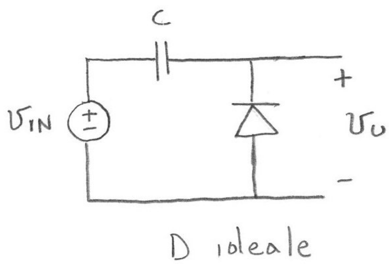
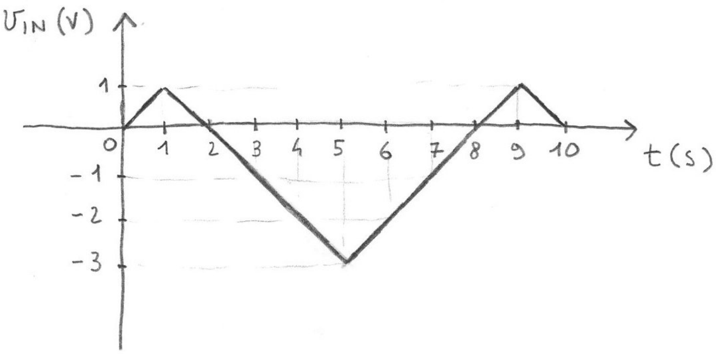
Scheda: **A22_06**	Data: **27 giugno 2022**

Cognome	Nome	Matricola

ESERCIZIO N°1
6 punti (4)

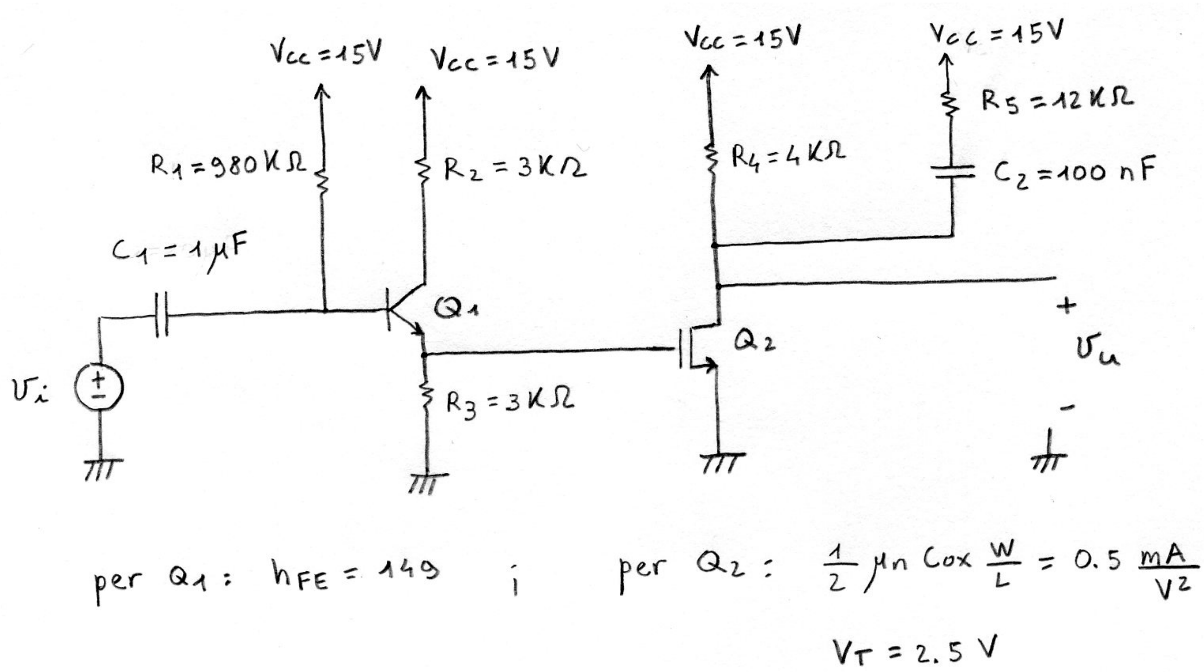
Si consideri il circuito rappresentato a sinistra in figura. Ipotizzando il condensatore inizialmente scarico, si ricavi passo passo e si disegni l'andamento nel tempo, per $0 \leq t \leq 10$ s, della tensione $v_U(t)$ in uscita da tale circuito quando in ingresso al circuito si applica la tensione $v_{IN}(t)$ 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 (e lo si verifichi). Si consideri il diodo ideale.





