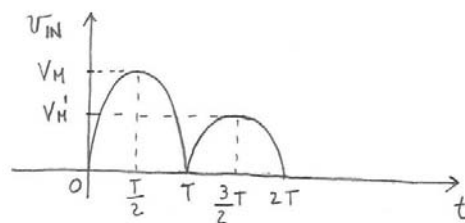
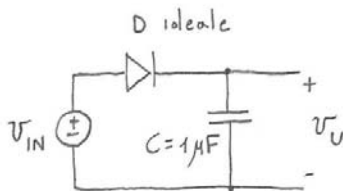


ESERCIZIO N°1

6 punti (4)

Si consideri il rivelatore di picco rappresentato a sinistra nella seguente figura. Ipotizzando il condensatore inizialmente scarico, si disegni l'andamento nel tempo, per $0 \leq t \leq 2T$, 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 nella figura. In particolare, si dica in quali intervalli di tempo il diodo conduce e in quali è interdetto e si verifichi tale stato. Si consideri il diodo ideale.

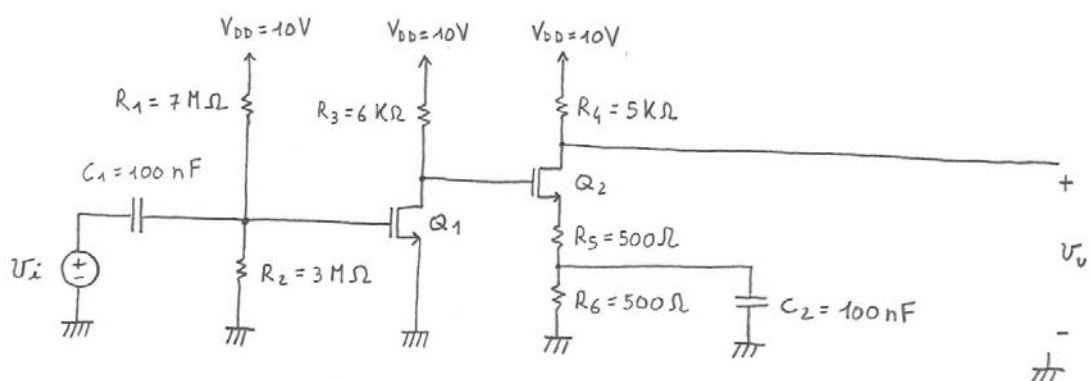


$$V_H' < V_H$$

ESERCIZIO N°2

7 punti (4)

Con riferimento al circuito in figura, determinare il punto di lavoro dei transistori Q_1 e Q_2 ed il valore di V_U a riposo. [Si consiglia di determinare prima il punto di lavoro di Q_1 ; il punto di lavoro di Q_2 andrà poi determinato risolvendo una semplice equazione di secondo grado.]



$$\text{per } Q_1: \quad \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_1}{L_1} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \quad ; \quad V_{T1} = 2 \text{ V}$$

$$\text{per } Q_2: \quad \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_2}{L_2} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \quad ; \quad V_{T2} = 2 \text{ V}$$

ESERCIZIO N°3

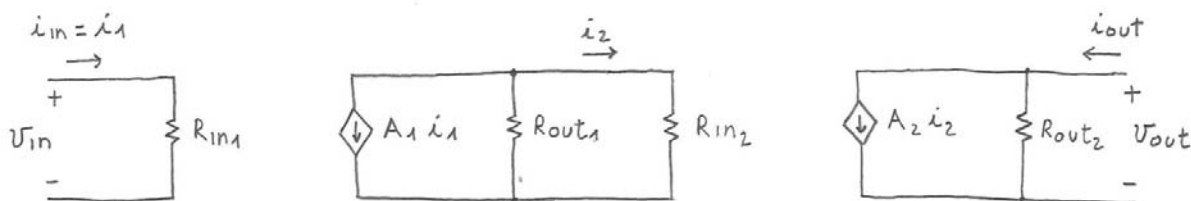
7.5 punti (4)

Si consideri il circuito mostrato nell'esercizio precedente. Considerando per Q_1 : $g_{m1}=2 \text{ mA/V}$ e per Q_2 : $g_{m2}=2 \text{ mA/V}$, 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 non è richiesto.

