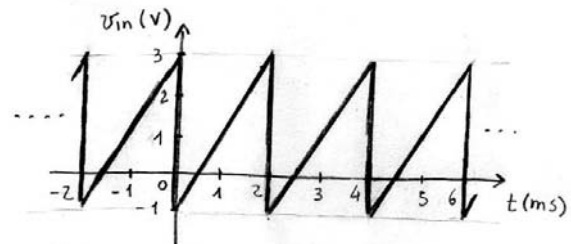
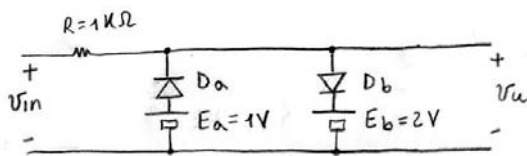


ESERCIZIO N°1

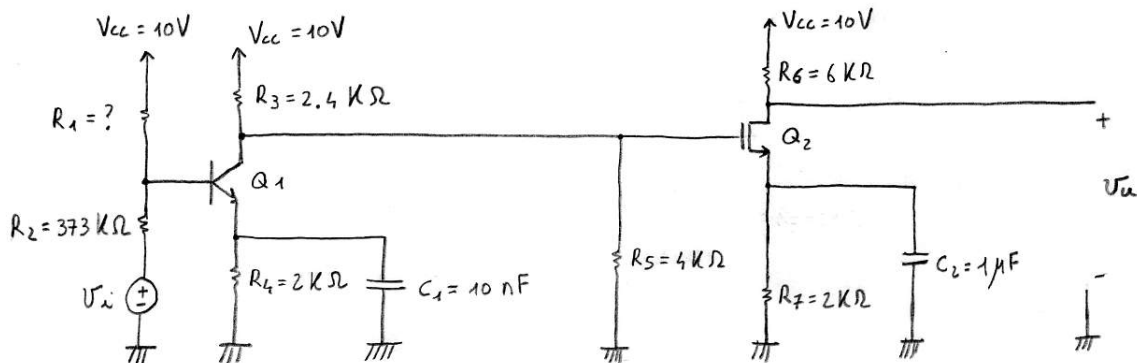
6 punti (4)

Si disegni la caratteristica ingresso/uscita del circuito rappresentato nella parte sinistra della figura. Si determini inoltre l'andamento nel tempo della tensione di uscita $v_u(t)$ nel caso in cui la tensione di ingresso $v_{in}(t)$ sia il segnale periodico rappresentato nella parte destra della figura (la valutazione esatta dei punti d'angolo non è richiesta). Si considerino i diodi D_a e D_b ideali.

**ESERCIZIO N°2**

7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, ricavare il valore della resistenza R_1 sapendo che la tensione di uscita V_u a riposo è pari a 4 V. Determinare inoltre il punto di lavoro dei transistori Q_1 e Q_2 .



per Q_1 : $h_{FE} = 100$

per Q_2 : $V_T = 1V$

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 1 \frac{mA}{V^2}$$

$(V_u)_Q = 4V$

ESERCIZIO N°3

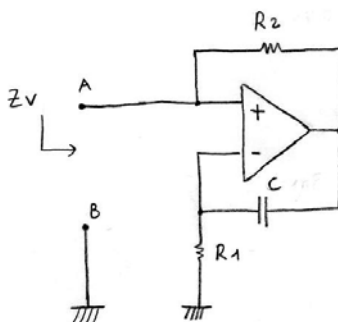
7.5 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_1=300\text{ K}\Omega$. Se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s)=V_u/V_i$ (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa) e se ne grafichi il diagramma di Bode del modulo. Si considerino per Q_1 : $h_{ie}=6\text{ K}\Omega$, $h_{fe}=150$ e per Q_2 : $g_m=2\text{ mA/V}$.

ESERCIZIO N°4

6 punti (4)

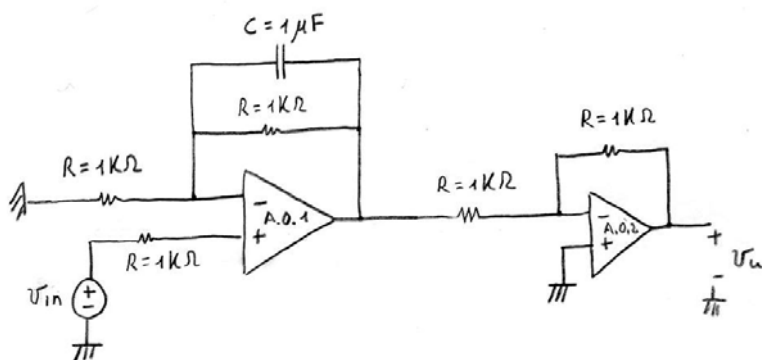
Usando la definizione standard di impedenza vista e lavorando nel dominio di Laplace, si ricavi l'impedenza Z_v vista tra i terminali A e B della porta di ingresso del seguente circuito. Si ipotizzi l'amplificatore operazionale ideale e si sfrutti il metodo del cortocircuito virtuale.



