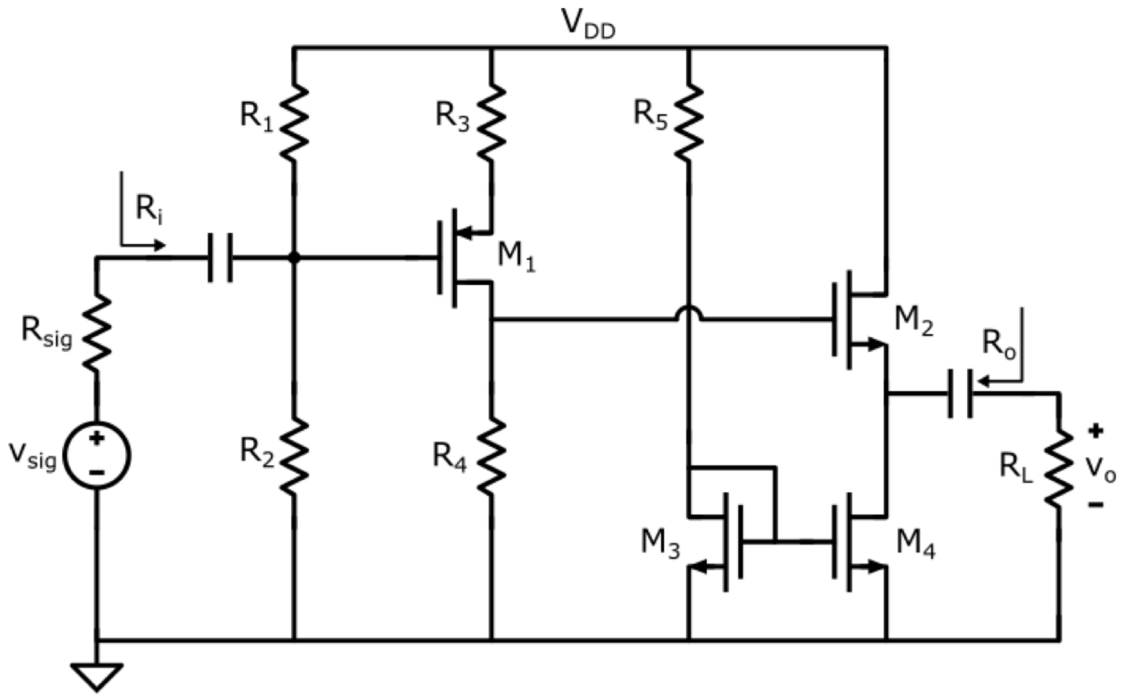
PROBLEMA P1

Dato il circuito riportato nella figura sottostante, determinare:

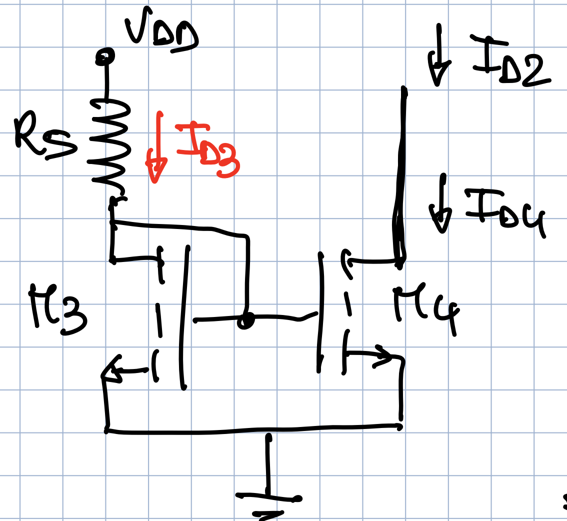
1) il valore della resistenza R_5 in modo che la corrente di drain di M_2 valga I_{D2} = 10 mA;
2) il punto di lavoro dei transistor M_1, M_2, M_3 e M_4;
3) il guadagno di tensione ai piccoli segnali ac $A_v=v_o/v_{sig}$ (**per il calcolo del piccolo segnale considerare λ_{n4}=0.01 V^{-1}**);
4) le resistenze di ingresso e uscita ai piccoli segnali ac R_i e R_o.



