



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki



LABORATORIUM  
ELEMENTÓW i UKŁADÓW  
ELEKTRONICZNYCH

Opracował zespół: Marek Panek, Waldemar Oleszkiewicz, Ryszard Korbutowicz, Iwona Zborowska-Lindert, Bogdan Paszkiewicz, Małgorzata Kramkowska, Zdzisław Synowiec, Beata Ściana, Irena Zubel, Tomasz Ohly, Bogusław Boratyński

## Ćwiczenie nr 6

### Wzmacniacz tranzystorowy

#### I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

- Charakterystyki i parametry tranzystora bipolarnego,
- Układy polaryzacji tranzystora,
- Podstawowy układ wzmacniacza WE,
- Prosta pracy i wybór punktu pracy tranzystora,
- Model zastępczy i parametry  $h_{ij}$  tranzystora.
- Wzmocnienie i pasmo przenoszenia wzmacniacza,

#### II. Program zajęć

- Projekt układu polaryzacji stałoprądowej wzmacniacza m.cz. WE.
- Montaż wzmacniacza i pomiar parametrów punktu pracy.
- Pomiar wzmocnienia napięciowego w paśmie częstotliwości.

#### III. Literatura

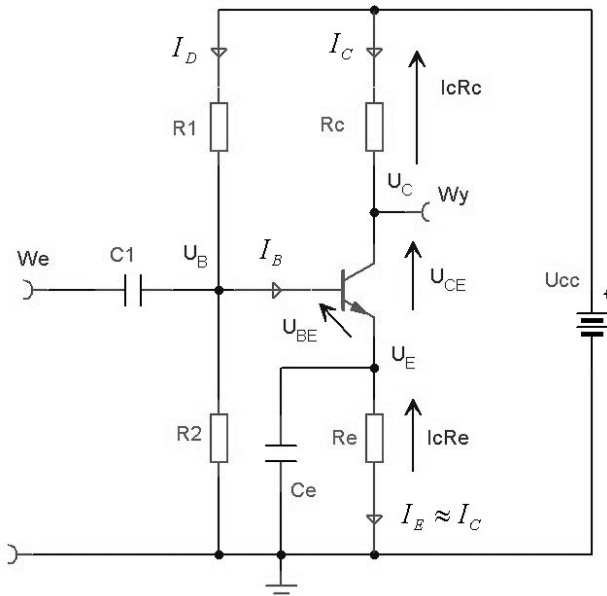
1. Notatki z WYKŁADU
2. W. Marciniak - Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
3. A. Guziński - Liniowe elektroniczne układy analogowe,

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów **BHP** związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

# 1. Wiadomości wstępne

## 1.1 Wzmacniacz napięciowy m.cz., WE

Układ wzmacniacza tranzystorowego m.cz. w układzie wspólnego emitera (WE) ze stałoprądowym sprzężeniem zwrotnym zapewniającym stabilizację punktu pracy przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys.1 Schemat układu wzmacniacza m.cz. w układzie WE.

Jest to wzmacniacz z pojemnościowym sprzężeniem sygnału (kondensator  $C_1$  łączy źródło sygnału z wejściem wzmacniacza) oraz stabilizacją punktu pracy na rezystorze  $R_e$ . Dzielnik napięciowy  $R_1/R_2$  zapewnia stałą polaryzację bazy napięciem  $U_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC}$ .

Napięcie  $U_B$  wynikające z dzielnika rezystorowego jest stałe, o ile prąd dzielnika  $I_D$  jest dużo większy od prądu bazy  $I_B$ , np.  $I_D = 10 I_B$  (wówczas można zaniedbać istniejący rozptył prądów w węzle bazy).

Ewentualne zmiany napięcia na rezystorze emiterowym  $R_e$  (np. wzrost wartości prądu  $I_E$ ) powodują zmianę (wzrost) potencjału emitera ( $U_E = I_E R_e$ ) i w efekcie zmniejszenie napięcia  $U_{BE}$ , ( $U_{BE} = U_B - I_E R_e$ ) co skutkuje powstaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego dla prądu stałego  $I_C \approx I_E$  w obwodzie wyjściowym tranzystora.

