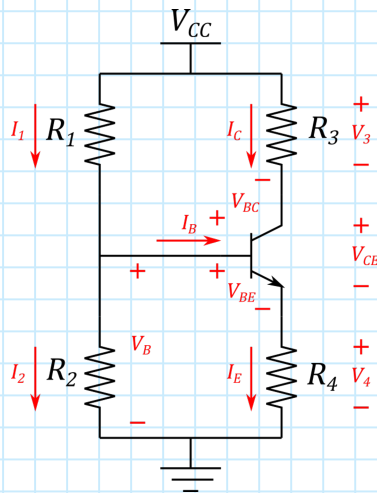


Polarizzazione del BJT

giovedì 28 novembre 2019 12:45

Progettare una rete di polarizzazione a quattro resistori per un transistor *npn* in modo tale da ottenere $I_C = 10 \mu A$, $V_{CE} = 6 V$, assumendo $V_{CC} = 18 V$ e $\beta_F = 75$.

L'esercizio richiede di progettare il seguente circuito:



Iniziamo calcolando le resistenze R_3 e R_4 .

La tensione complessiva applicata su tali resistenze è data da:

$$V_3 + V_4 = V_{CC} - V_{CE} = 18 - 6 = 12 V$$

Supponiamo di volere distribuire equamente tale tensione sulle due resistenze:

$$V_3 = V_4 = \frac{V_3 + V_4}{2} = \frac{12}{2} = 6 V$$

La corrente che scorre in R_3 è la corrente di collettore I_C , quindi R_3 vale:

$$R_3 = \frac{V_3}{I_C} = \frac{6}{10 \cdot 10^{-6}} = 600 k\Omega$$

La corrente che scorre in R_4 è invece la corrente di emettitore I_E , data da:

$$I_E = I_B + I_C = \left(\frac{1}{\beta_F} + 1 \right) \cdot I_C = \left(\frac{1}{75} + 1 \right) \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 10.13 \mu A$$

quindi R_4 vale:

$$R_4 = \frac{V_4}{I_E} = \frac{6}{10.13 \cdot 10^{-6}} = 592.11 k\Omega$$

Per calcolare le resistenze R_1 e R_2 occorre prima determinare la tensione e la corrente di base V_B e I_B .

Assumendo che il BJT sia in regione attiva diretta, possiamo affermare che $V_{BE} = 0.7 V$, quindi applicando Kirchhoff alla maglia data da R_2 , R_4 e la giunzione base-emettitore del BJT vediamo che

la tensione di base vale:

$$V_B = V_4 + V_{BE} = 6 + 0.7 = 6.7 \text{ V}$$

La corrente di base si ricava invece direttamente dalla corrente di collettore:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_F} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{75} = 133.33 \text{ nA}$$

Assumiamo di fornire al resistore R_1 una corrente pari a 10 volte la corrente di base:

$$I_1 = 10 \cdot I_B = 1.33 \text{ }\mu\text{A}$$

La resistenza R_1 sarà allora pari a:

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_1} = \frac{18 - 6.7}{1.33 \cdot 10^{-6}} = 8.48 \text{ M}\Omega$$

Avendo fissato I_1 a 10 volte la corrente di base, la corrente che scorre nel resistore R_2 sarà pari a 9 volte la corrente di base, quindi R_2 sarà pari a:

$$R_2 = \frac{V_B}{9 \cdot I_B} = \frac{6.7}{9 \cdot 133.33 \cdot 10^{-9}} = 5.58 \text{ M}\Omega$$

L'ultimo passaggio richiesto per risolvere l'esercizio è verificare che la condizione di funzionamento in regione attiva diretta sia verificata. Perché questo sia vero è necessario che la tensione base-collettore del BJT V_{BC} sia minore di 0. Tale tensione vale:

$$V_{BC} = V_B - (V_{CE} + V_4) = 6.7 - (6 + 6) = -5.3 \text{ V}$$

La condizione è verificata, quindi la rete di resistori progettata è in grado di fissare il punto di lavoro richiesto.

