Podstawowe układy pracy tranzystora bipolarnego

4

Ćwiczenie opracował Jacek Jakusz

1. Wstęp

Ćwiczenie umożliwia pomiar i porównanie parametrów podstawowych konfiguracji pracy tranzystora bipolarnego. Są to kolejno:
A - układ wspólnego emitera (CE),
B - układ wspólnego emitera z niebocznikowaną rezystancją w emiterze (CE-RE),
D - układ wspólnej bazy (CB).
Poszczególne konfiguracje wybiera się przy pomocy przełącznika obrotowego, który poprzez przekaźniki przełącza układy. Poszczególne układy wykonane są w ten sposób by zapewniały identyczne warunki zasilania tranzystorów. Różnice pomiędzy parametrami wzmacniaczy wynikają więc głównie z różnych konfiguracji pracy tranzystora, co umożliwia jakościowe porównanie układów. Dla uniezależnienia się od parametrów przyrządów pomiarowych oraz jakości połączeń, każdy ze wzmacniaczy ma wbudowany wejściowy i wyjściowy bufor o wzmocnieniu jednostkowym.

W ramach ćwiczenia wykonuje się pomiary wzmocnienia w środku pasma przepustowego, rezystancji wejściowej oraz wyjściowej, dolnej oraz górnej 3dB-owej częstotliwości granicznej a także amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej poza pasmem przepustowym wzmacniacza.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się z jego przebiegiem (podstawowe informacje zamieszczono w niniejszym opracowaniu). Prowadzący ma obowiązek sprawdzić przygotowanie do ćwiczenia.

2. Pomiary

2.1. Do układów podać z generatora sygnał wejściowy o częstotliwości: układy A, B $f=10\ kHz$, układ C $f=20\ kHz$, układu D $f=120\ kHz$):

a) **Zmierzyć dolną i górną 3-decybelową częstotliwość graniczną (f_{L3dB}, f_{H3dB}).** Pomiar należy wykonać w następujący sposób:
- ustawić wartość skuteczną napięcia sygnału wejściowego dla układu: **A≈2.0mV, B≈10mV, D≈6mV** tak, aby na wyjściu badanego układu uzyskać v_{o_max} **w zakresie 300÷500mV**.
- dla układu C ustawić v_{in} **≈ 400 mV** i przeprowadzić jedynie pomiar częstotliwości granicznej dolnej
- zmniejszać (dla pomiaru częstotliwości granicznej dolnej) lub zwiększać (dla pomiaru częstotliwości granicznej górnej) częstotliwość sygnału wejściowego aż do uzyskania napięcia wyjściowego równego $v_{o_\max}/\sqrt{2}$, uzyskana wartość jest odpowiednią częstotliwością graniczną.

b) **Określić częstotliwość środkową** $f_0=\sqrt{f_{L3dB}\cdot f_{H3dB}}$ i zmierzyć wzmocnienie w środku pasma $K_u(f_0)$, $K_u=v_{o_\max}/v_{in}$.

c) **Zmierzyć rezystancję wejściową** R_{in} (sygnał wejściowy o odpowiedniej częstotliwości, o amplitudzie jak w punkcie a). Rezystancję wejściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor R_S' włączony szeregowo z rezystancją wewnętrzną generatora R_S. Należy nacisnąć przycisk $\boxed{R_{in}}$ i zanotować napięcie wyjściowe. Dokładny opis pomiaru R_{in} znajduje się w części teoretycznej.

d) **Zmierzyć rezystancję wyjściową** R_{out} (sygnał wejściowy o odpowiedniej częstotliwości, amplituda jak w punkcie a). Rezystancję wyjściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor R_L' włączany równolegle z rezystancją obciążenia R_L wzmacniacza, którą w badanych układach jest rezystancja wejściowa bufora $\mathbf{R_{BUF}}$. Należy nacisnąć przycisk $\boxed{R_{out}}$ i zanotować napięcie wyjściowe. Dokładny opis pomiaru R_{out} znajduje się w części teoretycznej.

e) Pomiary charakterystyk częstotliwościowych prowadzić w zakresie od 40 Hz do 2 MHz, w rastrze 1,2, 5, 7, tzn. 100 Hz, 200Hz, 500 Hz, 700 Hz, 1 kHz, 2 kHz itd

