

## Ćw. 4 Sprzężenie zwrotne

### 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest ugruntowanie wiadomości dotyczących elementarnej teorii sprzężenia zwrotnego w układach elektronicznych.

### 2. Wymagane informacje

Budowa wzmacniacza tranzystorowego i jego parametry (wzmocnienie, rezystancja wejściowa i wyjściowa, górna i dolna częstotliwość graniczna), twierdzenie Thevenina.

### 3. Wprowadzenie teoretyczne

Sprzężenie zwrotne w układzie elektronicznym realizuje się przez sumowanie części sygnału wyjściowego z sygnałem wejściowym i użycie tej kombinacji do sterowania układu. Skutkiem działania sprzężenia zwrotnego jest modyfikacja właściwości układu. Ujemne sprzężenie zwrotne polepsza liniowość układów, zmniejsza zniekształcenia nieliniowe oraz obniża wpływ zmian elementów aktywnych na parametry układu, zmniejsza wrażliwość (kosztem redukcji wzmocnienia). Stosuje się je również w celu modyfikacji charakterystyk częstotliwościowych wzmacniaczy lub zmiany ich impedancji wejściowej i wyjściowej oraz do stabilizacji punktu pracy tranzystorów. Zasadniczą część ćwiczenia poświęcona jest pomiarom parametrów roboczych podstawowego, jednostopniowego wzmacniacza oporowego (RC) z tranzystorem bipolarnym. W układzie można aplikować różne rodzaje ujemnych sprzężeń zwrotnych. Właściwości tych ostatnich obrazowane są zmianami wartości parametrów roboczych wzmacniacza. Wyniki pomiarów mogą być następnie skonfrontowane z wartościami otrzymanymi z obliczeń teoretycznych. Obliczenia te wykonuje się w oparciu o małowartościowy, małosygnałowy model tranzystora z parametrami mieszanymi  $[h]$  oraz koncepcje skorygowanej macierzy tych parametrów  $[h_f]$  w przypadku danych sprzężeń zwrotnych.

### 4. Wykonanie ćwiczenia

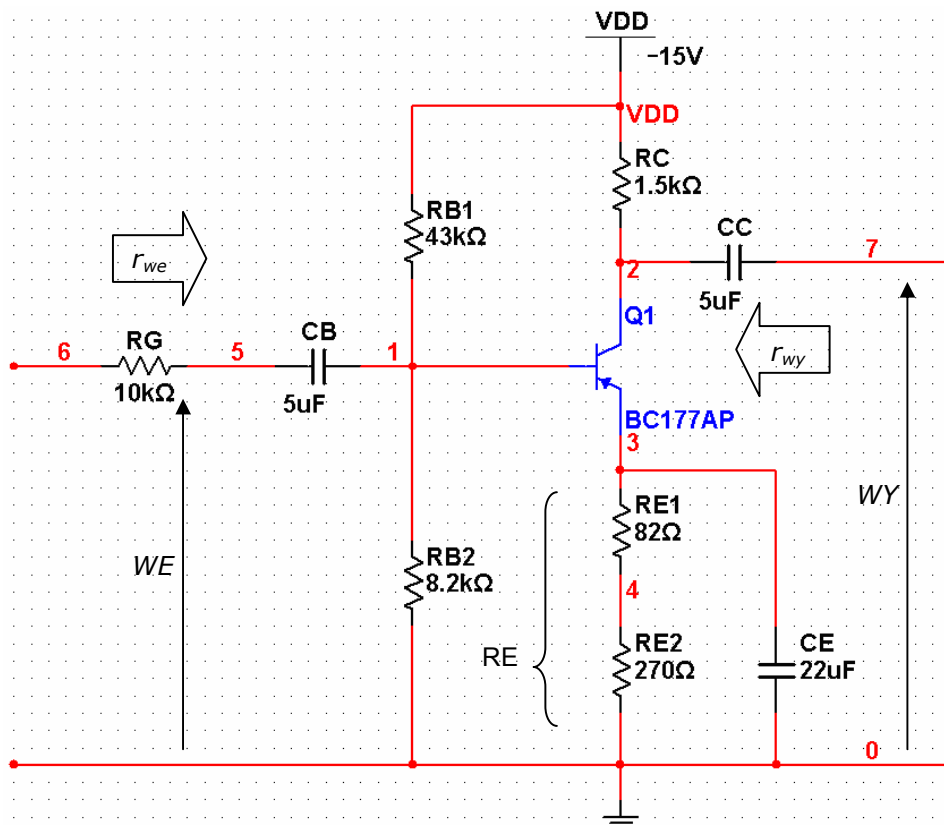
#### 4.1. Pomiar parametrów roboczych wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego

