Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure
Appello del 1° Marzo 2024

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
a	X			X
b			X	
c		X		
d				

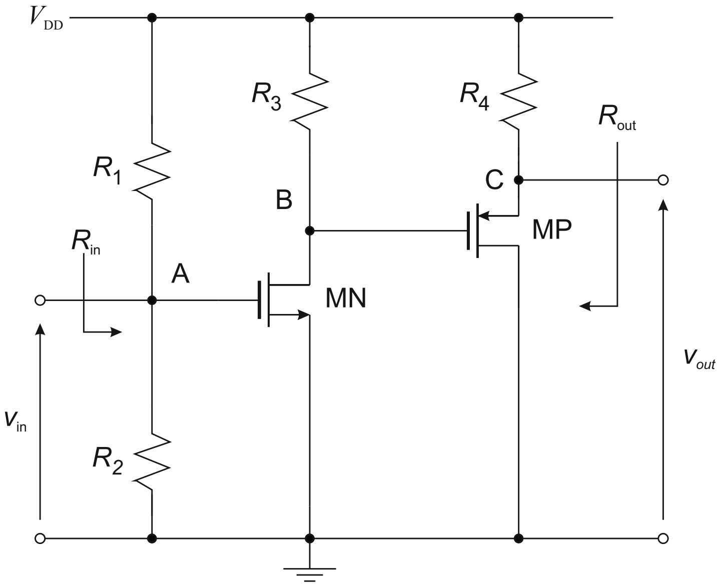
1. Un amplificatore differenziale fornisce in uscita una tensione $v_{\text{out}} = 99\,v^{+} - 101\,v^{-}$. Il rapporto di reiezione del modo comune (CMRR) dello stadio vale:
   (a) 34 dB
   (b) 40 dB
   (c) 100 dB
   (d) -6 dB

2. Un amplificatore di tensione non-invertente in cui $\beta = \frac{R_1}{R_1+R_2}$ è realizzato utilizzando un operazionale con amplificazione differenziale A_{d} finita, resistenze d'ingresso e uscita trascurabili ($R_{\text{in,d}} \to \infty, R_{\text{in,cm}} \to \infty, R_{\text{out}} = 0$). L'amplificazione di tensione ad anello chiuso $A_{\text{v}} = v_{\text{out}}/v_{\text{in}}$ dell'amplificatore di tensione non-invertente vale:
   (a) $\frac{1}{\beta}$
   (b) $\frac{1}{\beta A_{\text{d}}+1}$
   (c) $\frac{A_{\text{d}}}{\beta A_{\text{d}}+1}$
   (d) $\frac{A_{\text{d}}}{A_{\text{d}}+1}$

3. In un amplificatore di tensione non-invertente basato su operazionale si sono scambiati erroneamente i morsetti non-invertente ed invertente dell'operazionale. Il circuito che si ottiene si comporta come:
   (a) comparatore di tensione non invertente con isteresi
   (b) comparatore di tensione invertente con isteresi
   (c) comparatore di tensione non invertente senza isteresi
   (d) comparatore di tensione invertente senza isteresi

4. In amplificatore di transresistenza basato su operazionale con $R_{\text{m}} = 2\,\text{k}\Omega$, la dinamica del segnale d'ingresso è (0 mA,1 mA) e la porta d'uscita è collegata ad un carico di $100\,\Omega$. Quali sono la minima dinamica della tensione d'uscita dell'operazionale ΔV e la minima dinamica della corrente d'uscita dell'operazionale ΔI richieste all'operazionale per funzionare in linearità con il segnale d'ingresso dato?
   (a) $\Delta V = (0\,\text{V}, 2\,\text{V}), \Delta I = (0\,\text{mA}, 21\,\text{mA})$
   (b) $\Delta V = (-2\,\text{V}, 0\,\text{V}), \Delta I = (0\,\text{mA}, 21\,\text{mA})$
   (c) $\Delta V = (0\text{V}, 2\,\text{V})$; non ci sono requisiti su ΔI perchè l'uscita è in tensione
   (d) $\Delta I = (0\,\text{mA}, 20\,\text{mA})$; non ci sono requisiti su ΔV perchè l'uscita è in corrente

Esercizio 1.



