

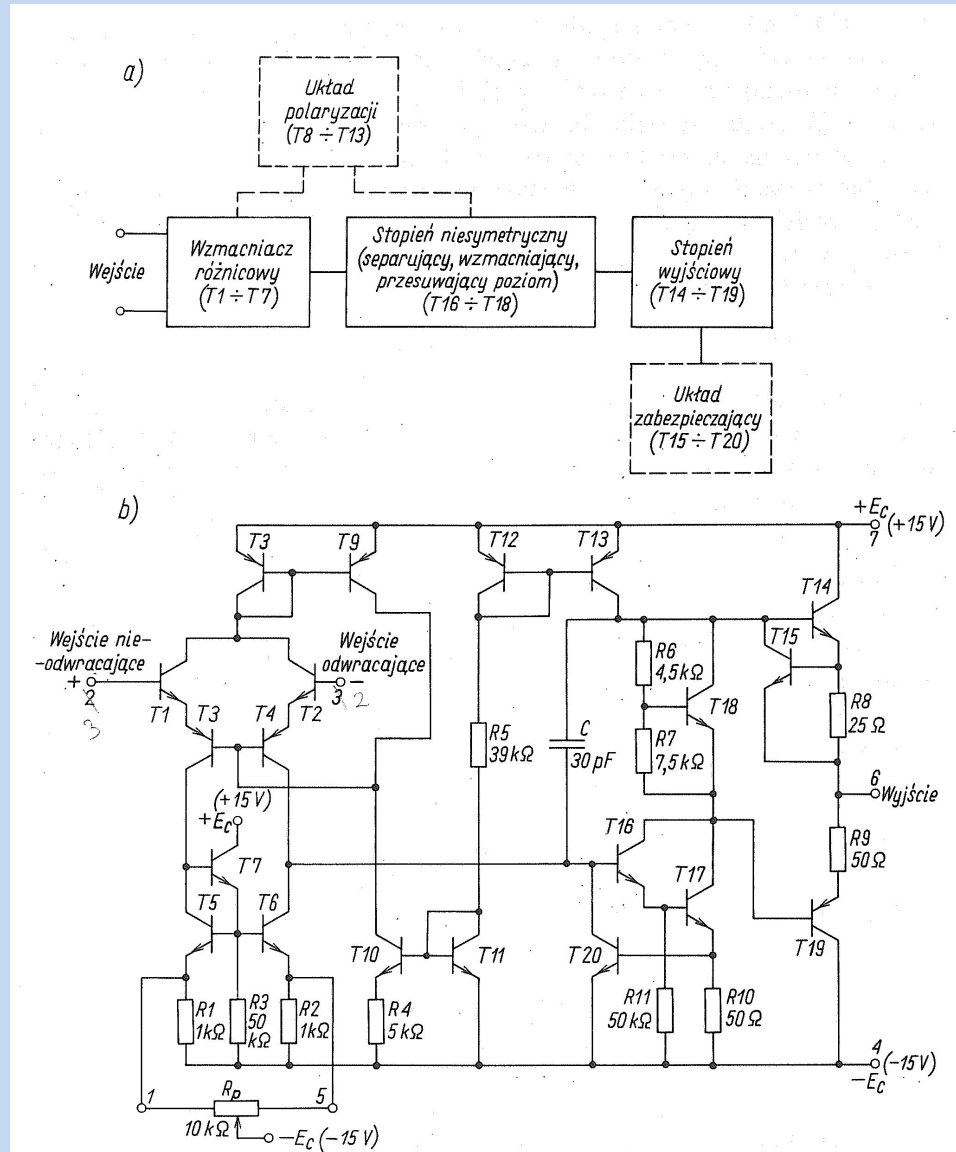
**UKŁADY ANALOGOWE**  
**WYKŁAD 05**

**WZMACNIACZ OPERACYJNY**

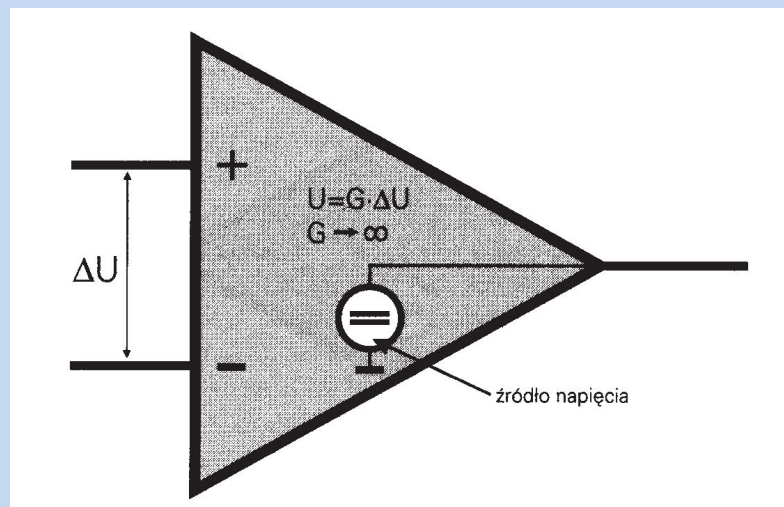
- Koncepcja wzmacniacza operacyjnego - Harry Black z Bell Lab w 1934 roku
- Rozważał on problem wzmacniania sygnałów przesyłanych długimi liniami telefonicznymi. Klasyczne wzmacniacze stosowane do tego celu miały wady związane z zależnością ich parametrów od takich czynników, temperatura czy wahania napięcia zasilającego przy czym spowodowane to było głównie przez stosowane w ówczesnych czasach we wzmacniaczach lampy próżniowe gdyż stabilność parametrów elementów biernych była znacznie lepsza.
- Black zaproponował, aby stworzyć taki układ wzmacniający, o którego parametrach decydowały by nie aktywne elementy wzmacniające a elementy bierne pętli sprzężenia zwrotnego. Wzmocnienie aktywnego układu wzmacniającego byłoby wielokrotnie większe aniżeli wymagane wzmocnienie wzmacniacza docelowego.
- Początkowo koncepcja takiego układu spotkała się z bardzo dużym sprzeciwem ze strony elektroników – projektantów układów wzmacniających. Spowodowane to było koniecznością pokonania skomplikowanych problemów związanych z zapewnieniem stabilnej pracy układów o bardzo dużym wzmocnieniu.
- W 1945 r W. Bode opracował graficzną metodę wyznaczania stabilności układów elektronicznych, zrozumiałą dla elektroników – praktyków. Od tego momentu koncepcja Blacka mogła być zrealizowana w praktyce.

- Szybko okazało się, że wzmacniacze zbudowane w oparciu o jądro wzmacniające o bardzo dużym wzmocnieniu i pętlę sprzężenia zwrotnego na elementach biernych można wykorzystać do budowy komputera analogowego, gdyż bardzo prosto można przy ich użyciu realizować podstawowe operacje matematyczne takie jak dodawanie, odejmowanie, całkowanie, różniczkowanie, mnożenie czy logarytmowanie. Ta właściwość spowodowała nadanie im miana WZMACNIACZA OPERACYJNEGO, która przetrwała do dzisiaj.
- Po wyparciu komputerów analogowych przez komputery cyfrowe wzmacniacze operacyjne wykorzystane były jedynie w układach akwizycji sygnałów z czujników pomiarowych, które bardzo często miały bardzo małą amplitudę, rzędu miliwoltów.
- Pierwszym wzmacniaczem operacyjnym opracowanym w postaci układu scalonego był opracowany w 1965 roku układ uA 709 firmy Fairchild.
- W miarę rozwoju technologii elektronicznej zdecydowanie poprawiały się parametry wzmacniaczy operacyjnych tak, że dzisiaj są one podstawowym elementem układów analogowych, często traktowanym jako samodzielny element elektroniczny, mimo jego często bardzo skomplikowanej struktury wewnętrznej.

- Wzmacniacz 741

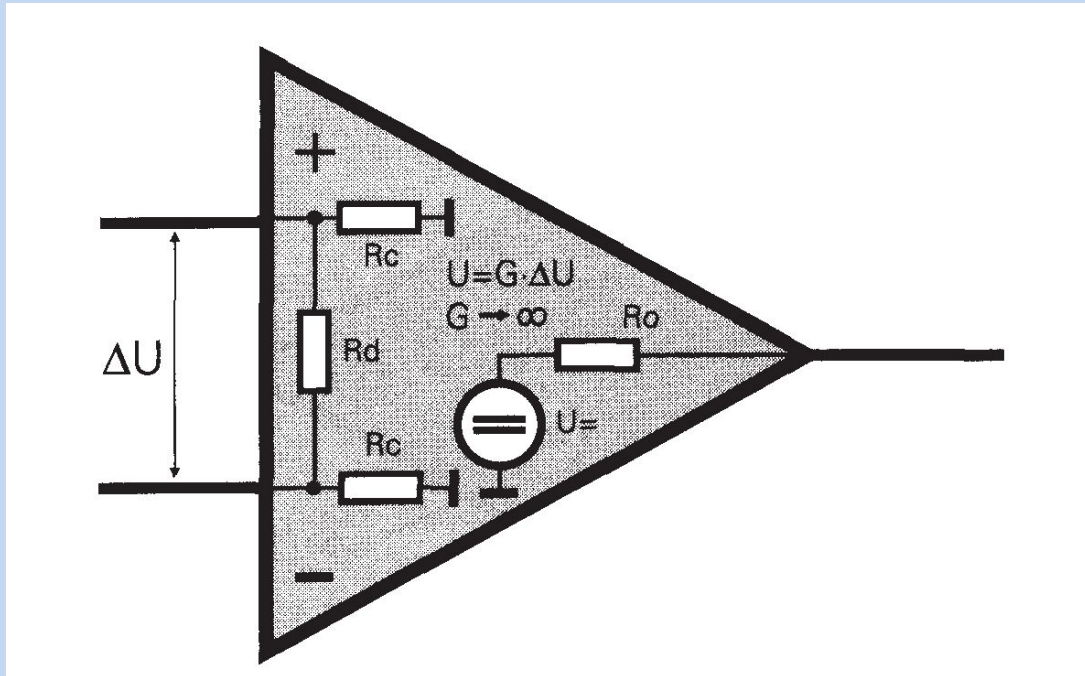


# IDEALNY WZMACNIACZ OPERACYJNY



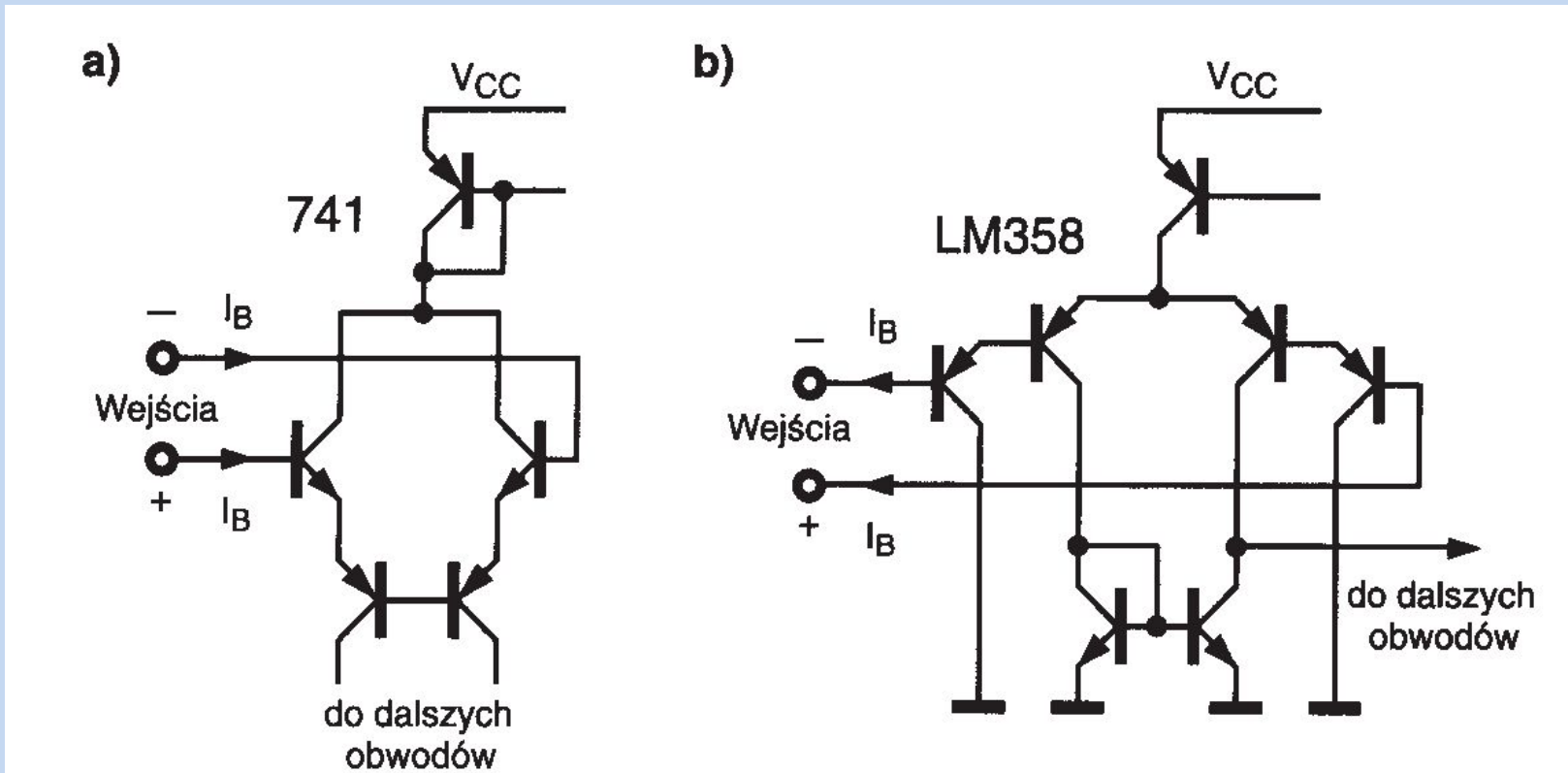
- Cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego :
  - Nieskończenie duża rezystancja wejściowa, zerowy prąd wejściowy
  - Nieskończenie duże wzmocnienie napięciowe
  - Zerowa impedancja wyjściowa
  - Nieskończenie duża wyjściowa wydajność prądowa
  - Nieskończenie duża szybkość działania