Dati:
V_{DD}=15 V,
R_1=200 kΩ,
R_2=400 kΩ,
R_3=0.25 kΩ,
R_4=1.0 kΩ,
R_L=10.0 kΩ,
R_{sig}=10 kΩ,
M_1: k_p=4 mA/V^2, V_{TP} = -1 V, λ_p=0 V^{-1};
$M_{2,4}$: k_n=20 mA/V^2, V_{TN} = 1 V, λ_n=0 V^{-1};
M_3: k_n=5 mA/V^2, V_{TN} = 1 V, λ_n = 0 V^{-1}.

SOLUZIONE – ANALISI DC

CALCOLO DI R5



$$I_{D4} = I_{D2} = 10mA$$

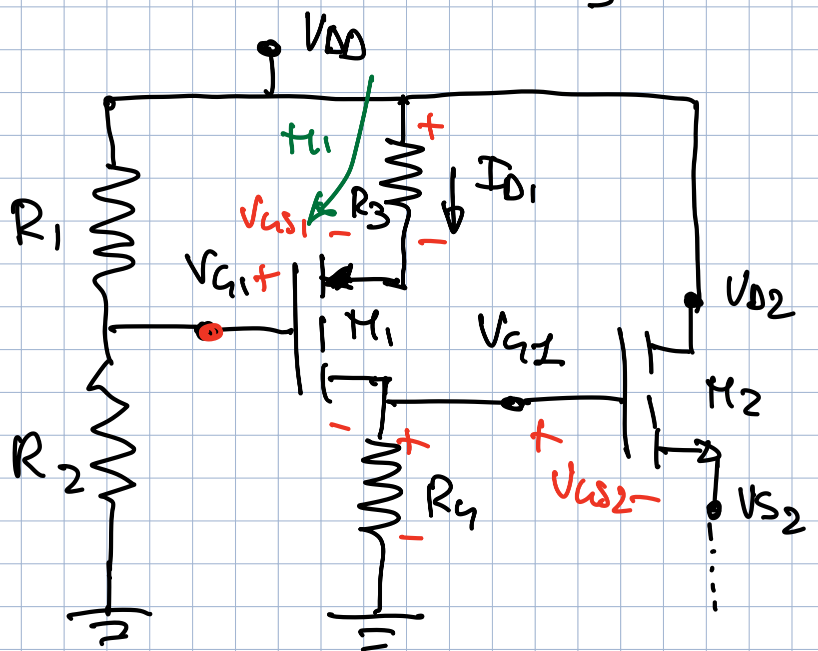
$$V_{GS4} = V_{GS3} = V_{tN_4} + \sqrt{\frac{2I_{D4}}{K_{n4}}} = 1V + \sqrt{\frac{2\cdot 10mA}{20mA}} = 2V$$

$$I_{D2} = I_{D3}\cdot\frac{K_{n4}}{K_{n3}}\frac{\cancel{(1+\lambda V_{DS4})}}{\cancel{(1+\lambda V_{DS3})}}$$

$$\Rightarrow I_{D3} = I_{D2}\cdot\frac{K_{n3}}{K_{n4}} = 10mA\cdot\frac{5mA}{20mA} = 2{,}5\,mA$$

$$V_{DD} = R_S I_{D3} + V_{GS3}$$

$$\Rightarrow R_5 = \frac{V_{DD} - V_{GS3}}{I_{D3}} = \frac{15V - 2V}{2{,}5\,mA} = 5{,}2\,K\Omega$$



$$V_{G1} = V_{DD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15V \cdot \frac{400K\Omega}{600K\Omega} = 10V$$

$$\begin{cases} 1) \; V_{DD} = I_{D1} R_3 - V_{GS1} + V_{G1} \\ 2) \; I_{D1} = \frac{Kp_1}{2}\left(V_{GS1} - V_{TP1}\right)^2 \end{cases}$$

1) $$I_{D1} = \frac{V_{DD} + V_{GS1} - V_{G1}}{R_3} = \frac{V_{DD} - V_{G1}}{R_3} + \frac{V_{GS1}}{R_3}$$

1+2

$$\Rightarrow \frac{2(V_{DD} - V_{G1})}{R_3 Kp_1} + \frac{2V_{GS1}}{R_3 Kp_1} = V_{GS1}^2 + V_{TP1}^2 - 2V_{GS} V_{TP}$$

$$V_{GS1}^2 + V_{GS}\underbrace{\left(-\frac{2}{R_3 Kp_1} - 2V_{TP}\right)}_{b} + \underbrace{V_{TP1}^2 - \frac{2(V_{DD} - V_{G1})}{R_3 Kp_1}}_{c} = 0$$

