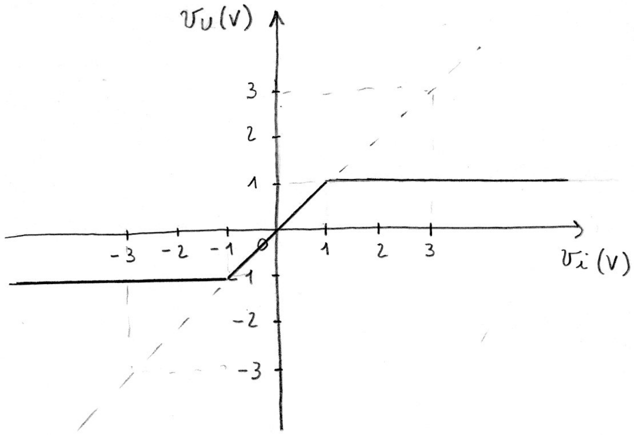
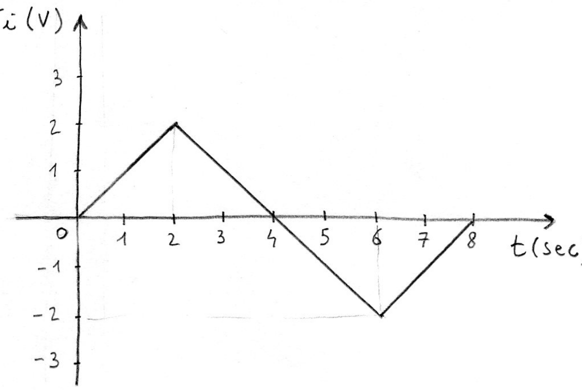
Scheda: **A23_02**	Data: **30 gennaio 2023**

Cognome	Nome	Matricola

ESERCIZIO N°1
5.5 punti (4)

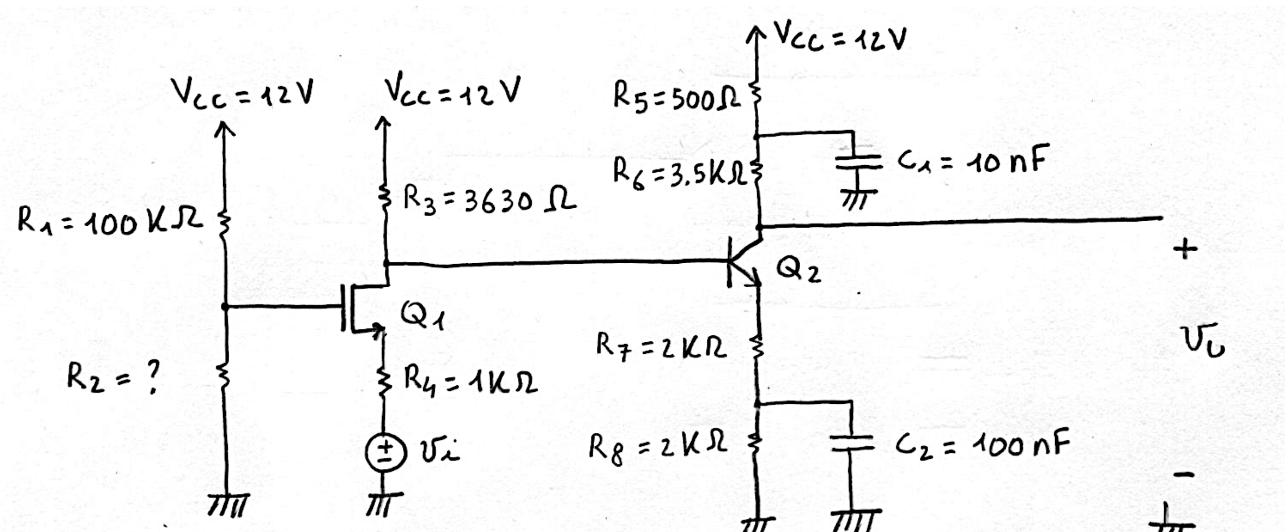
Considerando i diodi ideali, si progetti e si dimensioni un circuito tagliatore che possegga la caratteristica ingresso-uscita riportata a sinistra nella figura sottostante. Si disegni inoltre l'andamento nel tempo della tensione $v_u(t)$ che si ottiene in uscita da tale tagliatore quando al suo ingresso si applica la tensione $v_{in}(t)$ il cui andamento nel tempo è rappresentato a destra nella figura.





