

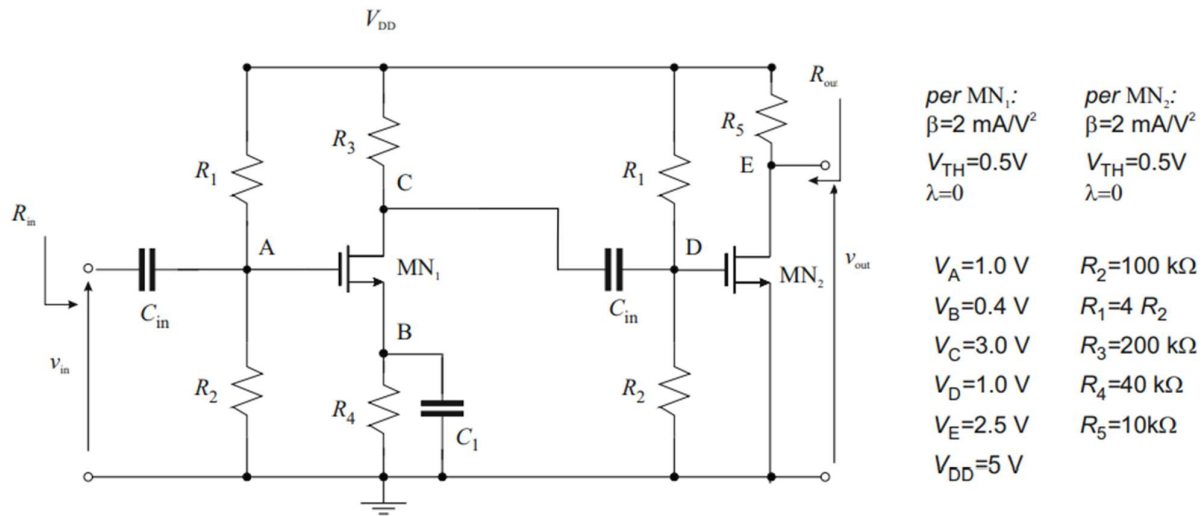
## Esercitazione 9: PROVA D'ESAME

## Domande a risposta multipla

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

- Un amplificatore operazionale con amplificazione in continua pari a 60dB 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 collegato in configurazione *voltage follower*. La banda dell'inseguitore di tensione è pari a:
  - 2kHz
  - ~~2MHz~~
  - 80kHz
  - 20kHz
- In un comparatore di soglia invertente senza isteresi realizzato a partire da un amplificatore operazionale:
  - è presente retroazione negativa
  - è presente retroazione positiva
  - è presente sia retroazione positiva sia retroazione negativa
  - ~~non è presente alcuna rete di retroazione (circuito ad anello aperto)~~
- Un amplificatore di transresistenza è ottenuto collegando in cascata un amplificatore di corrente descritto dai parametri  $A_{i,1}$ ,  $R_{in,1}$ ,  $R_{out,1}$ , (tutti finiti e non nulli) ed un amplificatore di transresistenza descritto dai parametri  $R_{m,2}$  finito e non nullo,  $R_{in,2} = 0$ ,  $R_{out,2} = 0$ . Dette  $R_{in}$  e  $R_{out}$  le resistenze d'ingresso e di uscita complessive della cascata, si ha che:
  - $R_{in} = 0$  e  $R_{out} = 0$
  - ~~$R_{in} = R_{in,1}$  e  $R_{out} = 0$~~
  - $R_{in} = R_{out,1}$  e  $R_{out} = 0$
  - $R_{in} = R_{in,1}$  e  $R_{out} = R_{m,2}$
- La banda di un blocco funzionale analogico:
  - ~~deve includere la banda del segnale con un certo margine, ma è opportuno che non sia molto più ampia, per evitare di amplificare rumore fuori banda~~
  - deve essere più ampia della banda del rumore in ingresso, per evitare che il rumore sia distorto
  - deve essere la più ampia possibile, per evitare perdita di informazione
  - deve essere inclusa nella banda del segnale ed è opportuno che sia decisamente più stretta della banda del segnale, così da non amplificare nè il rumore fuori banda, nè il rumore in banda

