

Wzmacniacz operacyjny.

Podsumowanie nt kilku obecnych trendów w przemyśle mikroelektronicznym.

Tomasz Słupiński

31.05.2016

Pracownia Fizyczna i Elektroniczna,
dla Inżynierii Nanostruktur oraz
Energetyki i Chemii Jądrowej

Wykład wykorzystuje materiały z wykładów Indywidualnej Pracowni Elektronicznej Wydz. Fizyki UW

Plan

1. Wzmacniacz operacyjny – własności
 2. Sprzężenie zwrotne
 3. Podstawowe układy z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych
 - wzmacniacz odwracający i nieodwracający
 - układ różniczkujący i całkujący
 - analogowy układ sumujący
 - układy logarytmujący i antylogarytmujący
 4. Bardziej zaawansowane układy ze wzmacniaczem operacyjnym
 - zasilacz stabilizowany napięcia stałego
 - źródło prądowe
 - generator Wiena – przykład sprzężenia zwrotnego dodatniego
 - przetworniki analogowo-cyfrowe ADC i cyfrowo-analogowe DAC – funkcja komparatora
 - wzmacniacze pomiarowe (np. termopara, fotodioda)
 5. Omówienie ćwiczenia C9
-

c.d. Plan

6. Kilka słów o technologiach półprzewodników, ważnych trendach w elektronice i organizacji przemysłu

- technologie półprzewodników, czyli jak się robi układy scalone
- karty katalogowe elementów - źródła informacji o własnościach i przykładowych zastosowaniach elementów elektronicznych
- symulator TI-Tina działania układów elektronicznych firmy Texas Instruments wykorzystujący język symulacji układów elektronicznych SPICE
- tranzystory unipolarne (MOS, FET) zastępują tranzystory bipolarne (nnp, pnp) – gdzie tylko się da !
- integracja coraz większej ilości funkcji w układach scalonych
- trendy w miniaturyzacji – skalowanie tranzystorów

Wzmacniacz operacyjny – podstawowe własności

- uniwersalny wzmacniacz napięcia stałego lub zmiennego
- dwa wejścia U_+ i U_- , jedno wyjście U_{wy}

- realizuje funkcję: $U_{wy} = A \cdot (U_+ - U_-)$

- bardzo duże wzmocnienie napięciowe A
- zanedbywalnie małe prądy wejściowe (bardzo duża oporność wejściowa)
- bardzo mała oporność wyjściowa
- zasilany przeważnie dwoma napięciami – dodatnim: $+V_{cc}$ i ujemnym: $-V_{ee}$

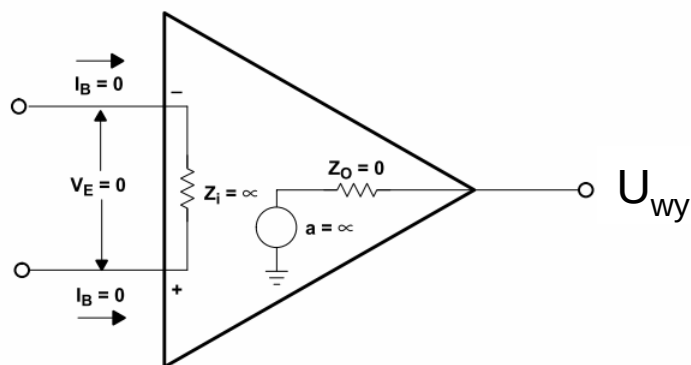
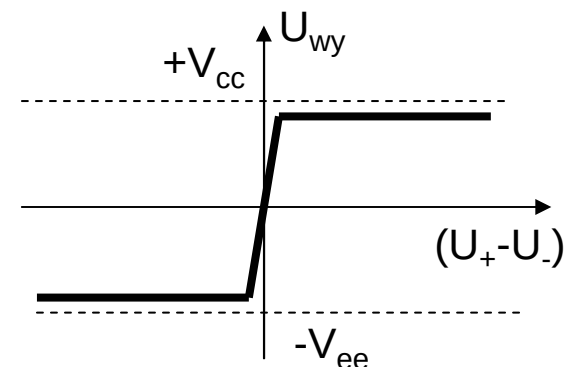


Figure 3-1. The Ideal Op Amp

Prąd wejściowy:

Impedancja wejściowa:

Impedancja wyjściowa:

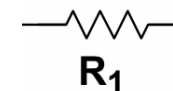
Wzmocnienie:

Ograniczenie napięcia wyjściowego:

$$-V_{ee} < U_{wy} < +V_{cc}$$

PARAMETER NAME	PARAMETERS SYMBOL	VALUE
Input current	I_{IN}	0
Input offset voltage	V_{OS}	0
Input impedance	Z_{IN}	∞
Output impedance	Z_{OUT}	0
Gain	a	∞

Uwaga: w lit. ang. oporność jest przedstawiona na schematach jako:



Wzmacniacze operacyjne

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

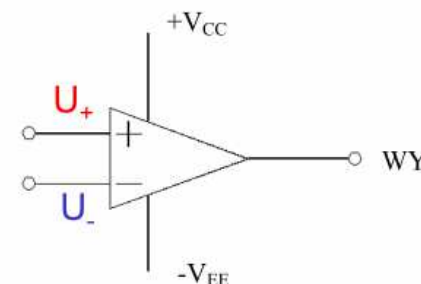
Każdy wzmacniacz operacyjny dwa wejścia:

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

(+) - nieodwracające fazy

Realizuje funkcję:

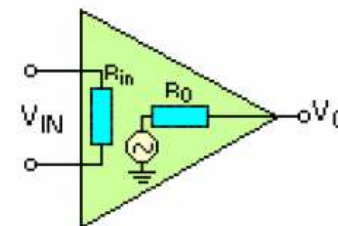
$$U_{WY} = A \cdot (U_+ - U_-) \quad \text{gdzie } A - \text{wzmocnienie układu}$$



- Zasilanie dwubatteryjne
- 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:

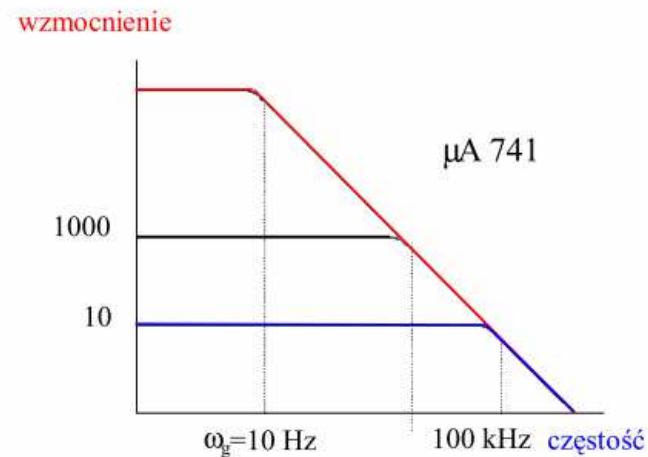
- wzmocnienie napięciowe $A \rightarrow \infty$,
- rezystancje obu wejść względem masy są nieskończone,
- rezystancja między wejściami $R_{WE} \rightarrow \infty$ (układ nie pobiera prądu z wejść)
- rezystancja wyjściowa jest pomijalnie mała $R_{WY} \rightarrow 0$,
- nieograniczone pasmo przenoszenia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



Idealny wzmacniacz operacyjny nie istnieje!

Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne:

- Rezystancje wejściowe wynoszą : $10^4 - 10^{12} \Omega$, wyjściowe : $1 - 10^4 \Omega$.
- Wzmocnienie dla małych częstotliwości może sięgać 10^6 (szybko spada z częstotliwością)
- Budując wzmacniacz o wzmocnieniu 10 możemy określić jego charakterystykę częstotliwościową i pasmo przenoszenia



Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne wystarczająco dobrze spełniają założenia dla wzmacniaczy idealnych, by model na nich oparty był stosowalny

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

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

Sprężenie zwrotne

S.z. - podawanie części sygnału wyjściowego ze wzmacniacza na wejście tego wzmacniacza

S.z. ujemne – gdy sygnał wyjściowy podawany na wejście odwracające U_-

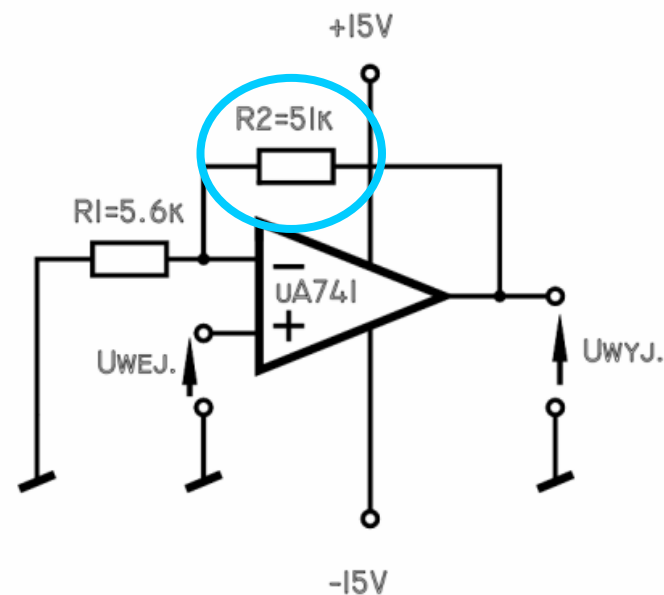
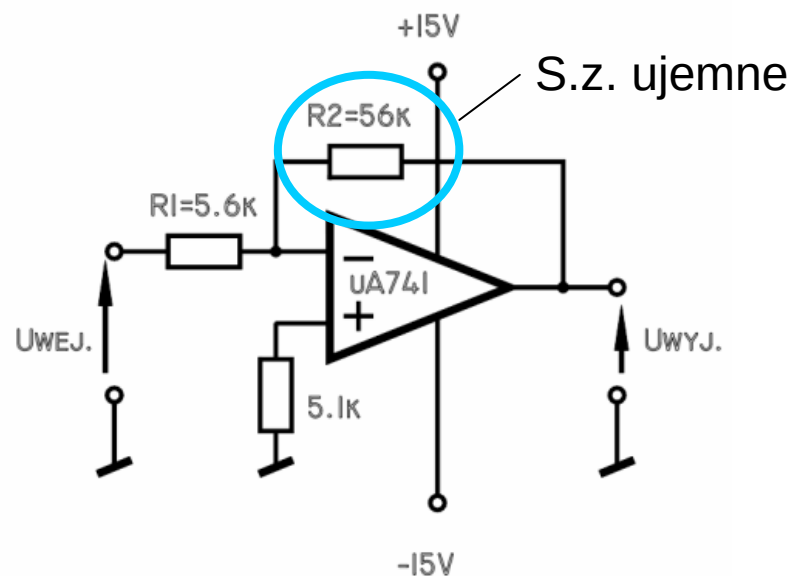
wtedy:

- wzmacnienie układu ulega zmniejszeniu
- można kształtować charakterystykę częstotliwościową układu, tzn. zależność transmitancji od częstotliwości

