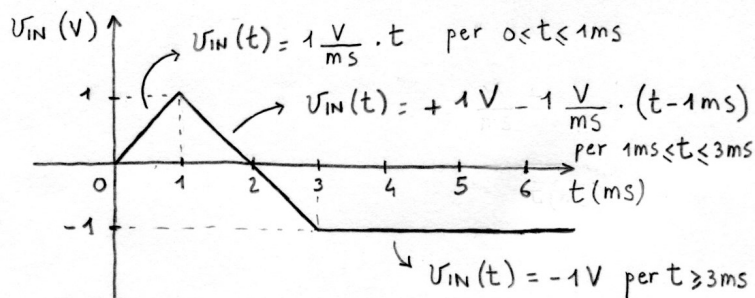
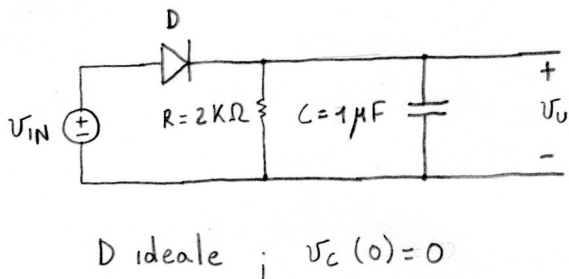


Scheda: A24_01		Data: 8 gennaio 2024	
Cognome	Nome		Matricola

ESERCIZIO N°1

6.5 punti

Si consideri il circuito rappresentato a sinistra in figura. Considerando il diodo D ideale e ipotizzando il condensatore C inizialmente scarico ($v_C(0) = 0$), si ricavi passo passo e si disegni l'andamento nel tempo, per $0 \leq t \leq 6$ ms, della tensione $v_U(t)$ che si ha 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 calcolino inoltre i due istanti di tempo in cui la $v_U(t)$ assume valore pari a $e^{-0.5}$ V ≈ 0.60653 V (e è il numero di Nepero).

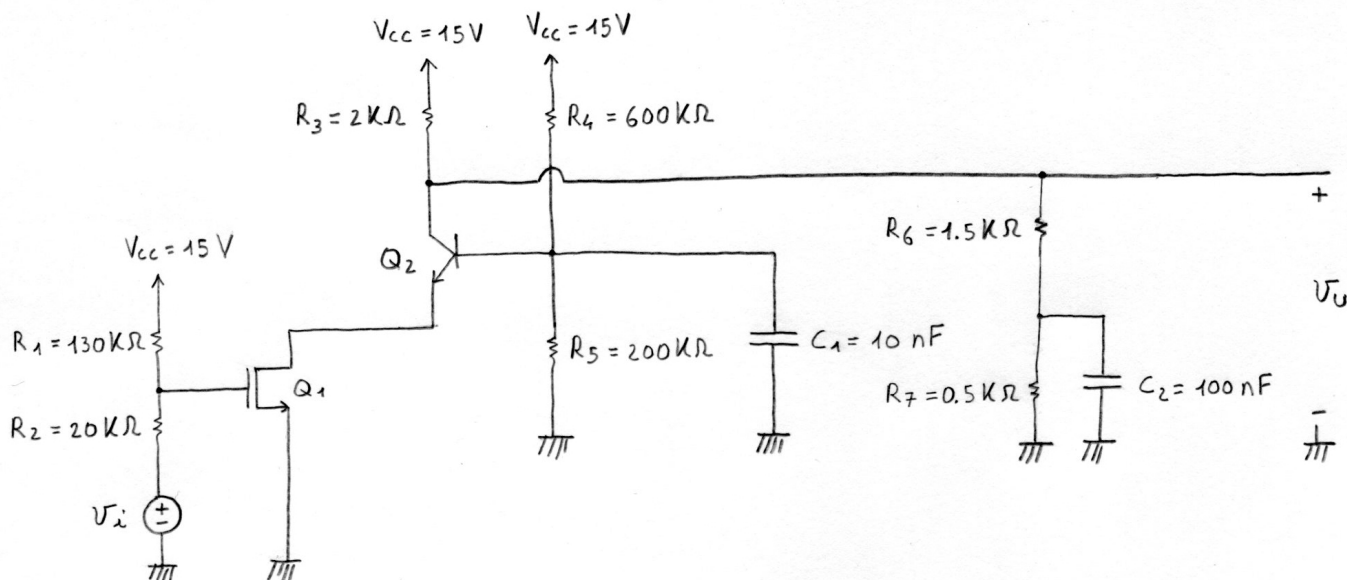


ESERCIZIO N°2

7 punti

Si studi in continua il circuito in figura. In particolare, si determini il punto di lavoro di Q_1 e Q_2 .

