Esame di Elettronica - Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
31 maggio 2006

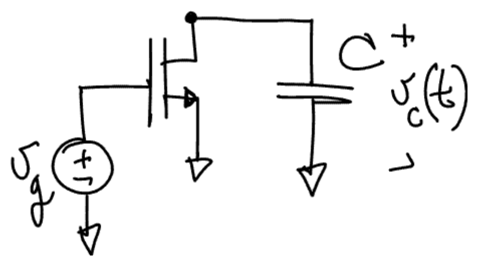
Parte A

1. Si consideri un amplificatore con amplificazione di tensione in continua A_{VO}=2000, R_{in} = 50 KΩ, R_{out} = 200 Ω, un polo a frequenza f_p = 1 KHz. Inoltre sia R_s = 1 KΩ la resistenza del generatore di segnale e R_L = 200 Ω la resistenza del carico. Si reazioni il circuito in modo da ottenere una resistenza di ingresso maggiore di 5 MΩ e una resistenza di uscita compresa tra 100 e 200 KΩ. Si calcoli la nuova funzione di trasferimento del circuito.

2. Si ricavi il circuito e si quotino i parametri di un filtro con due poli reali di valore sp_1 = - 1500 rad/s e sp_2 = - 2500 rad/s e nessuno zero nell'origine. E' necessario giustificare il procedimento.

3. Disegnare la caratteristica di trasferimento (Vu-Vi) di un inverter CMOS, identificando in modo preciso le varie zone di funzionamento dei transistori nel piano Vi-Vu.

4. Si consideri il circuito a lato. Si supponga che la caratteristica del MOSFET in zona di saturazione sia $I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_T)^2$, con V_T=3 V, K_n=2 mA/V^2. All'istante t=0 la tensione sulla capacità vale 5 V e una tensione costante di 5 V viene applicata sul gate. Calcolare dopo quanto tempo il MOSFET va in zona triodo.



Punteggio totale Parte A: 14

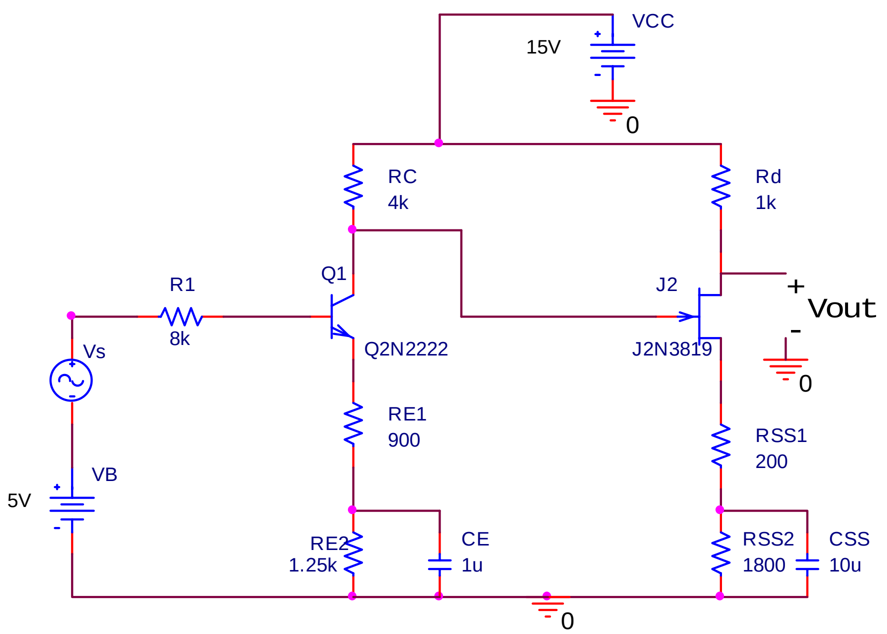
Parte B

Con riferimento al circuito mostrato a lato, calcolare:

- il punto di riposo dei due transistori Q1 e J2 e i parametri del circuito di piccolo segnale
- la funzione di trasferimento a centro banda
- il limite superiore di banda
- il limite inferiore di banda

Assunzioni semplificative:

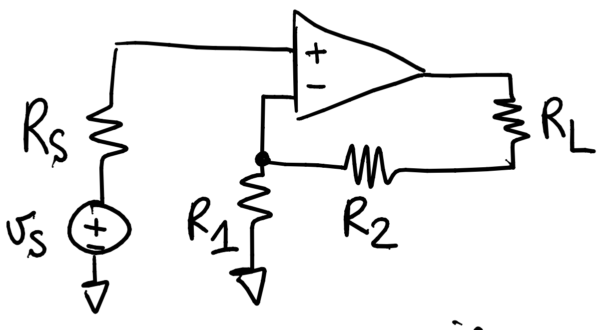
- Per il transistore Q1: considerare h_{oe}=0, h_{re}=0
- Per il transistore J2, considerare il transistore resistivo, $r_d \to \infty$, V_{gsoff}= 3V , J2 resistivo