- Parametry rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego odbiegają od wzmacniacza idealnego

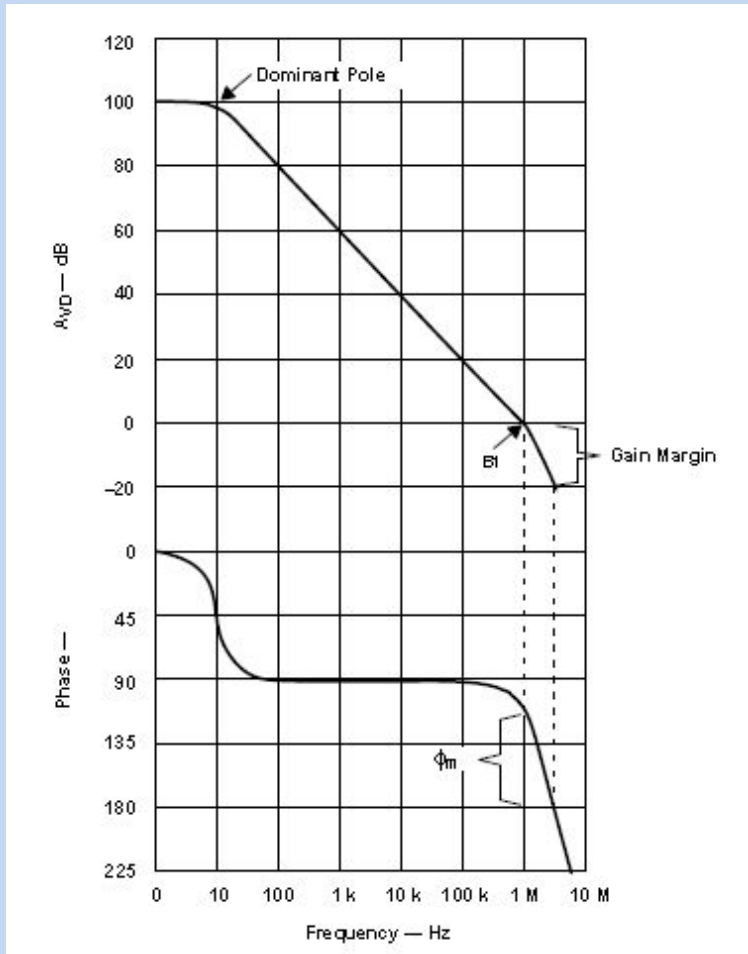


- Rezystancja wejściowa różnicowa pomiędzy wejściami wzmacniacza i rezystancja każdego z wejść dla typowych wzmacniaczy wynosi  $10^7 \dots 10^{12} \Omega$
- Prąd wejściowy w zależności od użytej technologii i jest rzędu  $\mu A$  dla układów z wejściem bipolarnym do  $fA$  dla układów z wejściem JFET .

- W zależności od konstrukcji stopni wejściowych wzmacniacza wejściowy prąd polaryzujący może wpływać do wejść lub z nich wypływać



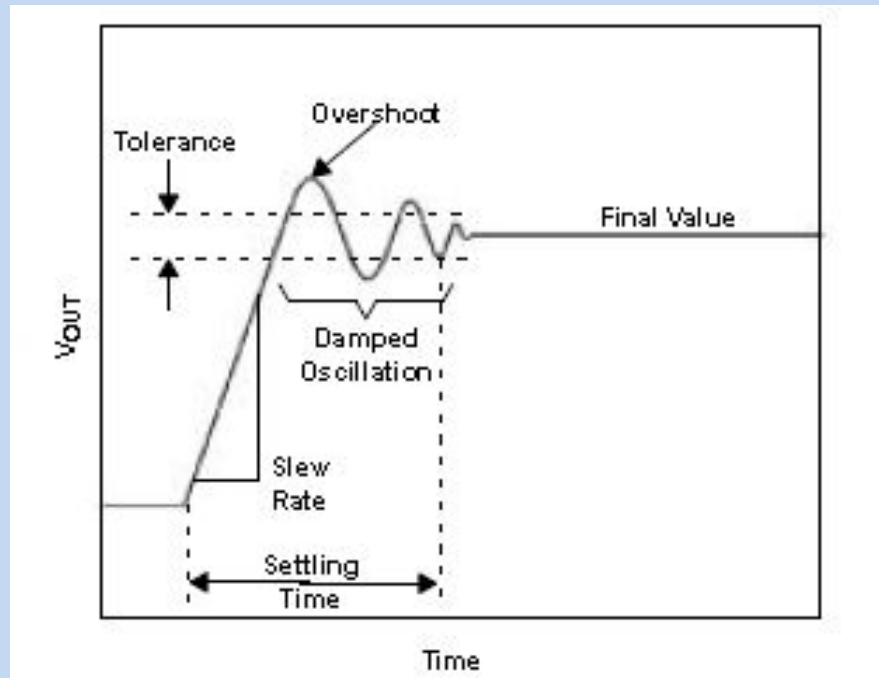
- Wzmocnienie napięciowe wejściowego napięcia różnicowego przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego – nie jest nieskończone, ale bardzo duże – nawet rzędu 1 000 000 ( typowo kilkadziesiąt tysięcy )



- Szybkość pracy wzmacniacza nie jest nieskończenie duża i może być określona w zależności od aplikacji albo szerokością pasma częstotliwościowego GBW ( Gain Band Width ) , czasem ustalania napięcia wyjściowego ( settling time ) albo szybkością narastania napięcia wyjściowego ( slew rate )
- 
- Pasma GBW w zależności od typu wzmacniacza zmienia się od kHz ( dla wzmacniaczy o bardzo małym poborze prądu ) do setek MHz dla wzmacniaczy wizyjnych.

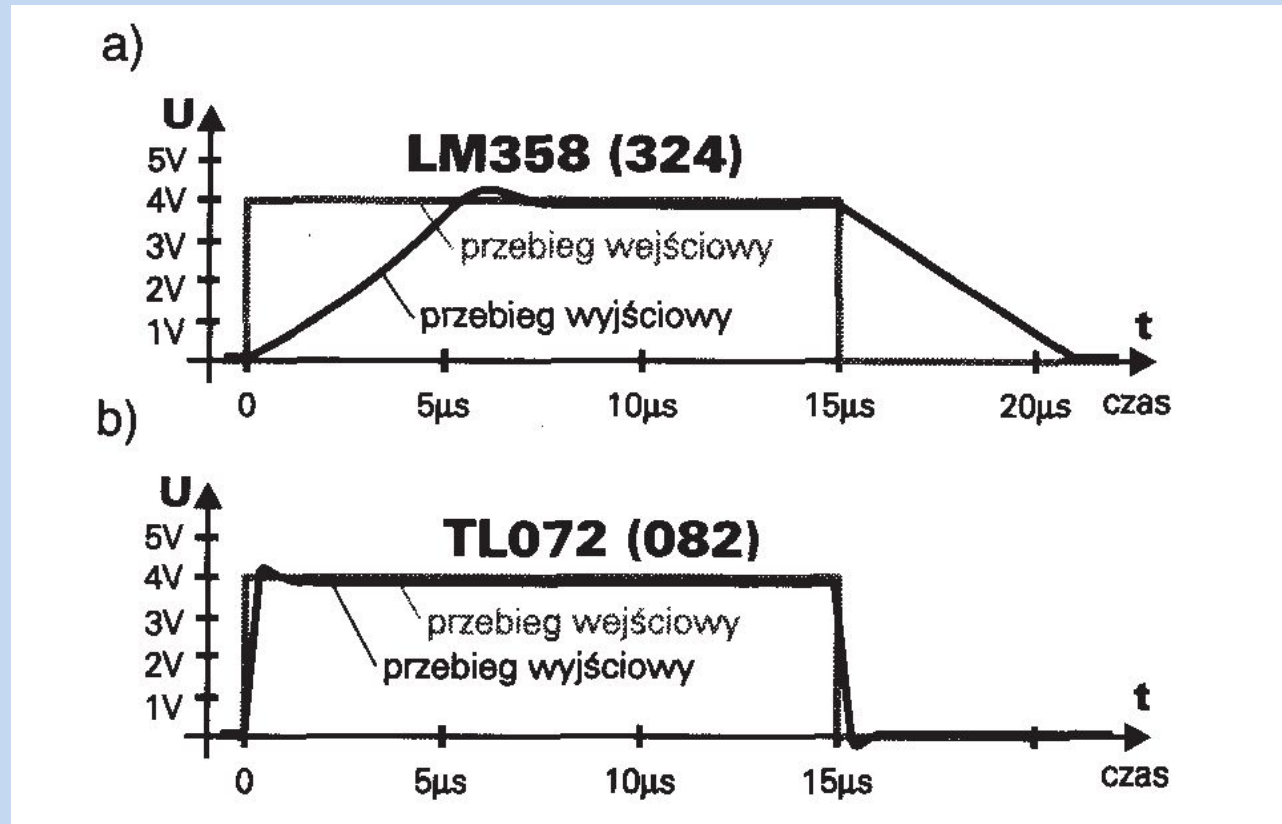


- Czas ustalania napięcia na wyjściu wzmacniacza pozwala na analizę układów przy pobudzenia wejścia sygnałem impulsowym.



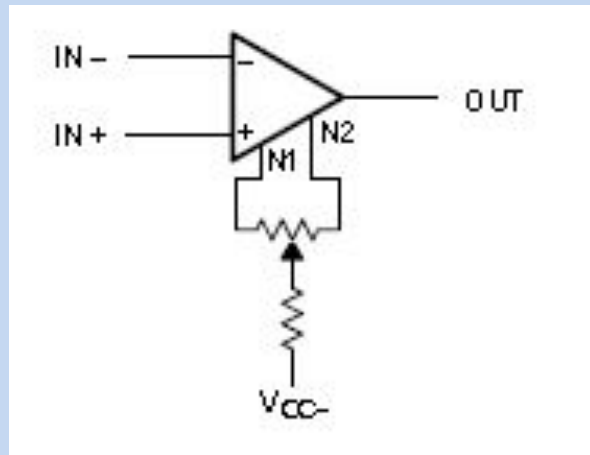
- Dla wzmacniaczy uniwersalnych czas ustalania napięcia może sięgać setek  $\mu s$  podczas gdy dla bardzo szybkich wzmacniaczy wizyjnych jest rzędu pojedynczych ns.

- W wielu przypadkach szybkość zmian napięcia na wyjściu jest zależna od charakteru obciążenia i jest mniejsza, gdy pojemność obciążenia jest większa



# PARAMETRY WZMACNIACZY OPERACYJNYCH

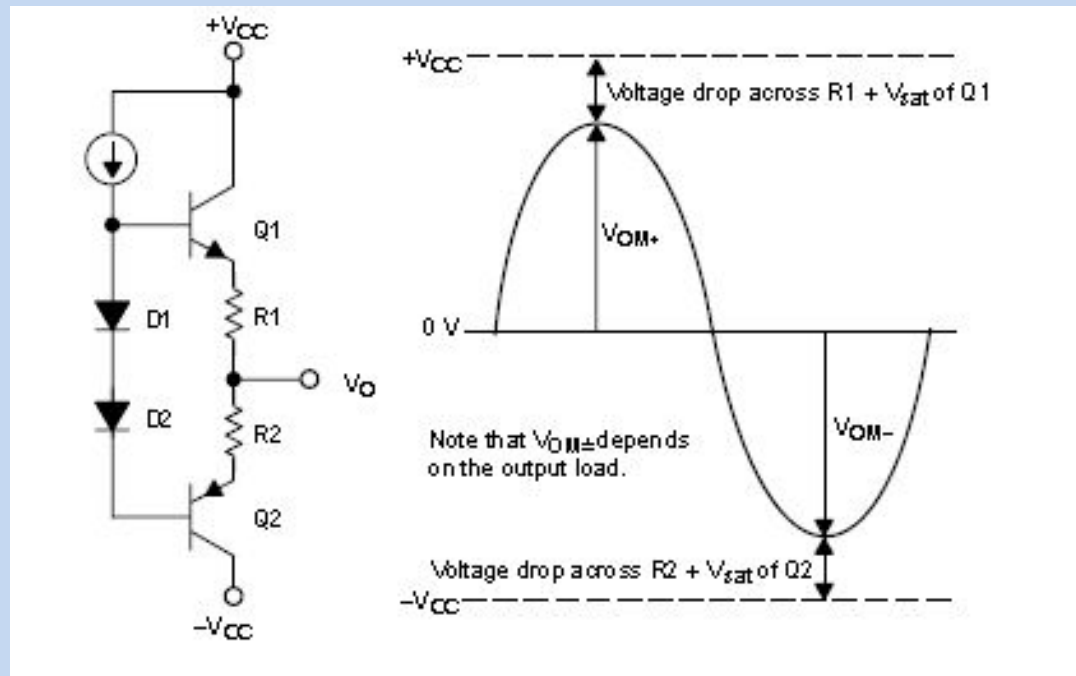
- Wejściowe napięcie niezrównoważenia – jest wartością napięcia przyłożonego do wejść wzmacniacza, niezbędną do uzyskania zerowej wartości napięcia wyjściowego. Parametr ten ( a przede wszystkim zmiany tego napięcia w funkcji temperatury i w czasie ) odgrywa podstawową rolę w układach pomiarowych, w których sygnał pobierany z czujników ma wartość  $\mu\text{V}$  ( termopary, czujniki ultradźwiękowe itp. ) . Dla typowych wzmacniaczy napięcie niezrównoważenia jest rzędu nawet  $\text{mV}$  , dla nowoczesnych wzmacniaczy precyzyjnych – pojedynczych  $\mu\text{V}$  .



