

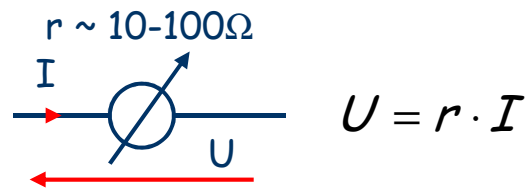
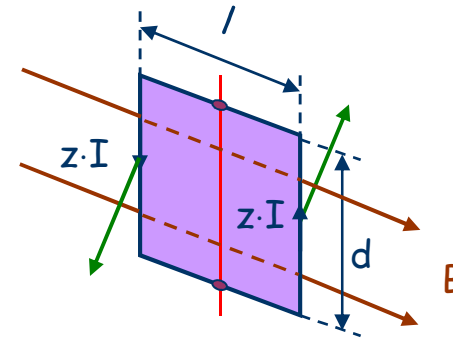
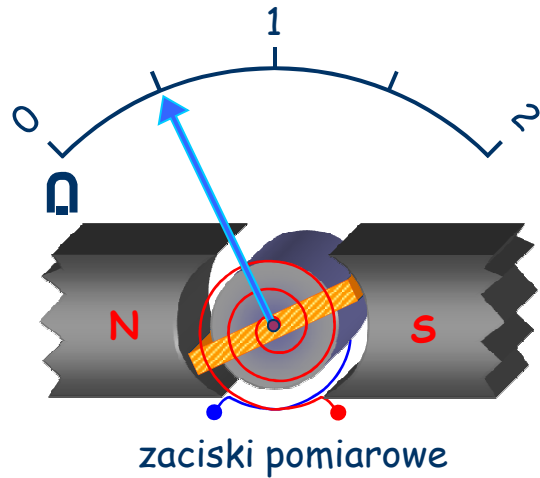
# Pomiary i przyrządy cyfrowe





# Przyrządy analogowe - trochę historii

## Ustrój magnetoelektryczny



współczynnik  
poszerzenia  
zakresu

$$M_I = B \cdot I \cdot z \cdot d \cdot l$$

$$M_S = k \cdot \alpha$$

$$M_I = M_S \Rightarrow \alpha = \frac{B \cdot z \cdot d \cdot l}{k} I = c \cdot I$$

$$1 + \frac{r}{R}$$

$$1 + \frac{R}{r}$$



# Rodzaje cyfrowych przyrządów pomiarowych

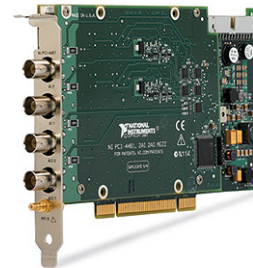
## 1. Przyrządy „tradycyjne”

multimetry przenośne i laboratoryjne  
mierniki parametrów:  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $Z$ ,  $Q$

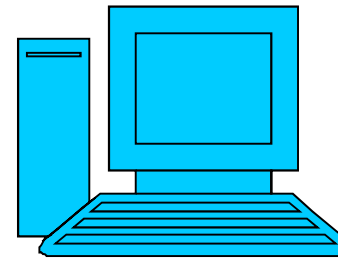


## 2. Komputerowe karty pomiarowe systemy sterowania

pomiar sygnałów elektrycznych  
czas, częstotliwość  
wielkości nieelektryczne



+



+

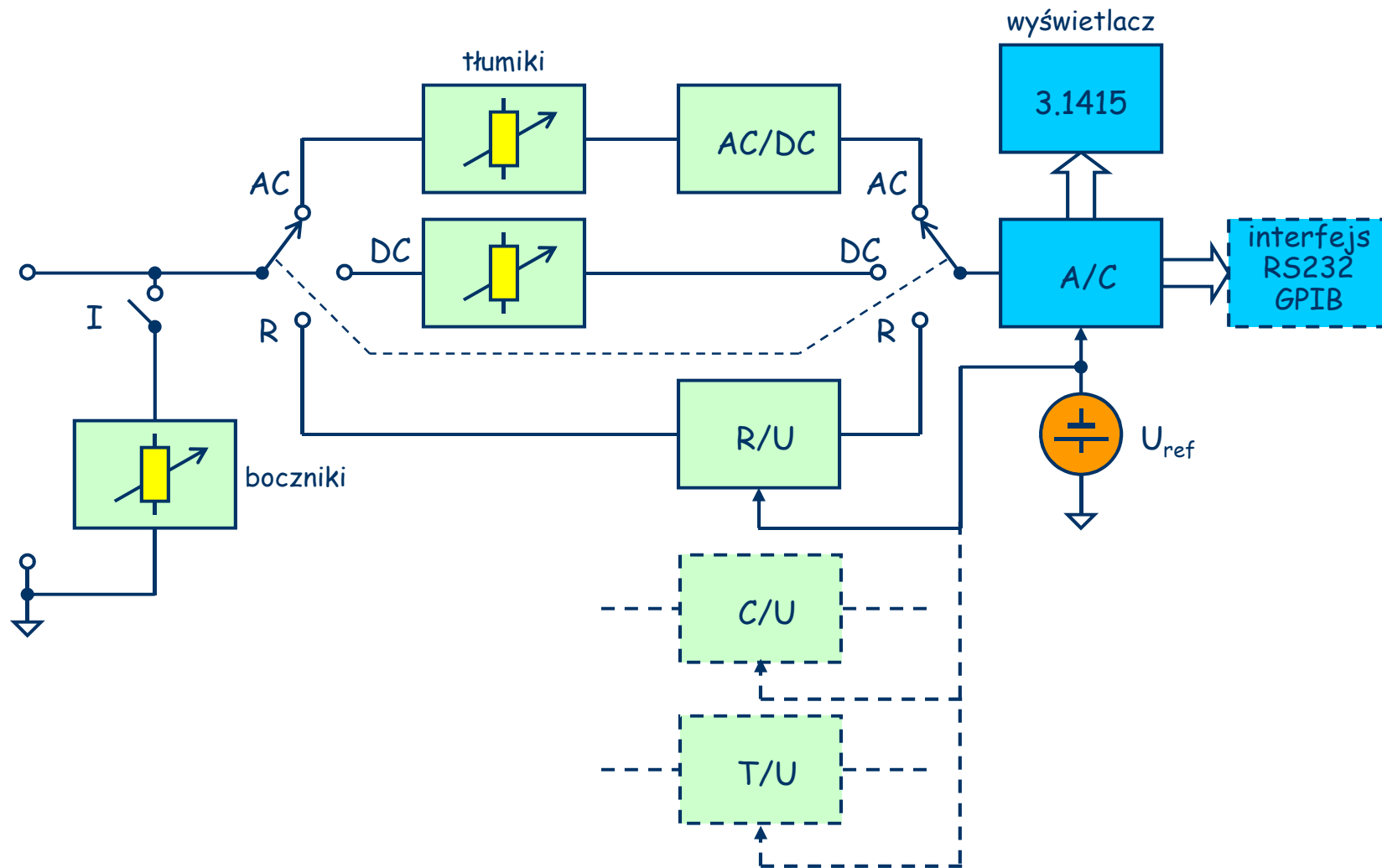
oprogramowanie

## 3. Przyrządy „wirtualne” (Virtual Instruments)

komputer przetwarza i obrazuje dane pomiarowe

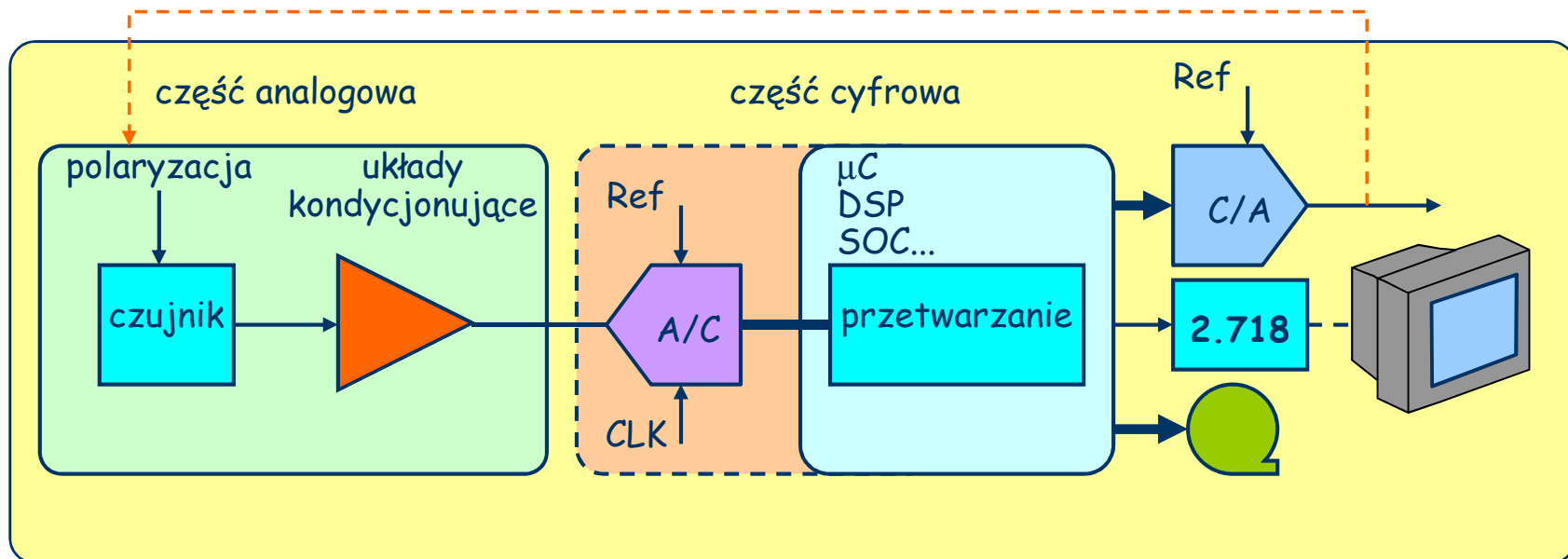


# Multimetr cyfrowy (DMM)



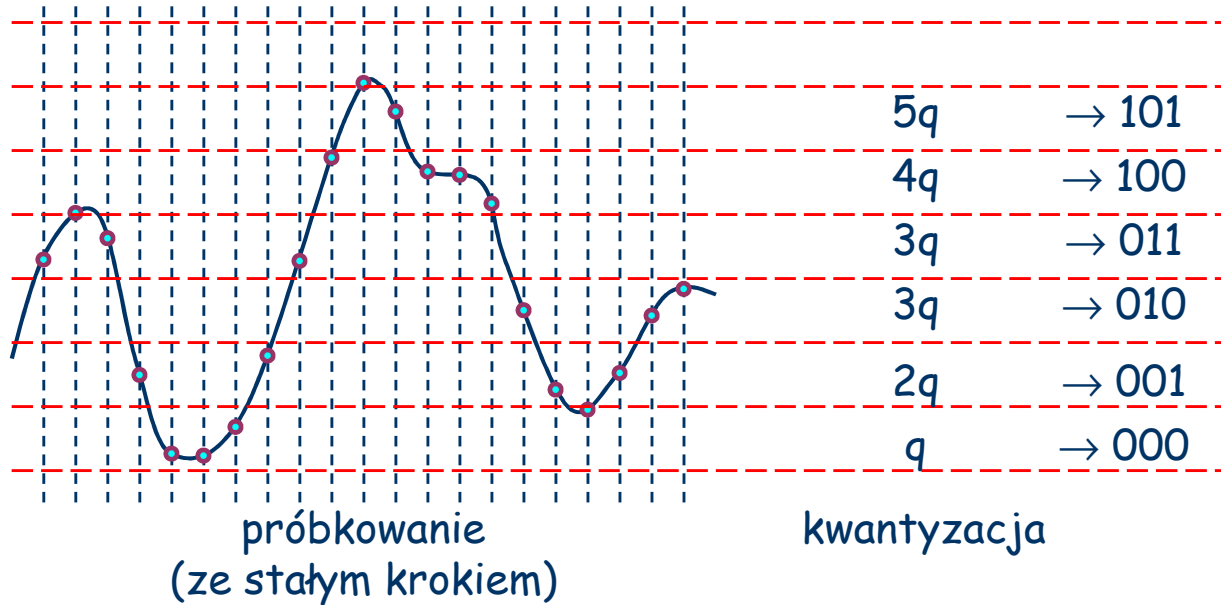


# Cyfrowy tor pomiarowy



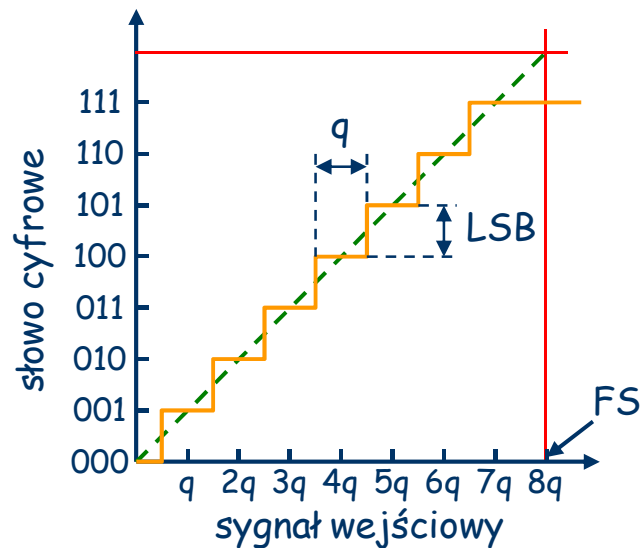


# Idealny przetwornik A/C



kodowanie

kod naturalny  
kod ze znakiem  
BCD  
Gray'a



$$FS = q \cdot 2^N$$

N	$2^N$	q (FS=1.024V)	q [dB FS]
8	256	4 mV	-48
10	1024	1 mV	-60
12	4096	250 $\mu$ V	-72
16	65536	15.625 $\mu$ V	-96
24	16777216	61 nV	-144



