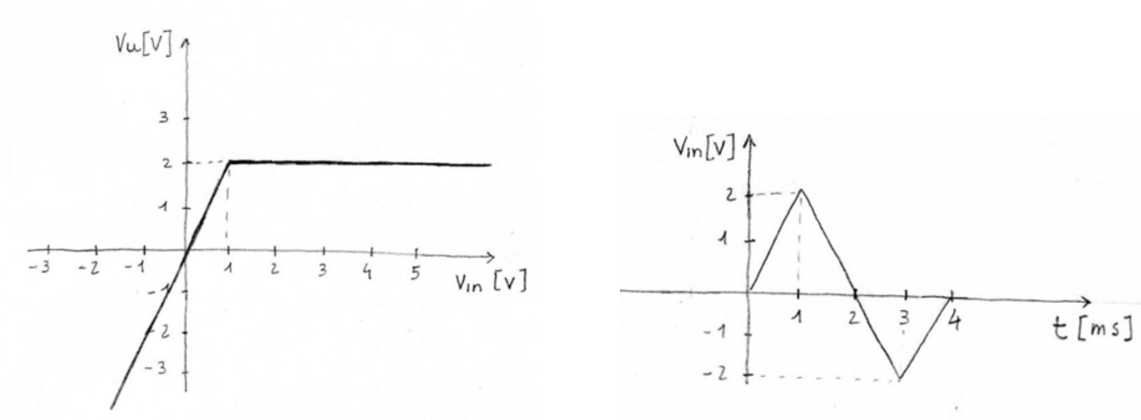
Scheda **A17_02**		Data: **2 febbraio 2017**
Cognome	Nome	Matricola

ESERCIZIO N°1

5 punti (4)

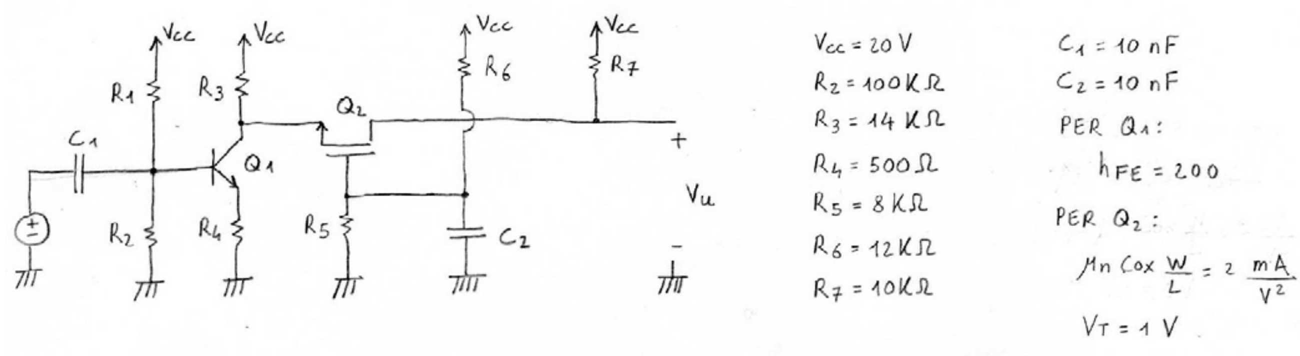
Si progetti e si dimensioni un circuito che possegga la caratteristica ingresso/uscita mostrata nella parte sinistra della figura, indipendentemente dalla sorgente e dal carico applicati.
Si determini inoltre l'andamento nel tempo della tensione di uscita $V_u(t)$ nel caso in cui la tensione di ingresso $V_{in}(t)$ sia il segnale mostrato nella parte destra della figura.



ESERCIZIO N°2

7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, ricavare il valore di R_1 sapendo che la tensione di uscita V_u a riposo è pari a 10 V. Determinare il punto di lavoro dei transistori Q_1 e Q_2.