ESERCIZIO N°4

6.5 punti (4)

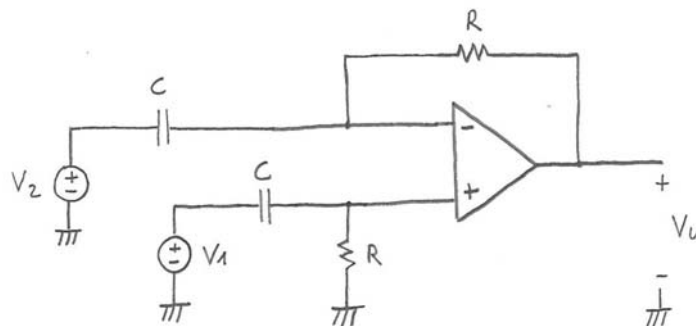
Si ricavino i parametri h per il quadripolo riportato nella seguente figura (le grandezze sulla porta di ingresso sono indicate con i_{in} e v_{in} , le grandezze sulla porta di uscita sono indicate con i_{out} e v_{out}).



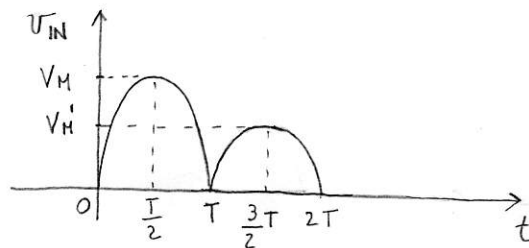
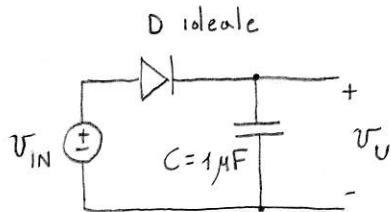
ESERCIZIO N°5

6 punti (4)

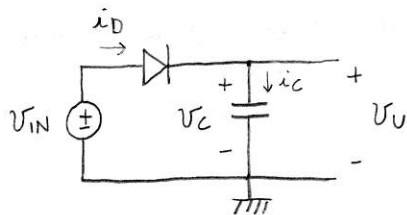
Svolgendo il calcolo in s (e sostituendo quindi ai condensatori le relative impedenze), ricavare il legame tra la tensione di uscita $V_u(s)$ e le due tensioni di ingresso $V_1(s)$ e $V_2(s)$ nel seguente circuito. Si consideri l'amplificatore operazionale ideale e si considerino i due condensatori C inizialmente scarichi.



①



$$V_M' < V_M$$

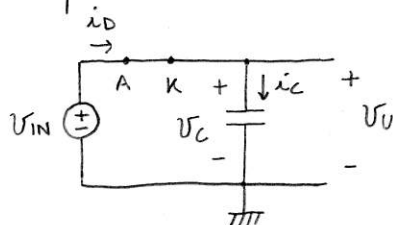


assumiamo C inizialmente scarica

$$v_C(0) = 0$$

partendo da $t=0$ inizialmente la v_{IN} cresce e diventa >0 ; visto che invece sul catodo del diodo la tensione rispetto al nodo inferiore è 0 presumibilmente D conduce

ipotesi: D conduce



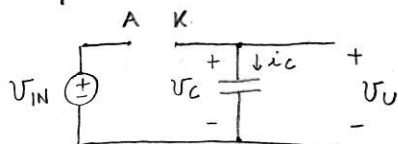
$$v_U = v_{IN}$$

verifica:

$$i_D = i_C = C \frac{dv_C}{dt} = C \frac{dv_{IN}}{dt} > 0 \quad \text{vero finché } v_{IN} \text{ cresce (cioè fino a } \frac{T}{2})$$

per $t = \frac{T}{2}$ cade l'ipotesi di diodo in conduzione, quindi facciamo la seguente

ipotesi: D interdetto



$$i_C = C \frac{dv_C}{dt} = C \frac{dv_U}{dt} = 0 \rightarrow v_U \text{ costante e pari all'ultimo valore che } v_U \text{ ha}$$

assunto nella fase precedente, cioè a $v_U(t = \frac{T}{2}) = v_{IN}(t = \frac{T}{2}) = V_M$

