

**Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure**  
**Appello del 25/2/2022**

Nome: \_\_\_\_\_ SOLUZIONE \_\_\_\_\_  
Cognome: \_\_\_\_\_  
Matricola: \_\_\_\_\_

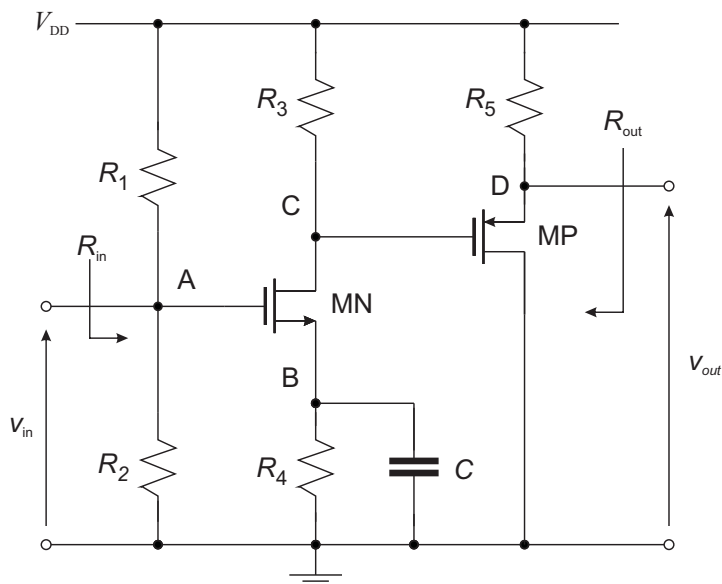
**ATTENZIONE**

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	
b						
c	X	X				X
d				X		

- In un circuito contenente un diodo semi-ideale  $D$  con  $V_\gamma = 0.7V$  si è fatta l'ipotesi che il diodo sia ON. L'ipotesi è verificata se e solo se:
  - $v_D < 0.7V$
  - $v_D > 0.7V$
  - $i_D > 0$
  - $v_D < -0.7V$
- In un amplificatore invertente basato su operazionale ideale, il resistore che collega il morsetto invertente all'uscita è sostituito da un diodo, con anodo collegato al morsetto invertente e catodo collegato all'uscita. Per  $v_{in} > 0$  il circuito che si ottiene si comporta come un
  - amplificatore esponenziale invertente
  - amplificatore esponenziale non invertente
  - amplificatore logaritmico invertente
  - amplificatore logaritmico non invertente
- Un amplificatore differenziale fornisce in uscita una tensione  $v_{out} = 99v^+ - 101v^-$ . Il rapporto di reiezione del modo comune (CMRR) dello stadio vale:
  - 34dB
  - 40dB
  - 100dB
  - 6dB
- In un circuito *voltage follower* realizzato utilizzando un amplificatore operazionale con amplificazione differenziale  $A_d$  finita e resistenze d'ingresso e uscita trascurabili (cioè  $R_{in,d} \rightarrow \infty$ ,  $R_{in,cm} \rightarrow \infty$ ,  $R_{out} = 0$ ), l'amplificazione di tensione ad anello chiuso  $A_v = v_{out}/v_{in}$  vale:
  - 1
  - $\frac{1}{A_d+1}$
  - $\frac{A_d}{A_d-1}$
  - $\frac{A_d}{A_d+1}$
- In un amplificatore invertente basato su operazionale si sono scambiati erroneamente gli ingressi non-invertente ed invertente dell'operazionale. Il circuito che si ottiene si comporta come:
  - un comparatore di tensione non invertente con isteresi
  - un comparatore di tensione invertente con isteresi
  - un amplificatore di tensione non invertente
  - un amplificatore di tensione invertente
- In uno stadio amplificatore a singolo transistor MOS, il segnale d'ingresso è applicato al terminale di *source* e l'uscita è prelevata al terminale di *drain*. Si tratta di uno stadio:
  - source* comune
  - drain* comune
  - gate* comune
  - per rispondere occorre sapere se il transistor è nMOS o pMOS

