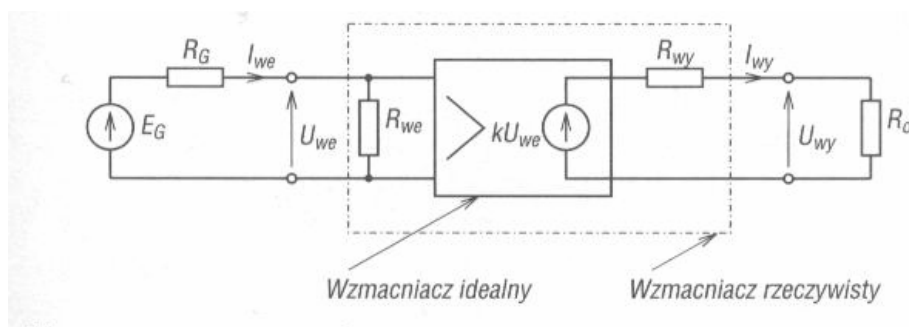


## 4.7. Wzmacniacze elektroniczne

### 4.7.1. Materiał nauczania

#### Podstawowe właściwości i parametry wzmacniaczy

Podstawową funkcją wzmacniacza jest wzmocnienie sygnału, przy zachowaniu nie zmienionego jego kształtu. Wzmocnienie to odbywa się kosztem energii doprowadzonej z pomocniczego źródła napięcia stałego. W związku z tym w każdym wzmacniaczu wyróżnia się dwa zasadnicze obwody: obwód sygnału i obwód zasilania. Obwód zasilania stwarza właściwe warunki dla wzmocnienia sygnału, natomiast obwód sygnału jest związany z przenoszeniem sygnału przez wzmacniacz. Dla wzmacnianego sygnału wzmacniacz jest czwórnikiem do którego zacisków wejściowych dołączono źródło sygnału a do wyjściowych odbiornik sygnału.



Rys. 32. Schemat zastępczy wzmacniacza [6]

Do najważniejszych parametrów wzmacniacza należą:

- wzmocnienie: napięciowe  $k_U$ , prądowe  $k_I$ , mocy  $k_P$ , które są definiowane następująco:

$$k_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \qquad k_I = \frac{I_{wy}}{I_{we}} \qquad k_P = \frac{P_{wy}}{P_{we}}$$

- częstotliwości graniczne (dolna i górna) wynikające z przebiegu charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej – są to takie częstotliwości sygnału wejściowego, dla których wzmocnienie napięciowe maleje względem wzmocnienia maksymalnego o 3 dB (czyli do poziomu 0,707 swej wartości maksymalnej), a wzmocnienie mocy maleje do połowy,
- zniekształcenia nieliniowe określające zniekształcenia kształtu sygnału wyjściowego w stosunku do wejściowego wyrażone w %,
- rezystancja wejściowa  $R_{we}$  – jest to rezystancja „widziana” z zacisków wejściowych układu, przy rozwartym wyjściu, tzn. 
$$R_{we} = \frac{U_{we}}{I_{we}} \quad \text{przy } R_o = \infty,$$
- rezystancja wyjściowa  $R_{wy}$  – jest to rezystancja „widziana” z zacisków wyjściowych układu, przy zwartym wejściu, tzn. 
$$R_{wy} = \frac{U_{wy}}{I_{wy}} \quad \text{przy } U_{we} = 0.$$

Ze względu na rodzaj wzmocnienia danego wzmacniacza rozróżniamy: wzmacniacze napięciowe, prądowe i wzmacniacze mocy.

