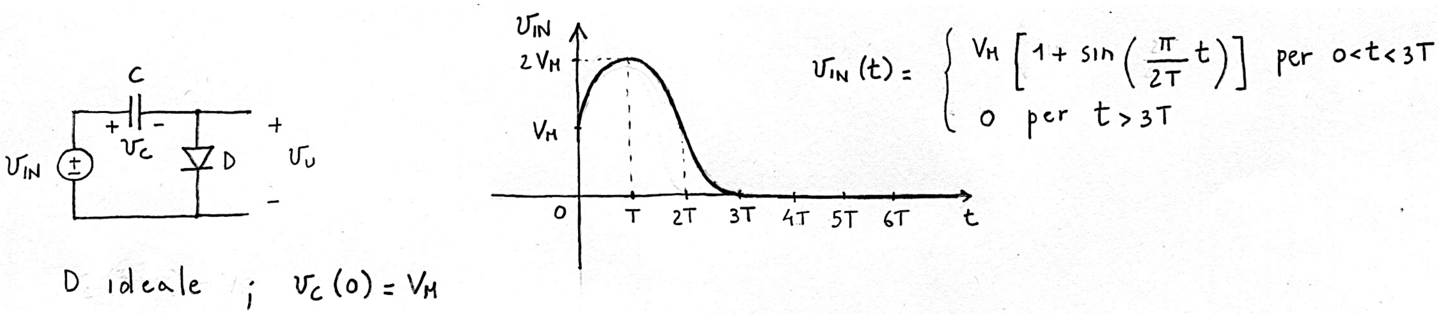
Scheda: **A23_03**	Data: **13 febbraio 2023**

Cognome	Nome	Matricola

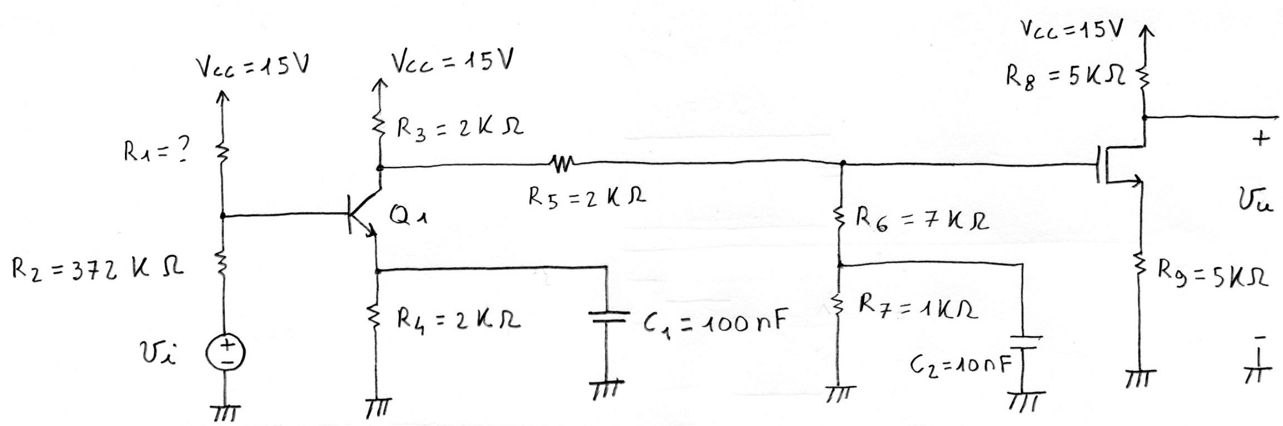
ESERCIZIO N°1
6.5 punti (4)

Si consideri il circuito rappresentato a sinistra in figura. Ipotizzando che $v_C(0)$ (tensione iniziale sul condensatore) sia pari a V_M, si ricavi passo passo e si disegni l'andamento nel tempo, per $0 \leq t \leq 6\ T$, 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 in 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, ipotizzando Q_1 (transistore BJT npn) in zona attiva diretta e Q_2 (transistore MOS a canale n) in saturazione e sapendo che la tensione V_U di uscita a riposo è pari a 10 V, si ricavi il valore della resistenza R_1. 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: $h_{FE} = 150$

per Q_2: $\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.25\ \frac{mA}{V^2}$

