

**Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure**  
**Appello del 2/9/2021**

Nome:	_____
Cognome:	_____ <b>SOLUZIONE</b> _____
Matricola:	_____

**ATTENZIONE**

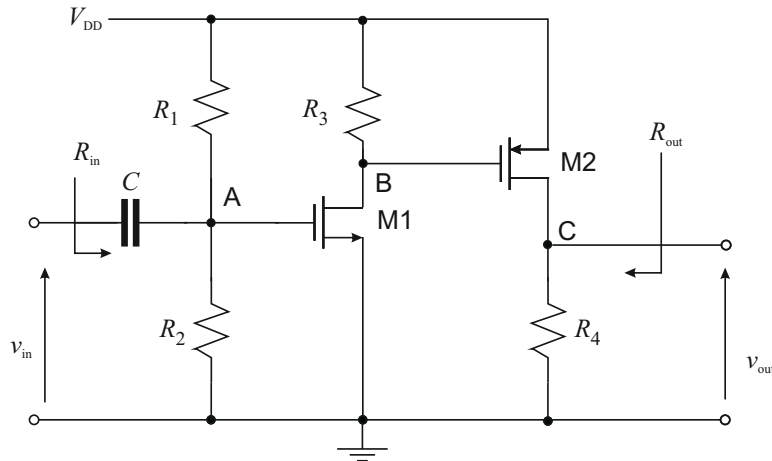
1. Compilare subito questa pagina con nome, cognome e numero di matricola
2. Per i quesiti a risposta multipla, la risposta errata determina la sottrazione di un punteggio pari a metà del valore della risposta esatta
3. Riportare le **risposte esatte** dei quesiti a risposta multipla nella tabella posta 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				X		X
c	X					
d		X				

- Un amplificatore di tensione è descritto dai parametri  $A_v$ ,  $R_{in}$ ,  $R_{out}$ . Collegando l'ingresso ad una data sorgente di segnale, la tensione d'uscita dell'amplificatore a vuoto è una sinusoide a frequenza 100Hz di ampiezza di picco pari a 4V. Con la stessa sorgente in ingresso, collegando una resistenza di carico  $R_L = 10k\Omega$ , la tensione d'uscita è una sinusoide a frequenza 100Hz con ampiezza di picco pari a 2V. Si può concludere che:
  - $R_{in} = 10k\Omega$
  - La dinamica della tensione d'uscita dell'amplificatore è limitata a  $\pm 2V$
  - $R_{out} = 10k\Omega$
  - $R_{in} \rightarrow \infty$  e non si ha effetto di carico in ingresso.
- Un amplificatore operazionale con amplificazione differenziale a bassa frequenza pari a 120dB, prodotto banda-guadagno pari a 1MHz, 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 non invertente con amplificazione di tensione in banda di 40dB. La banda dell'amplificatore di tensione non invertente è pari a:
  - 1Hz
  - 1MHz
  - 100kHz
  - 10kHz
- La transconduttanza di piccolo segnale  $g_m$  di un transistor nMOS in regione di saturazione può essere espressa in funzione delle grandezze nel punto di lavoro Q come:
  - $g_m = \beta (V_{GS} - V_{TH})$
  - $g_m = \sqrt{\frac{\beta}{I_D}}$
  - $g_m = \lambda I_D$
  - $g_m = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_{TH})^2}$
- In un diodo semi-ideale con  $V_\gamma = 0.7V$  in interdizione (stato OFF), detta  $v_D$  la tensione tra anodo e catodo in condizioni statiche, si ha sempre che:
  - $v_D < 0V$
  - $v_D < 0.7V$
  - $v_D < -0.7V$
  - $v_D < -0.7V$  o  $v_D > 0.7V$ , a seconda del verso della corrente
- In un amplificatore di tensione invertente basato su operazionale con  $A_v = -4$ , la dinamica del segnale d'ingresso è  $(-1V, 0)$ , la porta d'uscita è collegata ad un carico di  $1k\Omega$  e la corrente che scorre nella rete di retroazione è trascurabile. Detta  $\Delta V$  la dinamica della tensione d'uscita dell'operazionale e  $\Delta I$  la dinamica della corrente d'uscita dell'operazionale, in quale dei seguenti casi l'amplificatore opera in linearità?
  - $\Delta V = (1V, 5V)$ ,  $\Delta I = (-10mA, 10mA)$
  - $\Delta V = (-5V, 1V)$ ,  $\Delta I = (-5mA, 0)$
  - $\Delta V = (-5V, 5V)$ ,  $\Delta I = (0, 0.5mA)$
  - $\Delta V = (-5V, 5V)$ ,  $\Delta I = (-0.5mA, 0.5mA)$
- In un comparatore di soglia invertente con isteresi realizzato a partire da un amplificatore operazionale:
  - è presente retroazione negativa
  - è presente retroazione positiva
  - sono sempre presenti sia retroazione positiva sia retroazione negativa
  - non è presente alcuna rete di retroazione (circuiti ad anello aperto)

