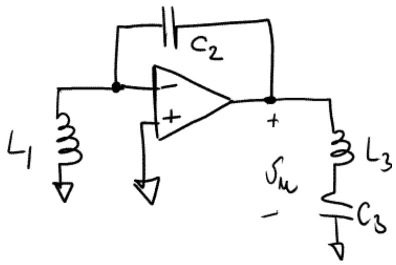
Esame di Elettronica - Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
23 luglio 2013

1. Si consideri un amplificatore con amplificazione di tensione in continua A_v=2000, R_{in} = 10 KΩ, R_{out} = 500 Ω. 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 di compresa tra 40 e 60 Ω e una resistenza di uscita minore di 300 Ω. [6 punti]

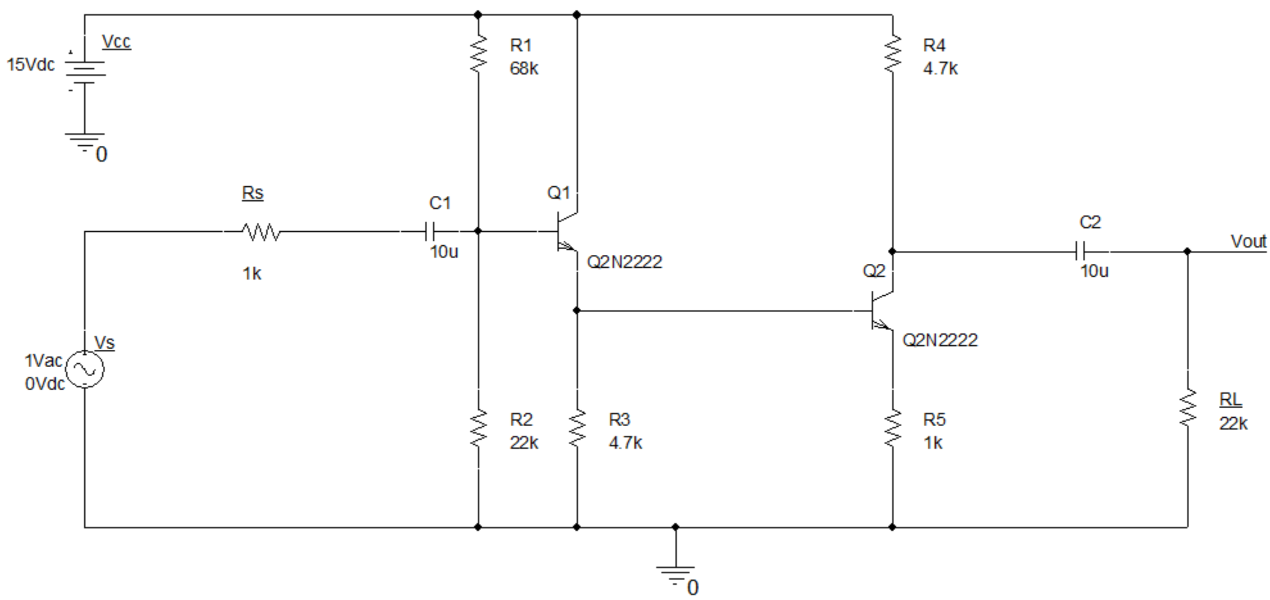
2. Verificare le condizioni di innesco dell'oscillatore disegnato a fianco, e determinare la frequenza di oscillazione.
   Sia L_1=L_3=100 μH, C_3=10 nF, C_2=1 nF. L'amplificatore è un amplificatore ideale di tensione con A_V=100. [6 punti]



