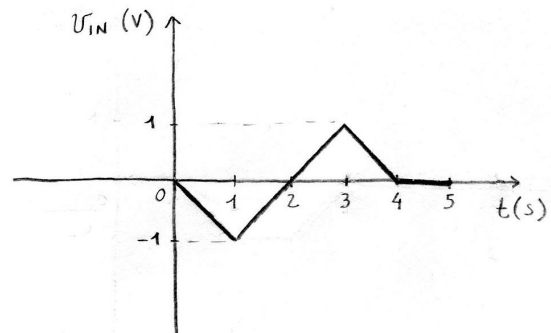
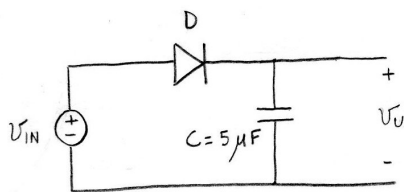


ESERCIZIO N°1

6.5 punti (4)

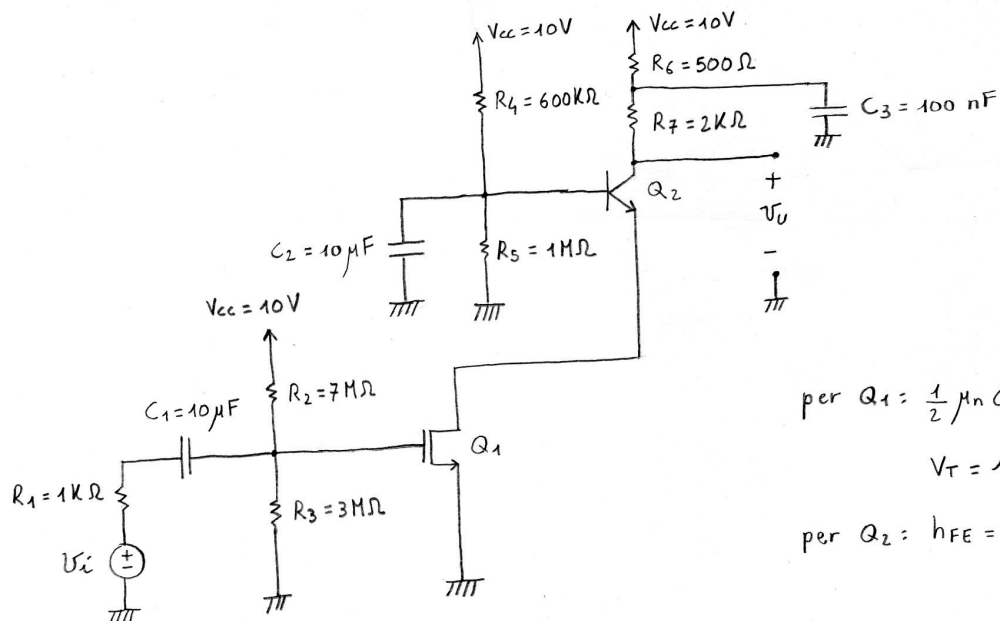
Si consideri il circuito rappresentato a sinistra nella seguente figura. Ipotizzando il condensatore inizialmente scarico, si ricavi e si disegni l'andamento nel tempo, per $0 \leq t \leq 5$ s, della tensione $v_U(t)$ in uscita da tale circuito quando in ingresso al circuito si applica la tensione $v_{IN}(t)$ il cui andamento nel tempo è rappresentato a destra nella figura. In particolare, si specifichi in quali intervalli di tempo il diodo conduce e in quali è interdetto. Si consideri il diodo ideale.

**ESERCIZIO N°2**

7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, determinare il punto di lavoro dei transistori Q_1 e Q_2 ed il valore della tensione di uscita V_U a riposo.