**Esercizio 1.**

$$R_1=420\text{k}\Omega$$

per MN:

$$R_2=80\text{k}\Omega$$

$$\beta_n=20\text{mA/V}^2$$

$$R_3=16\text{k}\Omega$$

$$V_{TH,n}=0.6\text{V}$$

$$R_4=1\text{k}\Omega$$

$$\lambda=0\text{V}^{-1}$$

$$R_5=2\text{k}\Omega$$

per MP:

$$V_A=0.8\text{V}$$

$$\beta_p=20\text{mA/V}^2$$

$$V_B=0.1\text{V}$$

$$V_{TH,p}=0.6\text{V}$$

$$V_C=3.4\text{V}$$

$$\lambda=0\text{V}^{-1}$$

$$V_D=4.2\text{V}$$

$$V_{DD}=5\text{V}$$

Con riferimento allo stadio in figura

1. determinare il punto di funzionamento a riposo dei transistori MN ed MP, verificare il funzionamento dei dispositivi 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 corto circuito;
3. Con riferimento allo stadio analizzato al punto precedente, si considerino i due casi:
  - (a) lo stadio è accoppiato in AC ad una sorgente di segnale  $v_s$  con resistenza interna  $R_S = 10\Omega$  e la porta di uscita è accoppiata in AC ad un carico resistivo  $R_L = 10\text{M}\Omega$ ;
  - (b) lo stadio è accoppiato in AC ad una sorgente di segnale  $v_s$  con resistenza interna  $R_S = 100\text{M}\Omega$  e la porta di uscita è accoppiata in AC ad un carico resistivo  $R_L = 10\text{M}\Omega$ .

Per ciascuno dei due casi si valuti la tensione sul carico  $R_L$  in funzione di  $v_s$ , assumendo che i condensatori di accoppiamento in AC si possano considerare come corto circuiti nella banda del segnale. Si indichi inoltre quale delle possibili rappresentazioni dello stadio (amplificatore di tensione, corrente, transconduttanza o transresistenza) è più appropriata nel caso a) e quale è più appropriata nel caso b), motivando le risposte.

## Soluzione

### Punto di funzionamento a riposo

Punto di funzionamento a riposo di MN:

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

$$V_{DS} = V_C - V_B = 3.3V;$$

$$I_D = \frac{1}{2}\beta_n(V_{GS} - V_{TH,n})^2 = 100\mu A.$$

Poiché  $V_{GS} > V_{TH,n} = 0.6V$  e  $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH,n}$ , MN lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_{m,n} = \beta_n(V_{GS} - V_{TH,n}) = 2\text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita  $g_{o,n}$  è nulla ( $\lambda = 0$ ).

Punto di funzionamento a riposo di MP:

$$V_{SG} = V_D - V_C = 0.8V;$$

$$V_{SD} = V_D = 4.2V;$$

$$I_D = \frac{1}{2}\beta_p(V_{SG} - V_{TH,p})^2 = 400\mu A.$$

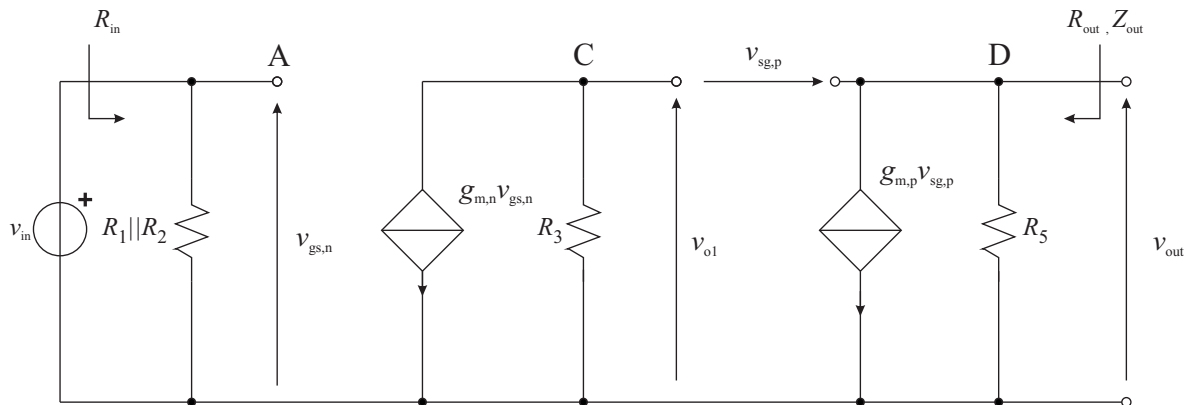
Poiché  $V_{SG} > V_{TH,p} = 0.6V$  e  $V_{SD} > V_{SG} - V_{TH,p}$ , MP lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_{m,p} = \beta_p(V_{SG} - V_{TH,p}) = 4\text{ mS}$$

mentre la conduttanza di uscita  $g_{o,p}$  è nulla ( $\lambda = 0$ ).

### Circuito di piccolo segnale

Si tratta di uno stadio amplificatore *source comune* nMOS a cui è collegato in cascata uno stadio *drain comune* pMOS. Il circuito di piccolo segnale è riportato in figura.



