

Fondamenti di elettronica

Corso di laurea in Ingegneria Biomedica

secondo appello - 15/07/2024 - A (0)

Problema 1

Dato il circuito amplificatore in figura di cui sono noti:

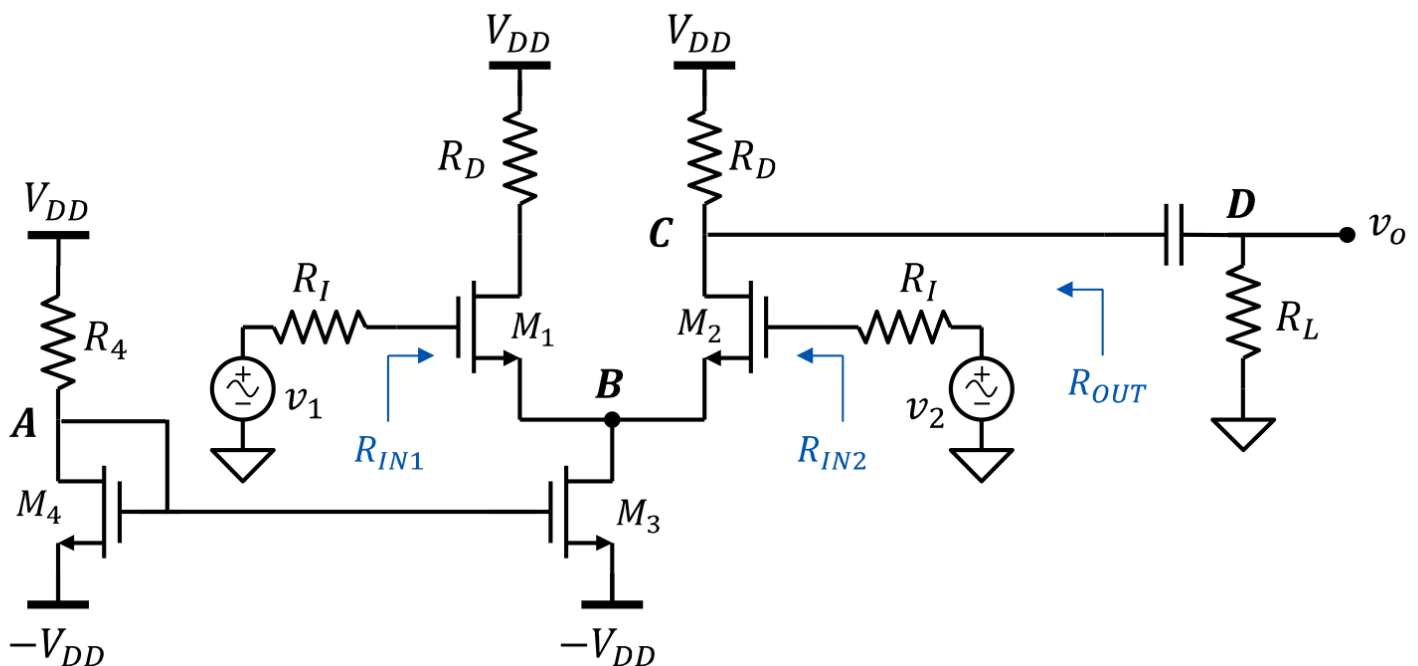
- I parametri dei MOSFET:
 - M_1 e M_2 : $k_1 = k_2 = 2\text{mA/V}^2$,
 - M_3 : $k_3 = 1\text{mA/V}^2$,
 - M_4 : $k_4 = 4\text{mA/V}^2$,
 - $V_{TN} = 2\text{V}$ per tutti i MOS
 - M_3 ha $\lambda_3 = 0.01\text{V}^{-1}$ (trascurare λ per tutti gli altri MOSFET)
- I valori delle resistenze: $R_i = 1\text{k}\Omega$, $R_L = 24\text{k}\Omega$, $R_D = 8\text{k}\Omega$.
- La tensione di alimentazione: $V_{DD} = 10\text{V}$

Dato il circuito in figura, sapendo che la tensione gate-source di M_4 è $V_{GS4} = 4\text{V}$, calcolare:

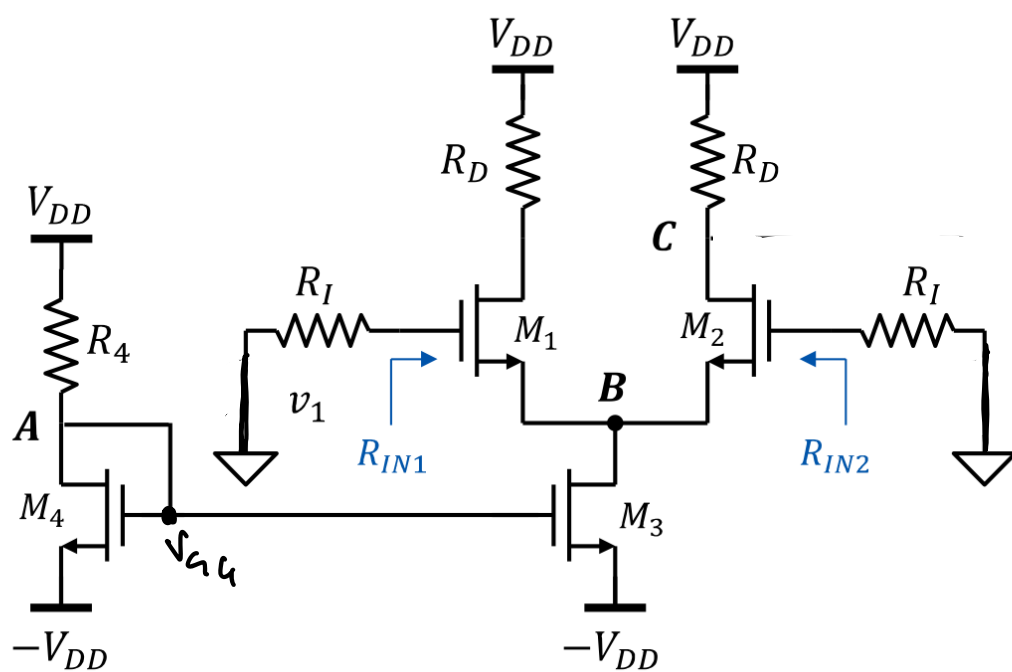
- 1) Il valore della resistenza R_4 e la corrente attraverso M_4 .
- 2) Il punto di polarizzazione di M_1 , M_2 e M_3 .
- 3) I potenziali dei nodi A, B, C, e D in condizioni DC. (Riportare i valori nello spazio sotto la figura)
- 4) Disegnare il modello ai piccoli segnali e calcolare le transconduttanze di M_1 e M_2 .

Dall'analisi ai piccoli segnali, calcolare:

- 5) Le resistenze di ingresso (R_{IN} e di uscita R_{OUT}) come evidenziate nel circuito.
- 6) Il guadagno di tensione di modo differenziale rispetto al segnale $v_1 - v_2$.
- 7) Il guadagno di tensione di modo comune
- 8) Il CMRR



POLARIZZAZIONE



$$V_{GS4} = 4V$$

$$V_{DS4} = 4V$$

OK SAT. M4

$$I_{DS4} = \frac{K_{M4}}{2} (V_{GS4} - V_{TN4})^2 = 8mA$$

$$V_{G4} = -V_{DS} + V_{GS4} = -6V$$

$$V_A = V_{G4} = -6V$$

$$I_{D3} = I_{D4} \cdot \frac{K_{M3}}{K_{M4}} = \frac{I_{D4}}{4} = 2mA$$

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{D3}}{2} = 1mA$$

$$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{TN1} + \sqrt{\frac{2I_{D1}}{K_{M1}}} = 2V + \sqrt{\frac{2 \cdot 1mA}{2mA/V^2}} = 3V$$

$$\Rightarrow V_B = -3V = V_{S1} = V_{S2}$$

$$V_C = V_{D1} = V_{D2} = V_{DD} - R_D I_{D1} = 10V - 8k\Omega \cdot 1mA = 2V$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 2V - (-3V) = 5V = V_{DS2}$$

$$V_{DS1} = V_{DS2} > V_{GS1} - V_{TN1,2} = 1V \quad \text{OK SAT}$$

$$V_{DS3} = V_{S1} - (-V_{DD}) = -3V + 10V = 7V$$

$$V_{DS3} > V_{GS3} - V_{TN3} = 2V \quad \text{OK SAT}$$

2) M1: $I_{D1} = 1mA$ $V_{DS1} = 5V$ $V_{GS1} = 3V$

M2: $I_{D2} = 1mA$ $V_{DS2} = 5V$ $V_{GS2} = 3V$

$$T_3: I_{D3} = 2 \text{ mA}, \quad V_{DS3} = 7 \text{ V}, \quad V_{GS3} = 6 \text{ V}$$