[Si consiglia di iniziare l'analisi del circuito a riposo dal gate di Q_1 . Successivamente, una volta trovato il valore della corrente I_{B2} , per trovare il valore della tensione V_{B2} può essere utile fare un equivalente di Thevenin di ciò che sta a sinistra della base di Q_2 .]



$$\text{per } Q_1: \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$V_T = 1 \text{ V}$$

$$\text{per } Q_2: h_{FE} = 249$$

ESERCIZIO N°3

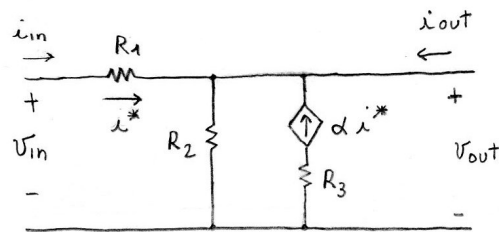
7.5 punti (4)

Considerando il circuito mostrato nell'esercizio precedente, se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s)=V_u/V_i$ (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa). Il diagramma di Bode non è richiesto. Si considerino per Q_1 : $g_{m1}=1 \text{ mA/V}$ e per Q_2 : $h_{ie2}=8 \text{ K}\Omega$, $h_{fe2}=300$. [Si controlli se qualcuno dei tre condensatori introduce poli e zeri coincidenti.]

ESERCIZIO N°4

6 punti (4)

Si ricavino i parametri r per il quadripolo mostrato nella seguente figura, dove α è un coefficiente moltiplicativo adimensionale.

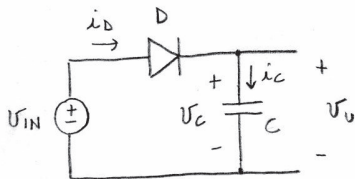
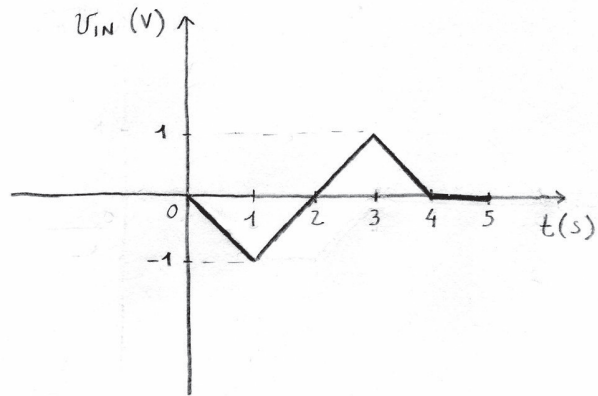
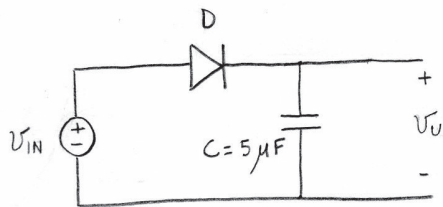


ESERCIZIO N°5

6 punti (4)

Si realizzi un filtro passa-basso di ordine 1, con guadagno a frequenza nulla pari a -5 e pulsazione di taglio $\omega_H=10 \text{ Krad/s}$. Si progetti il circuito in maniera tale che la sua funzione di trasferimento sia indipendente dall'impedenza della sorgente e da quella del carico.

1)

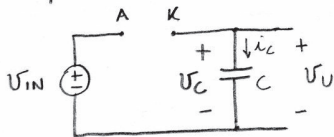


(rivelatore di picco positivo)

assumiamo C inizialmente scarico: $V_C(0) = 0$

partendo da $t = 0$, inizialmente la V_{IN} decresce e diventa < 0 ; visto che invece la tensione sul catodo del diodo (rispetto al nodo inferiore) è nulla, presumibilmente D è interdetto

ipotesi: D interdetto



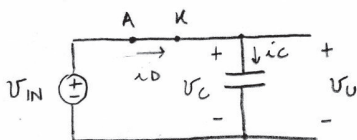
la maglia è aperta $\rightarrow$

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} = C \frac{dV_U}{dt} = 0 \rightarrow V_U \text{ costante e pari al valore che aveva all'inizio di questa fase, cioè } 0$$

verifica dell'ipotesi: $V_{AK} = V_A - V_K = V_{IN} - V_U = V_{IN} - 0 = V_{IN} < 0$, vero fino a $t = 2\text{ s}$;