ESERCIZIO N°3

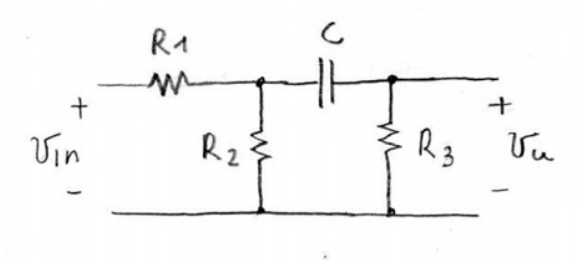
8 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma R_1=500 KΩ. Se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s)=V_u/V_s$ e se ne grafichi il diagramma di Bode del modulo. Si considerino per Q_1: *hie*=4800 Ω e *hfe*=190, e per Q_2: g_m=2 mA/V.

ESERCIZIO N°4

6 punti (4)

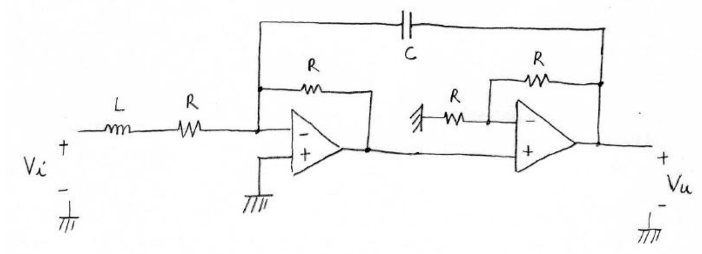
Si ricavino i parametri *f* del circuito mostrato in figura.



ESERCIZIO N°5

7 punti (4)

Ricavare il massimo sbilanciamento in uscita del circuito mostrato in figura. Si considerino gli amplificatori operazionali ideali.



$R = 5\,k\Omega$, $C = 10\,nF$, $L = 10\,nH$;

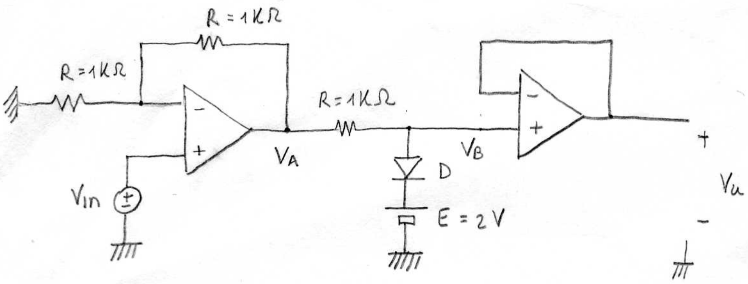
PER ENTRAMBI GLI AMPLIFICATORI OPERAZIONALI:

$|V_{io}|_{max} = 5\,mV$

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

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

1)



$$V_A = V_{in}\left(1 + \frac{R}{R}\right) = 2\,V_{in}$$

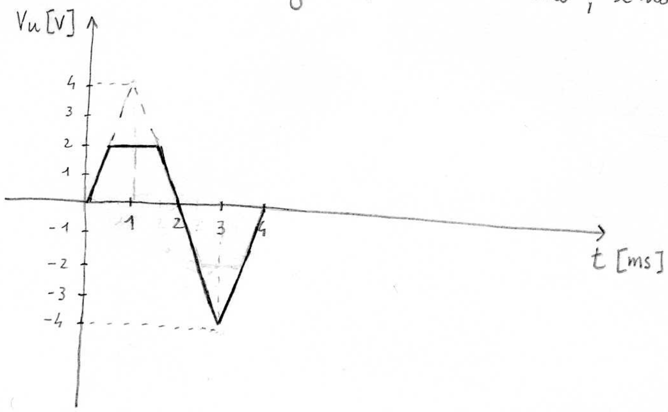
$$V_u = V_B$$

considerando ideale il diodo D,

se $V_A < E \rightarrow 2V_{in} < E \rightarrow V_{in} < \frac{E}{2} = 1V$ il diodo D è spento, quindi $V_u = V_B = V_A = 2V_{in}$

