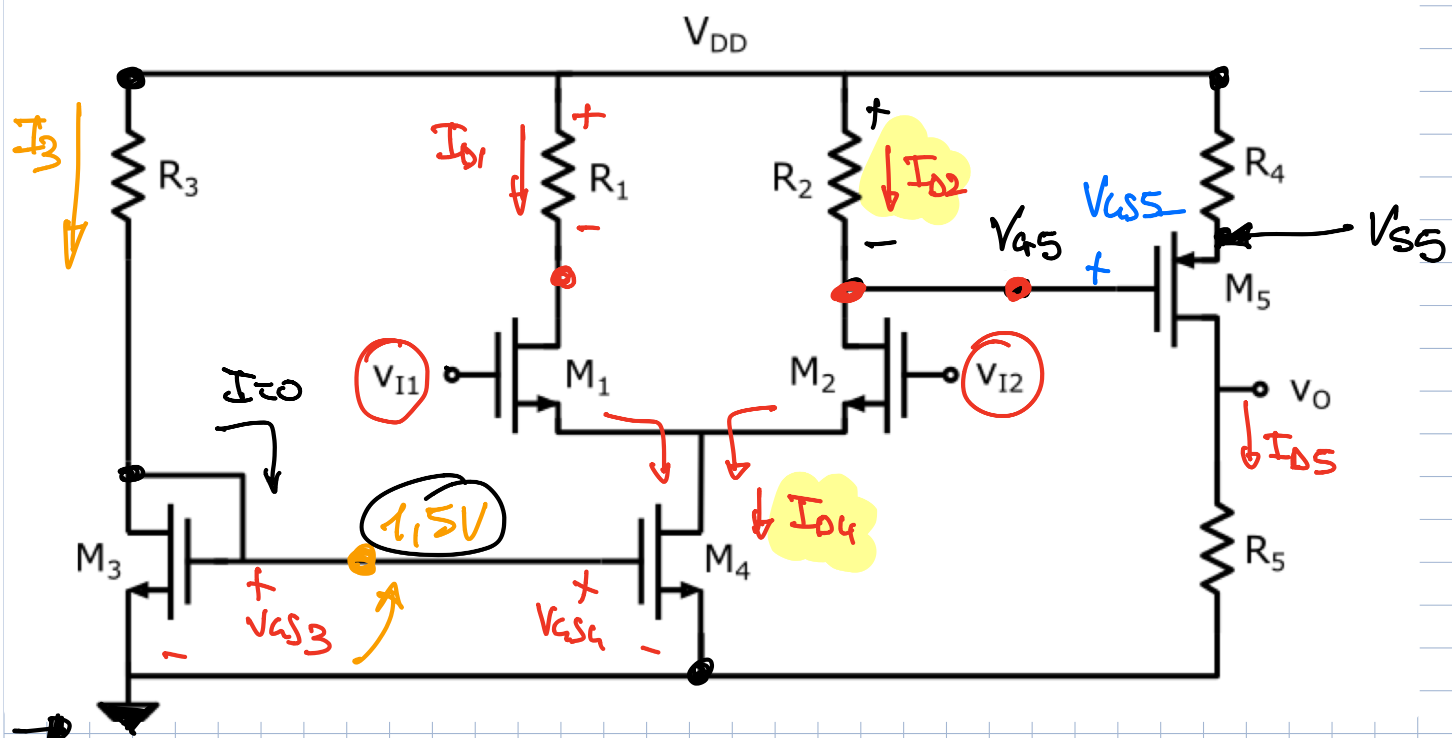
PROBLEMA P1

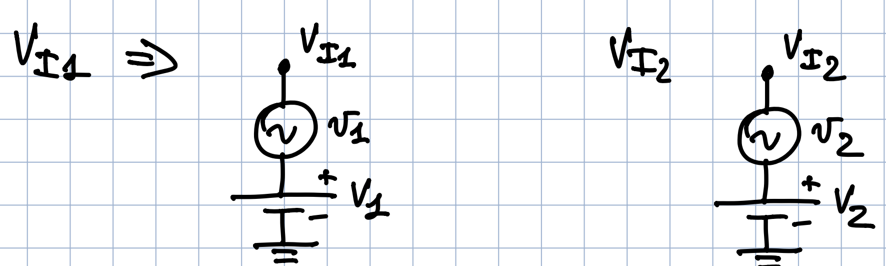
Dato il circuito riportato nella figura sottostante, determinare:

1) il valore delle resistenze R_3 e R_4 in modo che le correnti di drain di M_2 e M_5 valgano rispettivamente $I_{D2} = 1$ mA e $I_{D5} = 4$ mA;
2) il punto di lavoro dei transistor M_1, M_2, M_3, M_4 e M_5;
3) il guadagno di tensione differenziale ai piccoli segnali ac $A_{vd}=v_o/v_{id}$, dove $v_{id}=v_{i1} - v_{i2}$;
4) il rapporto di reiezione del modo comune (CMRR) supponendo, solo in questo caso, che il transistor M_4 abbia un parametro di modulazione della lunghezza di canale $\lambda_n=0.02\ V^{-1}$.

