



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

ESERCITAZIONE 2: AMPLIFICATORE AD EMETTITORE COMUNE

G. Galbato Muscio

L. Gravina

L. Graziotto

23 ottobre 2018

GRUPPO 11

Abstract

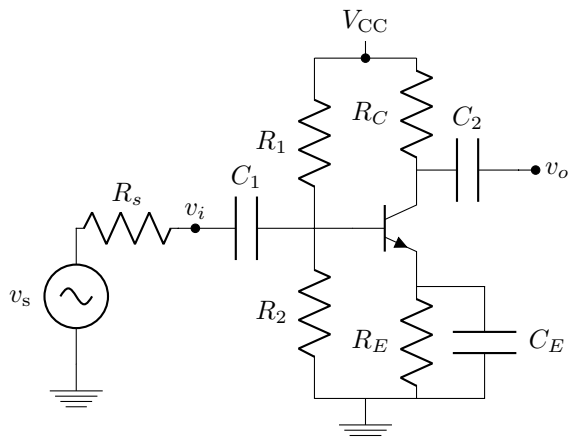
Si utilizza un transistor 2N2222A di tipo *nnp* per realizzare un amplificatore ad emettitore comune, con amplificazione di tensione di circa $A_v = -50$. Se ne studia quindi la risposta in frequenza e le resistenze in uscita e in ingresso.

Indice

1	Progetto della rete autopolarizzante	2
2	Dinamica del circuito	3
3	Studio in frequenza	4
4	Resistenza di uscita	4
5	Resistenza di ingresso	4

1 Progetto della rete autopolarizzante

Si realizza il circuito seguente per l'amplificatore, utilizzando un transistor 2N2222A di tipo *npn*.



Si vuole ottenere un'amplificazione di $A_v \simeq -50$, dunque si scelgono resistenze di valore prossimo a quello indicato nel progetto della guida all'esperienza. Poiché i valori disponibili saranno diversi, tuttavia, si procederà a verificare la correttezza dell'amplificazione ottenuta, calcolando direttamente i valori previsti e confrontandoli con quelli misurati sul circuito. I valori degli elementi utilizzati sono, come da misura con il multimetro e con il ponte:

$$\begin{aligned} R_1 &= (32.8 \pm 0.2) \text{ k}\Omega \\ R_2 &= (8.22 \pm 0.04) \text{ k}\Omega \\ R_C &= (1.174 \pm 0.006) \text{ k}\Omega \\ R_E &= (1.188 \pm 0.006) \text{ k}\Omega \\ V_{CC} &= (9.967 \pm 0.005) \text{ V} \\ C_1 &= (42.31 \pm 0.02) \text{ nF} \\ C_2 &= (155.34 \pm 0.08) \text{ nF} \\ C_E &= (89.62 \pm 0.05) \text{ }\mu\text{F}. \end{aligned}$$

Si verifica con il multimetro che le tensioni tra i diversi nodi del circuito siano compatibili con quelle previste, dati gli elementi usati, al fine di verificare il corretto funzionamento del circuito stesso.

¹Dunque si ha $V_{BE} = 0.7$ e I_B trascurabile; si

Si ha, nell'ipotesi che il circuito si trovi nella regione attiva¹:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$V_B \simeq V_{BB}$$

$$I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

$$I_E \simeq I_C$$

$$V_C = V_{CC} - R_C I_C$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_E + R_C) I_C$$

$$V_E = V_C - V_{CE}$$

Per quanto riguarda le correnti di emettitore e di collettore, che nella regione attiva devono essere circa uguali, si misura con il multimetro la differenza di potenziale ai capi di R_C e R_E e si applica la legge di Ohm $I = V/R$. Si riporta in tabella 1 il confronto tra valore previsto e misurato.