ESERCIZIO N°2
7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, ipotizzando Q_1 (transistore MOS a canale n) in saturazione e Q_2 (transistore BJT npn) in zona attiva diretta e sapendo che la tensione V_U a riposo è pari a 8 V, si ricavi il valore della resistenza R_2. Si determini il punto di lavoro di Q_1 e Q_2 e si verifichino le ipotesi fatte sullo stato dei due transistori.



per Q_1: $V_{T1} = 1.01$ V ; per Q_2: $h_{FE2} = 100$

$$\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W_1}{L_1} = 1.99 \ \frac{mA}{V^2}$$

a riposo $V_U = 8$ V

ESERCIZIO N°3

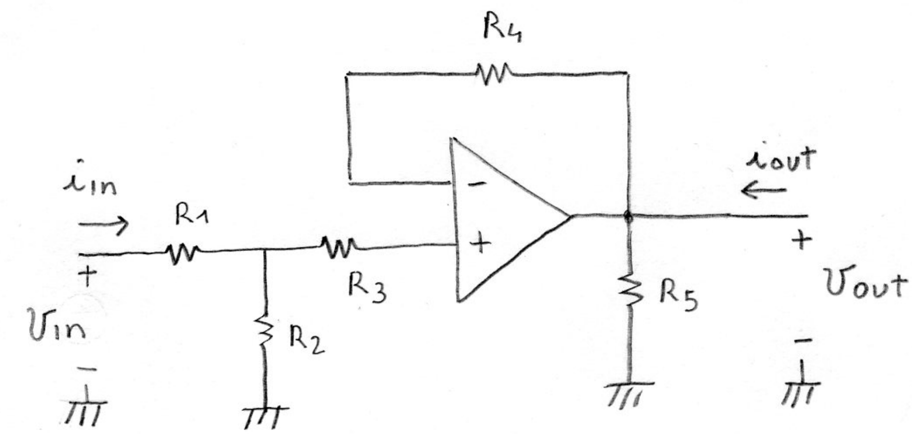
7.5 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_2 = 60$ KΩ. Considerando per Q_1: $g_{m1} = 4$ mA/V e per Q_2: $h_{ie2} = 4$ KΩ, $h_{fe2} = 120$, se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s) = V_u/V_i$ (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa) e si disegni il diagramma asintotico di Bode del suo modulo.

ESERCIZIO N°4

6 punti (4)

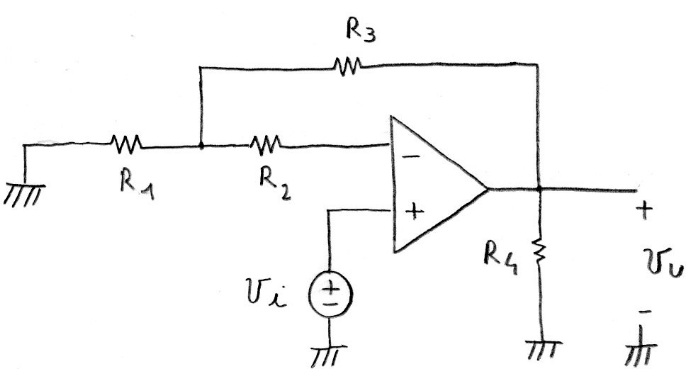
Si ricavino i parametri r del quadripolo mostrato in figura (le porte di ingresso e di uscita del quadripolo sono quelle alle quali in figura sono prese, rispettivamente, le tensioni v_{in} e v_{out}). Si consideri l'amplificatore operazionale ideale.



ESERCIZIO N°5

7 punti (4)

Ricavare il massimo sbilanciamento causato sull'uscita del circuito mostrato in figura (dove v_i è il segnale di ingresso) dai generatori di offset dell'amplificatore operazionale. A parte la presenza dei generatori di offset (il cui valore è riportato accanto allo schema), si consideri tale amplificatore operazionale ideale.



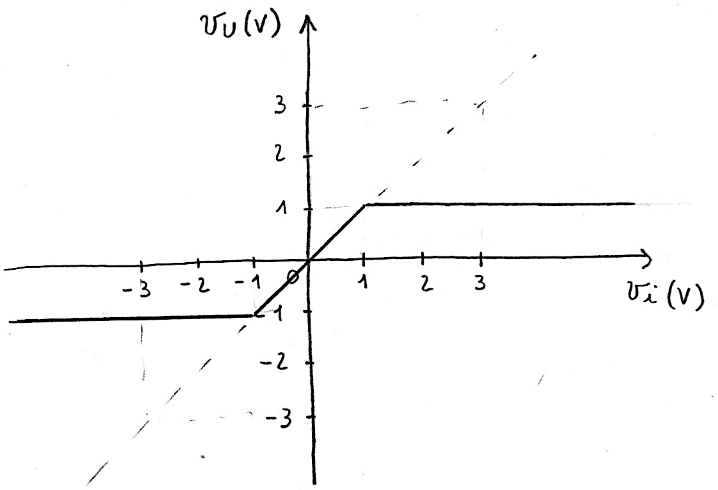
$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1\,K\Omega$

