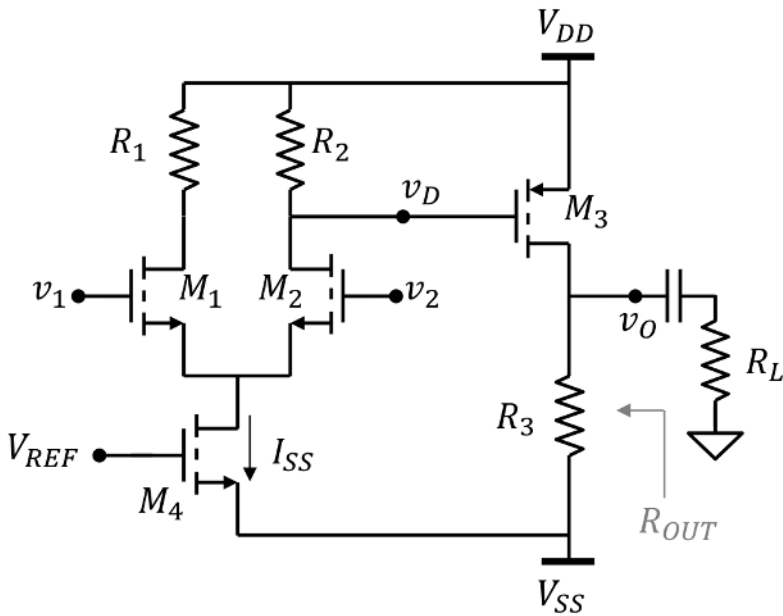


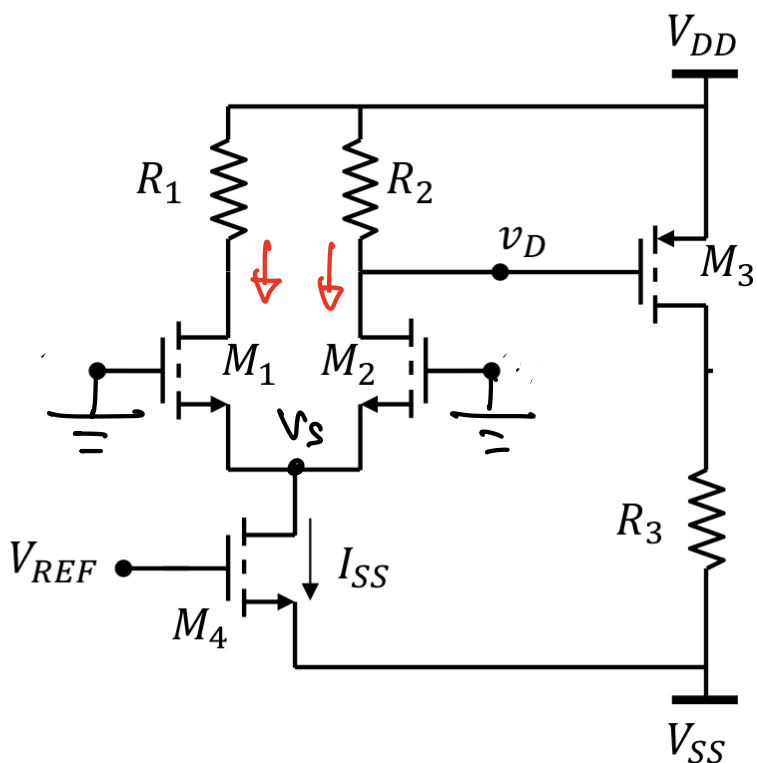
Problema 1

DATI:  $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 5\text{k}\Omega$ ,  $R_L = 20\text{k}\Omega$ ,  $V_{DD} = 5\text{V}$ ,  $V_{SS} = -5\text{V}$   
Parametrati dei MOS:  $M_1$  e  $M_2$ :  $k_{n1} = k_{n2} = 2\text{mA/V}^2$ ,  $V_{TN1} = V_{TN2} = 0.5\text{V}$ ,  $\lambda_{n1} = \lambda_{n2} = 0$   
 $M_3$ :  $k_{p3} = 0.5\text{mA/V}^2$ ,  $V_{TP3} = -0.5\text{V}$ ,  $\lambda_{p3} = 0$   
 $M_4$ :  $k_{n4} = 4\text{mA/V}^2$ ,  $V_{TN4} = 0.5\text{V}$ ,  $\lambda_{n4} = 0.02\text{ V}^{-1}$

- Dato il circuito in figura, calcolare:
1. Il valore della tensione  $V_{REF}$  sapendo che  $M_4$  lavora in saturazione con  $I_{SS} = 0.5\text{ mA}$
  2. La polarizzazione di tutti i transistor identificando la regione di funzionamento e i valori delle tensioni  $V_{GS}$  e  $V_{DS}$  e della corrente  $I_{DS}$ .
  3. Disegnare il modello ai piccoli segnali e calcolare le transconduttanze  $g_{m1}$ ,  $g_{m2}$  e  $g_{m3}$  di  $M_1$ ,  $M_2$  e  $M_3$ .
- Dal modello ai piccoli segnali calcolare:
4. La resistenza di uscita  $R_{OUT}$
  5. Il guadagno di modo differenziale dell'intero amplificatore  $A_d = v_o/(v_1 - v_2)$
  6. Il guadagno di modo comune dell'intero amplificatore e il CMRR