S.z. dodatnie – gdy sygnał wyjściowy jest podawany na wejście U_+

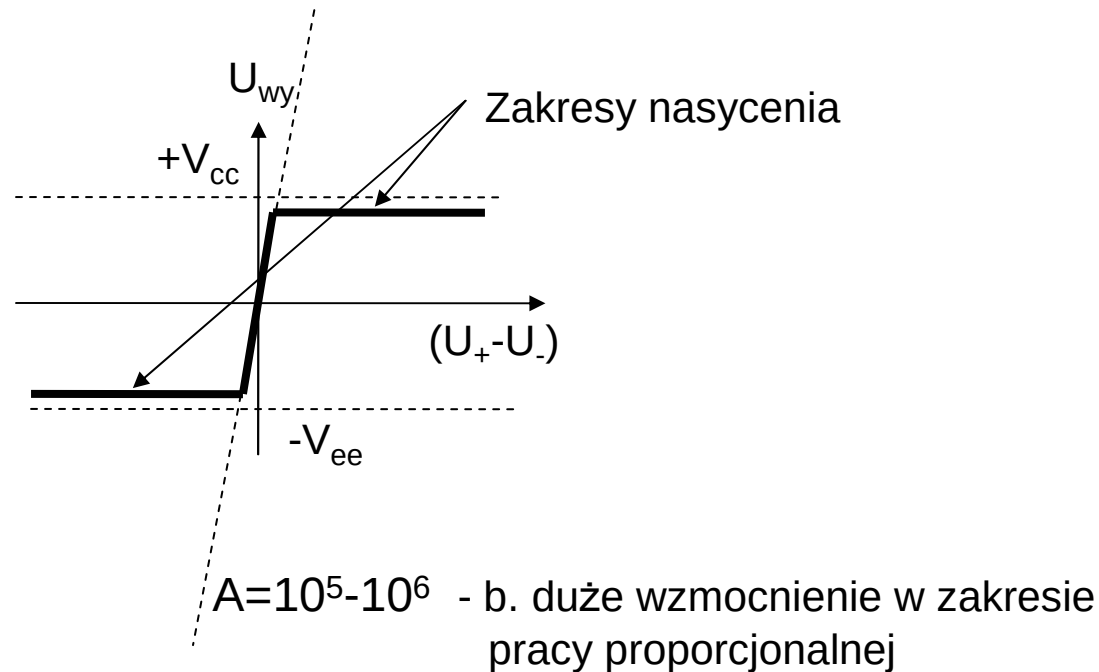
wtedy:

- wzmacniacz wzbudza się tzn. może generować sygnały wyjściowe bez podania sygnału zewnętrznego na wejście, pełni funkcję generatora (będzie zademonstrowany przykład z generatorem Wiena)



W zakresie pracy proporcjonalnej zachodzi przybliżona równość

$$U_+ \approx U_-$$



Jeśli np. $V_{cc}=V_{ee}=10V$, to zakres $(U_+ - U_-)$ pracy proporcjonalnej w przedziale ok. $-100 \mu V - +100 \mu V$

Układ ze sprzężeniem zwrotnym ujemnym przeważnie pracuje w zakresie proporcjonalnym.

Wzmacniacz operacyjny $\mu A741$ - schemat

Wzmacniacz
różnicowy

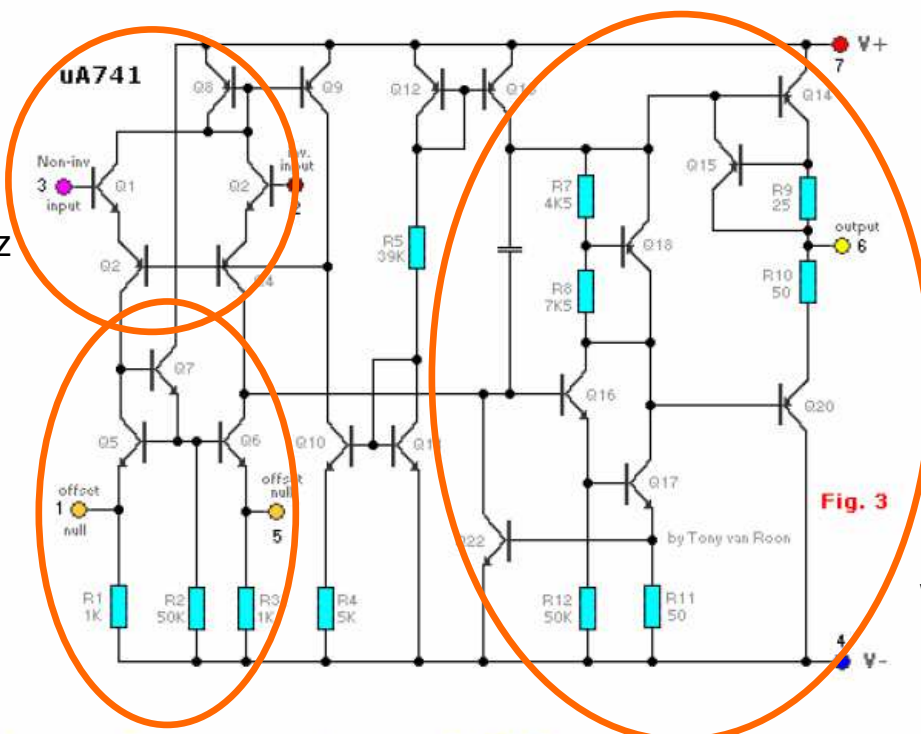
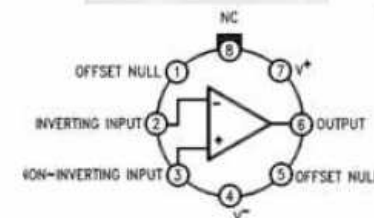


Fig. 3

Kolejne stopnie
wzmocnienia

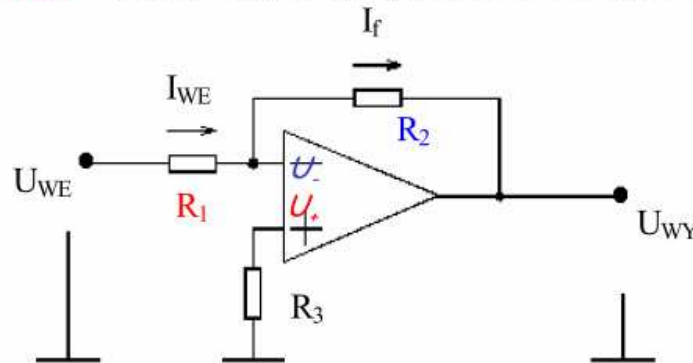


Parametry wzmacniacza $\mu A 741$:

- wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia $k = 100\ 000$
- rezystancja wejściowa $R_i = 2\ M\Omega$
- maksymalne różnicowe napięcie wejściowe $= \pm 30\ V$
- 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, że $U_- = 0$
- 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:**

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

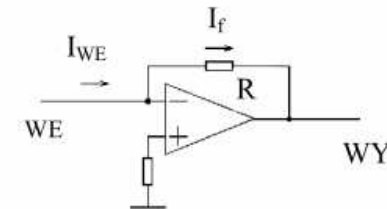
Ponieważ potencjał $U_- = 0$, rezystancja wejściowa układu wynosi R_1

Konwerter prąd-napięcie

gdy w układzie rezystor R_1 nie istnieje ($R_1 \rightarrow 0$) $\Rightarrow U_{WY} = I_{WE} \cdot R_2$

Zastosowanie:

do współpracy ze źródłami prądowymi, np. fotodiody, fotopowielacze



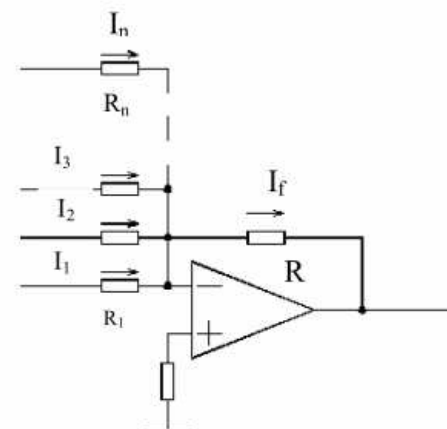
Wzmacniacz sumujący

w układzie wzmacniacza odwracającego fazę:

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

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

stąd:
$$U_{wy} = -R \sum \frac{U_{WEi}}{R_i}$$



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

Jeśli wszystkie oporniki będą miały wartość oporu R , to

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

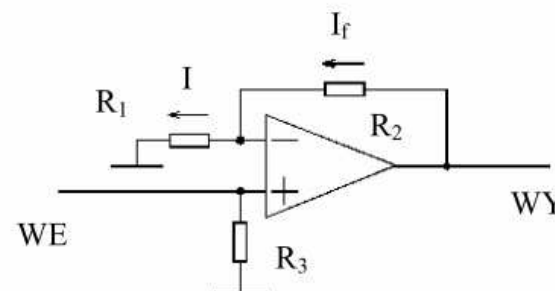
Jedno z zastosowań:

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

Rezystor R_3 określa rezystancję wejściową układu

Zastosowanie: współpraca z wysokooporowymi źródłami sygnału jak np. termopary

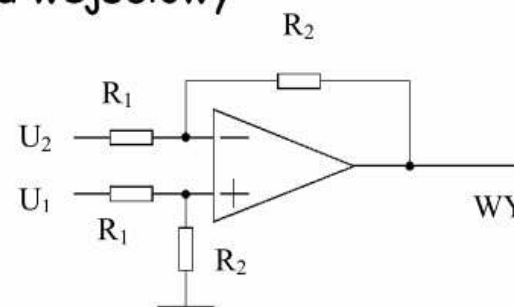
Wtórnik napięciowy:

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

lecz prąd wyjściowy może być znacznie większy niż prąd wejściowy

Wzmacniacz różnicowy
napięcie wyjściowe:

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



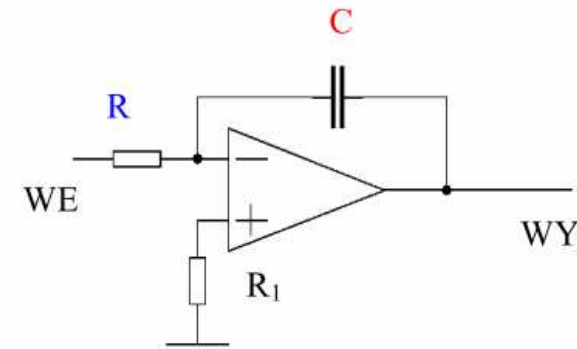
Inne operacje matematyczne na sygnałach

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



- bo: $U_+ \approx U_- \approx 0 \text{ V}$

Dla wejściowych sygnałów harmoniczných
(sinusoida) charakterystyka częstotliwościowa układu:

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

We wzorach na wzmocnienie wzmacniaczy odwracającego i nieodwracającego w ogólności oporności należy zastąpić impedancjami (gdy podłączane są kondensatory lub cewki indukcyjne)

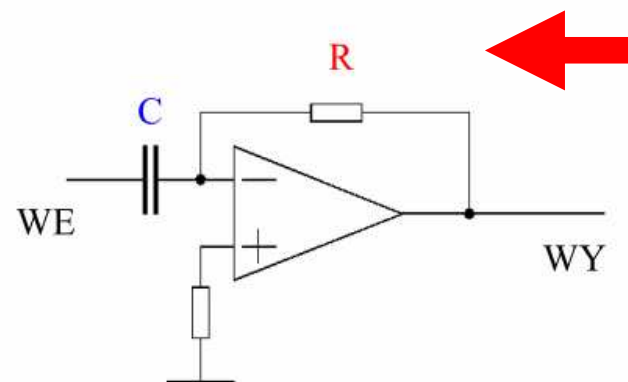
Inne operacje matematyczne na sygnałach c.d.