Dati: $V_{DD}=15$ V, $V_{I1}= V_{I2}=7.5$ V, $R_1=R_2=4$ kΩ, $R_5=2$ kΩ,

$M_{1,2,3,4}$: $k_n=8\ mA/V^2$, $V_{tn}=1$ V, $\lambda_n=0\ V^{-1}$, M_5: $k_p=2\ mA/V^2$, $V_{tp}= -1$ V, $\lambda_p=0\ V^{-1}$.





$$I_{D4} = I_{D1} + I_{D2} = 2\,mA$$

$$V_{GS4} = V_{GS3} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_{D4}}{K_n}} = 1V + \sqrt{\frac{2\cdot 2mA}{8mA/V^2}} = 1 + \sqrt{\frac{1}{2}} = 1{,}707V$$

$$V_{GS} - V_{TN} = \sqrt{\frac{2I_{D4}}{K_n}} = 0{,}707$$

$$I_4 = I_3 \cdot \underbrace{\frac{K_{n4}}{K_{n3}}}_{=1} \cdot \underbrace{\frac{1+\lambda V_{DS4}}{1+\lambda V_{DS3}}}_{1} = I_3 = 2mA$$

$K_{n4} = K_{n3}$ $\quad \lambda = 0$

$$R_3 = \frac{V_{DD} - V_{GS3}}{I_{D3}} = \frac{15V - 1,707V}{2mA} = 6,646\,K\Omega$$

$$I_{D5} = 4\,mA \Rightarrow V_{GS5} = V_{tp} - \sqrt{\frac{2I_{D5}}{K_p}} = -1 - \sqrt{\frac{8mA}{2mA/V^2}} = -1-2V = -3V$$

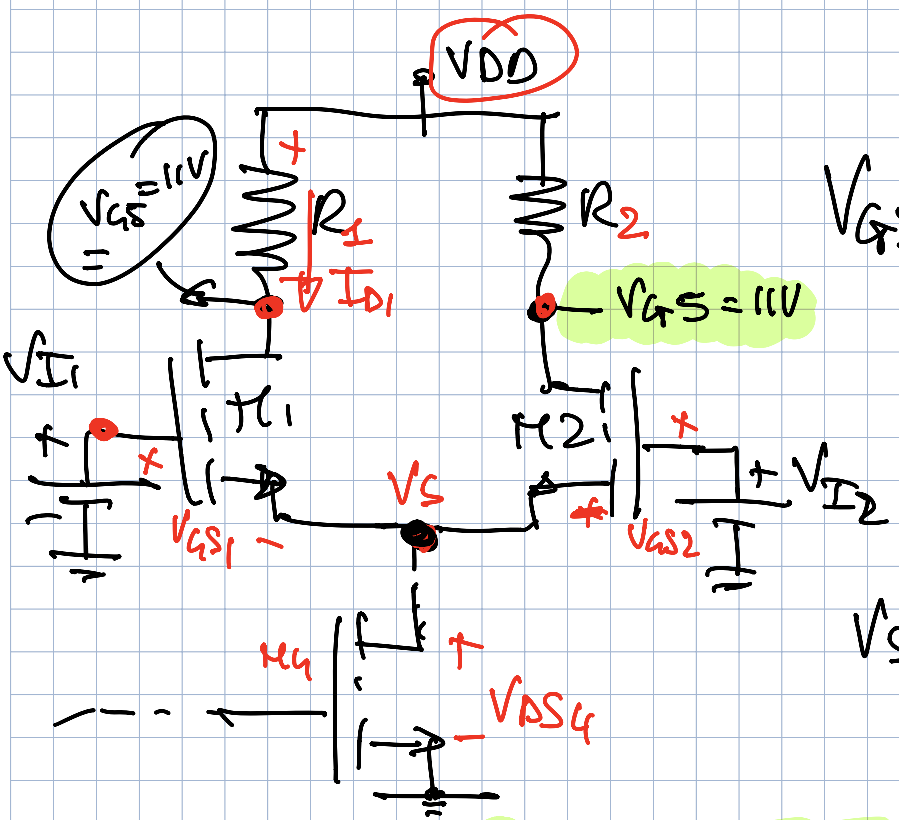
$$V_{GS5} - V_{tp} = -2V$$

$$V_{G5} = V_{DD} - R_D I_{D2} = 15V - 4K\Omega \cdot 1mA = 11V$$

$$V_{S5} = V_{G5} - V_{GS5} = 11V - (-3V) = 14V$$

$$R_4 = \frac{V_{DD} - V_{S5}}{I_{D5}} = \frac{1V}{4mA} = 250\,\Omega = 0,25\,K\Omega$$