## Esercizio 1.



$R_1=400\text{ k}\Omega$	$V_A=1\text{ V}$
$R_2=100\text{ k}\Omega$	$V_B=3.2\text{ V}$
$R_3=100\text{ k}\Omega$	$V_C=2\text{ V}$
$R_4=20\text{ k}\Omega$	$V_{DD}=5\text{ V}$

<i>per M1:</i>	<i>per M2:</i>
$\beta=400\text{ }\mu\text{A/V}^2$	$\beta=200\text{ }\mu\text{A/V}^2$
$V_{TH}=0.7\text{ V}$	$V_{TH}=0.8\text{ V}$
$\lambda=0$	$\lambda=0.1\text{ V}^{-1}$

Con riferimento allo stadio in figura

1. verificare la regione di funzionamento di M1 e M2 determinarne i parametri del modello per il piccolo segnale (si trascuri l'effetto di  $\lambda$  nel calcolo della corrente di drain e della transconduttanza);
2. determinare il guadagno di tensione  $A_v = v_{out}/v_{in}$  a centro banda, ovvero con  $C \rightarrow \infty$  (espressione simbolica e valore numerico).
3. determinare la resistenza di ingresso e la resistenza di uscita indicate in figura (espressione simbolica e valore numerico).
4. C'è effetto di carico tra il primo e il secondo stadio? Caricare le foto per giustificare la risposta.

### Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore M1

$$V_{GS,1} = V_A = 1 \text{ V}; V_{GS,1} - V_{TH,1} = 0.3 \text{ V} > 0;$$

$$V_{SD,1} = V_B = 3.2 \text{ V} > V_{GS,1} - V_{TH,1};$$

Non richiesto:  $I_D = 18 \mu\text{A}$ .

$$g_{m1} = \beta (V_{GS,1} - V_{TH,1}) = 120 \mu\text{S}; r_{o1} = \infty$$

### Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore M2

$$V_{SG,2} = V_{DD} - V_B = 1.8 \text{ V}; V_{SG,2} - V_{TH,2} = 1 \text{ V} > 0;$$

$$V_{SD,2} = V_{DD} - V_C = 3 \text{ V} > V_{SG,2} - V_{TH,2};$$

Non richiesto:  $I_D = 100 \mu\text{A}$ .

$$g_{m2} = \beta (V_{SG,2} - V_{TH,2}) = 200 \mu\text{S}; r_{o2} = 100 \text{ k}\Omega$$

NB. Si trascura l'effetto di  $\lambda$  nel calcolo della corrente di drain e della transconduttanza.

#### Analisi Stadio

Sostituendo  $C$  con un corto circuito si ha una cascata di due stadi a source comune (Fig. 1).

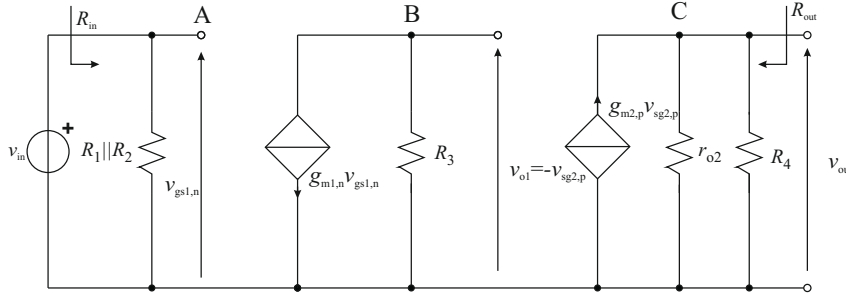


Figura 1: Circuito di piccolo segnale dello stadio

#### Primo stadio:

$$v_{gs,1} = v_{in}; v_{o1} = -g_{m1} R_3 v_{gs,1} = -g_{m1} R_3 v_{in}$$

$$A_{v01} = -g_{m1} R_3 = -12 \text{ (21.6 dB)}; R_{in,1} = R_p = R_1 // R_2 = 80 \text{ k}\Omega; R_{out,1} = R_3 = 100 \text{ k}\Omega$$