$V_T = 1V$

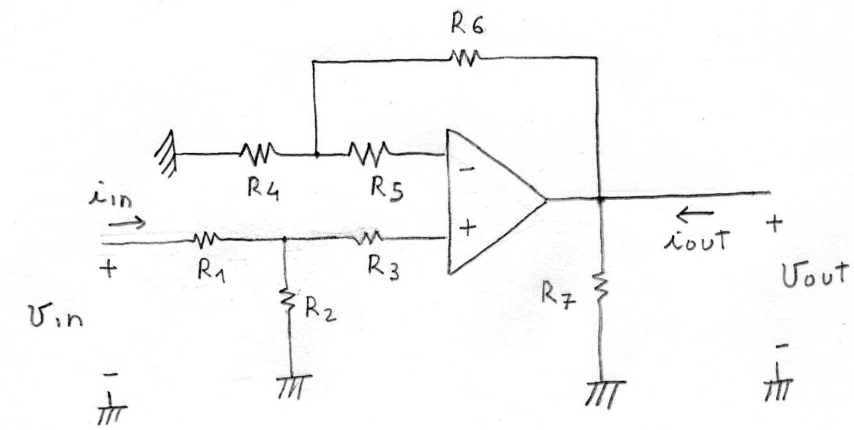
$(V_U)_Q = 10V$

ESERCIZIO N°3
7.5 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_1 = 1$ MΩ. Considerando per Q_1: $h_{ie} = 5$ KΩ, $h_{fe} = 200$ e per Q_2: $g_m = 1$ mA/V, 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.

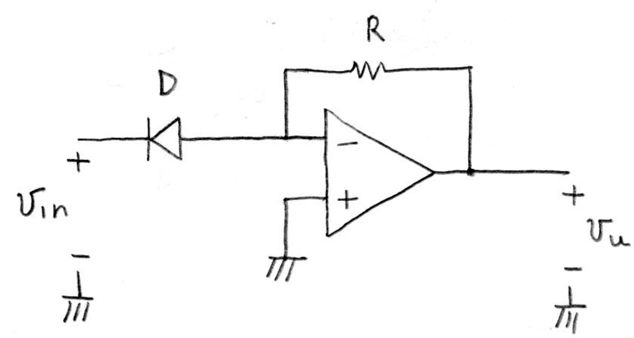
ESERCIZIO N°4
6.5 punti (4)

Si ricavino i parametri f 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.

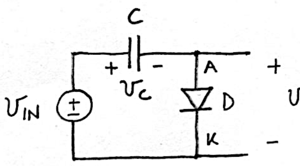


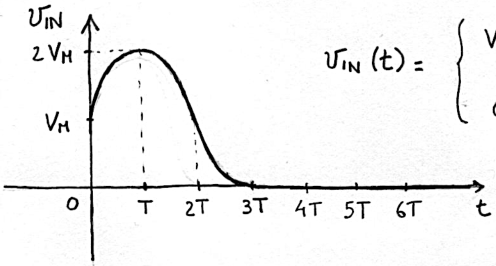
ESERCIZIO N°5
5.5 punti (4)

Per il circuito mostrato nella seguente figura, si trovi la relazione che lega la tensione di uscita alla tensione di ingresso, considerando l'amplificatore operazionale ideale e sfruttando per il diodo la relazione tra tensione e corrente data dall'equazione di Shockley: $i_D = I_S(e^{v_D/(\eta V_T)} - 1)$.