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

$$v_{gs,n} = v_{in}$$

$$v_{o1} = -g_{m,n}R_3 v_{in}$$

$$v_{sg,p} = -g_{m,p}R_5 v_{sg,p} - v_{o1}$$

$$v_{sg,p} = -\frac{v_{o1}}{1 + g_{m,p}R_5}$$

$$v_{out} = v_{o1} \frac{g_{m,p} R_5}{1 + g_{m,p} R_5} = -\frac{g_{m,n} R_3 \cdot g_{m,p} R_5}{1 + g_{m,p} R_5} v_{in}$$

Da cui:

$$A_v = -\frac{g_{m,n} R_3 \cdot g_{m,p} R_5}{1 + g_{m,p} R_5} = -28.44 \quad (29.08 \text{ dB})$$

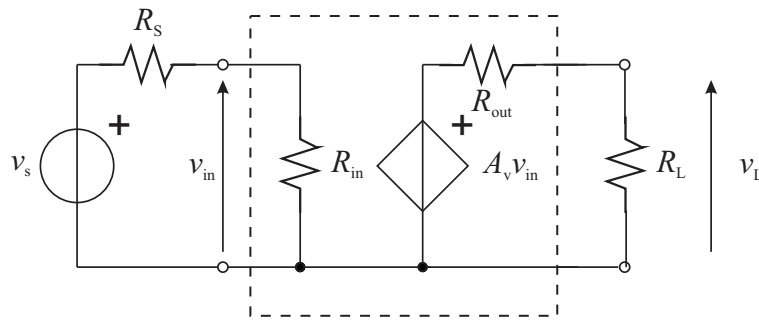
Si ha poi

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

$$R_{out} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_5}{1 + g_{m,p} R_5} = 222 \Omega$$

### Circuito con sorgente e carico

Per risolvere all'ultimo punto, si considera il modello a doppio bipolo dell'amplificatore riportato in figura. Dal momento che la sorgente ed il carico sono accoppiate in AC, il punto di funzionamento a riposo dello stadio non cambia per cui i valori di  $A_v$ ,  $R_{in}$  ed  $R_{out}$  sono quelli ricavati al punto precedente. I condensatori di accoppiamento sono stati inoltre direttamente sostituiti con corto circuiti, come indicato nel testo.



Con riferimento al circuito considerato si ricava quindi:

$$v_L = A_v \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \frac{R_L}{R_L + R_{out}} v_s$$

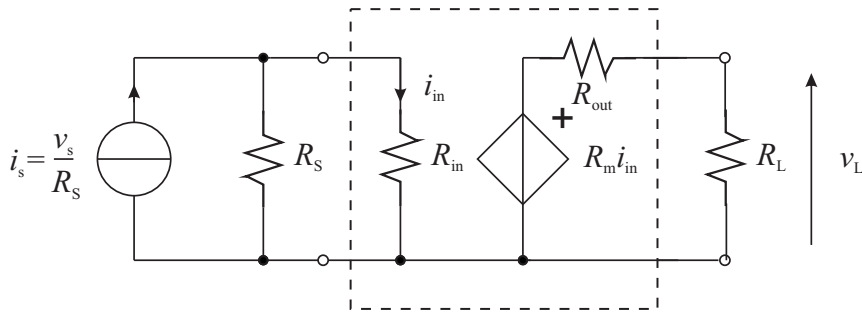
Sostituendo i valori numerici si ottiene, nel caso (a):

$$v_L = -28.43 v_s \simeq A_v v_s$$

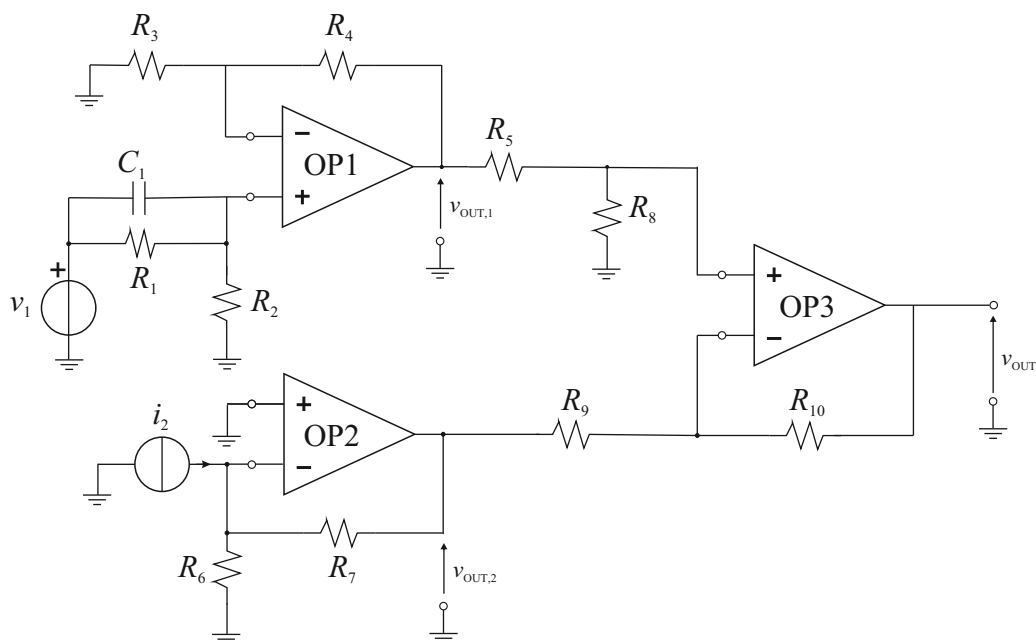
e nel caso (b):

