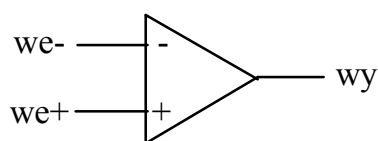


## WZMACNIACZ OPERACYJNY - WZMACNIACZE LINIOWE

Pod pojęciem „wzmacniacz operacyjny” należy rozumieć układ wzmacniający napięcie elektryczne, posiadający następujące cechy:

- duży (zwykle rzędu od kilku do kilkudziesięciu tysięcy) współczynnik wzmocnienia napięciowego,
- mały opór wyjściowy w stosunku do oporu wejściowego,
- pasmo przenoszonych częstości zaczynające się od zera (wzmacnianie napięć stałych),
- istnienie wejścia odwracającego.

Będziemy rozpatrywać wzmacniacz posiadający dwa wejścia (jedno odwracające, jedno nieodwracające) oraz jedno wyjście. Wejście odwracające jest to wejście, poprzez które wywołujemy zmianę potencjału wyjścia w kierunku odwrotnym w stosunku do kierunku zmiany potencjału wejścia. Wzrost potencjału na wejściu odwracającym (przy ustalonym potencjale drugiego wejścia) pociąga za sobą spadek potencjału na wyjściu; spadek potencjału na wejściu odwracającym pociąga za sobą wzrost potencjału na wyjściu. Z wejściem nieodwracającym jest odwrotnie: wzrost potencjału na wejściu nieodwracającym pociąga za sobą wzrost potencjału na wyjściu; spadek potencjału na wejściu nieodwracającym pociąga za sobą spadek potencjału na wyjściu. Rysunek 1 przedstawia symbol rozpatrywanego wzmacniacza. Symbolem „we-” zostało oznaczone wejście odwracające, symbolem „we+” - wejście nieodwracające, symbolem „wy” - wyjście.



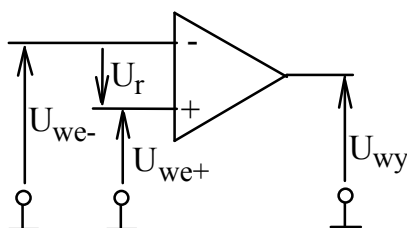
Rys.1. Symbol wzmacniacza operacyjnego.

Od wzmacniaczy operacyjnych wymaga się, aby potencjał wyjścia zależał tylko od różnicy potencjałów obu wejść a nie zależał (lub zależał tylko w stopniu znikomym) od wartości średniej z potencjałów wejść. We wzmacniaczu idealnym, w którym zwarte są ze sobą oba wejścia, potencjał wyjścia ma cały czas wartość zero, niezależnie od wartości potencjału wejść. W produkowanych wzmacniaczach istnieje możliwość odpowiednich regulacji tak, by ten warunek był dość dobrze spełniony.

Różnicę potencjałów wejścia nieodwracającego i wejścia odwracającego nazywamy napięciem wejściowym różnicowym wzmacniacza ope-

racyjnego i oznaczamy symbolem  $U_r$  (zobacz rys. 2). Niech  $U_{we-}$  oznacza potencjał wejścia odwracającego,  $U_{we+}$  - potencjał wejścia nieodwracającego. Mamy:  $U_r = U_{we+} - U_{we-}$ . Pomiedzy wartością  $U_r$  a wartością napięcia wyjściowego,  $U_{wy}$ , istnieje zależność, którą wyrazimy następująco:  $U_{wy} = K_o U_r$ .

$K_o$  jest współczynnikiem wzmocnienia napięciowego wzmacniacza operacyjnego. Zwykle dla danego typu wzmacniacza operacyjnego nie podaje się dokładnej wartości współczynnika  $K_o$  a tylko rząd jego wielkości, gdyż poszczególne egzemplarze wzmacniaczy operacyjnych mogą się trochę różnić między sobą. Poza tym ze względu na nieliniowość procesu wzmacniania (np. zależność natężenia prądu kolektora tranzystora od napięcia pomiędzy bazą a emiterem jest wykładnicza) wartość  $K_o$  zwykle zależy od wartości napięć wejściowych, napięć zasilających i - ewentualnie - od temperatury wzmacniacza.

