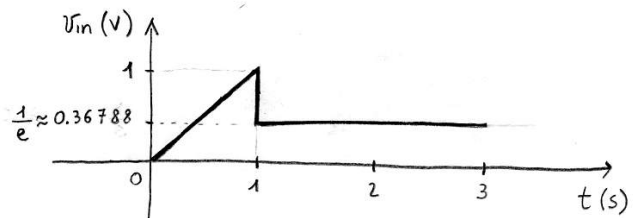
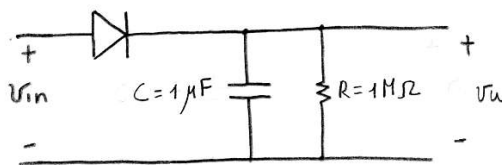


ESERCIZIO N°1

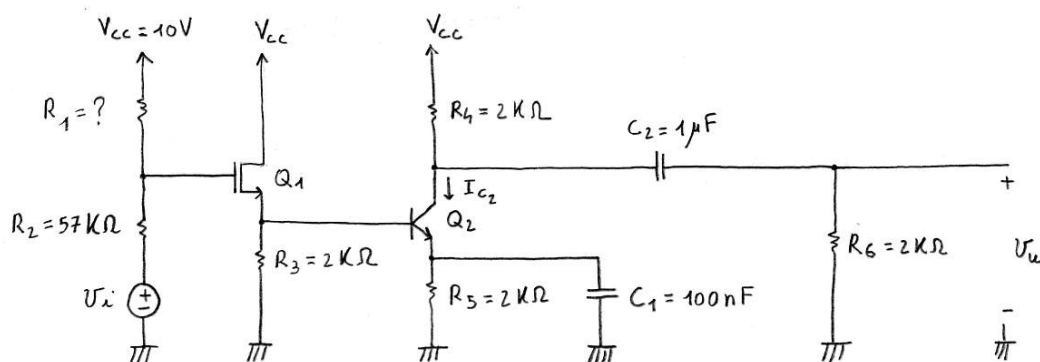
6 punti (4)

Si consideri il rivelatore di inviluppo rappresentato a sinistra nella seguente figura. Ipotizzando il condensatore inizialmente scarico, si disegni l'andamento nel tempo, per $0 \leq t \leq 3$ 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 dica in quali intervalli di tempo il diodo conduce e in quali è interdetto e si scriva l'espressione analitica della $v_u(t)$ in ciascuno di tali intervalli. Per quanto riguarda l'istante di tempo in cui termina la scarica del condensatore, è sufficiente scrivere la condizione analitica che deve essere soddisfatta in quell'istante. Si consideri il diodo ideale.

**ESERCIZIO N°2**

7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, ricavare il valore della resistenza R_1 sapendo che a riposo la corrente di collettore I_{C2} del transistor Q_2 è pari a 1.49 mA. Determinare inoltre il punto di lavoro dei transistori Q_1 e Q_2 .

per Q_1 : $V_T = 1$ V

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 1.86 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$(I_{C2})_Q = 1.49 \text{ mA}$$

per Q_2 : $h_{FE} = 149$

ESERCIZIO N°3

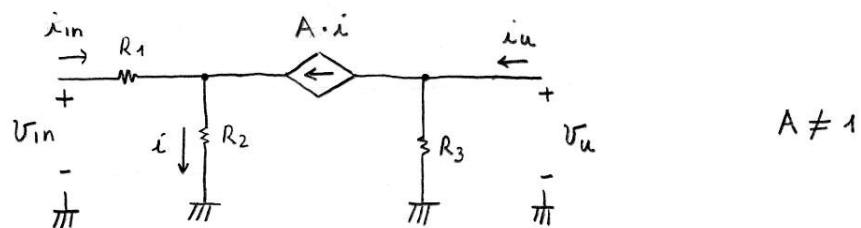
7.5 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_1=57\text{ K}\Omega$. 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 : $g_m=4\text{ mA/V}$ e per Q_2 : $h_{ie}=6\text{ K}\Omega$, $h_{fe}=200$.