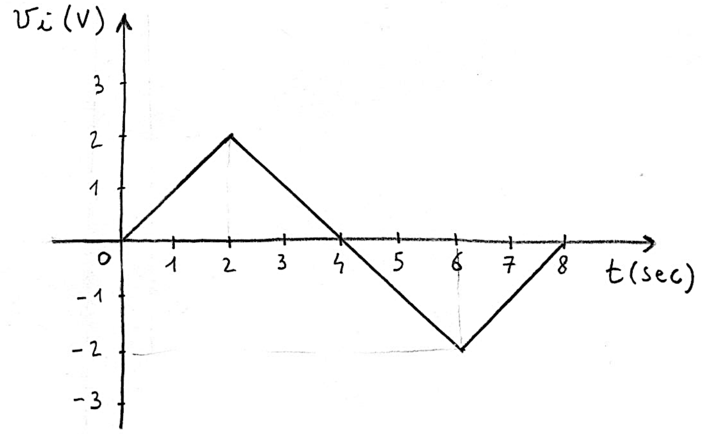
$|V_{io}|_{max} = 4\,mV$

$I_B = \dfrac{I_1 + I_2}{2} = 80\,nA$

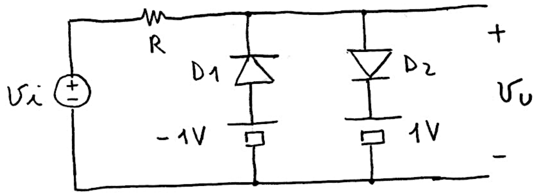
$|I_{io}|_{max} = |I_1 - I_2|_{max} = 20\,nA$

1)



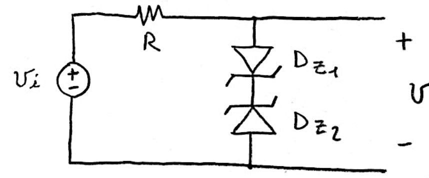


La caratteristica ingresso-uscita assegnata può essere realizzata mediante uno di questi circuiti tagliatori:



*

oppure

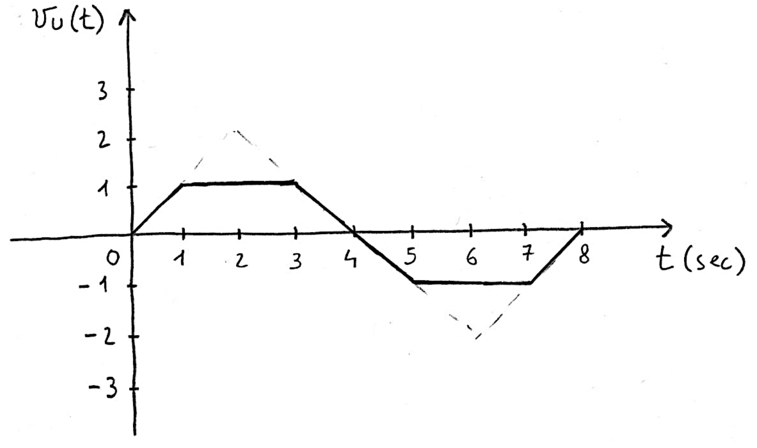


(con ad es. $R = 1k\Omega$).

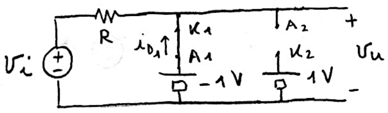
(nel caso fosse richiesta anche l'indipendenza dalla resistenza della sorgente e del carico, dovremmo aggiungere un buffer a monte e uno a valle)

(con la tensione di zener dei due diodi pari a $-1V$, nell'ipotesi di diodi ideali con $V_D = 0$ quando conducono in polarizzazione diretta)

Mandando in ingresso a questi circuiti la $v_i(t)$ assegnata, si ottiene in uscita la seguente $v_U(t)$:



* per $v_i < -1V$ ipotizzo D_1 in conduzione, D_2 interdetto

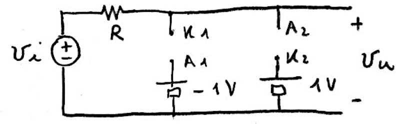


$$i_{D1} = \frac{-1V - v_i}{R} > 0 \rightarrow v_i < -1V$$

$$v_{AK2} = -1V - 1V < 0 \rightarrow -2V < 0$$

ipotesi verificate ; $v_u = -1V$

per $-1V < v_i < 1V$ ipotizzo D_1 e D_2 interdetti

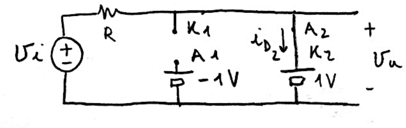


$$v_{AK1} = -1V - v_i < 0 \rightarrow v_i > -1V$$

$$v_{AK2} = v_i - 1V < 0 \rightarrow v_i < 1V$$

ipotesi verificate ; $v_u = v_i$

per $v_i > 1V$ ipotizzo D_1 interdetto, D_2 in conduzione

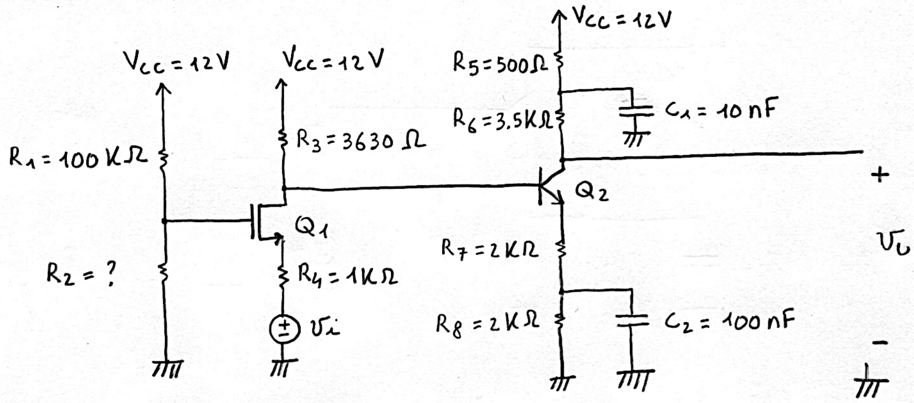


$$v_{AK1} = -1V - 1V < 0 \rightarrow -2V < 0$$

$$i_{D2} = \frac{v_i - 1V}{R} > 0 \rightarrow v_i > 1V$$

ipotesi verificate ; $v_u = 1V$

2)