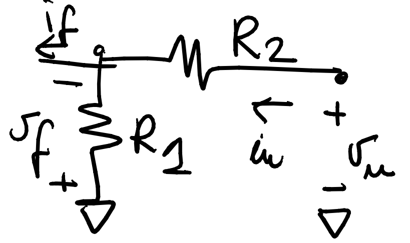
Punteggio totale Parte B: 14/30

Parte A

(1) $R_{IF} \gg R_{in}$; $R_{OF} \gg R_{out}$ → Prelievo di corrente
inserzione di tensione



Rete per il β :



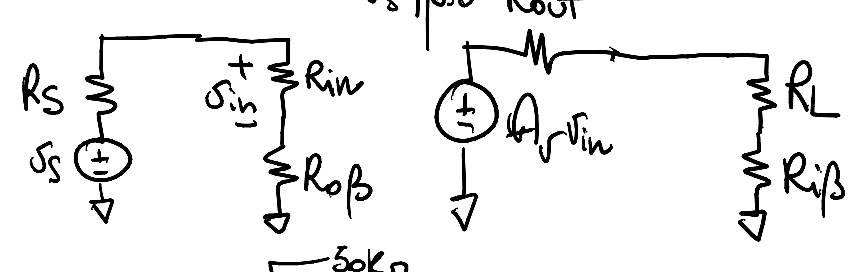
$v_f = \beta i_u + R_{o\beta} i_f$

$v_u = R_{i\beta} i_u + \cancel{\ldots}$

$\beta \equiv \left.\frac{v_f}{i_u}\right|_{i_f=0} = -R_1$; $R_{o\beta} = \left.\frac{v_f}{i_f}\right|_{i_u=0} = R_1$

$R_{i\beta} = \left.\frac{v_u}{i_u}\right|_{i_f=0} = R_1 + R_2$

Circuito per $A_e \equiv \left.\frac{i_u}{v_s}\right|_{\beta=0}$



$A_{e_0} = \frac{R_{in}}{R_s + R_{in} + R_{o\beta}} \; A_{v_0} \frac{1}{R_{i\beta} + R_L + R_{out}}$

$R_{IF} = (R_{o\beta} + \underbrace{R_{in}}_{50k\Omega})(1 - \beta A_{e0}) > 5\,M\Omega$

$R_{OF} = (R_{i\beta} + \underbrace{R_{out}}_{200})\left(1 - \beta A_{e0}\big|_{R_L=0}\right) \Rightarrow 100k\Omega < R_{OF} < 200k\Omega$

se poniamo $R_{i\beta} \sim 1000\,\Omega$ e $-\beta A_{e0} \simeq 150$ abbiamo $R_{OF} \sim 120k\Omega$
e $R_{IF} > 5\,M\Omega$

Poniamo $R_{i\beta} = R_1 + R_2 = 1000\ \Omega$

Vogliamo $\beta A_{e\emptyset}\big|_{R_L=0} = -150 = \dfrac{-R_1}{R_{i\beta} + R_{out}} A_{v\emptyset} \dfrac{R_{in}}{R_{in} + R_S + R_{o\beta}}$

$R_{in} = 50k$, $A_{v\emptyset} = 2000$, $R_{in} = 50k$, $R_S \ll$, $R_{o\beta} \ll$

ottengo una equazione di 1° grado in R_1

$$+\frac{150 \cdot \Omega}{50 \cdot 2000} = \frac{R_1}{R_{i\beta} + R_{out}} \rightarrow 0.078\,(1200) = R_1 \geq 93.6\ \Omega$$

$$R_2 = 906.4\ \Omega$$

Calcoliamo $R_{oF} = (R_{i\beta} + R_{out})\left(1 - \beta A_{e\emptyset}\big|_{R_L=0}\right) =$

$= 1200\,(1 + 150) = 181\,200$ OK

$R_{iF} = (R_{o\beta} + R_{in})\left(1 - \beta A_{e\emptyset}\big|_{R_S=0}\right) =$