Przykładowo, jeżeli prąd emitera wzrasta (np. na skutek wzrostu temperatury) o wartość  $\Delta I_E$  to efekt ujemnego sprzężenia można zobrazować następująco:

$$\text{dla ustalonego prądu } I_B = \text{const.} \quad \Delta I_E \uparrow \rightarrow \Delta I_E \cdot R_e \uparrow \rightarrow U_E \uparrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow \Delta I_E \downarrow$$

Kondensator  $C_e$ , o małym module impedancji w stosunku do wartości rezystora  $R_e$ , powoduje praktycznie zwarcie rezystora  $R_e$  dla sygnałów zmiennych. Tak więc układ dla wzmacniania sygnałów małych częstotliwości jest układem ze wspólnym emiterem, WE (bez rezystora emiterowego). Inaczej mówiąc, dzięki kondensatorowi  $C_e$  nie istnieje sprzężenie zwrotne dla sygnałów zmiennych na rezystorze  $R_e$ .

Wzmacnianie sygnałów wygodnie jest omawiać posługując się charakterystykami wyjściowymi tranzystora, na których nanosimy prostą pracy (rys.2). Prosta pracy wynika z zadanej wartości rezystora  $R_c$ , oraz napięcia zasilania  $U_{CC}$ . Rezystor  $R_c$  nazywany jest także obciążeniem (ang. load)  $R_L$ . Zauważ, że maksymalne napięcie w układzie wzmacniacza (przy wyjętym tranzystorze) wynosi  $U_{CC}$ , a maksymalny prąd płynący w układzie (przy zwartym tranzystorze) wynosi:  $I_{MAX} = \frac{U_{CC}}{R_c + R_e}$ . Prosta łącząca te punkty w układzie współrzędnych

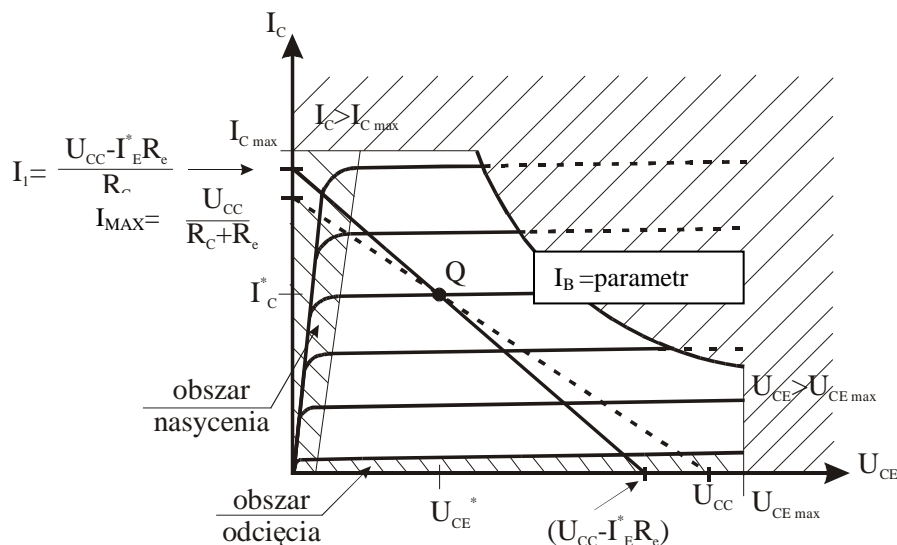
$I_C=f(U_{CE})$  to tzw. statyczna prosta pracy, czyli obliczona dla prądu stałego. Dla omawianego wzmacniacza statyczna prosta pracy (dla prądu stałego należy uwzględnić rezystor  $R_e$ ) dana jest równaniem:

$$I_C = -\frac{1}{R_c + R_e} U_{CE} + \frac{U_{CC}}{R_c + R_e}$$

Natomiast dla sygnałów zmiennych równanie dynamicznej prostej pracy wygląda następująco (nie uwzględniamy teraz rezystora  $R_e$ ):

$$I_C = -\frac{1}{R_c} U_{CE} + \frac{U_{CC} - I_E \cdot R_e}{R_c}$$

Proste pracy powinny leżeć w obszarze dopuszczalnych napięć i prądów tranzystora, tak jak to przedstawiono na rysunku 2. Prosta pracy dla prądu stałego oznaczona jest linią przerywaną, prosta pracy dla prądu zmiennego linią ciągłą. Tą ostatnią wykorzystujemy do analizy wzmocnienia układu.



Rys. 2. Charakterystyki wyjściowe z naniesionymi prostymi pracy: statyczną i dynamiczną.

Punkt pracy  $Q(I_C^*, U_{CE}^*)$  tranzystora musi znajdować się na prostej pracy w obszarze aktywnej pracy tranzystora. Jeżeli układ ma wzmacniać sygnał o dużej amplitudzie, to prąd kolektora  $I_C^*$  w punkcie pracy powinien wynosić około 1/2 prądu maksymalnego  $I_{MAX}$ , wówczas napięcie  $U_{CE}^*$  w punkcie pracy będzie wynosiło około 1/2 napięcia zasilania  $U_{CC}$ .

## 1.2 Przykład obliczania projektowanego układu wzmacniacza

- 1) Przyjmujemy napięcie zasilania  $U_{CC}$
- 2) Przyjmujemy, że spadek napięcia na rezystorze  $R_e$  powinien wynosić  $0,2 U_{CC}$ .  
*Ważność tego założenia wyjaśniono w p.8*
- 3) Wybieramy punkt pracy tak aby  $U_{CE}^* \sim I_C^* R_c$  czyli spadek napięcia na tranzystorze jest porównywalny ze spadkiem napięcia na rezystorze kolektorowym.
- 4) Zakładając, że  $I_C^* \sim I_E^*$  dla  $h_{21e} > 50$  (dla wygody zakładamy  $h_{21e} = 100$ ) obliczamy wartość prądu w obwodzie wyjściowym tranzystora:

$$I_C^* = \frac{0,2 \cdot U_{CC}}{R_e}$$

Natomiast jeśli mamy zaprojektować wzmacniacz dla zadanego prądu  $I_C^*$ , możemy obliczyć wartość  $R_e$

$$R_e = \frac{0,2 \cdot U_{CC}}{I_C^*}$$

- 5) Dobieramy wartość obciążenia  $R_c$  z równania prostej pracy:

$$I_C^* = \frac{1}{2} \frac{U_{CC} - I_C^* R_e}{R_c} \quad (2.1)$$

obliczamy 
$$R_c = \frac{1}{2} \frac{U_{CC} - I_C^* R_e}{I_C^*} \quad (2.2)$$

Jeżeli wartość rezystora obciążenia  $R_c$  jest dana, to sprawdzamy czy spełniony jest warunek:  $U_{CE}^* \approx I_C^* R_c$

- 6) Obliczamy prąd bazy  $I_B^*$  w punkcie pracy.

Zakładamy wartość  $h_{21e}$  zgodną z odczytaną w katalogu dla danego tranzystora.

Możemy zmierzyć wartość parametru  $h_{21e}$  (a także  $h_{11e}$ ) w założonym punkcie pracy, za pomocą dostępnego w laboratorium miernika parametrów  $h$ .

Prąd bazy w punkcie pracy:

$$I_B^* = \frac{I_C^*}{h_{21e}} \quad (2.3)$$

- 7) Obliczymy wartości rezystorów dzielnika napięcia,  $R_1$   $R_2$ .