ESERCIZIO N°2
7 punti (4)

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.]



ESERCIZIO N°3
7.5 punti (4)

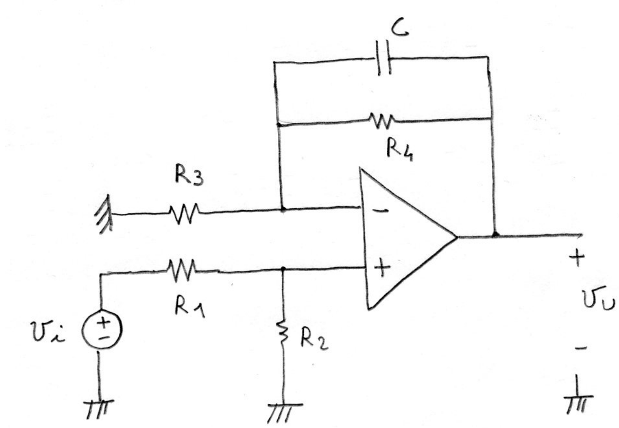
Considerando il circuito mostrato nell'esercizio precedente, se ne ricavi la funzione di trasferimento $A_v(s) = V_u/V_i$ (calcolando separatamente poli, zeri e costante moltiplicativa) e se ne grafichi il diagramma di Bode del modulo. Si consideri per Q_1: $h_{ie} = 6$ KΩ, $h_{fe} = 200$ e per Q_2: $g_m = 2$ mA/V.

ESERCIZIO N°4
6 punti (4)

Si progetti (mettendo in cascata due filtri di ordine 1 aventi lo stesso polo) un filtro passa-alto di ordine 2 con polo pari a 20 Krad/s e guadagno in banda passante pari a +4. Si realizzi in maniera tale che la sua funzione di trasferimento sia indipendente dall'impedenza della sorgente e del carico. Dopo averne disegnato lo schema circuitale, se ne trovi la funzione di trasferimento e si dimensionino tutti i suoi componenti circuitali.

ESERCIZIO N°5
6.5 punti (4)

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 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.



$C = 10\,\mu F$

$R_1 = R_2 = 2\,K\Omega$

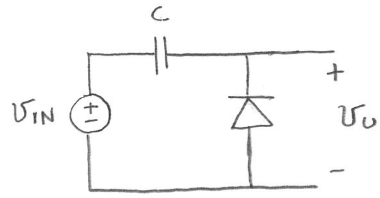
$R_3 = R_4 = 1\,K\Omega$

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

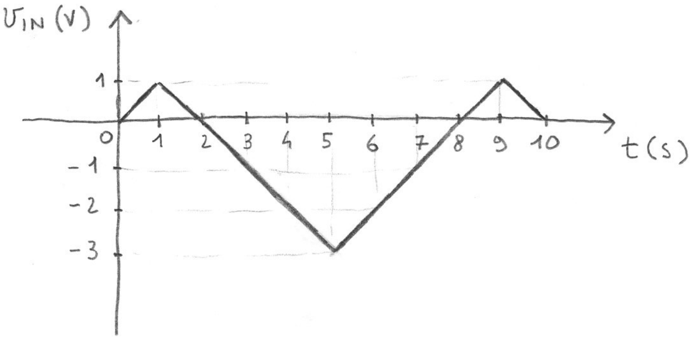
$I_B = \frac{I_1 + I_2}{2} = 100\,nA$

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

1)



