

**Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure**  
**Appello del 5/9/2023**

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

**ATTENZIONE**

1. Compilare subito questa pagina con nome, cognome e numero di matricola
2. Gli studenti del corso 05QXVOA (8 crediti, a.a. 2022/23) sono tenuti a rispondere solo ai primi quattro quesiti teorici a risposta multipla, gli studenti del corso 04QXVOA (10 crediti, a.a. 2021/22 e precedenti) sono tenuti a rispondere a tutti e sei i quesiti. Gli esercizi sono identici per i corsi 05QXVOA e 04QXVOA
3. Per i quesiti a risposta multipla, la risposta errata determina la sottrazione di un punteggio pari a metà del valore della risposta esatta
4. Riportare le **risposte esatte** dei quesiti a risposta multipla nella tabella posta all'inizio della relativa sezione
5. Le risposte ai vari quesiti vanno riportate **esclusivamente** nello spazio reso disponibile immediatamente dopo il quesito stesso
6. Si può fare uso di fogli di brutta **bianchi** resi disponibili a cura dello studente. La brutta non deve essere consegnata
7. Non si possono utilizzare libri, appunti o formulari

## Domande a risposta multipla

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

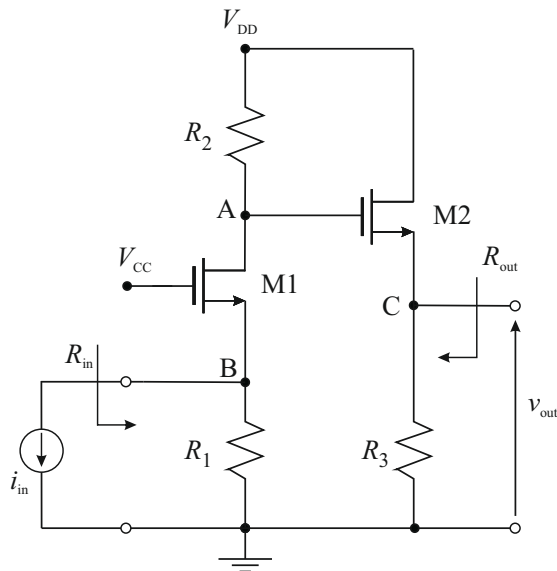
**Domande 1.-4. per tutti gli studenti (05QXVOA e 04QXVOA)**