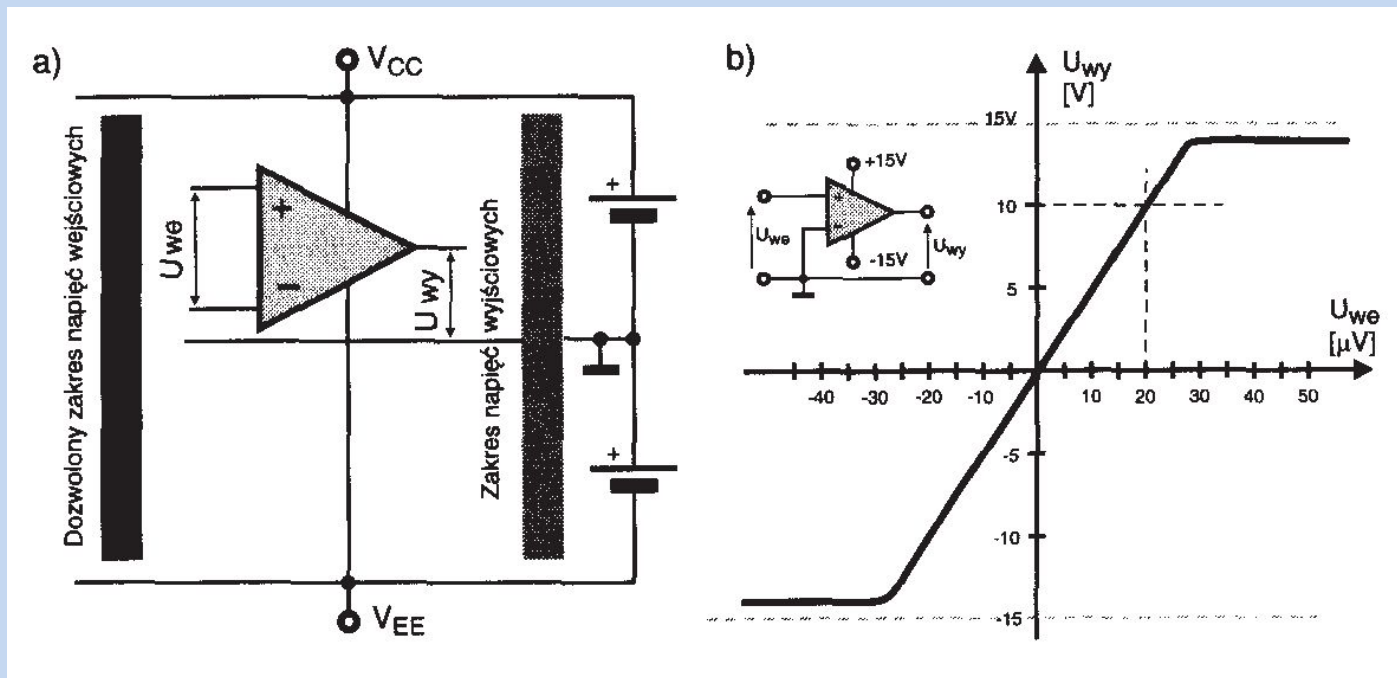
- W niektórych konstrukcjach wzmacniaczy napięcie niezrównoważenia można regulować potencjometrem dołączanym do końcówek wzmacniacza.

- Sposób i wartość napięcia zasilania wzmacniacza - pierwsze konstrukcje wzmacniaczy operacyjnych wymagały zasilania napięciem symetrycznym  $\pm U_{cc}$  ( np.  $\pm 12\text{ V}$  ) . Wartość napięcia zasilającego  $U_{cc}$  wynosiła typowo od 5 do 15 V .
- W miarę rozwoju konstrukcji wzmacniaczy napięcie zasilające zmniejszało się i pojawiły się wzmacniacze zasilane niesymetrycznie tylko z jednego napięcia dodatniego.
- Obecnie na rynku dostępne są wzmacniacze zasilane napięciem niesymetrycznym od 0.9 V do nawet kilkuset V lub napięciem symetrycznym o wartości do kilkudziesięciu V .
- Bardzo wiele typów wzmacniaczy może być zasilane symetrycznie lub niesymetrycznie.
- Prąd zasilania wzmacniacza operacyjnego waha się od kilkudziesięciu mA ( dla wzmacniaczy o bardzo dużej szybkości działania ) do kilku  $\mu\text{A}$  ( dla wzmacniaczy do urządzeń przenośnych ) .
- W celu ograniczenia poboru mocy w wielu typach wzmacniaczy wprowadzono funkcję POWER DOWN .

- Wydajność prądowa – maksymalna wartość prądu wpływającego do lub wypływającego z wyjścia wzmacniacza.
- Dla wzmacniaczy uniwersalnych wydajność prądowa jest rzędu kilku ... kilkunastu mA , dla układów buforów wydajność prądowa dochodzi do kilkuset mA .
- Zakres napięć wyjściowych – określa przedział zmian napięć wyjściowych przy pracy liniowej wzmacniacza i dla danych warunków jego zasilania.

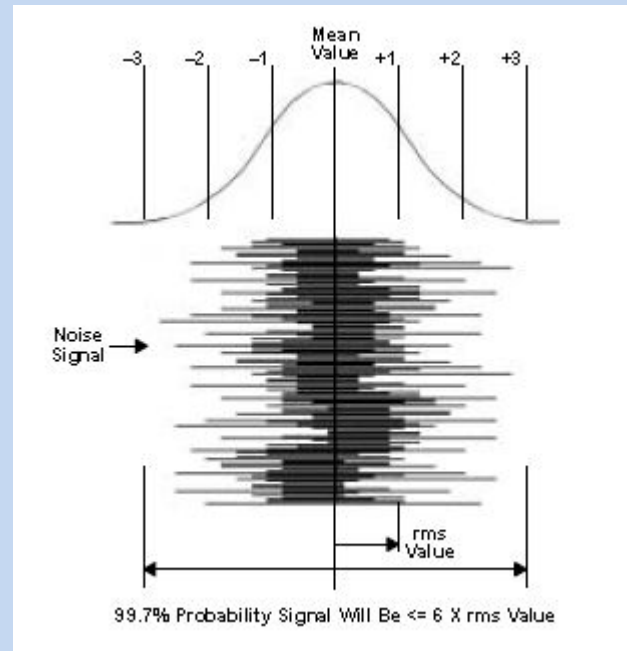


- Dla wzmacniaczy ze stopniem wyjściowym na tranzystorach bipolarnych zakres zmian napięcia wyjściowego jest mniejszy od 1 ... 2 V od napięcia zasilania.
- Dla wzmacniaczy typu rail-to-rail ( ze stopniem wyjściowym na tranzystorach polowych w technice CMOS ) na wyjściu można uzyskać napięcia mniejsze od kilkudziesięciu mV od napięcia zasilania.



# WŁAŚCIWOŚCI SZUMOWE WZMACNIACZA

- Analizując pracę wzmacniacza operacyjnego musimy w bardzo wielu przypadkach małych sygnałów wejściowych uwzględnić istnienie szumów własnych wzmacniacza.
- Analizując własności szumowe możemy brać pod uwagę zarówno maksymalną amplitudę szumów jak ich wartość skuteczną.
- Rozkład amplitudowy szumów cieplnych i kwantowych odpowiada rozkładowi Gaussa.



- W ogólności właściwości szumowe wzmacniacza określa się przez podanie gęstości widmowej odniesionej do wejścia  $n$  (  $nV/\sqrt{\text{Hz}}$  ). Wartość skuteczna napięcia szumów odniesiona do wejścia wynosi :

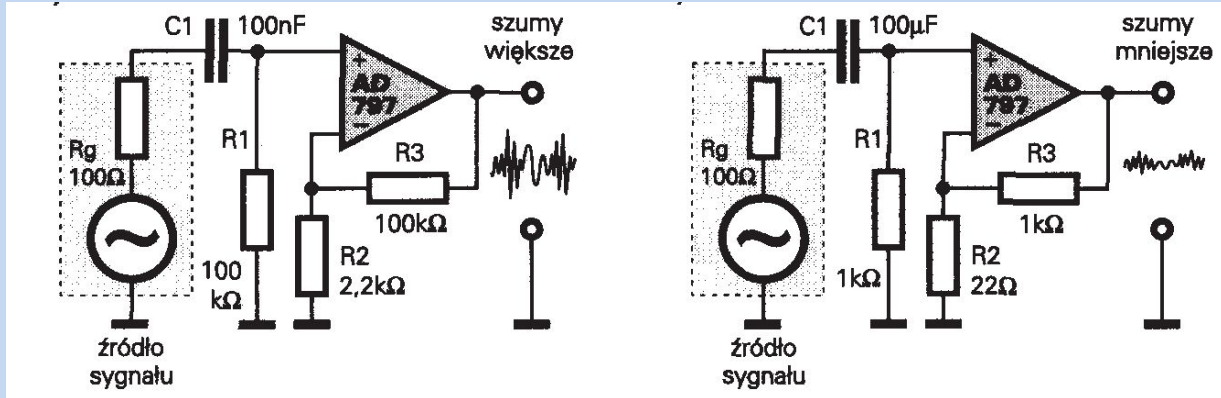
$$U_{\text{noise}} = n \times A_u \times \sqrt{BW}$$

$n$  – gęstość widmowa mocy,  $A_u$  – wzmocnienie wzmacniacza,  $BW$  – pasmo częstotliwościowe wzmacniacza

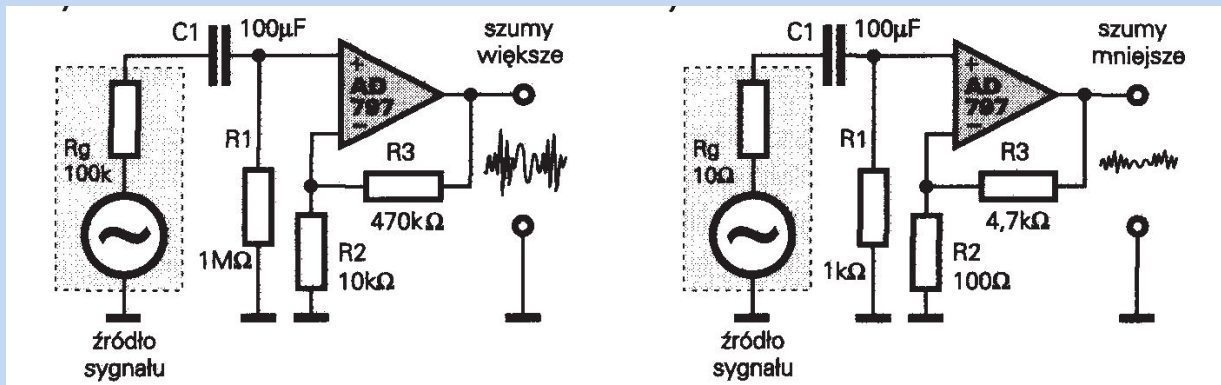
- Typowa wartość gęstości widmowej waha się od 0.7  $nV/\sqrt{\text{Hz}}$  dla specjalnych wzmacniaczy niskoszumnych jak AD797 do kilkudziesięciu  $nV/\sqrt{\text{Hz}}$  dla wzmacniaczy uniwersalnych.
- Wartość napięcia szumów na wyjściu wzmacniacza zależy nie tylko od poziomu szumów własnych wzmacniacza ale i od wartości rezystorów w pętli sprzężenia zwrotnego oraz rezystancji wewnętrznej źródła sygnału wejściowego wzmacniacza.



- Szумы на выходе усилителя уменьшаются при меньших значениях резисторов в цепи обратной связи

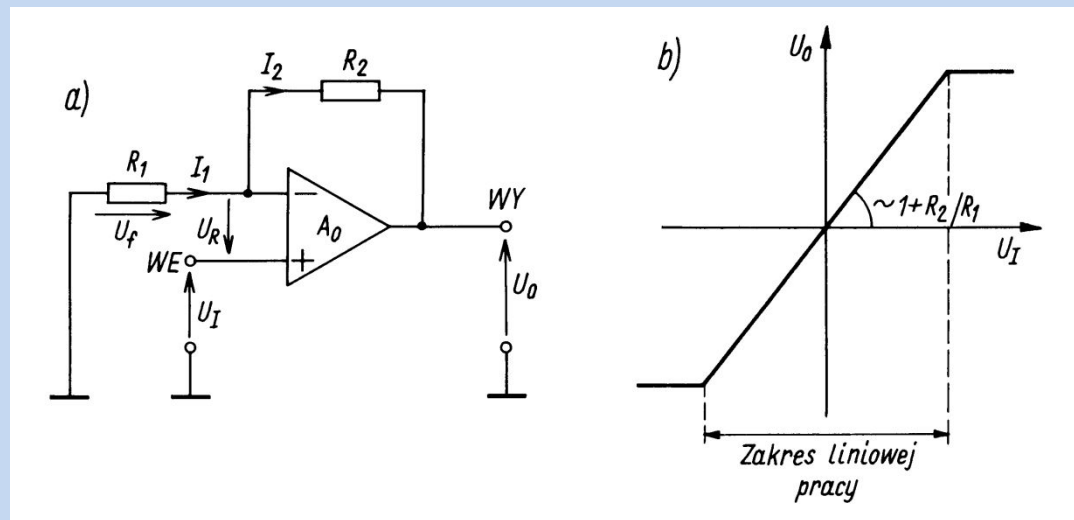


- Szумы на выходе усилителя уменьшаются при управлении из источников с меньшей внутренней импедансией