D ideale

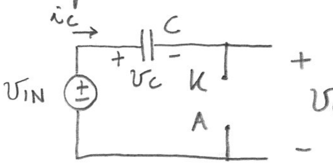


C inizialmente scarico;

per $t = 0$ $\quad v_U = v_{IN} - v_C = v_{IN} = 0$;

poi per t maggiori inizialmente la v_{IN} cresce e diventa positiva; visto che la tensione sull'anodo rispetto al nodo inferiore è nulla, l'ipotesi più probabile è che il diodo D sia interdetto

ipotesi: D interdetto

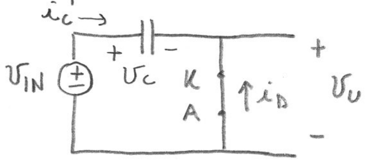


la maglia è aperta $\rightarrow i_C = C \dfrac{dv_C}{dt} = 0 \rightarrow v_C$ costante e pari al valore che aveva all'inizio di questa fase, cioè 0 $\rightarrow$

$v_U = v_{IN} - v_C = v_{IN}$

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

ipotesi: D conduce

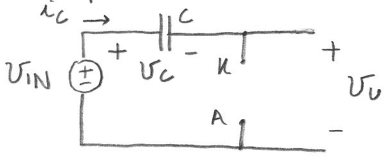


$v_U = 0$

$v_C = v_{IN} - 0 = v_{IN}$

verifica dell'ipotesi: $i_D = -i_C = -C\dfrac{dv_C}{dt} = -C\dfrac{dv_{IN}}{dt} > 0 \rightarrow \dfrac{dv_{IN}}{dt} < 0$, vero fino a $t = 5s$; dopo $t = 5s$ quest'ipotesi viene meno, quindi ipotizziamo che il diodo sia interdetto

ipotesi: D interdetto



la maglia è aperta $\rightarrow i_C = C\dfrac{dv_C}{dt} = 0 \rightarrow v_C$ costante e pari al valore che aveva all'inizio di questa fase, cioè alla fine della fase precedente, cioè a $v_{IN}(5s) = -3V$

$v_U = v_{IN} - v_C = v_{IN} + 3V$

verifica dell'ipotesi: $v_{AK} = v_A - v_K = -(v_{IN} - v_C) = -(v_{IN} + 3V) = -v_{IN} - 3V < 0 \rightarrow$ $v_{IN} > -3V$, vero sicuramente fino a $t = 10s$ (ultimo istante da considerare)

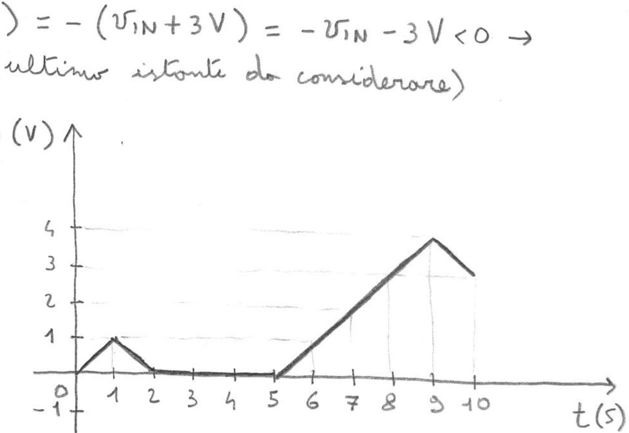
Quindi:

per $0 < t < 2s$: D interdetto e $v_U = v_{IN}$

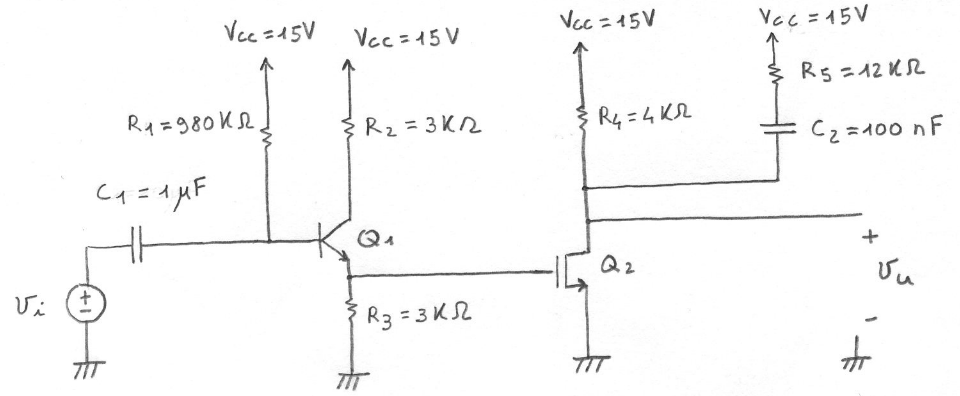
per $2s < t < 5s$: D conduce e $v_U = 0$