CALCOLO PUNTI DI LAVORO M_1, M_2, ... M_5



$$V_{GS1} = V_{GS2} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_{D1}}{K_n}} = 1V + \sqrt{\frac{2\cdot 1mA}{8mA/V^2}} = 1V + 0,5V = 1,5V$$

$$V_S = V_{I1} - V_{GS1} = V_{I2} - V_{GS2} = 7,5V - 1,5V = 6V$$

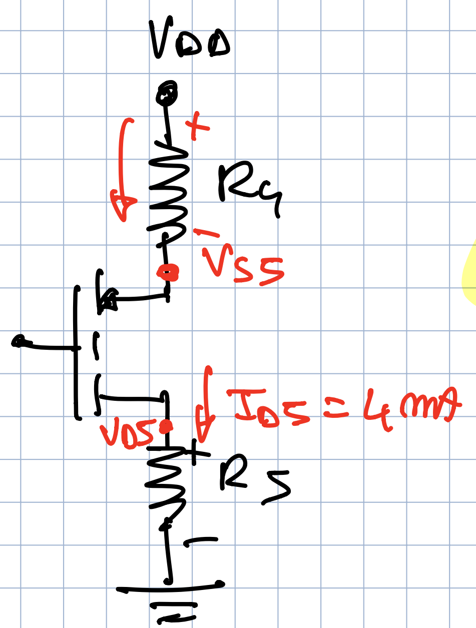
$$V_{D2} = V_{GS} = 11V = V_{D1}$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_S = 11V - 6V = 5V$$
$$V_{DS2} = V_{D2} - V_S = 11V - 6V = 5V$$
$> V_{GS} - V_{TN} = 0{,}5$ OK

$$M_1, M_2 \left(I_D = 1mA,\ V_{DS} = 5V\right)$$

$$V_{DS4} = V_S = 6V > V_{GS} - V_{TN} = 0{,}707V$$
$$V_{DS3} = V_{GS3} = 1{,}707 > V_{GS} - V_{TN} = 0{,}707$$
OK

$$M_3 \left(I_D = 2mA,\ V_{DS} = 1{,}707V\right)$$
$$M_4 \left(I_D = 2mA,\ V_{DS} = 6{,}0V\right)$$



$$V_{S5} = V_{DD} - I_{D5} R_4 = 15V - 4mA \cdot 0{,}25k\Omega = 14V$$

$$V_0 = V_{D5} = I_{D5} \cdot R_5 = 4mA \cdot 2k\Omega = 8V$$

$$V_{DS5} = V_{D5} - V_{S5} = 8V - 14V = -6V$$

$$V_{DS5} < V_{GS} - V_{TN} = -2V \quad \text{OK}$$

$$M_5: \left(I_D = 4mA,\ V_{DS} = -6V\right)$$

PARAMETRI AL PICCOLO SEGNALE

$$g_{m1} = g_{m2} = \frac{2 I_{D1}}{V_{GS} - V_{TN}} = \frac{2mA}{0{,}5V} = 4mS$$