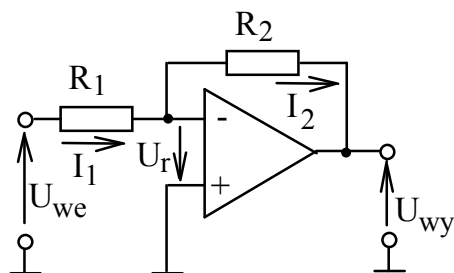


Rys.2. Oznaczenie napięć wejść i wyjścia wzmacniacza operacyjnego.

W układach elektronicznych chodzi o to, aby napięcie wyjściowe było określoną funkcją napięcia wejściowego. Stosując odpowiedni obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego można osiągnąć wymaganą zależność napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego, o ile tylko nasze wymagania nie są zbyt wygórowane. Nie możemy żądać np. zbyt dużego wzmocnienia napięciowego układu; moduł wzmocnienia układu powinien być wielokrotnie mniejszy od wartości  $|K_o|$ .

### 1. Wzmacniacz liniowy odwracający.

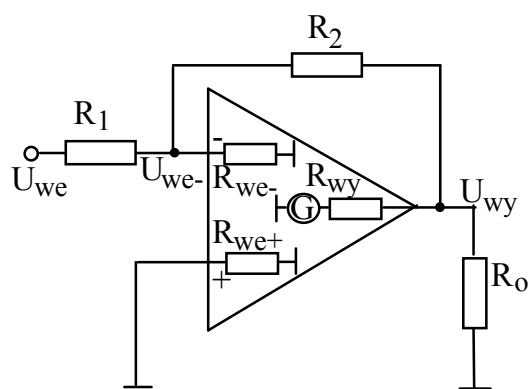
Rysunek 3 przedstawia schemat wzmacniacza liniowego odwracającego. Układ składa się ze wzmacniacza operacyjnego i dwu oporników,  $R_1$  i  $R_2$ .



Rys.3. Schemat wzmacniacza liniowego odwracającego.

Opornik  $R_1$  doprowadza sygnał z wejścia układu na wejście odwracające wzmacniacza operacyjnego. Opornik  $R_2$  doprowadza na wejście odwracające sygnał z wyjścia układu. Oba oporniki można potraktować jako dzielnik napięcia włączony pomiędzy wejście i wyjście układu. Wyjście dzielnika jest dołączone do wejścia odwracającego wzmacniacza operacyjnego. Wejście nieodwracające wzmacniacza jest połączone z masą układu.

Jeżeli na wejście układu podamy napięcie o wartości  $U_{we}$ , to na wyjściu pojawi się napięcie o pewnej wartości  $U_{wy}$ . Znajdziemy zależność pomiędzy  $U_{wy}$  i  $U_{we}$ . Obliczenia przeprowadzimy dla idealnego wzmacniacza operacyjnego, w którym opór wejścia odwracającego posiada wartość nieskończenie dużą, zaś opór wyjściowy wzmacniacza posiada wartość zero. W rzeczywistych wzmacniaczach te idealne właściwości są spełnione tylko w przybliżeniu.



Rys. 4. Wzmacniacz liniowy odwracający z zaznaczonymi oporami wejściowymi i oporem wyjściowym wzmacniacza operacyjnego.

Oznaczenia:  $R_{we-}$ ,  $R_{we+}$  - opory wejść: odwracającego i nieodwracającego,  $R_{wy}$  - opór stopnia wyjściowego wzmacniacza operacyjnego,  $\textcircled{G}$  - stopień wyjściowy wzmacniacza operacyjnego, traktowany jako źródło napięcia o

oporze wewnętrznym równym zero,  $R_o$  - opór obciążenia wzmacniacza liniowego (albo inaczej - opór wejściowy odbiornika; zwykle jest to opór wejściowy jakiegoś urządzenia, do którego kierujemy wzmocniony sygnał).

