

Wzmacniacze operacyjne

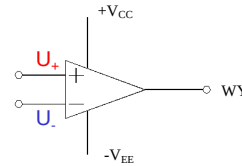
- należą do najbardziej uniwersalnych układów elektronicznych
- istnieją w postaci układów scalonych

Wzmacniacz operacyjny ma dwa wejścia:

(-) - odwracające fazę (sygnał wyjściowy jest przesunięty w fazie o 180° względem wejściowego),

(+) - nieodwracające fazy

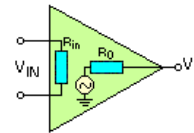
Realizuje funkcję: $U_{wy} = A \cdot (U_+ - U_-)$ gdzie A - wzmacnienie układu



- Napięcia zasilania $+V_{CC}$ i $-V_{EE}$ (z dwóch niezależnych źródeł)
- Wartości napięć U_+ , U_- i U_{wy} oraz V_{CC} i V_{EE} określone względem wspólnego poziomu odniesienia - masy

Idealny wzmacniacz operacyjny:

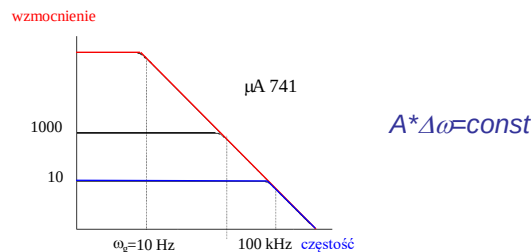
- **wzmocnienie napięciowe $A \rightarrow \infty$,**
- **rezystancje obu wejść względem masy są nieskończone,**
- **rezystancja między wejściami $R_{IN} \rightarrow \infty$ (układ nie pobiera prądu z wejść)**
- **rezystancja wyjściowa jest pomijalnie mała $R_O \rightarrow 0$,**
- **nieograniczone pasmo przenoszenia** (własności częstotściowe wzmacniacza nie mają wpływu na jego pracę)



Idealny wzmacniacz operacyjny nie istnieje!

Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne:

- Rezystancje wejściowe wynoszą: $10^4 \div 10^{12} \Omega$, wyjściowe: $1 \div 10^4 \Omega$.
- Wzmocnienie dla małych częstotliwości może sięgać 10^6
- Pasmo przenoszenia szerokie, choć zależne od efektywnego wzmocnienia

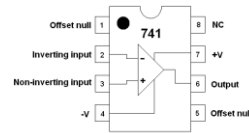
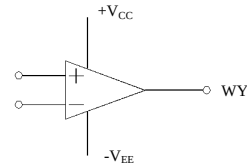
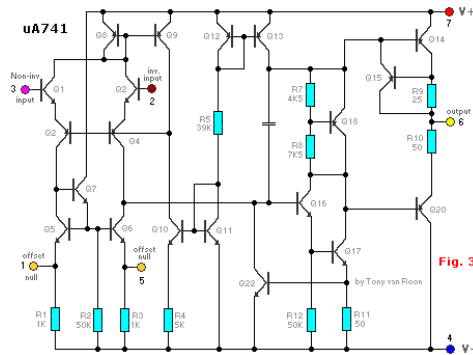


Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne dobrze spełniają założenia dla wzmacniaczy idealnych → model działania

np. LM 318: $A > 20\,000$, $R_{WE} = 10^{10} \Omega$, $R_{WY} = 100 \Omega$

niestety ograniczone pasmo przenoszenia ($A \cdot \Delta\omega = \text{const}$)

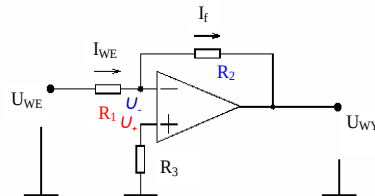
Wzmacniacz operacyjny $\mu A741$ - schemat



Parametry wzmacniacza $\mu A 741$:

- wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia $k = 100\ 000$
- rezystancja wejściowa $R_i = 2\ M\Omega$
- maksymalne różnicowe napięcie wyjściowe $= \pm 30\ V$
- napięcie zasilania $\pm 15\ V$
- pobór mocy $45\ mW$

Wzmacniacz odwracający fazę - podstawowy układ ze wzmacniaczem operacyjnym



Wzmocnienie ?

