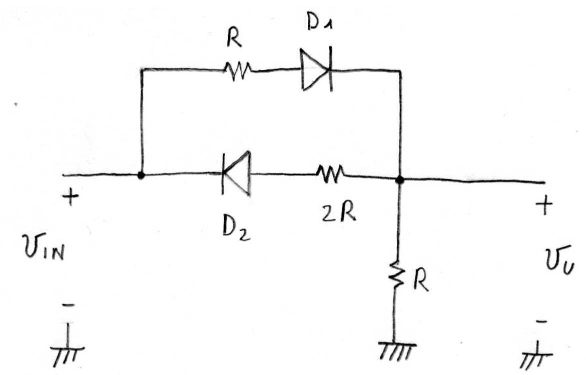
Scheda: **A23_04**	Data: **4 aprile 2023**

Cognome	Nome	Matricola

ESERCIZIO N°1

6 punti (4)

Considerando i diodi ideali, si ricavi la caratteristica ingresso-uscita del seguente circuito (con ingresso v_{IN} e uscita v_U), verificando le ipotesi fatte sui diodi nei diversi intervalli considerati della tensione di ingresso v_{IN}.



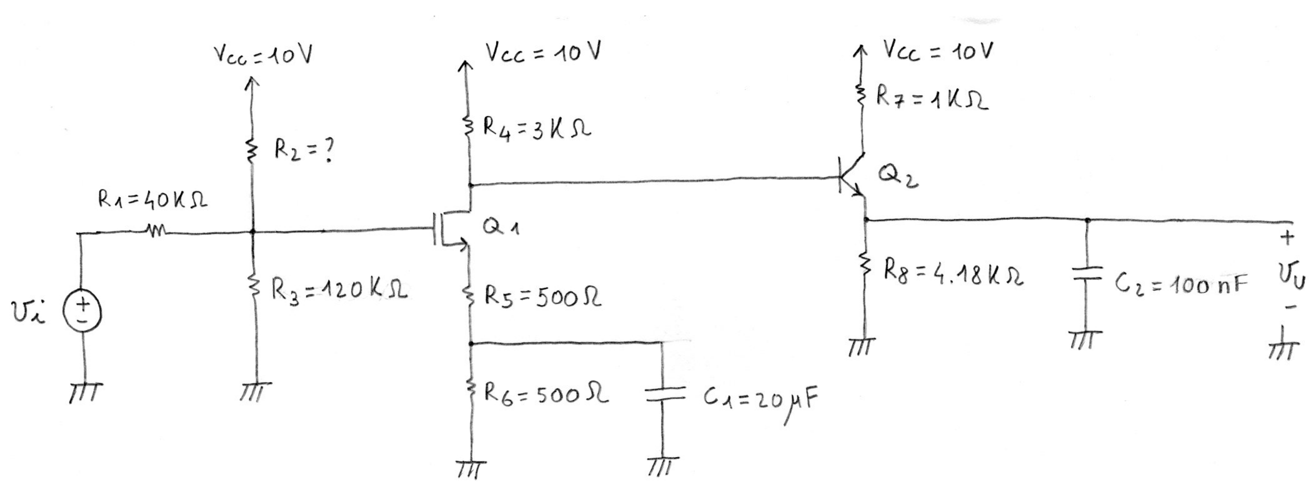
$R = 1\,K\Omega$

D_1 e D_2 ideali

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 6.27 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: $V_{T1} = 1V$; per Q_2: $h_{FE_2} = 149$; a riposo $V_U = 6.27V$

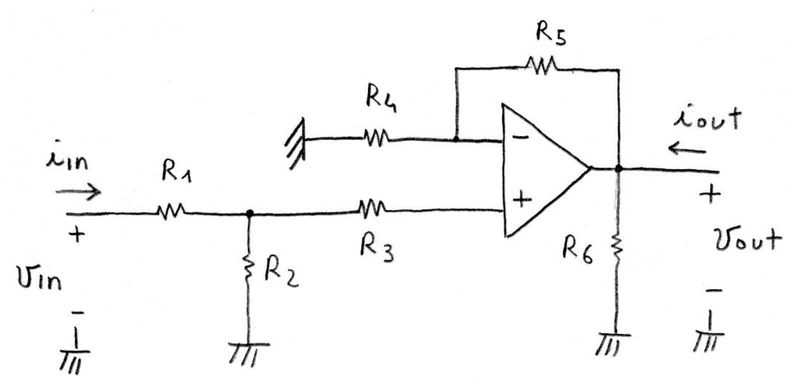
$\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W_1}{L_1} = 1\,\frac{mA}{V^2}$

ESERCIZIO N°3
7.5 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_2 = 100$ KΩ. Considerando per Q_1: $g_{m1} = 2$ mA/V e per Q_2: $h_{ie2} = 6$ KΩ, $h_{fe2} = 200$, 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.
[Ricordarsi che, nel caso il guadagno all'infinito $A_v(\infty)$ sia nullo ma quello per frequenza tendente a zero $A_v(0)$ (valutato sul circuito per le variazioni con tutti i condensatori aperti) sia diverso da zero, si può sfruttare il valore di $A_v(0)$ per ricavare la costante moltiplicativa della funzione di traferimento, facendo poi attenzione a scrivere in modo coerente l'espressione dell'$A_v(s)$.]