Połączyć układ wzmacniacza według schematu z Rys.1. Do wejścia należy doprowadzić napięcie sinusoidalne z generatora funkcyjnego (każdy zespół inne – patrz Tabela 1).

Do wyjścia należy podłączyć kanał B oscyloskopu, natomiast kanał A do wejścia. Wszelkich pomiarów dokonywać za pomocą oscyloskopu. Model tranzystora BC177AP znajduje się w bibliotece BJT\_PNP programu MultiSIM.

Tabela 1. Parametry sygnału wejściowego do wyboru przez poszczególne zespoły

Grupa	Amplituda [mV]	Częstotliwość [kHz]
A	50	3
B	80	3
C	100	5
D	120	5
E	150	5



Rys.1. Schemat układu wzmacniacza bez sprzężeń zwrotnych.

Należy przeprowadzić pomiary następujących parametrów roboczych wzmacniacza:

$$k_u = \frac{u_{wy}}{u_{we}} \quad - \quad \text{wzmocnienie napięciowe,}$$

$$r_{we} = \frac{u_{we}}{i_{we}} \quad - \quad \text{impedancja wejściowa,}$$

$$r_{wy} = \frac{u_{wy} |_{R_L=\infty}}{i_{wy} |_{R_L=0}} \quad - \quad \text{impedancja wyjściowa,}$$

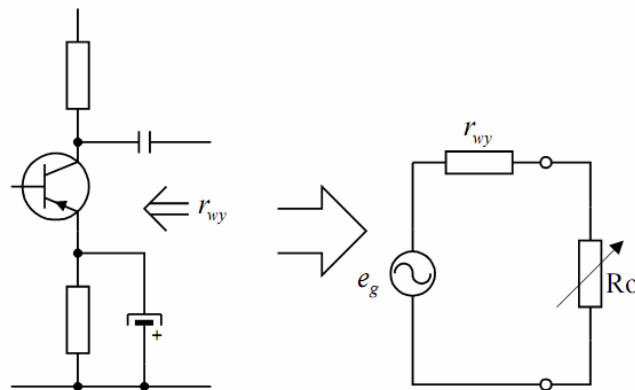
$$f_d, f_g \quad - \quad \text{częstotliwości graniczne: dolna i górna.}$$

Wszystkie pomiary za wyjątkiem impedancji wyjściowej należy przeprowadzić dla wzmacniacza nieobciążonego.

Wzmocnienie napięciowe należy zmierzyć poprzez porównanie amplitud sygnałów na wejściu (bazie) i wyjściu tranzystora (kolektorze).

W celu wyznaczenia impedancji wejściowej należy zmierzyć napięcie i prąd wejściowy tranzystora. Wielkość prądu można zmierzyć poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze wejściowym o znanej wartości (pomiar napięcia względem masy przed i za rezystorem, a następnie podzielenie go przez znaną wartość rezystancji).

W celu wyznaczenia impedancji wyjściowej należy posłużyć się twierdzeniem Thevenina. Na jego mocy każdy badany układ widziany od strony zacisków wyjściowych można przedstawić w postaci zastępczego źródła napięcia o określonej impedancji wewnętrznej. Sytuację tę ilustruje Rys.2.



