

**WYDZIAŁ FIZYKI, MATEMATYKI I INFORMATYKI**  
**POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ,**  
**Instytut Fizyki**  
**LABORATORIUM PODSTAW ELEKTROTECHNIKI,**  
**ELEKTRONIKI I MIERNICTWA**

**Ćwiczenie 6** *POMIARY CHARAKTERYSTYK WZMACNIACZA OPERACYJNEGO*

**POJĘCIA I MODELE** potrzebne do zrozumienia działania scalonego wzmacniacza operacyjnego:

1. Idealne i rzeczywiste źródło napięcia
2. Zależne źródło napięcia
3. Opór wejściowy układu, opór wyjściowy układu
4. Idealny wzmacniacz operacyjny
5. Praca wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym i nieodwracającym fazę sygnału wejściowego
6. Pasma przenoszenia układu elektronicznego
7. Wzmocnienie napięciowe
8. Sprzężenie zwrotne

Literatura

1. N.Lurch „Podstawy techniki elektronicznej” PWN 1974
2. P.G.Gray, C.L.Salre “Podstawy elektroniki” PWN 1974
3. M.Nadachowski, Z. Kulka „Analogowe układy scalone” WKiŁ 1990
4. Glode W. „Układy elektroniczne” WNT 1970
5. Barna A. „Wzmacniacze operacyjne” WNT 1974

Autor: Franciszek Starzyk

# WZMACNIACZ OPERACYJNY

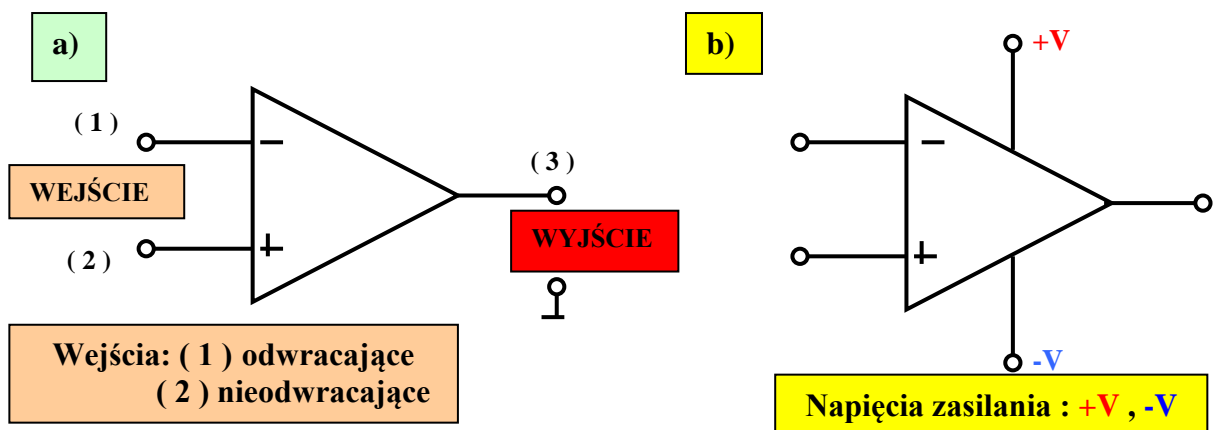
## 1. Wprowadzenie

Wzmacniacze operacyjne (wo) konstruowano i stosowano pierwotnie celem wykonywania operacji matematycznych (dodawanie, odejmowanie, całkowanie, różniczkowanie). Złożone z elementów dyskretnych R, L, C (biernych) oraz czynnych (diody, tranzystory, pierwotnie lampy elektronowe) wo posiadały struktury o stopniu złożoności zależnym od przeznaczenia i warunków, w których miały pracować.

Obecnie wo produkowane są w postaci obwodów scalonych liniowych. Są tanie i pracują na ogół przy napięciach zasilania nie przekraczających  $\pm 15V$ .

## 2. Symbol i doprowadzenia / wyprowadzenia wo

Na rysunku 1a przedstawiono symbol i oznaczenia doprowadzeń sygnałów do wo, a na rysunku 1b pokazano dodatkowo doprowadzenia napięć zasilających elementy struktury wewnętrznej wo.

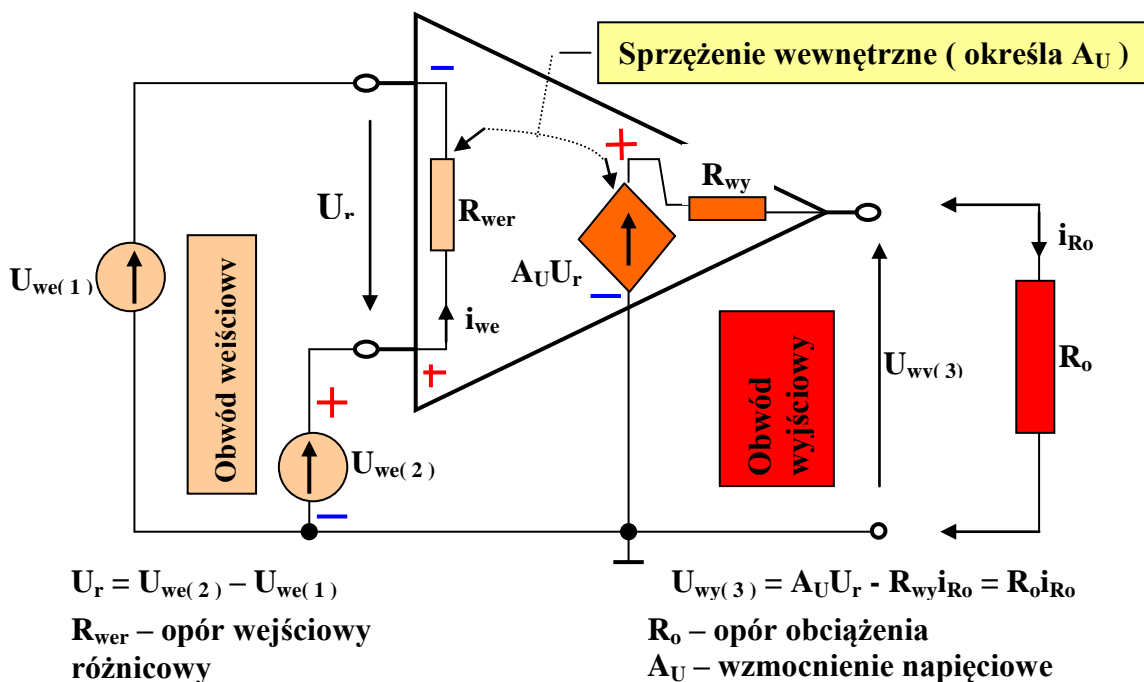


Rys.1. a) symbol wzmacniacza operacyjnego, oznaczenia doprowadzeń  
b) doprowadzenia napięć zasilających

Struktura zawarta wewnątrz scalonego wo określona przez producenta może realizować różne zadania. Określane są one przez konstruktora układu, a działanie wo może być modyfikowane poprzez dołączanie do doprowadzeń (1), (2), (3) różnych elementów biernych R, L, C lub bardziej złożonych układów. Na niektórych schematach układów elektronicznych doprowadzenia napięć zasilających są pomijane dla uproszczenia. Należy jednak pamiętać, że muszą być podłączone, aby układ wo mógł działać. Współczesne wo produkowane są głównie jako wzmacniacze o sprzężeniach bezpośrednich. Oznacza to, że sygnały prądowe lub napięciowe doprowadzane są na we (1) i (2) oraz (3) bez pośrednictwa pojemności sprzęgających. Wzmacniacze przeznaczone są głównie do pracy z zewnętrznym obwodem sprzężenia zwrotnego, dodatniego (generatory) lub ujemnego (wzmacniacze operacyjne, stabilizatory prądu i inne).