$a = 1$ $\quad b = \frac{-2}{0{,}25 \times 4} - 2(-1) = 0$ $\quad c = 1 - \frac{2(15-10)}{1} = -9$

$$V_{GS1} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{0 \pm \sqrt{36}}{2} = \pm\frac{6}{2}$$

$V_{GS} > V_{TP}$

$+3V$ NON VALIDA

$-3V$ OK

$V_{GS1} = -3V$

$$I_{D1} = \frac{Kp_1}{2}\left(V_{GS} - V_{TP}\right)^2 = \frac{4\,mA}{2}\left(-3V + 1V\right)^2 = 8\,mA$$

$$\Rightarrow V_{D1} = V_{G2} = I_{D1} \cdot R_4 = 8V$$

$$V_{S1} = V_{DD} - I_{D1} R_3 = 13V \qquad \text{OPPURE} \quad \left[V_{S1} = V_{G1} - V_{GS1} = 13V \right]$$

$$\Rightarrow V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = -5V < V_{GS1} - V_{TP1} = -2V$$

OK M_1 SATURAZ.

$$V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2 I_{D2}}{K_{n2}}} = 1V + 1V = 2V$$

$$V_{S2} = V_{G2} - V_{GS2} = 8V - 2V = 6V$$

$$\Rightarrow V_{DS2} = V_{DD} - V_{S2} = 15V - 6V = 9V > V_{GS2} - V_{TN2} = 1V$$

OK M_2 SATURAZ.

$$V_{DS3} = V_{GS3} = 2V > V_{GS3} - V_{TN3} = 1V$$

OK M_3 IN SATURAZ

$$V_{DS4} = V_{S2} = 6V > V_{GS4} - V_{TN4} = 1V$$

OK M_4 IN SAT.

M_1 ($I_{D1} = 8\,mA$, $V_{DS1} = -5V$)

M_2 ($I_{D2} = 10\,mA$, $V_{DS2} = 9V$)

M_3 ($I_{D3} = 2{,}5\,mA$, $V_{DS3} = 2V$)

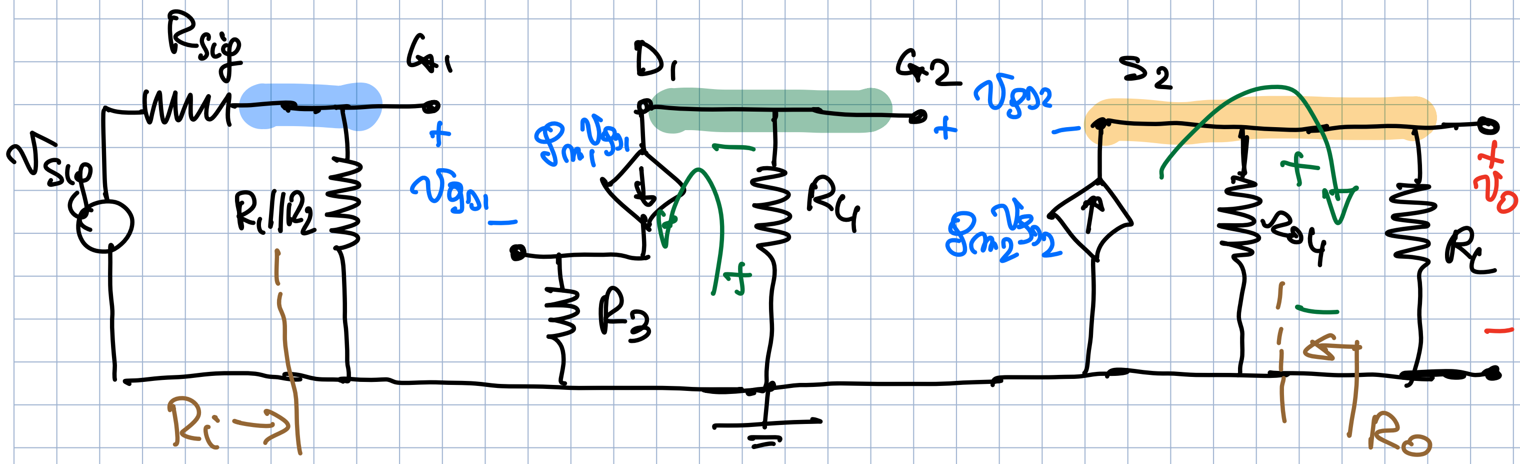
M_4 ($I_{D4} = 10\,mA$, $V_{DS4} = 6V$)

