

Scheda A19_05

Data: 7 giugno 2019

Cognome

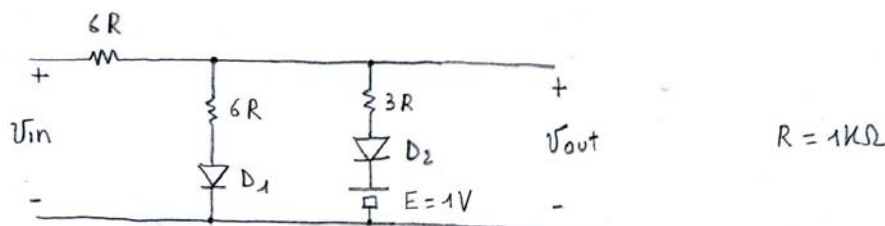
Nome

Matricola

ESERCIZIO N°1

6 punti (4)

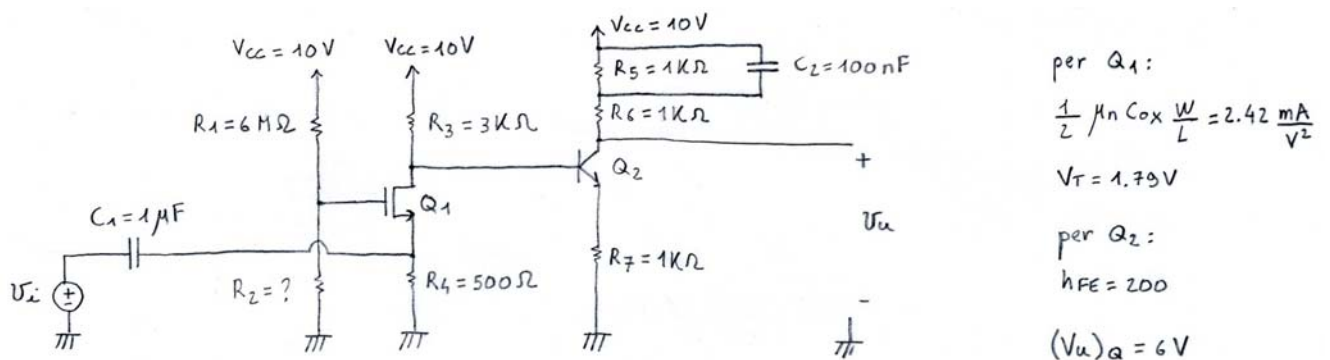
Si disegni, per v_{in} compresa tra -6 V e +6 V, la caratteristica ingresso/uscita del circuito rappresentato in figura. Si specifichi lo stato dei due diodi, al variare di v_{in} tra -6 V e +6 V (la verifica formale di tale stato non è esplicitamente richiesta). Si considerino tali diodi ideali.



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 di uscita a riposo è pari a 6 V, si determini 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.



ESERCIZIO N°3

7.5 punti (4)

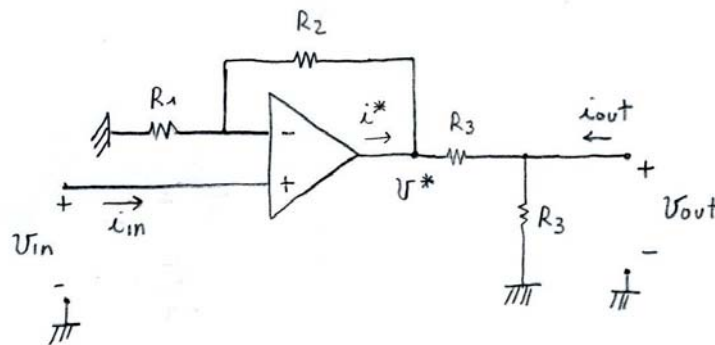
Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_2 = 4.5 \text{ M}\Omega$. Considerando per Q_1 : $g_m = 5 \text{ mA/V}$ e per Q_2 : $h_{ie} = 5 \text{ K}\Omega$ e $h_{fe} = 250$, se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s) = v_o/v_i$ (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa). Il diagramma di Bode non è richiesto.

ESERCIZIO N°4

6 punti (4)

Si ricavano i parametri f per il quadripolo riportato nella seguente figura (le grandezze sulla porta di ingresso sono indicate con i_{in} e v_{in} , le grandezze sulla porta di uscita sono indicate con i_{out} e v_{out}). Si consideri l'amplificatore operazionale ideale.