### 3. Idealny wzmacniacz operacyjny (iwo)

Aby łatwiej zrozumieć działanie i właściwości wo można posłużyć się pojęciem iwo W celu określenia cech iwo rozważymy prosty schemat zastępczy wo przedstawiony na rys. 2.



Rys.2. Prostý schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego pracującego różnicowo – sygnały wejściowe są odejmowane .

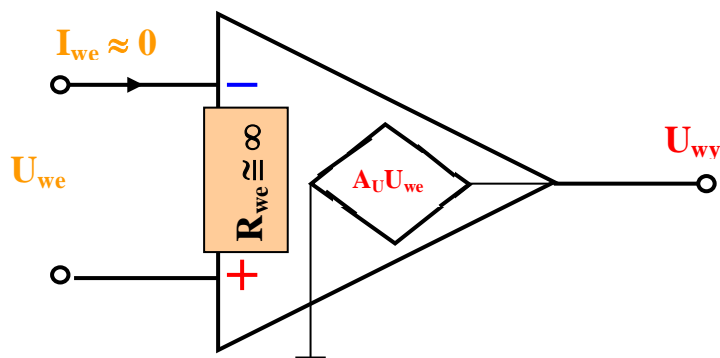
Na rys.2 przedstawiono opis tylko napięć podanych na wejścia wo:  $U_{we(1)}$ ,  $U_{we(2)}$ ; opór wejściowy różnicowy  $R_{wer}$ ; opór wyjściowy  $R_{wy}$ ; napięcie na wyjściu (3) wo  $U_{wy3}$ . Opornik  $R_0$  symbolizuje zastępczo obwód obciążający wyjście wo.

Napięcie  $U_r = U_{we(1)} - U_{we(2)}$  określa się jako napięcie różnicowe; obwód wyjściowy wo reprezentowany jest przez zależne źródło napięcia o wartości  $U_r$ . Połączony z tym źródłem opór wyjściowy  $R_{wy}$  oraz zamykający obwód wyjściowy opór obciążenia  $R_0$ .

W realizacji sprzężenia napięcia źródła zależnego z  $U_r$  pośredniczy struktura wewnętrzna wo nie pokazana na rys.2. Jej działanie określa wartość wzmocnienia napięciowego  $A_u$ . Napięcie wyjściowe  $U_{wy(3)}$  będzie mniejsze od  $A_u U_r$  o spadek potencjału na oporze  $R_{wy}$ . Gdy  $R_{wy}$  jest bardzo małe i można jego wpływ pominąć, tzn. gdy  $R_{wy} \sim 0$  (zwarcie), napięcie  $U_{wy(3)} \sim A_u U_r$ . Oznacza to, że źródło zależne ( $A_u U_r$ ) symbolizujące wyjście wo jest źródłem idealnym i można z niego czerpać prąd  $i_{r0}$  bardzo duży bez obniżenia wartości  $U_{wy(3)}$ . Jest to pierwsza cecha wzmacniacza operacyjnego idealnego.

Obwód wejściowy wo przedstawiono jako dwa źródła idealne napięć  $U_{we(1)}$  i  $U_{we(2)}$ , podawanych na wejścia wo odwracające (1) oraz nieodwracające (2). Obwód wejściowy zamyka opór wejściowy różnicowy wo oznaczony jako  $R_{wer}$ . Gdy wartość  $R_{wer}$  jest bardzo duża ( $\sim$  przerwa), to prąd płynący przez  $R_{wer}$  pod wpływem różnicy napięć  $U_r$  jest bardzo mały  $i_{we} \rightarrow 0$ , a różnica napięć pomiędzy wejściem (1) i (2) znika i można przyjąć, że  $R_{wer} \rightarrow \infty$  i wejście wo pracuje bezprądowo ( $i_{we} \approx 0$ ). Jest to druga cecha wo idealnego pracującego różnicowo.

Możemy teraz przedstawić model idealnego wo i określić jego cechy. Przedstawiono to na rys. 3.



Rys.3. Model idealnego wzmacniacza operacyjnego.

Nieskończenie wielka wartość oporu  $R_{we}$  powoduje, że iwo nie pobiera prądu ( $I_{we} \approx 0$ ). Tym samym nie obciąża źródeł sygnału/ów wejściowych. Jeżeli na zacisk (1) podamy jakieś napięcie, to na zacisku (2) pojawi się takie samo napięcie. Zestawimy teraz wszystkie istotne cechy iwo:

- nieskończenie duży opór wejściowy (pomiędzy (1) i (2), jak i pomiędzy (1) i ziemią oraz pomiędzy (2) i ziemią)
- prąd wejściowy zerowy
- opór wyjściowy równy zero
- nieskończenie duży dopuszczalny prąd wyjściowy
- napięcie wyjściowe równe 0 przy równych napięciach na zaciskach (1) i (2)
- cechy iwo zachowane są w bardzo szerokim przedziale częstotliwości sygnałów napięciowych i prądowych
- wzmocnienie napięciowe  $A_u$  jest bardzo duże.

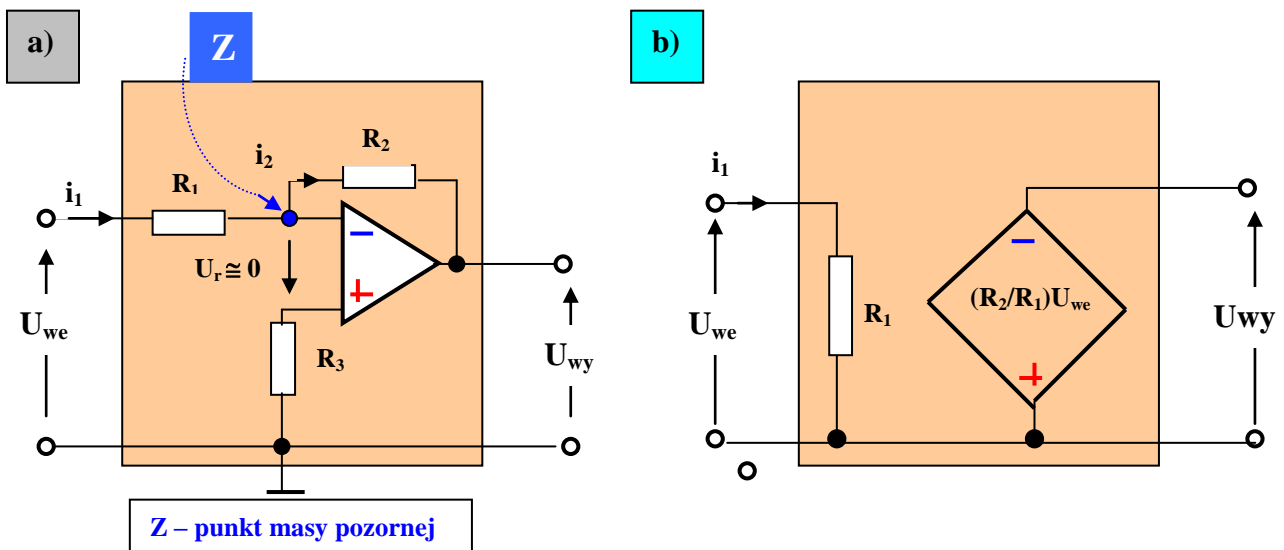
Powyższe cechy nie mogą być całkowicie zrealizowane w praktyce lecz stanowią zbiór cech granicznych z teoretycznego punktu widzenia. Ułatwiają one jednak analizę działania różnych układów, w których pracują wo . Przykłady przedstawiono poniżej.