per $5s < t < 10s$: D interdetto e $v_U = v_{IN} + 3V$

È un fissatore in basso a zero.



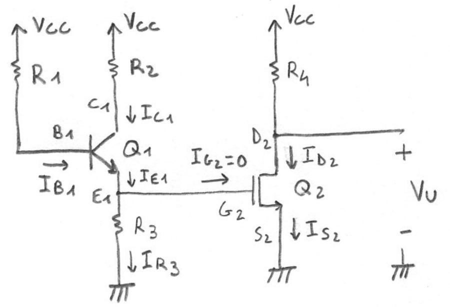
2)



per Q_1: $h_{FE} = 149$; per Q_2: $\frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L} = 0.5\ \frac{mA}{V^2}$

$V_T = 2.5\ V$

In continua il circuito diventa:



ipotesi 1: Q_1 in zona attiva diretta

$V_{BE_1} = 0.7V$

$I_{C_1} = h_{FE}\, I_{B_1}$

$I_{E_1} = I_{B_1} + I_{C_1} = (h_{FE}+1)\, I_{B_1}$

$I_{G_2} = 0 \rightarrow I_{R_3} = I_{E_1}$

equilibrio delle tensioni alla maglia V_{cc}, R_1, V_{BE_1}, R_3:

$V_{cc} = R_1 I_{B_1} + V_\gamma + R_3 I_{R_3} = R_1 I_{B_1} + V_\gamma + R_3 (h_{FE}+1) I_{B_1} \rightarrow$

$I_{B_1} = \dfrac{V_{cc} - V_\gamma}{R_1 + R_3(h_{FE}+1)} = 10\mu A > 0$

$I_{C_1} = h_{FE}\, I_{B_1} = 1.49\ mA$

$I_{E_1} = I_{B_1} + I_{C_1} = 1.5\ mA = I_{R_3}$

$V_{C_1} = V_{cc} - R_2 I_{C_1} = 10.53\ V$

$V_{E_1} = R_3 I_{R_3} = 4.5V = V_{G_2}$; $V_{B_1} = V_{E_1} + V_\gamma = 5.2V$

$V_{CE_1} = V_{C_1} - V_{E_1} = 6.03V > V_{CE\,sat} \approx 0.1V \longrightarrow$ ipotesi 1 verificata

$V_{GS_2} = V_{G_2} - V_{S_2} = 4.5\ V > V_T = 2.5V$

ipotesi 2: Q_2 in saturazione

$I_{D_2} = K\,(V_{GS_2} - V_T)^2$ con $K = \frac{1}{2}\mu_n C_{ox}\frac{W}{L} = 0.5\ \frac{mA}{V^2}$

$I_{D_2} = 2\ mA \underset{\uparrow}{=} I_{S_2} = I_{R_4} \rightarrow V_U = V_{cc} - R_4 I_{D_2} = 7V = V_{D_2}$

dato che $I_{G_2} = 0$

$V_{DS_2} = V_{D_2} - V_{S_2} = V_{D_2} = 7V > V_{GS_2} - V_T = 2V \longrightarrow$ ipotesi 2 verificata

