

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 przekładniki, 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:

- zmierzyć wzmocnienie dla środka pasma v_o/v_{in} (warunki pomiaru: sygnał wejściowy o częstotliwości 5kHz i napięciu około 50mV dla CS oraz CG, dla układu CD ok. 500mV- tak aby sygnał wyjściowy był w zakresie 300-500mV).
- 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 v_o ;
- rozewrzeć rezystor R_{SZER} (poprzez naciśnięcie i przytrzymanie przycisku R_{IN}) i zmierzyć napięcie wyjściowe v_o' ;
- wyznaczyć rezystancję wejściową ze wzoru:

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

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

$$R_{OUT} = \frac{R_L \parallel R_{BUF} \left(1 - \frac{v_o'}{v_o}\right)}{\frac{v_o'}{v_o} - \frac{R_L \parallel R_{BUF}}{R_{RÓW}}} \quad (2)$$

- 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 v_{o_max} w przedziale 300-500mV,
- 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.

- 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, ...). Zmierzona charakterystykę należy nanieść na wykres. Oś pionowa powinna być wzmocnieniem wyrażonym w mierze logarytmicznej tj. $20\log|v_o/v_{in}|$, 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_o/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 górna i dolna). Zamieścić własne wnioski i spostrzeżenia. Porównać układy pomiędzy sobą, a także skomentować zgodność obliczeń z pomiarami.

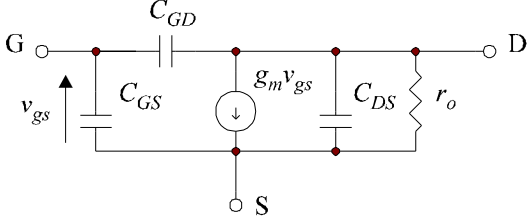
4. Teoria

W ćwiczeniu wykonane są trzy wzmacniacze oznaczone konfiguracjami pracy tranzystorów tj. CS, CG oraz CD. Wszystkie układy posiadają wbudowane bufor 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

4B-2

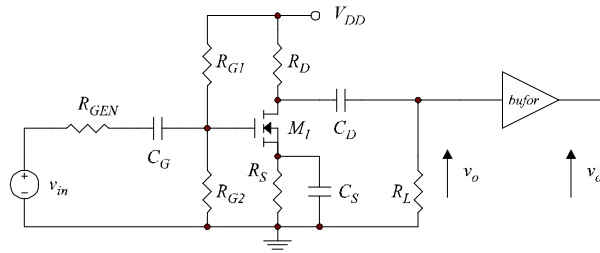
Małosygnałowy model zastępczy tranzystora MOS przedstawiony jest na rysunku 1,



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, $K_N = 0,5k_n W/L$ - 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):

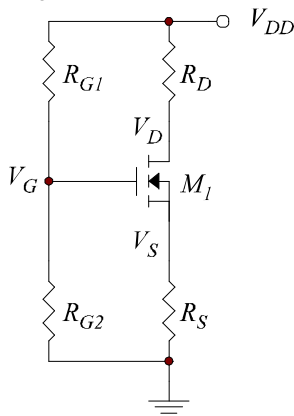


Rys. 2. Schemat wzmacniacza z tranzystorem MOS w konfiguracji wspólnego źródła (CS).

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:

$$V_G = V_{DD} \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \quad (3)$$



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:

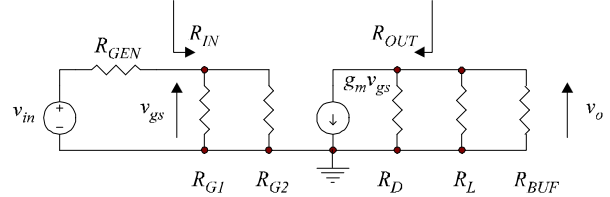
$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - I_D R_S \\ I_D = K_N (V_{GS} - V_T)^2 \end{cases} \quad (4)$$

Rozwiązaniem 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: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$, 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 pasywnicze tranzystora są rozwarcie.



Rys. 4. Zastępczy schemat małosygnałowy wzmacniacza w układzie CS dla zakresu częstotliwości średnich.

$$R_{IN} = R_{G1} \parallel R_{G2} \quad (5)$$

$$R_{OUT} = R_D \quad (6)$$

$$v_o = -g_m v_{gs} (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (7)$$

$$v_{gs} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} v_{in} \quad (8)$$

$$\frac{v_o}{v_{in}} = -\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} g_m (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (9)$$

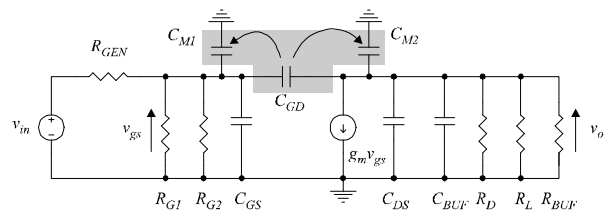
Wysokie częstotliwości:

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

$$K = \frac{v_o}{v_{gs}} = -g_m (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (10)$$

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

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



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

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

$$\tau_{H1} = (C_{M1} + C_{GS}) \cdot (R_{in} \parallel R_{GEN}) \quad (13)$$

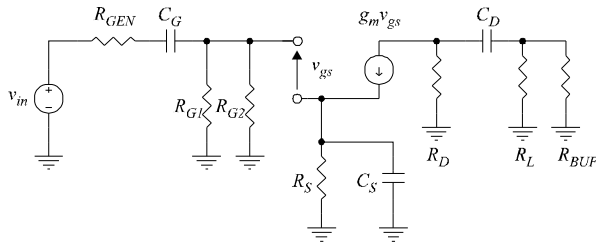
$$\tau_{H2} = (C_{M2} + C_{BUF} + C_{DS}) \cdot (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (14)$$

Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

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

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 pasozytnicze 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 następująco:

$$\tau_{L1} = C_G (R_{GEN} + R_{G1} \parallel R_{G2}) \quad (16)$$

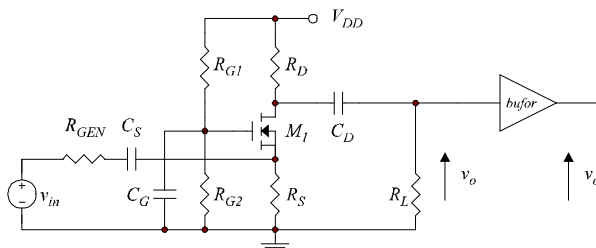
$$\tau_{L2} = C_S \left(R_S \parallel \frac{1}{g_m} \right) \quad (17)$$

$$\tau_{L3} = C_D (R_D + R_L \parallel R_{BUF}) \quad (18)$$

Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

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

4.2 Układ w konfiguracji wspólnej bramki (CG):



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

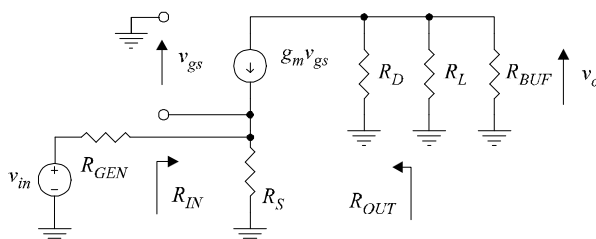
4.1.1 Punkt pracy

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 pasozytnicze tranzystora są rozwarciem.



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

$$R_{IN} = R_S \parallel \frac{1}{g_m} \quad (20)$$

$$R_{OUT} = R_D \quad (21)$$

$$v_0 = -g_m v_{gs} (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (22)$$

$$v_{gs} = -\frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} v_{in} \quad (23)$$

$$\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} g_m (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (24)$$

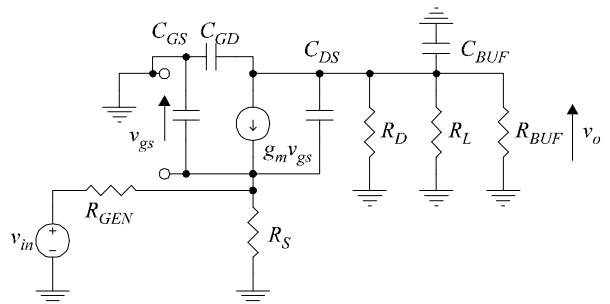
Wysokie częstotliwości:

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

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

$$\tau_{H2} = (C_{GD} + C_{BUF}) \cdot (R_D \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (26)$$

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



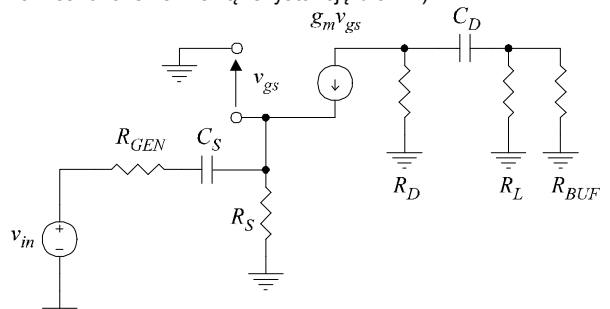
Rys. 9. Zastępczy schemat małosygnałowy układu CG dla wyznaczenia częstotliwości granicznej górnej.