1)





$$v_{IN}(t) = \begin{cases} V_M\left[1+\sin\left(\frac{\pi}{2T}t\right)\right] & \text{per } 0<t<3T \\ 0 & \text{per } t>3T \end{cases}$$

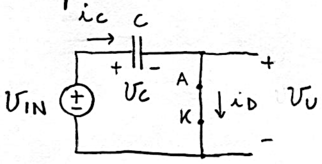
D ideale ; $v_C(0) = V_M$

inizialmente (per $t=0$) v_C è pari a V_M $\rightarrow$

per $t=0$ $v_U = v_{AK} = v_{IN} - v_C = V_M - V_M = 0$;

poi per t maggiori inizialmente la v_{IN} cresce e quindi $v_U = v_{AK} = v_{IN} - v_C$ tende a diventare positiva ;
quindi l'ipotesi più probabile è che il diodo D conduca

ipotesi: D conduce



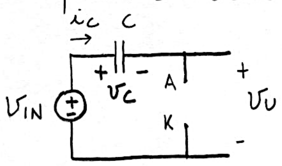
$v_U = 0$

$v_C = v_{IN} - 0 = v_{IN}$

verifica dell'ipotesi: $i_D = i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} = C\dfrac{dv_{IN}}{dt} > 0 \rightarrow \dfrac{dv_{IN}}{dt} > 0$, vero fino a $t=T$;

dopo $t=T$ questa ipotesi viene meno, quindi ipotizziamo che il diodo sia interdetto

ipotesi: D interdetto



la maglia è aperta $\rightarrow i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} = 0 \rightarrow v_C$ costante e pari al valore che aveva all'inizio di questa fase, cioè alla fine della fase precedente, cioè a $v_{IN}(T) = 2V_M$ $\rightarrow$

$v_U = v_{IN} - v_C = v_{IN} - 2V_M$

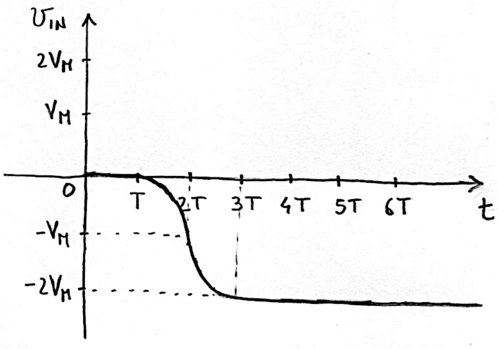
verifica dell'ipotesi: $v_{AK} = v_A - v_K = v_{IN} - v_C = v_{IN} - 2V_M < 0 \rightarrow v_{in} < 2V_M$, vero sempre da T in poi

Quindi:

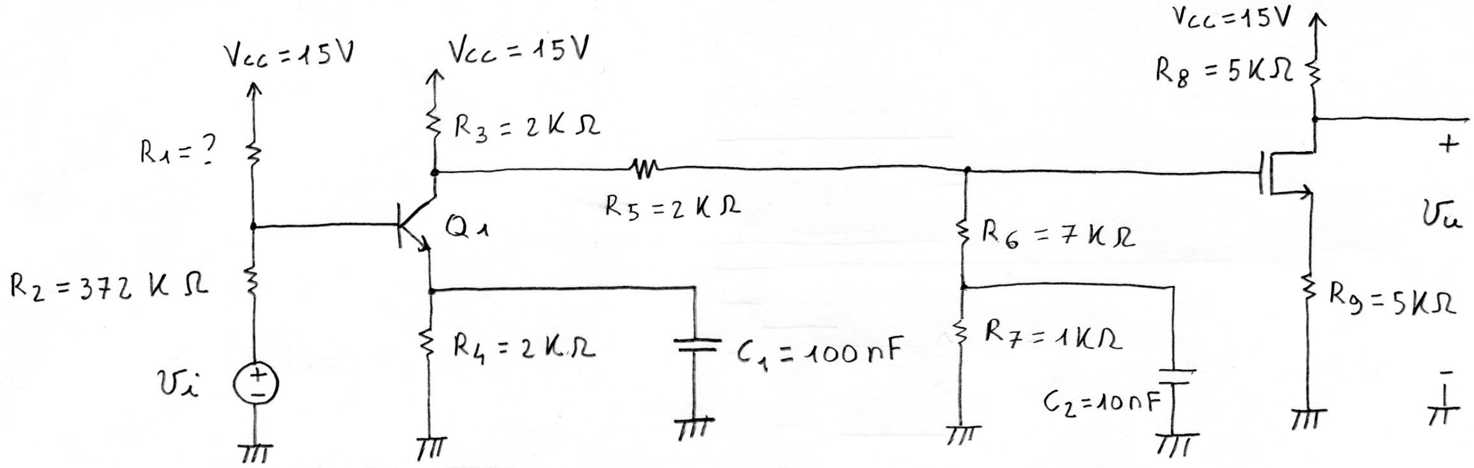
per $0<t<T$: D conduce e $v_U = 0$

per $t>T$: D interdetto e $v_U = v_{IN} - 2V_M$

È un fissatore in alto a zero.



2)



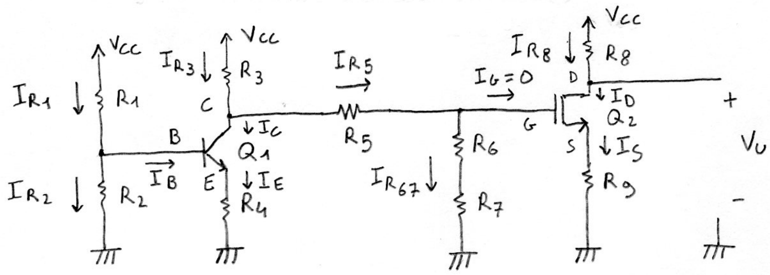
per Q_1: $h_{FE} = 150$

per Q_2: $\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.25 \frac{mA}{V^2}$

$V_T = 1V$

$(V_U)_Q = 10V$

In continua il circuito diventa:



$V_D = V_U = 10V$ (dato che $I_G = 0$)

$I_{R8} = \frac{V_{CC} - V_U}{R_8} = 1mA = I_D = I_S$

$V_S = R_9 I_S = 5V$

ipotesi 1: Q_2 in saturazione

$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$ con $K = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.25 \frac{mA}{V^2}$

$V_{GS} = V_T \pm \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 3V > V_T = 1V$

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

$V_{DS} = V_D - V_S = 5V > V_{GS} - V_T = 2V$

ipotesi 1 verificata

$V_G = V_S + V_{GS} = 8V$

$\left[g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}}\Big|_Q = 2K(V_{GS} - V_T) = \frac{1mA}{V} \right]$

NON RICHIESTO

(dato che $I_G = 0$)

$I_{R67} = \frac{V_G}{R_6 + R_7} = 1mA = I_{R5}$

$V_C = V_G + R_5 I_{R5} = 10V$

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

$I_C = I_{R3} - I_{R5} = 1.5 mA$

ipotesi 2: Q_1 in zona attiva diretta

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

$I_E = I_B + I_C = (1 + h_{FE}) I_B = 1.510 mA$

$V_E = R_4 I_E = 3.02V$

$V_B = V_E + V_\gamma = 3.72V$

$V_{CE} = V_C - V_E = 6.98V > V_{CEsat} \approx 0.1V \longrightarrow$ ipotesi 2 verificata

$I_{R2} = \frac{V_B}{R_2} = 10 \mu A$

$I_{R1} = I_{R2} + I_B = 20 \mu A \quad \rightarrow \quad R_1 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_{R1}} = 564 K\Omega$