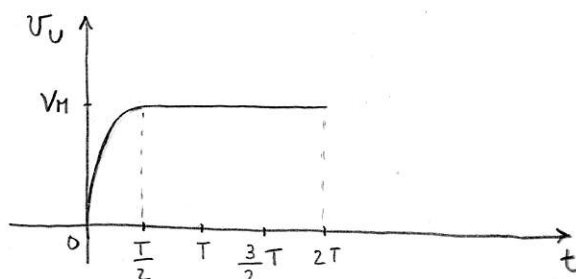
verifica:

$$v_{AK} = v_{IN} - v_U < 0 \rightarrow v_{IN} < v_U \quad \text{vero finché } v_{IN} < V_M;$$

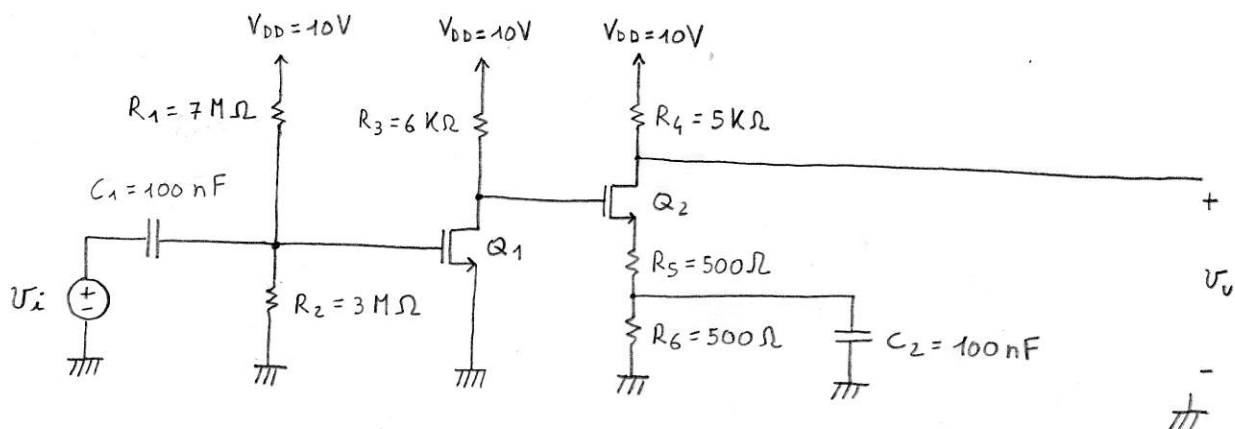
poiché da $t = \frac{T}{2}$ a $t = 2T$ la v_{IN} rimane sotto V_M , il diodo rimane interdetto

Riassumendo:

$$\begin{cases} \text{per } 0 < t < \frac{T}{2}: D \text{ conduce} \\ \text{per } \frac{T}{2} < t < 2T: D \text{ interdetto} \end{cases}$$



(2)



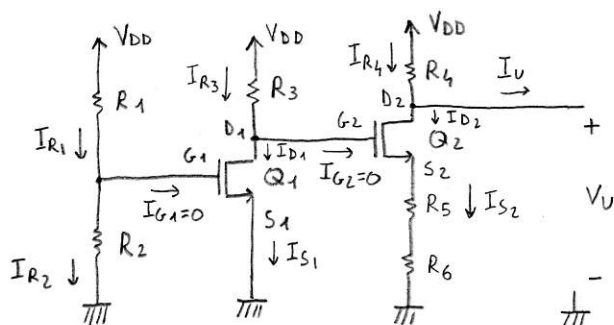
per Q_1 : $\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_1}{L_1} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$

$V_{T1} = 2 \text{ V}$

per Q_2 : $\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_2}{L_2} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$

$V_{T2} = 2 \text{ V}$

In continua il circuito diventa:



$I_{G1}=0 \rightarrow I_{R1}=I_{R2} = \frac{V_{DD}}{R_1+R_2} = 1 \mu\text{A}$

$V_{G1} = V_{DD} \frac{R_2}{R_1+R_2} = 3 \text{ V}$

$V_{S1} = 0$

$V_{GS1} = V_{G1} - V_{S1} = 3 \text{ V} > V_{T1} = 2 \text{ V}$

ipotesi 1: Q_1 in saturazione

$I_{D1} = K_1 (V_{GS1} - V_{T1})^2 = 1 \text{ mA}$

$K_1 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_1}{L_1} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$