napięcie wyjściowe układu jest skończone, lecz wzmocnienie „idealne” $A \rightarrow \infty$, z równania $U_{WY} = A \cdot (U_+ - U_-)$ wynika, że $U_+ = U_-$ czyli $U_- = 0$

nieskończona rezystancja wejściowa $\rightarrow$ prądy wpływające do wejść pomijalne

równanie prądów w układzie:

$$I_{WE} = \frac{U_{WE} - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{WY}}{R_2} = I_f$$

Stąd efektywne wzmocnienie układu:

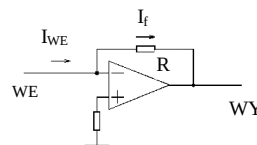
$$\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = -\frac{R_2}{R_1} = A$$

Ponieważ potencjał $U_- = 0 \rightarrow$ rezystancja wejściowa układu wynosi R_1

Konwerter prąd-napięcie

gdy rezystor $R_1 \rightarrow 0 \rightarrow U_{WY} = I_{WE} \cdot R$

Zastosowanie: źródła prądowe, np. fotodiody, fotopowielacze itp.



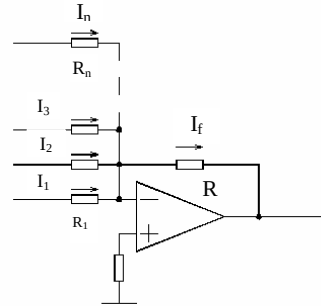
Wzmacniacz sumujący

w układzie wzmacniacza odwracającego fazę:

Suma prądów, które dopływają do wejścia odwracającego fazę jest równa prądowi sprzężenia zwrotnego:

$$\sum I_i = \sum \frac{U_{wei}}{R_i} = I_f = \frac{-U_{wy}}{R}$$

$$\text{Stąd: } U_{wy} = -R \sum \frac{U_{wei}}{R_i}$$



napięcie wyjściowe proporcjonalne do sumy napięć wejściowych z wagami R/R_i

Jeśli wszystkie oporniki będą miały wartość oporu R , to:

$$U_{wy} = -(U_{WE1} + U_{WE2} + \dots + U_{WEN})$$

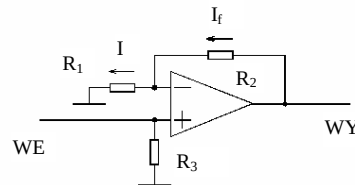
Jedno z zastosowań:

mikser akustyczny w studiach nagrań.

Przez regulację R_i ustala się wkład (głośność) każdego ze źródeł

Wzmacniacz nieodwracający fazy:

napięcie wejściowe podawane jest na wejście nieodwracające (+) wzmacniacza operacyjnego



Różnica napięć między wejściami wzmacniacza U_+ i U_- jest infinitezymalna.

→ prąd płynący w pętli sprzężenia zwrotnego: $I_f = \frac{U_{WY} - U_{WE}}{R_2} = \frac{U_{WE}}{R_1} = I$

wzmocnienie układu: $\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = A$

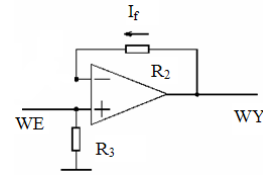
Rezystor R_3 określa rezystancję wejściową układu

Zastosowanie: współpraca z wysokooporowymi źródłami sygnału jak np. termopary

Wtórnik napięciowy:

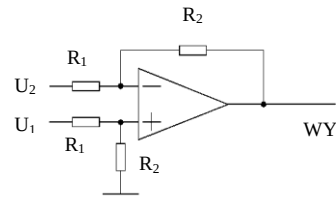
gdy w układzie wzmacniacza $R_1 \rightarrow \infty$, $\rightarrow A=1$,

lecz prąd wyjściowy może być znacznie większy niż prąd wejściowy

**Wzmacniacz różnicowy**

napięcie wyjściowe:

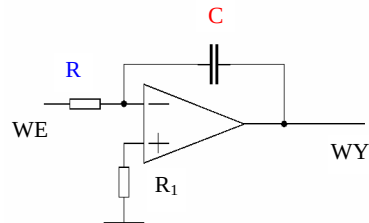
$$U_{WY} = \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_2)$$