da $t = 2\text{ s}$ quest'ipotesi viene meno, per cui presumibilmente D conduce

ipotesi: D in conduzione

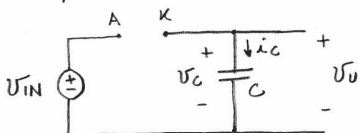


$$V_U = V_{IN}$$

verifica dell'ipotesi: $i_D = i_C = C \frac{dV_C}{dt} = C \frac{dV_U}{dt} > 0$, vero finché V_U cresce, cioè fino a $t = 3\text{ s}$;

da $t = 3\text{ s}$ quest'ipotesi viene meno, per cui presumibilmente D è interdetto

ipotesi: D interdetto



la maglia è aperta $\rightarrow$

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} = C \frac{dV_U}{dt} = 0 \rightarrow V_U \text{ costante e pari al valore che aveva all'inizio di questa fase (cioè alla fine della fase precedente), cioè } 1\text{ V}$$

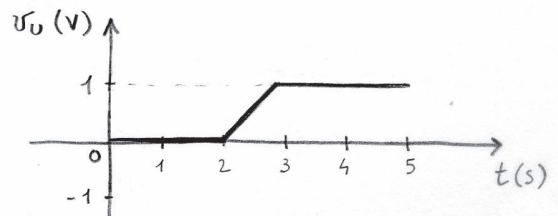
verifica dell'ipotesi: $V_{AK} = V_A - V_K = V_{IN} - V_U = V_{IN} - 1\text{ V} < 0 \rightarrow V_{IN} < 1\text{ V}$, vero fino a $t = 5\text{ s}$

Riassumendo:

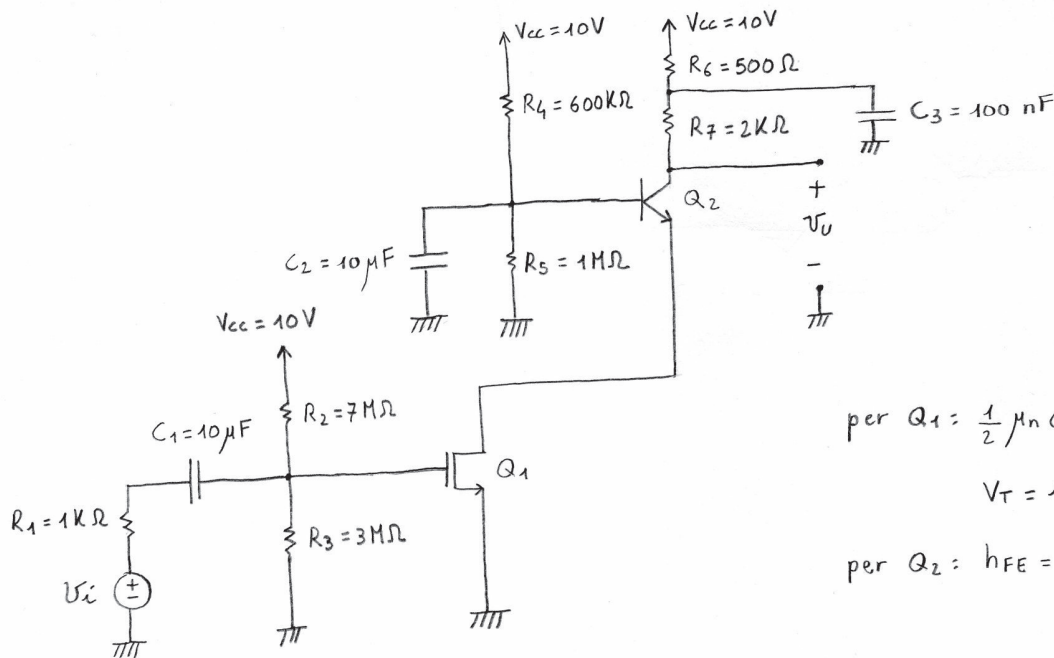
per $0 < t < 2\text{ s}$: D interdetto e $V_U = 0$

per $2\text{ s} < t < 3\text{ s}$: D conduce e $V_U = V_{IN}$

per $3\text{ s} < t < 5\text{ s}$: D interdetto e $V_U = 1\text{ V}$



2)