3. Con riferimento al circuito mostrato sotto, calcolare:

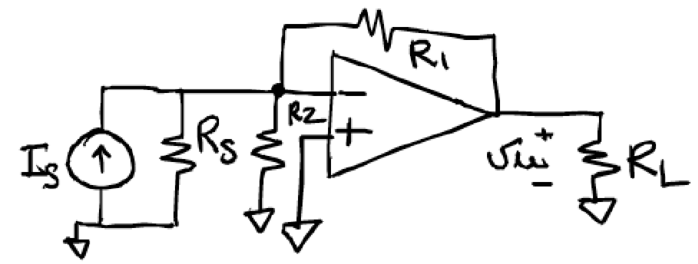
- il punto di riposo dei due transistori Q1 e Q2 e i parametri del circuito di piccolo segnale [5 punti]
- la funzione di trasferimento a centro banda [4 punti]
- il limite inferiore di banda [6 punti]

Assunzioni semplificative:
- considerare hoe = 0 per i due transistori.

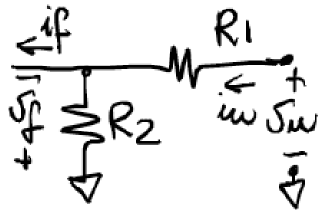


Soluzione - Esercizio 1

L'amplificatore ha inizialmente $R_{in} = 10\,k\Omega$ e $R_{out} = 500\,\Omega$. Vogliamo $40\Omega < R_{IF} < 60\Omega$ e $R_{OF} < 300\Omega$. Abbiamo quindi bisogno di una reazione con prelievo di tensione e inserzione di corrente



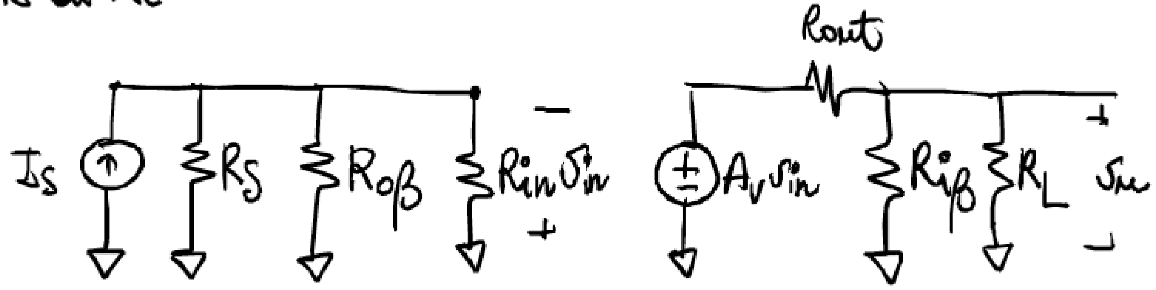
Rete di reazione



$$i_f = \beta v_u + v_f/R_{o\beta}$$
$$i_u = v_u/R_{i\beta} + \cancel{K} v_f$$

$$\beta = \left.\frac{i_f}{v_u}\right|_{v_f=0} = \frac{1}{R_1}\,;\quad R_{o\beta} = \left.\frac{v_f}{i_f}\right|_{v_u=0} = R_1 /\!/ R_2\,;\quad R_{i\beta} = \left.\frac{v_u}{i_u}\right|_{v_f=0} = R_1$$

Rete di Ae



$$v_{in} = -I_S (R_S /\!/ R_{o\beta} /\!/ R_{in}) \qquad v_u = A_v v_{in} \frac{R_{i\beta} /\!/ R_L}{R_{i\beta} /\!/ R_L + R_{out}}$$

$$A_e = \frac{v_u}{i_s} = -A_v \frac{R_{i\beta} /\!/ R_L}{R_{i\beta} /\!/ R_L + R_{out}} (R_S /\!/ R_{o\beta} /\!/ R_{in})$$

Fattore di reazione

$$1 - \beta A_e = 1 + \frac{A_v}{R_1} \frac{R_1 /\!/ R_L}{R_1 /\!/ R_L + R_{out}} (R_S /\!/ R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in})$$

Abbiamo $$R_{OF} = \frac{(R_{i\beta} /\!/ R_{out})}{1 - \beta A_e|_{R_L \to \infty}} < 300\,\Omega$$

$$R_{IF} = \frac{R_{o\beta} /\!/ R_{in}}{1 - \beta A_e \big|_{R_S \to \infty}} \qquad 40\Omega < R_{IF} < 60\Omega$$

La condizione più difficile da soddisfare è su R_{IF}. Possiamo ottenere R_{IF} di circa 50Ω se scegliamo $R_{o\beta} = 5\,K\Omega$ e $-\beta A_e\big|_{R_S \to \infty} \cong 66$

Con un valore di $-\beta A_e$ così grande la condizione su R_{OF} è molto probabilmente soddisfatta.