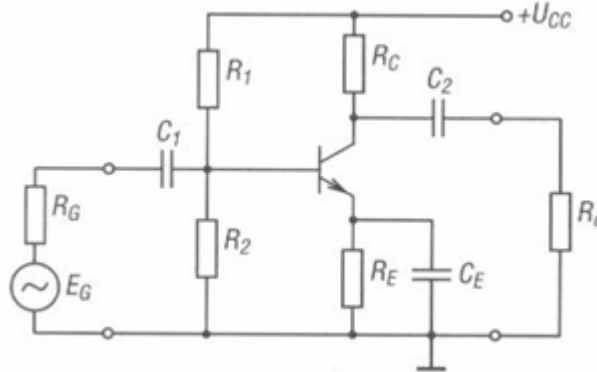
Ze względu na zakres częstotliwości wzmacnianego sygnału rozróżniamy: wzmacniacze prądu stałego, małej i wielkiej częstotliwości, szerokopasmowe oraz selektywne.

Ze względu na konstrukcję wzmacniacze dzielimy na tranzystorowe i scalone (w tym operacyjne).

### Tranzystorowe wzmacniacze napięciowe małej częstotliwości

Wybór układu pracy tranzystora jest zależny od przeznaczenia i rodzaju zastosowanego tranzystora, co zostało opisane w punkcie 4.4.1.

Na poniższym rysunku pokazano schemat wzmacniacza pracującego w konfiguracji OE z potencjometrycznym układem zasilania z emiterowym sprzężeniem zwrotnym dla składowej stałej.

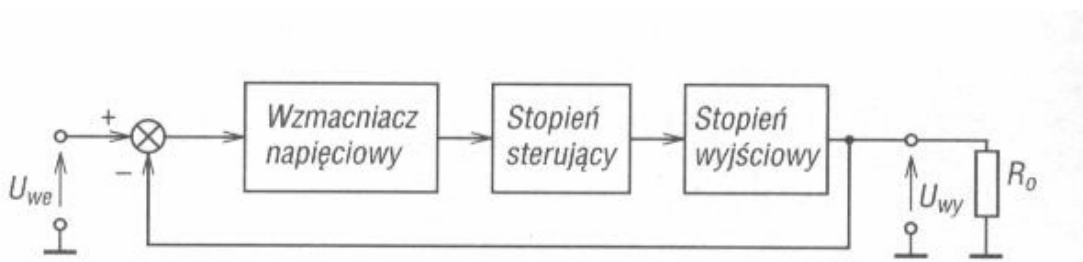


Rys. 33. Wzmacniacz małych częstotliwości – schemat idealowy [6]

Rezystory  $R_1$  i  $R_2$  polaryzują bazę tranzystora ustalając prąd bazy oraz zapewniają jego pracę w zakresie aktywnym. Rezystor  $R_E$  jest elementem sprzężenia zwrotnego, a rezystor  $R_C$  jest obciążeniem kolektorowym wzmacniacza. Kondensatory  $C_1$  i  $C_2$  oddzielają składowe stałe napięcia generatora i obciążenia od napięć stałych wzmacniacza.

### Budowa i parametry wzmacniacza mocy

Na poniższym rysunku przedstawiono schemat funkcjonalny wzmacniacza mocy. Sygnał wejściowy jest podawany na wejście wzmacniacza napięciowego, z którego poprzez stopień sterujący jest doprowadzany do stopnia wyjściowego. Następnie jest on podawany na obciążenie  $R_o$  (najczęściej głośnik) oraz poprzez pętlę sprzężenia zwrotnego na wejście wzmacniacza napięciowego.



Rys. 34. Schemat funkcjonalny wzmacniacza mocy [6]

Dzięki sprzężeniu zwrotnemu uzyskuje się stabilizację punktów pracy tranzystorów oraz linearyzację charakterystyki amplitudowej wzmacniacza, a co za tym idzie minimalizację zniekształceń nieliniowych.

Zadaniem stopnia sterującego jest doprowadzenie do stopnia wyjściowego sygnału o odpowiednich poziomach napięcia i prądu niezbędnego do jego prawidłowej pracy. Stopień wyjściowy może być sterowany ze źródła napięciowego, jak również ze źródła prądowego.

