Podstawowe układy pracy tranzystora MOS

11

Ćwiczenie opracował Bogdan Pankiewicz

1. Wstęp

Ćwiczenie umożliwia pomiar i porównanie właściwości trzech podstawowych konfiguracji pracy tranzystora MOS. Są to kolejno układ wspólnego źródła (CS), wspólnej bramki (CG) oraz wspólnego drenu (CD). 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. Poszczególne konfiguracje wybiera się przy pomocy przełącznika obrotowego, który poprzez przekaźniki, przełącza pomiędzy trzema układami CS, CG i CD. Czwarta pozycja przełącznika wykorzystana jest do bezpośredniego zwarcia gniazda sygnału wejściowego z gniazdem wyjściowym. Umożliwia to pomiar napięcia wejściowego i wyjściowego przy pomocy jednego i tego samego przyrządu. Poszczególne układy wykonano tak, aby zapewniały niemalże identyczne warunki zasilania tranzystorów. Różnice pomiędzy parametrami wzmacniaczy wynikają więc głównie z różnych konfiguracji pracy elementu aktywnego, co umożliwia jakościowe porównanie układów. Dla uniezależnienia się od parametrów przyrządów pomiarowych oraz jakości połączeń, w każdym ze wzmacniaczy wbudowano bufor o wzmocnieniu jednostkowym.

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

2. Pomiary

Dla każdego z układów CS, CG i CD należy:

a) zmierzyć wzmocnienie dla środka pasma v_o/v_s (warunki pomiaru: sygnał wejściowy o częstotliwości 5kHz i napięciu ok. 30mV dla CS oraz CG, dla układu CD ok. 300mV).

b) zmierzyć rezystancję wejściową (sygnał wejściowy jw., opis w części teoretycznej).

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

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

$$R_{IN} = \frac{v_o'}{v_o - v_o'} \cdot R_{SZER} - R_{GEN} \qquad (1)$$

c) zmierzyć rezystancję wyjściową (sygnał wejściowy jak w pkt. a, opis w części teoretycznej).

Aby zmierzyć rezystancję wyjściową należy (dla ustalonej amplitudy napięcia na wejściu):

- zmierzyć napięcie na wyjściu układu $\mathbf{v_o}$;
- zewrzeć rezystor $\mathbf{R_{RÓW}}$ (poprzez naciśnięcie i przytrzymanie przycisku $\boxed{R_{OUT}}$) i zmierzyć napięcie wyjściowe $\mathbf{v_o'}$;
- wyznaczyć rezystancję wyjściową ze wzoru:

$$R_{OUT} = \frac{R_L \| R_{BUF} \left(1 - \frac{v_0}{v_0'}\right)}{\frac{v_0}{v_0'} - \frac{R_L \| R_{BUF}}{R_L \| R_{BUF} \| R_{RÓW}}} \qquad (2)$$

d) zmierzyć dolną i górną 3-decybelową częstotliwość graniczną (f_{3dBL}, f_{3dBH}). Pomiar należy wykonać w następujący sposób:

- ustawić częstotliwość generatora na 5kHz,
- 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 $300mV/\sqrt{2}$, uzyskana wartość jest odpowiednią częstotliwością graniczną.

e) zmierzyć amplitudową charakterystykę częstotliwościową w zakresie od 30Hz do f_{3dBL} oraz od f_{3dBH} do 2MHz w rastrze częstotliwości 1, 2, 4, 7, 10 (tj. np. dla 10Hz, 20Hz, 40Hz, 70Hz, 100Hz, ...). Zmierzoną charakterystykę należy nanieść na wykres. Oś pionowa powinna być wzmocnieniem wyrażonym w mierze logarytmicznej tj. $20\log_{10}|V_O/V_{IN}|$, oś pozioma (częstotliwość sygnału pomiarowego) powinna być logarytmiczna.

Przykłady tabel pomiarowych

	CS	CG	CD
V_o/V_{in} [V/V]			
R_{in} [kΩ]			
R_{out} [kΩ]			
f_{3dBL} [Hz]			
f_{3dBH} [kHz]			

f [Hz]	30	40	...	f_{3dBL}	f_{3dBH}	...	1M	2M
V_0/V_{IN}								

3. Opracowanie wyników

Dla układów CS, CG oraz CD należy obliczyć teoretycznie:

- punkty pracy tranzystorów,
- wzmocnienie małosygnałowe v_o/v_{in},
- częstotliwości 3-decybelowe górne i dolne,
- rezystancję wejściową i wyjściową.