A questo punto abbiamo
- $R_{o\beta} = R_1 /\!/ R_2 = 5\,K\Omega$

- $$\frac{A_V}{R_1} \frac{R_1 /\!/ R_L}{R_1 /\!/ R_L + R_{out}} (R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in}) = 66$$

poiché $R_S = 1K\Omega$ e $R_L = 200\,\Omega$ possiamo fare le seguenti approssimazioni: $R_1 /\!/ R_L \simeq R_1$ e $R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in} = 3{,}3 K\Omega$

abbiamo quindi:

$$\frac{\overset{2000}{A_V}}{R_1} \frac{\overset{200\Omega}{R_L}}{R_L + R_{out}} (R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in}) = 67 \rightarrow \frac{2000}{R_1} \frac{200}{700} 3300 = 66$$

ottieniamo $R_1 = \dfrac{13.2 \cdot 10^8}{700 \cdot 66} = 28.6\ K\Omega$

poiché $R_1 /\!/ R_2 = 5K\Omega \rightarrow R_2 = \left[\dfrac{1}{R_1 /\!/ R_2} - \dfrac{1}{R_1}\right]^{-1} = 6060\ \Omega$

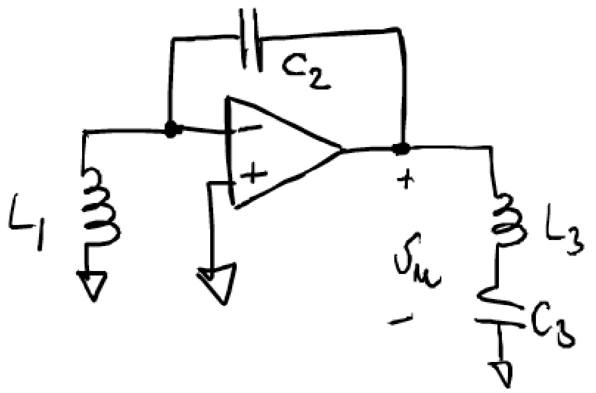
Facciamo ora il calcolo esatto di R_{IF} e R_{OF}

$$R_{IF} = \frac{R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in}}{1 + \frac{A_V}{R_1} \frac{R_1 /\!/ R_L}{R_1 /\!/ R_L + R_{out}} (R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in})} \simeq \frac{3333}{1 + \frac{2000}{28600} \frac{200}{200+500} 3333} = 49.3\ \Omega$$

$$R_{OF} = \frac{R_1 /\!/ R_{out}}{1 + \frac{A_V}{R_1} \frac{R_1}{R_1 + R_{out}} (R_S /\!/ R_1 /\!/ R_2 /\!/ R_{in})} = \frac{28600 /\!/ 500}{1 + \frac{2000}{28600 + 500} (200 /\!/ 3333)} =$$

$$= \frac{491}{1 + 12{,}96} = 35{,}17\,\Omega$$

Soluzione - Esercizio 2



$A_V = 100$

$L_1 = 10\,\mu H$

$L_3 = 10\,\mu H$

$C_3 = 10\,nF$

$C_2 = 1\,nF$

Deve essere soddisfatto il criterio di Barkhausen

Applichiamo il teorema dei tre punti:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0 \rightarrow \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_2} + \omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3} = 0$$