$$v_L = -0.0191 v_s$$

Si osserva che nel caso (a) si ha  $R_{in} \gg R_S$  e  $R_{out} \ll R_L$ , per cui lo stadio può essere opportunamente rappresentato come *amplificatore di tensione*. Nel caso (b), invece si ha  $R_{in} \ll R_S$  e  $R_{out} \ll R_L$ , per cui lo stadio può essere opportunamente rappresentato come *amplificatore di transresistenza*, con transresistenza  $R_m = |A_v R_{in}| = 1.91 \text{ M}\Omega$ , come riportato sotto (nota: il circuito relativo a questa rappresentazione ed il valore della transresistenza non erano richiesti dall'esercizio).



## Esercizio 2.



Nel circuito in figura

$$R_2 = R_3 = R_5 = R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R = 1\text{k}\Omega$$

$$R_1 = R_4 = 10\text{k}\Omega$$

$$R_6 = 5\text{k}\Omega$$

$$C_1 = 100 / (2\pi) \text{ nF}$$

Determinare:

1. l'espressione delle tensioni  $v_{OUT,1}$ ,  $v_{OUT,2}$  e  $v_{OUT}$  in condizioni statiche (DC)
2. l'intervallo di valori che possono assumere le tensioni  $v_{OUT,1}$ ,  $v_{OUT,2}$  e  $v_{OUT}$  quando tutti i generatori sono spenti, assumendo che tutti gli operazionali presentino *input offset voltage* (max.): 1mV.
3. l'espressione della funzione di trasferimento  $A_{v1} = v_{OUT,1}/v_1$ , disegnandone i diagrammi di Bode del modulo e della fase.

1. Espressione della tensione d'uscita in continua:

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

$$v_{\text{out},2} = -R_7 i_1 = -1\text{k}\Omega \cdot i_1$$

$$v_{\text{out}} = \frac{R_5}{R_5+R_8} \left(1 + \frac{R_{10}}{R_9}\right) v_{\text{out},1} - \frac{R_{10}}{R_9} v_{\text{out},2} = v_1 + 1\text{k}\Omega \cdot i_1$$

2.  $v_{\text{out}1,\text{OFF}} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) v_{\text{OFF}1} = 11v_{\text{OFF}1} \rightarrow v_{\text{out}1,\text{OFF}} \in [-11, 11] \text{ mV}$

$$v_{\text{out}2,\text{OFF}} = \left(1 + \frac{R_7}{R_6}\right) v_{\text{OFF}2} = \frac{6}{5}v_{\text{OFF}2} \rightarrow v_{\text{out}2,\text{OFF}} \in [-1.2, 1.2] \text{ mV}$$

$$v_{\text{out},\text{OFF}} = \left(v_{\text{OFF}3} + \frac{R_5}{R_5+R_8} v_{\text{out}1,\text{OFF}}\right) \left(1 + \frac{R_9}{R_{10}}\right) - \frac{R_9}{R_{10}} v_{\text{out}2,\text{OFF}} = 2v_{\text{OFF}3} + 11v_{\text{OFF}1} - \frac{6}{5}v_{\text{OFF}2} \rightarrow v_{\text{out},\text{OFF}} \in [-14.2, 14.2] \text{ mV}$$

3. Definendo:

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + sR_1C_1}; \quad R_p = R_1 // R_2$$

$$A_{v1} = -\frac{R_2}{Z_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

$$A_{v1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) \frac{1 + sR_1C_1}{1 + sR_pC_1} = k \frac{1 - s/s_z}{1 - s/s_{p1}}$$

$$k = 1, \quad s_z = -\frac{1}{R_1C_1}, \quad s_{p1} = -\frac{1}{R_pC_1}.$$

corrispondenti alle frequenze dello zero e del polo:

$$f_z = 1 \text{ kHz}, \quad f_{p1} \approx 11 \text{ kHz}.$$

Per  $f > f_{p1}$

$$A_0 = \frac{s_{p1}}{s_z} = 11(20.83\text{dB})$$

La funzione di trasferimento è rappresentata in rosso nella figura.