#### 4. Wybrane układy pracy wo i ich schematy zastępcze

Wo mogą pracować w bardzo wielu różnych układach. Najczęściej jednak pracują w układach z zewnętrznym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Polega to na wydzieleniu części sygnału wyjściowego i skierowaniu go zrotnie na wejście odwracające. Sprzężenie zwrotne umożliwia wpływanie na pracę całego układu zawierającego wo. Pozwala np. na zmniejszenie nieliniowości charakterystyk, poszerzenie pasma przenoszenia i regulację wzmocnienia. Poniżej przedstawiamy najprostsze modele pracy wo w układach: wzmacniacza odwracającego, nieodwracającego, oraz wtórnika napięciowego. Opis działania innych typów układów jak np. wzmacniacz sumujący, całkujący (integrator), różniczkujący oraz inne można odnaleźć w literaturze.

##### 4.1. Wzmacniacz odwracający ( inwerter )

Schemat wzmacniacza odwracającego przedstawiono na rys.4.



Rys.4. a) wzmacniacz odwracający b) obwód zastępczy wzm. odwracającego – stanowi sterowne napięciem  $U_{we}$  zależne źródło napięciowe .

Obwód zastępczy wzmacniacza odwracającego stanowi sterowane napięciem  $U_{we}$  zależne źródło napięciowe.

Węzeł Z stanowi punkt tzw. masy pozornej – potencjał w tym punkcie jest bliski potencjałowi masy, gdyż od Z przez (-) do (+) i dalej przez  $R_3$  do masy płynie pomijalnie mały prąd. Dzieje się tak z powodu bardzo dużego oporu pomiędzy (-) a (+), ( $R_{wer} \sim \infty$ ). W węźle Z prąd do (-) prawie nie wpływa, więc bilans prądów można zapisać jako  $i_1 = i_2$ . Korzystając z prawa Ohma mamy:

$$i_1 = \frac{U_{we}}{R_1}; \quad i_2 = -\frac{U_{wy}}{R_2}$$

$$\text{czyli } \frac{U_{we}}{R_1} = -\frac{U_{wy}}{R_2}$$

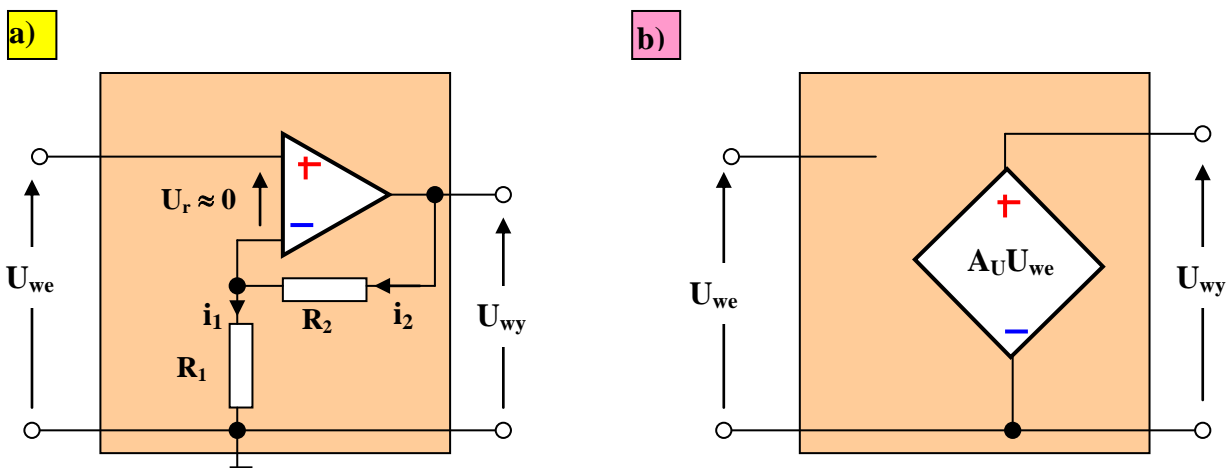
Wzmocnienie napięciowe układu określamy jako:

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1}; \quad U_{wy} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{we} \quad (1)$$

Rezystancja wejściowa wzmacniacza odwracającego wynosi  $R_1$ , co jest widoczne na rysunku 4b). Wartość  $R_3$  nie wpływa na rezystancję wejściową, gdyż przez  $R_3$  przepływa znikomo mały prąd. Jeżeli zastosować w układzie  $R_1 = R_2$ , to otrzymamy inwerter o wzmocnieniu 1. Aby  $A_U$  było duże, należy stosować bardzo duże opory ( $R_2 > R_1$ ), co przy wymogu dużego  $R_1$  (rezystancja wejściowa) wymaga jeszcze większych  $R_2$ . Tak duże opory w układzie w połączeniu z pojemnościami montażowymi (pasożytniczymi) mogą ograniczać przenoszenie sygnałów o dużych częstotliwościach.

## 4.2. Wzmacniacz nieodwracający

Schemat wzmacniacza nieodwracającego przedstawia rys. 5a. Sygnał wejściowy  $U_{we}$  jest doprowadzany do wejścia nieodwracającego (+). Część sygnału  $U_{wy}$  za pośrednictwem dzielnika  $R_2$ - $R_1$  podana jest zwrotnie na wejście odwracające (ujemne sprzężenie zwrotne).



Rys.5. a) wzmacniacz nie odwracający b) jego schemat zastępczy to sterowane napięciem zależne źródło napięcia

Podobnie jak poprzednio  $U_r \approx 0$ , co oznacza, że pomiędzy węzłem a masą panuje napięcie równe  $U_{we}$ . Bilans prądów w węźle q wynosi  $i_1 = i_2$  oraz