POLARIZZAZIONE



1)  $I_{SS} = 0.5\text{ mA}$

$$\Rightarrow V_{GS4} = V_{TN4} + \sqrt{\frac{2I_{SS}}{k_{n4}}}$$
$$= 0.5\text{V} + \sqrt{0.25\text{V}^2}$$
$$= 1\text{V}$$
  
$$\Rightarrow V_{REF} = V_{SS} + V_{GS4}$$
$$= -5\text{V} + 1\text{V}$$
$$= -4\text{V}$$

$$2) I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2} = 0,25 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow V_{GS1} = V_{TN1} + \sqrt{\frac{2I_{D1}}{k_{n1}}} = 0,5V + \sqrt{0,25V^2} = 1V$$

$$V_{GS2} = V_{GS1} = 1V \quad V_S = -V_{GS1} = -1V$$

$$V_{DS4} = V_S - V_{SS} = 4V$$

$$V_{DS4} > V_{GS4} - V_{TN4} = 0,5V \quad \text{OK SAT.!!}$$

$$V_{D1} = V_{DD} - R_1 I_{D1} = 5V - 10k\Omega \cdot 0,25mA = 2,5V$$

$$V_{D2} = V_{D1} = 2,5V$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_S = 3,5V = V_{DS2}$$

$$V_{DS1} > V_{GS1} - V_{TN1} = 0,5V$$

$$V_{DS2} > V_{GS2} - V_{TN2} = 0,5V$$

OK SATURATION

$$V_{G3} = V_{D2} = 2,5V$$

$$\Rightarrow V_{GS3} = V_{G3} - V_{DD} = -2,5V$$

$$\Rightarrow I_{DS3} = \frac{k_{P3}}{2} (V_{GS3} - V_{TP3})^2 = \frac{0,5mA}{2V^2} (-2)^2 = 1mA$$

$$V_{D3} = -V_{SS} + R_3 I_{DS3} = -5V + 5k\Omega \cdot 1mA = 0V$$

$$\Rightarrow V_{DS3} = V_{D3} - V_{DD} = -5V$$

$$V_{DS3} < V_{GS3} - V_{TP3} = -2V$$

OK SATURATION

$$M_1: I_{D1} = 0,25 \text{ mA}, V_{DS1} = 3,5 \text{ V}, V_{GS1} = 1 \text{ V}$$

