą zwiększenie szybkości przetwarzania jest zastosowanie struktury potokowej różniącej się od układu z rysunku umieszczeniem układu S/H w każdym stopniu przetwarzania. Zatem jednocześnie jest przetwarzanych  $n$  próbek sygnału wejściowego. Komplikuje się układ wyjściowy, na który musi się składać zestaw rejestrów pamiętających stany wyjść komparatorów po każdym przetworzeniu (wyjście każdego komparatora reprezentuje inny bit z kolejnych próbek sygnału).

# Układy próbkująco-pamiętające



Układy próbkująco-pamiętające (S/H) są stosowane z przetwornikami wartości chwilowej sygnału.

W czasie kiedy przełącznik jest zamknięty napięcie na kondensatorze zmienia się tak jak napięcie wejściowe. Otwarcie przełącznika powoduje, że kondensator „zapamiętuje” aktualną wartość napięcia i staje się ona dostępna dla przetwornika a/c. Stosowanie układów S/H jest niezbędne przy przetwornikach równoległych. Wartość pojemności wejściowej jest znacznie mniejsza dla układów próbkująco-pamiętających niż dla układu równoległych komparatorów. Decydujące znaczenie dla właściwości układów S/H ma umieszczony w jego strukturze przełącznik. Stosowane są dwa rozwiązania: tranzystor MOS i mostek diodowy. Oba układy zapewniają bardzo dużą szybkość przełączania. Najważniejsze użytkowe właściwości układów S/H to czas przyjęcia próbki, czas apertury i stałość napięcia na kondensatorze w fazie pamiętania.

# Parametry oscyloskopu – pasma sygnałów

pasmo analogowe

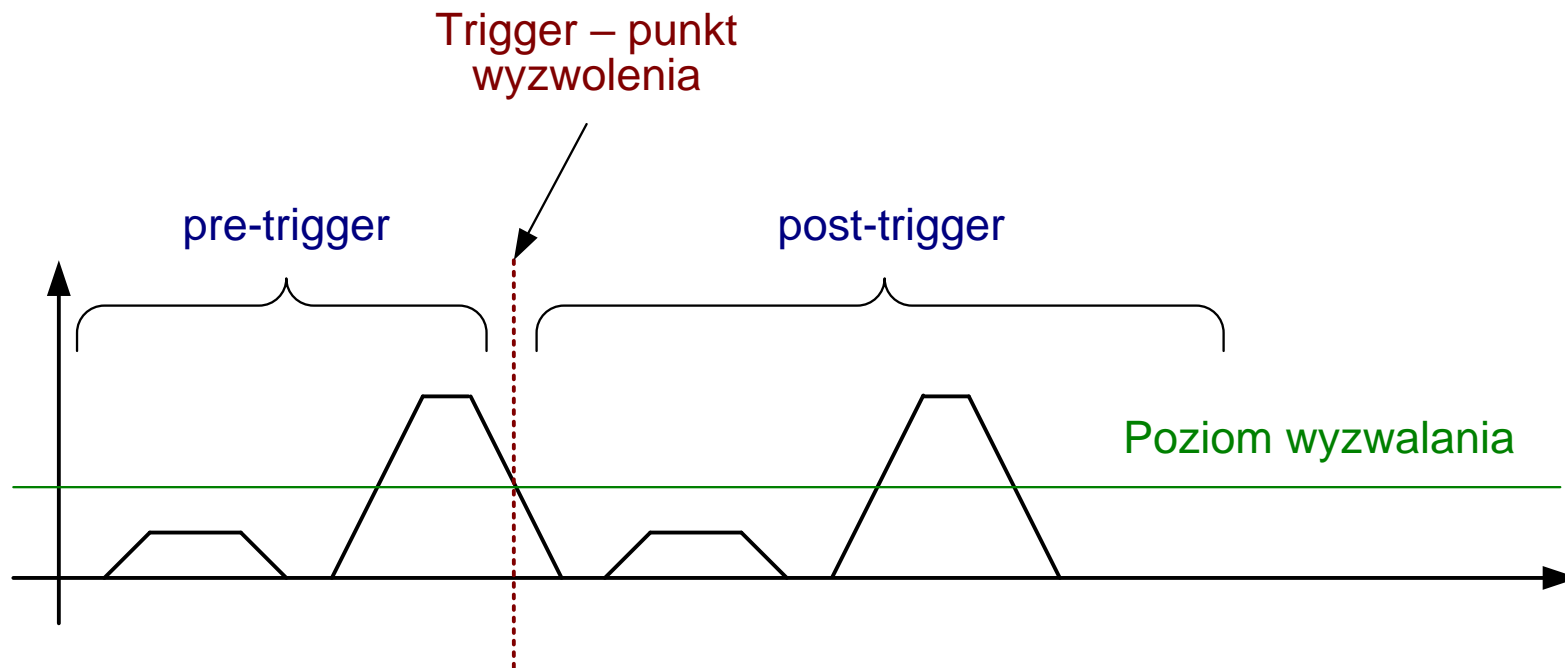
pasmo dla przebiegów jednokrotnych

pasmo dla przebiegów okresowych

W dokumentacji oscyloskopów jako podstawowy parametr podaje się jego pasmo. Użytkując przyrząd niezbędna jest prawidłowa interpretacja tego określenia i zrozumienie jakie sygnały mogą być obserwowane bez zniekształceń na ekranie oscyloskopu. Pasmo analogowe (podawane zazwyczaj na płycie czołowej oscyloskopu) dotyczy właściwości układów wejściowych przyrządu i wyznacza granicę pasma 3-decybelowego. Producent gwarantuje, że dla częstotliwości zawartej w paśmie analogowym sygnał nie ulegnie tłumieniu o więcej niż 3dB. Pasmo dla przebiegów jednokrotnych jest określone przez właściwości przetwornika a/c, a dokładnie układu próbkującego-pamiętającego. To pasmo jest zazwyczaj nieco węższe niż pasmo analogowe i wielokrotnie węższe niż pasmo dla przebiegów powtarzalnych. Stosując techniki próbkowania sekwencyjnego można obserwować przebiegi o częstotliwościach wielokrotnie przekraczających maksymalne częstotliwości pracy przetworników a/c.

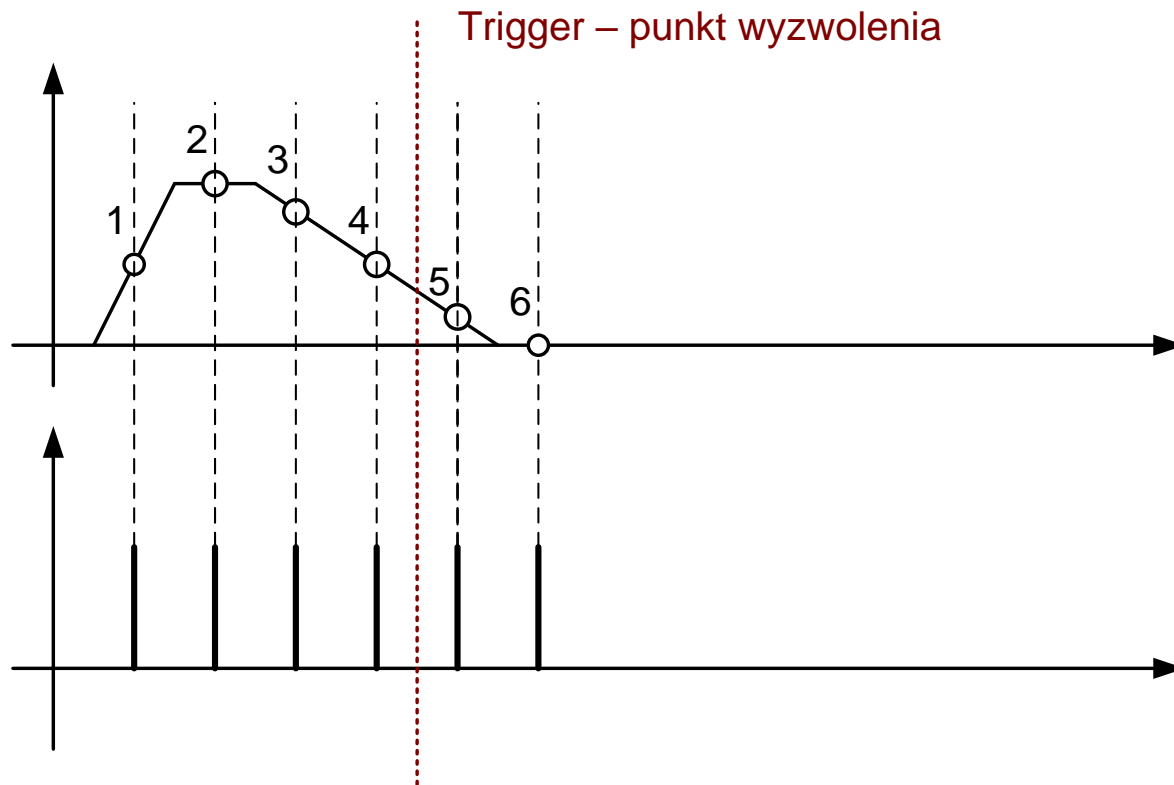
|  |                                    |
|--|------------------------------------|
| Pasmo przenoszenia                               | 25MHz                              |
| Częstotliwość próbkowania                        | 250MSa/s                           |
| Częstotliwość próbkowania w trybie ekwiwalentnym | 50GSa/s maksymalnie na każdy kanał |
| Ilość kanałów                                    | 2                                  |
| Długość rekordu danych                           | 4 k na każdy kanał                 |
| Czułość wejściowa                                | 2mV/div – 5V/div                   |
| Rozdzielczość pionowa                            | 8 bitów                            |
| Czas narastania                                  | 14ns                               |
| Impedancja wejściowa                             | 1MΩ    13pF                        |

# Praca pre- i posttrigger



W przyrządach do analizy sygnałów typu oscyloskopy czy analizatory stanów logicznych często spotykamy się z określeniami pre- i posttrigger, oznaczają one możliwość obserwacji sygnału przed pojawieniem się impulsu wyzwalającego. Zauważmy, że takiej funkcjonalności nie miały oscyloskopy analogowe, w których generator podstawy czasu startował w chwili spełnienia warunku wyzwala. Oscyloskop cyfrowy może pracować (tzn. pobierać próbki i zapisywać do pamięci) w sposób ciągły – to dopiero sygnał triggera (wyzwalania) określa kiedy i w jakim zakresie odtworzyć próbki z pamięci. Pamięć jest z reguły znacznie pojemniejsza niż rekord zobrazowania (liczba próbek na ekranie) i punkt wyzwala może wcale nie być widoczny na ekranie oscyloskopu.

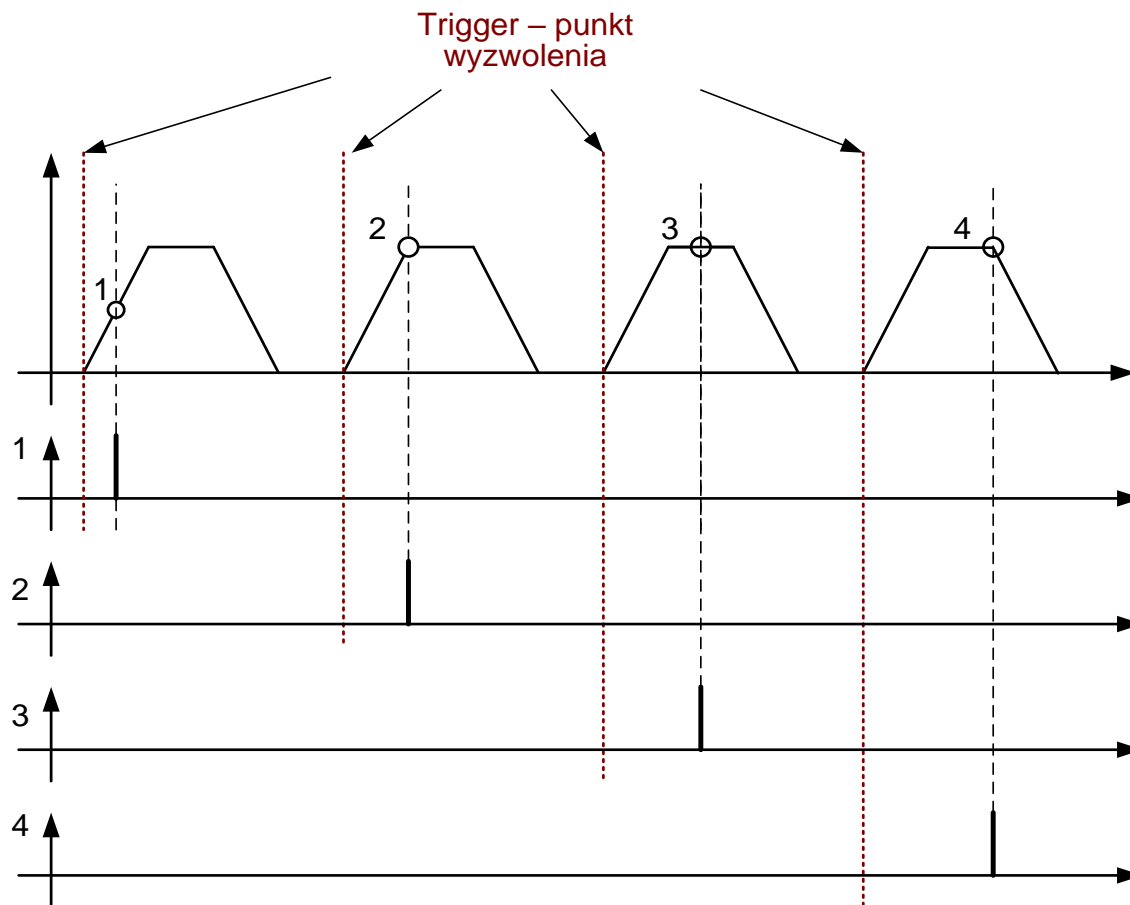
# Próbkowanie w czasie rzeczywistym



Technika próbkowania w czasie rzeczywistym polega na pobieraniu próbek z maksymalną częstotliwością pracy przetwornika a/c. Oscyloskop pracuje w sposób ciągły, a chwila zakończenia akwizycji danych jest określona przez wystąpienie impulsu wyzwalającego. Jeżeli jednak liczba zebranych próbek jest tak mała, że nie jest wypełniony nawet jeden rekord obrazowania, wówczas oscyloskop dalej pobiera próbki do czasu wypełnienia rekordu. Taka zasada obowiązuje w oscyloskopach, ale już niekoniecznie w analizatorach stanów logicznych, w szczególności w starszych analizatorach można spotkać się z efektem braku obrazowania sygnału na ekranie.

