

**T.2. SYSTEMATYZACJA
PODSTAWOWYCH OPERACJI
PRZETWARZANIA
ANALOGOWO-CYFROWEGO
SYGNAŁÓW
I KLASYFIKACJA
PRZETWORNIKÓW
A/C**

Cel: Zapoznać się z podstawowymi operacjami przetwarzania analogowo cyfrowego

Plan wykładu

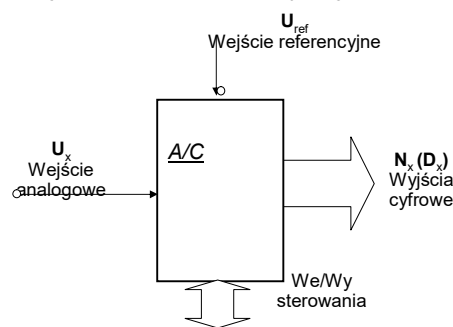
- 1. Wstęp. Przetwornik analogowo-cyfrowy jako czarna skrzynka**
- 2. Podstawowe operacje analogowo-cyfrowego przetwarzania**
- 3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova**
- 4. Inne metody wyboru**

1. Wstęp. Przetwornik analogowo-cyfrowy jako czarna skrzynka

Operacja przetwarzania wartości sygnału analogowego w wartości liczbowe nazywa się przetwarzaniem analogowo-cyfrowym.

Narzędzie pomiarowe, które realizuje operacje przetwarzaniem analogowo-cyfrowego nazywa się przetwornikiem analogowo-cyfrowym (A/C).

Otóż przetwornik A/C zmienia formę informacji pomiarowej z **analogowej w cyfrową**, dzięki czemu jest możliwa komputeryzacja pomiarów.



1. Wstęp. Przetwornik analogowo-cyfrowy jako czarna skrzynka

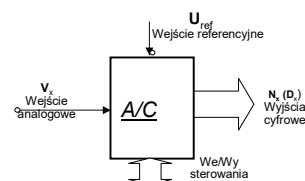
Przyjmując przetwornik A/C jako czarną skrzynkę (rys.1), w nim można wyróżnić:

- wejście analogowe (U_x) i
 - wyjście cyfrowe (D_x),
- oprócz tego można wyróżnić także
- wejście referencyjne (U_{ref}) i
 - wejścia/wyjścia sterowania.

Wynik przetwarzania przetwornika A/C jest wartością liczbową $N_x(D_x)$ wartości analogowej U_x :

$$D_x = N_x = \text{liczba całkowita} \left[\frac{U_x}{q} \right]$$

gdzie q – jest wartością kwantu (patrz dalej), a klamrami [*] poznaczono operację liczby całkowitej.



2. Podstawowe operacje analogowo-cyfrowego przetwarzania sygnałów

Podstawowymi operacjami analogowo-cyfrowego przetwarzania sygnałów są:

- - **próbkowanie sygnału** - jest to zamiana sygnału ciągłego w czasie na jego wartości w dyskretne momenty czasowe. Istotą próbkowania jest czasowe rozrzedzenie sygnału;
- - **kwantowanie sygnału** – jest to zamiana wartości ciągłego sygnału w dziedzinie amplitudy (intensywności) na sygnał dyskretny w dziedzinie amplitudy, wartości sygnału są przyrównywane i zaokrąglony do najbliższej wartości zadanych poziomów kwantowania. Istotą kwantowania jest amplitudowe rozrzedzenie sygnału;
- - **kodowanie wyniku** kwantowania - wartości kwantów są przedstawione w odpowiednim kodzie.

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych

- **Próbkowanie** – jest to zamiana sygnału ciągłego w czasie na jego wartości w dyskretne momenty czasowe.

Ciągły w czasie sygnał $U(t)$ zamienia się jego wartościami chwilowymi

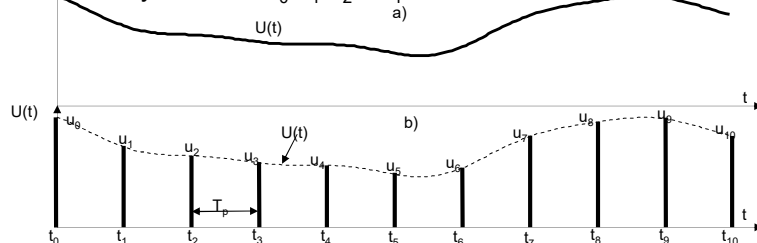
$$U_0 = u(t_0),$$

$$U_1 = u(t_1),$$

$$U_2 = u(t_2), \dots,$$

$$U_i = u(t_i), \dots,$$

w momenty czasowe $t_0, t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych

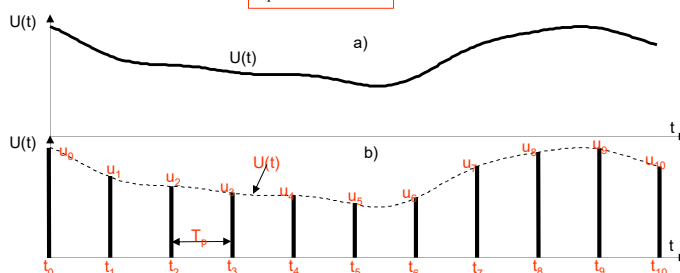
Momenty czasowe $t_0, t_1, t_2, \dots, t_i, \dots$ są nazywani momentami dyskretyzacji lub momentami pobierania próbek,

a wartości chwilowe sygnału $u_0, u_1, u_2, \dots, u_i, \dots$ nazywają się wartościami próbek (ang. samples).