# Podstawowe kody cyfrowe

## Kod naturalny (binarny)

$$a_{N-1}a_{N-2}\dots a_1a_0 \in \{0,1\}: L = \sum_{i=0}^{N-1} a_i \cdot 2^i$$

$$\begin{aligned} 000000 &\rightarrow 0 && \text{(np. 0)} \\ 1111111 &\rightarrow 2^{N-1} && \text{(np. 255)} \end{aligned}$$

## Kod uzupełnień do 2

$$a_{N-1}a_{N-2}\dots a_1a_0 \in \{0,1\}: L = -a_{N-1} \cdot 2^{N-1} + \sum_{i=0}^{N-2} a_i \cdot 2^i$$

$$\begin{aligned} 100000 &\rightarrow -2^{N-1} && \text{(np. -128)} \\ 0111111 &\rightarrow 2^{N-1}-1 && \text{(np. 127)} \end{aligned}$$

## Kod BCD (binary coded decimal)

$$\begin{array}{cccc} D_3 & | & D_2 & | & D_1 & | & D_0 \\ b_3b_2b_1b_0 & | & b_3b_2b_1b_0 & | & b_3b_2b_1b_0 & | & b_3b_2b_1b_0 \end{array} \quad L = \sum_{j=-k}^l 10^j \sum_{i=0}^3 a_{ij} \cdot 2^i$$

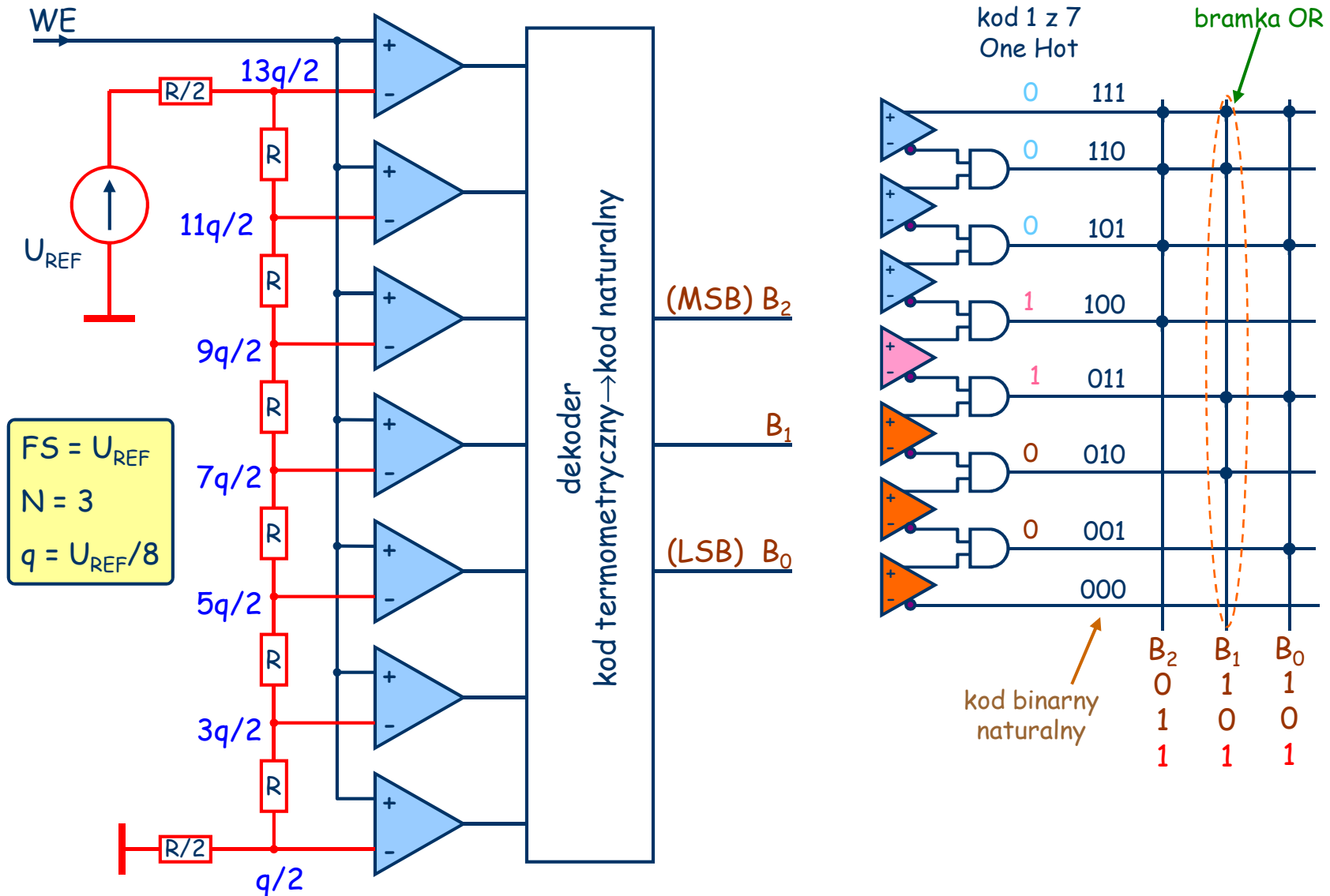
3.5 cyfry:  $\pm 1999$  (0.05%);  $\pm 3999$  (0.025%)  
 $3\frac{3}{4}$  cyfry:  $\pm 8999$  (0.01%; 100 ppm)  
 4.5 cyfry:  $\pm 51000$  (0.002%; 20 ppm)  
 5.5 cyfry:  $\pm 119999$  (0.0008%; 8 ppm)

## Kod Gray'a

0	00000
1	00001
2	00011
3	00010
4	00110
5	00111
6	00101
7	00100
8	01100
9	01101
10	01111
11	01110
12	01010
13	01011
14	01001
15	01000
16	11000



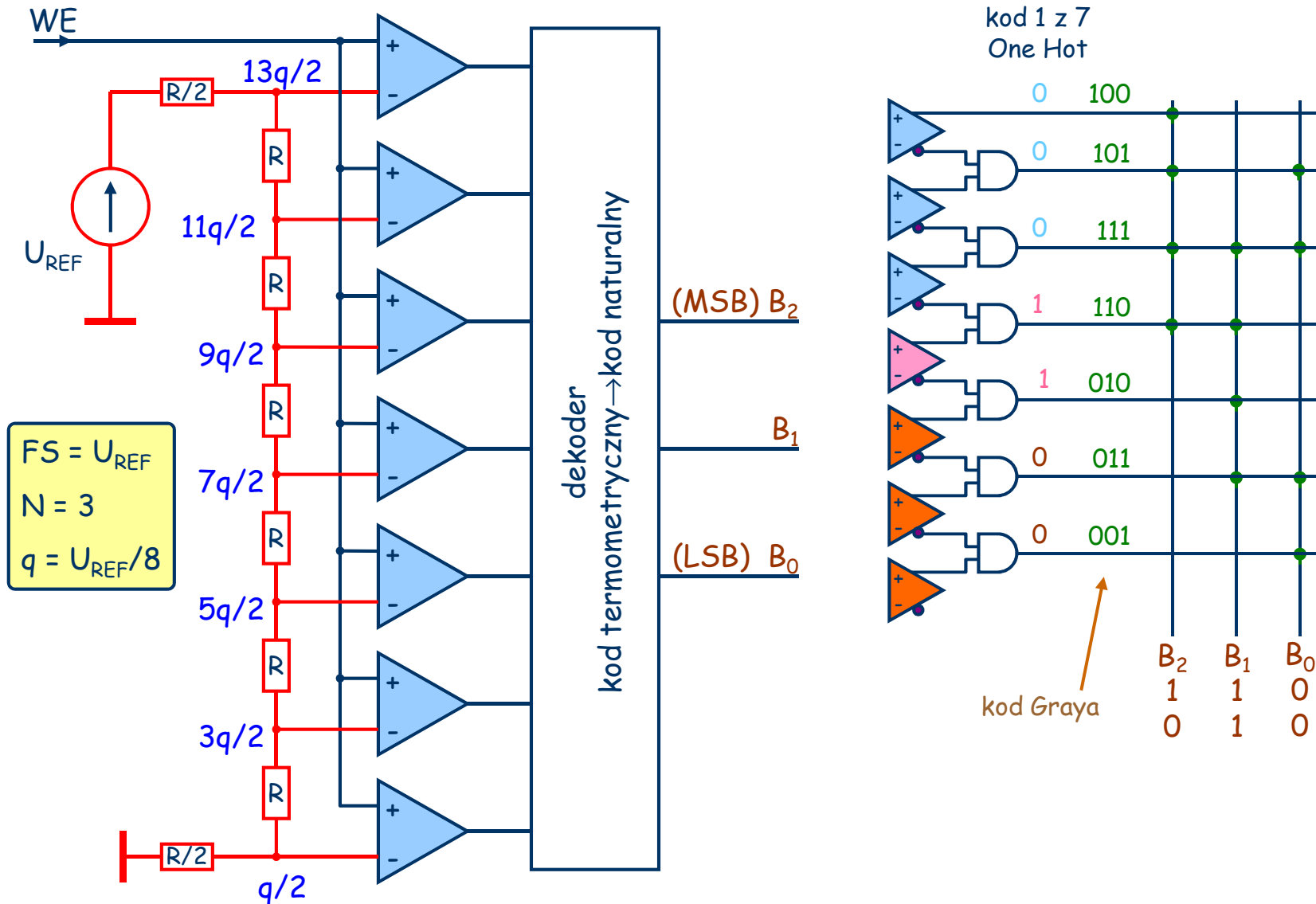
# Przykładowe realizacje: przetwornik flash