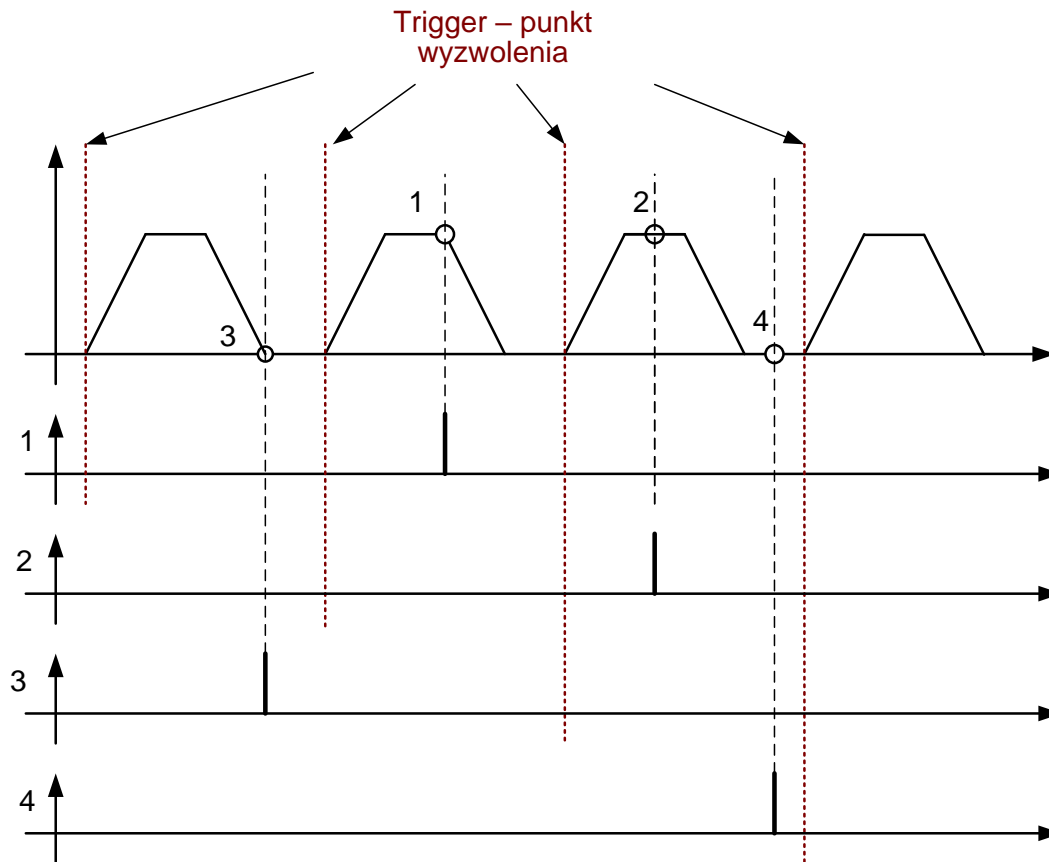


# Próbkowanie sekwencyjne



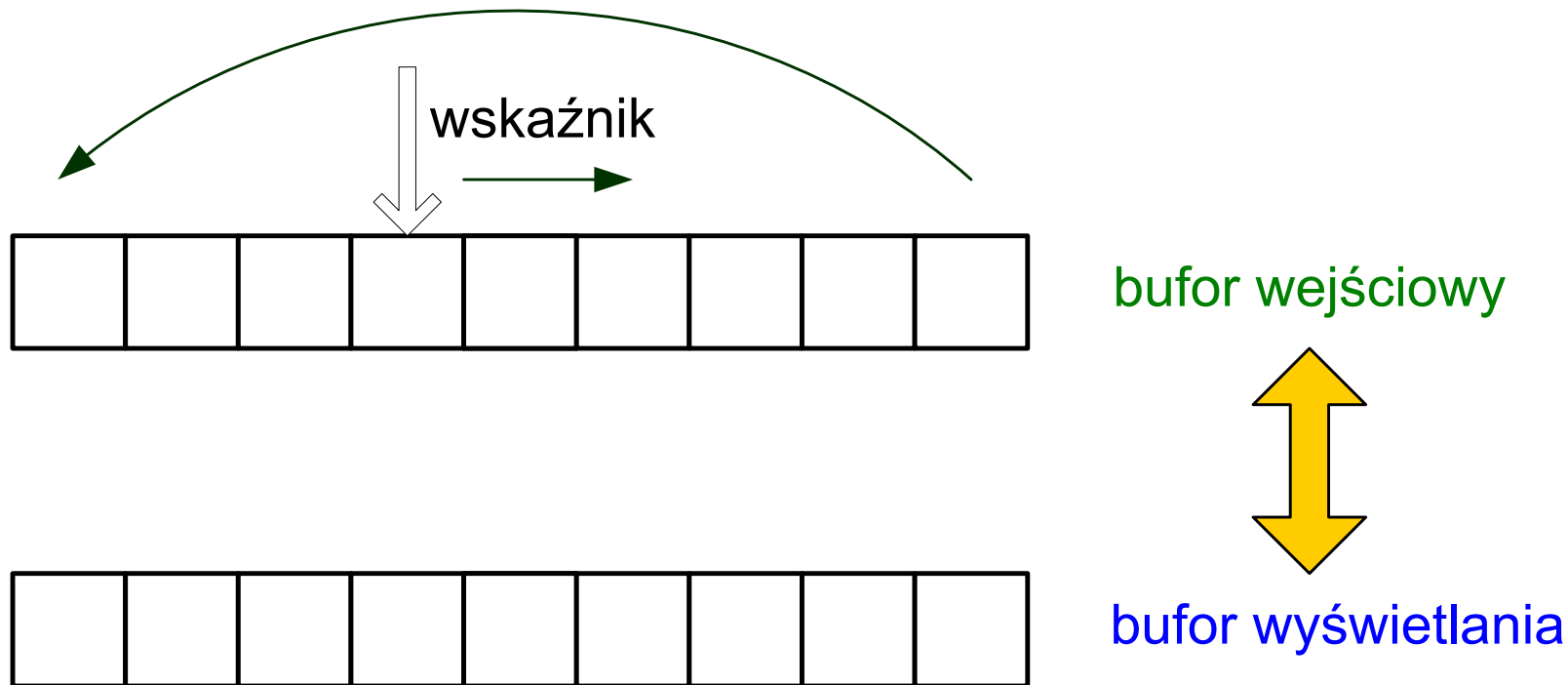
W trybie próbkowania sekwencyjnego próbki sygnału są pobierane po jednej z każdego okresu sygnału wejściowego. Warunkiem zastosowania tego trybu, oprócz okresowości sygnału, jest stabilność punktu wyzwiania (triggera), bowiem chwila pobrania próbki jest określana bardzo precyzyjnie, ale względem punktu wyzwiania. Z każdego okresu jest zatem pobierana jedna próbka – za każdym razem w innej chwili czasowej.

# Próbkowanie pseudoprzypadkowe



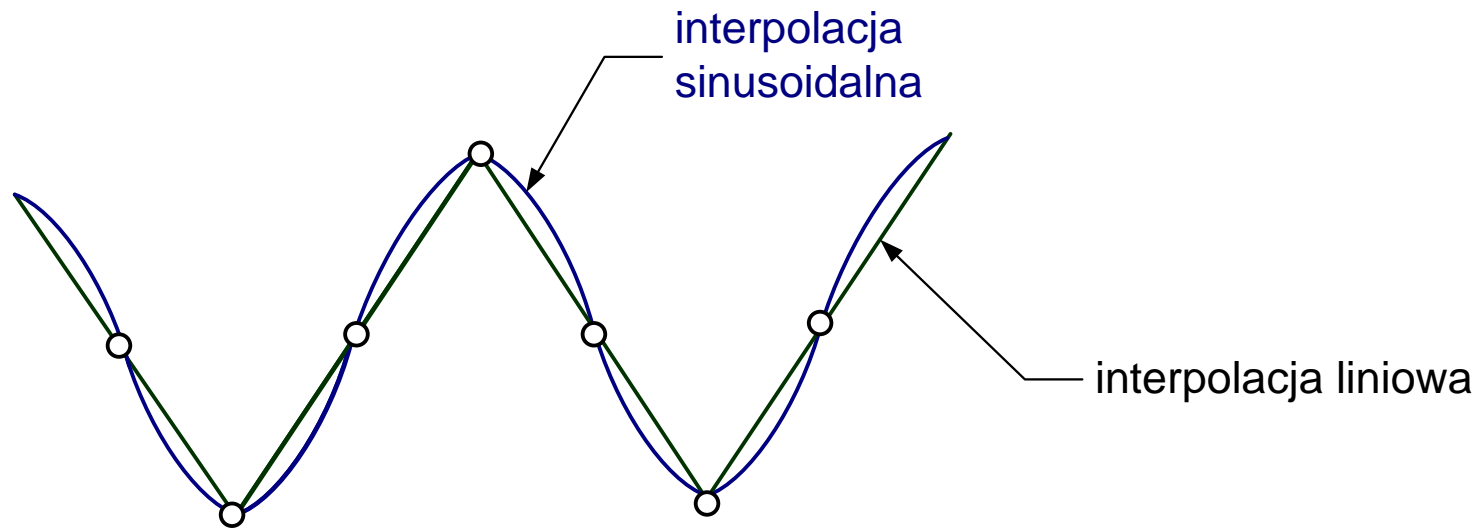
Podstawowym trybem próbkowania w oscyloskopach cyfrowych jest próbkowanie pseudoprzypadkowe polegające na tym, że próbki pobierane są w sposób ciągły, ale w przypadkowych chwilach czasowym względem punktu wyzwolenia. Ten tryb wymaga oprócz przetworzenia amplitudy sygnału także precyzyjnego pomiaru odstępu czasu pomiędzy impulsem wyzwalającym, a chwilą pobrania próbki, co z kolei umożliwia usytuowania próbki w odpowiednim miejscu na osi czasu.

## Technika zapamiętywania przebiegów



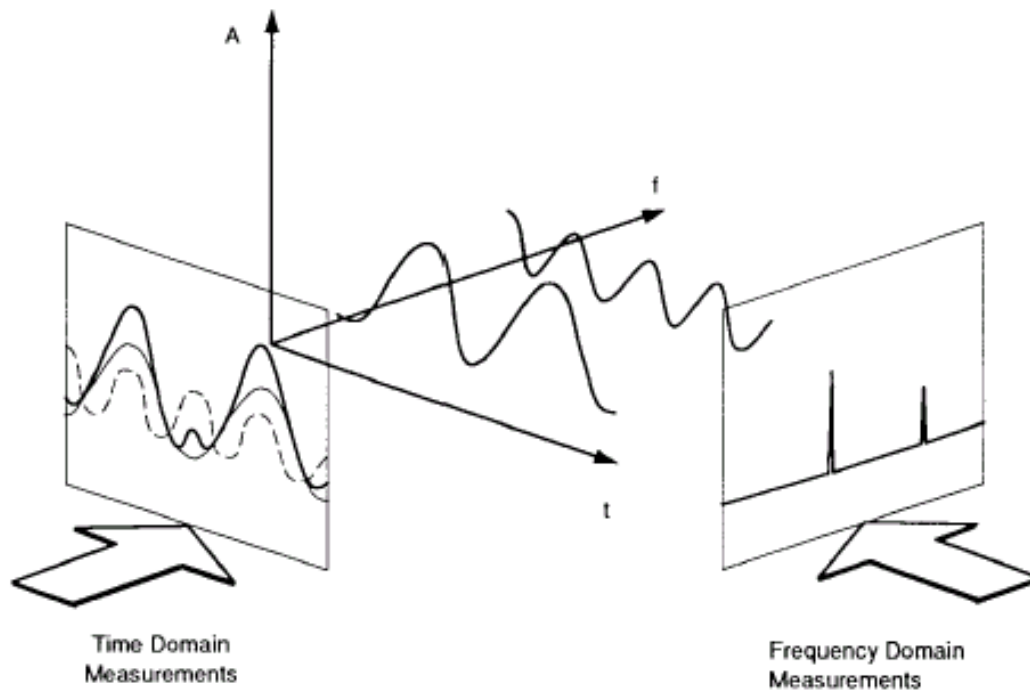
*We wcześniejszych uwagach pojawiło się sformułowanie o ciągłej pracy oscyloskopu, co wymaga ciągłego zapisu do pamięci. Zazwyczaj pamięć w oscyloskopie zorganizowana jest cyrkularnie tzn. w postaci bufora kołowego. Zapelnienie całej pamięci powoduje rozpoczęcie zapisu od początku, a zadaniem mikroprocesorowego układu sterującego jest prawidłowe usytuowanie próbek na osi czasu.*

## Interpolacja liniowa i sinusoidalna



*Bezpośrednie przesyłanie próbek na ekran oscyloskopu polega na zapalaniu odpowiednich punktów na ekranie. Jeżeli jednak przebieg jest szybkozmienny to może powstać ciekawe zjawisko aliasingu percepcyjnego, wynikające z bezwładności ludzkiego wzroku, a spowodowane mimowolnym łączeniem punktów znajdujących się blisko siebie na ekranie. Przyjmuje się, że aby można było prawidłowo zinterpretować obraz złożony z punktów, częstotliwość próbkowania musi być większa od częstotliwości sygnału 25 razy, tzn. znacznie więcej niż wynika z twierdzenia o próbkowaniu. W rzeczywistości oscyloskop przed wyprowadzeniem próbek na ekran dokonuje interpolacji i wypełnia przestrzeń między nimi. Na rysunku pokazano pewien problem związany z interpolacją, polegający na odkształceniu sygnału. Ogólnie przyjmuje się, że dla przebiegów o charakterze sinusoidalnym adekwatna jest właśnie interpolacja sinusoidalna, a dla przebiegów o charakterze impulsowym interpolacja liniowa.*

## Dziedzina czasu -> dziedzina częstotliwości



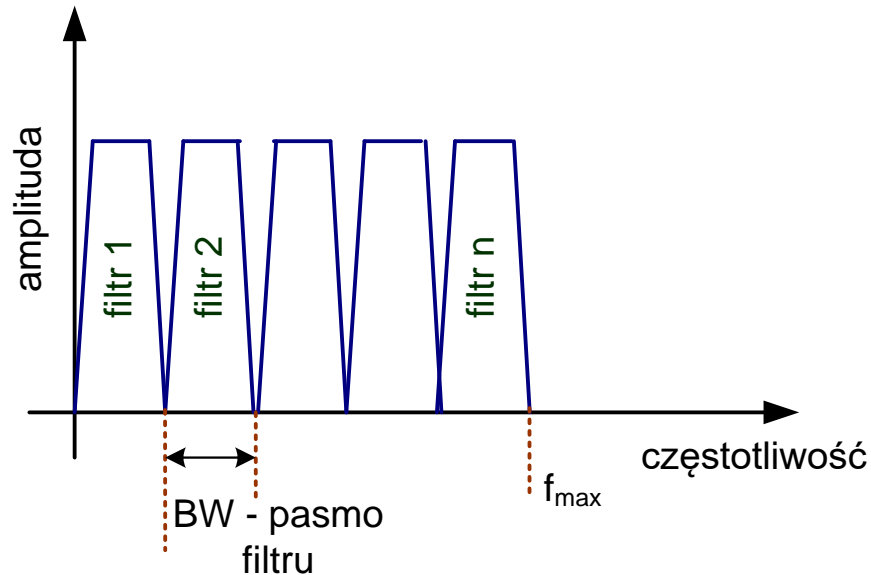
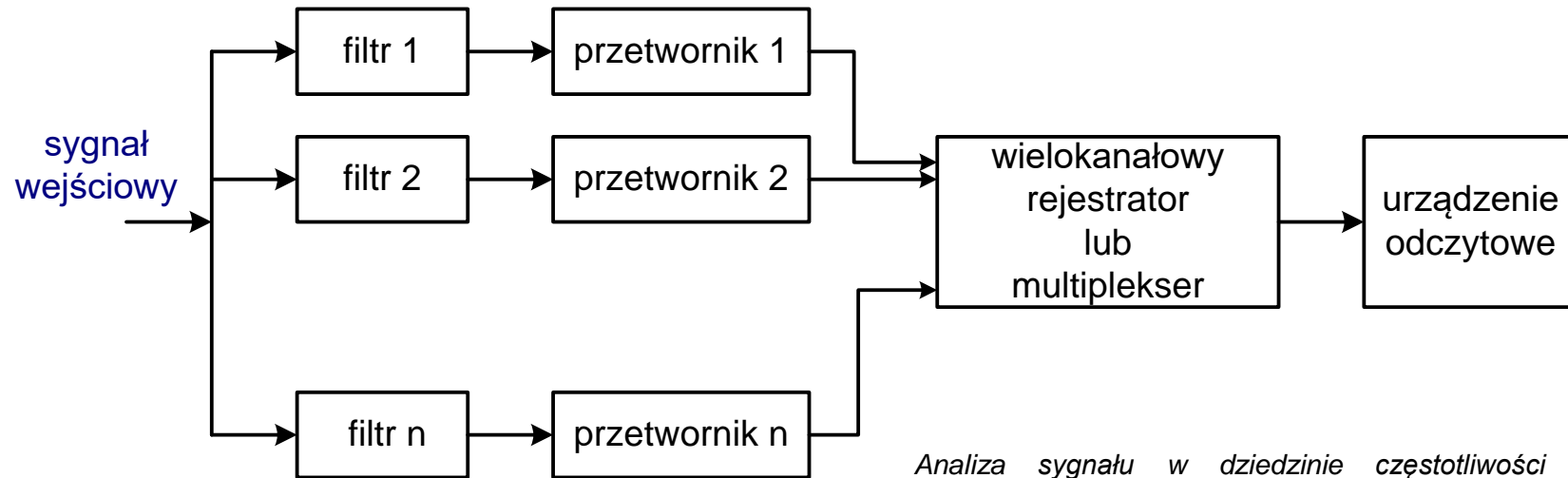
*W przypadku użycia oscyloskopu do obserwacji sygnału stosujemy analizę czasową. Jednak obserwacja sygnału w dziedzinie czasu nie pozwala na zidentyfikowanie wielu różnych charakterystycznych parametrów sygnałów, w tym tzw. zawartości harmonicznych.*

*Alternatywnie w stosunku do dziedziny czasu, sygnały można przedstawiać w dziedzinie częstotliwości. Taką transformację sygnału z jednej dziedziny do drugiej nazywa się analizą widmową.*

*Analiza widmowa polega na „rozłożeniu” sygnału na elementy składowe, którymi są funkcje trygonometryczne typu sinus i kosinus o różnych częstotliwościach.*

*Na rysunku przedstawiono poglądowo obraz sygnału w dziedzinie częstotliwości. Stanowią go prążki o wysokości odpowiadającej wartości amplitud poszczególnych harmonicznych. [patrz moduł 1 slajdy od 27 do 36]*

# Miernik sygnałów



Analiza sygnału w dziedzinie częstotliwości polega na wyodrębnieniu poszczególnych składowych harmonicznym sygnału i zobrazowaniu ich amplitudy w funkcji częstotliwości. Koncepcję urządzenia realizującego takie operacje przedstawiono na rysunku. Pasma przepustowe filtrów wejściowych pokrywają przedział częstotliwości od 0Hz do pewnej częstotliwości  $f_{\max}$  wyznaczającej zakres przetwarzania. Przetworniki w postaci detektorów wartości szczytowej sygnału przetwarzają amplitudy składowych sygnału na wartości stałe rejestrowane w pamięci przyrządu lub zobrazowane bezpośrednio na urządzeniu odczytowym. Pomiar lub rejestracja wartości sygnałów odpowiadających poszczególnym harmonicznym wymaga zastosowania dużej liczby filtrów o wąskim paśmie przepustowym BW (składowe o częstotliwościach zawierających się w paśmie danego filtru są nierozróżnialne).



