

Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure
Appello del 4/2/2022

Nome: _____ SOLUZIONE _____
Cognome: _____
Matricola: _____

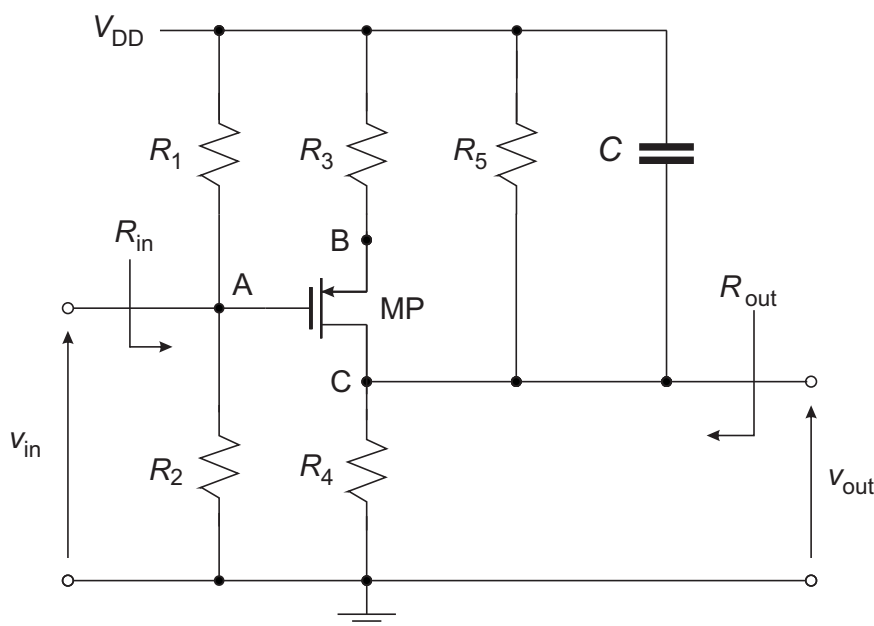
ATTENZIONE

1. Compilare subito questa pagina con nome, cognome e numero di matricola
2. Per i quesiti a risposta multipla, la risposta errata determina la sottrazione di un punteggio pari a metà del valore della risposta esatta
3. Riportare le **risposte esatte** dei quesiti a risposta multipla nella tabella posta all'inizio della relativa sezione
4. Le risposte ai vari quesiti vanno riportate **esclusivamente** nello spazio reso disponibile immediatamente dopo il quesito stesso
5. Si può fare uso di fogli di brutta **bianchi** resi disponibili a cura dello studente. La brutta non deve essere consegnata
6. Non si possono utilizzare libri, appunti o formulari

Domande a risposta multipla

	1	2	3	4	5	6
a		X			X	X
b	X			X		
c						
d			X			

- Un amplificatore operazionale con amplificazione differenziale a bassa frequenza pari a 80dB, prodotto banda-guadagno pari a 2MHz, resistenze d'ingresso e uscita trascurabili (cioè $R_{in,d} \rightarrow \infty$, $R_{in,cm} \rightarrow \infty$, $R_{out} = 0$), è utilizzato in un amplificatore di tensione invertente con amplificazione di tensione in banda pari a -1. La banda dell'amplificatore di tensione invertente è pari a:
 - 200Hz
 - 1MHz
 - 100kHz
 - 2MHz
- Un amplificatore differenziale fornisce in uscita una tensione $v_{out} = 100.2 v^+ - 99.8 v^-$. L'amplificazione differenziale dello stadio vale:
 - 40dB
 - 20dB
 - 100dB
 - 8dB
- In un comparatore di tensione non invertente senza isteresi, realizzato a partire da un amplificatore operazionale:
 - sono presenti sia retroazione negativa, sia retroazione positiva
 - è presente retroazione positiva
 - è presente retroazione negativa
 - l'operazionale è utilizzato ad anello aperto
- In uno stadio amplificatore a singolo transistor MOS, il segnale d'ingresso è applicato al terminale di *gate* e l'uscita è prelevata al terminale di *source*. Si tratta di uno stadio:
 - source* comune
 - drain* comune
 - gate* comune
 - per rispondere occorre sapere se il transistor è nMOS o pMOS
- Un transistor MOS (con $\lambda = 0$) polarizzato in regione di saturazione si comporta per il piccolo segnale come:
 - un generatore di corrente controllato in tensione
 - un generatore di tensione controllato in corrente
 - un circuito aperto
 - un corto circuito
- Un amplificatore di corrente è ottenuto collegando in cascata un amplificatore di transresistenza con transresistenza R_m ed ideale dal punto di vista degli effetti di carico, ed un amplificatore di transconduttanza descritto dai parametri G_m , R_{in} ed R_{out} (tutti finiti e non nulli). Detta A_i amplificazione di corrente complessiva della cascata dei due stadi, chiusa su un corto circuito, si ha:
 - $A_i = R_m G_m$
 - $A_i = R_{in} G_m$
 - $A_i = R_{out} G_m$
 - $A_i = R_{out} \parallel R_{in} \cdot G_m$

