

Esercitazione di Laboratorio:

Amplificatori operazionali con retroazione

Coa Giulio

Licastro Dario

Montano Alessandra

5 gennaio 2020

# 1 Scopo dell'esperienza

Gli scopi di questa esercitazione sono:

- Analizzare il comportamento e misurare i parametri di amplificatori reazionati.
- Verificare alcune deviazioni rispetto al comportamento previsto con i modelli ideali.

# 2 Strumentazione utilizzata

La strumentazione usata durante l'esercitazione è:

Strumento	Marca e Modello	Caratteristiche
Oscilloscopio	Rigol DS1054Z	4 canali, $B = 50 \text{ MHz}$ , $f_c = 1 \text{ G}\frac{\text{Sa}}{\text{s}}$ , $R_i = 1 \text{ M}\Omega$ , $C_i = 13 \text{ pF}$ , 12 Mbps di profondità di memoria
Generatore di segnali	Rigol DG1022	2 canali, $f_{\text{uscita}} = 20 \text{ MHz}$ , $Z_{\text{uscita}} = 50 \Omega$
Alimentatore in DC Scheda premontata Cavi coassiali Connettori	Rigol DP832 A3	3 canali Capacità dell'ordine dei $80 \div 100 \text{ p}\frac{\text{F}}{\text{m}}$

# 3 Premesse teoriche

## 3.1 Incertezza sulla misura dell'oscilloscopio

La misura del valore di un segnale tramite l'oscilloscopio (sia esso l'ampiezza, la frequenza, il periodo, etc.) presenta un'incertezza che dipende, principalmente, da due fattori:

- l'incertezza strumentale introdotta dall'oscilloscopio (ricavabile dal manuale).
- l'incertezza di lettura dovuta all'errore del posizionamento dei cursori.

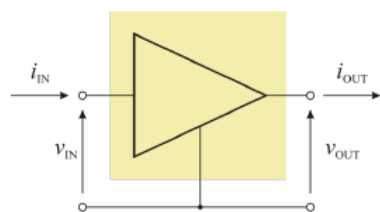
Quest'ultima incertezza deriva dal fatto che il segnale visualizzato non ha uno spessore nullo sullo schermo.

## 3.2 Amplificatore

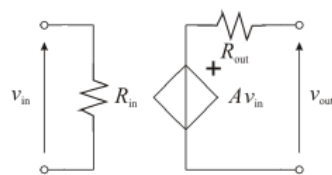
Un amplificatore è un doppio bipolo unidirezionale caratterizzato dalla seguente relazione

$$y(t) = A \cdot x(t)$$

Dove  $A$  è detto guadagno dell'amplificatore.



(a) Amplificatore.



(b) Circuito equivalente ad un amplificatore.

In base al tipo di segnale in ingresso e in uscita, possiamo distinguere quattro tipi di amplificatori:

- Amplificatore di Tensione.
- Amplificatore di Transconduttanza.
- Amplificatore di Transresistenza.
- Amplificatore di Corrente.

### 3.2.1 Amplificatore operazionale

L'amplificatore operazionale è un amplificatore differenziale, ovvero amplifica la differenza delle tensioni ai suoi capi, che presenta un'amplificazione  $A_d$  idealmente infinita.

$$A_d = \frac{v_{out}}{v_d} = \frac{v_{out}}{v^+ - v^-}$$

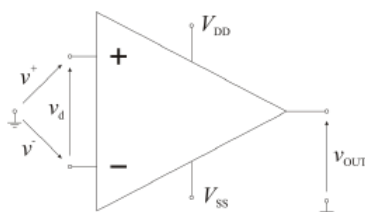


Figura 2: Amplificatore operazionale.