[Si consiglia di iniziare lo studio del circuito da Q_1 . Per calcolare la tensione V_{B2} si consiglia di fare l'equivalente di Thevenin di ciò che sta sulla base di Q_2 (cioè V_{CC} , R_4 e R_5). Allo stesso modo, per calcolare la tensione V_{C2} si consiglia di fare l'equivalente di Thevenin di ciò che sta sul collettore di Q_2 (cioè V_{CC} , R_3 , R_6 e R_7).]



per Q_1 : $\frac{1}{2} \mu\text{m Cox} \frac{W_1}{L_1} = 1.005 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$; per Q_2 : $h_{FE2} = 200$
 $V_{T1} = 1 \text{ V}$

ESERCIZIO N°3

7.5 punti

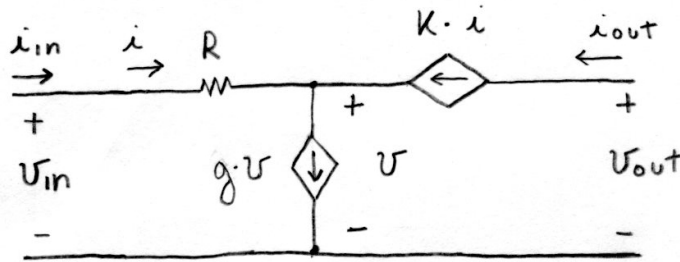
Considerando il circuito mostrato nell'esercizio precedente, se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s) = V_u/V_i$ (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa). Si consideri per Q_1 : $g_{m1} = 2 \text{ mA/V}$ e per Q_2 : $h_{fe2} = 250$, $h_{ie2} = 6 \text{ K}\Omega$. Il diagramma di Bode non è richiesto.

ESERCIZIO N°4

6 punti

Si ricavino i parametri g 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}). k è un coefficiente moltiplicativo positivo adimensionale, mentre g è un coefficiente moltiplicativo positivo espresso in Ω^{-1} .

[Per legare v a i può essere utile scrivere l'equilibrio delle correnti al nodo intermedio tra R , $k \cdot i$ e $g \cdot v$.]

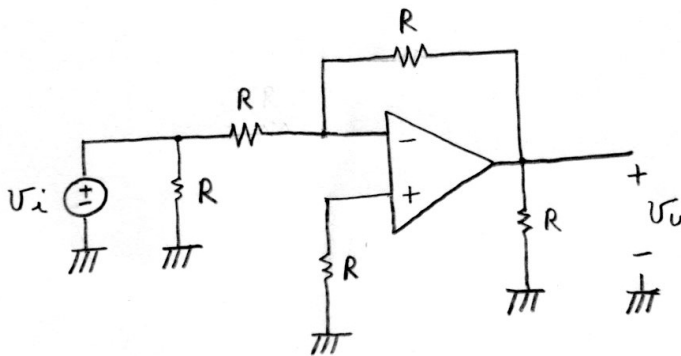


($k > 0$ adimensionale;
 $g > 0$ in Ω^{-1})

ESERCIZIO N°5

6 punti

Ricavare il massimo sbilanciamento causato sull'uscita del circuito mostrato in figura (dove v_i è il segnale di ingresso e v_u è la tensione in uscita) dai soli generatori di offset dell'amplificatore operazionale. A parte la presenza dei generatori di offset (il cui valore è riportato accanto allo schema), si consideri tale amplificatore operazionale ideale.



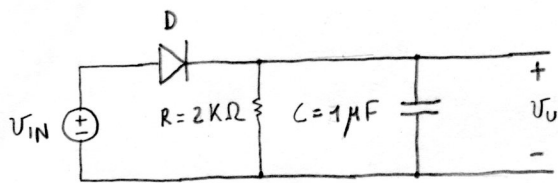
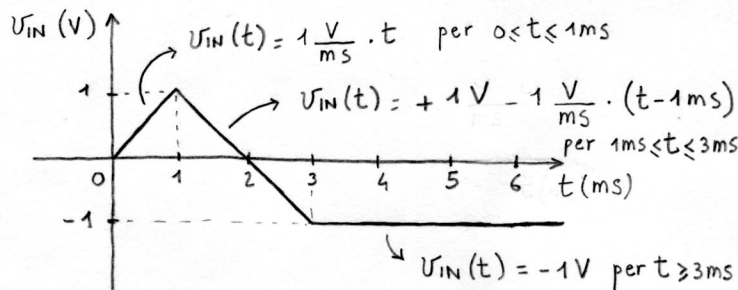
$$R = 1 \text{ K}\Omega$$

$$|V_{io}|_{\max} = 6 \text{ mV}$$

$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 90 \text{ nA}$$

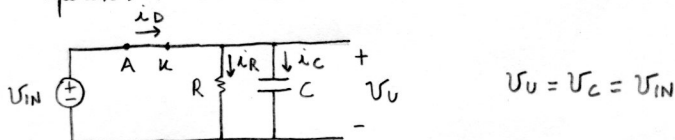
$$|I_{io}|_{\max} = |I_1 - I_2|_{\max} = 30 \text{ nA}$$

1)

D ideale ; $V_C(0) = 0$ C inizialmente scarica $\rightarrow$ per $t=0$ $V_U = V_C = 0$;

la V_{IN} per $t=0$ è nulla, poi diventa positiva; visto che la tensione sul catodo del diodo inizialmente è nulla, mentre quella sull'anodo diventa positiva, l'ipotesi più probabile è che il diodo D conduca.