Tabella 1: Valori previsti e misurati per il circuito

	Valore previsto	Valore misurato
V_C	8.68 V	$(8.67 \pm 0.04) \text{ V}$
V_B	1.998 V	$(1.95 \pm 0.01) \text{ V}$
V_E	1.3 V	$(1.315 \pm 0.007) \text{ V}$
V_{CE}	7.39 V	$(7.36 \pm 0.04) \text{ V}$
V_{BE}	0.7 V	$(0.632 \pm 0.003) \text{ V}$
I_C	1.09 mA	$(1.10 \pm 0.01) \text{ mA}$
I_E	1.09 mA	$(1.11 \pm 0.01) \text{ mA}$

Dalla tabella si evince che la differenza di potenziale tra base ed emettitore è compatibile con il valore $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$, e la differenza di potenziale tra collettore ed emettitore è $V_{CE} > 0.2 \text{ V}$, dunque il transistor si trova nella regione attiva. L'amplificazione prevista risulta essere

$$A_v = -\frac{R_C I_C}{V_T} = -51.7 \pm 0.5, \quad (1)$$

dove $V_T = 25 \text{ mV}$ alla temperatura del laboratorio, ed è compatibile con il valore richiesto dal progetto.

Al fine di stabilizzare il punto di lavoro, si introducono i condensatori C_1 , C_2 e C_E : i primi due impediscono le variazioni delle correnti verificherà la correttezza di queste ipotesi nel seguito.

statiche dovute alla connessione del generatore di segnali e della resistenza di carico, mentre C_E permette di ottenere un'amplificazione data da (1) invece che da $A_v = -R_C/R_E$, per frequenze sufficientemente alte. La scelta compiuta per la C_E verifica la condizione

$$\frac{1}{\omega C_E} \ll R_E$$

anche per pulsazioni molto basse, dell'ordine di $10/(R_E C_E) \sim 93.9 \text{ s}^{-1}$, ossia fino a circa 15 Hz. Per quanto riguarda i condensatori C_1 e C_2 , si sono scelte capacità non eccessivamente grandi (dell'ordine delle decine e centinaia di nF) al fine di osservare gli andamenti diversi del circuito prima e dopo le frequenze di taglio

$$\begin{aligned} f' &= \frac{1}{2\pi C_1 R_{in}} \\ f'' &= \frac{1}{2\pi C_2 (R_{out} + R_L)}, \end{aligned} \quad (2)$$

dove $R_{in} = R_B || h_{ie} \simeq R_B$ ² e $R_{out} = R_C || h_{oe}^{-1} \simeq R_C$ ³, mentre R_L sarà la resistenza di carico introdotta nel seguito. Se invece si fosse voluto realizzare un amplificatore con banda passante più ampia, si sarebbero senza dubbio inseriti condensatori di capacità più elevata.

2 Dinamica del circuito

Si connette al circuito il generatore di segnali e si imposta un segnale sinusoidale con frequenza fissa di $(53.6 \pm 1.6) \text{ kHz}$ e ampiezza variabile v_s ; si ricorda che la resistenza interna del generatore $R_s \simeq 50 \Omega$ viene trascurata. Si connette inoltre al canale CH1 dell'oscilloscopio il segnale d'ingresso e al canale CH2 il segnale v_o . Variando v_s , si misura con l'oscilloscopio l'ampiezza picco-picco di v_i e di v_o , e si stima l'amplificazione $A_v = -v_o/v_i$. Si riportano in tabella 2 i valori misurati.

²Dal datasheet del transistor si ha $h_{ie} = 2 \div 8 \text{ k}\Omega$.

³Sempre dal datasheet del transistor, si ha infatti

v_i [mV] ($\pm 3\%$)	v_o ($\pm 3\%$) [V]	A_v
19.80	0.91	46.06
26.40	1.21	45.83
34.00	1.55	45.59
39.20	1.90	48.47
47.60	2.20	46.22
56.00	2.56	45.71
62.00	2.82	45.48
72.00	3.24	45.00
84.00	3.68	43.81

Tabella 2: Misure di ampiezza picco-picco di v_i e v_o

Si ha un'amplificazione media di

$$A_v = 45.8 \pm 1.2,$$

coerente con quanto previsto precedentemente. Si osserva che per ampiezze superiori a $v_i \simeq 90 \text{ mV}$, il segnale appare distorto: questo è dovuto alla limitata dinamica del transistor. Si riporta in figura 1 uno screenshot dell'oscilloscopio per evidenziare il fenomeno.