### 3.2.2 Amplificatore invertente

L'amplificatore invertente è un derivato dell'amplificatore di transresistenza che fornisce, in uscita, un segnale proporzionale al segnale in ingresso ma che presenta fase invertita rispetto ad esso; esso caratterizzato dalle seguenti relazioni

$$\begin{aligned} v_{out} &= A_v \cdot v_{in} = \\ &= -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_{in} \\ R_{in} &= R_1 \end{aligned}$$

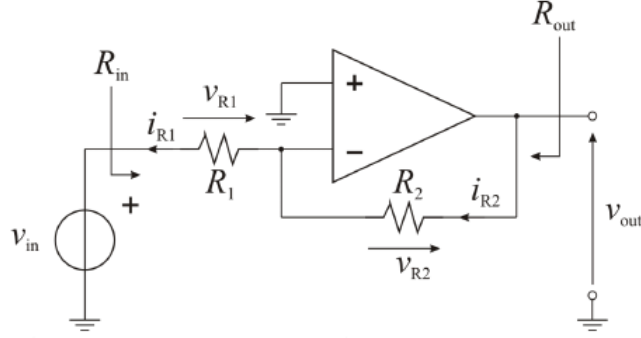


Figura 3: Amplificatore invertente.

$$R_{\text{out}} = 0$$

**N.B.**  $R_{\text{in}}$  non è necessariamente elevata.

### 3.2.3 Amplificatore differenziale

L'amplificatore differenziale è un amplificatore che fornisce, in uscita, un segnale proporzionale alla differenza rispetto ai segnali in ingresso; esso caratterizzato dalle seguenti relazioni

$$R_{\text{in},v^+} = R_a + R_b$$

$$R_{\text{in},v^-} = R'_b$$

$$R_{\text{out}} = 0$$

$$\frac{R'_a}{R'_b} = \frac{R_a}{R_b} \cdot (1 + \epsilon)$$

$$\begin{aligned} v_{\text{out}} &= A_{\text{diff}} \cdot v_d - A_{\text{cm}} \cdot v_{\text{cm}} = \\ &= \left( \frac{R_a}{R_b} - \frac{R_a}{R_a + R_b} \cdot \frac{\epsilon}{2} \right) \cdot v_d - \frac{R_a}{R_a + R_b} \cdot \epsilon \cdot v_{\text{cm}} = \\ &\approx \frac{R_a}{R_b} \cdot v_d - \frac{R_a}{R_a + R_b} \cdot \epsilon \cdot v_{\text{cm}} \end{aligned}$$

$$\text{CMRR} = \frac{A_{\text{diff}}}{A_{\text{cm}}} \approx \frac{1}{\epsilon} \cdot (1 + A_{\text{diff}})$$

Dove CMRR è il Common-Mode Rejection Ratio,  $A_{\text{diff}}$  è l'amplificazione differenziale e  $A_{\text{cm}}$  è l'amplificazione di modo comune.

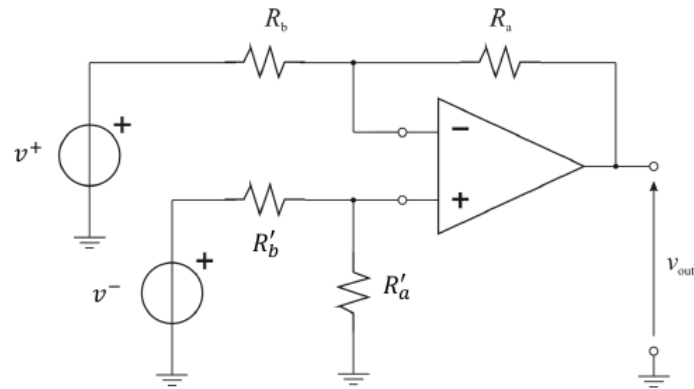


Figura 4: Amplificatore differenziale.

## 4 Esperienza in laboratorio

### 4.1 Amplificatore non invertente

Abbiamo realizzato il circuito richiesto, collegando il modulo A3-1:

- Il generatore di segnali al connettore coassiale J3.
- L'alimentatore duale viene connesso, in modalità tracking, al morsetto **nomeMorsetto**.
- L'oscilloscopio, tramite due cavi coassiali BNC-coccodrillo, all'ingresso e all'uscita del circuito, rispettivamente gli ancoraggi J4 e J7 (massa) e J2 e J8 (massa).

