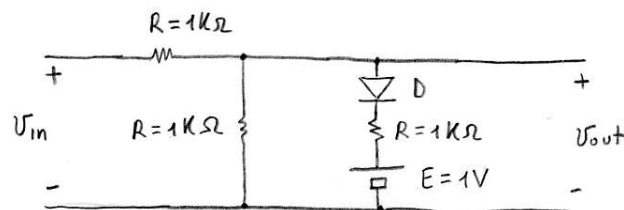


ESERCIZIO N°1

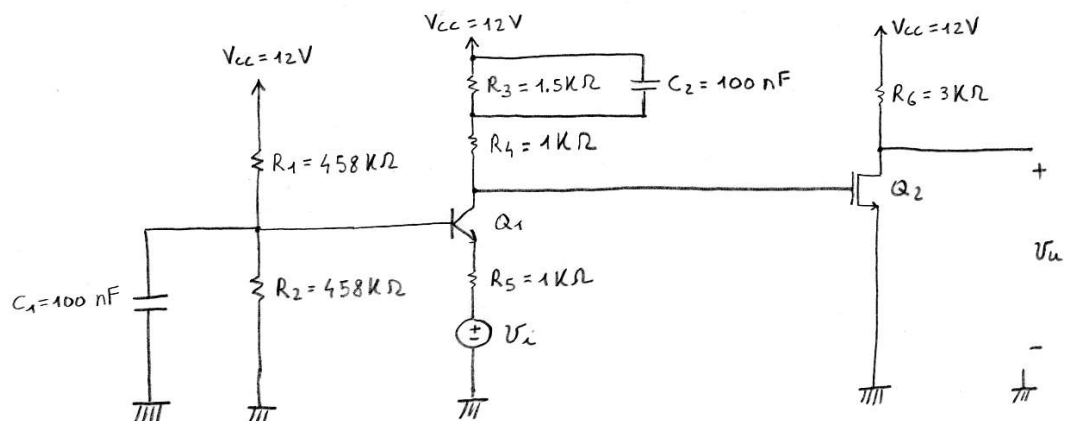
6.5 punti (4)

Per il circuito riportato in figura, si determini per quali valori di v_{in} il diodo D è interdetto e per quali invece conduce. Si disegni la caratteristica ingresso/uscita del circuito (in particolare si scrivano le pendenze dei vari tratti e le coordinate dei punti d'angolo). Nello svolgimento dell'esercizio, si supponga il diodo D ideale.

**ESERCIZIO N°2**

7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, determinare la tensione V_U a riposo e il punto di lavoro di Q_1 e Q_2 . [Nel calcolo, si consiglia di iniziare l'analisi dal punto di lavoro di Q_1 e di fare un equivalente di Thevenin di ciò che sta sulla base di Q_1].

PER Q_1 : $h_{FE} = 300$ PER Q_2 : $V_T = 2.5V$

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.5 \frac{mA}{V^2}$$

ESERCIZIO N°3

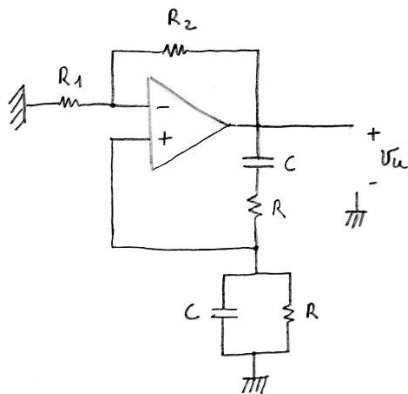
7.5 punti (4)

Si ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s) = V_u/V_i$ del circuito mostrato nell'esercizio precedente (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa). Il diagramma di Bode non è richiesto. Si considerino per Q_1 : $h_{ie} = 6 K\Omega$, $h_{fe} = 350$ e per Q_2 : $g_m = 2 mA/V$.

ESERCIZIO N°4

5.5 punti (4)

Si consideri l'oscillatore a ponte di Wien rappresentato nella parte sinistra della figura sottostante, con i valori dei componenti riportati nella parte destra della figura (notare che il valore della resistenza R_2 dipende dall'ampiezza $V_{u_{max}}$ dell'oscillazione in uscita). Per facilitare l'esercizio, nella parte sinistra della figura è riportata anche l'espressione del $\beta A(j\omega)$ del circuito (che può quindi essere usata senza doverla ricalcolare). Determinare la frequenza e l'ampiezza dell'oscillazione a regime in uscita da tale oscillatore.



$$C = 20 \text{ nF}$$

$$R = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R^* (1 - K V_{u_{max}})$$

con $V_{u_{max}}$ ampiezza dell'oscillazione in uscita

$$R^* = 3 \text{ k}\Omega$$

$$K = 0.5 \text{ V}^{-1}$$

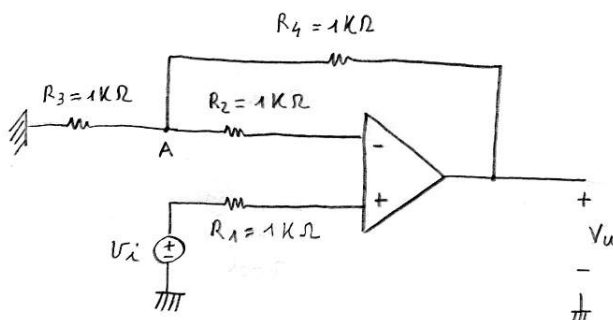
$$\beta A(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{(1 - R^2C^2\omega^2) + 3RCj\omega}$$

ESERCIZIO N°5

6.5 punti (4)

Ricavare il massimo sbilanciamento in uscita del circuito mostrato in figura. A parte la presenza dei generatori di sbilanciamento, si consideri l'amplificatore operazionale ideale.