ESERCIZIO N°4

6.5 punti (4)

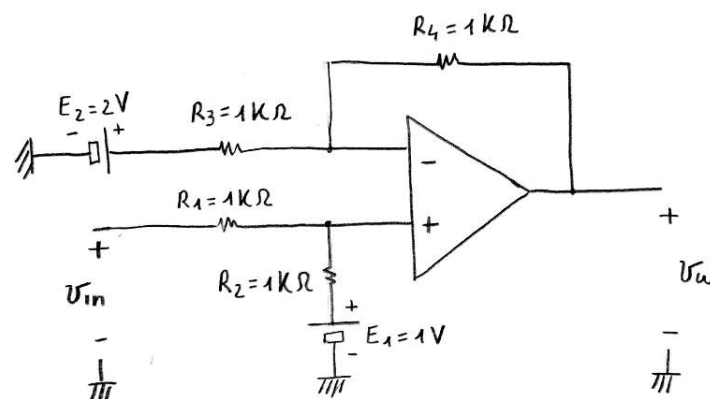
Si ricavino i parametri h per il quadripolo riportato nella seguente figura (dove $A \neq 1$).



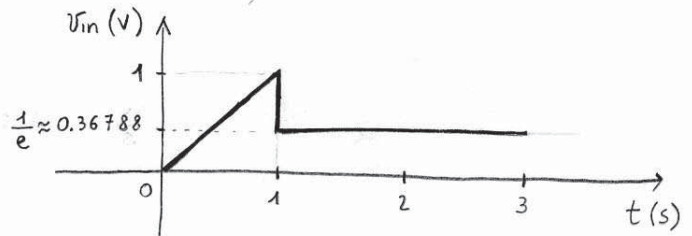
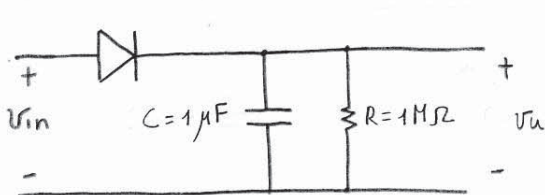
ESERCIZIO N°5

6 punti (4)

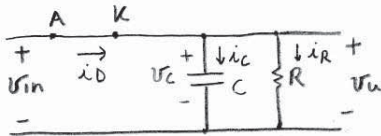
Determinare (in funzione della tensione v_{in}) la tensione v_u all'uscita dal seguente circuito. Ricavare per quale valore di v_{in} l'uscita v_u si annulla. Si consideri l'amplificatore operazionale ideale.



1)



poiché si parte da C scarico, all'inizio (cioè per $t=0$) $V_u = 0$;
 poi V_{in} cresce e (essendo collegato all'anodo del diodo il cui catodo è collegato al condensatore inizialmente scarico) manda in conduzione il diodo,
 quindi l'ipotesi più probabile è quella di diodo in conduzione
 facendo questa ipotesi il circuito diventa:



in questa fase (come si vede dal circuito) $V_u = V_{in}$;
 l'ipotesi di diodo in conduzione risulta verificata fintantoché
 $i_D = i_C + i_R = C \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_u}{R} = C \frac{dV_{in}}{dt} + \frac{V_{in}}{R} > 0$;
 $V_c = V_u = V_{in}$

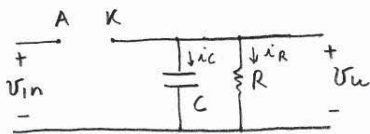
(in particolare $V_{in} = \frac{1V}{1s} \cdot t$)

questo è sicuramente vero per $0 < t < 1s$ perché in questo intervallo di tempo $V_{in} > 0$ e V_{in} cresce (quindi $\frac{dV_{in}}{dt} > 0$),
 per cui entrambi gli addendi sono positivi e quindi $i_D > 0$;

nell'istante $t = 1s$ quest'ipotesi non è più verificata perché (pur rimanendo $V_{in} > 0$) $\frac{dV_{in}}{dt} = -\infty$

per cui i_D non è più > 0 ;

questo significa che il diodo si interdice; in quest'ipotesi il circuito diventa:



a questo punto il condensatore si scarica esponenzialmente
 sulla resistenza R partendo dall'ultimo valore di tensione
 che ha raggiunto alla fine della fase precedente, cioè