Wyniki obliczeń należy umieścić tak, aby można było łatwo porównać je 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 z pomiarami.

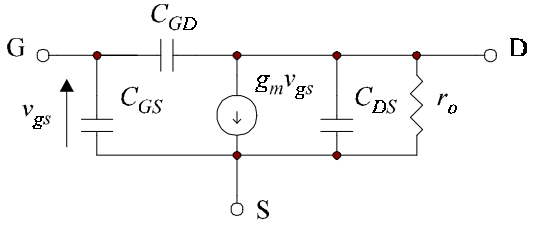
4. Teoria

W ćwiczeniu wykonane są trzy wzmacniacze oznaczone konfiguracjami pracy tranzystorów tj. CS, CG oraz CD. 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_{GEN}	Ω	50
Pojemność wejściowa C_{BUF}	pF	3
Częstotliwość graniczna	MHz	4

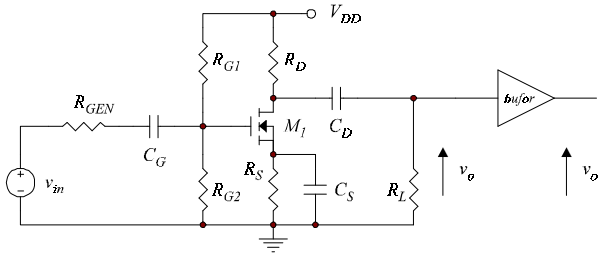
Małosygnałowy model zastępczy tranzystora MOS przedstawiony jest na rysunku 1,



Rys. 1. Małosygnałowy schemat zastępczy tranzystora MOS.

gdzie: $g_m = 2\sqrt{K_N I_D}$, $I_D = K_N (V_{GS} - V_T)^2$, $r_O = V_A / I_D$, V_T - napięcie progowe, $K_N = 0{,}5 k_n W/L$ - parametr transkonduktacyjny tranzystora MOS, W, L - wymiary geometryczne obszaru kanału elementu, k_n - ruchliwość nośników w kanale. Parametry tranzystorów wykorzystanych w ćwiczeniu podane są w tabeli na końcu opracowania. Ze względu na dużą wartość napięcia V_A tych elementów, rezystancja wyjściowa tranzystorów MOS w niniejszym ćwiczeniu została pominięta.

4.1 Układ w konfiguracji wspólnego źródła (CS):

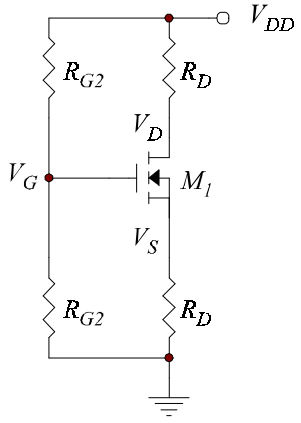


Rys. 2. Schemat wzmacniacza z tranzystorem MOS w konfiguracji wspólnego źródła (CS).

4.1.1 Punkt pracy

Ze względu na brak przepływu prądu przez bramkę tranzystora MOS napięcie stałe na jej wyprowadzeniu można obliczyć korzystając z zależności na dzielnik napięciowy:

$$V_G = V_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \tag{3}$$



Rys. 3. Schemat do wyznaczenia punktu pracy tranzystora.

Napięcie na wyprowadzeniu źródła jest równe spadkowi napięcia na rezystorze R_S, stąd napięcie bramka - źródło można wyrazić wzorem: $V_{GS} = V_G - I_D R_S$; natomiast prąd drenu można wyznaczyć z układu równań:

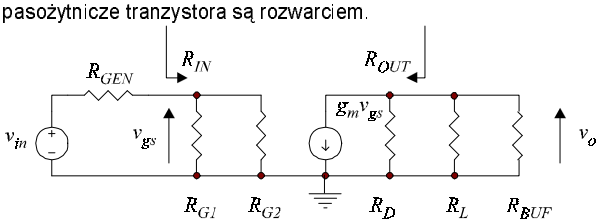
$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - I_D R_S \\ I_D = K_N (V_{GS} - V_T)^2 \end{cases} \tag{4}$$