Wzmacniacz różniczkujący:

Zamiana kondensatora i opornika miejscami!

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

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



$$U_+ \approx U_- \approx 0 \text{ V}$$

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.

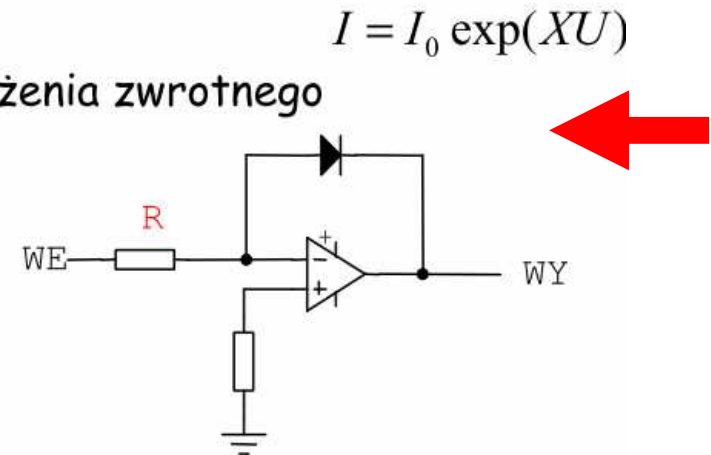
Wzmacniacz logarytmujący:

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



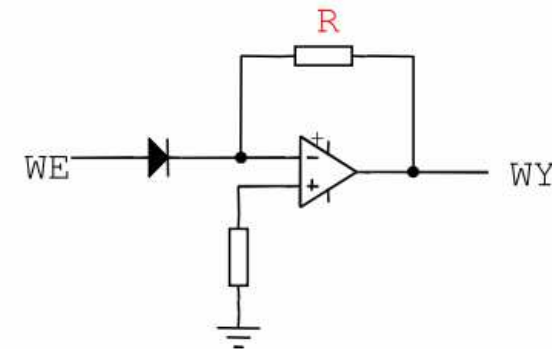
Wzmacniacze logarytmujące: przetwarzanie sygnałów o dużej dynamice zmian

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

- gdzie X - współczynnik wynikający ze wzoru diodowego Shockley'a

Podsumowanie dot. wzmacniacza operacyjnego

- wzmacniacz operacyjny to układ scalony wzmacniacza napięć stałych lub zmiennych o bardzo uniwersalnym charakterze,
- posiada dwa wejścia (oznaczane U_+ i U_- , zwane wejściem nieodwracającym i odwracającym) i jedno wyjście, jest zasilany przeważnie dwoma napięciami $+V_{cc}$ i $-V_{EE}$
- wzmacniacz realizuje następującą funkcję: napięcie wyjściowe $U_{wyj} = A \cdot (U_+ - U_-)$
- współczynnik wzmocnienia przyjmuje bardzo duże wartości $A \sim 10^6$
- minimalne i maksymalne napięcie wyjściowe jest ograniczone przez wartości napięć zasilania $+V_{cc}$ i $-V_{EE}$.
- w normalnych warunkach pracy przyjmuje się, że napięcia wejściowe są w przybliżeniu sobie równe, oraz że do wejść wpływają prądy w przybliżeniu zerowe,
- warunki pracy wzmacniacza operacyjnego ustala się poprzez stosowanie „sprzężenia zwrotnego”, czyli gałęzi obwodu łączącej wyjście z wejściem (przeważnie odwracającym), która podaje część sygnału wyjściowego na wejście wzmacniacza. Rodzaj obwodu użytego jako sprzężenie zwrotne wyznacza jakie funkcje realizuje układ ze wzmacniaczem operacyjnym,
- w oparciu o wzmacniacze operacyjne buduje się filtry RLC (filtry aktywne), które są równocześnie układami różniczkującymi lub całkującymi, wzmacniacze odwracające fazę lub nieodwracające, układy sumujące sygnały, źródła napięciowe i prądowe, wzmacniacze pomiarowe (np. wstępnego wzmocnienia niewielkich sygnałów z czujników pomiarowych), generatory sygnału zmiennego i wiele innych.

Ćwiczenie „Wzmacniacz operacyjny”.

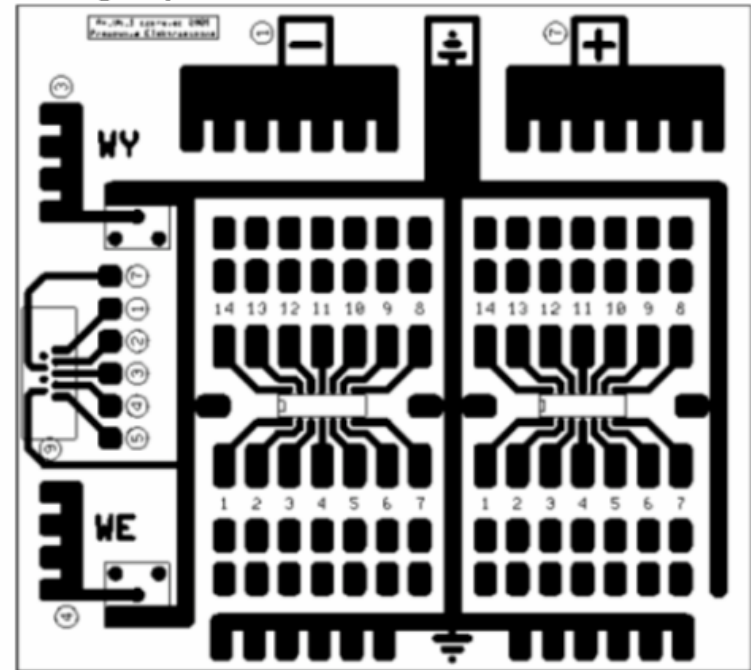
Zbadanie charakterystyk dwóch układów ze wzmacniaczem operacyjnym:

- wzmacniacz szerokopasmowy (odwracający lub nieodwracający),
- wzmacniacz kształtujący (różniczkujący lub całkujący).

Patrz instrukcja do ćwiczenia
„Analogowe układy scalone”

- pomiar charakterystyki amplitudowej:
 $U_{wy}=f(U_{we})$ przy częstotliwości 1000 Hz
- pomiar charakterystyki częstotściowej:

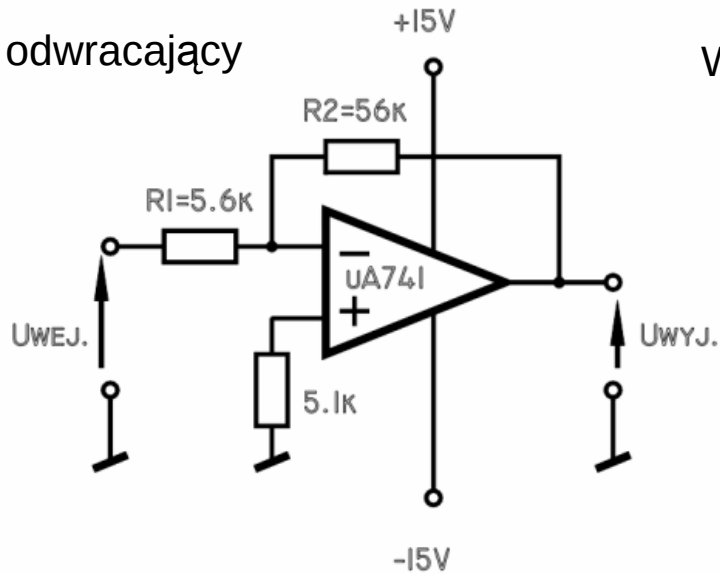
$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = f(\nu)$$



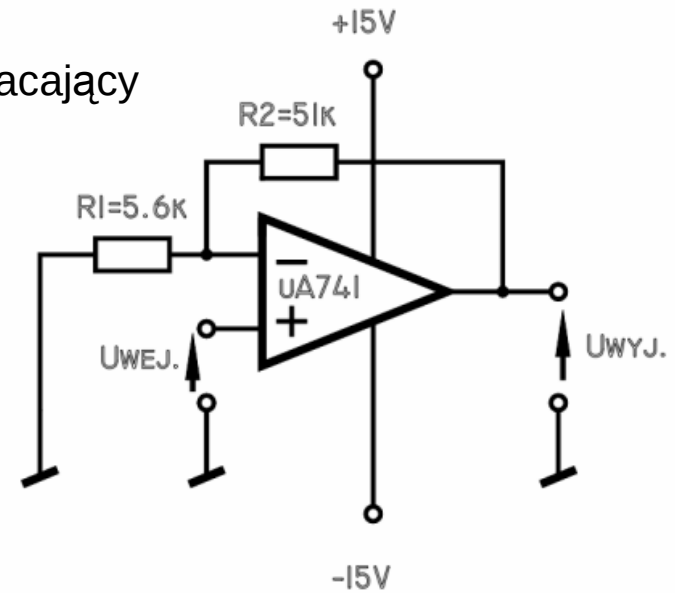
Charakterystykę amplitudową przedstawiamy na skali liniowej,
charakterystykę częstotściową - na skali logarytmiczno-logarytmicznej