ESERCIZIO N°5

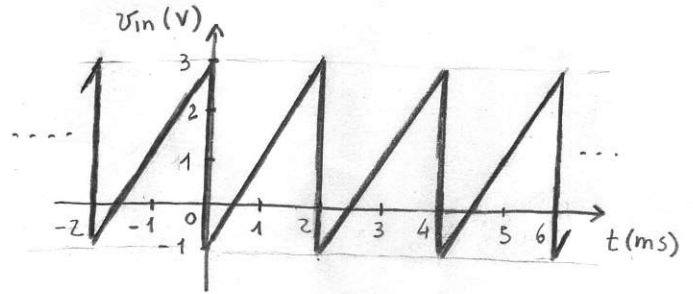
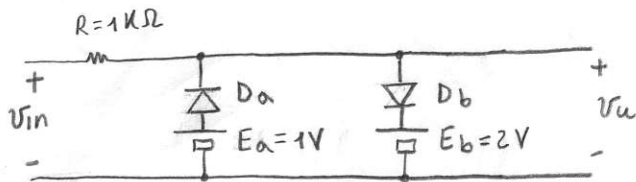
6.5 punti (4)

Ricavare il massimo sbilanciamento in uscita del circuito mostrato in figura, considerando il solo effetto delle tensioni di sbilanciamento in ingresso $V_{io}^{(1)}$ e $V_{io}^{(2)}$ (indipendenti tra di loro) dei due amplificatori operazionali (chiamati in figura A.O.1 e A.O.2). A parte la presenza dei generatori di sbilanciamento, si considerino gli amplificatori operazionali ideali.

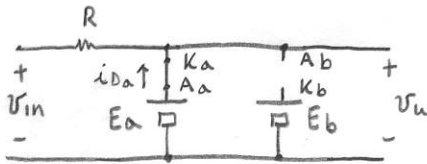


V_{io} per il 1° amplificatore operazionale
 $|V_{io}^{(1)}|_{\max} = 5\text{ mV}$
 $|V_{io}^{(2)}|_{\max} = 5\text{ mV}$
 V_{io} per il 2° amplificatore operazionale

1)



per $V_{in} < E_a = 1V$: D_a conduce e D_b è interdetto



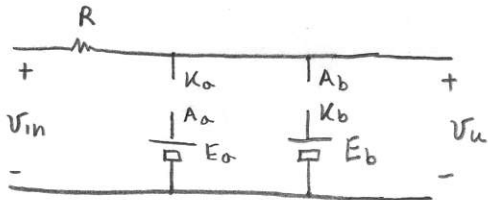
per cui $V_u = E_a = 1V$

verifiche:
dello stato
dei diodi

$$i_{Da} = \frac{E_a - V_{in}}{R} > 0 \text{ se } E_a - V_{in} > 0 \rightarrow V_{in} < E_a$$