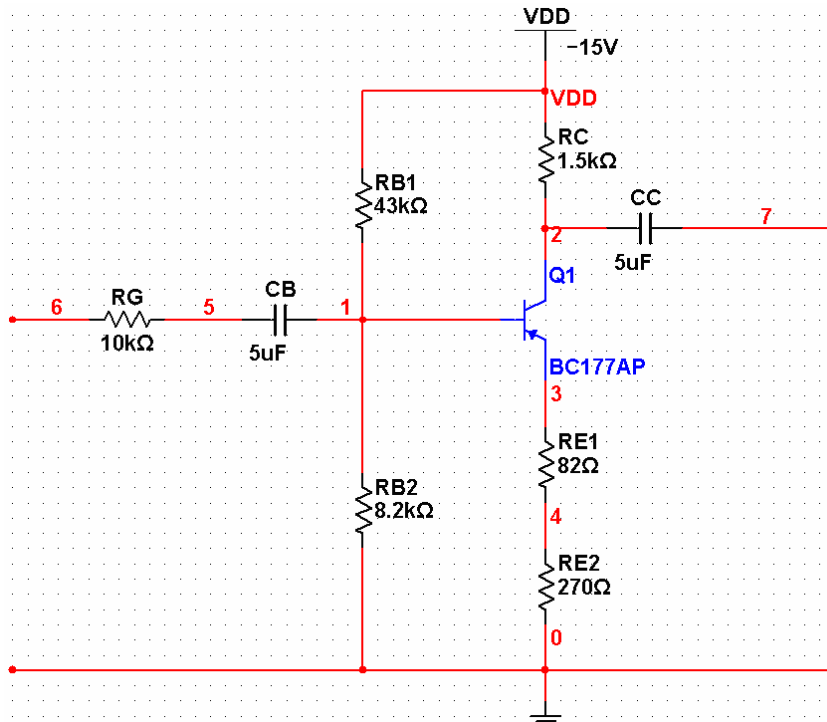
Rys.2. Ilustracja twierdzenia Thevenina.

Mierząc napięcie wyjściowe nieobciążonego wzmacniacza wyznacza się wartość siły elektromotorycznej  $e_g$  zastępczego źródła. Obciążając to źródło znaną rezystancją  $R_0$  doprowadza się do podziału tej siły na spadki napięcia na rezystancji wyjściowej  $r_{wy}$  i rezystancji obciążenia  $R_0$ . Można zatem zauważyć, że jeśli te dwie rezystancje będą sobie równe na każdej z nich odłoży się połowa  $e_g$  – dzielnik napięcia. A więc należy znaleźć taką wartość rezystancji obciążenia aby napięcie wyjściowe spadło do połowy wartości napięcia wyjściowego wzmacniacza nieobciążonego. W takiej sytuacji wartość rezystancji wyjściowej będzie równa rezystancji obciążenia.

Częstotliwości graniczne (częstotliwości połowy mocy) zgodnie z ich definicją określa się na podstawie charakterystyk częstotliwościowych jako częstotliwości, w których moc sygnału wyjściowego spada o połowę (a więc napięcie spada o  $\sqrt{2}$ ). Stanowi to spadek mocy o 3 dB na charakterystyce amplitudowo-częstotliwościowej wzmacniacza (stąd nazwa pasma 3-decybelowego). Aby je zmierzyć należy wykreślić tę charakterystykę za pomocą plotera Bodego.

