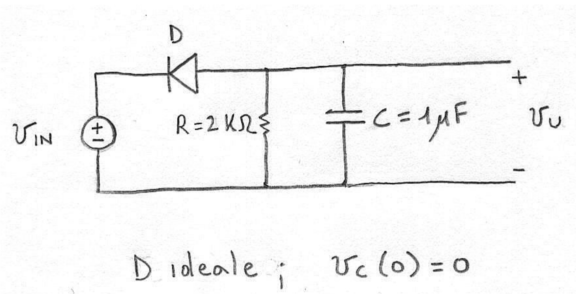
Scheda: **A23_08**	Data: **11 settembre 2023**

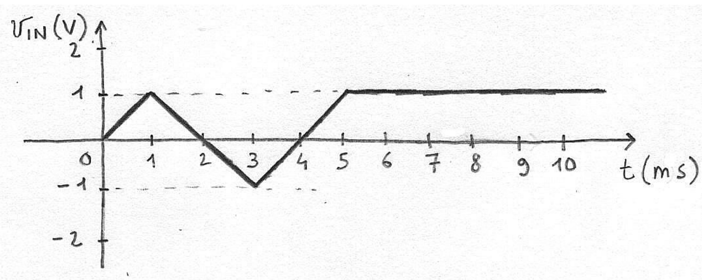
Cognome	Nome	Matricola

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 $0 \leq t \leq 10$ 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.

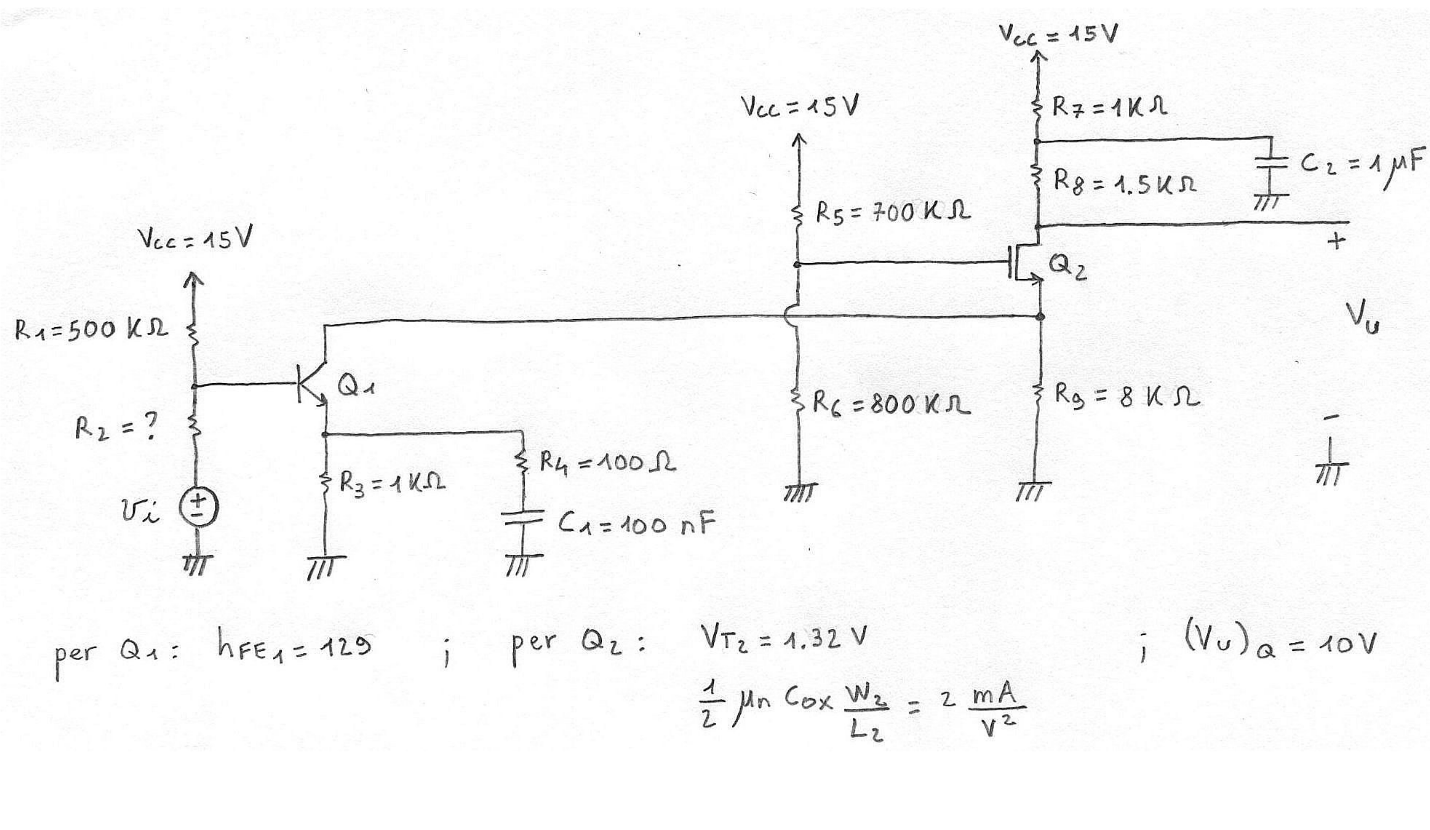
[Si noti che per tempi immediatamente successivi a 3 ms si ha che $-\dfrac{v_{IN}}{R} \leq \dfrac{1\text{ V}}{2\text{ K}\Omega} = 0.5$ mA e che $-C\,\dfrac{d\,v_{IN}}{d\,t} = -10^{-6}\text{ F} \cdot \dfrac{2\text{ V}}{2\text{ ms}} = -1$ mA , per cui $-\dfrac{v_{IN}}{R} - C\,\dfrac{d\,v_{IN}}{d\,t} \leq 0.5\text{ mA} - 1\text{ mA} = -0.5\text{ mA} < 0$.]