$I_{S1} = I_{D1} = 1 \text{ mA}$ (perché $I_{G1}=0$)

$I_{R3} = I_{D1} + I_{G2} = I_{D1} = 1 \text{ mA}$

(perché $I_{G2}=0$)

$V_{D1} = V_{DD} - R_3 I_{R3} = 4 \text{ V} = V_{G2}$

$V_{DS1} = V_{D1} - V_{S1} = V_{D1} = 4 \text{ V} > V_{GS1} - V_{T1} = 1 \text{ V}$

ipotesi 1 verificata

ipotesi 2: Q_2 in saturazione

$$\begin{cases} I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2 & \text{con } K_2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W_2}{L_2} = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \\ V_{GS2} = V_{G2} - (R_5 + R_6) I_{S2} = V_{G2} - (R_5 + R_6) I_{D2} \end{cases}$$

sostituendo la I_{D2} data dalla 1ª equazione nella 2ª equazione otteniamo:

$V_{GS2} = V_{G2} - (R_5 + R_6) K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2 \rightarrow$

$$V_{GS2} = V_{G2} - (R_5 + R_6) K_2 [V_{GS2}^2 - 2 V_{T2} V_{GS2} + V_{T2}^2] \rightarrow$$

$$V_{GS2} = V_{G2} - (R_5 + R_6) K_2 V_{GS2}^2 + (R_5 + R_6) K_2 2 V_{T2} V_{GS2} - (R_5 + R_6) K_2 V_{T2}^2 \rightarrow$$

$$[(R_5 + R_6) K_2] V_{GS2}^2 + [1 - (R_5 + R_6) K_2 \cdot 2 V_{T2}] V_{GS2} - [V_{G2} + (R_5 + R_6) K_2 V_{T2}^2] = 0 \rightarrow$$

$$1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} = 1 - 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \cdot 2 \cdot 2 \text{ V} = 4 \text{ V} - 1 \text{ k}\Omega \cdot 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \cdot (2 \text{ V})^2 =$$

$$= 1 \Omega \frac{\text{A}}{\text{V}^2} = = 1 - 4 \Omega \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}^2} \cdot \text{V} = = 4 \text{ V} - 4 \Omega \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}^2} \cdot \text{V}^2 =$$

$$= 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} \frac{\text{A}}{\text{V}^2} = = 1 - 4 \frac{\text{V}}{\text{A}} \frac{\text{A}}{\text{V}^2} = = 4 \text{ V} - 4 \frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{A}}{\text{V}^2} \cdot \text{V}^2 =$$

$$= 1 \text{ V}^{-1} = = 1 - 4 = -3 = 4 \text{ V} - 4 \text{ V} = 0 \text{ V}$$

$$(1 \text{ V}^{-1}) \cdot V_{GS2}^2 - 3 V_{GS2} = 0 \rightarrow (\text{moltiplicando tutto per } 1 \text{ V}) \quad 1 \cdot V_{GS2}^2 - (3 \text{ V}) \cdot V_{GS2} = 0 \rightarrow$$

$$V_{GS2} (V_{GS2} - 3 \text{ V}) = 0 \rightarrow \begin{cases} V_{GS2} = 0 \text{ (soluzione da scartare perché } < V_{T2} \text{, quindi non verifica l'ipotesi)} \\ V_{GS2} = 3 \text{ V che è la soluzione da considerare in quanto } > V_{T2} \end{cases}$$