$$M_2: I_{D2} = 0,25 \text{ mA}, V_{DS2} = 3,5 \text{ V}, V_{GS2} = 1 \text{ V}$$

$$M_3: I_{D3} = 1 \text{ mA}, V_{DS3} = -5 \text{ V}, V_{GS3} = -2,5 \text{ V}$$

$$M_4: I_{D4} = 0,5 \text{ mA}, V_{DS4} = 4 \text{ V}, V_{GS4} = 1 \text{ V}$$

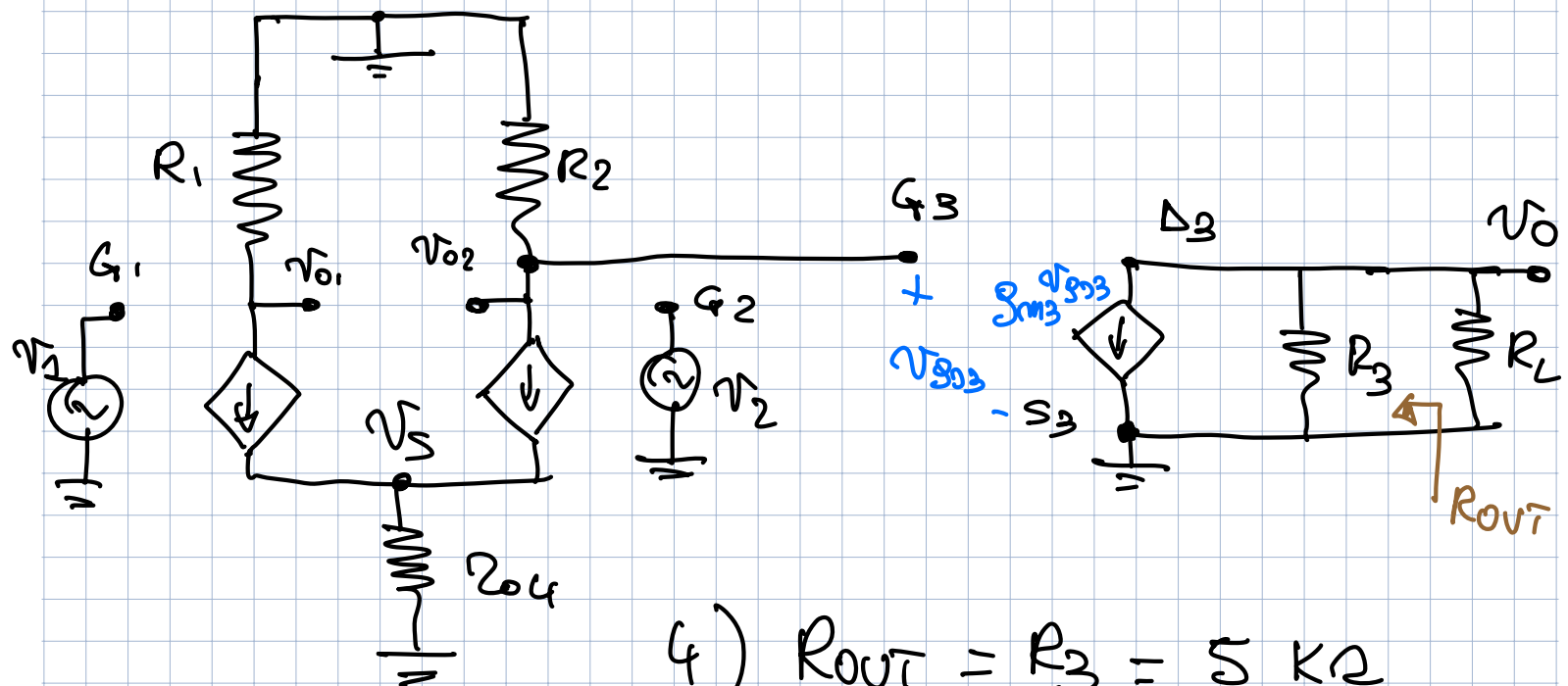
### 3) ANALISI PICCOLO SEGNALE

$$g_{m1} = \sqrt{2K_{M1}I_{D1}} = 1 \text{ mS}$$

$$g_{m2} = \sqrt{2K_{M2}I_{D2}} = 1 \text{ mS}$$

$$g_{m3} = \sqrt{2K_{M3}I_{D3}} = 1 \text{ mS}$$

$$r_{o4} = \frac{\frac{1}{\lambda_{M4}} + V_{DS4}}{I_{SS}} = 108 \text{ k}\Omega$$



$$4) R_{OUT} = R_3 = 5 \text{ k}\Omega$$

5) PER  $A_{d1}$  SOSTITUISCO  $v_g$  E  $v_z$

$$\text{COE} \quad \frac{v_{id}}{2} \text{ E } - \frac{v_{id}}{2}$$

E COME DESCRITTO A LEZIONE TROVO:

$$1) v_s = 0$$

STADIO SOURCE GATE