Esercizio 1.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 80\text{k}\Omega & \text{per MP:} \\
 R_2 &= 420\text{k}\Omega & \beta = 20\text{mA/V}^2 \\
 R_3 &= 1\text{k}\Omega & V_{TH} = 0.6\text{V} \\
 R_4 &= 16\text{k}\Omega & \lambda = 0\text{V}^{-1} \\
 R_5 &= 52\text{k}\Omega \\
 V_A &= 4.2\text{V} \\
 V_B &= 4.9\text{V} \\
 V_C &= 2.4\text{V} \\
 V_{DD} &= 5\text{V}
 \end{aligned}$$

Con riferimento allo stadio in figura

1. determinare il punto di funzionamento a riposo del transistor MP, verificare il funzionamento del dispositivo in regione di saturazione e ricavarne i parametri del modello per il piccolo segnale;
2. Disegnare il circuito equivalente per il piccolo segnale dello stadio e calcolare, in condizioni di piccolo segnale, l'amplificazione di tensione $A_v = v_{out}/v_{in}$, la resistenza di ingresso R_{in} e la resistenza di uscita R_{out} in banda, assumendo che in banda il condensatore C si comporti come un circuito aperto (sono richiesti i passaggi fondamentali, le espressioni analitiche ed i valori numerici);
3. Determinare l'espressione analitica di $A_v(s) = V_{out}(s)/V_{in}(s)$ per $C_1 = 10\text{ pF}$, e calcolare i valori numerici di poli e zeri.
4. Disegnarne i diagrammi di Bode del modulo e della fase dell'amplificazione $A_v(s) = V_{out}(s)/V_{in}(s)$ ricavata al punto precedente.

Soluzione

Punto di funzionamento a riposo di MP:

$$V_{SG} = V_B - V_A = 0.7V;$$

$$V_{SD} = V_B - V_C = 2.5V;$$

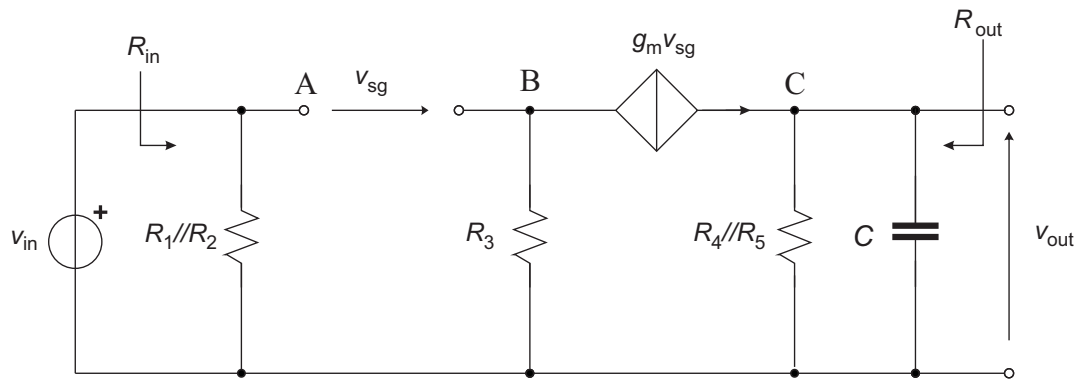
$$I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{SG} - V_{TH})^2 = 100 \mu A.$$

Poiché $V_{SG} > V_{TH} = 0.6V$ e $V_{SD} > V_{SG} - V_{TH}$, MP lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 2 \text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita g_o è nulla ($\lambda = 0$).

Circuito di piccolo segnale Si tratta di uno stadio amplificatore *source comune*. Il circuito di piccolo segnale è riportato in figura.