Układy badane w C9

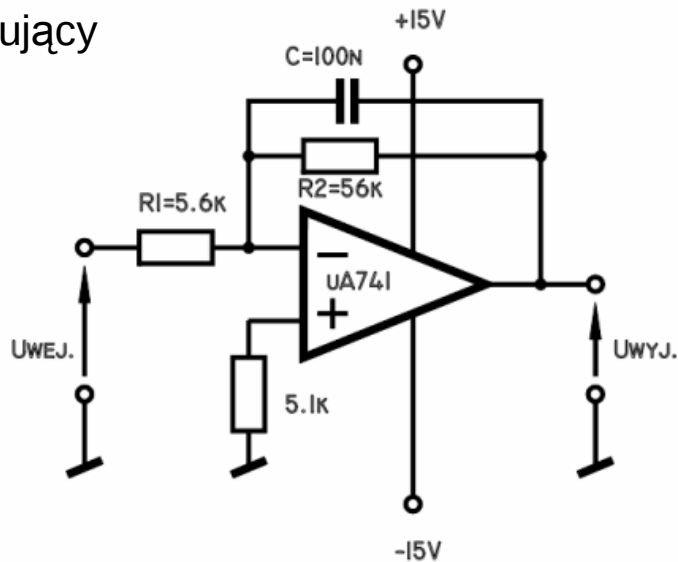
Wzm. odwracający



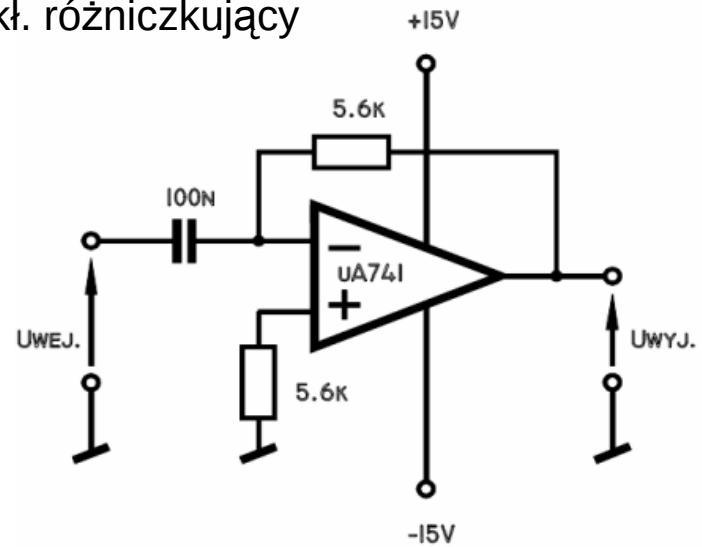
Wzm. nieodwracający



Ukł. całkujący



Ukł. różniczkujący



Będą wyznaczone charakterystyki częstotściowe i porównywane z teoretycznymi (dla napięć sinusoidalnych) oraz obserwowany charakter różniczkujący lub całkujący dla napięć prostokątnego lub trójkątnego.

Zasilacz stabilizowany napięcia stałego

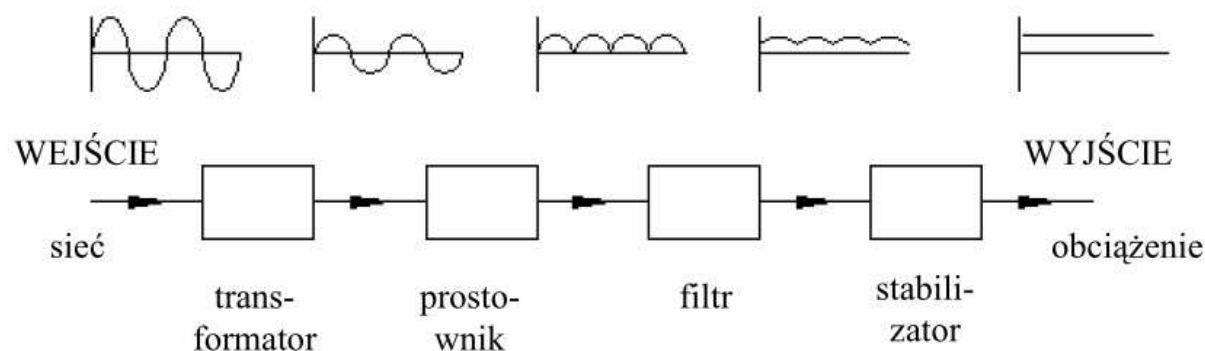
Zasilacze

Źródło energii elektrycznej dla układu wykonawczego:

- źródło napięciowe,
- źródło prądowe (ogranicznik prądu),
- zabezpieczenie przed przegrzaniem, zapaleniem, porażeniem itp.

Zasilacz przetwarza energię elektryczną pobieraną z sieci

Standardowy schemat blokowy zasilacza:



Transformator:

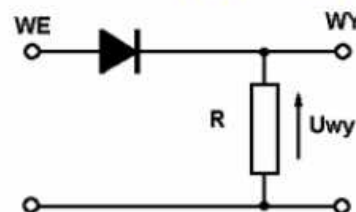
- dopasowanie przemiennego napięcia sieci do napięcia wyjściowego zasilacza
- galwaniczna izolacja układu elektronicznego od sieci

Zasilacz stabilizowany napięcia stałego

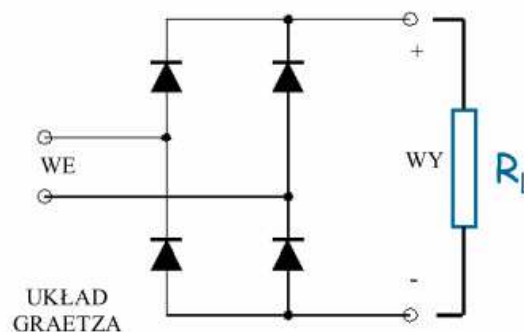
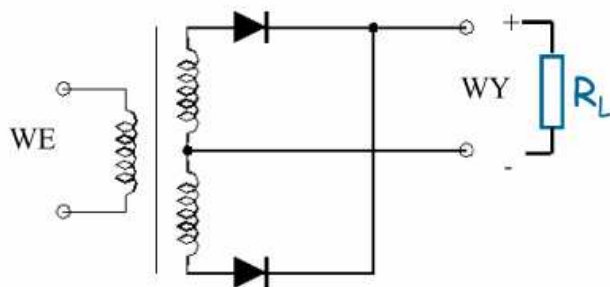
Prostownik:

przekształcenie prądu przemiennego na prąd zmienny płynący w jednym kierunku

najprostszy prostownik jednopółkowy:



Prostownik dwupółkowy: większa wydajność, większa zawartość składowej stałej w widmie wyjściowym, podstawowa składowa pulsacji wynosi 100 Hz.



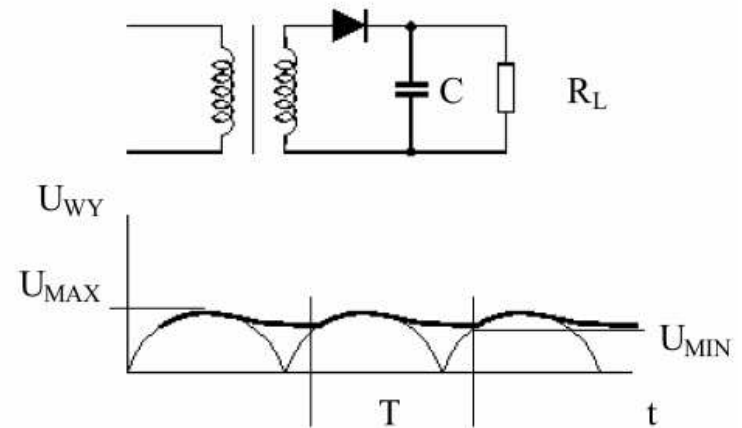
podstawowy układ:
mostek Graetza

Karol Pollak
prostowniczy układ
mostkowy
patent - 1895

Zasilacz napięcia stałego

Filtry dolnoprzepustowe:

typu RC lub typu RL: wyeliminowanie pulsacji



Stała czasowa RC musi być większa od okresu pulsacji

Stabilizatory napięcia

Zasada: dzielnik napięciowy

stabilizatory **szeregowe** i **równoległe**:

zależnie od położenia regulatora względem wyjścia

Stabilizatory równoległe:

Najprostszy: **stabilizator z diodą Zenera**, $U_{WY} \approx U_Z$

Stopień stabilizacji zależy od stabilności obciążenia

Wzmacniacz o wspólnym kolektorze

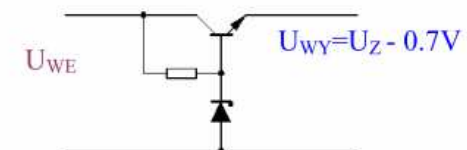
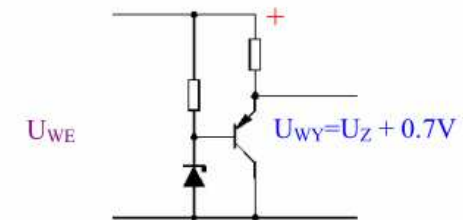
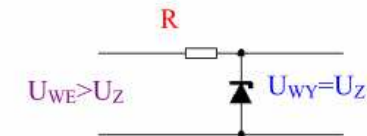
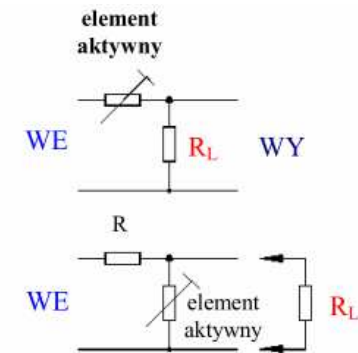
- dzielnik napięcia z diodą Zenera pełni rolę **źródła napięcia odniesienia**
- element aktywny - tranzystor

Wada stabilizatorów równoległych:

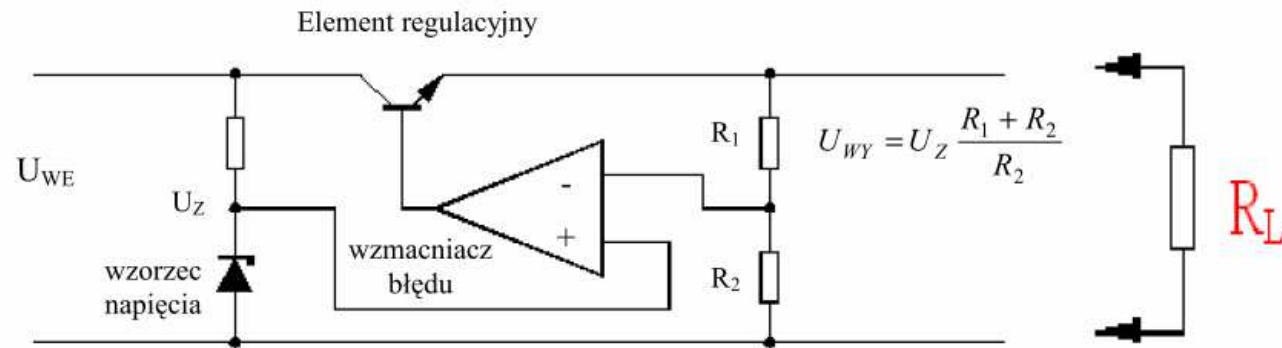
stały pobór prądu ze źródła napięcia bez obciążenia wyjścia

Stabilizatory szeregowe:

- niewielki pobór prądu ze źródła bez obciążenia wyjścia (wspólny kolektor → brak wzmocnienia napięciowego)
- wahania napięcia wyjściowego ze zmianą obciążenia i temperatury!