[Si consiglia di usare il principio di sovrapposizione degli effetti. Per quanto riguarda il contributo del generatore di corrente di sbilanciamento presente sul terminale invertente dell'amplificatore operazionale, può convenire: prima valutare la conseguente tensione nel nodo A, dopodiché fare l'equilibrio delle correnti al nodo A per trovare la corrente che scorre nella resistenza R_4 , infine usare queste quantità per valutare la corrispondente $V_{u..}$]

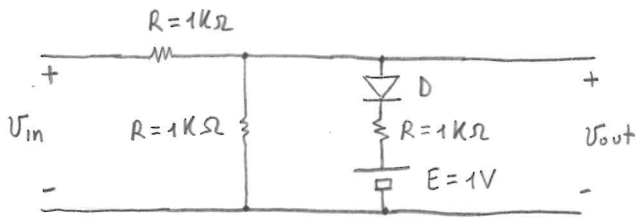


$$|V_{i'0}|_{max} = 5 \text{ mV}$$

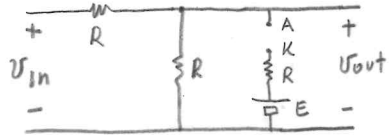
$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 100 \text{ nA}$$

$$|I_{i'0}|_{max} = 20 \text{ nA}$$

1)



Per valori bassi di V_{in} , ipotizziamo che il diodo D non conduca; quindi abbiamo



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

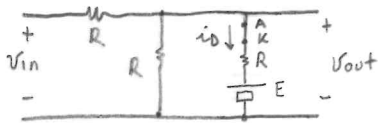
$$V_K = E \quad (\text{perché nella resistenza } R \text{ in serie con } E \text{ non scorre corrente})$$

$$\rightarrow V_{AK} = \frac{V_{in}}{2} - E$$

Perché l'ipotesi sia verificata deve essere $V_{AK} = \frac{V_{in}}{2} - E < 0 \rightarrow \frac{V_{in}}{2} < E \rightarrow V_{in} < 2E = 2V$.

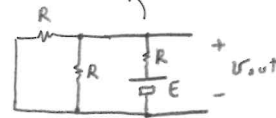
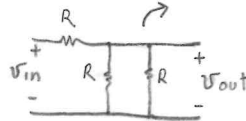
Quindi se $V_{in} < 2V$ il diodo D è interdetto e $V_{out} = \frac{V_{in}}{2}$

Se invece $V_{in} > 2V$, ipotizziamo che il diodo D conduca; quindi abbiamo:



per cui (usando la sovrapposizione degli effetti di V_{in} e E)

$$V_{out} = V_{in} \frac{R//R}{R+(R//R)} + E \frac{R//R}{R+(R//R)} = V_{in} \frac{0.5K\Omega}{1.5K\Omega} + 1V \cdot \frac{0.5K\Omega}{1.5K\Omega} =$$



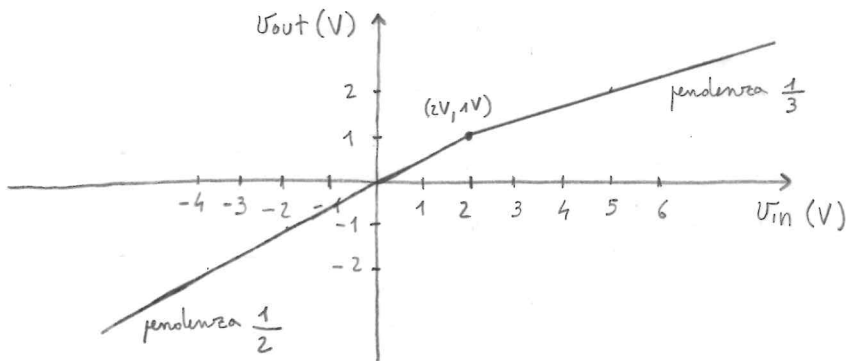
$$= \frac{1}{3} (V_{in} + 1V)$$

Perché l'ipotesi sia verificata deve essere $i_D = \frac{V_{out} - E}{R} > 0 \rightarrow V_{out} - E > 0 \rightarrow \frac{1}{3} (V_{in} + 1V) - 1V > 0 \rightarrow$

$V_{in} + 1V > 3V \rightarrow V_{in} > 2V$ (che è esattamente la condizione in cui stiamo lavorando).

Quindi se $V_{in} > 2V$ il diodo conduce e $V_{out} = \frac{1}{3} (V_{in} + 1V)$.