$= (93.6 + 50000)\left(1 + \dfrac{93.6}{1400}\, 2000\, \dfrac{50}{51}\right) =$

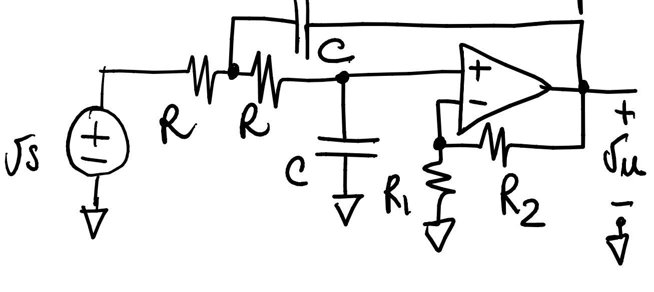
$= 50093.6\,(1 + 131.09) = 6.617\ M\Omega$

$$A_{F\emptyset} = \frac{i_u}{v_S} = \frac{A_{e\emptyset}}{1 - \beta A_{e\emptyset}} = 0.0107$$

$$f_H = f_p\,(1 - \beta A_{e\emptyset}) = \cancel{1000} \cdot 129.6 = 129.6\ KHz$$

$$\boxed{A_F = \frac{A_{F0}}{1 + jf/f_H}}$$

② Possiamo usare una cella passabasso di Sallen Key



$$\frac{v_u}{v_S} = \frac{A_V}{R^2C^2s^2 + (3 - A_V)RCs + 1}$$

con $A_V = 1 + \dfrac{R_2}{R_1}$

Se vogliamo $s_{p1} = -1500$ rad/s e $s_{p2} = -2500$ rad/s

$$\frac{1}{R^2C^2} = s_{p1}s_{p2} = 3.75\cdot10^6 \text{ rad}^2/s^2$$

$$RC = \frac{1}{\sqrt{3.75\cdot10^6}} = \underline{516.4\mu s}$$

poniamo $\underline{C = 100 \text{ nF}}$

$$R = \frac{516\cdot10^{-6}}{10^{-7}} = \underline{5164\,\Omega}$$

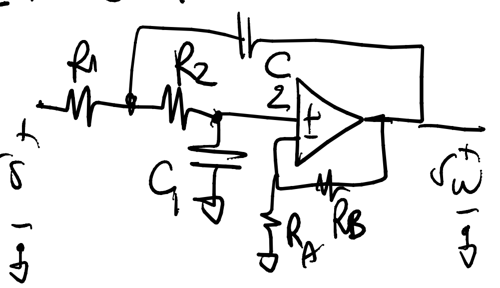
$$RC(3-A_v) = -\left(\frac{1}{s_{p1}} + \frac{1}{s_{p2}}\right) = \frac{1}{1500} + \frac{1}{2500} = 0.00107 \text{ s}$$

$$3 - A_v = \frac{0.00107}{5164\cdot10^{-6}} = 2.065 \rightarrow \underline{\underline{A_v = 0.935}}$$

così non posso usare l'amplificatore invertente devo fare così

Abbiamo a questo punto 2 soluzioni possibili

1 usare $R_1 \neq R_2$ $C_1 \neq C_2$ in generale



$$\frac{v_u}{v_S} = \frac{A_v}{R_1R_2C_1C_2s^2 + [(R_1+R_2)C_2 + R_1C_1(1-A_v)]s + 1}$$

$$R_1R_2C_1C_2 = \frac{1}{s_{p1}s_{p2}} = 2.67\cdot10^{-7} \text{ s}^2$$

$$(R_1+R_2)C_2 + R_1C_1(1-A_v) = 0.00107 \text{ s}$$

poniamo $C_1 = C_2 = C$ e $R_2 = 10R_1$

il denominatore diventa $\underbrace{10R_1^2C^2s^2}_{} + \underbrace{(12-A_v)R_1Cs}_{=0.00107} + 1$

$$10R_1^2C^2 = \frac{1}{3.75\cdot10^6}$$

$$R_1C = \sqrt{\frac{1}{3.75\cdot10^7}} = 1.63\cdot10^{-4} \text{ s} \rightarrow \begin{array}{l} C = 100 \text{ nF} \\ R_1 = 1.63 \text{ k}\Omega \end{array}$$

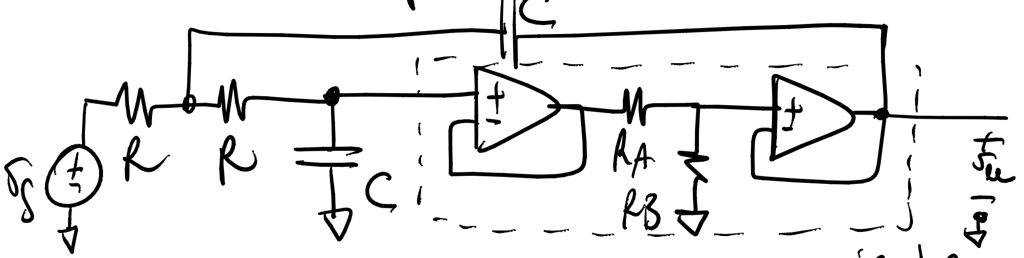
$\underline{(12-A_v)RC} = 0.00107 \rightarrow 12-A_v = 0.00107/1.63\cdot10^{-4} =$