ESERCIZIO N°2
7 punti

Con riferimento al circuito in figura, ipotizzando Q_1 (transistore BJT npn) in zona attiva diretta e Q_2 (transistore MOS a canale n) in saturazione e sapendo che la tensione V_U di uscita a riposo è pari a 10 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 sulla zona di funzionamento dei due transistori.
[Per ricavare V_{S_2}, si calcolino prima V_{G_2} e V_{GS_2}.]

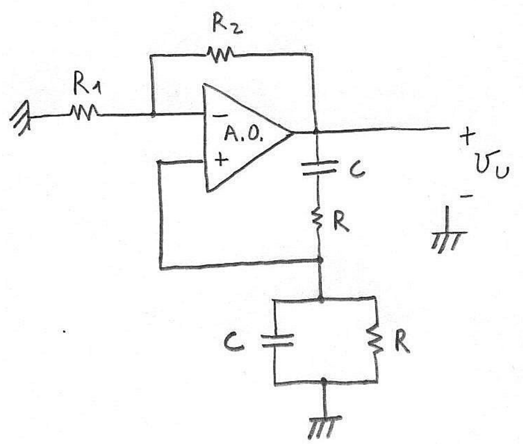


ESERCIZIO N°3
7.5 punti

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente, in cui però stavolta si assuma $R_2 = 100$ KΩ. Considerando per Q_1: $h_{fe_1} = 150$, $h_{ie_1} = 5$ KΩ e per Q_2: $g_{m_2} = 4$ mA/V, 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 <u>non</u> è richiesto.
[Nel calcolo del guadagno, un possibile modo di legare v_{gs_2} a i_{b_1} è scrivere la relazione tra la tensione ai capi di R_9 e la corrente che la attraversa.]

ESERCIZIO N°4
6 punti

Si consideri l'oscillatore a ponte di Wien rappresentato nello schema, con i valori riportati a destra dello schema (notare che il valore della resistenza R_2 dipende dall'ampiezza $V_{U_{max}}$ dell'oscillazione in uscita). Per facilitare l'esercizio, accanto alla figura è riportata anche l'espressione della funzione di trasferimento $\beta A(s)$ del circuito (che può quindi essere usata senza doverla valutare di nuovo). Determinare la frequenza e l'ampiezza dell'oscillazione a regime in uscita da tale oscillatore e verificarne l'innesco (ovviamente all'innesco $V_{U_{max}} = 0$).



A.O. ideale

$C = 500$ nF

$R = 1$ KΩ

$R_1 = 1$ KΩ

$$R_2 = \frac{R_0}{1 + K \cdot V_{U_{max}}}$$

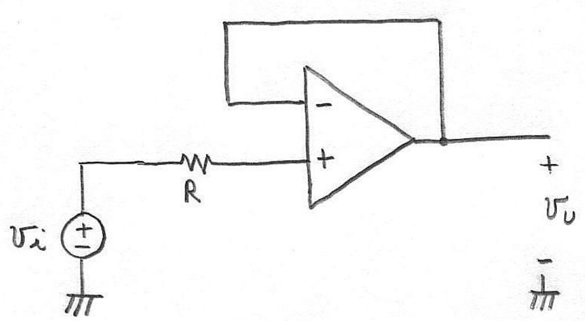
con: $R_0 = 10$ KΩ

$K = 4\ V^{-1}$

$$\beta A(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCs}{(RCs)^2 + 3RCs + 1}$$

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.



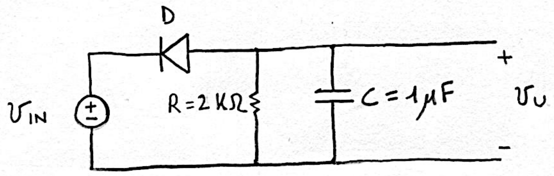
$R = 2$ KΩ

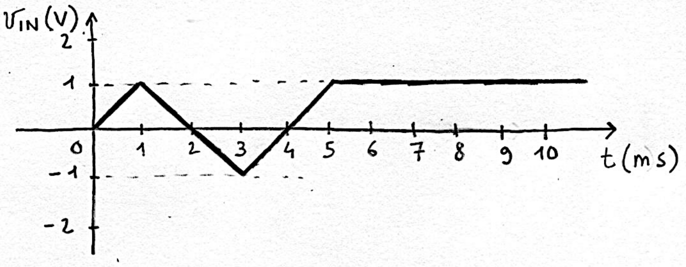
$|V_{io}|_{max} = 4$ mV

$$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 60 \text{ nA}$$

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

1)

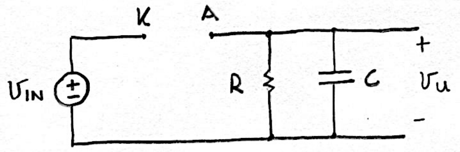




D ideale ; $v_C(0) = 0$

C inizialmente scarico $\rightarrow$ per $t=0$ $v_U = v_C = 0$;
poi per t maggiori inizialmente la v_{IN} diventa positiva ; visto che la tensione sull'anodo del diodo inizialmente è nulla, mentre quella sul catodo diventa positiva, l'ipotesi più probabile è che il diodo D sia interdetto

