

## 4. MATERIAŁ NAUCZANIA

### 4.1. Wzmacniacze operacyjne

#### 4.1.1. Materiał nauczania

Wzmacniacze operacyjne stosuje się obecnie we wszystkich nowoczesnych układach elektronicznych. Gwałtowny wzrost zainteresowania wzmacniaczami operacyjnymi nastąpił po wprowadzeniu w latach siedemdziesiątych do produkcji masowej monolitycznych układów scalonych o bardzo dobrych właściwościach i niskiej cenie.

Wzmacniacz operacyjny jest wzmacniaczem prądu stałego charakteryzującym się bardzo dużym wzmocnieniem i przeznaczonym z reguły do pracy w układzie z zewnętrznym obwodem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Właściwości tego obwodu decydują w głównej mierze o właściwościach całego układu. Przyłączone do wzmacniacza elementy – w szczególności łączące jego wyjście z wejściem (lub z obu wejściami) – radykalnie zmniejszają wzmocnienie (mówimy wówczas, że wzmacniacz został „obwiedziony” sprzężeniem zwrotnym czyli, że część napięcia wyjściowego została doprowadzona z powrotem na jego wejście). Tę pozorną stratę rekompensuje nam nabycie przez wzmacniacz nowych cech – takich, jakie posiadają dodatkowo dołączone elementy. Możliwe jest więc tworzenie bloków funkcjonalnych, zawierających w gałęziach sprzężeń zwrotnych zarówno rezystory czy kondensatory, jak i diody lub tranzystory. Powstają w ten sposób układy z odwracaniem bądź z nie odwracaniem fazy wzmacnianych sygnałów (zależnie od tego, które z wejść wzmacniacza jest wejściem odniesienia, a do którego doprowadzany jest wzmacniany sygnał).

Różnorodność funkcji realizowanych przy użyciu współczesnych wzmacniaczy operacyjnych jest, praktycznie biorąc, nieograniczona. Oprócz typowych zastosowań wzmacniacza operacyjnego tj.

- wzmacniacz odwracający,
- wzmacniacz nieodwracający,
- wtórnik napięciowy,
- układ całkujący,
- układ różniczkujący,

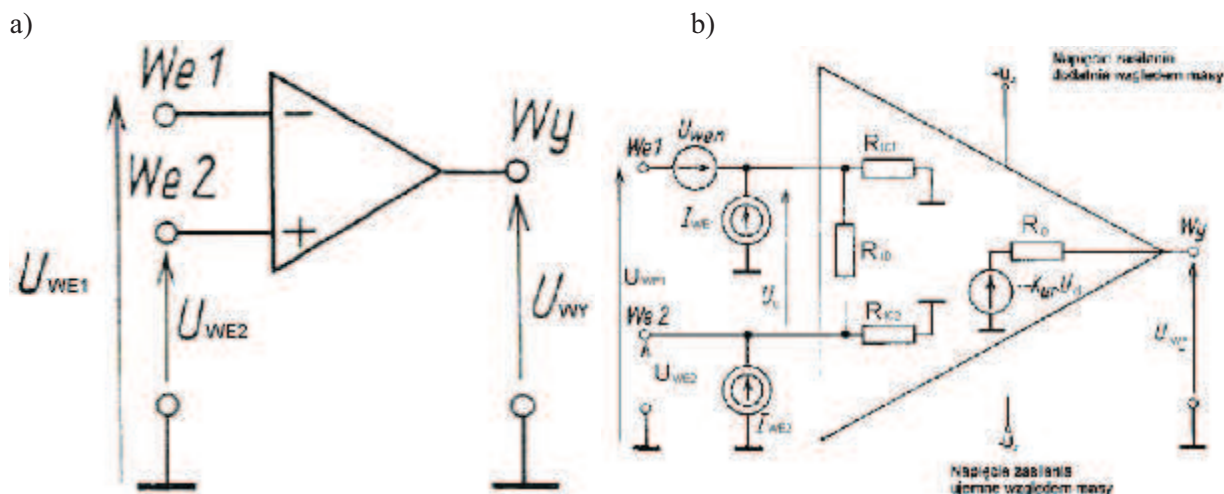
należy wymienić inne zastosowania tego układu, np.:

- układ logarytmujący,
- ogranicznik napięciowy,
- układ porównujący (komparator),
- prostownik liniowy,
- przetwornik analogowo-cyfrowy i cyfrowo-analogowy,
- generator przebiegów prostokątnych, trójkątnych i sinusoidalnych,
- filtry aktywne.

Większość wzmacniaczy operacyjnych ma symetryczne (różnicowe) wejścia i niesymetryczne wyjście. Na rys. 1a pokazano powszechnie stosowany symbol takiego wzmacniacza i jego schemat zastępczy.

Zacisk  $We1$  oznaczony „-” nosi nazwę wejścia odwracającego, ponieważ sygnał wyjściowy jest odwrócony w fazie o  $180^{\circ}$  względem sygnału przyłożonego do tego wejścia.

Zacisk  $We2$  oznaczony „+” jest wejściem nieodwracającym, ponieważ sygnał wyjściowy jest w fazie z sygnałem doprowadzonym do tego wejścia.



Rys. 1. Wzmacniacz operacyjny: a) symbol; b) schemat zastępczy [1, s. 197]

Wzmacniacz operacyjny może pracować w układzie o wejściu niesymetrycznym, jeżeli sygnał wejściowy podaje się na jedno z dwóch wejść We1 lub We2 (sygnał przyłączony jest pomiędzy zaciskiem wejściowym, przy drugim zacisku, dołączonym do masy). W układzie o wejściu symetrycznym sygnał wejściowy doprowadza się między wejścia We1 i We2 wzmacniacza. Sygnał taki nazywa się sygnałem różnicowym. Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do wartości sygnału różnicowego, czyli do różnicy napięć wejściowych zgodnie z zależnością:

$$U_{WY} = K_U (U_{WE1} - U_{WE2}) = K_U \cdot U_d \quad [V]$$

gdzie:

- $U_{WE1}, U_{WE2}$  - napięcia wejściowe,
- $U_{WY}$  - napięcie wyjściowe,
- $U_d$  - różnicowe napięcie wejściowe,
- $K_U$  - wzmacnienie napięciowe wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego (wzmacnienie różnicowe).

Ważną właściwością wzmacniacza operacyjnego, (dalej skrótowo oznaczanego WO) jest to, że sygnał na wyjściu powinien być równy zero, gdy na obu wejściach występują jednakowe sygnały względem masy. Jednakowy sygnał podany na oba wejścia jest nazywany sygnałem wspólnym (współbieżnym). Mówi się, że WO tłumi sygnał wspólny. Do innych ważnych parametrów WO należą:

- **różnicowe wzmacnienie napięciowe** ( $K_U$ ) - stosunek napięcia wyjściowego do różnicowego napięcia na wejściu przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego,
- **współczynnik CMRR** - współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego, określa o ile mniejsze jest wzmacnienie sygnału wspólnego od wzmacnienia różnicowego (wartość CMRR jest rzędu 80-140dB),
- **częstotliwość graniczna** - największa częstotliwość, przy której wzmacnienie napięciowe spada o 3 dB w stosunku do wzmacnienia dla częstotliwości środkowej,
- **rezystancja wejściowa** (rys. 1b); istnieją dwie składowe rezystancji wejściowej wzmacniacza operacyjnego:  $R_{ID}$  - rezystancja dla sygnału różnicowego, czyli rezystancja między końcówkami wejściowymi wzmacniacza z otwartą pętlą,  $R_{IC}$  - rezystancja dla sygnału współbieżnego, czyli rezystancja między jednym z wejść a masą. W katalogach

jako rezystancja wejściowa jest podawana wartość rezystancji mierzona między jednym z wejść a masą przy drugim wejściu uziemionym, co odpowiada równoległemu połączeniu  $R_{ID}$  i  $R_{IC}$ . Wzmacniacze operacyjne scalone są zwykle zaprojektowane w taki sposób, że  $R_{IC} \gg R_{ID}$ . W podobny sposób jak rezystancje wejściowe są definiowane impedancje wejściowe:  $Z_{ID}$  – dla wejścia różnicowego i  $Z_{IC}$  – dla wejścia wspólnego oraz pojemności wejściowe  $C_{IC}$  i  $C_{ID}$ ,

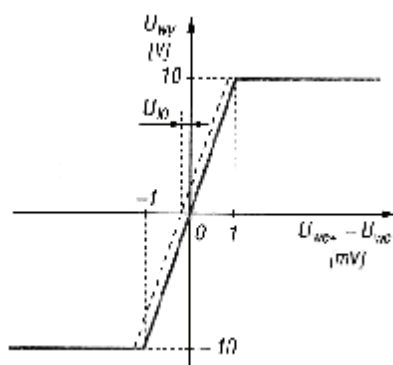
- **rezystancja wyjściowa** - rezystancja występująca między zaciskiem wyjściowym a masą we wzmacniaczu zrównoważonym z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. W katalogach jest podawana zwykle wartość rezystancji wyjściowej  $R_O$  wzmacniacza z otwartą pętlą. (rzędu kilkuset  $\Omega$ ),
- **wejściowe prądy polaryzujące** - prądy wpływające lub wypływające z wejść wzmacniacza operacyjnego (prądy wejściowe są rzędu nanoamperów lub nawet pikoamperów),
- **wejściowe napięcie niezrównoważenia** - jest to napięcie różnicowe (od 1 mikrowolta do kilku miliwoltów), jakie trzeba podać na wejścia, aby napięcie wyjściowe było równe zero. Napięcie to pojawia się ponieważ wejścia wzmacniacza nie są idealnie symetryczne.

Ponadto właściwości wzmacniaczy określa się na podstawie charakterystyki przenoszenia oraz charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowej. W tabeli 1 przedstawiono właściwości idealnego WO które stanowią pewną granicę teoretyczną. Do granicy tej zbliżają się parametry powszechnie konstruowanych WO. Wyszczególnione w tabeli parametry ograniczają bardzo dziedzinę zastosowań pozbawionych jakichkolwiek elementów zewnętrznych, wzmacniaczy.

**Tabela 1.** Porównanie podstawowych parametrów wzmacniaczy operacyjnych [13]

		Wzmacniacz idealny	$\mu A$ 741	Inne WO
Wzmocnienie różnicowe $K_U$	V/V	$\rightarrow \infty$	$10^5$	$10^4 \dots 10^7$
Rezystancja wejściowa różnicowa $R_{ID}$	M $\Omega$	$\rightarrow \infty$	1	$0,05 \dots 10^4$
Rezystancja wyjściowa $R_O$	$\Omega$	$\rightarrow 0$	75	50...200
Częstotliwość graniczna $f_T$	MHZ	$0 \rightarrow \infty$	1	1...100

Charakterystykę przenoszenia WO z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego przedstawiono na rys. 2.

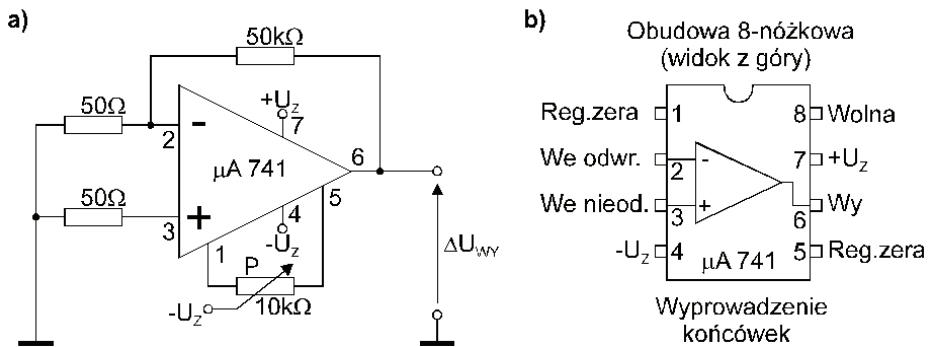


**Rys. 2.** Charakterystyka przenoszenia wzmacniacza operacyjnego [5, s. 121]

Na tej charakterystyce można wyróżnić 3 zakresy pracy WO: zakres pracy liniowej i 2 zakresy nasycenia. W zakresie pracy liniowej napięcie wyjściowe jest określone wzorem:

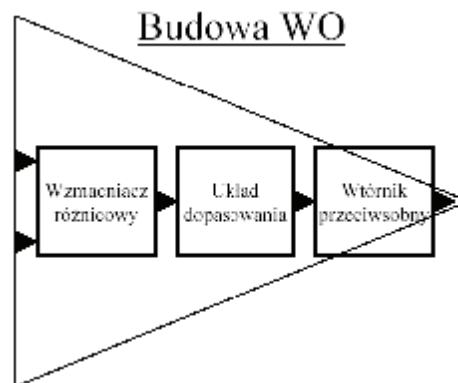
$$U_{WY} = K_U \cdot U_{WE} \quad [V]$$

W zakresie nasycenia napięcie wyjściowe przyjmuje dodatnią albo ujemną wartość napięcia nasycenia, które jest zwykle mniejsze co do wartości bezwzględnej, o 1 do 2V od napięcia zasilania. Zakres liniowości WO pracującego bez sprzężenia zwrotnego jest bardzo mały. Przykładowo, gdy WO ma napięcie nasycenia rzędu  $\pm 10V$ , a wzmacnienie  $K_U$  wynosi  $100000V/V$ , wówczas zakres liniowości napięcia wejściowego znajduje się w przedziale  $\pm 0,1mV$ .