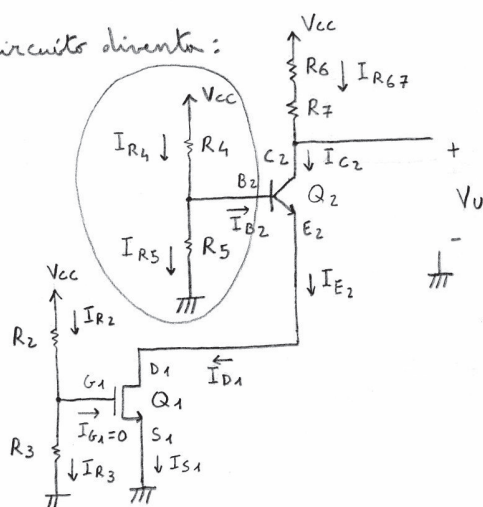


$$\text{per } Q_1: \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$V_T = 1\text{V}$$

$$\text{per } Q_2: h_{FE} = 249$$

In continua il circuito diventa:



$$I_{G1} = 0 \rightarrow I_{R2} = I_{R3} = \frac{V_{CC}}{R_2 + R_3} = 1\mu\text{A}$$

$$V_{G1} = V_{CC} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 3\text{V}$$

$$V_{S1} = 0 \rightarrow V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = V_{G1} = 3\text{V} > V_T$$

ipotesi 1: Q_1 in saturazione

$$I_{D1} = K (V_{GS1} - V_T)^2 = 1\text{mA} = I_{S1} = I_{E2}$$

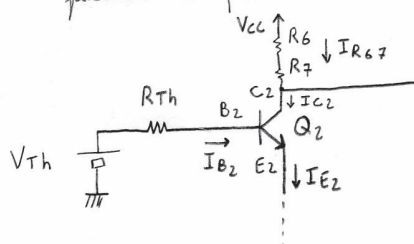
$$\downarrow$$

$$\text{con } K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.25 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

ipotesi 2: Q_2 in zona attiva diretta

$$I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = I_{B2} + h_{FE} I_{B2} = (1 + h_{FE}) I_{B2} \rightarrow I_{B2} = \frac{I_{E2}}{1 + h_{FE}} = 4\mu\text{A} > 0 \rightarrow *$$

facendo un equivalente di Thevenin tra B_2 e massa della parte cerchiata, abbiamo:



$$\text{con } V_{Th} = V_{CC} \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 6.25\text{V}$$

$$R_{Th} = R_4 \parallel R_5 = 375\text{k}\Omega$$

$$\text{per cui } V_{B2} = V_{Th} - R_{Th} I_{B2} = 4.75\text{V} \quad \textcircled{*}$$

$$V_{E2} = V_{B2} - V_{gs} = 4.05\text{V} = V_{D1}$$

$$\text{quindi } V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = V_{D1} = 4.05\text{V} > V_{GS1} - V_T = 2\text{V} \rightarrow$$

ipotesi 1 verificata

$$I_{C2} = h_{FE} I_{B2} = 0.996 \text{ mA} = I_{R67}$$

$$V_{C2} = V_{CC} - (R_6 + R_7) I_{R67} = 7.51 \text{ V} = V_U$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 3.46 \text{ V} > V_{CEsat} \approx 0.1 \text{ V}$$

*
L
ipotesi 2 verificata

$$\left[g_{m2} = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \right]_Q = 2K(V_{GS2} - V_T) = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