ANALISI AL PICCOLO SEGNALE

$$g_{m1} = \frac{2 I_{D1}}{|V_{GS1} - V_{TP1}|} = 8\,mS$$

$$g_{m2} = \frac{2 I_{D2}}{V_{GS2} - V_{TN2}} = 20\,mS$$

$$r_{o4} = \frac{\frac{1}{\lambda_4} + V_{DS4}}{I_{D4}} = 10{,}6\ k\Omega$$



$$A_v = \frac{v_o}{v_{sig}} = \frac{v_o}{v_{G2}} \cdot \frac{v_{G2}}{v_{G1}} \cdot \frac{v_{G1}}{v_{sig}} \qquad v_o = v_{S2} \qquad v_{D1} = v_{G2}$$

$$= \frac{v_{S2}}{v_{G2}} \cdot \frac{v_{D1}}{v_{G1}} \cdot \frac{v_{G1}}{v_{sig}} = A_{vt}^{CD} \cdot A_{vt}^{CS+RS} \cdot \frac{v_{G1}}{v_{sig}}$$

2° STADIO

$$v_{S2} = g_{m2} v_{gs2}\, r_{o4} // R_L$$
$$v_{G2} = v_{gs2} + g_{m2} v_{gs2}\, r_{o4}//R_L = v_{gs2}(1 + g_{m2}\, r_{o4}//R_L)$$

$$\Rightarrow \frac{v_{S2}}{v_{G2}} = A_{vt}^{CD} = \frac{g_{m2}\, r_{o4}//R_L}{1 + g_{m2}\, r_{o4}//R_L} = 0,99$$

1° STADIO

$$v_{D1} = -g_{m1} v_{gs1} \cdot R_4$$
$$v_{G1} = v_{gs1} + g_{m1} v_{gs1} R_3 = v_{gs1}(1 + g_{m1} R_3)$$

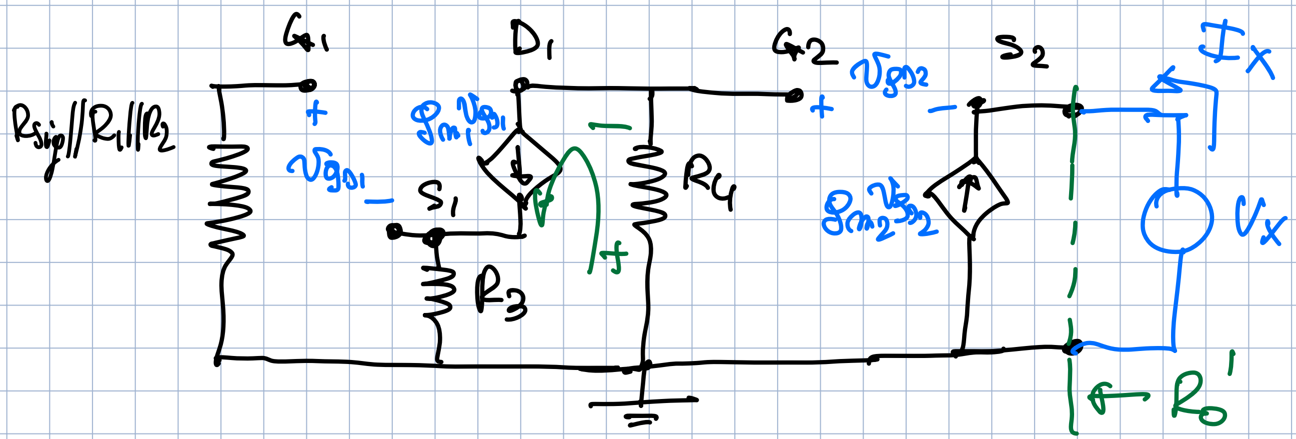
$$\Rightarrow \frac{v_{D1}}{v_{G1}} = A_{vt}^{CS+RS} = -\frac{g_{m1} R_4}{1 + g_{m1} R_3} = -2,667$$