Przy sterowaniu napięciowym zniekształcenia wprowadzane przez stopień wyjściowy są nieznaczne, a różnice wzmocnienia prądowego  $\beta$  tranzystorów mało istotne.

Do podstawowych parametrów wzmacniaczy mocy należą:

- wzmocnienie mocy  $k_p$ ,
- moc wyjściowa  $P_{wy}$  (przy określonym poziomie sygnału wejściowego), mierzona w watach,
- współczynnik sprawności energetycznej  $\eta$ , podawany w %,
- współczynnik zawartości harmoniczných, podawany w %,
- pasmo  $B$  przenoszonych częstotliwości podawane w kHz.

### **Klasy pracy wzmacniaczy mocy**

Zależnie od położenia punktu pracy tranzystorów wzmacniacze dzieli się na klasy: A, AB, B i C. Podział ten jest związany wyłącznie ze sposobem wzmacniania sygnału w pojedynczym stopniu wyjściowym, ponieważ stopnie wstępne zwykle pracują w klasie A.

Najczęściej jako stopnie końcowe stosuje się wzmacniacze klasy AB i B, a wzmacniacze klasy A używa się w sprzęcie profesjonalnym.

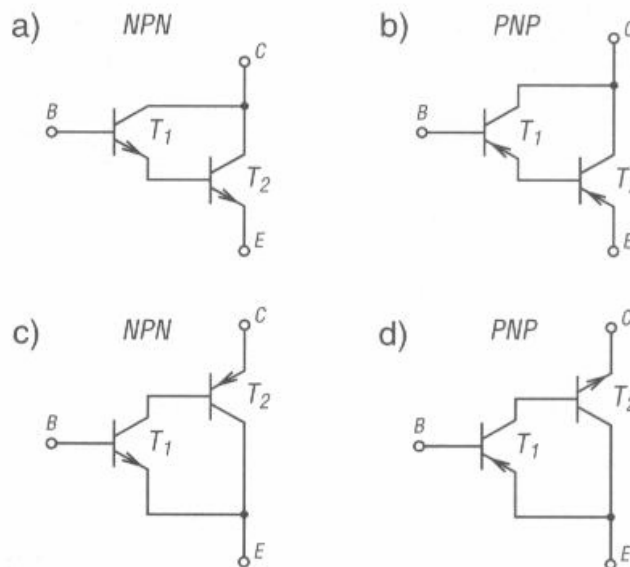
Jeżeli sygnał wejściowy podawany na dany stopień wzmacniający powoduje, że przez element aktywny tego wzmacniacza płynie prąd przez:

- cały okres  $T$  sygnału sterującego, to wzmacniacz jest klasy A (sprawność 50%),
- połowę okresu  $T$  sygnału sterującego, to wzmacniacz jest klasy B (sprawność 78,5%),
- czas mniejszy od  $T$ , ale większy od  $T/2$  sygnału sterującego, to wzmacniacz jest klasy AB (sprawność od 50% do 70%),
- czas krótszy od  $T/2$  sygnału sterującego, to wzmacniacz jest klasy C (nie ma zastosowania we wzmacnianiu sygnałów akustycznych, ze względu na bardzo duże zniekształcenia nieliniowe).

### **Stopnie wyjściowe wzmacniaczy mocy**

Stopnie wyjściowe wzmacniaczy mocy zazwyczaj są bardziej rozbudowane, ponieważ muszą wydzielić w obciążeniu pożądaną moc. W układach większej mocy wyraźnie wznoszą prądy wyjściowe wzmacniacza, a więc i prądy sterujące tranzystory końcowe. W celu zapobieżenia przeciążenia stopnia końcowego dużym prądem stosuje się w stopniach wyjściowych tranzystory złożone pracujące w układzie Darlingtona, co pokazano na rys. 35.