**Secondo stadio** ( $R' = r_{o2} // R_4 = 16.67 \text{ k}\Omega$ ):

$$v_{gs,2} = -v_{o1}; v_{out} = g_{m2} R' v_{gs,2} = -g_{m2} R' v_{o1}$$

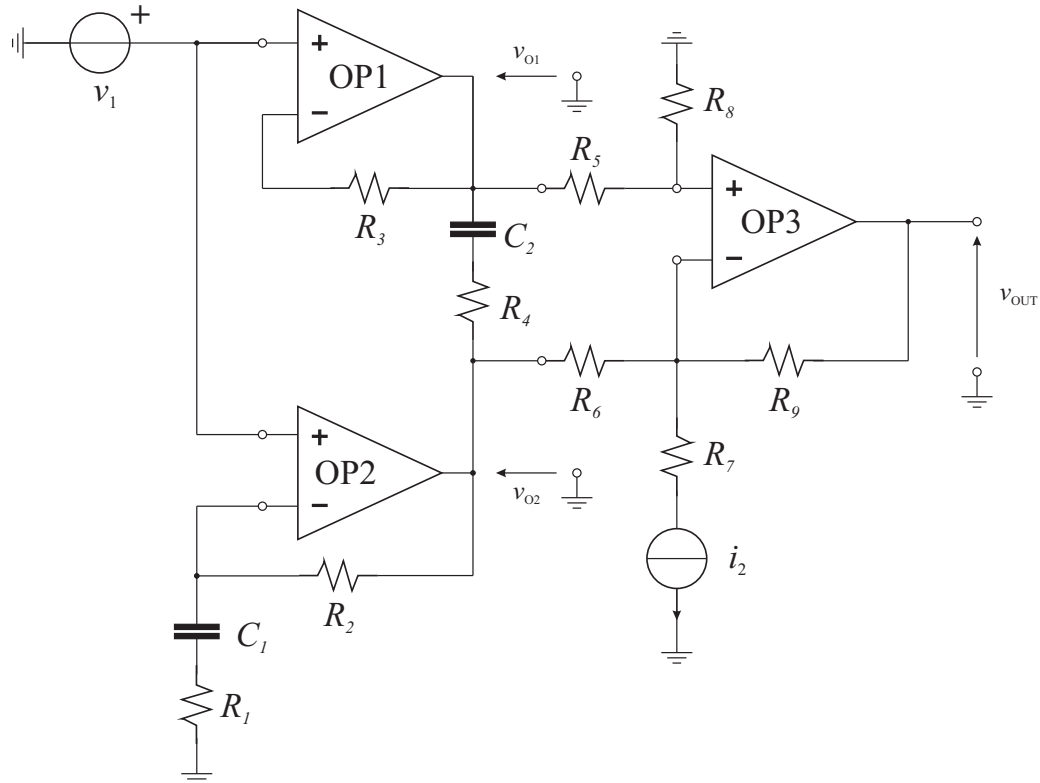
$$A_{v02} = -g_{m2} R' = -3.33 \text{ (10.45 dB)}; R_{in,2} = \infty; R_{out,2} = R'$$

#### Cascata:

$$A_{v0} = A_{v01} A_{v02} = 40 \text{ (}\approx 32 \text{ dB)}; R_{in} = R_{in,1}; R_{out} = R_{out,2}$$

NB. Non ci sono effetti di carico tra i due stadi poichè la resistenza di ingresso del secondo è infinita.

## Esercizio 2.



Assumendo  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = R_9 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = C_2 = \frac{10}{2\pi} \text{ nF}$  e considerando gli operazionali ideali, determinare:

1. l'espressione delle tensioni  $v_{O1}$ ,  $v_{O2}$  e  $v_{OUT}$  in continua (assumendo cioè che i condensatori possano essere considerati circuiti aperti);
2. l'espressione delle funzioni di trasferimento  $H_1(s) = \frac{V_{O1}(s)}{V_1(s)}$ ,  $H_2(s) = \frac{V_{O2}(s)}{V_1(s)}$ ,  $H(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{V_1(s)}$  (nel calcolo delle funzioni di trasferimento richieste, il generatore  $I_2$  è da considerarsi spento);
3. i diagrammi di Bode del modulo e della fase di  $H_2(s) = \frac{V_{O2}(s)}{V_1(s)}$  ricavata al punto precedente;
4. l'espressione della tensione di uscita  $v_{out}(t)$ , per  $v_1(t) = 1V \cdot \sin(2\pi f_0 t)$ , con  $f_0 = 1 \text{ MHz}$ , e  $i_2(t) = 200 \mu\text{A}$  (continua).