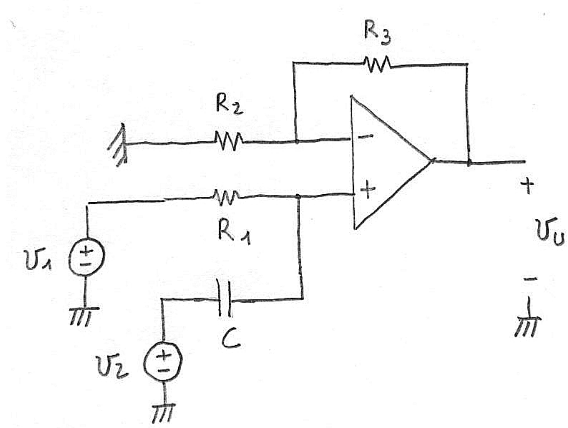
ESERCIZIO N°4
6.5 punti (4)

Si ricavino i parametri f per il quadripolo mostrato nella seguente figura. Si consideri l'amplificatore operazionale ideale.

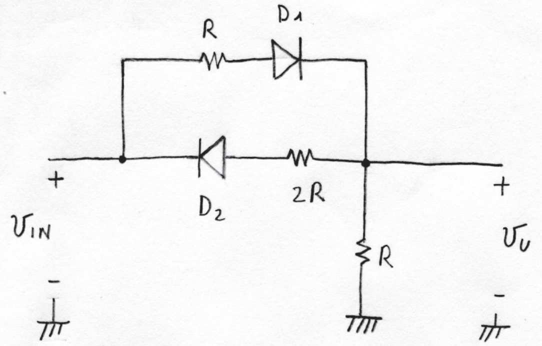


ESERCIZIO N°5
6 punti (4)

Lavorando nel dominio di Laplace e considerando l'amplificatore operazionale ideale, si ricavi l'espressione della tensione di uscita v_U in funzione dei due generatori di tensione di ingresso v_1 e v_2. Inoltre si ricavi l'impedenza di ingresso vista dai due terminali di v_1 (con v_2 disattivato) e l'impedenza di ingresso vista dai due terminali di v_2 (con v_1 disattivato).



1)



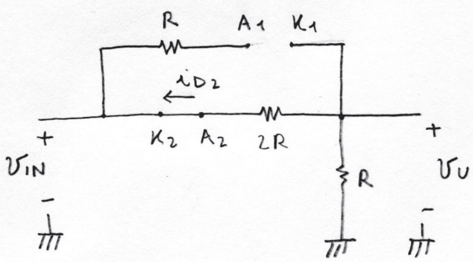
$R = 1\,K\Omega$

D_1 e D_2 ideali

nell'esaminare il comportamento del circuito per tutti i valori di v_{IN}, partiamo ad es. da valori di v_{IN} molto negativi e andiamo poi a considerare valori via via maggiori di v_{IN};

per v_{IN} molto negativi le ipotesi più ragionevoli da fare su D_1 e D_2 sono:

D_1 interdetto e D_2 in conduzione e il circuito equivalente per grandi segnali diventa:



verifiche delle ipotesi:

$$i_{D2} = \frac{0 - v_{IN}}{R+2R} = -\frac{v_{IN}}{3R} > 0$$ che è soddisfatta per $v_{IN} < 0$

$$v_{AK1} = -2R\, i_{D2} = -2R \cdot \left(-\frac{v_{IN}}{3R}\right) = \frac{2}{3} v_{IN} < 0$$

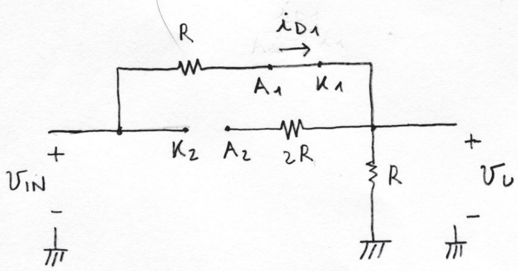
che è soddisfatta per $v_{IN} < 0$;

quindi per tutti i $v_{IN} < 0$ abbiamo che D_1 è interdetto, D_2 è in conduzione e

$$v_U = v_{IN} \frac{R}{2R+R} = \frac{v_{IN}}{3};$$

se invece, andando a considerare valori di v_{IN} via via maggiori, consideriamo valori positivi di v_{IN} le ipotesi più ragionevoli da fare per D_1 e D_2 diventano:

D_1 in conduzione e D_2 interdetto e il circuito equivalente per grandi segnali diventa:



verifiche delle ipotesi:

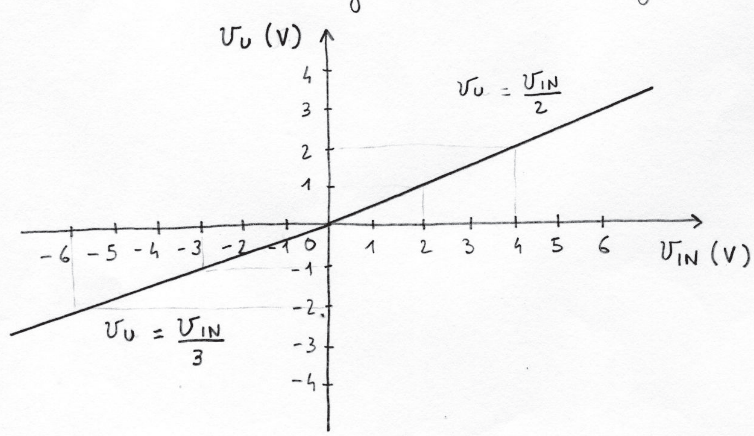
$$i_{D1} = \frac{v_{IN}}{R+R} = \frac{v_{IN}}{2R} > 0$$ che è soddisfatta per $v_{IN} > 0$

$$v_{AK2} = -v_{IN} \frac{R}{R+R} = -\frac{v_{IN}}{2} < 0$$ che è soddisfatta per $v_{IN} > 0$;

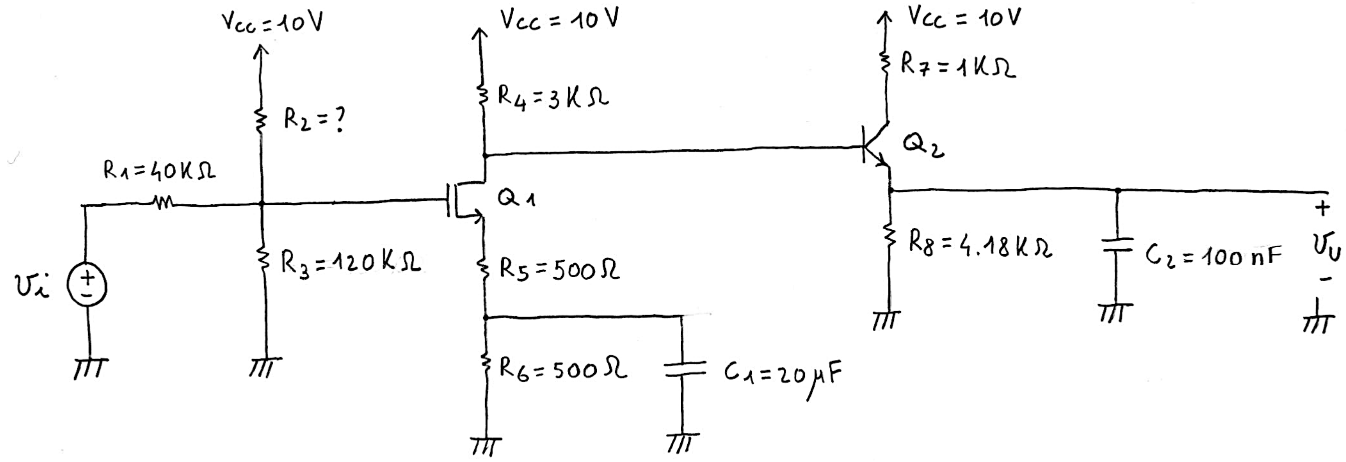
quindi per tutti i $v_{IN} > 0$ abbiamo che D_1 conduce, D_2 è interdetto e

$$v_U = v_{IN} \frac{R}{R+R} = \frac{v_{IN}}{2}.$$

Quindi la caratteristica ingresso-uscita è la seguente:



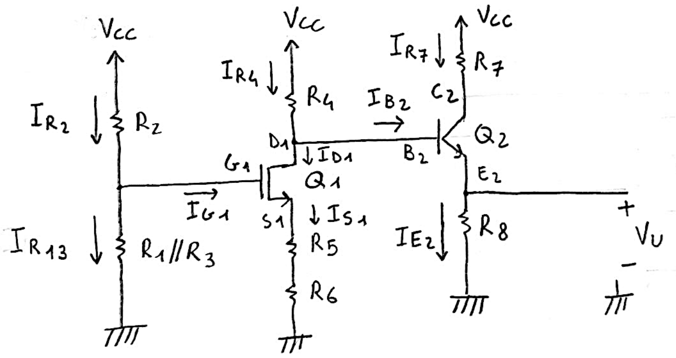
2)



per Q_1: $V_{T1} = 1V$; per Q_2: $h_{FE_2} = 149$; a riposo $V_U = 6.27V$

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

In continua il circuito diventa:



$V_U = V_{E_2} = 6.27V$

$I_{E_2} = \frac{V_{E_2}}{R_8} = 1.5\,mA$

ipotesi 1: Q_2 in zona attiva diretta

$I_{C_2} = h_{FE_2} I_{B_2}$

$I_{E_2} = I_{C_2} + I_{B_2} = (h_{FE_2}+1)\, I_{B_2}$

$V_{BE_2} = V_\gamma = 0.7V$

$I_{B_2} = \frac{I_{E_2}}{h_{FE_2}+1} = 10\mu A > 0$

$I_{C_2} = h_{FE_2} I_{B_2} = 1.49\ mA$

$V_{C_2} = V_{CC} - R_7 I_{C_2} = 8.51V$

$V_{CE_2} = V_{C_2} - V_{E_2} = 2.24V > V_{CE\,sat} \approx 0.1V \longrightarrow$ ipotesi 1 verificata

$V_{B_2} = V_{E_2} + V_\gamma = 6.97V = V_{D1}$

$I_{R_4} = \frac{V_{CC} - V_{B_2}}{R_4} = 1.01\ mA$

$I_{D1} = I_{R_4} - I_{B_2} = 1mA = I_{S1}$
(dato che $I_{G1}=0$)

$V_{S1} = (R_5 + R_6)\, I_{S1} = 1V$

ipotesi 2: Q_1 in saturazione

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

$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2$ $\left(\text{con } K_1 = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox} \frac{W_1}{L_1} = \frac{1mA}{V^2}\right) \rightarrow V_{GS1} = V_{T1} \cancel{\pm} \sqrt{\frac{I_{D1}}{K_1}} = 2V > V_{T1}$

$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 5.97V > V_{GS1} - V_{T1} = 1V \longrightarrow$ ipotesi 2 verificata

$V_{G1} = V_{S1} + V_{GS1} = 3V$

$I_{R13} = \frac{V_{G1}}{R_1 // R_3} = 0.1\ mA$ (in particolare $I_{R13} = I_{R_1} + I_{R_3}$ con $I_{R_1} = \frac{V_{G1}}{R_1} = 75\mu A$ e $I_{R_3} = \frac{V_{G1}}{R_3} = 25\mu A$)