ipotesi: D conduce



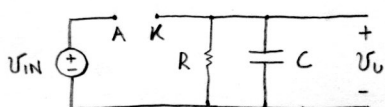
verifica dell'ipotesi: $i_D = i_R + i_C = \frac{V_{IN}}{R} + C \frac{dV_{IN}}{dt} > 0$

questo è sicuramente vero per $0 \leq t \leq 1ms$ perché in tale intervallo di tempo $V_{IN} > 0$ e $\frac{dV_{IN}}{dt} > 0$, invece superato $t=1ms$ questo non è più vero perché per $t=1ms^+$ si ha che

$$i_D(1ms^+) = \frac{1V}{2k\Omega} + 1\mu F \cdot \left(-1 \frac{V}{ms}\right) = 0.5mA - 1mA = -0.5mA < 0 \quad (\text{e poi cala ulteriormente});$$

quindi sicuramente l'ipotesi $i_D > 0$ cade a partire da $1ms$, quindi a partire da $1ms$ ipotizziamo che il diodo D sia interdetto.

ipotesi: D interdetto



abbiamo il gruppo RC senza eccitazione con condensatore inizialmente alla tensione finale della fase precedente $V_C(1ms) = 1V$ e che si scarica verso la tensione nulla (perché a regime, non essendoci più variazioni, e quindi avendo a frequenza nulla, C è un ramo aperto, per cui non

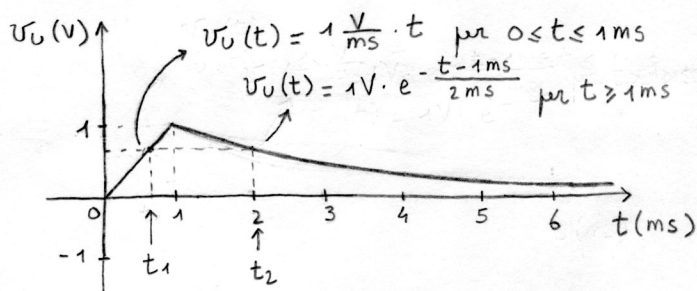
scorre corrente in C e quindi in R e quindi la tensione ai capi del condensatore deve essere pari a $R \cdot i = 0$) con costante di tempo $\tau = RC = 2k\Omega \cdot 1\mu F = 2ms$ (τ è pari a RC perché la capacità C vede una resistenza pari a R) con l'andamento esponenziale

$$V_C(t) = V_U(t) = V_{IN}(1ms) e^{-\frac{t-1ms}{RC}} = 1V \cdot e^{-\frac{t-1ms}{2ms}}$$

verifica dell'ipotesi: $V_{AK} = V_{IN} - V_U < 0 \rightarrow V_U > V_{IN}$ che è verificata per tutti i $t > 1ms$.

(infatti per $t=1ms$ $V_U = V_{IN} = 1V$; poi la V_{IN} scende con pendenza $-1 \frac{V}{ms}$ fino a $-1V$ e poi rimane fissa a $-1V$, mentre V_U scende con pendenza pari a $-\frac{1V}{2ms} e^{-\frac{t-1ms}{2ms}}$ inizialmente, cioè per $t=1ms$, pari a $-\frac{1V}{2ms}$ in modulo minore di $-1 \frac{V}{ms}$ e poi con modulo via via minore tendendo a 0 e quindi rimanendo sempre sopra alla V_{IN})

Quindi abbiamo

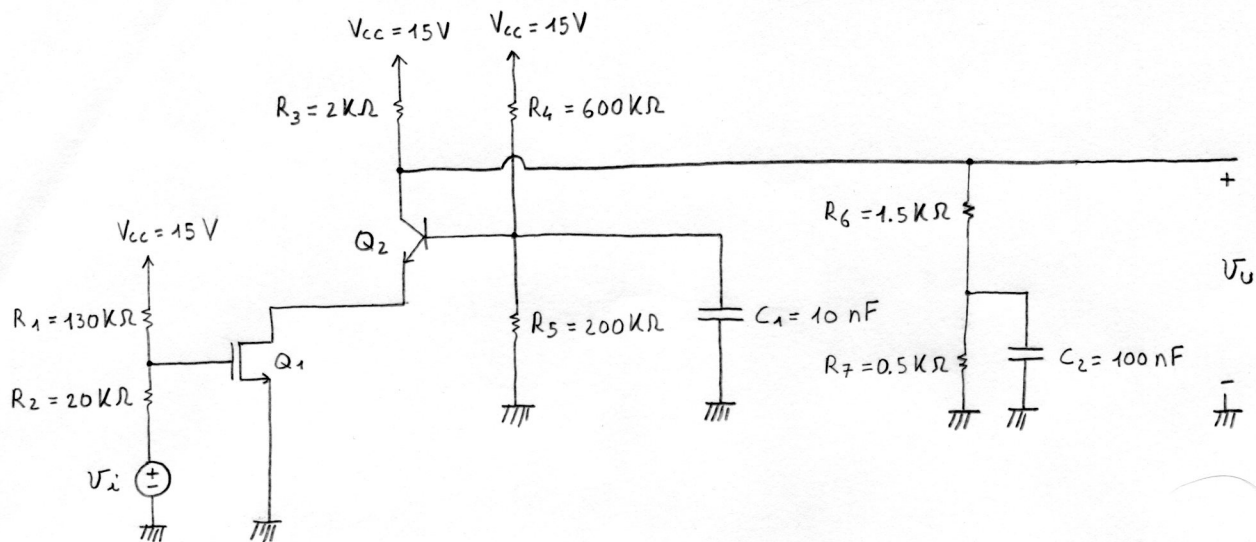


Gli istanti di tempo in cui $V_U(t)$ assume il valore $e^{-0.5} V \approx 0.60653 V$ si trovano imponendo:

$$\text{per } 0 \leq t \leq 1ms: 1 \frac{V}{ms} \cdot t_1 = e^{-0.5} V \rightarrow t_1 = \frac{e^{-0.5} V}{1 \frac{V}{ms}} = e^{-0.5} ms \approx 0.60653 ms;$$