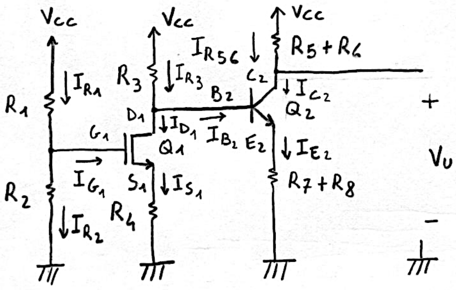


per Q_1: $V_{T1} = 1.01\ V$; per Q_2: $h_{FE2} = 100$

$$\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W_1}{L_1} = 1.99\ \frac{mA}{V^2}$$

a riposo $V_U = 8V$

In continua il circuito diventa:



$$I_{R56} = \frac{V_{cc} - V_U}{R_5 + R_6} = 1mA = I_{C_2}$$

ipotesi 1: Q_2 in zona attiva diretta

$$I_{B_2} = \frac{I_{C2}}{h_{FE_2}} = 10\mu A > 0$$

$$I_{E_2} = (h_{FE_2}+1)\, I_B = 1.01\ mA$$

$$V_{E_2} = I_{E_2}(R_7 + R_8) = 4.04V$$

$$V_{B_2} = V_{E2} + V_\gamma = 4.74V = V_{D1}$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 3.96\ V > V_{CEsat} = 0.1\ V \longrightarrow$$ ipotesi 1 verificata

$$I_{R_3} = \frac{V_{cc} - V_{B2}}{R_3} = 2mA$$

$$I_{D1} = I_{R_3} - I_{B_2} = 1.99\ mA = I_{S1}$$

dato che $I_{G1} = 0$

$$V_{S1} = R_4 I_{S1} = 1.99V$$

ipotesi 2: Q_1 in saturazione

$$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2 \quad \text{con } K_1 = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W_1}{L_1}$$

$$V_{GS1} = V_{T1} \cancel{\pm} \sqrt{\frac{I_{D1}}{K_1}} = 2.01V > V_{T1}$$

(un mos a canale n conduce se $V_{GS} > V_T$)

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 2.75\ V > V_{GS1} - V_{T1} = 1\ V \longrightarrow$$ ipotesi 2 verificata

$$V_{G1} = V_{S1} + V_{GS1} = 4V$$

$$I_{R1} = \frac{V_{cc} - V_{G1}}{R_1} = 80\mu A = I_{R2}$$

dato che $I_{G1} = 0$

$$R_2 = \frac{V_{G1}}{I_{R2}} = 50\ K\Omega$$

$$\left[g_{m1} = \left.\frac{\partial I_{D1}}{\partial V_{GS1}}\right|_Q = 2K_1(V_{GS1} - V_{T1}) = 3.98\ \frac{mA}{V} \right]$$ NON RICHIESTO

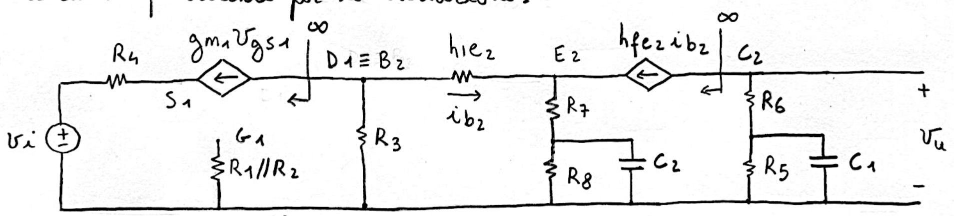
3) $R_2 = 60\,K\Omega$

$g_{m1} = 4\,\frac{mA}{V}$

$h_{ie2} = 4\,K\Omega$

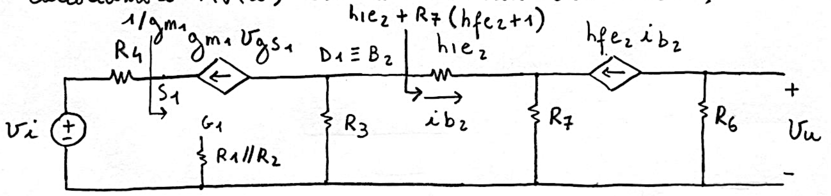
$h_{fe2} = 120$

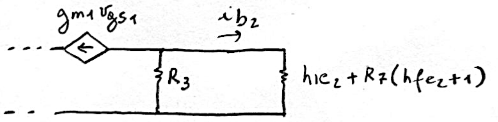
circuito equivalente per le variazioni:



2 condensatori, nessuna maglia impropria → 2 poli

Calcoliamoci $A_v(\infty)$ chiudendo i due condensatori:





$v_u = -R_6\, h_{fe2}\, i_{b2}$

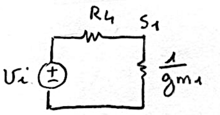
$i_{b2} = -g_{m1} v_{gs1} \dfrac{R_3}{R_3 + h_{ie2} + R_7(h_{fe2}+1)}$ (partizione della corrente $-g_{m1} v_{gs1}$ tra R_3 e $h_{ie2} + R_7(h_{fe2}+1)$)

[oppure: $-g_{m1} v_{gs1} = \underbrace{\dfrac{h_{ie2} i_{b2} + R_7(i_{b2} + h_{fe2} i_{b2})}{R_3}}_{\text{(corrente che scorre in } R_3)} + i_{b2} \rightarrow -g_{m1} v_{gs1} R_3 = (h_{ie2} + R_7(h_{fe2}+1) + R_3)\, i_{b2} \rightarrow$

$i_{b2} = -g_{m1} v_{gs1} \dfrac{R_3}{R_3 + h_{ie2} + R_7(h_{fe2}+1)}$]

$v_{gs1} = v_{g1} - v_{s1} \underset{\uparrow}{=} -v_{s1}$

essendo $v_{g1} = 0$



$v_{s1} = v_i \dfrac{\frac{1}{g_{m1}}}{R_4 + \frac{1}{g_{m1}}} = \dfrac{v_i}{1 + R_4 g_{m1}}$ (partizione della tensione v_i tra R_4 e $\frac{1}{g_{m1}}$)

[oppure: $v_i = v_{s1} - \underbrace{R_4 g_{m1} v_{gs1}}_{\text{caduta su } R_4} \underset{\uparrow}{=} v_{s1} + R_4 g_{m1} v_{s1} = v_{s1}(1 + R_4 g_{m1}) \rightarrow v_{s1} = \dfrac{v_i}{1 + R_4 g_{m1}}$]

essendo $v_{g1} = 0$

$A_v(\infty) = \dfrac{v_u}{v_i} = -R_6\, h_{fe2}\, g_{m1} \dfrac{R_3}{R_3 + h_{ie2} + R_7(h_{fe2}+1)} \dfrac{1}{1 + R_4 g_{m1}} = -4.88595$ (negativo, come è giusto che sia dato che si tratta di uno stadio a gate comune, non invertente, e di uno stadio a emettitore comune, invertente, in cascata).

$|A_v(\infty)|_{dB} = 13.779\ dB$

Calcoliamo adesso le singolarità (facendo riferimento al circuito per le variazioni che include C_1 e C_2)

$R_{vC1} = R_5 // (R_6 + \infty) = R_5 = 500\,\Omega$

$\omega_{P1} = \dfrac{1}{C_1 R_{vC1}} = 200'000\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P1} = \dfrac{\omega_{P1}}{2\pi} = 31830.99\ Hz$

$R_{vC2} = R_8 // \left(R_7 + \dfrac{h_{ie2} + R_3 // \infty}{h_{fe2}+1}\right) = R_8 // \left(R_7 + \dfrac{h_{ie2} + R_3}{h_{fe2}+1}\right) = 1015.5198\,\Omega$

$\omega_{P2} = \dfrac{1}{C_2 R_{vC2}} = 9847.174\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P2} = \dfrac{\omega_{P2}}{2\pi} = 1567.23\ Hz$

la v_u si annulla per la s per cui $R_7 + R_8 // \frac{1}{C_2 s} = \infty$ (cioè per la s per cui $R_8 // \frac{1}{C_2 s} = \infty$) perché in tale condizione deve essere $i_{b2} = -h_{fe2} i_{b2} \rightarrow i_{b2}(1 + h_{fe2}) = 0 \rightarrow i_{b2} = 0 \rightarrow h_{fe2} i_{b2} = 0 \rightarrow v_u = 0$

$R_8 // \dfrac{1}{C_2 s} = \dfrac{R_8 \frac{1}{C_2 s}}{R_8 + \frac{1}{C_2 s}} = \dfrac{R_8}{1 + R_8 C_2 s} = \infty \rightarrow 1 + R_8 C_2 s = 0 \rightarrow s = -\dfrac{1}{R_8 C_2} \rightarrow \omega_{Z2} = \dfrac{1}{R_8 C_2} = 5000\ \frac{rad}{s} \rightarrow$

$f_{Z2} = \dfrac{\omega_{Z2}}{2\pi} = 795.775\ Hz$

la Vu si annulla per la s per cui $R_6 + R_5 // \frac{1}{C_1 s} = 0$ e quindi abbiamo un cortocircuito in parallelo con l'uscita