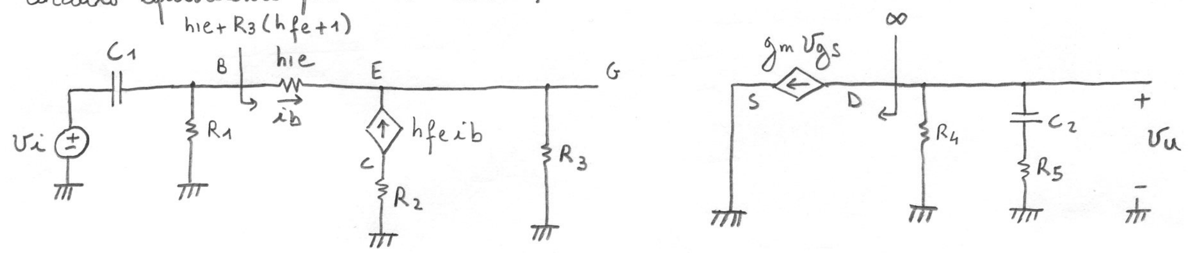
$\left[g_m = \left.\dfrac{\partial I_{D_2}}{\partial V_{GS_2}}\right|_Q = 2K(V_{GS_2} - V_T) = 2\ \dfrac{mA}{V} \right]$ NON RICHIESTO

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

$h_{fe} = 200$

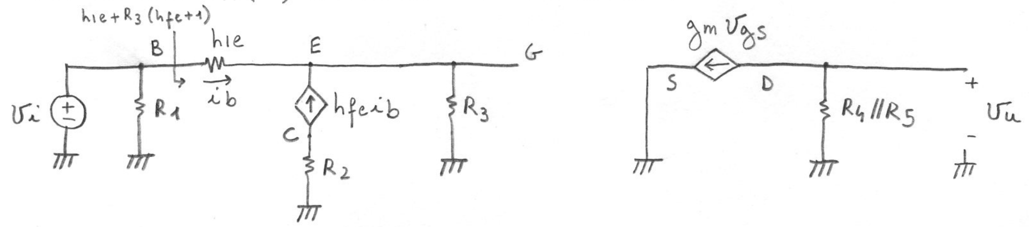
$g_m = 2\,\frac{mA}{V}$

Circuito equivalente per le variazioni:



2 condensatori, nessuna maglia impropria → 2 poli

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



$v_u = -(R_4 // R_5)\, g_m v_{gs}$

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

$v_g = R_3\,(h_{fe}+1)\, i_b$

$v_i = h_{ie}\, i_b + R_3\,(h_{fe}+1)\, i_b \rightarrow i_b = \frac{v_i}{h_{ie}+R_3(h_{fe}+1)}$

$A_v(\infty) = \frac{v_u}{v_i} = -(R_4//R_5)\, g_m \frac{R_3(h_{fe}+1)}{h_{ie}+R_3(h_{fe}+1)} = -5.9409$ (negativo, come deve essere visto che si tratta di uno stadio a collettore comune, non invertente, e di uno stadio a source comune, invertente, in cascata)

$|A_v(\infty)|_{dB} = 15.477\, dB$

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

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

$R_{VC_1} = R_1 // (h_{ie} + R_3(h_{fe}+1)) = 375594.7\ \Omega$

$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 2.6624\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 0.4237\ Hz$

dato che C_1 si trova in serie sull'unico percorso che porta l'effetto del segnale in uscita, la v_u si annulla per la s per cui $\frac{1}{C_1 s} = \infty \rightarrow s=0 \rightarrow \omega_{Z1} = 0 \rightarrow f_{Z1} = \frac{\omega_{Z1}}{2\pi} = 0$

$R_{VC2} = R_5 + (R_4 // \infty) = R_5 + R_4 = 16\ K\Omega$

$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{VC2}} = 625\ \frac{rad}{s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 99.4718\ Hz$

