Wzmacniacze szerokopasmowe 6

Ćwiczenie opracował Marek Wójcikowski

1. Wstęp

Ćwiczenie umożliwia pomiar i porównanie właściwości pięciu wzmacniaczy tranzystorowych w następujących konfiguracjach:

A - **wspólny emiter** (CE)
B - **wspólna baza** (CB)
C - połączenie: **wspólny emiter** + **wspólna baza** - tzw. **kaskoda** (CE-CB)
D - połączenie: **wspólny kolektor** + **wspólna baza** (CC-CB)
E - połączenie: **wspólny kolektor** + **wspólny emiter** (CC-CE)

Pierwsze dwa układy A i B są prostymi jednotranzystorowymi wzmacniaczami i służą jako odniesienie dla pozostałych, bardziej złożonych układów.

W ramach ćwiczenia wykonuje się pomiary: wzmocnienia w środku pasma przepustowego, rezystancji wejściowej, dolnej oraz górnej 3-decybelowej częstotliwości granicznej, a także amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej poza pasmem przepustowym wzmacniacza. Poszczególne konfiguracje wybiera się przy pomocy przełącznika obrotowego, który poprzez przekaźniki przełącza odpowiednie układy. Wszystkie układy wykonane są w taki sposób, aby zapewniały podobne warunki zasilania tranzystorów. Dla uniezależnienia się od parametrów przyrządów pomiarowych oraz jakości połączeń, każdy ze wzmacniaczy ma wbudowany bufor o wzmocnieniu jednostkowym zarówno na wejściu jak i na wyjściu.

Przed przystąpieniem do ćwiczenia należy zapoznać się z teorią dotyczącą pracy tranzystora bipolarnego jako wzmacniacza liniowego (zamieszczona jest ona w niniejszym opracowaniu). Prowadzący ma obowiązek sprawdzić przygotowanie do ćwiczenia.

2. Pomiary

Dla każdego z układów A, B, C, D i E należy:

a) zmierzyć wzmocnienie dla środka pasma v_o/v_s (warunki pomiaru: sygnał wejściowy o częstotliwości ok. 50kHz, wartość skuteczna napięcia v_s<5mV, /przykładowo: 1mV/).
b) zmierzyć rezystancję wejściową (dla sygnału wejściowego jw.) - patrz opis w części teoretycznej.
c) zmierzyć dolną i górną 3-decybelową częstotliwość graniczną (f_{3dBL}, f_{3dBH}). Pomiar należy wykonać w następujący sposób:
   - ustawić częstotliwość generatora na 50kHz,
   - ustalić wartość napięcia wejściowego w ten sposób aby na wyjściu badanego układu uzyskać 300mV,
   - zmniejszać (dla pomiaru częstotliwości granicznej dolnej) lub zwiększać (dla pomiaru częstotliwości granicznej górnej) częstotliwość sygnału wejściowego aż do uzyskania napięcia wyjściowego równego $300mV/\sqrt{2} \approx 212mV$, uzyskana w ten sposób wartość częstotliwości jest odpowiednią częstotliwością graniczną (należy zwrócić uwagę, aby napięcie z generatora nie zmieniało się ze zmianami częstotliwości).
d) zmierzyć amplitudową charakterystykę częstotliwościową w zakresie od 100Hz do f_{L3dB} oraz od f_{H3dB} do 1MHz w rastrze częstotliwości 1, 2, 4, 7, 10 (tj. np. dla 1kHz, 2kHz, 4kHz, 7kHz, 10kHz, ...). Zmierzoną charakterystykę należy nanieść na wykresie. Oś pionowa, logarytmiczna, powinna wyrażać wzmocnienie v_o/v_s w [V/V], oś pozioma (częstotliwość sygnału pomiarowego w [kHz]) powinna być logarytmiczna.

Przykłady tabel pomiarowych

	A	B	C	D	E
V_0/V_{IN} [V/V]					
R_{IN} [kΩ]					
f_{3dBL} [Hz]					
f_{3dBH} [kHz]					

f [Hz]	1k	2k	...	f_{L3dB}	f_{H3dB}	...	1M
V_0/V_{IN}							

3. Opracowanie wyników

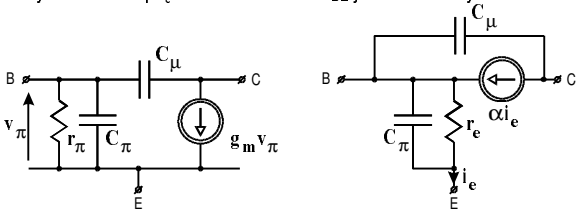
Dla układów A-E obliczyć, na podstawie wzorów z części teoretycznej:

- punkty pracy tranzystorów,
- wzmocnienie małosygnałowe v_0/v_s,
- częstotliwości 3-decybelowe górne i dolne,
- rezystancję wejściową i wyjściową.

Wyniki obliczeń należy umieścić w ten sposób aby można było łatwo porównać z pomiarami np. we wspólnej tabeli. Dla każdego z układów narysować zmierzone charakterystyki częstotliwościowe modułu wzmocnienia a następnie nanieść na nie wyniki obliczeń (tj. wzmocnienie w środku pasma i częstotliwości graniczne górną i dolną). Zamieścić własne wnioski i spostrzeżenia. Porównać układy pomiędzy sobą, a także skomentować zgodność obliczeń teoretycznych z pomiarami.

4. Teoria

Dla każdego tranzystora z układów A-E, 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.