$V_{GS2} = 3 \text{ V}$, che sostituito in una delle 2 equazioni del sistema racchiuse con le parentesi graffe (ad esempio la prima) dà

$$I_{D2} = K_2 (V_{GS2} - V_{T2})^2 = 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \cdot (3 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 = 1 \text{ mA}$$

$$V_{S2} = (R_5 + R_6) I_{D2} = 1 \text{ V}$$

$$I_{R4} = I_{D2} = 1 \text{ mA} \quad (\text{perché } I_U = 0 \text{ in quanto nessun carico è attaccato sulla porta di uscita})$$

$$V_{D2} = V_{DD} - R_4 I_{R4} = 5 \text{ V} = V_U$$

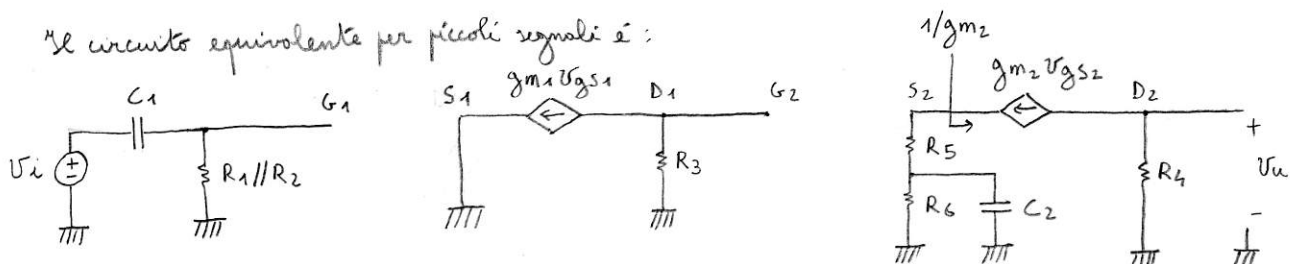
$$V_{DS2} = V_{D2} - V_{S2} = 4 \text{ V} > V_{GS2} - V_{T2} = 1 \text{ V} \quad \text{ipotesi 2 verificata}$$

$$V_{GS2} = 3 \text{ V} > V_{T2} = 2 \text{ V}$$

$$\left[\begin{aligned} g_{m1} &= \frac{\partial I_{D1}}{\partial V_{GS1}} \Big|_{V_{DS1} = V_{DS1Q}} = 2 K_1 (V_{GS1} - V_{T1}) = \frac{2 \text{ mA}}{\text{V}} \\ g_{m2} &= \frac{\partial I_{D2}}{\partial V_{GS2}} \Big|_{V_{DS2} = V_{DS2Q}} = 2 K_2 (V_{GS2} - V_{T2}) = \frac{2 \text{ mA}}{\text{V}} \end{aligned} \right] \quad \text{NON RICHIESTO}$$

$$\textcircled{3} \quad g_{m1} = g_{m2} = 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

Il circuito equivalente per piccoli segnali è:



ci sono 2 condensatori indipendenti (senza maglie improprie) $\rightarrow$ ci sono 2 poli
 $A_V(\infty) \neq 0 \rightarrow$ il numero degli zeri è uguale al numero dei poli $\rightarrow$ ci sono 2 zeri

$$R_{VC1} = R_1 \parallel R_2 = 2.1 \text{ M}\Omega$$

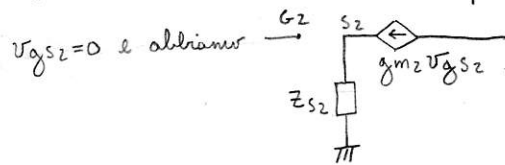
$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1 R_{VC1}} = 4.7619 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P1} = \frac{\omega_{P1}}{2\pi} = 0.7579 \text{ Hz}$$

C_1 introduce uno zero in corrispondenza del valore di s per cui $\frac{1}{C_1 s} = \infty \rightarrow s = 0 \rightarrow \omega_{Z1} = 0$
 (infatti C_1 è posto in serie sull'unico percorso che porta l'effetto del segnale in uscita)

$$R_{VC2} = R_6 \parallel \left(R_5 + \frac{1}{g_{m2}} \right) = 333.3 \Omega$$

$$\omega_{P2} = \frac{1}{C_2 R_{VC2}} = 30000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{P2} = \frac{\omega_{P2}}{2\pi} = 4774.6483 \text{ Hz}$$