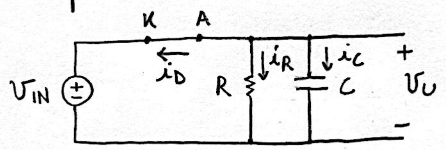
ipotesi : D interdetto



abbiamo il gruppo RC senza eccitazione con condensatore inizialmente scarico $\rightarrow$ il condensatore rimane scarico (in quanto va esponenzialmente da tensione iniziale nulla a un valore asintotico della tensione anch'esso nullo) $\rightarrow v_C = 0 \rightarrow v_U = 0$

verifica dell'ipotesi : $v_{AK} = v_U - v_{IN} = 0 - v_{IN} = -v_{IN} < 0 \rightarrow v_{IN} > 0$, vero fino a $t = 2\,ms$;
dopo $t = 2\,ms$ quest'ipotesi viene meno, quindi ipotizziamo che il diodo conduca

ipotesi : D conduce



$v_U = v_C = v_{IN}$

verifica dell'ipotesi : $i_D = -i_R - i_C = -\dfrac{v_{IN}}{R} - C\dfrac{d\,v_{IN}}{dt} > 0$
questo sicuramente è vero per $2\,ms \le t \le 3\,ms$ perché in tale intervallo di tempo $v_{IN} < 0$ e $\dfrac{d\,v_{IN}}{dt} < 0$
invece per $3\,ms \le t \le 5\,ms$ abbiamo che $v_{IN} \geqslant -1V \rightarrow \dfrac{v_{IN}}{R} \geqslant \dfrac{-1V}{2K\Omega} = -0.5\,mA \rightarrow -\dfrac{v_{IN}}{R} \leqslant 0.5\,mA$

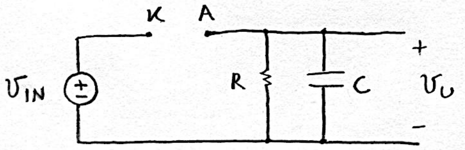
mentre $\dfrac{d\,v_{IN}}{dt} = \dfrac{2V}{2ms} = \dfrac{2V}{2\cdot 10^{-3}\,s} = 10^3\,\dfrac{V}{s} \rightarrow -C\dfrac{d\,v_{IN}}{dt} = -1\mu F \cdot 10^3\,\dfrac{V}{s} =$

$= -10^{-6}\,F \cdot 10^3\,\dfrac{V}{s} \underset{\uparrow}{=} -10^{-6}\,\dfrac{Coulomb}{V} \cdot 10^3\,\dfrac{V}{s} = -10^{-3}\,\dfrac{Coulomb}{s} = -1\,mA$

$\left[C = \dfrac{Q}{V} \rightarrow Farad = \dfrac{Coulomb}{Volt} \right]$

per cui $-\dfrac{v_{IN}}{R} - C\dfrac{d\,v_{IN}}{dt} \leqslant 0.5\,mA - 1\,mA = -0.5\,mA < 0$, per cui sicuramente l'ipotesi $i_D > 0$ cade a partire da $3\,ms$, quindi ipotizziamo che il diodo sia interdetto

ipotesi : D interdetto



abbiamo il gruppo RC senza eccitazione con condensatore inizialmente alla tensione finale della fase precedente $v_C(3ms) = v_{IN}(3\,ms) = -1V$ e che si scarica verso la tensione nulla con costante di tempo $RC = 2\,ms$ con l'andamento :
$v_C(t) = v_U(t) = v_{IN}(3\,ms)\, e^{-\frac{t-3ms}{RC}} = -1V \cdot e^{-\frac{t-3ms}{2ms}}$

verifica dell'ipotesi : $v_{AK} = v_U - v_{IN} < 0$ che è verificata per tutti i $t > 3\,ms$.
Infatti per $t = 3\,ms$ $v_U = v_{IN} = -1V$; poi : la v_{IN} sale con pendenza $\dfrac{2V}{2ms} = 10^3\,\dfrac{V}{s}$ fino a arrivare a $1V > 0$, dove diventa costante ; mentre la v_U sale esponenzialmente verso 0 con una pendenza $\dfrac{d\,v_U}{dt} = (-1V)\cdot\left(-\dfrac{1}{2ms}\right) e^{-\frac{t-3ms}{2ms}} = 0.5\cdot 10^3\,\dfrac{V}{s} \cdot e^{-\frac{t-3ms}{2ms}} < 0.5\cdot 10^3\,\dfrac{V}{s} < 10^3\,\dfrac{V}{s}$, per cui si mantiene sotto la v_{IN} e tende verso 0 rimanendo negativa
[Notare che la disuguaglianza tra le pendenze di v_{IN} e di v_U per $t = 3\,ms^+$ discende da quanto visto sopra perché $\left.\dfrac{d\,v_U}{dt}\right|_{t=3ms^+} = v_{IN}(3ms)\cdot\left(-\dfrac{1}{RC}\right) \left. e^{-\frac{t-3ms}{RC}} \right|_{t=3ms} = -\dfrac{v_{IN}(3ms)}{RC}$;