Rys. 3. Kompensacja (równoważenie, zerowanie) napięcia niezrównoważenia WO  $\mu A 741$   
 a) schemat, b) rozmieszczenie jego końcówek [13]

Napięcie wyjściowe WO powinno być równe zero przy zerowej różnicy napięć wejściowych ( $U_{WE}=0$ ). W rzeczywistości występuje w tej sytuacji pewne napięcie nazywane wyjściowym napięciem niezrównoważenia. Nowoczesne WO posiadają możliwość prostej kompensacji wyjściowego napięcia niezrównoważenia poprzez doprowadzenie do wejścia różnicowego, odpowiedniej wartości napięcia takiej, aby uzyskać zerową wartość napięcia na wyjściu. W praktyce kompensacja ta odbywa się za pomocą potencjometru  $P$  dołączonego do specjalnie wyprowadzonych końcówek wzmacniacza, jak to pokazano na rys. 3a.

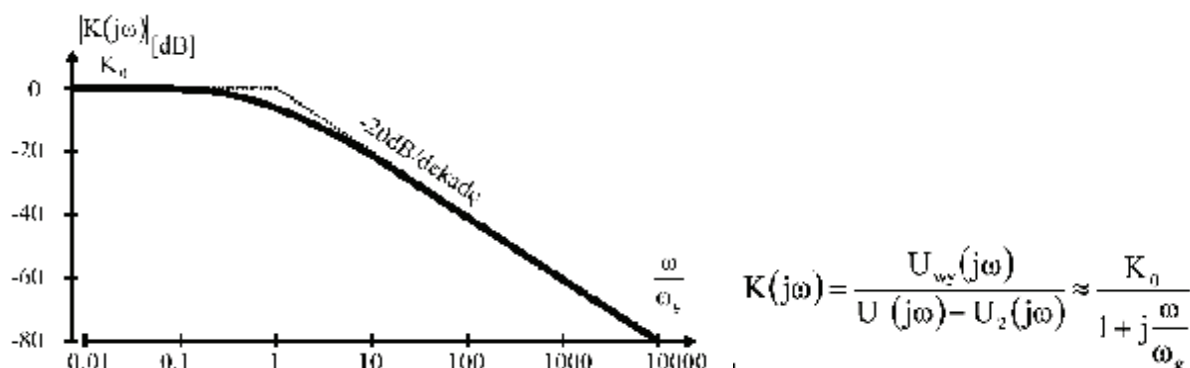


Rys. 4. Schemat blokowy wzmacniacza operacyjnego [12]

Najczęściej spotykaną obudową WO jest obudowa DIP8 (rys. 3b). Umieszcza się w niej od 1 do 2 wzmacniaczy operacyjnych. Sam wzmacniacz operacyjny składa się z kilku wzmacniaczy tranzystorowych, które można podzielić w następujące grupy:

- blok wzmacniacza różnicowego,
- blok wzmacniaczy dopasowujących poziom napięcia,
- stopień wyjściowy zbudowany w oparciu o układ przeciwsobny (rys. 4).

Transmitancję operatorową wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na rys. 5. Do częstotliwości granicznej transmitancja wzmacniacza ma stałą wartość, a po przekroczeniu częstotliwości granicznej spada 20 dB na dekadę.



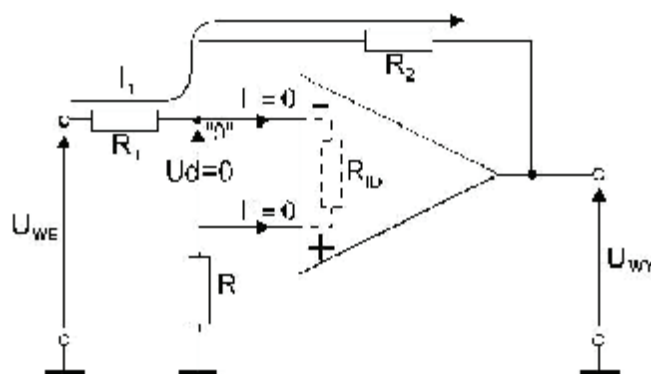
Rys. 5. Transmitancja operatorowa wzmacniacza operacyjnego [12]

### Podstawowe układy pracy wzmacniaczy operacyjnych

WO mogą pracować w wielu różnych konfiguracjach układowych. Najprostszą możliwością jest zastosowanie układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. W tym przypadku WO pracuje jako komparator napięcia, to znaczy już przy niewielkich wartościach różnicowego napięcia wejściowego wchodzi, zależnie od znaku tego napięcia, w jeden z dwóch stanów nasycenia. Jego praca jest w tym układzie bardzo niestabilna. WO są stosowane przede wszystkim w układach z zewnętrznym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Sprzężenie to polepsza właściwości wzmacniacza - zmniejsza nieliniowość charakterystyk i niezrównoważenie, poszerza pasmo, poprawia stałość parametrów i umożliwia dobór wzmocnienia. Poniżej omówiono kilka podstawowych układów pracy WO przy założeniu, że jego właściwości są idealne.

### Wzmacniacz odwracający

Wzmacniacz odwracający stanowi taki układ włączenia WO, w którym sygnał wejściowy jest podany na wejście odwracające (rys. 6).



Rys. 6. Wzmacniacz odwracający [13]

Przyjmując  $K_U \rightarrow \infty$  otrzymujemy:

$$U_d = \frac{U_{wy}}{K_U} \rightarrow 0 \text{ [V]}$$

a to oznacza, że potencjał punktu „0” jest w przybliżeniu równy potencjałowi na wejściu nieodwracającym, a więc jest bliski potencjałowi masy. Z tego powodu punkt „0” jest nazywany punktem „masy pozornej”. Przyjmując, że rezystancja różnicowa jest równą  $\infty$ , można łatwo

zauważyć, że do wejść WO nie wpływają żadne prądy ( $I^- = 0$  i  $I^+ = 0$ ), a zatem prąd w rezystorze  $R_1$  jest równy prądowi w rezystorze  $R_2$  (na rys. 6 oznaczony jako  $I_1$ ).  
Biorąc pod uwagę powyższe dwa spostrzeżenia możemy napisać:

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

a stąd wzmacnienie napięciowe wzmacniacza odwracającego (wzmacnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym) wynosi:

$$K_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = - \frac{R_2}{R_1} \quad [-]$$

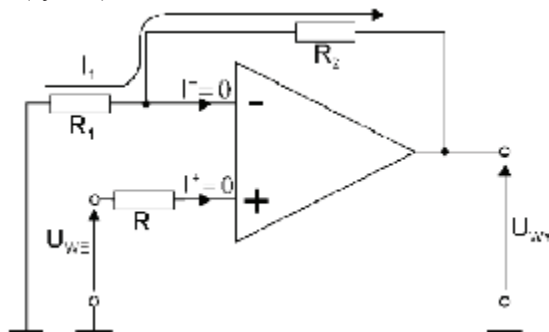
Dobierając rezystancję  $R_2$  (najczęściej  $R_1 = \text{const}$ ) można uzyskać wymagane wzmacnienie. W przypadku gdy  $R_1 = R_2$  otrzymuje się inwerter o wzmacnieniu 1. Rezystancja wejściowa wzmacniacza odwracającego wynosi:

$$R_{WE} = \frac{U_{WE}}{I_1} = R_1$$

Ponieważ rezystancja  $R_1$  jest niewielka to również i  $R_{WE}$  jest niewielka. W praktyce często włącza się pomiędzy masę a wejście „+” dodatkowy rezystor o wartości równej rezystancji połączenia równoległego  $R_1$  i  $R_2$ , gdyż w tym przypadku uzyskuje się najlepszą kompensację błędów spowodowanego napięciem niezrównoważenia.

### Wzmacniacz nieodwracający

W układzie wzmacniacza nieodwracającego sygnał wejściowy jest doprowadzany do wejścia nieodwracającego (rys. 7).



Rys. 7. Wzmacniacz nieodwracający [13]

Przyjmując założenie, że WO jest idealny i przeprowadzając rozumowanie jak we wzmacniaczu odwracającym otrzymujemy:

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

a stąd wzmacnienie napięciowe układu:

$$K_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad [-]$$

Rezystancja wejściowa wzmacniacza nieodwracającego wynosi:

$$R_{WE} = \frac{U_{WE}}{I^+} \quad [\Omega]$$



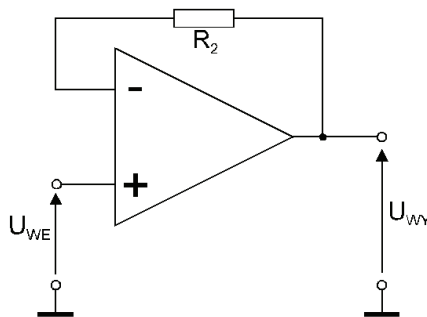
Ponieważ  $I^+ \rightarrow 0$  to  $R_{WE} \rightarrow \infty$ , w praktyce rezystancja  $R_{WE}$  jest bardzo duża. Z tych samych powodów, jakie opisane są we wzmacniaczu odwracającym w praktycznym układzie włącza się w obwód wejścia „+” rezystor o wartości równej rezystancji połączenia równoległego  $R_1$  i  $R_2$ .

### Wtórnik napięciowy

Jeżeli we wzmacniaczu nieodwracającym z rys. 7 wartość rezystora  $R_1$  jest nieskończenie duża, to otrzymuje się układ ze 100-procentowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Taki układ nazywamy wtórnikiem napięciowym (rys. 8). Przyjmując we wzorze na wzmocnienie wzmacniacza nieodwracającego  $R_1 = \infty$  otrzymujemy:

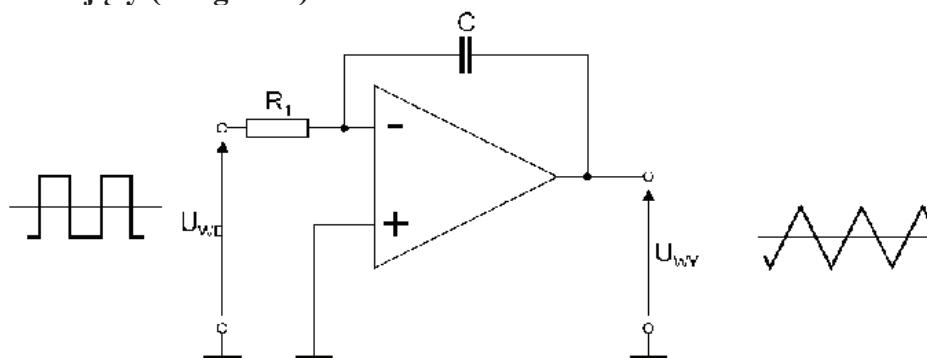
$$K_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = 1 [-]$$

Wtórnik napięciowy ma wzmocnienie równe 1 oraz charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją wejściową i małą rezystancją wyjściową. Z tego powodu nadaje się doskonale do zastosowań jako bufor separujący układy elektroniczne (np. w układzie próbkującym z pamięcią). W praktyce wartość rezystancji  $R_2$  należy dobierać równą rezystancji wewnętrznej źródła sygnału wejściowego.



Rys. 8. Wtórnik napięciowy [13]

### Wzmacniacz całkujący (integrator)



Rys. 9. Wzmacniacz całkujący [13]

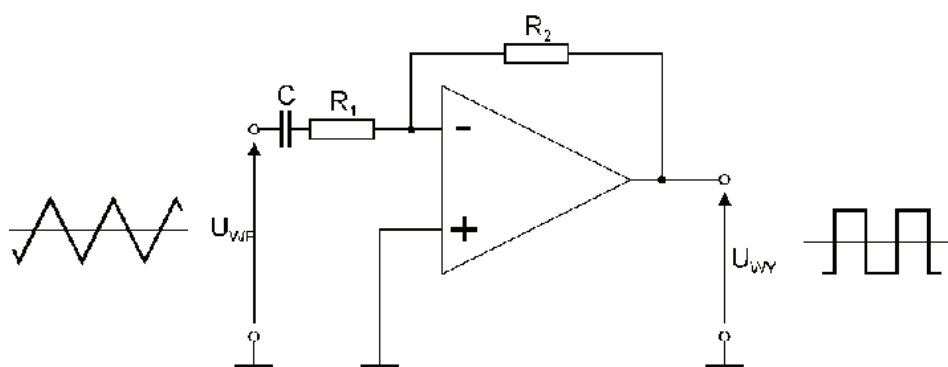
Wzmacniacz całkujący otrzymuje się włączając w obwód sprzężenia zwrotnego kondensator, a na wejście rezystor. Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza idealnego, układu całkującego maleje monotonicznie z szybkością 20dB/dek. W rzeczywistym układzie całkującym charakterystyka nakłada się na charakterystykę wzmacniacza operacyjnego. Całkowanie odbywa się w przedziale częstotliwości  $f_d < f_{sr} < f_g$ . W zakresie małych częstotliwości  $f < f_d$  powstają błędy całkowania związane ze skończoną wartością wzmocnienia wzmacniacza, a w zakresie dużych częstotliwości  $f_g < f$  z ograniczenia pasma przenoszenia. Układ włączenia WO wykonujący funkcję całkowania przedstawiono na rys. 9.