**Inne operacje matematyczne na sygnałach****Wzmacniacz całkujący**

Równanie prądów w układzie ma postać:

$$I_{WE} = \frac{U_{WE}}{R} = I_f = \frac{dq}{dt} = -C \frac{d}{dt} U_{WY}$$

stąd: $U_{WY} = -\frac{1}{RC} \int U_{WE} dt$



Dla wejściowych sygnałów harmonicznych
(sinusoida) charakterystyka częstotliwościowa układu:

$$\left| \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \right| = \frac{1}{\omega RC}$$

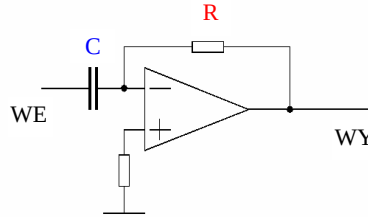
Inne operacje matematyczne na sygnałach c.d.

Wzmacniacz różniczkujący:

Zamiana kondensatora i opornika miejscami!

$$I_{WE} = \frac{dq}{dt} = C \frac{d}{dt} U_{WE} = I_f = -\frac{U_{WY}}{R}$$

$$\text{czyli: } U_{WY} = -RC \frac{d}{dt} U_{WE}$$



Charakterystyka częstotściowa tego układu dla wejściowych sygnałów harmonicznych:

$$\left| \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \right| = \omega RC$$

Zastosowanie wzmacniaczy całkujących i różniczkujących:

→ formowanie sygnałów analogowych

Inne operacje matematyczne na sygnałach c.d.

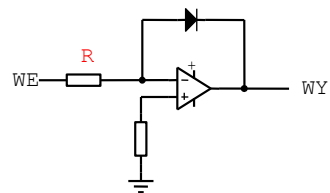
Wzmacniacz logarytmujący:

element o charakterystyce wykładniczej w pętli sprzężenia zwrotnego

$$I_{WE} = \frac{U_{WE}}{R} = I_f = I_0 \exp(-XU_{WY})$$

$$U_{WY} = -\frac{1}{X} \ln \left(\frac{U_{WE}}{RI_0} \right)$$

element nieliniowy: dioda, tranzystor bipolarny



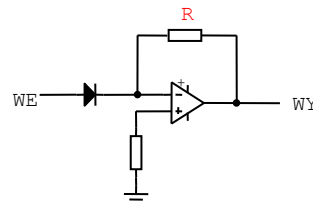
Wzmacniacze logarytmujące: przetwarzanie sygnałów o dużej dynamice zmian

Wzmacniacz antylogarytmujący:

zamiana miejscami rezystora i elementu nieliniowego

$$I_{WE} = I_0 \exp(XU_{WE}) = I_f = \frac{-U_{WY}}{R}$$

$$U_{WY} = -I_0 R \cdot \exp(XU_{WE})$$



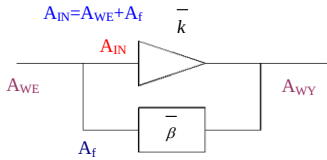
Układy mnożące: kombinacja wzmacniaczy sumujących, odejmujących, logarytmujących i antylogarytmujących

Sprężenie zwrotne:

- oddziaływanie skutku na przyczynę
- wpływa na własności układu elektronicznego

Wzmacniacz: podstawowy układ elektroniczny ze sprzężeniem zwrotnym.

Pętla sprzężenia zwrotnego przenosi część sygnału z wyjścia na wejście „IN” umożliwiając dodawanie do sygnału wejściowego „WE”.



Wzmocnienie wzmacniacza: $\bar{k} = A_{wy} / A_{in}$

Stopień sprzężenia zwrotnego: $\bar{\beta} = A_f / A_{wy}$

ponieważ: $A_{in} = A_{we} + A_f$

➤ wypadkowe wzmocnienie układu ze sprzężeniem:

$$k_f = \frac{A_{wy}}{A_{we}} = \frac{A_{wy}}{A_{in} - A_f} = \frac{\bar{k}}{1 - \bar{\beta}\bar{k}}$$

Wzmacniacz i układ sprzężenia zwrotnego **przesuwają fazę:**

$$\bar{k} = k \exp(j\phi) \quad \text{oraz} \quad \bar{\beta} = \beta \exp(j\psi)$$

Stąd, wzmocnienie wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym: $k_f = \frac{k(\cos\phi + j\sin\phi)}{1 - k\beta[\cos(\phi + \psi) + j\sin(\phi + \psi)]}$