## Realizacje analizy sygnałów

### Rozwinięcie koncepcji przedstawionej na rysunku



realizacja filtrów na drodze  
obliczeniowej

przemiana częstotliwości badanego  
sygnału w taki sposób, aby kolejne  
harmoniczne tego sygnału znalazły  
się w określonym paśmie  
przepustowym jednego filtru

zastosowaniu jednego  
filtru o przestrajonym  
paśmie

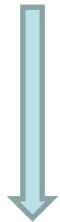
## Rodzaje transformat Fouriera

Związek między dziedziną czasu a dziedziną częstotliwości jest matematycznie opisany przez przekształcenie Fouriera.

Przejście z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości jest określane jako analiza sygnału, a z dziedziny częstotliwości do dziedziny czasu jako synteza sygnału.

Na slajdzie wymieniono rodzaje transformat Fouriera. Z praktycznego punktu widzenia współczesnej techniki pomiarowej, istotne jest Dyskretne Przekształcenie Fouriera, dotyczące przetwarzania sygnałów dyskretnych (ściśle cyfrowych), bo tylko takie sygnały mogą być przetwarzane metodami numerycznymi.

**sygnał ciągły w dziedzinie czasu  
(nieokresowy)**



widmo ciągłe w dziedzinie  
częstotliwości

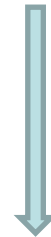


**sygnał dyskretny w dziedzinie czasu  
(nieokresowy)**



widmo ciągłe w dziedzinie  
częstotliwości  
(okresowe)

**sygnał ciągły w dziedzinie czasu  
(okresowy)**



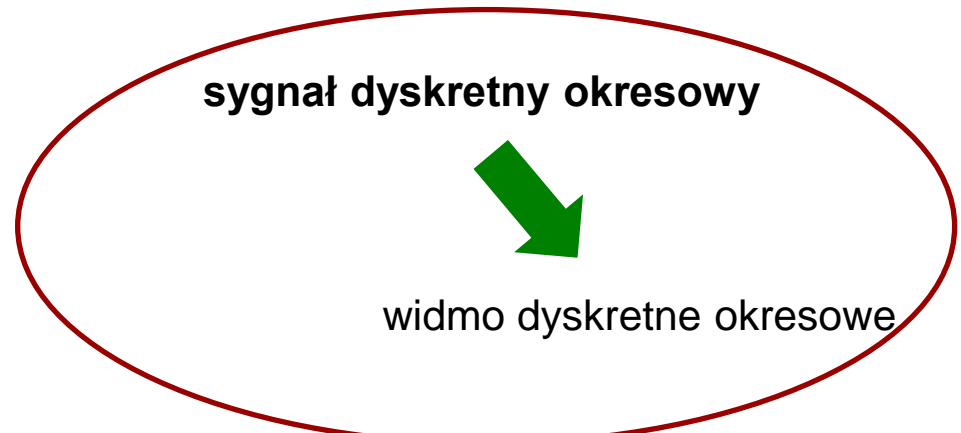
widmo dyskretne w dziedzinie  
częstotliwości



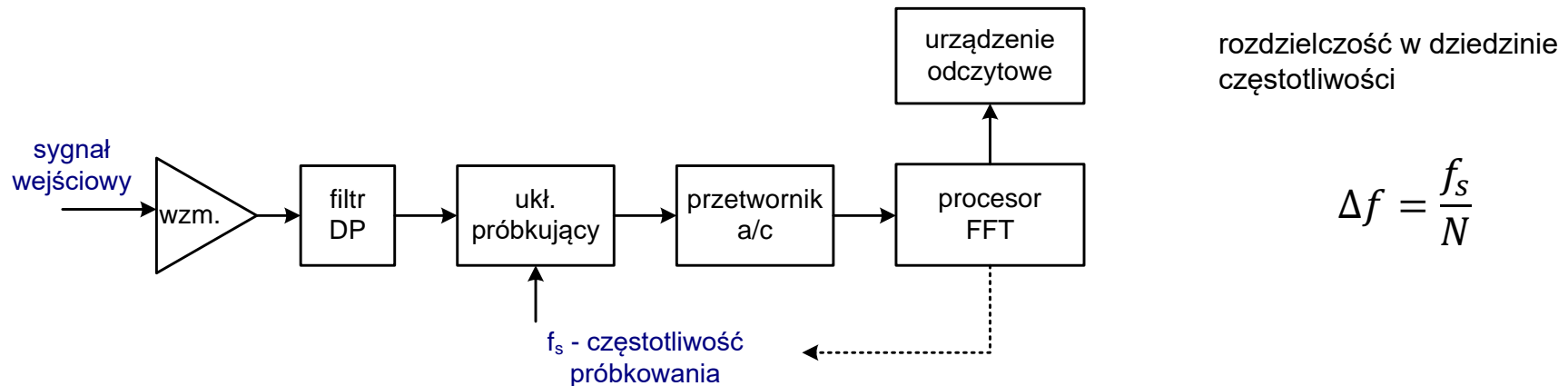
**sygnał dyskretny okresowy**



widmo dyskretne okresowe

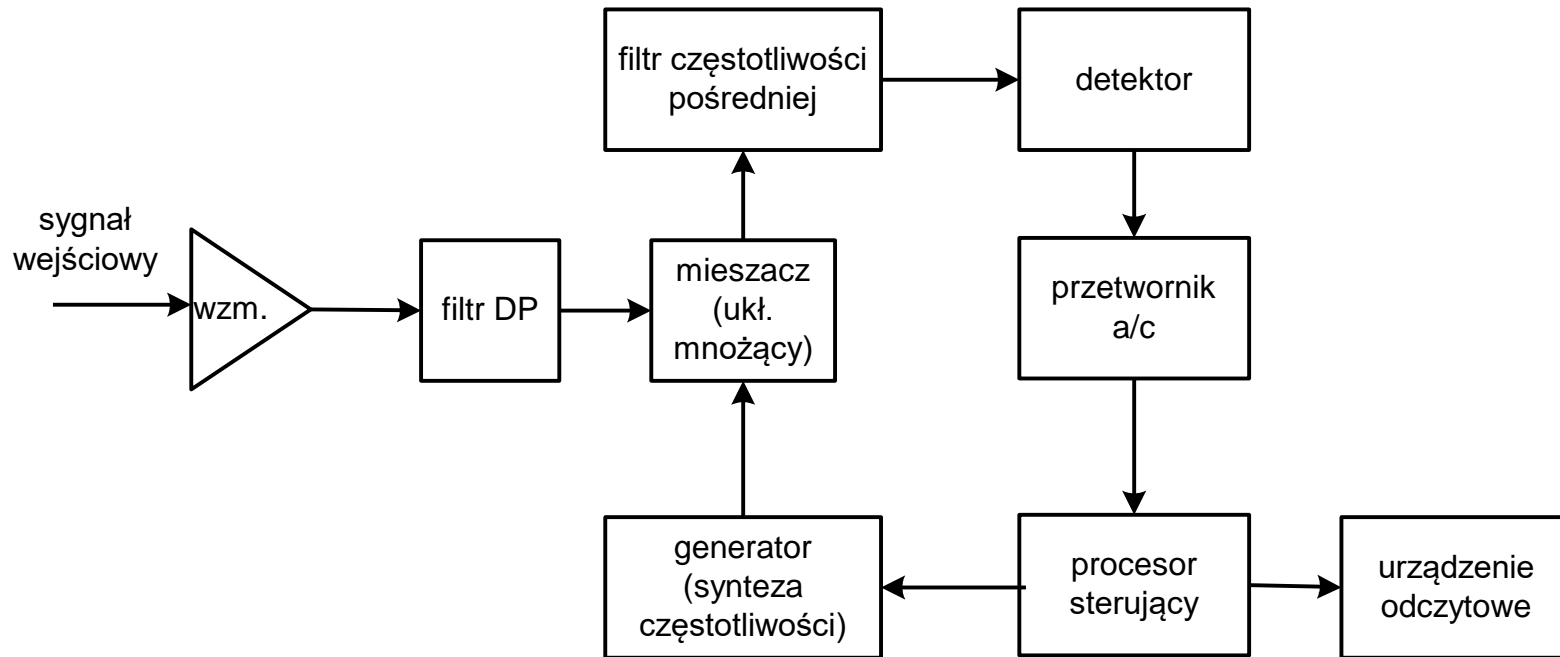


# Analizator FFT



Wszystkie obecnie budowane cyfrowe analizatory widma wykorzystują do obliczeń różne odmiany pierwotnej wersji algorytmu FFT. Strukturę takiego analizatora przedstawiono na rysunku. Podstawowe znaczenie dla prawidłowej analizy ma relacja między pasmem badanego sygnału a częstotliwością próbkowania  $f_s$ . Zadaniem filtra dolnoprzepustowego (tzw. filtra antyaliasingowego) na wejściu układu jest ograniczenie pasma sygnału do wartości umożliwiającej spełnienie twierdzenia o próbkowaniu. Problemem przy analizie widmowej jest rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości. Jeżeli zbiór danych do analizy składa się z  $N$  próbek sygnału, a częstotliwość próbkowania wynosiła  $f_s$ , to analizator wyznaczy wartości amplitud harmonicznych o częstotliwościach  $0, f_s/N, 2f_s/N$  itd., co wcale nie musi odpowiadać rzeczywistym wartościom częstotliwości harmonicznych. W powyższym przypadku odstęp na osi częstotliwości wyniesie  $f_s/N$ , z czego wynika, że aby poprawić rozdzielczość czyli dokładność zobrazowania widma należy zwiększyć liczbę próbek lub zmniejszyć częstotliwość próbkowania. Wzrost liczby próbek zwiększa nakłady obliczeniowe, wydłuża czas obliczeń i wymusza przechowywanie większej liczby danych. Z kolei zmniejszenie częstotliwości próbkowania może spowodować powstanie aliasingu. Z każdą zmianą częstotliwości próbkowania powinna ulegać zmianie charakterystyka filtra wejściowego. W praktyce filtr ma niezmienną charakterystykę, a analizator próbkuje z maksymalną częstotliwością. Proces zmniejszania częstotliwości próbkowania jest realizowany metodą decymacji ciągu próbek wejściowych, tzn. wybierania do analizy co  $n$ -tej próbki, a zerowaniu pozostałych. Taka technika poprawia rozdzielczość, ale przy ograniczeniu pasma sygnałów wejściowych. Rozwiązaniem umożliwiającym poprawę rozdzielczości w dowolnym paśmie jest transformacja (przesunięcie) pasma badanego sygnału metodą mieszania tego sygnału z sygnałem z lokalnego generatora (przetwarzanie heterodynowe). Mieszanie sygnałów jest fizycznie realizowane przez układ mnożący. Jeżeli na wejścia układu mnożącego zostaną podane sygnały o częstotliwościach  $f_1$  i  $f_2$ , to na wyjściu pojawi się sygnał zawierający składowe o częstotliwościach  $f_1 + f_2$  i  $f_1 - f_2$ . Składową sumacyjną eliminuje się za pomocą filtra dolnoprzepustowego i dalszemu przetwarzaniu podlega składowa różnicowa. Wynik przetwarzania lub pomiaru musi być przeskalowany na pasmo odpowiadające rzeczywistej częstotliwości badanego sygnału. Analizatory FFT pozwalają na badanie sygnałów w paśmie do kilkuset kHz.

# Analizator z przemianą częstotliwości

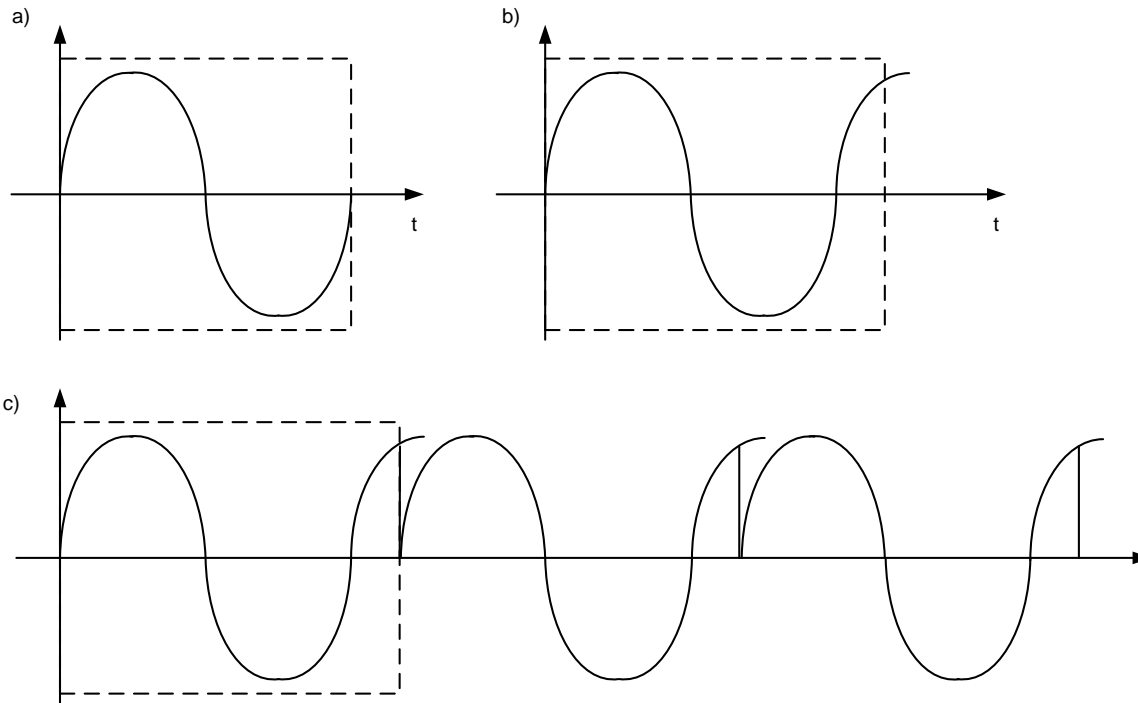


Technika transformacji pasma stanowi podstawę działania analizatorów działających w paśmie częstotliwości radiowych. Strukturę takiego analizatora przedstawiono na rysunku. Idea działania układu mnożącego została wyżej przedstawiona. Zastosowany w układzie filtr częstotliwości pośredniej ma stałą charakterystykę natomiast zmianie ulega częstotliwość generatora lokalnego. W układach analogowych ten generator jest generatorem VCO sterowanym napięciem narastającym liniowo, natomiast w układach cyfrowych generator działa na zasadzie bezpośredniej syntezy częstotliwości (próbki sygnału zapisane w pamięci i wyprowadzane pod kontrolą procesora).