$$\frac{U_{we}}{R_1} = \frac{U_{wy} - U_{we}}{R_2} \quad (2)$$

co po przekształceniu (2) daje

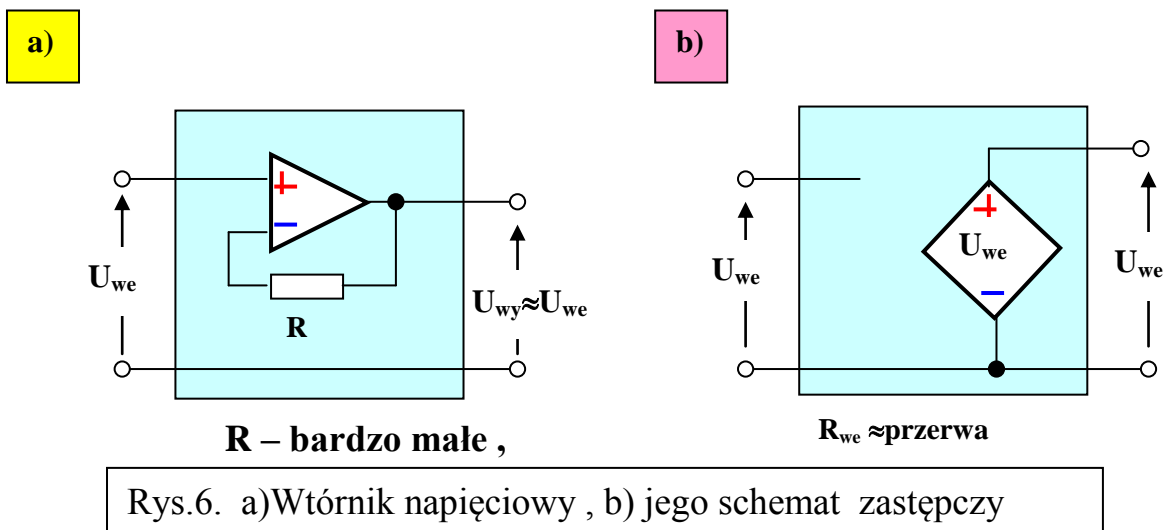
$$A_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{lub} \quad U_{wy} = A_U \cdot U_{we} \quad (3)$$

Wzmocnienie napięciowe w tym układzie zależy tylko od ilorazu  $R_2/R_1$  i zawsze jest równe lub większe od 1. W porównaniu z układem nieodwracającego wzmacniacza główna różnica dotyczy wartości na rezystancji wejściowej: jak widać na rys.5b, dla idealnego wzmacniacza nieodwracalnego jest ona ogromna (przerwa).



### 4.3. Wtórnik napięciowy

Jeżeli we wzmacniaczu nieodwracającym zastosujemy całkowite ujemne sprzężenie zwrotne, czyli na wejście odwracającego wo podamy całe (a nie podzielona na  $R_2$   $R_1$ ) napięcie  $U_{wy}$ , to otrzymamy układ zwany wtórnikiem napięciowym. Gdy w formule (3) (oraz w układzie) użyjemy  $R_1 \approx \infty$  (bardzo duży opór) lub  $R_2 \approx 0$  (zwarcie), to wzmocnienie napięciowe  $A_U = 1$ . Układ taki będzie posiadał bardzo dużą rezystancję wejściową i małą rezystancję wyjściową. Jest to układ znakomicie mogący pośredniczyć w przenoszeniu sygnałów z wysoko-oporowego źródła do niskooporowego obciążenia. Dlatego nazywamy go wzmacniaczem buforowym lub izolującym. Jego schemat pokazano na rys. 6a.



Układ ten przenosi napięcie lecz izoluje prądowo i stąd jego nazwa. W praktyce wartość  $R$  dobiera się zbliżoną do rezystancji wewnętrznej źródła podającego  $U_{we}$ .

#### Program ćwiczenia

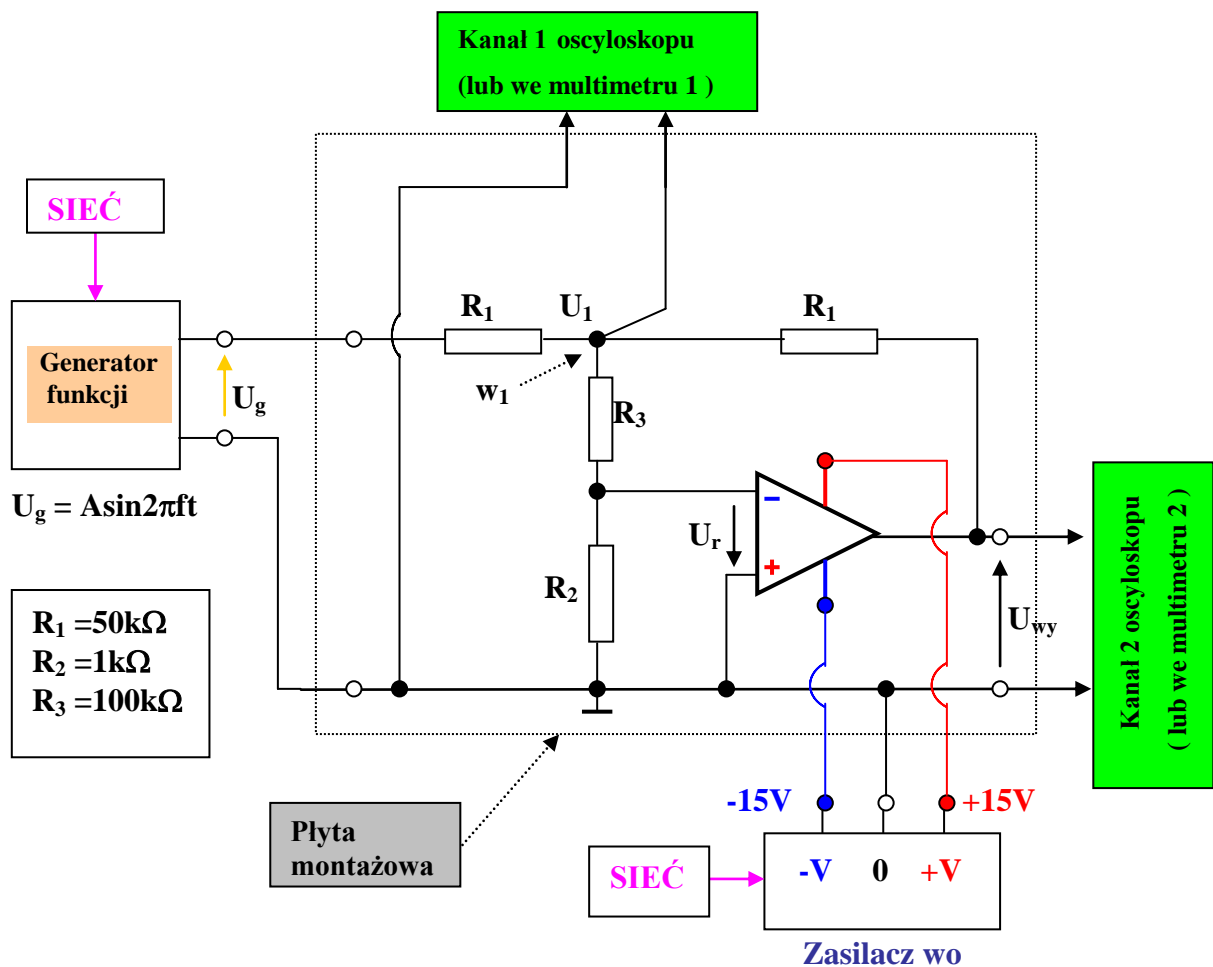
1. Pomiar wzmocnienia napięciowego wo z otwartą pętlą
2. Pomiar rezystancji wyjściowej wo
3. Pomiar rezystancji wejściowej dla sygnału różnicowego

4. Pomiar charakterystyk  $w_o$  w układzie odwracającym fazę sygnału wejściowego

5. Pomiar charakterystyk  $w_o$  nieodwracającego

### 5.1. Pomiar wzmacnienia napięciowego $w_o$ z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego

1. Zmontować układ pomiarowy według schematu przedstawionego na rys.7 nie podłączając niczego do sieci 230V/50Hz.



Rys.7. Schemat połączeń układu do pomiaru wzmacnienia  $w_o$  z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego .

#### Opis działania układu:

Napięcie wejściowe o ustalonej częstotliwości  $f$  i amplitudzie np.  $(1 \div 2)V$  podawane jest za pośrednictwem dzielnika oporowego  $R_1$ ;  $R_3$ ;  $R_2$  na wejście (-)  $w_o$ . Wejście (+)  $w_o$  jest połączone z masą układu. Małe napięcie  $U_r$  zbierane z

małego oporu  $R_2$  wysterowuje wejście (-) badanego wo. Znając dokładne wartości oporników  $R_3$  i  $R_2$  nie musimy mierzyć małego napięcia  $U_r$ . Wystarczy zmierzyć większe napięcie pomiędzy masą układu a węzłem  $w_1$ . Jest to napięcie  $U_1$ , które można zmierzyć oscyloskopem (lub multimetrem AC).

Cały układ wo pracuje tak, jak układ z otwartą pętlą sprzężenia, ponieważ jedynie pomijalna część napięcia wyjściowego ( $\sim 0,6\% U_{wy}$ ) przedostaje się zwrotnie na we wo dzięki dużej wartości  $R_3$  i małej  $R_2$ .

Metoda pomiaru wzmacnienia napięciowego  $A_U$ :

Mierząc oscyloskopem (lub multimetrem) napięcie  $U_1$  można obliczyć napięcie  $U_r$  (dzielnik napięć  $R_3 - R_4$ ) z formuły:

$$U_r = U_1 \left( \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) = U_1 \frac{R_1}{R_1 + 100R_1} = U_1 \frac{1}{101} \quad (4)$$

Wzmocnienie napięciowe badanego wo (dla otwartej pętli)  $A_{Uo}$  wyznaczamy mierząc napięcie na wyjściu wo,  $U_{wy}$  oscyloskopem (lub multimetrem) i obliczając z formuły:

$$A_{Uo} = \frac{U_{wy}}{U_r} = - \frac{U_{wy}}{U_1} (101) \quad (5)$$

Częstotliwość pracy generatora ustalić według wskazówek prowadzącego ćwiczenie.

Zadania do wykonania:

2. Po sprawdzeniu przez prowadzącego poprawności połączeń układu pomiarowego, w obecności prowadzącego skrócić do zera pokrętko regulacji amplitudy generatora oraz pokrętko napięcia zasilacza wo
3. Włączyć do sieci oscyloskop, generator sygnału oraz zasilacz wo
4. Zwiększyć napięcia zasilania wo stopniowo od  $\sim 0$  do wartości  $\pm 15V$ .
5. Zwiększając stopniowo amplitudę sygnału generatora ustalić jej wartość tak, aby nie przesterować wo i aby wartość  $U_{wy}$  nie przekroczyła  $\sim 10V_{p-p}$  (obserwowana na kanale 2 oscyloskopu).

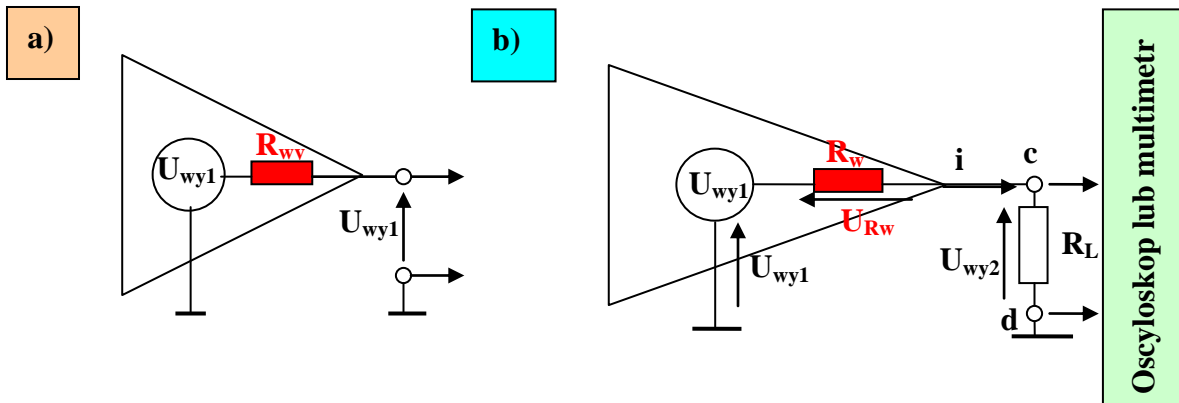
6. Pomiary napięć oscyloskopem na obu kanałach przeprowadzać przy pokrętkach wzmocnień ustawionych w pozycjach kalibrowanych.
7. Zmierzyć napięcie  $U_1$  dla minimum trzech wartości  $U_g$ , mierząc jednocześnie odpowiadające im wartości  $U_{wy}$ .
8. Obliczyć wartości  $A_{U_0}$  dla wszystkich zmierzonych par wartości  $(U_1, U_{wy})$  używając wzoru (5).
9. Opcja do decyzji prowadzącego:
  - 9.1. Poczynając od najmniejszych mierzalnych wartości  $U_{wy}$ , zwiększając stopniowo  $U_q$  zmierzyć zależność  $A_{u_0}$  od  $U_r$  i oszacować liniowość tej zależności przy ustalonym napięciu zasilania wo  $\pm 15V$  (lub mniejszym). Do sporządzenia zależności  $A_{u_0}$  od  $U_r$  trzeba wykonać minimum 8 pomiarów.
  - 9.2. Do pomiaru stałoprądowego użyć zasilacza dc zamiast generatora oraz 2 multimetrów zamiast oscyloskopu do pomiaru  $U_1$  i  $U_{wy}$ . Zbadać zależność  $A_{u_0}$  od wartości  $U_r$  w tych warunkach przy ustalonym napięciu zasilania wo równym  $\pm 15V$  (lub mniejszym).  
**Nie demontować układu pomiarowego (rys.7).**
10. Sporządzić wykresy zmierzonych zależności, opisać je i sformułować na piśmie spostrzeżenia i wnioski ujęte ilościowo.

## 5.2. Pomiar rezystancji wyjściowej wo

Do pomiaru użyjemy układu zmontowanego uprzednio z zachowaniem takich samych środków ostrożności.

Metoda pomiaru rezystancji wyjściowej wo:

Dla ustalonego napięcia zasilania wo  $\pm 15V$  (lub mniejszego) zmieniając  $U_g$  zmierzyć najpierw wartości  $U_{wy}$  dla trzech wartości  $U_1$ . Schemat zastępczy obwodu wyjściowego badanego wo jest następujący:



Rys.8. a) schemat zastępczy obwodu wyjściowego nieobciążonego wo  
 b) schemat zastępczy obwodu wyjściowego obciążonego znanym oporem  $R_L$

Mierzmy napięcie  $U_{wy1}$  panujące na nieobciążonym wyjściu badanego wo Oscyloskop (lub multimetr) o oporze wejściowym rzędu  $1M\Omega$  praktycznie nie obciąża źródła napięcia wyjściowego  $U_{wy1}$ . Notujemy zmierzoną wartość  $U_{wy1}$ . Skończona wartość oporu wyjściowego  $R_{wy}$  wo przy bezprądowym pomiarze nie wpływa na prawidłowość pomiaru  $U_{wy1}$ . Nie zmieniając warunków zasilania oraz sygnału generatora podłączamy do zacisków c – d (wyjście wo) znany opór obciążenia  $R_L$ , (rys. 7b). Mierzmy napięcie na  $R_L$ , czyli  $U_{wy2}$ .