$$V_{AKb} = E_a - E_b = -1V < 0$$

per $E_a = 1V < V_{in} < E_b = 2V$: D_a e D_b sono interdetti



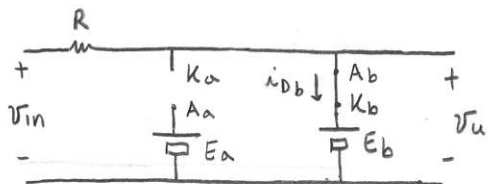
per cui $V_u = V_{in}$

verifiche:
dello stato
dei diodi

$$V_{AKa} = E_a - V_{in} < 0 \text{ se } V_{in} > E_a$$

$$V_{AKb} = V_{in} - E_b < 0 \text{ se } V_{in} < E_b$$

per $V_{in} > E_b = 2V$: D_a è interdetto e D_b conduce



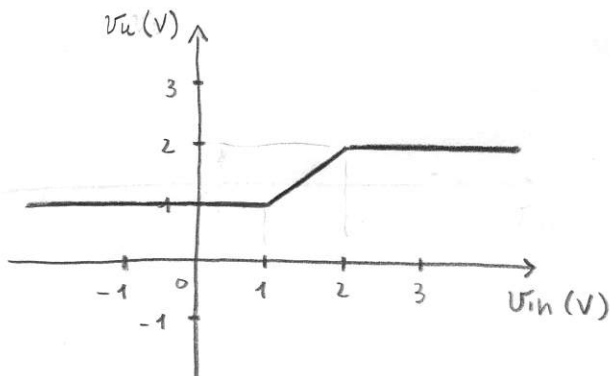
per cui $V_u = E_b = 2V$

verifiche:
dello stato
dei diodi

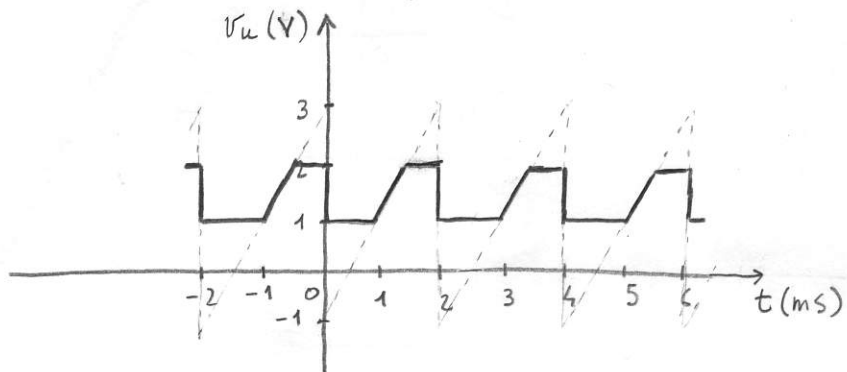
$$V_{AKa} = E_a - E_b = -1V < 0$$

$$i_{Db} = \frac{V_{in} - E_b}{R} > 0 \text{ se } V_{in} - E_b > 0 \rightarrow V_{in} > E_b$$

Quindi la caratteristica ingresso-uscita è

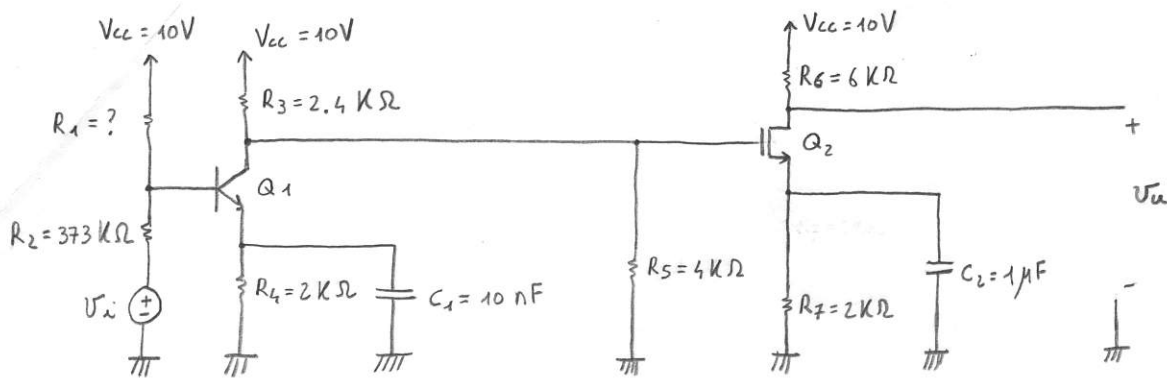


Di conseguenza, la $v_u(t)$ corrispondente alla $v_{in}(t)$ fornita è la seguente:



(perché in tutti gli istanti t in cui $v_{in} < 1V$ la v_u viene pari a $1V$,
in tutti gli istanti t in cui $1V < v_{in} < 2V$ la v_u coincide con la v_{in} ,
in tutti gli istanti t in cui $v_{in} > 2V$ la v_u viene pari a $2V$)

2)



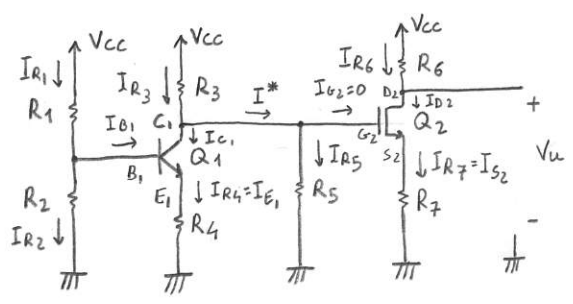
per Q_1 : $h_{FE} = 100$

per Q_2 : $V_T = 1V$

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 1 \frac{mA}{V^2}$$

$$(V_u)_{Q_1} = 4V$$

In continua il circuito diventa:



$$I_{R6} = \frac{V_{CC} - V_u}{R_6} = 1mA = I_{D2}$$

$$\text{essendo } I_{G2} = 0, I_{S2} = I_{D2} = 1mA = I_{R7}$$

$$V_{S2} = R_7 I_{R7} = 2V$$

$$V_{D2} = V_u = 4V$$

ipotesi 1: Q_2 in saturazione

$$I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_T)^2 \rightarrow V_{GS2} = V_T + \sqrt{\frac{I_{D2}}{K}} = 2V > V_T = 1V$$