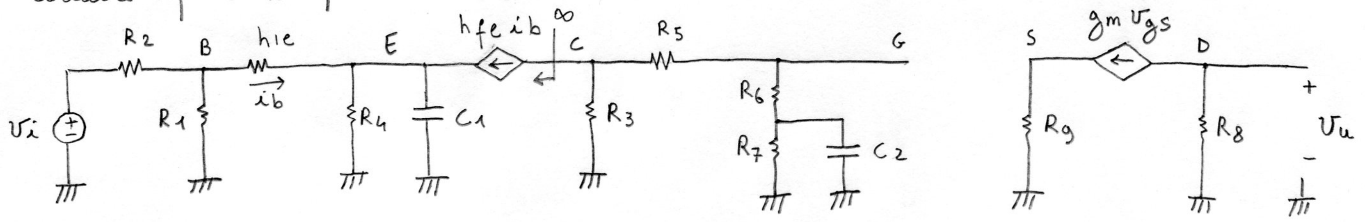
3) $R_1 = 1\,M\Omega$

$h_{ie} = 5\,K\Omega$

$h_{fe} = 200$

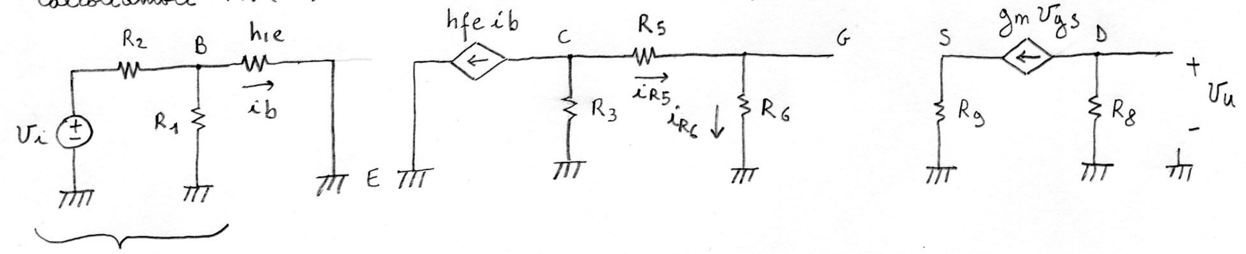
$g_m = 1\,\frac{mA}{V}$

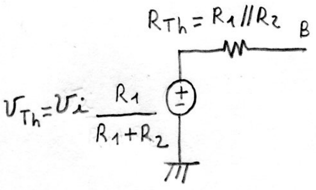
Circuito equivalente per le variazioni



2 condensatori, nessuna maglia impropria → 2 poli

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





(equivalente di Thevenin)

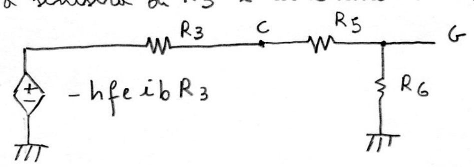
$v_u = -R_8 g_m v_{gs}$

$v_{gs} = v_g - v_s = v_g - R_9 g_m v_{gs} \rightarrow v_{gs}(1 + R_9 g_m) = v_g \rightarrow v_{gs} = \frac{v_g}{1 + R_9 g_m}$

$v_g = R_6 i_{R6}$

$i_{R6} = i_{R5} = -h_{fe} i_b \frac{R_3}{R_3 + R_5 + R_6}$ (partitore di corrente)

[altrimenti si sarebbe potuto fare l'equivalente di Thevenin di ciò che sta tra collettore e massa a sinistra di R_5 e avremmo ottenuto:



$v_g = -h_{fe} i_b R_3 \frac{R_6}{R_3 + R_5 + R_6}$ che coincide con quanto trovato sopra]

$i_b = \frac{v_{Th}}{R_{Th} + h_{ie}} = v_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 // R_2 + h_{ie}}$

$A_v(\infty) = +\frac{R_8 g_m}{1 + R_9 g_m} R_6 h_{fe} \frac{R_3}{R_3 + R_5 + R_6} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{R_1 // R_2 + h_{ie}} = 0.5599$ (positivo, come deve essere visto che si tratta di uno stadio a emettitore comune, invertente, e di uno stadio a source comune, invertente, in cascata)

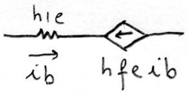
$|A_v(\infty)|_{dB} = -5.0379\ dB$

$A_v(\infty) \neq 0 \rightarrow$ n° zeri = n° poli = 2

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

$R_{VC1} = R_4 // \left(\frac{h_{ie} + R_1 // R_2}{h_{fe} + 1}\right) = 814.3989\ \Omega$