Prąd dzielnika rezystorowego polaryzacji bazy powinien być większy od prądu bazy (przynajmniej 10 razy) aby chwilowa zmiana prądu bazy (na skutek zmiany amplitudy sygnału) nie wpływała silnie na zmianę prądu dzielnika, a przez to na zmianę potencjału bazy  $U_B$ :

$$I_D = \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2} \geq 10 I_B^*$$

czyli 
$$R_1 + R_2 \leq \frac{U_{CC}}{10 I_B^*} \quad (2.4)$$

Potencjał bazy w punkcie pracy wynosi

$$U_B = U_{BE} + I_E^* R_e$$

zakładając  $U_{BE} \approx 0,65 \text{ V}$  ( tranzystor krzemowy) oraz  $I_E^* \approx I_C^*$  dla  $h_{21e} \gg 1$  otrzymujemy:

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,65\text{V} + I_C^* \cdot R_e}{U_{CC}} \quad (2.5)$$

ponieważ  $U_B \ll U_{CC}$  zależność (2.5) można uprościć

dla  $R_2 \ll R_1$ ;  $R_2 + R_1 \approx R_1$

$$R_2 = \frac{0,65\text{V} + I_C^* \cdot R_e}{U_{CC}} R_1 \quad (2.6)$$

Z zależności (2.4) i (2.6) obliczamy wartości  $R_1, R_2$ .

W praktyce, jeśli dokładnie mamy dobrać położenie punktu pracy, wygodniej jest obliczyć i wpiąć rezystor  $R_1$ , a jako  $R_2$  zastosować potencjometr, który pozwoli na precyzyjne ustalenie potencjału  $U_B$  i prądu  $I_B$  dla indywidualnego tranzystora.

8) Sprawdzenie stabilności termicznej punktu pracy (dobór rezystora  $R_e$ ):

Ponieważ  $U_B = \text{const.}$  oraz  $U_{BE} + U_{Re} = U_B$

to zmiany (przyrosty):  $\Delta U_{BE} = -\Delta U_{Re} = -\Delta I_C^* R_e$

$$\Delta I_C^* = \frac{\Delta U_{BE}}{R_e} \cdot \frac{1}{I_C^*}$$

$$\frac{\Delta I_C^*}{I_C^*} = -\frac{\Delta U_{BE}}{R_e \frac{U_{Re}}{R_e}} = -\frac{\Delta U_{BE}}{U_{Re}} \quad (2.7)$$

Zakładając zmiany temperatury np. w granicach  $0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 50 \text{ K}$  otrzymujemy

$$\Delta U_{BE} = 50 \text{ K} \cdot (-2 \text{ mV/K}) = -100 \text{ mV}$$

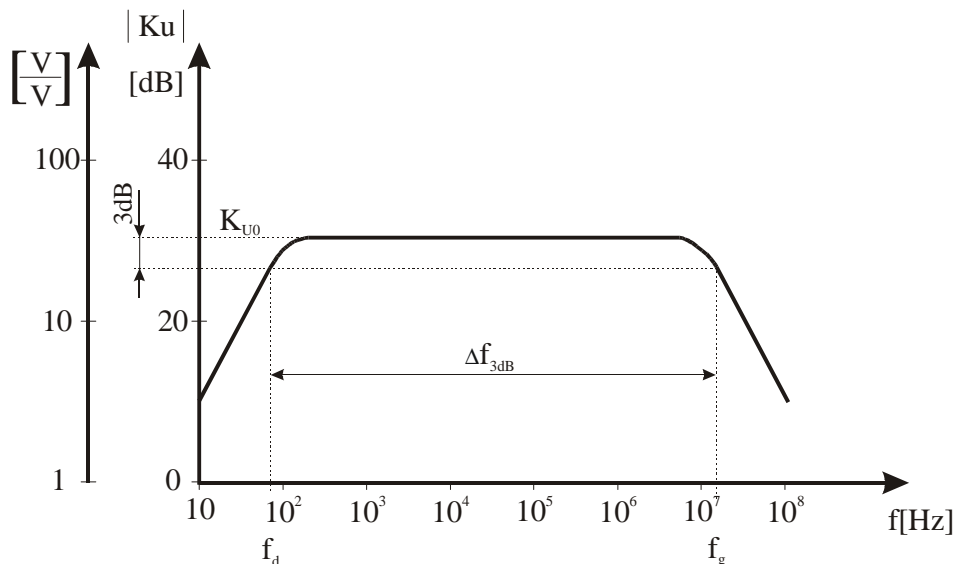
gdzie:  $-2 \text{ mV/K}$  wsp. temperaturowy napięcia na złączu p-n

$$\text{jeżeli żądamy aby } \frac{\Delta I_C^*}{I_C^*} < 0,1 \quad \text{to } U_{Re} \geq 1 \text{ V}$$