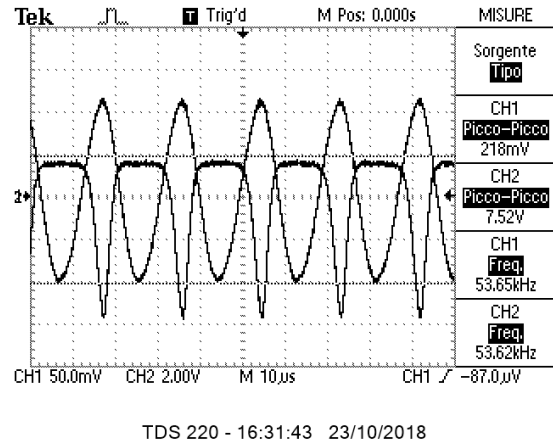


Figura 1: Distorsione del segnale per elevati valori di v_i

$$h_{oe} = 5 \div 35 \text{ }\mu\Omega^{-1}.$$

3 Studio in frequenza

Si procede allo studio in frequenza del circuito, variando anche v_s per evitare nella misura i fenomeni di distorsione precedentemente descritti. Si riporta in tabella 5 i valori di frequenza, v_i , v_o e del modulo dell'amplificazione $|A_v| = |v_o|/|v_i|$, e in figura 2 il diagramma di Bode corrispondente.

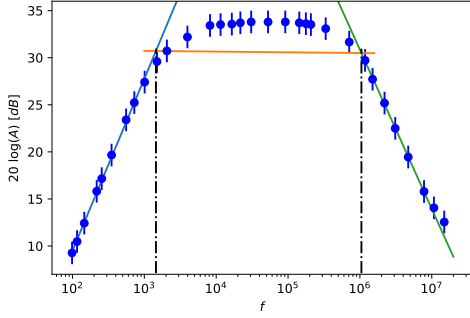


Figura 2: Diagramma di Bode dell'amplificazione in funzione della frequenza

Si osserva che per frequenze superiori ai 10 MHz l'andamento dell'amplificazione in funzione della frequenza segue una pendenza diversa da quella precedentemente assunta dall'inizio della zona decrescente. Si ritiene che questo sia dovuto all'intervento della capacità interna dell'oscilloscopio, che si aggiunge ai già presenti effetti capacitativi parassiti del transistor.

Si stimano quindi le frequenze di taglio inferiori e superiori, mediante un fit nelle tre zone dei punti che presentano un andamento lineare crescente, stazionario e decrescente, e trovando le intersezioni di quella crescente e decrescente con la retta stazionaria traslata verso il basso di 3 dB, ovvero del valore assunto in decibel dall'amplificazione alla frequenza di taglio. Si ha

$$f_L = (1.45 \pm 0.07) \text{ kHz}$$

$$f_H = (1.05 \pm 0.05) \text{ MHz};$$

si confronta la prima con le frequenze di taglio delle (2), ovvero $f' = (1199 \pm 21) \text{ Hz}$, $f'' = (1.02 \pm 0.02) \text{ Hz}$ e con $f_E = 1/(2\pi C_E R_E) =$

$(1.49 \pm 0.01) \text{ Hz}$ e si evince che nella zona crescente si ha l'effetto del solo filtro passa-alto dovuto a C_1 , dal momento che le frequenze di taglio degli altri due filtri sono di molto inferiori; questo è visibile anche dalla pendenza della retta, pari a 20 dB per decade. Per la frequenza di taglio superiore, invece, poiché essa è dovuta alle capacità parassite del transistor ignote, non si è in grado di fornire un valore teorico di confronto.