C_2 introduce una zero in corrispondenza del valore di s per cui $R_5 + R_6 \parallel \frac{1}{C_2 s} = \infty$ (in quanto $v_u = 0$ se



$$v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{g2} - g_{m2} v_{gs2} z_{s2} \rightarrow$$

$$v_{gs2} (1 + g_{m2} z_{s2}) = v_{g2} \rightarrow$$

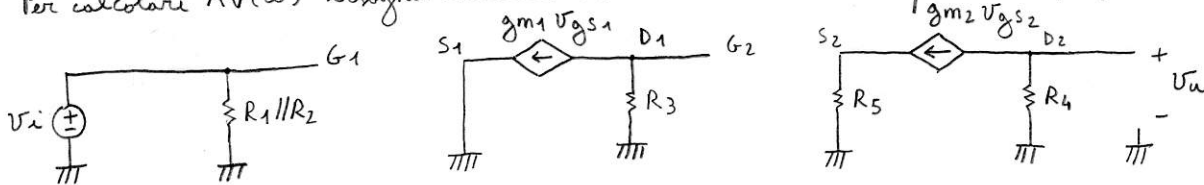
$$v_{gs2} = \frac{v_{g2}}{1 + g_{m2} z_{s2}} \quad \text{che va a } 0 \text{ se } z_{s2} = \infty$$

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

$$s = -\frac{1}{R_6 C_2} \rightarrow \omega_{z2} = \frac{1}{R_6 C_2} = 20000 \text{ rad/s} \rightarrow f_{z2} = \frac{\omega_{z2}}{2\pi} = 3183.099 \text{ Hz}$$

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

Per calcolare $A_v(\infty)$ bisogna chiudere C_1 e C_2 nel circuito equivalente per piccoli segnali:



$$v_u = -g_{m2} v_{gs2} R_4$$

$$v_{gs2} = v_{g2} - v_{s2} = v_{g2} - g_{m2} v_{gs2} R_5 \rightarrow v_{gs2} (1 + g_{m2} R_5) = v_{g2} \rightarrow v_{gs2} = \frac{v_{g2}}{1 + g_{m2} R_5}$$

$$v_{g2} = -g_{m1} v_{gs1} R_3$$

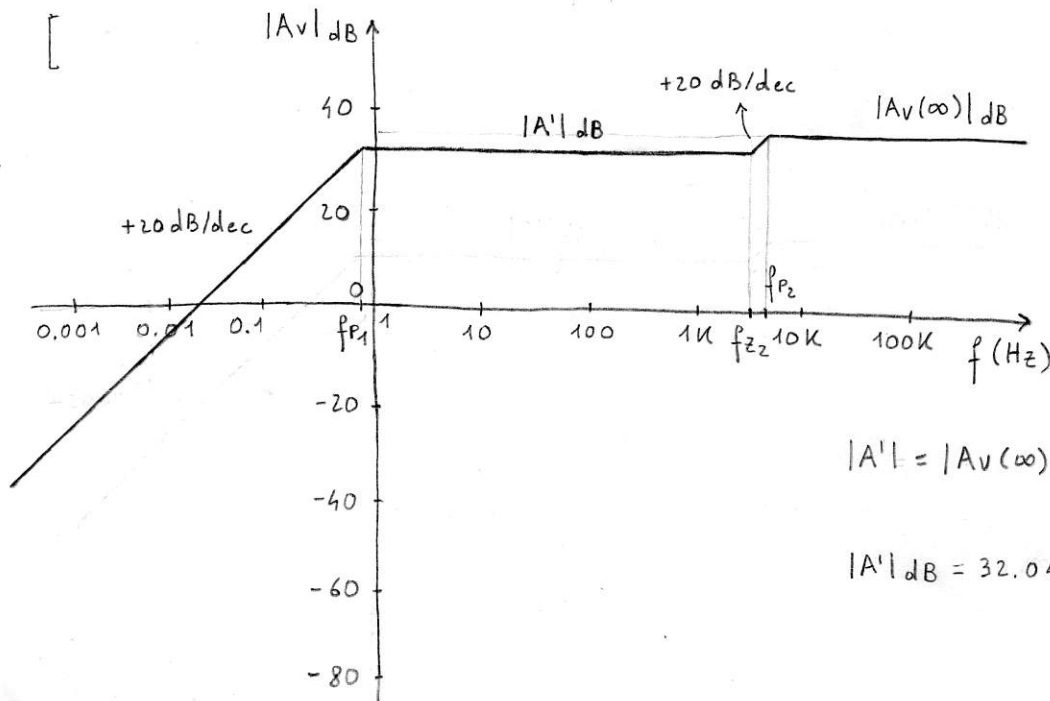
$$v_{gs1} = v_{g1} - v_{s1} = v_{g1} = v_i$$