Na wejściu odwracającym wzmacniacza operacyjnego istnieje pewien potencjał o wartości  $U_{we-}$ . Przez opornik  $R_1$  płynie prąd o natężeniu  $I_1 = \frac{U_{we} - U_{we-}}{R_1}$ . Przez opornik  $R_2$  płynie prąd o natężeniu

$I_2 = \frac{U_{wy} - U_{we-}}{R_2}$ . Jeśli opór wejścia wzmacniacza operacyjnego (tu chodzi o wejście odwracające) jest nieskończony, to przez to wejście nie płynie jakikolwiek prąd i natężenie  $I_1$  jest równe natężeniu  $I_2$ .

Otrzymujemy równanie:  $\frac{U_{we-} - U_{we}}{R_1} = \frac{U_{wy} - U_{we-}}{R_2}$ . W rozpatrywanym układzie  $U_{we-} = -U_r = \frac{-U_{wy}}{K_o}$ . Po podstawieniu do otrzymanego równania w miejsce  $U_{we-}$  wyrażenia  $\frac{-U_{wy}}{K_o}$  otrzymujemy wzór na wartość napięcia wyjściowego:  $U_{wy} = -U_{we} \frac{R_2}{\frac{R_2}{K_o} + \frac{R_1}{K_o} + R_1}$ .

Dla  $K_o \gg 1$  i  $R_1 \gg \frac{R_2}{K_o}$  możemy napisać:  $U_{wy} \approx -U_{we} \frac{R_2}{R_1}$ .

Otrzymujemy zatem następujący wzór przybliżony na wartość współczynnika wzmocnienia wzmacniacza liniowego odwracającego:

$$K_- = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \approx -\frac{R_2}{R_1}$$

Napięcie pomiędzy wejściem odwracającym i masą (tutaj jest ono równe  $U_r$ ) jest mniejsze, niż napięcie podawane na wejście układu. Jest to spowodowane działaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Sygnał wyjściowy, doprowadzany do wejścia odwracającego przez opornik  $R_2$ , przeciwdziała sygnałowi wejściowemu, doprowadzanemu przez opornik  $R_1$ . Jeżeli są spełnione warunki:  $K_o \gg 1$  i  $R_1 \gg \frac{R_2}{K_o}$ , to wartość napięcia  $U_r$  jest znikoma:  $U_r \approx 0$ . Wtedy też opór wejściowy układu jest niewiele większy od wartości opornika  $R_1$ ; można przyjąć, że jest mu równy.

Jeżeli wzmacniacz byłby przesterowany, to napięcie  $U_r$  może mieć stosunkowo dużą wartość, gdyż nie ma wtedy odpowiednio dużego „przeciwdziałania” sygnałowi wejściowemu.

Działanie wzmacniacza liniowego, zawierającego realny wzmacniacz operacyjny nie będzie się wiele różniło od przewidzianego teoretycznie działania idealnego wzmacniacza operacyjnego, jeśli wartość oporu  $R_1$  będzie mała w stosunku do oporu wejścia odwracającego oraz częstotści wzmacnianych przebiegów i szybkości zmian wzmacnianego napięcia nie będą zbyt wielkie (chodzi o to, aby wpływ pojemności

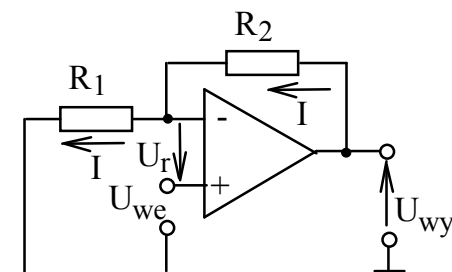
montażowych i pojemności wewnętrznych wzmacniacza operacyjnego nie był zbyt duży).