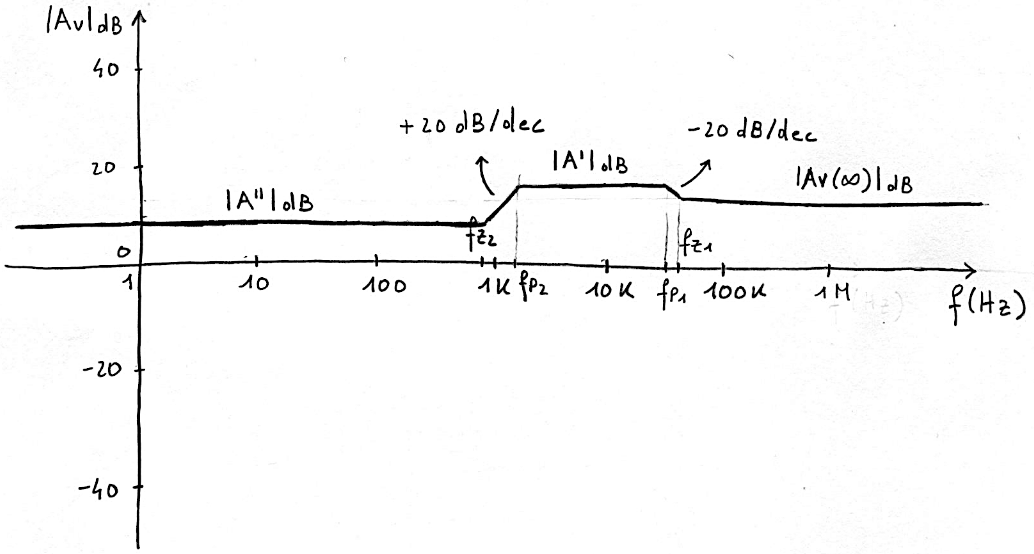
$$R_6 + R_5 // \frac{1}{C_1 s} = R_6 + \frac{R_5 \frac{1}{C_1 s}}{R_5 + \frac{1}{C_1 s}} = R_6 + \frac{R_5}{1 + R_5 C_1 s} = \frac{R_6 + R_5 R_6 C_1 s + R_5}{1 + R_5 C_1 s} = 0 \rightarrow R_5 + R_6 + R_5 R_6 C_1 s = 0 \rightarrow$$

$$s = -\frac{R_5 + R_6}{R_5 R_6 C_1} = -\frac{1}{\frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} C_1} = -\frac{1}{C_1 (R_5 // R_6)} \rightarrow \omega_{z1} = \frac{1}{C_1 (R_5 // R_6)} = 228571.43 \ \frac{rad}{s} \rightarrow$$

$$f_{z1} = \frac{\omega_{z1}}{2\pi} = 36378.27 \ Hz$$

La funzione di trasferimento è

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



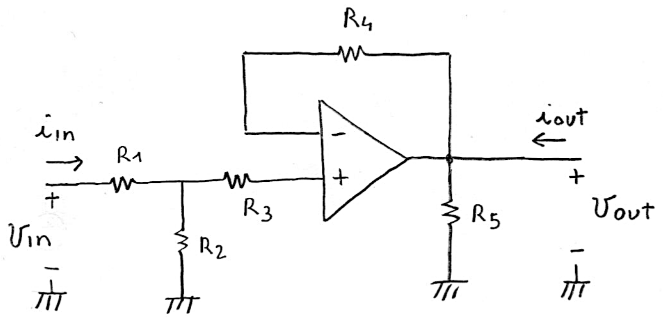
$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z1}}{f_{p1}} = 5.5839$$

$$|A'|_{dB} = 14.939 \ dB$$

$$|A''| = |A'| \frac{f_{z2}}{f_{p2}} = 2.8353$$

$$|A''|_{dB} = 9.052 \ dB$$

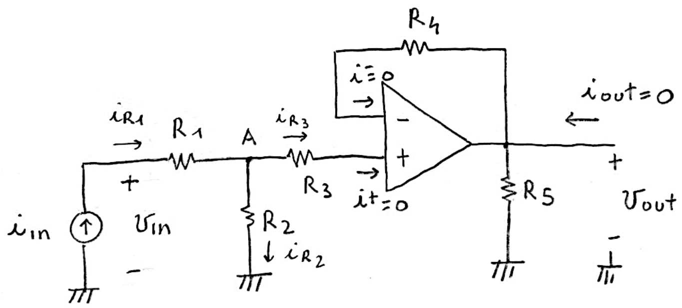
4)



$$\begin{cases} v_{out} = r_f\, i_{in} + r_o\, i_{out} \\ v_{in} = r_i\, i_{in} + r_r\, i_{out} \end{cases}$$

$r_f = \left.\dfrac{v_{out}}{i_{in}}\right|_{i_{out}=0}$; $r_i = \left.\dfrac{v_{in}}{i_{in}}\right|_{i_{out}=0}$

($i_{out}=0$ significa porta di uscita aperta)



per il c.c.v. $i^+=0 \rightarrow i_{R1} = i_{R2} = i_{in}$

$v_{in} = R_1 i_{R1} + R_2 i_{R2} = (R_1+R_2)\, i_{in} \rightarrow$

$r_i = \dfrac{v_{in}}{i_{in}} = R_1 + R_2$

(per il c.c.v)