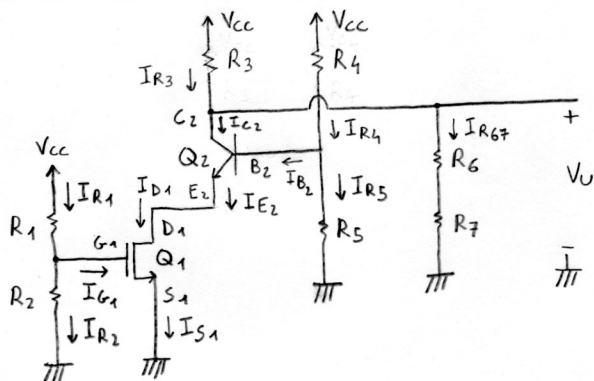
$$\text{per } t \geq 1ms: 1V \cdot e^{-\frac{t_2-1ms}{2ms}} = e^{-0.5} V \rightarrow \frac{t_2-1ms}{2ms} = 0.5 \rightarrow t_2 = 1ms + 0.5 \cdot 2ms = 2ms$$

2)



per Q_1 : $\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_1}{L_1} = 1.005 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$; per Q_2 : $h_{FE2} = 200$
 $V_{T1} = 1 \text{ V}$

In continua il circuito diventa:



$$I_{G1} = 0 \rightarrow I_{R1} = I_{R2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = 0.1 \text{ mA}$$

$$V_{G1} = R_2 I_{R2} = 2 \text{ V}$$

$$V_{S1} = 0$$

$$V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = V_{G1} = 2 \text{ V} > V_{T1} = 1 \text{ V}$$

ipotesi 1: Q_1 in saturazione

$$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2 = 1.005 \text{ mA} = I_{S1}$$

$$\left(\text{con } K_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_1}{L_1} = 1.005 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \right) \quad \left(\text{dato che } I_{G1} = 0 \right)$$

$$I_{E2} = I_{D1} = 1.005 \text{ mA}$$

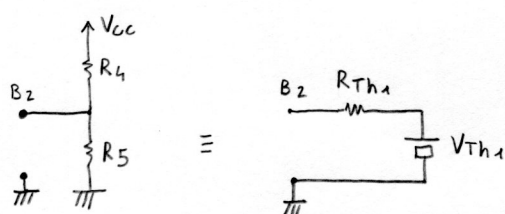
ipotesi 2: Q_2 in zona attiva diretta

$$I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = I_{B2} (1 + h_{FE2}) \rightarrow$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{1 + h_{FE2}} = 5 \mu\text{A} > 0$$

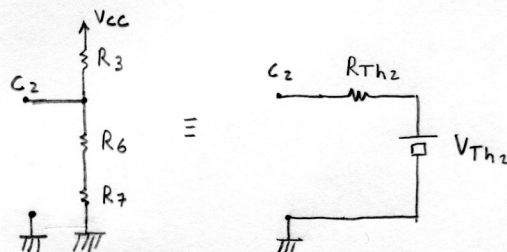
$$I_{C2} = I_{B2} \cdot h_{FE2} = 1 \text{ mA}$$

a questo punto, per trovare la V_{B2} e la V_{C2} conviene fare l'equivalente di Thevenin di ciò che sta nella base e di ciò che sta nel collettore



$$\text{con } R_{Th1} = R_4 \parallel R_5 = 150 \text{ K}\Omega$$

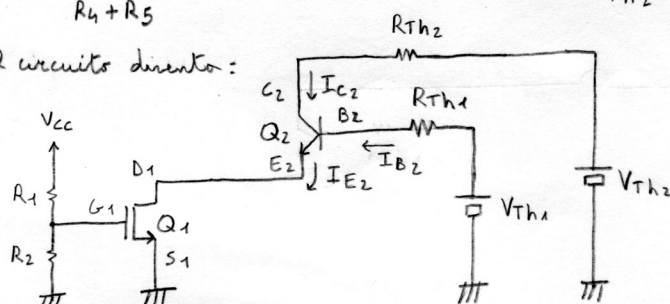
$$V_{Th1} = V_{CC} \frac{R_5}{R_4 + R_5} = 3.75 \text{ V}$$



$$\text{con } R_{Th2} = R_3 \parallel (R_6 + R_7) = 1 \text{ K}\Omega$$

$$V_{Th2} = V_{CC} \frac{R_6 + R_7}{R_3 + R_6 + R_7} = 7.5 \text{ V}$$

con il che il circuito diventa:



da cui ricaviamo che

$$V_{B2} = V_{Th1} - R_{Th1} I_{B2} = 3 \text{ V}$$

$$V_{C2} = V_{Th2} - R_{Th2} I_{C2} = 6.5 \text{ V}$$

*

conoscendo ora il valore di V_{B2} e V_{C2} e tornando a considerare il circuito in continua originale (nona equivalente di Thévenin) ne ricava che:

$$V_{E2} = V_{B2} - V_{BE} = 2.3 \text{ V} = V_{D1}$$

$$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = 2.3 \text{ V} > V_{GS1} - V_{T1} = 1 \text{ V} \quad \text{che (insieme a } V_{GS1} > V_{T1}, \text{ già provato) permette di verificare l'ipotesi 1}$$

$$V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 4.2 \text{ V} > V_{CEsat} = 0.1 \text{ V} \quad \text{che (insieme a } I_{B2} > 0, \text{ già provato) permette di verificare l'ipotesi 2}$$

$$I_{R4} = \frac{V_{CC} - V_{B2}}{R_4} = 20 \mu\text{A}$$

$$I_{R5} = \frac{V_{B2}}{R_5} = 15 \mu\text{A}$$

$$I_{R3} = \frac{V_{CC} - V_{C2}}{R_3} = 4.25 \text{ mA}$$

$$I_{R6} = I_{R7} = \frac{V_{C2}}{R_6 + R_7} = 3.25 \text{ mA}$$

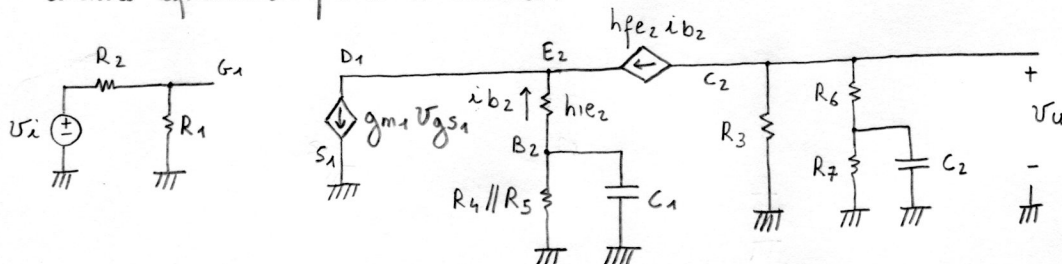
$$V_U = V_{C2} = 6.5 \text{ V}$$

$$3) \quad g_{m1} = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$h_{fe2} = 250$$

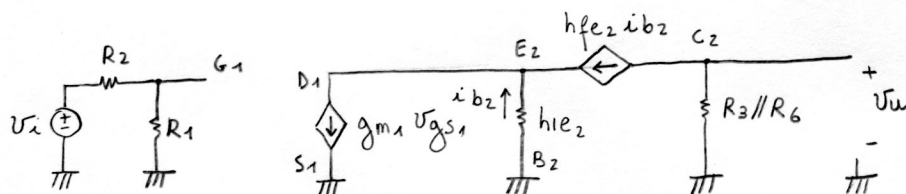
$$h_{ie2} = 6 \text{ k}\Omega$$

Circuito equivalente per le variazioni:



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

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



$$V_u = -h_{fe2} i_{b2} (R_3 \parallel R_6)$$

$$i_{b2} + h_{fe2} i_{b2} = g_{m1} V_{gs1} \rightarrow (1 + h_{fe2}) i_{b2} = g_{m1} V_{gs1} \rightarrow i_{b2} = \frac{g_{m1}}{1 + h_{fe2}} V_{gs1}$$

$$V_{gs1} = V_{g1} - V_{s1} = V_{g1}$$

$$V_{g1} = V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$A_v(\infty) = \frac{V_u}{V_i} = -h_{fe2} (R_3 \parallel R_6) \frac{g_{m1}}{1 + h_{fe2}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -1.4797951 \quad (\text{negativo, come deve essere visto che}$$

si tratta di uno stadio a source comune, invertente, e di uno stadio a base comune, non invertente, in cascata)

$$|A_v(\infty)|_{dB} = 3.404 \text{ dB}$$

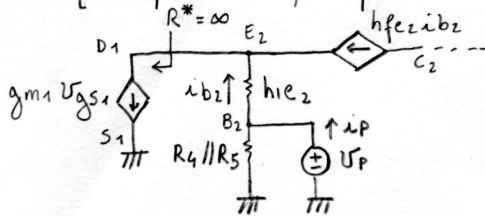
$$A_v(\infty) \neq 0 \rightarrow \text{numero zeri} = \text{numero poli} = 2$$

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

C_1 non introduce singolarità (o equivalentemente introduce un polo e uno zero coincidenti) in quanto V_u dipende da i_{b2} (in particolare è la caduta di $-h_{fe} i_{b2}$ su $R_3 \parallel (R_6 + (R_7 \parallel \frac{1}{C_2}))$), $i_{b2} = \frac{g_{m1} V_{gs1}}{1 + h_{fe2}}$ (a prescindere da quanto valga l'impedenza che sta tra B_2 e massa) e $V_{gs1} = V_{g1}$; quindi V_u dipende

dal valore di C_2 ma non dipende dal valore di C_1 .