#### 4.2. Pomiar parametrów roboczych wzmacniacza z ujemnym, prądowym, szeregowym sprzężeniem zwrotnym

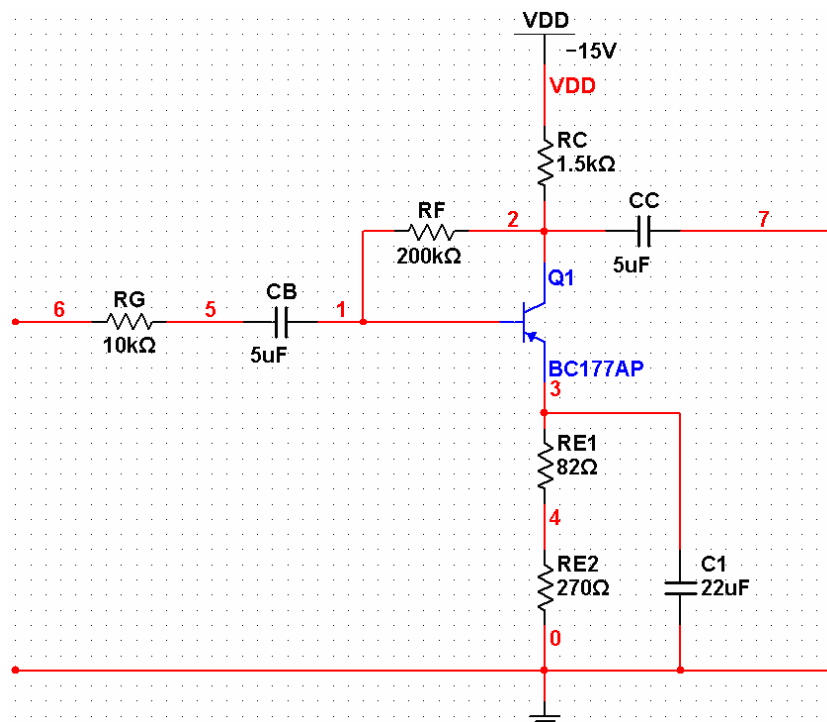
Należy połączyć układ wzmacniacza według schematu z Rys.3. i przeprowadzić pomiary tego samego zestawu parametrów roboczych jak w poprzednim punkcie. Należy otrzymane wyniki porównać z otrzymanymi w poprzednim punkcie a następnie skomentować.



Rys.3. Schemat wzmacniacza z szeregowym sprzężeniem zwrotnym.

### 4.3. Pomiar parametrów roboczych wzmacniacza z ujemnym, napięciowym, równoległym sprzężeniem zwrotnym

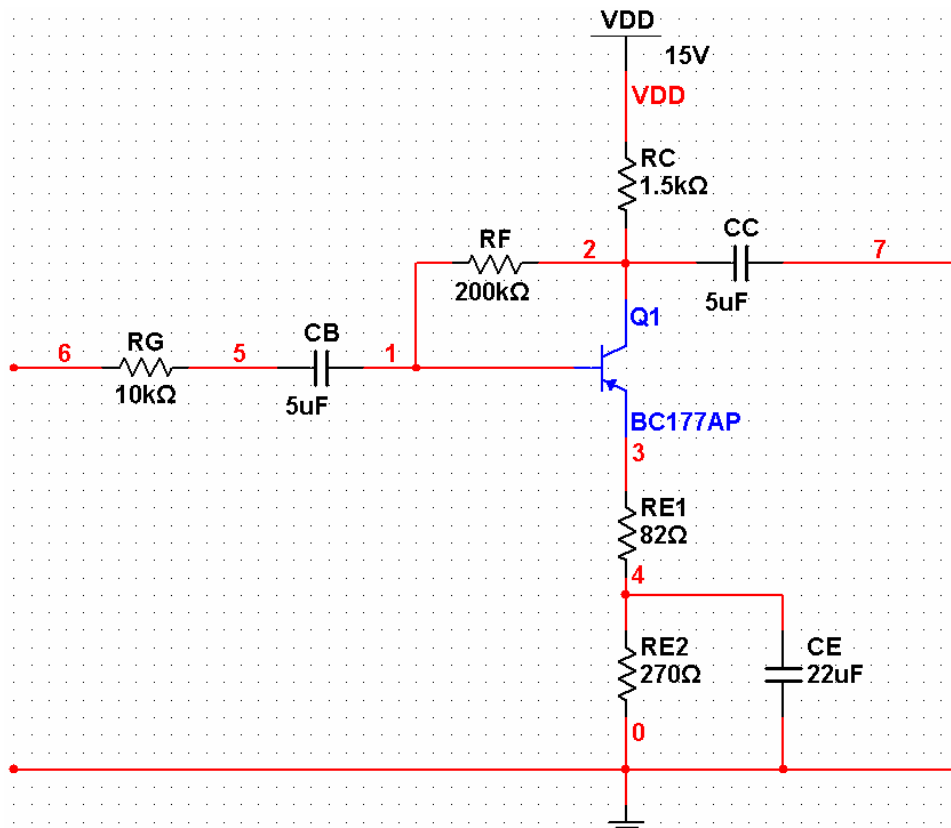
Należy połączyć układ wzmacniacza według schematu z Rys.4. i przeprowadzić pomiary tego samego zestawu parametrów roboczych jak w poprzednim punkcie. Należy otrzymane wyniki porównać z otrzymanymi w poprzednim punkcie a następnie skomentować.