$I_{R_2} = I_{R13} = 0.1\ mA$

$R_2 = \frac{V_{CC} - V_{G1}}{I_{R_2}} = 70K\Omega$

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

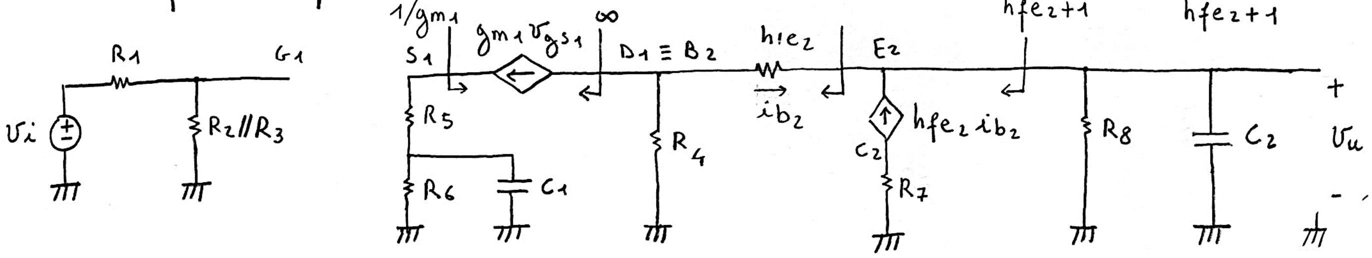
3) $R_2 = 100\,K\Omega$

$g_{m1} = 2\,\dfrac{mA}{V}$

$h_{fe2} = 200$

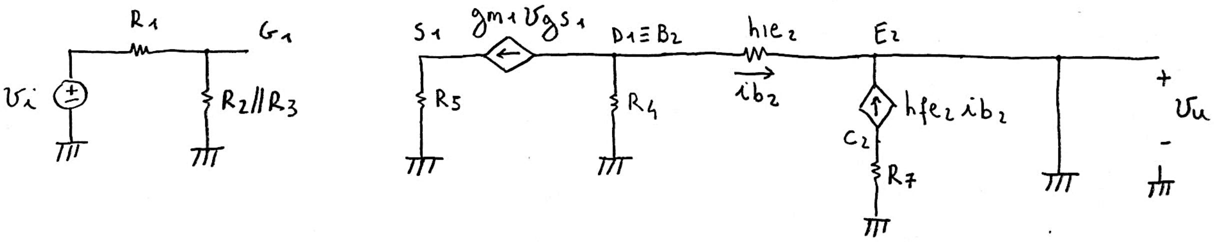
$h_{ie2} = 6\,K\Omega$

Circuito equivalente per le variazioni:



2 condensatori, nessuna maglia impropria → 2 poli

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

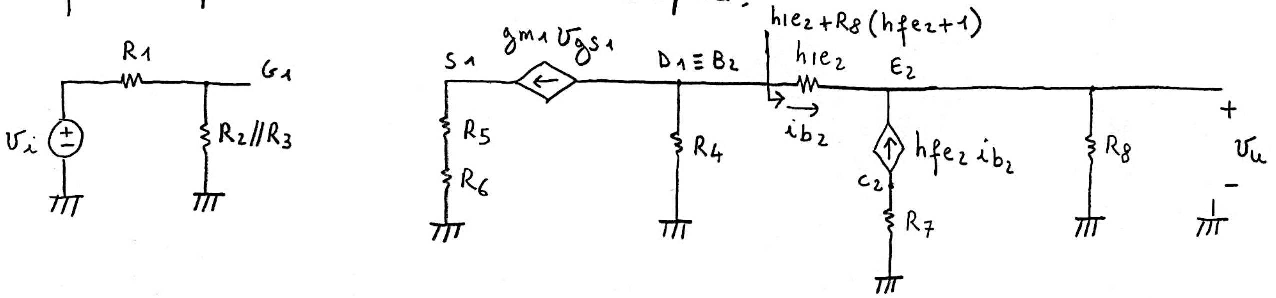


essendo v_u in parallelo a un cortocircuito, $v_u = 0 \rightarrow A_v(\infty) = \dfrac{v_u}{v_i} = 0$;

$A_v(\infty) = 0 \rightarrow$ numero zeri = (numero poli) − (numero dei condensatori che, indipendentemente da cosa fanno gli altri condensatori, portano a zero la tensione di uscita per $\omega \to \infty$) = $2 - 1 = 1$;

infatti C_2 introduce uno zero all'infinito (perché v_u va a zero quando $\dfrac{1}{C_2 s} = 0 \rightarrow s = \infty$) cioè (detto in modo equivalente) non introduce uno zero;

per riuscire a trovare la costante moltiplicativa della funzione di trasferimento allora proviamo a calcolare $A_v(0)$ (cioè il guadagno per frequenza tendente a zero), considerando il circuito equivalente per le variazioni con C_1 e C_2 aperti:



$v_u = R_8 (h_{fe2}+1)\, i_{b2}$

$i_{b2} = -g_{m1} v_{gs1} \dfrac{R_4}{R_4 + h_{ie2} + R_8(h_{fe2}+1)}$ (partizione della corrente $-g_{m1} v_{gs1}$ tra R_4 e $h_{ie2} + R_8(h_{fe2}+1)$) *

$v_{gs1} = v_{g1} - v_{s1} = v_{g1} - g_{m1} v_{gs1} (R_5 + R_6) \rightarrow v_{gs1}(1 + g_{m1}(R_5+R_6)) = v_{g1} \rightarrow$

$v_{gs1} = \dfrac{v_{g1}}{1 + g_{m1}(R_5+R_6)}$

$v_{g1} = v_i \dfrac{R_2//R_3}{R_1 + (R_2//R_3)}$

$A_v(0) = \dfrac{v_u}{v_i} = -R_8 (h_{fe2}+1)\, g_{m1} \dfrac{R_4}{R_4 + h_{ie2} + R_8(h_{fe2}+1)} \dfrac{1}{1 + g_{m1}(R_5+R_6)} \dfrac{R_2//R_3}{R_1 + (R_2//R_3)} =$

$= -1.1416$ (negativo, come è giusto che sia dato che si tratta di uno stadio a source comune, invertente, e di uno stadio a collettore comune, non invertente, in cascata)