[In particolare, il polo di C_1 si potrebbe trovare col metodo della resistenza vista



$$R_{V_{C1}} = (R_4 \parallel R_5) \parallel (h_{ie2} + R^* (h_{fe2} + 1)) = (R_4 \parallel R_5) \parallel \infty = R_4 \parallel R_5 = 150 \text{ k}\Omega$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{V_{C1}}} = 666.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 106.1033 \text{ Hz}$$

dopo di che per quanto detto $\omega_{Z1} = \omega_{P1}$.

Se non ce ne accorgiamo subito e cerchiamo (erroneamente) di trovare lo zero calcolando il valore di s per cui il parallelo di $R_4 \parallel R_5$ e $\frac{1}{C_1 s}$ diventa infinito (dico "erroneamente" perché in realtà in questa situazione non è vero che i_{b2} e quindi v_u si annulla perché come abbiamo visto $i_{b2} = \frac{g_{m1} V_{gs1}}{1 + h_{fe2}} = \frac{g_{m1} V_{g1}}{1 + h_{fe2}}$, per cui i_{b2} dipende da V_{g1} ma non da cosa c'è tra B_2 e massa)

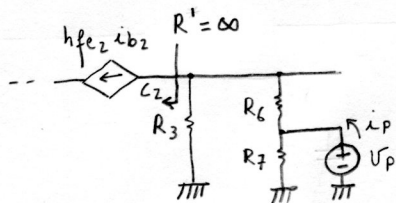
troveremmo

$$\frac{(R_4 \parallel R_5) \frac{1}{C_1 s}}{(R_4 \parallel R_5) + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_4 \parallel R_5}{1 + (R_4 \parallel R_5) C_1 s} = \infty \rightarrow 1 + (R_4 \parallel R_5) C_1 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{(R_4 \parallel R_5) C_1} \rightarrow$$

$$\omega_{Z1} = \frac{1}{(R_4 \parallel R_5) C_1} \text{ che coincidendo con } \omega_{P1} \text{ dovrebbe spingerci a guardare meglio il circuito}$$

e a concludere che effettivamente C_1 introduce singolarità coincidenti (perché non influisce su v_u).

Quanto a C_2 :



$$R_{V_{C2}} = R_7 \parallel (R_6 + R_3 \parallel R') = R_7 \parallel (R_6 + R_3) = 437.5 \Omega$$

$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{V_{C2}}} = 22857.143 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 3637.827 \text{ Hz}$$

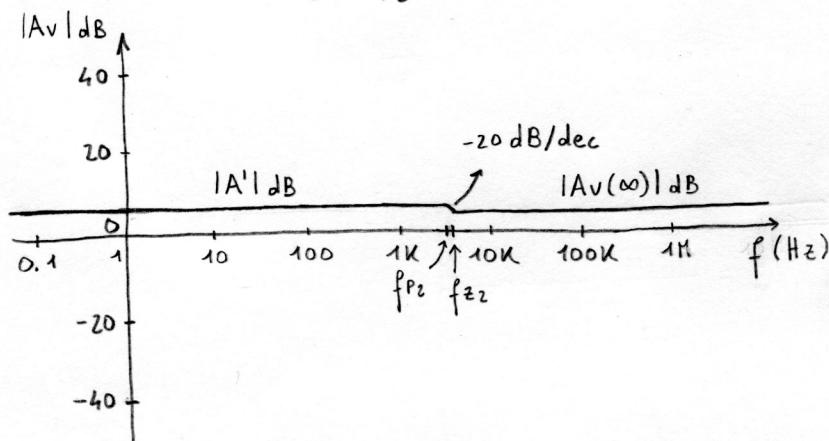
La v_u si annulla per la s per cui $R_6 + (R_7 \parallel \frac{1}{C_2 s}) = 0$ (perché in tali condizioni v_u è pura ai capi di un cortocircuito) $\rightarrow$

$$R_6 + \frac{R_7 \frac{1}{C_2 s}}{R_7 + \frac{1}{C_2 s}} = R_6 + \frac{R_7}{1 + R_7 C_2 s} = \frac{R_6 + R_6 R_7 C_2 s + R_7}{1 + R_7 C_2 s} = 0 \rightarrow R_6 + R_7 + R_6 R_7 C_2 s = 0 \rightarrow s = -\frac{R_6 + R_7}{R_6 R_7 C_2} =$$

$$= -\frac{1}{\frac{R_6 R_7}{R_6 + R_7} C_2} = -\frac{1}{C_2 (R_6 \parallel R_7)} \rightarrow \omega_{Z2} = \frac{1}{C_2 (R_6 \parallel R_7)} = 26666.6 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \rightarrow f_{Z2} = \frac{\omega_{Z2}}{2\pi} = 4244.1318 \text{ Hz}$$

La funzione di trasferimento è

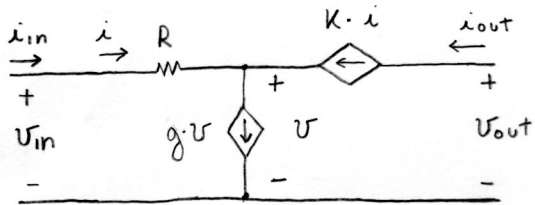
$$A_v(s) = A_v(\infty) \frac{s + \omega_{Z2}}{s + \omega_{P2}}$$