abbiamo $L_3 = L_1$ e $C_3 = 10 C_2$, quindi

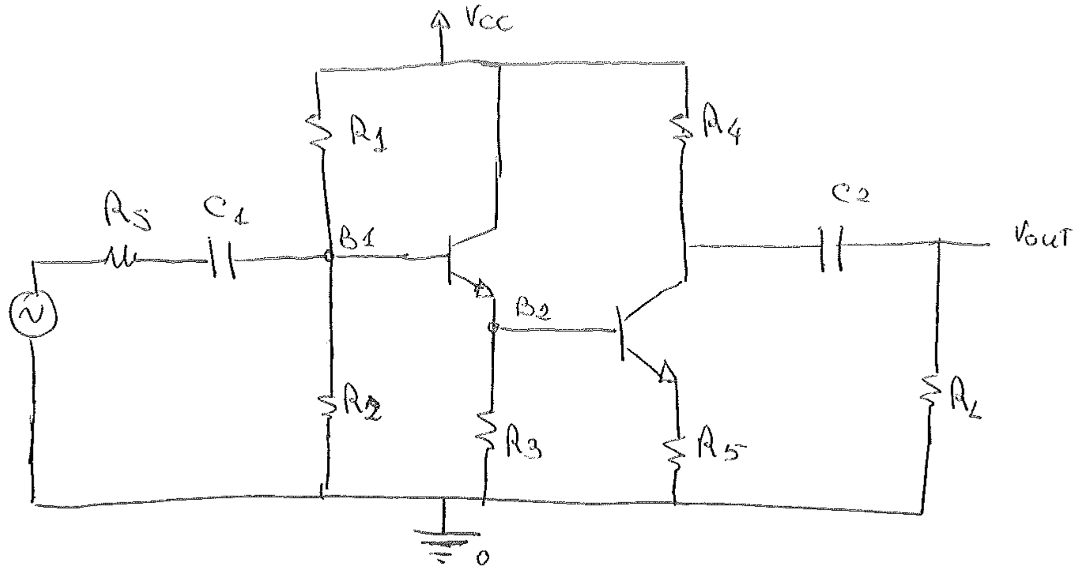
$$\rightarrow 2\omega L_1 - \frac{11}{\omega C_3} = 0 \rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{11}{2 L_1 C_3}} = 7{,}41 \cdot 10^6\ rad/s$$

la seconda condizione è

in $\omega = \omega_0$: $A_V \frac{X_3}{X_1} > 1 \rightarrow$

$$100 \cdot \frac{\omega_0 L_3 - \frac{1}{\omega_0 C_3}}{\omega_0 L_1} = 100\left(1 - \frac{1}{\omega_0^2 L_1 C_3}\right) = 100\left(1 - \frac{2}{11}\right) = \frac{900}{11} > 1$$

Soluzione - Esercizio 3



PUNTO DI RIPOSO

1) Hp pp. per Q_1 e Q_2
2) Hp Q_1 e Q_2 in ZAD

$$V_{B1} = V_{cc} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15V \cdot \frac{22K\Omega}{68K\Omega + 22K\Omega} = 3{,}67V$$

$$V_{E1} = V_{B2} = V_{B1} - V_\gamma = 3{,}67V - 0{,}7V = 2{,}97\,V$$

$$I_{E1} = \frac{V_{E1}}{R_3} = \frac{2{,}97\,V}{4{,}7k\Omega} = 631{,}9\,\mu A$$

$$I_{E1} \simeq I_{C1} \Rightarrow \boxed{I_{C1} = 631{,}9\,\mu A}$$

Dalle caratteristiche $h_{FE1} \simeq 150$

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{FE1}} = \frac{631{,}9\,\mu A}{150} = 4{,}2\,\mu A$$

$$\boxed{V_{CE1} = V_{C1} - V_{E1} = V_{CC} - V_{E1} = 15V - 2{,}97V = 12{,}03\,V}$$