Rys.4. Schemat wzmacniacza z równoległym sprzężeniem zwrotnym.

**4.4. Pomiar parametrów roboczych wzmacniacza z ujemnym, mieszanym sprzężeniem zwrotnym**

Należy połączyć układ wzmacniacza według schematu z Rys.5. i przeprowadzić pomiary tego samego zestawu parametrów roboczych jak w poprzednim punkcie. Należy otrzymane wyniki porównać z otrzymanymi w poprzednim punkcie a następnie skomentować.

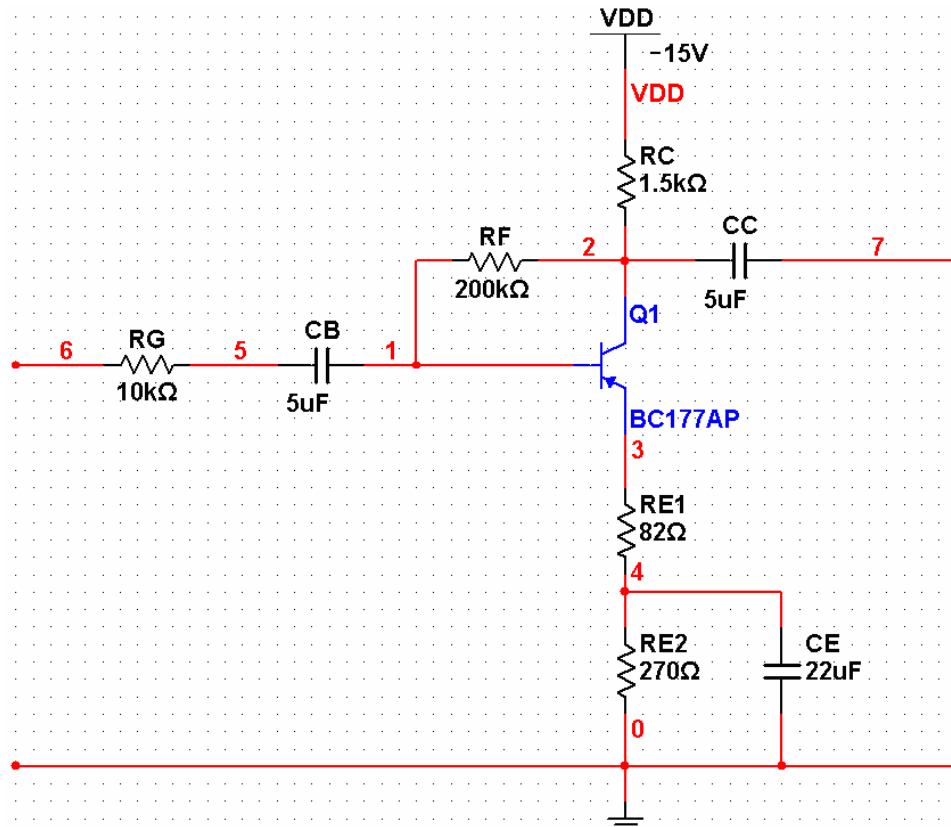


Rys.5. Schemat wzmacniacza z mieszanym sprzężeniem zwrotnym.