Na rys. 9 pokazano przebieg trójkątny sygnału wyjściowego, który jest całką wejściowego przebiegu prostokątnego. Wzmocnienie tego układu oblicza się ze wzoru:

$$K_U = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{1}{j\omega R_1 C} \quad [-]$$

Praktyczne układy integratorów są zwykle znacznie bardziej rozbudowane, zawierają bowiem dodatkowe elementy ustalające początkowe warunki pracy oraz kompensujące błędy. Przyczyną błędów są wejściowe prądy polaryzacji oraz wejściowe napięcie niezrównoważenia. W celu zmniejszenia wpływu wejściowego prądu polaryzującego, kondensator powinien mieć dużą pojemność i małe prądy upływu. Ważnym zagadnieniem jest również wybór rodzaju wzmacniacza. Powinien mieć dużą rezystancję wejściową i duże dopuszczalne napięcie wejściowe.

### Wzmacniacz różniczkujący



Rys. 10. Wzmacniacz różniczkujący [13]

We wzmacniaczu różniczkującym zamieniono względem całkującego miejscami kondensator z rezystorem (rys. 10). Prosty układ różniczkujący ma duże wzmocnienie przy większych częstotliwościach, co powoduje nadmierną wrażliwość na zakłócenia i szумы. Z tego powodu w niektórych układach istnieje też konieczność włączenia dodatkowego kondensatora w obwodzie sprzężenia zwrotnego (równoległe do rezystora  $R_2$ ). Brak rezystora  $R_1$  przy dużych częstotliwościach może spowodować niestabilność układu. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa nakłada się na charakterystykę wzmacniacza tworząc pasmo. Właściwości różniczkujące układ ma w paśmie  $0 \div f_g$ , zaś powyżej  $f_g$  następuje całkowanie.

#### 4.1.2. Pytania sprawdzające

- Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.
1. Jakie są podstawowe parametry idealnego wzmacniacza operacyjnego?
  2. Jakie są podstawowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego?
  3. Co oznacza pojęcie, zakres liniowości wzmocnienia?
  4. Który z układów pracy wzmacniacza operacyjnego zastosować, aby rezystancja wejściowa była duża, a wzmocnienie dużo większe od jedynki?
  5. Jakimi parametrami charakteryzuje się wtórnik napięciowy?
  6. Jaki kształt będzie miał przebieg wyjściowy jeśli na wejście układu całkującego podamy przebieg prostokątny?
  7. Jaki kształt będzie miał przebieg wyjściowy jeśli na wejście układu różniczkującego podamy przebieg prostokątny, a jaki jeśli trójkątny?



8. Jak zasilany jest wzmacniacz operacyjny?
9. Jaki jest schemat połączeń i jak wyznaczyć wzmocnienie układu odwracającego?
10. Jaki jest schemat połączeń i jak wyznaczyć wzmocnienie układu nieodwracającego?

### 4.1.3. Ćwiczenia

UWAGA!

Zachować szczególną ostrożność przy nastawianiu napięć zasilających, gdyż napięcia powyżej  $\pm 18V$  mogą zniszczyć badany wzmacniacz operacyjny.

**Czynności wstępne** - równoważenie wzmacniacza (dotyczy tylko wzmacniaczy posiadających wejścia równoważenia np.  $\mu A 741$ )

Przed przystąpieniem do właściwych badań należy zrównoważyć wzmacniacz. W tym celu należy zmontować układ pomiarowy wg rys. 3 na str. 10 p 4.1.1. materiału nauczania. Dołączyć woltomierz do zacisków  $\Delta U_{WY}$  i regulując potencjometrem P sprowadzić wskazanie woltomierza do zera. W trakcie trwania ćwiczenia nie zmieniać położenia suwaka potencjometru P, gdyż wyzerowany WO jest następnie włączany do wszystkich innych układów.

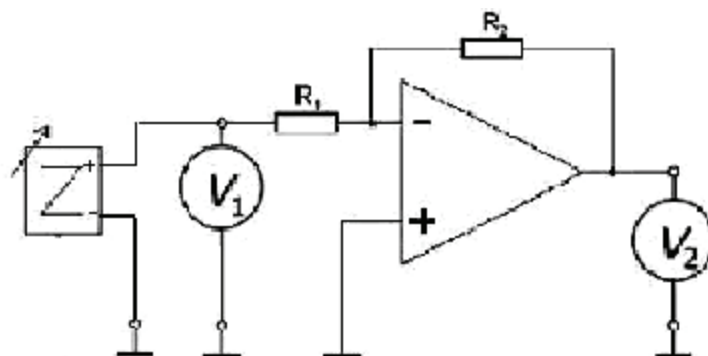
#### Ćwiczenie 1

Wyznaczenie charakterystyki przejściowej wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego,
- 2) przygotować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia i zmontować układ zgodnie z rysunkiem:



Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyki przejściowej wzmacniacza w układzie odwracającym

- 3) wartość rezystorów  $R_1$  i  $R_2$  ustalić tak, aby  $K_U = -2$ ,

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1} [-]$$

- 4) przyłączyć pomiędzy wejście układu i masę zasilacz regulowany,
- 5) przyłączyć na wejście i wyjście układu woltomierz,
- 6) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
- 7) zmieniać wartość napięcia wejściowego od  $-10V$  do  $+10V$  (z krokiem około  $1V$ ) dokonać pomiaru napięcia wyjściowego (charakterystyka przejściowa), a wyniki zapisać w tabeli.

- (Zwracać uwagę na to, aby w zakresach napięć wejściowych, w których następują silne zmiany napięcia wyjściowego zagęszczać pomiary),
- 8) zmienić wartość rezystorów  $R_1$  i  $R_2$  powtórzyć pomiary z punktu 7 dla  $K_U = -5, -10$ ,
  - 9) narysować na podstawie pomiarów, charakterystyki  $U_{WY} = f(U_{WE})$  (na jednym układzie współrzędnym wszystkie charakterystyki),
  - 10) porównać wartość wzmocnienia wyznaczoną z rezystancji  $R_1$  i  $R_2$  i z pomiarów,
  - 11) na podstawie charakterystyki określić wartość napięcia  $U_{WE}$ , przy której wzmacniacz wchodzi w nasycenie:  $+U_{WYsat} = \dots$   $-U_{WYsat} = \dots$ ,
  - 12) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
  - 13) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe wzmacniacza operacyjnego,
- elektroniczne mierniki uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- literatura z rozdziału 6.

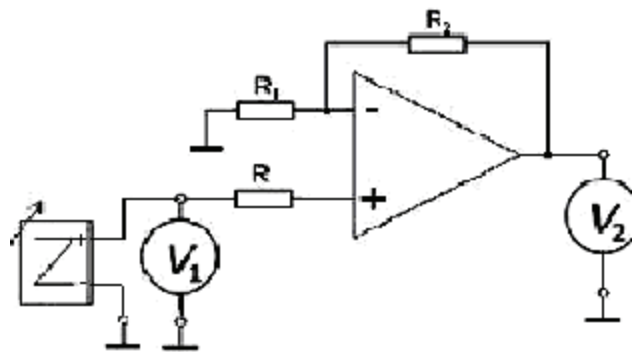
## Ćwiczenie 2

Wyznaczenie charakterystyki przejściowej wzmacniacza w układzie nieodwracającym

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego,
- 2) przygotować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia i zmontować układ zgodnie z rysunkiem:



Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyki przejściowej wzmacniacza w układzie nieodwracającym

- 3) wartość rezystorów  $R_1$  i  $R_2$  ustalić tak, aby  $K_U = 2$ ,
 
$$K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} [-]$$
- 4) przyłączyć pomiędzy wejście i masę zasilacz regulowany,
- 5) przyłączyć na wejście i wyjście układu woltomierz,
- 6) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
- 7) zmieniać wartość napięcia wejściowego od  $-10V$  do  $+10V$  (z krokiem co około  $1V$ ) dokonać pomiaru napięcia wyjściowego (charakterystyka przejściowa), a wyniki zapisać w tabeli. Zwracać uwagę na to, aby w zakresach napięć wejściowych, w których następują silne zmiany napięcia wyjściowego zagęszczać pomiary;
- 8) zmienić wartość rezystorów  $R_1$  i  $R_2$  powtórzyć pomiary z punktu 7 dla  $K_U = 5, 10$ ,

- 9) narysować na podstawie pomiarów charakterystyki  $U_{WY} = f(U_{WE})$  (na jednym układzie współrzędnym wszystkie charakterystyki),
- 10) porównać wartość wzmocnienia wyznaczoną z rezystancji  $R_1$  i  $R_2$  i z pomiarów dla najniższych częstotliwości,
- 11) określić na podstawie charakterystyki wartość napięcia  $U_{WE}$ , przy której wzmacniacz wchodzi w nasycenie  $+U_{WYsat} = \dots$   $-U_{WYsat} = \dots$ ,
- 12) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej, oscyloskopu dwustrumieniowego, przesunięcia fazowe między napięciami  $U_{WE}$  i  $U_{WY}$ ,
- 13) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 14) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe wzmacniacza operacyjnego,
- elektroniczne mierniki uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- literatura z rozdziału 6.

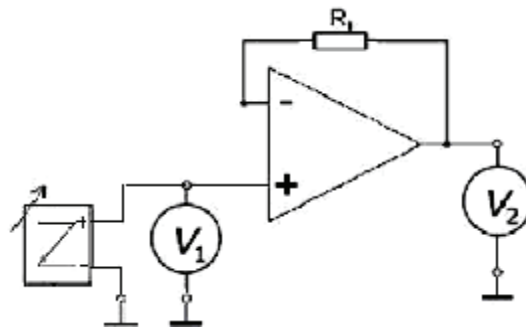
### Ćwiczenie 3

Wyznaczenie charakterystyki przejściowej wtórnika napięciowego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego,
- 2) przygotować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia i zmontować układ zgodnie z rysunkiem:



Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyki przejściowej wtórnika napięciowego

- 3) przyłączyć na wejście układu i masę zasilacz regulowany,
- 4) przyłączyć na wejście i wyjście układu woltomierz,
- 5) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
- 6) zmieniając wartość napięcia wejściowego od  $-10V$  do  $+10V$  (z krokiem co około  $1V$ ) dokonać pomiaru napięcia wejściowego i wyjściowego (charakterystyka przejściowa),
- 7) narysować na podstawie pomiarów charakterystykę  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 8) określić na podstawie charakterystyki wartość napięcia  $U_{WE}$ , przy której wzmacniacz wchodzi w nasycenie  $+U_{WYsat} = \dots$   $-U_{WYsat} = \dots$ ,
- 9) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 10) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe wzmacniacza operacyjnego,
- elektroniczne mierniki uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- literatura z rozdziału 6.

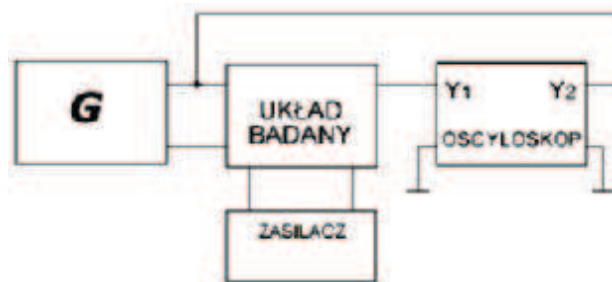
#### Ćwiczenie 4

Badanie układu całkującego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia i zmontować układ zgodnie z rysunkiem:



Schemat do pomiaru wzmacniacza całkującego [14]

- 2) jako wzmacniacz wykorzystać układ wg rys. 9,
- 3) przyłączyć na wejście i wyjście oscyloskop dwustrumieniowy,
- 4) przyłączyć na wejście układu generator funkcyjny i nastawić przebieg prostokątny o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie 1V,
- 5) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej, oscyloskopu dwustrumieniowego przebieg napięcia wyjściowego dla różnych wartości rezystancji  $R_1$  i stałej pojemności  $C$ ,
- 6) nanieść zaobserwowane przebiegi na jeden układ współrzędnych,
- 7) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej, oscyloskopu dwustrumieniowego przebieg napięcia wyjściowego dla różnych wartości pojemności  $C$  i stałej rezystancji  $R_1$ ,
- 8) nanieść zaobserwowane przebiegi na jeden układ współrzędnych,
- 9) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej, oscyloskopu dwustrumieniowego przebieg napięcia wyjściowego dla różnych wartości częstotliwości oraz stałej wartości rezystancji  $R_1$  i pojemności  $C$ ,
- 10) sformułować wnioski z obserwacji,
- 11) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 12) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe wzmacniacza operacyjnego,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- zasilacze stabilizowane,
- zestaw kondensatorów i rezystorów,
- literatura z rozdziału 6.

## Ćwiczenie 5

Badanie układu różniczkującego.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia i zmontować układ zgodnie z rysunkiem w ćwiczeniu 4
- 2) jako wzmacniacz wykorzystać układ wg rys. 10,
- 3) przyłączyć na wejście i wyjście oscyloskop dwustrumieniowy,
- 4) przyłączyć na wejście układu generator funkcyjny i nastawić przebieg prostokątny o częstotliwości 50 Hz i amplitudzie 1V,
- 5) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej oscyloskopu dwustrumieniowego przebieg napięcia wyjściowego dla 3 różnych wartości rezystancji  $R_1$  i stałej pojemności C,
- 6) nanieść zaobserwowane przebiegi na jeden układ współrzędnych,
- 7) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej, oscyloskopu dwustrumieniowego przebieg napięcia wyjściowego dla 3 różnych wartości pojemności C i stałej rezystancji  $R_1$ ,
- 8) nanieść zaobserwowane przebiegi na jeden układ współrzędnych,
- 9) zaobserwować na ekranie lampy oscyloskopowej, oscyloskopu dwustrumieniowego przebieg napięcia wyjściowego dla 3 różnych wartości częstotliwości oraz stałej wartości rezystancji  $R_1$  i pojemności C,
- 10) sformułować wnioski z obserwacji,
- 11) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 12) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe wzmacniacza operacyjnego,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- zasilacze stabilizowane,
- zestaw kondensatorów i rezystorów,
- literatura z rozdziału 6.