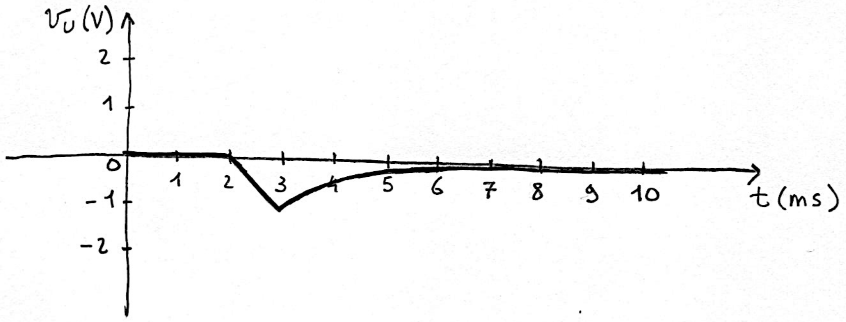
per quanto visto sopra per $3ms \le t \le 5ms$: $-\frac{v_{IN}}{R} - C\frac{dv_{IN}}{dt} < 0 \rightarrow -\frac{v_{IN}}{R} < C\frac{dv_{IN}}{dt} \rightarrow -\frac{v_{IN}}{RC} < \frac{dv_{IN}}{dt}$

per cui in particolare per $t = 3ms^+$ abbiamo che $-\frac{v_{IN}(3ms)}{RC} < \left.\frac{dv_{IN}}{dt}\right|_{t=3ms^+}$ cioè

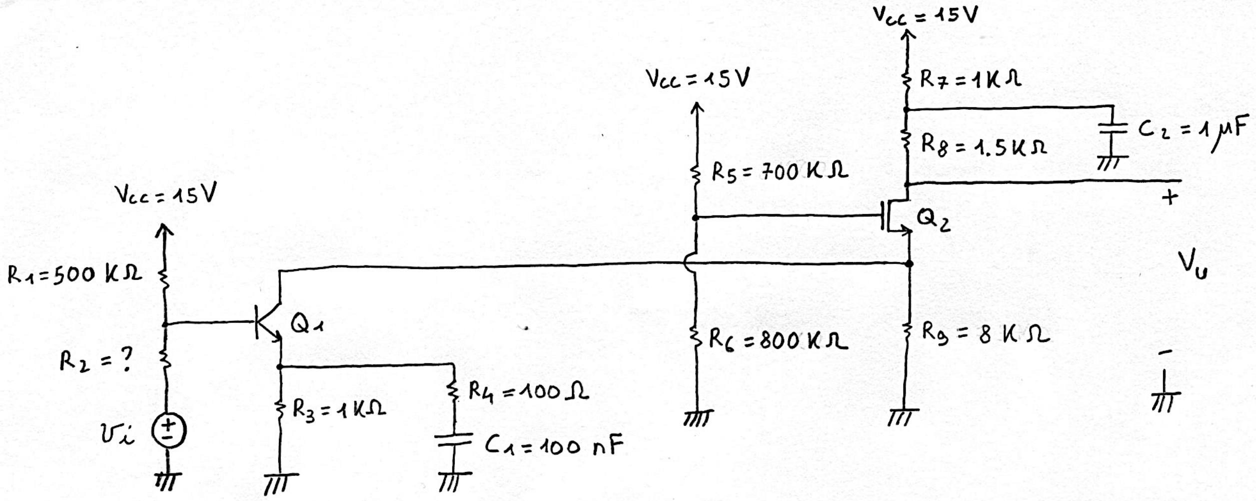
$\left.\frac{dv_U}{dt}\right|_{t=3ms^+} < \left.\frac{dv_{IN}}{dt}\right|_{t=3ms^+}$; dopodiché v_U sale con pendenza progressivamente minore, tendendo esponenzialmente verso 0 e rimanendo negativa, mentre v_{IN} cresce con pendenza costante fino a fermarsi una volta raggiunto un valore positivo (1V); quindi v_U si mantiene sempre sotto v_{IN}.]

In conclusione abbiamo che

$$v_U(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } 0 \le t \le 2ms \\ v_{IN}(t) & \text{per } 2ms \le t \le 3ms \\ (-1V)\cdot e^{-\frac{t-3ms}{2ms}} & \text{per } t \ge 3ms \end{cases}$$



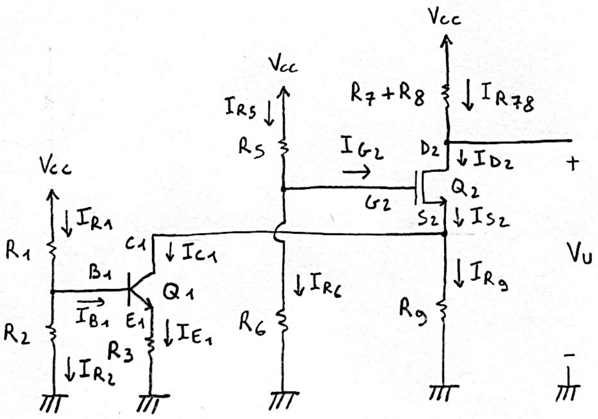
2)



per Q_1: $h_{FE1} = 129$; per Q_2: $V_{T2} = 1.32\,V$; $(V_U)_Q = 10V$

$\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W_2}{L_2} = 2\,\frac{mA}{V^2}$

In continua il circuito diventa:



$V_{D2} = V_U = 10V$

$I_{R78} = \frac{V_{cc} - V_U}{R_7 + R_8} = 2\,mA = I_{D2}$

$I_{G2} = 0 \rightarrow I_{S2} = I_{D2} = 2mA$; R_5 e R_6 in serie

$V_{G2} = V_{cc}\frac{R_6}{R_5 + R_6} = 8V$ e $I_{R5} = I_{R6} = 10\,mA$

ipotesi 1: Q_2 in saturazione

$I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2$ (con $K_2 = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W_2}{L_2} = 2\,\frac{mA}{V^2}$) $\rightarrow$

$V_{GS2} = V_{T2} \cancel{\pm} \sqrt{\frac{I_{D2}}{K_2}} = 2.32V > V_{T2}$

(un mos a canale n conduce se $V_{GS2} > V_{T2}$)