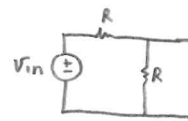
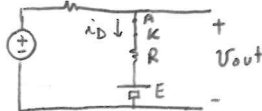
Di conseguenza, la caratteristica ingresso-uscita del circuito è



* oppure possiamo fare l'equivalente di Thevenin di questa parte del circuito:

$$R_{Th} = R//R = R/2$$

$$V_{Th} = V_{in} \frac{R}{R+R} = \frac{V_{in}}{2}$$

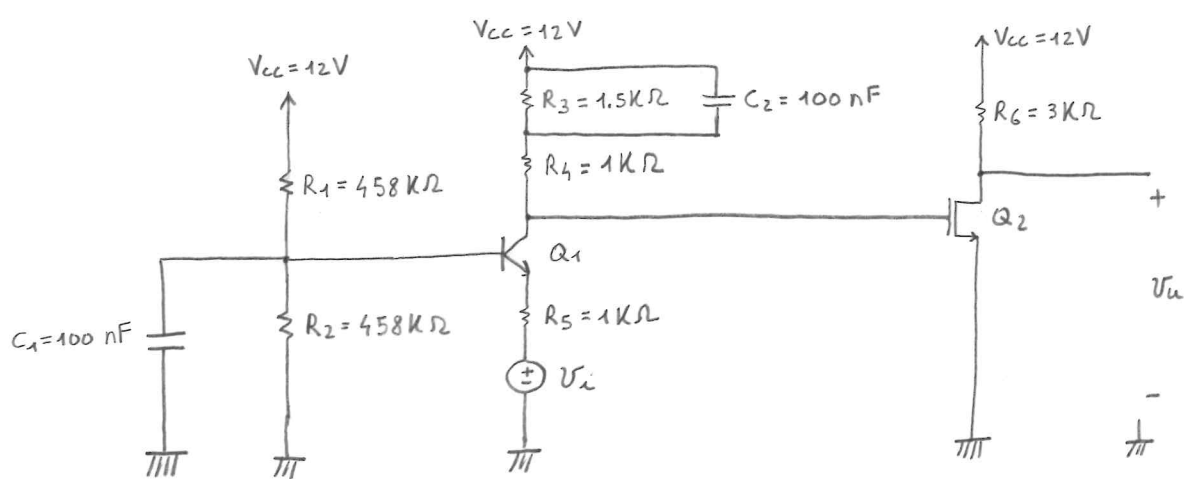


ottenendolo così:

$$\text{dal che si ricava che } i_D = \left(\frac{V_{in}}{2} - E \right) \frac{1}{\frac{R}{2} + R} = \frac{V_{in} - 2E}{2} \frac{2}{R + 2R} = \frac{V_{in} - 2E}{3R} \rightarrow$$

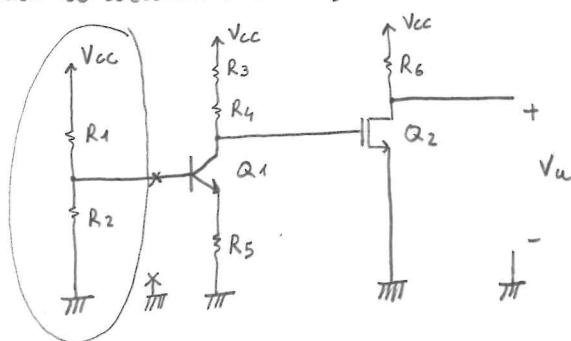
$$V_{out} = E + R i_D = E + \frac{V_{in} - 2E}{3} = \frac{3E + V_{in} - 2E}{3} = \frac{1}{3} (V_{in} + E) = \frac{1}{3} (V_{in} + 1V)$$

2)

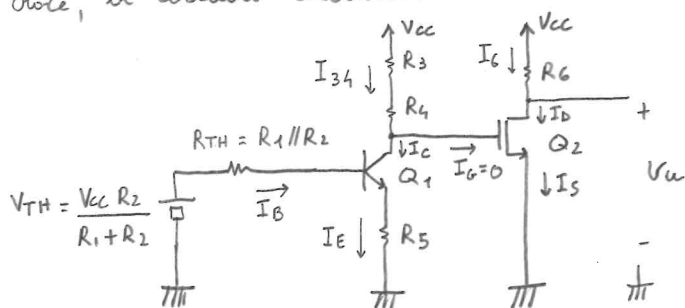
PER Q_1 : $h_{FE} = 300$ PER Q_2 : $V_T = 2.5V$

$$\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 0.5 \frac{mA}{V^2}$$

In continua il circuito diventa:



facendo l'equivalente di Thevenin (della parte evidenziata) tra i due terminali indicati con la croce, il circuito diventa:



$$V_{TH} = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6V$$

$$R_{TH} = R_1 || R_2 = 229 k\Omega$$

ipotesi 1: Q_1 in zona attiva diretta

$$\text{allora } I_C = h_{FE} I_B, \quad I_E = I_C + I_B = (h_{FE} + 1) I_B, \quad V_{BE} = V_{\gamma} = 0.7V$$

facendo l'equilibrio delle tensioni nella prima maglia a sinistra troviamo:

$$V_{TH} = R_{TH} I_B + V_{\gamma} + R_5 I_E = R_{TH} I_B + V_{\gamma} + R_5 (h_{FE} + 1) I_B \rightarrow$$