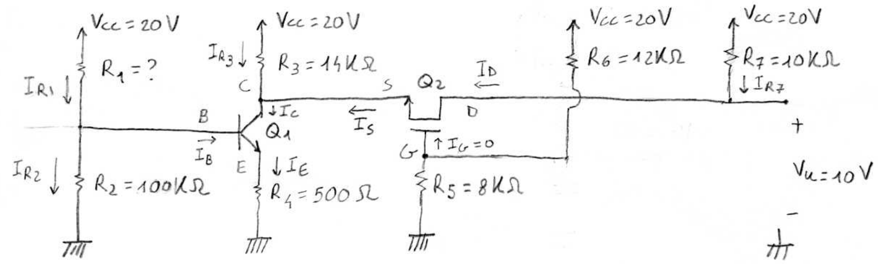
se $V_A \geq E \rightarrow 2V_{in} \geq E \rightarrow V_{in} \geq \frac{E}{2} = 1V$ il diodo D conduce, quindi $V_u = V_B = E = 2V$

In corrispondenza del segnale fornito nel testo, si ha la seguente uscita



2)

In continua:



$h_{FE} = 200$

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

$V_T = 1\,V$

$$I_{R7} = \frac{V_{cc} - V_u}{R_7} = 1\,mA = I_D = I_S$$

ipotesi 1: Q_2 in saturazione

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

con $K = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$

da cui segue che

$$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{2 I_D}{K}} = 2\,V$$

si considera il segno + perché in un nmos in conduzione $V_{GS} > V_T$

$I_G = 0$

$$V_G = V_{cc} \frac{R_5}{R_5 + R_6} = 8\,V$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 6\,V = V_c$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_u - V_S = 4\,V > V_{GS} - V_T = 1\,V \rightarrow \text{ipotesi 1 verificata}$$

$$I_{R3} = \frac{V_{cc} - V_c}{R_3} = 1\,mA$$

$$I_c = I_{R3} + I_S = 2\,mA$$

ipotesi 2: Q_1 in zona attiva diretta

$$I_E = \frac{I_c}{h_{FE}} (h_{FE} + 1) = 2.01\,mA$$

$$V_E = R_4 I_E = 1.005\,V$$

$$V_{CE} = V_c - V_E = 4.995\,V > V_{CE\,sat}$$

$$I_B = \frac{I_c}{h_{FE}} = 10\,\mu A > 0$$

ipotesi 2 verificata

$$V_B = V_E + V_\gamma = 1.705\,V$$

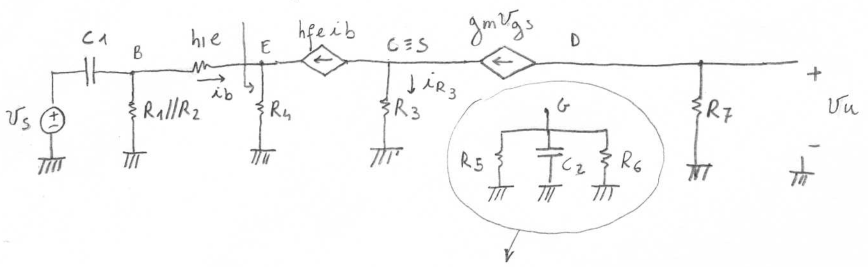
$$I_{R2} = \frac{V_B}{R_2} = 17.05\,\mu A$$

$$I_{R1} = I_{R2} + I_B = 27.05\,\mu A$$

$$R_1 = \frac{V_{cc} - V_B}{I_{R1}} = 676340.110906\,\Omega$$

3)

$R_V = R_4(h_{fe}+1)$



$h_{ie} = 4800\,\Omega$
$h_{fe} = 190$
$g_m = 2\,\frac{mA}{V}$
$R_1 = 500\,K\Omega$
$C_1 = 10\,nF$
$C_2 = 10\,nF$

$V_g = 0$ a prescindere da quanto valga l'impedenza di C_2, quindi C_2 non influisce sull'uscita

per $\omega \to \infty$ C_1 è un circuito chiuso e abbiamo

$v_u = -g_m v_{gs} R_7$

$v_{gs} = -v_s = -R_3 i_{R_3} = -R_3(g_m v_{gs} - h_{fe} i_b) = -R_3(-g_m v_s - h_{fe} i_b) = R_3 g_m v_s + R_3 h_{fe} i_b \Rightarrow$

dato che $v_g = 0$ dato che $v_{gs} = -v_s$

$-v_s = R_3 g_m v_s + R_3 h_{fe} i_b \Rightarrow (1 + R_3 g_m) v_s = -R_3 h_{fe} i_b \Rightarrow v_s = -\frac{R_3 h_{fe}}{1 + R_3 g_m} i_b = -v_{gs}$