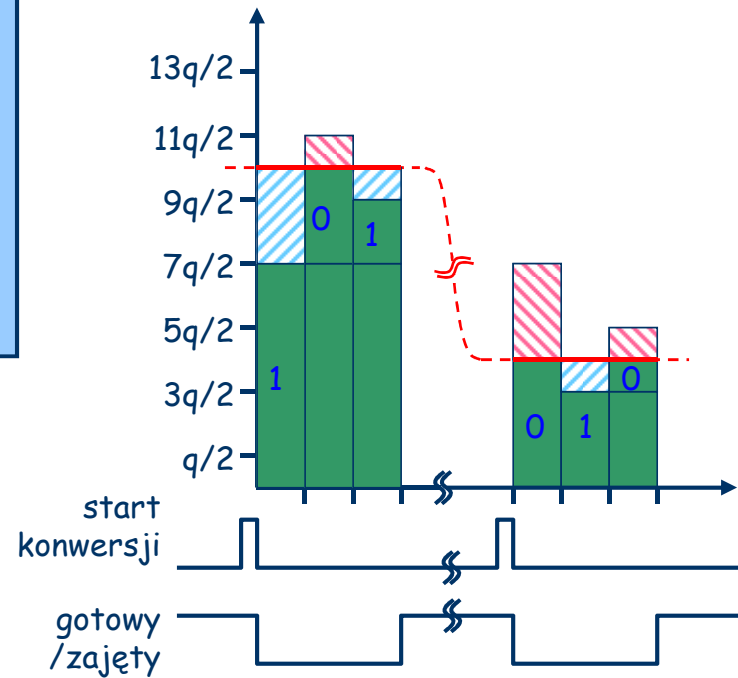
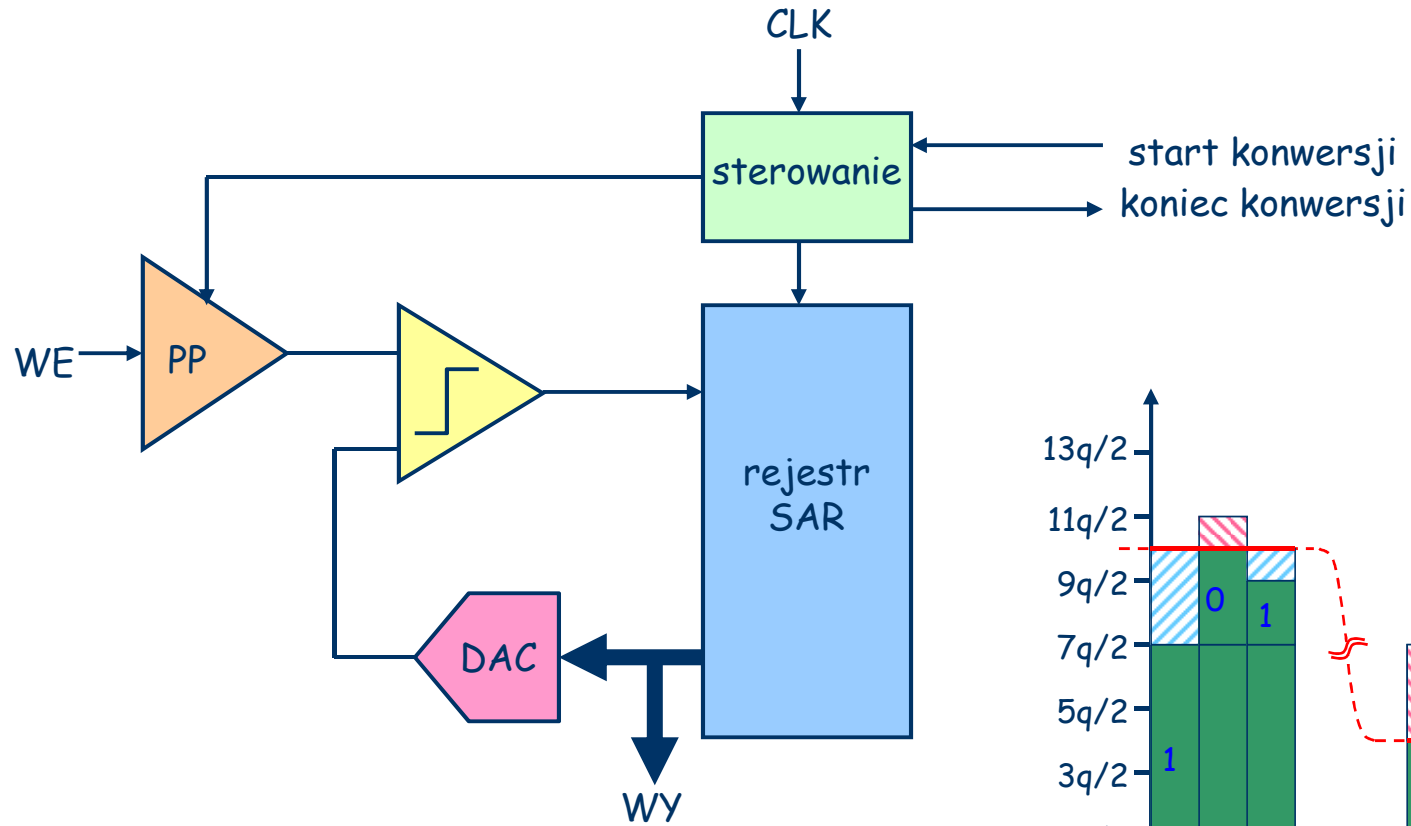


# Przykładowe realizacje: przetwornik flash



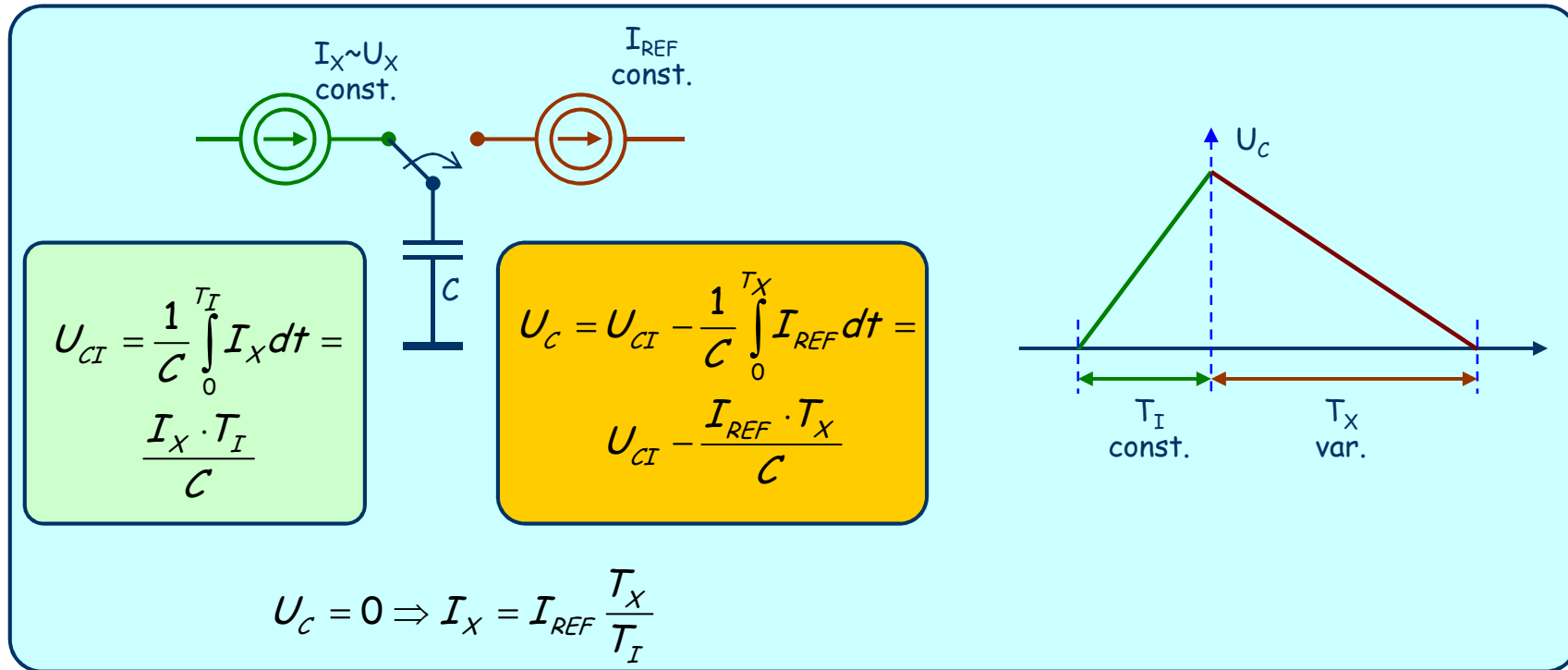


# Przetwornik SAR (Successive Approximation)





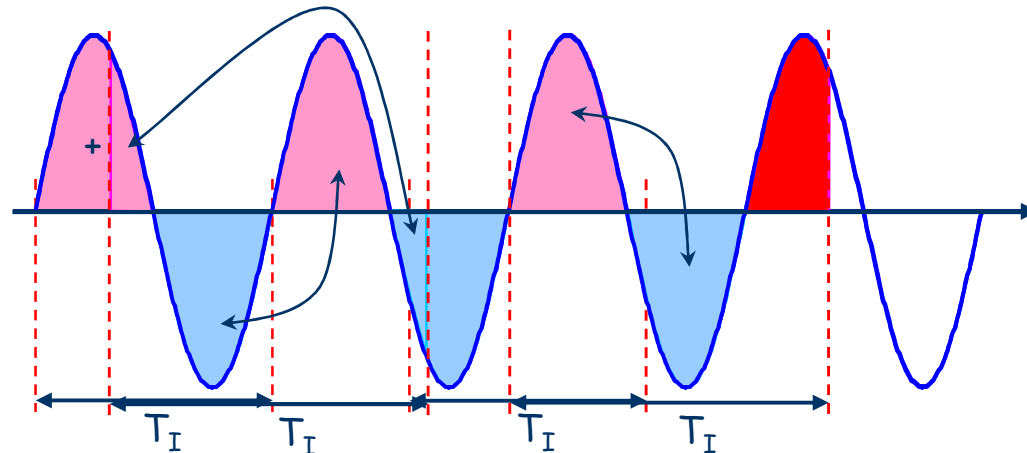
# Przetwornik z podwójnym całkowaniem



## Wrażliwość na zakłócenia

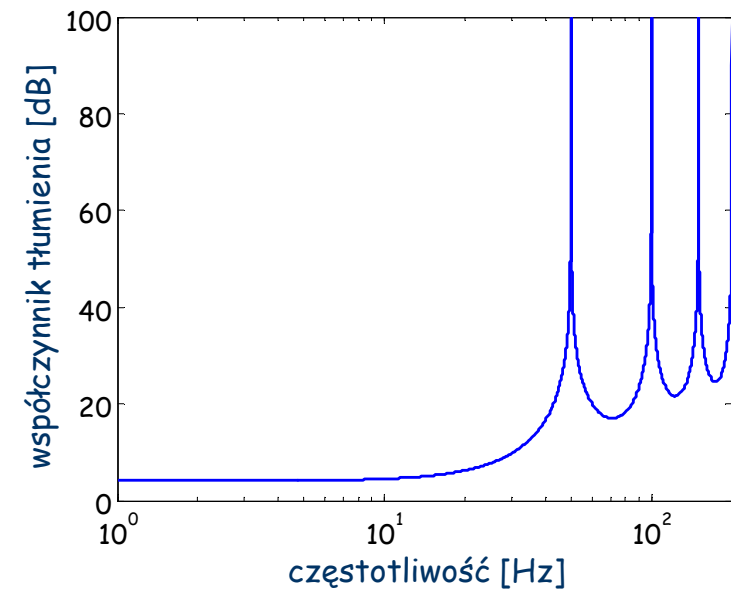
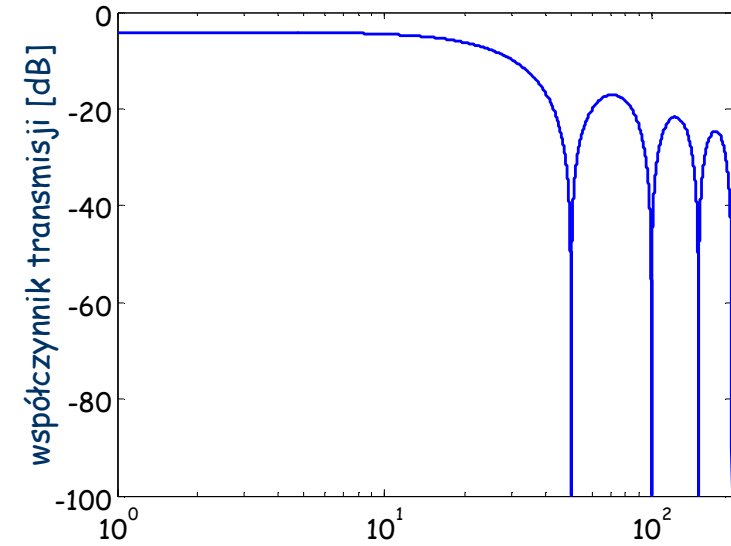
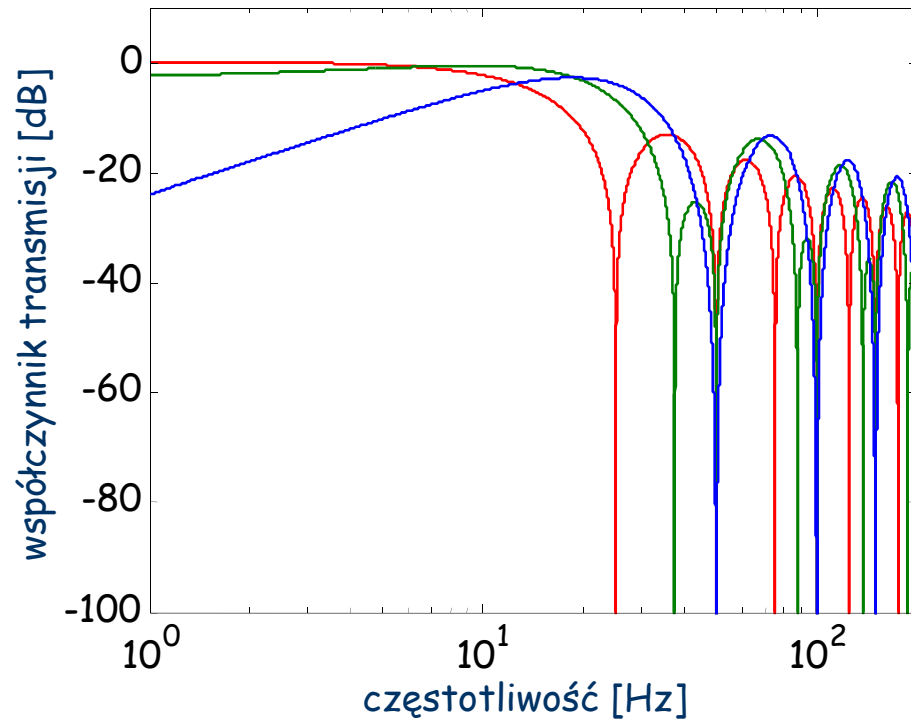
$$\int_0^{T_I} \sin(\omega t) dt = \frac{\cos(\omega T_I) - 1}{\omega}$$