$$2) \frac{v_{o2}}{v_{id}} = \frac{g_{m2} R_2}{2} = 5 \quad \left( \begin{array}{l} \text{USCITA} \\ \text{SINGLE} \\ \text{ENDED} \\ \text{"POSITIVE"} \end{array} \right)$$

Poi ho lo STADIO A SOURCE GATE

$$\frac{v_o}{v_{g3}} = -g_{m3} R_3 \parallel R_L$$
$$= -1 \text{ mS} \cdot 4 \text{ k}\Omega = -4$$

$$\Rightarrow A_d = \frac{v_o}{v_{id}} = 20$$

Per  $A_c$ , sostituisco  $v_1$  e  $v_2$  con

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

$$\Rightarrow \frac{v_{o2}}{v_{ic}} = - \frac{g_{m2} R_2}{1 + 2 g_{m2} R_{o4}} = - \frac{10}{217} = -0,046$$

STADIO A SOURCE GATE con  $R_s = 20 \text{ k}\Omega$

$$\Rightarrow A_c = \frac{v_o}{v_{ic}} = \frac{v_{o2}}{v_{ic}} \cdot \frac{v_o}{v_{g3}} = 0,184$$

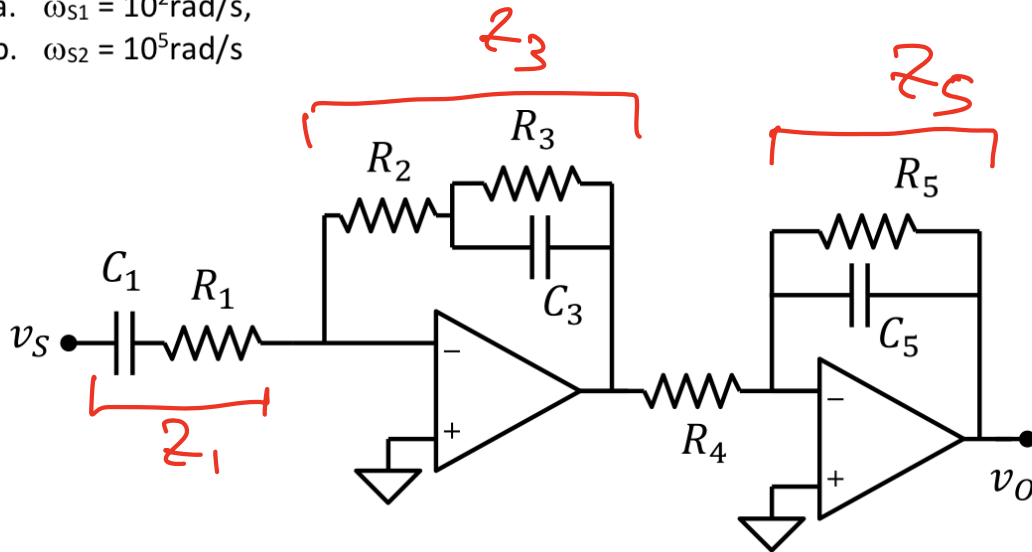
$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = 108,5$$