### 4.1.4. Sprawdzenie postępów

	Tak	Nie
<b>Czy potrafisz</b>		
1) narysować typowe układy pracy wzmacniaczy operacyjnych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) podać podstawowe własności idealnego wzmacniacza operacyjnego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) podać najważniejsze dane katalogowe wzmacniacza operacyjnego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) podać co oznacza pojęcie „zakres liniowości wzmocnienia”?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) wyjaśnić różnicę pomiędzy wzmacniaczem odwracającym i nieodwracającym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) wykonać pomiar pasma przenoszenia dowolnego wzmacniacza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) zmierzyć i obliczyć wzmocnienie napięciowe dowolnego wzmacniacza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) narysować kształt przebiegu wyjściowego wzmacniacza całkującego dla wejściowego przebiegu prostokątnego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) omówić jak zmienia się kształt przebiegu wyjściowego przy wzroście wartości C w układzie całkującym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) narysować kształt przebiegu wyjściowego wzmacniacza różniczkującego dla wejściowego przebiegu prostokątnego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

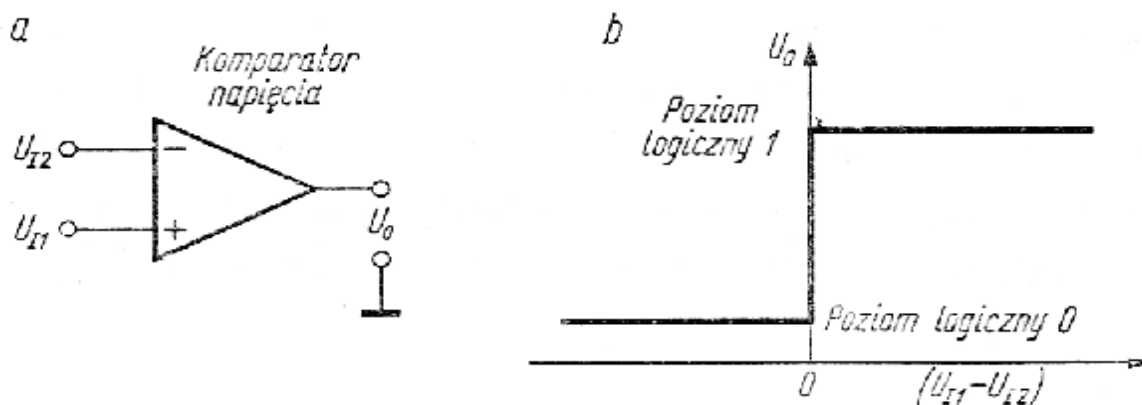
- |  |                          |                          |
|--|--------------------------|--------------------------|
| 11) zmierzyć charakterystyki: amplitudowe i przejściowe wzmacniaczy?   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 12) narysować charakterystykę statyczną wzmacniacza odwracającego (nieodwracającego) i zaznaczyć na niej: zakres liniowej pracy wzmacniacza? | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 13) określić wpływ elementów wzmacniaczy na wzmocnienie napięciowe i rezystancję wejściową tych wzmacniaczy?                                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 14) dobrać warunki pomiaru charakterystyki amplitudowej (amplituda sygnału wejściowego) wzmacniacza różniczkującego i całkującego?           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |



## 4.2. Komparatory analogowe

### 4.2.1. Materiał nauczania

Zadaniem analogowego komparatora napięcia jest wytworzenie sygnału logicznego 0 lub 1 na wyjściu w zależności od znaku różnicy napięć wejściowych. Komparator jest więc elementarnym jednobitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym i stanowi ogniwo pośrednie między układami analogowymi i cyfrowymi. Innymi słowy zamienia on dowolny (mieszczący się w granicach napięcia zasilania komparatora) przebieg analogowy na proporcjonalny, dwustanowy przebieg cyfrowy. Komparator służy więc do porównywania dwóch napięć (stałych lub zmiennych) doprowadzonych do jego wejść. Pojawienie się różnicy napięć rzędu ułamka mV między wejściami komparatora wywołuje skokową zmianę poziomu napięcia na wyjściu. Jeżeli napięcie wejściowe  $U_{I2}$  podane na końcówkę odwracającą komparatora jest mniejsze od napięcia wejściowego  $U_{I1}$  podawanego na końcówkę nieodwracającą, to napięcie wyjściowe przyjmuje poziom wysoki. Natomiast gdy napięcie wejściowe  $U_{I2}$  ma wartość większą niż wartość napięcia  $U_{I1}$ , wówczas napięcie wyjściowe przyjmuje poziom niski.



Rys. 11. Charakterystyka idealnego komparatora. a) układ, b) charakterystyka przejściowa [4,s.349]

Komparatory znajdują zastosowanie wszędzie tam, gdzie zachodzi potrzeba zasygnalizowania przejścia badanego napięcia przez z góry ustalony próg. Ich zastosowanie jest bardzo szerokie i są wykorzystywane w: układach formujących, przetwornikach analogowo-cyfrowych, dyskryminatorach amplitudy, generatorach, wzmacniaczach odczytu itd. Wśród komparatorów rozróżnia się:

- dyskryminatory progowe (napięcie odniesienia  $U_o \neq 0$ ),
- detektory przejścia przez zero ( $U_o=0$ ),
- dyskryminator okienkowy (połączenie dwóch komparatorów),
- dyskryminator progowy z histerezą (komparator z dodatnią pętlą sprzężenia zwrotnego).

Komparator w swojej budowie, czy chociażby symbolu, bardzo przypomina wzmacniacz operacyjny, są jednak pewne różnice pomiędzy tymi konstrukcjami. Komparator jest szczególnym rodzajem wzmacniacza operacyjnego o bardzo dużym wzmocnieniu, przeznaczony do pracy z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. Każdy wzmacniacz operacyjny może pracować jako komparator, natomiast większość komparatorów nie może pracować jako wzmacniacz operacyjny. Wynika to głównie z następujących różnic:

- komparatory są zazwyczaj układami o większej szybkości działania niż wzmacniacze,
- poziomy napięcia wyjściowego w komparatorach są dostosowane do wymagań typowych układów cyfrowych np. TTL, zaś wzmacniacze operacyjne dysponują szerokim zakresem napięcia wyjściowego obu znaków,

- komparatory mają zazwyczaj szerszy niż wzmacniacze, zakres napięcia wejściowego,
- wejściowe napięcia niezrównoważenia oraz jego współczynnik cieplny są na ogół większe w komparatorach niż we wzmacniaczach, kompensacja tego napięcia w komparatorach organizowana jest zazwyczaj wewnątrz układu,
- komparatory, a szczególnie te o dużej szybkości działania mają mniejsze rezystancje wejściowe i większe wejściowe prądy polaryzujące niż wzmacniacze,
- komparator pracuje w stanie odcięcia lub nasycenia na wyjściu podczas gdy wzmacniacz operacyjny pracuje zwykle z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego na liniowej części charakterystyki przejściowej (nie wchodzi w nasycenie). [4]

**Tabela 2.** Parametry przykładowego komparatora analogowego [11]

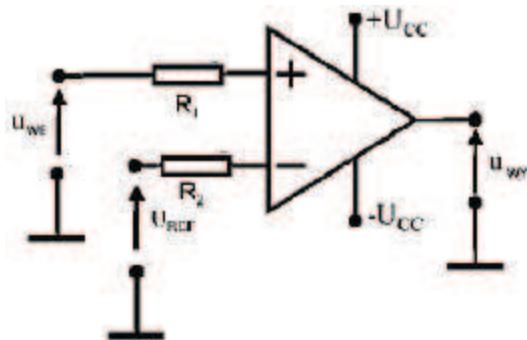
Parametr	Oznaczenie	Wartość max	Jednostka
Napięcie zasilania	$U_{CC}$	36 lub $\pm 18$	V
Prąd zasilający	$I_{CC}$	2	mA
Wej. napięcie niezrównoważenia	$U_{IO}$	5	mV
Wejściowy prąd polaryzujący	$I_{IB}$	250	nA
Wzmocnienie napięcia	$K_U$	200	V/mV
Różnicowe napięcie wejściowe	$U_{ID}$	36	V
Napięcie wejściowe	$U_I$	36	V
Moc strat	$P_{tot}$	570	mW
Zakres temp. pracy	$T_{amb}$	+70	°C

Szybkość działania odgrywa ważną rolę i jest zwykle czynnikiem decydującym o przydatności komparatora do określonego zastosowania. Czas odpowiedzi komparatora jest to czas upływający od chwili podania na wejście komparatora określonego skoku napięcia do chwili, gdy napięcie wyjściowe osiągnie wartość napięcia progu logicznego. Szumy nakładające się na sygnał wejściowy mogą powodować wielokrotne przełączanie wyjścia.

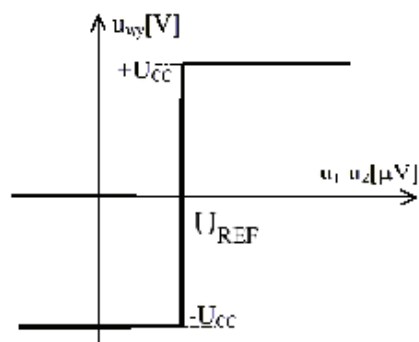
### Zastosowanie komparatorów analogowych

Głównym kierunkiem wykorzystania komparatorów napięcia jest ich zastosowanie w układach porównujących. Zadaniem tych układów jest porównanie analogowych sygnałów wejściowych z sygnałem odniesienia.

a)



b)

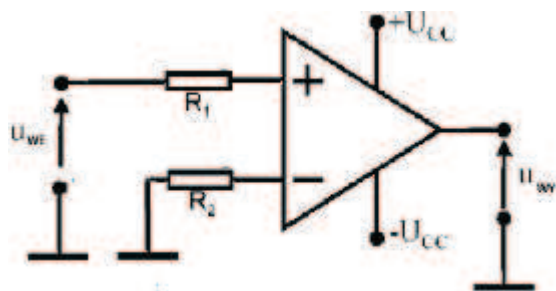


**Rys. 12.** Podstawowy układ pracy komparatora. a) schemat ideowy, b) charakterystyka przejściowa [12]

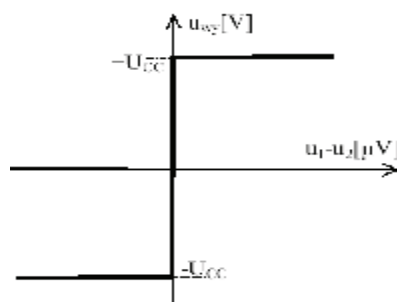
Na rys 12 przedstawiono schemat dyskryminatora progowego i jego charakterystykę przejściową. Układ ten sygnalizuje przejście badanego napięcia wejściowego ( $U_{WE}$ ) przez z góry

ustalony próg ( $U_{REF}$ ). W celu zminimalizowania napięcia niezrównoważenia wywołanego wejściowymi prądami polaryzującymi wartości  $R_1$  i  $R_2$  powinny być równe i niezbyt duże.

a)



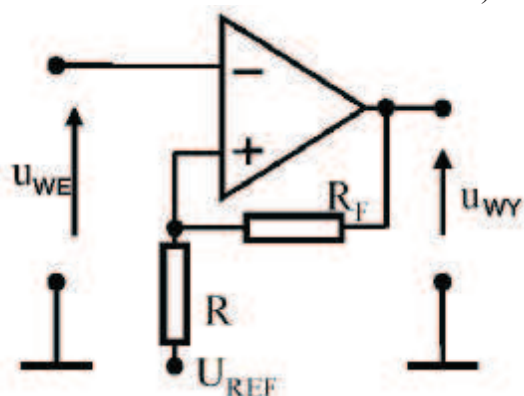
b)



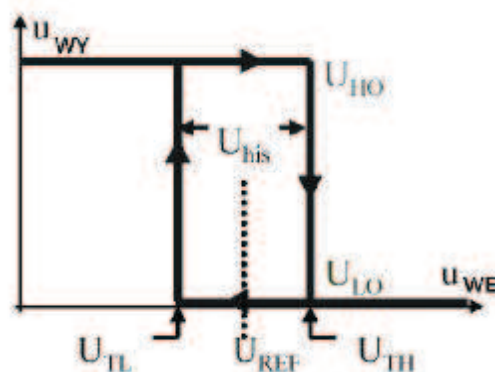
Rys. 13. Detektor przejścia przez zero. a) schemat ideowy, b) charakterystyka przejściowa [12]

Jeśli napięcie  $U_{REF}$  będzie równe zero to na wyjściu otrzymamy sygnalizację przy przejściu sygnału przez zero stąd nazwa: detektor przejścia przez zero. Na rys. 13 przedstawiono jego schemat i jego charakterystykę przejściową. Układ taki jest szczególnie przydatny przy analizie widma częstotliwościowego sygnału, gdyż przetwarza sygnał analogowy w ciąg impulsów prostokątnych o szerokościach zależnych od częstotliwości. W ten sposób następuje redukcja szumów i zniekształceń sygnału badanego, a dalszą analizę można łatwo przeprowadzić metodami cyfrowymi.

a)



b)



Rys. 14. Komparator z histerезą. a) schemat ideowy, b) charakterystyka przejściowa [12]

Proste układy dyskryminatorów, omówione poprzednio, mają kilka wad. W przypadku bardzo wolno zmiennego sygnału wejściowego napięcie wyjściowe może na pewien czas przyjąć wartość pośrednią pomiędzy  $U_{LO}$  i  $U_{HO}$ . Mogą nawet wystąpić oscylacje. Również jeśli  $U_{WE}$  znajduje się w pobliżu progu przełączania i jest mocno zakłócone składową zmienną, to napięcie wyjściowe komparatora będzie zmieniać stan w sposób niekontrolowany. W celu zapobieżenia opisanym zjawiskom należy zastosować słabe dodatnie sprzężenie zwrotne, powodujące powstanie niewielkiej histerезy układu (rys. 14). Wartość tej histerезy należy dobrać większą niż przewidywane zakłócenia. Zastosowanie sprzężenia powoduje powstanie dwóch progów przełączeń. Jeden przy przejściu  $U_{WE}$  od minimum do maksimum, a drugi przy przejściu  $U_{WE}$  od maksimum do minimum (strzałki na wykresie wytyczają przejścia).