Ponadto wskazane jest, aby wypadkowy opór obciążenia (składają się nań opór  $R_o$  i połączony z nim równolegle opór  $R = R_2 + \frac{R_1 \cdot R_{we}}{R_1 + R_{we}} \approx R_2 + R_1$ ) nie był zbyt mały w stosunku do oporu

stopnia wyjściowego wzmacniacza operacyjnego, gdyż w przeciwnym wypadku wzmacniacz będzie „szybko”, czyli dla niewielkich napięć wejściowych, przesterowywany i osiągnane wartości napięcia wyjściowego będą niewielkie, jakkolwiek w obszarze dynamicznym (gdzie napięcia wejściowe są na tyle małe, że przesterowanie nie występuje) wzmacniacz będzie działał prawidłowo i wzmocnienie układu będzie zgodne z wyprowadzonym wzorem.

## 2. Wzmacniacz liniowy nieodwracający.

We wzmacniaczu liniowym nieodwracającym (rys. 5) napięcie wzmacniane jest podawane na wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego. Na wejście odwracające jest podawana za pomocą dzielnika utworzonego z oporników  $R_1$  i  $R_2$  część napięcia wyjściowego.



Rys.6. Schemat wzmacniacza liniowego nieodwracającego.

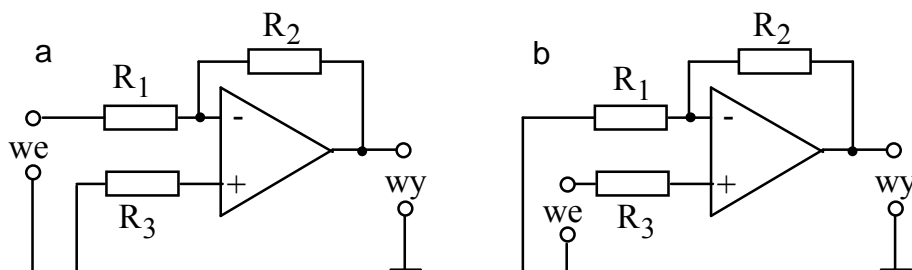
Zakładamy, że są spełnione warunki:  $K_o \gg 1$  i  $R_1 \gg \frac{R_2}{K_o}$ . Z założenia

tego wynika, że napięcie  $U_r$  będzie posiadało wartość znikomą w stosunku do wartości napięcia wejściowego,  $U_{we}$ , czyli potencjał wejścia odwracającego jest bardzo bliski potencjałowi wejścia nieodwracającego, praktycznie jemu równy (podobnie jest we wzmacniaczu liniowym odwracającym; potencjały wejść w pracującym, poprawnie zbudowanym i nieprzesterowanym wzmacniaczu operacyjnym różnią się bardzo niewiele). Zatem możemy napisać, że przez opornik  $R_1$  płynie prąd o natężeniu  $I = \frac{U_{we}}{R_1}$ . Taki sam prąd płynie przez opornik  $R_2$

(przyjmujemy, że opór wejścia odwracającego jest nieskończenie duży). Na połączonych szeregowo opornikach  $R_1$  i  $R_2$  istnieje więc napięcie o wartości równej  $I \cdot (R_1 + R_2) = \frac{U_{we}}{R_1} (R_1 + R_2)$ . Jest ono równe napięciu występującemu na wyjściu wzmacniacza. Mamy więc równanie:  $U_{wy} = U_{we} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ . Zatem współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza liniowego nieodwracającego,  $U_{wy}/U_{we}$ , wynosi:  $K_+ = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$ . Opór wejściowy wzmacniacza liniowego nieodwracającego równy jest oporowi wejścia nieodwracającego wzmacniacza operacyjnego.