Pomierzone charakterystyki umieścić na wykresach, przy czym obie osie winny mieć skalę logarytmiczną (oś pionowa – wzmocnienie wyrażone w decybelach, tj. **20 log$_{10}$**$|v_o/v_{in}|$

Przykłady tabel pomiarowych

	CE	CE+RE	CC	CB
v_o/v_{in} [v/v]				
R_{in} [kΩ]				
R_{out}[kΩ]				
f_{3dBL}				
f_{3dBH}				

f [Hz]	100	200	…	f_{3dBL}	…	f_o	…	f_{3dBH}	…	1M
v_o/v_{in}										

3. Opracowanie wyników

1) Dla układów CE, CE-RE, CC i CB należy wyznaczyć teoretyczne wartości:
- punktów pracy tranzystorów,
- wzmocnienie małosygnałowe v_o/v_{in},
- rezystancję wejściową i wyjściową.

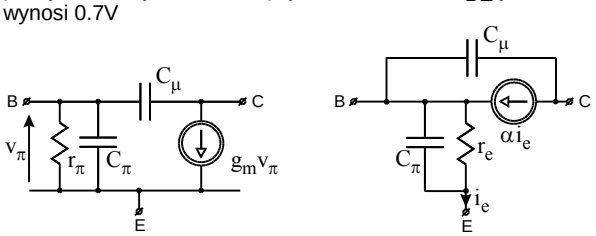
20 Wyniki obliczeń należy umieścić w ten sposób, aby można było je łatwo porównać z wynikami pomiarów, np. we wspólnej tabeli.
3) Zamieścić własne wnioski i spostrzeżenia. Porównać układy pomiędzy sobą, a także skomentować zgodność obliczeń z pomiarami.

4. Teoria

W ćwiczeniu wykonane są cztery wzmacniacze oznaczone literami A-D Wszystkie układy posiadają wbudowane bufory wejściowy i wyjściowy. Bufory te są identyczne a ich parametry przedstawia poniższa tabela:

Parametr	Jednostki	Wartość
Wzmocnienie	V/V	1
Rezystancja wejściowa R_{BUF}	MΩ	1
Rezystancja wyjściowa R_{0BUF}	Ω	≈0
Pojemność wejściowa C_{BUF}	pF	20
Częstotliwość graniczna	MHz	4

Dla każdego tranzystora z układów A-D, punkty pracy należy wyznaczyć przy założeniu, że prąd stały bazy I_B jest pomijalnie mały oraz, że napięcie baza-emiter V_{BE} jest stałe i wynosi 0.7V



Rys. 1. Małosygnałowe schematy zastępcze typu Π i typu T tranzystora bipolarnego.

W analizie małosygnałowej należy przyjąć V_T=25mV. Dane tranzystora BC237: β=160, C_μ=4.5pF, f_T=150MHz.

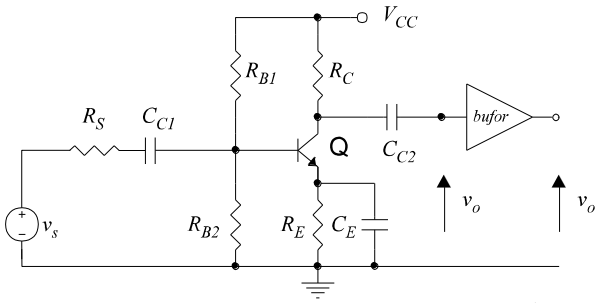
Parametry modelu małosygnałowego:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \qquad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \qquad \alpha = \frac{\beta}{\beta+1} \qquad r_e = \frac{r_\pi}{\beta+1}$$

$$C_\pi = \frac{g_m}{2\pi \cdot f_T} - C_\mu$$

4.1 Układ A:

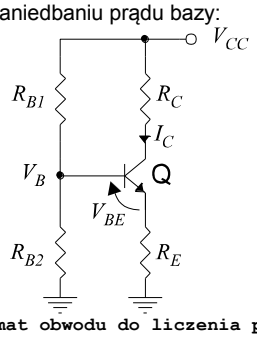
Jest to wzmacniacz w konfiguracji wspólnego emitera (CE).



Rys. 2. Schemat wzmacniacza w konfiguracji wspólnego emitera (CE).