E posizionando gli interruttori seguendo la seguente tabella

Interruttore	Posizione	Note
S1	1	aperto
S2	2	chiuso
S4	2	chiuso
S5	1	aperto
S6	1	aperto

Infine, abbiamo impostato il generatore di segnali, in modo da visualizzare un segnale sinusoidale con  $V_{pp}$  pari ad 1 V e frequenza pari a 2 kHz, e proceduto con la misurazione di  $V_i$  e  $V_u$  tramite l'uso dell'oscilloscopio.

### 4.2 Amplificatore invertente

Abbiamo realizzato il circuito richiesto, collegando il modulo A3-2:

- Il generatore di segnali al connettore coassiale J9.
- L'oscilloscopio, tramite due cavi coassiali BNC-coccodrillo, all'ingresso e all'uscita del circuito, rispettivamente gli ancoraggi J10 e J14 (massa) e J11 e J13 (massa).

E posizionando gli interruttori seguendo la seguente tabella

Interruttore	Posizione	Note
S8	1	aperto
S9	1	aperto
S10	2	chiuso
S11	1	aperto
S12	1	aperto
S13	1	$R_{11}$ non inserita
S14	1	$R_{12}$ non inserita

Successivamente, abbiamo impostato il generatore di segnali, in modo da visualizzare un segnale triangolare con  $V_{pp}$  pari ad 2 V e frequenza pari a 300 Hz, e proceduto con la misurazione di  $V_i$  e  $V_u$  tramite l'uso dell'oscilloscopio.

Infine, abbiamo verificato che la tensione sui morsetti dell'amplificatore fosse nulla o prossima allo zero ed abbiamo proceduto ad aumentare l'ampiezza del segnale al fine di ottenere il presentarsi del fenomeno di clipping.

### 4.3 Amplificatore differenziale

Abbiamo realizzato il circuito richiesto, posizionando gli interruttori seguendo la seguente tabella

Interruttore	Posizione	Note
S12	2	chiuso
S13	1	$R_{11}$ non inserita
S14	1	$R_{12}$ non inserita

Infine, abbiamo impostato il generatore di segnali, in modo da visualizzare un segnale sinusoidale con  $V_{pp}$  pari ad 1.6 V e frequenza pari a 200 Hz, e proceduto con la misurazione di  $V_i$  e  $V_u$  tramite l'uso dell'oscilloscopio.

### 4.4 Amplificatore AC/DC

Abbiamo realizzato il circuito richiesto, collegando il modulo A3-1:

- Il generatore di segnali al connettore coassiale J3.
- L'oscilloscopio, tramite due cavi coassiali BNC-coccodrillo, all'ingresso e all'uscita del circuito, rispettivamente gli ancoraggi J4 e J7 (massa), J2 e J8 (massa).

E, dopo aver posizionato gli interruttori seguendo la seguente tabella,

Interruttore	Posizione	Note
S3	2	chiuso
S5	2	chiuso
S6	1	aperto

Successivamente, abbiamo impostato il generatore di segnali, in modo da visualizzare un segnale triangolare con  $V_{pp}$  pari ad 300 mV, e proceduto con la misurazione di  $V_i$  e  $V_u$  tramite l'uso dell'oscilloscopio.

## 5 Risultati

### 5.1 Amplificatore non invertente

Dai calcoli abbiamo ricavato l'amplificazione

$$\begin{aligned}
 A_v &= \frac{A_d}{1 + \beta \cdot A_d} = \\
 &= \frac{A_d}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot A_d} = \\
 &= \frac{200k}{1 + \frac{12k}{100k + 12k} \cdot 200k} = \\
 &= 9.33
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{in} &= (R_{id} + R_3 + (R_1 + R_o) \parallel R_2) \cdot (1 + A_d \cdot \frac{R_2 \parallel (R_{id} + R_3) + R_o}{R_2 \parallel (R_{id} + R_3) + R_o + R_1}) = \\
 &= (1M + 4.7k + (100k + 100) \parallel 12k) \cdot (1 + 200k \cdot \frac{12k \parallel (1M + 4.7k) + 100}{12k \parallel (1M + 4.7k) + 100 + 100k}) = \\
 &= 21.7 \text{ G}\Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{out} &= \frac{R_o}{1 + \beta \cdot A_d} \parallel (R_1 + R_2) = \\
 &= \frac{R_o}{1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot A_d} \parallel (R_1 + R_2) = \\
 &= \frac{100}{1 + \frac{12k}{100k + 12k} \cdot 200k} \parallel (100k + 12k) = \\
 &= 4.67 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