$V_{CE1} > V_{CEsat} \Rightarrow$ verificata Hp Q_1 in ZAD

$$V_{E2} = V_{B2} - V_\gamma = V_{E1} - V_\gamma = 2{,}97V - 0{,}7V = 2{,}27V$$

$$I_{E2} = \frac{V_{E2}}{R_5} = \frac{2{,}27\,V}{1K\Omega} = 2{,}27\,mA$$

$$\boxed{I_{C2} \simeq I_{E2} = 2{,}27\,mA}$$

$$V_{C2} = V_{CC} - I_{C2} \cdot R_4 = 15V - 2{,}27\,mA \cdot 4{,}7K\Omega = 4{,}3\,V$$

$\boxed{V_{CE2} = V_{C2} - V_{E2} = 4{,}3V - 2{,}27V = 2{,}03\,V}$ $V_{CE2} > V_{sat} \Rightarrow Q_2$ in ZAD

Dalle caratteristiche $h_{FE2} = 160$

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{h_{FE2}} = \frac{2{,}27\,mA}{160} = 14{,}2\,\mu A$$

$I_{B2} \ll I_{E1} \Rightarrow$ hp pp per Q_2 verificata

Verifica del partitore pesante per Q_1:

$$I_{R1,2} = \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} = \frac{15\,V}{68K\Omega + 22K\Omega} = 166\,\mu A$$

$I_{R1,2} \gg I_{B2} \Rightarrow$ hp verificata

PARAMETRI DI PICCOLO SEGNALE

Q_1 : $I_{C_1} = 631{,}9\,\mu A$ $\quad V_{CE_1} = 12{,}03\,V$ $\quad V_{BC_1} = -11{,}33\,V$

- $h_{FE_1} = 150$ $\qquad$ • $h_{fe_1} = \dfrac{50 + 300}{2} = 175$

- $g_{m_1} = \dfrac{I_{C_1}}{V_T} = \dfrac{631{,}9\,\mu A}{26\,mA} = 0{,}0243\,\Omega^{-1}$

$$h_{ie_1}@1mA = \frac{2K\Omega + 8K\Omega}{2} = 5K\Omega$$

$$r_{b'e_1}@1mA = \frac{h_{fe_1}}{g_m@1mA} = 4{,}5\,K\Omega$$

- $r_{bb'_1} \simeq r_{bb'}@1mA = 450\,\Omega$

- $r_{b'e_1} = \dfrac{h_{fe_1}}{g_m@631{,}9\mu A} = \dfrac{175}{0{,}0243\,\Omega^{-1}} = 7{,}2\,K\Omega$

- $h_{ie_1} = r_{b'e_1} + r_{bb'}@1mA = 7{,}2K\Omega + 450\Omega = 7{,}65\,K\Omega$

$$V_A = \frac{1\,mA}{h_{oe}@1mA} = \frac{10^{-3}}{20\cdot 10^{-6}} = 50V \qquad h_{oe} = \frac{I_C}{V_A} = \frac{631{,}9\mu A}{50V} = 12{,}6\,\mu\Omega^{-1}$$

- $f_{T1} = 50\,MHz$ $\qquad$ • $C_{b'c_1} = C_{\mu_1} = 3{,}5\,pF$

- $C_{b'e_1} = C_{\pi_1} = \dfrac{g_{m_1}}{2\pi f_{T_1}} - C_{b'c_1} = \dfrac{0{,}0243}{2\pi\cdot 50\cdot 10^6} - 3{,}5pF = 73{,}8\,pF$

Q_2: $I_{C_2} = 2{,}27mA$ $\quad V_{CE_2} = 2{,}03V$ $\quad V_{BC_2} = -1{,}3V$

- $h_{FE_2} = 160$ $\qquad$ • $h_{fe_2} = \dfrac{50+300}{2} = 175$

- $g_{m_2} = \dfrac{I_{C2}}{V_T} = \dfrac{2{,}27mA}{26mA} = 0{,}0873\ \Omega^{-1}$