$K = 1 \frac{mA}{V^2}$

un n-mos conduce per $V_{GS} > V_T$
per cui scegliamo il segno "+"

$$V_{G2} = V_{S2} + V_{GS2} = 4V = V_{C1}$$

$$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 2V > V_{GS2} - V_T = 1V$$

ipotesi 1 verificata

$$I_{R5} = \frac{V_{G2}}{R_5} = 1mA$$

$$I^* = I_{R5} + I_{G2} = I_{R5} = 1mA$$

$$I_{R3} = \frac{V_{CC} - V_{G2}}{R_3} = 2.5mA$$

$$I_{C1} = I_{R3} - I^* = 1.5mA$$

ipotesi 2: Q_1 in zona attiva diretta

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{FE}} = 15\mu A > 0$$

$$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1} = 1.515mA$$

$$V_{E1} = R_4 I_{E1} = 3.03V$$

$$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = 0.97V > V_{CEsat} \approx 0.2V$$

ipotesi 2 verificata

$$V_{B1} = V_{E1} + V_{BE} = 3.73 \text{ V}$$

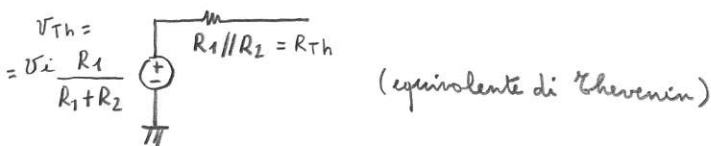
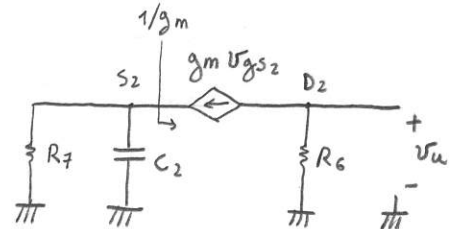
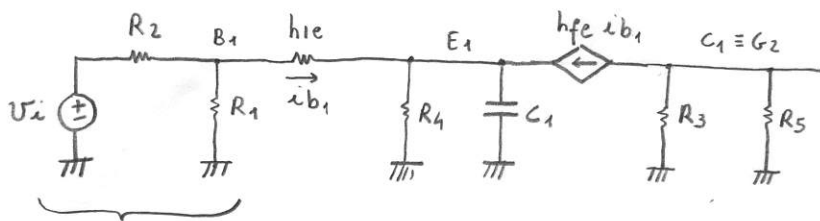
$$I_{R2} = \frac{V_{B1}}{R_2} = 10 \mu\text{A}$$

$$I_{R1} = I_{R2} + I_{B1} = 25 \mu\text{A}$$

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{B1}}{I_{R1}} = 250800 \Omega$$

3) $h_{ie} = 6 \text{ K}\Omega$, $h_{fe} = 150$, $g_m = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$; $R_1 = 300 \text{ K}\Omega$

Circuito per le variazioni:



2 condensatori indipendenti (nessuna maglia impropria) $\rightarrow$ 2 poli

$A_V(\infty) \neq 0 \rightarrow$ numero zeri = numero poli $\rightarrow$ 2 zeri

$$R_{VC1} = R_4 \parallel \left(\frac{h_{ie} + R_1 \parallel R_2}{h_{fe} + 1} \right) = 726.465 \Omega$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 137652.9 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 21908.137 \text{ Hz}$$

C_1 introduce uno zero per lo s per cui $R_4 \parallel \frac{1}{C_1 s} = \infty$ perché in questa condizione si ha

$B_1 \xrightarrow{i_b} E_1 \xleftarrow{h_{fe} i_b} C_1$ per cui dobbiamo avere $i_b = -h_{fe} i_b \rightarrow \underbrace{(1+h_{fe})}_{\neq 0} i_b = 0 \rightarrow i_b = 0 \rightarrow$

$$h_{fe} i_b = 0 \rightarrow U_u = 0$$

$$R_4 \parallel \frac{1}{C_1 s} = \frac{R_4 \frac{1}{C_1 s}}{R_4 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_4}{1 + R_4 C_1 s} = \infty \rightarrow 1 + R_4 C_1 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{R_4 C_1} \rightarrow$$

$$\omega_{Z1} = \frac{1}{R_4 C_1} = 50000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{Z1} = \frac{\omega_{Z1}}{2\pi} = 7957.747 \text{ Hz}$$

$$R_{VC2} = R_7 \parallel \frac{1}{g_m} = 400 \Omega$$

$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{VC2}} = 2500 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 397.89 \text{ Hz}$$