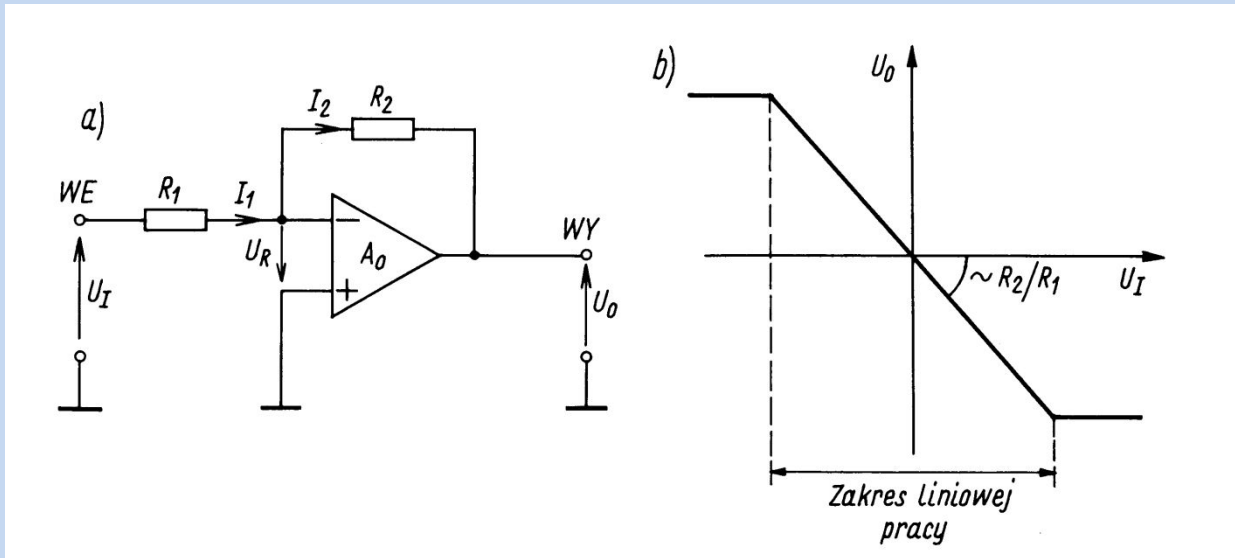
# PODSTAWOWE UKŁADY PRACY WZMACNIACZA OPERACYJNEGO

- WZMACNIACZ NIEODWRACAJĄCY



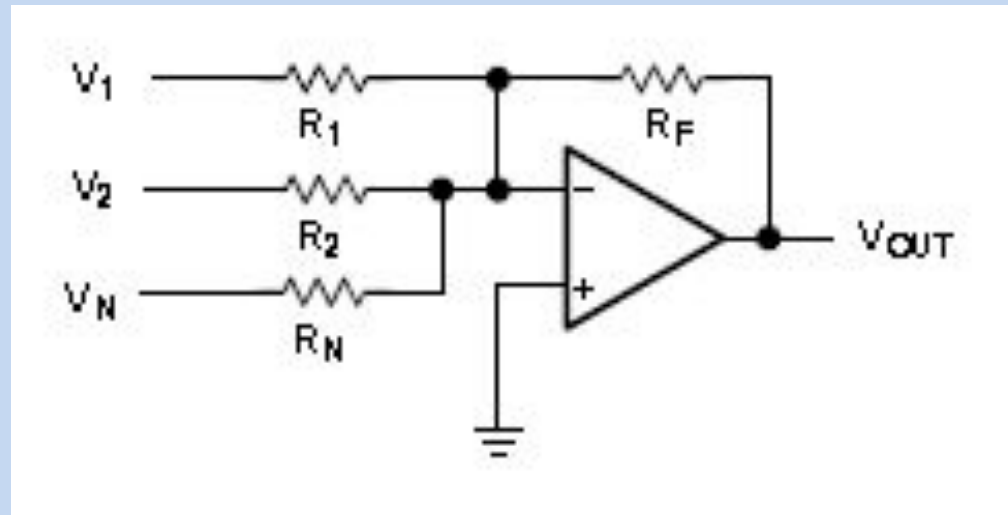
- Bardzo duża rezystancja wejściowa
- Wzmocnienie  $G = 1 + R_F / R_G$  ZAWSZE większe od jedności
- Dla  $R_G \rightarrow \infty$  układ wzmacniacza zamienia się we wtórnik napięciowy

- **WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY**



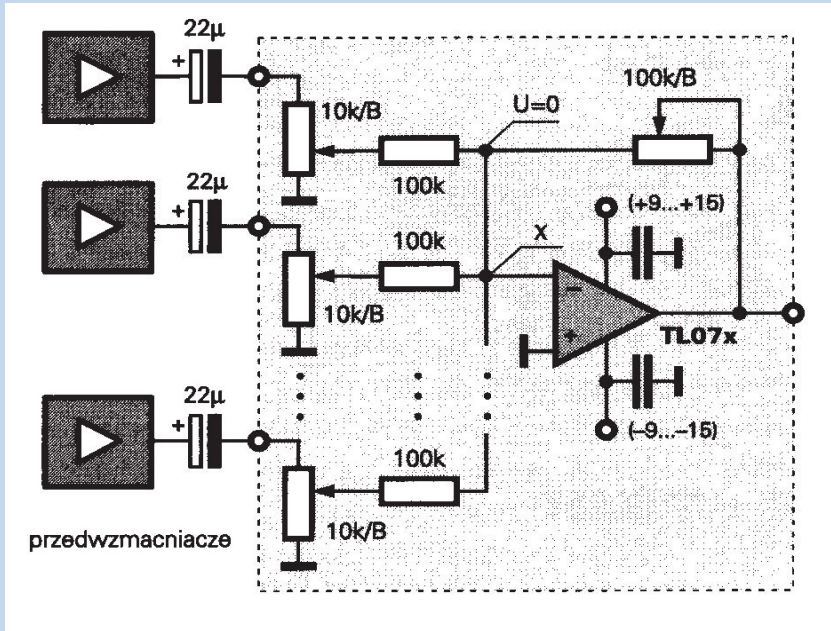
- Rezystancja wejściowa równa  $R_1$
- Wzmocnienie równe  $G = R_2 / R_1$  może być większe lub mniejsze od jedności
- Odwraca fazę napięcia

- SUMATOR

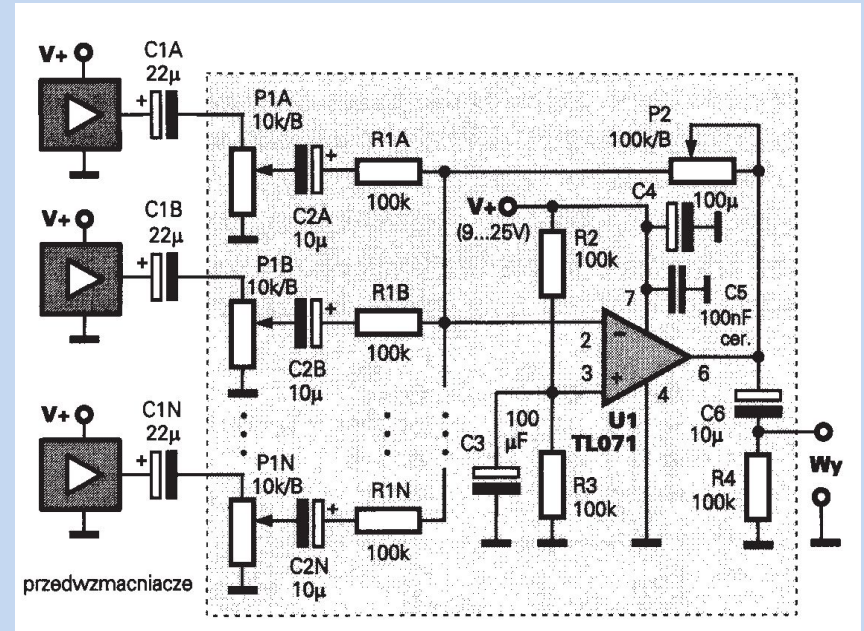


$$V_{OUT} = - \left( \frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_N} V_N \right)$$

- Sumator jako mikser sygnałów audio



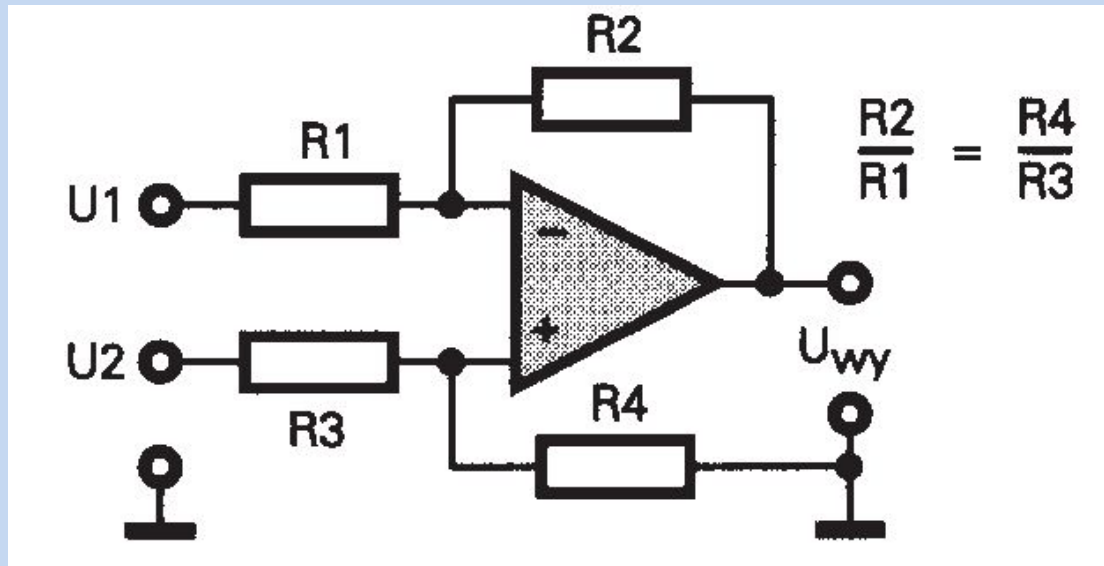
Przy zasilaniu symetrycznym



Przy zasilaniu niesymetrycznym  
 Rezystancje R2 , R3 polaryzują wejście nieodwracające napięciem 0.5 V+

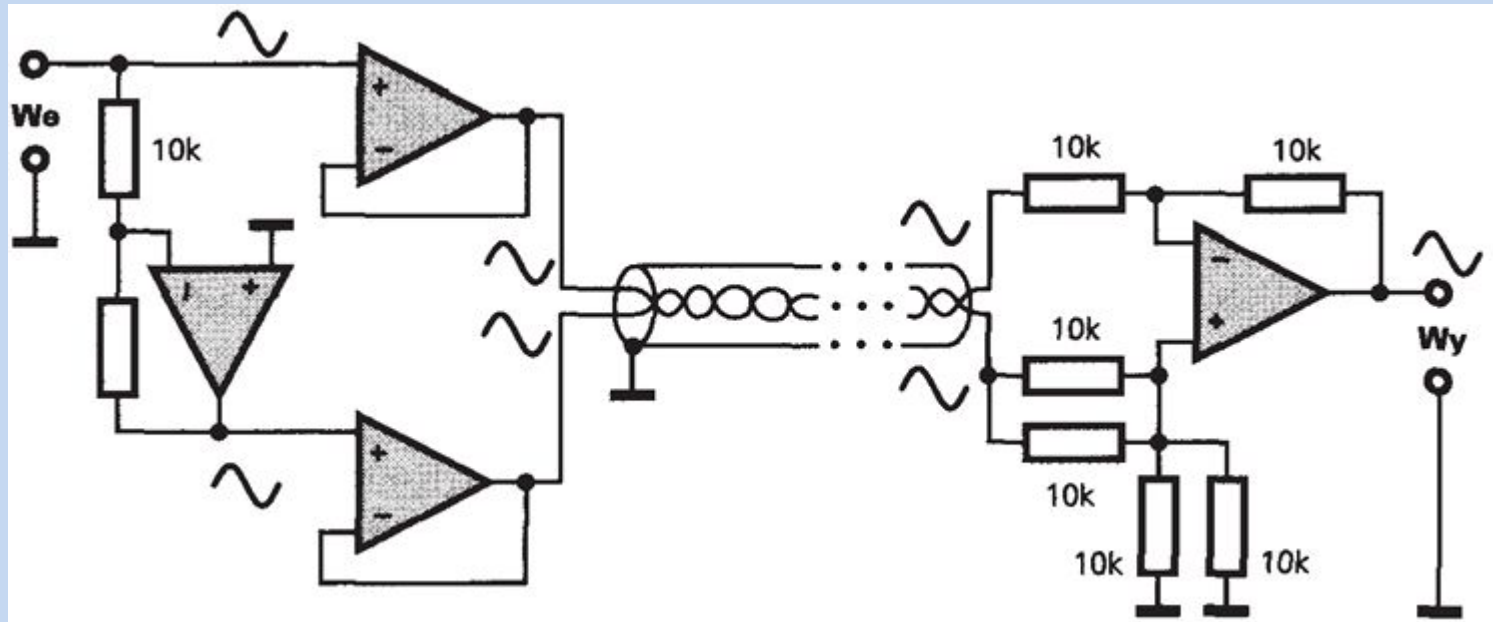
- **WZMACNIACZ RÓŻNICOWY**

- Zadaniem wzmacniacza różnicowego jest wzmocnienie sygnału różnicowego a tłumienie składowej wspólnej sygnałów



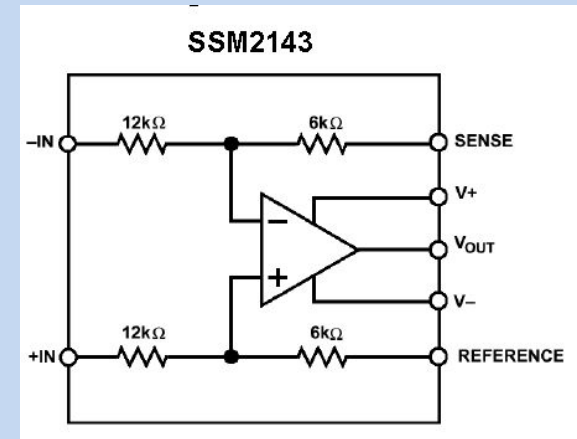
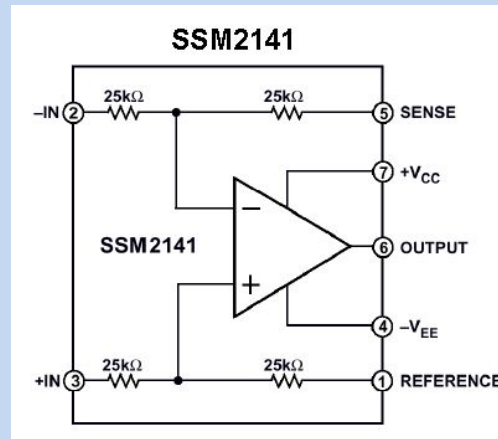
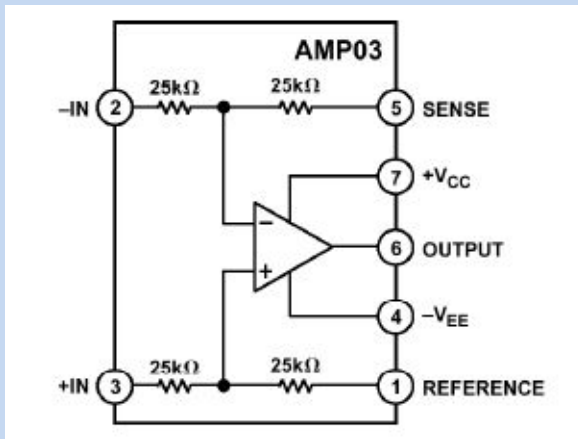
$$G = \frac{U_{wy}}{U_2 - U_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$$