- $r_{b'e_2} = \dfrac{h_{fe_2}}{g_{m_2}} = \dfrac{175}{0{,}0873\ \Omega^{-1}} \simeq 2K\Omega$

- $r_{bb'_2}@1mA = 450\Omega$

- $h_{ie_2} = r_{b'e_2} + r_{bb'} = 2K\Omega + 450\Omega = 2{,}45K\Omega$

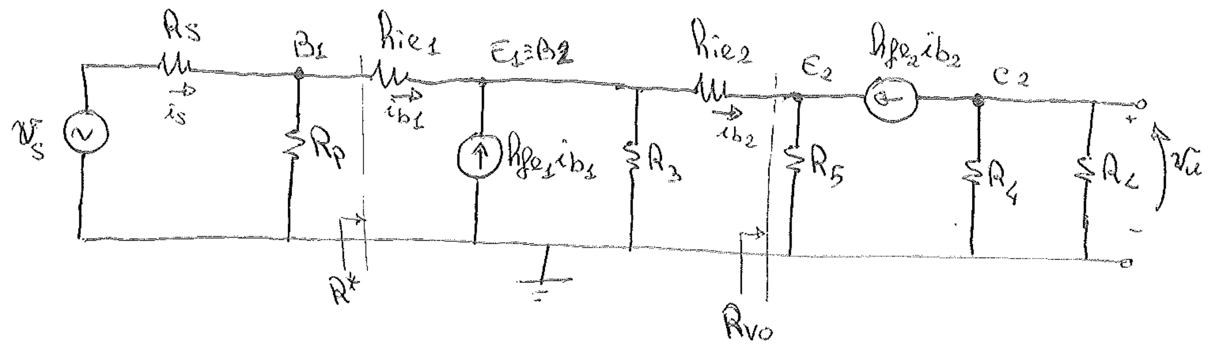
- $f_{T_2} = 160MHz$

- $h_{oe} = \dfrac{I_{C2}}{V_A} = \dfrac{2{,}27mA}{50V} = 45{,}4\mu\Omega^{-1}$

- $C_{b'c_2} = C_{\mu_2} \simeq 7pF$

- $C_{b'e_2} = C_{\pi_2} = \dfrac{g_{m2}}{2\pi f_{T_2}} - C_{b'c_2} = \dfrac{0{,}0873}{2\pi \cdot 160 \cdot 10^6} - 7pF = 79{,}8pF$

GUADAGNO A CENTRO BANDA



$$R_p = R_1 /\!/ R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{68K\Omega \cdot 22K\Omega}{68K\Omega + 22K\Omega} = 16,62K\Omega$$

$$A_{CB} = \frac{v_u}{v_s} \quad \text{con } C_1 = 0 \text{ e } C_2 = 0$$

$$v_u = -h_{fe_2} i_{b2} (R_4 /\!/ R_L) = \Theta_1 i_{b2}$$

con $\Theta_1 = -h_{fe2}(R_4 /\!/ R_L) = -h_{fe_2} \cdot \frac{R_4 \cdot R_L}{R_4 + R_L} = 175 \cdot \frac{4,7K \cdot 22K}{4,7K + 22K\Omega} =$
$= 677,7 \cdot 10^3 \Omega$

$$R_{vo} = (1 + h_{fe_2}) R_5 = (1 + 175) \cdot 1K\Omega = 176 K\Omega$$

$$i_{b_2} = (1 + h_{fe_1}) i_{b_1} \cdot \frac{R_3}{R_3 + h_{ie_2} + R_{vo}} = \Theta_2 i_{b1}$$

con $\Theta_2 = (1 + h_{fe_1}) \frac{R_3}{R_3 + h_{ie_2} + R_{vo}} = (1 + 175) \cdot \frac{4,7K\Omega}{4,7K + 2,45K + 176K} =$