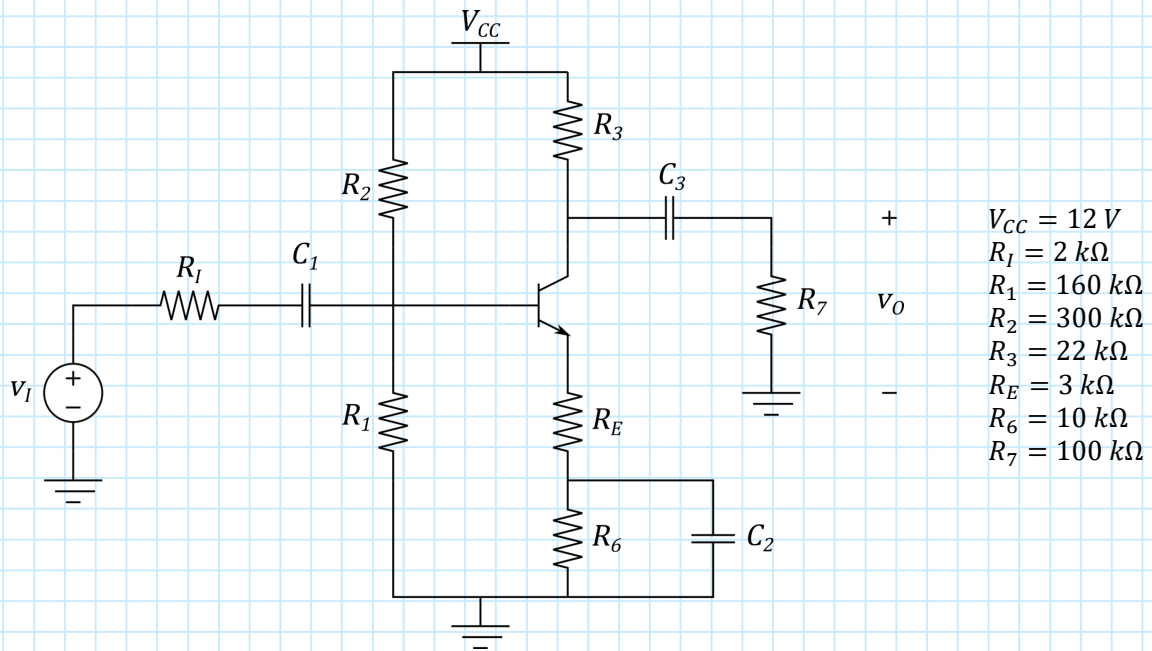
Amplificatore a Emettitore Comune

giovedì 28 novembre 2019 15:17

Dato il circuito in figura, si calcoli il punto di lavoro del BJT *npn* e si verifichi la condizione di funzionamento in regione attiva diretta. Si assumano $\beta_F = 100$ e $V_A = 50\text{ V}$.

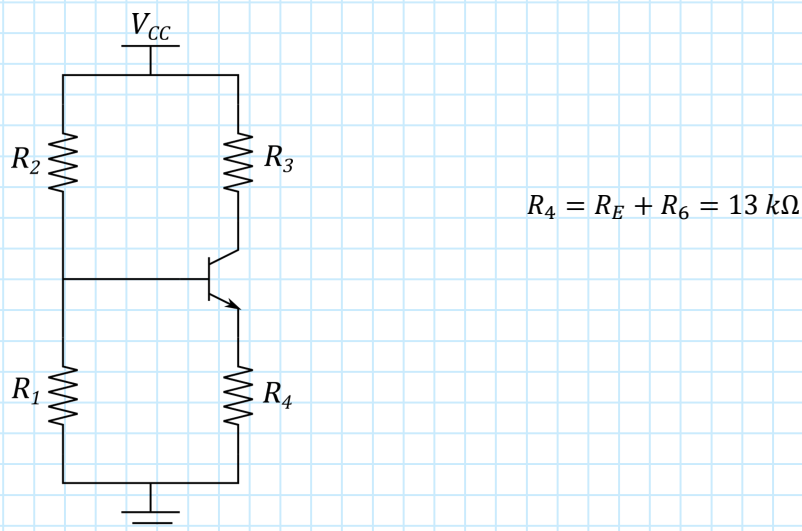
Successivamente si costruisca il circuito equivalente per piccoli segnali e si determinino il guadagno di tensione A_v , la resistenza di ingresso R_{in} e la resistenza di uscita R_{out} .

Assumendo di fornire in ingresso un segnale sinusoidale con frequenza $f_s = 1\text{ kHz}$, si dimensionino i condensatori C_1 , C_2 e C_3 .

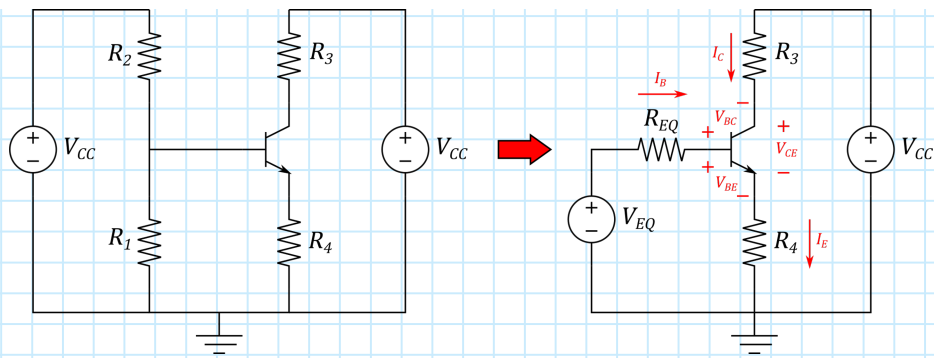


Al fine di determinare il punto di lavoro del BJT, occorre considerare il circuito rispetto al suo comportamento in continua.