R_1=200kΩ	*per MN:*
R_2=100kΩ	β_n=2mA/V^2
R_3=120kΩ	$V_{TH,n}$=0.5V
R_4=800Ω	λ=0V^{-1}
V_A=0.6V	*per MP:*
V_B=0.6V	β_p=50mA/V^2
V_C=1V	$V_{TH,p}$=0.2V
V_{DD}=1.8V	λ=0V^{-1}

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 $A_{\rm v} = v_{\rm out}/v_{\rm in}$, la resistenza di ingresso $R_{\rm in}$ e la resistenza di uscita $R_{\rm out}$;

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 $v_{\rm s}$ con resistenza interna $R_{\rm S} = 10\,\Omega$ e la porta di uscita è accoppiata in AC ad un carico resistivo $R_{\rm L} = 10\,{\rm M}\Omega$;

   (b) lo stadio è accoppiato in AC ad una sorgente di segnale $v_{\rm s}$ con resistenza interna $R_{\rm S} = 100\,{\rm M}\Omega$ e la porta di uscita è accoppiata in AC ad un carico resistivo $R_{\rm L} = 10\,{\rm M}\Omega$.

   Per ciascuno dei due casi si valuti la tensione sul carico $R_{\rm L}$ in funzione di $v_{\rm s}$, 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:

$$V_{\mathrm{GS}} = V_{\mathrm{A}} = 0.6\mathrm{V};$$

$$V_{\mathrm{DS}} = V_{\mathrm{B}} = 0.6\mathrm{V};$$

$$I_{\mathrm{D}} = \frac{1}{2}\beta_{\mathrm{n}}(V_{\mathrm{GS}} - V_{\mathrm{TH}})^2 = 10\,\mu\mathrm{A}.$$

Poiché $V_{GS} > V_{\mathrm{TH,n}} = 0.6\,\mathrm{V}$ e $V_{\mathrm{DS}} = 0.6\,\mathrm{V} > V_{GS} - V_{\mathrm{TH,n}} = 0.1\,\mathrm{V}$, MN lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_{\mathrm{m,n}} = \beta_{\mathrm{n}}(V_{\mathrm{GS}} - V_{\mathrm{TH,n}}) = 200\,\mu\mathrm{S}$$

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

Punto di funzionamento a riposo di MP:

$$V_{\mathrm{SG}} = V_{\mathrm{C}} - V_{\mathrm{B}} = 0.4\mathrm{V};$$

$$V_{\mathrm{SD}} = V_{\mathrm{C}} = 1\mathrm{V};$$

$$I_{\mathrm{D}} = \frac{1}{2}\beta_{\mathrm{p}}(V_{\mathrm{SG}} - V_{\mathrm{TH,p}})^2 = 1\,\mathrm{mA}.$$

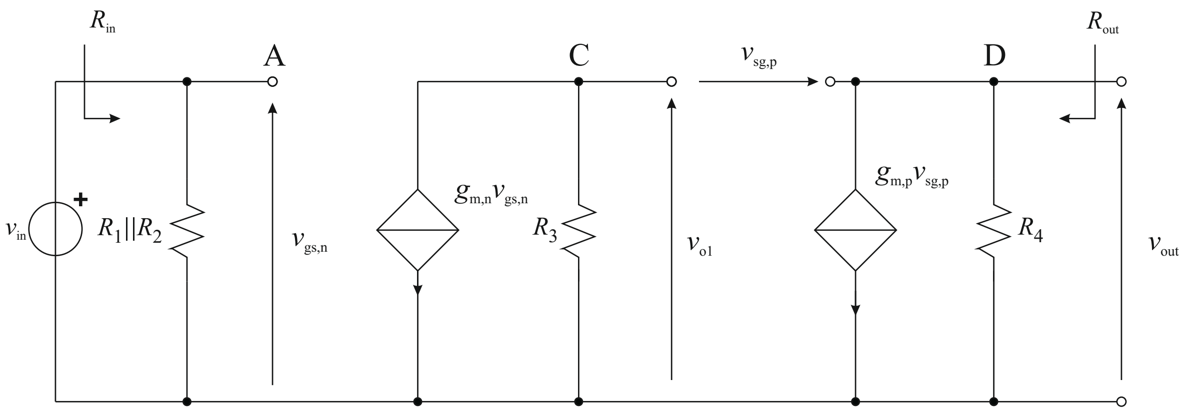
Poiché $V_{SG} > V_{\mathrm{TH,p}} = 0.4\mathrm{V}$ e $V_{\mathrm{SD}} = 1\,\mathrm{V} > V_{SG} - V_{\mathrm{TH,p}} = 0.2\,\mathrm{V} >$, MP lavora in regione di saturazione. La transconduttanza è

$$g_{\mathrm{m,p}} = \beta_{\mathrm{p}}(V_{\mathrm{SG}} - V_{\mathrm{TH,p}}) = 10\,\mathrm{mS}$$

mentre la conduttanza di uscita $g_{\mathrm{o,p}}$ 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.