## ESERCIZIO 2



Con riferimento allo stadio in figura

1. verificare la regione di funzionamento di  $MN_1$  e  $MN_2$  e determinarne i parametri dei rispettivi modelli per il piccolo segnale;
2. Determinare  $A_v = v_{out}/v_{in}$ , la resistenza di ingresso  $R_{in}$  e la resistenza di uscita  $R_{out}$  (sono richieste le espressioni simboliche ed i valori numerici) considerando il comportamento del condensatore  $C_1$  approssimabile ad un circuito aperto e  $C_{in}$  approssimabile ad un corto circuito. Si dia una rappresentazione dello stadio in termini di *amplificatore di tensione*;
3. Determinare  $A_v(s) = V_{out}(s)/V_{in}(s)$  per  $C_1 = 10 \text{ nF}$  e  $C_{in}$  approssimabile ad un corto circuito. Disegnarne il diagramma di Bode (modulo e fase).

### Transistore MN<sub>1</sub>

$$V_{GS} = V_A - V_B = 0.6V; \quad I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{GS} - V_{TH})^2 = 10\mu A; \quad V_{DS} = V_C - V_B = 2.6V$$

Poiché  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ , MN<sub>1</sub> lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_{m1} = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 200\mu S$$

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

### Transistore MN<sub>2</sub>

$$V_{GS} = V_D = 1V; \quad I_D = \frac{1}{2}\beta(V_{GS} - V_{TH})^2 = 250\mu A; \quad V_{DS} = V_E = 2.5V$$

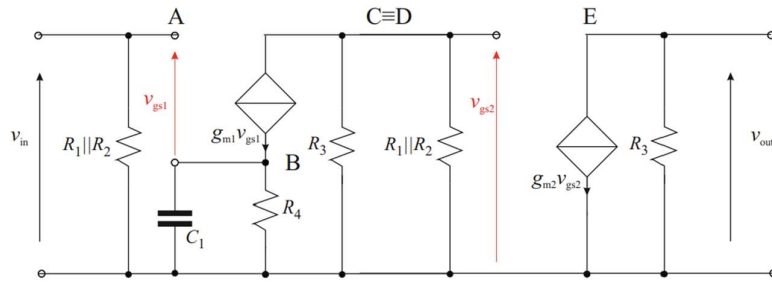
Poiché  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ , MN<sub>2</sub> lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_{m2} = \beta(V_{GS} - V_{TH}) = 1\text{ mS}$$

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

### Circuito di piccolo segnale

Si tratta di due stadi common source in cascata. Il circuito di piccolo segnale è:



$$R_p = R_1 || R_2 = 80k\Omega;$$

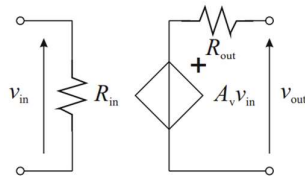
$$v_{gs,1} = v_{in} - g_{m1}v_{gs,1}R_4; \quad v_{gs,1} = \frac{v_{in}}{1 + g_{m1}R_4}$$

$$v_{gs,2} = -g_{m1}v_{gs,1}R_3 || R_p;$$

$$v_{out} = -g_{m2}v_{gs,2}R_5 = \frac{g_{m1}g_{m2}(R_3 || R_p)R_5}{1 + g_{m1}R_4}v_{in}$$

Lo stadio si rappresenta come amplificatore di tensione con

$$A_v = \frac{g_{m1}g_{m2}(R_3 || R_p)R_5}{1 + g_{m1}R_4} = 12.7 \text{ (22 dB)}; \quad R_{in} = R_p; \quad R_{out} = R_5$$



### Analisi in frequenza

$$R_4 \rightarrow Z_4 = R_4 || C_1 = \frac{R_4}{1 + sC_1 R_4}$$

$$A_v = \frac{g_{m1} g_{m2} (R_3 || R_p) R_5}{1 + g_{m1} Z_4} = 12.7 \text{ (22 dB)}; \quad R_{in} = R_p; \quad R_{out} = R_5$$