4.1.1 Punkt pracy

liczony jest przy zaniedbaniu prądu bazy:



Rys. 3. Schemat obwodu do liczenia punktu pracy.

$$V_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \tag{1}$$

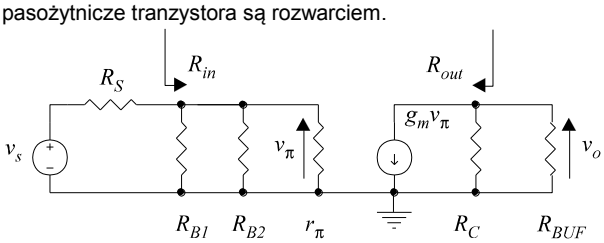
$$I_C \approx \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \tag{2}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \tag{3}$$

4.1.2 Analiza małosygnałowa:

Środek pasma:

Zastępczy schemat małosygnałowy w zakresie średnich częstotliwości (w paśmie przepustowym) jest tworzony przy założeniu, że pojemności sprzęgające i bocznikujące stanowią zwarcie dla sygnałów zmiennych, natomiast pojemności pasożytnicze tranzystora są rozwarciem.



Rys. 4. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE z rys. 2 dla zakresu częstotliwości średnich.

$$R_{in} = R_{B1} \| R_{B2} \| r_\pi \tag{4}$$

$$R_{out} = R_C \tag{5}$$

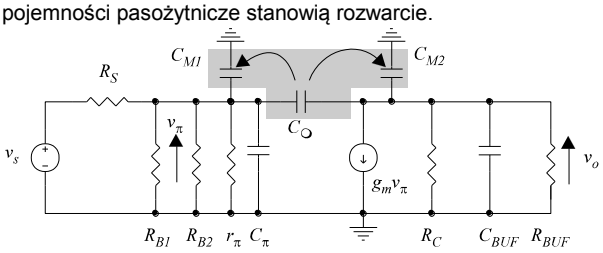
$$v_0 = -g_m v_\pi (R_C \| R_{BUF}) \tag{6}$$

$$v_\pi = v_s \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \tag{7}$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_s} = -\frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} g_m (R_c \| R_{BUF})} \tag{8}$$

Wysokie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasożytniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasożytnicze stanowią rozwarcie.



Rys. 5. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE z rys. 2 dla wyznaczenia górnej częstotliwości granicznej.

stałe czasowe:

korzystając z tw. Millera można zamienić pojemność C_μ tranzystora na pojemności C_{M1} i C_{M2}.

$$K = \frac{v_0}{v_\pi} = -g_m R_C \| R_{BUF} \tag{9}$$

$$C_{M1} = C_\mu (1 - K) \tag{10}$$

$$\boxed{} \tag{11}$$

Następnie wyznaczamy stałe czasowe związane z poszczególnymi pojemnościami:

$$\tau_{H1} = (C_{M1} + C_\pi)(R_S \| R_{in}) \tag{12}$$

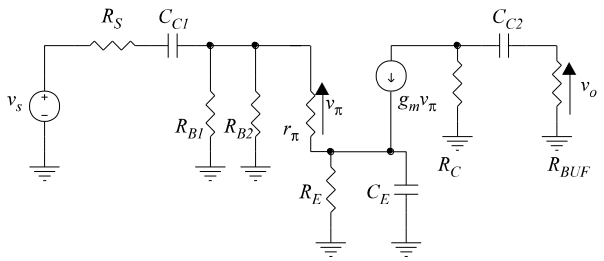
$$\tau_{H2} = (C_{M2} + C_{BUF})(R_C \| R_{BUF}) \tag{13}$$

Przybliżona wartość górnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2})}} \tag{14}$$

Niskie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna dolna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami sprzęgającymi lub bocznikującymi (licząc stałe czasowe dla każdej z pojemności, pozostałe należy traktować jako zwarcie). Pojemności pasożytnicze tranzystora traktuje się jako rozwarcia.



Rys. 6. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE z rys. 2 dla wyznaczenia dolnej częstotliwości granicznej.