$i_b = \frac{v_s}{h_{ie} + R_4(h_{fe}+1)}$

quindi

$v_u = -g_m R_7 \frac{R_3 h_{fe}}{1 + R_3 g_m} \frac{v_s}{h_{ie} + R_4(h_{fe}+1)} \Rightarrow$

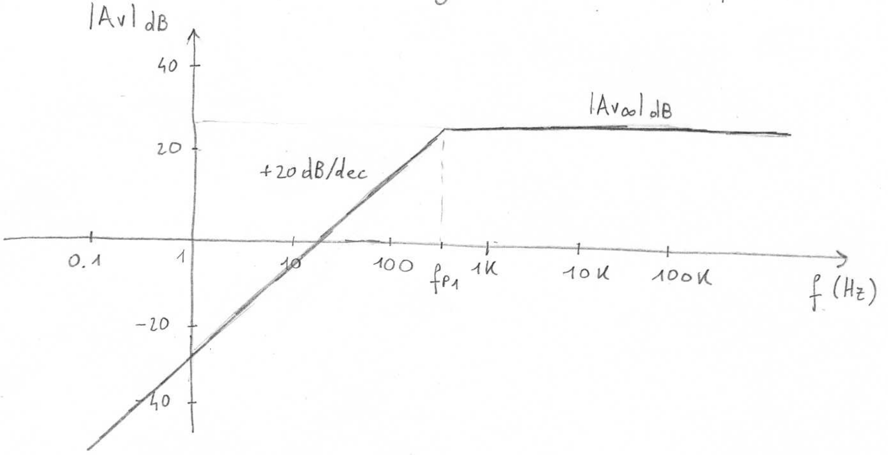
$A_{v\infty} = \frac{v_u}{v_s} = -g_m R_7 \frac{R_3 h_{fe}}{1 + R_3 g_m} \frac{1}{h_{ie} + R_4(h_{fe}+1)} = -18.29 \Rightarrow |A_{v\infty}|_{dB} = 25.244\,dB$

$R_{vC_1} = R_1 // R_2 // [h_{ie} + R_4(h_{fe}+1)] = 45'516.4277\,\Omega$

$\omega_{P_1} = \frac{1}{C_1 R_{vC_1}} = 2197\,rad/s \Rightarrow f_{P_1} = \frac{\omega_{P_1}}{2\pi} = 349.665\,Hz$

$A_v(s) = A_{v\infty} \frac{s}{s + \omega_{P_1}}$

C_1 è in serie sul percorso del segnale $\Rightarrow \omega_{z_1} = 0 \Rightarrow f_{z_1} = 0$

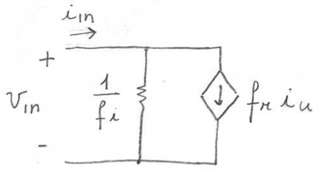


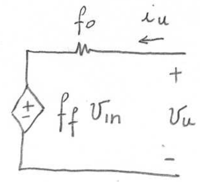
25

4) I parametri f sono definiti nel seguente modo:

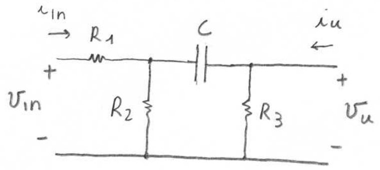
$$\begin{cases} v_u = f_f\, v_{in} + f_o\, i_u \\ i_{in} = f_i\, v_{in} + f_r\, i_u \end{cases}$$

con quindi: $f_f = \left.\dfrac{v_u}{v_{in}}\right|_{i_u=0}$, $f_o = \left.\dfrac{v_u}{i_u}\right|_{v_{in}=0}$, $f_i = \left.\dfrac{i_{in}}{v_{in}}\right|_{i_u=0}$, $f_r = \left.\dfrac{i_{in}}{i_u}\right|_{v_{in}=0}$