Dla  $U_{CC} = 5 \text{ V}$  stanowi to  $0,2 U_{CC}$ , dla wyższych  $U_{CC}$  odpowiednio mniej.

### 1.3 Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza

Definiuje się 3-decybelowe pasmo przenoszenia częstotliwości,  $\Delta f_{3dB}$  ograniczone częstotliwościami charakterystycznymi: dolną  $f_d$  (lub  $f_L$ ) i górną  $f_g$  (lub  $f_H$ ). W zakresie tych częstotliwości moduł wzmocnienia  $|K_u|$  zmniejsza się nie więcej niż o 3 dB od wartości ustalonej  $K_{U0}$ . Oś rzędnych wygodnie jest opisać w decybelach:  $K_u [dB] = 20 \lg K_u [V/V]$ . Jak można wyliczyć, spadek wzmocnienia o 3dB oznacza spadek bezwzględnej wartości wzmocnienia do wartości  $0,7 K_{U0}$ . Wyjaśnienie tych zależności przedstawiono na rys.3.

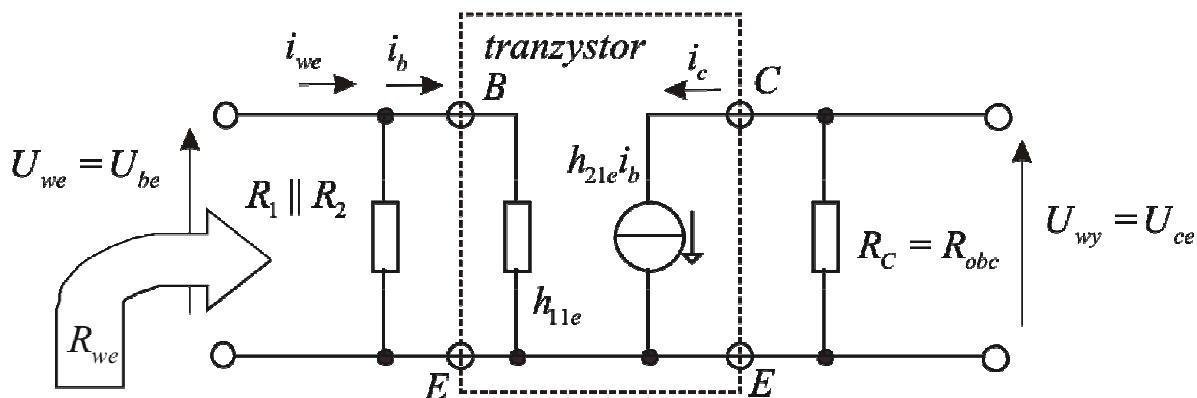


Rys.3 Typowa charakterystyka częstotliwościowa modułu wzmocnienia wzmacniacza tranzystorowego ze sprzężeniem pojemnościowym

Dla wzmacniacza z pojedynczym tranzystorem spadek wzmocnienia powinien wynosić 20dB na dekadę częstotliwości  $f$ .

### 1.4 Obliczanie wzmocnienia z analizy układu zastępczego wzmacniacza

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza dla małych sygnałów może być wyznaczone analizując, przedstawiony na rys. 4, układ wzmacniacza z dwuelementowym modelem zastępczym tranzystora typu [h], odpowiednim dla sygnałów małych częstotliwości. W tym układzie symbole  $U_{be}$ ,  $U_{ce}$ ,  $U_{we}$ ,  $U_{wy}$  oznaczają napięcia sygnałów zmiennych.