**4.5. Pomiar parametrów roboczych wtórnika emiterowego - wzmacniacza ze stuprocentowym napięciowym, szeregowym sprzężeniem zwrotnym**

Należy połączyć układ wzmacniacza według schematu z Rys.6. i przeprowadzić pomiary tego samego zestawu parametrów roboczych jak w poprzednim punkcie. Należy otrzymane wyniki porównać z otrzymanymi w poprzednim punkcie a następnie skomentować.

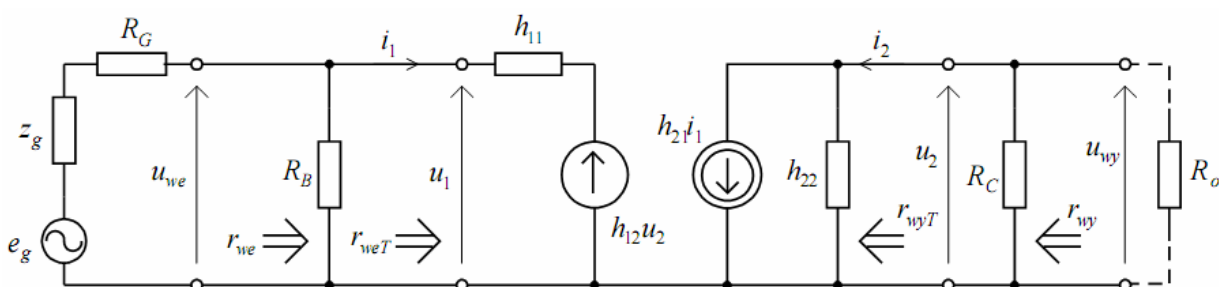
W sprawozdaniu należy napisać dlaczego układ ten nazywany jest wtórnikiem oraz jakie może mieć zastosowanie.



Rys.6. Schemat wtórnik emiterowego.

#### 4.6. Obliczenie teoretycznych wartości parametrów wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego

Wartości mierzonych wcześniej parametrów można obliczyć teoretycznie posługując się małosygnałowym, małowzrostotliwościowym modelem zastępczym tranzystora z parametrami mieszanymi  $[h_e]$ . Obwód wzmacniacza zgodny z tym modelem przedstawia Rys.7.



Rys.7. Schemat modelu zastępczego badanego układu.

Dla badanego wzmacniacza parametry małosygnałowe przyjmują następujące wartości:

- $h_{11e} = 1.94 \text{ k}\Omega$ ,
- $h_{12e} \cong 0$ ,
- $h_{21e} = 330$ ,
- $h_{22e} = 52.4 \text{ }\mu\text{S}$ .

W takim układzie można otrzymać wzmocnienie napięciowe dla zakresu średnich częstotliwości według wzoru:

$$k_u = \frac{u_{wy}}{u_{we}} = \frac{h_{21}r_L}{h_{11} + \Delta h r_L}$$

gdzie:  $r_L = \frac{R_C R_0}{R_C + R_0}$ ,  $\Delta h = h_{11}h_{22} - h_{21}h_{12}$ ,

impedancję wejściową wzmacniacza według wzoru:

$$r_{we} = \frac{r_{weT} R_B}{r_{weT} + R_B}$$

gdzie:  $r_{weT} = \frac{h_{11} + \Delta h r_L}{1 + h_{22} r_L}$ ,  $R_B = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$ ,

a impedancję wyjściową według wzoru:

$$r_{wy} = \frac{r_{wyT} R_C}{r_{wyT} + R_C}$$

gdzie:  $r_{wyT} = \frac{h_{11} + r_g'}{\Delta h + h_{22} r_g'}$ ,  $r_g' = \frac{(z_g + R_G) R_B}{(z_g + R_G) + R_B}$ .

#### 4.7. Obliczenie teoretycznych wartości parametrów wzmacniaczy ze sprzężeniami zwrotnymi.

Na podstawie obliczonych parametrów modelu małosygnałowego dla wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego możliwe jest wyprowadzenie skorygowanych parametrów  $[h_f]$  dla układów ze sprzężeniami zwrotnymi, a na ich podstawie wzmocnienia i impedancji wzmacniacza.

