

Sistemi Elettronici, Tecnologie e Misure
Appello del 3/7/2023

Nome:	_____
Cognome:	_____ SOLUZIONE _____
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

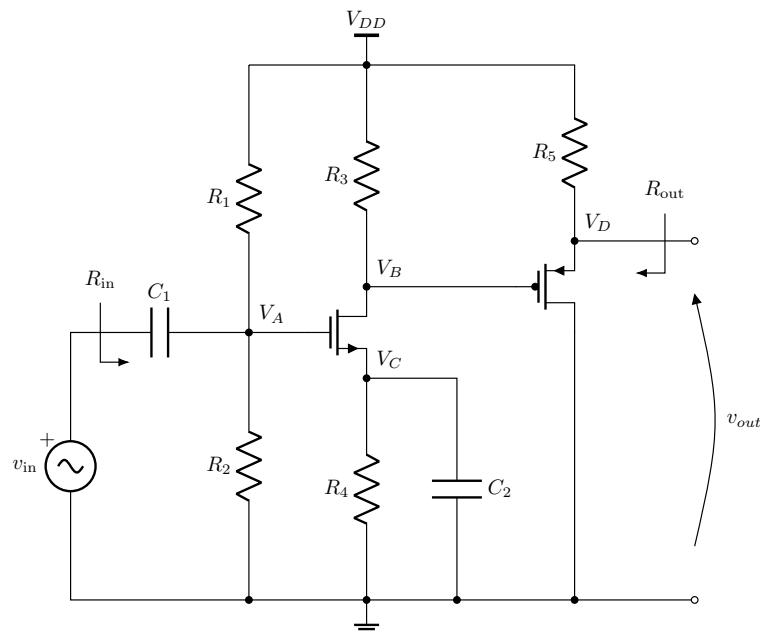
	1	2	3	4	5	6
a	X		X			
b		X		X		
c					X	
d						X

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

- Un amplificatore differenziale fornisce in uscita una tensione $v_{\text{out}} = 10.5v^+ - 9.5v^-$. Le amplificazioni differenziale ($A_{\text{d,dB}}$) e di modo comune ($A_{\text{cm,dB}}$) sono:
 - $A_{\text{d,dB}} = 20 \text{ dB}$, $A_{\text{cm,dB}} = 0 \text{ dB}$
 - $A_{\text{d,dB}} = 10 \text{ dB}$, $A_{\text{cm,dB}} = 0 \text{ dB}$
 - $A_{\text{d,dB}} = 0 \text{ dB}$, $A_{\text{cm,dB}} = -10 \text{ dB}$
 - $A_{\text{d,dB}} = 0 \text{ dB}$, $A_{\text{cm,dB}} = -20 \text{ dB}$
- Un transistor MOS con $\lambda \neq 0$ polarizzato in regione di saturazione si comporta per il piccolo segnale come:
 - un generatore di tensione controllato in corrente con una resistenza in parallelo
 - un generatore di corrente controllato in tensione con una resistenza in parallelo
 - un generatore di corrente controllato in tensione con una resistenza in serie
 - un generatore di tensione controllato in corrente ideale
- Un amplificatore operazionale con guadagno in banda di 100 dB, prodotto banda-guadagno pari a 10 MHz, resistenze d'ingresso e uscita trascurabili (cioè $R_{\text{in,d}} \rightarrow \infty$, $R_{\text{in,cm}} \rightarrow \infty$, $R_{\text{out}} = 0$), è utilizzato in configurazione amplificatore invertente con amplificazione di tensione $A_v = -3$. La banda dell'amplificatore invertente è pari a:
 - 2.5 MHz
 - 3.3 MHz
 - 10 MHz
 - 250 kHz
- Un amplificatore di transconduttanza è ottenuto collegando in cascata un amplificatore di transconduttanza con parametri $G_{\text{m},1}$, $R_{\text{in},1} \rightarrow \infty$ e $R_{\text{out},1}$ finita e non nulla, ed un amplificatore di corrente descritto dai parametri $A_{\text{i},2}$, $R_{\text{in},2}$ e $R_{\text{out},2}$, tutti finiti e non nulli. La transconduttanza complessiva G_{m} della cascata dei due stadi è data da:
 - $G_{\text{m},1} A_{\text{i},2}$
 - $G_{\text{m},1} A_{\text{i},2} \frac{R_{\text{out},1}}{R_{\text{out},1} + R_{\text{in},2}}$
 - $G_{\text{m},1} A_{\text{i},2} \frac{R_{\text{in},2}}{R_{\text{out},1} + R_{\text{in},2}}$
 - $G_{\text{m},1} A_{\text{i},2} \frac{R_{\text{out},1}}{R_{\text{out},1} + R_{\text{out},2}}$