$$V_{in}(t=1s^-) = 1V;$$

$$\text{quindi in questa fase } V_u = V_{in}(t=1s^-) \cdot e^{-\frac{t-1s}{RC}} = 1V \cdot e^{-\frac{t-1s}{1s}} \quad (\text{dato che } RC = 1s)$$

$$\left[\text{questo deriva dal fatto che nel nuovo circuito abbiamo che } i_C = -i_R \rightarrow C \frac{dV_u}{dt} = -\frac{V_u}{R} \rightarrow \frac{1}{V_u} dV_u = -\frac{1}{RC} dt \rightarrow \int_{V_u(t=1s)}^{V_u(t)} \frac{1}{V_u} dV_u = -\frac{1}{RC} \int_{t=1s}^t dt \rightarrow [\ln V_u]_{V_u(t=1s)}^{V_u(t)} = -\frac{t-1s}{RC} \rightarrow$$

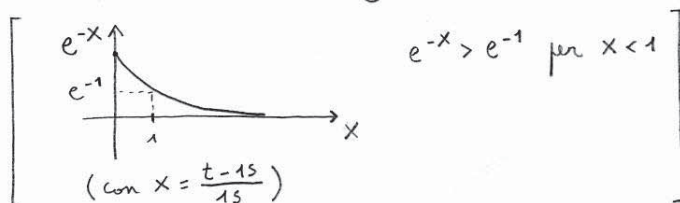
$$\ln V_u(t) - \ln(V_u(t=1s)) = -\frac{t-1s}{RC} \rightarrow \ln \frac{V_u(t)}{V_u(t=1s)} = -\frac{t-1s}{RC} \rightarrow$$

$$V_u(t) = V_u(t=1s) \cdot e^{-\frac{t-1s}{RC}} = 1V \cdot e^{-\frac{t-1s}{1s}} \quad]$$

l'ipotesi di diodo interdetto risulta verificata fintantoché $V_{AK} = V_{in} - V_u < 0 \rightarrow V_u > V_{in}$;

poiché per $t \geq 1s$ la $V_{in}(t) = \frac{1}{e} V$ la condizione $V_u > V_{in}$ si può scrivere:

$$1V \cdot e^{-\frac{t-1s}{1s}} > \frac{1}{e} V \rightarrow e^{-\frac{t-1s}{1s}} > e^{-1} \rightarrow \frac{t-1s}{1s} < 1 \rightarrow t-1s < 1s \rightarrow$$

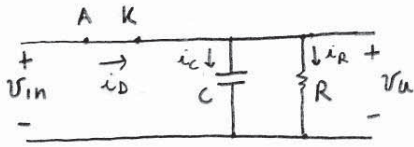


$$e^{-x} > e^{-1} \text{ per } x < 1$$

$$t < 2s;$$

quindi per $1s < t < 2s$ sicuramente
 l'ipotesi è verificata ed il diodo è
 interdetto;

per $t = 2s$ si ha che $v_u = 1V \cdot e^{-\frac{t-1s}{1s}} = \frac{1}{e} V = v_{in}$ e l'ipotesi non è più verificata; quindi il diodo torna a condurre, il circuito diventa ancora



e torniamo ad avere $v_u = v_{in}$;

a partire da questo istante $t = 2s$ l'ipotesi di diodo in conduzione è sempre verificata perché

$$i_D = i_C + i_R = C \frac{dv_C}{dt} + \frac{v_u}{R} = C \frac{dv_{in}}{dt} + \frac{v_{in}}{R}$$

ma, essendo v_{in} costante e pari a $\frac{1}{e} V > 0$ si ha che

$$\frac{dv_{in}}{dt} = 0 \rightarrow C \frac{dv_{in}}{dt} = 0, \text{ mentre } v_{in} > 0 \rightarrow \frac{v_{in}}{R} > 0,$$