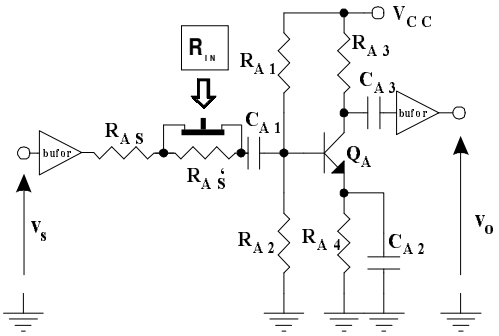
Rys. 1. Małosygnałowe schematy zastępcze typu π i typu T tranzystora bipolarnego.

W analizie małosygnałowej należy przyjąć V_T=25mV. 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:

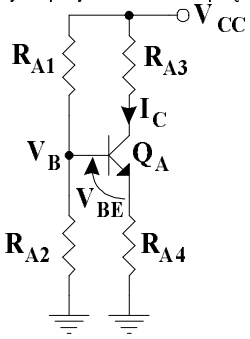


Rys. 2. Schemat układu A - wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym w konfiguracji wspólnego emitera (CE).

Jest to prosty wzmacniacz w konfiguracji wspólnego emitera (CE).

4.1.1 Punkt pracy

Punkt pracy liczony jest przy zaniedbaniu prądu bazy.



Rys. 3. Schemat do wyznaczenia punktu pracy tranzystora.

$$V_B \approx V_{CC}\frac{R_{A2}}{R_{A1}+R_{A2}} \tag{1}$$

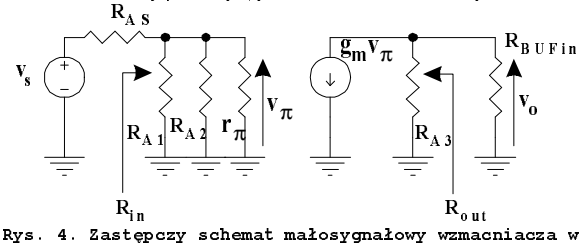
$$I_C \approx \frac{V_B - V_{BE}}{R_{A4}} \tag{2}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - \left(R_{A3}+R_{A4}\right) I_C \tag{3}$$

4.1.2 Analiza małosygnałowa:

<u>środek pasma:</u>

Zastępczy schemat małosygnałowy z 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. Napięcie zasilania, ponieważ ma stały potencjał, jest również traktowane jako masa.



Rys. 4. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE dla środka pasma.

Rezystancję wejściową i wyjściową wyznacza się z rys.4:

$$R_{in} = R_{A1}\left\|R_{A2}\right\|r_\pi \tag{4}$$

$$R_{out} = R_{A3} \tag{5}$$

natomiast wzmocnienie małosygnałowe (rys.4):

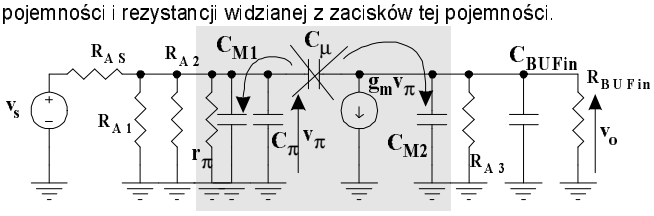
$$v_0 = -g_m v_\pi \left(R_{A3}\left\|R_{BUFin}\right.\right) \tag{6}$$

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

$$\boxed{\frac{v_0}{v_s} = -\frac{R_{in}}{R_{in}+R_{AS}} g_m\left(R_{A3}\left\|R_{BUFin}\right.\right)} \tag{8}$$

<u>wysokie częstotliwości:</u>

Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi. Każdą stałą czasową liczy się jako iloczyn pojemności i rezystancji widzianej z zacisków tej pojemności.



Rys. 5. Zastępczy schemat małosygnałowy dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

Korzystając z twierdzenia Millera można zamienić pojemność C_μ tranzystora na pojemności C_{M1} i C_{M2}:

$$K = \frac{v_o}{v_\pi} = -g_m\left(R_{A3}\left\|R_{BUFin}\right.\right) \tag{9}$$

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

$$C_{M2} = C_\mu\left(1-\frac{1}{K}\right) \tag{11}$$

Teraz można łatwo wyznaczyć stałe czasowe związane z poszczególnymi pojemnościami:

$$\tau_{H1} = (C_{M1}+C_\pi)\cdot\left(R_{in}\left\|R_{AS}\right.\right) \tag{12}$$

$$\tau_{H2} = (C_{M2}+C_{BUFin})\cdot\left(R_{A3}\left\|R_{BUFin}\right.\right) \tag{13}$$

Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

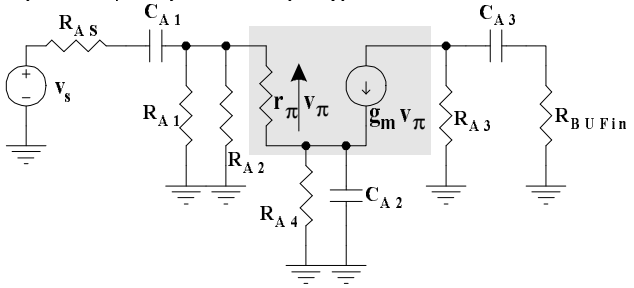
$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi\cdot(\tau_{H1}+\tau_{H2})} \tag{14}$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi\cdot\sqrt{\tau_{H1}^2+\tau_{H2}^2}}} \tag{15}$$

<u>niskie częstotliwości:</u>

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 traktuje się jako rozwarcia.



Rys. 6. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza z rys. 2 dla częstotliwości niskich.