Przybliżona częstotliwość graniczna górna może być określona wzorem:

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

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 pasozytnicze 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:

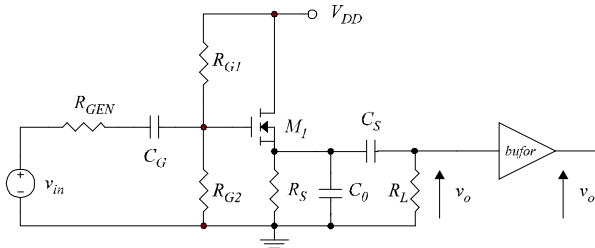
$$\tau_{L1} = C_S \left(R_{GEN} + R_S \parallel \frac{1}{g_m} \right) \quad (29)$$

$$\tau_{L2} = C_D (R_D + R_L \parallel R_{BUF}) \quad (30)$$

Przybliżona częstotliwość graniczna dolna może być określona wzorem:

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

4.3 Układ w konfiguracji wspólnego drenu (CD):



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

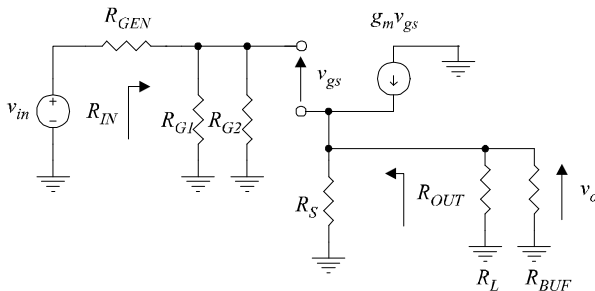
4.3.1 Punkt pracy

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 pasywnicze tranzystora są rozwarciem. Dodatkowa niewielka pojemność \$C_0\$ (35pF) ma wpływ na wysokie częstotliwości, więc w środku pasma można ją traktować jako rozwarciem.



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:

$$R_{IN} = R_{G1} \parallel R_{G2} \quad (32)$$

$$R_{OUT} = R_S \parallel \frac{1}{g_m} \quad (33)$$

$$v_0 = g_m v_{gs} (R_S \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (34)$$

$$v_g = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} v_{in} \quad (35)$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = v_g - v_0 = v_g - g_m v_{gs} (R_S \parallel R_L \parallel R_{BUF}) \quad (36)$$

$$v_{gs} = v_g \frac{1}{1 + g_m (R_S \parallel R_L \parallel R_{BUF})} \quad (37)$$

$$\frac{v_0}{v_{in}} = \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN}} \frac{g_m (R_S \parallel R_L \parallel R_{BUF})}{1 + g_m (R_S \parallel R_L \parallel R_{BUF})} \quad (38)$$

Wysokie częstotliwości:

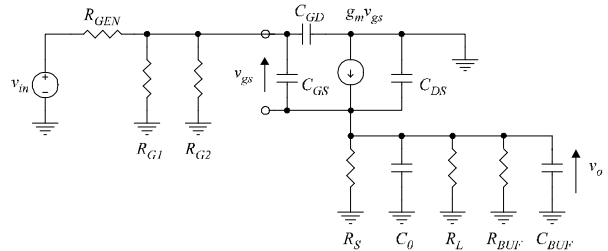
Częstotliwość graniczna górna wyznaczona jest w oparciu o stałe czasowe powiązane z odpowiednimi pojemnościami pasywniczymi tranzystora MOS. Stałe te liczy się dla danej pojemności pasywniczej przy założeniu, że pozostałe pojemności pasywnicze stanowią rozwarciem. Korzystając z rys. 13 poszczególne stałe czasowe są równe:

$$\tau_{H1} = C_{GD} (R_{GEN} \parallel R_{G1} \parallel R_{G2}) \quad (39)$$

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

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

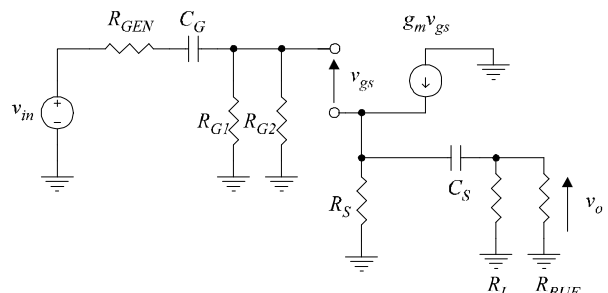
$$f_{H3dB} \approx \frac{1}{2\pi \cdot (\tau_{H1} + \tau_{H2} + \tau_{H3})} \quad (42)$$



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 pasywnicze tranzystora oraz niewielką pojemność \$C_0\$ traktuje się jako rozwarciem.