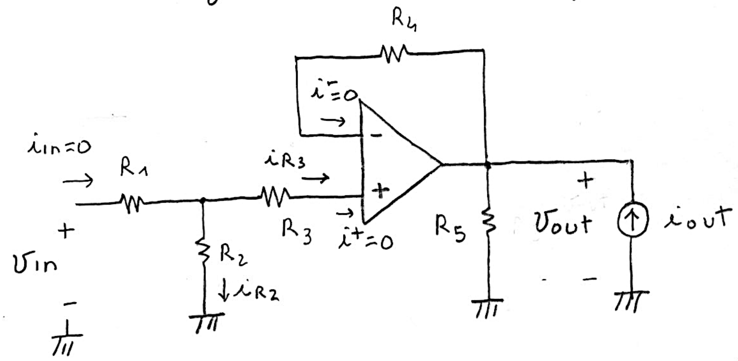
$v^+ = v_A = R_2 i_{R2} = R_2 i_{in} = v^-$

(perché, essendo $i^+=0$, la caduta su R_3 è nulla)

per il c.c.v. $i^-=0 \rightarrow$ la caduta su R_4 è nulla $\rightarrow v_{out} = v^- = R_2 i_{in} \rightarrow r_f = \dfrac{v_{out}}{i_{in}} = R_2$

$r_o = \left.\dfrac{v_{out}}{i_{out}}\right|_{i_{in}=0}$; $r_r = \left.\dfrac{v_{in}}{i_{out}}\right|_{i_{in}=0}$

($i_{in}=0$ significa porta di ingresso aperta)



$i_{in}=0 \rightarrow i_{R3} = -i_{R2}$

per il c.c.v. $i^+=0 \rightarrow i_{R3} = -i_{R2} = 0$

$v_{in} = R_1 i_{in} + R_2 i_{R2} = R_1 \cdot 0 + R_2 \cdot 0 = 0 \rightarrow$

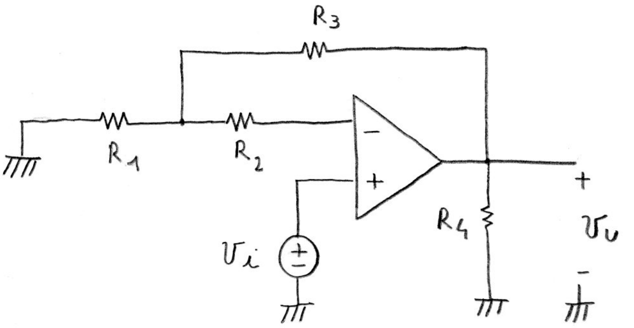
$r_r = \dfrac{v_{in}}{i_{out}} = 0$

$v^+ = +R_2 i_{R2} - R_3 i_{R3} = (R_2 - R_3)\cdot 0 = 0$

per il c.c.v. $v^- = v^+ = 0 \longrightarrow v_{out} = v^- + R_4 i^- = v^- = 0 \longrightarrow r_o = \dfrac{v_{out}}{i_{out}} = 0$

(essendo per il c.c.v $i^-=0$)

5)



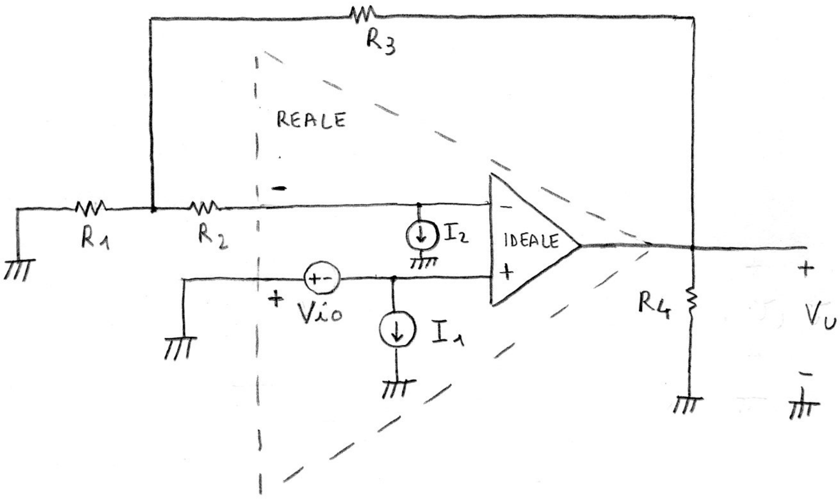
$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1 K\Omega$

$|V_{io}|_{max} = 4\ mV$

$I_B = \dfrac{I_1 + I_2}{2} = 80\ nA$

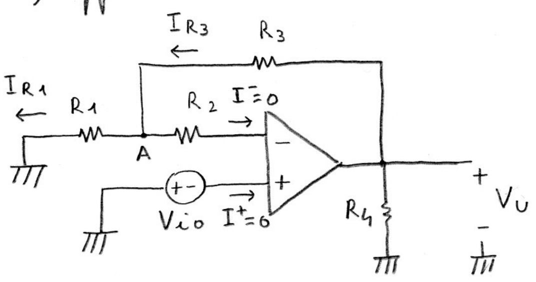
$|I_{io}|_{max} = |I_1 - I_2|_{max} = 20\ nA$