Poszczególne stałe czasowe wynoszą:

$$\tau_{L1} = C_{A1}\left(R_{AS}+R_{A1}\left\|R_{A2}\right\|r_\pi\right) \tag{16}$$

$$\tau_{I2} = C_{A2}\left(R_{A4} \left\| \frac{r_\pi + R_{A1}\|R_{A2}\|R_{AS}}{\beta+1} \right. \right) \quad (17)$$

$$\tau_{I3} = C_{A3}\left(R_{A3} + R_{BUFin}\right) \quad (18)$$

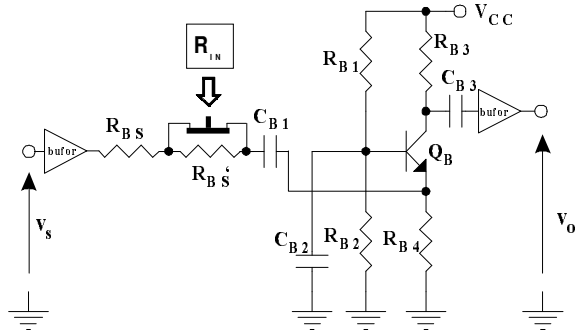
Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{I1}} + \frac{1}{\tau_{I2}} + \frac{1}{\tau_{I3}}\right) \quad (19)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{\tau_{I1}^2} + \frac{1}{\tau_{I2}^2} + \frac{1}{\tau_{I3}^2}}} \quad (20)$$

4.2 Układ B:



Rys. 7. Schemat układu B - wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym w konfiguracji wspólnego emitera (CB).

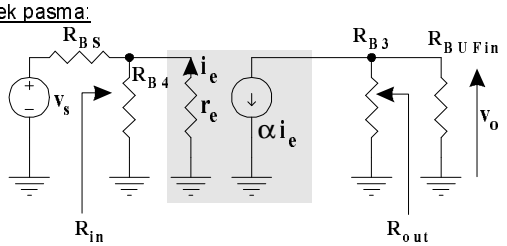
Jest to wzmacniacz w konfiguracji wspólnej bazy (CB).

4.2.1 Punkt pracy

Punkt pracy liczony tak jak dla układu A.

4.2.2 Analiza małosygnałowa:

środek pasma:



Rys. 8. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CE dla środka pasma.

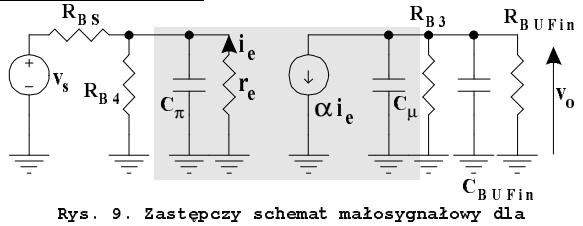
$$R_{in} = R_{B4}\|r_e\,,\ R_{out} = R_{B3} \quad (21)$$

$$v_0 = -\alpha \cdot i_e\left(R_{B3}\|R_{BUFin}\right) \quad (22)$$

$$i_e = v_s \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{BS}} \cdot \frac{1}{r_e} \quad (23)$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_s} = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{BS}} \cdot \frac{\alpha}{r_e} \cdot \left(R_{B3}\|R_{BUFin}\right)} \quad (24)$$

wysokie częstotliwości:



Rys. 9. Zastępczy schemat małosygnałowy dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

stałe czasowe:

$$\tau_{H1} = C_\pi r_e \| R_{B4} \| R_{BS} \quad (25)$$

$$\tau_{H2} = \left(C_\mu + C_{BUFin}\right)\cdot\left(R_{B3}\|R_{BUFin}\right) \quad (26)$$

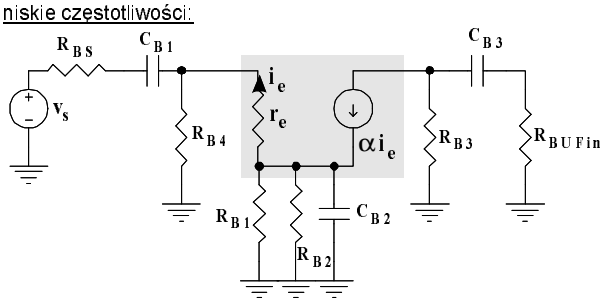
Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2})} \quad (27)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\tau_{H1}^2 + \tau_{H2}^2}}} \quad (28)$$

niskie częstotliwości:



Rys. 10. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza z rys. 7 dla częstotliwości niskich.

$$\tau_{I1} = C_{B1}\left(R_{BS} + R_{B4}\|r_e\right) \quad (29)$$

$$\tau_{I2} = C_{B2}\left[R_{B1}\left\|R_{B2}\right\|\left[\left(r_e + R_{BS}\|R_{B4}\right)\left(\beta+1\right)\right]\right] \quad (30)$$

$$\tau_{I3} = C_{B3}\left(R_{B3} + R_{BUFin}\right) \quad (31)$$

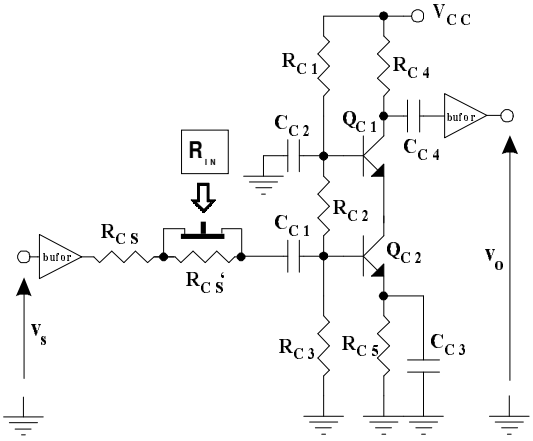
Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{I1}} + \frac{1}{\tau_{I2}} + \frac{1}{\tau_{I3}}\right) \quad (32)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{\tau_{I1}^2} + \frac{1}{\tau_{I2}^2} + \frac{1}{\tau_{I3}^2}}} \quad (33)$$

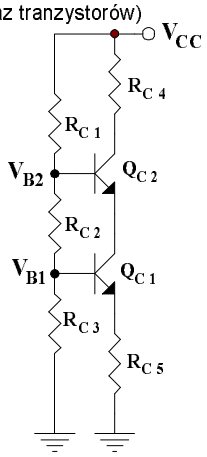
4.3 Układ C:



Rys. 11. Schemat układu C - wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym w konfiguracji kaskody (CE-CB).