Zapisując w oczku OW (rys.7.b) możemy otrzymać równania:

$$U_{wy1} = U_{Rwy} + U_{wy2} = iR_{wy} + U_{wy2}; \quad i = \frac{U_{wy2}}{R_L} \quad (6)$$

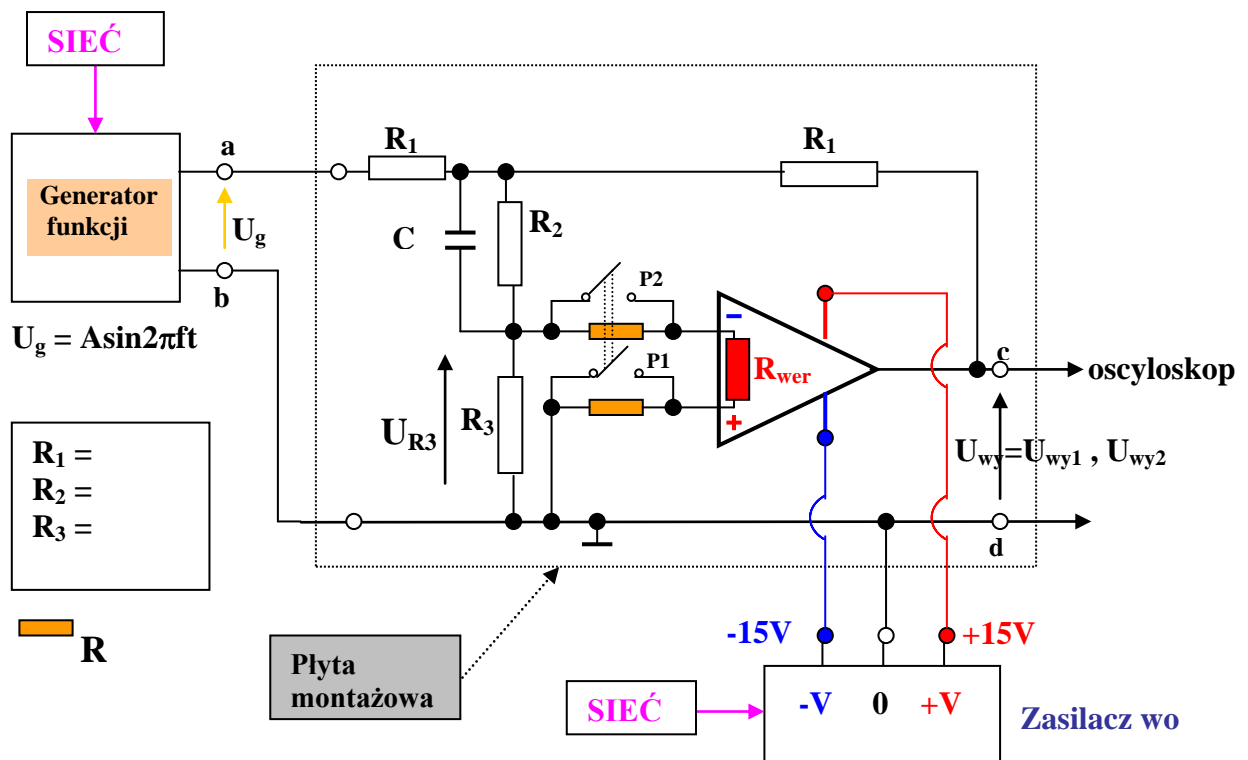
oraz

$$R_{wy} = R_L \left( \frac{U_{wy1}}{U_{wy2}} - 1 \right) \quad (7)$$

Tak więc, podstawiając do (7) znane wartości  $R_L$  i zmierzone wartości  $U_{wy1}$  oraz  $U_{wy2}$  możemy obliczyć szukaną wartość  $R_{wy}$  dla badanego wo.

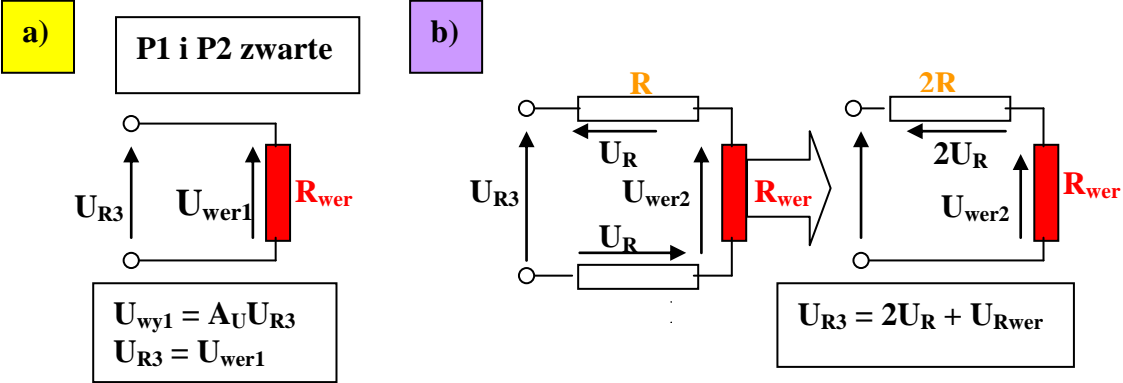
### 5.3. Pomiar rezystancji wejściowej wo dla sygnału różnicowego

1. Zmontować układ pomiarowy według schematu przedstawionego na rys.9 nie podłączając niczego do sieci 230V/50Hz.



Rys.9. Schemat połączeń układu do pomiaru rezystancji wejściowej  $R_{wer}$  wo dla sygnału różnicowego .

Opis działania układu i metoda pomiaru: Gdy opory R zwarte są przełącznikami P1 i P2, na wejście różnicowe wo (tzn. pomiędzy (-) i (+), czyli na oporność wejściową różnicową  $R_{wer}$ ) podawane jest całe napięcie z opornika  $R_3$ , wynoszące  $U_{R3}$ . Wtedy na wyjściu wo (zaciski c – d) zmierzone napięcie wynosi  $U_{wy1}$  (rys. 9.)



Rys.10. schemat zastępczy obwodu wejściowego wo przy zwartych Pa i P2  
b) schemat zastępczy tego obwodu przy P1 i P2 otwartych

Gdy wyłączniki P1 i P2 otworzymy jednocześnie, napięcie  $U_{R3}$  zostanie podzielone na dzielniku powstałym z szeregowego połączenia  $R-R_{wer}-R$  (rys.9). Na szukaną oporność wejściową w różnicową podany zostanie sygnał

$$U_{Rwe2} = U_{R3} \frac{R_{wer}}{2R + R_{wer}}$$

Wtedy na wyjściu w pojawi się napięcie  $U_{wy2}$ , które mierzymy podobnie, jak to uczyniliśmy w przypadku  $U_{wy1}$ . Wówczas możemy zapisać:

$$U_{wy2} = A_U U_{Rwe2} = A_U U_{R3} \frac{R_{we}}{2R + R_{wpr}},$$

a ponieważ  $U_{R3} = \frac{U_{wy1}}{A_U}$  z poziomu pierwszego, to:

$$\frac{U_{wy1}}{A_U} A_U \frac{R_{wer}}{2R + R_{wpr}} = U_{wy2} \quad (8)$$

Oznaczając wyznaczamy z obu pomiarów stosunek  $U_{wy2}/U_{wy1} = A_u$  (9)

możemy obliczyć, że szukane  $R_{wer}$  wynosi:

$$R_{wer} = 2R \frac{A_d}{1 - A_u} = 2R \frac{U_{wy2}}{U_{wy1} - U_{wy2}} \quad (10)$$