In tali condizioni, i tre condensatori si comportano come dei circuiti aperti, pertanto il circuito in DC sarà il seguente:



Dividiamo la tensione di alimentazione in due generatori di tensione di valore V_{CC} e sostituiamo alla rete di polarizzazione di base il corrispondente equivalente di Thevenin:



$$V_{EQ} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = \frac{160 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^3 + 300 \cdot 10^3} \cdot 12 = 4.17 \text{ V}$$

$$R_{EQ} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{160 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^3 + 300 \cdot 10^3} = 104.35 \text{ k}\Omega$$

Il nostro obiettivo è utilizzare il circuito come amplificatore di tensione, pertanto è necessario che il BJT funzioni in regione attiva diretta.

Assumiamo che la rete di resistori sia in grado di fissare un punto di lavoro in tale regione; tale supposizione ci permette di affermare che:

$$\begin{cases} I_C = \beta_F \cdot I_B = 100 \cdot I_B \\ I_E = (\beta_F + 1) \cdot I_B = 101 \cdot I_B \\ V_{BE} = 0.7 \text{ V} \end{cases}$$

Applichiamo la legge di Kirchhoff alle due maglie del circuito:

$$\begin{cases} V_{EQ} = R_{EQ} \cdot I_B + V_{BE} + R_4 \cdot I_E = (R_{EQ} + 101 \cdot R_4) I_B + V_{BE} \\ V_{CC} = R_3 \cdot I_C + V_{CE} + R_4 \cdot I_E = (100 \cdot R_3 + 101 \cdot R_4) \cdot I_B + V_{CE} \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_B = \frac{V_{EQ} - V_{BE}}{R_{EQ} + 101 \cdot R_4} = \frac{4.17 - 0.7}{(104.35 \cdot 10^3 + 101 \cdot 13 \cdot 10^3)} = 2.45 \mu\text{A} \\ V_{CE} = V_{CC} - (100 \cdot R_3 + 101 \cdot R_4) \cdot I_B = 12 - (100 \cdot 22 \cdot 10^3 + 101 \cdot 13 \cdot 10^3) \cdot 2.45 \cdot 10^{-6} = 3.39 \text{ V} \end{cases}$$

Utilizziamo questo risultato per calcolare tutte le correnti e tensioni mancanti del BJT:

$$\begin{cases} I_C = 100 \cdot I_B = 100 \cdot 2.45 \cdot 10^{-6} = 245 \mu\text{A} \\ I_E = 101 \cdot I_B = 101 \cdot 2.45 \cdot 10^{-6} = 247.45 \mu\text{A} \\ V_{BC} = V_{BE} - V_{CE} = 0.7 - 3.39 = -2.69 \text{ V} \end{cases}$$

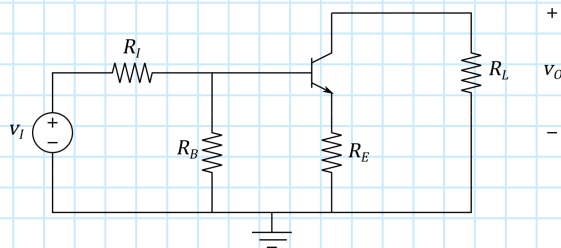
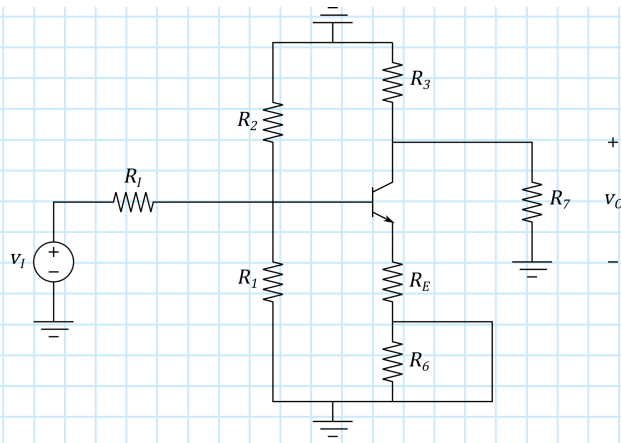
Poiché V_{BC} è minore di 0, la condizione di funzionamento in regione attiva diretta è confermata.

Il punto di lavoro del BJT è quindi:

$$P = (I_C, V_{CE}) = (245 \mu\text{A}, 3.39 \text{ V})$$

Passiamo ora all'analisi per piccoli segnali.