Rys.4 Schemat zastępczy układu wzmacniacza dla małych sygnałów m.cz.

Wzmocnienie napięciowe (dokładniej, moduł wzmocnienia) to iloraz amplitud sygnałów napięcia wyjściowego i wejściowego wzmacniacza:

$$K_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

Wzmocnienie napięciowe zależy wprost proporcjonalnie od wzmocnienia prądowego tranzystora:

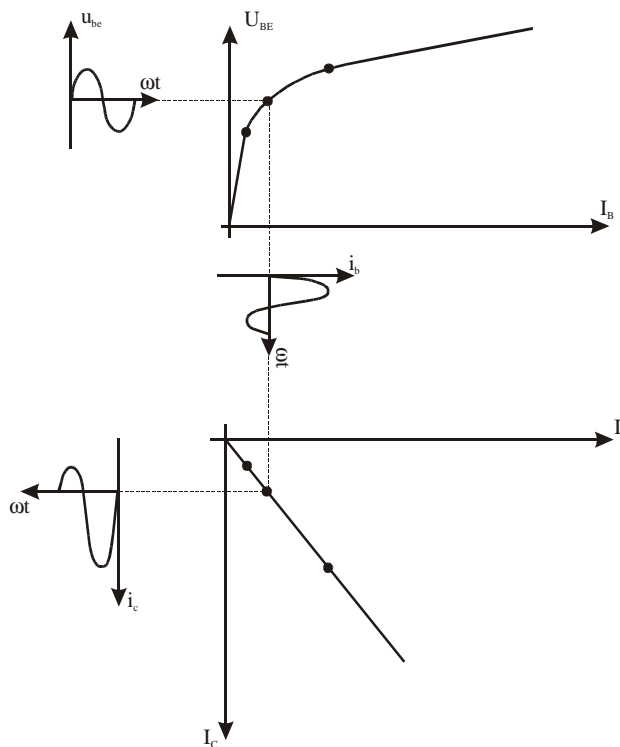
$$K_u = \frac{-h_{21e}R_c}{R_{we}} \quad \text{lub} \quad K_u \approx \frac{-h_{21e}R_c}{h_{11e}} \quad \text{dla } R_1 \parallel R_2 \gg h_{11e} \quad (2.8)$$

gdzie: rezystancja wejściowa wzmacniacza  $R_{we} = h_{11e} \parallel R_1 \parallel R_2$  (równoległe połączenie trzech rezystancji)

Uwaga: znak ujemny we wzorze oznacza odwrócenie amplitud sygnałów, czyli zmianę fazy sygnału na wyjściu o  $180^\circ$  w stosunku do sygnału wejściowego.

### **1.5 Zniekształcenia nieliniowe sygnału – materiał uzupełniający.**

Tranzystor bipolarny jest przyrządem sterowanym prądowo. Charakterystyka przejściowa  $I_C=f(I_B)$  w szerokim zakresie prądów jest liniowa. Jeżeli źródło sygnału ma charakter prądowy (tzn.:  $R_{gen} \gg R_{we.wzm}$ ) zniekształcenia sygnału na wyjściu tranzystora są niewielkie, ponieważ prąd wyjściowy jest proporcjonalny do prądu wejściowego  $i_c = h_{21e} i_b$ . Natomiast przy sterowaniu napięciowym,  $U_{we} = U_{be}$  na skutek silnej nieliniowości charakterystyki wejściowej tranzystora  $I_B=f(U_{BE})$ , jak we wzorze Shockley'a, powstają zniekształcenia amplitudowe przeniesionego sygnału, co przedstawiono graficznie na rysunku 5.



Rys.5 Graficzne przedstawienie zniekształceń nieliniowych wzmacnianego sygnału dla wejścia wzmacniacza sterowanego napięciowo.

Zniekształcenia sygnału prądu kolektora są przenoszone na analogiczne zniekształcenia napięcia wyjściowego,  $U_{ce} = i_c R_c$ . Można to dobrze obserwować podczas pomiarów wzmacnienia napięciowego za pomocą oscyloskopu zwiększając amplitudę sygnału wejściowego.