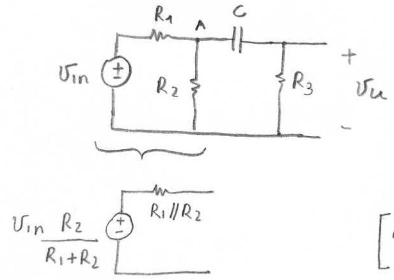




Dobbiamo trovare i parametri f della rete



$f_f = \left.\dfrac{v_u}{v_{in}}\right|_{i_u=0}$ (cioè con la porta di uscita aperta)

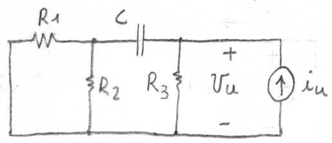


$$v_u = v_{in}\,\frac{R_2}{R_1+R_2}\,\frac{R_3}{R_1//R_2+\frac{1}{Cs}+R_3} \Rightarrow$$

$$f_f = \left.\frac{v_u}{v_{in}}\right|_{i_u=0} = \frac{R_2}{R_1+R_2}\,\frac{R_3}{R_1//R_2+\frac{1}{Cs}+R_3}$$

[oppure: $v_u = \underbrace{v_{in}\,\dfrac{R_2//\left(\frac{1}{Cs}+R_3\right)}{R_1+R_2//\left(\frac{1}{Cs}+R_3\right)}}_{v_A}\,\dfrac{R_3}{R_3+\frac{1}{Cs}} \Rightarrow f_f = \dfrac{R_2//\left(\frac{1}{Cs}+R_3\right)}{R_1+R_2//\left(\frac{1}{Cs}+R_3\right)}\,\dfrac{R_3}{R_3+\frac{1}{Cs}}$ ⊛]

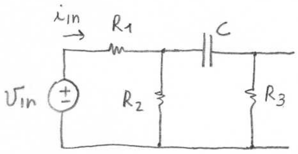
$f_o = \left.\dfrac{v_u}{i_u}\right|_{v_{in}=0}$ (cioè con la porta d'ingresso cortocircuitata)



$$v_u = i_u\left[R_3//\left(\frac{1}{Cs}+R_1//R_2\right)\right] \Rightarrow$$

$$f_o = \left.\frac{v_u}{i_u}\right|_{v_{in}=0} = R_3//\left(\frac{1}{Cs}+R_1//R_2\right)$$

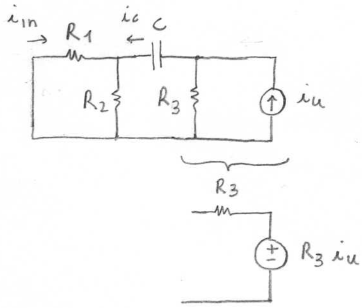
$f_i = \left.\dfrac{i_{in}}{v_{in}}\right|_{i_u=0}$ (cioè con la porta di uscita aperta)



$$i_{in} = \frac{v_{in}}{R_1+R_2//\left(\frac{1}{Cs}+R_3\right)} \Rightarrow$$

$$f_i = \left.\frac{i_{in}}{v_{in}}\right|_{i_u=0} = \frac{1}{R_1+R_2//\left(\frac{1}{Cs}+R_3\right)}$$

$f_r = \left.\dfrac{i_{in}}{i_u}\right|_{v_{in}=0}$ (cioè con la porta d'ingresso cortocircuitata)

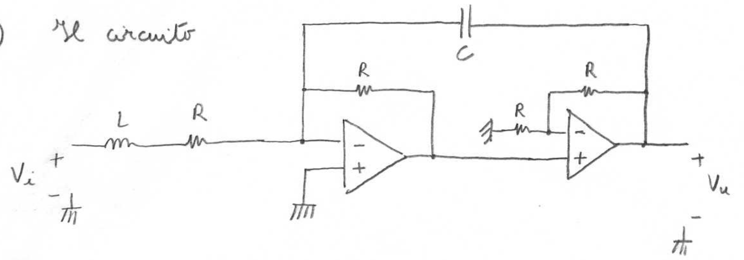


$$i_c = \frac{R_3\, i_u}{R_3+\frac{1}{Cs}+R_1//R_2}$$

$$i_{in} = -i_c\,\frac{R_2}{R_1+R_2} = -\frac{R_2}{R_1+R_2}\,\frac{R_3}{R_3+\frac{1}{Cs}+R_1//R_2}\,i_u \Rightarrow$$

$$f_r = \left.\frac{i_{in}}{i_u}\right|_{v_{in}=0} = -\frac{R_2}{R_1+R_2}\,\frac{R_3}{R_3+\frac{1}{Cs}+R_1//R_2}$$