$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{Z2}}{f_{P2}} = 1.7264276$$

$$|A'|_{\text{dB}} = 4.743 \text{ dB}$$

4)



($K > 0$ adimensionale;
 $g > 0$ in Ω^{-1})

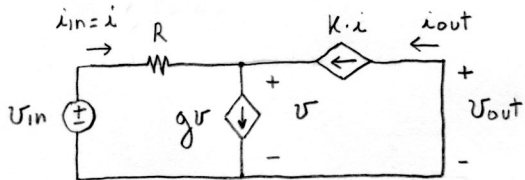
poniamo immediatamente legge v a i scrivendo l'equilibrio delle correnti al nodo intermedio superiore:

$$i + K i = g \cdot v \rightarrow i(1+K) = g \cdot v \rightarrow v = \frac{1}{g}(1+K) i$$

(alternativamente possiamo notare che il generatore di corrente $g \cdot v$ con ai capi la tensione v equivale a un bipolo in cui scorre una corrente proporzionale alla tensione ai suoi capi, cioè equivale a una resistenza di valore $\frac{v}{g \cdot v} = \frac{1}{g}$)

$$\begin{cases} i_{out} = g_f V_{in} + g_o V_{out} \\ i_{in} = g_i V_{in} + g_r V_{out} \end{cases}$$

$$g_f = \frac{i_{out}}{V_{in}} \Big|_{V_{out}=0} \quad ; \quad g_i = \frac{i_{in}}{V_{in}} \Big|_{V_{out}=0}$$



$$V_{in} = R i + v = R i + \frac{1}{g}(1+K) i = \left(R + \frac{1}{g}(1+K)\right) i$$

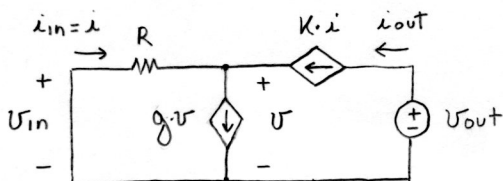
$$i_{out} = K \cdot i$$

$$g_f = \frac{i_{out}}{V_{in}} = \frac{K \cdot i}{\left(R + \frac{1}{g}(1+K)\right) i} = \frac{K}{R + \frac{1}{g}(1+K)}$$

$$i_{in} = i$$

$$g_i = \frac{i_{in}}{V_{in}} = \frac{i}{\left(R + \frac{1}{g}(1+K)\right) i} = \frac{1}{R + \frac{1}{g}(1+K)}$$

$$g_o = \frac{i_{out}}{V_{out}} \Big|_{V_{in}=0} \quad ; \quad g_r = \frac{i_{in}}{V_{out}} \Big|_{V_{in}=0}$$



$$V_{in} = R i + v = R i + \frac{1}{g}(1+K) i = \left(R + \frac{1}{g}(1+K)\right) i \rightarrow i = \frac{V_{in}}{R + \frac{1}{g}(1+K)}$$

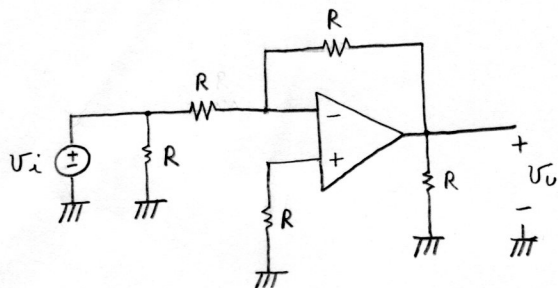
per cui, essendo $V_{in} = 0$, anche $i = 0$;

$$\text{ma allora } i_{out} = K \cdot i = 0 \rightarrow g_o = \frac{i_{out}}{V_{out}} = 0$$

$$\text{e anche } i_{in} = i = 0 \rightarrow g_r = \frac{i_{in}}{V_{out}} = 0$$

(alle stesse conclusioni possiamo arrivare sostituendo al generatore $g \cdot v$ una resistenza di valore $\frac{1}{g}$, in cui va a scorrere una corrente pari a $i + K \cdot i = (1+K) i$).

5)