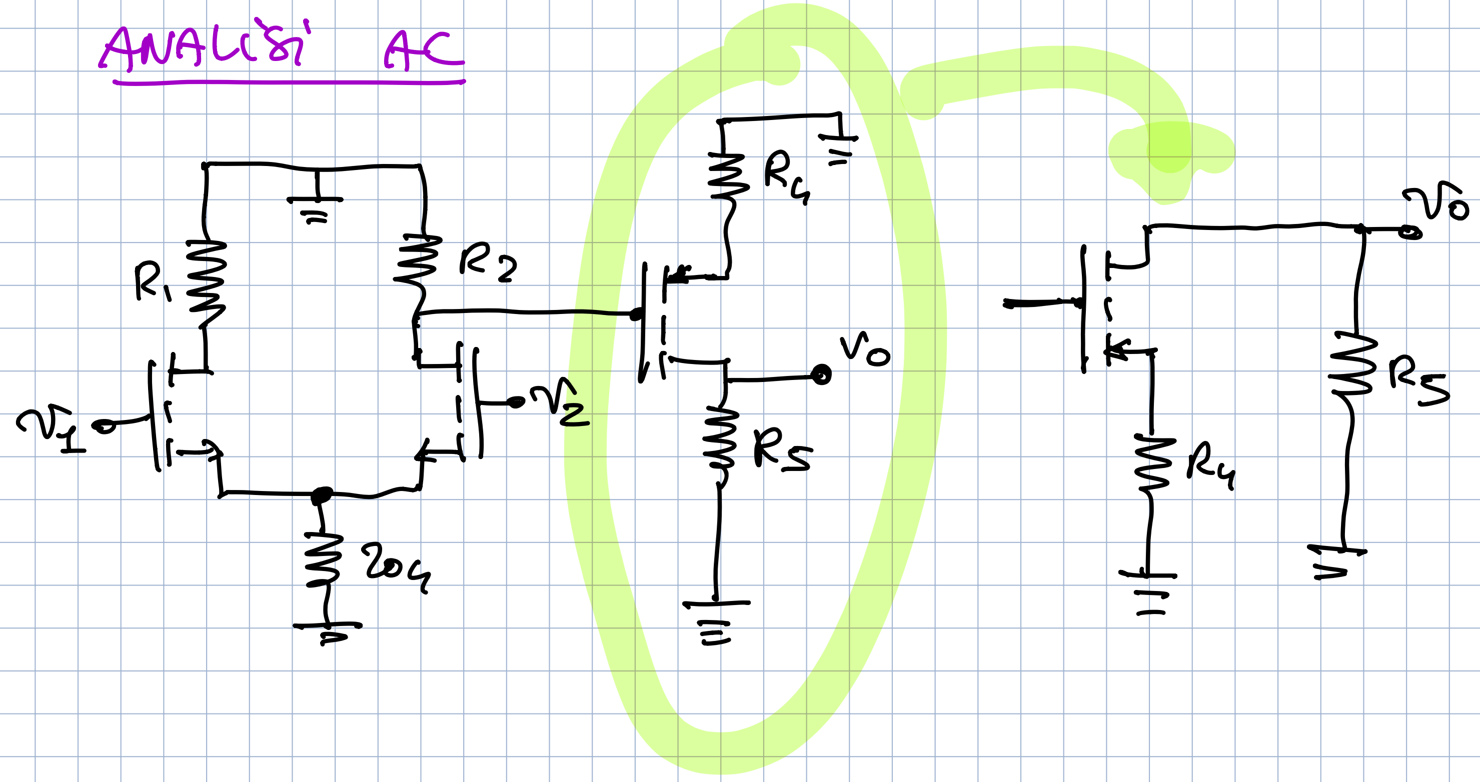
$r_{o1} = r_{o2} = 50$

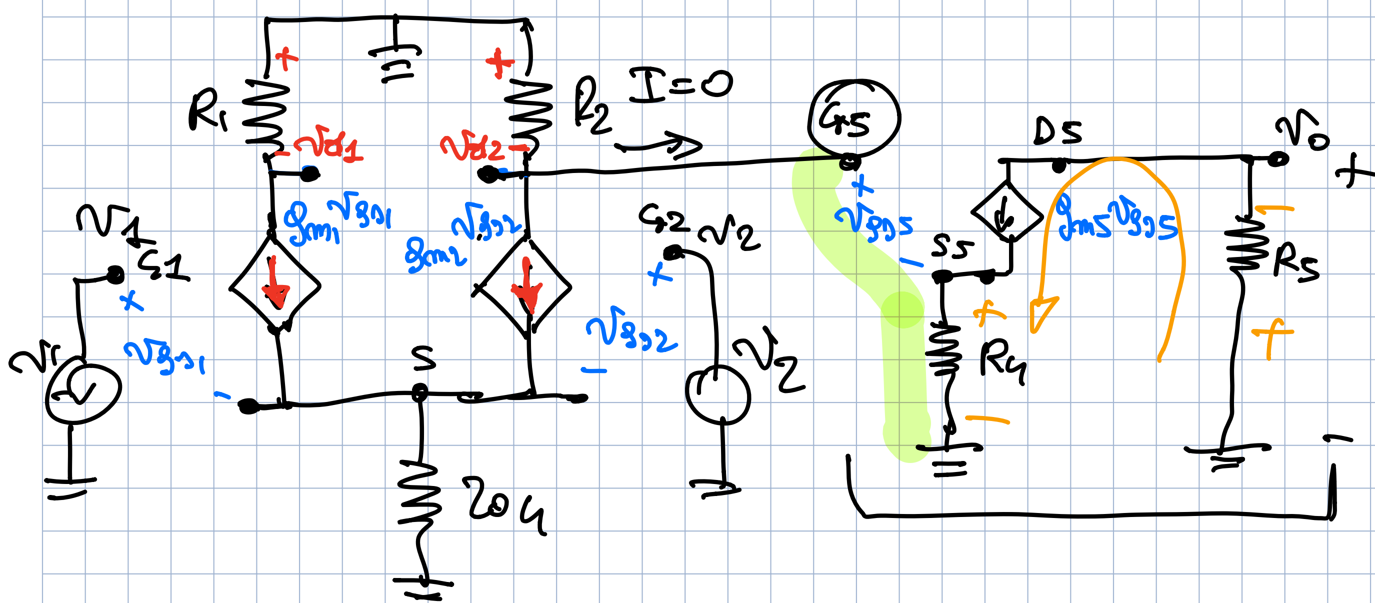
$$g_{m5} = \frac{2 I_{D5}}{V_{GS} - V_{TN}} = \frac{8mA}{2V} = 4mS$$

$r_{o5} = 100$

$$r_{o4} = \frac{\frac{1}{\lambda} + V_{DS}}{I_{D4}} = \frac{50V + 6V}{2mA} = 28k\Omega$$

ANALISI AC





GUADAGNO DI MODO DIFF DELLO STADIO DIFF.

$v_S = 0$ (nel modo differenziale $v_S = 0$)

$v_{d2} = -g_{m2} v_{gs2} R_2$

$v_{gs2} = v_{g2} = -\frac{v_{id}}{2}$

$\Rightarrow v_{d2} = +g_{m2} R_2 \frac{v_{id}}{2}$

$$\Rightarrow A_{d1} = \frac{v_{d2}}{v_{id}} = +\frac{g_m R_2}{2} = \frac{4mS \cdot 4k\Omega}{2} = 8$$

GUADAGNO DI MODO COMUNE DELLO STADIO DIFF.

$$v_{d2} = -g_{m2} v_{gs2} R_2$$

$$v_{ic} = v_{gs2} + g_{m2} v_{gs2} 2r_{o4} = v_{gs2}(1 + 2 g_{m2} r_{o4}) \Rightarrow v_{d2} = -\frac{g_{m2} R_2}{1 + 2 g_{m2} r_{o4}} v_{ic}$$

$$\Rightarrow A_c = \frac{v_{d2}}{v_{ic}} = -\frac{g_m R_2}{1 + 2 g_m r_{o4}} = -\frac{16}{1 + 224} = \underline{\underline{-0{,}071}}$$