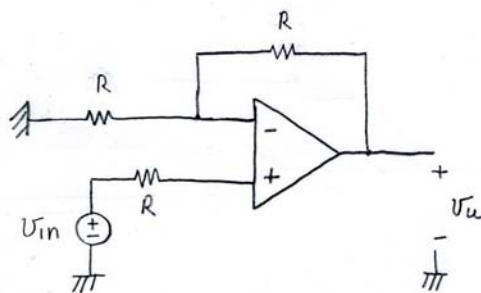
[Per il calcolo di f_o , si ricordi che il cortocircuito virtuale non fornisce alcuna indicazione sul valore della corrente i^* in uscita dall'amplificatore operazionale; il valore di tale corrente non può quindi essere sfruttato nei calcoli. Si consiglia invece come primo passo di valutare il valore della tensione v^* sfruttando (esplicitamente o implicitamente) il cortocircuito virtuale.]



ESERCIZIO N°5

6.5 punti (4)

Ricavare il massimo sbilanciamento in uscita dal circuito mostrato in figura. Le specifiche sui generatori di sbilanciamento dell'amplificatore operazionale sono indicate a fianco della figura. A parte la presenza dei generatori di sbilanciamento, si consideri l'amplificatore operazionale ideale.



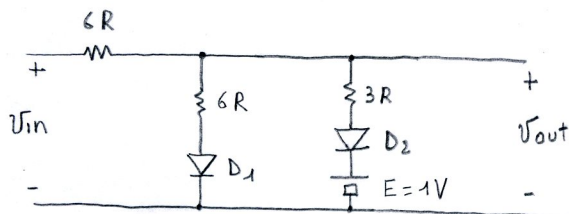
$$R = 1\text{ k}\Omega$$

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

$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 100\text{ nA}$$

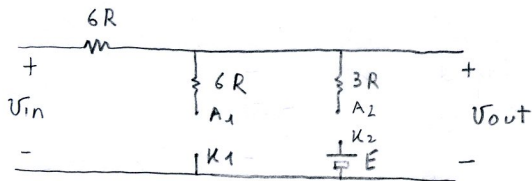
$$|I_{io}|_{\max} = |I_1 - I_2|_{\max} = 20\text{ nA}$$

1)



$$R = 1\text{K}\Omega$$

per $V_{in} < 0$ D_1 e D_2 sono interdetti, quindi il circuito diventa:

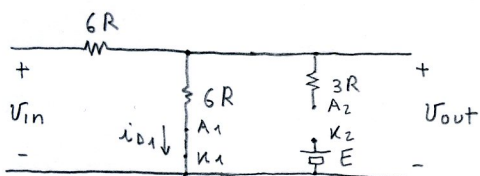


$$V_{out} = V_{in} \quad (\text{perché nella resistenza } 6R \text{ non passa corrente})$$

$$\text{verifiche: } V_{AK1} = V_{in} < 0 \quad \text{perché } V_{in} < 0$$

$$V_{AK2} = V_{in} - E < 0 \quad \text{perché } V_{in} < 1V$$

per $0 < V_{in} < 2V$ D_1 conduce mentre D_2 è interdetto, quindi il circuito diventa:

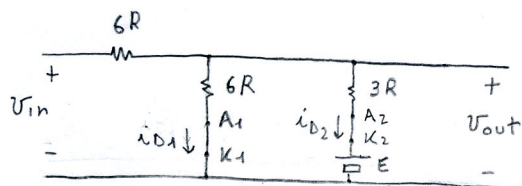


$$V_{out} = V_{in} \frac{6R}{6R + 6R} = \frac{V_{in}}{2}$$

$$\text{verifiche: } i_{D1} = \frac{V_{in}}{6R + 6R} = \frac{V_{in}}{12R} > 0 \quad \text{perché } V_{in} > 0$$

$$V_{AK2} = V_{out} - E = \frac{V_{in}}{2} - E < 0 \quad \text{perché } V_{in} < 2E = 2V$$

per $V_{in} > 2V$ D_1 e D_2 conducono, quindi il circuito diventa:



$$\left(6R // 3R = \frac{6R \cdot 3R}{6R + 3R} = \frac{18R^2}{9R} = 2R \right)$$

usando il principio di sovrapposizione degli effetti (in realtà per determinare la pendenza della caratteristica ingresso-uscita basterebbe derivare il contributo della sola V_{in})

$$V_{out} = V_{in} \frac{6R // 3R}{6R + (6R // 3R)} + E \frac{6R // 6R}{3R + (6R // 6R)} =$$

