

Esercitazione di Laboratorio:

Amplificatori operazionali con retroazione

Coa Giulio Licastro Dario Montano Alessandra

9 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.

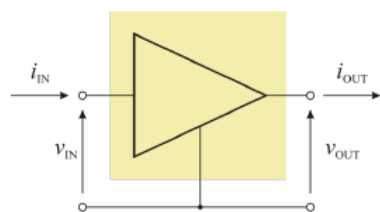
Quest'ultima incertezza deriva dal fatto che il segnale visualizzato non ha uno spessore nullo sullo schermo.

3.2 Amplificatore

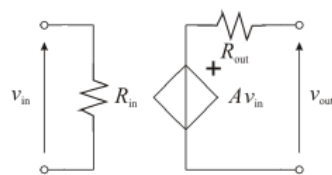
Un amplificatore è un doppio bipolo unidirezionale caratterizzato dalla seguente relazione

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

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.

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

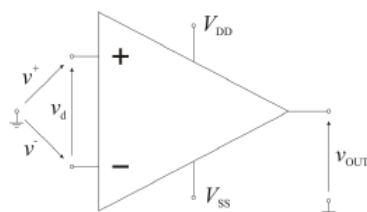


Figura 2: Amplificatore operazionale.

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; è caratterizzato dalle seguenti relazioni

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

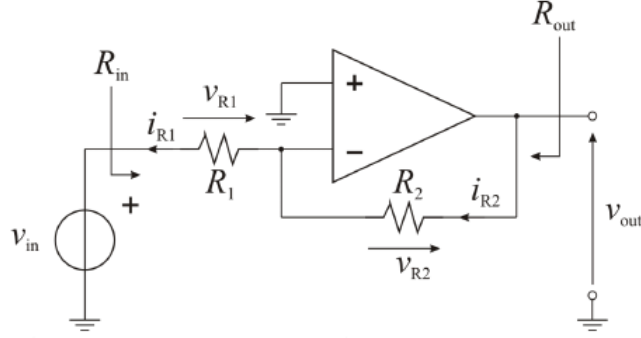


Figura 3: Amplificatore invertente.

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

N.B. R_{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_{diff} è l'amplificazione differenziale e A_{cm} è l'amplificazione di modo comune.

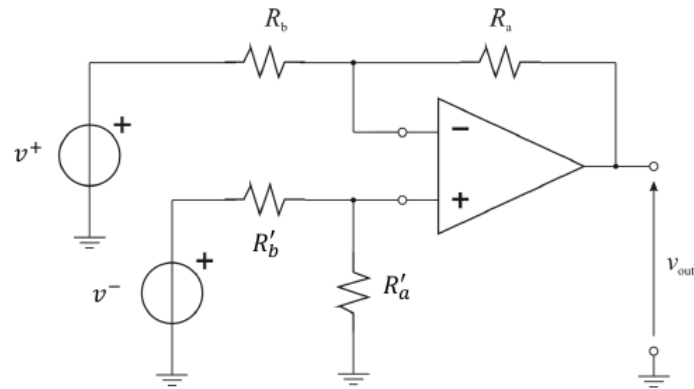


Figura 4: Amplificatore differenziale.

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 J15.
- L'alimentatore duale viene connesso, in modalità tracking, al morsetto Val.
- L'oscilloscopio, tramite due cavi coassiali BNC-coccodrillo, all'ingresso e all'uscita del circuito, rispettivamente gli ancoraggi J3 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:

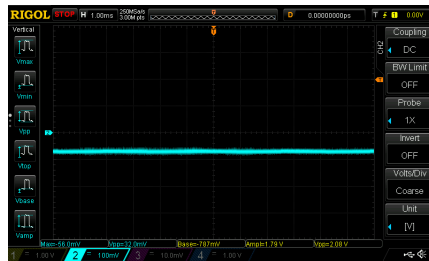
- Il generatore di segnali al connettore coassiale J16.
- L'oscilloscopio, tramite due cavi coassiali BNC-coccodrillo, all'ingresso e all'uscita del circuito, rispettivamente gli ancoraggi J9 e J14 (massa) e J11 e J13 (massa).

E posizionando gli interruttori seguendo la seguente tabella

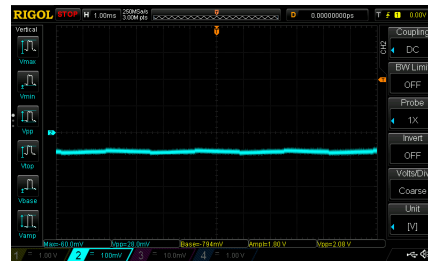
Interruttore	Posizione	Note
S8	1	aperto
S9	1	aperto
S10	2	chiuso
S11	1	aperto
S12	1	aperto
S13	1	R_{11} non inserita
S14	1	R_{12} non inserita

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.