# Przeciek sygnału – zniekształcenie widma

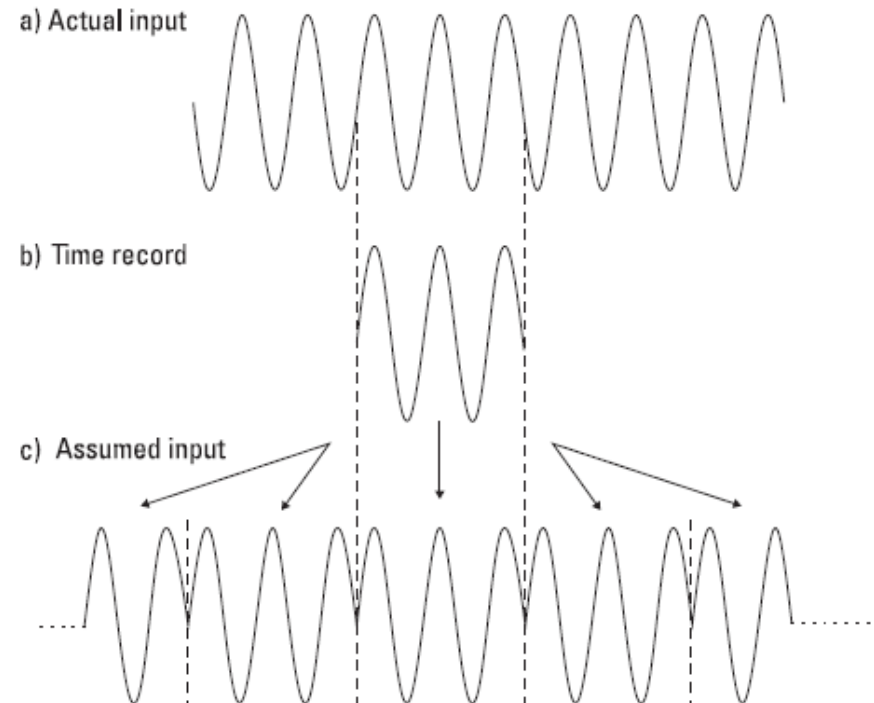
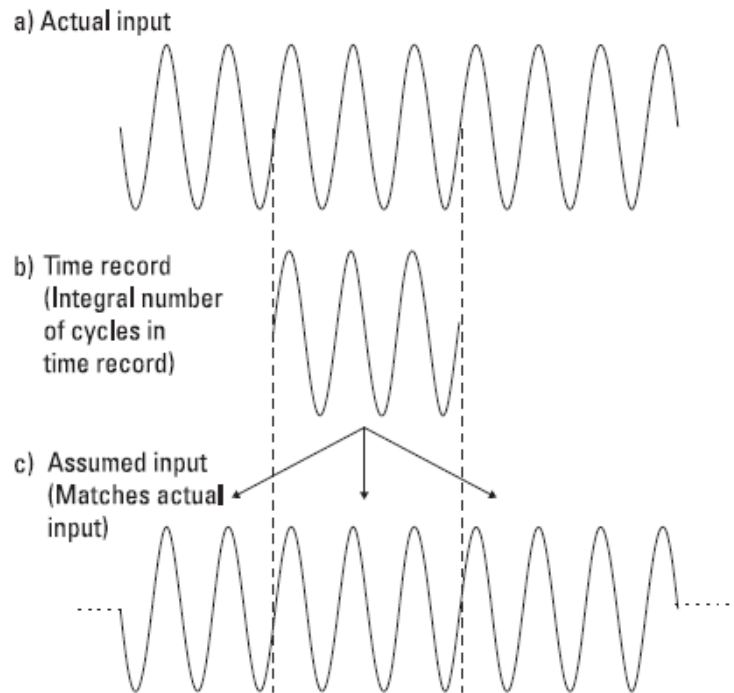
$$w(n) = \begin{cases} 1 & \text{dla } n = 0, 1, 2, \dots, N \\ 0 & \text{dla pozostałych} \end{cases}$$

$$X(k) = \frac{\sin(\pi k)}{\pi k}$$



Ważnym problemem w analizie widmowej jest brak korelacji pomiędzy rzeczywistym okresem badanego sygnału, a czasem akwizycji (rejestracji) próbek sygnału. Najlepiej by było, żeby w „oknie analizy” znalazł się jeden lub wielokrotność okresów sygnału. W praktyce jednak tak nie jest i przeważnie analizowany fragment sygnału jest przypadkowo usytuowany względem jego okresu. Fizycznie odpowiada to iloczynowi sygnału przez okno prostokątne  $w(n)$  zdefiniowana jak na slajdzie. W konsekwencji sytuacja jest taka, jakbyśmy analizowali sygnał taki jak na dolnym rysunku (zwróćmy uwagę na założenie o okresowości sygnału). Oczywiście jest, że widmo sygnału (takiego jak na dolnym rysunku) będzie inne niż widmo sygnału sinusoidalnego. Takie zjawisko zniekształcenia widma jest nazywane „przeciekaniem”, przy czym zniekształcenia są tym większe im zmiana sygnału jest „gwałtowniejsza”.

# Analiza synchroniczna i niesynchroniczna

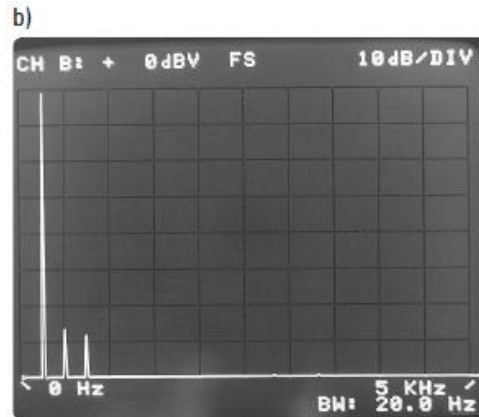
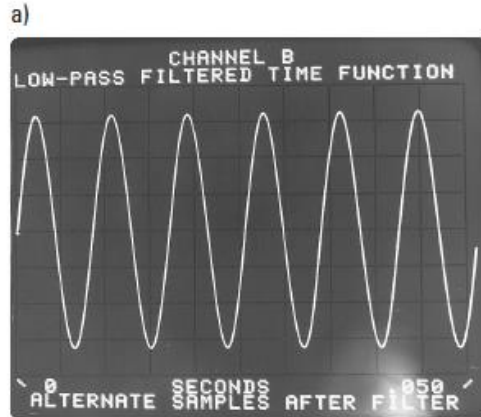


Na slajdzie pokazano jeszcze jeden rysunek ilustrujący omawiany problem. Do sytuacji pokazanej na lewym rysunku stosuje się określenie analiza synchroniczna, a do sytuacji pokazanej na prawym rysunku, w której wystąpi zjawisko przecieku, określenie analiza niesynchroniczna.

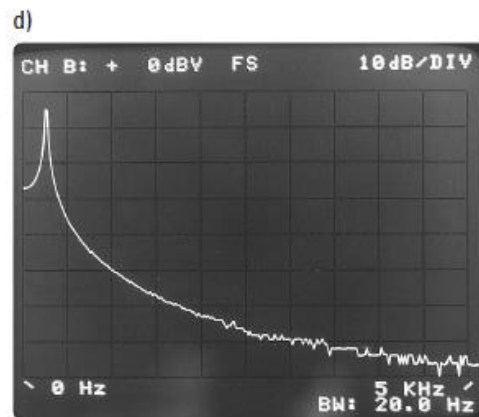
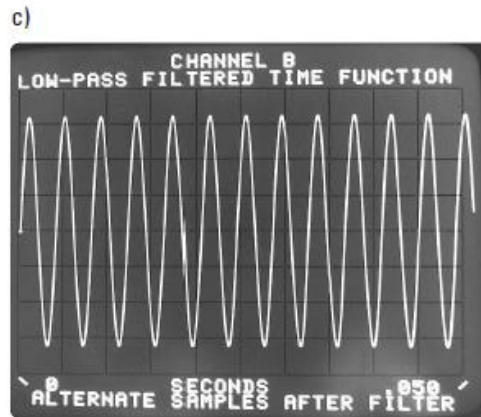


## Analiza synchroniczna i niesynchroniczna

Na slajdzie pokazano rzeczywisty przypadek analizy synchronicznej (całkowita liczba okresów) i analizy niesynchronicznej. W dziedzinie częstotliwości widać wyraźnie „rozmycie” prążków sygnału dla niecałkowitej liczby okresów przebiegu badanego.

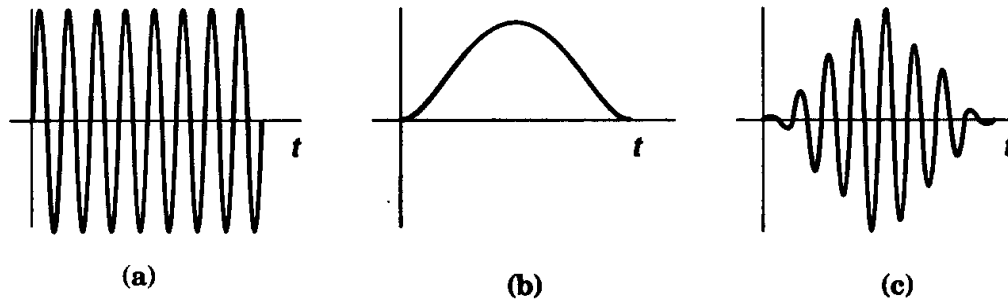


a) & b) Sine wave periodic in time record



c) & d) Sine wave not periodic in time record

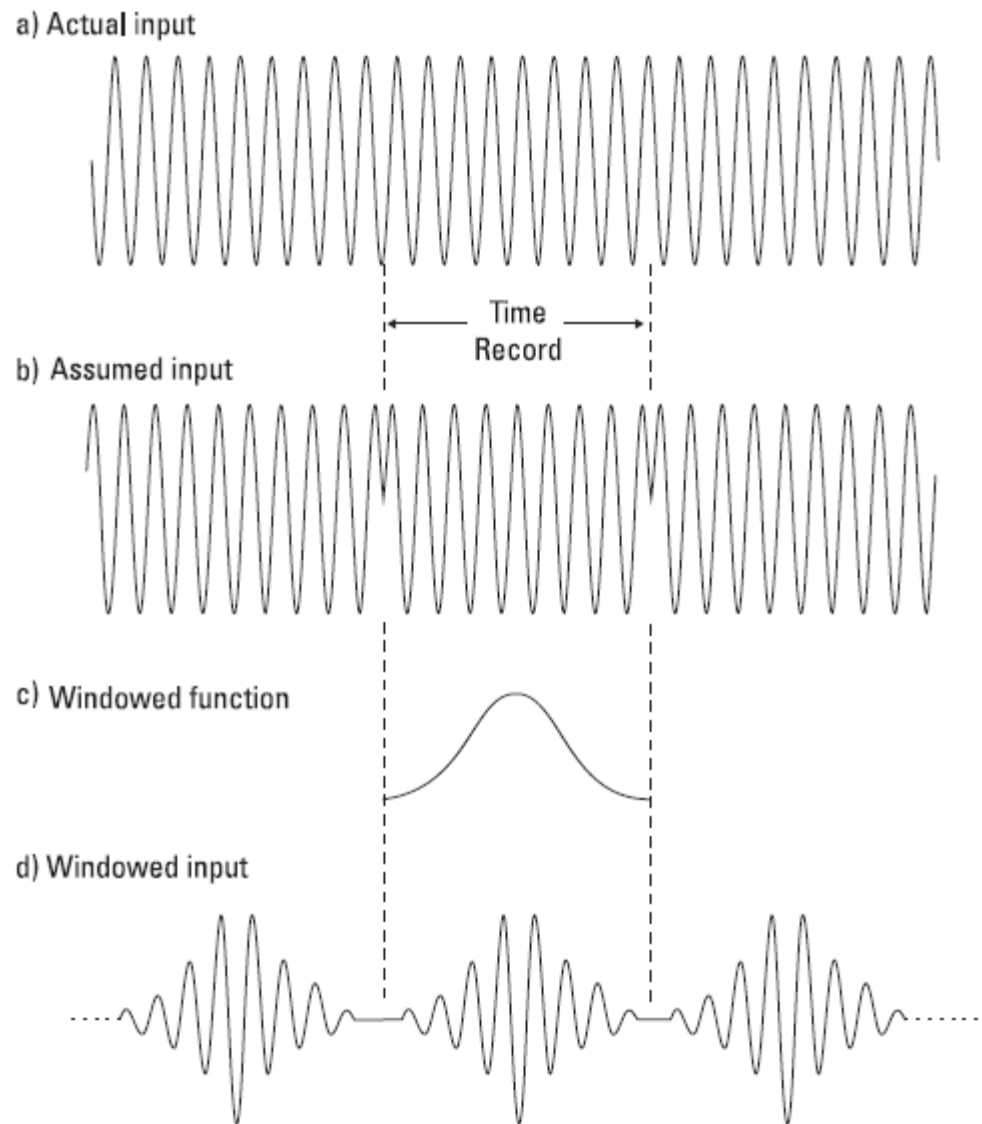
## Znaczenie i rodzaje okien czasowych



- **okno prostokątne** – bardzo dobrze nadaje się do analizy sygnałów przejściowych, czyli takich które samoistnie pojawiają się i zanikają więc nie trzeba ich wygładzać, stosowane również gdy mamy pewność że sygnał mieści się w długości okna całkowitą ilość razy, okna te charakteryzują się brakiem spadku amplitudy w widmie sygnału okienkowanego;
- **okno eksponentialne** – używane do analizy sygnałów przejściowych gdy sygnał jest dłuższy niż samo okno;
- **okno Hamminga** – okno o charakterystyce „dzwonowej”;
- **okno typu „flat top”** – bardzo przydatne do dokładnej analizy amplitudy pojedynczych składowych widma dobrze odizolowanych od reszty;

*Żeby uniknąć przecieku, a przynajmniej zminimalizować jego skutki, i ograniczyć „gwałtowność” ucięcia sygnału stosuje się tzw. okna czasowe. W praktyce największe znaczenie mają okna o charakterystyce „dzwonowej” (tak jak na rysunku b). Okno powoduje co prawda zniekształcenie amplitudy, ale prążek w dziedzinie częstotliwości jest stosunkowo wąski i prawidłowo usytuowany na osi częstotliwości. W sytuacjach kiedy celem analizy jest precyzyjne określenie amplitudy trzeba jednak stosować okna o płaskiej charakterystyce.*

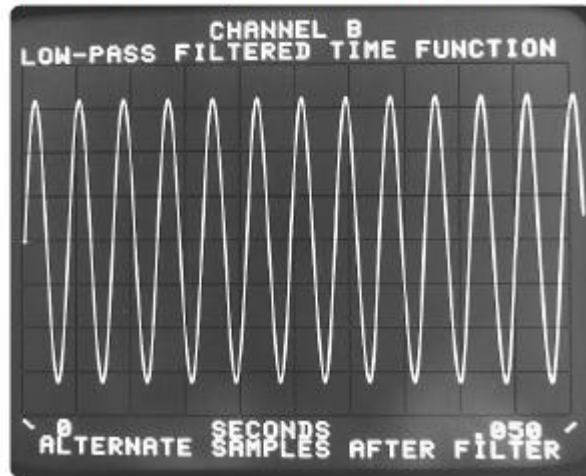
# Zastosowanie funkcji okna



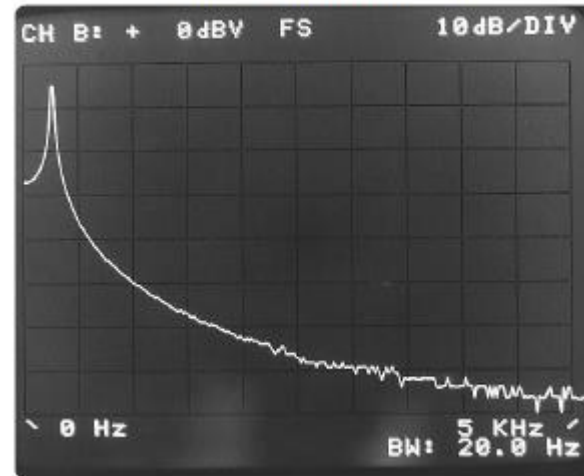
*Jeszcze jeden rysunek ilustrujący zastosowanie funkcji okna.*

# Efekt zastosowania okna czasowego

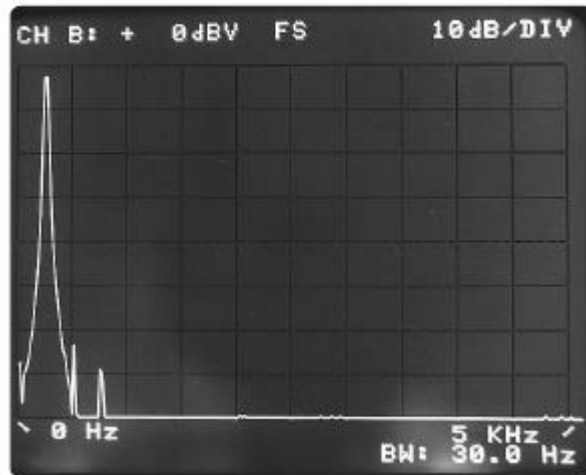
a) Sine wave not periodic in time record



b) FFT results with no window function



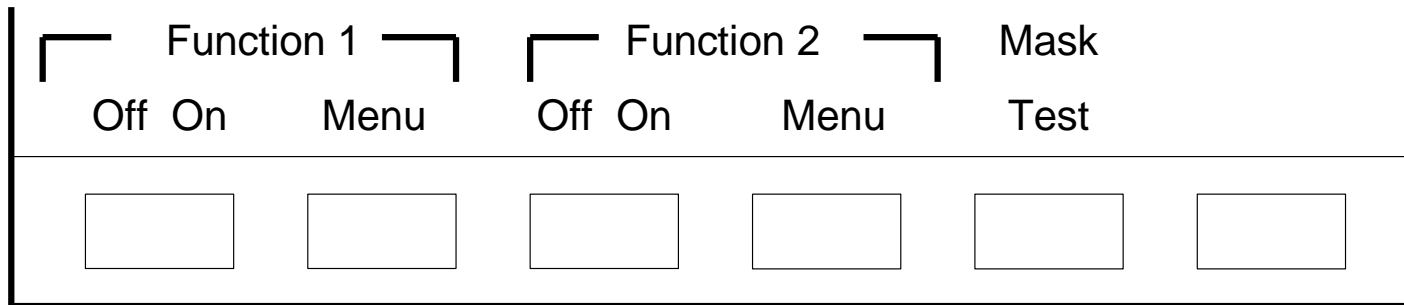
c) FFT results with a window function



*Na slajdzie pokazano rzeczywiste efekty analizy sygnału bez zastosowania i z zastosowaniem okna czasowego.*

## Funkcje matematyczne oscyloskopu cyfrowego

Menu działań matematycznych jest uaktywniane za pomocą przycisku +/-



**Function 1** - to działania wykonywane jednocześnie na dwóch przebiegach. Sygnały mogą być sumowane, odejmowane, lub mnożone.