$= 6.564$

$\underline{\underline{A_v = 5.436}}$ $R_A = 10\,k\Omega$ ||

$R_B = 44.36\,k\Omega$

2. Usare un amplificatore di tensione ideale che amplifichi 0.935.



$R_B = 9.35\,k\Omega$ || il blocco nel riquadro

$R_A = 650\,\Omega$ || Tratteggiato amplifica $\underline{\underline{0.935}}$

---

3 Vedere appunti del corso

---

4 la corrente è

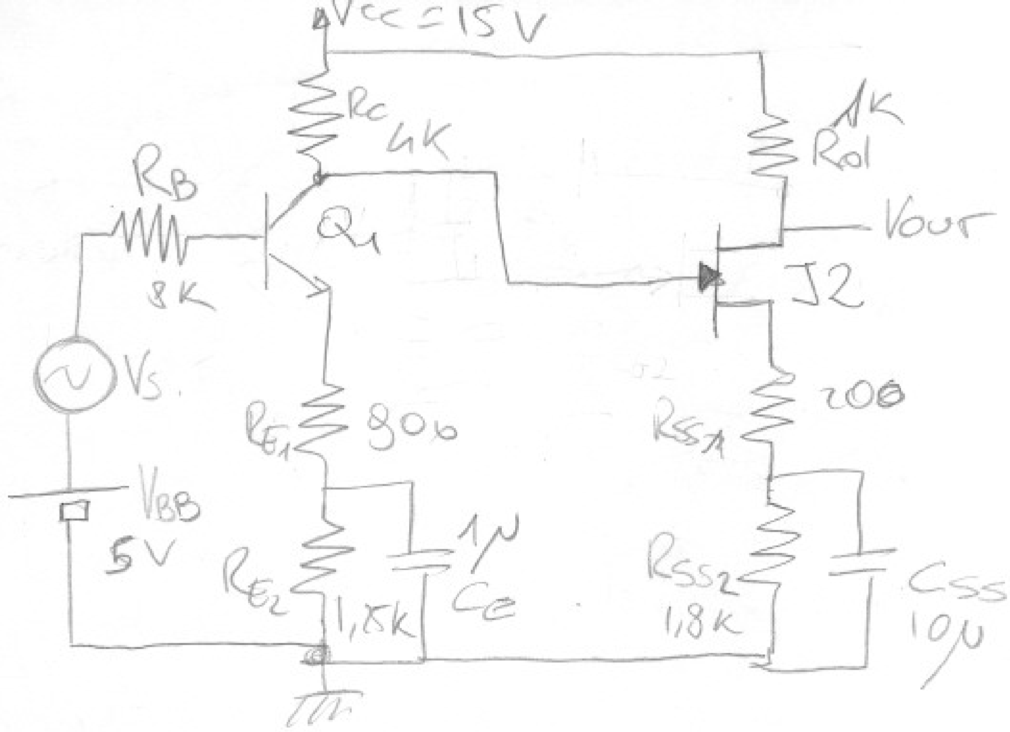
$$I_D = \frac{2\cdot10^{-3}}{2}(2)^2 = 4\,mA$$

la scarica avviene a corrente costante finché $v_C > V_{GS}-V_T = \underline{\underline{2V}}$, cioè fino a quando il MOSFET va in zona triodo

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{I_D}{C} = -\frac{4\cdot10^{-3}}{10\cdot10^{-9}} = -0.4\cdot10^{6}\ V/s$$

$$\Delta V_C = 2-5 = -3V$$

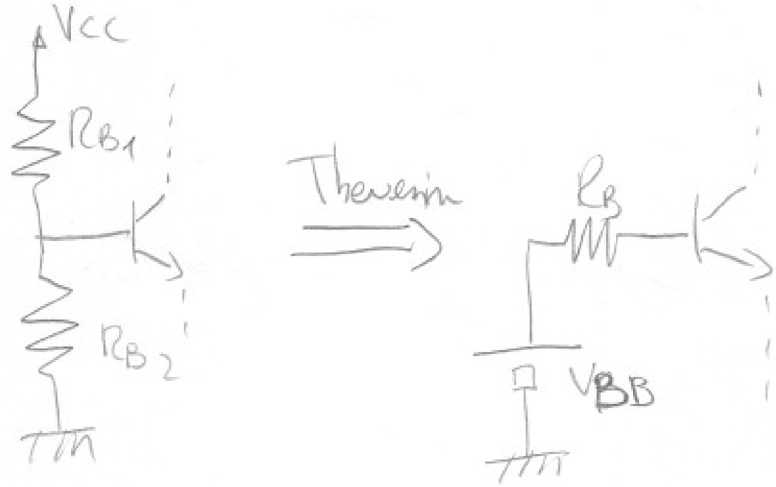
$$\Delta t = \frac{\Delta V_c}{dv_c/dt} = \frac{-3}{-0.4\cdot10^{6}} = \underline{\underline{+7.5\,\mu s}}$$



$h_{oe} = 0$ $\quad V_A = \infty$ $\quad h_{re} = 0$ $\quad$ J2: resistivo ($V_{GS_{off}} = -3V$)

PUNTO DI RIPOSO.