## Problema 2

DATI:  $R_1 = 5\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 0.5\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 4.5\text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 20\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_3 = 222,2\text{ nF}$ ,  $C_5 = 10\text{ pF}$ ,

Dato il filtro in figura realizzato con un amplificatore operazionale ideale:

1. Trovare la funzione di trasferimento del filtro  $W(\omega) = v_o / v_s$ .
2. Tracciare il diagramma asintotico di Bode del modulo e della fase
3. Dato il segnale di ingresso  $v_s = V_{s1} \sin(\omega_s t)$  con  $V_{s1} = 0.1\text{ V}$ , trovare il segnale di uscita  $v_o$  usando i diagrammi asintotici di bode alle due pulsazioni:
  - a.  $\omega_{s1} = 10^2\text{ rad/s}$ ,
  - b.  $\omega_{s2} = 10^5\text{ rad/s}$



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

$$Z_3 = R_2 + \frac{R_3 \cdot \frac{1}{sC_3}}{R_3 + \frac{1}{sC_3}} = R_2 + \frac{R_3}{1 + sC_3 R_3}$$

$$= \frac{R_2 + R_3 + sC_3 R_2 R_3}{1 + sC_3 R_3}$$

$$= (R_2 + R_3) \left( \frac{1 + sC_3 R_2 / R_3}{1 + sC_3 R_3} \right)$$

$$Z_5 = \frac{R_5 \cdot \frac{1}{sC_5}}{R_5 + \frac{1}{sC_5}} = \frac{R_5}{1 + sR_5 C_5}$$

$$W(s) = \left( - \frac{Z_5}{R_4} \right) \cdot \left( - \frac{Z_3}{Z_1} \right)$$

$$W(s) = \frac{SC_1(R_2+R_3)}{1+SR_1C_1} \cdot \frac{1+SC_3R_2||R_3}{1+SC_3R_3} \cdot \frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{1}{1+SR_5C_5}$$

$$\Rightarrow W(s) = \frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{SC_1(R_2+R_3)(1+SC_3R_2||R_3)}{(1+SR_1C_1)(1+SR_3C_3)(1+SR_5C_5)}$$

$$\frac{R_5}{R_4} = 100$$

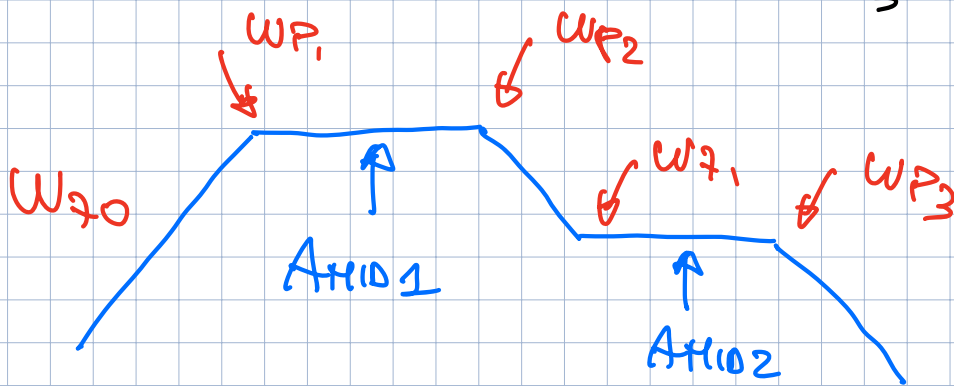
$$W_{70} = \frac{1}{C_1(R_2+R_3)} = 10$$