### 3. Uwzględnienie skończonych wartości oporów wejść wzmacniacza operacyjnego w układach wzmacniaczy liniowych.

We wzmacniaczach liniowych, zawierających wzmacniacze operacyjne, należy włączyć przed wejściem nieodwracającym szeregowy opór  $R_3$  (rys. 7), równy wypadkowemu oporowi połączonych równolegle oporników  $R_1$  i  $R_2$ .



Rys. 7. Schematy wzmacniaczy liniowych: odwracającego (rys. a) i nieodwracającego (rys. b) z oporem kompensującym  $R_3$

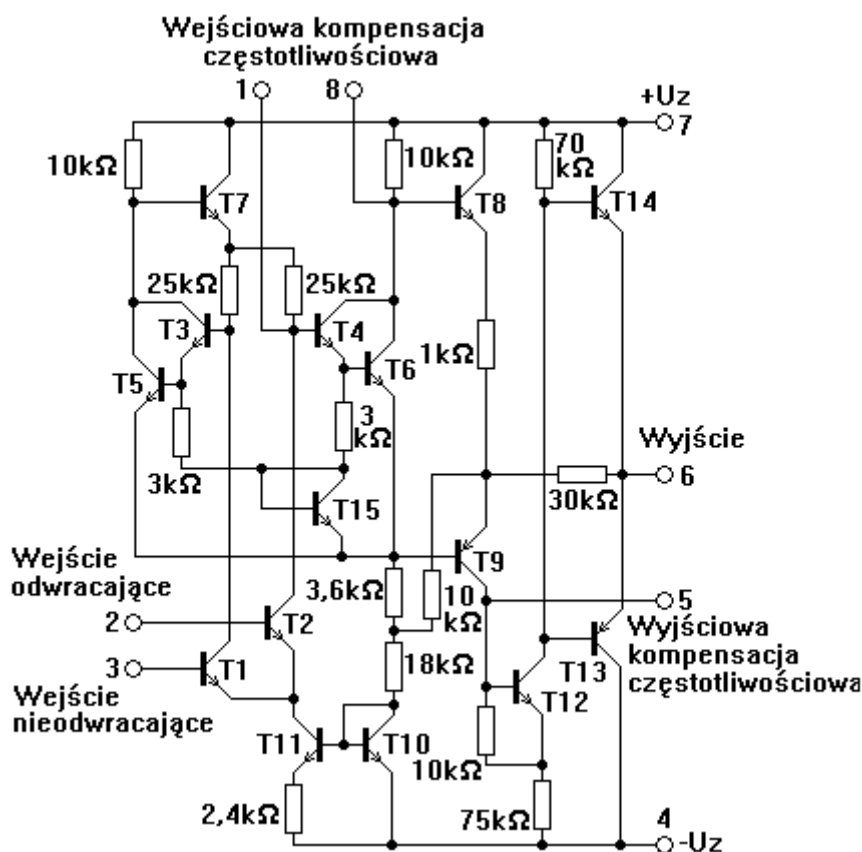
Potrzeba stosowania opornika  $R_3$  wynika stąd, że w realnym wzmacniaczu operacyjnym przez oba jego wejścia płyną prądy elektryczne. Wzmacniacze operacyjne (chodzi tutaj o monolityczne wzmacniacze operacyjne, wytwarzane w monokryształach krzemu) są tak budowane, by te prądy miały jednakową wartość i ten sam kierunek przy tym samym potencjale obu wejść. Dzielnik utworzony z oporników  $R_1$  i  $R_2$  posiada opór wyjściowy równy oporowi połączonych równolegle oporników  $R_1$  i  $R_2$ . Wejście odwracające wzmacniacza operacyjnego jest sterowane napięciem pobieranym z wyjścia tego dzielnika. Prąd płynący przez wejście odwracające wzmacniacza operacyjnego wytwarza na oporze

wyjściowym dzielnika pewien spadek potencjału,  $\Delta U$ . Tak więc wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego sterowane jest potencjałem różniącym się o  $\Delta U$  w stosunku do przypadku idealnego, dla którego przez wejścia wzmacniacza operacyjnego nie płyną prądy elektryczne. Obliczenia, przeprowadzone dla wzmacniacza idealnego pozostaną słuszne dla wzmacniacza rzeczywistego, jeśli o taką samą wartość  $\Delta U$  zmienimy potencjał wejścia nieodwracającego. Osiągamy to, włączając opornik  $R_3$ , równy oporowi wyjścia dzielnika utworzonego z oporników  $R_1$  i  $R_2$ .