$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 12278.99\ rad/s \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 1954.26\ Hz$

la v_u si annulla per la s per cui $R_4 // \frac{1}{C_1 s} = \infty$ (perché in questa condizione abbiamo 

e quindi $i_b = -h_{fe} i_b \to i_b \underbrace{(h_{fe}+1)}_{\neq 0} = 0 \to i_b = 0 \to v_u = 0$)

$$R_4 // \frac{1}{C_1 s} = \frac{R_4 \frac{1}{C_1 s}}{R_4 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_4}{1 + R_4 C_1 s} = \infty \to 1 + R_4 C_1 s = 0 \to s = -\frac{1}{R_4 C_1} \to \omega_{z1} = \frac{1}{R_4 C_1} = 5000 \frac{rad}{s} \to$$

$$f_{z1} = \frac{\omega_{z1}}{2\pi} = 795.77 \text{ Hz}$$

$$R_{vC_2} = R_7 // (R_6 + R_5 + R_3 // \infty) = R_7 // (R_6 + R_5 + R_3) = 916.\bar{6}\ \Omega$$

$$\omega_{p2} = \frac{1}{C_2 R_{vC_2}} = 109'090.\overline{90} \frac{rad}{s} \to f_{p2} = \frac{\omega_{p2}}{2\pi} = 17'362.36 \text{ Hz}$$

la v_u si annulla per la s per cui $R_6 + \left(R_7 // \frac{1}{C_2 s}\right) = 0$ (perché in questa condizione v_g va a finire a massa, per cui $v_g = 0 \to v_{gs} = 0 \to v_u = 0$)

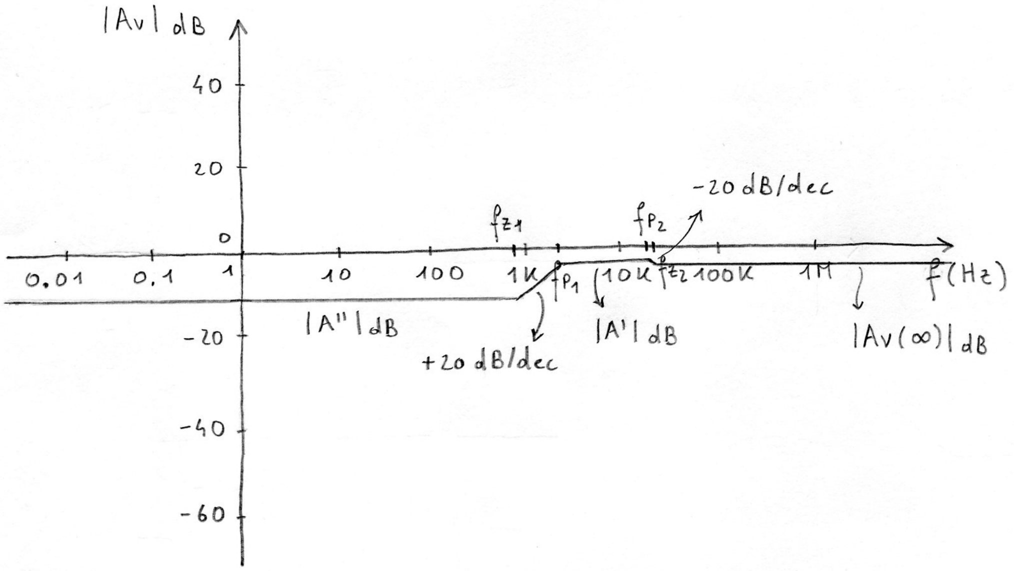
$$R_6 + R_7 // \frac{1}{C_2 s} = R_6 + \frac{R_7 \frac{1}{C_2 s}}{R_7 + \frac{1}{C_2 s}} = R_6 + \frac{R_7}{1 + R_7 C_2 s} = \frac{R_6 + R_6 R_7 C_2 s + R_7}{1 + R_7 C_2 s} = 0 \to R_6 + R_7 + R_6 R_7 C_2 s = 0 \to$$

$$s = -\frac{R_6 + R_7}{R_6 R_7 C_2} = -\frac{1}{C_2 \frac{R_6 R_7}{R_6 + R_7}} = -\frac{1}{C_2 (R_6 // R_7)} \to \omega_{z2} = \frac{1}{C_2 (R_6 // R_7)} = 114'285.71 \frac{rad}{s} \to$$