da cui si ha che:

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

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

$$v_{\mathrm{sg,p}} = -g_{\mathrm{m,p}}R_4\,v_{\mathrm{sg,p}} - v_{\mathrm{o1}}$$

$$v_{\mathrm{sg,p}} = -\frac{v_{\mathrm{o1}}}{1 + g_{\mathrm{m,p}}R_4}$$

$$v_{\mathrm{out}} = v_{\mathrm{o1}} \frac{g_{\mathrm{m,p}} R_4}{1 + g_{\mathrm{m,p}} R_4} = -\frac{g_{\mathrm{m,n}} R_3 \cdot g_{\mathrm{m,p}} R_4}{1 + g_{\mathrm{m,p}} R_4} v_{\mathrm{in}}$$

Da cui:

$$A_{\mathrm{v}} = -\frac{g_{\mathrm{m,n}} R_3 \cdot g_{\mathrm{m,p}} R_4}{1 + g_{\mathrm{m,p}} R_4} = -21.33 \quad (26.58\,\mathrm{dB})$$

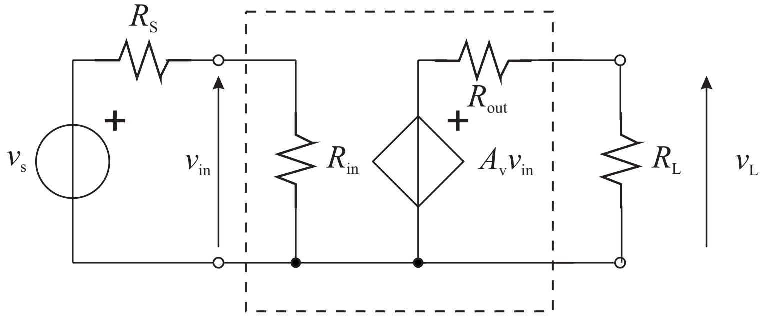
Si ha poi

$$R_{\mathrm{in}} = R_1 \parallel R_2 = 66.6\,\mathrm{k\Omega}$$

$$R_{\mathrm{out}} = \frac{v_{\mathrm{t}}}{i_{\mathrm{t}}} = \frac{R_4}{1 + g_{\mathrm{m,p}} R_4} = 88.8\,\Omega$$

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.



Con riferimento al circuito considerato si ricava quindi:

$$v_{\mathrm{L}} = A_{\mathrm{v}} \frac{R_{\mathrm{in}}}{R_{\mathrm{in}} + R_{\mathrm{S}}} \frac{R_{\mathrm{L}}}{R_{\mathrm{L}} + R_{\mathrm{out}}} v_{\mathrm{s}}$$

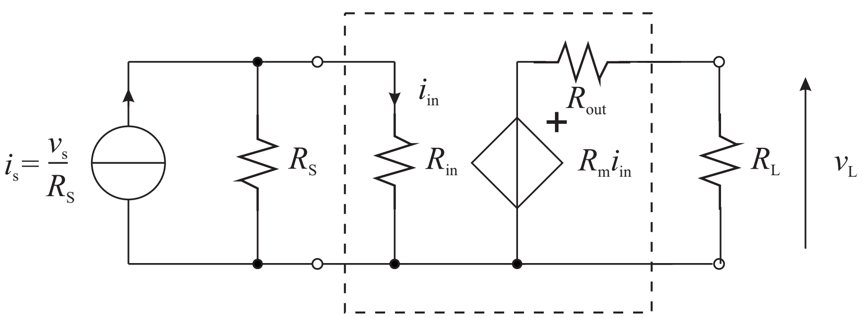
Sostituendo i valori numerici si ottiene, nel caso (a):

$$v_{\mathrm{L}} = -21.32994\, v_{\mathrm{s}} \simeq A_{\mathrm{v}} v_{\mathrm{s}}$$