Stabilizatory napięcia ze wzmacniaczami błędów - znacznie bardziej dokładne



- Próbkowanie napięcia wyjściowego
- Porównywane napięcie wyjściowe we wzmacniaczu błędów z napięciem wzorcowym
- wzmacniacz steruje tranzystorem (regulacja rezystancji tranzystora)
- zmniejszenie zależności napięcia od temperatury tranzystora

układ pozwala na stabilizację dowolnego napięcia $U_{WE} > (U_Z + 0.7V)$

W praktyce: $U_{WE} > U_Z + 2V$

Wada: uszkodzenia przy zbyt wielkim poborze prądu

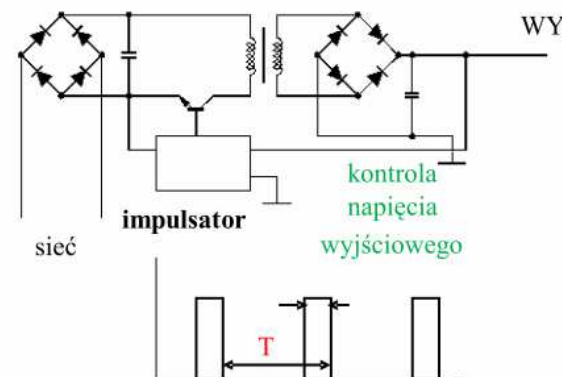
Moc cieplna wydzielana w tranzystorze regulującym: $P = (U_{WE} - U_{WY}) \cdot I$

Zwarcie wyjścia $\rightarrow P \rightarrow \infty$.

Dygresja – zasilacze impulsowe

Przetwornice - stabilizatory impulsowe o dużej sprawności

- napięcie sieciowe jest prostowane,
- modulowane z wysoką częstotliwością
- impulsy wysokiej częstotliwości transformowane
- prostowanie i filtrowanie
- na wyjściu wytwarzane jest napięcie stałe



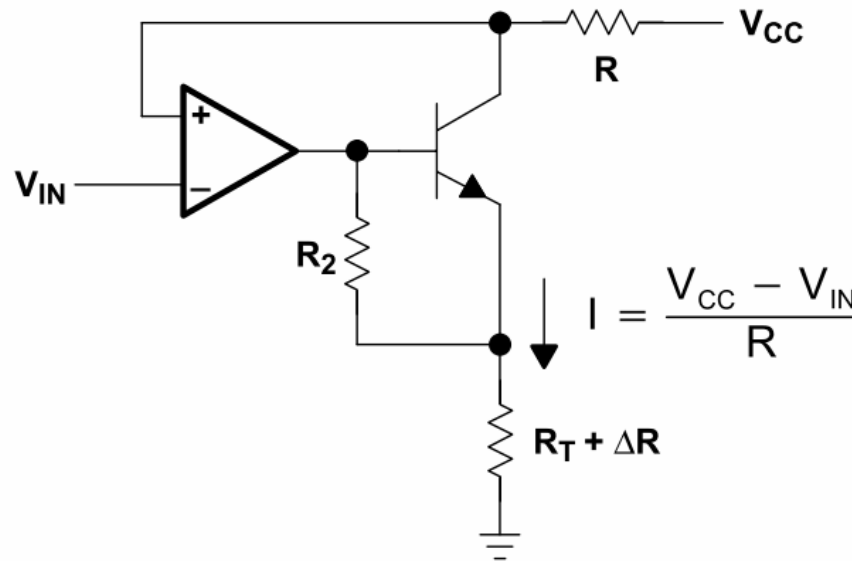
Stabilizacja napięcia wyjściowego: automatyczna regulacja szerokości impulsów modulujących w stosunku do okresu ich powtarzania (τ/T)

Przy wysokiej częstotliwości (>10 - 20 kHz): miniaturyzacja transformatora, niewielkie pojemności filtrujące, **wysoka sprawność zasilacza**

„inteligentne” zasilacze sterowane mikroprocesorem

Zasilacze impulsowe pozwalają np. ograniczyć masę zasilacza (mały transformator, bo moc przenoszona przez transformator rośnie z częstotliwością napięcia). Są obecnie bardzo powszechnie stosowane.

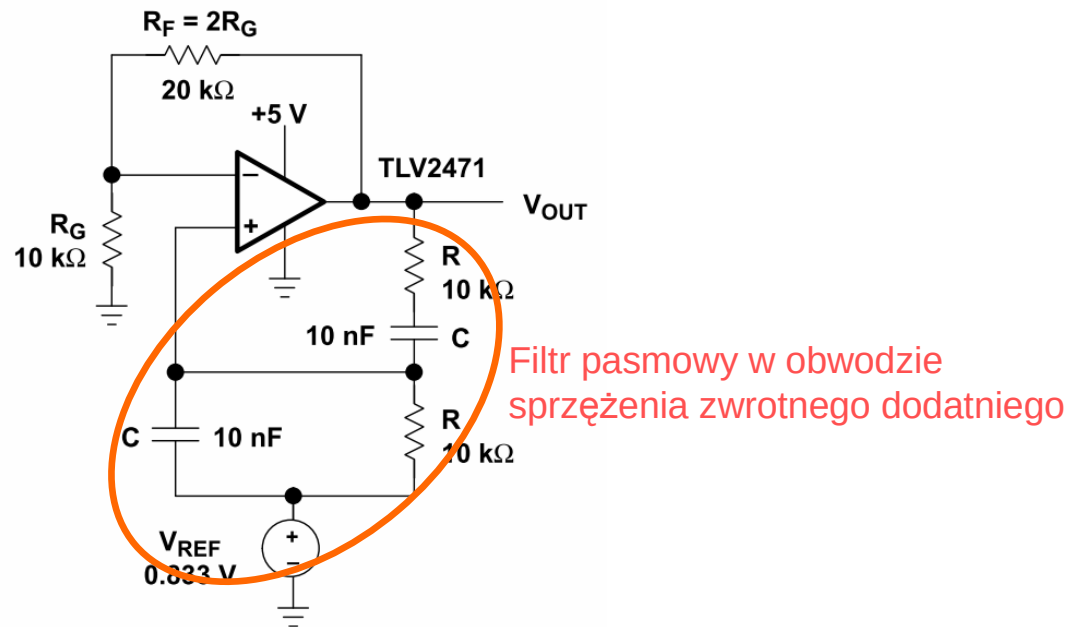
Źródło prądowe – daje prąd o natężeniu niezależnym od oporności R_T obciążenia



Precision Current Source

Wzmacniacz operacyjny otwiera tranzystor na tyle, aby płynął przez niego (C-E) i przez oporniki R oraz R_T prąd o takim natężeniu, żeby $U_+ = V_{IN}$. Wtedy to natężenie prądu wynosi: $I = (V_{CC} - V_{IN})/R$. Zmiana wartości oporności R_T nie powoduje zmiany natężenia prądu płynącego przez R_T .

Generator Wien'a – przykład układu z dodatnim sprzężeniem zwrotnym



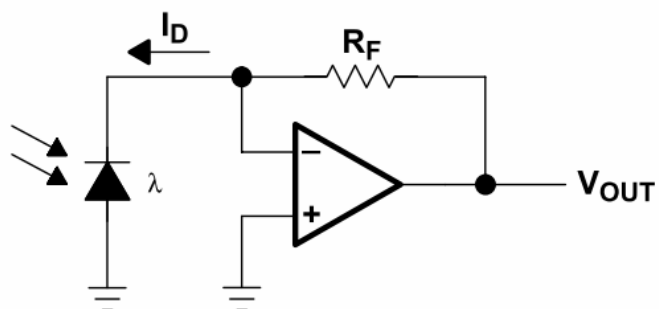
Wien Bridge Oscillator Circuit

Zastosowanie filtra pasmowego w obwodzie sprzężenia zwrotnego dodatniego pozwala wzbudzić oscylacje napięcia wyjściowego.

Zastosowanie elementu nieliniowego jako R_G lub w połączeniu z R_F pozwala uzyskać generację napięcia zbliżonego do sinusoidalnego.

- symulacja w progr. Tina-TI: generatorka Wien'a (z diodami w obw. sprz. ujemnego)

Wzmacniacz czujnika - fotodioda



Photovoltaic Cell Amplifier

Fotodioda oświetlona wytwarza napięcie fotowoltaiczne (złącze p-n) i daje prąd proporcjonalny do natężenia oświetlenia. Taki układ ze wzmacniczem operacyjnym daje napięcie wyjściowe proporcjonalne do oświetlenia.

W ogólności wzm. operacyjne są stosowane do wzmacniania małych sygnałów z czujników pomiarowych.

Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo analogowe, funkcja komparatora

Rejestracja i analiza sygnałów analogowych

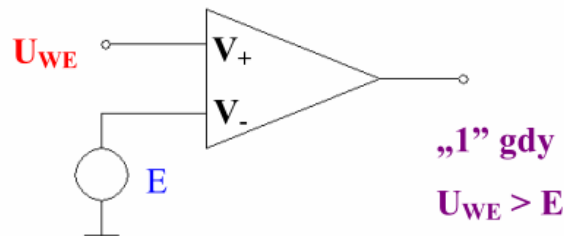
- Komparator analogowy
- Przetwornik cyfrowo-analogowy (DAC)
- Przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC)

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

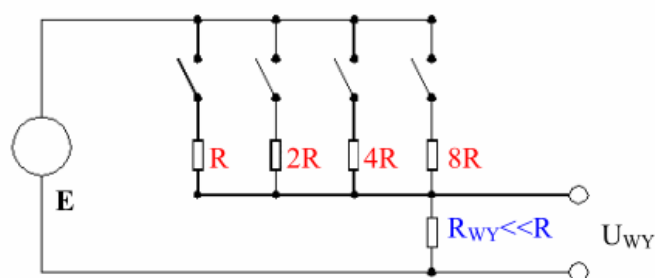
Uwaga:

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

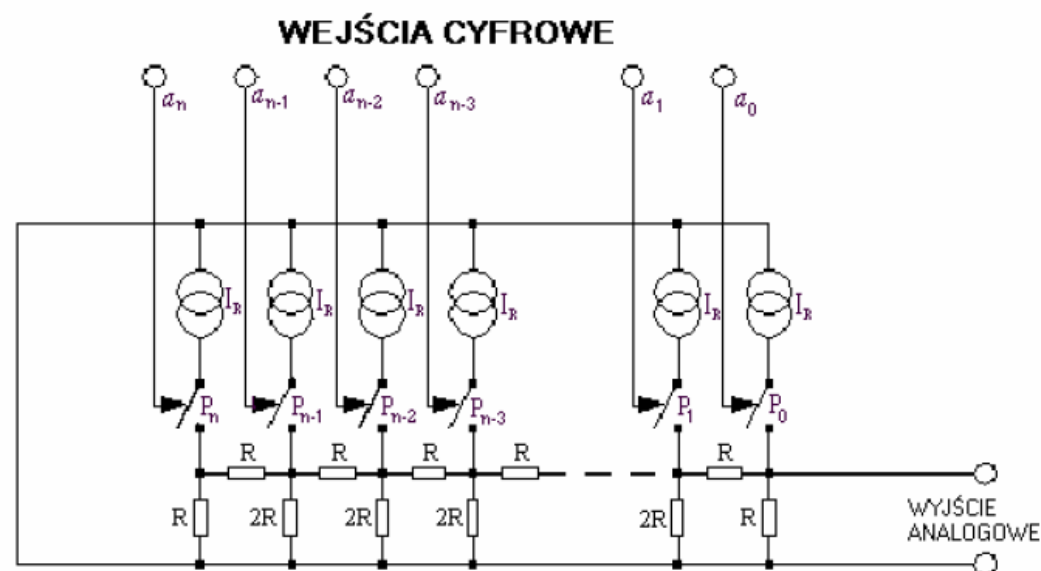


Działanie najprostszych (2-4 -bitowych) opiera się na **zasadzie dzielnika napięcia**
Nieliniowe działanie dzielnika liczby bitów