Rozwiązaniami powyższego układu równań są dwa różne prądy, z których ten prawidłowy spełnia nierówność: $V_{GS} = V_G - I_D R_S > V_T$. Znając wartość prądu drenu można wyznaczyć napięcia na źródle i drenie tranzystora MOS jako: $V_S = I_D R_S$ oraz $V_D = V_{DD} - I_D R_D$. W przypadku, gdy spełniona jest nierówność: $V_D \geq V_S - V_T$, tranzystor pracuje w zakresie nasycenia, a jego transkonduktancja wynosi: $g_m = 2\sqrt{K_N I_D}$.

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 CS dla zakresu częstotliwości średnich.

$$R_{IN} = R_{G1} \| R_{G2} \tag{5}$$

$$R_{OUT} = R_D \tag{6}$$

$$v_0 = -g_m v_{gs} \left(R_D \| R_L \| R_{BUF} \right) \tag{7}$$

$$v_{gs} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} v_{in} \tag{8}$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_{in}} = -\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} g_m \left(R_D \| R_L \| R_{BUF} \right)} \tag{9}$$

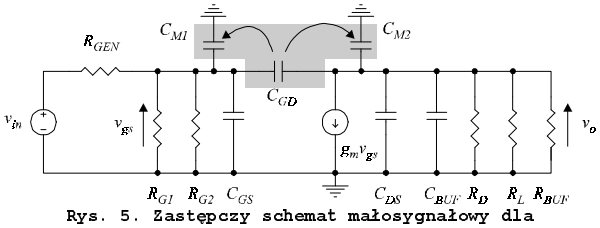
Wysokie częstotliwości:

Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe, powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora MOS. Korzystając z twierdzenia Millera, pojemność C_{GD} można zamienić (patrz rys. 5) na pojemności C_{M1} i C_{M2}.

$$K = \frac{v_o}{v_{gs}} = -g_m \left(R_D \| R_L \| R_{BUF} \right) \tag{10}$$

$$C_{M1} = C_{gd} (1 - K) \tag{11}$$

$$C_{M2} = C_{gd} \left(1 - \frac{1}{K} \right) \tag{12}$$



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

Po zamianie C_{GD}, w układzie są dwie stałe czasowe o następujących wartościach:

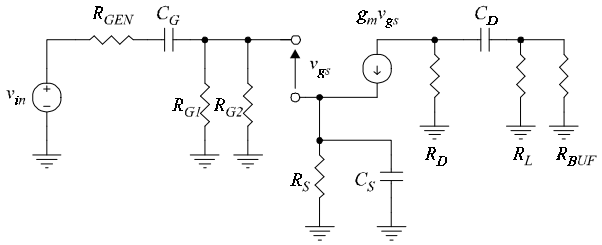
$$\tau_{H1} = (C_{M1} + C_{GS}) \cdot \left(R_{in} \| R_{GEN} \right) \tag{13}$$

$$\tau_{H2} = (C_{M2} + C_{BUF}) \cdot \left(R_D \| R_L \| R_{BUF} \right) \tag{14}$$

Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2})} \tag{15}$$

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 MOS traktuje się jako rozwarcia.



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

Wykorzystując schemat zastępczy z rys. 6 poszczególne stałe czasowe związane z kolejnymi pojemnościami można wyrazić nastąpująco:

$$\tau_{L1} = C_G\left(R_{GEN} + R_{G1} \| R_{G2}\right) \tag{16}$$

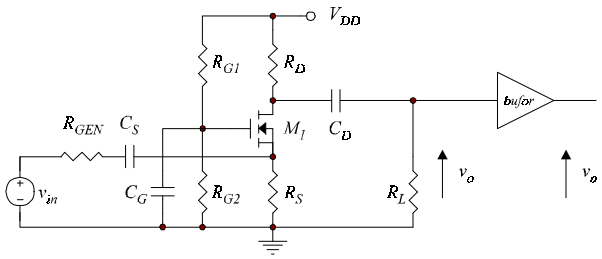
$$\tau_{L2} = C_S\left(R_S \left\| \frac{1}{g_m}\right.\right) \tag{17}$$

$$\tau_{L3} = C_D\left(R_D + R_L \| R_{BUF}\right) \tag{18}$$

Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}} + \frac{1}{\tau_{L3}}\right) \tag{19}$$