$$T_4: I_{D4} = 8 \text{ mA}, \quad V_{DS4} = 4 \text{ V}, \quad V_{GS4} = 4 \text{ V}$$

$$3) \quad V_A = -6 \text{ V}, \quad V_B = -3 \text{ V}, \quad V_C = 2 \text{ V}, \quad V_D = 0 \text{ V}$$

PICCOLO SEGNALE:

$$g_{m1} = \frac{2 I_{D1}}{V_{GS1} - V_{TN1}} = \frac{2 \text{ mA}}{1 \text{ V}} = 2 \text{ mS}$$

$$g_{m2} = \frac{2 I_{D2}}{V_{GS2} - V_{TN2}} = 2 \text{ mS}$$

$$r_{o3} = \frac{\frac{1}{\lambda_3} + V_{DS3}}{I_{D3}} = 53,5 \text{ k}\Omega$$

DALL'ANALISI FATTA

IN CLASSE:

CONSIDERARE:

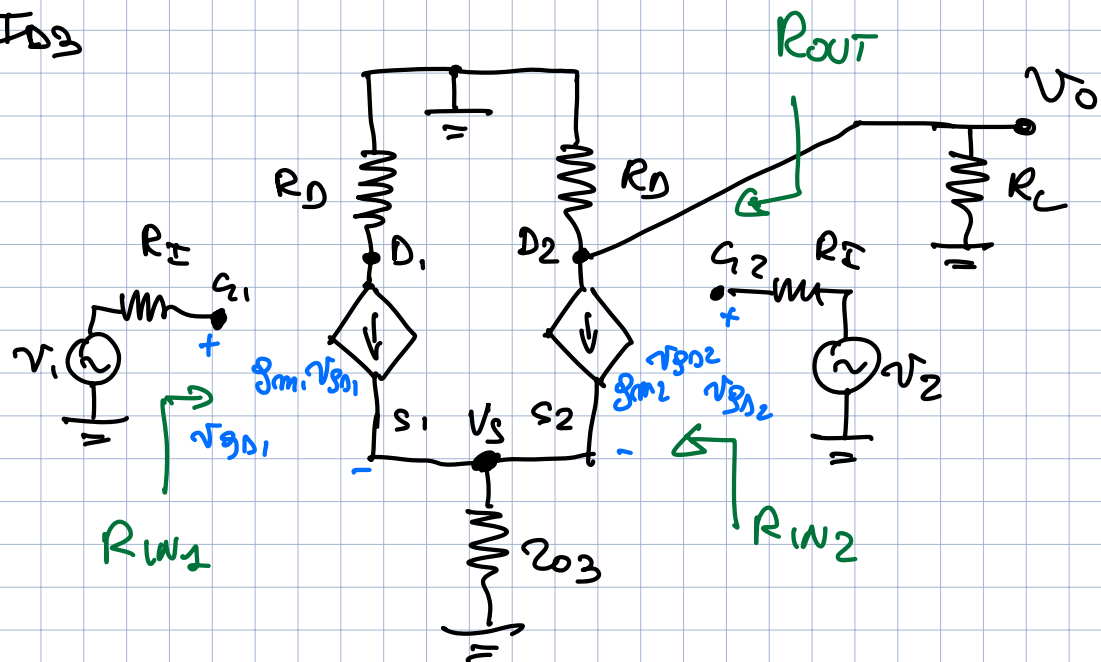
$$v_{id} = v_1 - v_2$$

$$v_{ic} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$R_{in1} = \infty$$

$$R_{in2} = \infty$$

$$R_{out} = R_D$$



(Se $v_1 = 0, v_2 = 0$ si trova
 $v_{gs1} = v_{gs2} = 0$
 $\Rightarrow g_{m2} v_{gs2} = 0 \Rightarrow R_{out} = R_D$
 (VEDERE LE FONE IN CLASSE))