- Zastosowanie wzmacniacza różnicowego do sterowania linią symetryczną



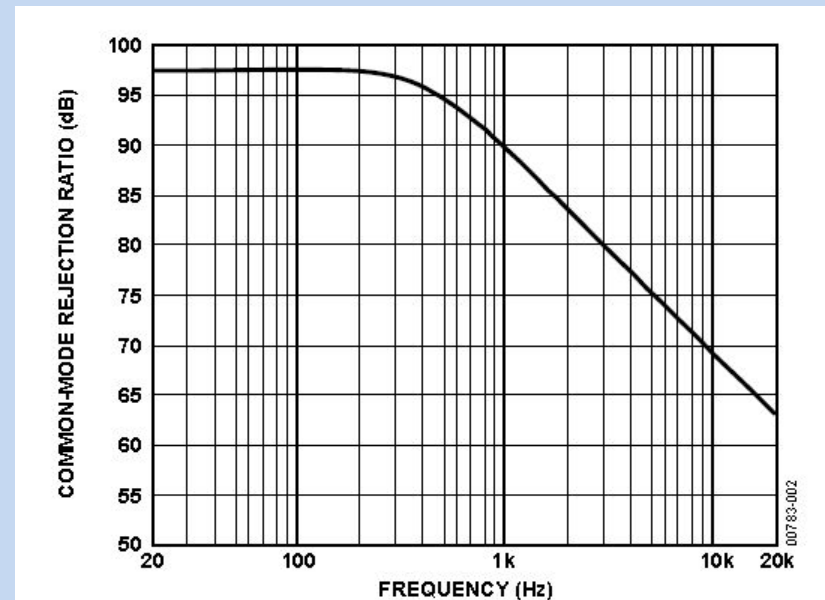
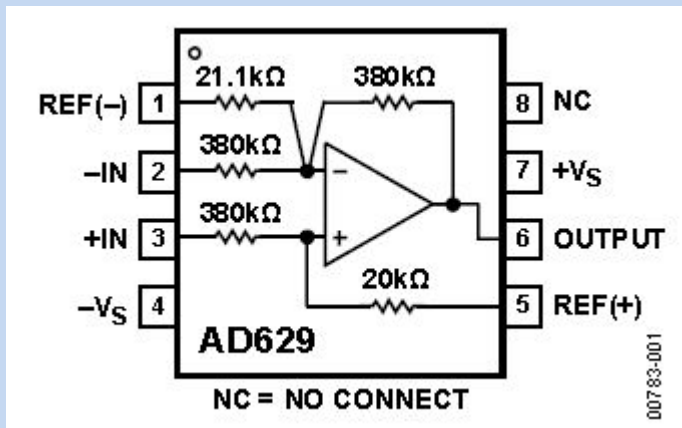
- Podstawowymi problemami w stosowaniu układu wzmacniacza różnicowego są :
  - Tłumienie sygnału wspólnego zależy od zapewnienia równości stosunku rezystorów w pętli sprzężenia zwrotnego
  - Regulacja wzmocnienia jest trudna
  - Na ogół niezbyt duża rezystancja wejściowa, która może być różna dla obu wejść

- Tłumienie sygnału wspólnego zależy od doboru rezystancji w obwodzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza różnicowego. Zastosowanie rezystorów o tolerancji 0.1 % pozwala na osiągnięcie współczynnika tłumienia CMRR ( Common Mode Rejection Ratio ) równego 66 dB .
- W układach pomiaru bardzo małych napięć taka wartość współczynnika tłumienia CMRR może okazać się niewystarczająca. Dlatego wielu producentów oferuje wzmacniacze różnicowe z wbudowanymi rezystorami , w których tłumienie sygnału wspólnego osiąga wartość powyżej 100 dB.
- Wzmacniacze AMP03 i SSM2141 mają wzmocnienie 1 , układ SSM2143 wzmocnienie 0.5.



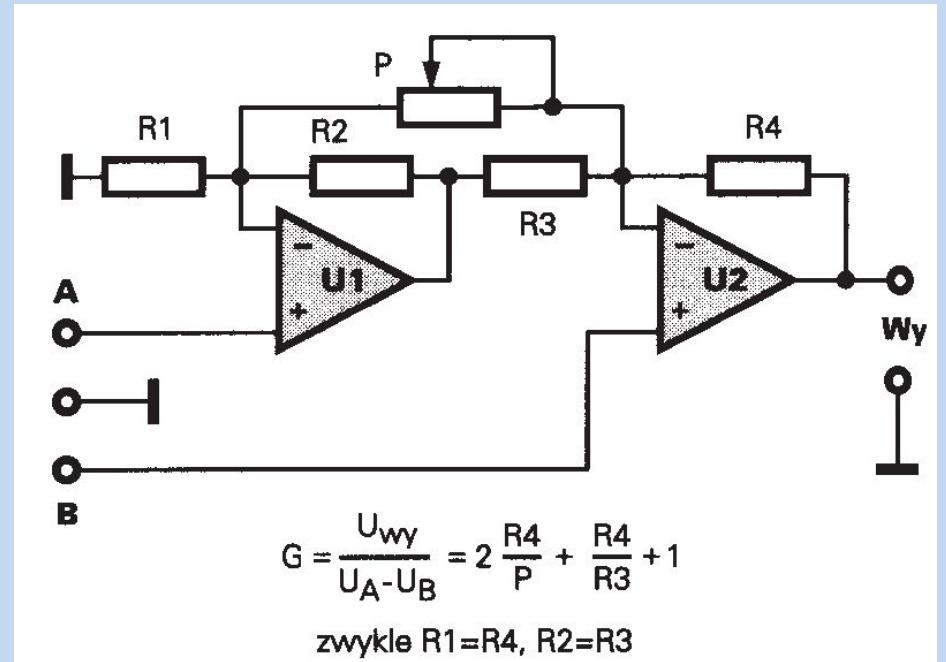
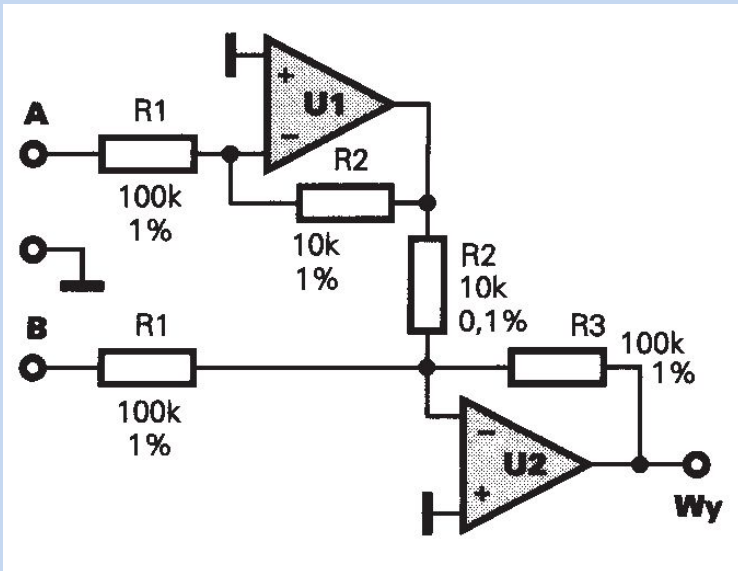


- Układ AD629 jest przeznaczony do pracy w obwodach, w których małe sygnały pomiarowe nałożone są na bardzo dużą składową stałą, sięgającą +/- 270 V . Wartość współczynnika tłumienia składowej wspólnej CMRR przekracza 86 dB dla sygnałów 500 Hz .



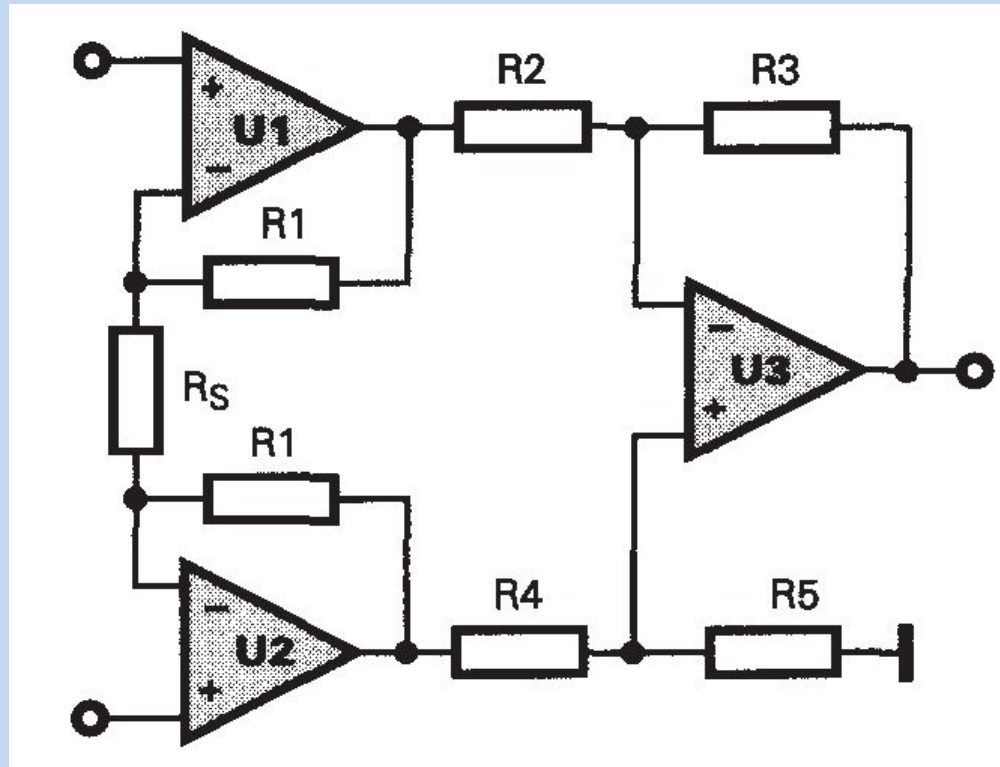
- Odmianą wzmacniacza różnicowego jest wzmacniacz pomiarowy przeznaczony do współpracy ze źródłami bardzo małych sygnałów. Wzmacniacz instrumentalny jest stosowany w bardzo dokładnych systemach pomiarowych.
- Od wzmacniacza różnicowego wzmacniacz instrumentalny różni się następującymi cechami :
  - zrównoważoną dla obu wejść impedancją wejściową o bardzo dużej wartości, rzędu  $10^9 \Omega$
  - Rezystory pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza są odseparowane od wejść sygnałowych
  - Prostsza Regulacją wzmocnienia.

- Istnieją dwa podstawowe rozwiązania wzmacniacza instrumentalnego :
  - Struktura z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi



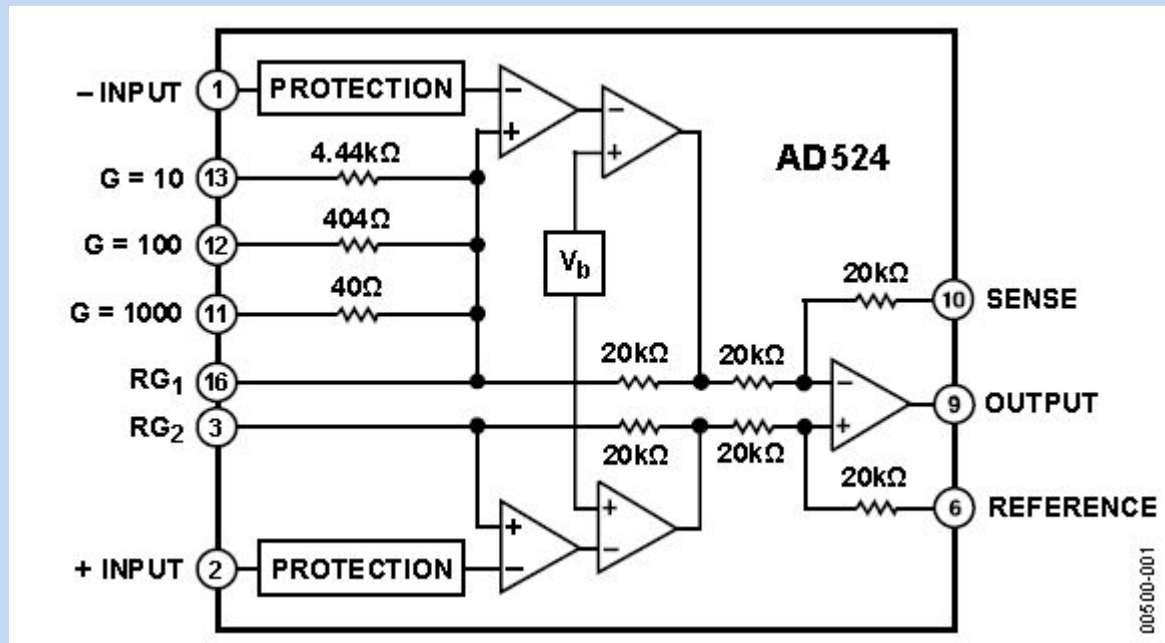
Układ z regulacją wzmocnienia

- Struktura z trzema wzmacniaczami operacyjnymi



$$K_U = 1 + 2 R_1 / R_S$$

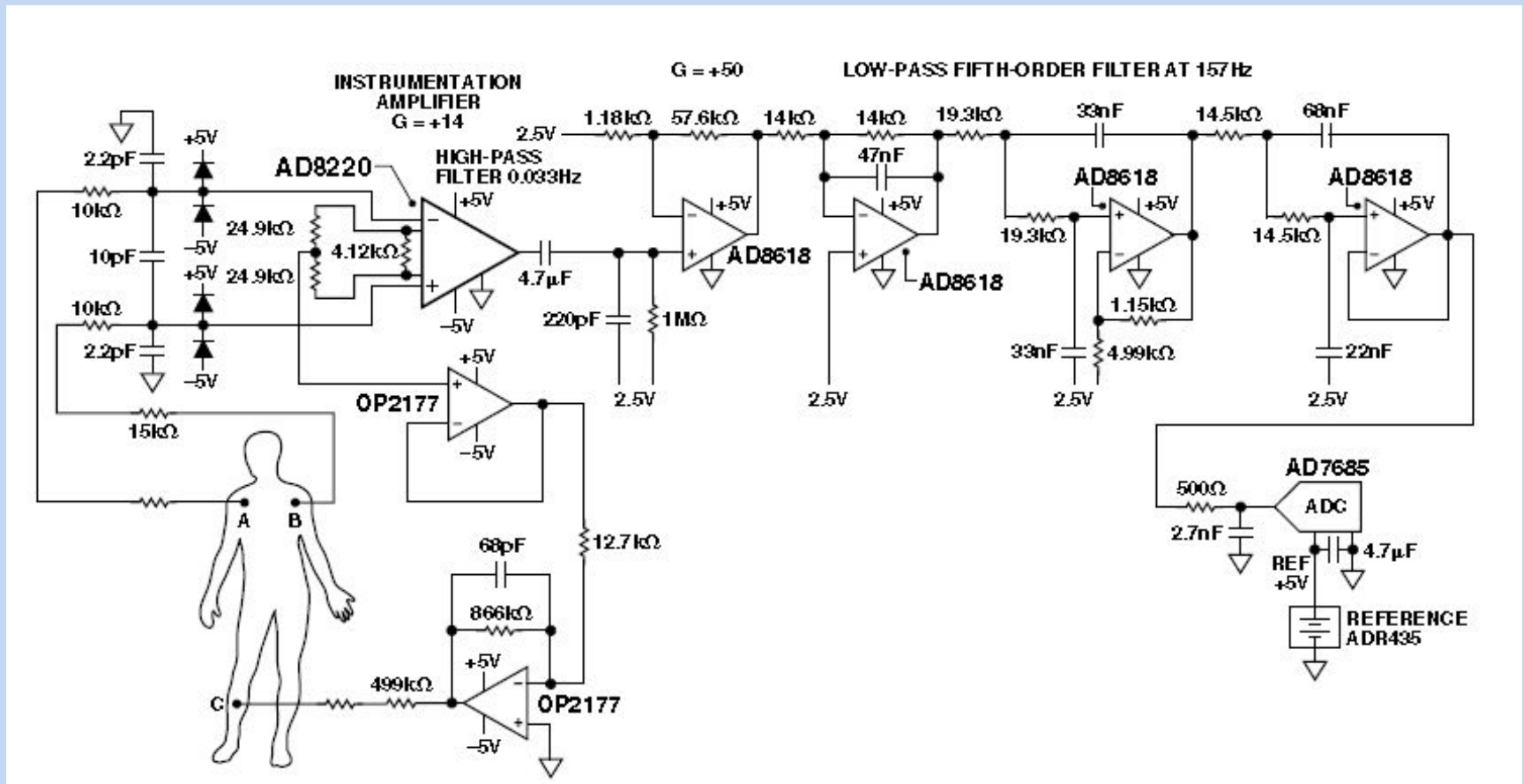
- Szereg producentów oferuje wzmacniacze instrumentalne o różnych parametrach : napięciach zasilania, zakres napięć wejściowych, możliwość regulacji wzmocnienia, wartość współczynnika CMRR.
- Dla przykładu, wbudowane rezystory w układzie AD524 pozwalają na łatwą regulację wzmocnienia od 1 ... 1000 .



- Zestawienie wzmacniaczy instrumentalnych

Product	Features	Power Supply Current Typ	-3 dB BW Typ (G = 10)	CMR G = 10 (dB) Min	Input Offset Voltage Max	V <sub>OS</sub> Drift (μV/°C) Max	RTI Noise <sup>2</sup> (nV/√Hz) (G = 10)	Input Bias Current (nA) Max
AD 8221	Precision, high BW	0.9 mA	560 kHz	100 <sup>3</sup>	60 μV	0.4	11 max	1.5
AD 620	General-purpose	0.9 mA	800 kHz	95 <sup>3</sup>	125 μV	1	16 max	2
AD 8225	Precision gain = 5	1.1 mA	900 kHz <sup>4</sup>	83 <sup>4,5</sup>	150 μV	0.3	45 typ <sup>4</sup>	1.2
AD 8220	R-R, JFET input	750 μA	1500 kHz	100	250 μV	5	17 typ	10 pA
AD 8222	Dual, precision, high BW	1.8 mA	750 kHz	100 <sup>3</sup>	120 μV	0.4	11 max	2
AD 8230	R-R, zero drift	2.7 mA	2 kHz	110	10 μV	10	240 typ	1
AD 8250	High BW, programmable gain	3.5 mA	3.5 MHz	100	100 μV	1	13 typ	15
AD 8251	High BW, programmable gain	3.5 mA	3.5 MHz	100	100 μV	1	13 typ	15
AD 8553	Auto-zero with shutdown	1.1 mA	1 kHz	100	20 μV	0.1	150 typ	1
AD 8555	Zero drift dig prog	2.0 mA	700 kHz <sup>6</sup>	80 <sup>6</sup>	10 μV	0.07	32 typ	22
AD 8556	Dig prog IA with filters	2.0 mA	700 kHz <sup>6</sup>	80 <sup>6</sup>	10 μV	0.07	32 typ	54
AD 622	Low cost	0.9 mA	800 kHz	86 <sup>3</sup>	125 μV	1	14 typ	5
AD 621	Precise gain	0.9 mA	800 kHz	93 <sup>3</sup>	250 μV <sup>7</sup>	2.5 <sup>7</sup>	17 max <sup>7</sup>	2
AD 623	Low cost, S.S.	375 μA	800 kHz	90 <sup>3</sup>	200 μV	2	35 typ	25
AD 627	Micropower, S.S.	60 μA	80 kHz	100	250 μV	3	42 typ	10

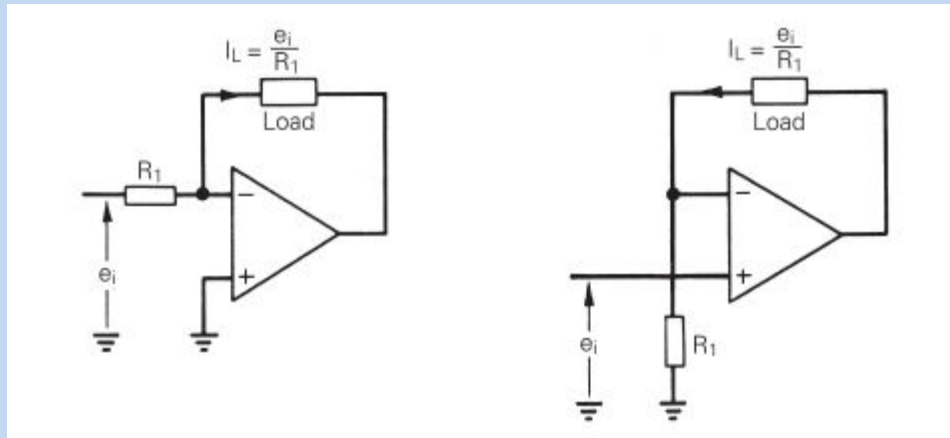




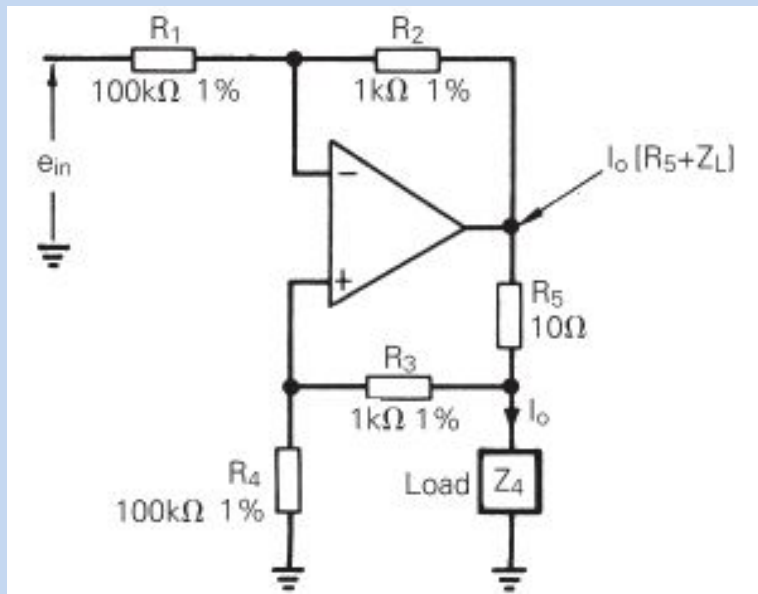
Wykorzystanie wzmacniacza instrumentalnego w aparacie EKG



- Konwerter napięcie – prąd dla pływającego obciążenia

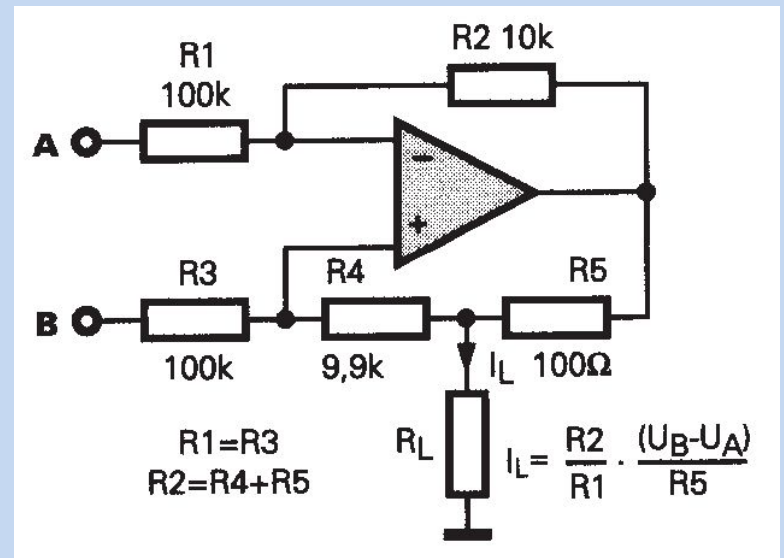
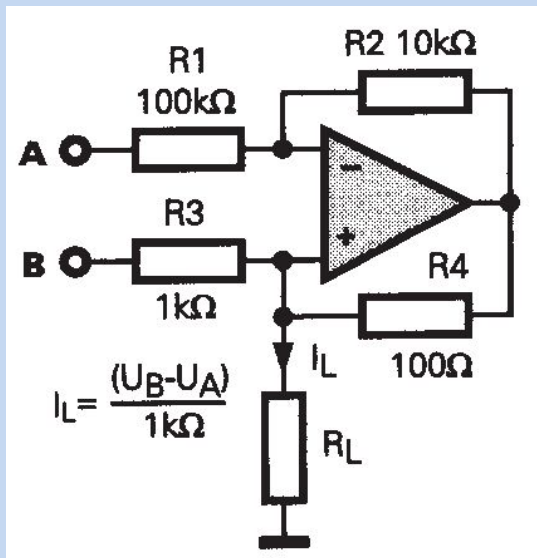
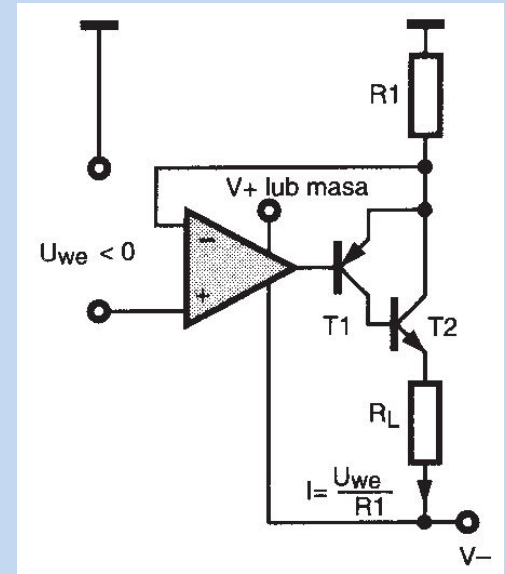
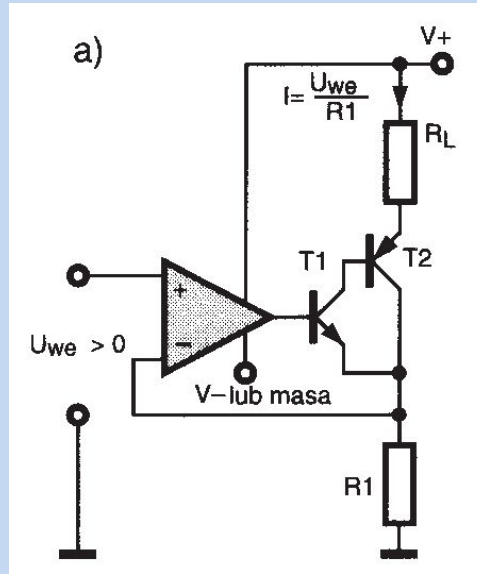
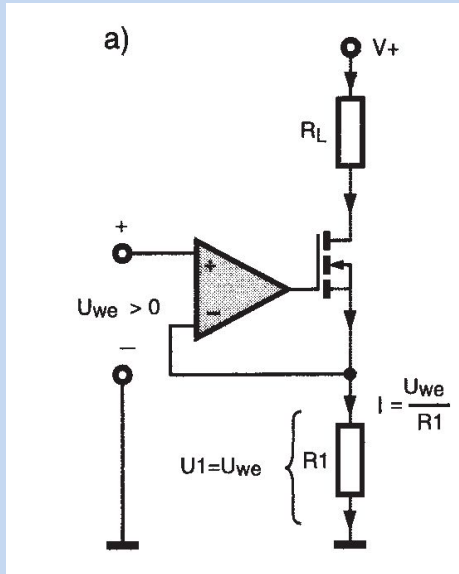