$$\frac{v_{G1}}{v_{sig}} = \frac{R_1//R_2}{R_{sig} + R_1//R_2} = 0,83$$

$$\Rightarrow A_v = (0,83)(-2,667)(0,976) = -2,46$$

$$R_i = R_1 // R_2 = 133{,}3\ K\Omega$$

$$R_o = r_{o4} // R_o'$$



$v_{G1} = 0 \Rightarrow v_{S1} = -v_{gs1}$ | N_{S1}: $g_{m1} v_{gs1} = \dfrac{v_{S1}}{R_3} \Rightarrow \left(g_{m1} + \dfrac{1}{R_3}\right) v_{gs1} = 0$

$$\Rightarrow v_{gs1} = 0$$

$$\Rightarrow v_{G2} = 0$$

$$v_{S2} = -v_{gs2} = V_x$$

$$I_x = -g_{m2} v_{gs2}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{V_x}{I_x} = \frac{1}{g_{m2}}} = R_o'$$

$$\Rightarrow R_o = r_{o4} // \frac{1}{g_{m2}} = \frac{r_{o4} \cdot \frac{1}{g_{m2}}}{r_{o4} + \frac{1}{g_{m2}}} = \frac{r_{o4}}{1 + g_{m2} r_{o4}} = 49{,}76\ \Omega$$

PROBLEMA P2

Dato il circuito riportato nella pagina seguente, che usa amplificatori operazionali e componenti passivi ideali:

1) ricavare l'espressione della funzione di trasferimento $W(s)=V_o(s)/V_{in}(s)$;
2) tracciare il diagramma di Bode asintotico dell'ampiezza e della fase di $H(j\omega)$, <u>usando, nel caso della fase, l'approssimazione senza discontinuità</u>.
3) usando il diagramma di Bode, stimare il valore del modulo e della fase di $W(j\omega)$ alle seguenti pulsazioni: $\omega_1 = 5*10^4$ rad/s; $\omega_2 = 10^8$ rad/s;
4) Calcolare il nuovo valore di C_3 che permette di ottenere una $W(s)$ a singolo polo.

DATI:

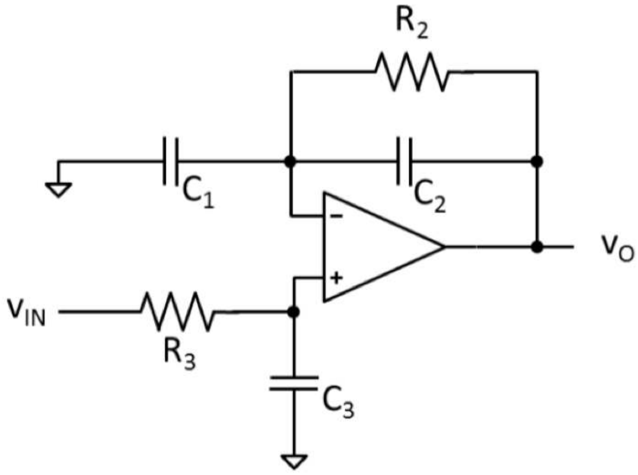
R_2=20kΩ,

R_3=3.3kΩ,

C_1=4.95μF,

C_2=50nF,

C_3=300pF.



$$Z_2 = \frac{R_2 \cdot \frac{1}{sC_2}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} = \frac{R_2}{1+sC_2R_2}$$

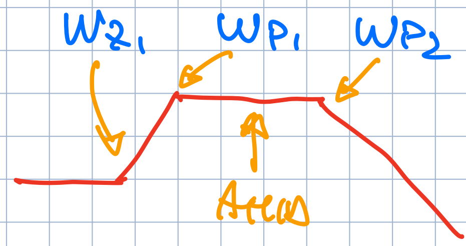
$$V_+ = V_{IN} \cdot \frac{\frac{1}{sC_3}}{R_3 + \frac{1}{sC_3}} = \frac{1}{1+sC_3R_3} V_{IN}$$

$$V_o = V_+\left(1+\frac{Z_2}{Z_{C1}}\right) = \frac{1}{1+sC_3R_3}\left(1+\frac{sC_1R_2}{1+sC_2R_2}\right)V_{IN}$$