$|A_v(0)|_{dB} = 1.1504\ dB$

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

$R_{VC1} = R_6 // \left(R_5 + \frac{1}{g_{m1}}\right) = 333.\bar{3}\ \Omega$

$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 150\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 23.873\ Hz$

la v_u si annulla per la s per cui $R_6 // \frac{1}{C_1 s} = \infty$ (e quindi $Z_{S1} = R_5 + \left(R_6 // \frac{1}{C_1 s}\right) = \infty$) perché in tale situazione $v_{gs1} = v_{g1} - v_{s1} = v_{g1} - Z_{S1}\, g_{m1} v_{gs1} \rightarrow v_{gs1}(1 + Z_{S1} g_{m1}) = v_{g1} \rightarrow$

$v_{gs1} = \frac{v_{g1}}{1 + Z_{S1} g_m}$ che per $Z_{S1} \rightarrow \infty$ va a zero, portando così a zero la i_{b2} e quindi v_u

$R_6 // \frac{1}{C_1 s} = \frac{R_6 \frac{1}{C_1 s}}{R_6 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_6}{1 + R_6 C_1 s} = \infty \rightarrow 1 + R_6 C_1 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{R_6 C_1} \rightarrow \omega_{Z1} = \frac{1}{R_6 C_1} =$

$= 100\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{Z1} = \frac{\omega_{Z1}}{2\pi} = 15.9155\ Hz$

$R_{VC2} = R_8 // \left(\frac{h_{ie2} + R_4 // \infty}{h_{fe2} + 1}\right) = R_8 // \left(\frac{h_{ie2} + R_4}{h_{fe2} + 1}\right) = 44.3016\ \Omega$

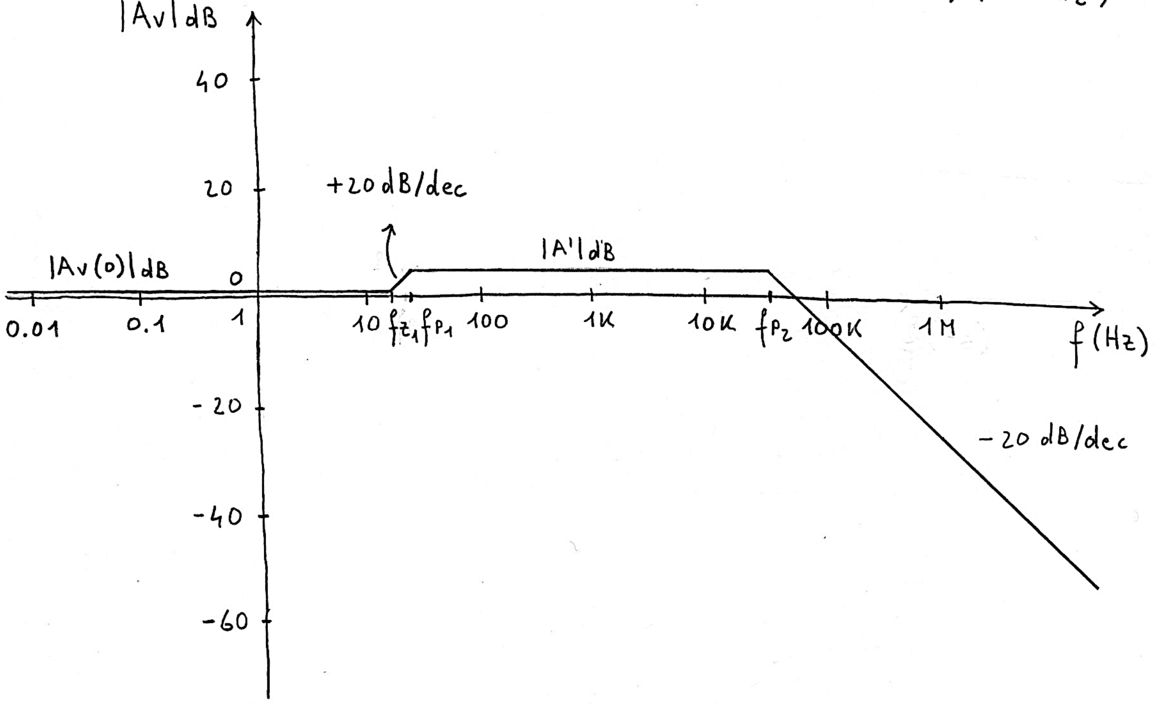
$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{VC2}} = 225'725.68\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 35925.36\ Hz$