S3	S7	$V_i$ [V]	$V_u$ [V]	$A_v$
1	1	1.08	9.80	9.07
1	2	1.08	9.80	9.07
2	1	1.08	10.0	9.26
2	2	1.08	10.0	9.26

Notiamo che i valori di  $A_v$  ottenuti dalle misurazioni sono leggermente più bassi del valore teorico; tale la differenza è piccola e, pertanto, trascurabile.

Sfruttando il partitore di tensione formatosi all'ingresso dell'amplificatore quando la resistenza  $R_3$  è inserita, possiamo scrivere

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{v_{out, R_3}}{v_{out}} = \\
 &= 0.98
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
w &= \frac{v_{\text{out}, R_3}}{v_{\text{out}}} = \\
&= \frac{A_v \cdot V_{i, R_3}}{A_v \cdot V_i} = \\
&= \frac{V_{i, R_3}}{V_i} = \\
&= \frac{v_s \cdot \frac{R_i}{R_3 + R_i}}{v_s} = \\
&= \frac{R_i}{R_3 + R_i}
\end{aligned}$$

Da cui

$$\begin{aligned}
R_i &= w \cdot R_3 \cdot \frac{1}{1 - w} = \\
&= 0.98 \cdot 4.7k \cdot \frac{1}{1 - 0.98} = \\
&= 230 \text{ k}\Omega
\end{aligned}$$

Il valore ottenuto ci conferma che la resistenza in ingresso è elevata e che, dato che le due tensioni misurate quando  $R_5$  è inserita sono uguali, il valore di  $R_u$  è trascurabile.

## 5.2 Amplificatore invertente

Dai calcoli abbiamo ricavato che

$$\begin{aligned}
A_v &= \frac{A_d}{1 + \beta \cdot A_d} = \\
&= \frac{A_d}{1 - \frac{R_9}{R_{10}} \cdot A_d} = \\
&= \frac{200k}{1 - \frac{22k}{100k} \cdot 200k} = \\
&= -4.55 \\
R_{\text{in}} &= R_9 + \frac{R_o + R_{10}}{1 + A_d} = \\
&= 22k + \frac{100 + 100k}{1 + 200k} = \\
&\approx 22 \text{ k}\Omega \\
R_{\text{out}} &= \frac{R_o + R_9 + R_{10}}{R_o + R_9 \cdot (1 + A_d) + R_{10}} \cdot [R_o \parallel (R_9 + R_{10})] = \\
&= \frac{100 + 22k + 100k}{100 + 22k \cdot (1 + 200k) + 100k} \cdot [100 \parallel (22k + 100k)] = \\
&= 2.77 \text{ m}\Omega
\end{aligned}$$

$V_i$ [V]	$V_u$ [V]	$A_v$
2.16	9.20	4.26

Notiamo che il valore di  $A_v$  ottenuto dalle misurazioni è leggermente più basso del valore teorico; tale la differenza è piccola e, pertanto, trascurabile. Inoltre, esso presenta segno positivo poichè l'oscilloscopio tiene in considerazione la differenza di fase di  $180^\circ$  tra l'ingresso e l'uscita.



### 5.3 Amplificatore differenziale

(Dopo ogni misurazione il circuito è stato riposizionato alla situazione di partenza) \* Chiudendo S8 creiamo una maglia priva di resistenze, il generatore è direttamente collegato al morsetto non invertente, infatti  $V_2 = V_i$ , di conseguenza la loro differenza è pari a 0 ed il guadagno che avremo sarà unitario, ovvero la tensione che entra nell'amplificatore resta invariata.

$$\begin{aligned} A_{v,S8} &= 1 + \frac{R_{10}}{R_9} - \frac{R_{10}}{R_9} = \\ &= 1 + \frac{100k}{22k} - \frac{100k}{22k} = \\ &= 1 \end{aligned}$$