$$I_B = \frac{V_{TH} - V_{\gamma}}{R_{TH} + R_5 (h_{FE} + 1)} = 10 \mu A > 0$$

$$I_E = (h_{FE} + 1) I_B = 3.01 mA$$

$$I_C = h_{FE} I_B = 3 mA = I_{34} \quad (\text{dato che } I_G = 0)$$

$$V_E = R_5 I_E = 3.01V$$

$$V_C = V_{cc} - (R_3 + R_4) I_{34} = 4.5V = V_G$$

$$\rightarrow V_{CE} = V_C - V_E = 1.49V > V_{CE_{sat}} \approx 0.2V \rightarrow \text{ipotesi 1 verificata}$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = 3.71 \text{ V} \rightarrow (\text{risultato allo schema iniziale}) \quad I_{R2} = \frac{V_B}{R_2} = 8.1 \mu\text{A} \quad ; \quad I_{R1} = \frac{V_{CC} - V_B}{R_1} = 18.1 \mu\text{A}$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = V_G = 4.5 \text{ V} > V_T = 2.5 \text{ V}$$

ipotesi 2: Q_2 in saturazione

$$\text{allora } I_D = \frac{1}{2} \underbrace{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}_{K = 0.5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}} (V_{GS} - V_T)^2 = K (V_{GS} - V_T)^2 = 2 \text{ mA}$$

$$I_G = I_D = 2 \text{ mA}$$

$$V_u = V_{CC} - R_C I_G = 6 \text{ V} = V_D$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = V_D = 6 \text{ V} > V_{GS} - V_T = 2 \text{ V}$$

ipotesi 2 verificata

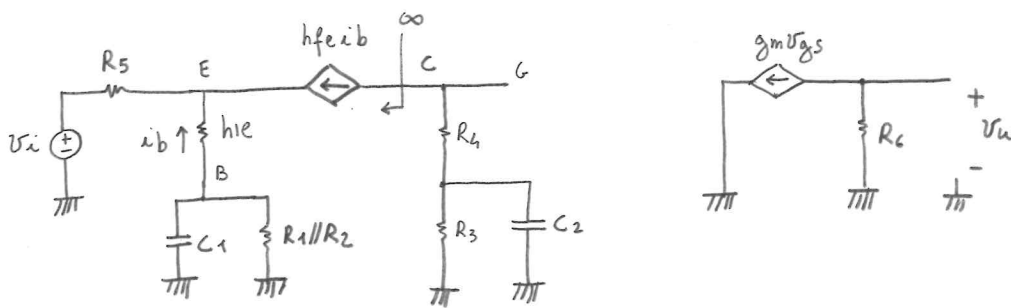
$$\left[g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \Big|_{V_{DS} = V_{DSQ}} = 2K (V_{GS} - V_T) = \frac{2 \text{ mA}}{\text{V}} \right] \quad \text{NON RICHIESTO}$$

$$3) \quad h_{ie} = 6 \text{ K}\Omega$$

$$h_{fe} = 350$$

$$g_m = \frac{2 \text{ mA}}{\text{V}}$$

Circuito equivalente per le variazioni



2 condensatori indipendenti (nessuna maglia impropria) $\rightarrow$ 2 poli

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

$$R_{VC1} = (R_1 // R_2) // (h_{ie} + R_5(h_{fe} + 1)) = 139510.239 \Omega$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 71.679 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 11.408 \text{ Hz}$$

C_1 introduce uno zero per lo s per cui $\frac{1}{C_1 s} // R_1 // R_2 = \infty$ perché in tale condizione $i_b = 0$ e quindi (non propagandosi il segnale verso l'uscita tramite $h_{fe} i_b$) $v_u = 0$

[infatti se chiamiamo $Z_B = \frac{1}{C_1 s} // R_1 // R_2$, abbiamo che $v_i = -R_5(h_{fe} + 1)i_b - (h_{ie} + Z_B)i_b \rightarrow i_b = -\frac{v_i}{R_5(h_{fe} + 1) + h_{ie} + Z_B}$, per cui $i_b = 0$ quando $Z_B = \infty$];

$$\frac{1}{C_1 s} // (R_1 // R_2) = \infty \rightarrow \frac{\frac{1}{C_1 s} (R_1 // R_2)}{\frac{1}{C_1 s} + R_1 // R_2} = \frac{R_1 // R_2}{1 + (R_1 // R_2) C_1 s} = \infty \rightarrow 1 + (R_1 // R_2) C_1 s = 0 \rightarrow$$

$$s = -\frac{1}{C_1 (R_1 // R_2)} \rightarrow \omega_{Z1} = \frac{1}{C_1 (R_1 // R_2)} = 43.668 \text{ rad/s} \rightarrow f_{Z1} = \frac{\omega_{Z1}}{2\pi} = 6.95 \text{ Hz}$$

$$R_{VC2} = R_3 // (R_4 + \infty) = R_3 = 1.5 \text{ K}\Omega$$

$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{VC2}} = 6666.6 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 1061.033 \text{ Hz}$$

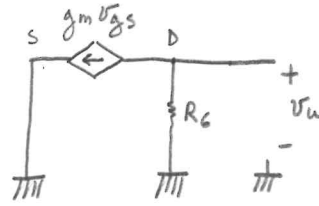
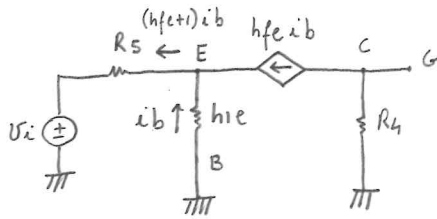
C_2 introduce uno zero per lo s per cui $R_4 + (R_3 // \frac{1}{C_2 s}) = 0$, per cui $v_g = 0 \rightarrow v_{gs} = 0 \rightarrow v_u = 0$;