Iniziamo da Q1. La batteria VB e la resistenza RB possono essere immaginati come l'equivalente di Thevenin della classica struttura a partitore



$R_B = R_{B1} // R_{B2}$

$V_B = \frac{V_{CC}}{R_{B1}+R_{B2}} R_{B2}$.

Equazione alla maglia d'ingresso

$V_{BB} = R_B I_B + V_\gamma + (R_{E1}+R_{E2})(h_{FE}+1) I_B$

Perché RB sia trascurabile dobbiamo imporre che

$R_B I_B \ll (R_{E1}+R_{E2})(h_{FE}+1) I_B \Rightarrow R_B \ll (R_{E1}+R_{E2})(h_{FE}+1)$. OK

Allora, con l'ipotesi fatte,

$V_{B1} = V_{BB} \Longrightarrow V_{E1} = V_{BB} - V_\gamma = 4{,}3\,V$. [Hp di zona attiva diretta]

$$I_E = \frac{V_{E1}}{R_{E1}+R_{E2}} = 2\,mA$$

Verifichiamo subito la 1ª ipotesi.

$h_{FE}@2mA = 150$ (da caratteristiche)

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = 13{,}3\,\mu A \Longrightarrow R_B I_B = 106\,mV << 5V \;\; \underline{OK}$$

$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_{E1} + R_{E2}) I_E = 2{,}7V$ $\left(>> V_{CESAT} \overset{ok}{\Longrightarrow} Z.A.D\right)$

$$V_{CB} = \underbrace{V_{CC} - R_C I_C}_{V_C} - \underbrace{V_{BB}}_{V_B} = 2\,V$$

Calcoliamo anche i parametri di piccolo segnale per Q1

$h_{fe} \simeq 175$

$r_b = 450$ per il Q 2N2222

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_C} h_{fe} = 2{,}26\,K\Omega \Longrightarrow h_{ie} = r_\pi + r_b = 2{,}715\,K\Omega$$

$$g_{m_{BJT}} = \frac{I_C}{V_T} = 77{,}2\,mS$$

$f_T \simeq 140\,MHz$

$$C_\mu @ V_{CB}=2V = 6pF \Longrightarrow C_\pi = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_\mu = 81{,}8\,pF$$

Passiamo adesso al JFET.

$$V_G = V_{C1} = V_{CC} - R_C I_{C1} = 7V$$

$$V_S = (R_{SS1} + R_{SS2}) I_{DS}$$

$$V_{GS} = V_G - (R_{SS1} + R_{SS2}) I_{DS}$$

Se $V_{GS} = 0$

$\Downarrow$

$$I_{DS} = \frac{V_G}{R_{SS1} + R_{SS2}} = 3{,}5\,mA$$

Se $V_{GS} = -3V$

$\Downarrow$

$$I_{DS} = \frac{V_G - V_{GS}}{R_{SS1} + R_{SS2}} = 5\,mA$$

$$\boxed{\begin{array}{l} V_{GS} \simeq -1{,}25\,V \\ I_{DS} \simeq 4{,}1\,mA \end{array}}$$

Dalle caratteristiche (con l'ipotesi che il JFET sia in saturazione)