$$\omega = \frac{\pi/2 + n \cdot 2\pi}{T_I} \Rightarrow \int_0^{T_I} \dots = 0$$



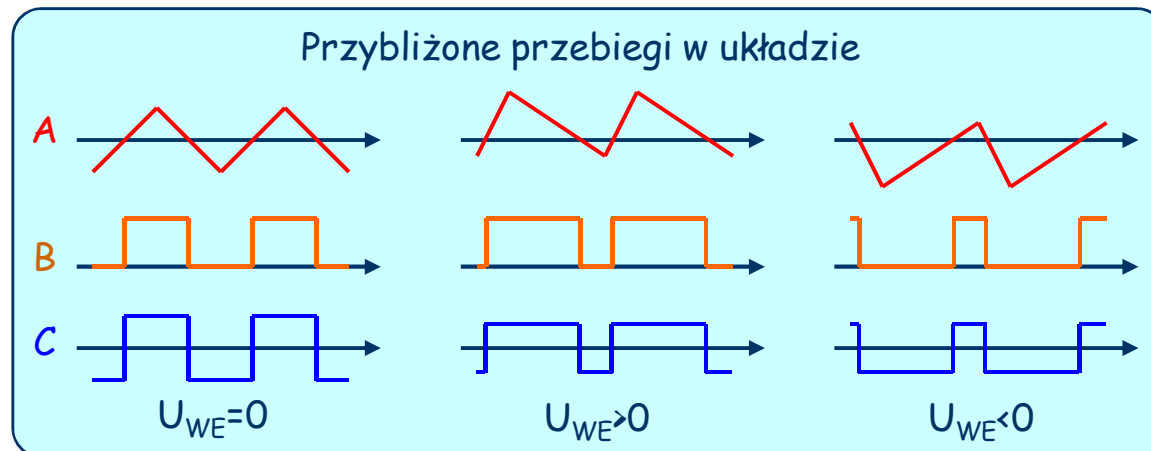
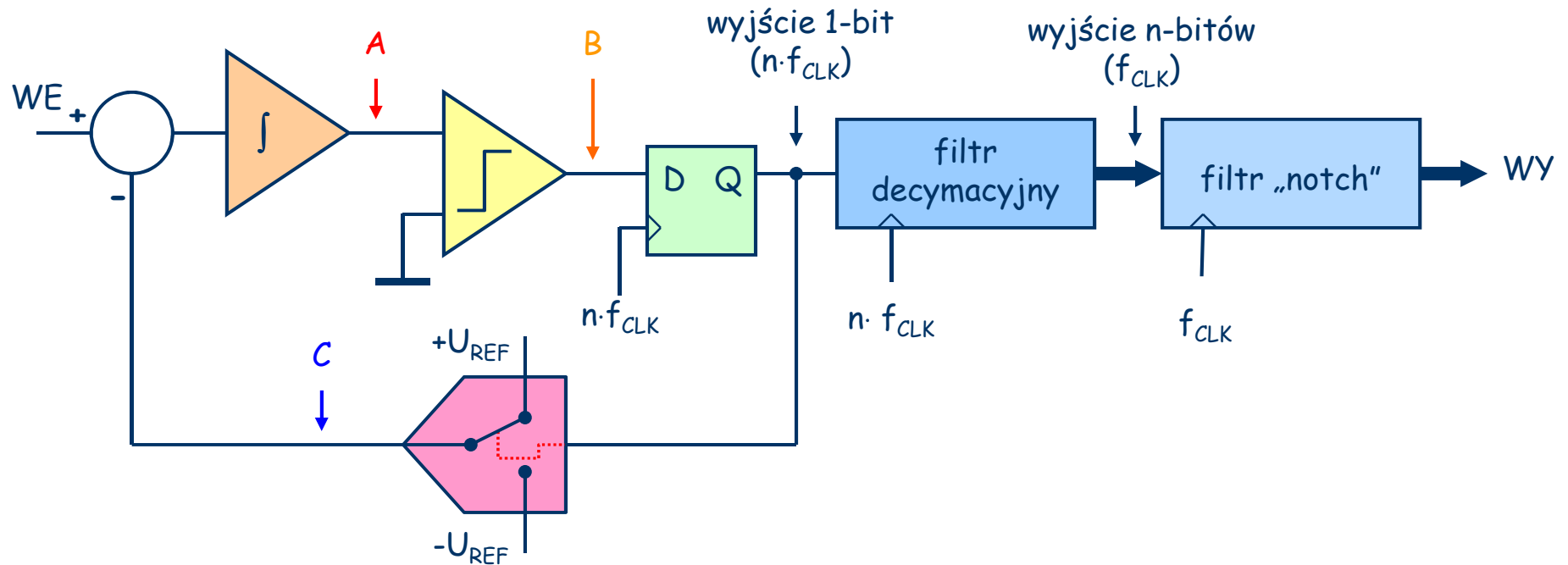


# Zakłócenia - c.d.





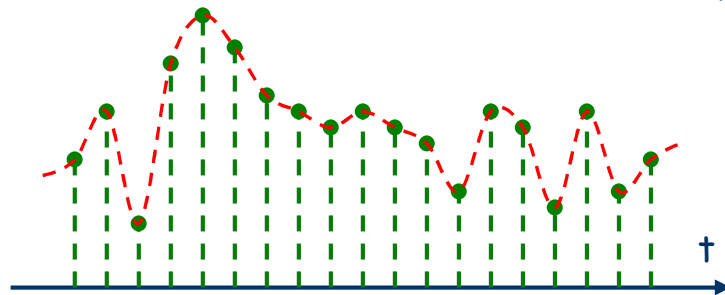
# Przetwornik $\Sigma$ - $\delta$ (sigma-delta)



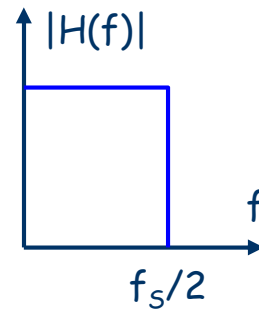


# Przetwarzanie C/A

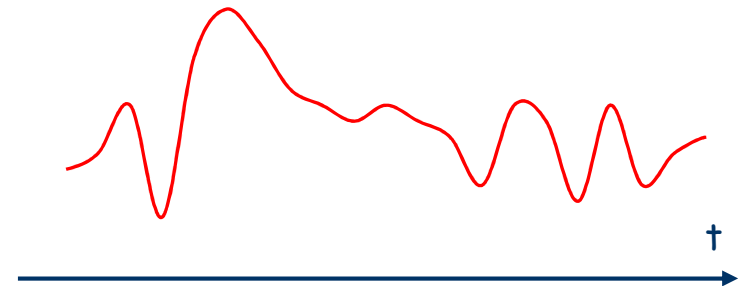
Wyjście idealnego przetwornika C/A



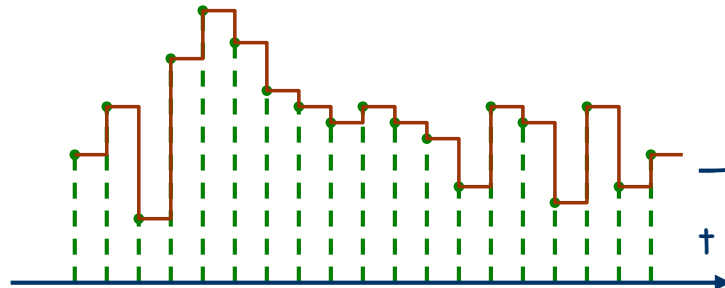
Filtr rekonstrukcyjny



Przebieg odtworzony



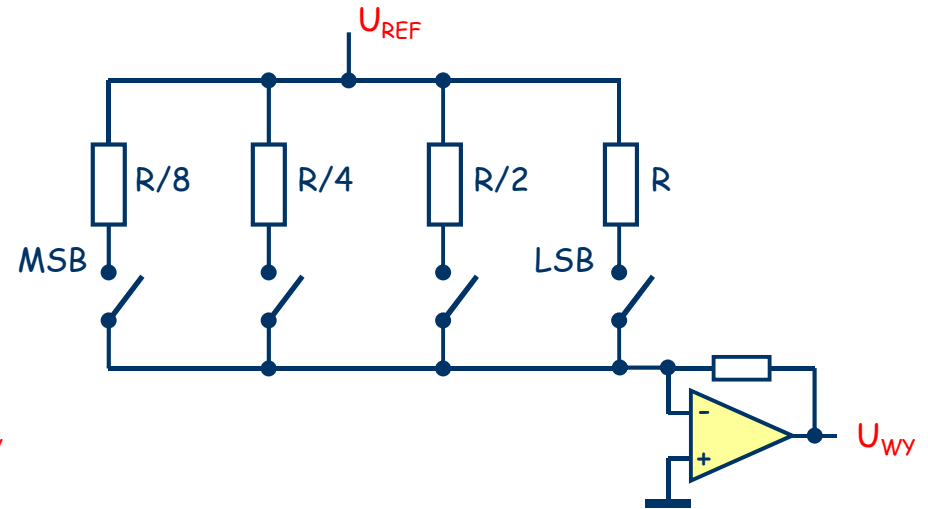
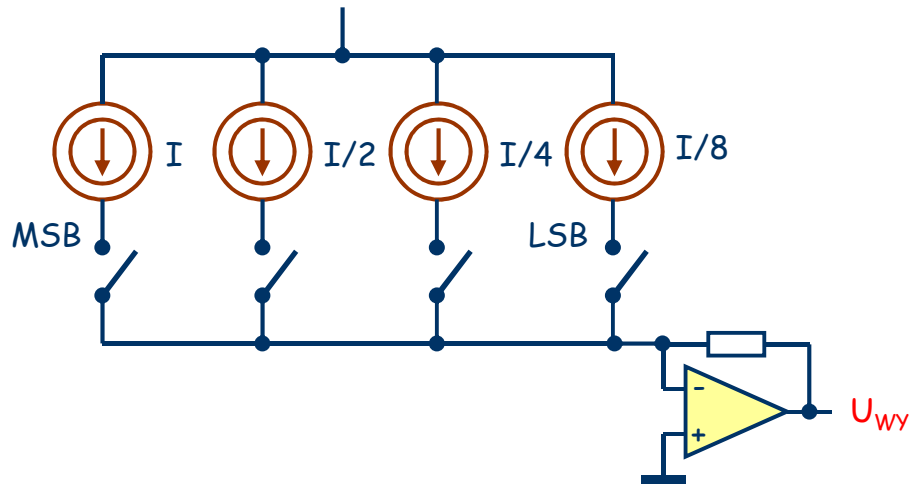
Wyjście rzeczywistego przetwornika C/A  
interpolacja rzędu zero (Zero-Order Hold)



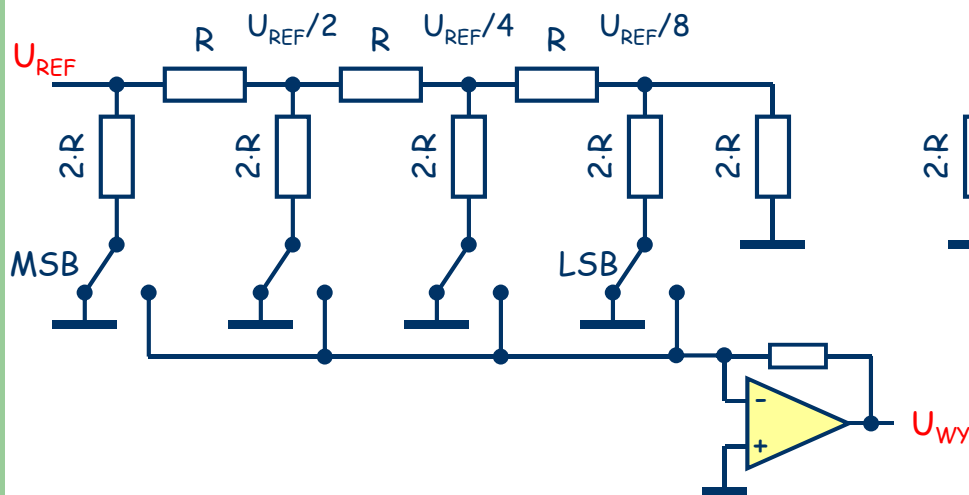


# Przetworniki C/A

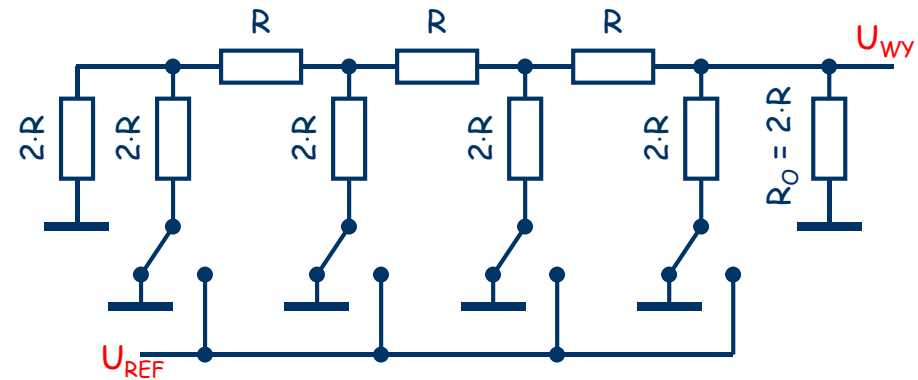
## Binarne przetworniki wagowe



## Przetwornik z drabinką R-2R



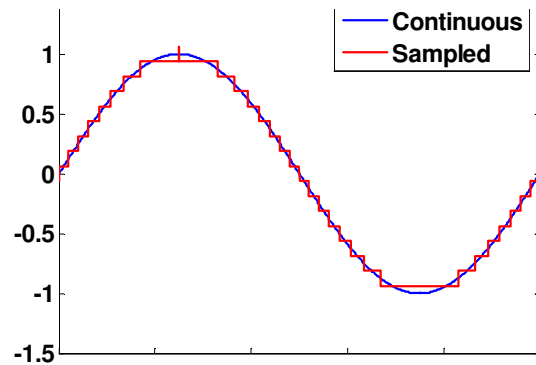
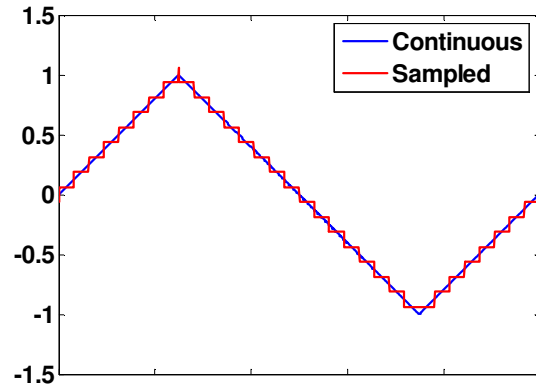
## Przetwornik z odwrotną drabinką R-2R