Dai passaggi si ottiene una funzione di trasferimento del tipo

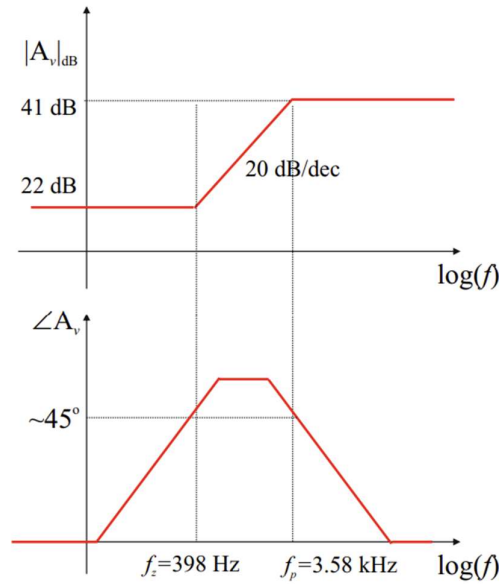
$$A_v = A_0 \frac{1 - s/s_z}{1 - s/s_p}$$

con

$$A_0 = \frac{g_{m1} g_{m2} (R_3 || R_p) R_5}{1 + g_{m1} R_4}; \quad s_z = -\frac{1}{R_4 C_1}; \quad s_p = -\frac{1 + g_{m1} R_4}{R_4 C_1};$$

Le frequenze dello zero e del polo sono

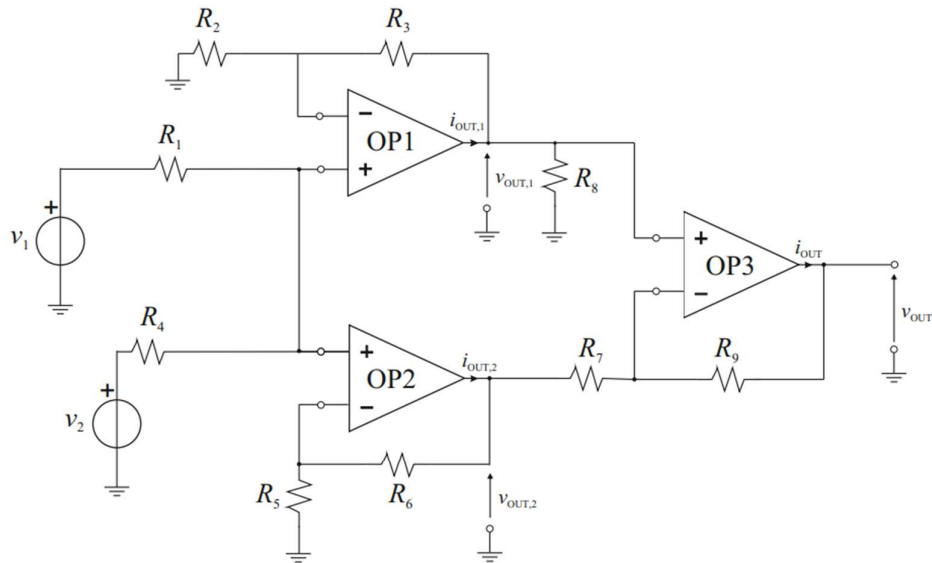
$$f_p = \frac{|s_z|}{2\pi} = 398 \text{ Hz}; \quad f_p = \frac{|s_p|}{2\pi} = 3.58 \text{ kHz};$$



La frequenza del polo è  $(1 + g_{m1} R_4) = 9$  volte più alta della frequenza dello zero (quasi una decade). Tra  $f_z$  e  $f_p$  la fase dovrebbe salire a  $+90^\circ$  (zero negativo), ma la frequenza del polo è troppo ravvicinata per raggiungere tale valore. La fase ritorna a zero al di sopra del polo. Il guadagno sale dal valore di 22 dB al valore  $A_v = g_{m1} g_{m2} (R_3 || R_p) R_5 = 114$  (41 dB) corrispondente al guadagno dello stadio con  $R_4$  cortocircuitata.

Le resistenze di ingresso e uscita dello stadio sono invariate.

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

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

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:

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

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

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