$$R_4 + \left(R_3 \parallel \frac{1}{C_2 s} \right) = R_4 + \frac{R_3 \frac{1}{C_2 s}}{R_3 + \frac{1}{C_2 s}} = R_4 + \frac{R_3}{1 + R_3 C_2 s} = \frac{R_4 + R_3 R_4 C_2 s + R_3}{1 + R_3 C_2 s} = 0 \rightarrow R_3 + R_4 + R_3 R_4 C_2 s = 0 \rightarrow$$

$$s = - \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4 C_2} = - \frac{1}{\frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} C_2} = - \frac{1}{(R_3 \parallel R_4) C_2} \rightarrow \omega_{z2} = \frac{1}{C_2 (R_3 \parallel R_4)} = 16'666, \bar{6} \text{ rad/s} \rightarrow f_{z2} = \frac{\omega_{z2}}{2\pi} =$$

$$= 2652,58 \text{ Hz}$$

Per calcolare $A_v(\infty)$ chiudiamo i condensatori:



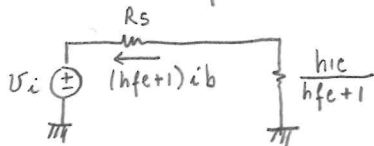
$$V_u = -g_m V_{gs} R_4$$

$$V_{gs} = V_g = -R_4 h_{fe} i_b$$

$$V_i = -R_5 (h_{fe} + 1) i_b - h_{ie} i_b \quad (\text{equilibrio delle tensioni alla maglia sinistra}) \rightarrow$$

$$i_b = - \frac{V_i}{h_{ie} + R_5 (h_{fe} + 1)}$$

[si poteva ricavare anche notando che la resistenza vista tra emettitore e massa guardando verso destra è pari a $\frac{h_{ie}}{h_{fe} + 1}$, per cui abbiamo



da cui ricaviamo che

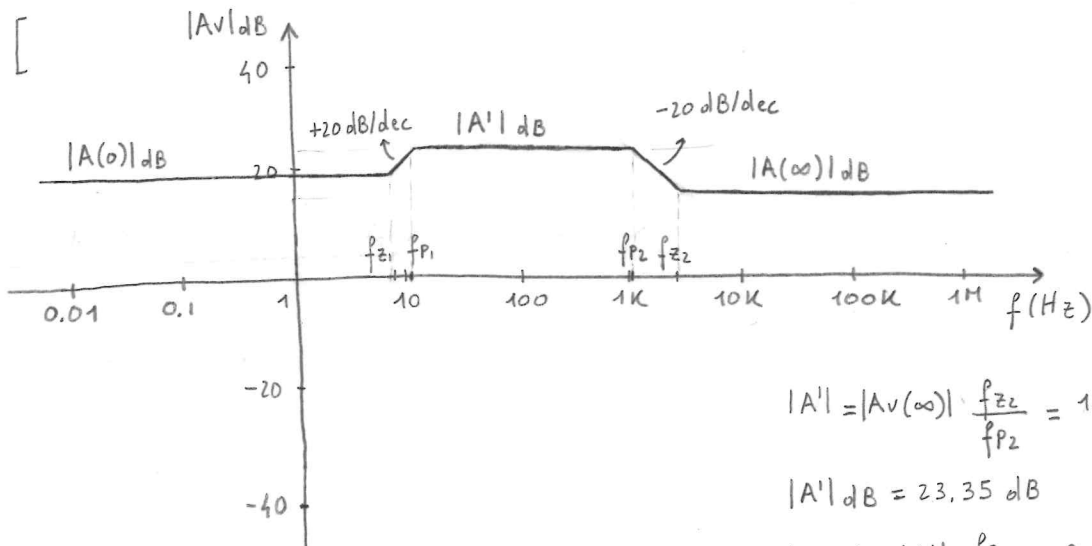
$$(h_{fe} + 1) i_b = - \frac{V_i}{R_5 + \frac{h_{ie}}{h_{fe} + 1}} \rightarrow i_b = - \frac{V_i}{R_5 (h_{fe} + 1) + h_{ie}} \quad]$$

$$A_v(\infty) = \frac{V_u}{V_i} = - \frac{g_m R_4 R_4 h_{fe}}{h_{ie} + R_5 (h_{fe} + 1)} = -5,8824$$

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

$$|A_v(\infty)|_{dB} = 15,391 \text{ dB}$$

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



$$|A'| = |A_v(\infty)| \cdot \frac{f_{z2}}{f_{p2}} = 14,706$$

$$|A'|_{dB} = 23,35 \text{ dB}$$

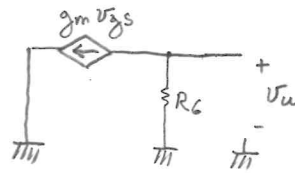
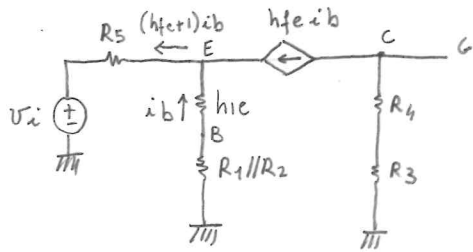
$$|A(0)| = |A'| \frac{f_{z1}}{f_{p1}} = 8,959$$

$$|A(0)|_{dB} = 19,05 \text{ dB}$$

NON RICHIESTO

Facciamo una verifica calcolando il valore di $A_v(0)$.