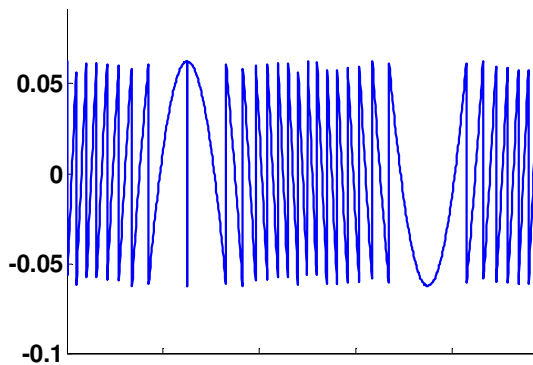
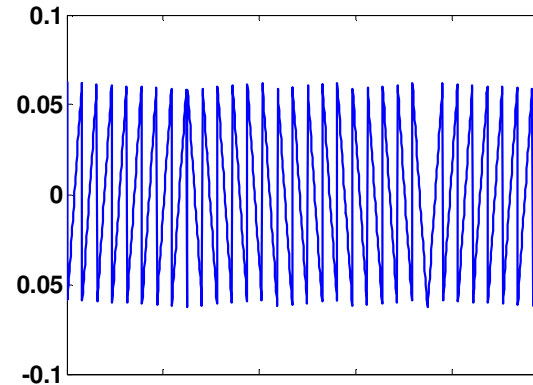


# Nieidealność przetwarzania - szum kwantyzacji

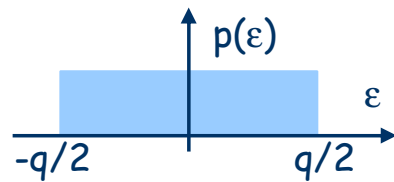
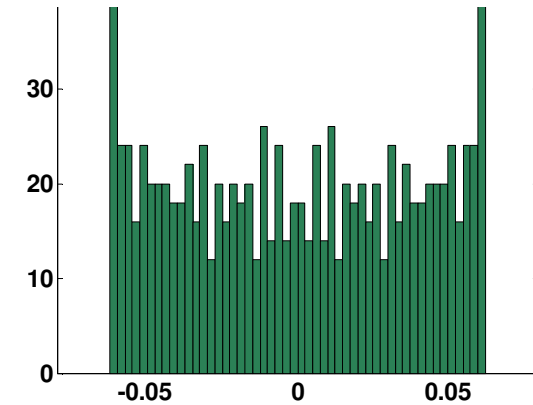
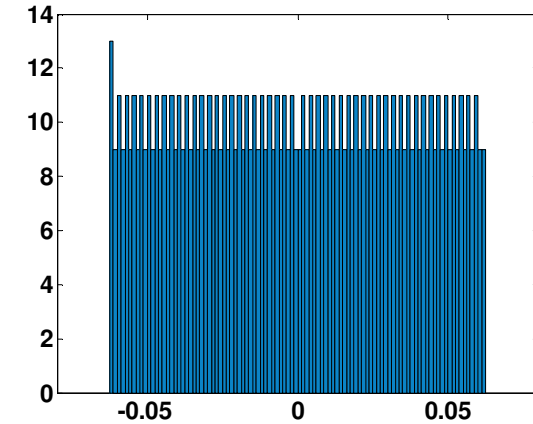
kwantyzator 4-ro bitowy



błąd kwantyzacji  $\epsilon$



histogram błędu



$$\epsilon_{RMS} = \frac{q}{\sqrt{12}} \approx 0.289 \cdot q$$

$$SNR = 20 \log \frac{S_{RMS}}{\epsilon_{RMS}} = 6.02 \cdot N + 1.76 \text{ [dB]}$$

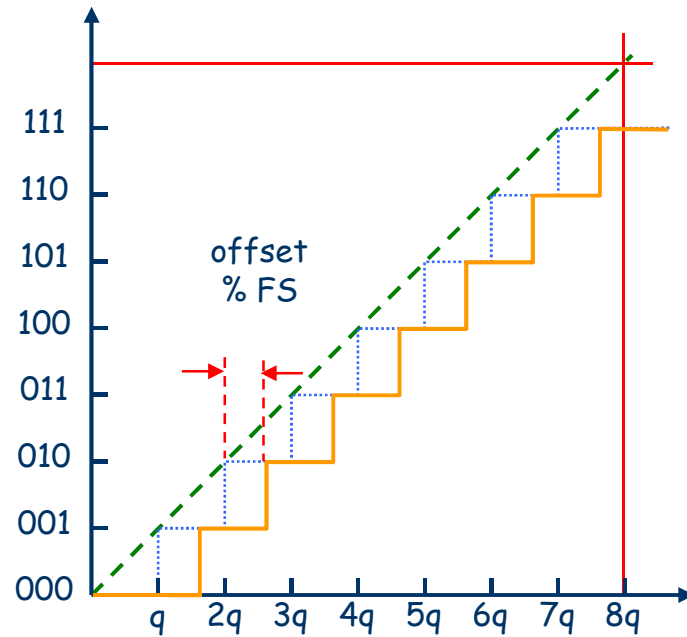
$$DR = 20 \log \frac{FS}{q} = 20 \log \frac{2^N q}{q} = 6.02 \cdot N \text{ [dB]}$$



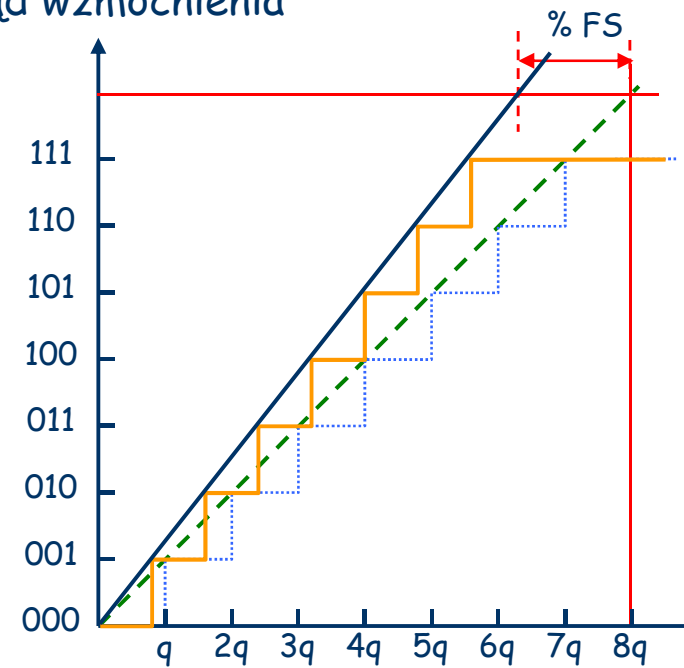


# Błędy przetworników

Błąd przesunięcia (błąd zera, offset)



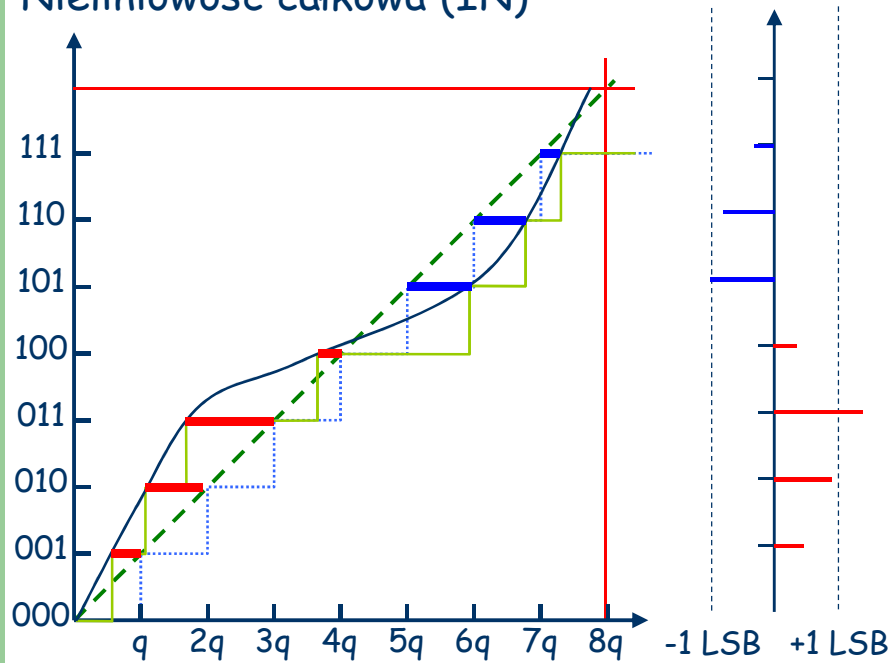
Błąd wzmacnienia



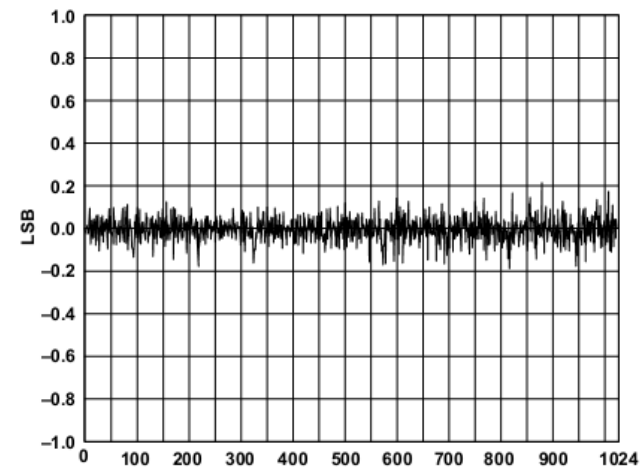
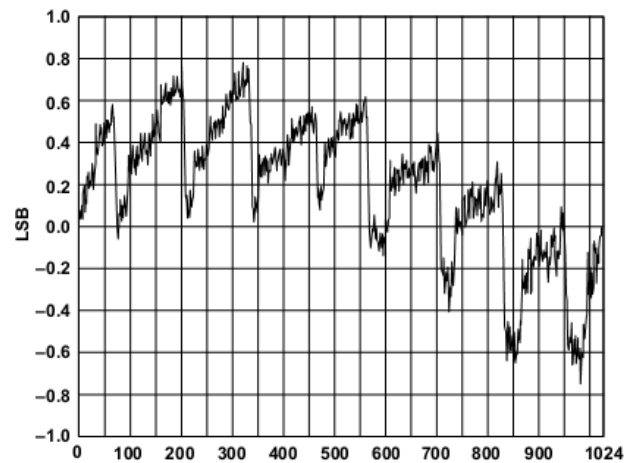
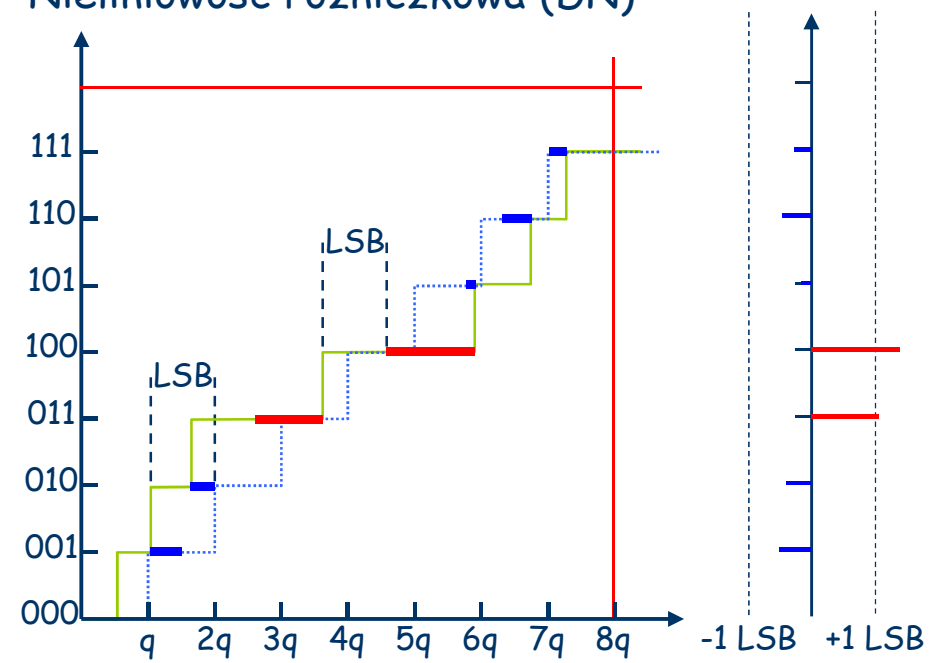