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

- In un amplificatore invertente basato su operazionale ideale, il resistore che collega il morsetto invertente al generatore d'ingresso è sostituito da un diodo, con catodo collegato al morsetto invertente e anodo collegato al generatore d'ingresso. Per $v_{\text{in}} > 0$ il circuito che si ottiene si comporta come
 - integratore invertente
 - amplificatore logaritmico invertente
 - amplificatore esponenziale invertente
 - derivatore invertente
- In un circuito contenente un diodo semi-ideale con $V_{\gamma} = 0.5 \text{ V}$ si è fatta l'ipotesi che il diodo sia OFF. Per verificare l'ipotesi occorre:
 - sostituire il diodo con un circuito aperto e verificare che $i_{\text{D}} < 0$
 - sostituire il diodo con un generatore di tensione ideale $V_{\gamma} = 0.5 \text{ V}$ e verificare che $i_{\text{D}} > 0$
 - sostituire il diodo con un corto circuito e verificare che $v_{\text{D}} < 0.5 \text{ V}$
 - sostituire il diodo con un circuito aperto e verificare che $v_{\text{D}} < 0.5 \text{ V}$



$n\text{MOS}$: $\beta_n = 10 \text{ mA/V}^2$, $V_{THn} = 0.2 \text{ V}$, $\lambda_n = 0$

$p\text{MOS}$: $\beta_p = 40 \text{ mA/V}^2$, $V_{THp} = 0.3 \text{ V}$, $\lambda_p = 0$

Tensioni DC: $V_{DD} = 4.8 \text{ V}$, $V_A = 1.2 \text{ V}$, $V_B = 2 \text{ V}$, $V_C = 0.8 \text{ V}$, $V_D = 2.4 \text{ V}$

Resistori: $R_1 = 360 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 14 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 12 \text{ k}\Omega$

Condensatori: $C_1 = \frac{1}{2\pi} \mu\text{F}$, $C_2 = \frac{10}{2\pi} \text{ nF}$

Con riferimento al circuito in figura:

1. verificare il funzionamento dei transistori in regione di saturazione e determinare i parametri di piccolo segnale nel punto di lavoro;
2. determinare, in condizioni di piccolo segnale, l'amplificazione di tensione $A_v = v_{\text{out}}/v_{\text{in}}$, la resistenza d'ingresso R_{in} e la resistenza di uscita R_{out} , assumendo che entrambi i condensatori C_1 e C_2 si comportino come cortocircuiti alla frequenza del segnale applicato (disegnare il circuito equivalente e riportare sia l'espressione analitica sia i risultati numerici di A_v , R_{in} e R_{out});
3. determinare, in condizioni di piccolo segnale, l'espressione dell'amplificazione di tensione in frequenza $A_v(s)$ (riportare sia l'espressione analitica sia i risultati numerici);
4. disegnare il diagramma di modulo e fase di $A_v(s)$ trovata al punto precedente

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore $n\text{MOS}$

$$V_{\text{GSn}} = V_A - V_C = 0.4 \text{ V}; \quad V_{\text{GSn}} - V_{\text{THn}} = 0.2 \text{ V} > 0;$$

$$V_{\text{DSn}} = V_B - V_C = 1.2 \text{ V} > V_{\text{GSn}} - V_{\text{THn}};$$

Non richiesto: $I_{\text{Dn}} = 0.2 \text{ mA}$.

$$g_{\text{mn}} = \beta_n (V_{\text{GSn}} - V_{\text{THn}}) = 2 \text{ mS}; \quad r_0 = \infty$$