4 Resistenza di uscita

Si misura la resistenza di uscita dell'amplificatore, inserendo una resistenza di carico R_L tra il potenziale v_o e la terra. Si lavora in regime sinusoidale a frequenza $(10.7 \pm 0.3) \text{ kHz}$ e si fissa innanzitutto il potenziale $v_o = (1.70 \pm 0.05) \text{ V}$ a vuoto, scegliendo $v_i = (36.0 \pm 1.1) \text{ mV}$. Si sceglieranno valori di $R_L \simeq R_C$ per ottimizzare la qualità della misura, e si varierà tale resistenza misurando la tensione ai suoi capi. Si riportano in tabella 3 i valori di R_L e di v_{R_L} . Si stima R_{out} con

$$R_{\text{out}} = \frac{v_o - v_{R_L}}{v_{R_L}} R_L.$$

Tabella 3: Valori misurati per la resistenza di uscita

R_L ($\pm 0.5\%$) [k Ω]	v_{R_L} ($\pm 3\%$) [mV]	R_{out} [k Ω]
0.817	672.00	1.250
1.770	1000.00	1.239
1.510	936.00	1.233
1.186	840.00	1.214
1.000	768.00	1.214

La stima della resistenza, data dal valore medio, è dunque

$$R_{\text{out}} = (1229 \pm 14) \Omega,$$

compatibile con il valore della resistenza R_C .

5 Resistenza di ingresso

Si valuta anche la resistenza in ingresso dell'amplificatore, mediante l'inserimento di una resistenza r_x dell'ordine del k Ω tra il generatore di segnali e il condensatore C_1 . Misurando i potenziali v_i e v_2 rispettivamente prima e dopo la

resistenza r_x con l'oscilloscopio, si ricava il valore della resistenza di ingresso dall'equazione del partitore di tensione:

$$R_{\text{in}} = \frac{v_2}{v_i - v_2} r_x.$$

Si lavora ancora in regime sinusoidale a frequenza (10.7 ± 0.3) kHz.

Si riportano in tabella 4 i valori di r_x e dei potenziali, nonché le stime di R_{in} .

La stima della resistenza, data dal valore medio, è

$$R_{\text{in}} = (3.25 \pm 0.12) \text{ k}\Omega;$$

si confronta questo valore con quello ricavato dalla frequenza di taglio stimata, ossia $R_{\text{in}} = 1/(2\pi f_L C_1) = (2.59 \pm 0.08) \text{ k}\Omega$, e si osserva che sono compatibili, tenendo conto che anche la stima stessa della frequenza di taglio è affetta da incertezza.

Tabella 4: Valori misurati per la resistenza di ingresso

r_x ($\pm 3\%$) [k Ω]	v_i ($\pm 3\%$) [mV]	v_2 ($\pm 3\%$) [mV]	R_{in} [k Ω]
1.000	260	200	3.333
0.816	258	208	3.396
1.190	262	190	3.140
1.510	262	176	3.090
1.770	258	168	3.304

Tabella 5: Studio in frequenza dell'amplificatore

f [Hz]	v_i ($\pm 3\%$) [mV]	v_o [mV] ($\pm 3\%$)	$ A_v $
9.88e+01	39.2	114	2.91
1.16e+02	39.2	131	3.34
1.46e+02	39.2	164	4.18
2.18e+02	36.6	226	6.17
2.55e+02	39.4	284	7.21
3.50e+02	36.8	354	9.62
5.58e+02	39.2	580	14.80
7.26e+02	36.8	672	18.26
1.01e+03	39.2	920	23.47
1.50e+03	36.8	1110	30.16
2.06e+03	39.0	1340	34.36
3.98e+03	38.8	1580	40.72
8.20e+03	38.8	1820	46.91
1.15e+04	38.8	1840	47.42
1.65e+04	38.8	1850	47.68
2.17e+04	38.8	1880	48.45
3.07e+04	38.8	1900	48.97
5.27e+04	38.8	1900	48.97
9.15e+04	38.8	1900	48.97
1.43e+05	38.8	1880	48.45
1.77e+05	38.8	1860	47.94
2.08e+05	38.8	1840	47.42
3.34e+05	38.8	1750	45.10
7.10e+05	37.6	1440	38.30
1.18e+06	36.6	1120	30.60
1.50e+06	36.2	880	24.31
2.20e+06	35.8	650	18.16
3.10e+06	32.4	432	13.33
4.70e+06	32.6	306	9.39
7.80e+06	27.6	170	6.16
1.07e+07	22.6	114	5.04
1.49e+07	31.6	134	4.24