# Nieliniowość przetwarzania

Nieliniowość całkowa (IN)



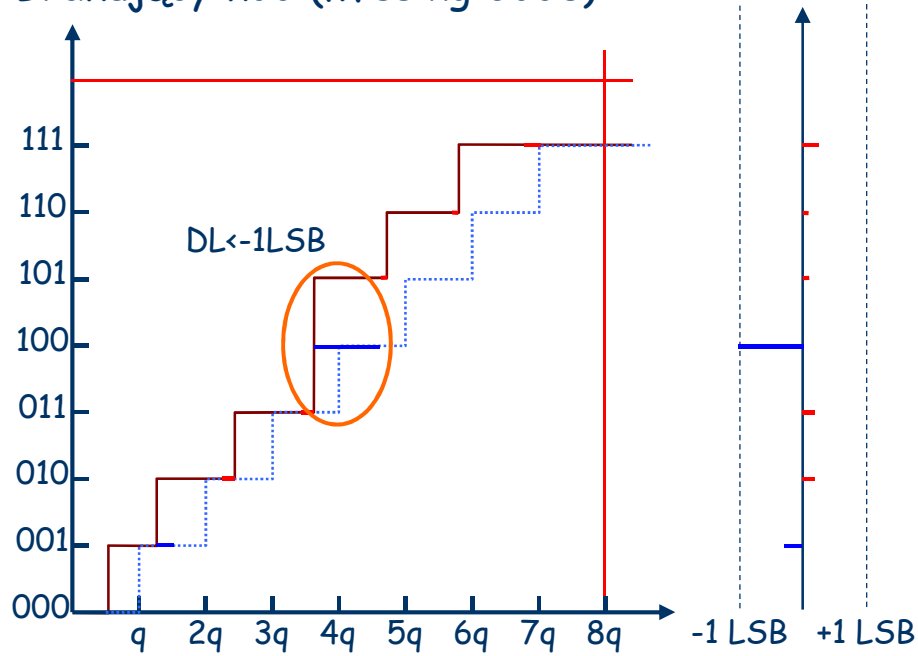
Nieliniowość różniczkowa (DN)



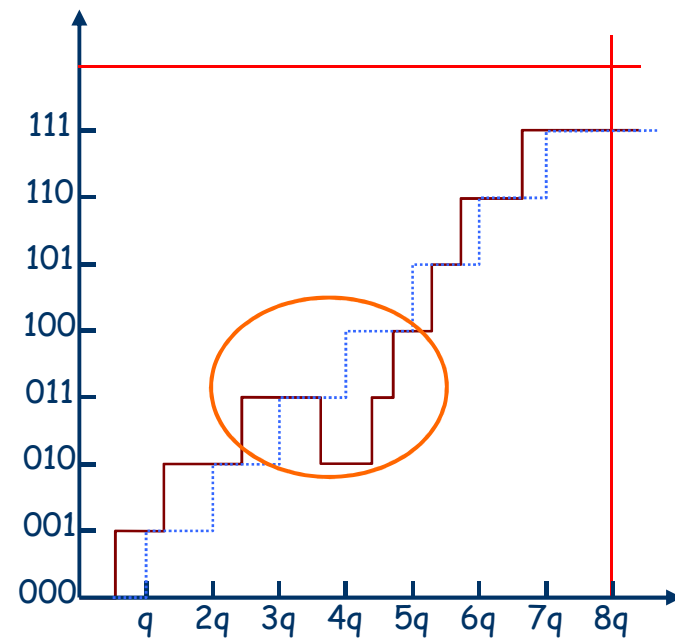


# Drastyczne przykłady

Brakujący kod (Missing Code)

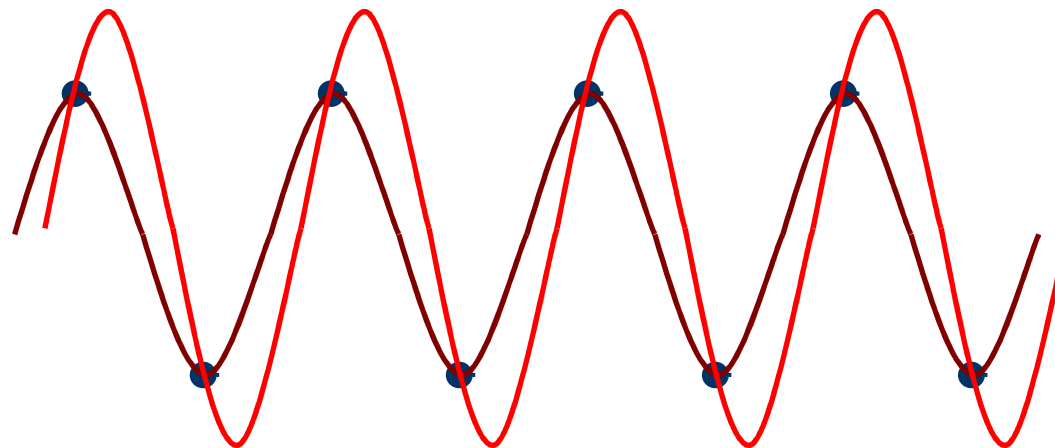
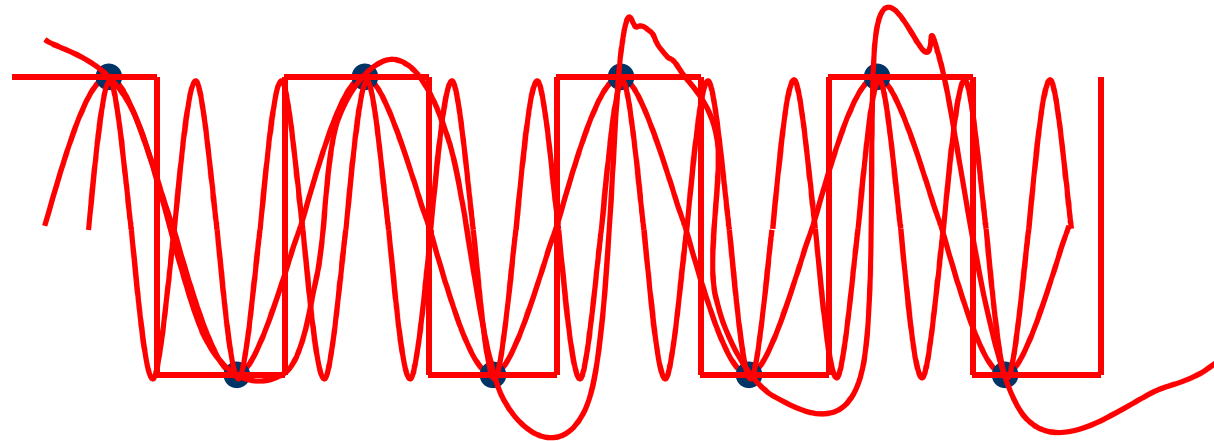


Błąd monotoniczności





# Czy próbkowanie daje pełną informację?



Tak,  
pod warunkiem, że uszanujemy...



# Twierdzenie o próbkowaniu

Shannona-Kotelnikowa, Nyquista-Shannona, ...

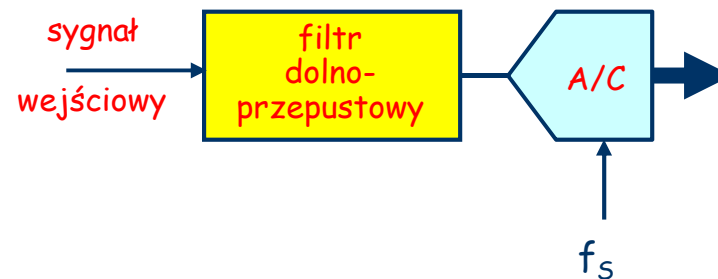
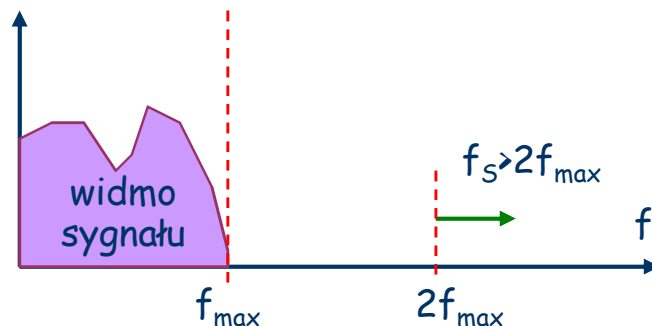
Sygnal może być jednoznacznie odtworzony z próbek pobranych ze stałą częstotliwością  $f_s$  jeżeli żadna ze składowych tego sygnału nie ma częstotliwości większej niż  $f_s/2$ .

$f_s$  - częstotliwość próbkowania

$f_s/2$  - częstotliwość Nyquista

albo bardziej wprost:

Próbkowanie sygnału musi się odbywać z częstotliwością co najmniej dwukrotnie większą od pasma zajmowanego przez ten sygnał.



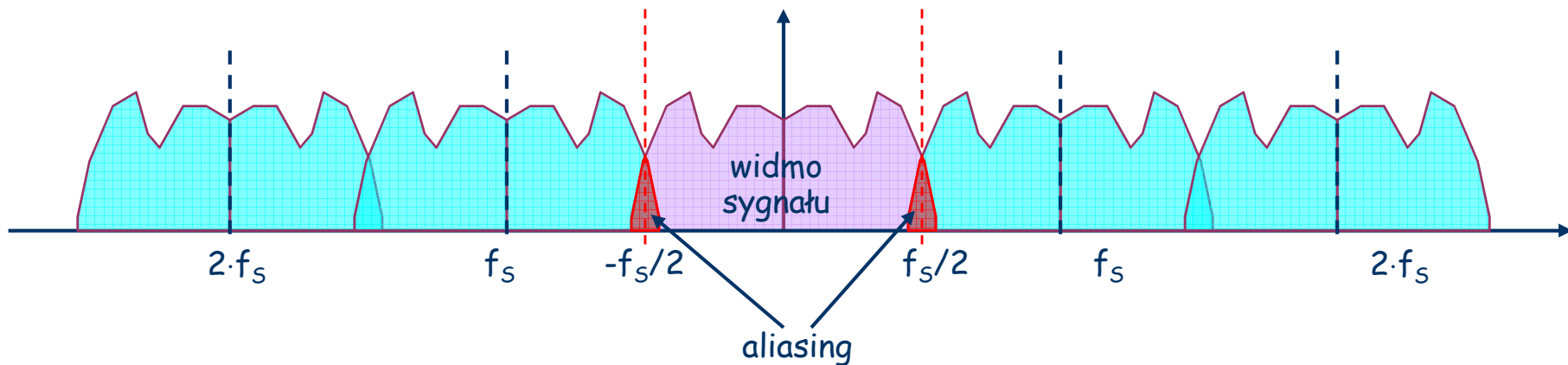
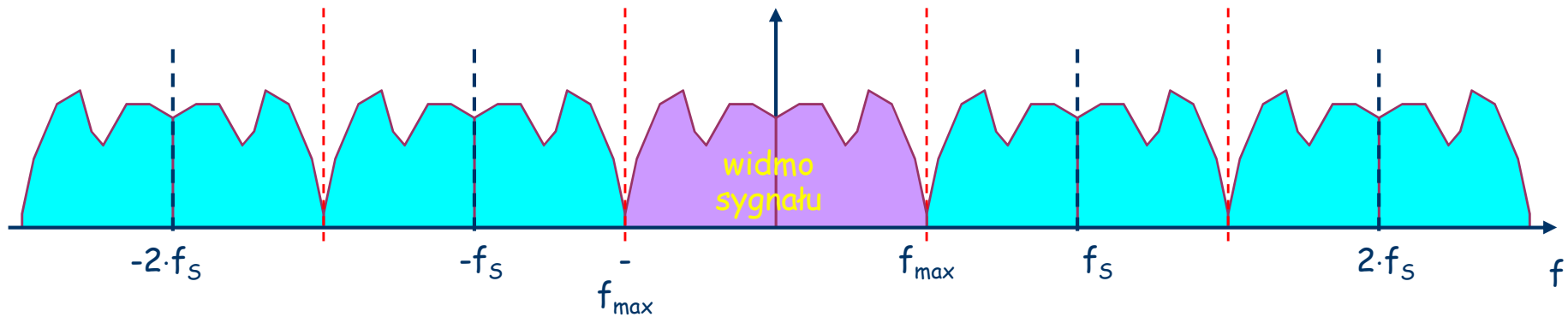