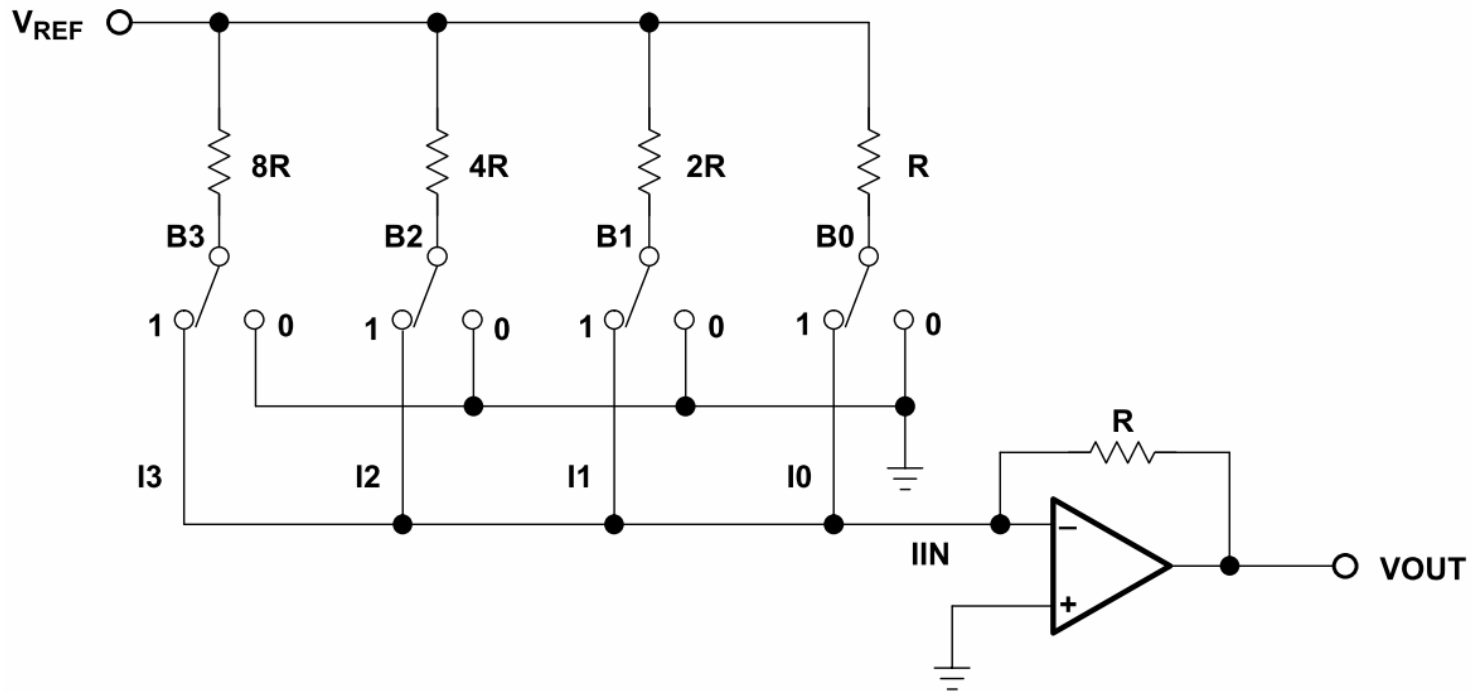
Wielobitowe (do 18 bitów) przetworniki cyfrowo-analogowe buduje się w oparciu o drabinki rezystorów zasilane za pomocą bardzo stabilnych źródeł prądowych

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

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



Czterobitowy przetwornik DA



2. Binary Weighted D/A Converter

Prądy wpływające $I0 \dots I3$ sumują się w oporniku R dając napięcie V_{out} zależne od stanu przełączników $B0 \dots B3$, czyli od stanów wejść cyfrowych $B0 \dots B3$.

V_{REF} – stabilizowane napięcie odniesienia

Przetwornik analogowo-cyfrowy

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

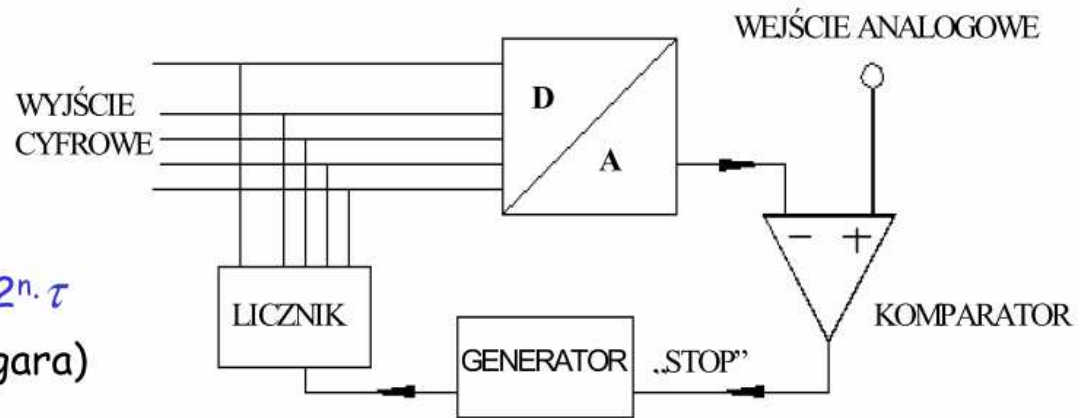
- zamiana wartości napięcia (lub natężenia prądu) wejściowego na słowo logiczne

Powolna konwersja:

przy n -bitowym słowie

wyjściowym wymaga czasu $2^n \cdot \tau$

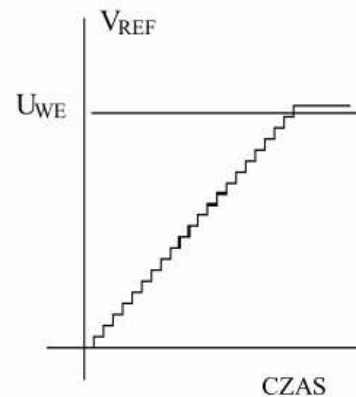
(τ czas trwania impulsu zegara)



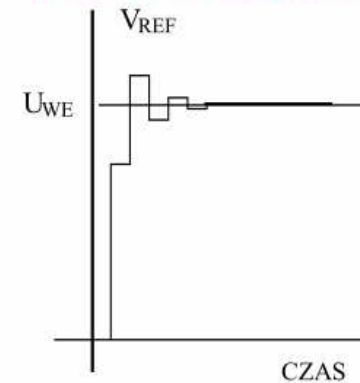
Przetwornik kompensacyjny:

czas konwersji wynosi $n \cdot \tau$

➔ rzędu kilkudziesięciu μs

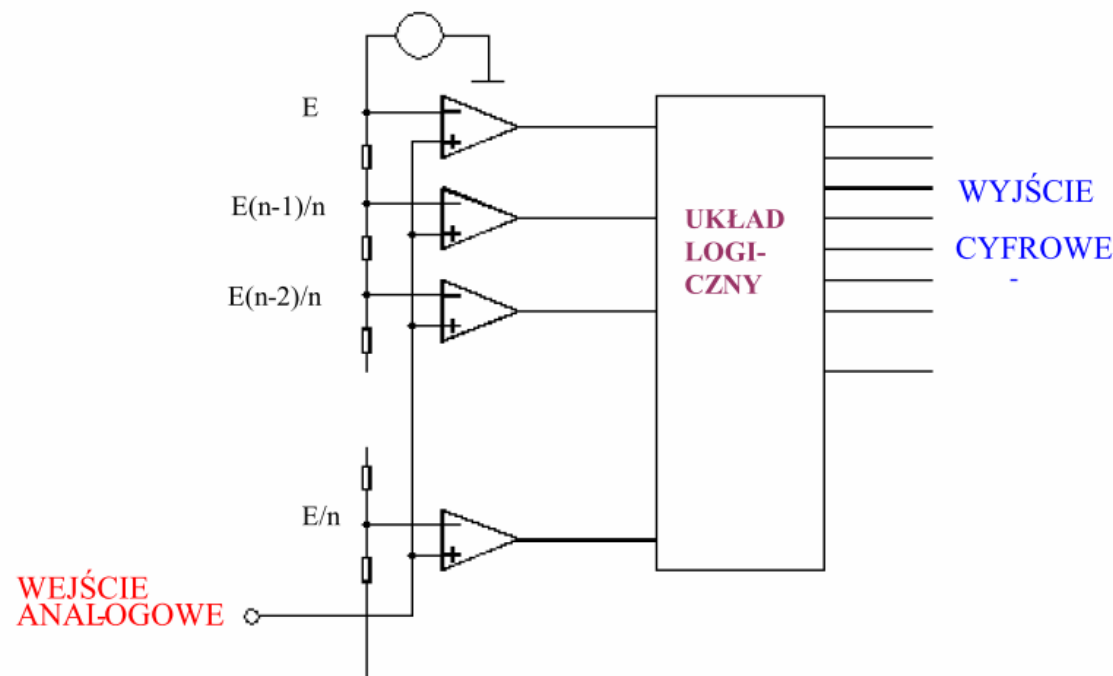


przetwornik kompensacyjny



Im mniejsza dokładność przetwarzania tym większa szybkość konwersji

Najszybsze są przetworniki analogowo-cyfrowe typu flash

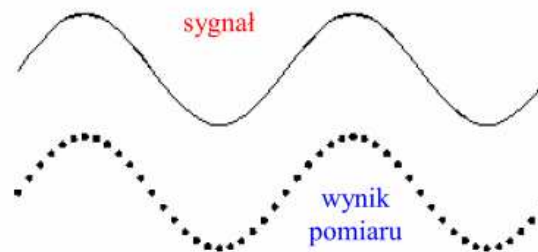
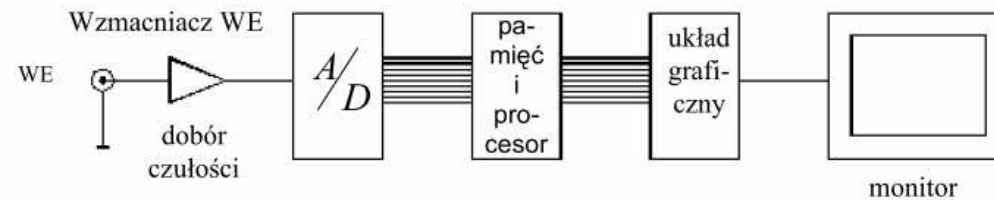


- Dokładność przetworników 10 bitów przy częstotliwości próbkowania 1 GHz
(Hewlett-Packard, Tektronix, National Instruments, Agiris)
- Możliwe tworzenie układów przetworników pracujących sekwencyjnie
→ częstość próbkowania sięga 10 GHz
- Przetworniki typu „flash” o większej liczbie bitów są wolniejsze: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

Przetwornik analogowo cyfrowy - podstawowy element układów pomiarowych

Przykład: oscyloskop cyfrowy

UPROSZCZONY SCHEMAT OSCYLOSKOPU CYFROWEGO



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

Przykładowa literatura nt Op Amp

1.