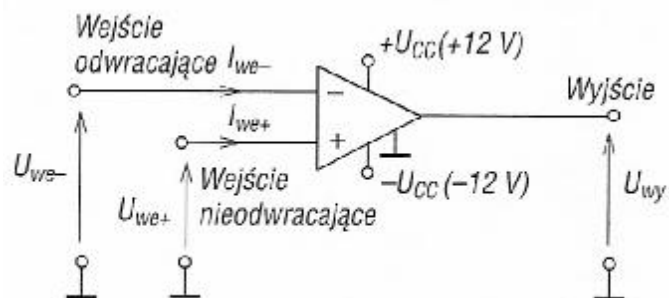
Tranzystory złożone charakteryzują się bardzo dużym wzmocnieniem prądowym  $\beta$  będącym iloczynem wzmocnień tranzystorów składowych.



**Rys. 35.** Schematy podstawowych układów połączeń tranzystorów (układów Darlingtona) stosowanych w stopniach mocy: a) i c) odpowiedniki tranzystorów NPN; b) i d) odpowiedniki tranzystorów PNP [6]

### Wzmacniacze operacyjne

Wzmacniacze operacyjne stanowią największą grupę analogowych układów scalonych. Symbol graficzny wzmacniacza i jego sposób działania pokazano na rys. 36



**Rys. 36.** Wzmacniacz operacyjny - symbol ogólny [2]

Model idealnego wzmacniacza operacyjnego charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- bardzo duże wzmocnienie napięciowe różnicowe dla prądu stałego i zmiennego,
- odwracaniem fazy sygnału wyjściowego w stosunku do sygnału wejściowego odwracającego podawanego na wejście oznaczone znakiem „-” oraz zachowaniem zgodności faz w stosunku do sygnału wejściowego nieodwracającego podawanego na wejście oznaczone znakiem „+”
- bardzo dużą rezystancją wejściową i bardzo małą rezystancją wyjściową,
- bardzo dużą częstotliwością graniczną i szybkością zmian napięcia wyjściowego.

Dla rzeczywistych wzmacniaczy operacyjnych definiuje się parametry, których wartości odbiegają od idealnych lub określają pewne wady wzmacniaczy rzeczywistych. Do tych parametrów zaliczamy:

- wzmacnienie napięciowe przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego  $K_{Ur}$ , które definiujemy jako stosunek przyrostu napięcia wyjściowego do wywołującego ten przyrost napięcia wejściowego różnicowego. Wzmacnienie to nazywane jest również wzmacnieniem napięciowym sygnału różnicowego i w praktyce wynosi ok.  $10^6$  V/V. Należy pamiętać, że w przypadku wzmacniacza operacyjnego objętego ujemnym sprzężeniem zwrotnym o wartości wzmacnienia układu (przy dużym wzmacnieniu wzmacniacza operacyjnego) decyduje układ sprzężenia zwrotnego,

$$K_{Ur} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta(U_{we+} - U_{we-})}$$