Szczególne przypadki:

dodatnie sprzężenie zwrotne $\phi + \psi = 2n\pi$ $k_f = \frac{\bar{k}}{1 - k\beta}$ **zwiększenie** efektywnego wzmocnienia wzmacniacza

ujemne sprzężenie zwrotne $\phi + \psi = (2n+1)\pi$ $k_f = \frac{\bar{k}}{1 + k\beta}$ **zmniejszenie** efektywnego wzmocnienia wzmacniacza

Rodzaj sprzężenia zwrotnego wpływa na własności urządzeń elektronicznych

Stabilność wzmocnienia: stabilność bezwzględna := $\gamma = dk_f / dk$

$$\text{wrażliwość względna} := \gamma_r = \frac{dk_f / k_f}{dk / k}$$

Dla **dodatniego sprzężenia zwrotnego** $\gamma = \frac{1}{(1 - \beta k)^2}$ $\gamma_r = \frac{1}{1 - \beta k} > 1$

czyli **stabilność wzmacniacza pogarsza się**

Dla **ujemnego sprzężenia zwrotnego:** $\gamma = \frac{1}{(1 + \beta k)^2}$ $\gamma_r = \frac{1}{1 + \beta k} < 1$

czyli **ujemne sprzężenie zwrotne poprawia stabilność układu**

Jeśli duże wzmocnienia ($k \rightarrow \infty$) i ujemne sprzężenie, to $k_f \rightarrow 1/\beta$

Parametry układu są wyznaczone tylko przez parametry układu sprzężenia zwrotnego, które mogą być bardzo stabilne (elementy bierne)

Sprężenie zwrotne ustala pasmo transmisji układów elektronicznych
Charakterystyka wzmacniacza podobna jak dla filtra dolnoprzepustowego

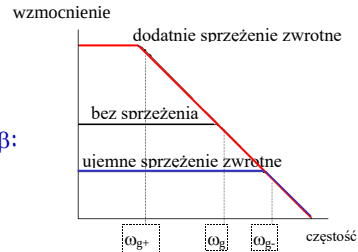
$$\bar{k}(\omega) = \frac{\bar{k}_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}}$$

Wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym β :

$$\bar{k}_f(\omega) = \frac{\bar{k}(\omega)}{1 - \beta \bar{k}(\omega)} = \frac{\frac{\bar{k}_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}}}{1 - \frac{\beta \bar{k}_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_g}}} = \frac{\bar{k}_0}{1 - \beta \bar{k}_0 + j \frac{\omega}{\omega_g}}$$

otrzymujemy wzmocnienie układu ze sprzężeniem:

$$\bar{k}_f(\omega) = \frac{\bar{k}_{f0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_{fg}}}$$



Oznaczając: $\omega_{fg} = \omega_g \cdot (1 - \beta \bar{k}_0)$ $k_{f0} = \bar{k}_0 / (1 - \beta \bar{k}_0)$

Ujemne sprzężenie zwrotne:

- ☐ zmniejszenie maks. wzmocnienia
- ☐ zwiększenie częstości granicznej

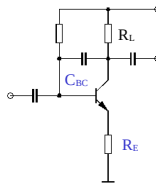
Dodatnie sprzężenie zwrotne:

- ☐ zwiększenie maks. wzmocnienia
- ☐ ograniczenie pasma przenoszenia

Ujemne sprzężenie - korzystna modyfikacja własności układu elektronicznego

- zwiększenie stabilności,
- redukcja współczynnika szumów,
- poszerzenie pasmo częstości

Zmniejszenie efektywnego współczynnika wzmocnienia nie jest ograniczeniem!

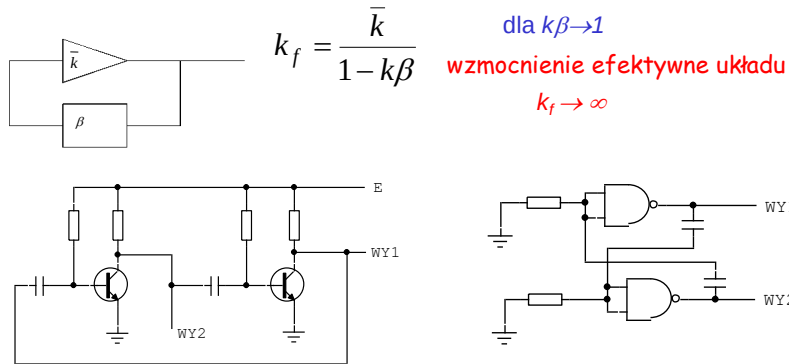


Ujemne sprzężenie zwrotne stosuje się w układach tranzystorowych do **stabilizacji punktu pracy** - za pomocą rezystora R_E umieszczanego w emiterze