$V_{S2} = V_{G2} - V_{GS2} = 5.68\,V = V_{C1}$

$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 4.32V > V_{GS2} - V_{T2} = 1\,V$ ⟶ ipotesi 1 verificata

$I_{R9} = \frac{V_{S2}}{R_9} = 0.71\,mA$

$I_{C1} = I_{S2} - I_{R9} = 1.29\,mA$

ipotesi 2: Q_1 in zona attiva diretta

$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{FE1}} = 10\,\mu A > 0$

$I_{E1} = I_{C1} + I_{B1} = 1.3\,mA$

$V_{E1} = R_3 \cdot I_{E1} = 1.3\,V$

$V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = 4.38\,V > V_{CE\,sat} = 0.1\,V$ ⟶ ipotesi 2 verificata

$V_{B1} = V_{E1} + V_\gamma = 2\,V$

$I_{R1} = \frac{V_{cc} - V_{B1}}{R_1} = 26\,\mu A$

$I_{R2} = I_{R1} - I_{B1} = 16\,\mu A$

$R_2 = \frac{V_{B1}}{I_{R2}} = 125\,K\Omega$

$\left[g_{m2} = \left.\frac{\partial I_{D2}}{\partial V_{GS2}}\right|_Q = 2K_2(V_{GS2} - V_{T2}) = 4\,\frac{mA}{V} \right]$ NON RICHIESTO

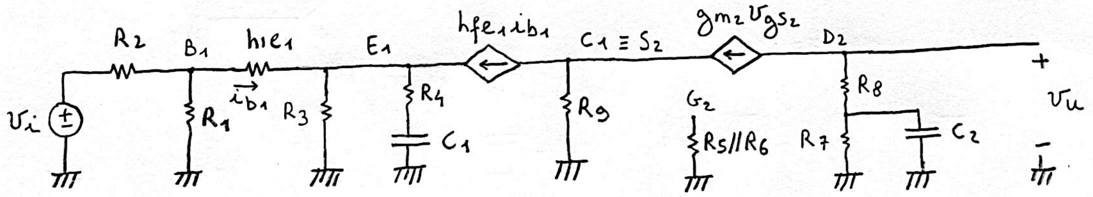
3) $R_2 = 100\,K\Omega$

$h_{fe1} = 150$

$h_{ie1} = 5\,K\Omega$

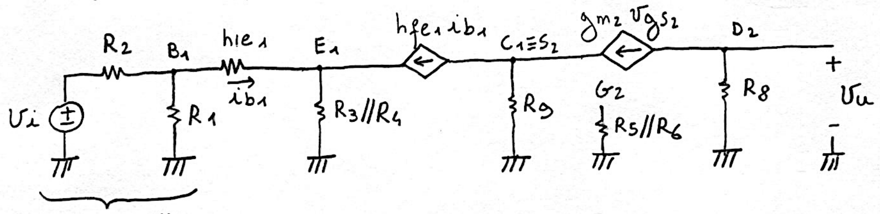
$g_{m2} = 4\,\frac{mA}{V}$

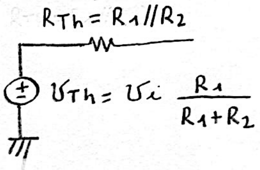
Circuito equivalente per le variazioni:



2 condensatori, nessuna maglia impropria → 2 poli

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





(equivalente di Thevenin)

$v_u = -R_8\, g_{m2}\, v_{gs2} = R_8\, g_{m2}\, v_{s2}$

$v_{g2} = 0$ perché in $R_5 // R_6$ (flottanti) non scorre corrente $\rightarrow v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = -v_{s2}$

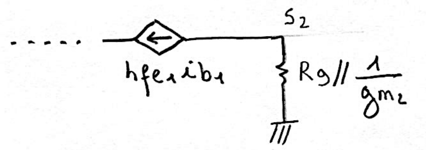
dobbiamo legare v_{s2} a i_{b1}; a tal fine possiamo scrivere che (essendo v_{s2} la tensione ai capi di R_9)

$v_{s2} = R_9 \cdot \underbrace{(g_{m2} v_{gs2} - h_{fe1} i_{b1})}_{\text{corrente che scorre in } R_9} = R_9(-g_{m2} v_{s2} - h_{fe1} i_{b1}) \rightarrow v_{s2}(1 + R_9 g_{m2}) = -R_9 h_{fe1} i_{b1} \rightarrow$

$v_{gs2} = -v_{s2}$

$$v_{s2} = -\frac{R_9 h_{fe1} i_{b1}}{1 + R_9 g_{m2}}$$

oppure possiamo ad esempio fare un equivalente di Thevenin di tutto ciò che sta a destra di $h_{fe1} i_{b1}$: la tensione di Thevenin (tensione a vuoto) di tale parte del circuito è nulla (perché in tale parte del circuito non ci sono generatori indipendenti), mentre la resistenza di Thevenin è il parallelo di R_9 e della resistenza vista dal source guardando verso $g_{m2} v_{gs2}$, che è pari a $\frac{1}{g_{m2}}$, per cui abbiamo:



quindi $v_{s2} = -h_{fe1} i_{b1} \left(R_9 // \frac{1}{g_{m2}}\right) = -h_{fe1} i_{b1} \frac{R_9 \cdot \frac{1}{g_{m2}}}{R_9 + \frac{1}{g_{m2}}} =$

$= -h_{fe1} i_{b1} \frac{R_9}{1 + R_9 g_{m2}}$

infine (usando l'equivalente di Thevenin della parte di circuito a sinistra di h_{ie1}):