Najważniejszym **parametrem próbkowania** sygnału jest interwał próbkowania lub interwał dyskretyzacji:

– jest to interwał (ostęp) czasowy pomiędzy kolejnymi próbkami

$$T_{pi} = t_{i+1} - t_i$$



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych

Jeżeli odstęp jest stały wtedy interwał próbkowania nazywa się okresem próbkowania

$$T_{pi} = t_{i+1} - t_i = T_p = const$$

Przy **stałym okresie** próbkowanie sygnału nazywa się **okresowym**

W razie okresowego próbkowanie drugim ważnym parametrem jest częstotliwość próbkowania

$$f_p = 1/T_p$$

Zwykle **jednostką częstotliwości próbkowania** jest **liczba próbek na sekundę**, oraz Hz, w literaturze anglojęzycznej jako jednostka częstotliwości próbkowania wykorzystuje się **kS/s, MS/s** – tysiąc (milionów) próbek na sekundę, przy tym $1\text{kS/s} = 1\text{kHz}$.

Na przykład: jeżeli okres równa się $T_p = 0,1\text{ms}$ wtedy częstotliwość próbkowania

– jest to interwał (ostęp) czasowy pomiędzy kolejnymi próbkami.

$$f_p = 1/0,1 \cdot 10^{-3}\text{s} = 10\text{kS/s} = 10\text{kHz}$$

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

Zasada **wyboru wartości częstotliwości próbkowania** zależy od następnego wykorzystywania wartości próbek.

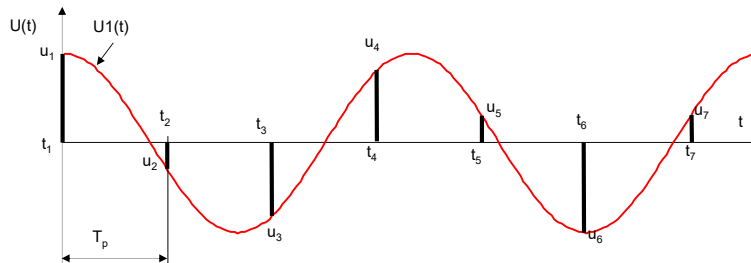
One mogą być wykorzystywane **w celu** :

- (1) **następnego** (po opracowaniu, transmisji itp.) **odtworzenia pierwotnego sygnału**, jak w telewizji oraz muzyce cyfrowej, w oscyloskopach cyfrowych (wyświetlenie przebiegu sygnału) itp.;
- (2) **następnego pomiaru** (wyznaczania) **charakterystyk sygnału** – wartości średniej, średniej wyprostowanej, skutecznej, mocy, zawartości składowych harmoniczných, charakterystyk statystycznych, widmowych itp.

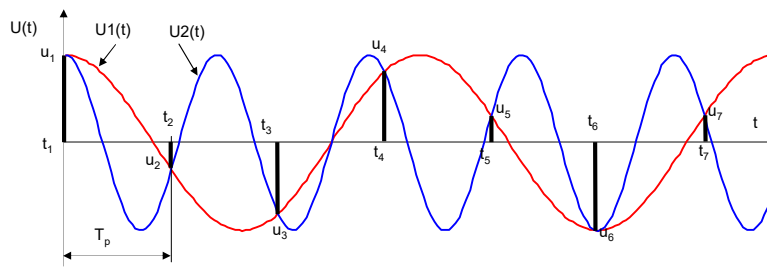
3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych

W razie następnego odtwarzania sygnału, częstotliwość próbkowania zależy od sposobu odtwarzania oraz dopuszczalnych zniekształceń odtworzonego sygnału

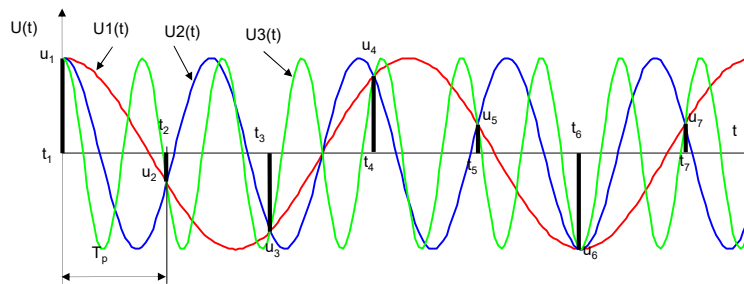
Przy **niewłaściwym wyborze częstotliwości (okresu) próbkowania** może się okazać, że **różnym sygnałom będą odpowiadać te same wartości próbek** i wtedy nie będzie możliwości rozróżnić pierwotne sygnały.



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych

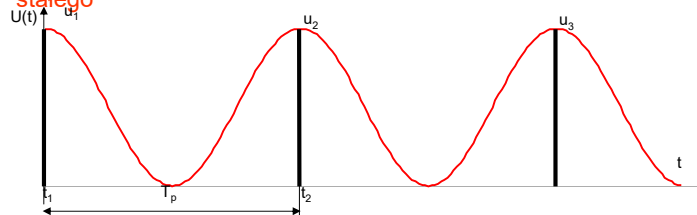


3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych

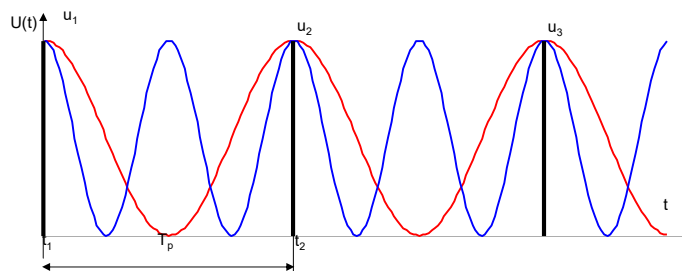


3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

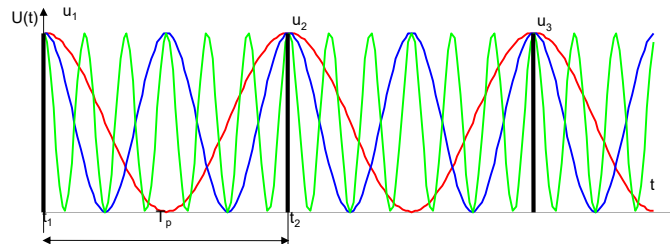
Jeżeli częstotliwość sygnału jest krotna częstotliwości próbkowania wtedy wartości wszystkich próbek będą stałymi jak w razie próbkowania sygnału stałego