**Function 2** - to menu funkcji matematycznych takich jak:

- całkowanie,
- różniczkowanie,
- analiza widma sygnału.

*Praktycznie wszystkie dostępne aktualnie oscyloskopy cyfrowe wyposażone są w moduł FFT, stając się w istocie analizatorami sygnałów. W konkretnym przypadku oscyloskopu często używanego w laboratorium (HP54603B) funkcję analizatora dostępne są w Menu działań matematycznych. Działania matematyczne podzielone są na dwie funkcje (Function 1 i Function 2) realizujące operacje dodawania, odejmowania, mnożenia oraz całkowania, różniczkowania i FFT. [Wymieniony przyrząd jest używany na zajęciach w ramach Zjazdu 3].*

# Menu analizy widmowej

| Operand              | Operation            | Units/div            | Ref Levl             | FFT                  | Previous             |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 2 F1               | FFT                  | 10.00 dB             | -10.00 dBV           | Menu                 | Menu                 |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

Function 2

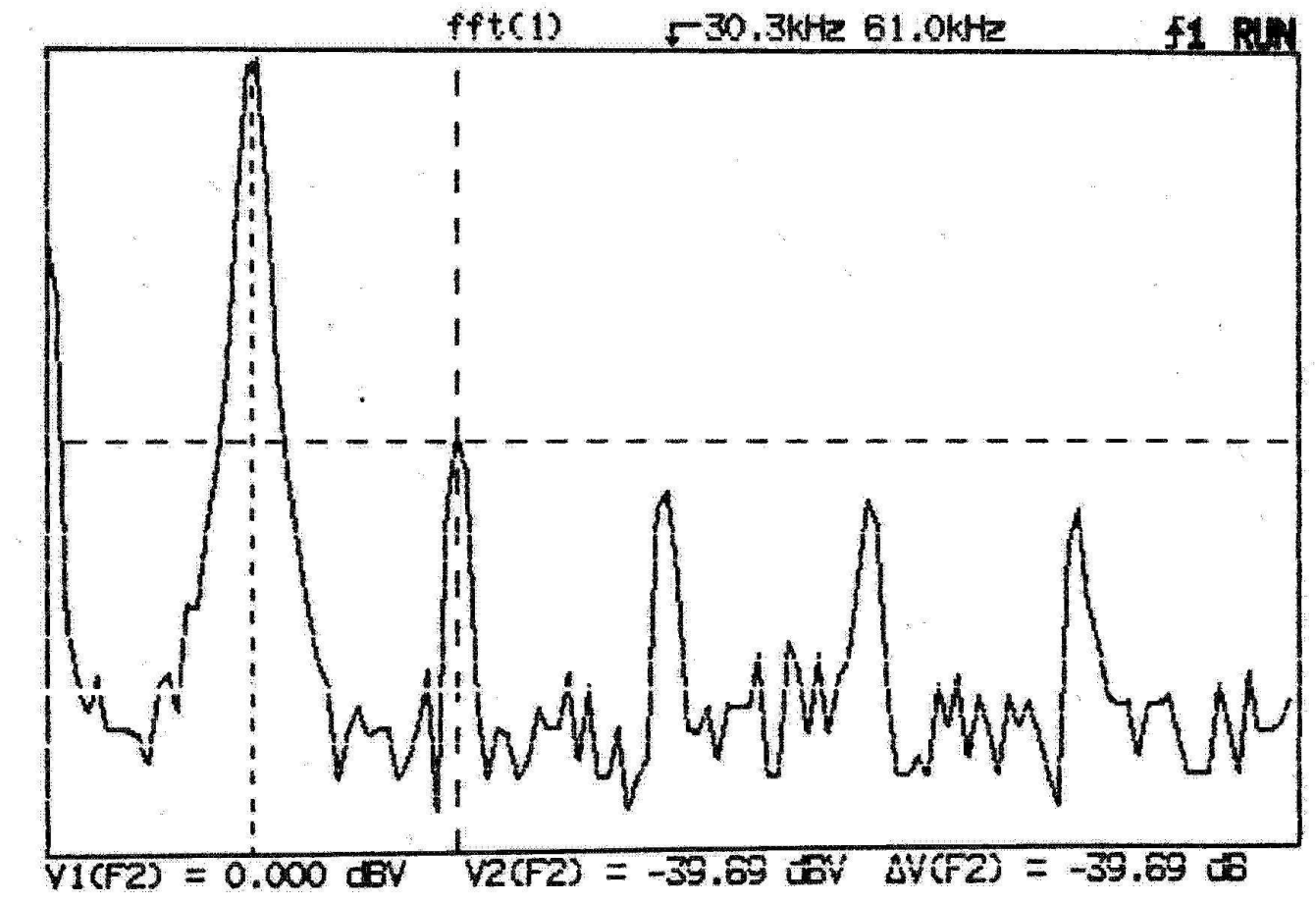
| Cent Freq            | Freq Span            | Move 0Hz             | Autocale             | Window               | Previous             |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 122.1kHz             | 244.1kHz             | To left              | FFT                  | Hanning              | Menu                 |
| <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

FFT Menu

Menu Function 2 udostępnia możliwość wyboru: źródła sygnału, wykonywanej operacji (tutaj FFT), czułości w osi pionowej w skali logarytmicznej oraz ustalenia poziomu odniesienia (Ref Levl) w dBV.



# Rzeczywisty obraz widma sygnału



Na slajdzie pokazano obraz ekranu przyrządu HP54603B z widmem rzeczywistego sygnału.

# Wprowadzenie: generacja sygnałów pomiarowych



*W wielu systemach pomiarowych ukierunkowanych na badania obiektów występuje konieczność wymuszenia określonego sygnału na wejściu badanego układu. Zazwyczaj sytuacja taka ma miejsce, gdy badamy zachowanie układu przy różnych parametrach amplitudowych i czasowych sygnałów. Określając charakterystyki przetwarzania dla znanego (dobrze zdefiniowanego) sygnału możemy wnioskować o zachowaniu układu w rzeczywistych warunkach pracy.*

# Techniki generacji sygnałów

## Podstawowe techniki generacji sygnałów

### *generatory przebiegów sinusoidalnych*

- z układem rezonansowym LC
- z mostkiem RC

### *generatory funkcyjne*

- przebiegi: trójkąt (ładowanie kondensatora stałym prądem), prostokąt (komparator), sinusoida (kształtowanie w układzie diodowym);
- przestrajanie częstotliwości
- regulacja poziomu sygnału wyjściowego
- składowa stała
- standardowe wyjście TTL
- modulacja FM i AM

*Urządzeniami pełniącymi zadania źródeł sygnału w układach i systemach pomiarowych są generatory. W skrótowym ujęciu można przyjąć rozwój generatorów sygnałowych w postaci: oscylatory, generatory funkcyjne i generatory cyfrowe. Jeszcze należy zwrócić uwagę na generatory impulsowe – przydatne w badaniach układów cyfrowych i generatory mocy – przebieg wyjściowy sinusoidalny, o dużej wydajności prądowej. W kontekście powszechności użytkowania prym niewątpliwie wiodą generatory funkcyjne zapewniające możliwość wytworzenia sygnałów sinusoidalnych, trójkątnych i prostokątnych o regulowanej częstotliwości, amplitudzie, współczynniku wypełnienia, wyposażone dodatkowo w modulacje amplitudy i częstotliwości. Przydatną funkcją może być zwłaszcza możliwość automatycznej zmiany częstotliwości przebiegu wyjściowego w sposób liniowy lub logarytmiczny. Taka funkcja pozwala na wyznaczanie pasma przenoszenia układów, a jest wręcz niezbędna przy automatycznych badaniach filtrów analogowych i cyfrowych.*

## Metody syntezy sygnałów

### *synteza częstotliwości*

1. synteza bezpośrednia
2. synteza pośrednia z wykorzystaniem pętli fazowej
3. bezpośrednia synteza cyfrowa

*Urządzeniami zapewniającymi największe możliwości w zakresie generacji sygnałów są generatory przebiegów dowolnych (ang. Arbitrary Waveform Generator). Wykorzystywana jest w nich technika cyfrowej syntezy częstotliwości. Samo zagadnienie syntezy sygnałów jest bardzo interesujące z naukowego punktu widzenia. Pomijając kwestie ściśle techniczne synteza sygnałów jest zagadnieniem z pogranicza elektroniki i informatyki.*

## Parametry synteзаторów

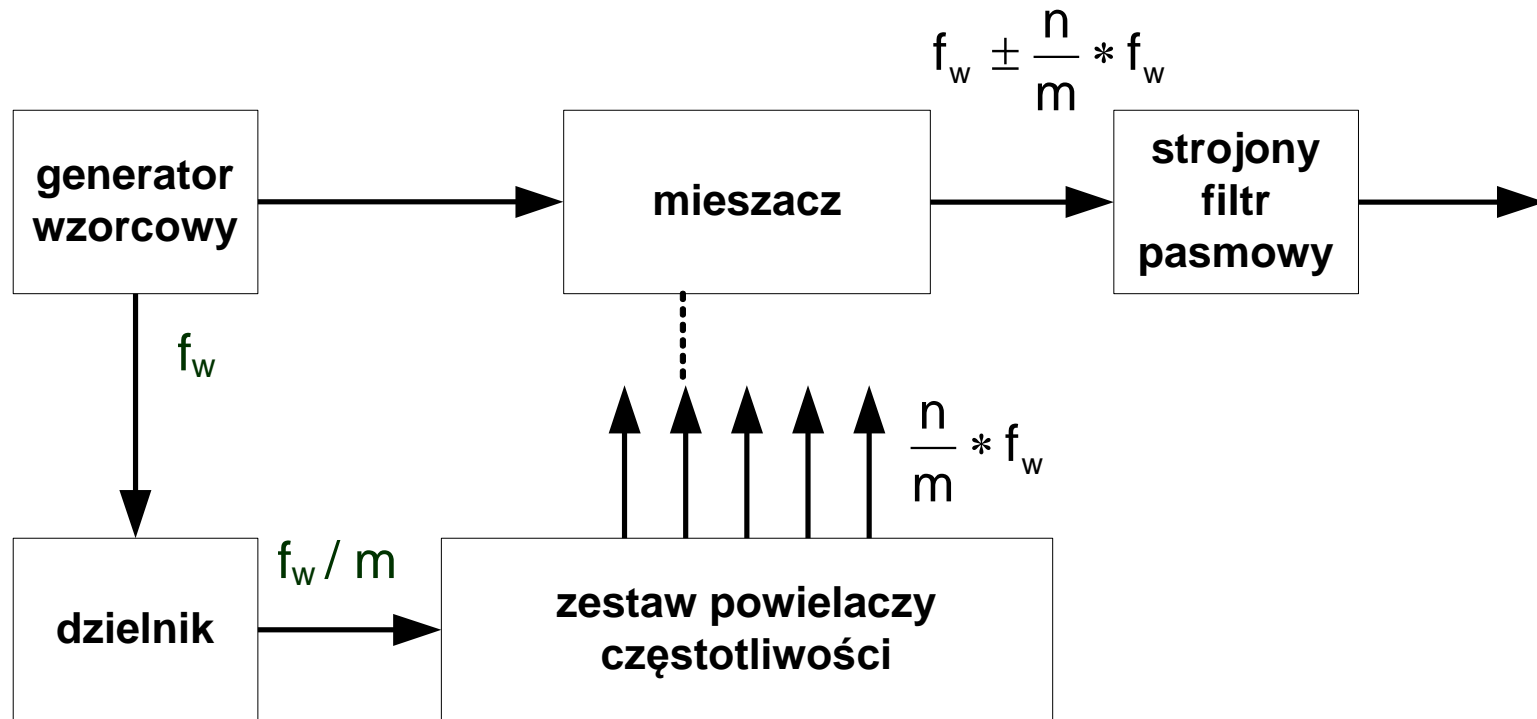
### *parametry synteзаторów*

- zakres generowanych częstotliwości  $f_{\min}$  ,  $f_{\max}$
- rozdzielczość  $F$  (krok siatki)
- liczba generowanych częstotliwości  $n = (f_{\max} - f_{\min}) / F$
- stabilność
- czas przestrajania
- charakterystyka widmowa

*Podstawowymi parametrami układów syntezy są zakres generowanych częstotliwości i rozdzielczość. Oczywiście generatory można oceniać biorąc pod uwagę różne parametry, ale w praktyce ważny jest właśnie zakres, rozdzielczość (precyzja regulacji) i jakość sygnału rozumiana np. jako zawartość harmoniczných.*

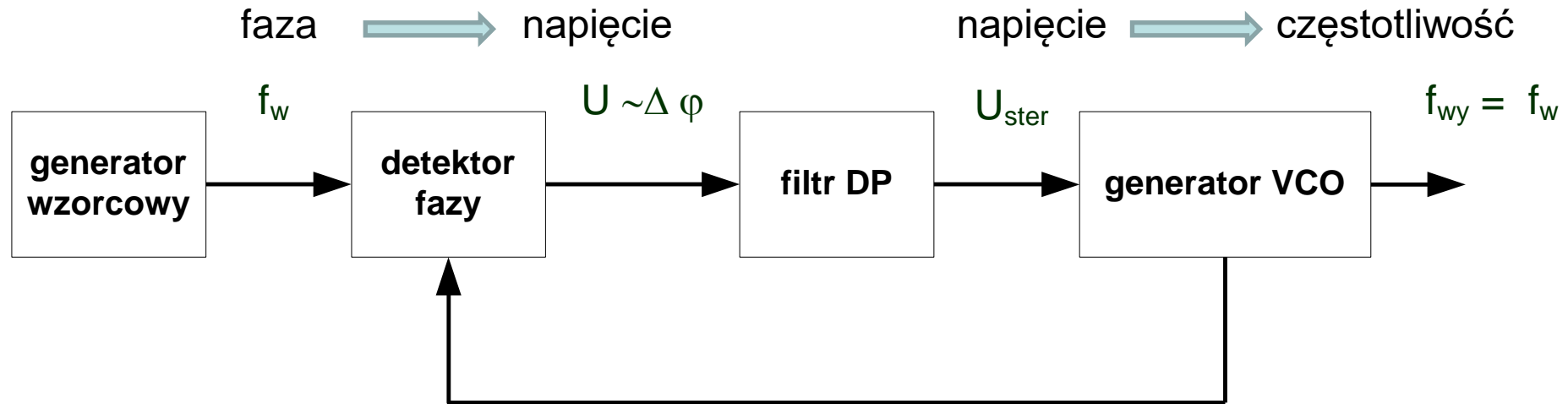
*Użytkowane powszechnie w laboratoriach generatory funkcyjne charakteryzują się raczej nienajlepszą jakością sygnału (przebieg sinusoidalny jest kształtowany przez wykorzystanie parabolicznej charakterystyki diody półprzewodnikowej), nie mówiąc już o precyzji regulacji za pomocą pokrętki na płycie czołowej.*

# Synteza bezpośrednia



*Klasyczny układ syntezy bezpośredniej ma obecnie już niewielkie znaczenie, a ustalanie wartości częstotliwości sygnału wyjściowego odbywa się poprzez zmiany nastaw powielaczy i dzielników częstotliwości. Mieszacz (układ mnożący) pozwala na uzyskanie sygnałów sumacyjnych i różnicowych wybieranych następnie przy użyciu filtru pasmowego.*