La funzione di trasferimento è

$$A_v(s) = K \frac{s + \omega_{Z1}}{(s + \omega_{P1})(s + \omega_{P2})}$$

per $s = 0$ abbiamo che $A_v(0) = K \frac{\omega_{Z1}}{\omega_{P1}\omega_{P2}} \rightarrow K = A_v(0) \frac{\omega_{P1}\omega_{P2}}{\omega_{Z1}}$, per cui

$$A_v(s) = A_v(0) \frac{\omega_{P1}\omega_{P2}}{\omega_{Z1}} \frac{s + \omega_{Z1}}{(s + \omega_{P1})(s + \omega_{P2})} = A_v(0) \frac{1 + \frac{s}{\omega_{Z1}}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)}$$



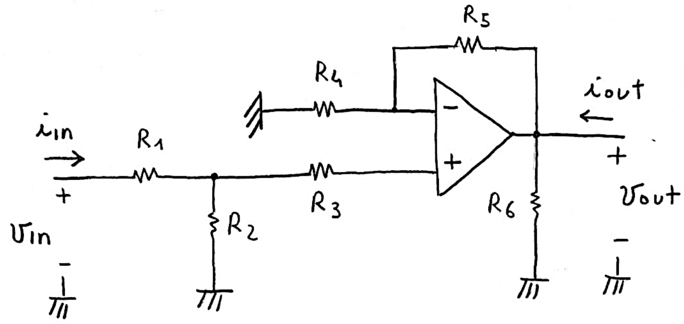
$A' = A_v(0) \frac{f_{P1}}{f_{Z1}} = 1.7124 \rightarrow |A'|_{dB} = 4.6721\ dB$

* oppure, facendo l'equilibrio delle tensioni alla maglia che comprende R_4, h_{ie2} e R_8:

$R_4(g_{m1} v_{gs1} + i_{b2}) + h_{ie2} i_{b2} + R_8 (h_{fe2} + 1) i_{b2} = 0 \rightarrow i_{b2}(R_4 + h_{ie2} + R_8(h_{fe2} + 1)) = -g_{m1} v_{gs1} R_4 \rightarrow$

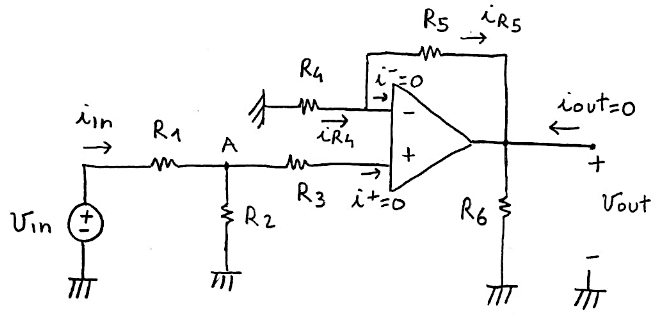
$i_{b2} = -g_{m1} v_{gs1} \frac{R_4}{R_4 + h_{ie2} + R_8(h_{fe2} + 1)}$

4)



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

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



per il c.c.v. $i^- = 0 \rightarrow i_{R4} = i_{R5}$

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

$v^- = v^+$

essendo $i^+ = 0$, R_1 e R_2 sono in serie $\rightarrow$

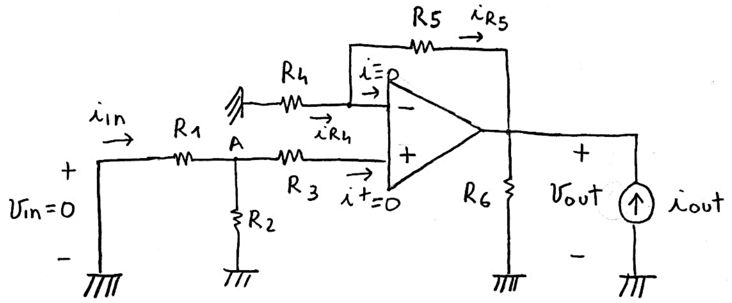
$v_A = v_{in} \dfrac{R_2}{R_1+R_2} = v^+ = v^-$ (perché non c'è caduta su R_3)

$$i_{R4} = \frac{0 - v^-}{R_4} = -\frac{v^+}{R_4} = i_{R5} \rightarrow v_{out} = v^- - R_5\, i_{R5} = v^+ + \frac{R_5}{R_4} v^+ = \underbrace{\left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right)}_{\text{guadagno dell'amplificatore non invertente}} v^+ =$$

$$= \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{R_2}{R_1+R_2}\, v_{in} \rightarrow f_f = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