\* Chiudendo S9 creiamo una maglia con  $R_6 = 10k\Omega$ , di conseguenza avremo una diminuzione di  $V_2 = 2/3V_i$ , che porterà ad un incremento del guadagno in modulo, come riscontrabile anche dai calcoli effettuati.

$$\begin{aligned} A_{v,S9} &= \frac{2}{3} \cdot \left(1 + \frac{R_{10}}{R_9}\right) - \frac{R_{10}}{R_9} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \left(1 + \frac{100k}{22k}\right) - \frac{100k}{22k} = \\ &= -0.85 \end{aligned}$$

\* Chiudendo S10 creiamo una maglia con  $R_6 = 10k\Omega$  e  $R_7 = 10k\Omega$ , di conseguenza avremo una diminuzione di  $V_2 = 1/3V_i$ , che porterà ad un incremento del guadagno in modulo, come riscontrabile anche dai calcoli effettuati.

$$\begin{aligned} A_{v,S10} &= \frac{1}{3} \cdot \left(1 + \frac{R_{10}}{R_9}\right) - \frac{R_{10}}{R_9} = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \left(1 + \frac{100k}{22k}\right) - \frac{100k}{22k} = \\ &= -2.7 \end{aligned}$$

\* Chiudendo S11 colleghiamo direttamente il morsetto non-invertente alla massa, quindi  $V_2 = 0$ , otteniamo il circuito di un amplificatore invertente, con guadagno massimo

$$\begin{aligned} A_{v,S11} &= -\frac{R_{10}}{R_9} = \\ &= -\frac{100k}{22k} = \\ &= -4.55 \end{aligned}$$

S8	S9	S10	S11	$V_i$ [V]	$V_u$ [V]	$A_v$
2	1	1	1	1.66	1.64	0.99
1	2	1	1	1.66	1.40	0.84
1	1	2	1	1.64	4.36	2.66
1	1	1	2	1.64	7.32	4.46

Le misurazioni effettuate sono coerenti con i valori calcolati, infatti al massimo troviamo differenze di un decimo del valore, ma tendenzialmente la differenza è molto minore.

## 5.4 Amplificatore AC/DC

Punto a) Abbiamo osservato, per mezzo dell'oscilloscopio, che al crescere della frequenza il segnale veniva distorto a causa della limitazione di slew rate di conseguenza abbiamo continuato ad aumentare la frequenza in ingresso come richiesto, riducendo però la  $V_{pp}$ , partendo da un valore di 1,6V per scendere fino a 300 mV, rimanendo, quindi, nei limiti richiesti. Punto b) Calcolando la frequenza di taglio abbiamo ottenuto  $f=86.08\text{kHz}$ ????????? Punto c) Per verificare che l'offset venga amplificato lo abbiamo inserito pari a 140mV (foto 9), per poi aumentarlo fino a 180 mV (foto 10) ed apprezzare la differente rappresentazione dell'offset, sono stati mantenuti valori bassi per evitare distorsioni del segnale. Il segnale in uscita presenta l'offset anch'esso amplificato di un fattore  $A_v$ . Punto d) (Premessa: il valore misurato di  $C_3$  è 15pF, non 10nF come riportato nella consegna) Abbiamo inserito  $C_3$  come da istruzioni ed abbiamo ricalcolato la frequenza di taglio, ottenendo  $f = 54\text{kHz}$ , quindi 32kHz di calo. Invece troviamo il guadagno del segnale di 8, 56 e un guadagno della componente continua di circa 10, quindi si è verificato un aumento di circa 0,7 Variazioni di offset per misurare il guadagno in continua Punto e) Inserendo il condensatore  $C_4= 100\text{ nF}$  ed impostando  $V_i= 360\text{ mV}$  otteniamo  $V_u=2,86\text{ V}$  ed una nuova frequenza di taglio  $f = 83\text{kHz}$ , cioè inferiore di 3 kHz rispetto a quella del circuito privo di condensatori. Punto f) Abbiamo inserito  $C_5$ ,  $V_i$  invariata,  $V_u= 2,86\text{ V}$ , quindi il condensatore non influenza la tensione di uscita, e frequenza di taglio  $f= 84\text{kHz}$ .