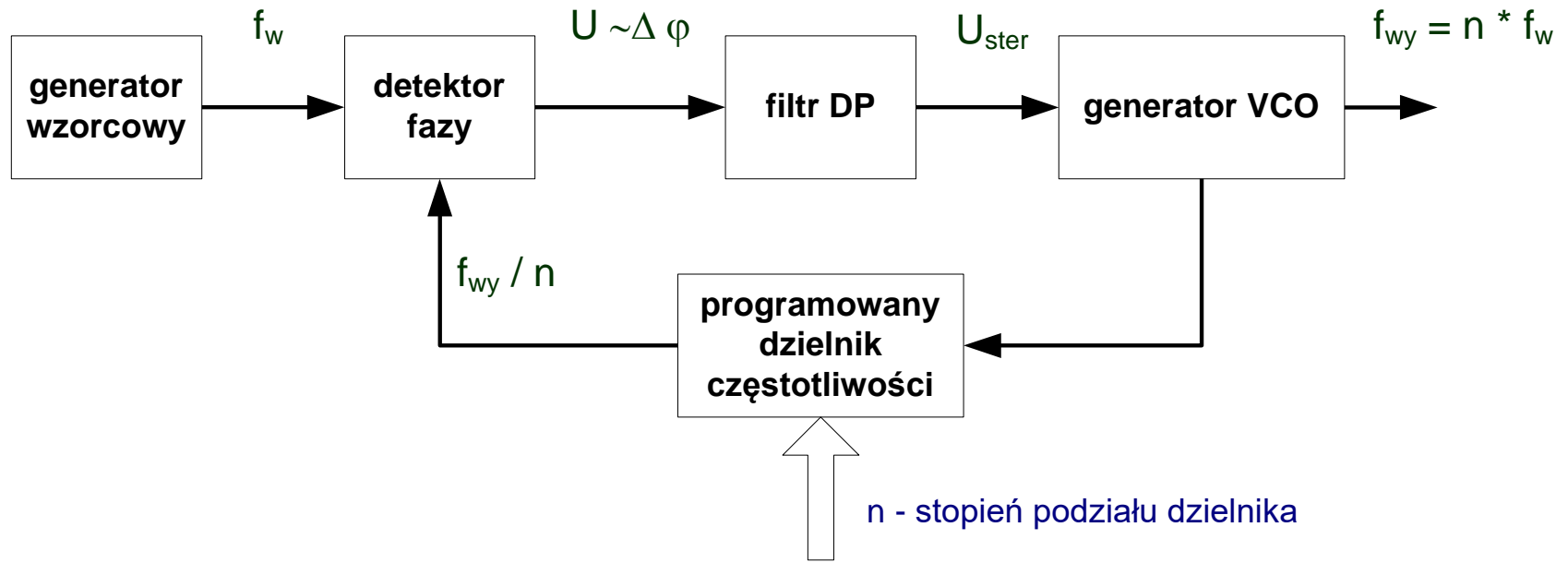
# Synteza pośrednia – pętla PLL



Podstawowym układem stosowanym w synteźatorach częstotliwości jest pętla fazowa PLL, której elementarnym przeznaczeniem jest stabilizacja częstotliwości przebiegu wejściowego. Ideę działania układu można przedstawić dosyć prosto. Detektor fazy porównuje sygnał wejściowy i wyjściowy dając na wyjściu sygnał o składowej stałej proporcjonalnej do różnicy faz obu sygnałów wynikającej z różnicy częstotliwości. Wyodrębniona za pomocą filtra dolnoprzepustowego składowa stała steruje generatorem VCO czyli układem, którego częstotliwość sygnału wyjściowego zależy od napięcia na jego wejściu. Po pewnym czasie trwającym zazwyczaj kilka okresów przebiegu wejściowego pętla wchodzi w stan synchronizmu i częstotliwość sygnału na wyjściu jest dokładnie równa częstotliwości sygnału wejściowego.

[patrz też moduł 2 slajd 36]

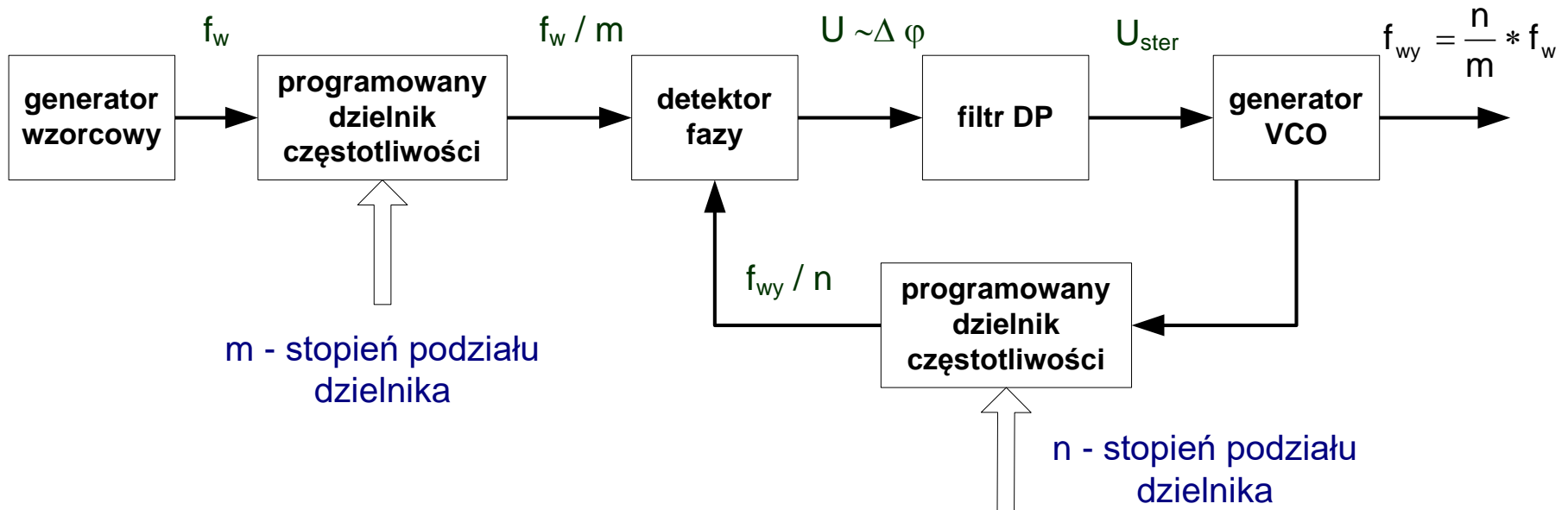
# Synteza pośrednia 1



Umieszczenie w pętli sprzężenia zwrotnego dzielnika częstotliwości przez  $n$  powoduje, że stanem ustalonym jest sytuacja, w której sygnał wyjściowy ma częstotliwość  $n$  razy większą niż częstotliwość sygnału wejściowego. Zauważmy, że układ pętli fazowej jest stosowany do powielania częstotliwości sygnałów na magistrali komputera.

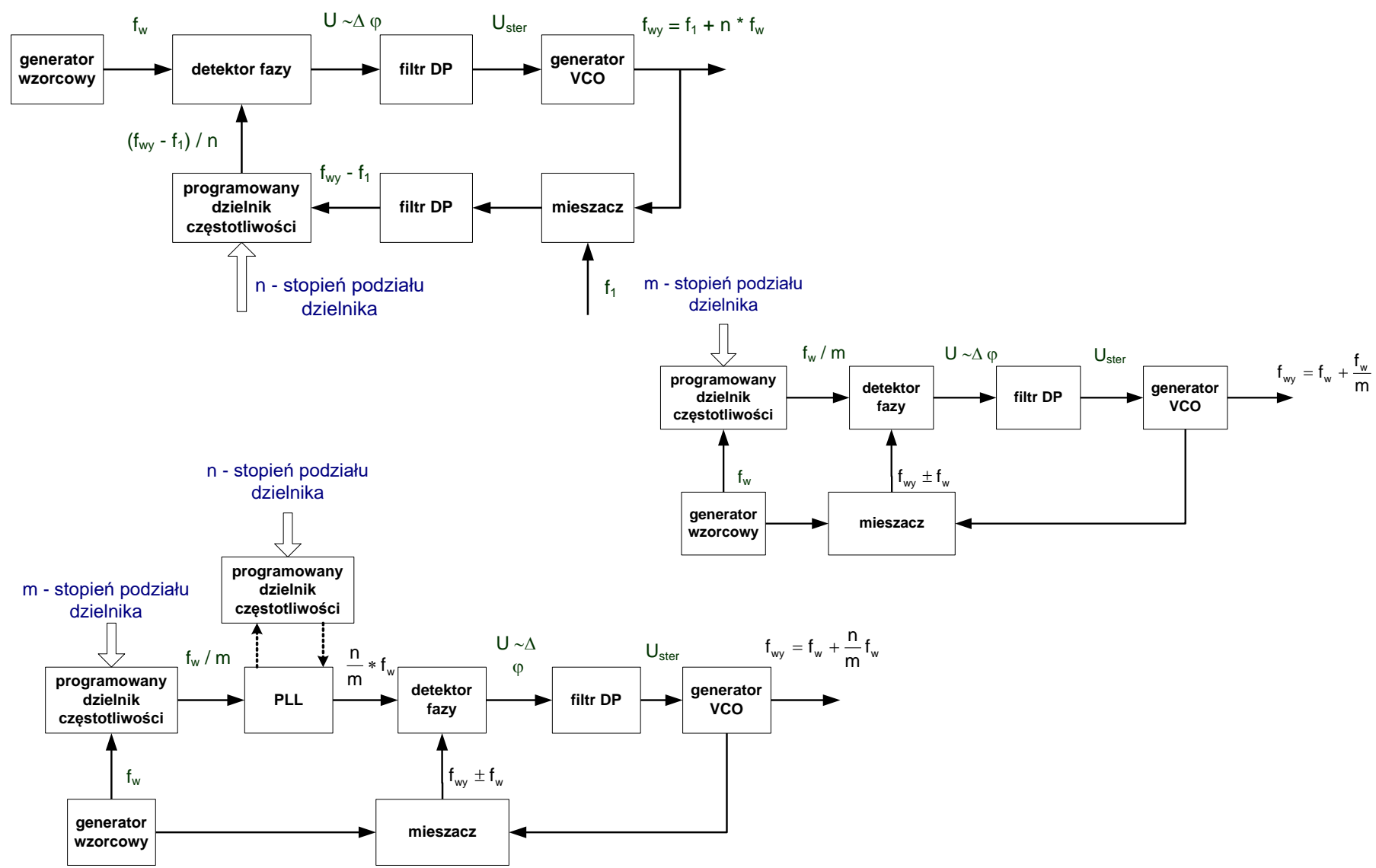


## Synteza pośrednia 2



Stosując różne konfiguracje dzielników częstotliwości w połączeniu z wewnętrznymi pętlami PLL można zmieniać częstotliwość sygnału wyjściowego w szerokim zakresie. Interesującym wariantem układów syntezy jest technika ułamek-N (N-fractional). Na kolejnych slajdach przedstawiono przykłady konfiguracji układów syntezy pośredniej.

Synteza pośrednia 3



# bezpośrednia synteza cyfrowa – zależności podstawowe

faza  $\phi(t) = \omega t = 2\pi f t$

dyskretyzacja czasu  $t = nT_s$   $T_s = T_{ref} = \frac{1}{F_{ref}}$

rozdzielczość częstotliwości  $f_{res} = \frac{F_{ref}}{2^N}$   $N$  – liczba bitów rejestru (akumulator)

$f = K f_{res}$   $K$  – słowo programujące

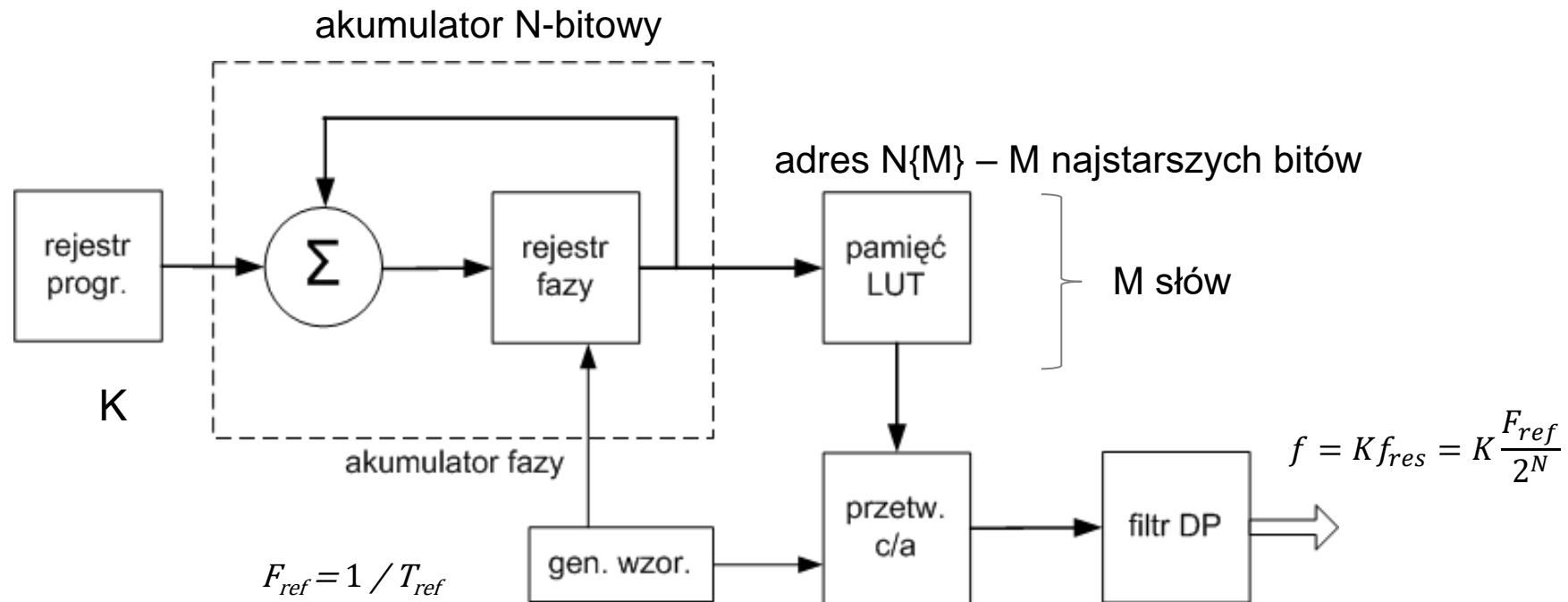
$$\phi(n) = 2\pi K f_{res} n T_{ref} = 2\pi K \frac{F_{ref}}{2^N} n T_{ref} = \frac{2\pi}{2^N} K n$$

Na slajdzie przedstawiono matematyczne podstawy bezpośredniej syntezy cyfrowej.  $T_s$  jest okresem próbkowania odpowiadającym okresowi generatora wzorcowego (oznaczonego tutaj jako  $T_{ref}$  – okres odniesienia).

Rozdzielczość częstotliwości  $f_{res}$  zależy od rozmiaru akumulatora i przy stosowanych długościach rejestrów może osiągać bardzo małe wartości. Powszechnie stosuje się akumulator 32-bitowy co daje podział częstotliwości odniesienia przez 4 294 967 296, zatem przy  $F_{ref} = 10\text{MHz}$  rozdzielczość nastaw częstotliwości wynosi 2,3mHz !

Z kolej jeżeli rozpatrzymy fazę sygnału  $\phi(n)$  to rozdzielczość nastaw fazy wynosi  $1,46 \cdot 10^{-9}$  [rad].

## bezpośrednia synteza cyfrowa – struktura układu

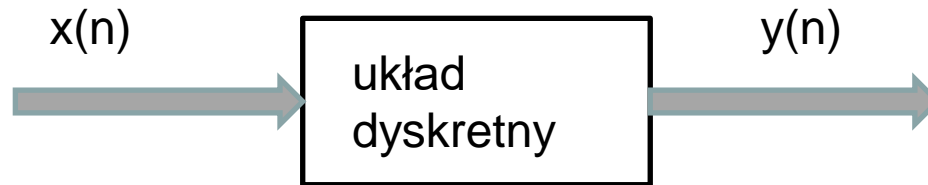


Na slajdzie pokazano strukturę układu. Pamięć (nazywana LUT) zawiera próbki sygnału; z założenia będzie to jeden okres, aczkolwiek przy standardowych przebiegach np. sinusoidzie wystarczy zapisać  $\frac{1}{4}$  okresu. Akumulator fazy, zawierający rejestr fazy i sumator, zwiększa swoją zawartość o wartość słowa programującego K w każdym takcie generatora wzorcowego. To co pojawia się na wyjściu akumulatora fazy to fizycznie jest adres pamięci. Oczywiście pamięć ma mniejszą pojemności niż to wynika z długości akumulatora (standardowo 32 bity), zatem nieuchronnie występuje tzw. efekt „ucięcia fazy”. Próbkę sygnału pobrana z pamięci jest następnie podawana na przetwornik cyfrowo/analogowy i poprzez filtr dolnoprzepustowy (wygładzający) wyprowadzana na wyjście układu.

Częstotliwość sygnału wyjściowego zależy zatem od wartości słowa programującego K i jest najmniejsza dla  $K=1$  (wszystkie próbki wyprowadzane z pamięci) a największa (przynajmniej teoretycznie) dla  $K=2^{N-1}$ , co odpowiada 2 próbkom na okres; to jest taka sytuacja jakby próbować sygnał z częstotliwością 2-krotnie większą od częstotliwości sygnału, twierdzenie o próbkowaniu jest spełnione, ale odtworzenie sygnału z jego próbek wymaga odpowiedniej interpolacji.

# Filtry cyfrowe

Uwaga: zagadnienie nie jest wymagane w ramach przedmiotu, ale jest ciekawe !