Allora

$$V_{DS} = V_{CC} - (R_d + R_{SS1} + R_{SS2}) I_{DS} = 2{,}7V$$

Dobbiamo verificare che $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$

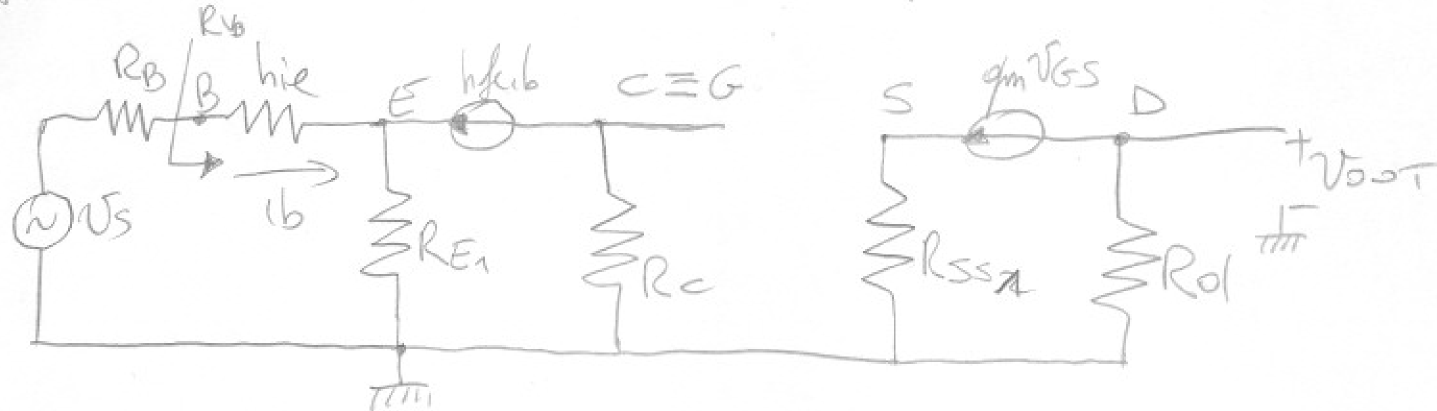
$$2{,}7 \geq -1{,}25 - (-3V) = 1{,}75 \qquad \underline{\underline{OK}}$$

Calcoliamo anche i parametri di piccolo segnale

$g_m = 4{,}5\,mS$

Le capacità non dobbiamo calcolarle perché J2 è stato supposto resistivo.

AMPLIFICAZIONE A CENTRO BANDA.



Come al solito procediamo dall'uscita verso l'ingresso.

$$V_{OUT} = -g_m V_{GS} R_d$$

Dobbiamo calcolare V_{GS}

$$V_{GS} = V_G - V_S = \underbrace{-h_{fe} i_b R_C}_{V_G} - \underbrace{g_m V_{GS} R_{SS1}}_{V_S}$$

$$V_{GS}(1 + g_m R_{SS1}) = -h_{fe} i_b R_C \Rightarrow V_{GS} = \frac{-h_{fe} R_C}{1 + g_m R_{SS1}} \cdot i_b$$

Non ci rimane che calcolare i_b in funzione di V_S. (i_b è la corrente erogata da V_S).

$$i_b = \frac{V_S}{R_B + \underbrace{h_{ie} + R_{E1}(h_{fe}+1)}_{R_{VB}}}$$

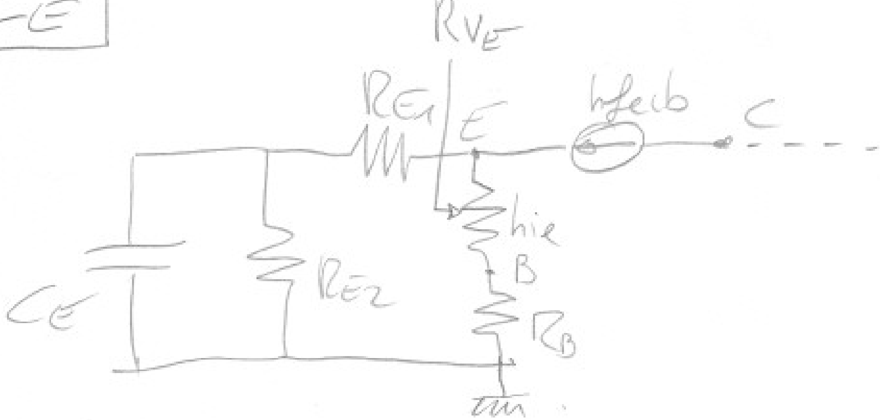
Mettendo tutto assieme otteniamo

$$\frac{V_U}{V_S} = \frac{g_m R_d h_{fe} R_C}{1 + g_m R_{SS1}} \cdot \frac{1}{R_B + h_{ie} + R_{E1}(h_{fe}+1)} = 9{,}8$$

FREQUENZA DI TAGLIO INFERIORE.

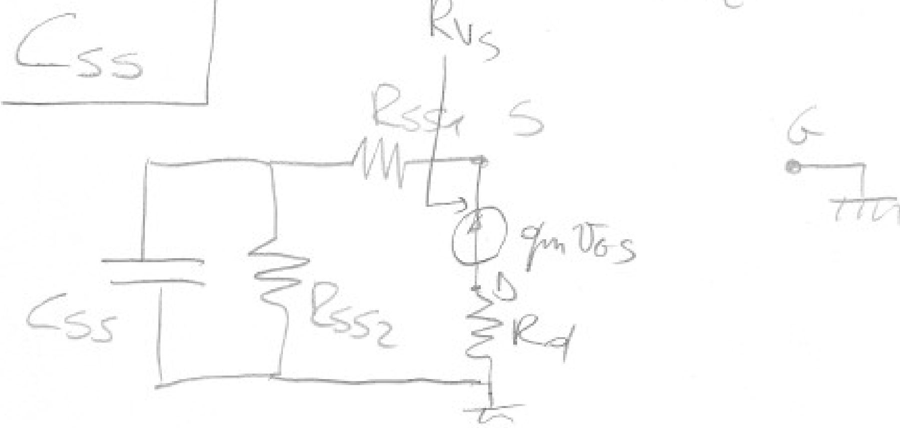
Dobbiamo calcolare le resistenze viste da C_E e da C_{SS}. Il calcolo è molto semplice e può essere fatto direttamente sul circuito. Per completezza riportiamo comunque i circuiti per piccoli segnali