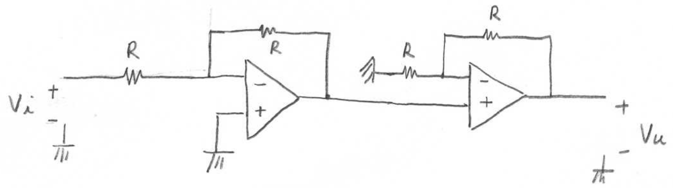
5) Il circuito



$R = 5\,K\Omega$
$C = 10\,nF$
$L = 10\,nH$

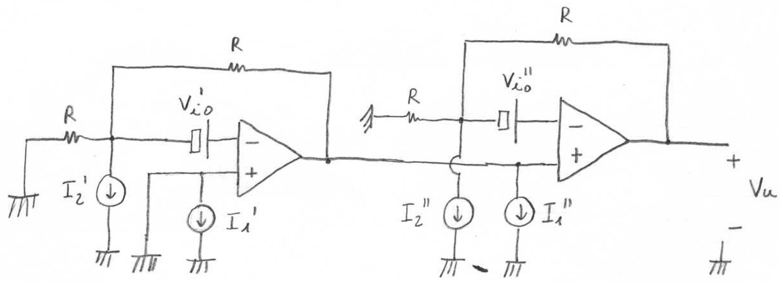
$|V_{io}|_{max} = 5\,mV$
$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 80\,nA$
$|I_{io}|_{max} = |I_1 - I_2|_{max} = 20\,nA$

in continua si riduce nella forma



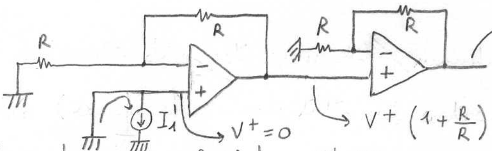
Se rappresentiamo i suoi generatori di offset e polarizzazione e disattiviamo V_i, abbiamo:

$\left(\text{con } I_1 = I_B + \frac{I_{io}}{2} \quad , \quad I_2 = I_B - \frac{I_{io}}{2}\right)$.



Troviamo il contributo in uscita di questi generatori, usando la sovrapposizione degli effetti.

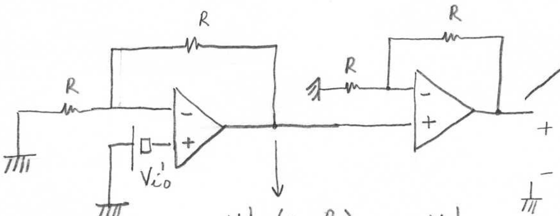
contributo di I_1':



$V^+ = 0$; $V^+\left(1+\frac{R}{R}\right) = 2V^+ = 0$; $2V^+\left(1+\frac{R}{R}\right) = 4V^+ = 0$

$V_u^{(1)} = 0$

contributo di V_{io}': facendo scorrere la V_{io}' sull'altro ingresso dell'operazionale



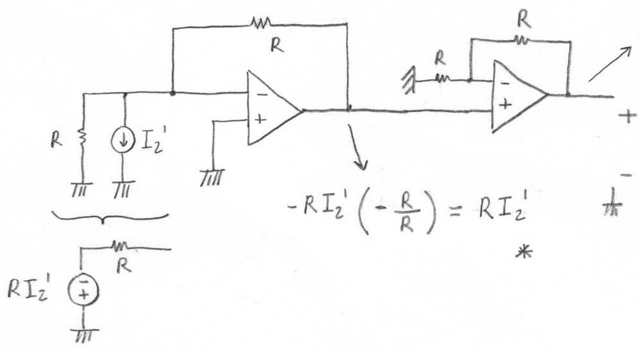
$-V_{io}'\left(1+\frac{R}{R}\right) = -2V_{io}'$