ANALISI DI MODO DIFFERENZIALE:

$$v_1 = \frac{v_{id}}{2} \quad v_2 = -\frac{v_{id}}{2}$$

$$\boxed{V_S = 0}$$

Node V_S :

$$g_{m1} v_{gs1} + g_{m2} v_{gs2} = \frac{V_S}{r_{o3}}$$

$$g_{m1} = g_{m2} \Rightarrow$$

$$v_{gs1} = \frac{v_{id}}{2} - V_S$$

$$v_{gs2} = -\frac{v_{id}}{2} - V_S$$

$$g_{m1} (v_{gs1} + v_{gs2}) = \frac{V_S}{r_{o3}}$$

$$\Rightarrow -g_{m1} 2V_S = \frac{V_S}{r_{o3}} \Rightarrow V_S \left(2g_{m1} + \frac{1}{r_{o3}} \right) = 0$$

$$\text{SE } V_S = 0!$$

$$\Rightarrow V_S = 0!$$

$$\Rightarrow v_o = -g_{m2} v_{gs2} R_D \parallel R_L$$

$$v_{gs2} = -\frac{v_{id}}{2}$$

$$R_D \parallel R_L = \frac{8k\Omega \cdot 24k\Omega}{8k\Omega + 24k\Omega} = 6k\Omega$$

$$A_{vd} = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{g_{m2} R_D \parallel R_L}{2} = 6$$

ANALISI DI MODO COMUNE

$$v_1 = v_{ic} \quad , \quad v_2 = v_{ic}$$

$$v_o = -g_{m2} v_{gs2} R_D \parallel R_L$$

$$v_2 = v_{gs2} + (g_{m1} v_{gs1} + g_{m2} v_{gs2}) r_{o3}$$

$$\text{ma } v_1 = v_2 \Rightarrow v_{gs1} = v_{gs2} \quad g_{m1} = g_{m2}$$

$$v_2 = v_{gs2} + 2g_{m2} v_{gs2} r_{o3}$$

$$\Rightarrow v_{ic} = v_{gs2} (1 + 2g_{m2} r_{o3})$$

$$\Rightarrow v_{SD2} = \frac{v_{ic}}{1 + 2g_{m2}r_{o3}}$$

$$\Rightarrow A_{vc} = \frac{v_o}{v_{ic}} = - \frac{g_{m2} R_D // R_C}{1 + 2g_{m2}r_{o3}} = \frac{-12}{215} = -0,056$$

$$1 + 2g_{m2}r_{o3} = 215$$

$$CMRR = \left| \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \right| = 107,5$$

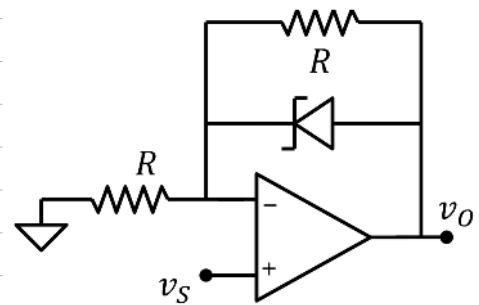
Problema 2

Dato il circuito in figura, realizzato con un amplificatore operazionale e un diodo zener ($V_{ON} = 0V$ e $V_Z = 4V$). Assumendo l'operazionale ideale e $R = 10k\Omega$:

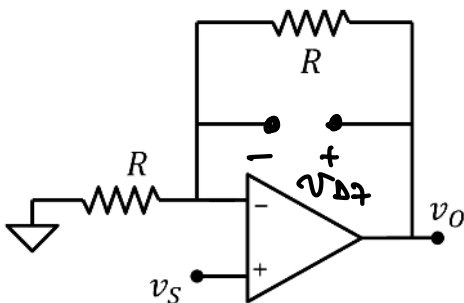
1. Tracciare la transcaratteristica di v_o in funzione di v_s e riportarla nel grafico sulla pagina seguente.
2. Calcolare la tensione v_o , la corrente i_D attraverso il diodo e la tensione v_D ai capi del diodo con $v_s = -8V$.