$$f_{z2} = \frac{\omega_{z2}}{2\pi} = 18'189.136 \text{ Hz}$$

La funzione di trasferimento è

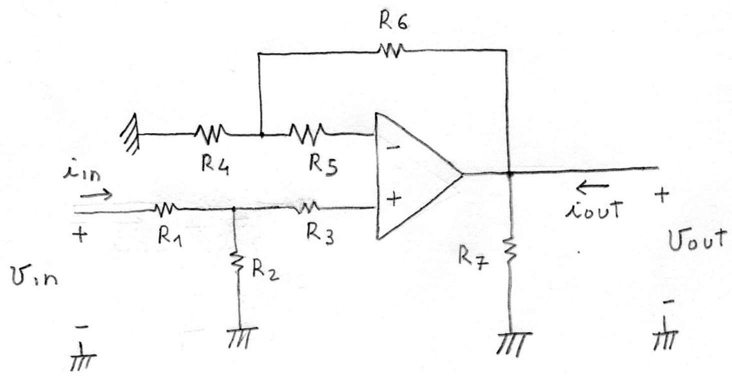
$$A_v(s) = A_v(\infty) \frac{(s + \omega_{z1})(s + \omega_{z2})}{(s + \omega_{p1})(s + \omega_{p2})}$$



$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z2}}{f_{p2}} = 0.5866 \to |A'|_{dB} = -4.6337 \text{ dB}$$

$$|A''| = |A'| \frac{f_{z1}}{f_{p1}} = 0.2388 \to |A''|_{dB} = -12.4376 \text{ dB}$$

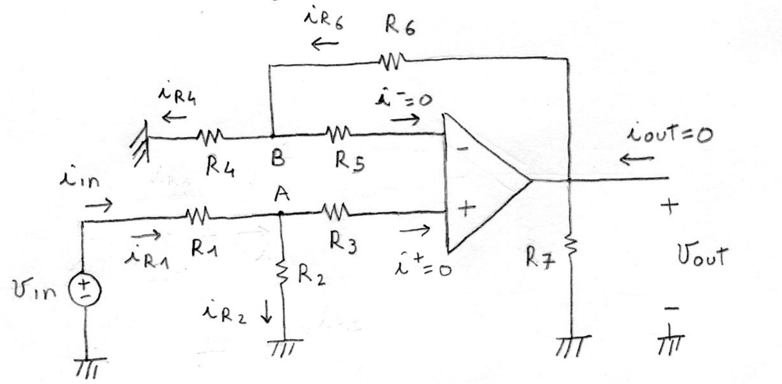
4)



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

$$f_f = \left.\frac{v_{out}}{v_{in}}\right|_{i_{out}=0} \quad ; \quad f_i = \left.\frac{i_{in}}{v_{in}}\right|_{i_{out}=0}$$

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



per il c.c.v. $i^+=0 \rightarrow i_{in} = i_{R1} = i_{R2} = \dfrac{v_{in}}{R_1+R_2} \rightarrow$

$$f_i = \frac{i_{in}}{v_{in}} = \frac{1}{R_1+R_2}$$

poiché $i^+=0$, non c'è caduta su R_3 $\rightarrow$

$$v^+ = v_A = R_2\, i_{R2} = \frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in}$$

per il c.c.v. $v^- = v^+ = \dfrac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in}$

per il c.c.v. $i^-=0 \rightarrow$ non c'è caduta su R_5 $\rightarrow$

$$v_B = v^- = \frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} \rightarrow$$