C_2 introduce uno zero per lo s per cui $R_7 \parallel \frac{1}{C_2 s} = \infty$ perché (chiamando $Z_{S2} = R_7 \parallel \frac{1}{C_2 s}$) si

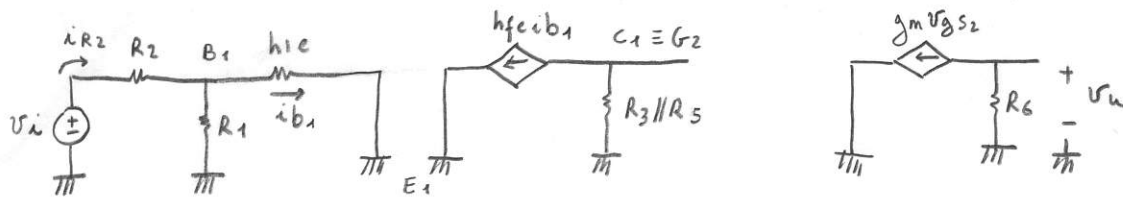
ha che $U_{gs2} = U_{g2} - U_{s2} = U_{g2} - Z_{S2} g_m U_{gs2} \rightarrow U_{gs2} (1 + Z_{S2} g_m) = U_{g2} \rightarrow U_{gs2} = \frac{U_{g2}}{1 + Z_{S2} g_m}$

e quindi se $Z_{S2} = \infty$ si ha che $U_{gs2} = 0$ e quindi $U_u = 0$

$$R_7 \parallel \frac{1}{C_2 s} = \frac{R_7 \frac{1}{C_2 s}}{R_7 + \frac{1}{C_2 s}} = \frac{R_7}{1 + R_7 C_2 s} = \infty \rightarrow 1 + R_7 C_2 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{R_7 C_2} \rightarrow$$

$$\omega_{Z2} = \frac{1}{R_7 C_2} = 500 \text{ rad/s} \rightarrow f_{Z2} = \frac{\omega_{Z2}}{2\pi} = 79.577 \text{ Hz}$$

Per calcolare $A_v(\infty)$ chiudiamo C_1 e C_2 :



$$V_u = -R_6 g_m V_{gs2}$$

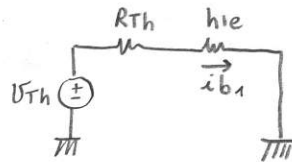
$$V_{gs2} = V_{g2} \quad (\text{in quanto } V_{s2} = 0)$$

$$V_{g2} = -(R_3 || R_5) h_{fe} i_{b1}$$

$$i_{b1} = i_{R2} \frac{R_1}{R_1 + h_{ie}}$$

$$i_{R2} = \frac{V_i}{R_2 + (R_1 || h_{ie})}$$

oppure:



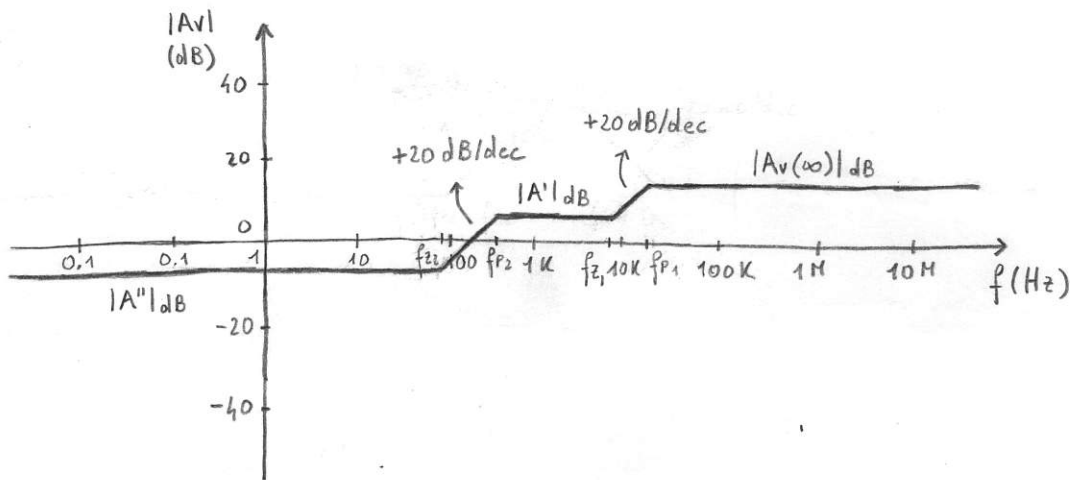
$$i_{b1} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 || R_2 + h_{ie}}$$