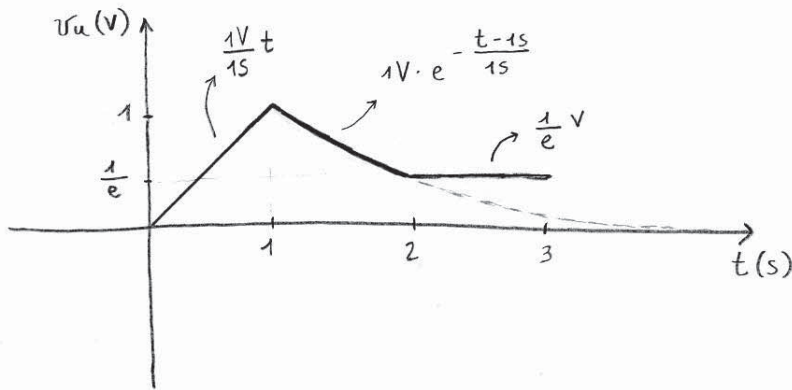
per cui sicuramente $i_D > 0$.

Ricapitolando:

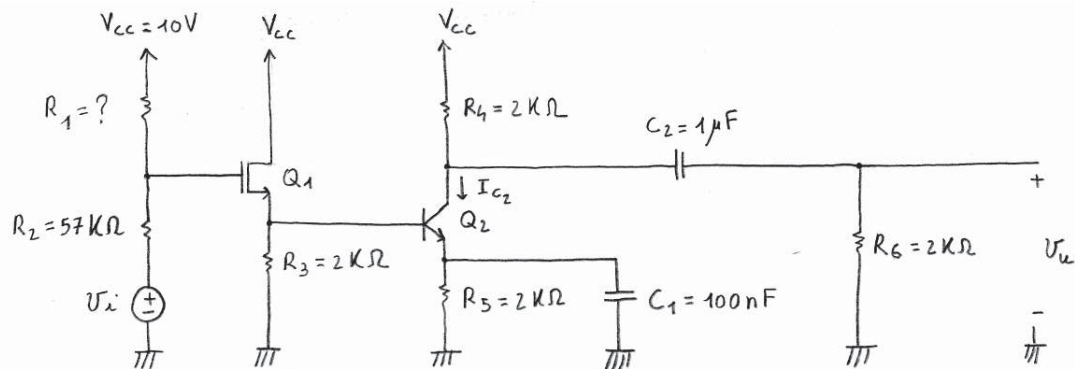
$$\text{per } 0 \leq t \leq 1s : v_u = v_{in} = \frac{1V}{1s} \cdot t$$

$$\text{per } 1s \leq t \leq 2s : v_u = 1V \cdot e^{-\frac{t-1s}{1s}}$$

$$\text{per } t \geq 2s : v_u = v_{in} = \frac{1}{e} V \quad (\text{con } \frac{1}{e} = 0.36788)$$



2)

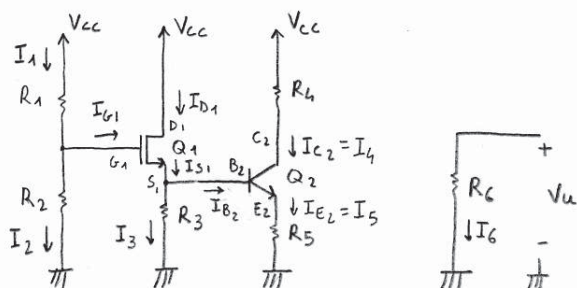
per Q_1 : $V_T = 1V$

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 1.86 \frac{mA}{V^2}$$

per Q_2 : $h_{FE} = 149$

$$(I_{C2})_Q = 1.49 mA$$

In continua il circuito diventa:



$$I_6 = 0 \rightarrow V_u = R_6 I_6 = 0$$

$$I_{C2} = I_4 = 1.49 mA$$

ipotesi 1: Q_2 in zona attiva diretta

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{h_{FE}} = 0.01 mA = 10 \mu A > 0$$

$$I_{E2} = I_{C2} + I_{B2} = 1.5 mA = I_5$$

$$V_{E2} = R_5 I_{E2} = 3V$$

$$V_{B2} = V_{E2} + V_{BE} = 3.7V = V_{S1}$$

$$V_{C2} = V_{CC} - R_4 I_{C2} = 7.02V$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 4.02V > V_{CEsat} \approx 0.2V \rightarrow \text{ipotesi 1 verificata}$$