Wartości progów przełączeń i histerезy można wyznaczyć z następujących zależności:

$$U_{\pi} = U_{REF} \frac{R_f}{R + R_f} + U_{IIO} \frac{R}{R + R_f} \quad [V]$$

$$U_{\pi} = U_{REF} \frac{R_f}{R + R_f} + U_{ILO} \frac{R}{R + R_f} \quad [V]$$

$$U_{his} = \frac{R}{R + R_f} (U_{IIO} - U_{ILO}) \quad [V]$$

Na rys. 15 przedstawiono przykład wyjaśniający funkcję histerezy.



Rys. 15. Zasada pracy komparatora z histerezą. a) przebieg wejściowy, b) przebieg wyjściowy bez histerezy, c) przebieg wyjściowy z histerezą [12]

#### 4.2.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczenia.

1. Jaka jest funkcja komparatora analogowego?
2. Wymień podstawowe parametry komparatorów?
3. Ile jest stanów wyjściowych komparatora?
4. Jakie są różnice pomiędzy komparatorem a wzmacniaczem operacyjnym?
5. Czy wzmacniacz operacyjny może pracować jako komparator?
6. Czy komparator może pracować jako wzmacniacz operacyjny?
7. Wyjaśnij wpływ dodatniego sprzężenia w komparatorze?
8. Jaka powinna być szerokość pętli histerezy?
9. Jaka będzie odpowiedź detektora przejścia przez zero na przebieg sinusoidalny?

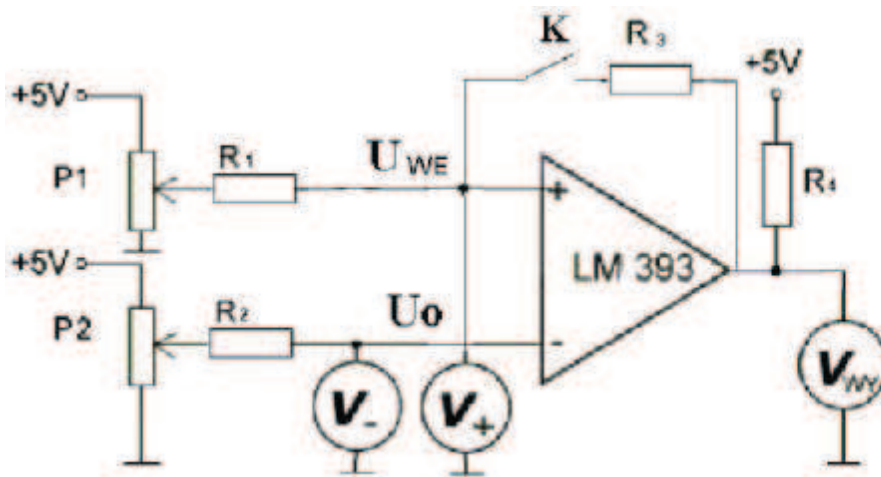
#### 4.2.3. Ćwiczenia

##### Ćwiczenie 1

Badanie komparatora w podstawowych układach pracy dla napięć stałych.

##### Dyskryminator progowy

Sposób wykonania ćwiczenia



Schemat do pomiaru charakterystyki przejściowej komparatora [14]

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować przyrządy i sprzęt pomiarowy,
- 2) zmontować układ zgodnie z rysunkiem,
- 3) dobrać  $R_1=R_2$  dla zmniejszenia błędów spowodowanego napięciem nie zrównoważenia,
- 4) otworzyć klucz „K”,
- 5) dołączyć woltomierz do wejścia i wyjścia,
- 6) dołączyć zasilacz regulowany na wejście ( $U_{WE}$ ),
- 7) dołączyć napięcie odniesienia  $U_O$  i nastawić wartość napięcia odniesienia (np.  $U_O=+2V$ ),
- 8) przygotować tabelę pomiarową,
- 9) regulować napięcie  $U_{WE}$  w zakresie od 1,5V do 2,5 V co 100 mV, dokonując pomiarów napięcia  $U_{WE}$  i  $U_{WY}$ ,
- 10) zmierzyć napięcie  $U_{WE}$ , przy którym zmienia się stan wyjścia,
- 11) powtórzyć pomiary dla innej wartości napięcia odniesienia  $U_O$ ,
- 12) narysować na podstawie pomiarów charakterystykę układu  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 13) sformułować wnioski.

### Detektor przejścia przez zero

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zmontować układ zgodnie z rysunkiem,
- 2) dobrać  $R_1=R_2$  dla zmniejszenia błędów spowodowanego napięciem nie zrównoważenia,
- 3) otworzyć klucz „K”,
- 4) dołączyć woltomierz do wejścia i wyjścia,
- 5) dołączyć zasilacz regulowany na wejście ( $U_{WE}$ ),
- 6) dołączyć wejście odniesienia  $U_O$  do masy,
- 7) przygotować tabelę pomiarową,
- 8) regulować napięcie  $U_{WE}$  w zakresie od  $-0,5V$  do  $+0,5 V$  co 100 mV, dokonując pomiarów napięcia  $U_{WE}$  i  $U_{WY}$ ,
- 9) zmierzyć napięcie  $U_{WE}$ , przy którym zmienia się stan wyjścia,
- 10) na podstawie pomiarów narysować charakterystykę układu  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 11) porównać napięcie odniesienia z otrzymanym wykresem,
- 12) sformułować wnioski.



## Komparator z histerezą

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

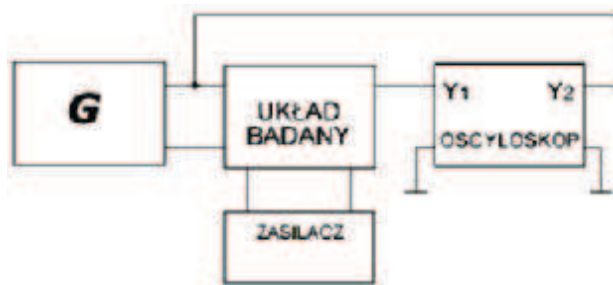
- 1) zmontować układ zgodnie z rysunkiem,
- 2) zamknąć klucz „K”,
- 3) dołączyć woltmierz do wejścia i wyjścia,
- 4) dobierać  $R_1=R_2$  dla zmniejszenia błędów spowodowanego napięciem nieznównoważenia,
- 5) obliczyć wartość rezystorów tak, aby  $U_{TL} = 2V$ ,  $U_{TH} = 4V$  dla  $U_{REF} = 3V$  i  $U_{WY} = 15V$
- 6) dołączyć zasilacz regulowany na wejście ( $U_{WE}$ ),
- 7) dołączyć napięcie odniesienia  $U_O$  i nastawić wartość napięcia odniesienia (np.  $U_O = +2V$ ),
- 8) przygotować tabelę pomiarową,
- 9) regulować napięcie  $U_{WE}$  w zakresie od 1,5V do 4,5V co 100 mV, dokonując pomiarów napięcia  $U_{WE}$  i  $U_{WY}$ ,
- 10) zmierzyć napięcie  $U_{WE}$ , przy którym zmienia się stan wyjścia,
- 11) narysować na podstawie pomiarów charakterystykę układu  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 12) porównać obliczone napięcia progowe i szerokość histerezy z otrzymanym wykresem,
- 13) sformułować wnioski,
- 14) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 15) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe komparatora analogowego,
- elektroniczne mierniki uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- literatura z rozdziału 6.

## Ćwiczenie 2

Badanie komparatora w podstawowych układach pracy dla przebiegów zmiennych .



Schemat do pomiaru charakterystyki przejściowej komparatora [14]

## Dyskryminator progowy

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować stanowisko pracy zgodnie z rysunkiem,
- 2) wykorzystać jako układ badany komparator LM393 w układzie detektora progowego jak w ćwiczeniu 1,
- 3) otworzyć klucz „K”,



- 4) przygotować wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego,
- 5) podłączyć do wejścia wzmacniacza generator funkcyjny,
- 6) podłączyć do wejścia odniesienia zasilacz regulowany i ustawić wart. np. 2V
- 7) podłączyć do wejścia i wyjścia wzmacniacza oscyloskop dwukanałowy,
- 8) przyjąć częstotliwość sygnału sterującego  $f = 1\text{kHz}$ , a amplitudę  $U_{WE}$  ustalić na ok. 5 V,
- 9) zaobserwować przebiegi na wejściu, wyjściu i nanieść je na papier milimetrowy,
- 10) zaobserwować zmiany przebiegu wyjściowego przy zmianach napięcia progowego,
- 11) porównać otrzymany przebieg wyjściowy z napięciem odniesienia, dokonać oceny poprawności i przedstawić wynik w postaci wniosków,
- 12) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 13) dokonać oceny ćwiczenia.

### **Komparator z histerezą**

#### Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zmontować układ zgodnie z rysunkiem,
- 2) wykorzystać jako układ badany komparator LM393 w układzie detektora z histerezą jak w ćwiczeniu 1,
- 3) zamknąć klucz „K”,
- 4) przygotować wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego,
- 5) podłączyć do wejścia wzmacniacza generator funkcyjny,
- 6) podłączyć do wejścia odniesienia zasilacz regulowany i ustawić wart. np. 2V ,
- 7) podłączyć do wejścia i wyjścia wzmacniacza oscyloskop dwukanałowy,
- 8) przyjąć częstotliwość sygnału sterującego  $f = 1\text{kHz}$ , a amplitudę  $U_{WE}$  ustalić na ok. 5 V,
- 9) zaobserwować przebiegi na wejściu, wyjściu i nanieść je na papier milimetrowy,
- 10) zaobserwować zmiany przebiegu wyjściowego przy zmianach napięcia progowego i szerokości pętli(zmiana rezystora),
- 11) porównać otrzymany przebieg wyjściowy z napięciem odniesienia, dokonać oceny poprawności,
- 12) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 13) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe komparatora analogowego,
- elektroniczne mierniki uniwersalne,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- zasilacze stabilizowane,
- zestaw kondensatorów i rezystorów,
- literatura z rozdziału 6.

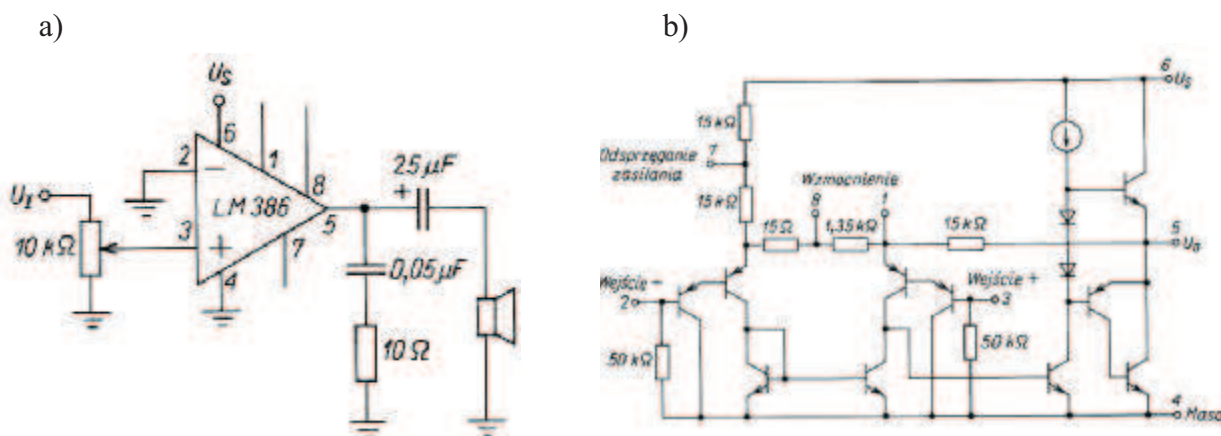
#### 4.2.4. Sprawdzian postępów

	Tak	Nie
<b>Czy potrafisz:</b>		
1) wyjaśnić pojęcie i funkcję komparatora napięcia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) narysować komparator z pętlą histerezy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) narysować schemat układu pomiarowego do pomiaru charakterystyk przejściowych komparatora?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) narysować schemat układu pomiarowego dla pomiarów sygnałów zmiennoprądowych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) dobrać konfigurację układu komparatora dla konkretnego zastosowania?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) określić w jakim celu stosuje się histerezę w komparatorach?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) omówić źródła błędnej pracy komparatora bez histerezy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) narysować odpowiedź komparatora bez pętli histerezy z pętlą histerezy na przebieg piłokształtny?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) podać rząd wielkości napięcia niezrównoważenia i prądów wejściowych?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) określić, jaka będzie odpowiedź detektora przejścia przez zero na przebieg sinusoidalny?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) podać kilka przykładów zastosowań układów porównujących napięcia?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.3. Scalone wzmacniacze mocy