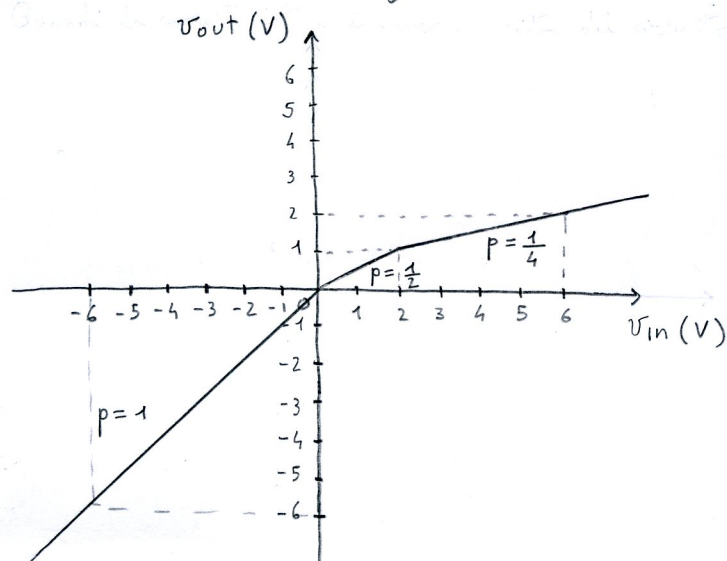
$$= V_{in} \frac{2R}{6R + 2R} + E \frac{3R}{3R + 3R} = \frac{V_{in}}{4} + \frac{E}{2} = \frac{V_{in}}{4} + 0.5V$$

$$\text{verifiche: } i_{D1} = \frac{V_{out}}{6R} = \frac{1}{6R} \left(\frac{V_{in}}{4} + 0.5V \right) > 0 \quad \text{perché } V_{in} > -2V$$

$$i_{D2} = \frac{V_{out} - E}{3R} = \frac{1}{3R} \left(\frac{V_{in}}{4} + 0.5V - 1V \right) =$$

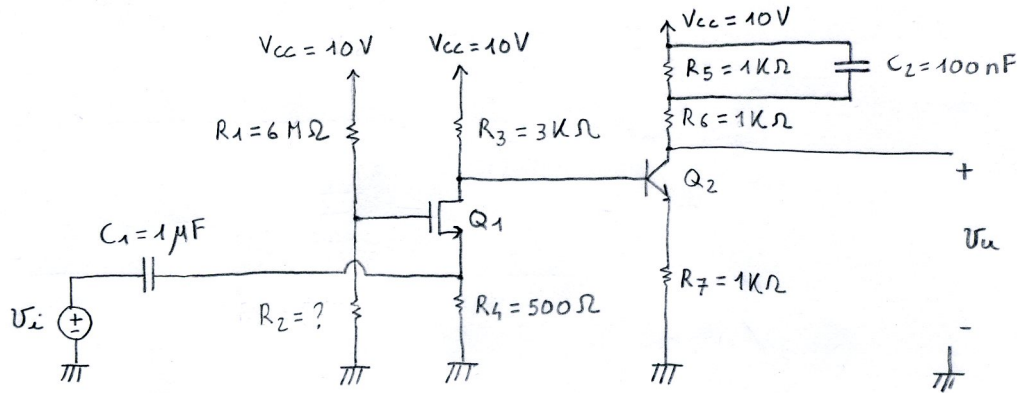
$$= \frac{1}{3R} \left(\frac{V_{in}}{4} - 0.5V \right) \quad \text{perché } V_{in} > 2V$$

Quindi la caratteristica ingresso-uscita del circuito a vuoto è la seguente:



(p indica la pendenza)

2)

per Q_1 :

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 2.42 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

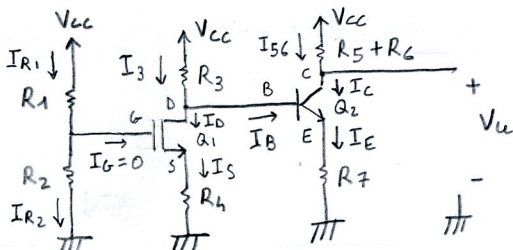
$$V_T = 1.79 \text{ V}$$

per Q_2 :

$$h_{FE} = 200$$

$$(V_u)_Q = 6 \text{ V}$$

In continua abbiamo:



$$I_{SC} = \frac{V_{CC} - V_u}{R_5 + R_6} = 2 \text{ mA} = I_C$$

ipotesi 1: Q_2 in zona attiva diretta

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

$$I_E = I_B (h_{FE} + 1) = 2.01 \text{ mA}$$

$$V_C = V_u = 6 \text{ V}$$

$$V_E = R_7 I_E = 2.01 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 3.99 \text{ V} > V_{CE_{sat}} \approx 0.1 \text{ V} \rightarrow \text{ipotesi 1 verificata}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 2.71 \text{ V} = V_D$$

$$I_3 = \frac{V_{CC} - V_B}{R_3} = 2.43 \text{ mA}$$

$$I_D = I_3 - I_B = 2.42 \text{ mA}$$

$$I_G = 0 \rightarrow I_S = I_D = 2.42 \text{ mA}$$

$$V_S = R_4 I_S = 1.21 \text{ V}$$

ipotesi 2: Q_1 in saturazione

$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 \quad \text{con } K = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 2.42 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

$$V_{GS} = V_T + \sqrt{\frac{I_D}{K}} = 2.79 \text{ V} > V_T = 1.79 \text{ V}$$

si considera il segno + perché Q_1 è un nmos e un nmos conduce se $V_{GS} > V_T$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 1.5 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 1 \text{ V} \rightarrow \text{ipotesi 2 verificata}$$

$$V_G = V_{GS} + V_S = 4 \text{ V}$$

$$I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_G}{R_1} = 1 \mu\text{A}$$

$$I_G = 0 \rightarrow I_{R2} = I_{R1} = 1 \mu\text{A}$$

$$R_2 = \frac{V_G}{I_{R1}} = 4 \text{ M}\Omega$$

[NOTA: forse stata data già nel testo R2 e forse stato richiesto il punto di lavoro (inclusa V_u , incognito) avvenire proceduto così:

$$V_G = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4V$$

ipotesi 1: Q_1 in saturazione

$$\begin{cases} I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 \\ V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_4 I_D \end{cases} \rightarrow V_{GS} = V_G - R_4 K (V_{GS} - V_T)^2 \rightarrow V_{GS} = V_G - R_4 K V_{GS}^2 - R_4 K V_T^2 + 2 R_4 K V_T V_{GS} \rightarrow R_4 K V_{GS}^2 + (1 - 2 R_4 K V_T) V_{GS} + (R_4 K V_T^2 - V_G) = 0$$

$$\begin{cases} V_{GS} = V_G - V_S = V_G - R_4 I_D \end{cases}$$

$$\uparrow$$

$$(I_G = 0 \rightarrow I_S = I_D)$$

$$(1.21 \text{ V}^{-1}) V_{GS}^2 - 3.3318 V_{GS} - 0.123039 \text{ V} = 0$$

$$V_{GS} = \begin{cases} -0.03646 \text{ V} < V_T & \text{da scartare} \\ 2.79 \text{ V} > V_T & \text{da tenere} \end{cases}$$

$$V_S = V_G - V_{GS} = 1.21 \text{ V}$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_4} = 2.42 \text{ mA} = I_D$$

↑
($I_G = 0$)

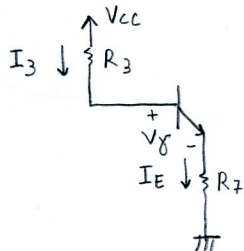
a questo punto, nota I_D , per trovare V_D avremmo dovuto scrivere un'equazione in V_D imponendo l'equilibrio delle tensioni alla maglia che include V_{CC} , R_3 , V_{BE} , R_7 in questo modo:

$$I_3 = \frac{V_{CC} - V_D}{R_3}$$

$$I_B = I_3 - I_D = \frac{V_{CC} - V_D}{R_3} - I_D$$

ipotesi 2: Q_2 in zona attiva diretto

$$I_E = (h_{FE} + 1)I_B = (h_{FE} + 1) \left(\frac{V_{CC} - V_D}{R_3} - I_D \right)$$



$$V_{CC} - R_3 I_3 - V_{\gamma} - R_7 I_E = 0 \rightarrow$$

$$V_{CC} - R_3 \left(\frac{V_{CC} - V_D}{R_3} \right) - V_{\gamma} - R_7 (h_{FE} + 1) \left(\frac{V_{CC} - V_D}{R_3} - I_D \right) = 0 \rightarrow$$

$$\cancel{V_{CC}} - \cancel{V_{CC}} + V_D - V_Y - \frac{R_7}{R_3} (h_{FE} + 1) V_{CC} + \frac{R_7}{R_3} (h_{FE} + 1) V_D + R_7 (h_{FE} + 1) I_D = 0 \rightarrow$$

$$V_D \left(1 + \frac{R_7}{R_3} (h_{FE} + 1) \right) = V_{\gamma} + \frac{R_7}{R_3} (h_{FE} + 1) V_{CC} - R_7 (h_{FE} + 1) I_D \rightarrow$$

$$V_D = 2.71 \text{ V} = V_B$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 1.5 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 1 \text{ V}$$