- Konwerter napięcie – prąd dla obciążenia dołączanego do masy



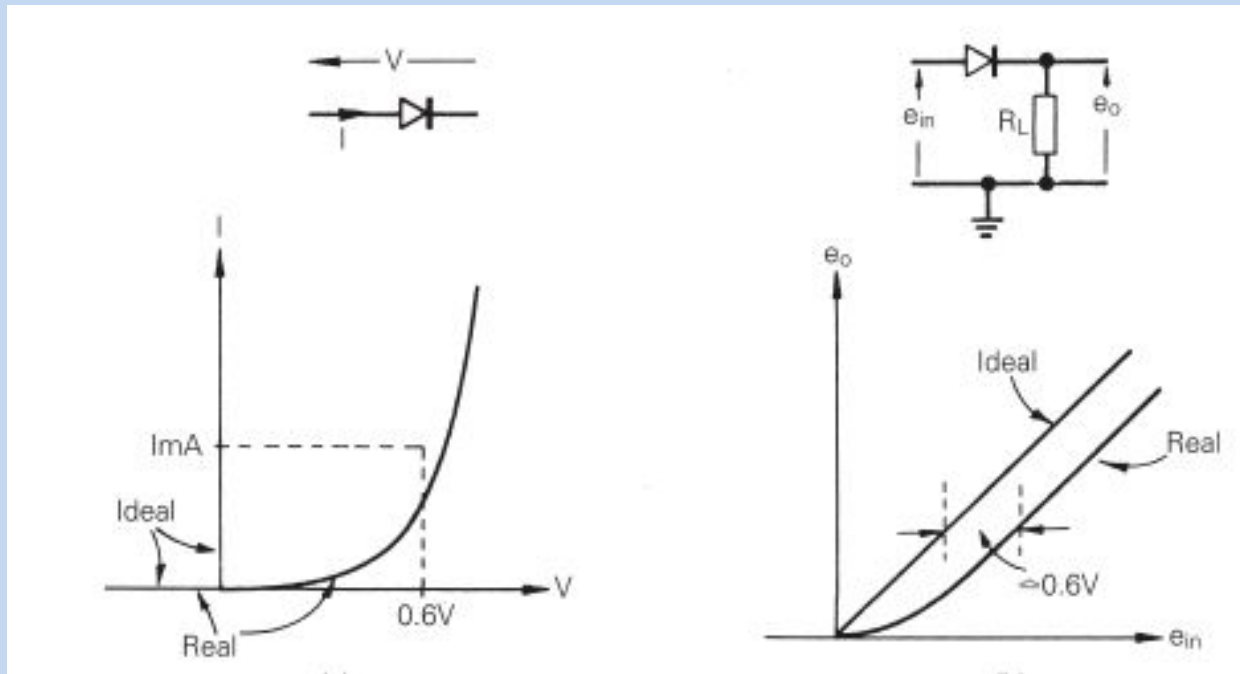
$$I_o = -\frac{e_{in} R_2}{R_5 R_1}$$

- Źródła prądowe

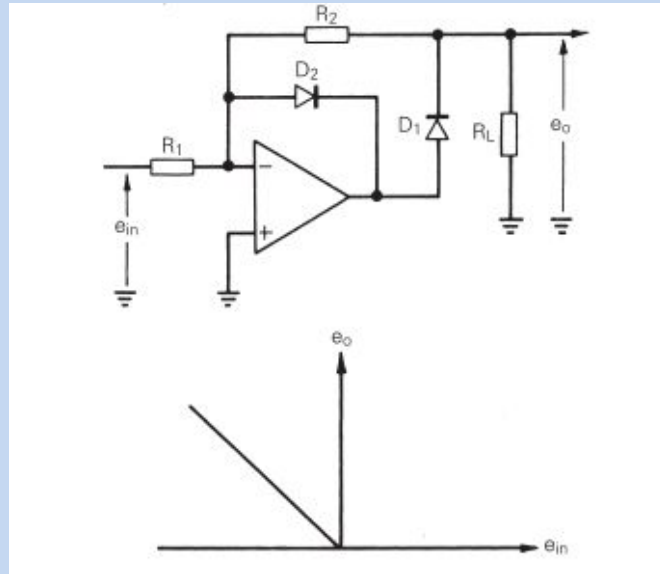


# PROSTOWNIK LINIOWY

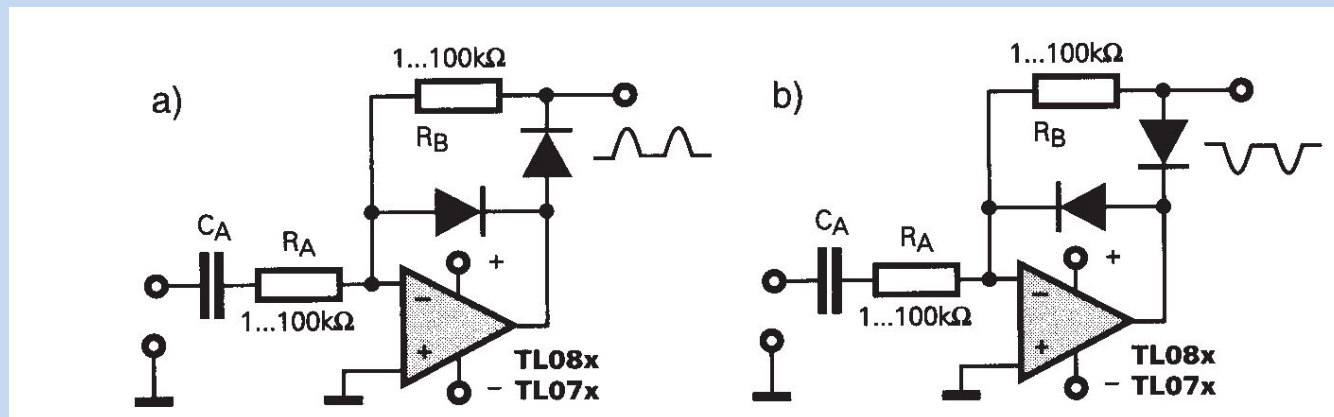
- Idealna dioda jest elementem, który wykazuje zerową rezystancję dla napięć o danej polaryzacji a nieskończoną rezystancję dla napięć o przeciwnej polaryzacji.
- Rzeczywista dioda półprzewodnikowa wykazuje odstępstwa od charakterystyki idealnej. Są one źródłem błędów nieliniowych szczególnie wtedy, gdy mamy do czynienia z napięciami o małych amplitudach.



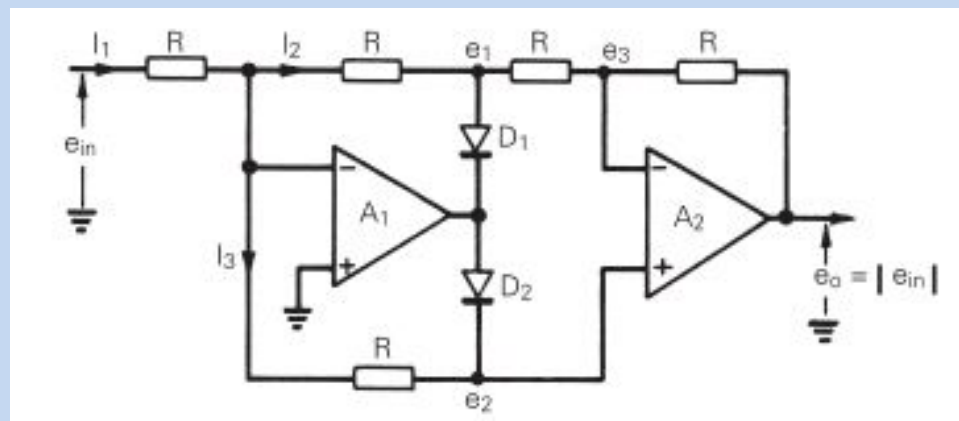
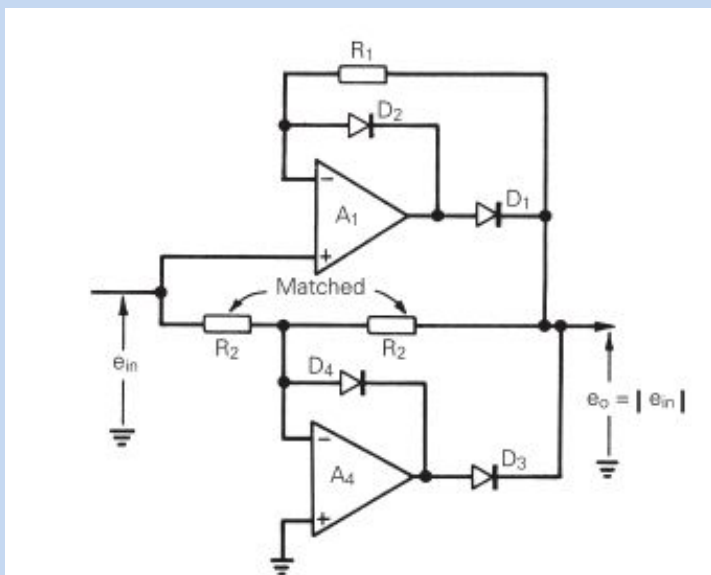
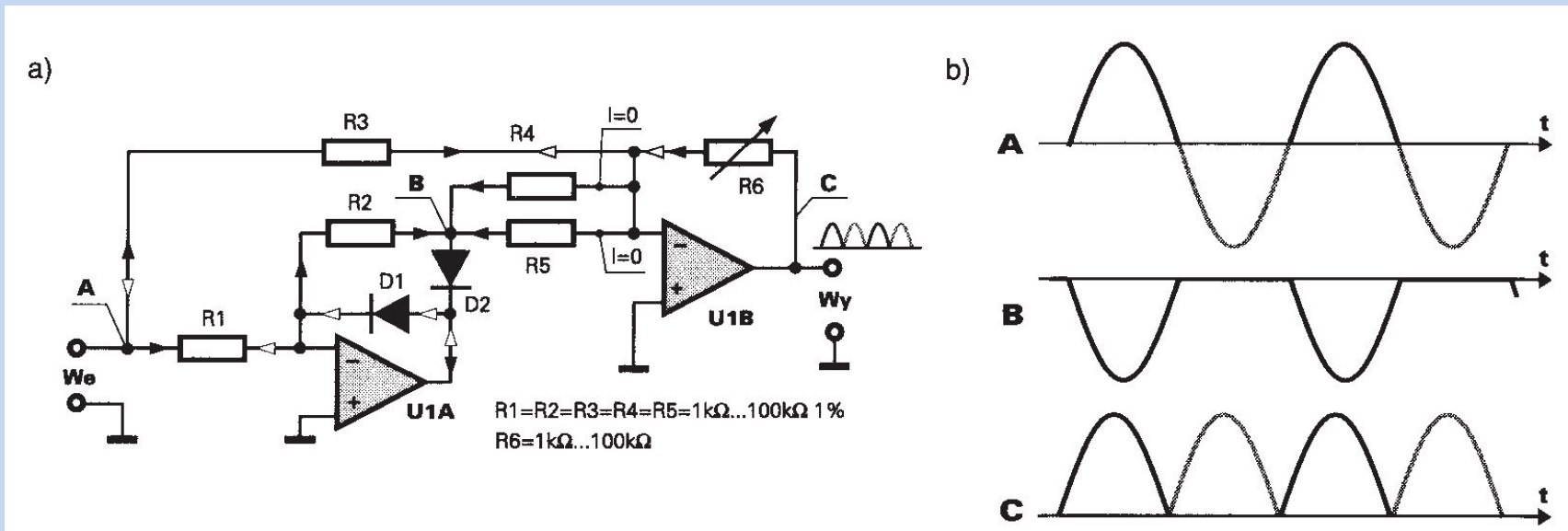
- Prostownik liniowy jest układem zrealizowanym przy użyciu wzmacniacza operacyjnego, którego charakterystyka przejściowa odpowiada charakterystyce diody idealnej.



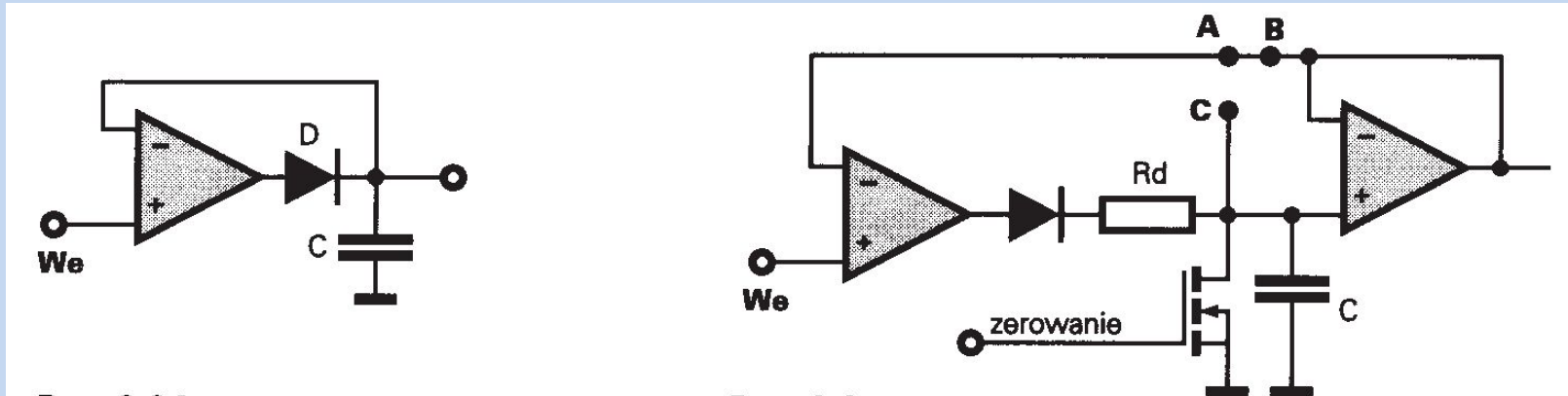
Zasada pracy jednopółkowego prostownika liniowego i jego praktyczna realizacja dla prostownika dodatniego i ujemnego