$-2V_{io}' \cdot \left(1+\frac{R}{R}\right) = -4V_{io}'$

$V_u^{(2)} = -4V_{io}'$

[*]

contributo di I_2':



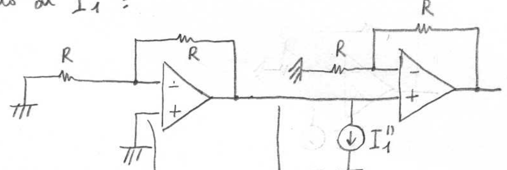
$-RI_2'\left(-\frac{R}{R}\right) = RI_2'$

*

$RI_2'\left(1+\frac{R}{R}\right) = 2R \cdot I_2'$

$V_u^{(3)} = 2RI_2'$

contributo di I_1'':



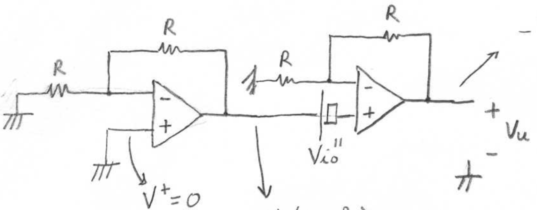
$V^+ = 0$

$V^+\left(1+\frac{R}{R}\right) = 2V^+ = 0$

$2V^+\left(1+\frac{R}{R}\right) = 4V^+ = 0$

$V_u^{(4)} = 0$

contributo di V_{io}'' :



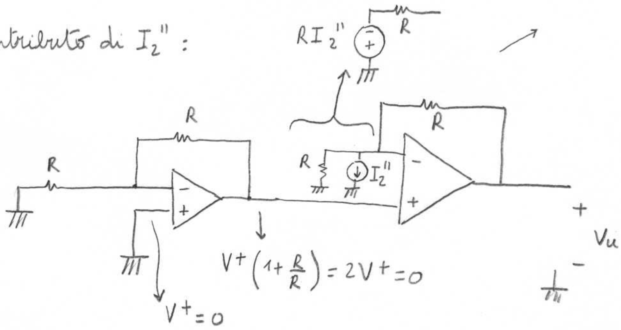
$$V^+\left(1+\frac{R}{R}\right)=2V^+=0$$

$$-V_{io}''\left(1+\frac{R}{R}\right) = -2V_{io}''$$

$$V_u^{(5)} = -2V_{io}''$$

<*>

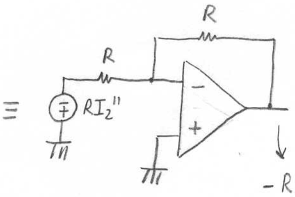
contributo di I_2'' :



$$V^+\left(1+\frac{R}{R}\right)=2V^+=0$$

$V^+=0$

$\equiv$



$$-RI_2''\left(-\frac{R}{R}\right)=RI_2''$$

(*)

$$V_u^{(6)} = RI_2''$$

Complessivamente

$$V_u = V_u^{(1)} + V_u^{(2)} + V_u^{(3)} + V_u^{(4)} + V_u^{(5)} + V_u^{(6)} = -4V_{io}' + 2RI_2' - 2V_{io}'' + RI_2'' =$$

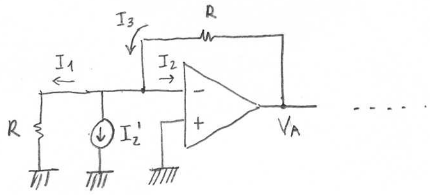
essendo $I_2' = I_B' - \frac{I_{io}'}{2}$, $I_2'' = I_B'' - \frac{I_{io}''}{2}$

$$= -4V_{io}' + 2RI_B' - RI_{io}' - 2V_{io}'' + RI_B'' - R\frac{I_{io}''}{2}$$

Di queste grandezze sappiamo che $|V_{io}'|_{max}=5\,mV$, $|V_{io}''|_{max}=5\,mV$, $I_B'=80\,nA$, $|I_{io}'|_{max}=20\,nA$, $I_B''=80\,nA$, $|I_{io}''|_{max}=20\,nA$, per cui le uniche quantità di segno definito nella V_u sono $2RI_B'+RI_B''=1.2\,mV$; essendo questa quantità positiva, per ottenere il massimo sbilanciamento in uscita dobbiamo scegliere per le altre quantità V_{io}', I_{io}', V_{io}'', I_{io}'' il modulo massimo e un segno tale che anche tutti gli altri addendi siano positivi, quindi consideriamo $V_{io}'=-5\,mV$, $I_{io}'=-20\,nA$, $V_{io}''=-5\,mV$, $I_{io}''=-20\,nA$, col che si ha che