Jest to wzmacniacz w konfiguracji kaskody (CE-CB). Połączenie to jest charakterystyczne, gdyż obydwa stopnie wzmacniacza są połączone bezpośrednio, bez użycia pojemności. Przez obydwa tranzystory płynie ten sam prąd.

4.3.1 Punkt pracy
(zaniedbano prądy baz tranzystorów)



Rys. 12. Schemat do wyznaczenia punktu pracy tranzystorów.

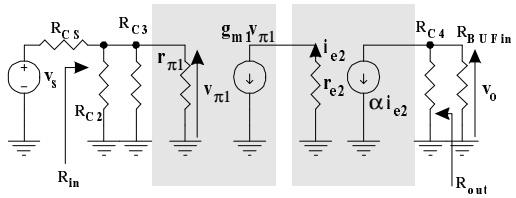
$$V_{B1} \approx \frac{R_{C3}}{R_{C1}+R_{C2}+R_{C3}} V_{CC} \tag{34}$$

$$I_{C2} \approx I_{C1} \approx I_{E2} \approx I_{E1} = \frac{V_{B1}-V_{BE}}{R_{C5}} \tag{35}$$

$$V_{B2} \approx \frac{R_{C2}+R_{C3}}{R_{C1}+R_{C2}+R_{C3}} V_{CC}, \tag{36}$$

$$V_{C1} = V_{E1} = V_{B2} - V_{BE},\ V_{C2} = V_{CC} - I_C R_{C4},$$
$$V_{E1} = V_{B1} - V_{BE},\ V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1},\ V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2}$$

4.3.2 Analiza małosygnałowa:
<u>środek pasma:</u>



Rys. 13. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie kaskody dla środka pasma.

$$R_{in} = R_{C2} \| R_{C3} \| r_{\pi 1} \tag{37}$$

$$R_{out} = R_{C4} \tag{38}$$

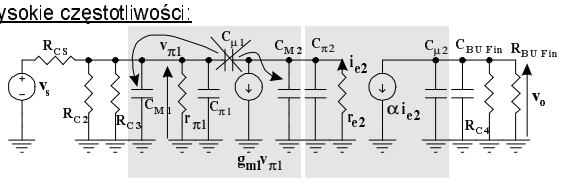
$$v_0 = -\alpha \cdot i_{e2} \cdot \left(R_{C4} \| R_{BUFin} \right) \tag{39}$$

$$i_{e2} = g_{m1} v_{\pi 1} \tag{40}$$

$$v_{\pi 1} = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{CS}} v_s \tag{41}$$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_{in}}{R_{in}+R_{CS}} \cdot \alpha \cdot g_{m1} \cdot \left(R_{C4} \| R_{BUFin} \right)} \tag{42}$$

<u>wysokie częstotliwości:</u>



Rys. 14. Zastępczy schemat małosygnałowy dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

(twierdzenie Millera pozwala zamienić pojemność $C_{\mu 1}$ na pojemności C_{M1} i C_{M2})

$$K = -g_{m1} r_{e2} \approx -1 \tag{43}$$

$$C_{M1} = C_{\mu 1}(1-K) \tag{44}$$

$$C_{M2} = C_{\mu 1}\left(1-\frac{1}{K}\right) \tag{45}$$

Poszczególne stałe czasowe wynoszą:

$$\tau_{H1} = \left(C_{M1}+C_{\pi 1}\right) \cdot \left(R_{CS} \| R_{C2} \| R_{C3} \| r_{\pi 1} \right) \tag{46}$$

$$\tau_{H2} = \left(C_{M2}+C_{\pi 2}\right) \cdot r_{e2} \tag{47}$$

$$\tau_{H3} = \left(C_{\mu 2}+C_{BUFin}\right) \cdot \left(R_{C4} \| R_{BUFin} \right) \tag{48}$$

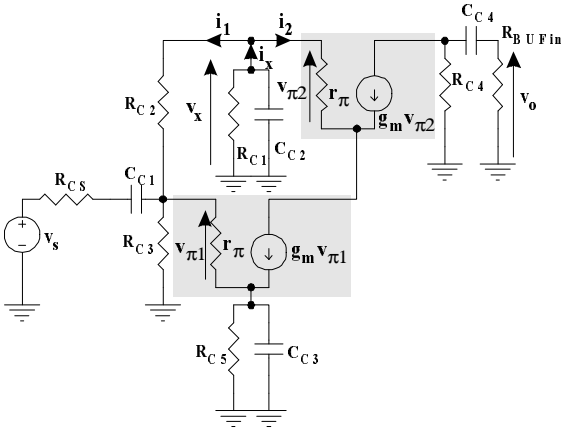
Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1}+\tau_{H2}+\tau_{H3})} \tag{49}$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\tau_{H1}^2+\tau_{H2}^2+\tau_{H3}^2}}} \tag{50}$$

<u>niskie częstotliwości:</u>



Rys. 15. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza z rys. 11 dla częstotliwości niskich.