$v_{Th} = R_{Th}\, i_{b1} + h_{ie1}\, i_{b1} + (R_3//R_4)(1 + h_{fe1})\, i_{b1} \rightarrow i_{b1} = \frac{v_{Th}}{R_{Th} + h_{ie1} + (R_3//R_4)(1 + h_{fe1})} =$

$= v_i \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{(R_1//R_2) + h_{ie1} + (R_3//R_4)(1 + h_{fe1})}$

in conclusione

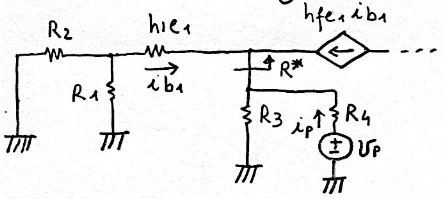
$$A_v(\infty) = \frac{v_u}{v_i} = -R_8\, g_{m2} \frac{R_9 h_{fe1}}{1 + R_9 g_{m2}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{1}{(R_1//R_2) + h_{ie1} + (R_3//R_4)(1 + h_{fe1})} = -1.781473$$

(negativo, come deve essere dato che si tratta della cascata di uno stadio a emettitore comune, invertente, e di uno stadio a gate comune, non invertente)

$|A_v(\infty)|_{dB} = 5.0156\ dB$

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

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

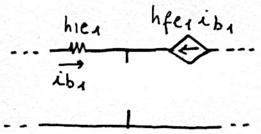


$R_{vc1}\left(=\frac{v_P}{i_P}\right) = R_4 + R_3 /\!/ R^*$ con $R^* = \frac{h_{ie1}+R_1/\!/R_2}{h_{fe1}+1}$, cioè

$$R_{vc1} = R_4 + R_3 /\!/ \left(\frac{h_{ie1}+R_1/\!/R_2}{h_{fe1}+1}\right) = 469.08078\ \Omega$$

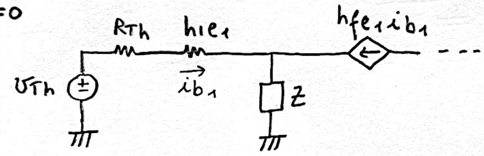
$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{vc1}} = 21318.29\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 3392.91\ Hz$$

la v_u si annulla per la s per cui $R_3 /\!/ \left(R_4 + \frac{1}{C_1 s}\right) = \infty$ perché in tale condizione abbiamo



per cui $i_{b1} + h_{fe1} i_{b1} = 0 \rightarrow \underbrace{(1+h_{fe1})}_{\neq 0} i_{b1} = 0 \rightarrow i_{b1} = 0 \rightarrow h_{fe1} i_{b1} = 0 \rightarrow g_{m2} v_{gs2} = 0 \rightarrow v_u = 0$

o equivalentemente abbiamo che



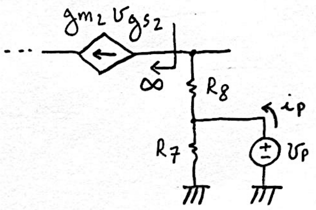
$$v_{Th} = R_{Th} i_{b1} + h_{ie1} i_{b1} + Z(h_{fe1}+1) i_{b1}$$

$$\rightarrow i_{b1} = \frac{v_{Th}}{R_{Th} + h_{ie1} + Z(h_{fe1}+1)}$$

che per $Z = R_3 /\!/ \left(R_4 + \frac{1}{C_1 s}\right) = \infty$ va a 0 $\rightarrow h_{fe1} i_{b1} = 0 \rightarrow g_{m2} v_{gs2} = 0 \rightarrow v_u = 0$; ma

$$R_3 /\!/ \left(R_4 + \frac{1}{C_1 s}\right) = \frac{R_3\left(R_4 + \frac{1}{C_1 s}\right)}{R_3 + R_4 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{R_3(1 + R_4 C_1 s)}{1 + (R_3+R_4) C_1 s} = \infty \rightarrow 1 + (R_3+R_4) C_1 s = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{(R_3+R_4) C_1} \rightarrow$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{(R_3+R_4) C_1} = 9090.\overline{90}\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{z1} = \frac{\omega_{z1}}{2\pi} = 1446.8631\ Hz$$



$$R_{vc2}\left(=\frac{v_P}{i_P}\right) = R_7 /\!/ (R_8 + \infty) = R_7 = 1K\Omega$$

$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{vc2}} = \frac{1}{C_2 R_7} = 1000\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 159.155\ Hz$$

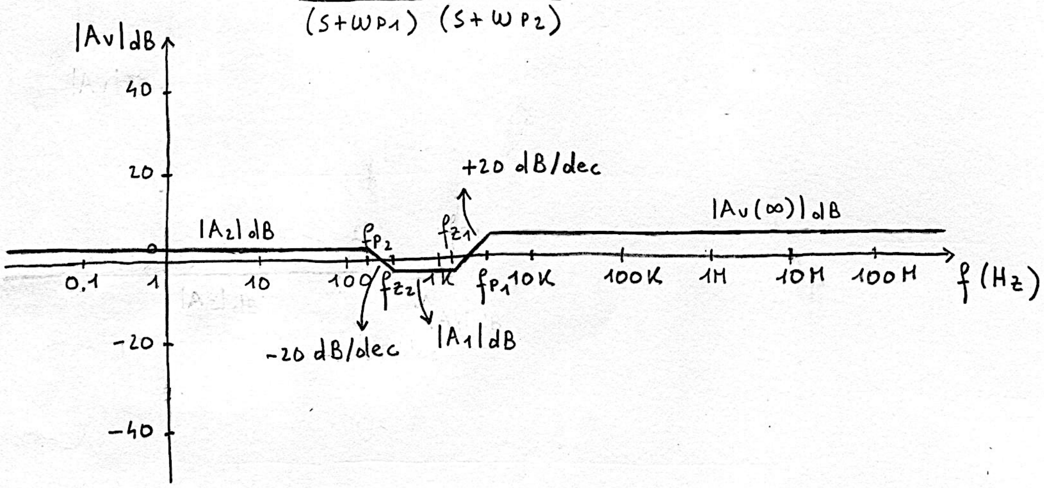
la v_u si annulla per la s per cui $R_8 + \left(R_7 /\!/ \frac{1}{C_2 s}\right) = 0 \rightarrow R_8 + \frac{R_7 \frac{1}{C_2 s}}{R_7 + \frac{1}{C_2 s}} = R_8 + \frac{R_7}{1 + R_7 C_2 s} =$