Korzystając z powyższego schematu zastępczego poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{L1} = C_{C1}(R_S + R_{in}) \tag{15}$$

$$\tau_{L2} = \frac{C_E R_E}{1 + g_m R_E} \tag{16}$$

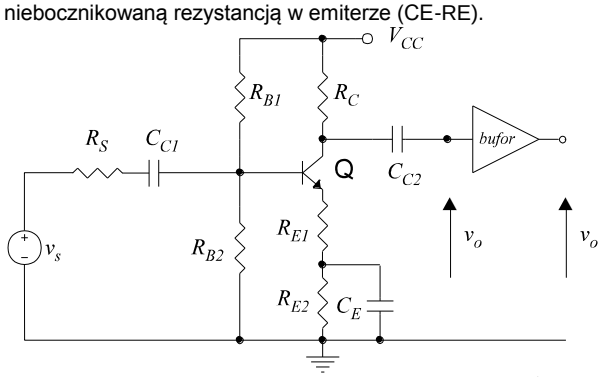
$$\tau_{L3} = C_{C2}(R_C + R_{BUF}) \tag{17}$$

Przybliżona wartość dolnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}} + \frac{1}{\tau_{L3}}\right)} \tag{18}$$

4.2 Układ B:

Jest to wzmacniacz w konfiguracji wspólnego emitera z niebocznikowaną rezystancją w emiterze (CE-RE).



Rys. 7. Schemat wzmacniacza w konfiguracji wspólnego emitera (CE).

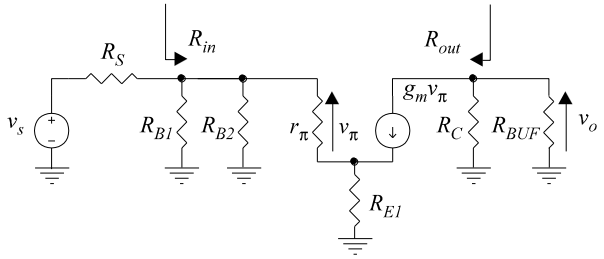
4.2.1 Punkt pracy

liczony tak jak dla układu A (we wzorach na I_C i V_{CE} zamiast R_E jest suma R_{E1}+R_{E2})

4.2.2 Analiza małosygnałowa:

Środek pasma:

Zastępczy schemat małosygnałowy w zakresie średnich częstotliwości (w paśmie przepustowym) jest tworzony przy założeniu, że pojemności sprzęgające i bocznikujące stanowią zwarcie dla sygnałów zmiennych, natomiast pojemności pasożytnicze tranzystora są rozwarciem.



Rys. 8. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE-RE z rys. 7 dla zakresu częstotliwości średnich.

$$R_{in} = R_{B1} \| R_{B2} \| (r_\pi + (\beta+1)R_{E1}) \tag{19}$$

$$R_{out} = R_C \tag{20}$$

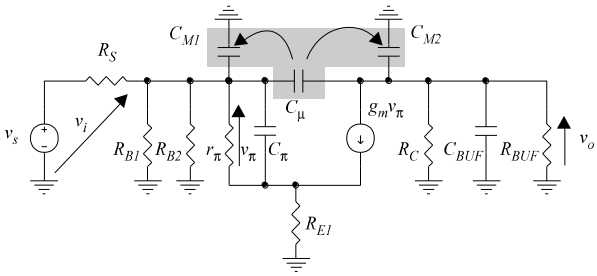
$$v_0 = -g_m v_\pi (R_C \| R_{BUF}) \tag{21}$$

$$v_\pi = v_s \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \cdot \frac{r_\pi}{r_\pi + (\beta+1)R_{E1}} \tag{22}$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_s} = -\frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \cdot \frac{r_\pi}{r_\pi + (\beta+1)R_{E1}} \cdot g_m (R_c \| R_{BUF})} \tag{23}$$

Wysokie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasożytniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasożytnicze stanowią rozwarcie.



Rys. 9. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE-RE z rys. 7 dla wyznaczenia górnej częstotliwości granicznej.

stałe czasowe:

korzystając z tw. Millera można zamienić pojemność C_μ tranzystora na pojemności C_{M1} i C_{M2}.

$$K = -\frac{\alpha \cdot R_C \| R_{BUF}}{r_e + R_{E1}} \tag{24}$$

$$C_{M1} = C_\mu (1 - K) \tag{25}$$

$$C_{M2} = C_\mu \left(1 - \frac{1}{K}\right) \tag{26}$$

Następnie wyznaczamy stałe czasowe związane z poszczególnymi pojemnościami:

$$\tau_{H1} = C_{M1}(R_S \| R_{in}) \tag{27}$$

$$\tau_{H2} = C_\mu \left(r_\pi \| \frac{R_{E1} + R_S \| R_{B1} \| R_{B2}}{1 + g_m R_{E1}} \right) \tag{28}$$

$$\tau_{H3} = (C_{M2} + C_{BUF})(R_C \| R_{BUF}) \tag{29}$$

Przybliżona wartość górnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2} + \tau_{H3})}} \tag{30}$$