$$r_{\pi 1} = r_{\pi 2} = r_\pi,\ \ g_{m1} = g_{m2} = g_m \tag{51}$$

$$\tau_{L1} = C_{C1}\left(R_{CS} + R_{C3} \| R_{C2} \| r_\pi \right) \tag{52}$$

$$\tau_{L2} = C_{C3} \cdot \left(R_{C5} \| \frac{r_\pi + R_{C3} \| R_{C2} \| R_{CS}}{\beta+1} \right) \tag{53}$$

$$\tau_{L3} = C_{C2} \cdot \left(R_{C1} \| R_X \right) \tag{54}$$

$$\tau_{L4} = C_{C4} \cdot \left(R_{C4} + R_{BUFin} \right) \tag{55}$$

Rezystancję R_X widzianą przez pojemność C_{C2} należy wyznaczyć z definicji:

$$R_X = \frac{v_x}{i_x} = ?$$

$$i_X = i_1 + i_2 \tag{56}$$

$$i_1 = \frac{v_{\pi 1}}{R_{CS} \| R_{C3} \| r_\pi} \tag{57}$$

$$i_2 = g_m v_{\pi 1} - g_m v_{\pi 2} = g_m \left(v_{\pi 1} - v_{\pi 2} \right) \tag{58}$$

$$v_{\pi 2} = i_2 r_\pi \tag{59}$$

$$i_2 = g_m v_{\pi 1} - g_m r_\pi \cdot i_2 \tag{60}$$

$$i_2 = \frac{g_m v_{\pi 1}}{1+g_m r_\pi} \tag{61}$$

$$i_X = i_1 + i_2 = v_{\pi 1}\left(\frac{1}{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi} + \frac{g_m}{1+g_m r_\pi}\right) \tag{62}$$

$$\frac{v_{\pi 1}}{i_x} = \frac{1}{\frac{1}{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi} + \frac{g_m}{1+g_m r_\pi}} \tag{63}$$

$$v_{\pi 1} = v_x \frac{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi}{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi + R_{C2}} \tag{64}$$

$$R_X = \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi + R_{C2}}{\left(R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi\right)\cdot\left(\frac{1}{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi} + \frac{g_m}{1+g_m r_\pi}\right)} \tag{65}$$

$$g_m r_\pi = \frac{I_C}{V_T}\cdot\frac{V_T}{I_B} = \beta \tag{66}$$

$$\frac{g_m}{\beta+1} = \frac{\alpha}{r_\pi} \tag{67}$$

$$R_X = \frac{v_x}{i_x} = \frac{R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi + R_{C2}}{1+\frac{\alpha}{r_\pi}\cdot\left(R_{CS}\|R_{C3}\|r_\pi\right)} \tag{68}$$

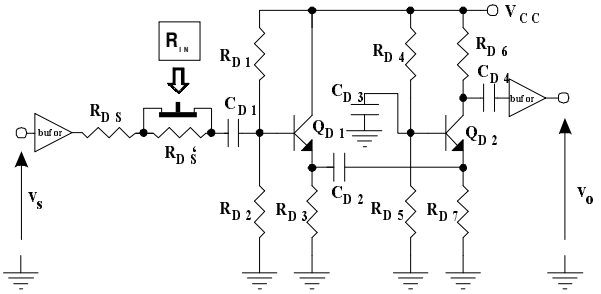
Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}} + \frac{1}{\tau_{L3}} + \frac{1}{\tau_{L4}}\right) \tag{69}$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{\tau_{L1}^2} + \frac{1}{\tau_{L2}^2} + \frac{1}{\tau_{L3}^2} + \frac{1}{\tau_{L4}^2}} \tag{70}$$

4.4 Układ D:



Rys. 16. Schemat układu D - wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym w konfiguracji CC-CB.

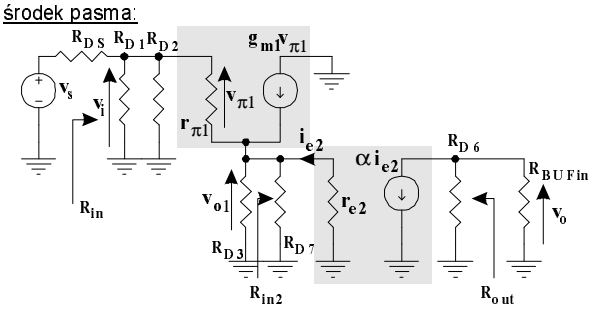
Jest to wzmacniacz będący połączeniem układów wspólny kolektor i wspólna baza (CC-CB).

4.4.1 Punkt pracy

Punkt pracy dla obydwu stopni liczy się tak samo jak dla układu A.

4.4.2 Analiza małosygnałowa:

środek pasma:



Rys. 17. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CC-CB dla środka pasma.

$$R_{in2} = r_{e2}\|R_{D7} \tag{71}$$

$$R_{in} = R_{D1}\|R_{D2}\|\left[r_{\pi 1} + (\beta+1)\left(R_{D3}\|R_{in2}\right)\right] \tag{72}$$

$$v_o = -\alpha\cdot i_{e2}\cdot\left(R_{D6}\|R_{BUFin}\right) \tag{73}$$

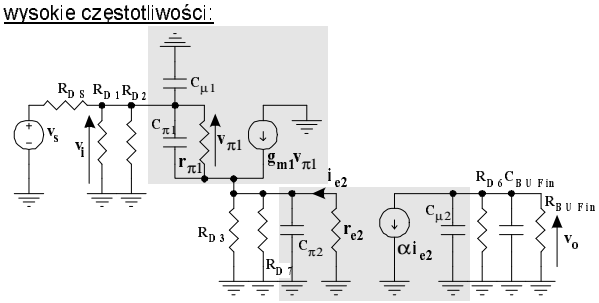
$$i_{e2} = -\frac{v_{o1}}{r_{e2}} \tag{74}$$

$$v_{o1} = v_i\cdot\frac{\left(R_{D3}\|R_{in2}\right)(\beta+1)}{\left(R_{D3}\|R_{in2}\right)(\beta+1) + r_{\pi 1}} \tag{75}$$

$$v_i = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{DS}}\cdot v_s \tag{76}$$

$$\boxed{\frac{v_o}{v_s} = \frac{R_{in}}{R_{in}+R_{DS}}\cdot\frac{\left(R_{D3}\|R_{in2}\right)(\beta+1)}{\left(R_{D3}\|R_{in2}\right)(\beta+1)+r_{\pi 1}}\cdot\frac{\alpha}{r_{e2}}\cdot R_{D6}\|R_{BUFin}} \tag{77}$$

wysokie częstotliwości:



Rys. 18. Zastępczy schemat małosygnałowy dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

$$\tau_{H1} = C_{\mu 1}\cdot\left(R_{DS}\|R_{in}\right) \tag{78}$$

$$\tau_{H2} = C_{\pi 2}\cdot\left(R_{in2}\|R_{D3}\|\frac{r_{\pi 1} + R_{D1}\|R_{D2}\|R_{DS}}{\beta+1}\right) \tag{79}$$

$$\tau_{H3} = \left(C_{\mu 2} + C_{BUFin}\right)\cdot\left(R_{D6}\|R_{BUFin}\right) \tag{80}$$

$$\tau_{H4} = C_{\pi 1}\cdot\left(r_{\pi 1}\|R_X\right) \tag{81}$$

Rezystancję R_X widzianą przez pojemność $C_{\pi 1}$ należy wyznaczyć z definicji:

$$R_X = \frac{v_{\pi 1}}{i_x} = ? \tag{82}$$

$$v_{\pi 1} = i_x \cdot \left(R_{DS} \| R_{D1} \| R_{D2} \right) + \left(i_x - g_{m1} v_{\pi 1} \right) \cdot \left(R_{D3} \| R_{in2} \right)$$

$$v_{\pi 1} \left[1 + g_{m1} \left(R_{D3} \| R_{in2} \right) \right] = i_x \left(R_{DS} \| R_{D1} \| R_{D2} + R_{D3} \| R_{in2} \right)$$

$$R_X = \frac{v_{\pi 1}}{i_x} = \frac{R_{DS} \| R_{D1} \| R_{D2} + R_{D3} \| R_{in2}}{1 + g_{m1} \cdot \left(R_{D3} \| R_{in2} \right)} \qquad (83)$$

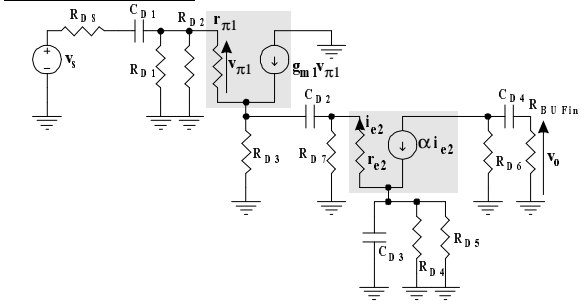
Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2} + \tau_{H3} + \tau_{H4})} \qquad (84)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\tau_{H1}^2 + \tau_{H2}^2 + \tau_{H3}^2 + \tau_{H4}^2}} \qquad (85)$$

niskie częstotliwości:



Rys. 19. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza z rys. 16 dla częstotliwości niskich.

$$\tau_{I1} = C_{D1} \left(R_{DS} + R_{in} \right) \qquad (86)$$

$$\tau_{I2} = C_{D2} \left(R_{in2} + R_{D3} \| \frac{r_{\pi 1} + R_{DS} \| R_{D1} \| R_{D2}}{\beta + 1} \right) \qquad (87)$$

$$\tau_{I3} = C_{D3} \cdot \left\{ R_{D4} \| R_{D5} \| \left[(\beta + 1) \left(r_{e2} + R_{D7} \| R_{D3} \| \frac{r_{\pi 1} + R_{D1} \| R_{D2} \| R_{DS}}{\beta + 1} \right) \right] \right\} \qquad (88)$$

$$\tau_{I4} = C_{D4} \cdot \left(R_{D6} + R_{BUFin} \right) \qquad (89)$$

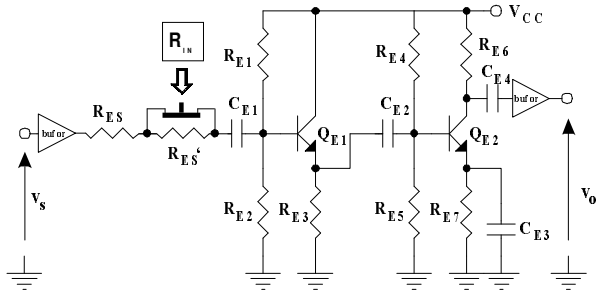
Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$f_{I3dB} \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_{I1}} + \frac{1}{\tau_{I2}} + \frac{1}{\tau_{I3}} + \frac{1}{\tau_{I4}} \right) \qquad (90)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$f_{I3dB} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\tau_{I1}^2} + \frac{1}{\tau_{I2}^2} + \frac{1}{\tau_{I3}^2} + \frac{1}{\tau_{I4}^2}} \qquad (91)$$

4.5 Układ E:



Rys. 20. Schemat układu D - wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym w konfiguracji CC-CE

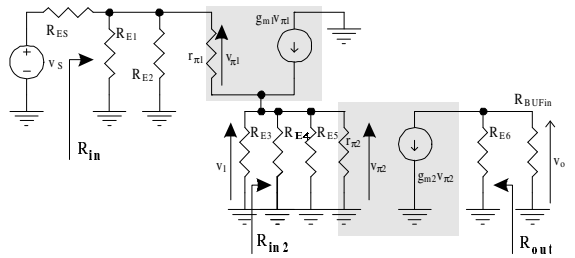
Jest to wzmacniacz będący połączeniem układów wspólny kolektor i wspólny emiter (CC-CE).