$$WP_1 = \frac{1}{C_1R_1} = 10$$

$$W_{71} = \frac{1}{C_3R_2||R_1} = 10^4$$

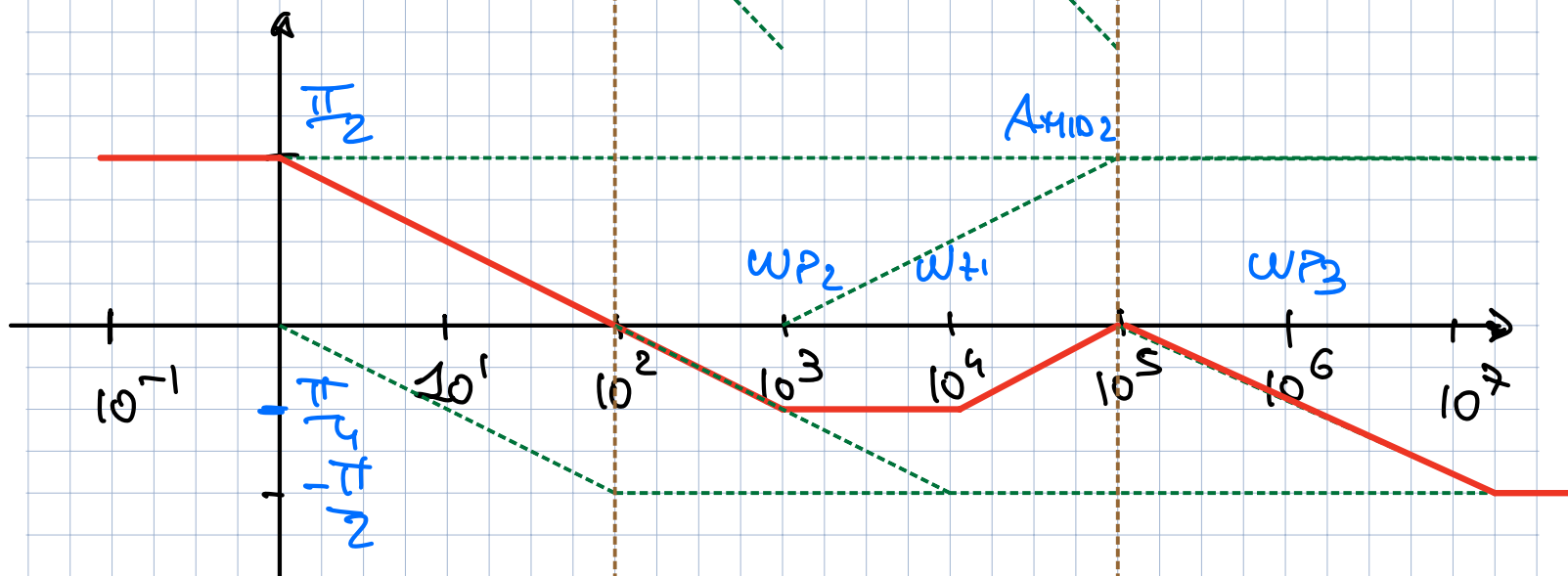