Assumiamo ora l'operazionale reale con tensione di offset $V_{OS} = -20mV$, correnti di bias $I_{BN} = 1\mu A$, $I_{BP} = 0.5\mu A$ e $CMRR = 100$:

3. Calcolare la tensione di uscita con $v_s = -1V$



HP DZ = OFF



$$v_{DZ} = v_o - v_- = v_o - v_s$$

$$v_o = v_s \left(1 + \frac{R}{R} \right) = 2v_s$$

$$\Rightarrow v_{DZ} = v_s$$

$$\Rightarrow \text{Diodo OFF} \quad -V_Z \leq v_{DZ} \leq V_{ON} \Rightarrow -4V \leq v_s \leq 0V$$

$$\text{Diodo ON} \quad v_{DZ} > V_{ON} \Rightarrow v_s > 0$$

$$\text{Diodo BREAK} \quad v_{DZ} < -V_Z \Rightarrow v_s \leq -4V$$

Diode "OFF", $v_o = 2v_s$
(vedi sopra)

$$v_o(0) = 0$$

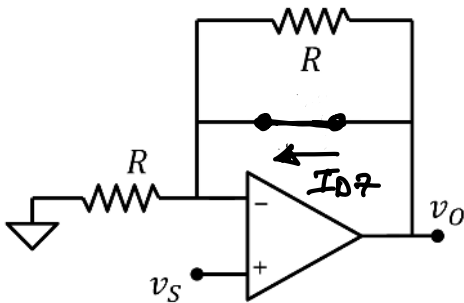
$$v_o(-4V) = -8V$$

$v_s > 0$ Diode "ON"

$$v_o = v_- = v_s$$

$$I_{D2} = \frac{v_s}{R} \geq 0 \quad \text{OK}$$

$$v_o(0) = 0 \quad \text{OK RACCORDO}$$



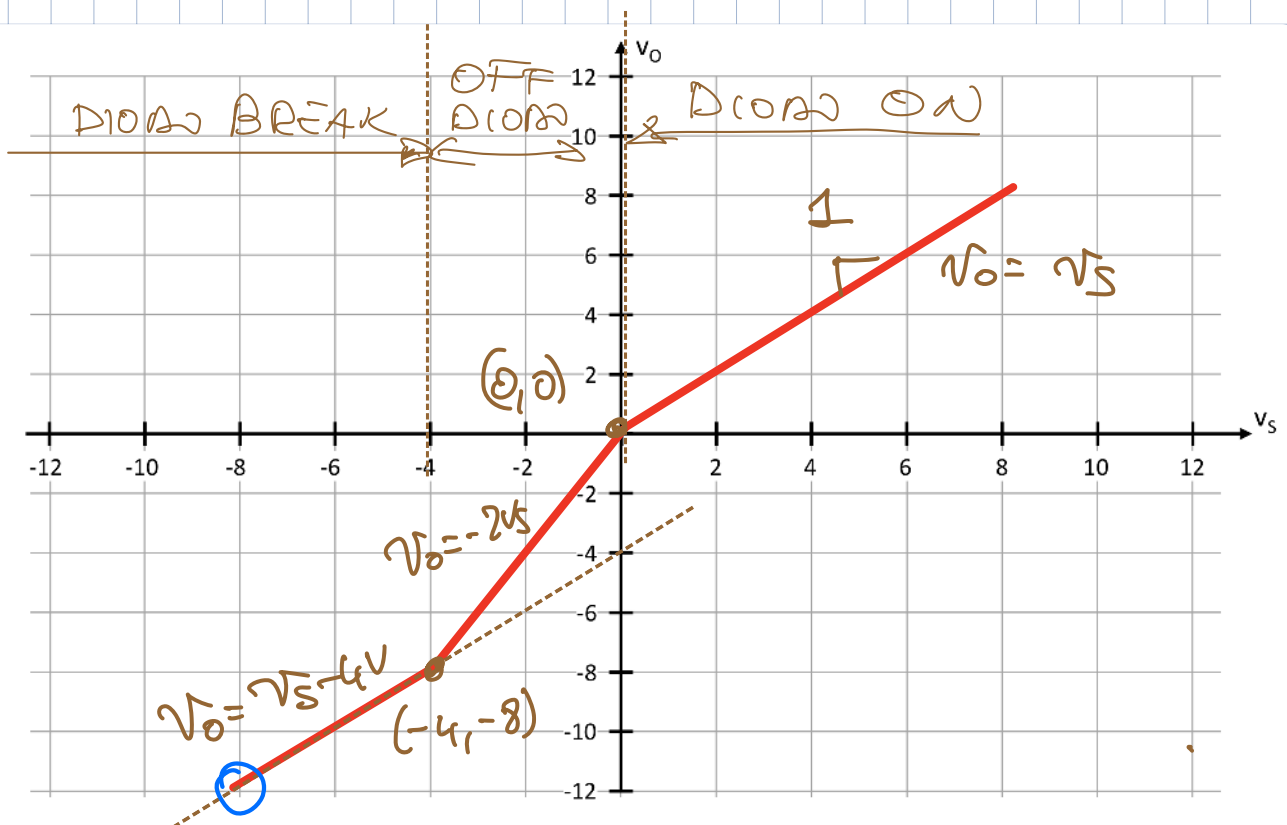
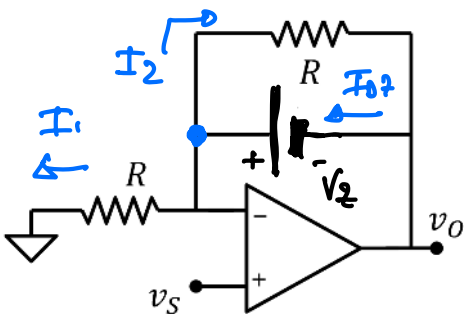
$v_s < -v_z$ Diode = BREAKDOWN