Regione di funzionamento e Parametri di piccolo segnale Transistore $p\text{MOS}$

$$V_{\text{SGp}} = V_D - V_B = 0.4 \text{ V}; \quad V_{\text{SGp}} - V_{\text{THp}} = 0.1 \text{ V} > 0;$$

$$V_{\text{SDp}} = V_D = 2.4 \text{ V} > V_{\text{SGp}} - V_{\text{THp}};$$

Non richiesto: $I_{\text{D}} = 0.2 \text{ mA}$.

$$g_{\text{mp}} = \beta_p (V_{\text{SGp}} - V_{\text{THp}}) = 4 \text{ mS}; \quad r_0 = \infty$$

Analisi Stadio con C_1 e C_2 Corto-circuiti

Il circuito dato è formato da uno stadio a drain comune (degenere) in cascata e uno a source comune. Il condensatore in serie all'ingresso C_1 ha la funzione di tagliare la componente DC e attenuare le componenti a bassissima frequenza, mentre C_2 fa sì che lo stadio a drain comune sia degenere (basso guadagno) per le basse frequenze e non degenere (alto guadagno) a frequenze più alte che rappresentano la banda utile dell'amplificatore. Sostituendo C_1 e C_2 con dei cortocircuiti si ottiene l'equivalente in Figura (drain comune non degenere).

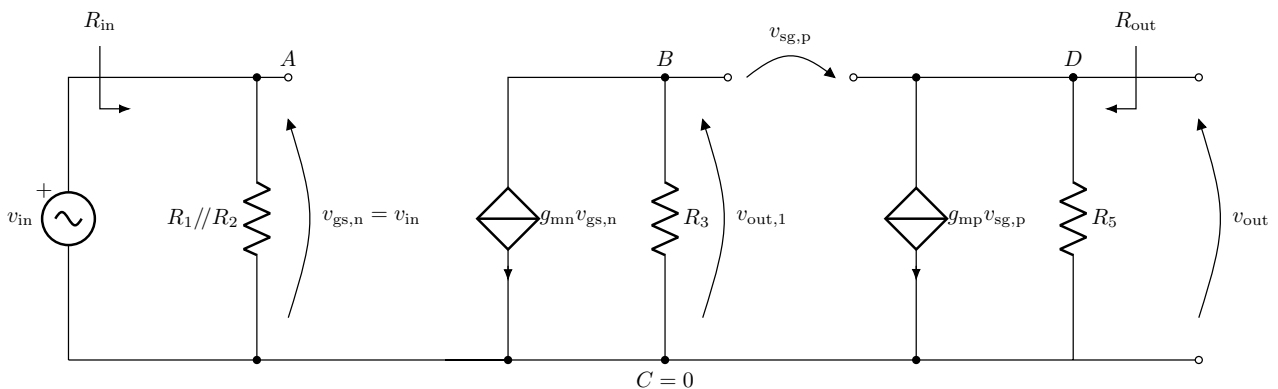


Figura 1: Circuito di piccolo segnale dello stadio con C_1 e C_2 corto-circuiti.

Primo stadio:

$$v_{\text{out},1} = -R_3 g_{\text{mn}} v_{\text{gs},n}$$

Secondo stadio:

$$v_{\text{out}} = -R_5 g_{\text{mp}} v_{\text{sg},p}$$

con

$$v_{\text{sg},p} = v_{\text{out}} - v_{\text{out},1} \Rightarrow v_{\text{out}} = \frac{R_5 g_{\text{mp}}}{1 + R_5 g_{\text{mp}}} v_{\text{out},1}$$

Per cui

$$A_v = -\frac{g_{\text{mn}} g_{\text{mp}} R_3 R_5}{1 + g_{\text{mp}} R_5} = -27.4$$

Dato che il secondo stadio ha impedenza di ingresso infinita (non carica l'uscita del primo stadio) il guadagno totale è il prodotto dei guadagni dei due stadi:

$$A_v = A_{v,\text{CS}} A_{v,\text{CD}} = -g_{\text{mn}} R_3 \frac{g_{\text{mp}} R_5}{1 + g_{\text{mp}} R_5} = -28 \cdot 0.98 = -27.4$$