C_E



$$R_{V_{CE}} = R_{E2} \,//\, \left[R_{E1} + \underbrace{\frac{h_{ie} + R_B}{h_{fe}+1}}_{R_{VE}} \right] = 543\,\Omega$$

C_{SS}

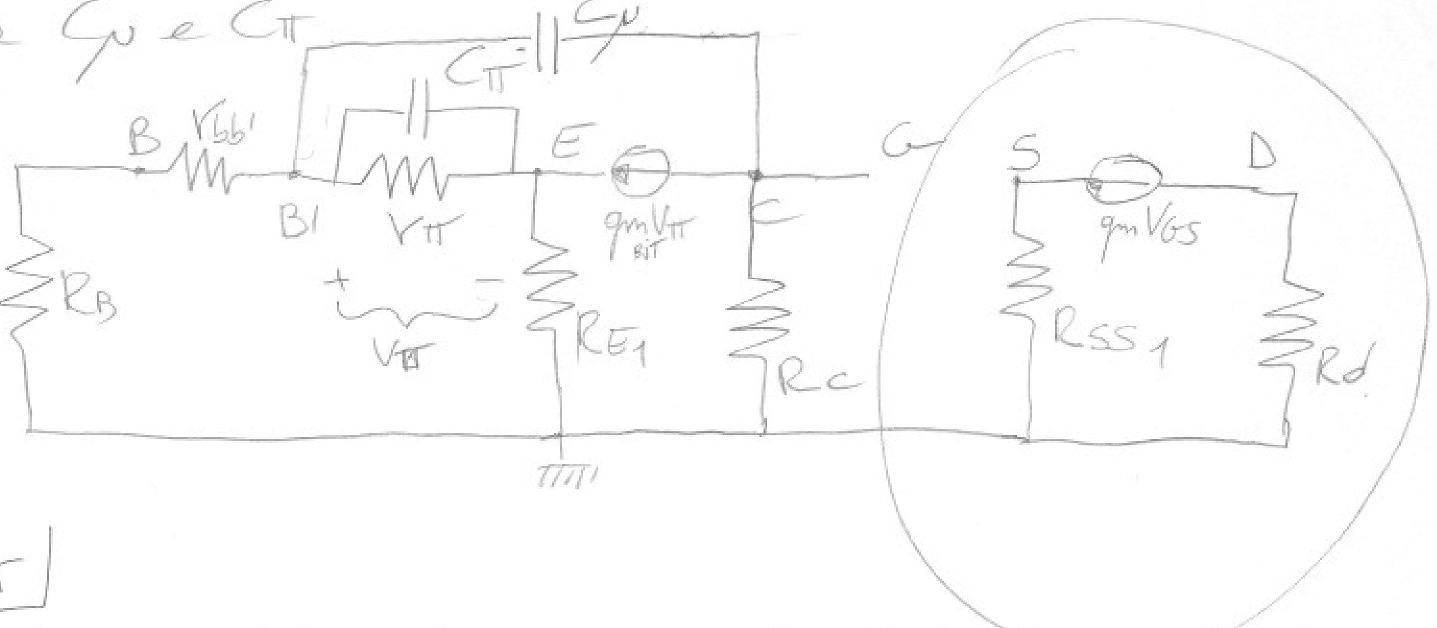


$$R_{V_{CSS}} = R_{SS2} \,//\, \left[R_{SS1} + \underbrace{\frac{1}{g_m}}_{R_{VS}\ \text{(se G è a massa)}} \right] = 342\,\Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{C_E R_{VCE}} + \frac{1}{C_{SS} R_{VCSS}} \right] \simeq 340\,\text{Hz}$$

