

Es03A: Amplificatore a transistor

Gruppo 1.AC
Matteo Rossi, Bernardo Tomelleri

21 ottobre 2021

Misura componenti

Resistenze [Ω]	R	σR	Capacità [F]	C	σC
R_C	5.06 k	0.04 k	C_{in}	0.23 μ	0.01 μ
R_{E_p}	992	8	C_{out}	104 n	4
R_{E_q}	993	8	C_E	90 μ	5
R_E	496	4			
R_{1_s}	19.87 k	0.16 k			
R_{1_t}	50.5 k	8 k			
R_1	70.4 k	0.6 k			
R_2	9.93 k	0.08 k			
R_{es_p}	100.5	0.8			
R_{es_q}	100.2	0.8			
R_{es}	50.5	0.5			

Tabella 1: Valori di resistenza e capacità misurate per i componenti del circuito

1 Verifica del punto di lavoro

1.a Componenti quiescenti

Con il multimetro digitale abbiamo misurato

$$\begin{aligned}V_{BE}^Q &= 630 \pm 4 \text{ mV} \\V_{CE}^Q &= 3.67 \pm 0.03 \text{ V} \\I_C^Q &= \frac{\Delta V_{RC}}{R_C} = 1.134 \pm 0.011 \text{ mA}\end{aligned}$$

Prendendo come riferimento (arbitrario) il valore per la tensione di soglia della giunzione BE $V_\gamma = 0.6 \pm 0.1 \text{ V}$ e come valore atteso per la tensione al terminale di base del transistor $V_B = \frac{V_{CC}}{1 + R_1/R_2}$, ci aspettiamo di trovare

$$\begin{aligned}V_{BE,exp}^Q &\approx V_\gamma = 0.6 \pm 0.1 \text{ mV} \\I_{C,exp}^Q &= \frac{V_B - V_{BE}^Q}{R_E + R_B/h_{fe}} = \\V_{CE,exp}^Q &= V_{CC} - I_C^Q(R_C + R_E) =\end{aligned}$$

Dove abbiamo indicato con R_B la resistenza di base, data dal parallelo di R_1 e R_2 .

1.b Tensioni ai terminali

Con il multimetro digitale abbiamo misurato rispetto a V_{EE}

$$\begin{aligned}V_E &= 566 \pm 3 \text{ mV} \\V_B &= 1.196 \pm 0.006 \text{ V} \\V_C &= 4.23 \pm 0.03 \text{ V}\end{aligned}$$

mentre rispetto a GND :

$$\begin{aligned}V_E &= -773 \pm 3 \text{ mV} \\V_B &= -3.76 \pm 0.006 \text{ V} \\V_C &= -4.39 \pm 0.03 \text{ V}\end{aligned}$$

Come valori attesi otteniamo

$$\begin{aligned}V_{E,\text{exp}} &= R_E I_E \approx R_E I_{C,\text{exp}}^Q = \pm \text{V} \\V_{B,\text{exp}} &= \frac{V_{CC}}{1 + R_1/R_2} = 0.618 \pm \text{V} \\V_{C,\text{exp}} &= R_C I_{C,\text{exp}}^Q = \pm \text{V}\end{aligned}$$

1.c Partitore di tensione rigido

Possiamo ricavare le intensità di corrente che scorrono per le resistenze di base a partire dalle misure precedenti

$$I_{R_1} = \frac{V_{CC} - V_B}{R_1} = \quad I_{R_2} = \frac{V_B}{R_2} =$$

da cui ricaviamo una stima della corrente di base

$$I_B = I_{R_1} - I_{R_2} =$$

La condizione di partitore “stiff”, che si traduce in $I_{R_1} \sim I_{R_2} > 10I_B$ è abbastanza ben verificata. Possiamo anche stimare

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} =$$

2 Risposta a segnali sinusoidali

2.a Inversione di fase

La nostra stima della frequenza per cui $A_v(\text{dB}) = -3 \text{ dB}$ è

$$f_{1A} = 7336 \pm 6 \text{ Hz}$$

2.b Guadagno per piccoli segnali

Dal fit a bassa frequenza ($f \ll f_1$) otteniamo

$$A_1(\text{dB}) = (-17.91 \pm 0.18) \times 10^{-3} \quad \chi^2 = 243 \quad d.o.f. = 873$$

Ad alta frequenza ($f \gg f_1$) la retta di best-fit al plot di Bode in ampiezza ha i seguenti parametri:

$$\text{intercetta} = 75.928 \pm 0.008 \quad \text{pendenza} = -19.6747 \pm 0.0016 \quad \text{correlazione} = -0.997 \quad \chi^2 = 1647 \quad d.o.f. = 1746$$

Dall'intersezione delle due rette stimiamo per la frequenza di taglio il valore

$$f_{1B} = 7246 \pm 8 \text{ Hz}$$

Figura 1: Fit al plot di bode per trovare la frequenza di corner. In verde i punti non utilizzati nel fit.