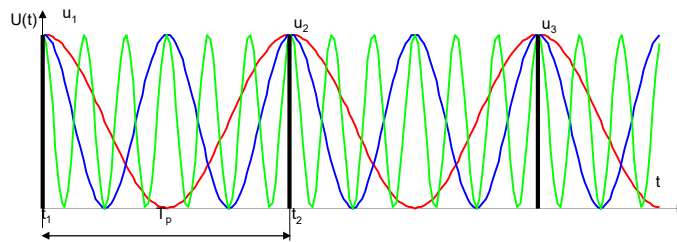
3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova



To jest, składowe sygnału o różnych częstotliwości po próbkowaniu są nie rozróżnialne, jedni jak by maskują inne.

Ta **niejednoznaczność** jest związana z próbkowaniem czasowym sygnału i nie istnieje dla sygnałów ciągłych.

Niejednoznaczność częstotliwości z próbkowanego sygnału nosi nazwę **aliasingu**.

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

Odpowiedzią na pytanie o prawidłowym wyborze częstotliwości próbkowania sygnału z cełą następnego jego odtwarzania daje tak zwane twierdzenie o próbkowaniu, które stosuje się sygnałów z ograniczonym pasmem częstotliwościowym (**twierdzenie Shannona-Kotelnikova**):

- (1) Aby teoretycznie bez błędu z próbek odtworzyć sygnał z ograniczonym pasmem, $f < f_m$ (w sygnale są nieobecni składowe harmoniczne częstotliwość których $f \geq f_m$) jego należy próbować z częstotliwością nie mniejszą za podwójną częstotliwość maksymalna w widmie sygnału:

$$f_p \geq 2 \cdot f_m$$

- (2) Aby z próbek odtworzyć sygnał próbki należy przepuścić przez filtr idealny dolnoprzepustowy (IFDP) z częstotliwością graniczna pasma przepustowego równą granicznej częstotliwości pasma sygnału oryginalnego

$$B = f_{IFDP} = f_m$$

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

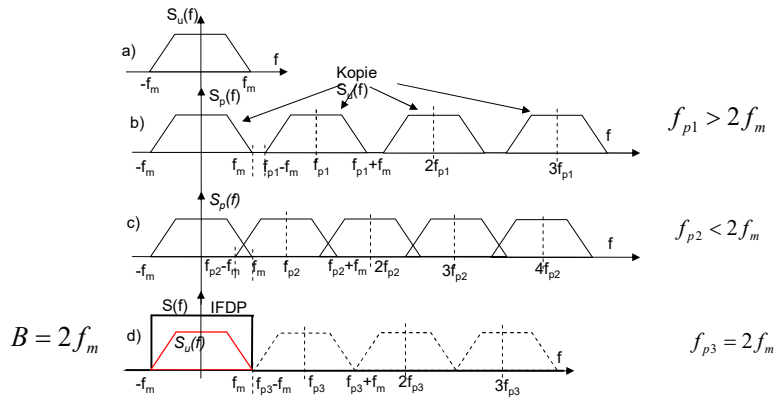


W teorii sygnałów jest udowodniono, że przy próbkowaniu sygnału ciągłego $U(t)$, który charakteryzuje się widmem $S(f)$ dolno pasmowym (ograniczonym maksymalną częstotliwością $f < f_m$) (rys.7,a) w dziedzinie częstotliwości otrzymuje się kopię widm pierwotnego sygnału rozmieszczonych wokół częstotliwości próbkowania f_p (rys.7,b).

Jest to tak zwany efekt powielania widm. Okres tego powielania w dziedzinie częstotliwości równa się częstotliwości próbkowania

$$F_{of} = f_p$$

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova



Warunkiem nie nakładania się widm będzie $f_p - f_m \geq f_m$ lub:

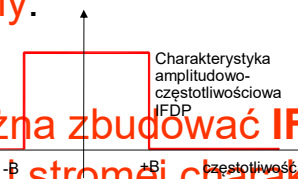
$$f_p \geq 2 \cdot f_m$$

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova.

Problemy

W praktyce są **dwie najważniejsze problemy**:

1. **Nie można zbudować IFDP** (filtru o takiej płaskiej i stromej charakterystyce amplitudowo częstotliwościowej)



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

Problemy

2. Każdy sygnał o skończonej trwałości charakteryzuje się nieskończoną szerokością jego widma czym krótsza trwałość sygnału tym szersze widmo.

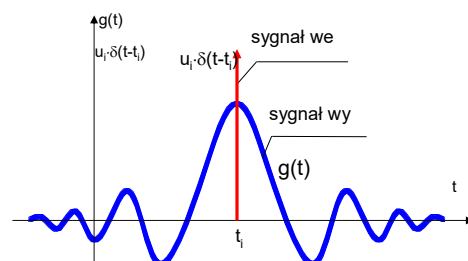
To jest rzeczywisty sygnał teoretycznie ma nieograniczone pasmo częstotliwościowe.