# Aliasing

$X(f)$  - widmo sygnału (obustronne)

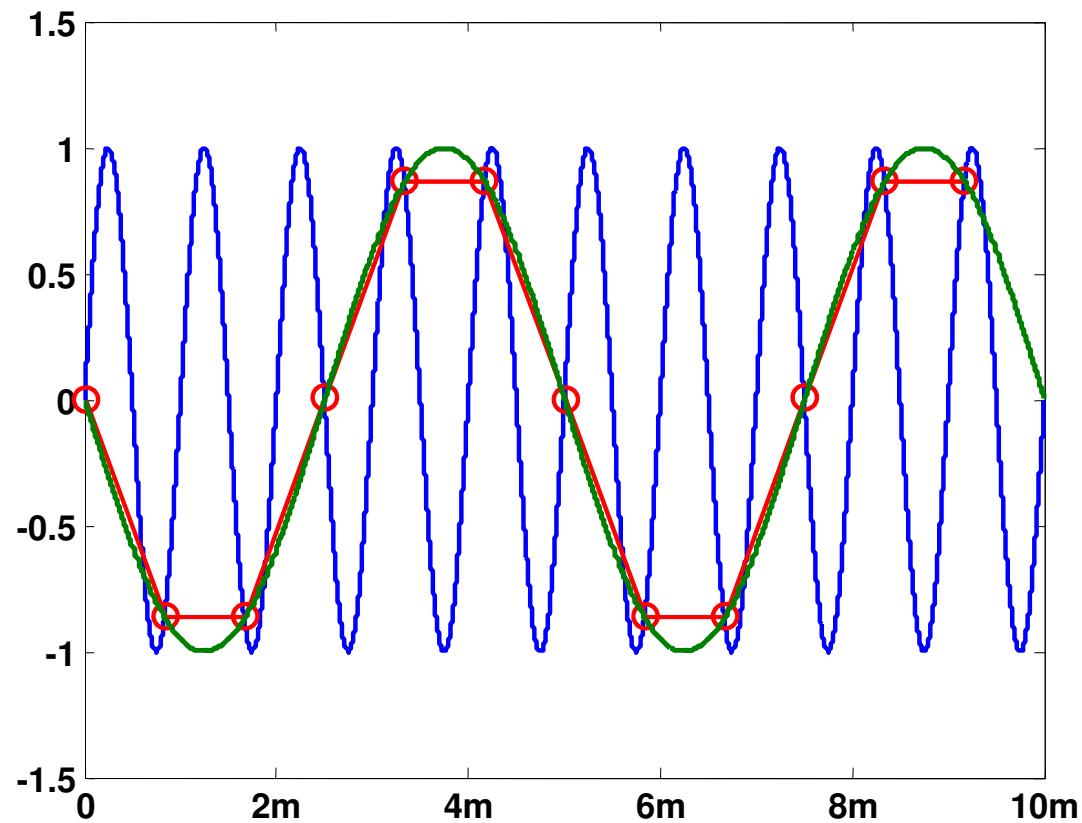
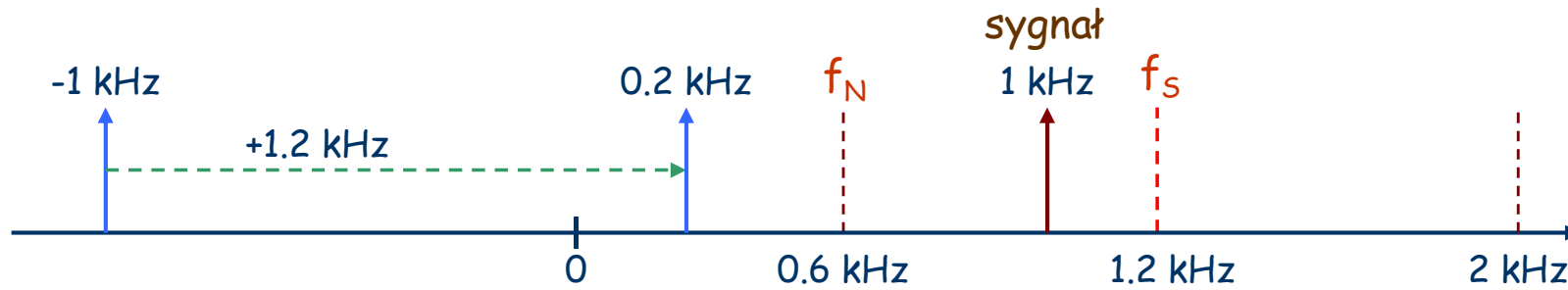
widmo sygnału próbkowanego:

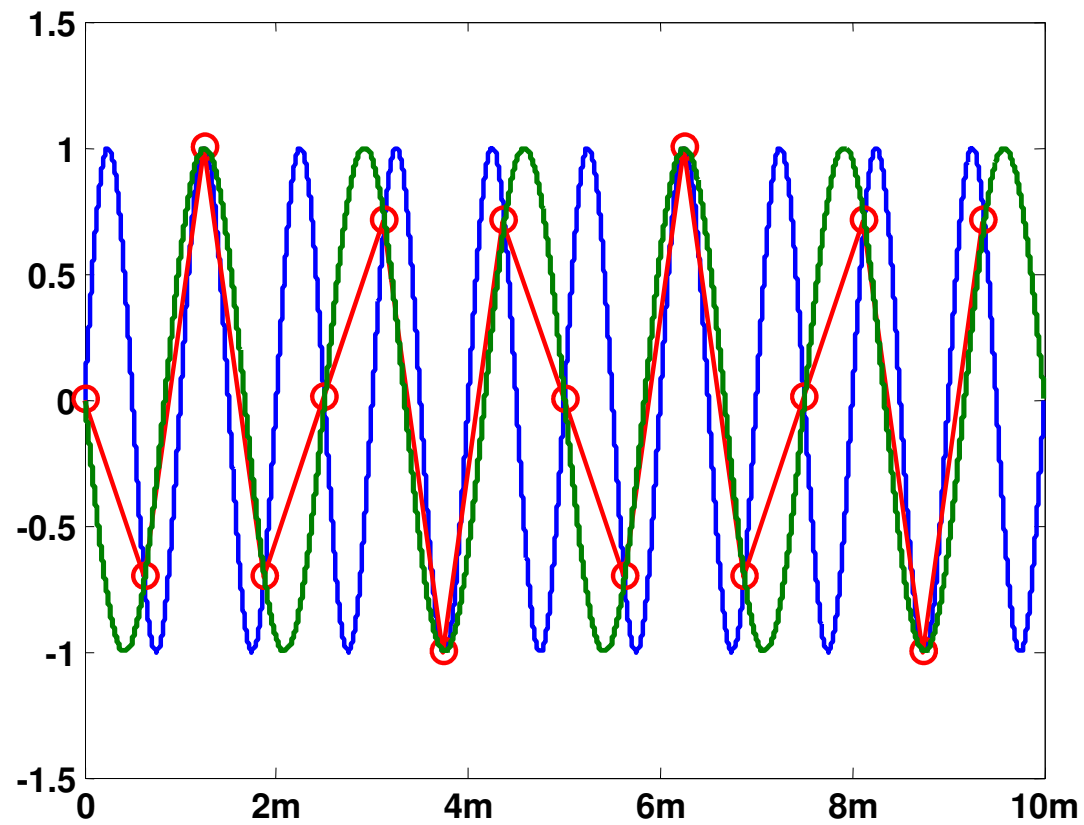
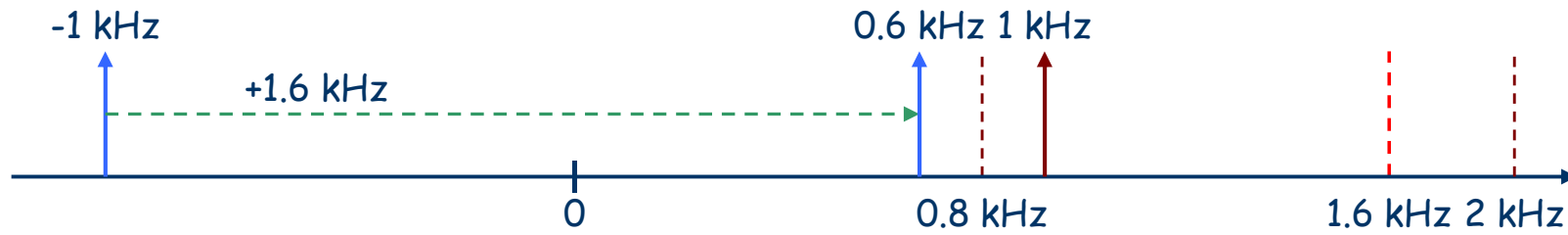
$$X_s(f) \sim \sum_{n=-\infty}^{+\infty} X(f - n \cdot f_s)$$