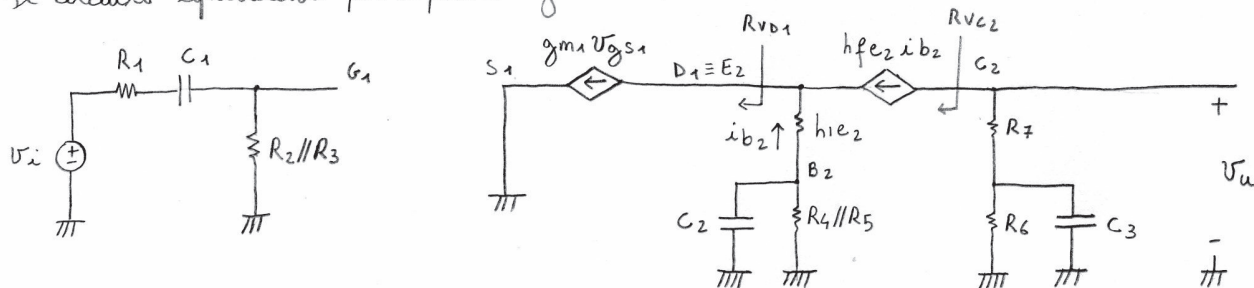
NON RICHIESTO

$$3) \quad g_{m1} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$h_{ie2} = 8 \text{ K}\Omega$$

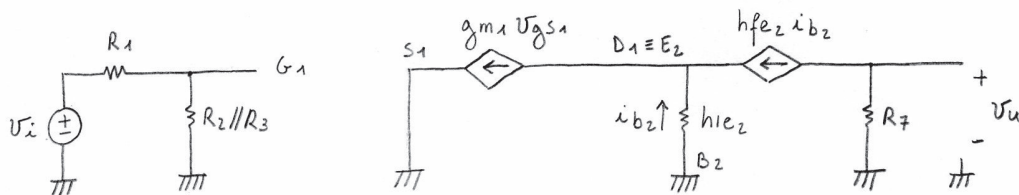
$$h_{fe2} = 300$$

Il circuito equivalente per i piccoli segnali è:



3 condensatori, nessuna maglia impropria $\rightarrow$ 3 poli

Calcoliamoci $A_v(\infty)$ chiudendo i 3 condensatori



$$V_u = -R_7 h_{fe2} i_{b2}$$

$$i_{b2} + h_{fe2} i_{b2} = g_{m1} V_{gs1} \rightarrow i_{b2} = \frac{g_{m1}}{h_{fe2} + 1} V_{gs1}$$

$$V_{S1} = 0 \rightarrow V_{gs1} = V_{g1}$$

$$V_{g1} = V_i \frac{R_2 || R_3}{R_1 + (R_2 || R_3)}$$

$$A_v(\infty) = \frac{V_u}{V_i} = -R_7 \frac{h_{fe2}}{h_{fe2} + 1} g_{m1} \frac{R_2 || R_3}{R_1 + (R_2 || R_3)} = -1.9924067$$

(negativo, come doveva essere visto che si tratta dello cascato di uno stadio a source comune, invertente, e di uno stadio a base comune, non invertente)

$$|A_v(\infty)|_{\text{dB}} = 5.9876 \text{ dB}$$

$$A_v(\infty) \neq 0 \rightarrow \text{numero zeri} = \text{numero poli}$$

Calcoliamo adesso le singolarità (facendo riferimento al circuito per piccoli segnali che include C_1, C_2 e C_3)

$$R_{VC1} = R_1 + (R_2 || R_3) = 2.101 \text{ M}\Omega$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 0.0475964 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 0.0075752 \text{ Hz}$$

$$C_1 \text{ è in serie sul percorso del segnale} \rightarrow V_u \text{ si annulla quando } \frac{1}{C_1 s} = \infty \rightarrow s = 0 \rightarrow \omega_{Z1} = 0 \rightarrow f_{Z1} = 0$$

C_2 non influisce sulla V_u in quanto la V_u dipende dalla i_{b2} e la i_{b2} è direttamente legata alla V_{gs1} tramite la relazione $g_{m1} V_{gs1} = (1 + h_{fe2}) i_{b2}$, per cui i_{b2} non dipende dal valore dell'impedenza relativa a C_2 ; poiché C_2 non influisce su V_u , esso introduce un polo e uno zero coincidenti