- Un amplificatore differenziale fornisce in uscita una tensione  $v_{\text{out}} = 10.05v^+ - 9.95v^-$ . Le amplificazioni differenziale ( $A_{d,\text{dB}}$ ) e di modo comune ( $A_{cm,\text{dB}}$ ) sono:
  - $A_{d,\text{dB}} = 20 \text{ dB}$ ,  $A_{cm,\text{dB}} = 20 \text{ dB}$
  - $A_{d,\text{dB}} = 20 \text{ dB}$ ,  $A_{cm,\text{dB}} = -20 \text{ dB}$
  - $A_{d,\text{dB}} = 10 \text{ dB}$ ,  $A_{cm,\text{dB}} = -10 \text{ dB}$
  - $A_{d,\text{dB}} = 10 \text{ dB}$ ,  $A_{cm,\text{dB}} = 10 \text{ dB}$
- La banda di un amplificatore di tensione non invertente con amplificazione di tensione  $A_v$ , basato su un amplificatore operazionale reale dato con  $A_d(s) = \frac{A_{d0}}{1 - \frac{s}{s_p}}$ ,  $R_{\text{in}} \rightarrow \infty$ ,  $R_{\text{out}} = 0$ .
  - è indipendente da  $A_v$  e dalle caratteristiche dell'operazionale.
  - è inversamente proporzionale ad  $A_v$ , fintanto che  $A_v < A_{d,0}$ .
  - è pari alla frequenza centrale del polo di  $A_d(s)$ , cioè  $\frac{|s_p|}{2\pi}$
  - è pari al prodotto banda-guadagno dell'operazionale  $f_T = \frac{A_{d,0}|s_p|}{2\pi}$
- La resistenza d'uscita di piccolo segnale  $r_o$  di un transistor pMOS in regione di saturazione può essere espressa in funzione delle grandezze nel punto di lavoro Q come:
  - $r_o = \frac{V_{SG} - V_{TH}}{I_D}$
  - $r_o = \frac{1}{\sqrt{2}\beta I_D}$
  - $r_o = \frac{V_{SD}}{I_D}$
  - $r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$
- Un amplificatore di tensione non-invertente basato su operazionale presenta  $A_v = +10$  e pilota un carico resistivo  $R_L = 500 \Omega$ . Se l'ingresso ha dinamica  $(-0.1, +0.2) \text{ V}$  e la corrente che scorre nella rete di retroazione è trascurabile, la minima dinamica della tensione d'uscita  $\Delta V_{\text{min}}$  e la minima dinamica della corrente d'uscita  $\Delta I_{\text{min}}$  richieste all'operazionale per garantire il funzionamento in linearità sono:
  - $\Delta V_{\text{min}} = (-1, 2) \text{ V}$ ;  $\Delta I_{\text{min}} = (-2, 4) \text{ mA}$
  - $\Delta V_{\text{min}} = (-1, 2) \text{ V}$ , non ci sono condizioni su  $\Delta I_{\text{min}}$  perchè l'uscita dell'amplificatore è in tensione
  - $\Delta V_{\text{min}} = (-0.1, 0.2) \text{ V}$ ;  $\Delta I_{\text{min}} = (-0.2, 0.4) \text{ mA}$
  - $\Delta V_{\text{min}} = (-0.1, 0.2) \text{ V}$ , non ci sono condizioni su  $\Delta I_{\text{min}}$  perchè l'uscita dell'amplificatore è in tensione

**Domande 5.-6. per i soli studenti del corso 04QXVOA (10 crediti, frequenza a.a. 2021/22 o precedenti)**

- In un circuito contenente un diodo ideale si è fatta l'ipotesi che il diodo sia in conduzione. Per verificare l'ipotesi occorre:
  - sostituire il diodo con un circuito aperto e verificare che  $v_D < 0$
  - sostituire il diodo con un circuito aperto e verificare che  $i_D = 0$
  - sostituire il diodo con un corto circuito e verificare che  $v_D = 0$
  - sostituire il diodo con un corto circuito e verificare che  $i_D > 0$
- In un comparatore di soglia invertente con 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)

## Esercizio n. 1



$$\begin{aligned}
 R_1 &= 5 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= 2 \text{ k}\Omega \\
 R_3 &= 10 \text{ k}\Omega \\
 V_{DD} &= 1.8 \text{ V} \\
 V_{CC} &= 1.2 \text{ V} \\
 V_A &= 1.6 \text{ V} \\
 V_B &= 0.5 \text{ V} \\
 V_C &= 1.0 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\text{per M1:} \\
 &\beta = 20 \text{ mA/V}^2 \\
 &V_{TH} = 0.6 \text{ V} \\
 &\lambda = 0 \\
 &\text{per M2:} \\
 &\beta = 20 \text{ mA/V}^2 \\
 &V_{TH} = 0.5 \text{ V} \\
 &\lambda = 0
 \end{aligned}$$

Con riferimento al circuito in figura:

1. verificare il funzionamento dei transistori MOS in regione di saturazione e determinarne i parametri di piccolo segnale nel punto di lavoro;
2. determinare, in condizioni di piccolo segnale, l'amplificazione di transresistenza  $R_m = v_{out}/i_{in}$ ,  $R_{in}$  e  $R_{out}$  indicate in figura;
3. si supponga che lo stadio amplificatore sia collegato alla porta d'ingresso ad una sorgente che presenta tensione a vuoto  $v_s$  e resistenza interna  $R_S = 400\Omega$  e che piloti un carico  $R_L = 400\Omega$  collegato alla porta d'uscita. Sia la sorgente, sia il carico sono accoppiati in AC mediante condensatori che si possono considerare come corto circuiti nella banda del segnale. Determinare l'amplificazione di tensione  $A_v = v_{out}/v_s$  nelle condizioni descritte.