- wejściowe napięcie niezrównoważenia  $U_{I0}$ , jest to stałe napięcie różnicowe, które należy podać na wejście wzmacniacza (przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego) w celu uzyskania zerowej wartości napięcia wyjściowego. W praktyce wynosi ono kilka lub kilkanaście mV, maksimum 50 mV.
- wzmacnienie napięciowe sygnału współbieżnego  $K_{Us}$ , jest to stosunek zmiany napięcia wyjściowego pod wpływem zmian napięcia sygnału współbieżnego tzn. takiego, przy którym  $U_{we+} = U_{we-}$ . W praktyce wzmacnienie to w porównaniu ze wzmacnieniem sygnału różnicowego jest małe, a we wzmacniaczu idealnym byłoby równe zero,
- współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego  $CMRR$ , definiowany jako stosunek wartości wzmacnienia sygnału różnicowego  $K_{Ur}$  do wzmacnienia sygnału współbieżnego  $K_{Us}$ . Współczynnik ten podawany jest w dB i w praktyce wynosi od 60 do 100 dB,
- rezystancja wejściowa wzmacniacza operacyjnego (zarówno dla wejścia odwracającego jak i nieodwracającego) jest duża i wynosi od 100 kΩ do 50 MΩ, natomiast rezystancja wyjściowa jest mała i nie przekracza 300 Ω,
- zakres napięcia wejściowego jest to zakres zmian napięcia na każdym z wejść względem masy, przy którym wzmacniacz pracuje prawidłowo w zakresie liniowym,
- napięcie zasilania  $U_{CC}$  jest symetryczne i najczęściej wynosi  $\pm 15$  V,
- wejściowe prądy polaryzujące to prądy stałe wpływające do wejść wzmacniacza operacyjnego. W praktyce  $I_{we+} = I_{we-}$  i wynosi od 5 pA do 5 mA. Dobierając elementy sprzężenia zwrotnego wzmacniacza, należy pamiętać, aby prądy płynące w tych elementach były co najmniej 100 razy większe od wartości prądów polaryzujących wzmacniacza,
- częstotliwość graniczna  $f_T$  wzmacniacza operacyjnego to częstotliwość przy której jego wzmacnienie maleje do jedności. W praktyce częstotliwość ta waha się w granicach od 1 do 100 MHz i decyduje ona o paśmie przenoszenia wzmacniacza.

Ze względu na przeznaczenie wyróżnia się wzmacniacze operacyjne:

- ogólnego przeznaczenia (np. ULA6741N),
- szerokopasmowe (szybkie np.  $\mu A715$ ),
- stosowane w urządzeniach dokładnych, gdzie wymagana jest duża rezystancja wejściowa oraz bardzo mały wpływ temperatury i szumów na pracę wzmacniacza (np. LM 108,  $\mu A777$ , CA 3130),
- do zastosowań specjalnych (np. w technice kosmicznej lub biomedycznej)

Wzmacniacze operacyjne są głównie stosowane w następujących układach elektronicznych:

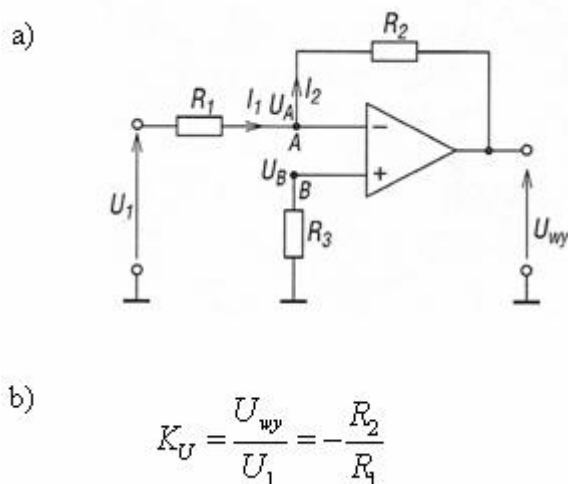
- układy analogowe, które wykonują operacje dodawania, odejmowania, mnożenia, całkowania, logarytmowania itd.,
- wzmacniacze o zadanej charakterystyce przejściowej i częstotliwościowej,
- układy filtrów aktywnych,

- generatory sygnałów np. prostokątnego, trójkątnego lub sinusoidalnego,
- detektory np. wartości szczytowej,
- układy próbkujące z pamięcią.