4.5.1 Punkt pracy

Punkt pracy tranzystorów Q_{E1} i Q_{E2} liczy się tak jak w układzie A.

4.5.2 Analiza małosygnałowa:

środek pasma:



Rys. 21. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CC-CE dla środka pasma.

$$R_{in2} = R_{E4} \| R_{E5} \| r_{\pi 2} \qquad (92)$$

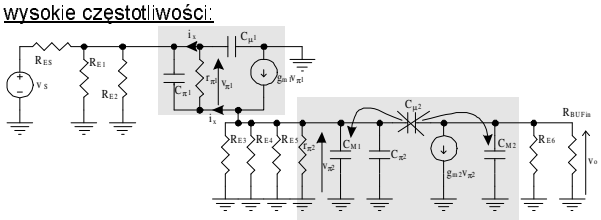
$$R_{in} = R_{E1} \| R_{E2} \| \left[r_{\pi 1} + (\beta + 1) \left(R_{E3} \| R_{in2} \right) \right] \qquad (93)$$

$$v_o = -g_{m2} \cdot v_{\pi 2} \cdot \left(R_{E6} \| R_{BUFin} \right) \qquad (94)$$

$$\frac{v_1}{v_{\pi 1}} = \frac{\left(R_{E3} \| R_{in2} \right)(\beta + 1)}{\left(R_{E3} \| R_{in2} \right)(\beta + 1) + r_{\pi 1}} \qquad (95)$$

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{ES}} \cdot \frac{\left(R_{E3} \| R_{in2} \right)(\beta + 1)}{\left(R_{E3} \| R_{in2} \right)(\beta + 1) + r_{\pi 1}} \cdot g_{m2} \cdot R_{E6} \| R_{BUFin} \qquad (96)$$

wysokie częstotliwości:



Rys. 22. Zastępczy schemat małosygnałowy dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

$$\tau_{H1} = C_{\mu 1} \left(R_{ES} \| R_{in} \right) \qquad (97)$$

$$\tau_{H2} = C_{\pi 1} \left(r_{\pi 1} \| R_X \right) \qquad (98)$$

$$\tau_{H3} = \left(C_{\pi 2} + C_{M2} \right) \left(R_{in2} \| R_{E3} \| \frac{r_{\pi 1} + R_{E1} \| R_{E2} \| R_{ES}}{\beta + 1} \right) \qquad (99)$$

$$\tau_{H4} = \left(C_{M2} + C_{BUFin} \right) \cdot \left(R_{E6} \| R_{BUFin} \right) \qquad (100)$$

Rezystancję R_X widzianą przez pojemność C_{p1} należy wyznaczyć z definicji:

$$v_{\pi 1} = i_x \cdot R_{ES} \| R_{E1} \| R_{E2} + \left(i_x - g_{m1} v_{\pi 1} \right) \cdot R_{E3} \| R_{in2}$$

$$v_{\pi 1} \left[1 + g_{m1} \left(R_{E3} \| R_{in2} \right) \right] = i_x \left(R_{ES} \| R_{E1} \| R_{E2} + R_{E3} \| R_{in2} \right)$$

$$R_X = \frac{v_{\pi 1}}{i_x} = \frac{R_{ES} \| R_{E1} \| R_{E2} + R_{E3} \| R_{in2}}{1 + g_{m1} \cdot \left(R_{E3} \| R_{in2} \right)} \qquad (101)$$

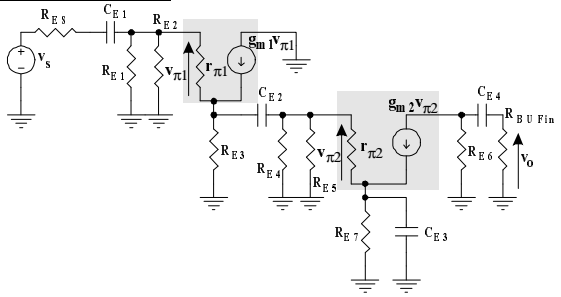
Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2} + \tau_{H3} + \tau_{H4})} \qquad (102)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{\tau_{H1}^2 + \tau_{H2}^2 + \tau_{H3}^2 + \tau_{H4}^2}} \qquad (103)$$

niskie częstotliwości:



Rys. 23. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza z rys. 20 dla częstotliwości niskich.

$$\tau_{I1} = C_{E1}\left(R_{ES} + R_{in}\right) \qquad (104)$$

$$\tau_{I2} = C_{E2}\left(R_{in2} + R_{E3} \left\| \frac{r_{\pi 1} + R_{ES} \left\| R_{E1} \right\| R_{E2}}{\beta + 1} \right.\right) \qquad (105)$$

$$\tau_{I3} = C_{E3} \cdot \left\{ R_{E7} \left\| \left[\frac{r_{\pi 2} + R_{E5} \left\| R_{E4} \right\| R_{E3} \left\| \frac{r_{\pi 1} + R_{ES} \left\| R_{E1} \right\| R_{E2}}{\beta + 1} \right.}{\beta + 1} \right] \right.\right\} \qquad (106)$$

$$\tau_{I4} = C_{E4} \cdot \left(R_{E6} + R_{BUFin}\right) \qquad (107)$$

Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$f_{I3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{I1}} + \frac{1}{\tau_{I2}} + \frac{1}{\tau_{I3}} + \frac{1}{\tau_{I4}}\right) \qquad (108)$$

ale lepiej zastosować wzór dokładniejszy:

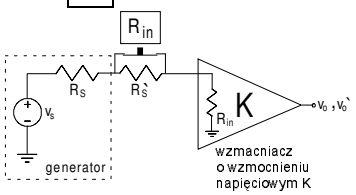
$$f_{I3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{\tau_{I1}^2} + \frac{1}{\tau_{I2}^2} + \frac{1}{\tau_{I3}^2} + \frac{1}{\tau_{I4}^2}} \qquad (109)$$