**Soluzione**

1. Per il transistor M1:

$$V_{GS1} = V_{CC} - V_C = 1.2V - 0.5V = 700mV > V_{TH1} = 600mV$$

e

$$V_{DS1} = V_A - V_B = 1.6V - 0.5V = 1.1V > V_{GS1} - V_{TH1} = 100mV$$

Il transistor M1 è polarizzato in regione di saturazione.

La transconduttanza di piccolo segnale può essere valutata come  $g_{m1} = \beta(V_{GS1} - V_{TH1}) = 2\text{ mS}$ . La conduttanza di uscita è nulla essendo  $\lambda = 0$ .

Per il transistor M2:

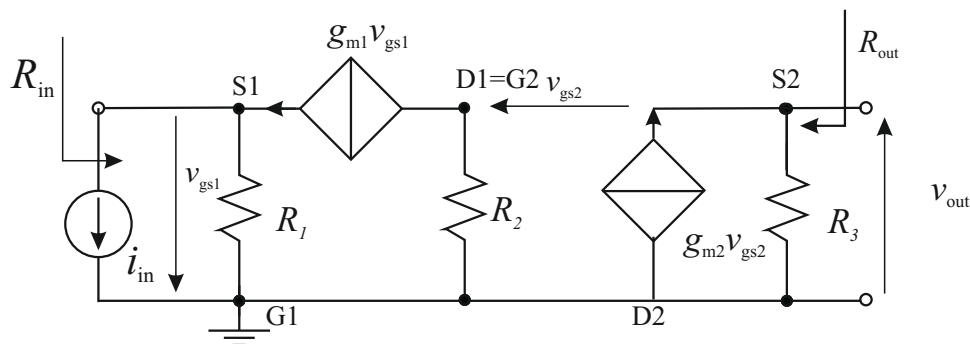
$$V_{GS2} = V_A - V_C = 1.6V - 1V = 0.6V > V_{TH2} = .5V$$

e

$$V_{DS2} = V_{DD} - V_C = 1.8V - 1V > V_{GS2} - V_{TH2} = 100mV$$

Il transistor M2 è polarizzato in regione di saturazione.

La transconduttanza di piccolo segnale può essere valutata come  $g_{m2} = \beta(V_{GS2} - V_{TH2}) = 2\text{ mS}$ . La conduttanza di uscita è nulla essendo  $\lambda = 0$ .



2. Il circuito equivalente per il piccolo segnale è quello riportato sopra in figura. Si tratta di uno stadio gate comune collegato in cascata ad uno stadio drain comune.

- Transresistenza:

per lo stadio gate comune è possibile ricavare la tensione di controllo  $v_{gs1}$  dalla KCL al nodo B come:

$$i_{in} = \frac{v_{gs1}}{R_1} + g_{m1}v_{gs1}$$

da cui:

$$v_{gs1} = \frac{i_{in}R_1}{1 + g_{m1}R_1}$$

e quindi la tensione d'uscita  $v_{o1}$  del primo stadio vale:

$$v_{o1} = -g_{m1}R_2v_{gs1} = -\frac{g_{m1}R_1R_2}{1 + g_{m1}R_1}i_{in}.$$

Per lo stadio drain comune, dalla KVL alla maglia d'uscita

$$v_{gs2} = v_{o1} - g_{m2}R_3v_{gs2}$$

la tensione di controllo  $v_{gs2}$  si può esprimere come:

$$v_{gs2} = \frac{v_{o1}}{1 + g_{m2}R_3}$$

e quindi la tensione d'uscita complessiva  $v_{out}$  è data da:

$$v_{out} = g_{m2}R_3v_{gs2} = v_{o1} \frac{g_{m2}R_3}{1 + g_{m2}R_3} = -\frac{g_{m2}R_3}{1 + g_{m2}R_3} \frac{g_{m1}R_1R_2}{1 + g_{m1}R_1} i_{in}.$$