Niskie częstotliwości:

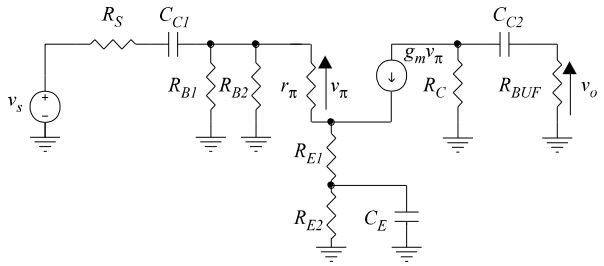
Częstotliwość graniczna dolna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami sprzęgającymi lub bocznikującymi (licząc stałe czasowe dla każdej z pojemności, pozostałe należy traktować jako zwarcie). Pojemności pasożytnicze tranzystora traktuje się jako rozwarcia.

Korzystając ze schematu zastępczego z rys. 10, poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{L1} = C_{C1}(R_S + R_{in}) \tag{31}$$

$$\tau_{L2} = C_E \left(R_{E2} \| \left(R_{E1} + \frac{r_\pi + R_{B1} \| R_{B2} \| R_S}{\beta + 1} \right) \right) \tag{32}$$

$$\tau_{L3} = C_{C2}(R_C + R_{BURF}) \tag{33}$$



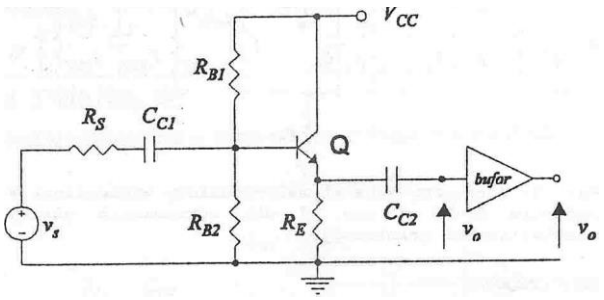
Rys. 10. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE-RE z rys. 7 dla wyznaczenia dolnej częstotliwości granicznej.

Przybliżona wartość dolnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}}+\frac{1}{\tau_{L2}}+\frac{1}{\tau_{L3}}\right)} \qquad (34)$$

4.3 Układ C:

Jest to wzmacniacz w konfiguracji wspólnego kolektora (CC), czyli tzw. wtórnik emiterowy.



Rys. 11 Schemat wzmacniacza w konfiguracji wspólnego kolektora (CB).

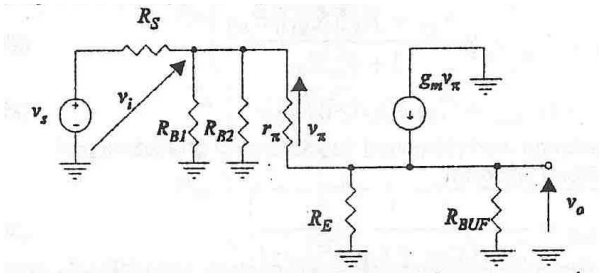
4.3.1. Punkt pracy

liczony tak jak dla układu A

4.3.2. Analiza małosygnałowa

Środek pasma:

Zastępczy schemat małosygnałowy w zakresie średnich częstotliwości (w paśmie przepustowym) jest tworzony przy założeniu, że pojemności sprzęgające i bocznikujące stanowią zwarcie dla sygnałów zmiennych, natomiast pojemności pasożytnicze tranzystora są rozwarciem.



Rys. 12. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CC z rys. 11 dla zakresu częstotliwości średnich

$$R_{in} = R_{B1}\|R_{B2}\|\left(r_\pi + (\beta+1)(R_E\|R_{BUF})\right)$$

$$R_{out} = R_E\|\left(\frac{r_\pi + R_S\|R_{B1}\|R_{B2}}{\beta+1}\right)$$

$$v_0 = v_i \cdot \frac{(\beta+1)(R_E\|R_{BUF})}{r_\pi + (\beta+1)(R_E\|R_{BUF})}$$