Op Amps For Everyone

Ron Mancini, Editor in Chief

- książka (600 stron) dostępna na stronach firmy TI

2. - dla osób zainteresowanych:

Tina-TI - dobry program do graficznego projektowania i symulacji działania układów elektronicznych analogowych od firmy Texas Instruments (uwzględniający komponenty produkowane przez TI):

<http://www.ti.com/tool/tina-ti>

(konieczna darmowa rejestracja aby otrzymać działającą wersję).

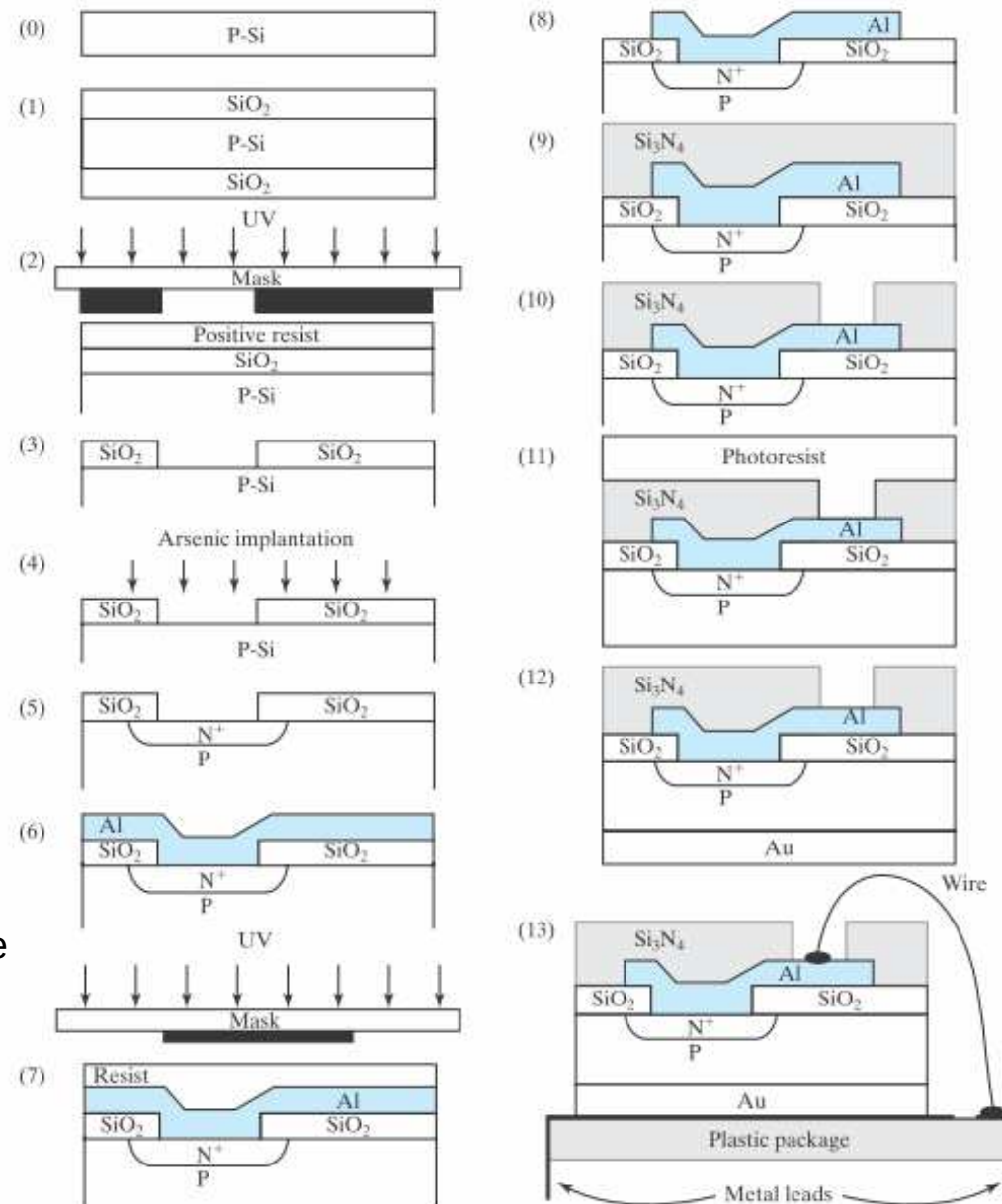
Program wykorzystuje język opisu i symulacji układów elektronicznych SPICE

<http://en.wikipedia.org/wiki/SPICE>

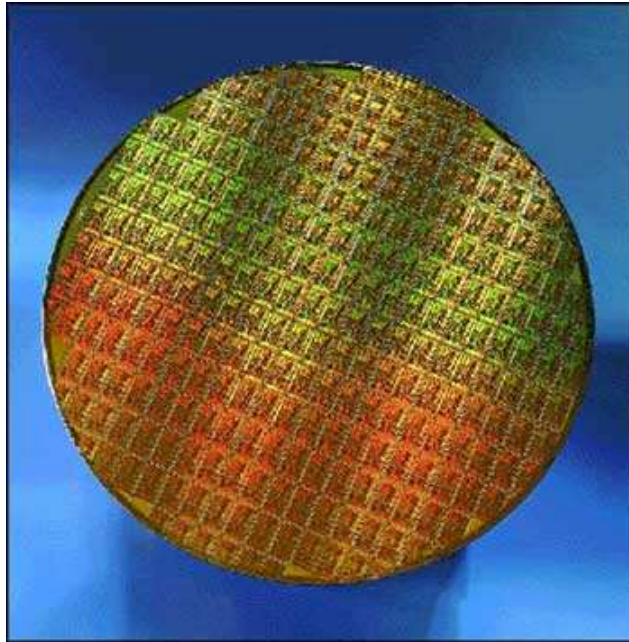
Technologia wytwarzania elementów półprzewodnikowych (np. złącza pn) w płytce z krzemu

- (0) płytka monokrystalicznego Si typu p
- (1) Przykrywana warstwą izolującą i maskującą SiO_2
- (2, 3) fotolitografia i trawienie SiO_2
- (4) lokalne wprowadzanie domieszek implantacja As = wbijanie wysoko-energetyczną wiązką z akceleratora
- (5) wygrzewanie poimplantacyjne dla aktywacji domieszek i usunięcia zniszczeń strukturalnych z implantacji – złącze pn
- (6,7,8) napylenie lokalnie metalizacji, czyli kontaktu elektrycznego do obszaru n
- (10,11) nanoszenie warstwy Si_3N_4 zabezpieczającej diodę
- (12,13) podłączanie kontaktów elektrycznych i zamykanie w obudowie

Takimi metodami wytwarzana jest obecnie cała elektronika półprzewodnikowa.



Wafel Si z wyprodukowanymi układami scalonymi



Rys 42.20. Układ scalony procesora Pentium wytwarzanego przez firmę Intel używany jest głównie w komputerach. Przed użyciem zostaje zamknięty w ceramicznej obudowie



Kryształy ultraczystego krzemu na potrzeby mikroelektroniki. Obecnie średnica może sięgać 30-40 cm.

Kilka ważnych trendów mikroelektroniki

1. Integracja coraz większej liczby funkcji w coraz bardziej specjalizowanych układach scalonych, dostosowanych do konkretnych aplikacji.
2. Projektowanie układów elektronicznych w coraz większym stopniu przesunęło się do producentów układów scalonych. Bardzo często można znaleźć układy scalone specjalizowane do pożądanego zastosowania.
3. Źródłem wiedzy o przyrządach półprzewodnikowych są *karty katalogowe* udostępniane na stronach internetowych producentów.
4. Stosowanie techniki cyfrowej w miejscach jeszcze niedawno analogowej.
5. W układach scalonych stosowanie tranzystorów unipolarnych (polowych MOS, FET) gdzie się da, bo mają łatwiejszą technologię, większe możliwości zmniejszania rozmiarów (skalowanie), mniejsze zużycie energii niż tranzystory bipolarne (nnp, pnp).
6. Stosowanie układów programowalnych – np. mikrokontrolerów w pomiarach i sterowaniu urządzeniami laboratoryjnymi, przemysłowymi i również codziennego użytku.

Integracja funkcji i specjalizacja układów scalonych

- projektowanie powszechnych aplikacji elektronicznych w dużym stopniu następuje u producentów układów scalonych np. Texas Instruments:

Products

Audio	www.ti.com/audio
Amplifiers	amplifier.ti.com
Data Converters	dataconverter.ti.com
DLP® Products	www.dlp.com
DSP	dsp.ti.com
Clocks and Timers	www.ti.com/clocks
Interface	interface.ti.com
Logic	logic.ti.com
Power Mgmt	power.ti.com
Microcontrollers	microcontroller.ti.com
RFID	www.ti-rfid.com
OMAP Applications Processors	www.ti.com/omap
Wireless Connectivity	www.ti.com/wirelessconnectivity

Applications

Automotive and Transportation	www.ti.com/automotive
Communications and Telecom	www.ti.com/communications
Computers and Peripherals	www.ti.com/computers
Consumer Electronics	www.ti.com/consumer-apps
Energy and Lighting	www.ti.com/energy
Industrial	www.ti.com/industrial
Medical	www.ti.com/medical
Security	www.ti.com/security
Space, Avionics and Defense	www.ti.com/space-avionics-defense
Video and Imaging	www.ti.com/video

TI E2E Community

e2e.ti.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2013, Texas Instruments Incorporated

c.d. kilka ważnych trendów mikroelektroniki

7. Zwiększanie gęstości upakowania tranzystorów w układzie scalonym
(biznesowe prawo Moora – ilość tranzystorów w układach mikroprocesorów podwaja się co 18-24 miesiące)
Gordon Moore – jeden z założycieli firmy Intel

Prawo Moora rozwoju mikroelektroniki !!!:

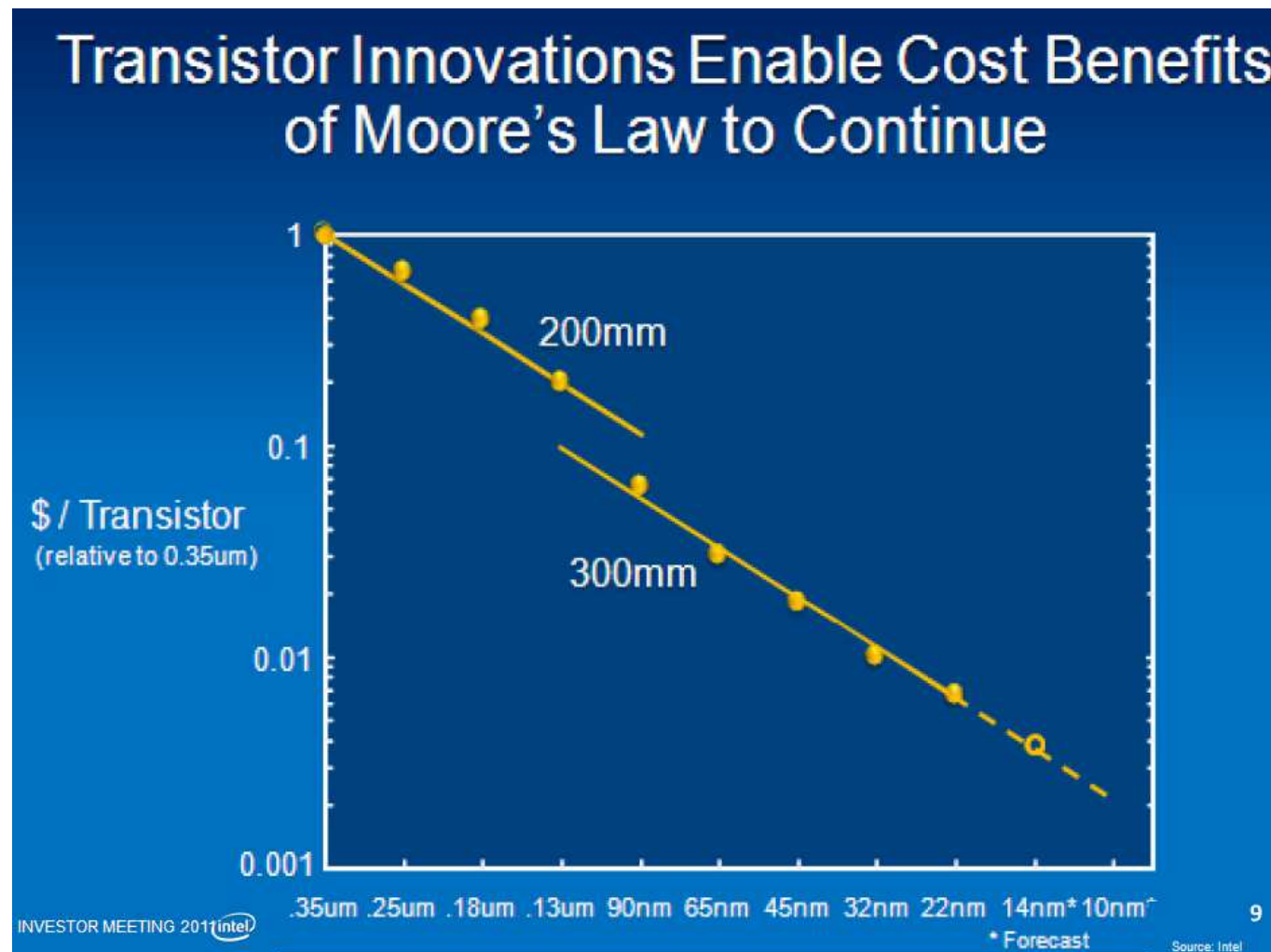
<https://www.youtube.com/watch?v=V-pk-A8lqE4>

- historia głównego trendu mikroelektroniki opowiadana przez założycieli Intel-a (ok. 30 min)

8. Prawo Moora utrzymuje się od ok. 40 lat dzięki skalowaniu tranzystorów (zmniejszaniu rozmiarów). Przewiduje się, że będzie dalej spełnione co najmniej do osiągnięcia rozmiarów tranzystorów FET ok. 7-10 nm
- technologie FinFET oraz FD-SOI.

9. Dużą rolę w technice odgrywają przyrządy półprzewodnikowe wysokoprądowe (przełączające prądy o wysokim natężeniu np. 10-1000A). Są to tyrystory, triaki, tranzystory polowe PowerMOSFET, (Nie mieliśmy niestety czasu poznać ich.)
Umożliwiają przepływ wysokich gęstości prądu, są w tym celu wykonywane ze specjalnie wysokiej jakości monokrystalicznego krzemu.
Przyrządy półprzewodnikowe wysokoprądowe np. stosowane w:
układach zasilania silników, sterowaniu oświetleniem, konwerterach napięcia stałego z elektrowni fotowoltaicznych na napięcie zmienne sieci energetycznych, ...

Coraz więcej coraz tańszych w produkcji tranzystorów w układach scalonych produkowanych na coraz większych płytkach krzemowych



c.d. kilka ważnych trendów mikroelektroniki

10. Przemysł półprzewodnikowy skoncentrowany w wielkich firmach produkcji układów scalonych.

Między firmami istnieje współpraca np. poprzez organizacje standaryzujące.

Funkcjonuje też model: fabless + foundries, czyli firmy będące biurami projektowymi bez produkcji układów scalonych oraz firmy produkujące układy scalone wg zewnętrznych projektów

2010 Rank	2009 Rank	Company	Headquarters	2009 Tot Semi	2010 Tot Semi	10/09 % Change
1	1	Intel	U.S.	32,325	40,095	24%
2	2	Samsung	South Korea	21,273	32,287	52%
3	6	TSMC*	Taiwan	8,989	13,307	48%
4	3	TI	U.S.	9,697	13,022	34%
5	5	Toshiba	Japan	9,537	12,994	36%
6	4	Renesas	Japan	9,649	11,791	22%
7	7	ST	Europe	8,466	10,212	21%
8	9	Hynix	South Korea	6,320	10,200	61%
9	10	Micron	U.S.	5,450	8,977	65%
10	8	Qualcomm**	U.S.	6,409	7,098	11%
11	15	Elpida	Japan	3,948	6,690	69%
12	13	Infineon	Europe	4,617	6,662	44%
13	14	Broadcom**	U.S.	4,271	6,540	53%
14	11	AMD**	U.S.	5,403	6,460	20%
15	12	Sony	Japan	5,245	5,652	8%
16	16	NXP	Europe	3,547	4,431	25%
17	19	Freescall	U.S.	3,302	4,176	26%
18	18	Fujitsu	Japan	3,377	4,123	22%
19	24	UMC*	Taiwan	2,815	3,965	41%
20	20	Panasonic	Japan	3,237	3,907	21%
21	25	Marvell**	U.S.	2,690	3,602	34%
22	17	MediaTek**	Taiwan	3,500	3,590	3%
23	21	Nvidia**	U.S.	3,151	3,571	13%
24	26	GlobalFoundries*	U.S.	2,641	3,510	33%
25	22	Rohm	Japan	3,035	3,481	15%

THE MCCLEAN REPORT 2011
Copyright © 2011 by IC Insights, Inc., all rights reserved.

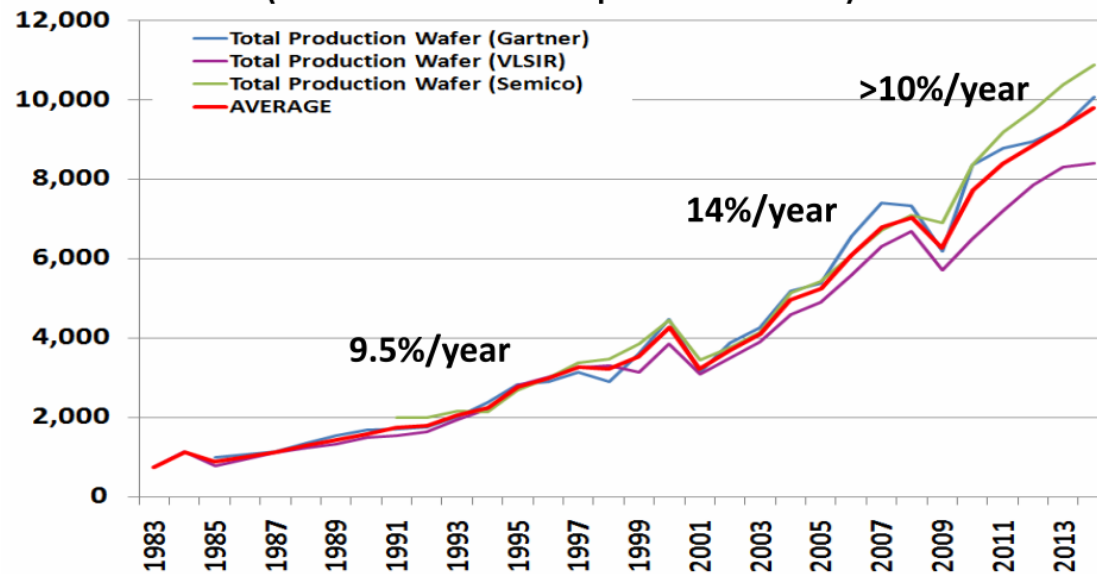
Rozwój mikroelektroniki następował w większości przy wsparciu państw, np. Taiwan, Japonia, Niemcy.

Niedaleko nas dużym regionem przemysłu półprzewodnikowego jest Saksonia (okolice Drezna, Lipska):

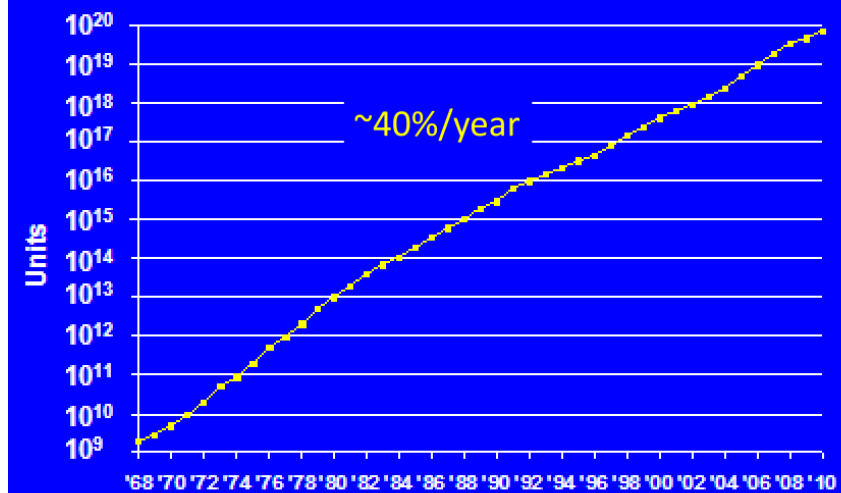
http://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_Saxony

Worldwide Silicon Demand

(in Millions of Square inches)



Transistors Shipped per Year



Source: Intel/WSTS, 3/11

P. Gargini

Bardziej zaawansowane przedmioty związane z elektroniką półprzewodnikową
na Wydz. Fizyki UW

1. Programowanie mikrokontrolerów
(specjalizowane mikroprocesory z układami peryferyjnymi
wykorzystywane w urządzeniach sterujących i pomiarowych)
2. Programowanie układów FPGA
(programowalne układy logiki cyfrowej)
- dla studiów 2-go stopnia
3. Z badaniami materiałów półprzewodnikowych są związane prace w Zakładzie
Fizyki Ciała Stałego, np. prace licencjackie.