Per calcolare $A_v(0)$ apriamo tutti i condensatori nel circuito per le variazioni:



$$v_u = -g_m v_{gs} R_6$$

$$v_{gs} = v_g = -(R_4 + R_3) h_{fe} i_b$$

$$v_i = -R_5 (h_{fe} + 1) i_b - (h_{ie} + R_1 \parallel R_2) i_b \rightarrow$$

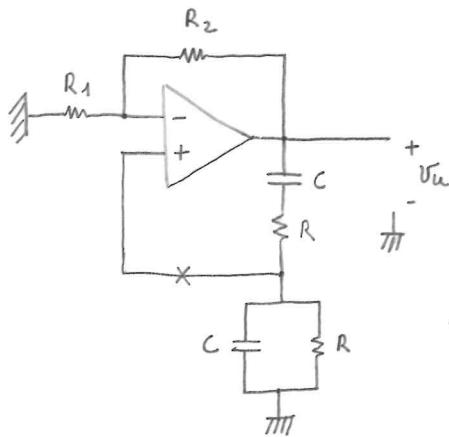
$$i_b = - \frac{v_i}{h_{ie} + R_1 \parallel R_2 + R_5 (h_{fe} + 1)}$$

$$A_v(0) = \frac{v_u}{v_i} = - \frac{g_m R_6 (R_4 + R_3) h_{fe}}{h_{ie} + R_1 \parallel R_2 + R_5 (h_{fe} + 1)} = -8.959$$

$$|A_v(0)|_{dB} = 19.05 \text{ dB}$$

NON RICHIESTO

4)



$$C = 20 \text{ nF}$$

$$R = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = R^* (1 - K V_{u \max})$$

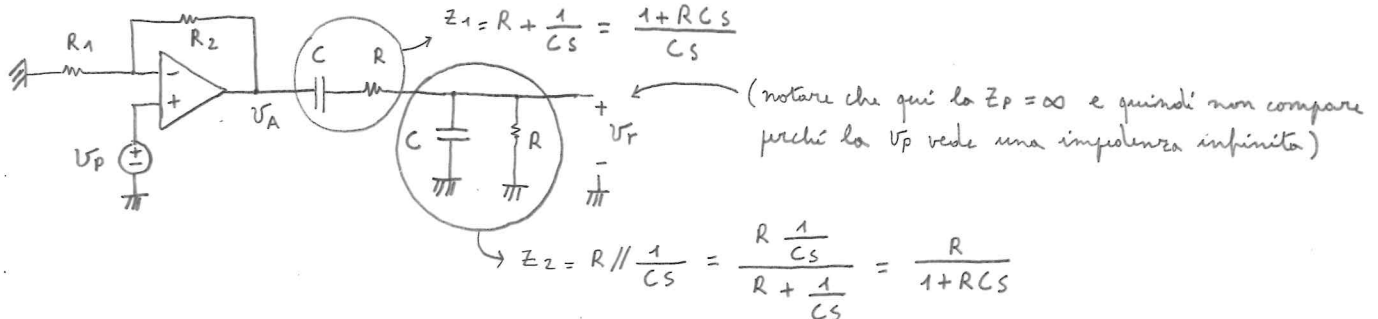
con $V_{u \max}$ ampiezza dell'oscillazione in uscita

$$R^* = 3 \text{ k}\Omega$$

$$K = 0.5 \text{ V}^{-1}$$

$$\beta A(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{(1 - R^2 C^2 \omega^2) + 3RCj\omega}$$

[se tagliamo l'anello di reazione nel punto indicato con la croce otteniamo



$$\beta A = \frac{V_r}{V_p} = \frac{V_r}{V_A} \frac{V_A}{V_p}$$

$$\text{con } V_A = V_p \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \rightarrow \frac{V_A}{V_p} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_r = V_A \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = V_A \frac{\frac{R}{1 + RCs}}{\frac{1 + RCs}{Cs} + \frac{R}{1 + RCs}} = V_A \frac{RCs}{(1 + RCs)^2 + RCs} = V_A \frac{RCs}{(RCs)^2 + 3RCs + 1} \rightarrow$$

$$\frac{V_r}{V_A} = \frac{RCs}{(RCs)^2 + 3RCs + 1}$$

per cui

$$\beta A(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCs}{(RCs)^2 + 3RCs + 1} \rightarrow \text{GIÀ DATO NEL TESTO (IN QUESTO CASO)}$$

$$\beta A(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{-R^2 C^2 \omega^2 + 3RCj\omega + 1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{(1 - R^2 C^2 \omega^2) + 3RCj\omega}$$

$$\text{All'ingresso deve essere } \begin{cases} \angle \beta A(j\omega_I) = 0 \\ |\beta A(j\omega_I)| > 1 \end{cases}$$

(condizioni di Barkhausen)

$$\text{a regime deve essere } \begin{cases} \angle \beta A(j\omega_0) = 0 \\ |\beta A(j\omega_0)| = 1 \end{cases}$$

Perché il numeratore di $\beta A(j\omega)$ è immaginario puro, per avere $\angle \beta A(j\omega) = 0$ dovremo imporre che anche il denominatore sia immaginario puro e verificare che in quella condizione il βA venga un numero reale positivo.