### 4.3.1. Materiał nauczania

W każdym wzmacniaczu, oprócz zwiększania amplitudy sygnału (napięcia lub prądu), następuje również wzmocnienie mocy. Wzmacniaczem mocy jest nazywany układ elektroniczny o specjalnej konstrukcji, którego zadaniem jest dostarczenie do obciążenia odpowiednio dużej mocy użytecznej wzmacnianego sygnału przy małych zniekształceniach sygnału i możliwie dużej sprawności. Wzmacniaczami mocy są np.: wzmacniacze głośnikowe w radioodbiornikach (o mocy wyjściowej od kilkuset miliwatów do kilkudziesięciu watów) lub wzmacniacze tyrystorowe sterujące silnikami elektrycznymi o mocy kilkuset watów, a nawet kilku megawatów. Wzmacniacze mocy można podzielić też na wzmacniacze małej częstotliwości (używane głównie do wzmacniania pasma akustycznego - w głośnikach, słuchawkach), wzmacniacze dużej częstotliwości (używane głównie do wzmacniania pasma radiowego w nadajnikach) oraz wzmacniacze b.w.cz. (bardzo wielkiej częstotliwości - gigahercowe). Wzmacniacze mocy realizuje się z elementów dyskretnych, a także w wersji scalonej. Topologie takich układów scalonych są bardzo skomplikowane, ale zapewniają uzyskanie dobrych parametrów i ich stałość niezależnie od temperatury. Głównym jednak problemem przy realizacji scalonego wzmacniacza mocy jest odprowadzanie ciepła. Z tego powodu trudno jest wykonać wzmacniacz scalony o mocy powyżej 100W. Scalone wzmacniacze mocy mają na ogół obudowy przystosowane do zamocowania na radiatorze. Podstawowym problemem dla projektantów wzmacniaczy mocy jest uzyskanie możliwie dużej sprawności oraz dobre wykorzystanie możliwości granicznych elementów układów jeżeli chodzi o moc, napięcie, czy natężenie prądu. Ograniczenia takie dotyczą głównie tranzystorów - podstawą jest nie używanie elementów, których parametry przekraczają znacząco potrzeby.



Rys. 16. Wzmacniacz mocy LM386

a) Schemat ogólny wzmacniacza b) Struktura wewnętrzna wzmacniacza mocy LM386 [8,s.282]

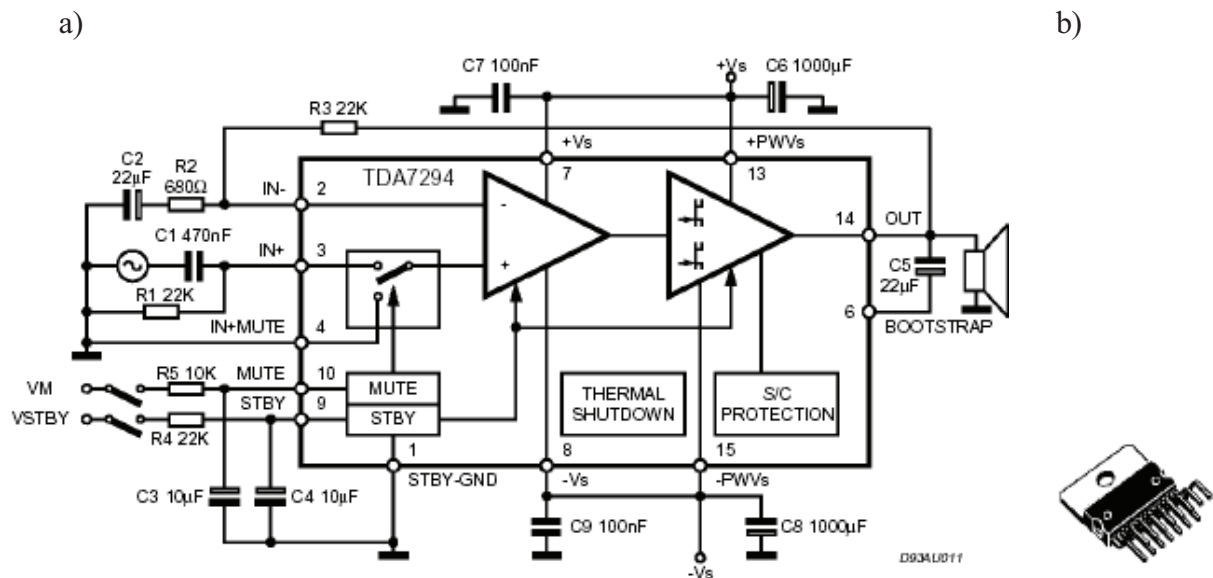
Najczęściej spotykanymi wzmacniaczami mocy w wersji scalonej są wzmacniacze akustyczne. Konstrukcje scalonych wzmacniaczy mocy, przeznaczonych do zastosowań w sprzęcie akustycznym, są bardzo zróżnicowane, gdyż są uzależnione od jakości i mocy wyjściowej wzmacniacza. Na rysunku 16a przedstawiono schemat scalonego wzmacniacza mocy LM386 z wyjściem komplementarnym, a na rys. 16b jego strukturę wewnętrzną. Składa się on z następujących stopni:

- stopnia wstępnego, zwanego przedwzmacniaczem, który jest sterowany przez źródło sygnału,

- stopni pośrednich, sterowanych przez poprzedni stopień wzmacnienia; wzmacniacze te są zazwyczaj o jednakowym rozwiązaniu i są wzajemnie dopasowane,
- stopnia końcowego lub inaczej stopnia mocy, dostarczającego sygnały o dużym poziomie do urządzenia wyjściowego.

Jest to klasyczne rozwiązanie stosowane również w układach z elementów dyskretnych. Układ LM 386 jest bardzo popularnym układem ze względu na małą liczbę elementów zewnętrznych i niewielką cenę. Wymaga zasilania 5-18V. Posiada ustalone wewnętrznie wzmacnienie wynoszące 20 V/V, które można zwiększyć przez dodanie jednego rezystora pomiędzy końcówki 1 i 8. Moc wyjściowa nie przekracza jednak 1 W. Układ ten produkowany jest w wersji DIP8 i SMD bez radiatora zewnętrznego.

Często stosowanym scalonym wzmacniaczem mocy o dużej mocy wyjściowej są układy serii TDA72xx. Na rysunku pokazano aplikację układu TDA 7294 i jego strukturę blokową.



MUTE – wyciszenie

STBY – stand-by – funkcja czuwania

THERMAL SHUTDOWN – zabezpieczenie termiczne

S/C PROTECTION – zabezpieczenie nadprądowe wyjścia wzmacniacza

**Rys. 17.** Aplikacja i struktura wewnętrzna i wygląd zewnętrzny wzmacniacza mocy TDA 7294 [11]

Niewątpliwą zaletą scalonych wzmacniaczy mocy z rodziny TDA729x są bardzo dobre parametry przetwarzania dźwięku oraz prosta aplikacja odznaczająca się niewielką ilością elementów zewnętrznych. Układy te cechują się niskim poziomem szumów własnych, niskim poziomem zniekształceń, dużą dynamiką oraz dużą mocą wyjściową. Stopnie wyjściowe wykonane są w technologii D-MOS i pracują w klasie AB. Układy TDA729x wymagają zasilania napięciami symetrycznymi o wartościach z przedziału od  $\pm 12\text{VDC}$  do  $\pm 42\text{VDC}$ . Wzmacniacze z rodziny TDA729x mogą pracować w układach mostkowych, w których moc wyjściowa jest znacznie większa niż w przypadku aplikacji standardowych moc znamionową (do 180W przy  $\text{THD+N} \leq 1\%$ ). Scalone wzmacniacze mocy z rodziny TDA729x posiadają pełny zestaw zabezpieczeń, które chronią je przed przypadkowym uszkodzeniem w czasie uruchamiania i eksploatacji. Zestaw ten obejmuje zabezpieczenia przeciwzwarceniowe oraz zabezpieczenie termiczne. Układy TDA7293 oraz TDA7294S mają wbudowaną funkcję umożliwiającą stałą kontrolę warunków pracy stopni wyjściowych. Dopełnieniem całości wyposażenia wzmacniaczy z rodziny TDA729x są funkcje sterujące ich trybem pracy tj. funkcja wyciszenia Mute oraz funkcja czuwania Stand-by. Podczas normalnej pracy układów z rodziny

TDA729x wydzielana jest duża ilość ciepła, co wymaga zapewnienia odpowiedniego chłodzenia. Dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie radiatorów żebranych lub dodatkowych wentylatorów wymuszających obieg powietrza.

### **Wielkości charakteryzujące wzmacniacze mocy małej częstotliwości:**

- moc wyjściowa  $P_o$  [ W ] - jest to moc, którą wzmacniacz może wydzielić na znamionowej impedancji obciążenia przy danej częstotliwości lub w danym paśmie częstotliwości bez przekroczenia określonego współczynnika zniekształceń nieliniowych,
- wzmacnienie napięciowe  $K_u$  - liczba określająca, ile razy napięcie wyjściowe jest większe od napięcia wejściowego,

$$K_u = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \quad [-]$$

- wzmacnienie mocy - iloraz mocy wydzielonej w jego obwodzie wejściowym do mocy dostarczonej przez źródło sygnału do obwodu wejściowego wzmacniacza,

$$K_p = \frac{U_{WY} I_{WY}}{U_{WE} I_{WE}} \quad [-]$$

- współczynnik zawartości harmonicznym (zniekształcenia nieliniowe)  $h = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}$  [%] -

wywołane przez nieliniowość charakterystyk statycznych niektórych elementów wzmacniacza (tranzystora, transformatora z rdzeniem żelaznym itp.) Zniekształcenia nieliniowe mierzy się za pomocą specjalistycznych mierników;

- zniekształcenia częstotliwościowe ( liniowe ) - wywołane niejednakowym przenoszeniem przez wzmacniacz sygnałów o różnych częstotliwościach. Zniekształcenia liniowe można określić na podstawie charakterystyki amplitudowo – częstotliwościowej;
- impedancja wejściowa - impedancja, jaką przedstawia sobą wejście wzmacniacza dla znamionowych warunków pracy,

$$Z_{WE} = \frac{U_{WE}}{I_{WE}} \quad [-]$$

- impedancja wyjściowa decyduje o wartości impedancji obciążenia, która może być dołączona przy określonej sprawności wzmacniacza,

$$Z_{WY} = \frac{U_{WY}}{I_{WY}} \quad [-]$$

- pasmo przenoszenia  $\Delta f$  [ Hz ] - zgodnie z normą PN-74/T-06251/07 dla wzmacniaczy Hi-Fi minimalne pasmo przenoszenia powinno wynosić 40Hz - 16kHz ,

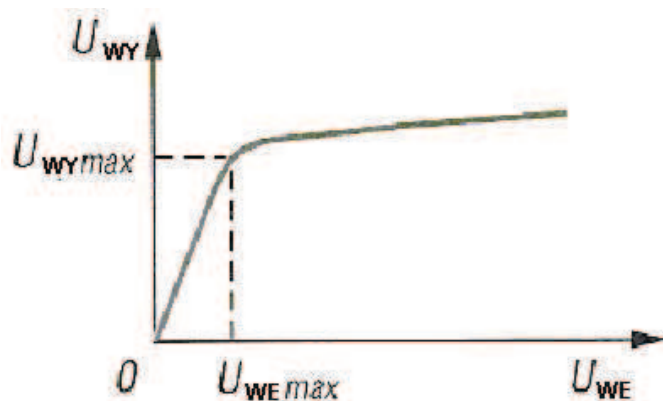
- sprawność energetyczna  $\eta = \frac{P_{WY}}{P_{ZAS}} \cdot 100$  [%]

gdzie:  $P_{WY}$  - moc sygnału dostarczanego do obciążenia i niosącego informację,

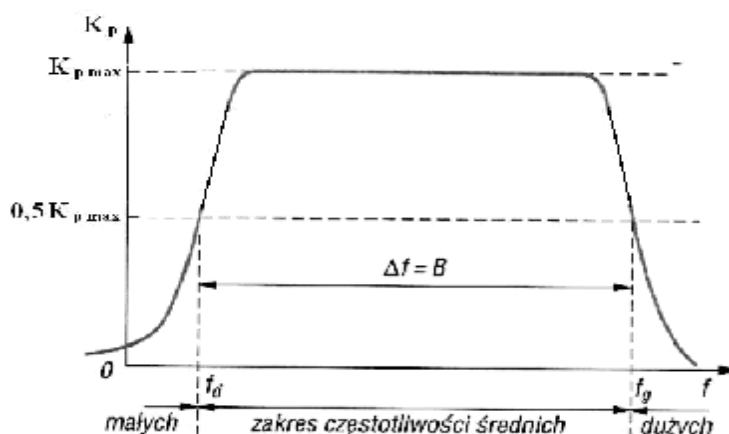
$P_{ZAS}$  - moc dostarczana do układu ze źródła zasilania.

- napięcie szumów na wyjściu [ mV ],
- spoczynkowy prąd zasilania  $I_{CCQ}$  [ mA ],
- charakterystyka przejściowa (rys. 18) określa zależność  $U_{WY}$  od  $U_{WE}$  dla sygnału sinusoidalnego o częstotliwości  $f = \text{const}$  leżącej w paśmie przenoszenia wzmacniacza. W zależności od wartości amplitudy sygnału wejściowego wzmacniacz może ten sygnał wzmacniać bez zniekształceń lub go zniekształcając. Dla napięć wejściowych od 0 do  $U_{WE\text{max}}$  zachowana jest proporcja przyrostu napięcia wyjściowego do wejściowego. Po przekroczeniu tej wartości elementy aktywne wzmacniacza wchodzi w stan nasycenia co powoduje powstanie dużych zniekształceń sygnału wyjściowego.