$$= \frac{1+sR_2(C_1+C_2)}{(1+sC_2R_2)(1+sC_3R_3)} V_{IN}$$

$$\Rightarrow \boxed{W(s) = \frac{1+sR_2(C_1+C_2)}{(1+sC_2R_2)(1+sC_3R_3)}}$$

$$\omega_{z_1} = \frac{1}{R_2(C_1+C_2)} = 10^1 \text{ rad/sec}$$



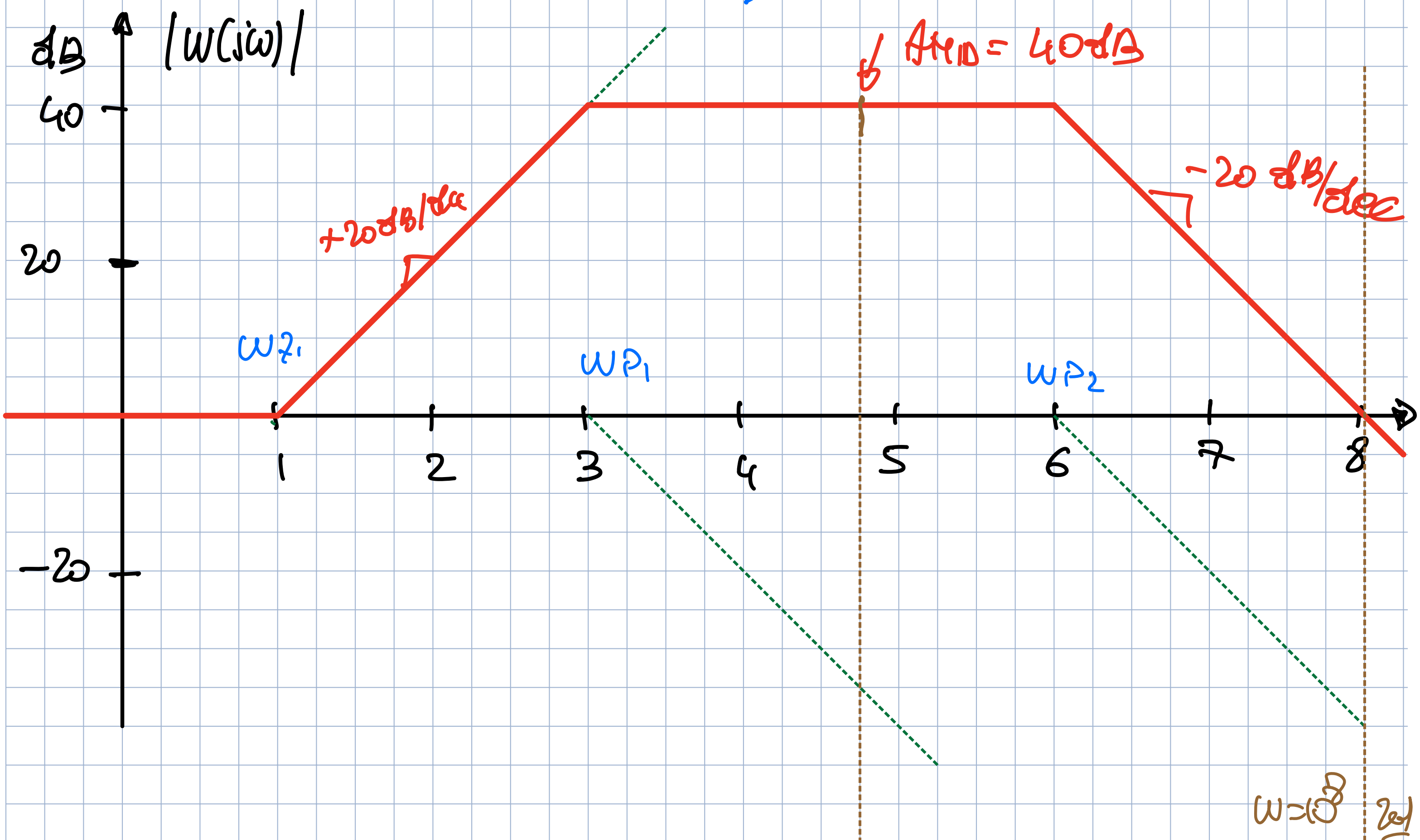
$$\omega_{P_1} = \frac{1}{R_2 C_2} = 10^3 \text{ rad/sec}$$