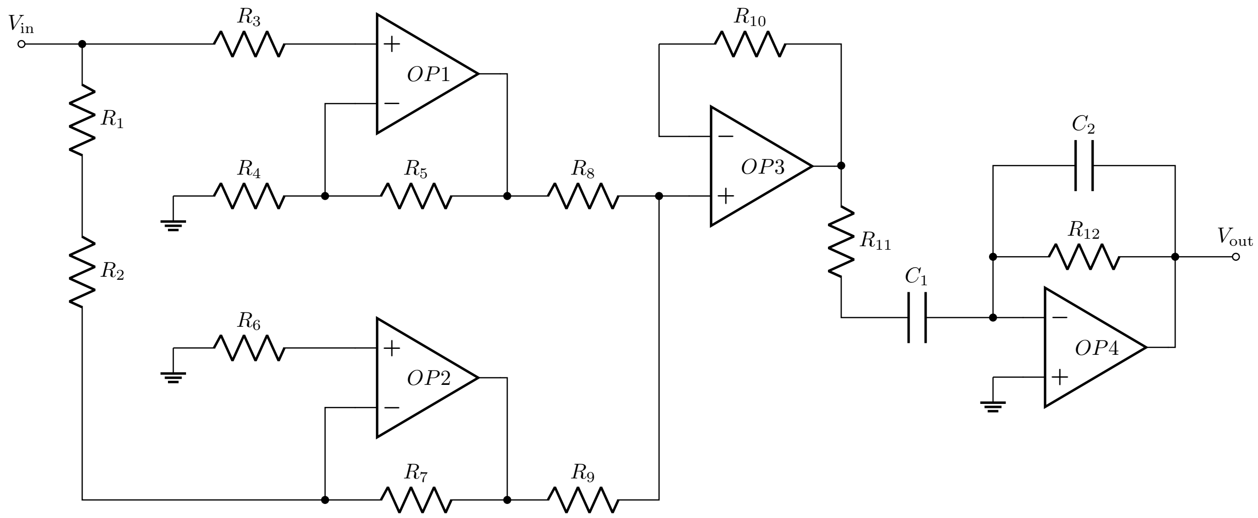
e nel caso (b):

$$v_{\mathrm{L}} = -0.0142\, v_{\mathrm{s}}$$

Si osserva che nel caso (a) si ha $R_{\mathrm{in}} \gg R_{\mathrm{S}}$ e $R_{\mathrm{out}} \ll R_{\mathrm{L}}$, per cui lo stadio può essere opportunamente rappresentato come amplificatore di tensione. Nel caso (b), invece si ha $R_{\mathrm{in}} \ll R_{\mathrm{S}}$ e $R_{\mathrm{out}} \ll R_{\mathrm{L}}$, per cui lo stadio può essere opportunamente rappresentato come amplificatore di transresistenza, con transresistenza $R_{\mathrm{m}} = A_{\mathrm{v}} R_{\mathrm{in}} = -1.422\,\mathrm{M\Omega}$, come riportato sotto (nota: il circuito relativo a questa rappresentazione ed il valore della transresistenza non erano richiesti dall'esercizio).



Esercizio 2.



Dato il circuito in figura, dove:

- $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R$
- $R_7 = R_8 = R_9 = R_{10} = R_{11} = 20R$
- $R_{12} = 50R$
- $C_1 = 1000C$
- $C_2 = C$

con $R = 1\,\text{k}\Omega$ e $C = \dfrac{10}{2\pi}$ nF

Determinare:

1. l'espressione simbolica (in funzione di R_1, R_2, etc.) e il valore numerico del guadagno di tensione $A_{\rm V} = V_{\rm out}/V_{\rm in}$ assumendo che C_1 si comporti come un cortocircuito e C_2 come un circuito aperto;
2. l'espressione simbolica (in funzione di R_1, R_2, etc.) e il valore numerico del guadagno di tensione $A_{\rm V}(s) = V_{\rm out}(s)/V_{\rm in}(s)$ al variare della frequenza;
3. il diagramma di Bode asintontico di modulo e fase di $A_{\rm V}(s)$ al punto precedente;
4. l'intervallo di tensioni in cui può variare $V_{\rm OUT}$ in continua assumendo che tutti gli amplificatori operazionali presentino input offset voltage (max.) pari a 5 mV.