## SOI

$$y(n) = \sum_{k=0}^N x(n-k)b(k)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^N b(k) z^{-k}$$

## NOI

$$y(n) = \sum_{k=0}^N x(n-k)b(k) + \sum_{k=1}^M y(n-k)a(k)$$

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b(k) z^{-k}}{1 - \sum_{k=1}^M a(k) z^{-k}}$$

$$y(n) = x(n) \times h(0) + x(n-1) \times h(1) + x(n-2) \times h(2) \dots$$

*Sinusoidę o bardzo dobrej jakości (bez zawartości harmoniczných) można otrzymać wykorzystując oscylator. Odpowiednikiem oscylatora w technice analogowej typu LC lub RC będzie w technice cyfrowej układ dyskretny znajdujący się na granicy stabilności. Układy dyskretné są opisywane równaniami różnicowymi. Na slajdzie pokazano dwa przykłady równań różnicowych opisujące filtry cyfrowe.*

*Filtr SOI (filtr o skończonej odpowiedzi impulsowej) jest strukturalnie stabilny; sygnał wyjściowy zależy od aktualnej i poprzednich próbek wejściowych oraz od odpowiedzi impulsowej filtru; transmitancja filtru ma tylko zera, a nie ma biegunów.*

*Filtr NOI (filtr o nieskończonej odpowiedzi impulsowej) może już być niestabilny; sygnał wyjściowy (ściśle: aktualna próbka sygnału wyjściowego) zależy zarówno od próbek wejściowych jak i poprzednich próbek wyjściowych a transmitancja ma bieguny. Żeby filtr był stabilny bieguny muszą być położone we wnętrzu okręgu jednostkowego na płaszczyźnie Z. Usytuowanie biegunów dokładnie na okręgu jednostkowym skutkuje tym, że układ jest na „granicy stabilności” i staje się generatorem (oscylatorem).*

## oscylator cyfrowy

Uwaga: zagadnienie nie jest wymagane w ramach przedmiotu, ale jest ciekawe !

$$y(n) = b_1 x(n-1) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2)$$

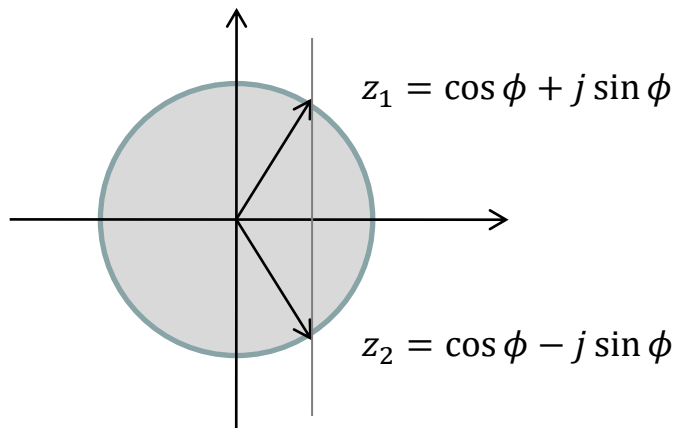
$$Y(z) = b_1 X(z) z^{-1} + a_1 Y(z) z^{-1} + a_2 Y(z) z^{-2}$$

$$Y(z)[1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}] = b_1 X(z) z^{-1}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_1 X(z) z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2}} = \frac{b_1 z}{z^2 - a_1 z - a_2}$$

$$a_1 = 2 \cos \phi \quad \text{faza} \quad \phi = 2\pi \frac{f_{\text{signal}}}{f_{\text{sample}}}$$

$$a_2 = -1$$



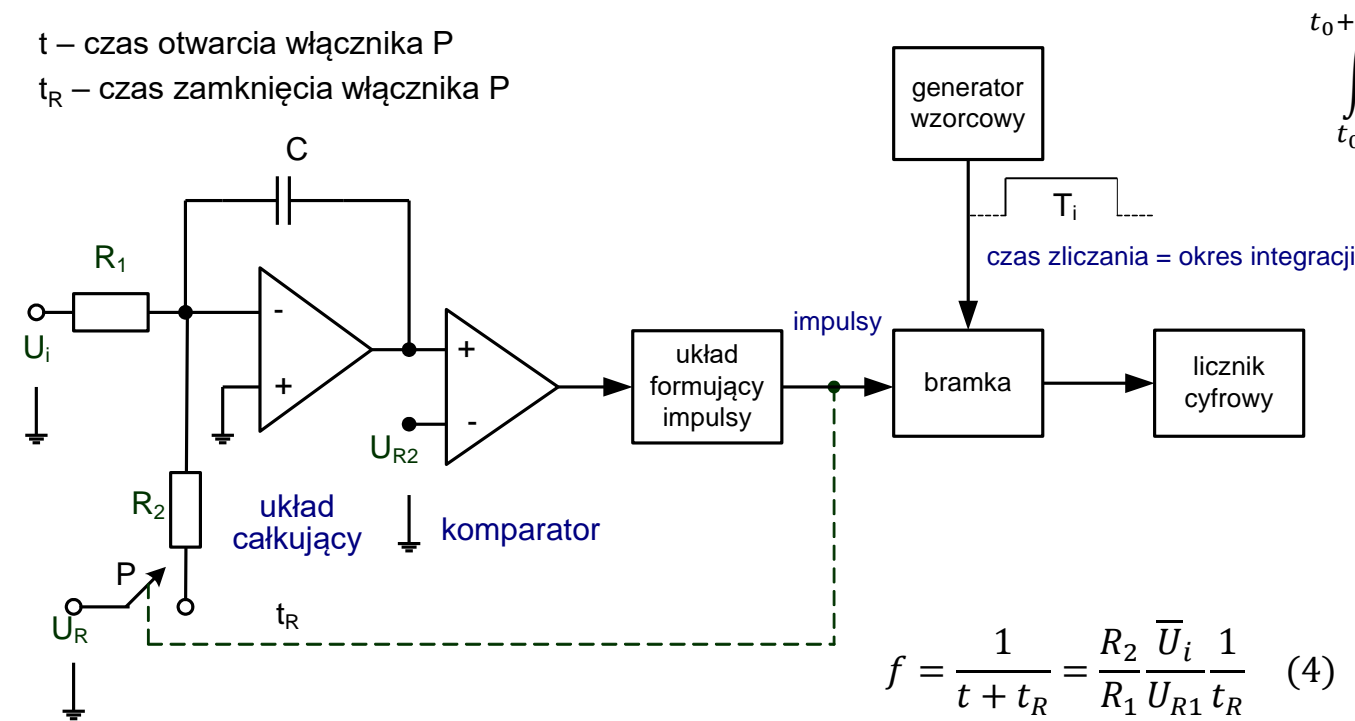
Na slajdzie pokazano równanie różnicowe i na jego podstawie określono transmitancję układu  $H(z)$ . W mianowniku transmitancji występuje równanie mające dwa pierwiastki. Żeby spełnić warunek usytuowania pierwiastków symetrycznie na okręgu jednostkowym, pierwiastki powinny być opisane zależnościami jak na slajdzie. Wartość fazy  $\phi$  należy wyznaczyć przy założonej częstotliwości sygnału i częstotliwości próbkowania (określonej przez częstotliwość generatora wzorcowego).

W praktyce, zaimplementowanie takiego rozwiązania wymaga zastosowania układu mikroprocesorowego operującego na liczbach zmiennoprzecinkowych z uwagi na problem „obcinania” (zaokrąglania) wyników pośrednich. Zauważmy bowiem, że do wyznaczenia kolejnej próbki sygnału wyjściowego potrzebna jest znajomość dwóch poprzednich próbek wyjściowych. Te obliczenia wykonywane są rekurencyjnie i układ może „wyjść z obszaru stabilności”.

Przetwarzanie U/f (równoważenie ładunku)

to są dodatkowe, ale dosyć ważne w technice pomiarowej zagadnienia związane z przetwarzaniem sygnałów

t – czas otwarcia włącznika P  
t<sub>R</sub> – czas zamknięcia włącznika P



$$\int_{t_0}^{t_0+t+t_R} \frac{U_i}{R_1} dt = \int_t^{t+t_R} \frac{U_{R1}}{R_2} dt \tag{1}$$

$$\frac{\overline{U}_i}{R_1} (t + t_R) = \frac{U_{R1}}{R_2} t_R \tag{2}$$

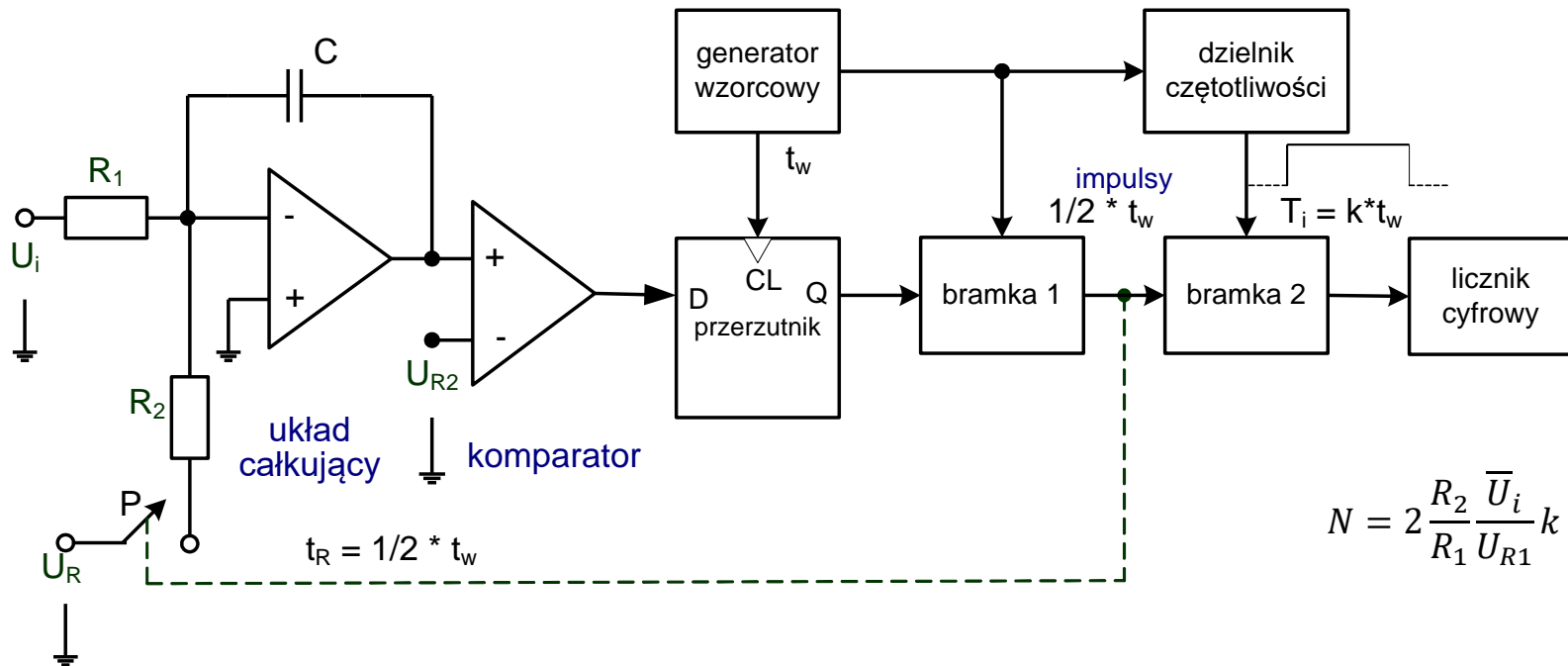
$$t + t_R = \frac{R_1}{R_2} \frac{U_{R1}}{\overline{U}_i} t_R \tag{3}$$

$$f = \frac{1}{t + t_R} = \frac{R_2}{R_1} \frac{\overline{U}_i}{U_{R1}} \frac{1}{t_R} \tag{4}$$

$$N = \frac{R_2}{R_1} \frac{\overline{U}_i}{U_{R1}} \frac{T_i}{t_R} \tag{5}$$

W czasie zamknięcia przełącznika P do kondensatora w układzie całkującym jest dostarczany ładunek ze źródła U<sub>R</sub>. Jednocześnie z kondensatora jest odprowadzany ładunek do źródła sygnału przetwarzanego (napięcie wejściowe ma polaryzację ujemną). Czas zamknięcia przełącznika t<sub>R</sub> zależy od właściwości układu formującego. W czasie otwarcia przełącznika (przez czas t) ładunek jest tylko odprowadzany z kondensatora i w tym czasie napięcie na wyjściu układu całkującego rośnie do wartości U<sub>R2</sub>. Moment zamknięcia przełącznika jest wyznaczony zmianą stanu wyjścia komparatora porównującego napięcie wyjściowe integratora z napięciem odniesienia U<sub>R2</sub>. Z warunku równowagi ładunków dostarczonych i odprowadzonych z kondensatora wynika zależność (1). Czas t+t<sub>R</sub> czyli okres impulsów jest odwrotnie proporcjonalny do wartości średniej napięcia wejściowego. Zatem częstotliwość impulsów jest wprost proporcjonalna (wzór 4). Impulsy są zliczane w określonym czasie T<sub>i</sub> (okresie integracji).

## Przetwarzanie U/f (delta-sigma)



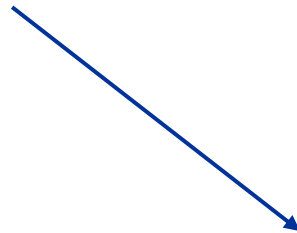
$$N = 2 \frac{R_2}{R_1} \frac{\bar{U}_i}{U_{R1}} k \quad (1)$$

Początek i koniec czasu zliczania w układzie z równoważeniem ładunku jest przypadkowo usytuowany względem impulsów z układu formującego, natomiast w układzie delta-sigma szerokość impulsów ładunkowych ze źródła  $U_R$  i czas zliczania są synchronizowane impulsami z generatora wzorcowego. Zaletą rozwiązania zastosowanego w układzie delta-sigma jest uniezależnienie wyniku przetwarzania (liczby impulsów) od dokładności określenia czasów  $T_i$  oraz  $t_R$ . Jeżeli  $t_R = 1/2 t_w$  a  $T_i = k t_w$  to obowiązuje zależność (1).



# Metody poprawy stosunku sygnału do szumu

$$SNR_{dB\ max} = 6.02 * n + 1.76$$



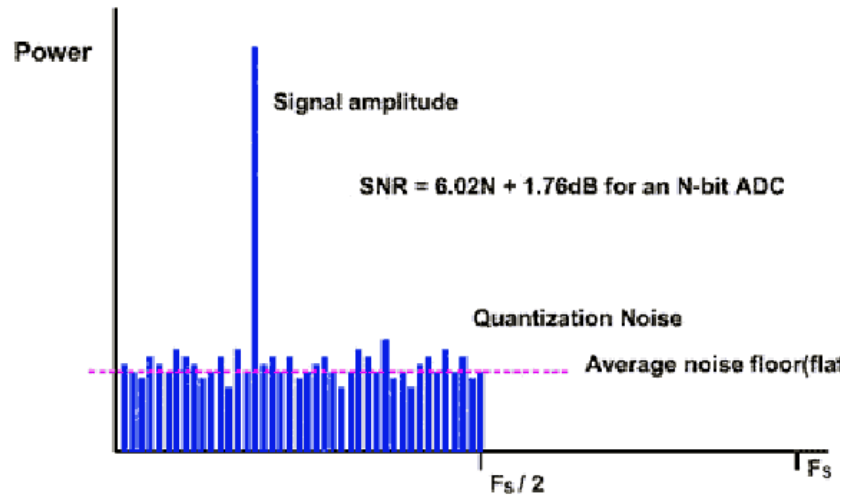
efektywna liczba bitów

$$ENOB = \frac{SNR - 1.76}{6.02}$$

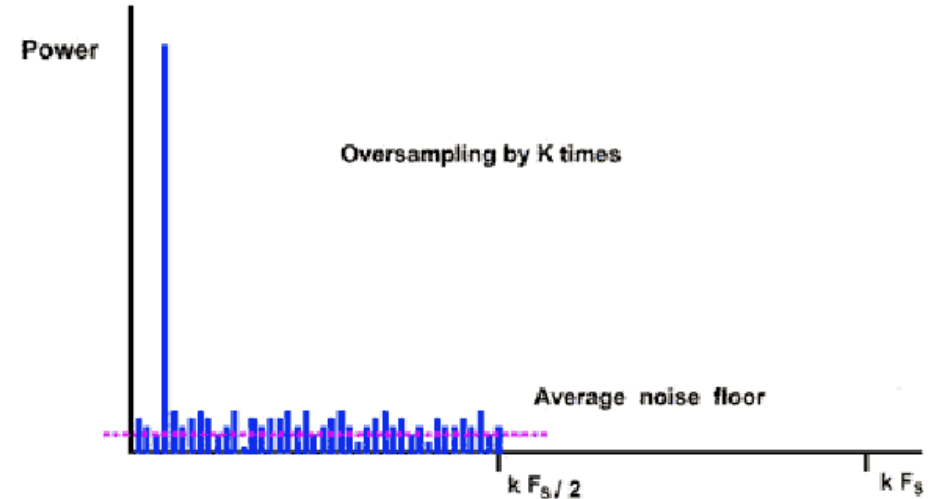
*Współcześnie, przetwarzanie a/c metodą delta-sigma, zyskuje dużą popularność z uwagi na bardzo wysoką rozdzielczość (24 bity). Jest to efektywna rozdzielczość wynikająca z ograniczenia poziomu szumów (wzrost współczynnika SNR).*