*
↓
ipotesi 1 verificata

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_D}{R_3} - I_D = 10 \mu A > 0$$

$$I_C = h_{FE} I_B = 2 \text{ mA}$$

$$I_E = (h_{FE} + 1) I_B = 2.01 \text{ mA}$$

$$V_c = V_{cc} - (R_5 + R_6) I_c = 6 \text{ V} = V_u$$

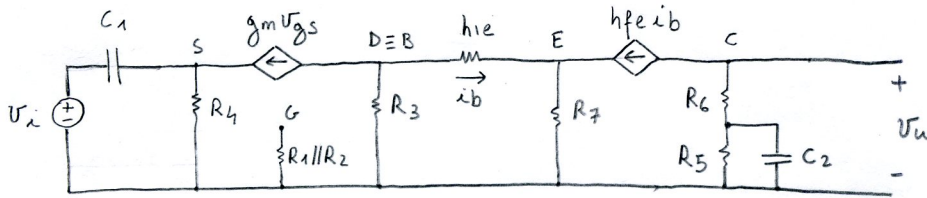
$$V_E = R_7 I_E = 2.01 \text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 3,99 \text{ V} > V_{CEsat} \approx 0,1 \text{ V} \rightarrow \text{ipotesi 2 verificata}$$

1

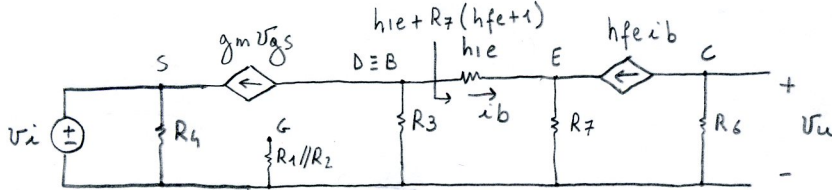
3) Ora consideriamo $g_m = 5 \frac{mA}{V}$, $h_{ie} = 5 k\Omega$, $h_{fe} = 250$, $R_2 = 4.5 M\Omega$

Circuito per le variazioni:



2 condensatori, nessuna maglia impropria $\rightarrow$ 2 poli

calcoliamo $A_v(\infty)$ chiudendo i due condensatori



$$v_u = -R_6 h_{fe} i_b$$

$$i_b = -g_m v_{gs} \frac{R_3}{R_3 + h_{ie} + R_7(h_{fe} + 1)} \quad (\text{partitore della corrente } -g_m v_{gs} \text{ tra } R_3 \text{ e } h_{ie} + R_7(h_{fe} + 1))$$

$$v_{gs} = v_g - v_s = -v_s = -v_i$$

$v_g = 0$

$$A_v(\infty) = \frac{v_u}{v_i} = -R_6 h_{fe} g_m \frac{R_3}{R_3 + h_{ie} + R_7(h_{fe} + 1)} = -14.47876$$

(negativo, come doveva essere visto che si tratta della cascata di uno stadio a base comune, non invertente, e di uno stadio a emettitore comune, invertente)

$$|A_v(\infty)|_{dB} = 23.21463 \text{ dB}$$

$$A_v(\infty) \neq 0 \rightarrow \text{numero zeri} = \text{numero poli} = 2$$

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

$$R_{V_{C1}} = R_4 \parallel \frac{1}{g_m} = 142.85714 \Omega$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{C_1 R_{V_{C1}}} = 7000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{p1} = \frac{\omega_{p1}}{2\pi} = 1114.0846 \text{ Hz}$$

inserendo C_1 in serie sull'unico percorso che porta sull'uscita l'effetto del segnale v_i , la v_u va a 0 per la s per cui $\frac{1}{C_1 s} = \infty \rightarrow s = 0 \rightarrow \omega_{z1} = 0 \rightarrow f_{z1} = 0$

$$R_{V_{C2}} = R_5 \parallel (R_6 + \infty) = R_5 \parallel \infty = R_5 = 1 k\Omega$$