Występuje w postaci **efektu Millera**, (pojemność C_{BC}) powodującego ograniczenie wzmocnienia dla wysokich częstości

Dodatnie sprzężenie zwrotne oddziałuje niekorzystnie na układ i w urządzeniach elektronicznych jest w zasadzie stosowane **tylko w generatorach**

Generatory - najczęściej wzmacniacze z silnym dodatnim sprzężeniem zwrotnym



Multiwibrator astabilny (generator przebiegów prostokątnych)

- połączone w pętli dwa wzmacniacze o wspólnym emiterze (każdy odwraca fazę)
oba tranzystory pracują w nasyceniu!
- dwie sprzężone bramki NAND

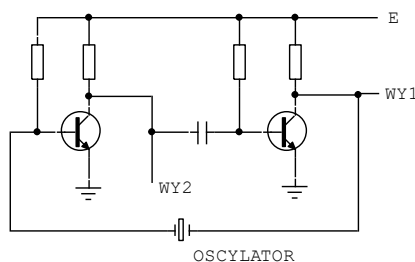
osc2.ckt

osc3.ckt

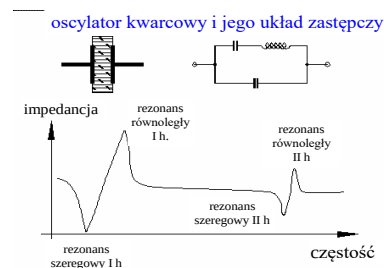
Oscylator kwarcowy w pętli rezonansowej sprzężenia zwrotnego

Zwiększenie stabilności częstotliwości oscylacji (drgania układów mechanicznych)

- Kryształy kwarcu mają własności **piezoelektryczne**
- Efekt piezoelektryczny jest odwracalny: przykładanie napięć do ścian kryształu piezoelektrycznego powoduje jego odkształcanie



OSCYLATOR



oscylator kwarcowy $\Leftrightarrow$ układ rezonansowy szeregowo-równoległy

Stabilność częstotliwości może przekraczać 10^{-7}

Podstawowe układy generatorów kwarcowych są nieprzestrzajalne

Rejestracja i analiza sygnałów analogowych

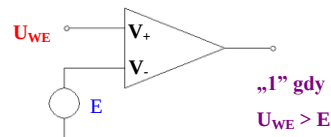
- Komparator analogowy
- Przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC)
- Przetwornik cyfrowo-analogowy (DAC)

Komparator analogowy:

- układ pośredniczący między elektroniką analogową i cyfrową

Komparator analogowy służy do porównywania napięć analogowych

WEJŚCIE



Komparator - specyficzny rodzaj wzmacniacza porównującego dwa napięcia:

- V_+ (na wejściu nieodwracającym fazy) i
- V_- (na wejściu odwracającym fazę).

Jeśli zachodzi relacja: $V_+ > V_-$, to stan wyjściu jest jedynką logiczną

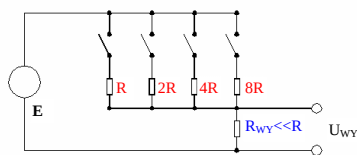
Uwaga:

Komparatora analogowego nie należy mylić z komparatorem cyfrowym, który służy do porównywania słów logicznych

Przetwornik cyfrowo-analogowy

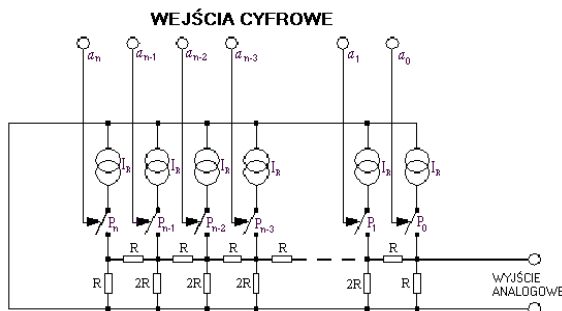
Przetwornik cyfrowo-analogowy (DAC - Digital - Analog Converter)