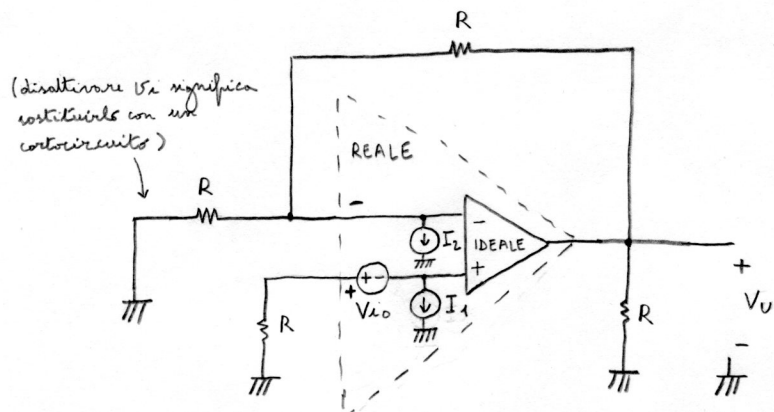
$$R = 1k\Omega$$

$$|V_{io}|_{\max} = 6 \text{ mV}$$

$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 90 \text{ nA}$$

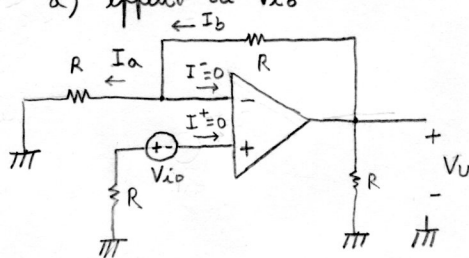
$$|I_{io}|_{\max} = |I_1 - I_2|_{\max} = 30 \text{ nA}$$

Per valutare l'effetto a regime sulla V_o dei soli generatori di offset, disattiveremo V_i , lavoriamo in continuo e sostituiamo all'amplificatore operazionale reale lo schema equivalente in cui compaiono un amplificatore operazionale ideale e i generatori di offset:



dopodiché calcoliamo l'effetto sull'uscita dei generatori di offset usando la sovrapposizione degli effetti e sfruttando il metodo del cortocircuito virtuale per l'amplificatore operazionale ideale:

a) effetto di V_{io}



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow V^+ = -RI^+ - V_{io} = -V_{io}$

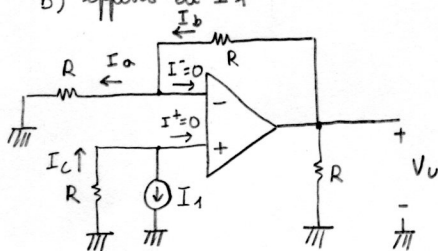
$$V^- = V^+ = -V_{io}$$

$$I_a = -\frac{V_{io}}{R}$$

$$I^- = 0 \rightarrow I_b = I_a = -\frac{V_{io}}{R} \rightarrow V_o = V^- + RI_b =$$

$$V_o = V^- + RI_b = -V_{io} - R \frac{V_{io}}{R} = -V_{io} \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -2V_{io}$$

b) effetto di I_1



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_c = I_1 \rightarrow V^+ = -RI_c = -RI_1$

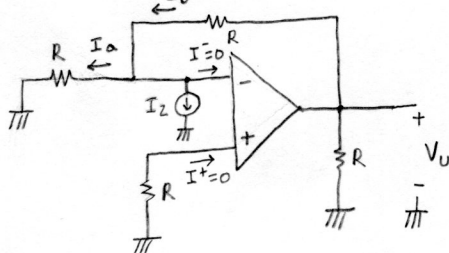
$$V^- = V^+ = -RI_1$$

$$I_a = -\frac{RI_1}{R}$$

$$I^- = 0 \rightarrow I_b = I_a = -\frac{RI_1}{R} \rightarrow$$

$$V_o = V^- + RI_b = -RI_1 - R \frac{RI_1}{R} = -RI_1 \left(1 + \frac{R}{R}\right) = -2RI_1$$

c) effetto di I_2



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow V^+ = -RI^+ = 0$

$$V^- = V^+ = 0$$

$$I_a = \frac{V^-}{R} = 0$$

$$I^- = 0 \rightarrow I_b = I_a + I_2 = I_2 \rightarrow$$

$$V_o = V^- + RI_b = RI_2$$

Complessivamente abbiamo che

$$V_o = -2V_{io} - 2RI_1 + RI_2 = -2V_{io} - 2R \left(\frac{I_B + \frac{I_{io}}{2}}{2} \right) + R \left(\frac{I_B - \frac{I_{io}}{2}}{2} \right) = -2V_{io} + I_B(-2R+R) + \frac{I_{io}}{2}(-2R-R) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} \\ I_{io} = I_1 - I_2 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_1 + I_2 = 2I_B \\ I_1 - I_2 = I_{io} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 2I_1 = 2I_B + I_{io} \\ 2I_2 = 2I_B - I_{io} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_1 = I_B + \frac{I_{io}}{2} \\ I_2 = I_B - \frac{I_{io}}{2} \end{array} \right.$$

$$= -2V_{i0} - \underbrace{RI_B}_{-90\mu V} - \frac{3}{2}RI_{i0} = -2V_{i0} - 90\mu V - 1.5RI_{i0}$$

Poiché l'unico addendo il cui valore è noto (cioè $-RI_B$) è negativo, per ottenere la V_o di modulo massimo dobbiamo scegliere per gli altri due addendi (cioè $-2V_{i0}$ e $-1.5 \cdot R \cdot I_{i0}$) il valore di modulo massimo e negativo, quindi scegliere

$V_{i0} = 6\text{ mV}$ e $I_{i0} = 30\text{ nA}$, ottenendo così

$$|V_o|_{\max} = |-2 \cdot 6\text{ mV} - 90\mu V - 1.5 \cdot 1\text{ k}\Omega \cdot 30\text{ nA}| = |-12\text{ mV} - 90\mu V - 45\mu V| = |-12.135\text{ mV}| = 12.135\text{ mV}$$