GUADAGNO DEL 2° STADIO

$$v_o = -g_{m5} v_{gs5} R_5$$

$$v_{G5} = v_{gs5} + g_{m5} v_{gs5} R_4$$

$$\frac{v_o}{v_{G5}} = -\frac{g_{m5} R_5}{1 + g_{m5} R_4} = -\frac{4mS \cdot 2k\Omega}{1 + 4mS \cdot 0{,}25k\Omega} = \underline{\underline{-4}}$$

$$A_d = \frac{v_o}{v_{id}} = \frac{v_o}{v_{d2}} \cdot \frac{v_{d2}}{v_{id}} = -4 \cdot 8 = -32$$

$$A_c = \frac{v_o}{v_{ic}} = \frac{v_o}{v_{d2}} \cdot \frac{v_{d2}}{v_{ic}} = -4 \cdot (-0{,}071) = 0{,}284$$

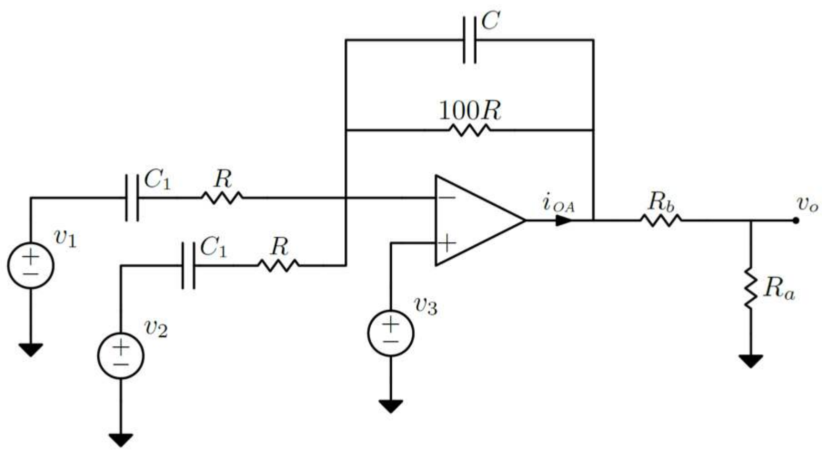
$$CMRR = \left|\frac{A_d}{A_c}\right| = 112{,}5 = 41{,}02\ dB$$

PROBLEMA P2

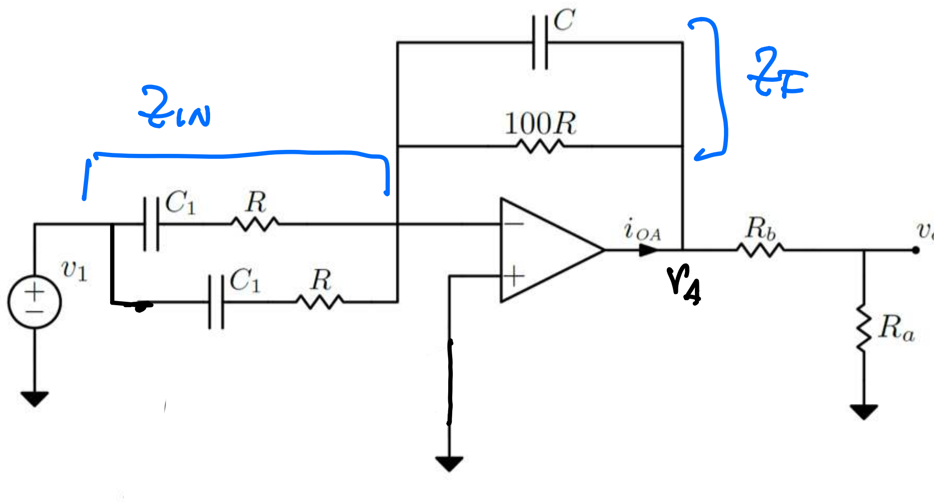
Dato il circuito riportato in figura sottostante, che utilizza un amplificatore operazionale **ideale**:

1) Posto $v_3 = 0$ e posto $v_1 = v_2$, ricavare l'espressione del guadagno di tensione $A_v(s) = v_o/v_1$.
2) Tracciare il diagramma di Bode asintotico di ampiezza e fase di $A_v(s)$.
3) Posto $V_1 = 4\text{V}$, $V_2 = 3\text{V}$, $V_3 = 5\text{V}$, calcolare il valore della corrente I_{OA} erogata dall'amplificatore operazionale.