La transresistenza dello stadio è quindi data da:

$$R_m = \frac{v_{out}}{i_{in}} = -\frac{g_{m2}R_3}{1 + g_{m2}R_3} \frac{g_{m1}R_1R_2}{1 + g_{m1}R_1} = -1.73k\Omega \quad (\approx 65 \text{ dB}\Omega)$$

- Resistenza d'ingresso:

applicando un generatore di test  $i_t$  alla porta d'ingresso,

$$v_t = v_{gs1} = \frac{i_t R_1}{1 + g_{m1}R_1}$$

la resistenza d'ingresso  $R_{in}$  si può quindi esprimere come:

$$R_{in} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_1}{1 + g_{m1}R_1} = 455\Omega$$

- Resistenza d'uscita:

applicando un generatore di test  $i_t$  alla porta d'uscita e spegnendo il generatore d'ingresso

$$v_t = v_{gs2} = \frac{i_t R_3}{1 + g_{m2}R_3}$$

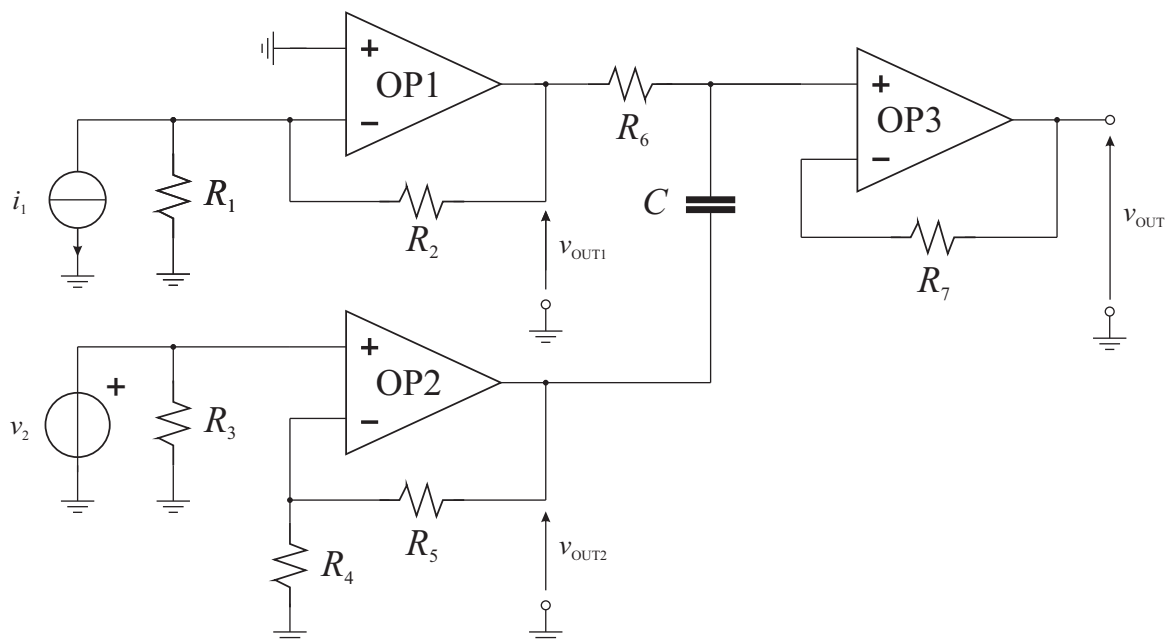
e la resistenza d'uscita si ricava pertanto come:

$$R_{out} = \frac{v_t}{i_t} = \frac{R_3}{1 + g_{m2}R_3} = 476\Omega$$

### 3. Per lo stadio caricato

$$A_v = \frac{R_m R_L}{(R_S + R_{in})(R_L + R_{out})} = -0.92$$

## Esercizio 2.



Nel circuito in figura  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 9R = 9 \text{ k}\Omega$ ,  $R_6 = R_7 = 10R = 9 \text{ k}\Omega$  e  $C = \frac{10}{2\pi} \text{ nF}$ . Supponendo che tutti gli amplificatori operazionali si possano considerare ideali salvo indicazioni diverse, determinare:

1. l'espressione delle tensioni  $v_{\text{OUT},1}$ ,  $v_{\text{OUT},2}$  e  $v_{\text{OUT}}$  in funzione degli ingressi  $i_1$ ,  $v_2$  e delle resistenze  $R_1 \dots R_7$ , assumendo che  $C$  si comporti come un circuito aperto;
2. l'espressione della funzione di trasferimento nel dominio della frequenza  $H(s) = \frac{V_{\text{out}}(s)}{V_2(s)}$ ;
3. i diagrammi di Bode in modulo e fase della funzione di trasferimento  $H(s)$  ricavata al punto precedente;
4. l'intervallo in cui può variare la tensione d'uscita  $v_{\text{OUT}}$  in continua con ingressi spenti, supponendo che tutti gli amplificatori operazionali utilizzati presentino, da dati di targa, *input offset voltage* (max.) pari a 5 mV.

## 1. Espressioni delle tensioni d'uscita:

$$v_{\text{OUT},1} = R_2 i_1 = 1 \text{ k}\Omega \cdot i_1$$

$$v_{\text{OUT},2} = v_2 \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) = 10 v_2$$

$$v_{\text{OUT}} = v_{\text{OUT},1} = R_2 i_1 = 1 \text{ k}\Omega \cdot i_1$$

2. Funzione di trasferimento  $H(s)$ 

$$H(s) = \frac{V_{\text{out}}(s)}{V_2(s)} = \frac{sC}{\frac{1}{R_6} + sC} v_2 \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) = \frac{100 RCs}{1 + 10 RCs};$$

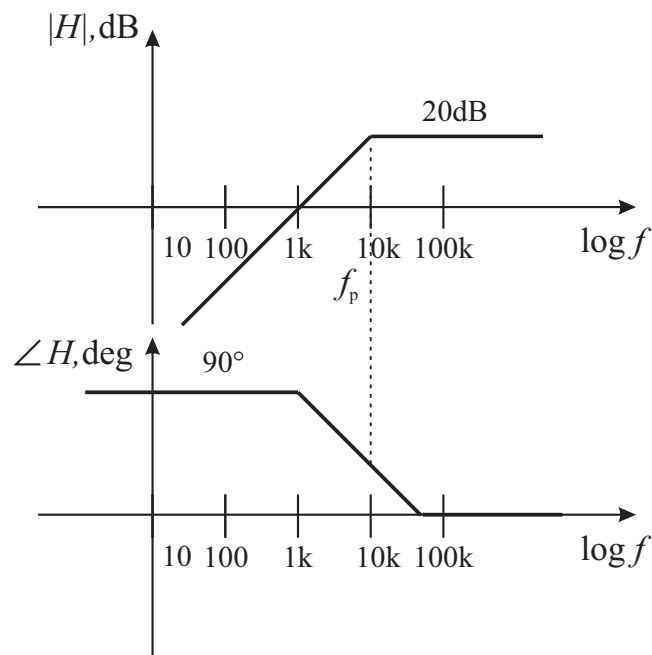
## 3. Diagrammi di Bode

La funzione di trasferimento  $H(s)$  presenta uno zero nell'origine ed un polo a pulsazione:

$$s_p = -\frac{1}{10RC} = -62.8 \cdot \text{rad/ms}$$

che corrisponde ad una frequenza centrale:

$$f_p = \frac{|s_p|}{2\pi} = 10 \text{ kHz}$$



## 4. Offset

$$\Delta V_{\text{OUT}} = V_{\text{OFF},1} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + V_{\text{OFF},3} = 2 V_{\text{OFF},1} + V_{\text{OFF},3}$$

$$\Delta V_{\text{OUT}} \in (-15, +15) \text{ mV}$$