3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

Problemy IFDP

Odpowiedź idealnego filtra na δ - (delta) impuls $u_i \cdot \delta(t - t_i)$, którym jest próbka sygnału wejściowego w moment czasowy) opisuje się zależnością

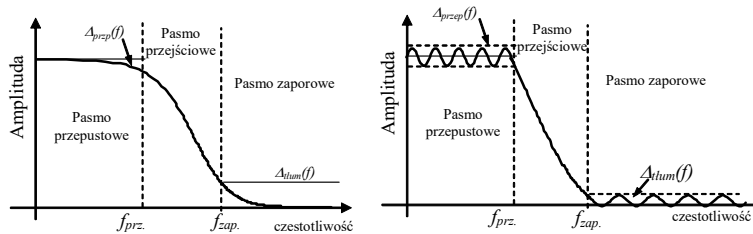
$$g_i(t) = u_i \frac{\sin(2\pi f_B(t - t_i))}{2\pi f_B(t - t_i)}$$



3. Okresowe próbkowanie sygnałów dolno pasmowych. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova Filtry realne

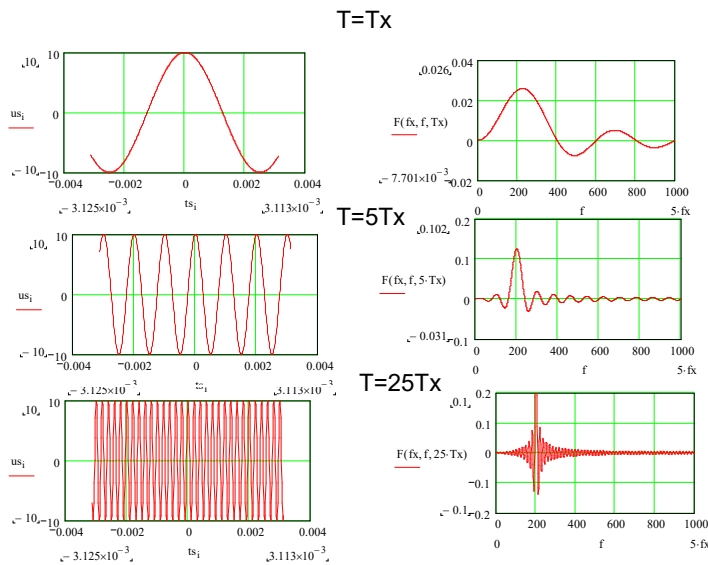
Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe fizycznie realizowanych filtrów nie mogą mieć idealnie płaskich odcinków, a przejście pomiędzy pasmami przepustowym oraz zaporowym nie może być skokowym.

Dlatego tak w pasmach przepustowych jak i w pasmach zaporowych charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa zawsze nie jest stałą, lecz zmienia się monotonicznie lub ma pulsację, a pomiędzy tymi pasmami istnieje tak zwane pasmo przejściowe o skończonej stromości.



Sygnały o skończonej trwałości

Czym krótsza trwałość sygnału tym szersze widmo



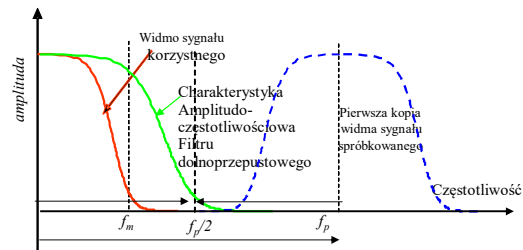
3. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova **Filtr realny**

Stąd wynika że w warunkach rzeczywistych w wyniku:

- i) rozszerzenia pasma sygnału oraz
- ii) braku idealnej płaskości i stromości charakterystyki amplitudo-częstotliwościowej filtra dolnoprzepustowego

Dla następnego odtworzenia sygnału częstotliwość próbkowania powinna być większa za minimalne możliwą (według twierdzenia Shannona-Kotelnikova).

To jest praktycznie zawsze po próbkowaniu sygnał może być odtworzony tylko w przybliżeniu.



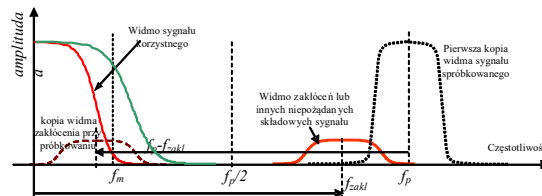
3. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova **Aliasing**

Podczas próbkowania sygnał może być zakłócony szumem lub innymi składowymi niepożądanymi.

Może się okazać że jedna z kopii (lub kilka) składowej od szumu oraz zakłóceń mogą się pojawić w paśmie sygnału oryginalnego.

Przy stosowaniu filtra odtwarzającego, te składowe będą traktowane jako sygnał pożądany i będzie powodować błędy odtwarzania sygnału.

To zjawisko nazywane jest aliasingiem

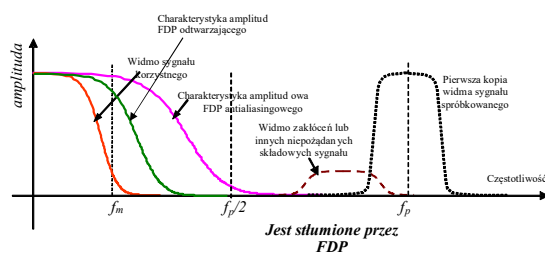


3. Twierdzenie Shannona-Kotelnikova

Aliasing

Aby tego uniknąć przed próbkowaniem zawsze należy wyczyścić ten sygnał od szumów oraz zakłóceń, stosując filtr wejściowy analogowy dolnoprzepustowy.

- Pasmo zaporowe tego filtru powinno się zaczynać od połowy częstotliwości próbkowania. Ten filtr często jest nazywany filtrem antialiasingowym.



4. Inne metody wyboru częstotliwości próbkowania

Wykorzystują się inne metody odtwarzania sygnałów, na przykład ekstrapolacją odcinkami stałych wartości sygnału pomiędzy kolejnymi próbkami, a także liniami łączącymi sąsiedni próbki itp.