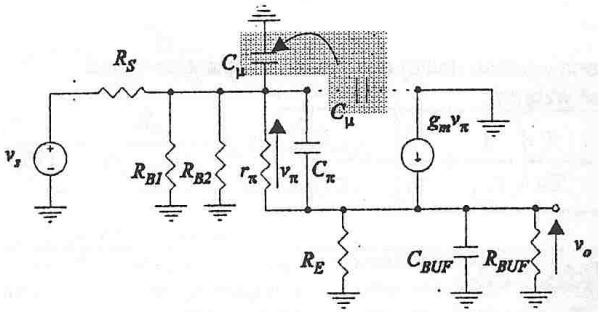
$$v_i = v_s \cdot \frac{R_{in}}{R_{in}+R_S}$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_s} = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_S} \cdot \frac{(\beta+1)(R_E\|R_{BUF})}{r_\pi + (\beta+1)(R_E\|R_{BUF})}}$$

Uwaga: kolejne wzory posiadają w Instrukcji papierowej numery odpowiednio: (35), (36), (37), (38) i (39)

Wysokie częstotliwości

Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasożytniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasożytnicze stanowią rozwarcie.



Rys. 13 Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CC z rys. 11 dla wyznaczenia górnej częstotliwości granicznej

W układzie CC nie występuje pojemność Millera!

Stałe czasowe:

$$\tau_{H1} = C_\mu(R_S\|R_{in}) \qquad (40)$$

$$\tau_{H2} = C_\pi\left(r_\pi\|\frac{R_E\|R_{BUF} + R_S\|R_{B1}\|R_{B2}}{1+g_m(R_E\|R_L)}\right) \qquad (41)$$

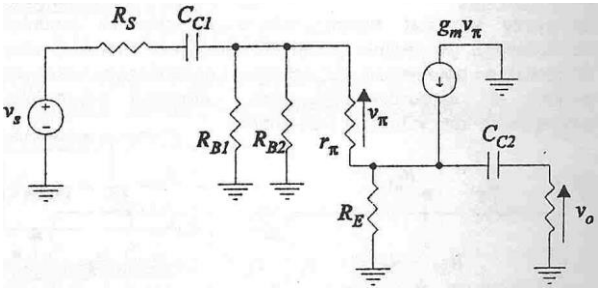
$$\tau_{H3} = C_{BUF}\left(R_{BUF}\|R_{out}\right) \qquad (42)$$

Przybliżona wartość górnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi\cdot(\tau_{H1}+\tau_{H2}+\tau_{H3})}} \qquad (43)$$

Niskie częstotliwości

Częstotliwość graniczna dolna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami sprzęgającymi lub bocznikującymi (licząc stałe czasowe dla każdej pojemności, pozostałe należy traktować jako zwarcie). Pojemności pasożytniczej tranzystora traktuje się jako rozwarcia.



Rys. 14 Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CC z rys. 11 dla wyznaczenia dolnej częstotliwości granicznej

Korzystając z powyższego schematu zastępczego poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{L1} = C_{C1}(R_S + R_{in}) \tag{44}$$

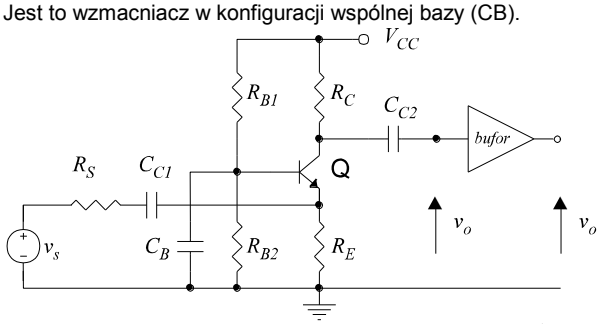
$$\tau_{L2} = C_{C2}(R_{out} + R_{BUF}) \tag{45}$$

Przybliżona wartość dolnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}}\right)} \tag{46}$$

4.4 Układ D:

Jest to wzmacniacz w konfiguracji wspólnej bazy (CB).



Rys. 15 Schemat wzmacniacza w konfiguracji wspólnej bazy (CB).

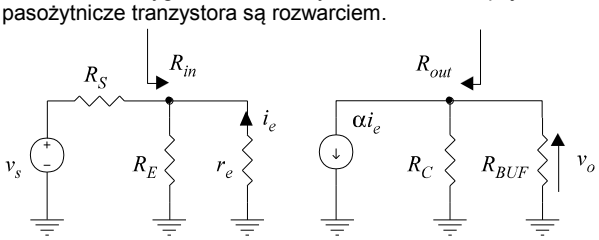
4.4.1 Punkt pracy

liczony tak jak dla układu A.