$$I_3 = \frac{V_{S1}}{R_3} = 1.85 mA$$

$$I_{S1} = I_3 + I_{B2} = 1.86 mA$$

$$I_{G1} = 0 \rightarrow I_{D1} = I_{S1} = 1.86 mA$$

ipotesi 2: Q_1 in saturazione

$$I_{D1} = \underbrace{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}_{\text{chiamiamolo } K} (V_{GS1} - V_T)^2 \rightarrow V_{GS1} = V_T + \sqrt{\frac{I_{D1}}{K}} = 2V > V_T$$

un mos a canale n conduce se $V_{GS1} > V_T$

$$V_{D1} = V_{CC} = 10V$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 6.3V > V_{GS1} - V_T = 1V \rightarrow \text{ipotesi 2 verificata}$$

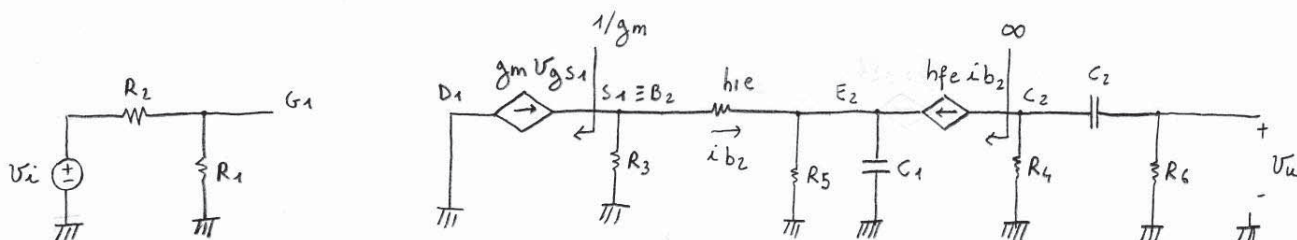
$$V_{G1} = V_{S1} + V_{GS1} = 5.7V$$

$$I_2 = \frac{V_{G1}}{R_2} = 0.1 \text{ mA} = I_1 \quad (\text{dato che } I_{G1}=0)$$

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_{G1}}{I_1} = 43 \text{ K}\Omega$$

$$\left[g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \Big|_{V_{DS}=V_{DSa}} = 2K(V_{GS1} - V_T) = 3.72 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \right] \quad \text{NON RICHIESTO}$$

$$3) \quad g_m = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \quad ; \quad h_{ie} = 6 \text{ K}\Omega \quad ; \quad h_{fe} = 200 \quad ; \quad R_1 = 57 \text{ K}\Omega$$



2 condensatori indipendenti (nessuna maglia impropria) $\rightarrow$ 2 poli
 $A_v(\infty) \neq 0 \rightarrow$ numero zeri = numero poli $\rightarrow$ 2 zeri

$$R_{VC1} = R_5 \parallel \left(\frac{h_{ie} + R_3 \parallel \frac{1}{g_m}}{h_{fe} + 1} \right) = 30.4845 \Omega$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 328.035.714 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 52208.505 \text{ Hz}$$

C_1 introduce uno zero per lo s per cui $R_5 \parallel \frac{1}{C_1 s} = \infty$ perché in questa condizione si ha

$$\begin{array}{c} h_{ie} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ i_{b2} \end{array} \quad \begin{array}{c} h_{fe} i_{b2} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \text{---} \end{array} \quad \text{per cui deve essere } i_{b2} = -h_{fe} i_{b2} \rightarrow i_{b2}(1+h_{fe}) = 0 \rightarrow i_{b2} = 0 \rightarrow h_{fe} i_{b2} = 0 \rightarrow v_u = 0$$

$$R_5 \parallel \frac{1}{C_1 s} = \frac{R_5 \frac{1}{C_1 s}}{R_5 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_5}{1 + R_5 C_1 s} = \infty \rightarrow 1 + R_5 C_1 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{R_5 C_1} \rightarrow$$