$$v_o = v_s - v_z = v_s - 4V$$

$$v_o(-4) = -8V \quad \text{OK RACCORDO}$$

$$I_{D2} = I_1 + I_2 = \frac{v_s}{R} + \frac{v_z}{R} < 0$$

$$\frac{v_s}{R} < -\frac{v_z}{R} \quad v_s < -v_z \quad \text{OK}$$



2) $V_S = -8V, V_O, V_D, I_D$

$V_S = -8V$ DIODO BREAKDOWN

$V_O = V_S - 4V = -12V$

$V_D = -V_Z = -4V$

$I_{DZ} = (V_{EM} \text{ SOPRA}) = \frac{V_S}{R} + \frac{V_Z}{R} = \frac{-8V}{10k\Omega} + \frac{4V}{10k\Omega} = -0,4mA$

3) $V_S = -1V$

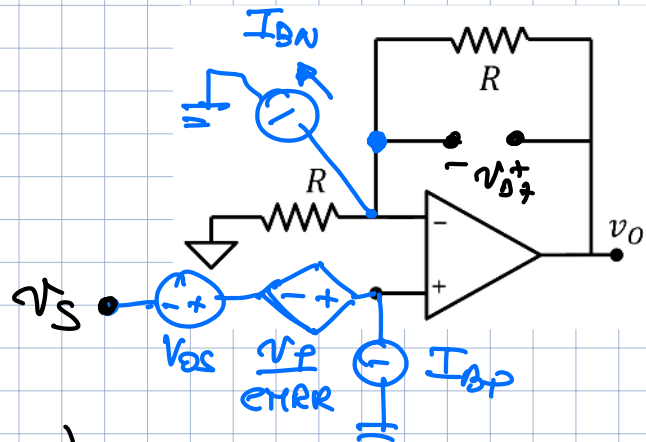
$V_{OS} = -20mV, I_{AN} = I_{AP} = 0,5\mu A, C_{MRR} = 100!$

SOUVRAPP. EFFETTI

• ATTIVO V_S

$V_+ = V_S + \frac{V_S}{C_{MRR}}$
 $= V_S \left(1 + \frac{1}{C_{MRR}} \right)$

$V_O' = V_+ \left(1 + \frac{R}{R} \right) = 2V_S \left(1 + \frac{1}{C_{MRR}} \right)$
 $= -2,02V$