Wybór częstotliwości próbkowania w tym przypadku zależy od dopuszczalnego błędu odtwarzania.

W razie wykorzystania próbek w celu wyznaczenia charakterystyk sygnału pomiarowego (wartości średniej, średniej wyprostowanej, skutecznej, mocy, zawartości składowych harmonicznych, charakterystyk statystycznych, widmowych itp.) zasada wyboru częstotliwości nieco inna.

4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

Odtworzenie przebiegu sygnału wykosztowane są próbki sygnału zarejestrowane w pamięci RAM. Przy tym rekonstruowany przebieg może być utworzony bezpośrednio z wartości próbek, a także przy zastosowaniu odpowiedniej interpolacji.

Przy tej samej częstotliwości próbkowania zastosowanie interpolacji zwiększa szerokość pasma analizowanych sygnałów.

Dokładność odtworzenia przebiegu sygnału na ekranie oscyloskopu zależy od liczby próbek (M) oraz sposobu interpolacji - wyznaczania wartości pośrednich pomiędzy wartościami kolejnych próbek sygnału.

4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

Dla sygnału sinusoidalnego definiuje się tak zwane użyteczne pasmo pamiętania (USB , *Useful Storage Bandwidth*):

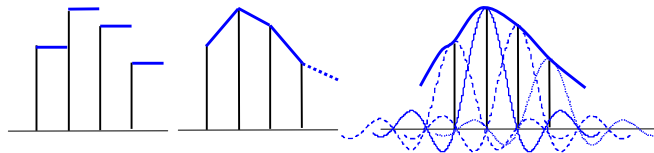
$$f_{USB} = \frac{f_{s,max}}{p}, f_{s,max} = p \cdot f_{USB}$$

Jest to maksymalna częstotliwość sygnału sinusoidalnego f_{max} , przy próbkowaniu którego z maksymalną częstotliwością $f_{s,max}$ otrzymuje się zadana liczba p próbek w ciągu jednego okresu.

Liczba próbek p , przy której przebieg sygnału jest odtworzony wystarczająco jednoznacznie zależy od wykorzystywanej interpolacji.

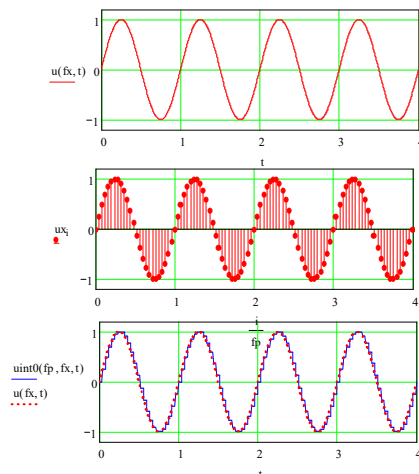
4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

- Najczęściej przyjmuje się (zwłaszcza dla oscyloskopów firmy Tektronix):
- $p=25$ dla przebiegów bez interpolacji – bezpośrednio odtwarzane zarejestrowane próbki, tzw. **interpolacja zerowego rzędu** – 25 próbek na okres sygnału sinusoidalnego;
- $p=10$ dla **interpolacji liniowej** – 10 próbek na okres sygnału sinusoidalnego;
- $p=2.5$ dla **interpolacji $\sin(x)/x$** – 2,5 próbki na okres sygnału sinusoidalnego.



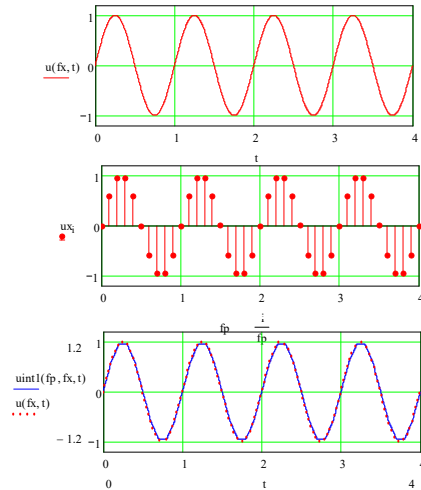
4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

- Interpolacja zerowego rzędu (25 próbek na okres)



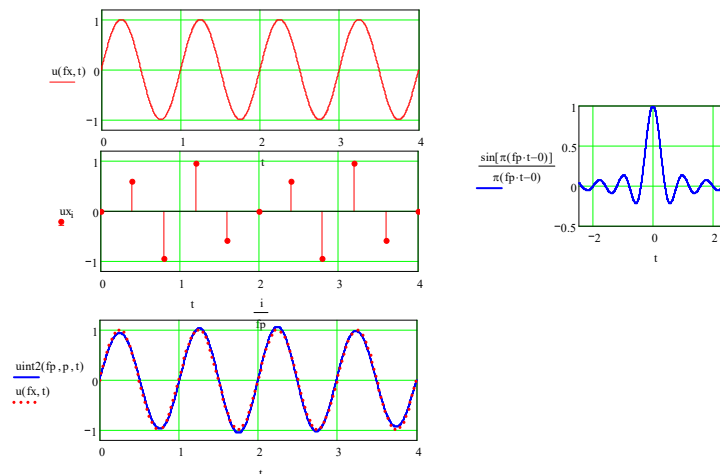
4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

- Liniowa interpolacja (10 próbek na okres)



4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

- Interpolacja $\sin(x)/x$ (2.5 próbek na okres)



4. Odtworzenie sygnału w oscyloskopie cyfrowym

Błąd interpolacji sygnału sinusoidalnego

- **Interpolacja zerowego rzędu** – $p=25$ próbek na okres, tj. przy $f_x/f_s=1/p=1/25$ unormowany do wartości $U_{p-p}=2U_m$ sygnału błąd równa się:

$$\frac{\Delta_{0,\max}}{2U_m} = \frac{U_m \cdot 2\pi \cdot f_x}{2U_m \cdot f_p} = \frac{\pi}{p} \approx 0.126 = 12.6\%$$