# Nadpróbkowanie i filtracja

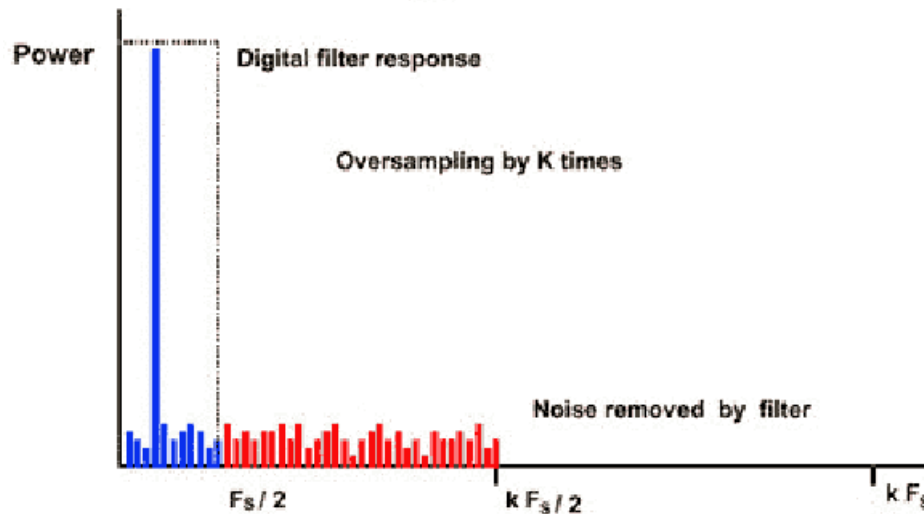
## The Frequency Domain



## Oversampling by K Times



## The Digital Filter



W dziedzinie częstotliwości spróbkowany sygnał sinusoidalny jest reprezentowany przez pojedynczy prążek na tle szumu kwantyzacji rozłożonego równomiernie w paśmie od 0 do połowy częstotliwości próbkowania  $f_s/2$ . Jeżeli częstotliwość próbkowania wzrośnie  $k$  razy to szum rozłoży się w szerszym paśmie (do  $k f_s/2$ ), a jego wartość skuteczna się nie zmieni. Stosując filtr cyfrowy można wybrać z widma sygnał użyteczny, a wyeliminować znaczną część szumu. Zatem zastosowanie nadpróbkowania i filtracji cyfrowej już znacznie poprawia SNR.

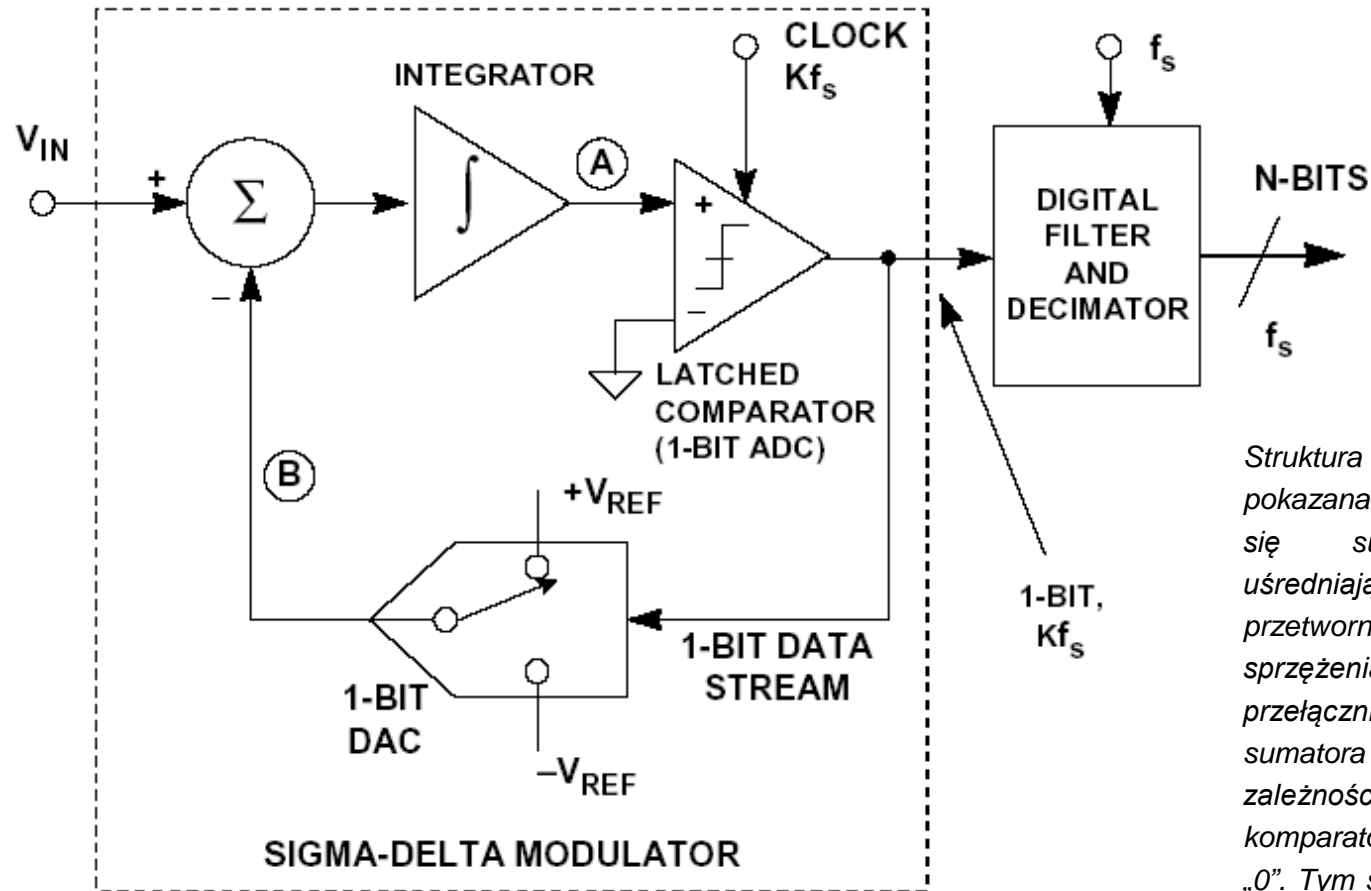
## Układy elektroniczne i technika pomiarowa



*W układzie przedstawionym na slajdzie można wyróżnić elementy spełniające określone funkcje. To stało się podstawą konstrukcji współczesnych przetworników delta-sigma.*

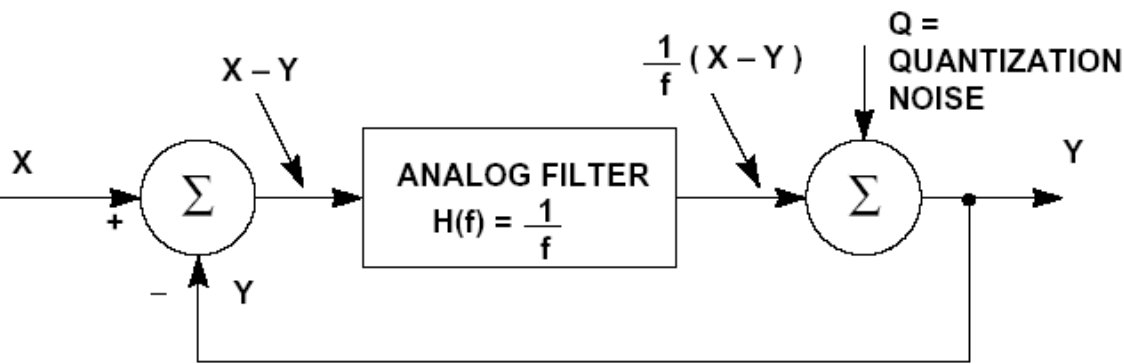
## Przetwarzanie delta-sigma

## FIRST-ORDER SIGMA-DELTA ADC



Struktura układu przetwornika jest pokazana na rysunku. W układzie znajduje się sumator, integrator (układ uśredniający), komparator (1-bitowy przetwornik a/c) oraz przełącznik w pętli sprzężenia zwrotnego. Zadaniem przełącznika jest podanie na wejście sumatora napięcia  $-U_{REF}$  lub  $+U_{REF}$  w zależności od tego czy na wyjściu komparatora był stan wysoki „1” czy niski „0”. Tym samym przełącznik pracuje jak 1-bitowy przetwornik c/a. Na wyjściu całego układu znajduje się filtr cyfrowy i decymator czyli układ zmniejszający częstotliwość próbkowania.

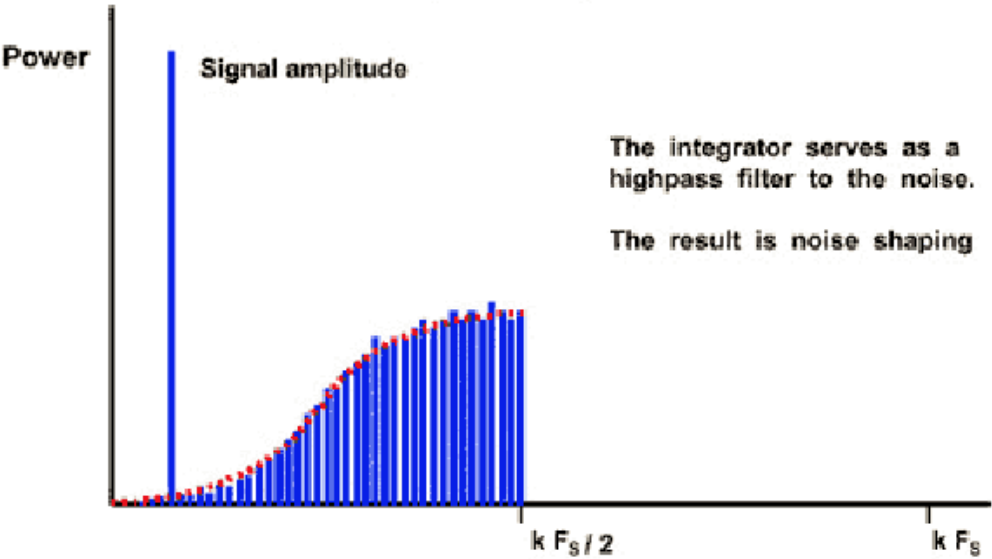
# Właściwości filtracyjne układu



$$Y = \frac{1}{f}(X - Y) + Q \quad (1)$$

$$Y = \frac{X}{f + 1} + \frac{Qf}{f + 1} \quad (2)$$

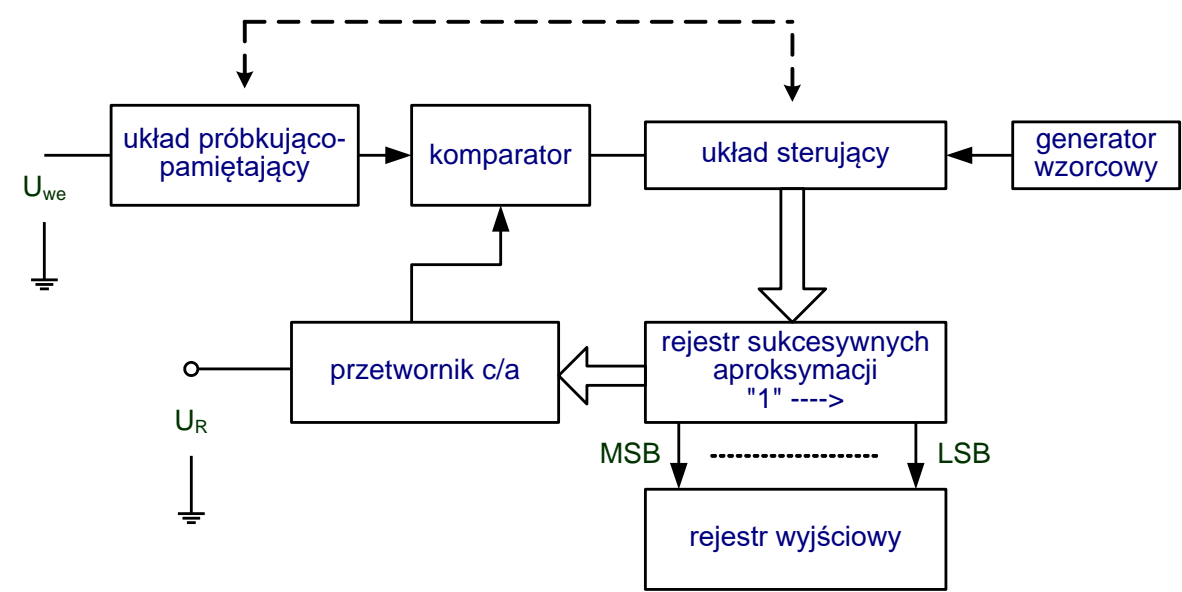
## Noise Shaped Spectrum



Kolejny ważny czynnik, zwiększający SNR, to kształtowanie szumów poprzez wykorzystanie naturalnych właściwości układu.

Układ przetwornika można zamodelować strukturą pokazaną na rysunku. Całkowanie sygnału jest operacją równoważną uśrednianiu i filtracji dolnoprzepustowej. Sygnał wyjściowy jest opisany zależnością (2), z której wynika, że sygnał wyjściowy jest sumą dwóch składników: sygnału wejściowego (filtrowanego dolnoprzepustowo) i szumu (filtrowanego górnoprzepustowo). Efekt w dziedzinie częstotliwości pokazano na rysunku.

Metoda SAR (kompensacji wagowej)

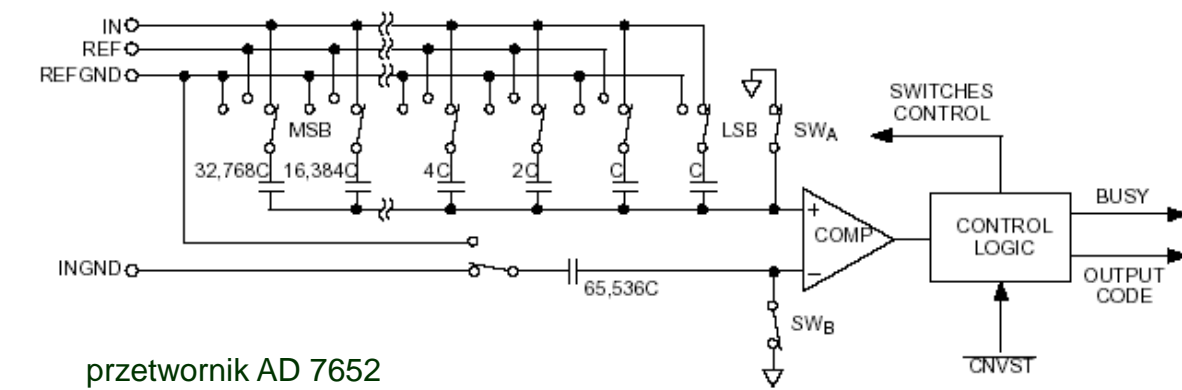


1.  $U_k = U_R / 2$

- jeżeli  $U_{we} > U_k$  ----> MSB = 1  
2.  $U_k = (U_R / 2) + (U_R / 4)$

- jeżeli  $U_{we} < U_k$  ----> MSB = 0  
2.  $U_k = (U_R / 4)$

Podstawowym elementem układu jest rejestr sukcesywnych aproksymacji (SAR). Przetwarzanie polega na porównywaniu napięcia wejściowego z wytwarzanym cyfrowo napięciem kompensującym. W zależności od wyniku porównania w SAR zostaje ustawiona „1” lub „0” na odpowiednim bicie. Czas przetwarzania jest równy sumie czasów porównania dla wszystkich bitów + 1 okres zegara taktującego. Problem w przetwornikach kompensacyjnych stanowi wytwarzanie napięcia w wewnętrznym przetworniku c/a. Zamiast dawniej stosowanych przetworników z drabinką rezystancyjną obecnie stosuje się układy z redystrybucją ładunku.



przetwornik AD 7652

## Właściwości przetwarzania kompensacyjnego

- średnia rozdzielczość ( $10 \div 16$  bitów)
- średni czas przetwarzania
- konieczność zastosowania w układzie źródła napięcia kompensującego
- łatwość integracji w układach cyfrowych