4.2 Układ w konfiguracji wspólnej bramki (CG):



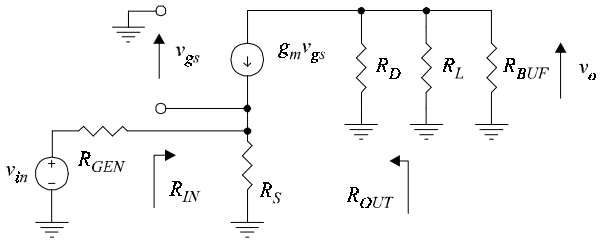
Rys. 7. Schemat wzmacniacza z tranzystorem MOS w konfiguracji wspólnej bramki (CG).

4.1.1 Punkt pracy

Punkt pracy liczy się identycznie jak dla układu w konfiguracji CS.

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 CG z rys. 7 dla zakresu częstotliwości średnich.

$$R_{IN} = R_S \left\| \frac{1}{g_m}\right. \tag{20}$$

$$R_{OUT} = R_D \tag{21}$$

$$v_0 = -g_m v_{gs}\left(R_D \| R_L \| R_{BUF}\right) \tag{22}$$

$$v_{gs} = -\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}}\, v_{in} \tag{23}$$

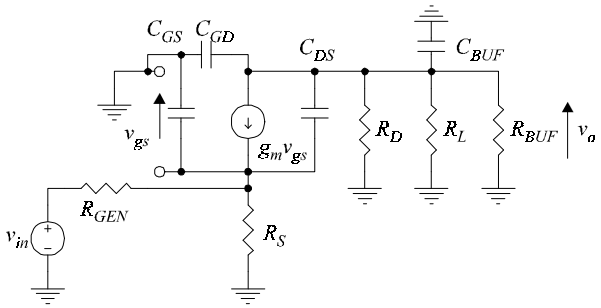
$$\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}}\, g_m\left(R_D \| R_L \| R_{BUF}\right) \tag{24}$$

Wysokie częstotliwości:
Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora MOS. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasożytniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasożytnicze stanowią rozwarcie. Z rys. 9 wynika, że poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{H1} = C_{GS}\left(R_{GEN} \left\| R_S \right\| \frac{1}{g_m}\right) \tag{25}$$

$$\tau_{H2} = \left(C_{GD} + C_{BUF}\right) \cdot \left(R_D \| R_L \| R_{BUF}\right) \tag{26}$$

$$\tau_{H3} = C_{DS}\left(R_D \| R_L \| R_{BUF} + \frac{R_D \| R_L \| R_{BUF}\, g_m - 1}{\frac{1}{R_{GEN} \| R_S} - g_m}\right) \tag{27}$$

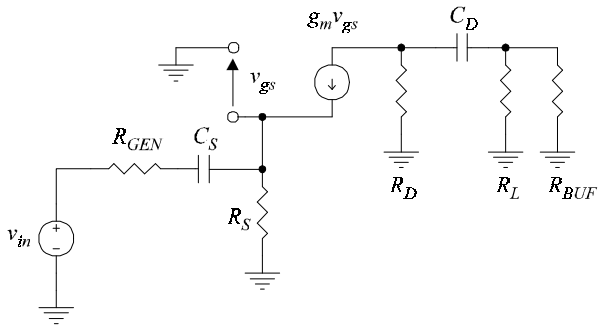


Rys. 9. Zastępczy schemat małosygnałowy układu CG dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2} + \tau_{H3})} \tag{28}$$

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 MOS traktuje się jako rozwarcia. Stała czasowa związana z pojemnością C_G nie występuje ze względu na nie przechodzenie sygnału z wyprowadzenia źródła na wyprowadzenie bramki (ze względu na nieskończenie wielką rezystancję bramki).