Perché il denominatore sia immaginario puro dobbiamo annullare la sua parte reale:

$$1 - R^2 C^2 \omega^2 = 0 \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{R^2 C^2} \rightarrow \omega = \frac{1}{RC} = 25.000 \text{ rad/s} \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 3978.8736 \text{ Hz}$$

(dato che $\omega > 0$)

Perché nel caso in esame lo schema e i valori di R e C rimangono i soliti all'ingresso e a regime, questa è sia la ω_I (all'ingresso) che la ω_0 (a regime).

all'ingresso $V_{u\max} = 0$, per cui $R_2 = R^* = 3K\Omega$ e per $\omega = \omega_I$ si ha che

$$\beta A(j\omega_I) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{3RCj\omega} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3} = \frac{4}{3}, \text{ per cui } |\beta A(j\omega_I)| = \frac{4}{3} > 1, \text{ come deve essere all'ingresso.}$$

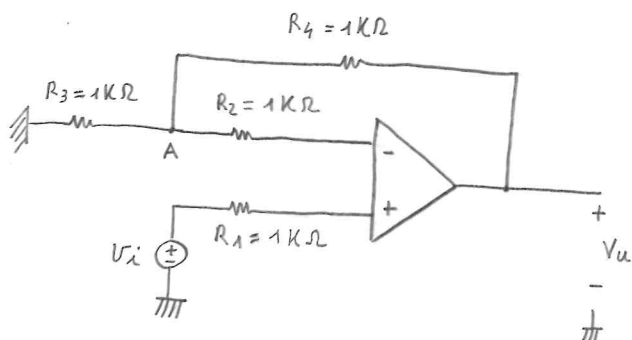
A regime dobbiamo avere che $|\beta A(j\omega_0)| = 1$; poiché

$$|\beta A(j\omega_0)| = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{3RCj\omega} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3} \text{ dobbiamo imporre che}$$

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3} = 1 \rightarrow 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3 \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 2 \rightarrow \frac{R^*(1 - K V_{u\max})}{R_1} = 2 \rightarrow 3(1 - K V_{u\max}) = 2 \rightarrow$$

$$3 - 3K V_{u\max} = 2 \rightarrow 3K V_{u\max} = 1 \rightarrow V_{u\max} = \frac{1}{3K} = \frac{2}{3} V = 0.6 V$$

5)

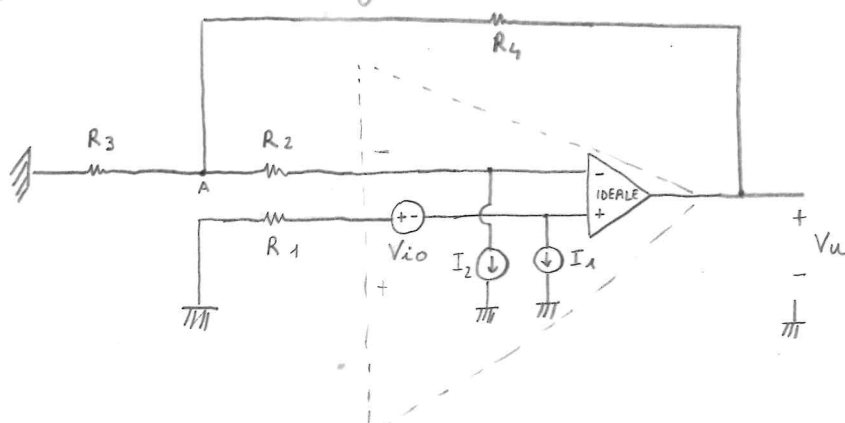


$$|V_{i0}|_{\max} = 5\text{ mV}$$

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

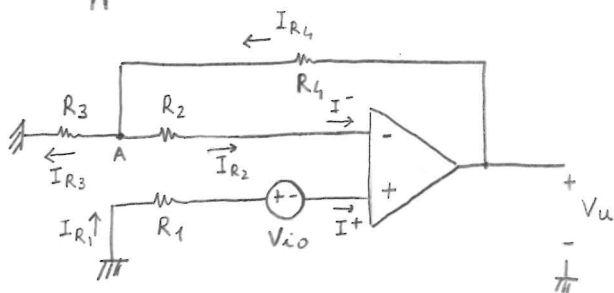
$$|I_{i0}|_{\max} = 20\text{ nA}$$

a noi interessa il solo contributo dei generatori (in continua) di offset, per cui disattiveremo V_i ; sostituendo all'amplificatore operazionale reale il suo equivalente in termini di un amplificatore operazionale ideale e dei generatori di offset, abbiamo



Per calcolare il contributo alla V_u dei generatori di offset, usiamo il principio di sovrapposizione degli effetti.

Effetto di V_{i0} :



per il c.c.v.: $I_{R1} = I^+ = 0 \rightarrow V^+ = -R_1 I_{R1} - V_{i0} = -V_{i0} \stackrel{\downarrow}{=} V^-$

per il c.c.v.: $I_{R2} = I^- = 0 \rightarrow V_A = V^- + R_2 I_{R2} = V^- = -V_{i0}$

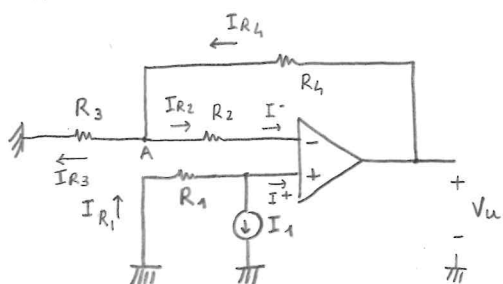
$$I_{R3} = \frac{V_A}{R_3} = -\frac{V_{i0}}{R_3}$$

$$I_{R4} = I_{R3} + I_{R2} = I_{R3} = -\frac{V_{i0}}{R_3}$$

$$V_u = V_A + R_4 I_{R4} = -V_{i0} - \frac{V_{i0}}{R_3} R_4 = -V_{i0} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