2.c Linearità del circuito

Dal fit complessivo del modulo della funzione di trasferimento

$$|T(f)| = A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_1}\right)^2}} \quad (1)$$

otteniamo per l' amplificazione di centro-banda e per la frequenza di taglio i seguenti valori:

$$A_1(\text{dB}) = (-19.1 \pm 0.3) \times 10^{-3} \quad f_{1C} = 7428.8 \pm 0.9\text{Hz} \quad \chi^2 = 1614 \quad d.o.f. = 4997$$

Figura 2: Fit complessivo al plot di bode con l'espressione per l'attenuazione (1).

2.d Clipping

Le misure delle frequenze di taglio trovate sono tutte compatibili con il valore atteso dato dai componenti.

3 Impedenze in ingresso e uscita

Il fronte del segnale di uscita ha un tempo di salita, misurato con i cursori, di

$$t_r = 47 \pm 2 \mu\text{s}$$

da cui

$$f_1 = \ln(9)R_1C_1 \approx \frac{2.2}{2\pi t_r} = 7.4 \pm 0.3 \text{ kHz}$$

3.a Impedenza di ingresso

L'impedenza in ingresso al circuito in ?? è data da:

$$Z_{\text{in}}(\omega) = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = R_1 \left(1 - j \frac{1}{\omega R_1 C_1}\right) = R_1 \left(1 - j \frac{\omega_1}{\omega}\right)$$

A bassa frequenza ($f \ll f_1$) il termine costante è trascurabile, per cui

$$Z_{\text{in}}(f) \approx -jR_1 \frac{f_1}{f}$$

Poiché l'impedenza del condensatore $Z_{C_1} \rightarrow \infty$ per $f \rightarrow 0$ il filtro si comporta come un circuito aperto.

Ad alta frequenza ($f \gg f_1$) è il termine costante a dominare, quindi

$$Z_{\text{in}} \approx R$$

cioè, nel limite opposto ($Z_{C_1} \rightarrow 0$ per $f \rightarrow \infty$) il condensatore si comporta come un corto-circuito, quindi il filtro ha impedenza puramente reale.

Alla frequenza di taglio vale

$$Z_{\text{in}} = R_1(1 - j).$$

Mentre come impedenza in uscita abbiamo:

$$Z_{\text{out}}(\omega) = \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1\right)^{-1}.$$

3.b Impedenza di uscita

(Qui è richiesto che valutate l' amplificazione di centro-banda e la frequenza di taglio nel caso in cui il carico sia rispettivamente 100 e 10 kΩ)

$$\begin{aligned} R_L = 100 \text{ k}\Omega &\implies A_1 = 0.98 \quad f_1 = 7450 \\ R_L = 10 \text{ k}\Omega &\implies A_1 = 0.83 \quad f_1 = 8761 \end{aligned}$$

4 Risposta in frequenza

4.a Network Analyzer

$$R_1 = 1.98 \pm 0.02 \text{ k}\Omega \quad C_1 = 10.8 \pm 0.4 \text{ nF} \quad f_1 = 7442 \pm 351 \text{ Hz}$$

4.b Stima delle frequenze di taglio

Dalla fit con la funzione di trasferimento del passa basso risulta: Il valore della frequenza di taglio vale invece:

Figura 3: Fit con il modello della funzione di trasferimento per il filtro passa basso

$$f_1 = 7.76 \pm 0.01 \text{ kHz}$$

che è compatibile con i valori attesi.

Il guadagno a centro banda vale:

$$A_1 = (-23 \pm 61) \times 10^{-3} \text{ dB}$$

5 Aumento del guadagno

$$R_2 = 1.98 \pm 0.02 \text{ k}\Omega \quad C_1 = 97.6 \pm 3.9 \text{ nF} \quad f_1 = 821 \pm 41 \text{ Hz}$$

5.a Guadagno a 10 kHz

Dal fit con modello la funzione di trasferimento di un filtro passa alto risulta: Il valore della frequenza di taglio

Figura 4: Fit con il modello della funzione di trasferimento per il filtro passa alto

ricavata dal fit vale:

$$f_2 = 821.3 \pm 0.2 \text{ Hz}$$

Il guadagno a centro banda vale:

$$A_2 = (-25 \pm 61) \times 10^{-3} \text{ dB}$$

5.b Confronto con il guadagno atteso

La nostra stima dell'amplificazione di centro-banda e delle frequenze di taglio (per cui il guadagno si riduce di 3 dB rispetto a centro-banda) è

$$A(\text{dB}) = -6.505 \pm 0.006 \quad f_L = 380 \pm 3 \text{ Hz} \quad f_H = 16.29 \pm 0.16 \text{ kHz}$$

Conclusioni e commenti finali

Si è riusciti a realizzare dei filtri RC passivi del primo ordine (o “a un polo”) e ad apprezzarne il differente comportamento in vari regimi, quando usati separatamente, collegati in cascata e connessi a carichi resistivi di diverso valore.

Dichiarazione

I firmatari di questa relazione dichiarano che il contenuto della relazione è originale, con misure effettuate dai membri del gruppo, e che tutti i firmatari hanno contribuito alla elaborazione della relazione stessa.