Per valutare l'effetto a regime sulla v_U dei soli generatori di offset, lavoriamo in continua, disattiviamo v_i e sostituiamo all'amplificatore operazionale reale lo schema equivalente in cui compaiono un amplificatore operazionale ideale e i generatori di offset:



dopodiché calcoliamo l'effetto sull'uscita dei generatori di offset usando la sovrapposizione degli effetti e sfruttando il metodo del cortocircuito virtuale per l'amplificatore operazionale ideale:

a) effetto di V_{io}



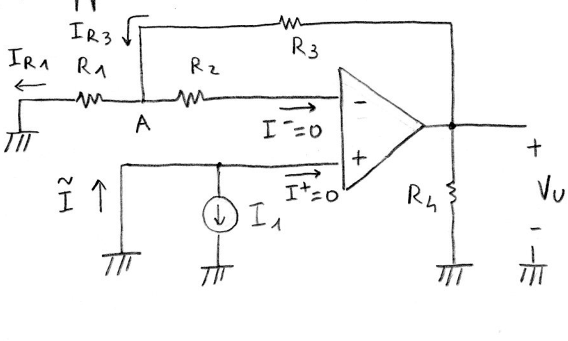
per il c.c.v. $V^- = V^+ = -V_{io}$;

$I^- = 0 \rightarrow V_A = V^- = -V_{io}$

$I_{R1} = \dfrac{V_A}{R_1} = -\dfrac{V_{io}}{R_1} = I_{R3}$ (dato che $I^- = 0$)

$V_U = V_A + R_3 I_3 = -V_{io} - V_{io}\dfrac{R_3}{R_1} = -V_{io}\left(1 + \dfrac{R_3}{R_1}\right)$

b) effetto di I_1



per il c.c.v. $I^+ = 0$, $I^- = 0$; $V^- = V^+ = 0$

$\tilde{I} = I_1$

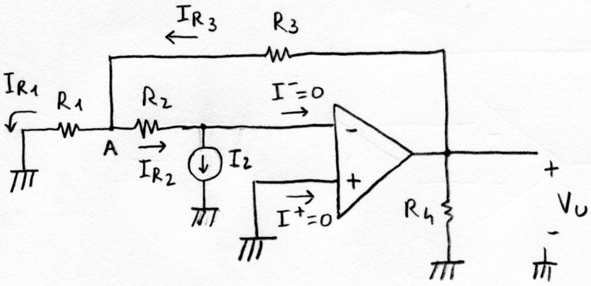
$I^- = 0 \rightarrow V_A = V^- = 0$

$I_{R1} = \dfrac{V_A}{R_1} = 0$

$I_{R3} = I_{R1} + I^- = 0$

$V_U = V_A + R_3 I_{R3} = 0$

c) effetto di I_2



per il c.c.v. $V^-=V^+=0$; $I^+=0$, $I^-=0$

$$I_{R2}=I_2+I^-=I_2$$

$$V_A=V^-+R_2I_{R2}=R_2I_2$$

$$I_{R1}=\frac{V_A}{R_1}=\frac{R_2}{R_1}I_2$$

$$I_{R3}=I_{R1}+I_{R2}=\frac{R_2}{R_1}I_2+I_2=I_2\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$V_U=V_A+R_3I_{R3}=R_2I_2+R_3I_2\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=$$

$$=I_2\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)$$

Complessivamente abbiamo che

$$V_U=-V_{io}\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right)+I_2\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)\underset{\downarrow}{=}-V_{io}\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right)+\left(I_B-\frac{I_{io}}{2}\right)\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)=$$

$$\left[\begin{cases}I_B=\frac{I_1+I_2}{2}\\ I_{io}=I_1-I_2\end{cases}\rightarrow\begin{cases}I_1+I_2=2I_B\\ I_1-I_2=I_{io}\end{cases}\rightarrow\begin{cases}2I_1=2I_B+I_{io}\\ 2I_2=2I_B-I_{io}\end{cases}\rightarrow\begin{cases}I_1=I_B+\frac{I_{io}}{2}\\ I_2=I_B-\frac{I_{io}}{2}\end{cases}\right]$$

$$=-V_{io}\underbrace{\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right)}_{2}+\underbrace{I_B\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)}_{0.24\,mV}-\frac{I_{io}}{2}\underbrace{\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)}_{3K\Omega}=$$

$$=-2V_{io}+0.24\,mV-1.5K\Omega\cdot I_{io}$$

Poiché l'unico addendo il cui valore è noto (cioè $I_B\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)$) è positivo, per ottenere la V_U di modulo massimo dobbiamo scegliere per gli altri due addendi (cioè $-V_{io}\left(1+\frac{R_3}{R_1}\right)$ e $-I_B\left(R_2+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\right)$) il valore di modulo massimo e positivo, quindi scegliere

$V_{io}=-4mV$ e $I_{io}=-20\,nA$, ottenendo così

$$|V_U|_{max}=|\,8mV+0.24mV+0.03\,mV|=8.27\,mV$$