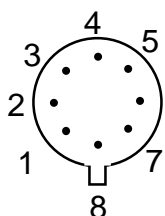
#### 4. Praktyczne wykorzystanie wzmacniacza operacyjnego podczas ćwiczeń w Pracowni Elektroniki.

W ćwiczeniu jest wykorzystywany monolityczny wzmacniacz operacyjny typu  $\mu A709$  (lub jego odpowiednik MAA502). Wzmacniacz jest zamontowany na płytce z gniazdkami radiowymi. Wyprowadzenia wzmacniacza są przyłączone do gniazd. Oznaczenia wejść, wyjścia i zasilania wzmacniacza umieszczone są przy gniazdkach. Dołączając zewnętrzne elementy, można tworzyć opisane wzmacniacze liniowe. Wzmacniacz operacyjny wymaga zasilania źródłem napięć, posiadającym 3 wyjścia: zero, biegun dodatni i biegun ujemny. Potencjał dodatniego wyjścia zasilacza powinien zawierać się w granicach od +9V do +18V, potencjał ujemnego wyjścia zasilacza - w granicach od -9V do -18V. Bezwzględne wartości potencjału bieguna dodatniego oraz bieguna ujemnego powinny być sobie równe. Typowe wartości potencjałów wyjść źródła zasilania są następujące: +15V, 0V i -15V. Wyjście źródła zasilania o potencjale 0V jest - z reguły - masą układu. Dopuszczalna wartość bezwzględna napięcia (mierzonego względem przewodu o potencjale 0V), które można podać na jedno lub oba wejścia, wynosi 5V.

Rysunek 8 przedstawia schemat stosowanego w ćwiczeniu wzmacniacza operacyjnego  $\mu A709$ . Cyfry przy wyprowadzeniach wzmacniacza operacyjnego (od 1 do 8) oznaczają numery wyprowadzeń układu scalonego, stanowiącego wzmacniacz operacyjny.

Rys. 8. Schemat wzmacniacza operacyjnego  $\mu A709$ .

Rysunek 9 przedstawia widok układu scalonego  $\mu A709$  w obudowie metalowej od strony wyprowadzeń oraz numerację wyprowadzeń.

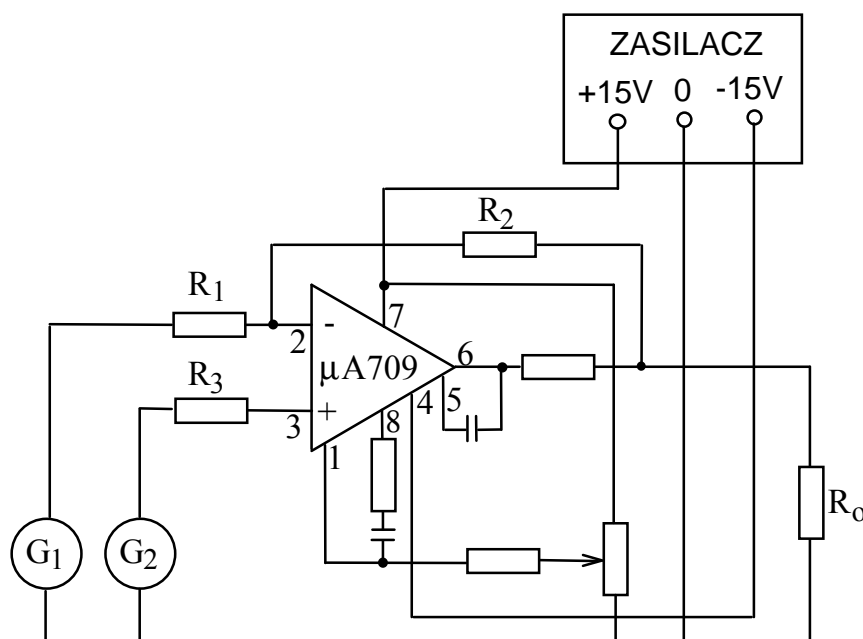
Rys. 9. Widok układu scalonego, stanowiącego wzmacniacz operacyjny  $\mu A709$ .