Le impedenze di ingresso e uscita sono:

$$R_{\text{in}} = R_1 // R_2 = 360 \text{ k}\Omega // 120 \text{ k}\Omega = 90 \text{ k}\Omega$$

$$R_{out} = R_5 // \frac{1}{g_{mp}} = 12 \text{ k}\Omega // 0.5 \text{ k}\Omega = 0.44 \text{ k}\Omega$$

Analisi Stadio in Frequenza

Mantenendo C_1 e C_2 si ottiene l'equivalente in Figura (drain comune non degenerare e partizione in ingresso tra C_1 e $R_1 // R_2$).

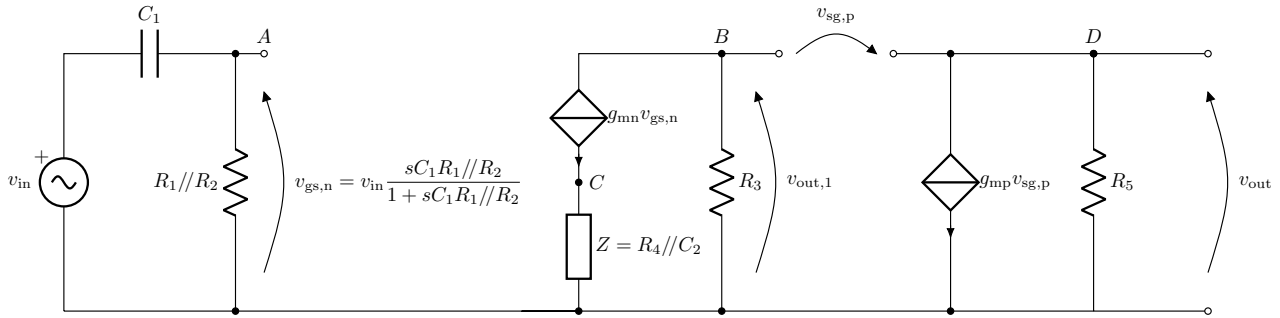


Figura 2: Circuito di piccolo segnale dello stadio completo.

Analogamente al caso precedente, dato che il secondo stadio ha impedenza di ingresso infinita (non carica l'uscita del primo stadio) il guadagno totale è il prodotto dei guadagni dei due stadi per il prodotto di partizione in ingresso. Chiaramente, in questo caso occorre tenere conto della degenerazione di source del primo stadio:

$$A_v = P_{in} A_{v,CS} A_{v,CD} = \frac{sC_1 R_1 // R_2}{1 + sC_1 R_1 // R_2} \left(-\frac{g_{mn} R_3}{1 + g_{mn} Z} \right) \frac{g_{mp} R_5}{1 + g_{mp} R_5}$$

con

$$Z = \frac{R_4}{1 + sC_2 R_4}$$

Per il calcolo completo si ha che il secondo stadio è identico al caso precedente, per cui

$$v_{out} = \frac{R_5 g_{mp}}{1 + R_5 g_{mp}} v_{out,1}$$

mentre per il primo stadio si ha

$$v_{out,1} = -R_3 g_{mn} v_{gs,n}$$

con (come indicato in Figura)

$$v_{gs,n} = v_{in} \frac{sC_1 R_1 // R_2}{1 + sC_1 R_1 // R_2}$$

Per cui

$$A_v = -\frac{g_{mn} g_{mp} R_3 R_5}{1 + g_{mp} R_5} \frac{s \left(s + \frac{1}{C_2 R_4} \right)}{\left(s + \frac{1}{C_1 (R_1 // R_2)} \right) \left(s + \frac{1 + g_{mp} R_4}{C_2 R_4} \right)}$$