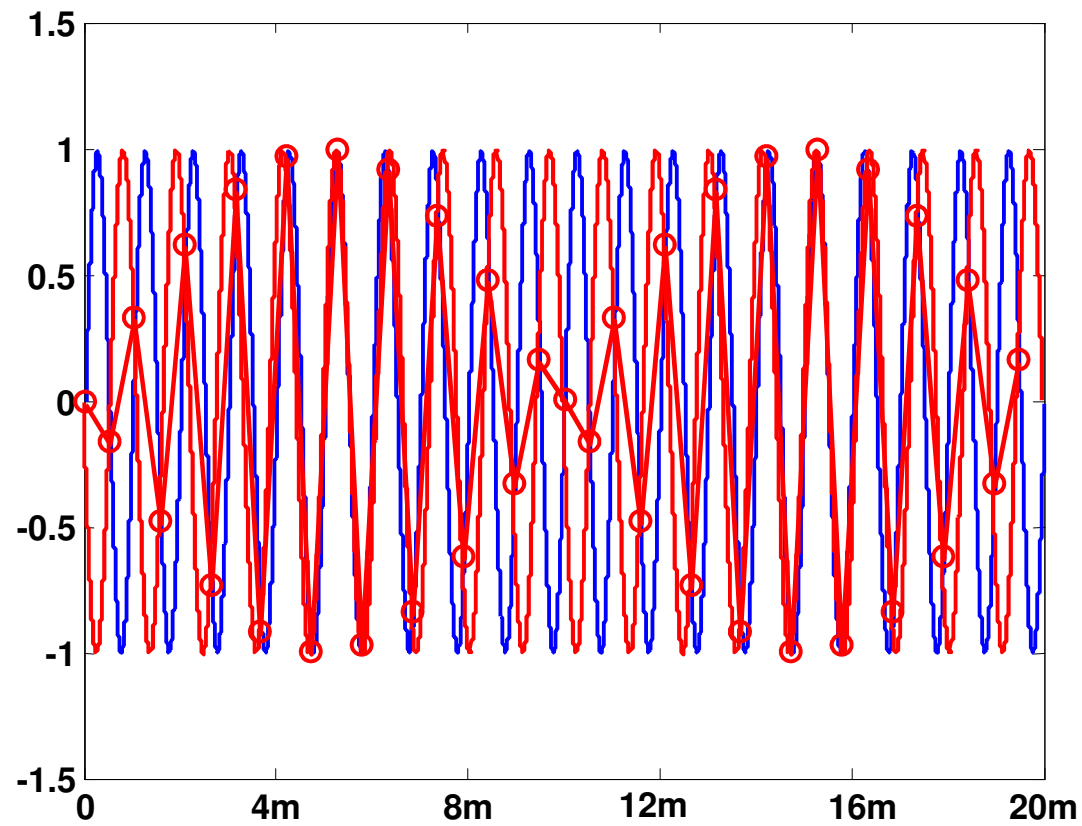


# Aliasing bardziej przystępnie...



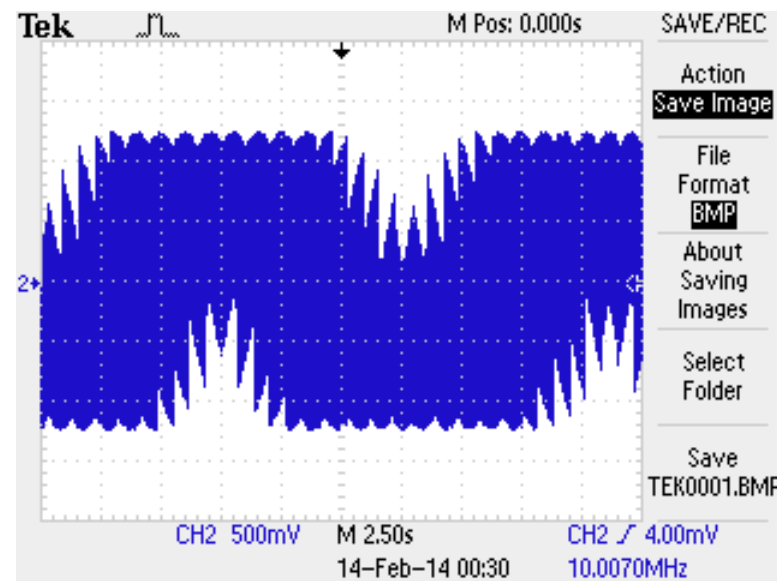
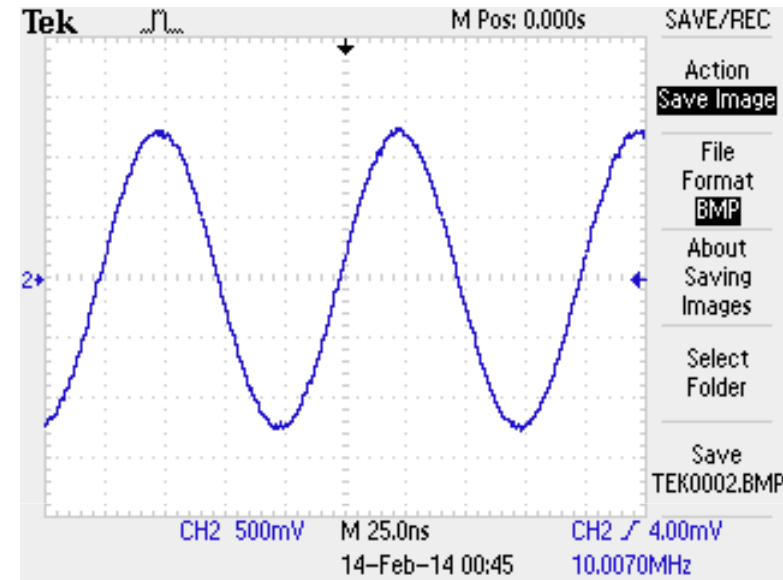
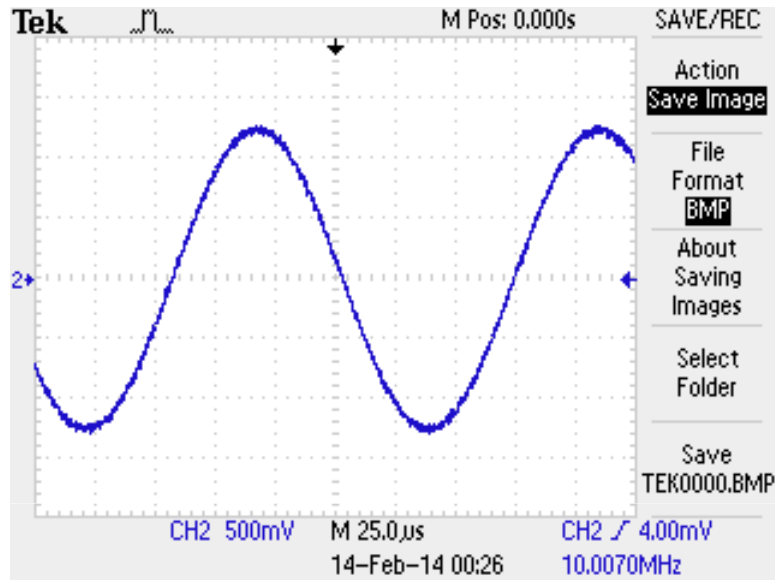








# Aliasing w praktyce można go spotkać w DSO

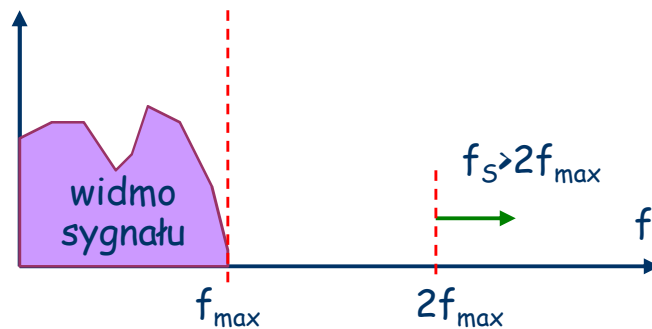




# Dlaczego?

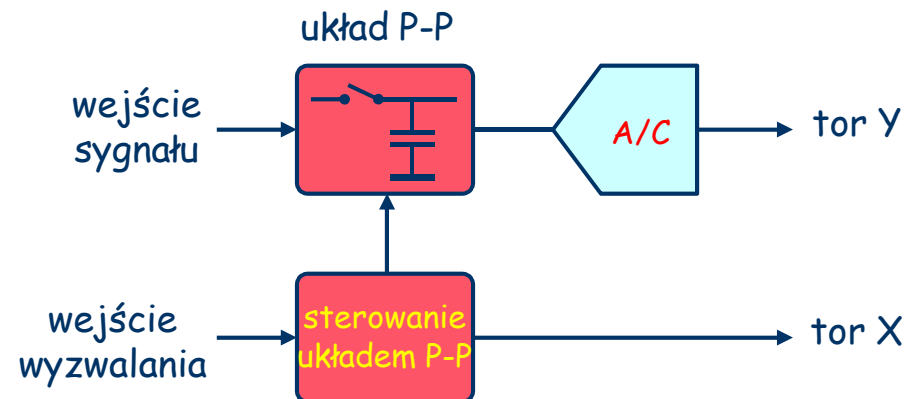
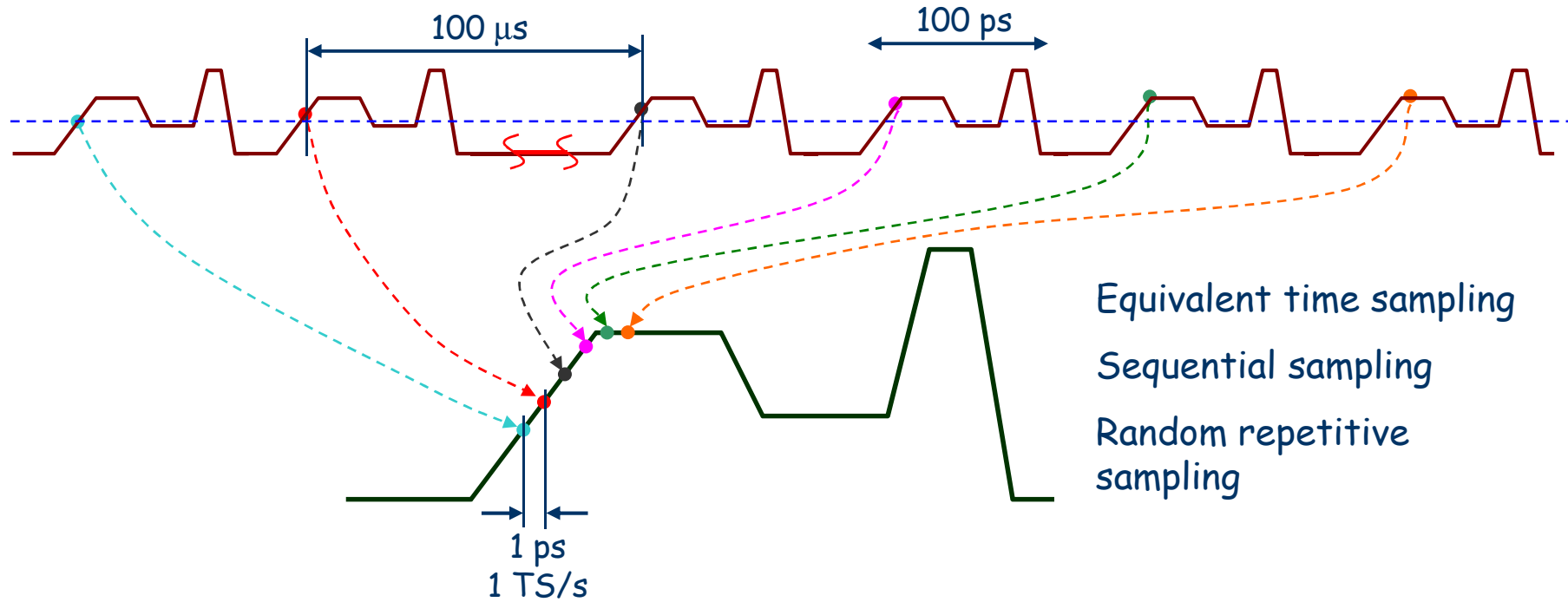
## Twierdzenie o próbkowaniu (w uproszczeniu)

Szybkość próbkowania musi być co najmniej dwukrotnie większa od najwyższej częstotliwości zawartej w sygnale.





# Czy można próbkować wolniej niż $2 \times f_{\max}$ ???



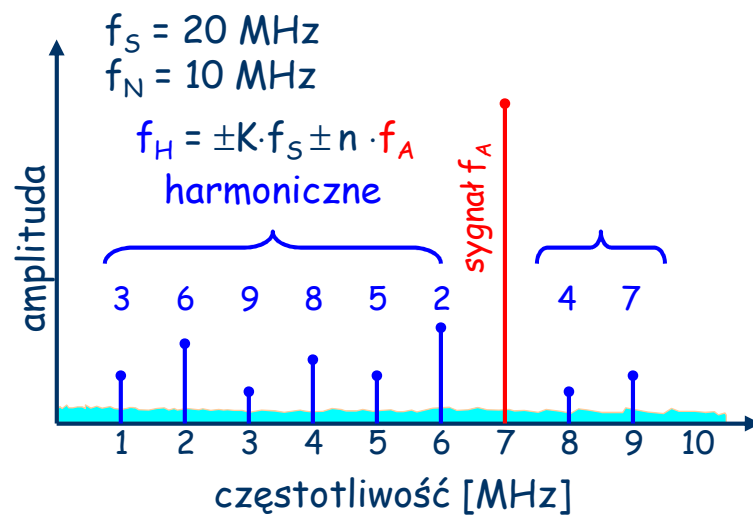


# Liczba bitów przetwornika

??? przecież to wynika z konstrukcji...

$$SNR = 20 \log \frac{S_{RMS}}{\epsilon_{RMS}} = 6.02 \cdot N + 1.76 \text{ [dB]}$$

$$N = \frac{SNR \text{ [dB]} - 1.76 \text{ [dB]}}{6.02 \text{ [dB]}}$$



SINAD

Signal-to-Noise-and-Distortion

$$SINAD = 10 \log \left( \frac{A_{A,RMS}^2}{\sum_i A_{H,RMS}^2 + N_{RMS}^2} \right) \text{ [dB]}$$

ENOB

Effective Number of Bits

$$ENOB = \frac{SINAD \text{ [dB]} - 1.76 \text{ [dB]}}{6.02 \text{ [dB]}}$$



# Błędy dynamiczne przy przetwarzaniu

## Niestołość apertury próbkowania (Aperture Jitter)

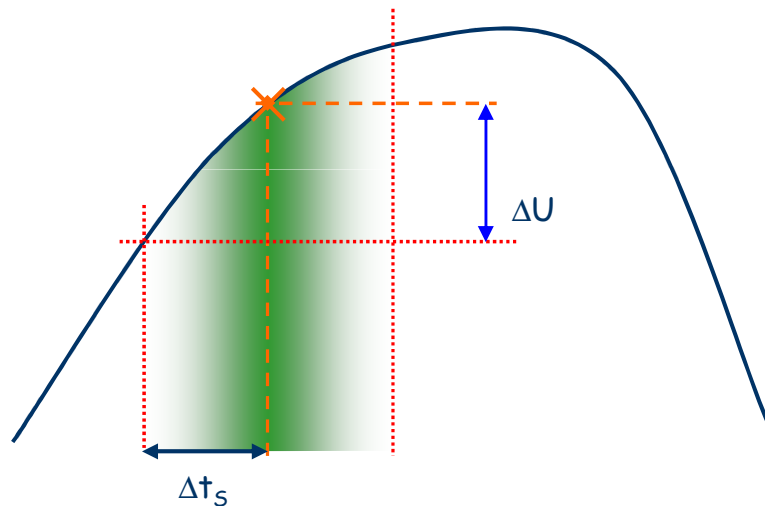
Oszacowanie dozwolonego jitteru  
(konserwatywne)

$$U = A \cdot \sin(\omega t)$$

$$\frac{dU}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \Rightarrow \left. \frac{dU}{dt} \right|_{MAX} = A \cdot \omega$$

$$\Delta U \approx \left. \frac{dU}{dt} \right|_{MAX} \cdot \Delta t_s = A_{MAX} \cdot \omega_{MAX} \cdot \Delta t_s$$

$$\Delta U < q(\text{LSB}) \Rightarrow \Delta t_s < \frac{q}{\omega_{MAX} \cdot FS/2}$$



N	$f_{MAX}$	$\Delta t_s$
8	10 MHz	125 ps
8	100 MHz	12.5 ps
8	1 GHz	1.25 ps
12	10 MHz	3.9 ps
16	10 MHz	490 fs