- **Interpolacja liniowa** – $p=10$ próbek na okres, tj. przy $f_x/f_s=1/p=1/10$ unormowany błąd równa się:

$$\frac{\Delta_{1,\max}}{2U_m} = \frac{U_m}{2 \cdot 2U_m} \cdot \left(\pi \cdot \frac{f_x}{f_p}\right)^2 = \left(\frac{\pi}{2p}\right)^2 \approx 0.025 = 2.5\%$$

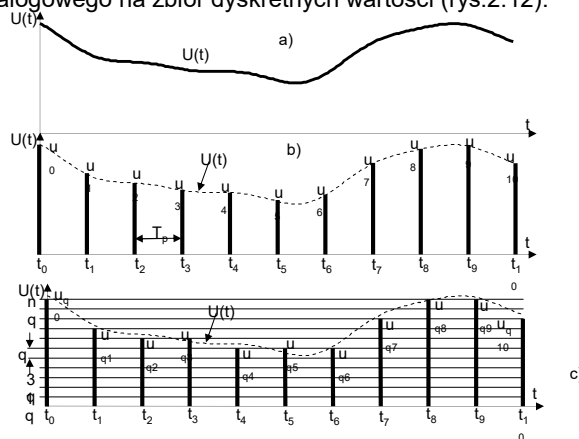
- **Interpolacja $\sin(x)/x$** – 2,5 próbki na okres, tj. przy $f_x/f_s=1/p=1/2.5$ unormowany błąd równa się:

$$\frac{\Delta_{\sin(x)/x}}{2U_m} = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=-M/2}^{M/2} \sin(2\pi \cdot f_s \cdot i \cdot T_p) \cdot \frac{\sin(\pi \cdot f_p \cdot (t-i \cdot T_p))}{\pi \cdot f_p \cdot (t-i \cdot T_p)} - \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \right]$$

- I zależy od liczby **M** zarejestrowanych próbek. Przy $M=10$ (4 okresy) maksymalny błąd interpolacji wynosi około 3.5%.

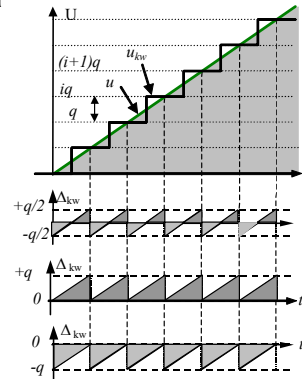
4. Kwantowanie sygnału

- **Kwantowanie sygnału** jest to dyskretyzacja sygnału analogowego w dziedzinie amplitudy, (intensywności) lub inaczej - przekształcenie wartości sygnału analogowego na zbiór dyskretnych wartości (rys.2.12).



5. Kwantowanie sygnału

- Podstawowymi parametrami kwantowania są:
 - - wartość kwantu lub przedział kwantowania;
 - - błąd kwantowania;
 - - liczba kwantów;
 - - rozdzielczość kwantowania.
- **Wartość kwantu.** Odstęp pomiędzy sąsiednimi wartościami poziomów nazywa się przedziałem kwantowania (q), najczęściej ten przedział kwantowania jest stały ($q = \text{const}$), wtedy mówi się że kwantowanie jest równomierne. Istnieją systemy (adaptacyjne), gdzie wartość kwantu q jest funkcją wartości sygnału lub szybkości jego zmian, wtedy kwantowanie nazywa się nierównomiernym (adaptacyjnym).



5. Kwantowanie sygnału

- **Błąd kwantowania.** Różnica pomiędzy sygnałem skwantowanym oraz sygnałem analogowym wejściowym nazywa się błędem kwantowania.

$$\Delta_{kw} = u_{kw} - u$$

- Wartość błędu kwantowania zależy od sposobu zaokrąglania (rys.2.12). Może wykorzystywać się trzy sposoby kwantowania: z zaokrągleniem do (1) wartości kwantu mniejszego, (2) do wartości kwantu większego i (3) do wartości kwantu bliższego .
- W pierwszym przypadku (rys. 2.12,a) błąd kwantowania zmienia się w zakresie

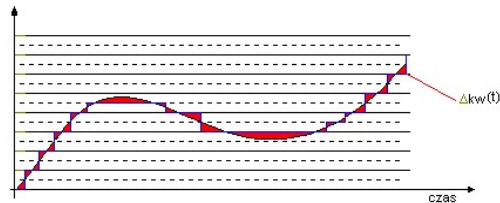
$$0 \leq \Delta_{kw} \leq +q$$
- w drugim przypadku

$$-q \leq \Delta_{kw} \leq 0$$
- i w trzecim przypadku

$$-q/2 \leq \Delta_{kw} \leq +q/2$$

5. Kwantowanie sygnału

- Kształt błędu kwantowania powtarza kształt sygnału pomiędzy wartościami kwantów.



- Często błąd kwantowania nazywany jest szumem kwantowania.

Wynik kwantowania sygnału analogowego $U_{x,q}$, na przykład napięcia $U_{x,q}$, można opisać zależnością

$$U_{x,q} = \left[\frac{U_x}{q} \right] \cdot q = N_x q$$

gdzie klamrami jest poznaczona operacja zaokrąglania do liczby całkowitej – N_x liczby kwantów, które odpowiadają wartości sygnału wejściowego, przy tym sposób zaokrąglania jest wyznaczony poprzednio.