[Se uno non se ne accorge subito, calcolame il polo col metodo della resistenza vista:

$$R_{Vc2} = R_4 // R_5 // (h_{ie2} + R_{Vb1}(1 + h_{fe2})) = R_4 // R_5 // (h_{ie2} + \infty(1 + h_{fe2})) = R_4 // R_5 \rightarrow \omega_{P2} = \frac{1}{C_2(R_4 // R_5)}$$

e, in modo non corretto (perché in realtà V_u non dipende da C_2) calcolame lo zero imponendo

$$\frac{1}{C_2 s} // (R_4 // R_5) = \infty \rightarrow \frac{\frac{1}{C_2 s} (R_4 // R_5)}{\frac{1}{C_2 s} + R_4 // R_5} = \frac{R_4 // R_5}{1 + (R_4 // R_5) C_2 s} = \infty \rightarrow 1 + (R_4 // R_5) C_2 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{C_2(R_4 // R_5)} \rightarrow$$

$$\omega_{Z2} = \frac{1}{C_2(R_4 // R_5)} \quad \text{allo fine giungibile comunque a rendersi conto che } \omega_{Z2} = \omega_{P2}]$$

$$R_{Vc3} = R_6 // (R_7 + R_{Vc2}) = R_6 // (R_7 + \infty) = R_6 = 500 \Omega$$

$$\omega_{P3} = \frac{1}{C_3 R_{Vc3}} = 20'000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P3} = \frac{\omega_{P3}}{2\pi} = 3183.09886 \text{ Hz}$$

la V_u si annulla per la s per cui $R_7 + R_6 // \frac{1}{C_3 s} = 0$ (perché in tale condizione C_2 è cortocircuitato a massa), ma

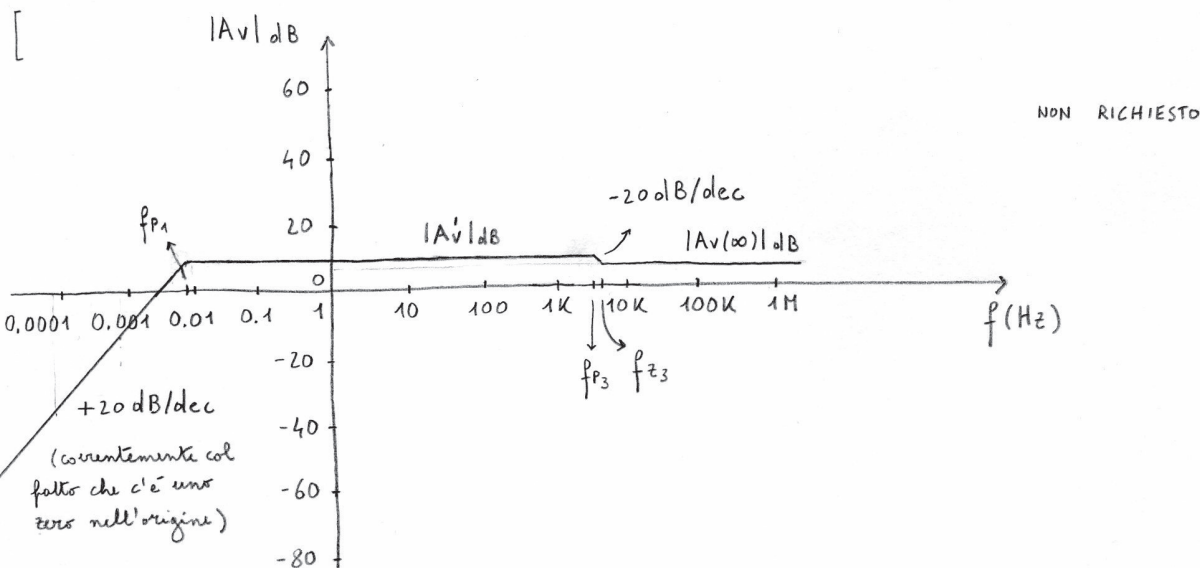
$$R_7 + R_6 // \frac{1}{C_3 s} = 0 \rightarrow R_7 + \frac{R_6 \frac{1}{C_3 s}}{R_6 + \frac{1}{C_3 s}} = R_7 + \frac{R_6}{1 + R_6 C_3 s} = \frac{R_7 + R_6 R_7 C_3 s + R_6}{1 + R_6 C_3 s} = 0 \rightarrow$$