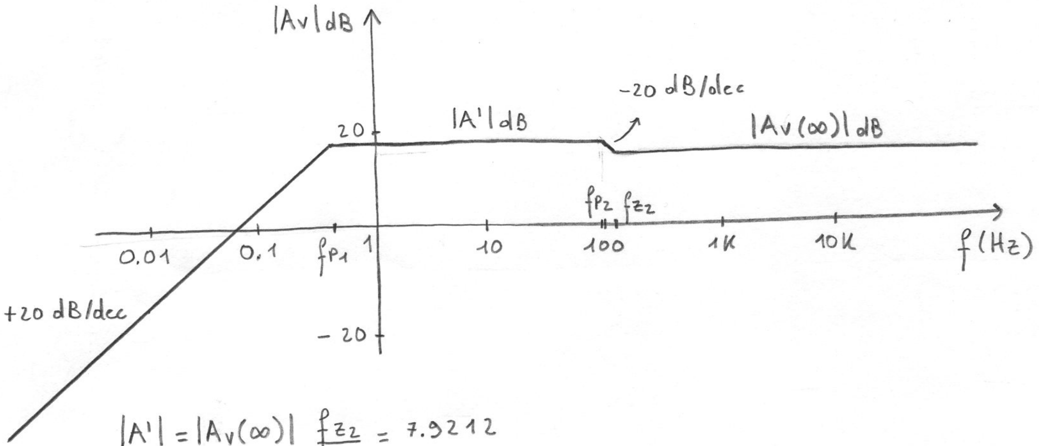
la v_u si annulla per la s per cui $R_5 + \frac{1}{C_2 s} = 0$ perché in tale condizione l'uscita è cortocircuitata

$R_5 + \frac{1}{C_2 s} = \frac{R_5 C_2 s + 1}{C_2 s} = 0 \rightarrow R_5 C_2 s + 1 = 0 \rightarrow s = -\frac{1}{R_5 C_2} \rightarrow \omega_{Z2} = \frac{1}{R_5 C_2} = 833.\bar{3}\ \frac{rad}{s} \rightarrow$

$f_{Z2} = \frac{\omega_{Z2}}{2\pi} = 132.629\ Hz$

La funzione di trasferimento è

$$A_v(s) = A_v(\infty)\,\frac{s\,(s+\omega_{Z2})}{(s+\omega_{P1})(s+\omega_{P2})}$$

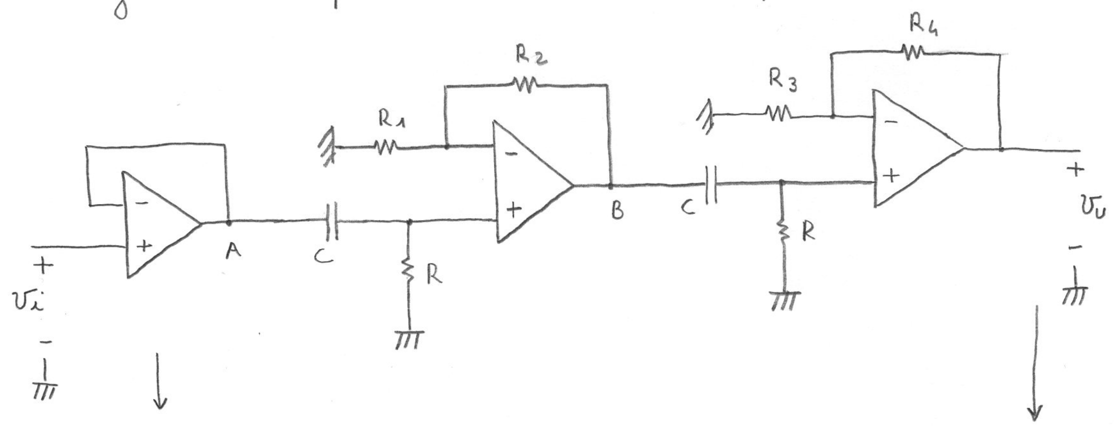


$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z2}}{f_{p2}} = 7.9212$$

$$|A'|_{dB} = 17.9758$$

4) Per ottenere un filtro passa-alto di ordine 2 con guadagno in banda passante positivo si possono mettere in cascata due filtri passa-alto di ordine 1 non invertenti oppure due filtri passa-alto di ordine 1 invertenti. Il guadagno complessivo in banda passante sarà pari al prodotto dei guadagni in banda passante dei due filtri di ordine 1.