Zadania do wykonania:

2. Po sprawdzeniu poprawności połączeń układu przez prowadzącego, w jego obecności skrócić do zera pokrętko regulacji amplitudy generatora oraz pokrętko napięcia zasilacza wo.
3. Włączyć do sieci oscyloskop, generator sygnału oraz zasilacz wo.
4. Zwiększyć napięcie zasilania wo stopniowo od  $\sim 0$  do  $\pm 15V$
5. Zwiększając stopniowo amplitudę sygnału generatora  $U_g$ , ustalić jej wartość tak, aby nie przesterować wo i aby wartość  $U_{wy}$  obserwowana na ekranie oscyloskopu, przy obu wyłącznikach  $P_1$  i  $P_2$  zwartych, nie przekroczyła  $\sim 10V_{p-p}$
6. Zmierzyć i zanotować wartość  $U_{wy1}$ .

7. Przełączyć  $P_1$  i  $P_2$  jednocześnie w położenie przeciwne (oba otwarte) i ponownie zmierzyć napięcie na wyjściu  $w_o$  i zapisać jego wartość  $U_{wy2}$ .
8. Korzystając ze znanego  $R$  oraz wartości obu zmierzonych napięć wyjściowych obliczyć  $R_{wer}$  ze wzoru (10).
9. powtórzyć cały pomiar jeszcze 2 razy.
10. W sprawozdaniu opisać samodzielnie, własnymi słowami działanie układu pomiarowego i wyprowadzenie formuły na  $R_{wer}$ .

#### **5.4. Pomiar charakterystyk wo w układzie odwracającym fazę sygnału wejściowego**

- 5.4.1. Zmontować układ pomiarowy według schematu przedstawionego na rysunku 11. Nie podłączać niczego do sieci. Po sprawdzeniu połączeń przez prowadzącego:
- 5.4.2. Na wejście wzmacniacza podać z generatora funkcji sygnał o amplitudzie pik-pik 1V o częstotliwości 1000 Hz.
- 5.4.3. Dla  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega = \text{const}$ , mierzyć wzmocnienie układu ( $U_{wy}/U_{we}$ ) =  $(R_2/R_1)$  dla następujących wartości oporu  $R_1 = 10, 33, 39, 50, 60, 80, 100 \text{ k}\Omega$  (podane wartości oporów są przykładowe) . Można posłużyć się tabelką 1 (załącznik).
- 5.4.4. Podłączyć do wzmacniacza oporniki  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$  oraz  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ . Na wejście podać sygnał z generatora funkcji o amplitudzie 1Vp-p. Zwiększając częstotliwość sygnału wejściowego co jedną dekadę (logarytmicznie), zmierzyć charakterystykę częstotliwościową układu . Można posłużyć się tabelką 2 (załącznik).
- 5.4.5. W oparciu o wyniki zgromadzone w tabelkach 1 i 2 sporządzić wykresy zależności:
  - a) wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego odwracającego w funkcji wartości oporu  $R_1$  przy  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ .



b) Zależność wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego odwracającego od częstotliwości przy stałej amplitudzie sygnału wejściowego.

Na podstawie wyników pomiarów sporządzić wykresy zależności wzmocnienia napięciowego  $w_o$  od  $R_1$  zmierzonego ( $k$ ), oraz dla wzmocnienia obliczonego ( $k_{obl}$ ) i porównać obie zależności umieszczając je na tym samym wykresie. Na wykresy nanieść punkty i dopasować krzywe ręcznie lub użyć programu graficznego. Sporządzić charakterystykę częstotliwościową wzmocnienia  $w_o$  na podstawie wyników zapisanych w tabeli pomiarów<sup>2</sup> (patrz załącznik). Opisać słownie uzyskane wyniki.

### **5.5.Pomiary charakterystyk wzmacniacza operacyjnego nieodwracającego**

5.5.1. Zmontować układ pomiarowy według schematu przedstawionego na rys.12. Niczego nie podłączać do sieci . Po sprawdzeniu połączeń:

5.5.2. Na wejście wzmacniacza podać sygnał z generatora funkcji o amplitudzie 1Vp-p o częstotliwości 1 kHz.

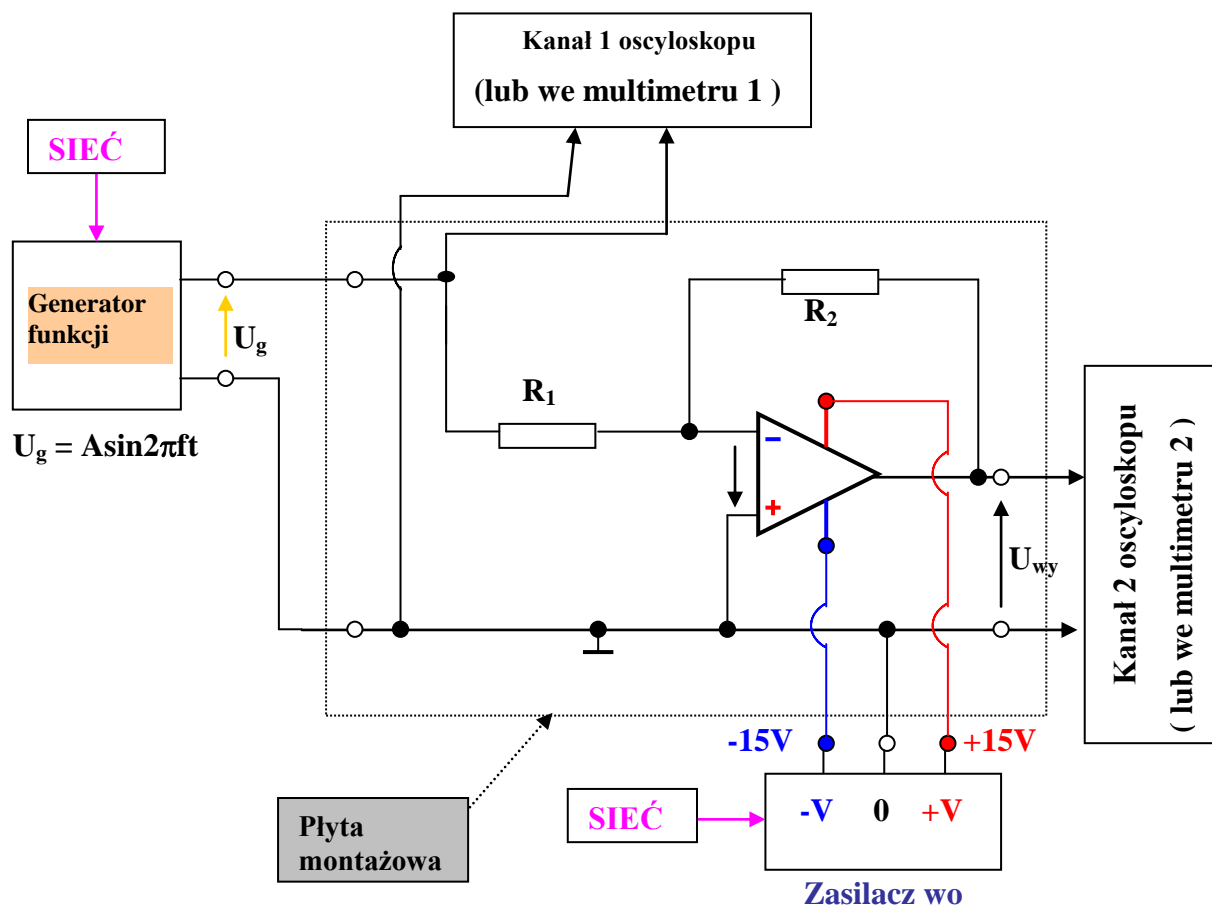
5.5.3. Przy  $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$  zmierzyć amplitudę sygnału wyjściowego dla następujących wartości oporników  $R_1$ : 1 , 10 , 33 , 39, 50, 60, 80 k $\Omega$ . Wyniki pomiarów można zapisać w tabeli podobnej do tabeli 1. Wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego nieodwracającego wynosi:

$$k = (1+(R_2/R_1)) = (U_{wy}/U_{we}).$$

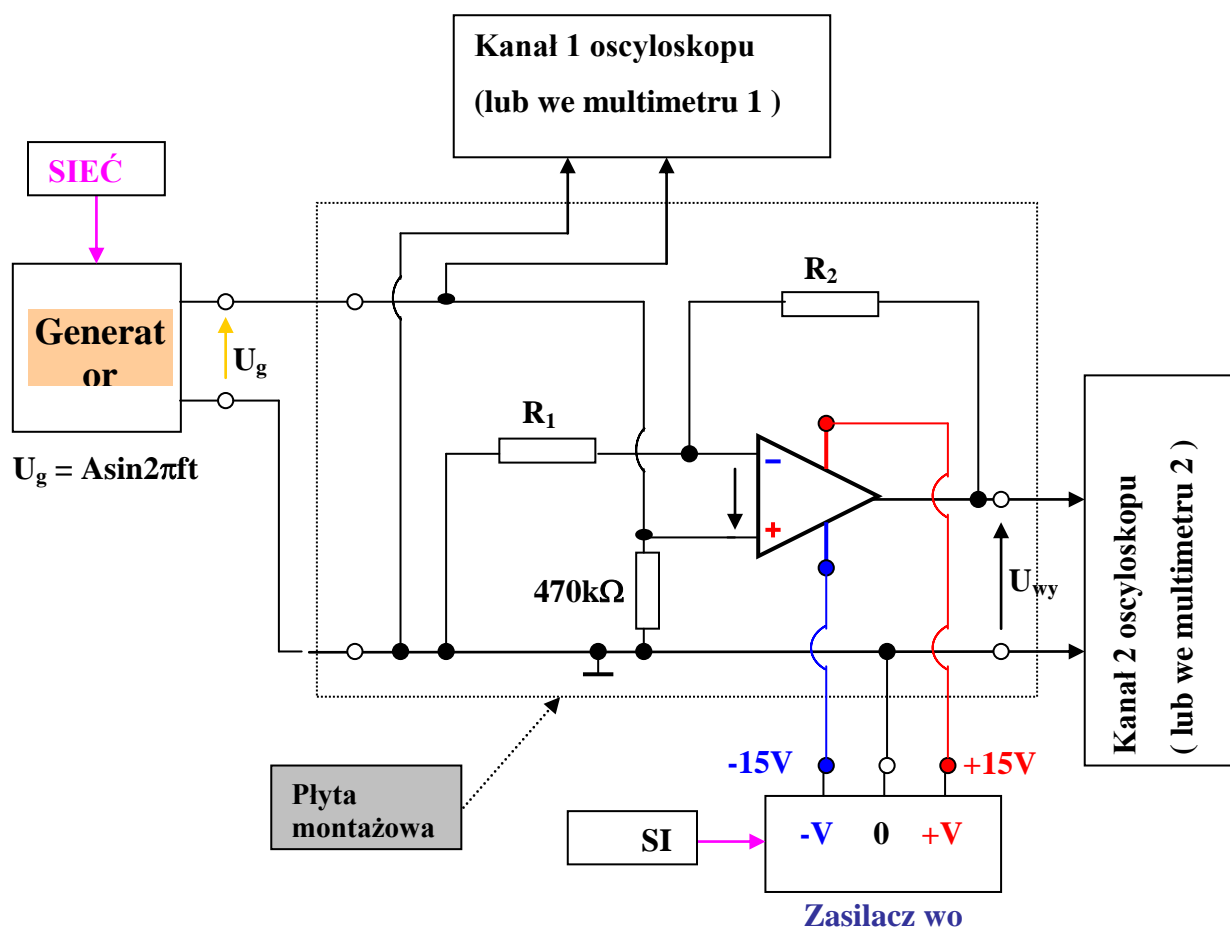
Sporządzić wykres zmierzonej zależności.

5.5.4. Zwiększając amplitudę sygnału wejściowego (w obecności prowadzącego) zaobserwować wpływ przesterowania wzmacniacza na przebieg sygnału wyjściowego dla sygnałów: sinusoidalnego, piłokształtnego oraz prostokątnego.

Wyniki opracować podobnie jak dla  $w_o$  w układzie odwracającym fazę.



Rys.11. Schemat połączeń układu do pomiaru charakterystyk wo odwracającego.



Rys.12. Schemat połączeń układu do pomiaru charakterystyk wo nie odwracającego.

Załącznik: *tabele pomiarów*

Tabela pomiarów 1

Pomiar zależności wzmocnienia napięciowego w układzie odwracającym fazę od wartości oporu  $R_1$  przy  $R_2 = 100[\text{k}\Omega] = \text{const}$

STAŁE: typ badanego wzmacniacza operacyjnego:.....

Napięcie zasilania wo:.....

Sygnal wejściowy:  $u_{we}(t) = 1[\text{V}_{p-p}] \sin(2\pi 10^3[\text{Hz}]t)$

Lp.	$R_1[\text{k}\Omega]$	$U_{wy} [\text{V}_{p-p}]$	$k = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$	$k_{obl} = \frac{R_2}{R_1}$
1	10			
2	27			
3	33			
4	39			
5	50			
6	60			
7	80			
8	100			

Uwaga: w przypadku wo nieodwracającego fazy:  $k_{obl} = \frac{R_2}{R_1} + 1$   
Na wykresie punkty  $k$  i  $k_{obl}$  nanieść innymi symbolami graficznymi.

Tabela pomiarów 2

Pomiar zależności wzmocnienia napięciowego wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym fazę od wartości częstotliwości sygnału wejściowego  $f_G$  [Hz]

STAŁE: jak poprzednio oraz  $R_1 = 10[\text{k}\Omega]$ ,  $R_2 = 100[\text{k}\Omega]$

Lp.	$f_G$ [Hz]	$\log(2\pi f_G)$ [Hz]	$U_{wy}$ [V <sub>p-p</sub> ]	$k = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Sporządzić wykres zależności  $k = k(\log(2\pi f_G))$ , nanieść punkty i krzywą ręcznie dopasować (krzywką) lub użyć programu graficznego. Opisać osie i podpisać cały wykres kompletnie i jednoznacznie, podać stałe przy których wykonano pomiary.