$$s = -\frac{R_6 + R_7}{R_6 R_7 C_3} = -\frac{1}{\frac{R_6 R_7}{R_6 + R_7} C_3} = -\frac{1}{(R_6 // R_7) C_3} \rightarrow \omega_{Z3} = \frac{1}{(R_6 // R_7) C_3} = 25'000 \text{ rad/s} \rightarrow$$

$$f_{Z3} = \frac{\omega_{Z3}}{2\pi} = 3978.8736 \text{ Hz}$$

La funzione di trasferimento è

$$A_v(s) = A_v(\infty) \frac{s(s + \omega_{Z3})}{(s + \omega_{P1})(s + \omega_{P3})}$$



$$|A_v| = |A_v(\infty)| \frac{f_{Z3}}{f_{P3}} = 2.4905$$

$$|A_v|_{dB} = 7.926 \text{ dB}$$

]

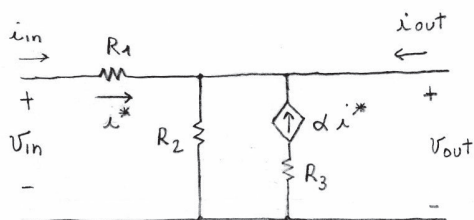
⊛ oppure (senza fare l'equivalente di Thevenin):

$$I_{R4} = \frac{V_{CC} - V_{B2}}{R_4} ; I_{R5} = \frac{V_{B2}}{R_5}$$

$$I_{R4} = I_{B2} + I_{R5} \rightarrow \frac{V_{CC} - V_{B2}}{R_4} = I_{B2} + \frac{V_{B2}}{R_5} \rightarrow \frac{V_{B2}}{R_4} + \frac{V_{B2}}{R_5} = \frac{V_{CC}}{R_4} - I_{B2} \rightarrow V_{B2} \cdot \frac{R_4 + R_5}{R_4 R_5} = \frac{V_{CC}}{R_4} - I_{B2} \rightarrow$$

$$V_{B2} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \left(\frac{V_{CC}}{R_4} - I_{B2} \right) = 4.75 \text{ V}$$

4)

 α adimensionale

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

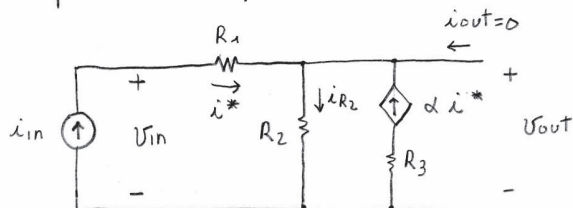
$$r_f = \left. \frac{V_{out}}{i_{in}} \right|_{i_{out}=0}$$

$$r_o = \left. \frac{V_{out}}{i_{out}} \right|_{i_{in}=0}$$

$$r_i = \left. \frac{V_{in}}{i_{in}} \right|_{i_{out}=0}$$

$$r_r = \left. \frac{V_{in}}{i_{out}} \right|_{i_{in}=0}$$

per calcolare r_f e r_i imponiamo $i_{out}=0$ (cioè apriamo la porta di uscita)



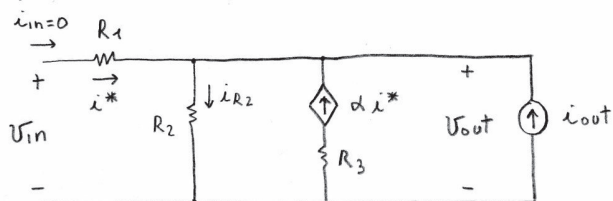
$$i_{in} = i^*$$

$$\text{dato che } i_{out}=0, \quad i_{R2} = i^* + \alpha i^* = (1+\alpha) i^*$$

$$V_{out} = R_2 i_{R2} = R_2 (1+\alpha) i^* \rightarrow r_f = \frac{V_{out}}{i_{in}} = R_2 (1+\alpha)$$