Scegliamo ad esempio di mettere in cascata due filtri di ordine 1 non invertenti:



buffer, che consente di rendere la $R_{IN} \approx \infty$ e quindi la funzione di trasferimento del filtro indipendente dalla resistenza della sorgente

qui non è necessario mettere un buffer per rendere la $R_{out} \approx 0$ e quindi la funzione di trasferimento indipendente dalla resistenza del carico perché la R_{out} è già circa nulla

$$v_A = v_i$$

$$v_B = v_A \frac{R}{R + \frac{1}{CS}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = v_A \frac{RCS}{1+RCS} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$v_U = v_B \frac{R}{R + \frac{1}{CS}} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = v_B \frac{RCS}{1+RCS} \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$$

$$H = \frac{v_U}{v_i} = \underbrace{\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)}_{H_\infty} \left(\frac{RCS}{1+\underbrace{RCS}_{\frac{S}{\frac{1}{RC}} = \frac{S}{\omega_P}}}\right)^2 = H_\infty \left(\frac{\frac{S}{\omega_P}}{1 + \frac{S}{\omega_P}}\right)^2 = H_\infty \frac{S^2}{(S+\omega_P)^2}$$

con $H_\infty = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$

$\omega_P = \frac{1}{RC}$ (RC è stato scelto identico per i due filtri di ordine 1 affinché essi avessero lo stesso polo)

Dimensionamento dei vari componenti:

$\omega_P = 20 \frac{Krad}{S} \rightarrow$ se scegliamo ad es. $R = 5K\Omega$, $C = \frac{1}{R\omega_P} = 10\,nF$

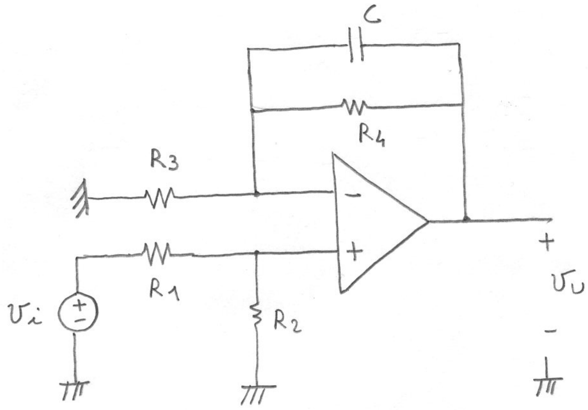
Possiamo scegliere come distribuire il guadagno tra i due filtri di ordine 1 perché:

$H_\infty = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = 4$; ad esempio:

$1 + \frac{R_2}{R_1} = 2 \rightarrow \frac{R_2}{R_1} = 1 \rightarrow$ ad es. $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$

$1 + \frac{R_4}{R_3} = 2 \rightarrow \frac{R_4}{R_3} = 1 \rightarrow$ ad es. $R_3 = 1K\Omega$, $R_4 = 1K\Omega$

5)



$C = 10\,\mu F$

$R_1 = R_2 = 2\,K\Omega$

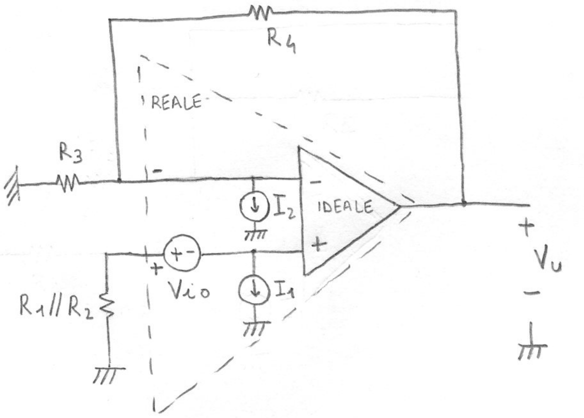
$R_3 = R_4 = 1\,K\Omega$

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

$I_B = \dfrac{I_1 + I_2}{2} = 100\,nA$

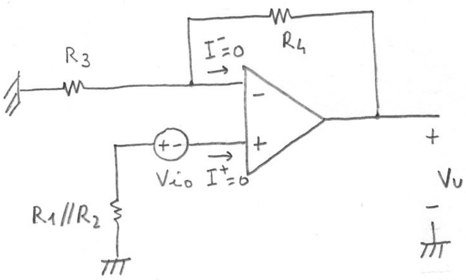
$|I_{io}|_{max} = |I_1 - I_2|_{max} = 20\,nA$