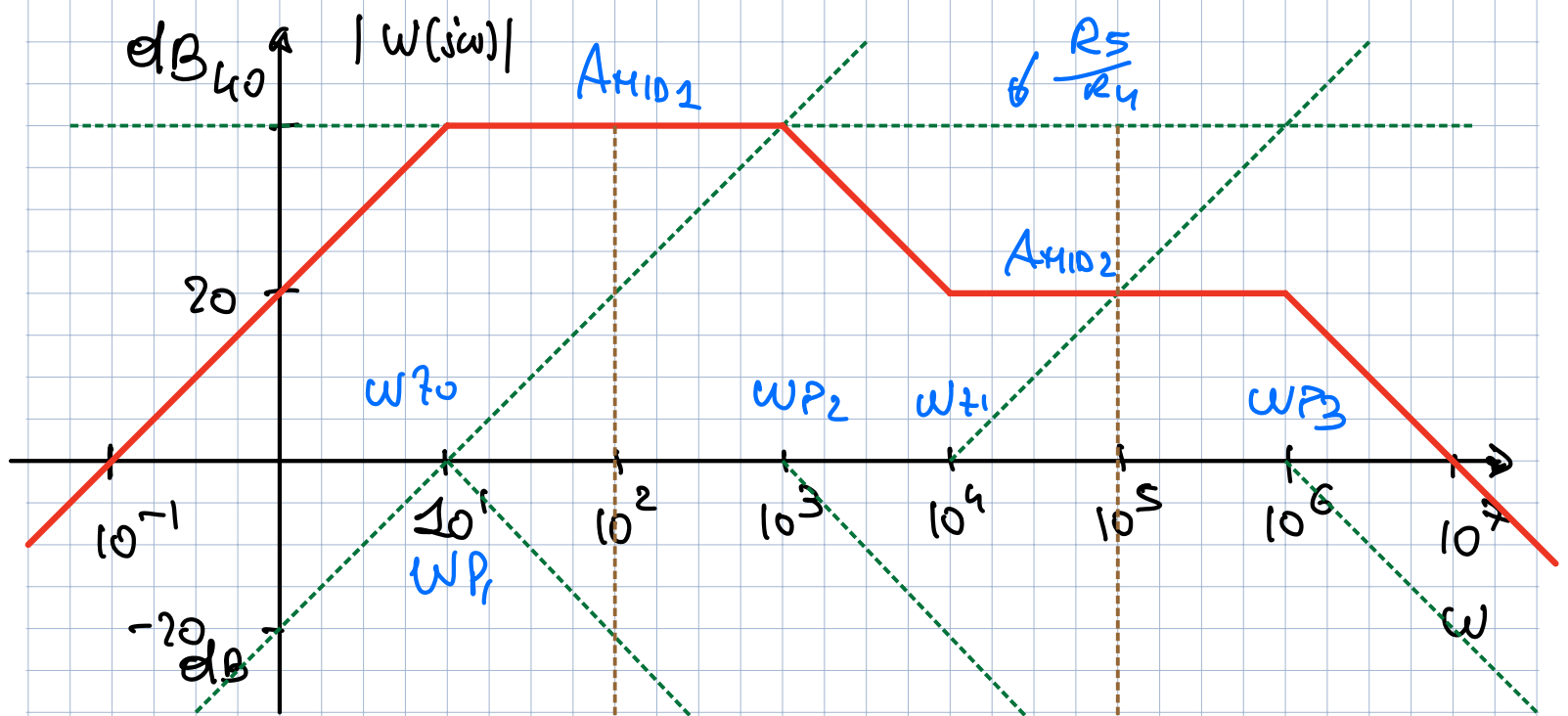
$$WP_2 = \frac{1}{C_3R_3} = 10^3$$