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

Wykorzystując schemat zastępczy z rys.10, poszczególne stałe czasowe są równe:

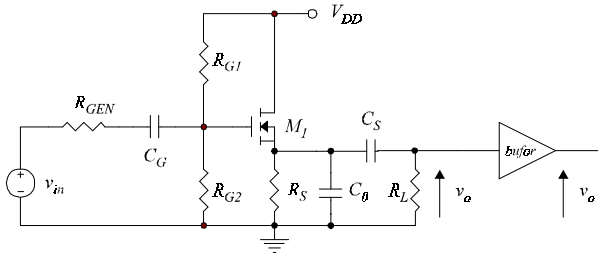
$$\tau_{L1} = C_S\left(R_{GEN} + R_S\left\|\frac{1}{g_m}\right.\right) \tag{29}$$

$$\tau_{L2} = C_D\left(R_D + R_L\|R_{BUF}\right) \tag{30}$$

Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}}\right)} \tag{31}$$

4.3 Układ w konfiguracji wspólnego drenu (CD):



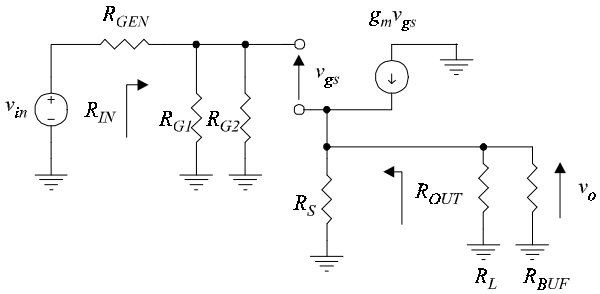
Rys. 11. Schemat wzmacniacza z tranzystorem MOS w konfiguracji wspólnego drenu (CG).

4.3.1 Punkt pracy

Punkt pracy liczy się jak dla układu w konfiguracji CS. Jedyną różnicą jest to, że napięcie stałe na wyprowadzeniu drenu tranzystora jest równe napięciu zasilania.

4.3.2 Analiza małosygnałowa:

Środek pasma:
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. Dodatkowa niewielka pojemność C_0 (35pF) ma wpływ na wysokie częstotliwości, więc w środku pasma można ją traktować jako rozwarcie.



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

Na podstawie schematu przedstawionego na rys. 12 poszczególne rezystancje, napięcia oraz wzmocnienie można określić następująco:

$$R_{IN} = R_{G1}\|R_{G2} \tag{32}$$

$$R_{OUT} = R_S\left\|\frac{1}{g_m}\right. \tag{33}$$

$$v_0 = g_m v_{gs}\left(R_S\|R_L\|R_{BUF}\right) \tag{34}$$

$$v_g = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}}\, v_{in} \tag{35}$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = v_g - v_0 = v_g - g_m v_{gs}\left(R_S\|R_L\|R_{BUF}\right) \tag{36}$$

$$v_{gs} = v_g \frac{1}{1 + g_m\left(R_S\|R_L\|R_{BUF}\right)} \tag{37}$$

$$\boxed{\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} \frac{g_m\left(R_S\|R_L\|R_{BUF}\right)}{1 + g_m\left(R_S\|R_L\|R_{BUF}\right)}} \tag{38}$$

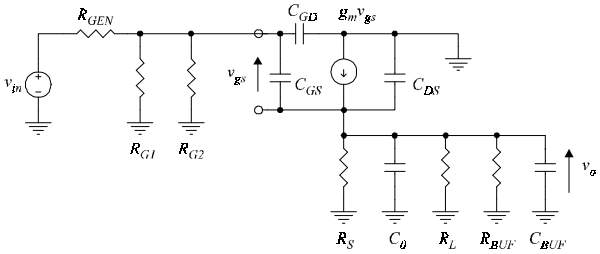
Wysokie częstotliwości:
Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasożytniczymi tranzystora MOS. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasożytniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasożytnicze stanowią rozwarcie. Korzystając z rys. 13 poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{H1} = C_{GD}\left(R_{GEN}\|R_{G1}\|R_{G2}\right) \tag{39}$$

$$\tau_{H2} = \left(C_{DS} + C_0 + C_{BUF}\right)\cdot\left(\frac{1}{g_m}\left\|R_S\right\|R_L\|R_{BUF}\right) \tag{40}$$

$$\tau_{H3} = C_{GS}\left(\frac{R_{GEN}\|R_{G1}\|R_{G2} + R_S\|R_L\|R_{BUF}}{1 + g_m R_S\|R_L\|R_{BUF}}\right) \tag{41}$$