Związek pomiędzy wcześniej wyprowadzonymi wartościami a parametrami można obliczyć na podstawie:

- dla sprzężenia prądowego szeregowego:

$$h_{11f} = h_{11e} + (1 + h_{21e}) R_E \approx h_{11e} + \beta_0 R_E,$$

$$h_{12f} = h_{12e} + h_{22e} R_E \approx h_{22e} R_E,$$

$$h_{21f} = h_{21e} = \beta_0,$$

$$h_{22f} = h_{22e},$$

$$\Delta h_f = \Delta h_e + h_{22e} R_E \approx h_{22e} R_E.$$

- dla sprzężenia napięciowego równoległego (uwaga! Do wcześniejszych wzorów należy podstawić  $R_F$  zamiast  $R_B$ ):

$$h_{11f} = h_{11e},$$

$$h_{12f} = h_{12e} + \frac{h_{11e}}{R_F} \approx \frac{h_{11e}}{R_F},$$

$$h_{21f} = h_{21e} = \beta_0,$$

$$h_{22f} = h_{22e} + \frac{1 + h_{21e}}{R_F} \approx h_{22e} + \frac{\beta_0}{R_F},$$

$$\Delta h_f = \Delta h_e + \frac{h_{11e}}{R_F} \approx \frac{h_{11e}}{R_F}.$$

- dla sprzężenia mieszanego (uwaga! Do wcześniejszych wzorów należy podstawić  $R_F$  zamiast  $R_B$ ):

$$h_{11f} = h_{11e} + \beta_0 R_E,$$

$$h_{12f} = h_{12e} + \frac{h_{11e}}{R_F} + h_{22e} R_E + \frac{\beta_0 R_E}{R_F} \approx \frac{\beta_0 R_E}{R_F},$$

$$h_{21f} = h_{21e} = \beta_0,$$

$$h_{22f} = h_{22e} + \frac{\beta_0}{R_F},$$

$$\Delta h_f = \Delta h_e + \frac{h_{11e}}{R_F} + h_{22e} R_E + \frac{\beta_0 R_E}{R_F} \approx \frac{\beta_0 R_E}{R_F}.$$

#### 4.8. Obliczenie teoretycznych wartości parametrów wtórnika emiterowego

Analogicznie jak poprzednio można postąpić dla układu wtórnika emiterowego. Należy posłużyć się zależnościami dla:

- wzmocnienia napięciowego:

$$k_u = \frac{u_{wy}}{u_{we}} = \frac{1}{1 + \frac{h_{11e}}{R_E(1+h_{21e})}} \approx \frac{1}{1 + \frac{h_{11e}}{\beta_0 R_E}},$$

- impedancji wejściowej (zastąpić  $r_{weT}$ ):

$$r_{weT} = h_{11e} + \frac{1+h_{21e}}{h_{22e} + \frac{1}{R_E}} \approx h_{11e} + \beta_0 R_E,$$

- impedancji wyjściowej:

$$r_{wy} = \frac{r_{wyT} R_E}{r_{wyT} + R_E}$$

$$\text{gdzie } r_{wyT} = \frac{h_{11e} + r_g'}{1 + h_{21e}} \approx \frac{h_{11e} + r_g'}{\beta_0}.$$

### 5. Opracowanie wyników

W sprawozdaniu z ćwiczenia należy:

- narysować schematy badanych układów,
- zamieścić zmierzone wzmocnienia, rezystancje wejściowe i wyjściowe oraz częstotliwości graniczne, wszystkie wartości należy zebrać w tabeli i porównać wpływ danego sprzężenia na działanie układu,
- obliczyć teoretyczne wartości parametrów wzmacniacza i porównać z otrzymanymi wynikami symulacyjnymi,
- wyciągnąć wnioski.

### 6. Literatura

- [1] „Elementy i układy elektroniczne. Część 1.”, pod red. S. Kutya, Wydawnictwa AGH, Kraków 2000, Rozdział 11 „Sprzężenie zwrotne” (ss. 218-238)