In banda, considerando il condensatore C come un circuito aperto, si ha:

$$v_{sg} = -v_{in} - g_m v_{sg} R_3; \quad v_{sg} = -\frac{v_{in}}{1 + g_m R_3}$$

$$v_{out} = g_m v_{sg} R_4 \parallel R_5 = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5}{1 + g_m R_3} v_{in}$$

Da cui:

$$A_v = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5}{1 + g_m R_3} = -8.157 \quad (18.2 \text{ dB})$$

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 = 67.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_4 \parallel R_5 = 12.2 \text{ k}\Omega$$

Analisi in frequenza

La funzione di trasferimento richiesta si ricava analizzando il circuito di piccolo segnale nel dominio della frequenza, considerando il contributo dell'impedenza $Z_C = \frac{1}{sC}$ del condensatore C . In tal modo si ricava:

$$A_v(s) = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5 \parallel Z_C}{1 + g_{m1} (R_4 \parallel R_5 \parallel Z_C)} = -\frac{g_m R_4 \parallel R_5}{1 + g_m R_3} \frac{1}{1 + s R_4 \parallel R_5 C}$$

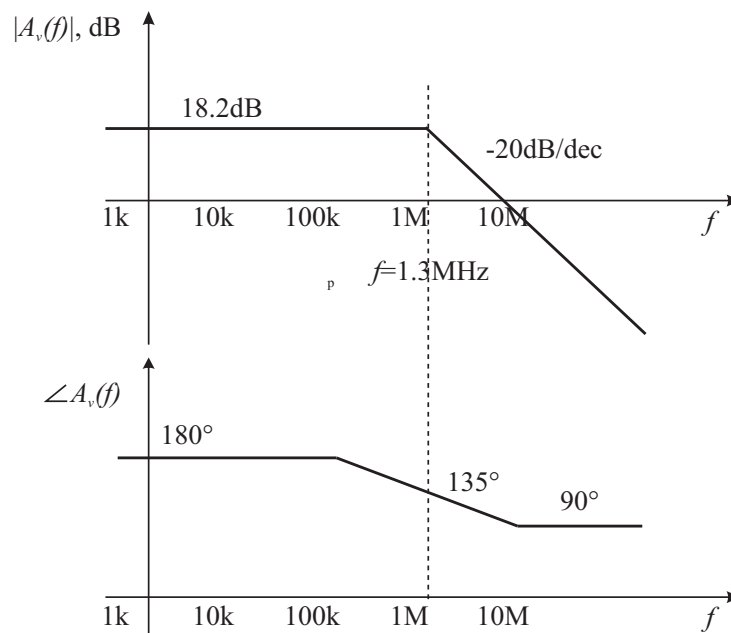
La funzione di trasferimento richiesta presenta un singolo polo reale negativo:

$$s_p = -\frac{1}{R_4 \parallel R_5 C} = -8.17 \text{ rad}/\mu\text{s}$$

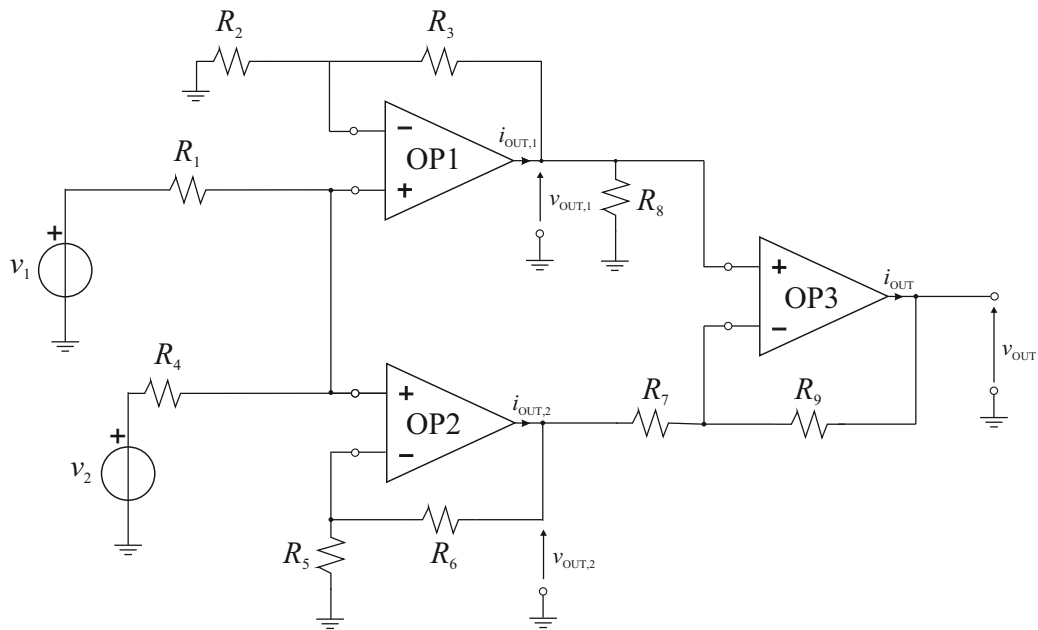
con frequenza di taglio:

$$f_p = \frac{|s_p|}{2\pi} = 1.3 \text{ MHz};$$

I diagrammi di Bode di modulo e fase sono riportati in figura.