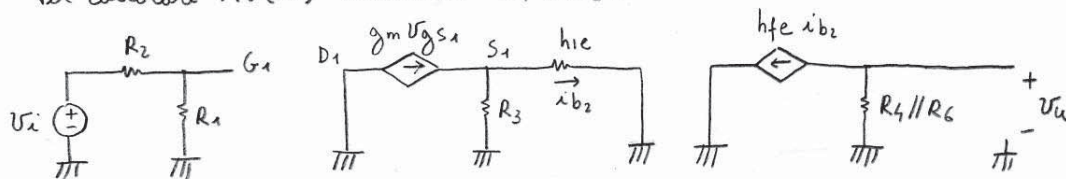
$$\omega_{Z1} = \frac{1}{R_5 C_1} = 5000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{Z1} = \frac{\omega_{Z1}}{2\pi} = 795.775 \text{ Hz}$$

$$R_{VC2} = R_6 + (R_4 \parallel \infty) = R_6 + R_4 = 4 \text{ K}\Omega$$

$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{VC2}} = 250 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 39.789 \text{ Hz}$$

C_2 introduce uno zero nell'origine perché i in serie sull'unico percorso che porta l'effetto del segnale in uscita $\rightarrow$ dobbiamo imporre $\frac{1}{C_2 s} = \infty \rightarrow s = 0 \rightarrow \omega_{Z2} = 0 \rightarrow f_{Z2} = 0$

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



$$v_u = -(R_4 \parallel R_6) h_{fe} i_{b2}$$

$$i_{b2} = g_m v_{GS1} \frac{R_3}{R_3 + h_{ie}}$$

$$v_{GS1} = v_{G1} - v_{S1} = v_{G1} - g_m v_{GS1} (R_3 \parallel h_{ie}) \rightarrow v_{GS1} (1 + g_m (R_3 \parallel h_{ie})) = v_{G1} \rightarrow$$

$$v_{GS1} = \frac{v_{G1}}{1 + g_m (R_3 \parallel h_{ie})}$$

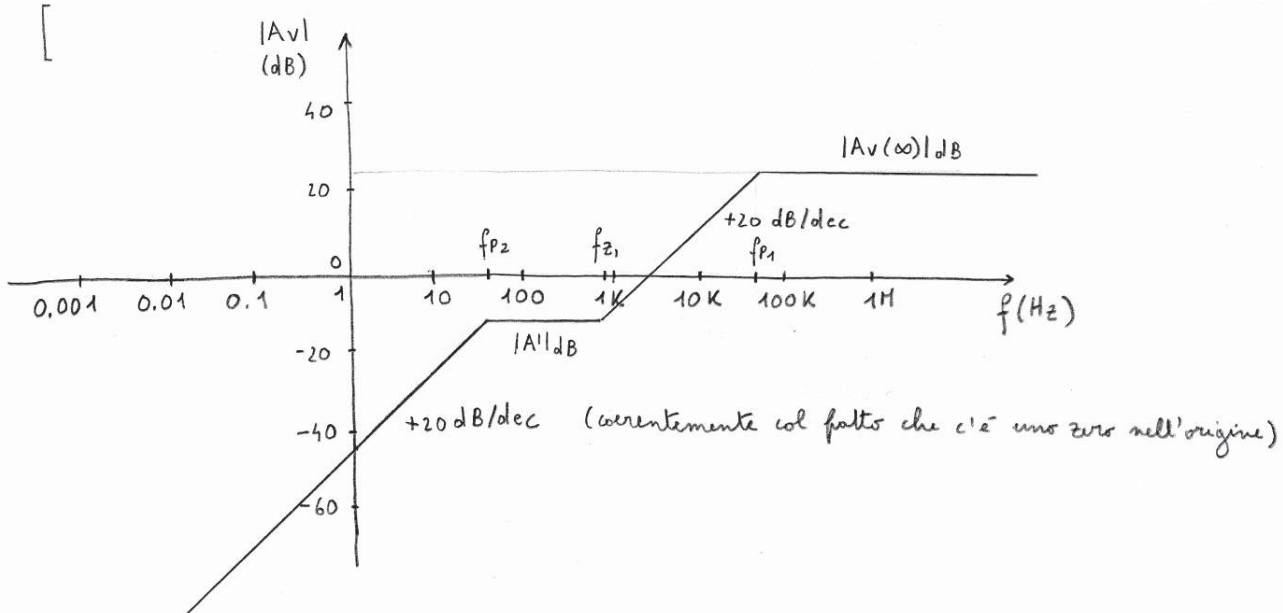
$$v_{g1} = v_i \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_v(\infty) = \frac{v_u}{v_i} = - (R_4 // R_6) h_{fe} g_m \frac{R_3}{R_3 + h_{ie}} \frac{1}{1 + g_m (R_3 // h_{ie})} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -14.2857$$

$$|A_v(\infty)|_{dB} = 23.098 \text{ dB}$$

(negativo, come doveva essere visto che si tratta di uno stadio a drain comune, non invertente, in cascata con uno stadio a emettitore comune, invertente)