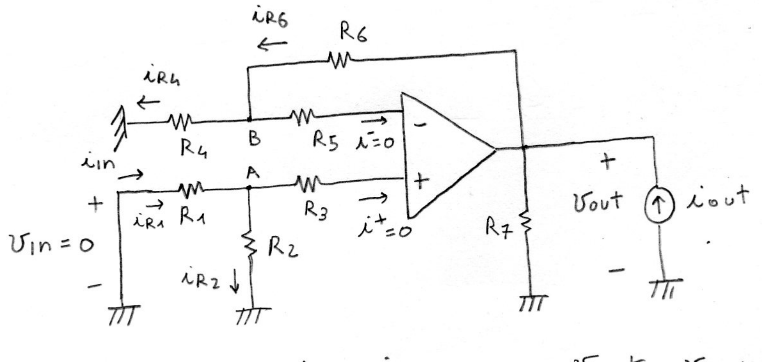
$$i_{R4} = \frac{v_B}{R_4} = \frac{1}{R_4}\frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} \rightarrow \text{poiché } i^-=0,\; i_{R6} = i_{R4} = \frac{1}{R_4}\frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} \rightarrow$$

$$v_{out} = v_B + R_6\, i_{R6} = \frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} + \frac{R_6}{R_4}\frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} = \left(1+\frac{R_6}{R_4}\right)\frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} \rightarrow$$

$$f_f = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(1+\frac{R_6}{R_4}\right)\frac{R_2}{R_1+R_2}$$

$$f_o = \left.\frac{v_{out}}{i_{out}}\right|_{v_{in}=0} \quad ; \quad f_r = \left.\frac{i_{in}}{i_{out}}\right|_{v_{in}=0}$$

($v_{in}=0$ significa porta di ingresso cortocircuitata)



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

$$= \frac{v_{in}}{R_1+R_2} = \frac{0}{R_1+R_2} = 0 \rightarrow f_r = \frac{i_{in}}{i_{out}} = 0 \;;$$

$$v^+ = R_2\, i_{R2} - R_3 \cdot i^+ = R_2 \cdot 0 - R_3 \cdot 0 = 0 \;;$$

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

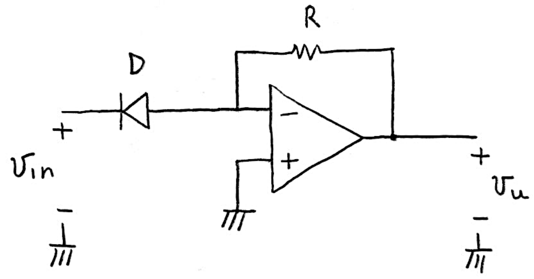
per il c.c.v. $i^-=0 \rightarrow$ non c'è caduta su R_5 $\rightarrow$

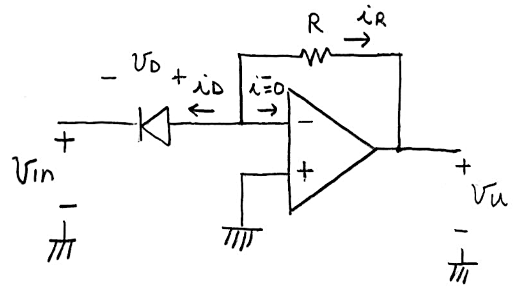
$$v_B = v^- = 0 \rightarrow i_{R4} = \frac{v_B}{R_4} = 0 \;;$$

poiché $i^-=0$, $i_{R6} = i_{R4} = 0 \rightarrow v_{out} = v_B + R_6\, i_{R6} = 0 + R_6 \cdot 0 = 0 \rightarrow$

$$f_o = \frac{v_{out}}{i_{out}} = 0$$

5)





per il c.c.v. $\quad i^- = 0 \rightarrow i_R = -i_D$

$$v^- = v^+ = 0 \quad ;$$

d'altra parte $i_D = I_S \left(e^{\frac{v_D}{\eta V_T}} - 1 \right)$

con $V_T = \dfrac{K_B T}{q}$

e $v_D = v^- - v_{in} = -v_{in}$

per cui $i_D = I_S \left(e^{-\frac{v_{in}}{\eta V_T}} - 1 \right)$;

quindi $v_u = v^- - R i_R = v^- + R i_D = R i_D \rightarrow$

$$v_u = R I_S \left(e^{-\frac{v_{in}}{\eta V_T}} - 1 \right)$$