- charakterystyka częstotliwościowa  $P=f(f)$  (rys. 19) określa zależność mocy sygnału wyjściowego od częstotliwości. Wykreśla się ją w skali logarymicznej. Na charakterystyce tej wyznacza się dwie wartości, przy których moc wyjściowa zmniejsza się o połowę. Wartości te określa się jako częstotliwość graniczną dolną ( $f_d$ ) i górną ( $f_g$ ). Odległość pomiędzy częstotliwością graniczną dolną i górną nazywa się pasmem przenoszenia i oznacza  $\Delta f$ .



Rys. 18. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza [5,s.36]



Rys. 19. Charakterystyka częstotliwościowa

#### 4.3.2. Pytania sprawdzające

Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczenia.

1. Jakie są podstawowe parametry scalonego wzmacniacza mocy, podaj ich definicje?
2. W której części charakterystyki przejściowej powinien pracować wzmacniacz?
3. Jaki kształt ma charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza mocy?
4. Jakie parametry można odczytać z charakterystyki częstotliwościowej?
5. Na czym polega główny problem w projektowaniu scalonych wzmacniaczy mocy?
6. Jakiej klasy wzmacniacze stosuje się jako wyjściowe stopnie wzmacniaczy mocy?
7. Jakie wielkości określają wzmocnienie mocy?
8. Jak obliczyć impedancję wejściową i wyjściową?
9. Jakie rodzaje zniekształceń powstają we wzmacniaczu?



### 4.3.3. Ćwiczenia

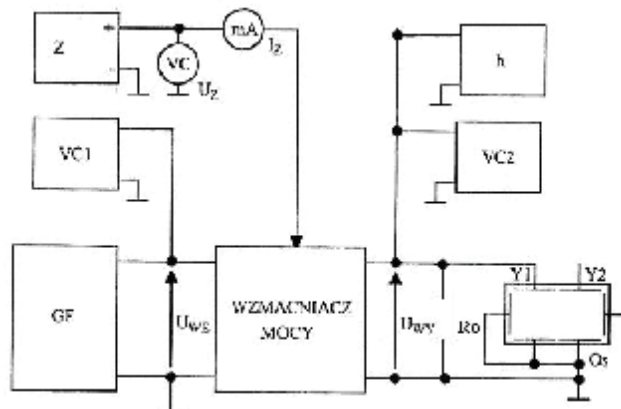
#### Ćwiczenie 1

Pomiar charakterystyki przejściowej wzmacniacza mocy.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zmontować układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem,
- 2) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
- 3) ustalić rezystancję obciążenia  $R_O = 1k\Omega$ ,
- 4) wyznaczyć charakterystykę przejściową, zmieniając  $U_{WE}$  w granicach od 0 do takiej wartości która nie uszkodzi wzmacniacza mierząc napięcie wejściowe  $U_{WE}$  i wyjściowe  $U_{WY}$ ,
- 5) wyznaczyć na podstawie pomiarów charakterystykę  $U_{WY} = f(U_{WE})$ ,
- 6) porównać otrzymane wyniki z teoretycznymi (p 4.3.1) i ocenić efekty swojej pracy,
- 7) dokonać oceny ćwiczenia.



Układ pomiarowy scalonego wzmacniacza mocy

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe scalonego wzmacniacza mocy,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- zasilacz stabilizowany,
- elektroniczne przyrządy uniwersalne,
- literatura z rozdziału 6.

#### Ćwiczenie 2

Pomiar wybranych parametrów i charakterystyk wzmacniacza mocy.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zmontować układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem w ćwiczeniu 1,
- 2) przyjąć częstotliwość sygnału wejściowego  $f = 1kHz$ , a maksymalne  $U_{WE}$  dobrać tak, aby kształt przebiegu wyjściowego nie był zniekształcony,
- 3) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
- 4) przyłączyć do wyjścia wzmacniacza opornik suwakowy lub dekadowy dużej mocy,

- 5) obliczyć moc pobraną z zasilania, moc dostarczoną do obciążenia i sprawność dla różnych wartości obciążenia  $R_O$  korzystając z zależności:

$$\eta = \frac{P_{WY}}{P_{ZAS}} \cdot 100 [\%], \quad P_{WY} = U_{WY}^2 / R_O [W], \quad P_{ZAS} = I_{ZAS} \cdot U_{ZAS} [W]$$

- 6) wyznaczyć charakterystykę dopasowania energetycznego odbiornika do impedancji wyjściowej wzmacniacza:  $P_{WY} = f(R_O)$
- 7) wyznaczyć charakterystykę współczynnika zawartości harmoniczych w funkcji napięcia wejściowego za pomocą miernika zniekształceń:  $h = f(U_{WE})$
- 8) przyjąć częstotliwość sygnału sterującego  $f = 1\text{kHz}$ , a maksymalne  $U_{WE}$  dobrać tak, aby kształt przebiegu wyjściowego nie był zniekształcony,
- 9) wyznaczyć charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową ( $K_U = f(f)$ ), zmieniając częstotliwość generatora w zakresie od 10 Hz do 100 kHz skokami według skali logarytmicznej: 10Hz, 20Hz, 50Hz, 100Hz itd mierząc napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  gdy  $U_{WE} = \text{const}$ ,
- 10) wyznaczyć na wykresach dwie wartości częstotliwości granicznych: dolną i górną oraz pasmo przenoszenia,
- 11) porównać wyniki otrzymane i dokonać oceny poprawności wyników na podstawie materiału nauczania pkt 4.3.1,
- 12) dokonać oceny ćwiczenia.

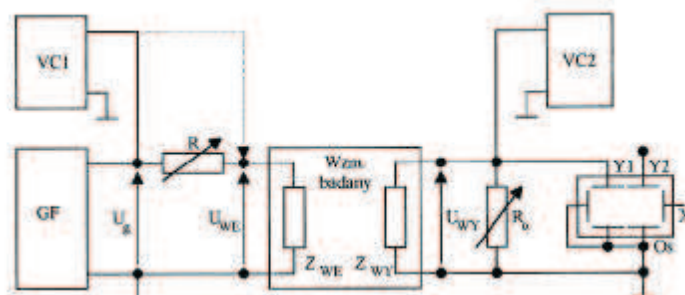
Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe scalonego wzmacniacza mocy,
- elektroniczne przyrządy uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- miernik zniekształceń,
- rezystory regulowane,
- literatura z rozdziału 6.

### Ćwiczenie 3

Pomiar impedancji wejściowej i wyjściowej ( $Z_{WE}$ ,  $Z_{WY}$ ) wzmacniacza mocy

**Pomiar impedancji wejściowej  $Z_{WE}$**



Schemat blokowy układu do wyznaczenia impedancji wejściowej i wyjściowej

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zmontować układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem,
- 2) ustalić wskazaną przez prowadzącego ćwiczenie rezystancję obciążenia  $R_0$ , np.:  $1\text{k}\Omega$ ,

- 3) przyjąć częstotliwość sygnału sterującego  $f=1\text{kHz}$ , a amplitudę  $U_{WE}$  dobrać tak, aby kształt przebiegu wyjściowego nie był zniekształcony,
  - 4) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
  - 5) zmierzyć napięcie wyjściowe dla rezystancji  $R = 0$ ,
  - 6) zwiększać rezystancję  $R$  ( $R_{\text{max}}=100\text{ k}\Omega$ ) obserwować napięcie na wyjściu i ustawić je tak, aby zmalało o połowę,
  - 7) wyłączyć napięcie zasilania wzmacniacza i odłączyć rezystancję  $R$  od obwodu,
  - 8) zmierzyć rezystancję  $R$ , która odpowiada impedancji wejściowej. ( $Z_{WE}=R$ ),
- UWAGA! Jeśli mimo maksymalnej rezystancji  $R$  nie udało się zmniejszyć napięcia wyjściowego o połowę możemy skorzystać z wzoru:

$$Z_{WE} = \frac{U_{WE}'}{U_{WE} - U_{WE}'} \cdot R \quad [\Omega]$$

gdzie:

$U_{WE}$  – napięcie wejściowe dla  $R=0$

$U_{WE}'$  – napięcie wejściowe dla  $R = R_{\text{max}}$

- 9) porównać otrzymane wyniki z teoretycznymi i ocenić efekty swojej pracy,

### **Pomiar impedancji wyjściowej $Z_{WY}$**

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) zmontować układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem,
  - 2) ustalić rezystancję  $R=0$  i odłączyć rezystancję  $R_O$ ,
  - 3) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
  - 4) zmierzyć napięcie wyjściowe,
  - 5) ustawić  $R_O$  na maksymalną i włączyć do układu zgodnie ze schematem,
  - 6) zmniejszać rezystancję  $R_O$  do wartości minimalnej  $1\text{ k}\Omega$  obserwować napięcie na wyjściu i ustawić je tak, aby zmalało o połowę,
  - 7) wyłączyć napięcie zasilania wzmacniacza i odłączyć rezystancję  $R_O$  od obwodu,
  - 8) zmierzyć rezystancję  $R_O$ , która odpowiada impedancji wyjściowej ( $Z_{WY}=R_O$ ),
- UWAGA! Jeśli mimo minimalnej rezystancji  $R_O$  nie udało się zmniejszyć napięcia wyjściowego o połowę możemy skorzystać z wzoru:

$$Z_{WY} = \frac{U_{WY} - U_{WY}'}{U_{WY}'} \cdot R_O \quad [\Omega]$$

gdzie:

$U_{WY}'$  – napięcie wyjściowe dla  $R_O$  włączonego

$U_{WY}$  – napięcie wyjściowe dla  $R_O$  wyłączzonego

$R_O$  – rezystancja, dla której zmierzono  $U_{WY}'$

- 9) porównać otrzymane wyniki z teoretycznymi i ocenić efekty swojej pracy,
- 10) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe scalonego wzmacniacza mocy,
- elektroniczne przyrządy uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,

- opornice dekadowe,
- literatura z rozdziału 6.

#### 4.3.4. Sprawdzian postępów

	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
<b>Czy potrafisz:</b>		
1) wymienić podstawowe parametry scalonego wzmacniacza mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zmierzyć wzmocnienie napięciowe wzmacniacza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) odczytać parametry z charakterystyki częstotliwościowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) wyznaczyć pasmo przenoszenia wzmacniacza na podstawie pomiarów?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) zmierzyć impedancję wejściową i wyjściową?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) określić jaka powinna być impedancja wejściowa i wyjściowa dla wzmacniacza idealnego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) wykorzystać zdobyte wiadomości w pomiarach rzeczywistego wzmacniacza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) wymienić podstawowe parametry wzmacniacza mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) wyjaśnić pojęcie dopasowania energetycznego wyjścia wzmacniacza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10) podać kilka przykładów zastosowań wzmacniaczy mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11) podać definicje napięcia przesterowania i umieć go ocenić na podstawie przebiegu czasowego na oscyloskopie?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12) określić rodzaje zniekształceń we wzmacniaczu mocy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13) zmierzyć charakterystykę przejściową wzmacniacza?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 4.4. Scalone wzmacniacze selektywne i szerokopasmowe

### 4.4.1. Materiał nauczania

#### Wzmacniacz selektywny

Wzmacniaczem selektywnym nazywa się wzmacniacz wzmacniający tylko sygnały w wąskim paśmie częstotliwości wokół pewnej częstotliwości zwanej środkową  $f_0$ . Wzmacniacz ten tłumi wszystkie inne sygnały o częstotliwościach leżących poza tym przedziałem. Idealną charakterystyką amplitudowo – częstotliwościową takiego wzmacniacza jest prostokąt przedstawiony linią przerywaną na rys. 20. Takiej charakterystyki nie daje się uzyskać w praktyce. Praktycznie osiąga się charakterystykę zaznaczoną pogrubioną linią ciągłą. Głównymi parametrami roboczymi określającymi właściwości wzmacniacza selektywnego są:

- częstotliwość środkowa  $f_0$ ,
- pasmo przenoszenia  $\Delta f$ ,
- współczynnik prostokątności określający stromość zboczy charakterystyki amplitudowej

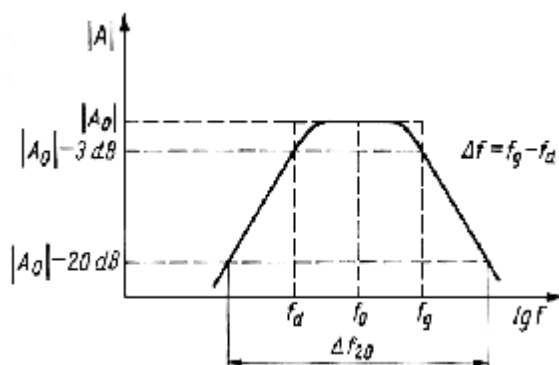
$$p = \frac{\Delta f_{3dB}}{\Delta f_{20dB}} \quad [-]$$

gdzie:

$\Delta f_{3dB}$  - pasmo dla spadku wzmocnienia 3dB

$\Delta f_{20dB}$  - pasmo dla spadku wzmocnienia 20dB

Pozostałe parametry wzmacniacza definiuje się i mierzy tak samo jak dla innych wzmacniaczy.