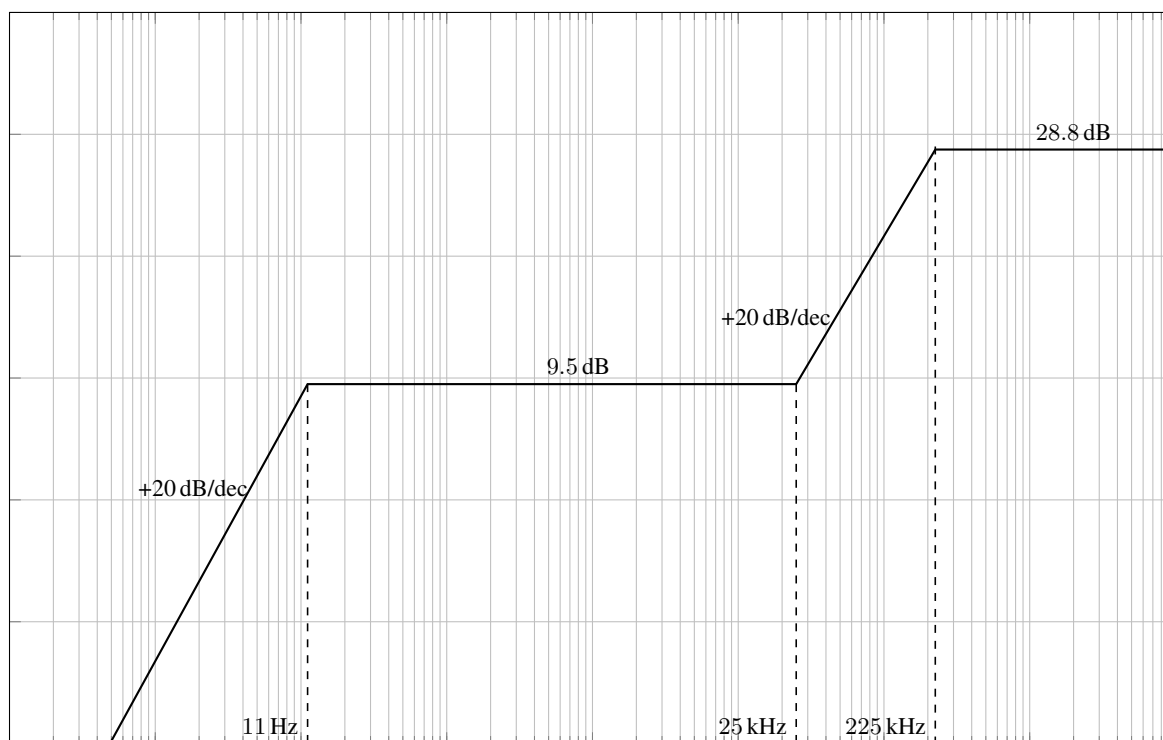
L'amplificazione ha uno zero nell'origine (DC) e uno in $-1/C_2 R_4$ corrispondente a una frequenza di 25 kHz e due poli, uno in $-1/C_1 (R_1 // R_2)$ corrispondente a una frequenza di circa 11 Hz e uno in $-(1 + g_{mp} R_4)/C_2 R_4 = -1/C_2 [R_4 // (1/g_{mp})]$ corrispondente a una frequenza di 225 kHz. A frequenza nulla $A_v = 0$ (C_1 serie impone lo zero nell'origine), mentre a frequenza infinita $A_v = -27.4$ (caso precedente con condensatori sostituiti da corto-circuiti), ovvero circa 28.8 dB. Tra 11 Hz (primo polo) e 25 kHz (secondo zero) si può considerare C_1 come un corto-circuito e C_2 come un circuito aperto per cui si ha una cascata di un source comune con degenerazione e un drain comune, per cui l'amplificazione vale

$$A_v = -\frac{g_{mn} R_3}{1 + g_{mp} R_4} \frac{g_{mp} R_5}{1 + g_{mp} R_5} = -3.11 \cdot 0.98 = -3$$