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

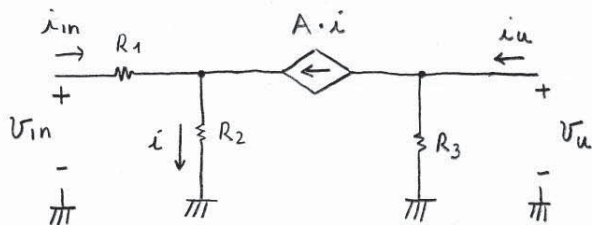


$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z1}}{f_{p1}} = 0.2177$$

$$|A'|_{dB} = -13.241 \text{ dB}$$

NON RICHIESTO

4)



$$A \neq 1$$

$$\begin{cases} i_u = h_f i_{in} + h_o V_u \\ V_{in} = h_i i_{in} + h_r V_u \end{cases}$$

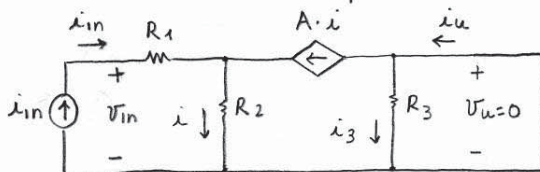
$$h_f = \left. \frac{i_u}{i_{in}} \right|_{V_u=0}$$

$$h_o = \left. \frac{i_u}{V_u} \right|_{i_{in}=0}$$

$$h_i = \left. \frac{V_{in}}{i_{in}} \right|_{V_u=0}$$

$$h_r = \left. \frac{V_{in}}{V_u} \right|_{i_{in}=0}$$

Per il calcolo di h_f e h_i considero $V_u=0$ (cioè la porta di uscita cortocircuitata)



$$i_3 = \frac{0}{R_3} = 0 \rightarrow i_u = A \cdot i$$

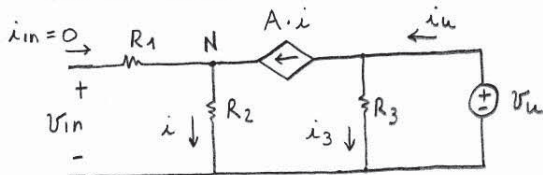
$$i_{in} = i - A \cdot i = (1-A) i$$

$$h_f = \frac{i_u}{i_{in}} = \frac{A \cdot i}{(1-A) i} = \frac{A}{1-A}$$

$$V_{in} = R_1 i_{in} + R_2 i = R_1 (1-A) i + R_2 i$$

$$h_i = \frac{V_{in}}{i_{in}} = \frac{[R_1 (1-A) + R_2] i}{(1-A) i} = R_1 + \frac{R_2}{1-A}$$

Per il calcolo di h_o e h_r considero $i_{in}=0$ (cioè la porta di ingresso aperta)