$\uparrow$
resistenza vista dal collettore

$$\omega_{p2} = \frac{1}{C_2 R_{V_{C2}}} = 10000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{p2} = \frac{\omega_{p2}}{2\pi} = 1591.5494 \text{ Hz}$$

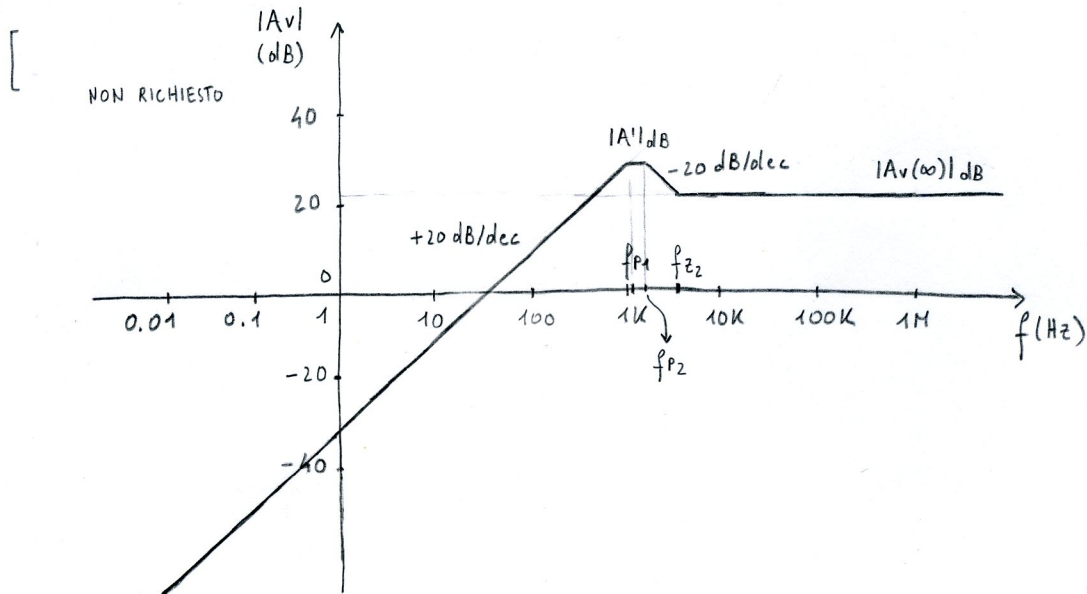
la v_u va a 0 per la s per cui il blocco $R_6 + (R_5 \parallel \frac{1}{C_2 s})$ diventa un cortocircuito

$$R_6 + (R_5 \parallel \frac{1}{C_2 s}) = 0 \rightarrow R_6 + \frac{R_5 \frac{1}{C_2 s}}{R_5 + \frac{1}{C_2 s}} = 0 \rightarrow R_6 + \frac{R_5}{1 + R_5 C_2 s} = \frac{R_5 + R_6 + R_5 R_6 C_2 s}{1 + R_5 C_2 s} = 0 \rightarrow$$

$$R_5 + R_6 + R_5 R_6 C_2 s = 0 \rightarrow s = -\frac{R_5 + R_6}{R_5 R_6 C_2} = -\frac{1}{C_2 \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}} = -\frac{1}{C_2 (R_5 \parallel R_6)} \rightarrow$$

$$\omega_{z2} = \frac{1}{C_2 (R_5 \parallel R_6)} = 20000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{z2} = \frac{\omega_{z2}}{2\pi} = 3183.0989 \text{ Hz}$$

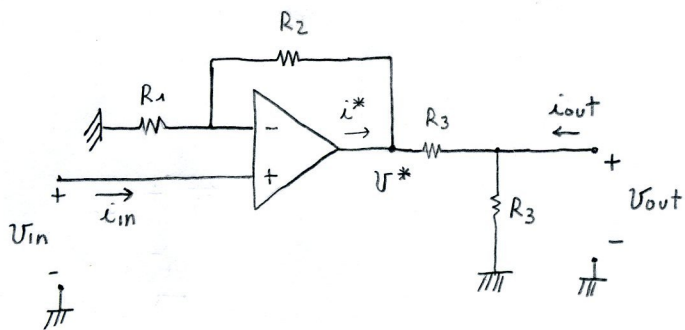
$$A_v(s) = A_v(\infty) \frac{s(s+\omega_{z2})}{(s+\omega_{p1})(s+\omega_{p2})}$$



$$|A'| = |A_v(\infty)| \left| \frac{f_{z2}}{f_{p2}} \right| = 28.9575$$

$$|A'|_{dB} = 29.235 \text{ dB}$$

4)