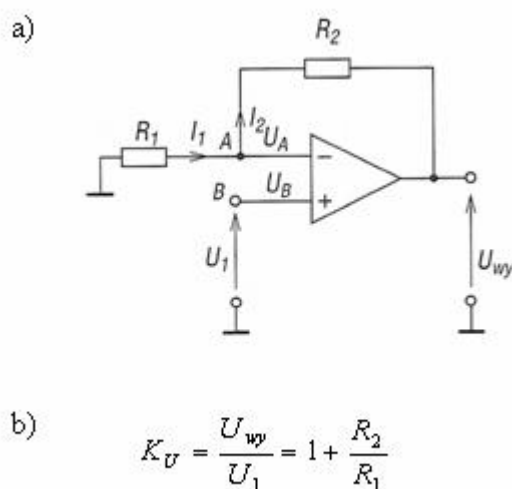
Wzmacniacz operacyjny pracujący z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego może służyć jako „przybliżony” komparator (czyli układ porównujący wartości dwóch napięć), ale obarczony wieloma wadami. Zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego we wzmacniaczu operacyjnym zmniejsza nieliniowość jego charakterystyki, umożliwia realizację układu o szerszym paśmie niż pasmo częstotliwościowe wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego. Iloczyn wzmocnienia i odpowiadającej mu górnej częstotliwości granicznej – tzw. pole wzmocnienia – jest stały i wynosi  $K_{U1}f_1 = K_{U2}f_2 = 1 \cdot f_T$

W układach ze wzmacniaczem operacyjnym objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym właściwości wzmacniacza i sprzężenia zwrotnego powodują wyrównanie napięć na obu wejściach wzmacniacza. Na tej podstawie wyznacza się wzmocnienie całego układu pracy.

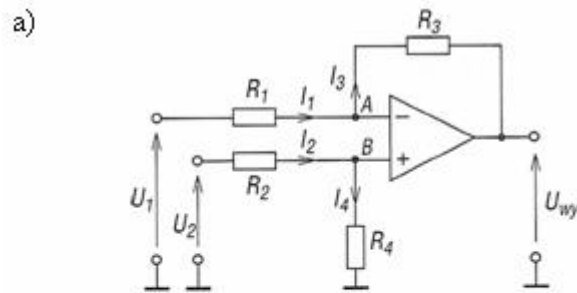
Poniżej pokazujemy podstawowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego z ujemnym sprzężeniem zwrotnym oraz odpowiadające tym układom wzmocnienia napięciowe.



**Rys. 37.** Układ wzmacniacza odwracającego: a) schemat ideowy, b) wzmocnienie napięciowe układu [2]



**Rys. 38.** Układ wzmacniacza nieodwracającego: a) schemat ideowy, b) wzmocnienie napięciowe układu [2]



b)

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

Rys. 39. Układ wzmacniacza odejmującego: a) schemat ideowy, b) wzmocnienie napięciowe układu [2]

## 4.7.2. Pytania sprawdzające

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

1. Jakie są podstawowe parametry wzmacniacza elektronicznego?
2. Jakie właściwości ma układ wzmacniacza z tranzystorem pracującym w układzie OE?
3. Z jakich bloków funkcjonalnych składa się wzmacniacz mocy?
4. Czym charakteryzuje się wzmacniacz mocy pracujący w klasie AB?
5. Czym charakteryzuje się układ Darlingtona?

## 4.7.3. Ćwiczenia

### Ćwiczenie 1

Wyznacz charakterystykę amplitudową i pasmo przenoszenia tranzystorowego wzmacniacza napięciowego pracującego w układzie OE.

Sposób wykonania ćwiczenia

Aby wykonać ćwiczenie, powinieneś:

- 1) połączyć układ pomiarowy zgodnie z instrukcją,
- 2) wybrać zakresy urządzeń pomiarowych zgodnie z instrukcją,
- 3) dobrać poziom sygnału z generatora poniżej napięcia przesterowania,
- 4) dobrać zakres częstotliwości, dla których badamy wzmacniacz,
- 5) wybrać częstotliwości pomiarowe,
- 6) wykonać pomiary,
- 7) zapisać wyniki pomiarów w opracowanej przez Ciebie tabeli,
- 8) narysować charakterystykę amplitudową wzmacniacza zgodnie ze skalą częstotliwości podaną w instrukcji,
- 9) odczytać częstotliwości graniczne wzmacniacza i wyznaczyć jego pasmo przenoszenia.

Wyposażenie stanowiska pracy:

- makieta do demonstracji działania wzmacniacza,
- instrukcja do ćwiczenia,