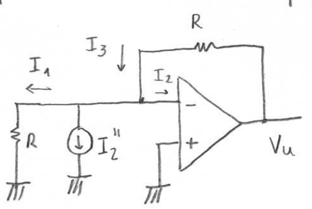
$$V_u = 4\cdot 5\,mV + 1.2\,mV + 5\,K\Omega\cdot 20\,nA + 2\cdot 5\,mV + 5\,K\Omega\cdot 10\,nA = 31.35\,mV$$

* oppure: abbiamo



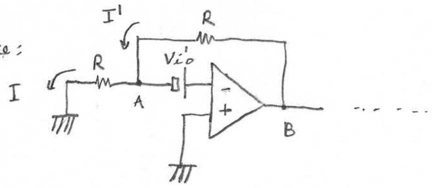
$V^+=0 \Rightarrow V^-=0 \Rightarrow$ la differenza di potenziale ai capi della R sinistra è nulla $\Rightarrow I_1=0$;
d'altra parte per il cortocircuito virtuale $I_2=0$;
quindi $I_3 = I_2' + \underset{0}{I_1} + \underset{0}{I_2} = I_2' \Rightarrow V_A = +RI_3 = +RI_2'$

(*) oppure: l'uscita del 1° amplificatore operazionale è nulla, quindi abbiamo



$V^+=0 \Rightarrow V^-=0 \Rightarrow$ la d.d.p. ai capi della R sinistra è nulla $\Rightarrow I_1=0$;
d'altra parte per il c.c.v. la $I_2=0$;
quindi $I_3 = I_2'' + I_1 + I_2 = I_2'' \Rightarrow V_u = +RI_3 = +RI_2''$

[*] oppure:



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

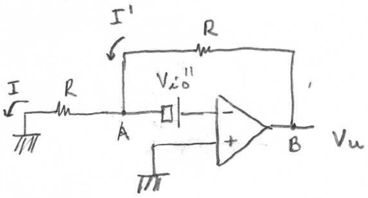
quindi $V_A = -V'_{io}$

$$I = \frac{V_A}{R} = -\frac{V'_{io}}{R} = I'$$

quindi $V_B = V_A + RI' = -V'_{io} - R \cdot \frac{V'_{io}}{R} = -2V'_{io}$

dopodiché $V_u = \left(1+\frac{R}{R}\right) V_B = 2V_B = -4V'_{io}$

<*> oppure: l'uscita del 1° A.O. è nulla, quindi abbiamo



per il CCV $V^- = V^+ = 0$

quindi $V_A = -V''_{io}$

$$I = \frac{V_A}{R} = -\frac{V''_{io}}{R} = I'$$

quindi $V_u = V_A + RI' = -V''_{io} - R \cdot \frac{V''_{io}}{R} = -2V''_{io}$

(*) che coincide con l'espressione precedente dato che

$$\frac{R_2 /\!/ \left(\frac{1}{CS}+R_3\right)}{R_1 + R_2 /\!/ \left(\frac{1}{CS}+R_3\right)} \cdot \frac{R_3}{R_3+\frac{1}{CS}} = \frac{R_2 \cancel{\left(\frac{1}{CS}+R_3\right)}}{R_1\left(R_2+\frac{1}{CS}+R_3\right) + R_2 \cdot \left(\frac{1}{CS}+R_3\right)} \cdot \frac{R_3}{\cancel{R_3+\frac{1}{CS}}} =$$

$$= \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot \frac{R_3}{\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} + \frac{1}{CS} + R_3} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \cdot \frac{R_3}{R_1 /\!/ R_2 + \frac{1}{CS} + R_3}$$