- wytwarza napięcie proporcjonalne do wartości słowa logicznego na wejściu



Działanie najprostszych (2-4 -bitowych) opiera się na **zasadzie dzielnika napięcia**
Nieliniowe działanie dzielnika liczby bitów

Wielobitowe (do 18 bitów) przetworniki cyfrowo-analogowe buduje się w oparciu o drabinkę rezystorów zasilane za pomocą bardzo stabilnych źródeł prądowych



$$U_{wy} = \frac{2}{3} I_R \cdot R \cdot \sum_{i=0}^n \frac{P_i}{2^i}$$

Przetworniki cyfrowo - analogowe => do budowy programowalnych generatorów przebiegów analogowych, sterowników analogowych, itd

Przetwornik analogowo-cyfrowy

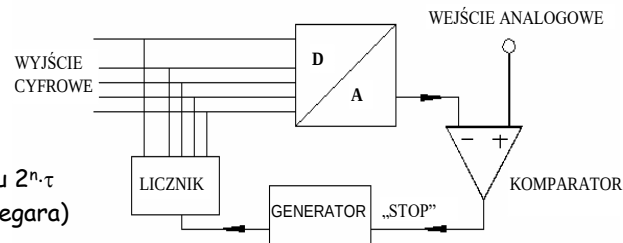
Przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC - Analog - Digital Converter)

➤ zamiana wartości napięcia (lub natężenia prądu) wejściowego na słowo logiczne

Powolna konwersja:

przy n -bitowym słowie

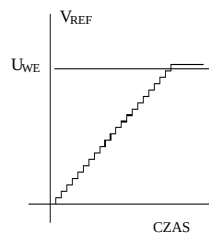
wyściowym wymaga czasu $2^n \cdot \tau$
(τ czas trwania impulsu zegara)



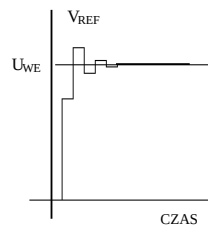
Przetwornik kompensacyjny:

czas konwersji wynosi $n \cdot \tau$

=> rzędu kilkudziesięciu μs

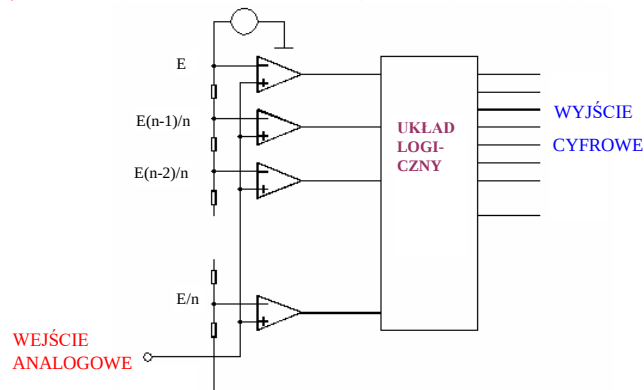


przetwornik kompensacyjny



Im mniejsza dokładność przetwarzania tym większa szybkość konwersji

Najszybsze są przetworniki analogowo-cyfrowe typu flash

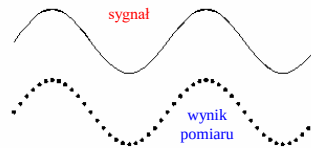
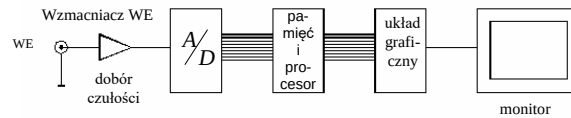


- Dokładność przetworników 10 bitów przy częstotliwości próbkowania 1 GHz
(Hewlett-Packard, Tektronix, National Instruments, Aguris)
- Możliwe tworzenie układów przetworników pracujących sekwencyjnie
➔ częstość próbkowania sięga 10 GHz
- Przetworniki typu „flash” o większej liczbie bitów są wolniejsze:
12 bitów - 100 MHz, 14 bitów - 50 MHz (firma Ga-Ge)

Przetwornik analogowo cyfrowy - podstawowy element układów pomiarowych

Przykład: **oscylloskop cyfrowy**

UPROSZCZONY SCHEMAT OSCYLOSKOPU CYFROWEGO



Szybkie przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe: podstawowe urządzenia do cyfrowego zapisu, przetwarzania i odtwarzania obrazu i dźwięku