Wyprowadzenie o numerze 1 służy do tzw. kompensacji napięcia niezrównoważenia, czyli wyregulowania wzmacniacza tak, by przy zwartych do masy obu wejściach, na wyjściu istniał potencjał o wartości 0V. Rysunek 10 przedstawia wzmacniacz operacyjny  $\mu A709$  z dołączonym potencjometrem, umożliwiającym kompensację napięcia niezrównoważenia. Kompensacji dokonujemy, ustawiając tak potencjometr, by przy zwartych z masą obu wejściach, na wyjściu istniał potencjał 0V. Poza tym wyprowadzenia: nr 8 wraz z wyprowadzeniem nr 1 oraz wyprowadzenie nr 5 służą do kompensacji częstotliwości, czyli zabezpieczenia wzmacniacza przed powstaniem niepożądanych drgań elektrycznych.





mamy wtedy do czynienia ze wzmacniaczem odwracającym, wzmacniającym napięcie pochodzące ze źródła  $G_1$ .



Rys. 11. Schemat wzmacniacza z przyłączonym źródłem napięć zasilających, źródłami napięć wejściowych oraz odbiornikiem wzmacnionego sygnału.

### Plan ćwiczenia.

1. Zbadać zależność napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego w liniowym wzmacniaczu odwracającym:

- a) dla wejścia nieodwracającego połączonego z masą przez opornik  $R_3$ ,
- b) dla wejścia nieodwracającego spolaryzowanego pewnym potencjałem stałym w granicach od  $-3V$  do  $+3V$  (wejście nieodwracające ma tutaj być połączone ze źródłem stałego napięcia poprzez opornik  $R_3$ ).

2. Zbadać zależność napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego w liniowym wzmacniaczu nieodwracającym.

Uwaga. Wzmacniacze badamy, podając na ich wejścia napięcia stałe. Napięcia te należy zmieniać od wartości ujemnych do wartości dodatnich. Jeśli prowadzący nie poda inaczej, to można zastosować:  $R_1=10k\Omega$ ,  $R_2=1M\Omega$  ( $R_3$  obliczamy); napięcie wejściowe zmieniamy wtedy od  $-0,2V$  do  $+0,2V$ . We wszystkich przypadkach wzmacniaczy liniowych stosujemy opornik  $R_3$ . W punkcie 1b planu ćwiczenia pomiaru

potencjału polaryzującego dokonujemy, włączając woltomierz pomiędzy masę układu a wyprowadzenie opornika  $R_3$ , do którego doprowadzamy napięcie polaryzujące (a nie pomiędzy masę a wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego).

#### Literatura.

1. Zbigniew Kulka, Michał Nadachowski: Liniowe układy scalone i ich zastosowanie. WKŁ, Warszawa 1975.
2. Michał Nadachowski, Zbigniew Kulka: Analogowe układy scalone. WKŁ, Warszawa 1979.
3. Stanisław Sońta, Henryk Kotlewski: Układy scalone liniowe i ich zastosowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.

Opracował mgr Roman Kazański.

Nowa wersja opisu ćwiczenia.  
Lublin. 30 marca, 1998r.