$$A_v(\infty) = \frac{V_u}{V_i} = R_6 g_m (R_3 || R_5) h_{fe} \frac{R_1}{R_1 + h_{ie}} \frac{1}{R_2 + (R_1 || h_{ie})} = 6.9865$$

$$\text{oppure: } \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 || R_2 + h_{ie}}$$

$$|A_v(\infty)|_{dB} = 16.885 \text{ dB}$$

$$A_v(s) = A_v(\infty) \frac{(s + \omega_{z1})(s + \omega_{z2})}{(s + \omega_{p1})(s + \omega_{p2})}$$



$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z1}}{f_{p1}} = 2.5377$$

$$|A'|_{dB} = 8.089 \text{ dB}$$

$$|A''| = |A'| \frac{f_{z2}}{f_{p2}} = 0.5075$$

$$|A''|_{dB} = -5.89 \text{ dB}$$

[infatti con i condensatori C_1 e C_2 aperti abbiamo che

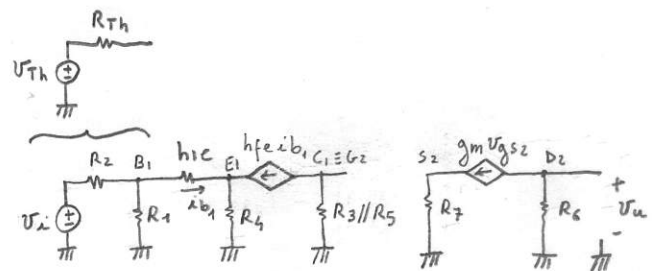
$$V_u = -R_6 g_m V_{gs2}$$

$$V_{gs2} = V_{g2} - V_{s2} = V_{g2} - R_7 g_m V_{gs2} \rightarrow V_{gs2} (1 + R_7 g_m) = V_{g2} \rightarrow V_{gs2} = \frac{V_{g2}}{1 + R_7 g_m}$$

$$V_{g2} = -(R_3 || R_5) h_{fe} i_{b1}$$

$$i_{b1} = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + h_{ie} + R_4 (h_{fe} + 1)} = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 || R_2 + h_{ie} + R_4 (h_{fe} + 1)}$$

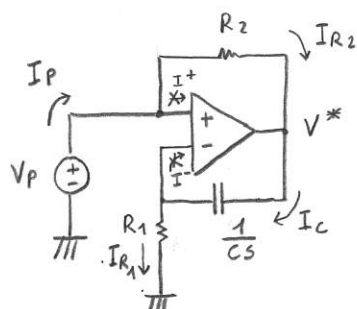
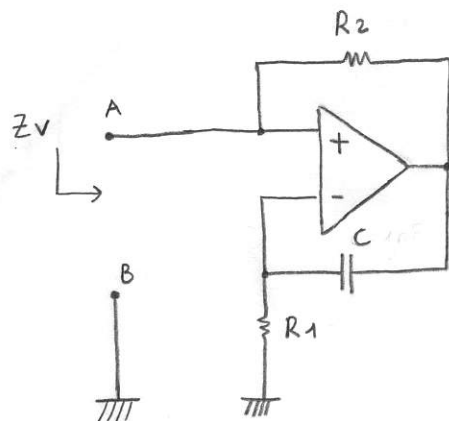
$$A_v(0) = \frac{V_u}{V_i} = \frac{R_6 g_m}{1 + R_7 g_m} (R_3 || R_5) h_{fe} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 || R_2 + h_{ie} + R_4 (h_{fe} + 1)} = 0.5075 \rightarrow |A_v(0)| = -5.89 \text{ dB}$$



[* verifico che le due espressioni sono identiche;

$$\begin{aligned}
 i_{b_1} &= \frac{V_i}{R_2 + R_1 // h_{ie}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + h_{ie}} = \frac{V_i}{R_2 + \frac{R_1 h_{ie}}{R_1 + h_{ie}}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + h_{ie}} = \frac{V_i \cancel{(R_1 + h_{ie})}}{R_2 (R_1 + h_{ie}) + R_1 h_{ie}} \cdot \frac{R_1}{\cancel{R_1 + h_{ie}}} = \\
 &= V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 + h_{ie} (R_1 + R_2)} = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + h_{ie}} = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 // R_2 + h_{ie}}]
 \end{aligned}$$