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

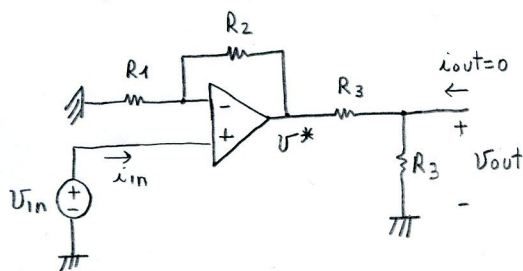
$$f_f = \frac{V_{out}}{V_{in}} \Big|_{i_{out}=0}$$

$$f_o = \frac{V_{out}}{i_{out}} \Big|_{V_{in}=0}$$

$$f_i = \frac{i_{in}}{V_{in}} \Big|_{i_{out}=0}$$

$$f_r = \frac{i_{in}}{i_{out}} \Big|_{V_{in}=0}$$

per calcolare f_f e f_i imponiamo $i_{out}=0$ (cioè teniamo la porta di uscita aperta)



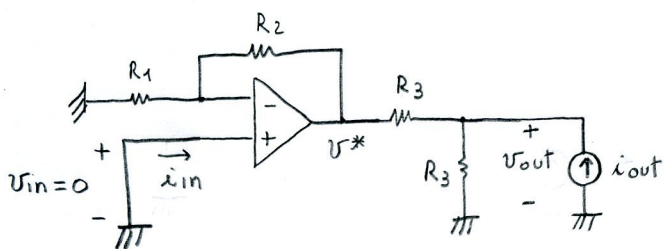
per il c.c.v. $i_{in}=0 \rightarrow f_i = \frac{i_{in}}{V_{in}} = 0$

usando il c.c.v. si trova che $V^* = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow$
 $V_{out} = V^* \frac{R_3}{R_3 + R_3} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_3 + R_3} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{2} \rightarrow$

$$f_f = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{2}$$

amplificazione dell'amplificatore non invertente

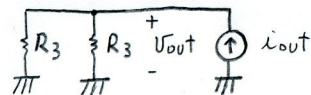
per calcolare f_o e f_r imponiamo $V_{in}=0$ (cioè cortocircuitiamo la porta di ingresso)



per il c.c.v. $i_{in}=0 \rightarrow f_r = \frac{i_{in}}{i_{out}} = 0$ (amplificazione dell'amplificatore non invertente)

usando il c.c.v. si trova che $V^* = 0 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 0 \rightarrow$

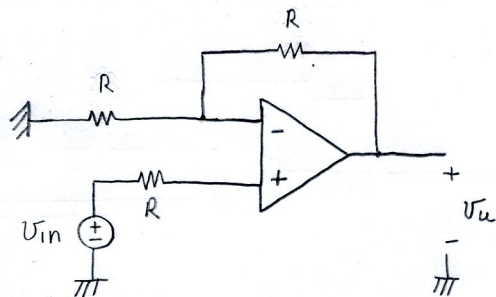
abbiamo



$$V_{out} = i_{out} (R_3 \parallel R_3) = i_{out} \frac{R_3}{2} \rightarrow f_o = \frac{V_{out}}{i_{out}} = \frac{R_3}{2}$$

[notare che il c.c.v. non ci dice nulla sul valore della corrente i^* , che quindi non va sfruttato]

5)