5. Kwantowanie sygnału

- **Liczba kwantów w zakresie przetwarzania** - jest to stosunek pełnego zakresu przetwarzania U_z (ang. FSR – Full Scale Range) - sygnału do przedziału kwantowania q

$$N_{kw} = \frac{U_z}{q} = \frac{FSR}{q}$$

- Odwrotnie, wartość kwantu jest związana z zakresem i liczbą kwantów wyrażeniem

$$q = \frac{U_z}{N_{kw}} = \frac{FSR}{N_{kw}}$$

- Jeżeli przetwornik analogowo-cyfrowy może przetwarzać sygnały obydwu polaryzacji, zakres przetwarzania których stanowi od $-U_z$ do U_z , wtedy przy tej samej rozdzielczości (liczbie kwantów) wartość kwantu jest dwukrotnie większa za wartość kwantu w razie jednej polaryzacji

$$q = \frac{2U_z}{N_{kw}} = \frac{2U_{FSR}}{N_{kw}}$$

- **Rozdzielczość kwantowania** (wyrażona w bitach) wyznacza się jako logarytm z liczby kwantów

$$n = \log_2(N_{kw})$$

- Odwrotnie liczba kwantów jest powiązana z rozdzielczością funkcja wykładniczą

$$N_{kw} = 2^n$$

5. Kwantowanie sygnału, Przykłady:

1. Dla zakresu przetwarzania 2 V oraz liczby kwantów $N_{kw}=256$ wyznaczyć wartość kwantu oraz rozdzielczość.

1) Wartość kwantu $q = \frac{U_z}{N_{kw}} = \frac{2V}{256} = 7,8125 \text{ mV}$

2) Rozdzielczość $n = \log_2(N_{kw}) = \log_2(256) = 8 \text{ bitów}$

1. Dla zakresu przetwarzania $U_z = \pm 4 \text{ V}$ oraz rozdzielczości $n=10$ bitów wyznaczyć wartość kwantu q oraz liczbę kwantów N_{kw}

1) Liczba kwantów $N_{kw} = 2^n = 2^{10} = 1024$

2) wartość kwantu $q = \frac{2U_z}{N_{kw}} = \frac{8V}{1024} = 7,8125 \text{ mV}$

3. Dla zakresu przetwarzania $U_z = 4,096 \text{ V}$ oraz wartości kwantu $q = 0,5 \text{ mV}$ wyznaczyć liczbę kwantów N_{kw} oraz rozdzielczość n .

1) Liczba kwantów $N_{kw} = \frac{U_z}{q} = \frac{4,096 \text{ V}}{0,5 \text{ mV}} = 8192$

2) rozdzielczość bitów. $n = \log_2(N_{kw}) = \log_2(8192) = 13$

5. Kwantowanie sygnału, przykłady

- Jeżeli wyniki przetwarzania są prezentowani liczbami dziesiętkowymi (jak na przykład w multimetrach) wtedy przy wyznaczaniu **rozdzielczości** wykorzystuje się logarytm dziesiętkowy $n_{10} = \lg_{10} N_{kw}$

- A **liczba kwantów** wyznacza się ze wzoru $N_{kw} = 10^{n_{10}}$

Przykład. Jeżeli zakres przetwarzania wynosi $U_z = 10 \text{ V}$, a liczba kwantów $N_{kw} = 10000$, wtedy rozdzielczość wynosi

$$n_{10} = \lg_{10} N_{kw} = \lg_{10}(10000) = 4$$

cyfry dziesiętkowe, przy tym wartość kwantu stanowi

$$q = \frac{U_z}{N_{kw}} = \frac{10V}{10000} = 1 \text{ mV}$$

5. Kwantowanie sygnału, przykłady

- W multimetrach oraz innych przyrządach cyfrowych często jest wykorzystywany **zakres przetwarzania krotny 2**, na przykład, 200,0 mA, 2,0000 kOhm, 2,000000 V.
- W takich przypadkach mówi się o rozdzielczości przykładowo 3 ½ cyfr dziesiętkowych, gdzie liczba ½ oznacza że zakres przetwarzania jest krotny 2, a pierwsza cyfra oznacza liczbę następnych miejsc dziesiętkowych, w danym przypadku 3, inaczej liczba kwantów stanowi $N_{kw}=2000$.
- Jeżeli rozdzielczość stanowi 4 ½ cyfr dziesiętkowych, to liczba kwantów wynosi $N_{kw}=20000$, a jeżeli rozdzielczość stanowi 6 ½ cyfr dziesiętkowych, to oznacza że liczba kwantów wynosi $N_{kw}=2000000$, itp.
- Przykład. Jeżeli zakres przetwarzania wynosi $U_z=2,0$ V, a rozdzielczość stanowi 4 ½ cyfr dziesiętkowych, wtedy liczba kwantów wynosi $N_{kw}=20000$, a wartość kwantu wynosi

$$q = \frac{U_z}{N_{kw}} = \frac{2\text{ V}}{20000} = 0,1\text{ mV}$$

6. Kodowanie wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego

- Kodowanie** na zadaniu **przedstawienie** uzyskanej podczas kwantowania liczby kwantów, odpowiadających wartości sygnału analogowego, w **odpowiednim kodzie**. Jeżeli wynik przetwarzania analogowo- cyfrowego wykorzystuje się w celu dawniejszego opracowania komputerem (procesorem), wtedy wykorzystuje naturalny kod dwójkowy (binarny), lub jego pochodne, z pośród nich szesnastkowy, który jest utworzony kodowaniem czterech bitów odpowiednią liczbą od 0 do 9 i dalej literami A=10, B=11, C=12, D=13, E=14, F=15.
- Bit najmniej znaczący (ang. LSB – least significant bit) – jest wartość sygnału, odpowiadającemu jednemu bitowi

$$LSB=q$$

W razie rozdzielczości n bitów maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania $N_{x,maks(2)}$ stanowi n jedynek