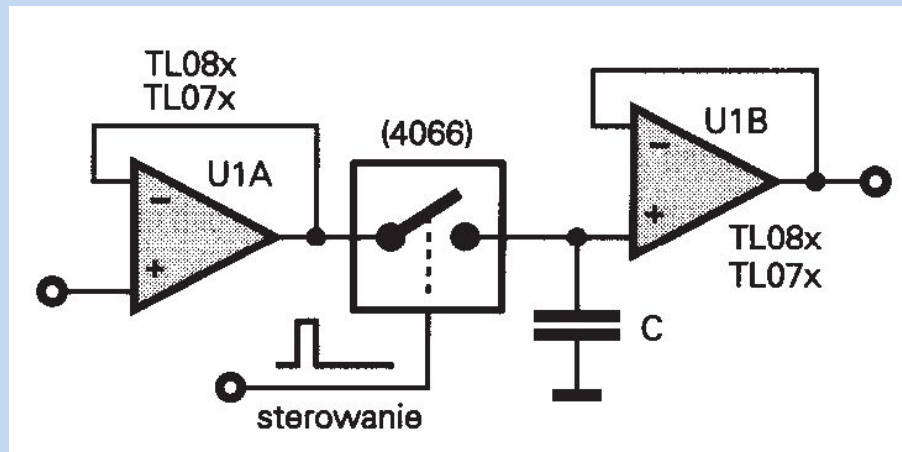
- Układy prostownika dwupołówkowego



- Detektor szczytowy

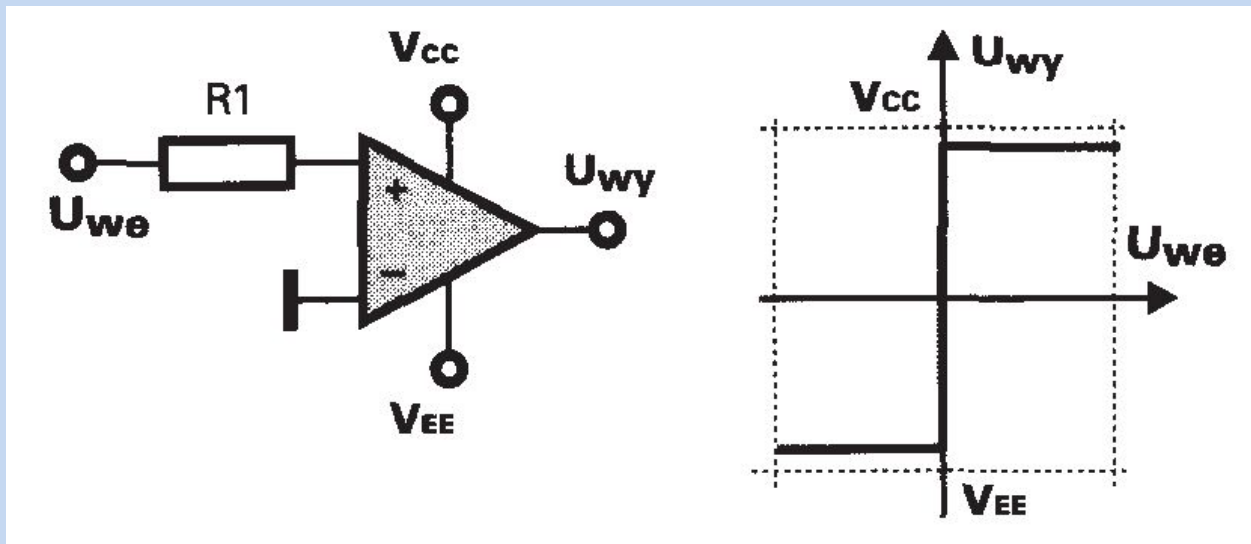


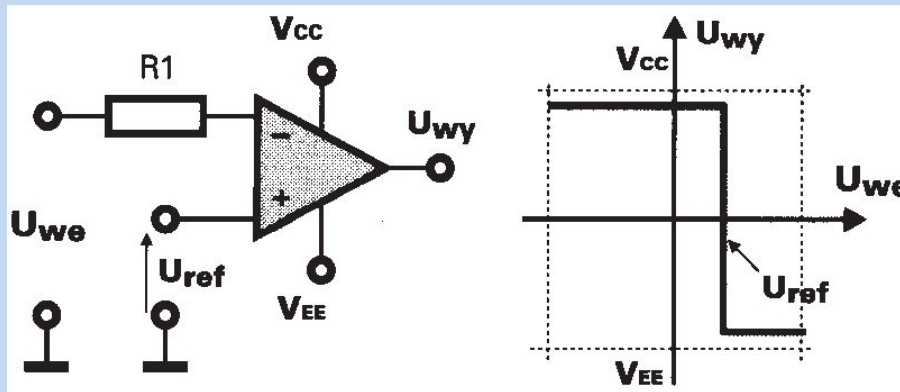
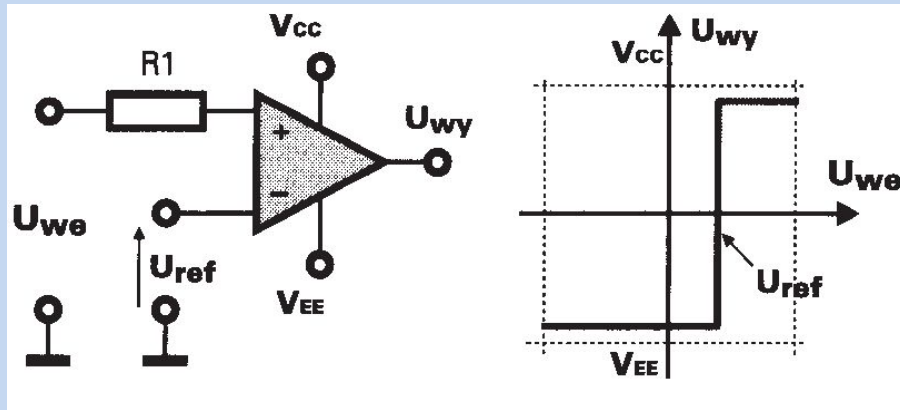
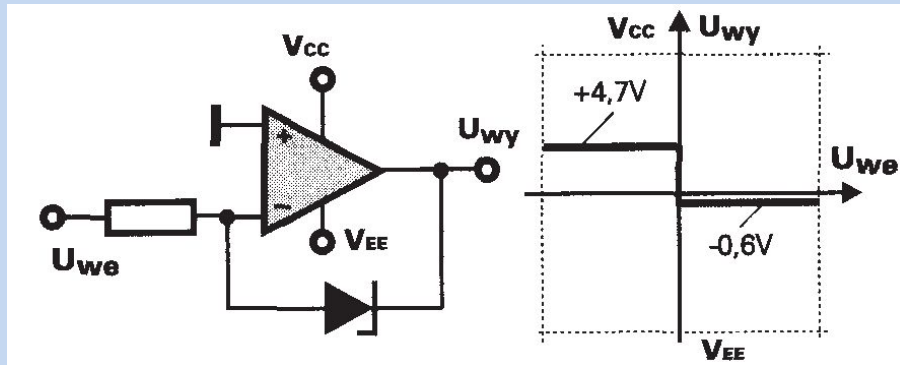
- Układ próbkująco-pamiętający



# KOMPARATOR

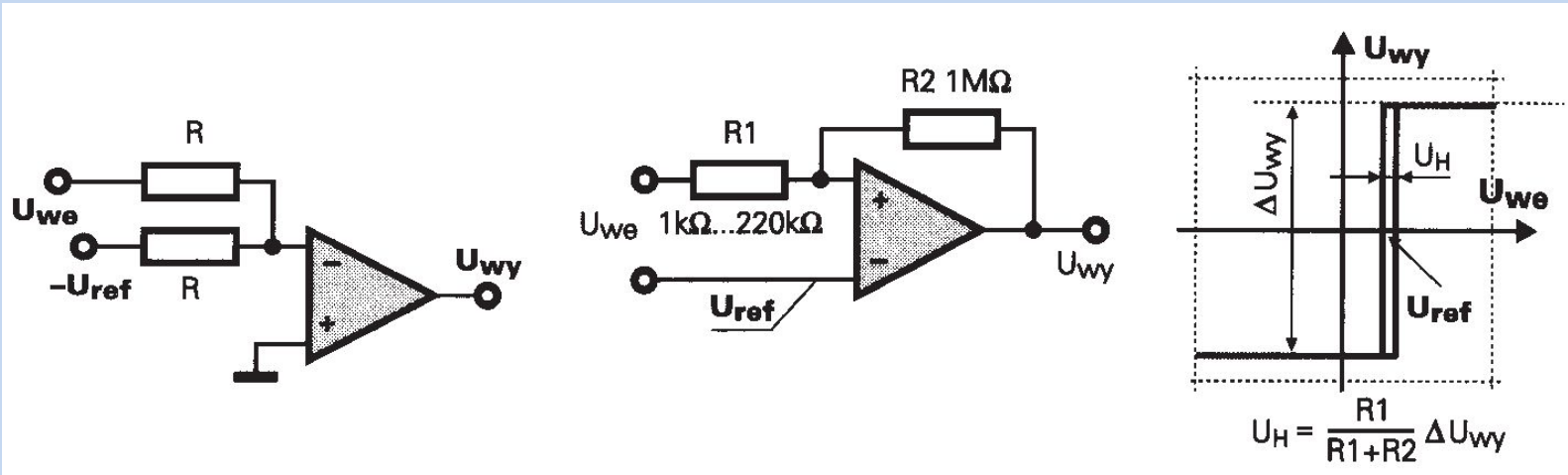
- KOMPARATOR jest układem analogowym służącym do porównania napięć wejściowych.
- W roli komparatora może być użyty zwykły wzmacniacz operacyjny, jednakże ich parametry takie jak zakres napięć wejściowych i wyjściowych oraz szybkość zmian napięcia na wyjściu nie są na ogół dostosowane do poziomu współpracującego z komparatorem układu logicznego.
- Dlatego rolę komparatora pełni na ogół wyspecjalizowany układ analogowy.



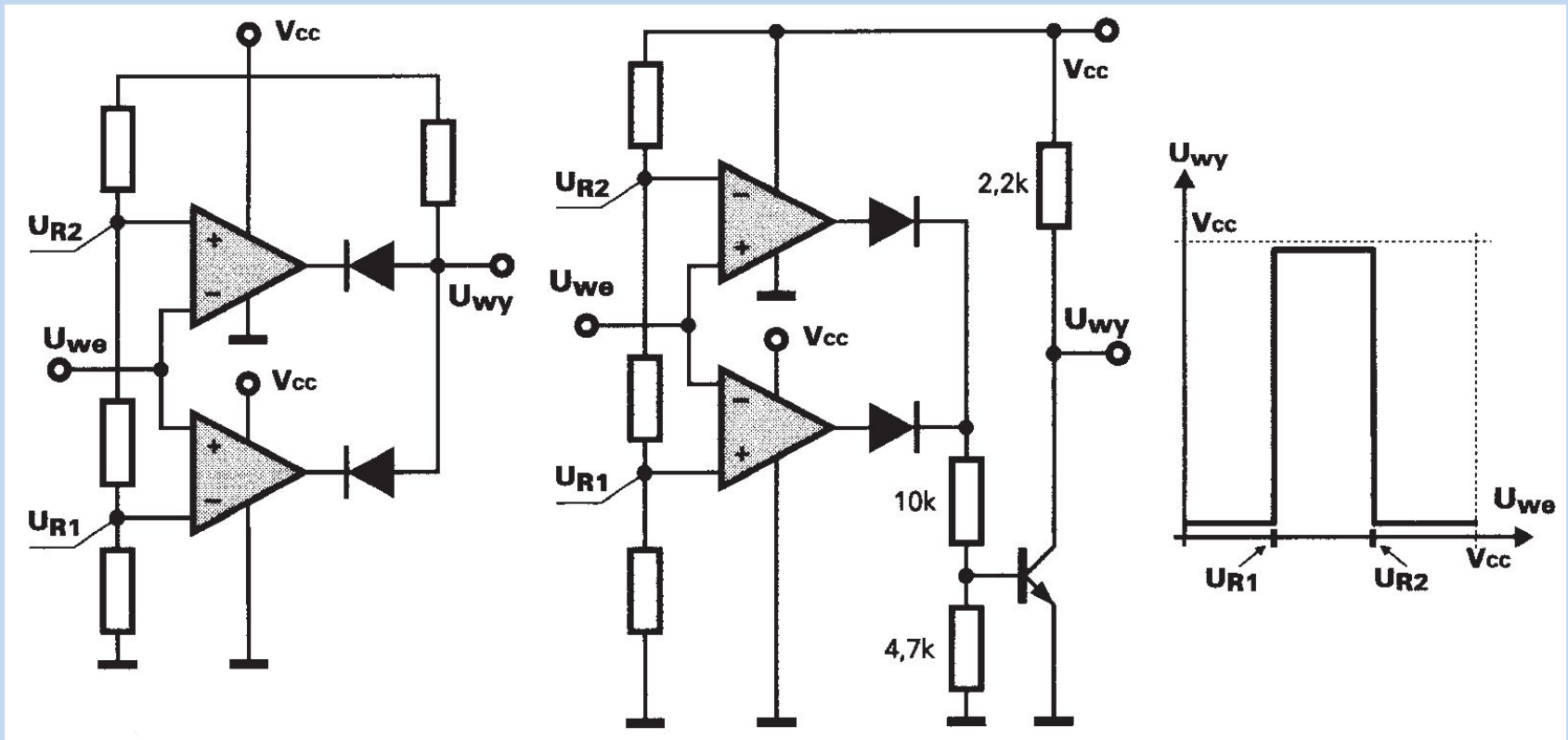




- Komparator z histerezą pozwala na wyeliminowanie przypadkowych zmian stanu wyjściowego na napięciu szumów wejściowych.
- O szerokości histerezy decyduje stosunek rezystorów R2 i R1 oraz wartości napięć zasilających.



- Jeżeli chcemy sprawdzić, czy dane napięcie mieści się w założonym przedziale napięć, należy wykorzystać DYSKRYMINATOR OKIENKOWY .



- PRZYKŁAD DO OBLICZEŃ