4.4.2 Analiza małosygnałowa

Środek pasma:

Zastępczy schemat małosygnałowy w zakresie średnich częstotliwości (w paśmie przepustowym) jest tworzony przy założeniu, że pojemności sprzęgające i bocznikujące stanowią zwarcie dla sygnałów zmiennych, natomiast pojemności pasożytnicze tranzystora są rozwarciem.



Rys. 16. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CB z rys. 15 dla zakresu częstotliwości średnich.

$$R_{in} = R_E \| r_e \tag{47}$$

$$R_{out} = R_C \tag{48}$$

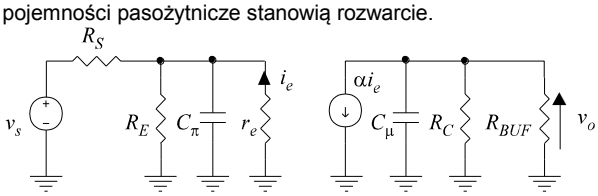
$$v_0 = -\alpha \cdot i_e (R_C \| R_{BUF}) \tag{49}$$

$$i_e = -\frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \cdot \frac{1}{r_e} \cdot v_s \tag{50}$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_s} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_s} \cdot \frac{\alpha}{r_e} \cdot (R_C \| R_{BUF})} \tag{51}$$

Wysokie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasożytniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasożytnicze stanowią rozwarcie.



Rys. 17. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CB z rys. 15 dla wyznaczenia górnej częstotliwości granicznej.

Dla w.cz. nie ma efektu multiplikacji pojemności (efekt Millera)

stałe czasowe:

$$\tau_{H1} = C_\pi (R_S \| R_E \| r_e) \tag{52}$$

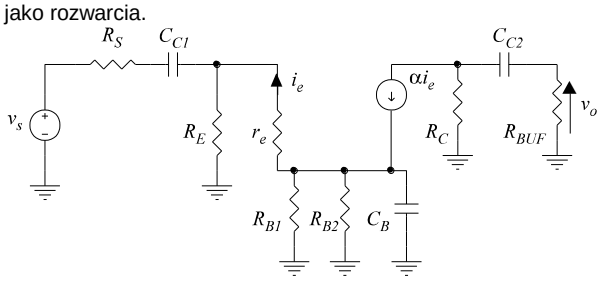
$$\tau_{H2} = (C_\mu + C_{BUF}) \cdot (R_C \| R_{BUF}) \tag{53}$$

Przybliżona wartość górnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2})}} \tag{54}$$

Niskie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna dolna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami sprzęgającymi lub bocznikującymi (licząc stałe czasowe dla każdej z pojemności, pozostałe należy traktować jako zwarcie). Pojemności pasożytnicze tranzystora traktuje się jako rozwarcia.



Rys. 18. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CB z rys. 15 dla wyznaczenia dolnej częstotliwości granicznej.

Korzystając z powyższego schematu zastępczego poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{L1} = C_{C1}(R_S + R_{in}) \tag{55}$$

$$\tau_{L2} = C_B\left[R_{B1} \| R_{B2} \| \left((r_e + R_E \| R_S) \cdot (\beta + 1)\right)\right] \tag{56}$$

$$\tau_{L3} = C_{C2}(R_C + R_{BUF}) \tag{57}$$

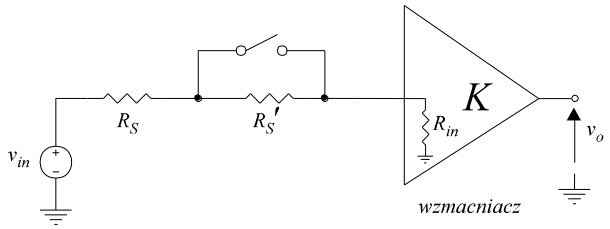
Przybliżona wartość dolnej częstotliwości granicznej jest określona wzorem:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}} + \frac{1}{\tau_{L3}}\right)} \tag{58}$$

4.5 Pomiar rezystancji wejściowej wzmacniaczy

Rezystancję wejściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor R_S' włączony szeregowo z rezystancją wewnętrzną generatora R_S. Podczas normalnej pracy jest on zwierany przełącznikiem umieszczonym na płycie czołowej. Po naciśnięciu przycisku oznaczonego $\boxed{R_{in}}$ następuje dołączenie

rezystora R_S' w szereg z R_S, co powoduje zmniejszenie wzmocnienia.