$$N_{x,maks(2)} = \underbrace{11111111\dots11}_n = 2^n - 1$$

Na przykład, dla rozdzielczości n=10, maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania równa się

$$N_{x,maks(2)} = \underbrace{11\ 1111\ 1111}_{10} = 2^{10} - 1 = 1023_{(10)}$$

6. Kodowanie wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego

- W razie kodu dziesiętkowego dla rozdzielczości n cyfr maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania wynosi:

$$N_{x,maks(10)} = \underbrace{99\dots9}_n = 10^n - 1$$

- a w razie rozdzielczości $n\frac{1}{2}$ cyfr maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania wynosi:

$$N_{x,maks(10)} = \underbrace{199\dots9}_n = 2 \cdot 10^n - 1$$

- Na przykład, dla rozdzielczości $5\frac{1}{2}$ cyfr dziesiętkowych, maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania równa się

$$N_{x,maks(10)} = 199999$$

Maksymalna wartość sygnału przetwarzanego wynosi

$$U_{x,maks.} = N_{x,maks.} \cdot q = (2^n - 1) \cdot q = (2^n - 1) \cdot LSB$$

a przy kodzie dziesiętkowym maksymalna wartość sygnału przetwarzanego równa się

$$U_{x,maks.} = N_{x,maks.} \cdot q = (2 \cdot 10^n - 1) \cdot q = (2 \cdot 10^n - 1) \cdot LSD$$

6. Kodowanie wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego

- Przykłady.

- 1) W razie rozdzielczości $n=10$ bitów, dla której maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania równa się $N_{max(2)}=1111111111$, oraz wartości kwantu $q=1$ mV maksymalna wartość napięcia przetwarzanego równa się.

$$U_{x,maks.} = N_{x,maks(2)} q = (2^8 - 1) \cdot mV = 255 mV$$

- 2) W razie rozdzielczości $n=4\frac{1}{2}$ cyfr dziesiętkowych, dla której maksymalny cyfrowy wynik przetwarzania równa się $N_{max(10)}=19999$, oraz wartości kwantu $q=0,1$ mA maksymalny wynik przetwarzania natężenia prądu równa się

$$I_{x,maks.} = N_{x,maks(10)} q = 19999 \cdot 0,1 mA = 1,9999 mA$$

Jeżeli wynik przetwarzania będzie przedstawiany na urządzeniu odczytowym może wykorzystywać się kod pośredni, przykładowo kod dwójkowo-dziesiętkowy (każda cyfra dziesiętkowa jest kodowana dwójkową liczbą 4 bitową).

Dla kodowania liniowych lub kątowych przemieszczeń wykorzystuje się kod Graya, w którym eliminuje się niejednoznaczność odczytu, którego osobiwością jest to, że każde dwie sąsiedni kombinacji kodowe różnią się między sobą tylko w jednym bicie.

6. Kodowanie wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego

Przy zliczaniu liczby zdarzeń, przykładowo liczby impulsów jako pośredni wykorzystuje się kod impulsowy – numeryczny, w którym liczba jedynek równa się liczbie impulsów (zdarzeń).

Podczas przetwarzania analogowo – cyfrowego także może się wykorzystywać tak zwany **kod termometryczny**, w którym liczba sąsiednich jedynek równa się liczbie kwantów.

Jeżeli taki kod zapisać pionowo, to wysokość słupka z tych jedynek będzie podobna do wysokości słupka zwykłego termometru rtęciowego lub z innym płynem roboczym.

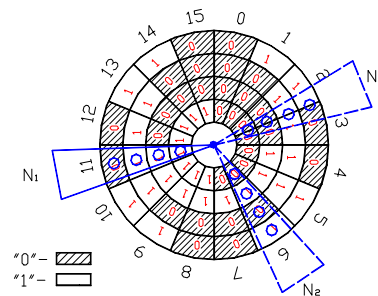
Przykładowo w tablicy 1. przedstawione wartości kombinacji kodów dla liczb dziesiętkowych od 0 do 16.

6. Kodowanie wyniku przetwarzania analogowo-cyfrowego

Dziesiątkowy	Dwójkowy	Szesnaśtkowy	Dwójkowo-dziesiątkowy.	Greya	Numeryczny
0	0000	0	0000	0000	0
1	0001	1	0001	0001	1
2	0010	2	0010	0011	11
3	0011	3	0011	0010	111
4	0100	4	0100	0110	1111
5	0101	5	0101	0111	11111
6	0110	6	0110	0101	111111
7	0111	7	0111	0100	1111111
8	1000	8	1000	1100	11111111
9	1001	9	1001	1101	111111111
10	1010	A	0001 0000	1111	1111111111
11	1011	B	0001 0001	1110	11111111111
12	1100	C	0001 0010	1010	111111111111
13	1101	D	0001 0011	1011	1111111111111
14	1110	E	0001 0100	1001	11111111111111
15	1111	F	0001 0101	1000	111111111111111
16	0001 0000	10	0001 0110	0001 1000	1111111111111111

Kod Graya

- **Kod Graya – zastosowanie przy kodowaniu przesunięcia liniowego lub kątownego** (rys.2.13)
- Zaletą tego kodu jest to, że każde sąsiednie dwa słowa różnią się tylko 1 bitem. Zamiana liczby NKB (naturalny kod binarny) na kod Graya:



7. Klasyfikacja przetworników analogowo-cyfrowych

Rozróżnia się przetworniki:

- **wielkości przestrzennych** (liniowych oraz kątowych),
- **parametrów czasowo-częstotliwościowych** (trwałość impulsów, okres, częstotliwość, przesuwu fazy, stosunku częstotliwości itp.) oraz
- **wartości (intensywności) sygnału** (napięcia, prądu itp.)

7. Klasyfikacja przetworników analogowo-cyfrowych