Soluzione:

1. In banda:

$$A_{\mathrm{V}} = -\frac{R_{12}}{R_{11}}\left[\frac{R_9}{R_8+R_9}\left(1+\frac{R_5}{R_4}\right) - \frac{R_8}{R_8+R_9}\frac{R_7}{R_1+R_2}\right] = 10 \quad (20\,\mathrm{dB}, 0°)$$

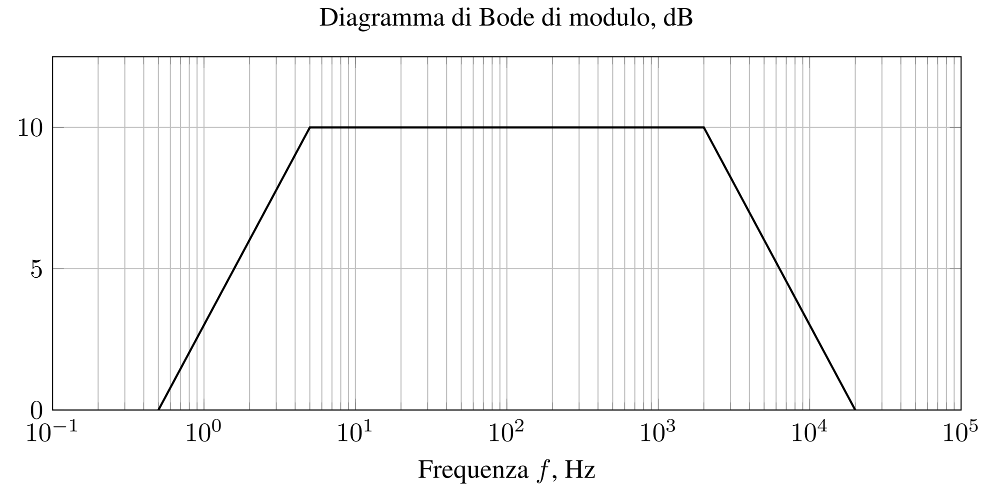
2. In frequenza:

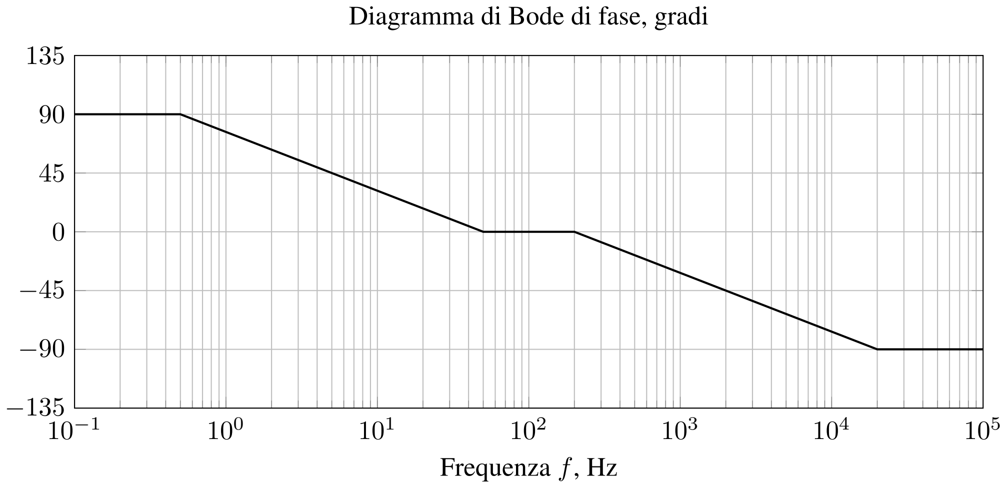
$$A_{\mathrm{V}}(s) = -\frac{sR_{12}C_1}{(1+sR_{11}C_1)\,(1+sR_{12}C_2)}\left[\frac{R_9}{R_8+R_9}\left(1+\frac{R_5}{R_4}\right) - \frac{R_8}{R_8+R_9}\frac{R_7}{R_1}\right]$$

$$A_{\mathrm{V}}(s) = \frac{s\cdot 50\,000\,RC}{(1+s\cdot 20\,000RC)\,(1+s\cdot 50RC)} = \frac{s\cdot(2\,\mathrm{s}/2\pi)}{(1+s\cdot(200\,\mathrm{ms}/(2\pi))\,(1+s\cdot 500\,\mu\mathrm{s}/(2\pi))}$$

La funzione di trasferimento presenta uno zero semplice nell'origine ($s_z = 0$) e due poli reali negative, con frequenze di taglio $f_{\mathrm{p1}} = 5\,\mathrm{Hz}$ e $f_{\mathrm{p2}} = 2\,\mathrm{kHz}$

3. Bode





4. In continua OP4 è in configurazione voltage follower ed è disaccoppiato dall'uscita di OP3. Pertanto $V_{\mathrm{OUT,DC}} = V_{\mathrm{OFF,4}}$ e $V_{\mathrm{OUT,DC}} \in (-5, +5)\mathrm{mV}$.