• ATTIVO V_{OS}

$V_O'' = 2V_{OS} = -40mV$

$V_O = V_O' + V_O'' + V_O'''$
 $= -2,05V$

• ATTIVO I_{AN}

$V_O''' = I_{AN} \cdot R = 10mV$

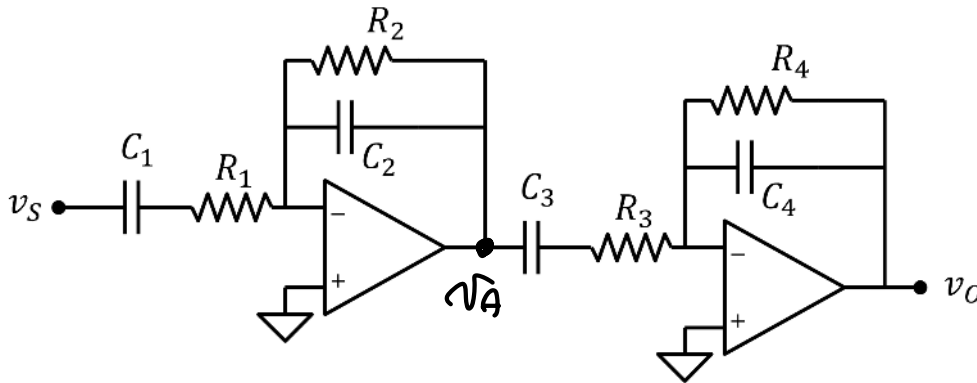
• I_{AP} NON HA EFFETTO $V_O^{AV} = 0$

Problema 3

DATI: $R_1 = 2k\Omega$, $C_1 = 5\mu F$, $R_2 = 20k\Omega$, $C_2 = 0.5nF$, $R_3 = 1k\Omega$, $C_3 = 1\mu F$, $R_4 = 10k\Omega$, $C_4 = 1nF$

Dato il filtro in figure.

1. Trovare la funzione di trasferimento (riportare l'espressione della funzione di trasferimento nella scheda della quarta pagina)
2. Tracciare i diagrammi di bode asintotici di modulo e fase (usando i grafici in quarta pagina).



$$Z_1 = \frac{1}{sC_1} + R_1 = \frac{1 + sC_1 R_1}{sC_1}$$

$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{sC_2}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} = \frac{R_2}{1 + sC_2 R_2}$$

$$Z_3 = \frac{1 + sC_3 R_3}{sC_3}$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + sC_4 R_4}$$

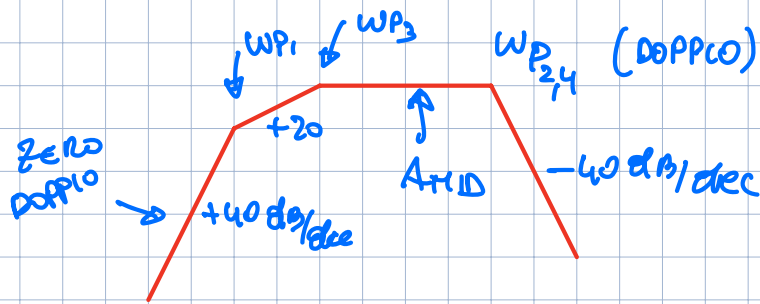
$$v_A = v_S \left(- \frac{Z_2}{Z_1} \right) = \frac{sC_1 R_2}{(1 + sC_1 R_1)(1 + sC_2 R_2)}$$

$$v_O = v_A \left(- \frac{Z_4}{Z_3} \right) = v_A \cdot \frac{sC_3 R_4}{(1 + sC_3 R_3)(1 + sC_4 R_4)}$$

$$W(s) = \frac{sC_1 R_2 \cdot sC_3 R_4}{(1 + sC_1 R_1)(1 + sC_2 R_2)(1 + sC_3 R_3)(1 + sC_4 R_4)}$$

$$\omega_{z01} = \frac{1}{C_1 R_2} = 10^2 \text{ rad/sec} \quad \omega_{p1} = \frac{1}{C_1 R_1} = 10^2 \text{ rad/sec} \quad \omega_{p3} = \frac{1}{C_3 R_3} = 10^3 \text{ rad/sec}$$

$$\omega_{z02} = \frac{1}{C_3 R_4} = 10^2 \text{ rad/sec} \quad \omega_{p2} = \frac{1}{C_2 R_2} = 10^5 \text{ rad/sec} \quad \omega_{p4} = \frac{1}{C_4 R_4} = 10^5 \text{ rad/sec}$$



$$A_{MID} = \frac{C_1 R_2 C_3 R_4}{C_1 R_1 C_3 R_3} = 100 = 40 \text{ dB}$$

$$W(s) = \underbrace{\frac{C_1 R_2 C_3 R_4}{C_1 R_1 C_3 R_3}}_{A_{MID}} \cdot \underbrace{\frac{s^2}{\left(\frac{1}{C_1 R_1} + s\right)\left(\frac{1}{C_3 R_3} + s\right)}}_{F_L(s)} \cdot \underbrace{\frac{1}{(1 + s C_2 R_2)(1 + s C_4 R_4)}}_{F_H(s)}$$