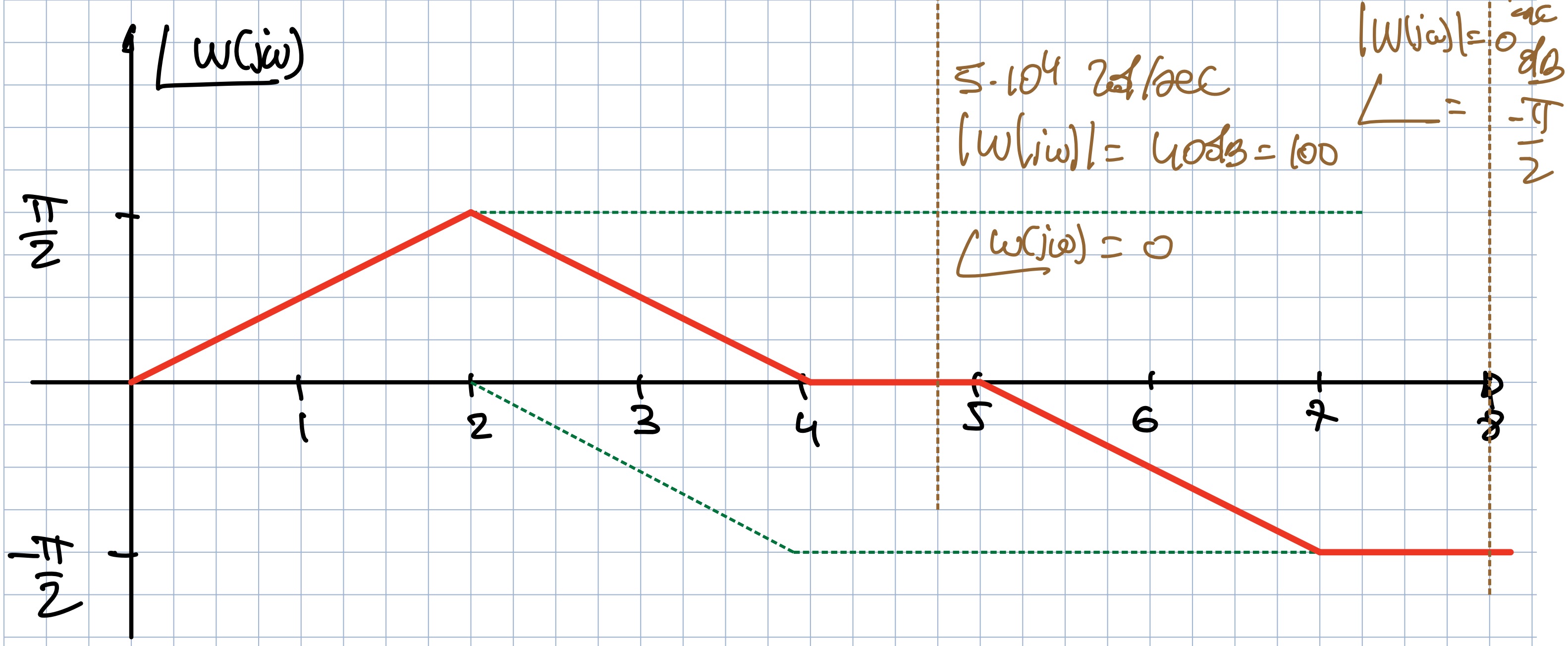
$$\omega_{P_2} = \frac{1}{R_3 C_3} = 1{,}01 \cdot 10^6 \text{ rad/sec}$$

$$W(0) = 1 \Rightarrow 0\,dB$$

$$W(s) = \underbrace{\frac{\cancel{R_2}(C_1+C_2)}{\cancel{R_2}C_2}}_{A_{MD}} \cdot \underbrace{\frac{\frac{1}{R_2(C_1+C_2)}+s}{\frac{1}{R_2C_2}+s}}_{F_L(s)} \cdot \underbrace{\frac{1}{1+sC_3R_3}}_{F_H(s)}$$

$$A_{MD} = \frac{C_1+C_2}{C_2} = \frac{4{,}95\,\mu F + 0{,}05\,\mu F}{0{,}05\,\mu F} = 100 = 40\,dB$$





PER AVERE W(s) A SINGOLO POLO CON C_3 OPPORTUNA!