(infatti, considerando che $I_{R1} = 0$ e $I_{R2} = 0$, per cui non c'è caduta su R_1 e R_2 , il tutto è un amplificatore non invertente con guadagno $(1 + \frac{R_4}{R_3})$)

Effetto di I_1 :



per il c.c.v.: $I^+ = 0 \rightarrow I_{R1} = I_1 \rightarrow V^+ = -R_1 I_1 = V^-$

per il c.c.v.: $I^- = 0 \rightarrow I_{R2} = 0 \rightarrow V_A = V^- + R_2 I_{R2} = V^- = -R_1 I_1$

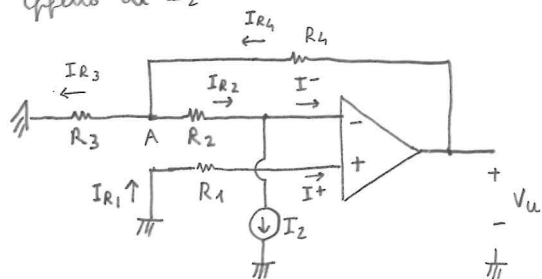
$$I_{R3} = \frac{V_A}{R_3} = -\frac{R_1 I_1}{R_3}$$

$$I_{R4} = I_{R3} + I_{R2} = I_{R3} = -\frac{R_1 I_1}{R_3}$$

$$V_u = V_A + R_4 I_{R4} = -R_1 I_1 - R_1 I_1 \frac{R_4}{R_3} = -R_1 I_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

(infatti: l'equivalente di Thevenin di I_1 e R_1 è $-I_1 R_1$, dopodiché considerando che $I_{R1} = 0$ e $I_{R2} = 0$ e quindi non c'è caduta su R_1 e R_2 il tutto è un amplificatore non invertente con guadagno $(1 + \frac{R_4}{R_3})$)

Effetto di I_2 :



per il ccv: $I_{R1} = I^+ = 0 \rightarrow V^+ = -R_1 I_{R1} = 0 \stackrel{\text{per il ccv}}{\downarrow} = V^-$

per il ccv: $I^- = 0 \rightarrow I_{R2} = I_2 \rightarrow V_A = V^- + R_2 I_{R2} = R_2 I_2$

$$I_{R3} = \frac{V_A}{R_3} = \frac{R_2}{R_3} I_2$$

$$I_{R4} = I_{R3} + I_{R2} = \frac{R_2}{R_3} I_2 + I_2 = I_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right)$$

$$V_u = V_A + R_4 I_{R4} = R_2 I_2 + R_4 I_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) = I_2 \left(R_2 + R_4 + \frac{R_4 R_2}{R_3} \right)$$

Complessivamente

$$V_u = -V_{i0} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - R_1 I_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + I_2 \left(R_2 + R_4 + \frac{R_4 R_2}{R_3} \right)$$

N'altra parte

$$\begin{cases} I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} \\ I_{i0} = I_1 - I_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 + I_2 = 2 I_B \\ I_1 - I_2 = I_{i0} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2 I_1 = 2 I_B + I_{i0} \\ 2 I_2 = 2 I_B - I_{i0} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 = I_B + \frac{I_{i0}}{2} \\ I_2 = I_B - \frac{I_{i0}}{2} \end{cases}$$

per cui

$$\begin{aligned} V_u &= -V_{i0} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) - \left(I_B + \frac{I_{i0}}{2} \right) R_1 \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) + \left(I_B - \frac{I_{i0}}{2} \right) \left(R_2 + R_4 + \frac{R_4 R_2}{R_3} \right) = \\ &= -V_{i0} \underbrace{\left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right)}_2 + I_B \underbrace{\left(-R_1 - \frac{R_1 R_4}{R_3} + R_2 + R_4 + \frac{R_4 R_2}{R_3} \right)}_{-1K\Omega - 1K\Omega + 1K\Omega + 1K\Omega + 1K\Omega = 1K\Omega} - \frac{I_{i0}}{2} \underbrace{\left(R_1 + \frac{R_1 R_4}{R_3} + R_2 + R_4 + \frac{R_4 R_2}{R_3} \right)}_{1K\Omega + 1K\Omega + 1K\Omega + 1K\Omega + 1K\Omega = 5K\Omega} = \\ &= -2V_{i0} + I_B \cdot 1K\Omega - I_{i0} \cdot 2.5K\Omega = \\ &= -2V_{i0} + 0.1mV - I_{i0} \cdot 2.5K\Omega \end{aligned}$$

Dato che $0.1mV$ è una quantità positiva, per ottenere il massimo sbilanciamento in uscita $|V_u|_{max}$ dobbiamo scegliere per gli altri termini il modulo massimo e un segno tale che anche gli altri addendi siano positivi; consideriamo quindi

$V_{i0} = -5mV$ e $I_{i0} = -20nA$, ottenendo così:

$$|V_u|_{max} = | +10mV + 0.1mV + \underbrace{20nA \cdot 2.5K\Omega}_{0.05mV} | = 10.15mV$$