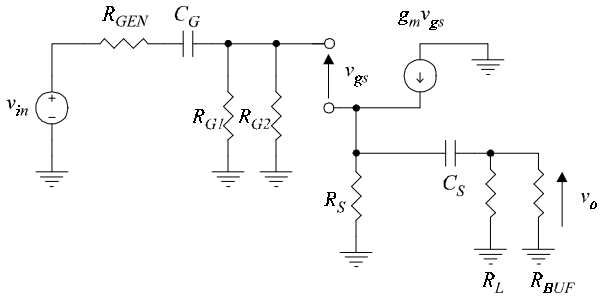
$$\boxed{f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi\cdot\left(\tau_{H1} + \tau_{H2} + \tau_{H3}\right)}} \tag{42}$$



Rys. 13. Zastępczy schemat małosygnałowy układu CD z rys. 11 dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

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 oraz niewielką pojemność C_0 traktuje się jako rozwarcia.



Rys. 14. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza z rys. 11 dla częstotliwości niskich.

Według rys. 14 poszczególne stałe czasowe odpowiadające za częstotliwość graniczną dolną są równe:

$$\tau_{L1} = C_G\left(R_{GEN} + R_{G1} \| R_{G2}\right) \tag{43}$$

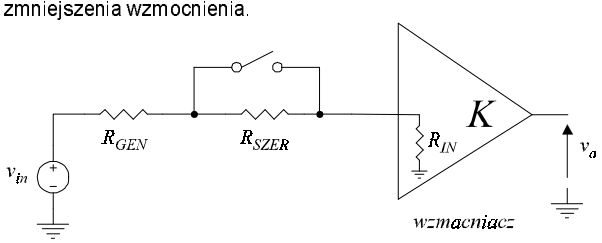
$$\tau_{L2} = C_S\left(\frac{1}{g_m} \| R_S + R_L \| R_{BUF}\right) \tag{44}$$

Częstotliwość trzydecybelową dolną można wyznaczyć za pomocą wzoru przybliżonego:

$$\boxed{f_{L3dB} \approx \frac{1}{2\pi}\left(\frac{1}{\tau_{L1}} + \frac{1}{\tau_{L2}}\right)} \tag{45}$$

4.4 Pomiar rezystancji wejściowej wzmacniaczy

Rezystancję wejściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor R_{SZER} włączony szeregowo z rezystancją wewnętrzną generatora R_{GEN}. Podczas normalnej pracy jest on zwierany przez przełącznik umieszczony na płycie czołowej. Po naciśnięciu przycisku oznaczonego $\boxed{R_{IN}}$ następuje rozwarcie, powodujące dołączenie rezystora R_{SZER}, co prowadzi do zmniejszenia wzmocnienia.



Rys. 15. Metoda pomiaru rezystancji wejściowej wzmacniacza.

Oznaczając odpowiednio napięcia wyjściowe przy zwartym i rozwartym rezystorze R_{SZER} jako v_0 oraz v_0', otrzymujemy:

$$v_o = K \cdot \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} \cdot v_{in} \tag{46}$$

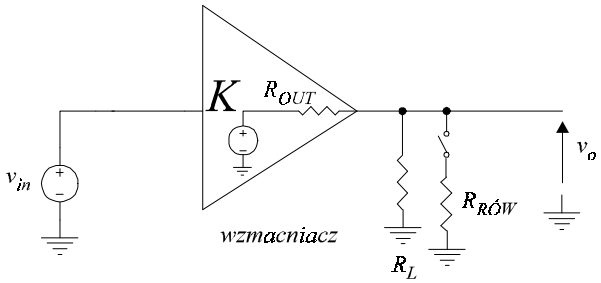
$$v_o' = K \cdot \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN} + R_{SZER}} \cdot v_{in} \tag{47}$$

$$\frac{v_o}{v_o'} = \frac{R_{IN} + R_{GEN} + R_{SZER}}{R_{IN} + R_{GEN}} \tag{48}$$

$$\boxed{R_{IN} = \frac{v_o'}{v_o - v_o'} \cdot R_{SZER} - R_{GEN}} \tag{49}$$

4.5 Pomiar rezystancji wyjściowej wzmacniaczy

Rezystancję wyjściową mierzy się wykorzystując dodatkowy rezystor $R_{RÓW}$ włączany równolegle z rezystancją obciążenia wzmacniacza R_L. Podczas normalnej pracy rezystor $R_{RÓW}$ jest odłączony. W czasie pomiaru rezystancji dołącza się go przełącznikiem umieszczonym na płycie czołowej i oznaczonym $\boxed{R_{OUT}}$.