$$= \frac{R_7 + R_8 + R_7 R_8 C_2 s}{1 + R_7 C_2 s} = 0 \rightarrow R_7 + R_8 + R_7 R_8 C_2 s = 0 \rightarrow s = -\frac{R_7+R_8}{R_7 R_8 C_2} = -\frac{1}{\frac{R_7 R_8}{R_7+R_8} C_2} = -\frac{1}{(R_7/\!/R_8) C_2} \rightarrow$$

$$\omega_{z2} = \frac{1}{(R_7/\!/R_8) C_2} = 1666.\overline{6}\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{z2} = \frac{\omega_{z2}}{2\pi} = 265.2582\ Hz$$

La funzione di trasferimento è

$$A_v(s) = A_v(\infty) \frac{(s+\omega_{z1})(s+\omega_{z2})}{(s+\omega_{P1})(s+\omega_{P2})}$$



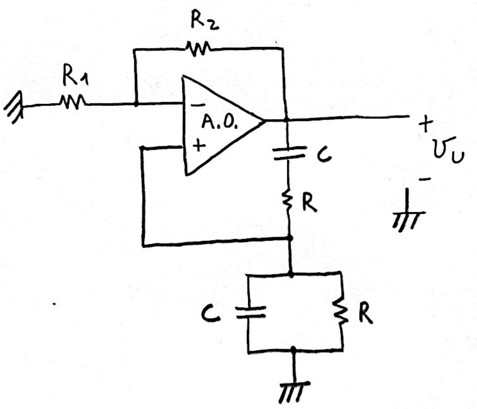
$$|A_1| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z1}}{f_{P1}} = 0.75969$$

$$|A_1|_{dB} = -2.3873\ dB$$

$$|A_2| = |A_1| \frac{f_{z2}}{f_{P2}} = 1.26614$$

$$|A_2|_{dB} = 2.0496\ dB$$

4)



A.O. ideale

$C = 500\ nF$

$R = 1\ K\Omega$

$R_1 = 1 K\Omega$

$R_2 = \dfrac{R_0}{1 + K \cdot V_{Umax}}$

con: $R_0 = 10\ K\Omega$

$K = 4\ V^{-1}$

$$\beta A(s) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCs}{(RCs)^2 + 3RCs + 1}$$

A partire dalla funzione di trasferimento $\beta A(s)$, ricaviamo la risposta in frequenza $\beta A(j\omega)$:

$$\beta A(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{RCj\omega}{(RCj\omega)^2 + 3RCj\omega + 1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{j\omega RC}{(1 - \omega^2R^2C^2) + j3\omega RC}$$

All'innesco deve esistere una ω_I tale che $\begin{cases} \angle \beta A(j\omega_I) = 0 \\ |\beta A(j\omega_I)| > 1 \end{cases}$;

a regime deve esistere una ω_0 tale che $\begin{cases} \angle \beta A(j\omega_0) = 0 \\ |\beta A(j\omega_0)| = 1 \end{cases}$ (condizioni di Barkhausen)

Poiché il numeratore di $\beta A(j\omega)$ è immaginario puro, per avere $\angle \beta A(j\omega) = 0$ dobbiamo 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:

$$1 - \omega^2R^2C^2 = 0 \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{R^2C^2} \xrightarrow{} \omega = \frac{1}{RC} = 2000\ \frac{rad}{s} \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = 318.3099\ Hz$$

(dato che $\omega > 0$)

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

All'innesco $V_{Umax} = 0$, per cui $R_2 = R_0 = 10 K\Omega$ e per $\omega = \omega_I$ si ha che

$$\beta A(j\omega_I) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{j\omega_I RC}{j3\omega_I RC} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3} = \frac{11}{3}$$

, per cui $|\beta A(j\omega_I)| = \frac{11}{3} > 1$, come deve essere all'innesco.