Dati: $R = 5\ \text{k}\Omega$, $R_a = R_b = 1\ \text{k}\Omega$, $C = 20\ \text{pF}$, $C_1 = 2\ \mu\text{F}$



Con $v_1 = v_2$ e $v_3 = 0$ il circuito diventa:



$$Z_{IN} = \frac{\frac{1}{sC_1} + R}{2} = \frac{1 + sC_1R}{2sC_1}$$

$$Z_F = \frac{\frac{1}{sC} \cdot 100R}{\frac{1}{sC} + 100R} = \frac{100R}{1 + 100sRC}$$

$$v_A = v_1\left(-\frac{Z_F}{Z_W}\right) = -\frac{100R}{1+100sRC}\cdot\frac{2sC_1}{1+sC_1R}\,v_1$$

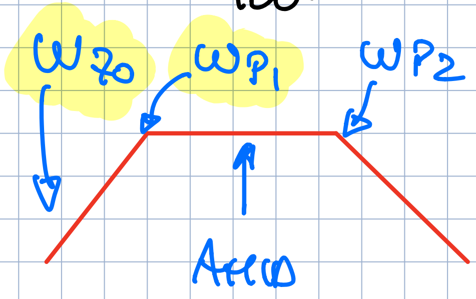
$$= -\frac{200\,sC_1R}{(1+sC_1R)(1+s\,100RC)}\,v_1$$

$$\Rightarrow \boxed{W(s) = \frac{v_o}{v_1} = -\underbrace{\frac{200R_a}{R_a+R_b}}\cdot\frac{sC_1R}{(1+sC_1R)(1+s100RC)}}$$

$$\frac{200R_a}{R_a+R_b} = 100 \qquad\qquad \omega_{P_1} = \frac{1}{C_1R} = 10^2\ \text{rad/sec}$$

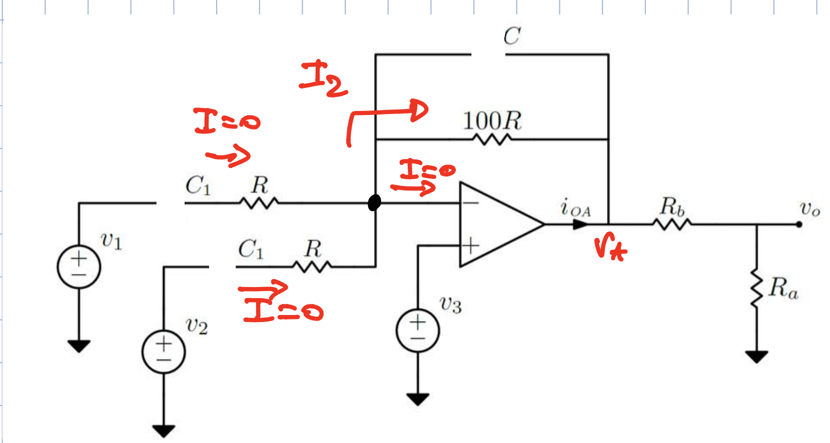
$$\omega_{Z0} = \frac{1}{C_1R} = 10^2\ \text{rad/sec} \qquad\qquad \omega_{P_2} = \frac{1}{100RC} = 10^5\ \text{rad/sec}$$

$$A_{MID} = \underbrace{\frac{200R_a}{R_a+R_b}}\cdot\frac{C_1R}{C_1R} = 100 = \underline{40\text{dB}}$$



3) Posto $V_1 = 4$V, $V_2 = 3$V, $V_3 = 5$V, calcolare il valore della corrente I_{OA} erogata dall'amplificatore operazionale.