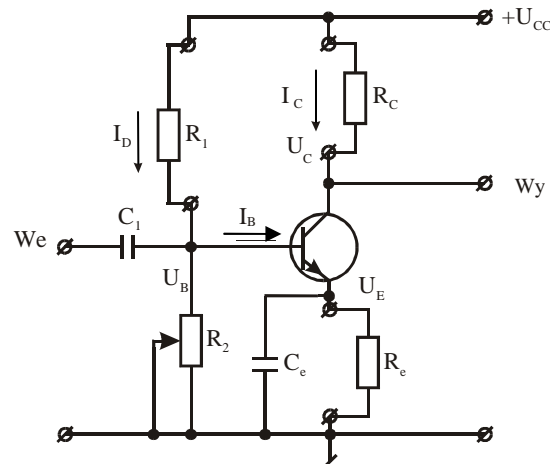
## 2. Pomiary

Na płytce z układem wzmacniacza (Rys. 6) może występować tranzystor typu **npn** lub **pnp**. **Sprawdź typ tranzystora i wynotuj jego dane katalogowe. Zastanów się, jakie zmiany polaryzacji układu wymusza określony typ tranzystora.** Zamontowane na płytkach rezystory  $R_e$  i  $R_c$  mają określone wartości. Można wybrać dowolny z nich lub równoległe połączenie każdej z par. Rezystor polaryzacji bazy  $R_1$  ma ustaloną wartość. Potencjometr  $R_2$  w dzielniku wejściowym umożliwia płynną regulację potencjału bazy  $U_B$  i w związku z tym dokładną regulację położenia punktu pracy tranzystora.

### 2.1 Montaż układu.

**Zadanie polega na wybraniu i połączeniu rezystorów zgodnie z wytycznymi podanymi w rozdziale IV, a następnie sprawdzeniu ustalonego punktu pracy za pomocą pomiarów napięć i prądów.**

Dla zastosowanych na płytce rezystorów, maksymalny prąd tranzystora ograniczony będzie do wartości kilku miliamperów (dla typowych napięć zasilania 9V-15V).



Rys.6 Schemat montażowy wzmacniacza WE

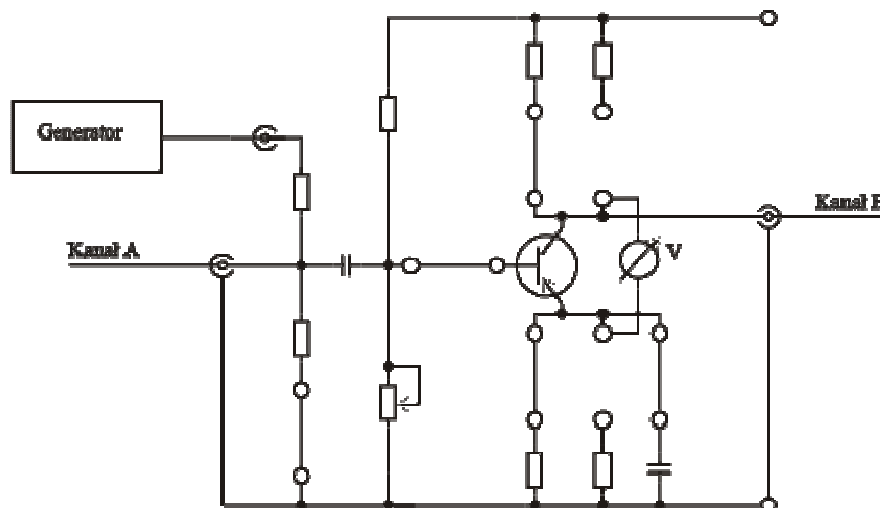
#### **Algorytm postępowania w celu uzyskania właściwego punktu pracy:**