$$WP_3 = \frac{1}{C_5R_5} = 10^6$$



$$AM_{101} = \frac{C_1(R_2+R_3)}{C_1R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4} = 10^2$$

$$AM_{102} = \frac{C_1(R_2+R_3)}{C_1R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{R_2||R_3}{R_3} = 10$$



$\omega_{s1}$   
 $|W(j\omega)| = 100$   
 $\angle W(j\omega) = 0$

$\omega_{s2}$   
 $|W(j\omega)| = 10$   
 $\angle W(j\omega) = 0$

$\underline{V_{01} = 10 \sin(\omega_{s1} t)}$

$\underline{V_{02} = 1 - \sin(\omega_{s1} t)}$

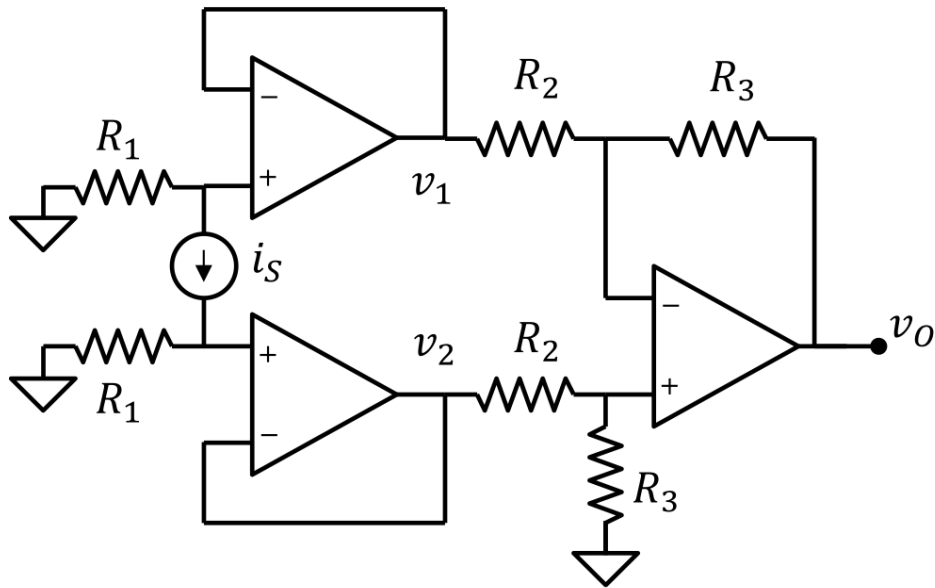
### Problema 3

DATI:  $R_1 = 5\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 100\text{k}\Omega$

Sia dato il circuito in figura realizzato con tre amplificatori operazionali.

Supponendo che tutti gli amplificatori operazionali siano ideali, calcolare:

1. Il valore di  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_0$  con  $i_s = 0.1\text{mA}$ .
2. Il guadagno di transresistenza  $R_m = v_0/i_s$
3. Supponiamo ora che tutti gli amplificatori operazionali abbiano la stessa tensione di offset  $V_{os} = 0.1\text{V}$ , calcolare il valore delle tensioni  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_0$  con  $i_s = 0.1\text{mA}$ .



$$1) \quad v_1 = -R_1 i_s = -0,5\text{V}$$

$$v_2 = R_1 i_s = +0,5\text{V}$$

USO SOVRAPP. EFFETTI'

$$v_1: \quad v_0' = v_1 \left( -\frac{R_3}{R_2} \right)$$

$$v_2: \quad v_0'' = v_2 \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right)$$
$$= v_2 \frac{R_3}{R_2}$$



$$\Rightarrow V_0 = V_0' + V_0'' = \frac{R_3}{R_2} (V_2 - V_1)$$

$$= \frac{R_3}{R_2} \cdot R_1 (2 i_s)$$

$$= \frac{2 R_3 R_1}{R_2} i_s = 10V$$

$$2) R_m = \frac{V_0}{i_s} = \frac{2 R_3 R_1}{R_2} = 100 K\Omega$$

3) SE AGGIUNGO OFFSET:

$$V_1 = -R_1 i_s + V_{os}$$

$$V_2 = R_1 i_s + V_{os}$$

$$\left. \begin{array}{l} V_1 = -R_1 i_s + V_{os} \\ V_2 = R_1 i_s + V_{os} \end{array} \right\} V_2 - V_1 = 2 R_1 i_s$$

OFFSET  $S_i$   
ANNULLA!

RESTA L'OFFSET

DEL TERZO AO CHE DA:

$$V_0''' = V_{os} \left( 1 + \frac{R_3}{R_2} \right) = 1.1 V_{os} = 1.1V$$

$$\Rightarrow \underline{V_0 = V_0' + V_0'' + V_0''' = 11.1V}$$