quindi

$$v_u = +g_{m2} R_4 \frac{1}{1 + g_{m2} R_5} g_{m1} R_3 v_i \rightarrow$$

$$A_v(\infty) = \frac{v_u}{v_i} = \frac{g_{m2} R_4 g_{m1} R_3}{1 + g_{m2} R_5} = 60 \quad (\text{positivo, come deve essere visto che si tratta di due stadi a source comune, invertenti, in cascata})$$

$$|A_v(\infty)|_{dB} = 35.563 \text{ dB}$$

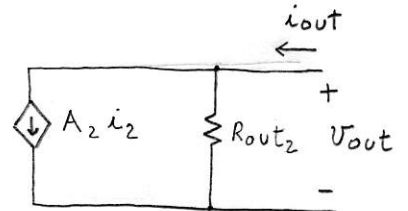
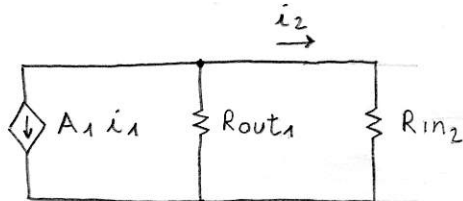
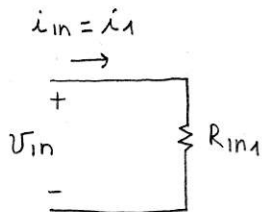


NON RICHIESTO

$$|A'| = |A_v(\infty)| \frac{f_{z2}}{f_{P2}} = 40$$

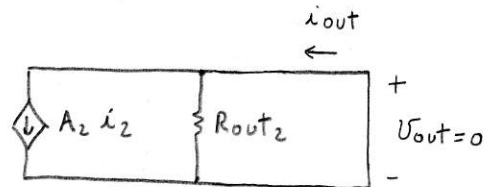
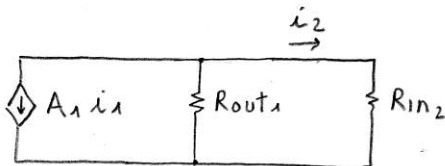
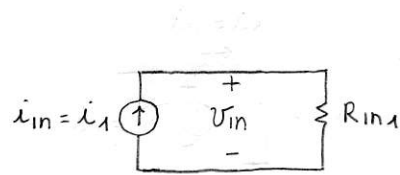
$$|A'|_{dB} = 32.0412 \text{ dB}$$

④



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

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



$$i_{out} = A_2 i_2 = A_2 \left(-A_1 i_1 \frac{R_{out1}}{R_{out1} + R_{in2}} \right) = -A_1 A_2 \frac{R_{out1}}{R_{out1} + R_{in2}} i_{in} \rightarrow$$

[prendo un cortocircuito in parallelo a R_{out2}
tutta la corrente $A_2 i_2$ scorre nel cortocircuito;
se vogliamo, facendo un partitore di corrente si
ottiene: $i_{out} = A_2 i_2 \frac{R_{out2}}{R_{out2} + 0} = A_2 i_2$]

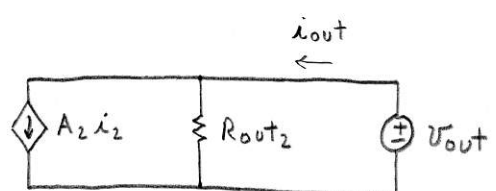
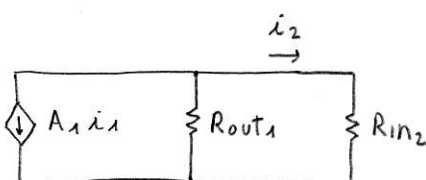
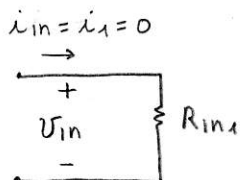
facendo un partitore di corrente tra R_{out1} e R_{in2} :
 $i_2 = (-A_1 i_1) \frac{R_{out1}}{R_{out1} + R_{in2}}$

$$h_f = \frac{i_{out}}{i_{in}} = -A_1 A_2 \frac{R_{out1}}{R_{out1} + R_{in2}}$$

$$V_{in} = R_{in1} i_1 = R_{in1} i_{in} \rightarrow h_i = \frac{V_{in}}{i_{in}} = R_{in1}$$