Il primo passo è quello di spegnere tutti i generatori in continua e sostituire i condensatori con dei cortocircuiti:



$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{160 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^3}{160 \cdot 10^3 + 300 \cdot 10^3} = 104.35 \text{ k}\Omega$$

$$R_L = \frac{R_3 \cdot R_7}{R_3 + R_7} = \frac{22 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} = 18.03 \text{ k}\Omega$$

A questo punto occorre sostituire il BJT con il suo modello per piccoli segnali.

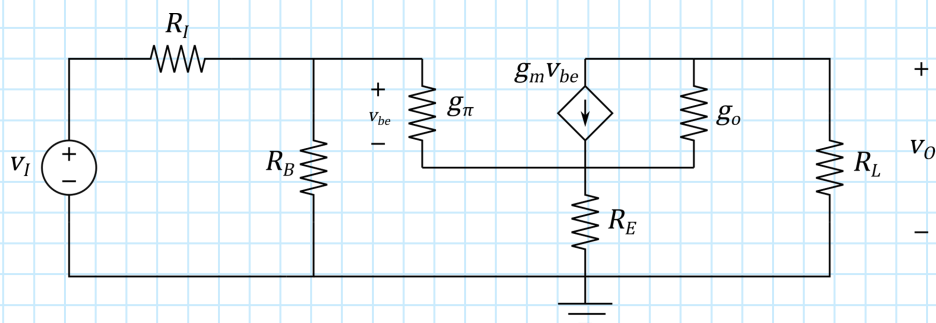
Il modello a piccoli segnali del BJT si ottiene linearizzando le correnti di base e collettore rispetto alle tensioni base-emettitore e collettore-emettitore nell'intorno del punto di lavoro:

$$\begin{cases} i_C = I_S \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \cdot \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) \\ i_B = \frac{i_C}{\beta_F} = \frac{I_S}{\beta_{F0}} \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_C = \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right]_P \cdot v_{be} + \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right]_P \cdot v_{ce} = g_m \cdot v_{be} + g_o \cdot v_{ce} \\ i_b = \left[\frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right]_P \cdot v_{be} = g_\pi \cdot v_{be} \end{cases}$$

$$\begin{cases} g_m = \frac{I_S}{V_T} \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \cdot \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right) = \frac{I_C}{V_T} = \frac{245 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-3}} = 9.8 \text{ mS} \\ g_o = \frac{I_S}{V_A} \cdot e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} = \frac{I_C}{V_A + V_{CE}} = \frac{245 \cdot 10^{-6}}{50 + 3.39} = 4.59 \text{ }\mu\text{S} \\ g_\pi = \frac{g_m}{\beta_F} = \frac{9.8 \cdot 10^{-3}}{100} = 98 \text{ }\mu\text{S} \end{cases}$$

Inserendo il modello del BJT, il circuito assume la seguente forma:



Per il calcolo del guadagno applichiamo le leggi di Kirchhoff ai nodi di base, emettitore e collettore del BJT:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_i - v_b}{R_I} = \frac{v_b}{R_B} + g_\pi \cdot (v_b - v_e) \\ g_\pi \cdot (v_b - v_e) + g_m \cdot (v_b - v_e) = \frac{v_e}{R_E} + g_o \cdot (v_e - v_o) \\ g_o \cdot (v_e - v_o) = g_m \cdot (v_b - v_e) + \frac{v_o}{R_L} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{v_i}{R_I} + g_\pi v_e = \left(\frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_B} + g_\pi \right) \cdot v_b \\ (g_m + g_\pi) \cdot v_b + g_o \cdot v_o = \left(\frac{1}{R_E} + g_m + g_\pi + g_o \right) \cdot v_e \\ (g_m + g_o) \cdot v_e = g_m \cdot v_b + \left(\frac{1}{R_L} + g_o \right) \cdot v_o \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 5 \cdot 10^{-4} \cdot v_i + 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot v_e = 6.08 \cdot 10^{-4} \cdot v_b \\ 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_b + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_o = 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot v_e \\ 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_e = 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_b + 6.01 \cdot 10^{-5} \cdot v_o \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_e = v_b + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_o \\ 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_b + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_o = 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot (v_b + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_o) \\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot v_i + 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot (v_b + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_o) = 6.08 \cdot 10^{-4} \cdot v_b \end{array} \right.$$