Dati: $R = 5$ kΩ, $R_a = R_b = 1$ kΩ, $C = 20$ pF, $C_1 = 2$ μF

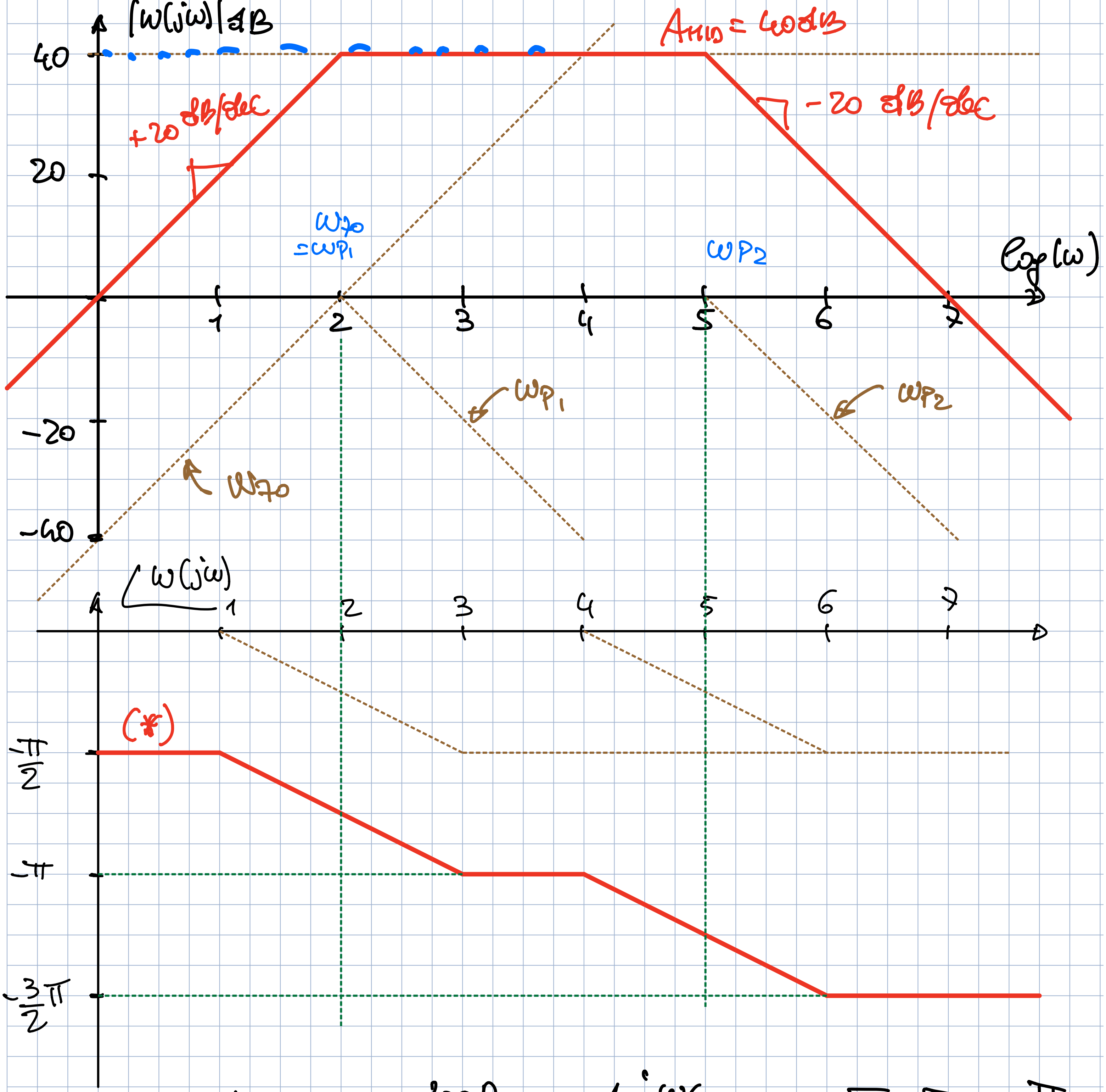


CON SEGNALI DC, C = CIRC. APERTI

$I_2 = 0$

$\Rightarrow V_A = V_3 = 5V$

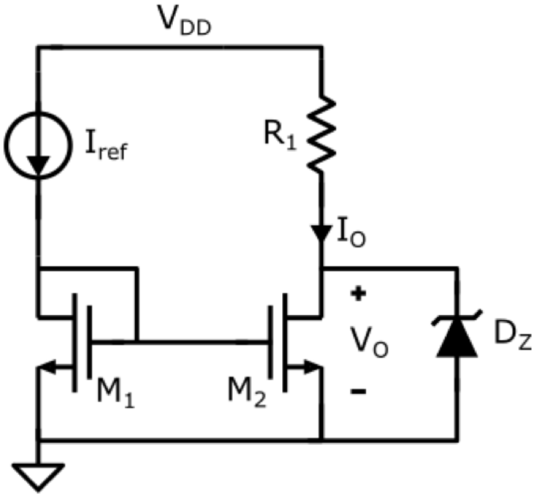
$$\Rightarrow i_{OA} = \frac{V_A}{R_b+R_a} = \frac{5V}{2k\Omega} = 2{,}5\ \text{mA}$$



$$* \quad \angle W(j0) = \angle -\frac{200\,R_e}{R_e+R_s} + \angle j\,\omega/\omega_{z0} = -\pi + \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}$$

PROBLEMA Q1

Dato il circuito riportato nella figura sottostante, si calcoli il valore della corrente I_o, giustificando chiaramente la risposta.



Dati:

$V_{DD} = 12$ V

$I_{ref} = 5$ mA

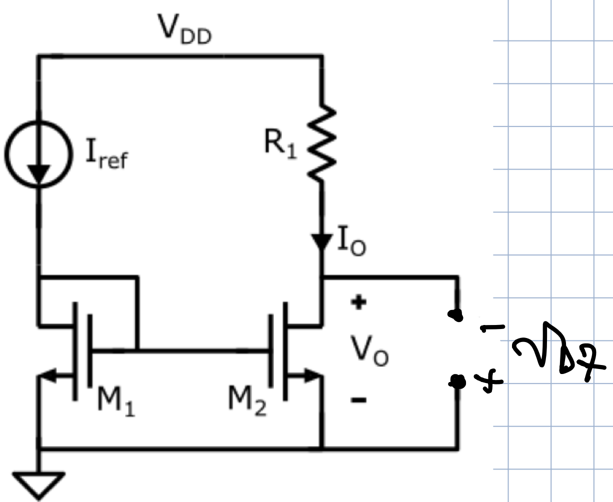
$R_1 = 500\ \Omega$

D_z: $V_{z0} = 4$ V, $r_z = 0\ \Omega$, $V_{D,on} = 0.6$ V

M_1: $k_{n1} = 10$ mA/V^2, $V_{tn1} = 1$ V, $\lambda_1 = 0$ V^{-1}

M_2: $k_{n2} = 20$ mA/V^2, $V_{tn2} = 1$ V, $\lambda_2 = 0$ V^{-1}

HP DZ = OFF



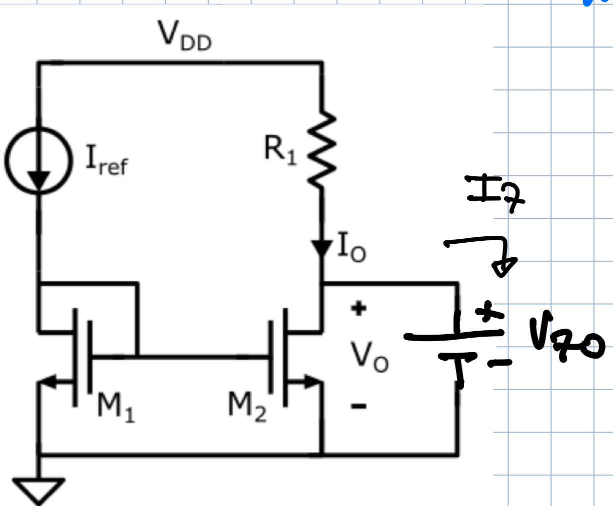
$$I_o = I_{REF} \frac{K_{n2}}{K_{n1}} = 10\ mA$$

$$V_o = V_{DD} - R_1 I_o = 12V - 0{,}5K\Omega \cdot 10mA = 7V$$

$$V_{DZ} = -7V < -V_Z$$

$\Rightarrow$ DZ = BREAKDOWN

HP DZ = BREAK.



$$I_o = \frac{V_{DD} - V_{Z0}}{R_1} = \frac{8V}{0{,}5K\Omega} = 16\ mA$$

$I_{D2} = 10\ mA$ (VEDI SOPRA)

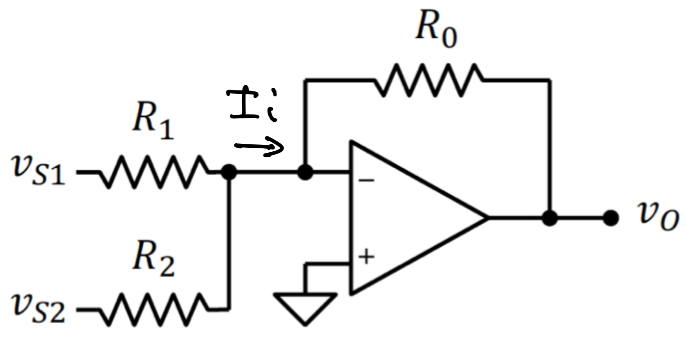
$\Rightarrow I_Z = I_o - I_{D2} = 6\ mA > 0$

OK DZ IN BREAK

PROBLEMA Q2

Dato il circuito riportato nella figura sottostante, si calcoli il valore della tensione di uscita v_o, sapendo che l'amplificatore operazionale ha una **tensione di offset pari a 10 mV**.

Dati: v_{S1}=0.1 V, v_{S2}=0.2 V, v_{off}=10 mV, R_0=10 kΩ, R_1=1 kΩ, R_2=0.5 kΩ.



SOVRAPP. EFFETTI

1) v_{S1}, v_{S2}, ($v_{OFF}=0$)

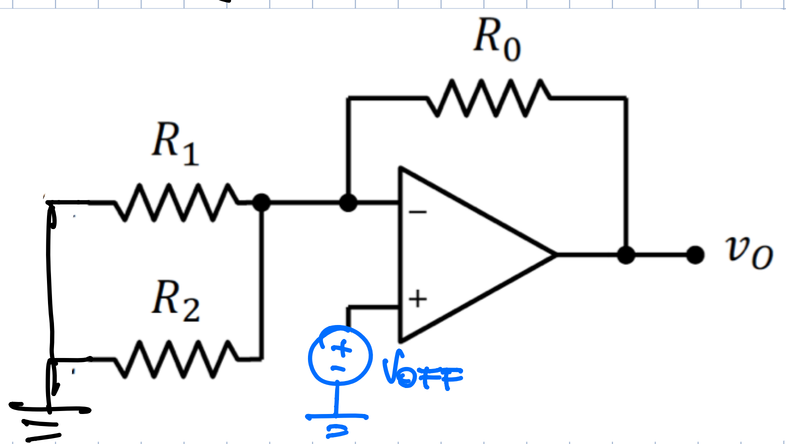
$$v_o = -I_i(R_0) = -\left(\frac{v_{S1}}{R_1}+\frac{v_{S2}}{R_2}\right)R_0$$

$$= -\left(\frac{0{,}1\,V}{1\,k\Omega}+\frac{0{,}2\,V}{0{,}5\,k\Omega}\right)10\,k\Omega$$

$$= -(0{,}1\,mA + 0{,}4\,mA)\,10\,k\Omega$$

$$= -5\,V$$

2) v_{OFF} ($v_{S1}=0$ $v_{S2}=0$)



$$R_1 // R_2 = \frac{1\,k\Omega \cdot 0{,}5\,k\Omega}{1{,}5\,k\Omega} = \frac{1}{3}\,k\Omega$$

$$v_o = V_{OFF}\left(1+\frac{R_0}{R_1//R_2}\right)$$

$$= 10\,mV\,(31) = 310\,mV$$

$$= 0{,}31\,V$$

$$\Rightarrow \boxed{v_o = -5\,V + 0{,}31\,V = -4{,}69\,V}$$