$$V_{in} = R_1 i^* + R_2 i_{R2} = R_1 i^* + R_2 (1+\alpha) i^* \rightarrow r_i = \frac{V_{in}}{i_{in}} = R_1 + R_2 (1+\alpha)$$

per calcolare r_o e r_r imponiamo $i_{in}=0$ (cioè apriamo la porta di ingresso)



$$i^* = i_{in} = 0 \rightarrow \alpha i^* = 0$$

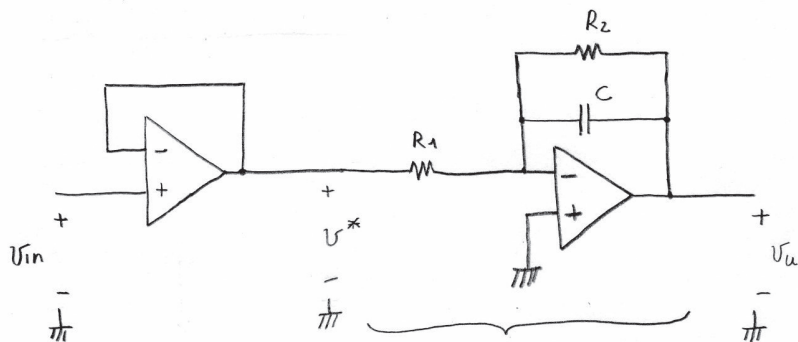
$$\text{dato che } i^* = 0 \text{ e } \alpha i^* = 0, \quad i_{R2} = i_{out}$$

$$V_{out} = R_2 i_{R2} = R_2 i_{out} \rightarrow r_o = \frac{V_{out}}{i_{out}} = R_2$$

$$V_{in} = R_1 i^* + R_2 i_{R2} = R_2 i_{R2} = R_2 i_{out} \rightarrow r_r = \frac{V_{in}}{i_{out}} = R_2$$

$$(\text{infatti avendo } i^* = i_{in} = 0 \text{ e quindi } R_1 i^* = 0, \quad V_{in} = V_{out} \rightarrow r_r = \frac{V_{in}}{i_{out}} = \frac{V_{out}}{i_{out}} = r_o)$$

5) si tratta di un filtro passa-basso invertente del 1° ordine, realizzabile in questo modo:



buffer, che serve per rendere la $R_{in} \approx \infty$ e quindi la funzione di trasferimento del filtro circa indipendente dall'impedenza della sorgente

filtro passa-basso invertente

del 1° ordine (notare che esso presenta già una $R_{out} \approx 0$, per cui non c'è necessità di mettere in uscita un buffer per rendere la funzione di trasferimento del filtro circa indipendente dall'impedenza del carico)

$$R_2 // \frac{1}{CS} = \frac{R_2 \frac{1}{CS}}{R_2 + \frac{1}{CS}} = \frac{R_2}{1 + R_2 CS}$$

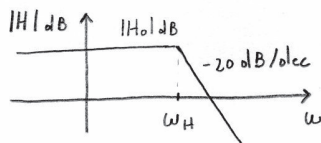
$$V_u = - \frac{R_2 // \frac{1}{CS}}{R_1} V^* = \frac{-R_2/R_1}{1 + R_2 CS} V^*$$

$$V^* = V_{in}$$

$$H = \frac{V_u}{V_{in}} = - \frac{R_2 // \frac{1}{CS}}{R_1} = \frac{-R_2/R_1}{1 + R_2 CS} = \frac{H_0}{1 + \frac{s}{\omega_H}}$$

$$\text{con } H_0 = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$\omega_H = \frac{1}{R_2 C}$$



vogliamo $H_0 = -5 \rightarrow R_2 = 5 R_1$, ad esempio $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$

$\omega_H = 10 \text{ krad/s} \rightarrow \frac{1}{R_2 C} = \omega_H = 10000 \text{ rad/s} \rightarrow$ avendo scelto $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$

$$C = \frac{1}{R_2 \omega_H} = 20 \text{ nF}$$