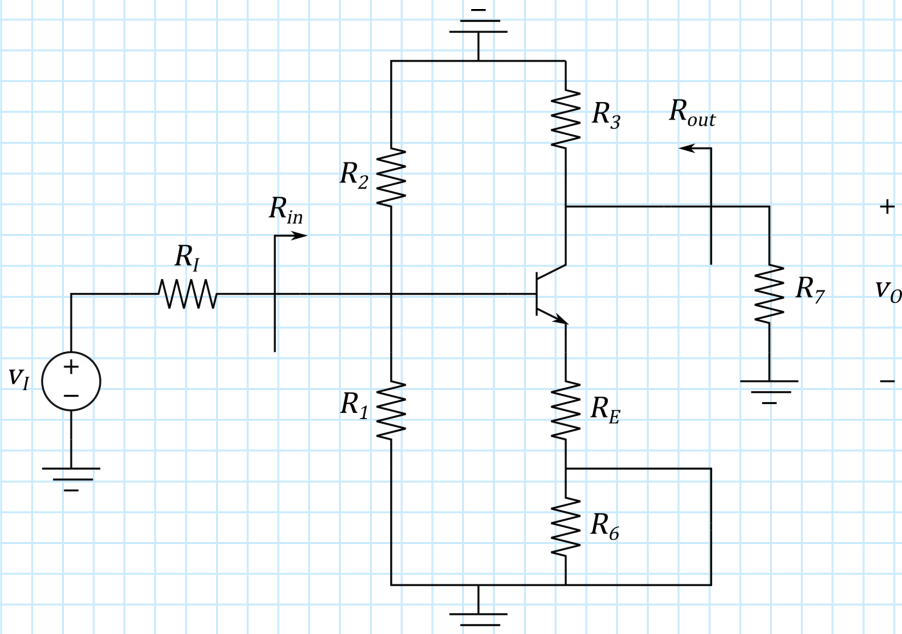
$$\left\{ \begin{array}{l} v_e = v_b + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_o \\ -3 \cdot 10^{-4} \cdot v_b = 5.76 \cdot 10^{-5} \cdot v_o \\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot v_i + 5.98 \cdot 10^{-7} \cdot v_o = 5.1 \cdot 10^{-4} \cdot v_b \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v_e = v_b + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_o \\ v_b = -1.92 \cdot 10^{-1} \cdot v_o \\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot v_i + 5.98 \cdot 10^{-7} \cdot v_o = 5.1 \cdot 10^{-4} \cdot (-1.92 \cdot 10^{-1} \cdot v_o) \end{array} \right.$$

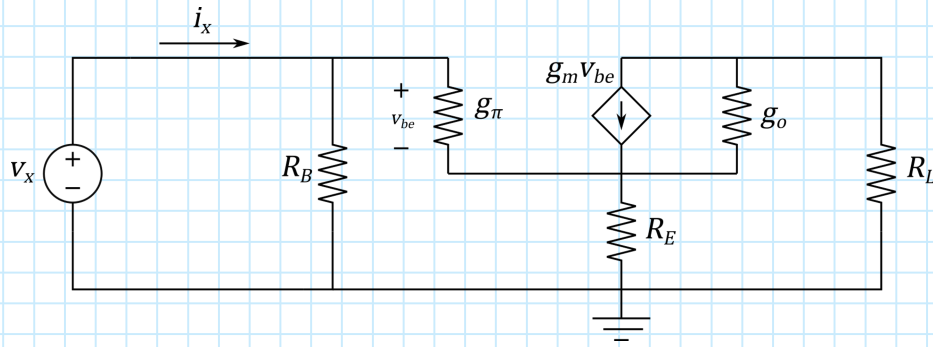
$$\left\{ \begin{array}{l} v_b = -1.92 \cdot 10^{-1} \cdot v_o \\ v_e = -1.86 \cdot 10^{-1} \cdot v_o \\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot v_i + 9.85 \cdot 10^{-5} \cdot v_o = 0 \end{array} \right.$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{5 \cdot 10^{-4}}{9.85 \cdot 10^{-5}} = 5.1$$

Passiamo ora al calcolo delle resistenze di ingresso e di uscita, ovvero le resistenze viste rispettivamente dal condensatore C_1 e dal condensatore C_3 prendendo in esame il circuito in alternata:



Partiamo con la resistenza di ingresso:



$$\begin{cases} i_x = \frac{v_x}{R_B} + g_\pi \cdot (v_x - v_e) \\ g_\pi \cdot (v_x - v_e) + g_m \cdot (v_x - v_e) = \frac{v_e}{R_E} + g_o \cdot (v_e - v_c) \\ g_o \cdot (v_e - v_c) = g_m \cdot (v_x - v_e) + \frac{v_c}{R_L} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_B} + g_\pi \right) \cdot v_x - g_\pi \cdot v_e = i_x \\ (g_m + g_\pi) \cdot v_x - \left(\frac{1}{R_E} + g_m + g_\pi + g_o \right) \cdot v_e + g_o \cdot v_c = 0 \\ g_m \cdot v_x - (g_m + g_o) \cdot v_e + \left(\frac{1}{R_L} + g_o \right) \cdot v_c = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot v_e = i_x \\ 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_x - 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot v_e + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_c = 0 \\ 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_x - 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_e + 6.01 \cdot 10^{-5} \cdot v_c = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_e = v_x + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_c \\ 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot (v_x + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_c) = i_x \\ 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_x - 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot (v_x + 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_c) + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_c = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_e = v_x + 6.13 \cdot 10^{-4} \cdot v_c \\ 10^{-5} \cdot v_x - 5.98 \cdot 10^{-7} \cdot v_c = i_x \\ -3 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 5.76 \cdot 10^{-5} \cdot v_c = 0 \end{cases}$$

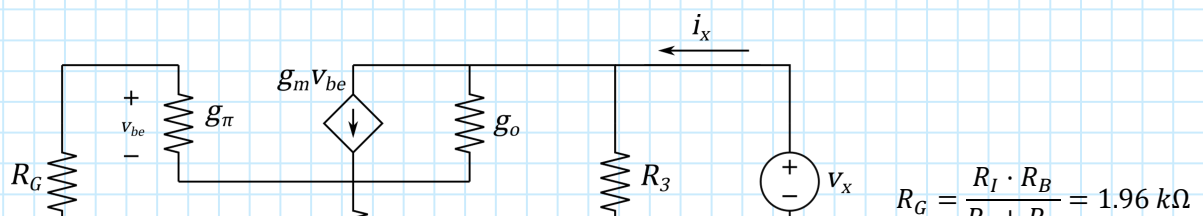
$$\begin{cases} v_c = -5.21 \cdot v_x \\ v_e = -5.21 \cdot v_x \\ 10^{-5} \cdot v_x - 5.98 \cdot 10^{-7} \cdot (-5.21 \cdot v_x) = i_x \end{cases}$$

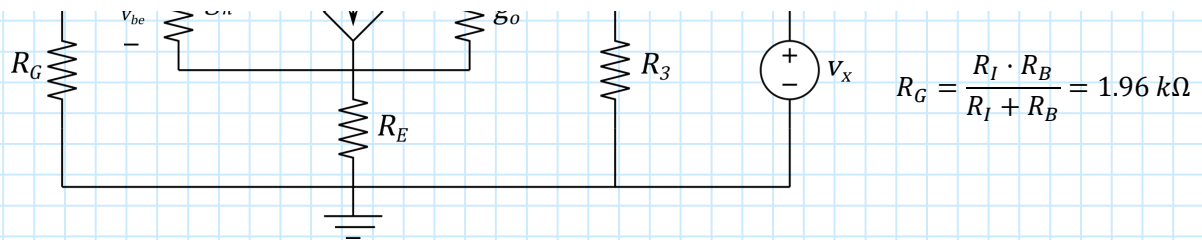
$$\begin{cases} v_c = -5.21 \cdot v_x \\ v_e = -5.21 \cdot v_x \\ 10^{-5} \cdot v_x - 5.98 \cdot 10^{-7} \cdot (-5.21 \cdot v_x) = i_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_c = -5.21 \cdot v_x \\ v_e = -5.21 \cdot v_x \\ 1.31 \cdot 10^{-5} \cdot v_x = i_x \end{cases}$$

$$R_{in} = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{1.31 \cdot 10^{-5}} = 76.25 \text{ k}\Omega$$

Passiamo ora alla resistenza di uscita:





$$\begin{cases} i_x = \frac{v_x}{R_3} + g_o \cdot (v_x - v_e) + g_m \cdot (v_b - v_e) \\ g_m \cdot (v_b - v_e) + g_o \cdot (v_x - v_e) = \frac{v_e}{R_E} + g_\pi \cdot (v_e - v_b) \\ g_\pi \cdot (v_e - v_b) = \frac{v_b}{R_G} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_3} + g_o \right) \cdot v_x - (g_m + g_o) \cdot v_e + g_m \cdot v_b = i_x \\ g_o \cdot v_x - \left(\frac{1}{R_E} + g_m + g_\pi + g_o \right) \cdot v_e + (g_m + g_\pi) \cdot v_b = 0 \\ g_\pi \cdot v_e - \left(\frac{1}{R_G} + g_\pi \right) \cdot v_b = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 5 \cdot 10^{-5} \cdot v_x - 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_e + 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = i_x \\ 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_x - 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot v_e + 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = 0 \\ 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot v_e - 6.08 \cdot 10^{-4} \cdot v_b = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_e = 6.2 \cdot v_b \\ 5 \cdot 10^{-5} \cdot v_x - 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot 6.2 \cdot v_b + 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = i_x \\ 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_x - 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot 6.2 \cdot v_b + 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_e = 6.2 \cdot v_b \\ 5 \cdot 10^{-5} \cdot v_x - 5.1 \cdot 10^{-2} \cdot v_b = i_x \\ 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_x - 5.33 \cdot 10^{-2} \cdot v_b = 0 \end{cases}$$