$\neq 0$ perché $A \neq 1$

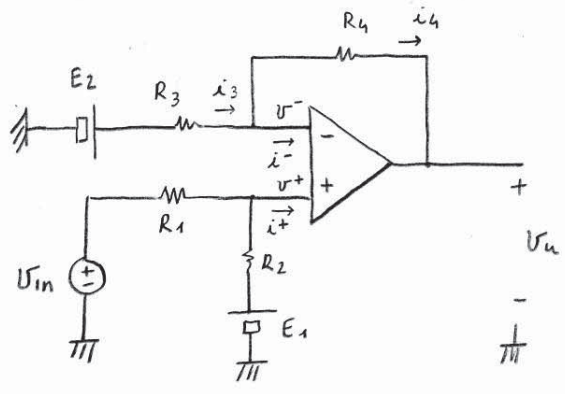
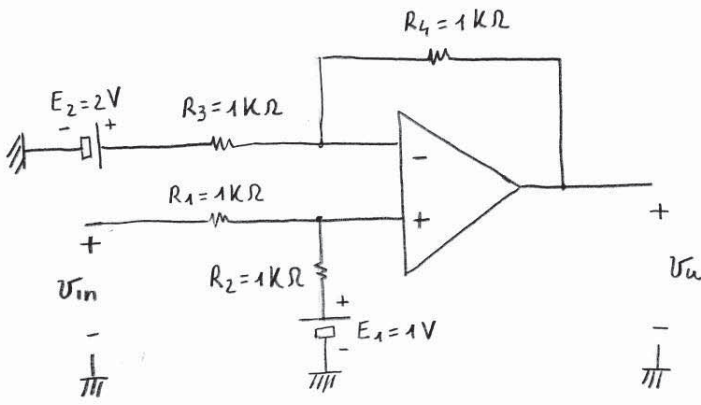
facendo l'equilibrio delle correnti al nodo N si ha che $A \cdot i = i \rightarrow (1-A) i = 0 \rightarrow i = 0 \rightarrow$
il generatore controllato $A \cdot i$ è spento $\rightarrow i_u = i_3 = \frac{V_u}{R_3}$

$$h_o = \frac{i_u}{V_u} = \frac{V_u}{R_3} \frac{1}{V_u} = \frac{1}{R_3}$$

essendo $i_{in}=0$ non c'è voltaggio su $R_1 \rightarrow V_{in} = R_2 i = 0$

$$h_r = \frac{V_{in}}{V_u} = 0$$

5)



per il c.c.v. $i^+ = i^- = 0$, $v^+ = v^-$

V_{in} , R_1 , R_2 e E_1 sono in serie (in quanto $i^+ = 0$)

sovrapponendo gli effetti di V_{in} e E_1 abbiamo che $v^+ = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + E_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{V_{in} + E_1}{2} = v^-$

$$i_3 = \frac{E_2 - v^-}{R_3} = i_4 \quad (\text{in quanto } i^- = 0)$$

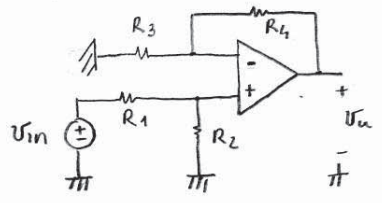
(sostituendo quanto scritto sopra per v^-)

$$V_u = v^- - R_4 i_4 = v^- - \frac{R_4}{R_3} (E_2 - v^-) = v^- - E_2 + v^- = 2v^- - E_2 = (V_{in} + E_1) - E_2 = V_{in} - 1V$$

V_u si annulla per $V_{in} - 1V = 0 \rightarrow V_{in} = 1V$

[l'espressione della V_u si poteva anche ricavare sovrapponendo gli effetti su V_u di V_{in} , E_1 e E_2 ;

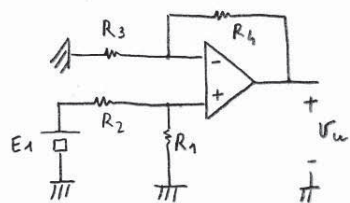
effetto di V_{in} :



$$V_u = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = \frac{V_{in}}{2} \cdot 2 = V_{in}$$

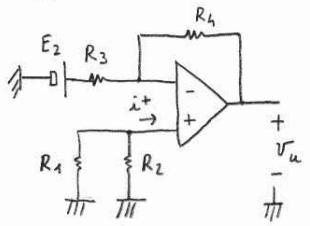
guadagno dell'amplificatore non invertente

effetto di E_1 :



$$V_u = E_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = \frac{E_1}{2} \cdot 2 = E_1$$

effetto di E_2 :



$$\text{per il c.c.v. } i^+ = 0 \rightarrow v^+ = -(R_1 // R_2) i^+ = 0 \rightarrow V_u = -\frac{R_4}{R_3} E_2 = -E_2$$

guadagno dell'amplificatore invertente

per cui complessivamente $V_u = V_{in} + E_1 - E_2$