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:

$$\tau_{L1} = C_G (R_{GEN} + R_{G1} \parallel R_{G2}) \quad (43)$$

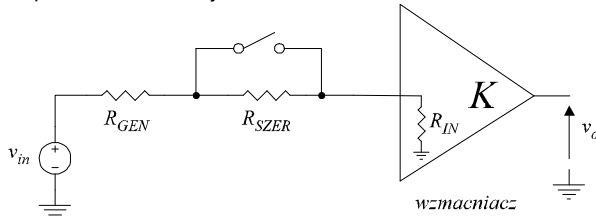
$$\tau_{L2} = C_S \left(\frac{1}{g_m} \parallel R_S + R_L \parallel R_{BUF} \right) \quad (44)$$

Częstotliwość trzydecybelową dolną można wyznaczyć za pomocą wzoru przybliżonego:

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

4.4 Pomiar rezystancji wejściowej wzmacniacza

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 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_o oraz v_o' , otrzymujemy:

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

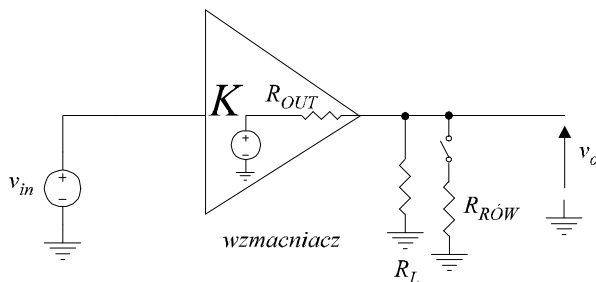
$$v_o' = K \cdot \frac{R_{IN}}{R_{IN} + R_{GEN} + R_{SZER}} \cdot v_{in} \quad (47)$$

$$\frac{v_o}{v_o'} = \frac{R_{IN} + R_{GEN} + R_{SZER}}{R_{IN} + R_{GEN}} \quad (48)$$

$$R_{IN} = \frac{v_o' - v_o}{v_o - v_o'} \cdot R_{SZER} - R_{GEN} \quad (49)$$

4.5 Pomiar rezystancji wyjściowej wzmacniacza

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 R_{OUT} .



Rys. 16. Metoda pomiaru rezystancji wyjściowej wzmacniacza.

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

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

$$v_o' = K \cdot \frac{R_L \parallel R_{RÓW}}{R_L \parallel R_{RÓW} + R_{OUT}} \cdot v_{in} \quad (51)$$

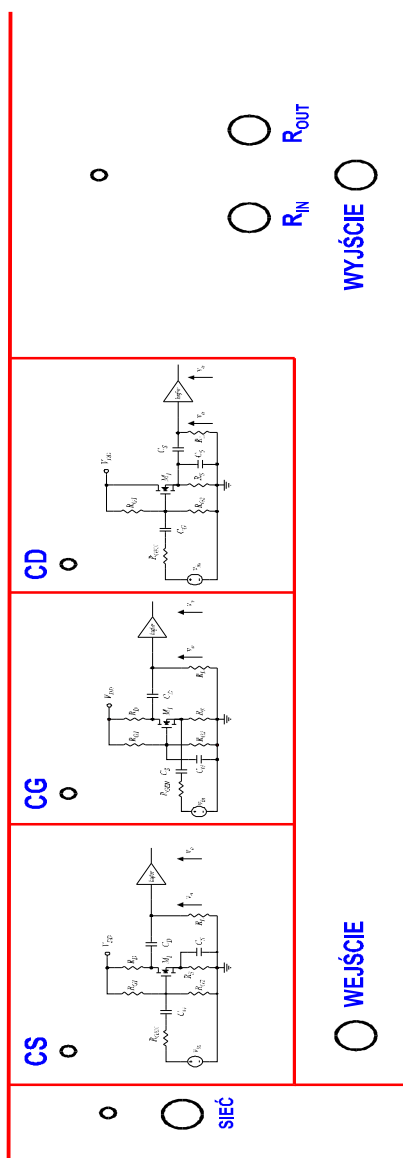
$$\frac{v_o}{v_o'} = \frac{R_L \parallel R_{RÓW} + R_{OUT}}{R_L} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_{OUT}} \quad (52)$$

$$R_{OUT} = \frac{R_L \left(1 - \frac{v_o}{v_o'} \right)}{\frac{v_o}{v_o'} - \frac{R_L}{R_L \parallel R_{RÓW}}} \quad (53)$$

4.6 Dane elementów i parametry tranzystorów w poszczególnych konfiguracjach układowych.

Parametr	Jednostki	CS	CG	CD
K_N	$\mu A/V^2$	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}	M Ω	1	1	1
C_{BUF}	pF	3	3	3
C_0	pF	nie ma	nie ma	35
R_{SZER}	k Ω	300,8	2,87	306,5
$R_{RÓW}$	k Ω	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}	k Ω	752,8	755,5	754,5
R_{G2}	k Ω	479	481,3	480,6
R_S	k Ω	21,97	22,26	22,31
R_D	k Ω	46,68	46,83	nie ma
R_L	k Ω	46,8	46,78	13,35
V_{DD}	V	12	12	12

PODSTAWOWE UKŁADY PRACY TRANZYSTORA MOS



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.