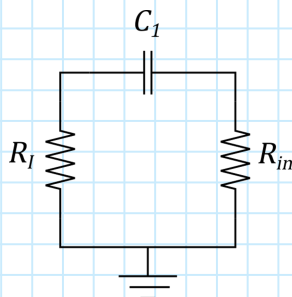
$$\begin{cases} v_b = 8.61 \cdot 10^{-5} \cdot v_x \\ v_e = 5.34 \cdot 10^{-4} \cdot v_x \\ 5 \cdot 10^{-5} \cdot v_x - 5.1 \cdot 10^{-2} \cdot 8.61 \cdot 10^{-5} \cdot v_x = i_x \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_b = 8.61 \cdot 10^{-5} \cdot v_x \\ v_e = 5.34 \cdot 10^{-4} \cdot v_x \\ 4.56 \cdot 10^{-5} \cdot v_x = i_x \end{cases}$$

$$R_{out} = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{4.56 \cdot 10^{-5}} = 21.93 \text{ k}\Omega$$

Concludiamo l'esercizio con il dimensionamento dei condensatori.

Affinché i condensatori siano considerabili dei corto circuiti alla frequenza di lavoro, è necessario che la loro impedenza sia molto minore (assumiamo due ordini di grandezza) rispetto alla resistenza equivalente che appare ai suoi capi. Iniziamo con il condensatore C_1 . Basandoci sui valori calcolati nel corso dell'esercizio, possiamo rappresentare il circuito con il seguente circuito equivalente:



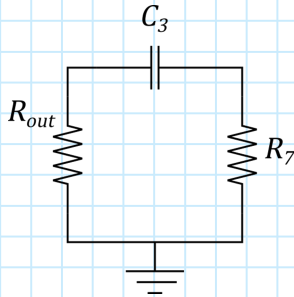
La resistenza equivalente che appare ai capi del condensatore sarà semplicemente $R_L + R_{in}$, quindi la capacità dovrà rispettare la condizione:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C_1} \ll R_I + R_{in}$$

$$C_1 \gg \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot (R_I + R_{in})}$$

$$C_1 = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot (R_I + R_{in})} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot (2 \cdot 10^3 + 76.25 \cdot 10^3)} = 203 \text{ nF}$$

In maniera analoga a C_1 , possiamo calcolare il valore del condensatore C_3 . Il circuito equivalente ai capi del condensatore è:



quindi la resistenza equivalente vista ai capi di C_3 è $R_7 + R_{out}$. La capacità avrà quindi il seguente valore:

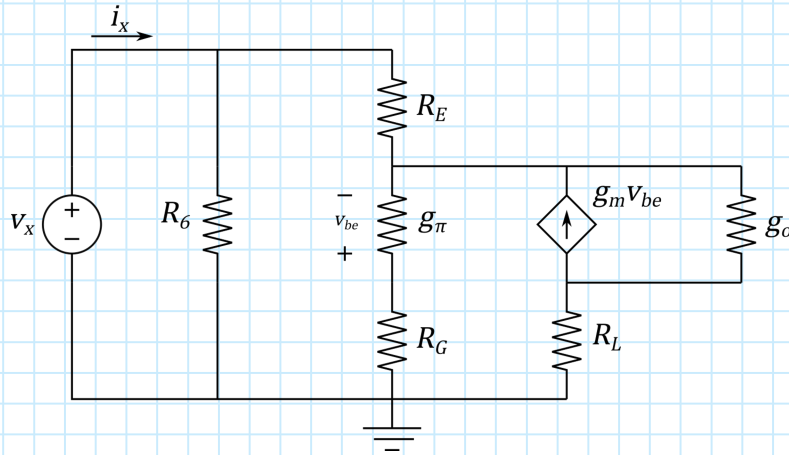
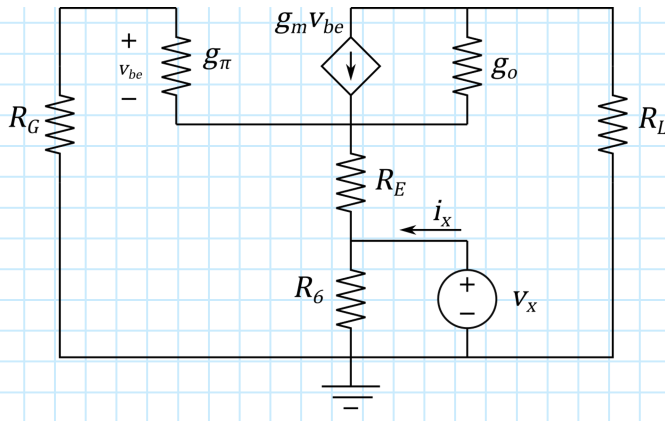
$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C_3} \ll R_7 + R_{out}$$

$$C_3 \gg \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot (R_7 + R_{out})}$$

$$C_3 = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot (R_7 + R_{out})} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot (100 \cdot 10^3 + 21.93 \cdot 10^3)} = 131 \text{ nF}$$

Concludiamo con la capacità C_2 .