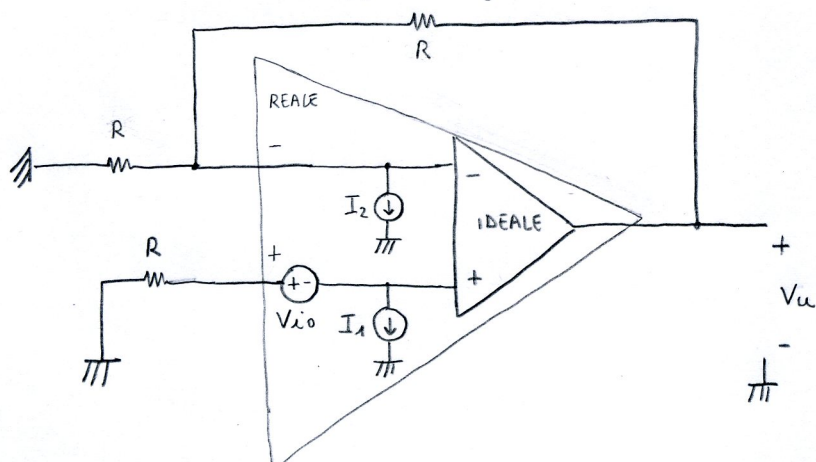
$$R = 1\text{ k}\Omega$$

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

$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 100\text{ nA}$$

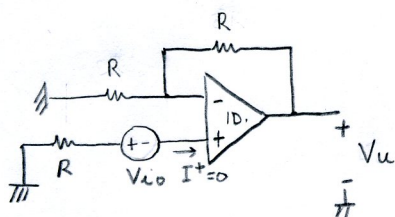
$$|I_{io}|_{\max} = |I_1 - I_2|_{\max} = 20\text{ nA}$$

considerando solo l'effetto dei generatori di offset (e disattivando quindi V_{in}) abbiamo:



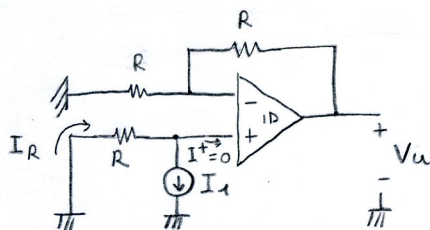
usando la sovrapposizione degli effetti:

a) effetto di V_{io}



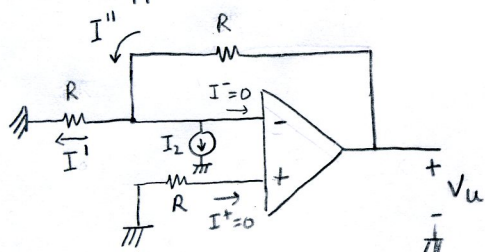
per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow$ non c'è caduta sulla R posta sull'ingresso "+" $\rightarrow V^+ = -V_{io} \rightarrow$
 $V_u = V^+ \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -V_{io} \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -2V_{io}$

b) effetto di I_1



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_R = I_1 \rightarrow V^+ = -RI_R = -RI_1 \rightarrow$
 $V_u = V^+ \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -RI_1 \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -2RI_1$

c) effetto di I_2



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow V^+ = -RI^+ = 0 \rightarrow$ per il c.c.v. $V^- = V^+ = 0$;
 per il c.c.v. $I^- = 0$; $I' = \frac{V^- - 0}{R} = \frac{0}{R} = 0$;
 $I'' = I' + I_2 + I^- = 0 + I_2 + 0 = I_2$
 $V_u = V^- + RI'' = 0 + RI_2 = RI_2$

complessivamente $V_u = -2V_{io} - 2RI_1 + RI_2$

$$\begin{cases} I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} \\ I_{io} = I_1 - I_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2I_B = I_1 + I_2 \\ I_{io} = I_1 - I_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2I_1 = 2I_B + I_{io} \\ 2I_2 = 2I_B - I_{io} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 = I_B + \frac{I_{io}}{2} \\ I_2 = I_B - \frac{I_{io}}{2} \end{cases}$$

quindi $V_u = -2V_{i0} - 2R \left(I_B + \frac{I_{i0}}{2} \right) + R \left(I_B - \frac{I_{i0}}{2} \right) = -2V_{i0} + I_B (-2R + R) + \frac{I_{i0}}{2} (-2R - R) =$
 $= -2V_{i0} - \underbrace{RI_B}_{-0.1 \text{ mV}} - \frac{3}{2} R I_{i0}$

poiché l'unico addendo il cui valore è noto ($-RI_B$) è negativo, per ottenere la V_u di modulo massimo conviene scegliere per gli altri due addendi ($-V_{i0}$ e $-\frac{3}{2} R I_{i0}$) il valore di modulo massimo ma negativo, quindi scegliere $V_{i0} = 5 \text{ mV}$ e $I_{i0} = 20 \text{ nA}$, ottenendo così

$$|V_u|_{\max} = \left| -2 \cdot 5 \text{ mV} - 0.1 \text{ mV} - \frac{3}{2} \cdot 1 \text{ k}\Omega \cdot 20 \text{ nA} \right| = \left| -10 \text{ mV} - 0.1 \text{ mV} - 0.03 \text{ mV} \right| = \left| -10.13 \text{ mV} \right| =$$

$$= 10.13 \text{ mV}$$