4.6 Pomiar rezystancji wejściowej

Rezystancję wejściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor R_S' włączony szeregowo z rezystancją wewnętrzną generatora R_S zwierany przełącznikiem $\boxed{R_{in}}$ umieszczonym na płycie czołowej. Normalnie rezystor R_S' jest zwarty, po naciśnięciu przycisku oznaczonego $\boxed{R_{in}}$ następuje jego rozwarcie, co powinno spowodować zmniejszenie wzmocnienia.

v_o - napięcie wyjściowe przy zwartym $\boxed{R_{in}}$

v_o' - napięcie wyjściowe przy rozwartym $\boxed{R_{in}}$ (naciśniętym przycisku $\boxed{R_{in}}$)



Rys. 24. Metoda pomiaru rezystancji wejściowej wzmacniacza.

$$v_o = K \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \cdot v_s \qquad (110)$$

$$v_o' = K \cdot \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S + R_S'} \cdot v_s \qquad (111)$$

$$\frac{v_o}{v_o'} = \frac{R_{in} + R_S + R_S'}{R_{in} + R_S} \qquad (112)$$

$$R_{in} = \frac{v_o'}{v_o - v_o'} \cdot R_S' - R_S \qquad (113)$$

Procedura pomiaru rezystancji wejściowej:

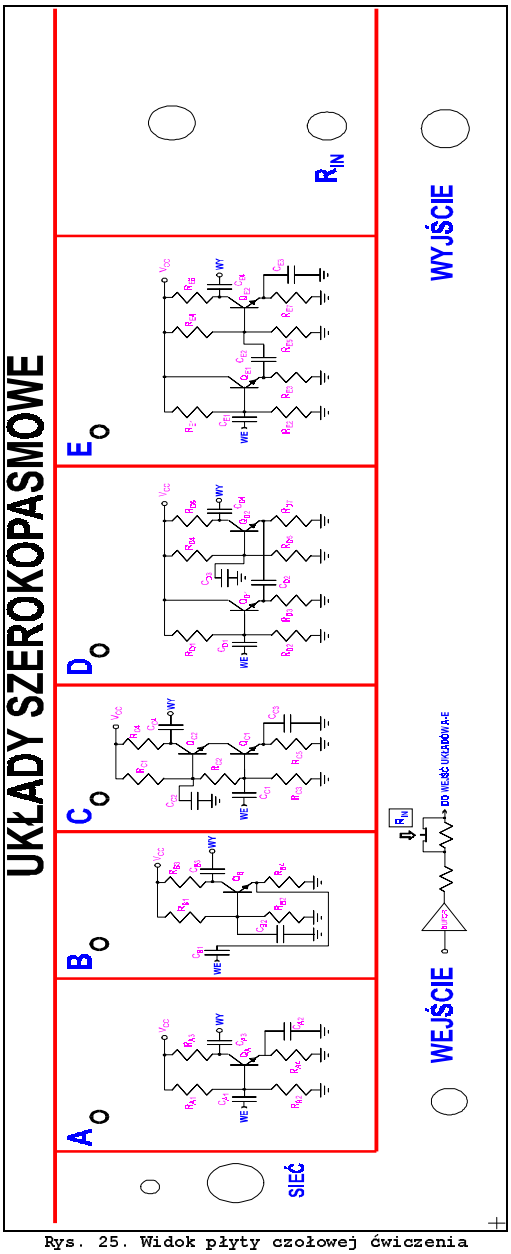
Aby zmierzyć rezystancję wejściową należy (dla stałej amplitudy napięcia na wejściu):

- zmierzyć napięcie na wyjściu układu v_o
- rozewrzeć rezystor R_S' (poprzez naciśnięcie i przytrzymanie przycisku $\boxed{R_{in}}$) i zmierzyć napięcie wyjściowe v_o'
- wyznaczyć rezystancję wejściową ze wzoru:

$$R_{in} = \frac{v_o'}{v_o - v_o'} \cdot R_S' - R_S \qquad (114)$$

4.7 Parametry tranzystorów i dane elementów:

Parametr	Wartość
β	240
C_μ	4.5pF
f_T	150MHz
V_{CC}	+12V
R_{AS}, R_{BS}, R_{CS}, R_{DS}, R_{ES}	500Ω
R_{AS}', R_{DS}', R_{ES}'	3kΩ
R_{BS}'	500Ω
R_{CS}'	2kΩ
R_{A1}, R_{B1}, R_{D1}, R_{D4}, R_{E1}, R_{E4}	18kΩ
R_{A2}, R_{B2}, R_{D2}, R_{D5}, R_{E2}, R_{E5}	6.8kΩ
R_{A3}, R_{B3}, R_{C4}, R_{D6}, R_{E6}	7.5kΩ
R_{A4}, R_{B4}, R_{C5}, R_{D3}, R_{D7}, R_{E3}, R_{E7}	5.1kΩ
R_{C1}	13kΩ
R_{C2}	3.9kΩ
R_{C3}	6.2kΩ
C_{A1}, C_{C1}, C_{D1}, C_{E1}	10nF
C_{A3}, C_{B1}, C_{B3}, C_{C4}, C_{D2}, C_{D4}, C_{E2}, C_{E4}	100nF
C_{A2}, C_{B2}, C_{C2}, C_{C3}, C_{D3}, C_{E3}	100μF
Dane bufora:	
R_{BUFin}	1MΩ
C_{BUFin}	20pF
R_{BUFout}	≈ 0Ω



Rys. 25. Widok płyty czołowej ćwiczenia

Literatura:

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

[2] A. Guziński, „Linowe elektroniczne układy analogowe" WNT 1992.

[3] A. Filipkowski, „Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe", WNT 1978.