Rys. 16. Metoda pomiaru rezystancji wyjściowej wzmacniacza.

Oznaczając odpowiednio napięcia wyjściowe przy odłączonym i dołączonym rezystorze $R_{RÓW}$ jako v_0 oraz v_0', otrzymujemy:

$$v_o = K \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \cdot v_{in} \tag{50}$$

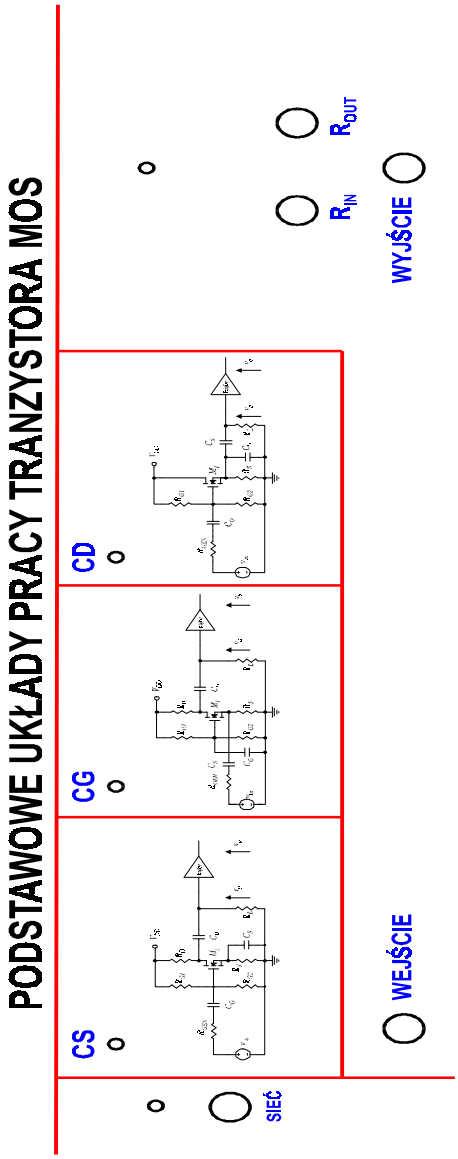
$$v_o' = K \cdot \frac{R_L \| R_{RÓW}}{R_L \| R_{RÓW} + R_{OUT}} \cdot v_{in} \tag{51}$$

$$\frac{v_o}{v_o'} = \frac{R_L \| R_{RÓW} + R_{OUT}}{R_L \| R_{RÓW}} \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \tag{52}$$

$$\boxed{R_{OUT} = \frac{R_L\left(1 - \frac{v_0}{v_0'}\right)}{\frac{v_0}{v_0'} - \frac{R_L}{R_L \| R_{RÓW}}}} \tag{53}$$

4.6 Dane elementów i parametry tranzystorów w poszczególnych konfiguracjach układowych.

Parametr	Jednostki	CS	CG	CD
K_N	µS	312,32	323,46	309,15
V_T	V	1,272	1,264	1,252
C_{DS}	pF	12,34	12,36	11,42
C_{GS}	pF	9,33	9,74	8,99
C_{GD}	pF	1,7	1,84	1,93
R_{GEN}	Ω	50	50	50
R_{BUF}	MΩ	1	1	1
C_{BUF}	pF	3	3	3
C_0	pF	nie ma	nie ma	35
R_{SZER}	kΩ	300,8	2,87	306,5
$R_{RÓW}$	kΩ	21,8	20,49	3,142
C_G	nF	9,15	9,20	9,17
C_S	µF	0,98	0,98	1,001
C_D	nF	100	100	100
R_{G1}	kΩ	752,8	755,5	754,5
R_{G2}	kΩ	479	481,3	480,6
R_S	kΩ	21,97	22,26	22,31
R_D	kΩ	46,68	46,83	nie ma
R_L	kΩ	46,8	46,78	13,35
V_{DD}	V	12	12	12



Rys. 17. Widok płyty czołowej ćwiczenia.

Literatura:

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

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

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