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

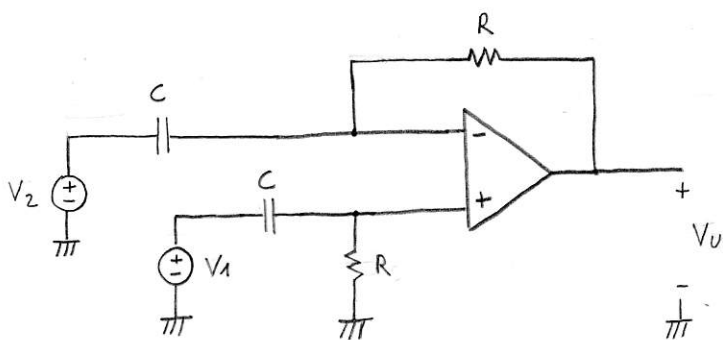
$$h_r = \frac{V_{in}}{V_{out}} \Big|_{i_{in}=0}$$



$$i_{in} = i_1 = 0 \rightarrow A_1 i_1 = 0 \rightarrow i_2 = 0 \rightarrow A_2 i_2 = 0 \rightarrow i_{out} = \frac{V_{out}}{R_{out2}} \rightarrow h_o = \frac{i_{out}}{V_{out}} = \frac{1}{R_{out2}}$$

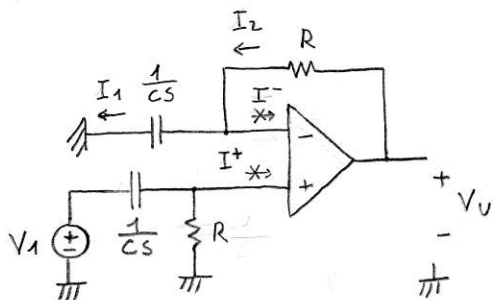
$$V_{in} = R_{in1} i_{in} = 0 \rightarrow h_r = \frac{V_{in}}{V_{out}} = 0$$

⑤



usando il principio di sovrapposizione degli effetti:

lasciando attivo V_1 e disattivando V_2 :



$$V^+ = V_1 \frac{R}{\frac{1}{CS} + R} = V_1 \frac{RCS}{1 + RCS} = V^-$$

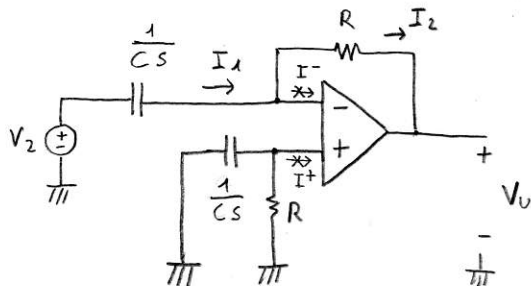
↓
per il c.c.v. $I^+ = 0$ per il c.c.v. $V^+ = V^-$

$$I_1 = \frac{V^-}{\frac{1}{CS}} = CS V^- = I_2$$

↓
per il c.c.v. $I^- = 0$

$$V_0^{(1)} = V^- + RI_2 = V^- (1 + RCS) = V_1 \frac{RCS}{1 + RCS} (1 + RCS) = V_1 RCS$$

lasciando attivo V_2 e disattivando V_1 :



$$V^+ = -I^+ \left(\frac{1}{CS} \parallel R \right) = 0 = V^-$$

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

$$I_1 = \frac{V_2}{\frac{1}{CS}} = CS V_2 = I_2$$

↓
per il c.c.v. $I^- = 0$

$$V_0^{(2)} = V^- - RI_2 = 0 - RCS V_2 = -RCS V_2$$

completivamente

$$V_u = V_u^{(1)} + V_u^{(2)} = RCS (V_1 - V_2) \Rightarrow v_u(t) = RC \frac{d}{dt} (v_1(t) - v_2(t))$$