Esercizio 2.



Nel circuito in figura la dinamica di v_1 è $(0,2)$ V e di v_2 è $(-1,0)$ V. Nel circuito $R_1 = R_2 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R_9 = R = 1\text{k}\Omega$ e $R_3 = 3\text{k}\Omega$. Determinare:

1. l'espressione delle tensioni $v_{OUT,1}$, $v_{OUT,2}$ e v_{OUT} in funzione di v_1 e v_2 ;
2. l'espressione della corrente erogata da OP1 ($i_{OUT,1}$), OP2 ($i_{OUT,2}$) e OP3 (i_{OUT}), assumendo che gli amplificatori operazionali siano ideali;
3. la minima dinamica delle tensione d'uscita di OP1 ($V_{OUT,min}$, $V_{OUT,max}$) compatibile con i segnali in ingresso assegnati;
4. la minima dinamica della corrente d'uscita di OP3 ($I_{OUT,min}$, $I_{OUT,max}$), compatibile con i segnali in ingresso assegnati.

Soluzione

1. Espressione della tensione d'uscita di OP1 e OP2:

$$v_{\text{out},1} = \frac{R_4}{R_4+R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) v_1 + \frac{R_1}{R_1+R_4} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) v_2 = 2(v_1 + v_2)$$

$$v_{\text{out},2} = \frac{R_4}{R_4+R_1} \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) v_1 + \frac{R_1}{R_1+R_4} \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) v_2 = (v_1 + v_2)$$

Equivalentemente osservando che per OP1 e OP2

$$v^+ = \frac{R_4}{R_4+R_1} v_1 + \frac{R_1}{R_1+R_4} v_2 = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$$

Espressione della tensione d'uscita di OP3

$$v_{\text{out}} = -\frac{R_9}{R_7} v_{\text{out},2} + \left(1 + \frac{R_9}{R_7}\right) v_{\text{out},1} = 3(v_1 + v_2)$$

2. Espressione della corrente d'uscita ($G_0 = 1/R$)

$$i_{\text{out},1} = \frac{v_{\text{out},1} - v_{\text{OP1}}^-}{R_3} + \frac{v_{\text{out},1}}{R_8} = \frac{v_{\text{out},1} - v^+}{R_3} + \frac{v_{\text{out},1}}{R_8} = \frac{5}{2} G_0 (v_1 + v_2)$$

$$i_{\text{out},2} = \frac{v_{\text{out},2} - v_{\text{OP2}}^-}{R_6} + \frac{v_{\text{out},2} - v_{\text{OP3}}^-}{R_7} = \frac{v_{\text{out},2} - v^+}{R_6} + \frac{v_{\text{out},2} - v_{\text{out},1}}{R_7} = -\frac{1}{2} G_0 (v_1 + v_2)$$

$$i_{\text{out}} = \frac{v_{\text{out}} - v_{\text{out},1}}{R_9} = G_0 (v_1 + v_2)$$

3. Minima dinamica delle tensioni d'uscita:

$$\text{OP1: } (V_{\text{OUT,min}}, V_{\text{OUT,max}}) = (-2, 4) \text{ V}$$

$$\text{OP2: } (V_{\text{OUT,min}}, V_{\text{OUT,max}}) = (-1, 2) \text{ V}$$

$$\text{OP3: } (V_{\text{OUT,min}}, V_{\text{OUT,max}}) = (-3, 6) \text{ V}$$

4. Minima dinamica della corrente d'uscita richiesta:

$$\text{OP1: } (I_{\text{OUT,min}}, I_{\text{OUT,max}}) = (-2.5, 5) \text{ mA}$$

$$\text{OP2: } (I_{\text{OUT,min}}, I_{\text{OUT,max}}) = (-1, 0.5) \text{ mA}$$

$$\text{OP3: } (I_{\text{OUT,min}}, I_{\text{OUT,max}}) = (-1, 2) \text{ mA}$$