4)



per il c.c.v. $V^- = V^+ = V_p$

$$I_{R1} = \frac{V^-}{R_1}$$

per il c.c.v. $I^- = 0 \rightarrow I_C = I_{R1} = \frac{V^-}{R_1} = \frac{V_p}{R_1}$

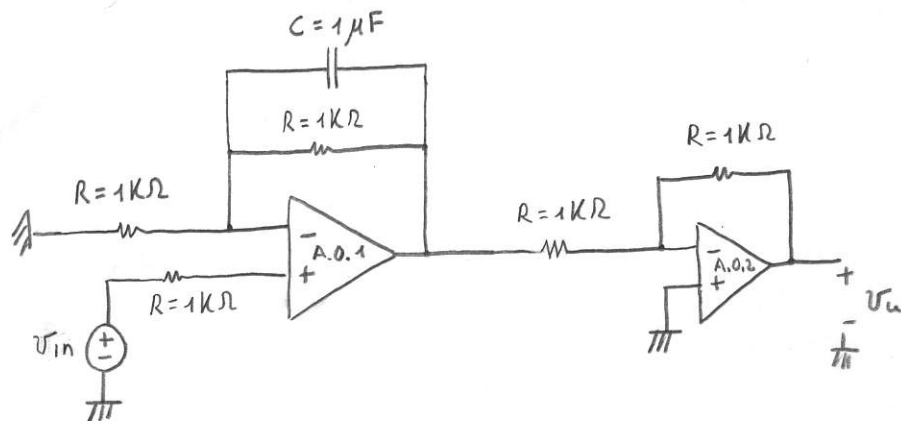
$$V^* = V^- + \frac{1}{CS} I_C = V_p + \frac{1}{R_1 CS} V_p$$

$$I_{R2} = \frac{V_p - V^*}{R_2} = \frac{1}{R_2} \left(V_p - V_p - \frac{1}{R_1 CS} V_p \right) = - \frac{1}{R_1 R_2 CS} V_p$$

per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_p = I_{R2} = - \frac{1}{R_1 R_2 CS} V_p$

$$Z_V = \frac{V_p}{I_p} = - R_1 R_2 CS$$

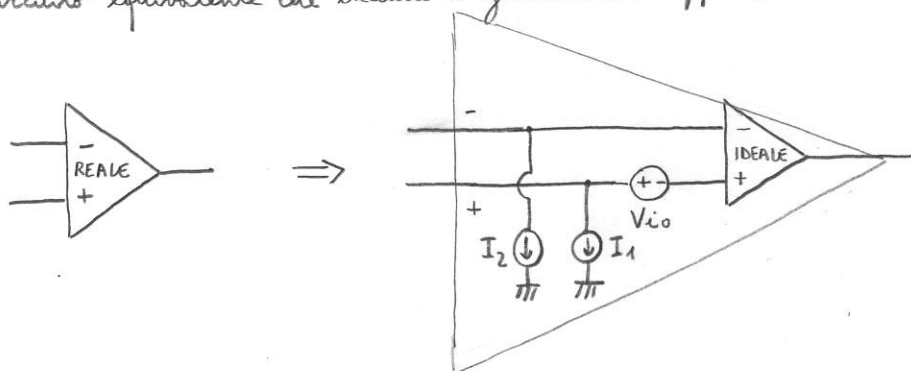
5)



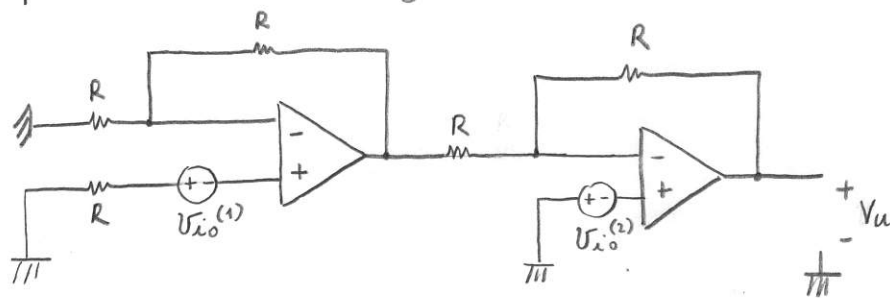
V_{io} per il 1° amplificatore operazionale
 $|V_{io}^{(1)}|_{\max} = 5 \text{ mV}$
 $|V_{io}^{(2)}|_{\max} = 5 \text{ mV}$
 V_{io} per il 2° amplificatore operazionale

dobbiamo determinare il contributo sull'uscita dei soli generatori di offset, quindi disattiviamo V_{in} ; inoltre, poiché i generatori di offset sono generatori costanti (cioè operano in continuo), apriamo il condensatore C ;

dovremmo sostituire a ciascuno dei due amplificatori operazionali reali mostrati nel circuito il suo circuito equivalente che include i generatori di offset:

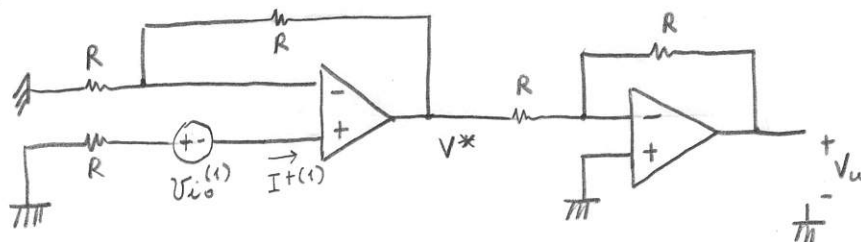


poiché però in questo caso vogliamo considerare il contributo sull'uscita dei soli generatori di offset $V_{io}^{(1)}$ e $V_{io}^{(2)}$ dei due amplificatori operazionali, il circuito complessivo si ridurrà al seguente:



usiamo il principio di sovrapposizione degli effetti:

a) contributo di $V_{io}^{(1)}$

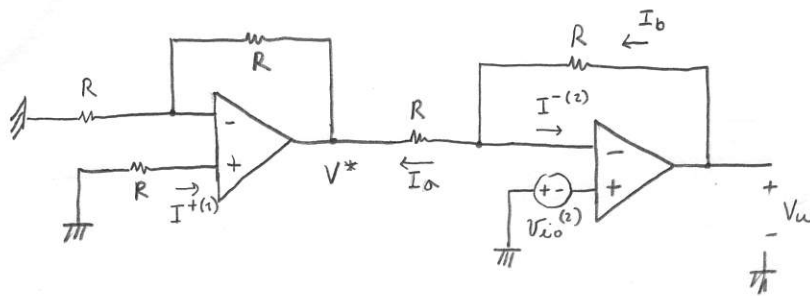


per il c.c.v. $I^{+(1)} = 0 \rightarrow$ non c'è caduta sulla resistenza in serie a $V_{io}^{(1)} \rightarrow$

$$V^{+(1)} = -V_{io}^{(1)} \rightarrow V^* = V^{+(1)} \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -2V_{io}^{(1)} \rightarrow V_u = V^* \left(-\frac{R}{R}\right) = 2V_{io}^{(1)}$$

(ingresso non invertente del 1° amplificatore operazionale)

b) contributo di $v_{i0}^{(2)}$



per il ccv $I^{+(1)} = 0 \rightarrow$ non c'è caduta sulla resistenza posta sull'ingresso non invertente del 1° amplificatore operazionale $\rightarrow V^{+(1)} = 0 \rightarrow V^* = 0 \rightarrow$ di conseguenza per il 2° stadio possiamo usare la formula del guadagno di un amplificatore non invertente, cioè (essendo $V^{+(2)} = -v_{i0}^{(2)}$)

$$v_u = -v_{i0}^{(2)} \left(1 + \frac{R}{R} \right) = -2 v_{i0}^{(2)}$$

[in altre parole: $V^+ = -v_{i0}^{(2)}$; per il ccv $V^- = V^+ = -v_{i0}^{(2)}$; $I_a = \frac{V^- - V^*}{R} = \frac{-v_{i0}^{(2)}}{R}$;

per il ccv $I^{-(2)} = 0 \rightarrow I_b = I_a + I^{-(2)} = I_a = -\frac{v_{i0}^{(2)}}{R} \rightarrow v_u = V^- + R I_b = -v_{i0}^{(2)} - R \frac{v_{i0}^{(2)}}{R} = -2 v_{i0}^{(2)}$]

Completivamente

$$v_u = 2 v_{i0}^{(1)} - 2 v_{i0}^{(2)}$$

per cui il massimo modulo della v_u si ottiene per $v_{i0}^{(1)} = 5 \text{ mV}$ e $v_{i0}^{(2)} = -5 \text{ mV}$, oppure per $v_{i0}^{(1)} = -5 \text{ mV}$ e $v_{i0}^{(2)} = 5 \text{ mV}$; in entrambi i casi

$$|v_u|_{\max} = 4 \cdot 5 \text{ mV} = 20 \text{ mV}$$