Rys. 20. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa wzmacniacza selektywnego [8,s.283]

Wzmacniacze selektywne stosuje się w:

- urządzeniach telekomunikacyjnych,
- urządzeniach radiowych i telewizyjnych,
- w technice pomiarowej.

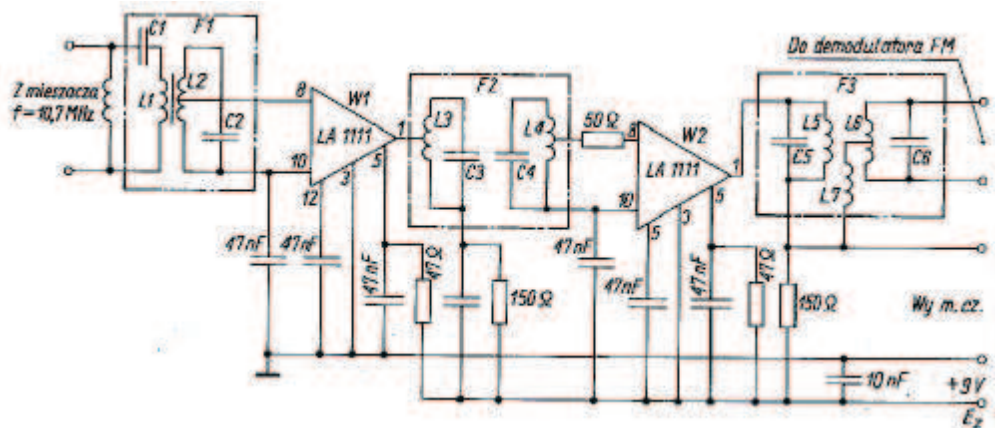
Klasyfikację wzmacniaczy selektywnych można przeprowadzić ze względu na rodzaj zastosowanych elementów:

- wzmacniacze bezindukcyjne zwane filtrami aktywnymi RC. Są to wzmacniacze, w których w sprzężeniu zwrotnym zastosowano filtr pasmowo – przepustowy RC (np. podwójne T),
- wzmacniacze z obwodami LC. Kolejne dwa stopnie wzmacniające sprzęga się rozbudowanymi filtrami LC o dużej stromości zboczy,

- wzmacniacze z filtrami piezoceramicznymi lub rezonatorami kwarcowymi. Wzmacniacze te charakteryzują się dużym współczynnikiem prostokątności,
- wzmacniacze z falą powierzchniową - najnowsze rozwiązanie wzmacniaczy selektywnych o dobrej powtarzalności parametrów, które umożliwia łatwe kształtowanie charakterystyki i relatywnie niskiej cenie.

W wielu rozwiązaniach stosuje się układy scalone, do których jako elementy zewnętrzne dołącza się wymienione wcześniej filtry czy elementy. Układy te to wzmacniacze szerokopasmowe charakteryzujące się bardzo małym oddziaływaniem sprzężenia zwrotnego. Podstawowe stopnie wzmacniające są budowane z dwu tranzystorów w konfiguracjach OE-OE, OE-OB. (kaskoda), lub OC-OB (wzmacniacz różnicowy). Produkuje się wiele takich wzmacniaczy, których przykładem są układy: UL1201, UL1202, UL1211, UL 1221, UL 1231, UL 1241.

Układ UL1201 to dwustopniowy wzmacniacz wykorzystywany w odbiorniku jako wzmacniacz częstotliwości pośredniej (10,7 MHz) toru FM (rys. 21). Fragmenty obwodu oznaczone jako F1, F2, F3 to obwody rezonansowe LC pracujące jako filtry. Dla toru AM częstotliwość pośrednia wynosi 465 kHz. W odbiornikach radiolokacyjnych wzmacniacze te pracują na częstotliwościach 30 MHz, 60 MHz, 300MHz, i 500 MHz, a w odbiornikach telekomunikacyjnych od kilkuset kiloherców do kilku gigaherców. [1]



Rys. 21. Schemat ideowy wzmacniacza selektywnego pośredniej częstotliwości LA1111 (UL1201) [1, s.238]

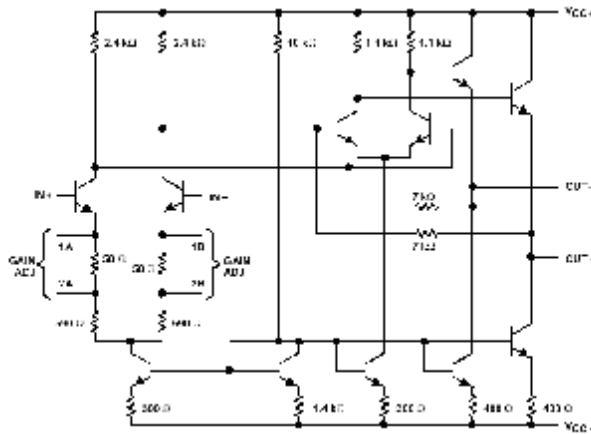
### Wzmacniacz szerokopasmowy

Wzmacniacze te służą do wzmacniania sygnałów o szerokim widmie częstotliwości. Stosuje się je głównie jako:

- wzmacniacze teletransmisyjne,
- wzmacniacze odbiorników TV,
- wzmacniacze urządzeń radarowych.

We wzmacniaczach szerokopasmowych dąży się do uzyskania jak najmniejszej dolnej częstotliwości granicznej i jak największej górnej częstotliwości granicznej. Wzmacniacz szerokopasmowy opisuje się za pomocą tych samych parametrów co zwykły wzmacniacz pasmowy. Scalone wzmacniacze szerokopasmowe to dwutranzystorowe wzmacniacze pracujące w konfiguracji OC-OB lub OE-OC o sprzężeniu bezpośrednim charakteryzujące się dobrymi właściwościami w zakresie wysokich częstotliwości. Przykładem wzmacniaczy szerokopasmowych są układy  $\mu A$  733 z pasmem 200MHz, MAX4158 z pasmem 350MHz MAX4258 (250MHz), LT6550 (110MHz), AD8072 (100MHz), OPA 2355 (450MHz). Pasma podane w nawiasach podano dla wzmocnienia równego 1 i zawężają się one nawet kilkukrotnie jeśli chcemy uzyskać duże wzmocnienie. Do sygnałów o bardzo dużej częstotliwości stosuje się wzmacniacze prądowe Gilberta.





Rys. 22. Schemat scalonego wzmacniacza  $\mu A$  733 [11]

#### 4.4.2. Pytania sprawdzające

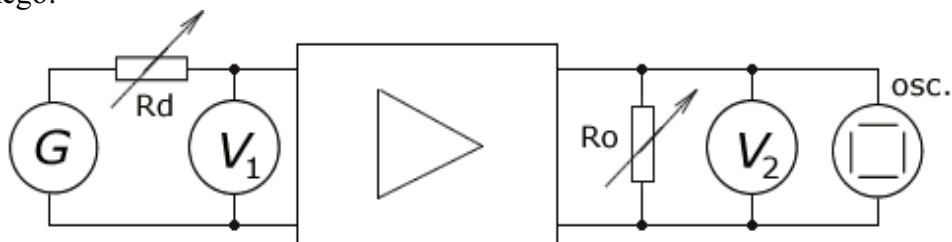
Odpowiadając na pytania, sprawdzisz, czy jesteś przygotowany do wykonania ćwiczeń.

1. Jakimi właściwościami charakteryzuje się wzmacniacz selektywny?
2. Które elementy wpływają na pasmo przenoszenia wzmacniacza selektywnego?
3. Co określa współczynnik prostokątności wzmacniacza selektywnego?
4. Gdzie stosuje się wzmacniacze selektywne?
5. Jakimi właściwościami charakteryzuje się wzmacniacz szerokopasmowy?
6. Gdzie stosuje się wzmacniacze szerokopasmowe?
7. Czy zwiększenie wzmocnienia wzmacniacza szerokopasmowego zwiększa, czy zawęża pasmo przenoszenia?

#### 4.4.3. Ćwiczenia

##### Ćwiczenie 1

Pomiar charakterystyki amplitudowej scalonego wzmacniacza szerokopasmowego i selektywnego.



Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej, impedancji wejściowej i wyjściowej [14]

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie powinieneś:

- 1) przygotować stanowisko pracy do wykonania ćwiczenia i zmontować układ zgodnie z rysunkiem dla  $R_d=0$  i  $R_o=\infty$ ,
- 2) jako wzmacniacz wykorzystać wzmacniacz szerokopasmowy o wzmocnieniu  $K_U=2$ ,

- 3) przygotować wykaz przyrządów i sprzętu pomiarowego,
- 4) przyłączyć na wejście i wyjście oscyloskop dwustrumieniowy,
- 5) przyłączyć na wejście układu generator funkcyjny,
- 6) przyjąć częstotliwość sygnału sterującego  $f = 1\text{kHz}$ , a maksymalne  $U_{WE}$  dobrać tak, aby kształt przebiegu wyjściowego nie był zniekształcony,
- 7) przygotować tabele do notowania wyników pomiarów,
- 8) wyznaczyć charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową wzmacniacza szerokopasmowego, zmieniając częstotliwość generatora w zakresie od 10 Hz do 100 MHz mierząc napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  gdy  $U_{WE} = \text{const}$ ,
- 9) powtórzyć poprzedni punkt dla  $K_U = 5, 10$ ,
- 10) wyznaczyć na podstawie pomiarów charakterystykę  $K_U = f(f)$  za pomocą programu komputerowego „Excel” (na jednym układzie współrzędnych wszystkie charakterystyki),
- 11) wyznaczyć na charakterystyce częstotliwość graniczną, dla której wzmacnienie zmniejsza się do wartości  $\frac{K_{U_{\max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 K_{U_{\max}}$  oraz pasmo przenoszenia,
- 12) wyznaczyć charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową wzmacniacza selektywnego, dobierając zakres badanych częstotliwości w zależności od parametrów (pasma przenoszenia i częstotliwości środkowej) mierząc napięcie wyjściowe  $U_{WY}$  gdy  $U_{WE} = \text{const}$ ,
- 13) wyznaczyć na podstawie pomiarów charakterystykę  $K_U = f(f)$  za pomocą programu komputerowego „Excel”,
- 14) wyznaczyć na charakterystyce częstotliwość graniczną, dla której wzmacnienie zmniejsza się do wartości  $\frac{K_{U_{\max}}}{\sqrt{2}} = 0,707 K_{U_{\max}}$  oraz pasmo przenoszenia,
- 15) porównać wyniki otrzymane i dokonać oceny poprawności wyników na podstawie materiału nauczania pkt 4.4.1,
- 16) zaprezentować wyniki z wykonanego ćwiczenia,
- 17) dokonać oceny ćwiczenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- stanowisko pomiarowe szerokopasmowego wzmacniacza scalonego,
- stanowisko pomiarowe selektywnego wzmacniacza scalonego,
- elektroniczne przyrządy uniwersalne,
- zasilacze stabilizowane,
- generator funkcyjny,
- oscyloskop z sondami pomiarowymi,
- stanowisko komputerowe z programem „Excel”
- literatura z rozdziału 6.

#### 4.4.4. Sprawdzian postępów

<b>Czy potrafisz:</b>	<b>Tak</b>	<b>Nie</b>
1) zorganizować stanowisko do wykonania ćwiczeń?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2) zaprojektować układy pomiarowe i sposób pomiaru wzmocnienia i charakterystyki amplitudowej wzmacniaczy?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3) zmontować wszystkie układy pomiarowy dla charakterystyki amplitudowej?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4) obliczyć współczynnik prostokątności dla znanej charakterystyki?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5) określić jak zmienia się pasmo dla większych wzmocnień we wzmacniaczu szerokopasmowym?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6) wyszukać w internecie noty katalogowe wzmacniaczy podanych w materiale nauczania, a następnie w notach znaleźć szerokość pasma dla wzmocnienia $> 1$ ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7) narysować charakterystykę amplitudową wzmacniacza za pomocą programu Excel?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8) wyznaczyć praktycznie częstotliwość środkową wzmacniacza selektywnego?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9) znaleźć w katalogu wymienione w materiale nauczania wzmacniacze selektywne i szerokopasmowe?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 6. LITERATURA

1. Chwaleba A. , Moeschke B., Płoszajski G. : Elektronika. WSiP, Warszawa 1996,
2. Horowitz P., Hill W. : Sztuka elektroniki WKiŁ 1999,
3. Kulka Z., Nadachowski M. : Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowanie cz.2 realizacje praktyczne. Warszawa, WNT 1982,
4. Nadachowski N., Kulka Z. : Analogowe układy scalone. Warszawa, WKiŁ 1979,
5. Pióro B., Pióro M. : Podstawy elektroniki WSiP, Warszawa 1997,
6. Rusek A. : Podstawy elektroniki WSiP, Warszawa 1981,
7. Rusek M., Ćwirko R., Marciniak W. : Przewodnik po elektronice. Warszawa, WNT 1986,
8. Rusek M., Pasiebiński J. : Elementy i układy elektroniczne. WNT, Warszawa 1999,
9. Sońta S., Kotlewski H. : Układy scalone liniowe i ich zastosowanie. Warszawa, WNT 1977,
10. [www.ag.ia.agh.edu.pl](http://www.ag.ia.agh.edu.pl),
11. [www.elenota.pl](http://www.elenota.pl),
12. [www.eti.pg.gda.pl](http://www.eti.pg.gda.pl),
13. [www.matel.p.lodz.pl](http://www.matel.p.lodz.pl),
14. [www.zse.bydgoszcz.pl](http://www.zse.bydgoszcz.pl),