Rys. 19. Metoda pomiaru rezystancji wejściowej wzmacniacza.

Oznaczając jako v_O oraz v_O' odpowiednio napięcia wyjściowe przy zwartym i rozwartym rezystorze R_S' otrzymujemy:

$$v_0 = K \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \cdot v_{in} \tag{59}$$

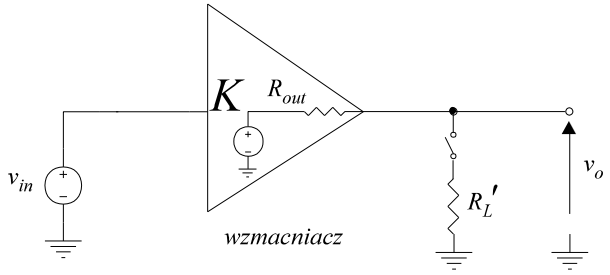
$$v_0' = K \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S + R_S'} \cdot v_{in} \tag{60}$$

$$\frac{v_0}{v_0'} = \frac{R_{in} + R_S + R_S'}{R_{in} + R_S} \tag{61}$$

$$\boxed{R_{in} = \frac{v_0'}{v_0 - v_0'} \cdot R_S' - R_S} \tag{62}$$

4.6 Pomiar rezystancji wyjściowej wzmacniaczy

Rezystancję wyjściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor R_L' włączany równolegle z rezystancją obciążenia R_L wzmacniacza, którą w badanych układach jest rezystancja wejściowa bufora R_{BUF}. Podczas normalnej pracy R_L' jest odłączony. W czasie pomiaru rezystancji dołącza się go przełącznikiem umieszczonym na płycie czołowej i oznaczonym $\boxed{R_{out}}$. Po naciśnięciu przycisku następuje dołączenie rezystora R_L', co powoduje zmniejszenie wzmocnienia.



Rys. 20. Metoda pomiaru rezystancji wyjściowej wzmacniacza.

Oznaczając jako v_O oraz v_O' odpowiednio napięcia wyjściowe przy rozwartym i zwartym rezystorze otrzymujemy:

$$v_0 = K \cdot \frac{R_{BUF}}{R_{BUF} + R_{out}} \cdot v_{in} \tag{63}$$

$$v_{0'} = K \cdot \frac{R_{BUF} || R_L'}{R_{BUF} || R_L' + R_{out}} \cdot v_{in} \tag{64}$$

$$\frac{v_{0'}(R_{BUF} || R_L' + R_{out})}{R_{BUF} || R_L'} = \frac{v_0(R_{BUF} + R_{out})}{R_{BUF}} \tag{65}$$

$$\boxed{R_{out} = \frac{R_{BUF} \cdot R_L}{\frac{R_{BUF} \cdot v_0}{v_0 - v_0} - R_L}} \tag{66}$$

4.7 Dane elementów w poszczególnych konfiguracjach układowych.

Parametr	Jednostki	CE	CE-RE	CC	CB
β	-	160	160	160	160
C_μ	pF	4.5	4.5	4.5	4.5
f_T	MHz	150	150	150	150
R_S	$k\Omega$	1	1	1	0.1
$R_{S'}$	$k\Omega$	1	1	1	1
C_{C1}	nF	68	68	68	68
R_{B1}	$k\Omega$	43	43	43	43
R_{B2}	$k\Omega$	22	22	22	22
C_B	μF	nie ma	nie ma	nie ma	47
R_C	$k\Omega$	6.2	6.2	6.2	6.2
R_E	$k\Omega$	3.13	nie ma	3.13	3.13
R_{E1}	$k\Omega$	nie ma	0.16	nie ma	nie ma
R_{E2}	$k\Omega$	nie ma	2.97	nie ma	nie ma
C_E	μF	100	100	100	100
C_{C2}	nF	100	100	100	100
R_{BUF}	$M\Omega$	1	1	1	1
C_{BUF}	pF	20	20	20	20
$R_{L'}$	$k\Omega$	4.7	4.7	4.7	4.7
V_{CC}	V	12	12	12	12

Literatura:

[1] Z. J. Staszak, J. Glinianowicz, D. Czarnecki “Materiały pomocnicze do przedmiotu Układy Elektroniczne Liniowe”.

[2] A. Guziński, “Liniowe elektroniczne układy analogowe” WNT 1992.

[3] S. Soclof, “Zastosowania analogowych układów scalonych”, WKŁ 1991.