La resistenza equivalente ai capi della capacità può essere calcolata tramite il seguente circuito:



$$\left\{ \begin{array}{l} i_x = \frac{v_x}{R_6} + \frac{v_x - v_e}{R_E} \\ \frac{v_x - v_e}{R_E} + g_m \cdot (v_b - v_e) = g_\pi \cdot (v_e - v_b) + g_o \cdot (v_e - v_c) \\ g_o \cdot (v_e - v_c) = g_m \cdot (v_b - v_e) + \frac{v_c}{R_L} \\ g_\pi \cdot (v_e - v_b) = \frac{v_b}{R_G} \\ \left(\frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_E} \right) \cdot v_x - \frac{v_e}{R_E} = i_x \\ \frac{v_x}{R_E} - \left(\frac{1}{R_E} + g_m + g_\pi + g_o \right) \cdot v_e + (g_m + g_\pi) \cdot v_b + g_o \cdot v_c = 0 \\ (g_m + g_o) \cdot v_e - g_m \cdot v_b - \left(\frac{1}{R_L} + g_o \right) \cdot v_c = 0 \\ g_\pi \cdot v_e - \left(\frac{1}{R_G} + g_\pi \right) \cdot v_b = 0 \\ 4.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_e = i_x \\ 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot v_e + 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_b + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_c = 0 \\ 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_e - 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_b - 6.01 \cdot 10^{-5} \cdot v_c = 0 \\ 9.8 \cdot 10^{-5} \cdot v_e - 6.08 \cdot 10^{-4} \cdot v_b = 0 \\ v_e = 6.2 \cdot v_b \\ 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 1.02 \cdot 10^{-2} \cdot 6.2 \cdot v_b + 9.9 \cdot 10^{-3} \cdot v_b + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_c = 0 \\ 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot 6.2 \cdot v_b - 9.8 \cdot 10^{-3} \cdot v_b - 6.01 \cdot 10^{-5} \cdot v_c = 0 \\ 4.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot 6.2 \cdot v_b = i_x \end{array} \right.$$

$$\begin{cases}
 v_e = 6.2 \cdot v_b \\
 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 5.33 \cdot 10^{-2} \cdot v_b + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot v_c = 0 \\
 5.1 \cdot 10^{-2} \cdot v_b - 6.01 \cdot 10^{-5} \cdot v_c = 0 \\
 4.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 2.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = i_x
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 v_e = 6.2 \cdot v_b \\
 v_c = 848.59 \cdot v_b \\
 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 5.33 \cdot 10^{-2} \cdot v_b + 4.59 \cdot 10^{-6} \cdot 848.59 \cdot v_b = 0 \\
 4.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 2.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = i_x
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 v_e = 6.2 \cdot v_b \\
 v_c = 848.59 \cdot v_b \\
 3.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 4.94 \cdot 10^{-2} \cdot v_b = 0 \\
 4.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 2.1 \cdot 10^{-3} \cdot v_b = i_x
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 v_b = 6.7 \cdot 10^{-3} \cdot v_x \\
 v_c = 5.96 \cdot v_x \\
 v_e = 4.15 \cdot 10^{-2} \cdot v_b \\
 4.33 \cdot 10^{-4} \cdot v_x - 2.1 \cdot 10^{-3} \cdot 6.7 \cdot 10^{-3} \cdot v_x = i_x
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 v_b = 6.7 \cdot 10^{-3} \cdot v_x \\
 v_c = 5.96 \cdot v_x \\
 v_e = 4.15 \cdot 10^{-2} \cdot v_b \\
 4.19 \cdot 10^{-4} \cdot v_x = i_x
 \end{cases}$$

$$R_{C2} = \frac{v_x}{i_x} = \frac{1}{4.19 \cdot 10^{-4}} = 2.39 \text{ k}\Omega$$

A questo punto possiamo calcolare il valore della capacità:

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C_2} \ll R_{C2}$$

$$C_2 \gg \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_{C2}}$$

$$C_2 = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_{C2}} = \frac{100}{2 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot 2.39 \cdot 10^3} = 6.66 \text{ }\mu\text{F}$$