ovvero circa 9.5 dB

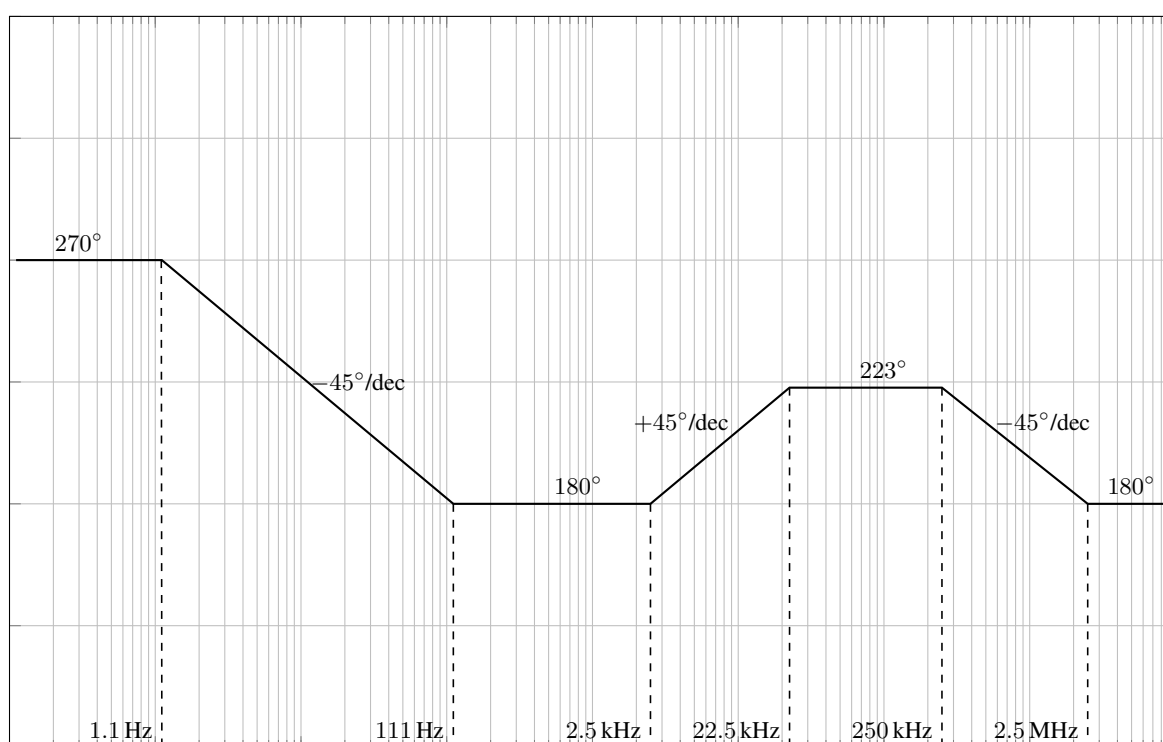
Diagrammi di Bode

Diagramma di Bode di modulo, dB



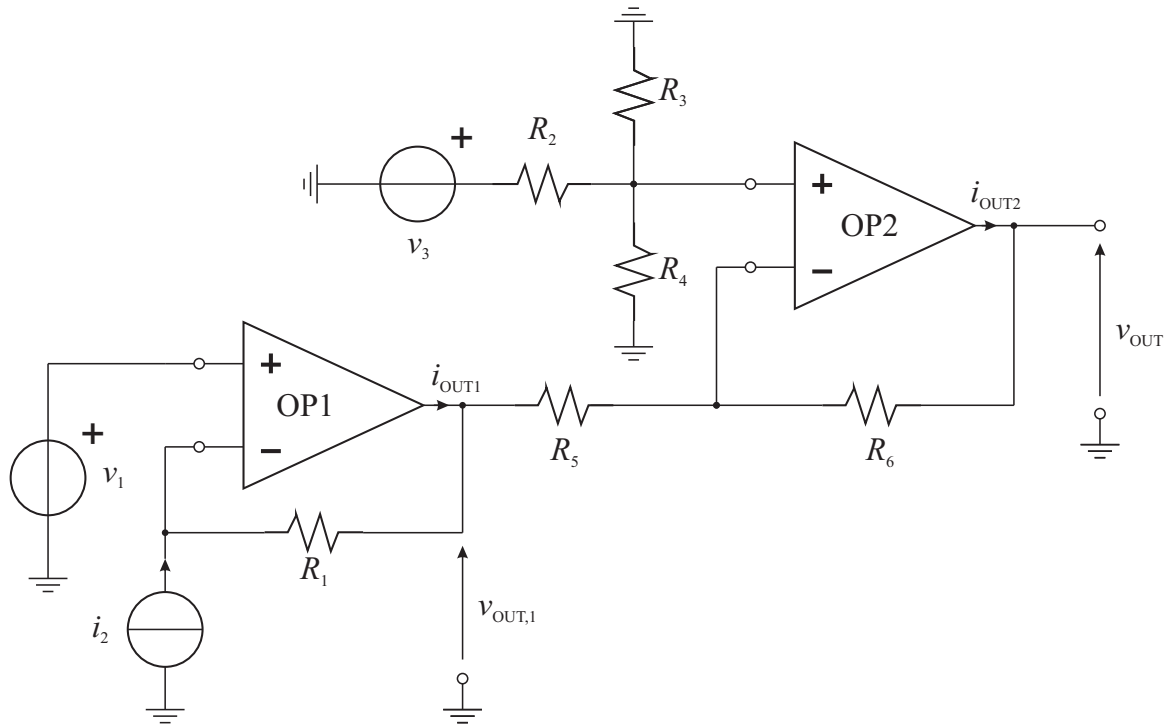
Frequenza, Hz

Diagramma di Bode di fase, gradi



Frequenza, Hz

Esercizio 2.



Nel circuito in figura $R_1 = \dots = R_6 = R = 10 \text{ k}\Omega$, la dinamica di v_1 è $(0,1) \text{ V}$, la dinamica di i_2 è $(-100, 100) \mu\text{A}$ e la dinamica di v_3 è $(-3,3) \text{ V}$. Determinare:

1. l'espressione delle tensioni $v_{\text{OUT},1}$ e v_{OUT} in funzione degli ingressi v_1 , i_2 e v_3 e delle resistenze $R_1 \dots R_6$;
2. l'espressione delle correnti $i_{\text{OUT},1}$ e $i_{\text{OUT},2}$ in funzione degli ingressi v_1 , i_2 e v_3 e delle resistenze $R_1 \dots R_6$;
3. la minima dinamica della tensione di uscita richiesta agli amplificatori OP1 ed OP2 per funzionare in linearità con gli ingressi dati;
4. la minima dinamica d'ingresso di modo comune richiesta agli amplificatori OP1 ed OP2 per funzionare in linearità con gli ingressi dati.

1. Espressioni delle tensioni d'uscita:

$$v_{\text{OUT},1} = v_1 - R_1 i_2 = v_1 - R i_2 = v_1 - 10 \text{ k}\Omega \cdot i_2$$