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

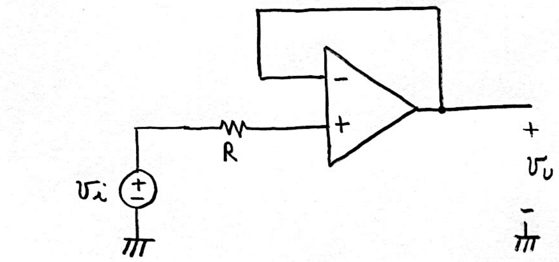
$$\beta A(j\omega_0) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{j\omega_0 RC}{j3\omega_0 RC} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3} = |\beta A(j\omega_0)|$$

, dobbiamo imporre che

$$\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{3} = 1 \rightarrow 1 + \frac{R_2}{R_1} = 3 \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 2 \rightarrow \frac{R_0}{1 + KV_{Umax}} \frac{1}{R_1} = 2 \rightarrow 1 + KV_{Umax} = \frac{R_0}{2R_1} \rightarrow$$

$$KV_{Umax} = \frac{R_0}{2R_1} - 1 \rightarrow V_{Umax} = \frac{1}{K}\left(\frac{R_0}{2R_1} - 1\right) = 1\ V$$

5)



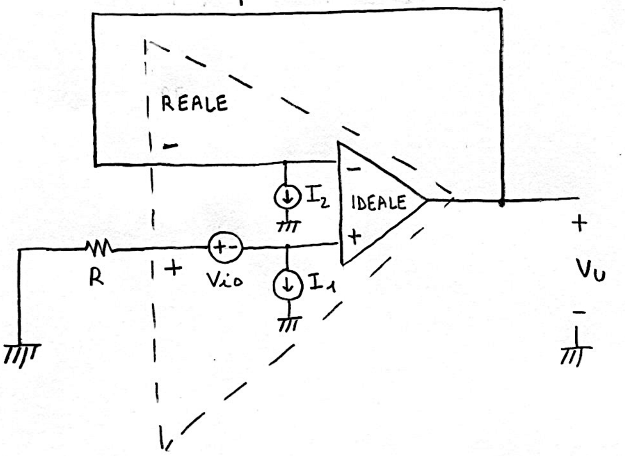
$R = 2 K\Omega$

$|V_{io}|_{max} = 4\ mV$

$I_B = \dfrac{I_1 + I_2}{2} = 60\ nA$

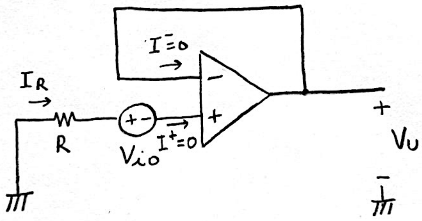
$|I_{io}|_{max} = |I_1 - I_2|_{max} = 20\ nA$

Per valutare l'effetto a regime sulla v_U dei soli generatori di offset (che sono generatori in continua) lavoriamo in continua (qui, non essendoci elementi reattivi, questo non ha effetto sul circuito da analizzare), disattiviamo v_i e sostituiamo all'amplificatore operazionale reale (quello che compare nello schema assegnato) lo schema equivalente in cui compaiono un amplificatore operazionale ideale e i generatori di offset:



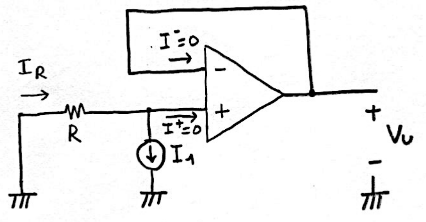
dopodiché calcoliamo l'effetto sull'uscita dei generatori di offset usando il principio di sovrapposizione degli effetti e sfruttando il metodo del cortocircuito virtuale per l'amplificatore operazionale ideale:

a) effetto di V_{io}:



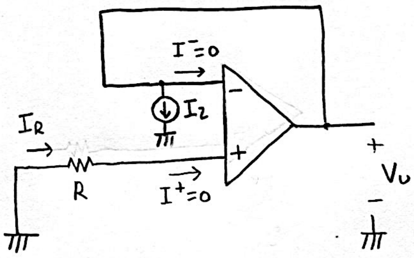
per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_R = 0 \rightarrow$ non c'è caduta su R $\rightarrow V^+ = -V_{io}$;
per il c.c.v. $V^- = V^+ = -V_{io}$;
di conseguenza $V_U = V^- = -V_{io}$

b) effetto di I_1:



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_R = I_1 \rightarrow V^+ = -RI_1$;
per il c.c.v. $V^- = V^+ = -RI_1$;
di conseguenza $V_U = V^- = -RI_1$

c) effetto di I_2:



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_R = 0 \rightarrow$ non c'è caduta su R $\rightarrow V^+ = 0$;
per il c.c.v. $V^- = V^+ = 0$;
di conseguenza $V_U = V^- = 0$ (I_2 non ha effetto sull'uscita)

Complessivamente abbiamo che

$$V_U = -V_{io} - RI_1 = -V_{io} - R\left(I_B + \frac{I_{io}}{2}\right) = -V_{io} \overbrace{- RI_B}^{-120\,\mu V} - R\frac{I_{io}}{2} = -V_{io} - 120\,\mu V - 1K\Omega \cdot I_{io}$$

$$\left[\begin{cases} I_B = \dfrac{I_1 + I_2}{2} \\ I_{io} = I_1 - I_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 + I_2 = 2I_B \\ I_1 - I_2 = I_{io} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2I_1 = 2I_B + I_{io} \\ 2I_2 = 2I_B - I_{io} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 = I_B + \dfrac{I_{io}}{2} \\ I_2 = I_B - \dfrac{I_{io}}{2} \end{cases} \right]$$

Poiché l'unico addendo il cui valore è noto (cioè $-RI_B$) è negativo, per ottenere la V_U di modulo massimo dobbiamo scegliere per gli altri due addendi (cioè $-V_{io}$ e $-\frac{R}{2}I_{io}$) il valore di modulo massimo e negativo, quindi scegliere $V_{io} = 4\,mV$ e $I_{io} = 20\,nA$, ottenendo così:

$$|V_U|_{max} = |-4\,mV - 120\,\mu V - 1\,K\Omega \cdot 20\,nA| = |-4\,mV - 120\,\mu V - 20\,\mu V| = |-4.14\,mV| = 4.14\,mV$$