$= 4,52$

$$R^* = h_{ie_1} + (1 + h_{fe_1}) \cdot \left[R_3 \,//\, (h_{ie_2} + R_{V0}) \right] =$$

$$= h_{ie_1} + (1 + h_{fe_1}) \frac{R_3 \cdot (h_{ie_2} + R_{V0})}{R_3 + h_{ie_2} + R_{V0}} = h_{ie_2} + \theta_2 \, (h_{ie_2} + R_{V0}) =$$

$$= 7{,}65k + 4{,}52 \cdot (2{,}45 K\Omega + 176 K\Omega) = 814{,}24 \, K\Omega$$

$$i_{b_1} = i_s \cdot \frac{R_p}{R_p + R^*}$$

$$i_s = \frac{v_s}{R_s + (R_p \,//\, R^*)} = v_s \cdot \frac{R_p + R^*}{R_s (R_p + R^*) + R_p R^*}$$

$$i_{b_1} = v_s \frac{\cancel{R_p + R^*}}{R_s (R_p + R^*) + R_p R^*} \cdot \frac{R_p}{\cancel{R_p + R^*}} = \theta_3 \, v_s$$

con

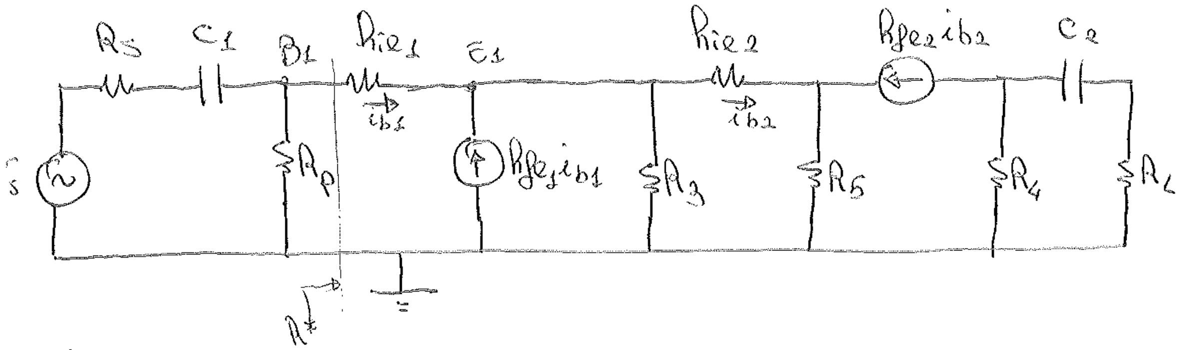
$$\theta_3 = \frac{R_p}{R_s (R_p + R^*) + R_p R^*} = \frac{16{,}62 K\Omega}{1 K\Omega \cdot (16{,}62K + 814{,}24K) + 16{,}62K \cdot 814{,}24K} =$$

$$= 1{,}157 \cdot 10^{-6} \, \Omega^{-1}$$

$$v_u = \theta_1 \theta_2 \theta_3 \, v_s \quad \Rightarrow \quad A_{CB} = \theta_1 \theta_2 \theta_3$$

$$A_{CB} = (677{,}7 K\Omega)(4{,}52)(1{,}157 \cdot 10^{-6} \, \Omega^{-1}) = -3{,}54$$

LIMITE INFERIORE DI BANDA



1) R_{vc1}

$$R_{vc_1} = R_s + R_p \,//\, R^* = R_s + \frac{R_p \cdot R^*}{R_p + R^*} =$$

$$= 1K\Omega + \frac{16{,}62K\Omega \cdot 814{,}24K\Omega}{16{,}62K\Omega + 814{,}24K\Omega} = 17{,}29K\Omega$$

2) R_{vc2}

$i_{b2} = 0$

$$R_{vc_2} = R_4 + R_L = 4{,}7K\Omega + 22K\Omega = 26{,}7K\Omega$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi}\left[\frac{1}{R_{vc_1} \cdot C_1} + \frac{1}{R_{vc_2} \cdot C_2}\right] =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left[\frac{1}{17{,}29 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{26{,}7 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}\right] = 1{,}5Hz$$