$$v_{\text{OUT}} = -\frac{R_6}{R_5} v_{\text{OUT},1} + v_3 \frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + R_3 \parallel R_4} \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) = -v_1 + R i_2 + \frac{2}{3} v_3 = -v_1 + 10 \text{ k}\Omega \cdot i_2 + \frac{2}{3} v_3$$

2. Espressioni delle correnti d'uscita:

$$i_{\text{OUT}1} = \left(v_{\text{OUT},1} - v_3 \frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + R_3 \parallel R_4}\right) \frac{1}{R_5} - i_2 = \frac{v_1}{R} - 2i_2 - \frac{v_3}{3R} = 100 \mu\text{S} \cdot v_1 - 2i_2 - 33.3 \mu\text{S} \cdot v_3$$

$$i_{\text{OUT}2} = -\left(v_{\text{OUT},1} - v_3 \frac{R_3 \parallel R_4}{R_2 + R_3 \parallel R_4}\right) \frac{1}{R_5} = -\frac{v_1}{R} + i_2 + \frac{v_3}{3R} = -100 \mu\text{S} \cdot v_1 + i_2 + 33.3 \mu\text{S} \cdot v_3$$

3. Minima dinamica delle tensioni d'uscita di OP1 e OP2

$$\Delta V_{\text{OUT},1} \supset (-1, 2) \text{ V}$$

$$\Delta V_{\text{OUT},2} \supset (-4, 3) \text{ V}$$

4. Minima dinamica d'ingresso di modo comune di OP1 e OP2

$$\Delta V_{\text{CM},1} \supset (0, 1) \text{ V}$$

$$\Delta V_{\text{CM},2} \supset (-1, 1) \text{ V}$$