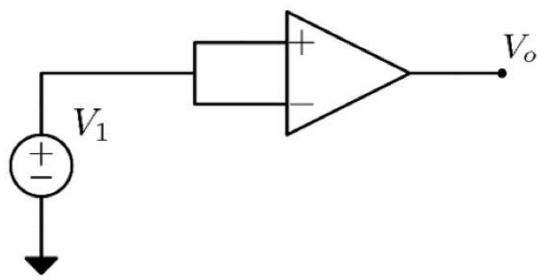
$$\Rightarrow W(s) = \frac{1 + sR_2(C_1+C_2)}{(1+sC_2R_2)(1+sC_3R_3)}$$

$$C_3R_3 = R_2(C_1+C_2) \Rightarrow C_3 = \frac{R_2}{R_3}(C_1+C_2)$$

$$= \underline{\underline{30{,}3\,\mu F}}$$

PROBLEMA Q1

L'amplificatore differenziale illustrato in figura ha un guadagno di modo differenziale pari ad $A_d = 100$ V/V e un guadagno di modo comune pari ad $A_c = 0.5$ V/V. Sapendo che l'amplificatore differenziale ha una tensione do offset pari a 10 mV, si calcoli il valore della tensione di uscita V_o, giustificando chiaramente la risposta.



Dati: $V_{OS} = 10$ mV, $A_d = 100$ V/V, $A_c = 0.5$ V/V $V_1 = 2$ V

DALLA RELAZIONE: $V_o = A_d \cdot v_{id} + A_c \cdot v_{ic}$

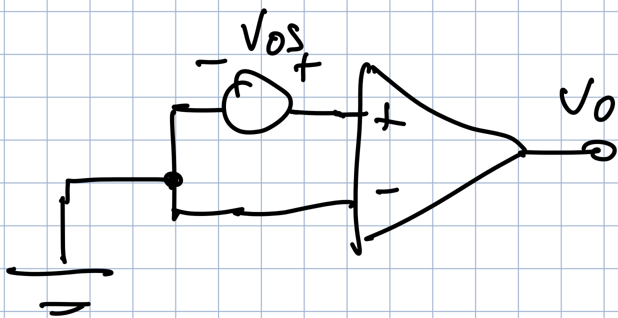
APPLICO SOVRAPP. EFFETTI

ATTIVO V_1 e ANNULLO V_{os} (FIGURA SOPRA)

$\Rightarrow v_{id} = 0$, $v_{ic} = V_1$

$$\Rightarrow V_o' = A_c \cdot V_1 = 0{,}5 \, \frac{V}{V} \cdot 2V = 1V$$

ATTIVO V_{os} e ANNULLO V_1!



IN QUESTO CASO

$v_- = 0$ $\quad v_+ = V_{os}$

$$v_{ic} = \frac{v_+ + v_-}{2} = \frac{V_{os}}{2}$$

$$v_{id} = v_+ - v_- = v_{os}$$

$$\Rightarrow V_o'' = A_c \cdot \frac{V_{os}}{2} + A_d \, v_{os}$$

$$= 0{,}5 \frac{V}{V} \cdot 5mV + 100 \frac{V}{V} \cdot 10mV$$

$$= 2{,}5mV + 1V = 1{,}0025 \, mV$$

$$\Rightarrow V_o = V_o' + V_o'' = 2{,}0025 \, V$$

N.B. SE NEL V_o'' SI TRASCURAVA/TRALASCIAVA IL TERMINE $v_{ic} = \frac{V_{os}}{2}$ NON SI FACEVA UN ERRORE GRANDE!

N.B2: ATTIVANDO SIA V_1 che V_{os} si ho

$\boxed{v_- = V_1 \quad v_+ = V_1 + V_{os}}$ $\rightarrow$ DA QUI SI CALCOLO

$$v_{id} = v_+ - v_- = V_{OS}$$

$$v_{ic} = \frac{v_+ + v_-}{2} = \frac{2V_1 + V_{OS}}{2} = V_1 + \frac{V_{OS}}{2}$$

$$\Rightarrow v_o = A_d \, v_{id} + A_c \, v_{ic} =$$

$$= 100 \cdot (10\,mV) + 0{,}5\,(2V + 0{,}01) = \underline{2{,}0025\,V}$$

PROBLEMA Q2

Data la seguente tabella della verità
1) Ricavare la mappa di Karnaugh corrispondente;
2) Trovare una F minimizzata
3) Disegnare la rete logica minimizzata tramite porte logiche fondamentali.

A	B	C	D	F
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	1
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	1	1	X