- Ustalamy napięcie zasilania (np.  $U_{CC} = 9V, 12V, 15V$ )
  - Wybieramy rezystory  $R_e$  i  $R_c$  (można przyjąć  $R_e \sim 0,3R_c$ ) i notujemy ich wartości
  - Montujemy układ (Rys. 6).
  - Podłączamy woltomierz do zacisku emitera i mierzymy spadek napięcia, względem zacisku „masy”, na rezystorze  $R_e$ . Jest on równy  $I_C^* R_e$ .
  - Aby spełnić kryteria doboru punktu pracy, regulujemy potencjometrem spadek napięcia  $I_C R_e$  ustalając jego wartość na  $0,1 - 0,2 U_{CC}$ . Obliczamy i notujemy ustaloną wartość prądu  $I_C^*$
  - Mierzmy wartość napięcia  $U_{CE}$ ,  $U_{BE}$  oraz napięcie na rezystorze  $R_c$ . Ewentualnie korygujemy nastawą potencjometru ustawienie punktu pracy tak, aby spełniony był warunek  $U_{CE} \sim I_C^* R_c$  (mogą być różnice do 20%).
  - Ponownie mierzymy i zapisujemy wartości napięć i prądu w pkt. pracy:  $U_{CE}^*$ ,  $U_{BE}^*$ ,  $I_C^*$
- Rysujemy schemat (Rys.6) z oznaczeniem wartości rezystorów oraz zmierzonymi wartościami napięć i prądów**



## 2.2 Pomiar wzmacnienia napięciowego wzmacniacza w ustalonym punkcie pracy.

Nie zmieniając punktu pracy ustalonego poprzednio podłączamy generator sygnałów m.cz. oraz oscyloskop jak pokazano na rys. 7.



Rys. 7 Układ montażowy do pomiaru wzmacnienia napięciowego.

### **Algorytm postępowania w celu pomiaru wzmacnienia:**

- Ustawiamy częstotliwość generatora tak aby znajdowała się w założonym paśmie przenoszenia badanego wzmacniacza (np.  $f = 10\text{kHz}$ )
- Ustawiamy amplitudę sygnału wejściowego (kanał A) na takim poziomie aby amplituda sygnału wyjściowego (kanał B) nie przekraczała  $0,2U_{CE}^*$ , co powinno odpowiadać amplitudzie sygnału na wejściu  $U_{be}$  nie większej niż  $26\text{mV}$  (małe sygnały zmienne).
- Sprawdzamy wartość napięcia stałego w punkcie pracy ( $U_{CE}^*$ )
- **Mierzmy oscyloskopem amplitudy sygnałów wejściowego i wyjściowego. Obliczamy wzmacnienie napięciowe i porównujemy z wartością teoretyczną obliczoną ze wzoru (2.8).**

Dodatkowo:

Można zaobserwować zniekształcenia sygnału zależne od położenia punktu pracy (obcinanie amplitudy), zmieniając nastawienie potencjometru  $R_2$ .

Można zmierzyć wzmacnienie po odłączeniu z układu kondensatora  $C_e$ . Wtedy układ nosi nazwę ( $WE+R_e$ ), a moduł wzmacnienia jest równy  $R_c/R_e$  i nie zależy od  $h_{21e}$  tranzystora.

## 2.3 Pomiar pasma przenoszenia wzmacniacza.

- Mierzmy wzmacnienie napięciowe wzmacniacza dla sygnałów w zakresie od  $100\text{Hz}$  do  $1\text{MHz}$ . Pomiar zaczynamy każdorazowo od częstotliwości  $10\text{kHz}$  (w górę i w dół). Praktycznie rzecz biorąc, należy „znaleźć” częstotliwości, dla których obserwujemy spadek wzmacnienia do wartości  $0,7 K_{u0}$  (należy wyjaśnić to stwierdzenie).
- **Rysujemy charakterystykę przenoszenia wzmacniacza i wyznaczamy 3dB pasmo przenoszenia,  $\Delta f_{3dB}$ . Wykres we współrzędnych  $K_u = f(f)$ , skala logarytmiczna na obu osiach.**