FREQUENZA DI TAGLIO SUPERIORE

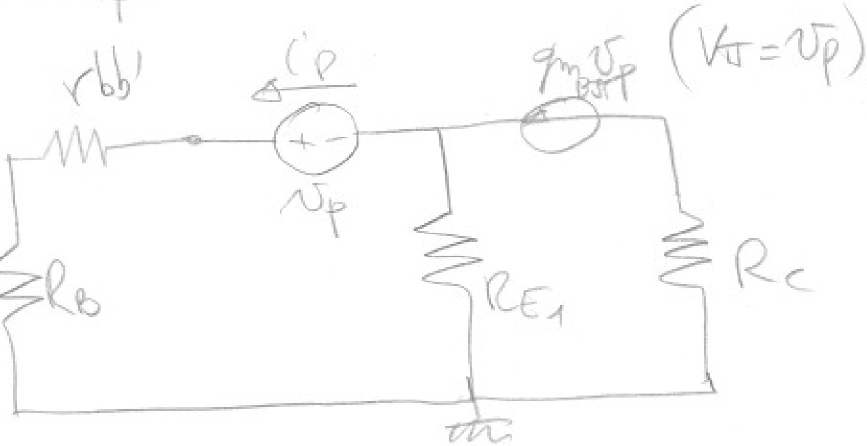
J2 è supposto resistivo, dobbiamo calcolare le resistenze viste da C_μ e C_π



Non conta nel calcolo delle resistenze

C_π

Togliamo r_π (che metteremo in // alla fine) e mettiamo al posto di C_π un generatore di prova V_p.



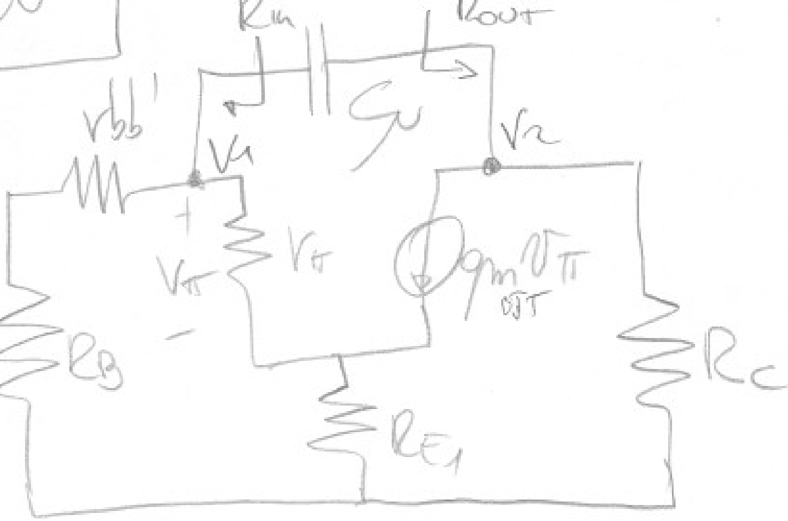
$$v_p = (r_{bb'} + R_B)\, i_p + R_{E1}\left(i_p - g_{m_{BJT}} v_p\right)$$

$$\Downarrow$$

$$\frac{v_p}{i_p} = \frac{r_{bb'} + R_B + R_{E1}}{1 + g_{m_{BJT}} R_{E1}}$$

$$R_{V_{C\pi}} = r_\pi \,//\, \left[\frac{r_{bb'} + R_B + R_{E1}}{1 + g_{m_{BJT}} R_{E1}}\right] \simeq 125\ \Omega$$

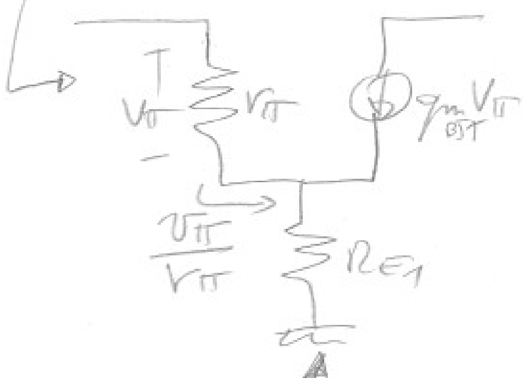
Gu



Utilizziamo il metodo usuale per il calcolo delle resistenze viste da una capacità tra ingresso e uscita di uno stadio amplificatore.

$$R_{OUT} = R_C = 4K\Omega$$

$$R_{in} = (r_{bb'} + R_B) \,||\, \underbrace{\left[r_\pi + R_{E1}\left(1 + g_{m_{BJT}} r_\pi\right)\right]} \simeq 8K\Omega$$



$$A_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{-g_{m_{BJT}} v_\pi R_c}{v_\pi + R_{E1}\left(g_{m_{BJT}} v_\pi + \frac{v_\pi}{r_\pi}\right)}$$

$$A_v = -\frac{g_{m_{BJT}} R_c}{1 + \left(g_{m_{BJT}} + \frac{1}{r_\pi}\right) R_{E1}} = -4{,}35$$

$$R_{V_{Gu}} = R_{in}\left(1 + |A_v|\right) + R_{out} = 46{,}85\,K\Omega$$

Alla fine abbiamo

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{R_{VC\pi} \cdot C_\pi + R_{VC\mu} C_\mu} \right] = 516 \ \underline{\underline{\underline{KHz}}}$$