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

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



per il c.c.v. $i^- = 0 \rightarrow i_{R4} = i_{R5}$

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

$v^- = v^+$

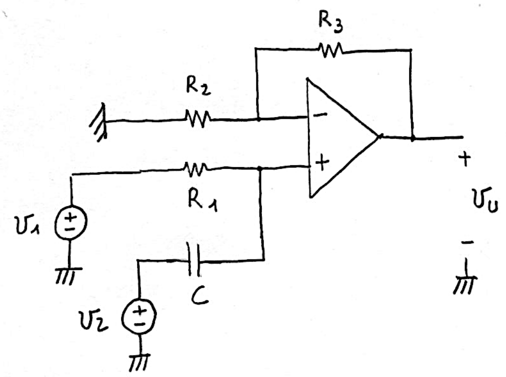
essendo $i^+ = 0$, R_1 e R_2 sono in serie $\rightarrow$

$i_{in} = \dfrac{0}{R_1+R_2} = 0 \rightarrow f_r = \dfrac{i_{in}}{i_{out}} = 0$

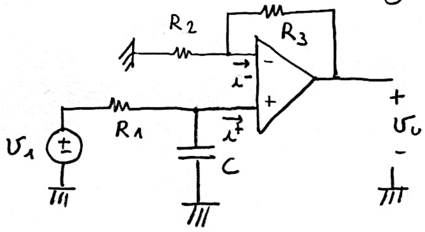
$v_A = R_2\, i_{in} = 0 = v^+ = v^- \rightarrow$

$$i_{R4} = \frac{0-0}{R_4} = 0 = i_{R5} \rightarrow v_{out} = v^- - R_5\, i_{R5} = 0 - R_5 \cdot 0 = 0 \rightarrow f_o = \frac{v_{out}}{i_{out}} = 0$$

5)



usando la sovrapposizione degli effetti, quando agisce v_1 con v_2 disattivato abbiamo:

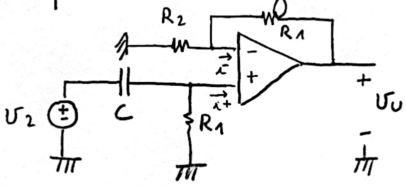


per il c.c.v $i^+=0 \rightarrow v^+ = \dfrac{\frac{1}{CS}}{R_1 + \frac{1}{CS}} v_1 = \dfrac{1}{1+R_1CS} v_1$

tra v^+ e v_u c'è un amplificatore non invertente che guadagna $1+\dfrac{R_3}{R_2} \rightarrow$

$$v_u^{(1)} = \left(1+\frac{R_3}{R_2}\right)\frac{1}{1+R_1CS} v_1$$

quando invece agisce v_2 con v_1 disattivato abbiamo:



per il c.c.v $i^+=0 \rightarrow v^+ = \dfrac{R_1}{R_1+\frac{1}{CS}} v_2 = \dfrac{R_1CS}{1+R_1CS} v_2$

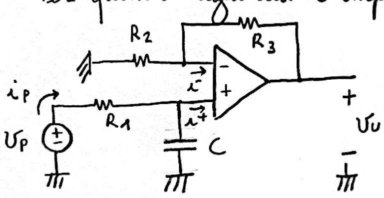
tra v^+ e v_u c'è un amplificatore non invertente che guadagna $1+\dfrac{R_3}{R_2} \rightarrow$

$$v_u^{(2)} = \left(1+\frac{R_3}{R_2}\right)\frac{R_1CS}{1+R_1CS} v_2$$

quindi complessivamente in uscita abbiamo

$$v_u = v_u^{(1)} + v_u^{(2)} = \left(1+\frac{R_3}{R_2}\right)\frac{v_1 + R_1CS\, v_2}{1+R_1CS}$$

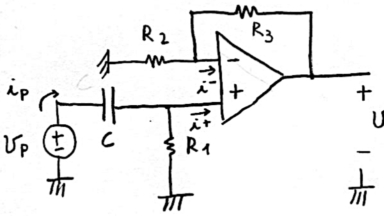
Per quanto riguarda l'impedenza vista tra i terminali di v_1 (con v_2 disattivato) abbiamo:



per il c.c.v. $i^+=0 \rightarrow R_1$ e C sono in serie e

$i_P = \dfrac{v_P}{R_1+\frac{1}{CS}} \rightarrow Z_{v_1} = \dfrac{v_P}{i_P} = R_1 + \dfrac{1}{CS}$

Per quanto riguarda l'impedenza vista tra i terminali di v_2 (con v_1 disattivato) abbiamo:



per il c.c.v. $i^+=0 \rightarrow C$ e R_1 sono in serie e

$i_P = \dfrac{v_P}{\frac{1}{CS}+R_1} \rightarrow Z_{v_2} = \dfrac{v_P}{i_P} = \dfrac{1}{CS} + R_1 = Z_{v_1}$