## 1. Espressioni delle tensioni richieste:

$$v_{\text{OUT},1} = v_1$$

$$v_{\text{OUT},2} = v_1$$

$$v_{\text{OUT}} = R_9 i_2 = R i_2$$

## 2. Funzioni di trasferimento:

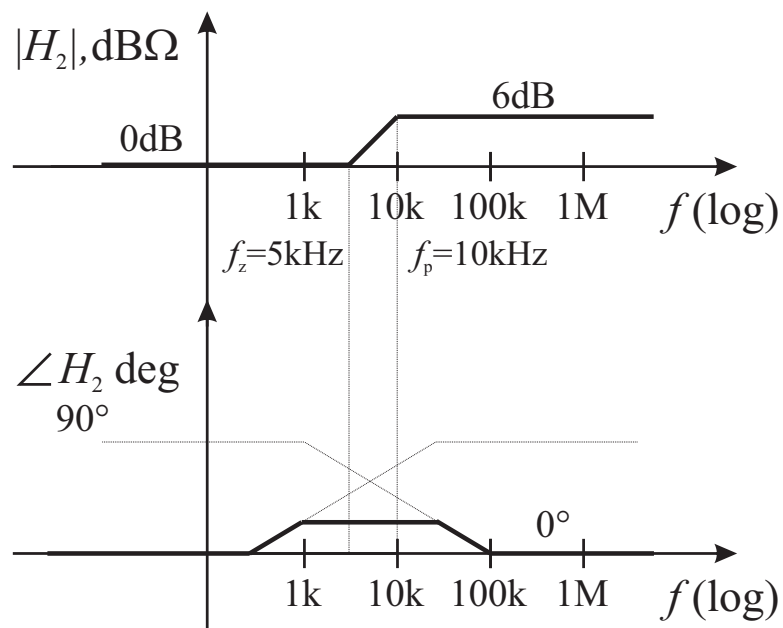
$$H_1(s) = \frac{V_{o1}(s)}{V_1(s)} = 1$$

$$H_2(s) = \frac{V_{o2}(s)}{V_1(s)} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{sC_1}}\right) = \frac{1 + sC_1(R_1 + R_2)}{1 + sC_1R_1} = \frac{1 + s2RC_1}{1 + sRC_1}$$

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{V_o(s)}{V_1(s)} = \frac{V_{o1}(s)}{V_1(s)} \frac{R_8}{R_5 + R_8} \left(1 + \frac{R_9}{R_6}\right) - \frac{V_{o2}(s)}{V_1(s)} \frac{R_9}{R_6} \\ &= \frac{R_8}{R_5 + R_8} \left(1 + \frac{R_9}{R_6}\right) - \frac{R_9}{R_6} \frac{1 + sC_1(R_1 + R_2)}{1 + sC_1R_1} \\ &= 1 - \frac{1 + s2RC_1}{1 + sRC_1} = -\frac{sRC_1}{1 + sRC_1} \end{aligned}$$

## 3. Diagrammi di Bode:

La funzione di trasferimento  $H_2(s)$  presenta uno zero reale negativo in  $s_z = -\frac{1}{2RC_1}$  (con frequenza centrale  $f_z = \frac{1}{2\pi \cdot 2RC_1} = 5 \text{ kHz}$ ) ed un polo reale negativo in  $s_p = -\frac{1}{RC_1}$  (con frequenza centrale  $f_p = \frac{1}{2\pi RC_1} = 10 \text{ kHz}$ ). Il valore asintotico del modulo di  $|H_2(s)|$  per  $|s| \rightarrow 0$  è 1 (0dB), il valore asintotico per  $|s| \rightarrow \infty$  è 2 (6dB).

4. I diagrammi di Bode del modulo e della fase di  $H_2(s)$  sono riportati in figura.

## 5. Tensione d'uscita nel dominio del tempo

La tensione d'uscita può esprimersi sovrapponendo gli effetti dei generatori  $v_1$  ed  $i_2$ :

$$v_{\text{out}} = v_{\text{out},1} + v_{\text{out},2}$$

La frequenza del generatore sinusoidale  $v_1$  è superiore di due decadi alla frequenza del polo di  $H(s)$  al punto 2, pertanto  $|H(j2\pi f_0)| \simeq 1$  e  $\angle H(j2\pi f_0) \simeq 180^\circ$ , e, con ottima approssimazione:  $v_{\text{out},1} \simeq -v_1 = -1V \sin(2\pi f_0 t)$ .

Essendo poi  $i_2$  una corrente continua, il contributo  $v_{\text{out},2}$  si può ricavare immediatamente dall'espressione trovata al punto 1, e vale  $Ri_2 = 2V$ .

Ne segue quindi che:

$$v_{\text{out}} = -1V \sin(2\pi f_0 t) + 2V$$