Per valutare l'effetto a regime sulla v_U dei soli generatori di offset (che sono generatori in continua) lavoriamo in continua (quindi sostituiamo il condensatore C con un ramo aperto), disattiviamo v_i 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}:

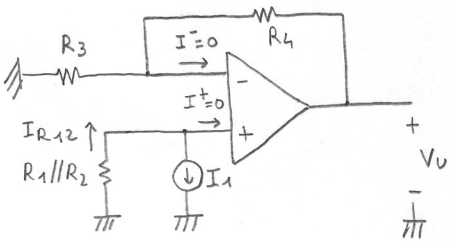


per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow$ non c'è caduta su $R_1//R_2 \rightarrow V^+ = -V_{io}$;

per il c.c.v. $V_U = V^+\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = -V_{io}\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$

(amplificatore non invertente)

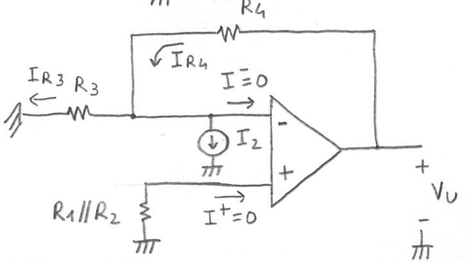
b) effetto di I_1:



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow I_{R12} = I_1 \rightarrow V^+ = -(R_1//R_2)\,I_1$

per il c.c.v. $V_U = V^+\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) = -(R_1//R_2)\,I_1\left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)$

c) effetto di I_2:



per il c.c.v. $I^+ = 0 \rightarrow$ non c'è caduta su $R_1//R_2 \rightarrow V^+ = 0$

per il c.c.v. $V^- = V^+ = 0$

$I_{R3} = \dfrac{V^-}{R_3} = 0 \rightarrow I_{R4} = I_{R3} + I_2 + I^- = I_2$

$V_U = V^- + R_4 I_{R4} = R_4 I_2$

Complessivamente abbiamo che

$$V_U = -V_{io}\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right) - (R_1//R_2)\, I_1 \left(1+\frac{R_4}{R_3}\right) + R_4 I_2 \underset{\uparrow}{=} -V_{io}\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right) - (R_1//R_2)\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)\left(I_B+\frac{I_{io}}{2}\right) + R_4\left(I_B-\frac{I_{io}}{2}\right) =$$

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

$$= -\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right) V_{io} + \left[R_4 - (R_1//R_2)\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)\right] I_B - \left[R_4 + (R_1//R_2)\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)\right]\frac{I_{io}}{2} =$$

$$= -2\,V_{io} \underbrace{-\,1\,K\Omega \cdot I_B}_{-0.1\,mV} - 1.5\,K\Omega \cdot I_{io} = -2\,V_{io} - 0.1\,mV - 1.5\,K\Omega \cdot I_{io}$$

Poiché l'unico addendo il cui valore è noto $\left(\text{cioè } \left(R_4 - (R_1//R_2)\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)\right) I_B\right)$ è negativo, per ottenere la V_U di modulo massimo dobbiamo scegliere gli altri due addendi $\left(\text{cioè } -\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)V_{io} \text{ e } -\left[R_4 + (R_1//R_2)\left(1+\frac{R_4}{R_3}\right)\frac{I_{io}}{2}\right]\right)$ il valore di modulo massimo e negativo, quindi scegliere $V_{io} = 6\,mV$ e $I_{io} = 20\,nA$, ottenendo così

$$|V_U|_{max} = |-12\,mV - 0.1\,mV - 0.03\,mV| = |-12.13\,mV| = 12.13\,mV$$