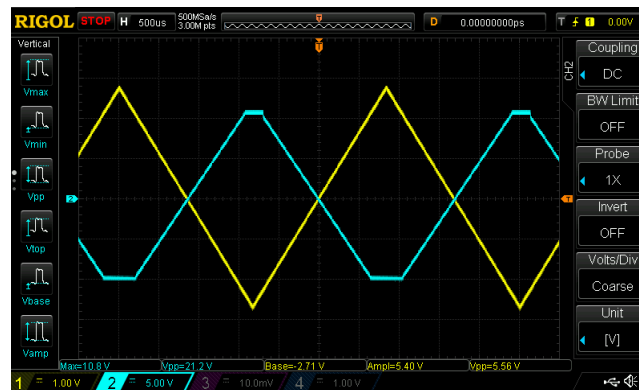
Infine, abbiamo verificato che la tensione sui morsetti dell'amplificatore fosse nulla o prossima allo zero ed abbiamo proceduto ad aumentare l'ampiezza del segnale al fine di ottenere il presentarsi del fenomeno di clipping.



(a) Verifica della tensione al morsetto non-invertente.



(b) Verifica della tensione al morsetto invertente.



(c) Verifica del fenomeno di clipping ($V_{pp} = 5.5 \text{ V}$).

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

Successivamente, 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, per le varie configurazioni.

4.4 Amplificatore AC/DC

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

- Il generatore di segnali al connettore coassiale J15.
- L'oscilloscopio, tramite due cavi coassiali BNC-coccodrillo, all'ingresso e all'uscita del circuito, rispettivamente gli ancoraggi J3 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

Poi, prima di procedere con l'esperienza, 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 10 kHz. Infine, abbiamo valutato, nel dominio di Laplace, il circuito nelle varie configurazioni.

a.

Successivamente, abbiamo osservato come, al crescere della frequenza, il segnale venga distorto a causa della limitazione di Slew Rate.



Figura 6: Verifica della limitazione di Slew Rate.

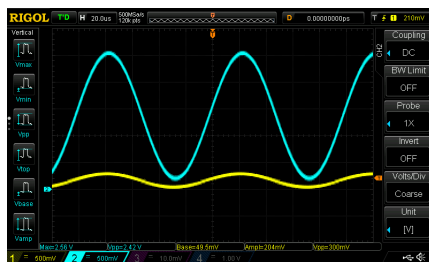
Di conseguenza, abbiamo determinato sperimentalmente quale fosse la tensione per cui la limitazione di Slew Rate fosse rispettata ed abbiamo proceduto al ridurre l'ampiezza V_{pp} fino a tale valore, passando da 1.6 V a 300 mV.



Figura 7: Ingresso ed uscita dell'amplificatore alla frequenza di 100 kHz.

A questo punto abbiamo proceduto con la misurazione di V_i e V_u , tramite l'uso dell'oscilloscopio, alle varie frequenze in esame.

- b. Al fine di determinare la frequenza di taglio, abbiamo determinato il valore di V_u una volta attenuato di 3 dB e abbiamo variato la frequenza affinché il valore di V_u si avvicinasse il più possibile al valore calcolato.
- c. Al fine di verificare che l'amplificatore amplificasse eventuali offset del segnale, abbiamo applicato, dapprima, un offset di 140 mV e, successivamente, un offset di 180 mV, riscontrando un'amplificazione di un fattore A_v del suddetto. Sono stati mantenuti valori piccoli per gli offset di modo da evitare errate visualizzazioni del segnale.



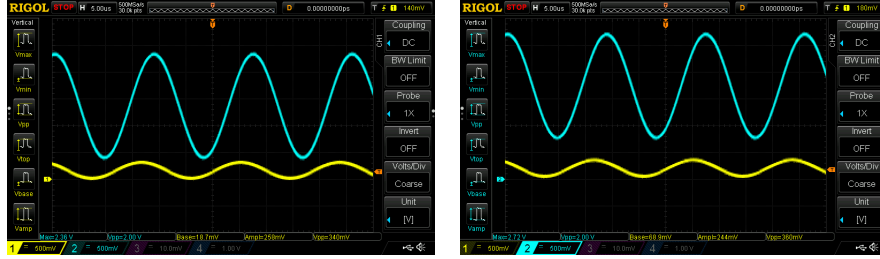
(a) Segnale con un offset di 140 mV.



(b) Segnale con un offset di 180 mV.

- d. **N.B.** Il condensatore C_3 preso in esame ha un valore di 15 pF e non di 10 nF come riportato nel testo dell'esercitazione; ciò ha portato ad un'esperienza che si discosta da quella che era stata pensata per l'esercitazione.

Abbiamo commutato lo switch S1, inserendo il condensatore C_3 nel circuito, ed abbiamo ripetuto la procedura al punto **b.** al fine di determinare la nuova frequenza di taglio. Infine, abbiamo determinato il guadagno in continua dell'amplificatore tramite l'applicazione di due offset.



(a) Segnale con un offset di 140 mV.

(b) Segnale con un offset di 180 mV.

e.

Abbiamo commutato lo switch S2, inserendo il condensatore C_4 nel circuito, ed abbiamo ripetuto la procedura al punto **b.** al fine di determinare la nuova frequenza di taglio. Inoltre, si è verificato come l'offset in ingresso non venisse amplificato in uscita.

f.

Abbiamo commutato lo switch S4, inserendo il condensatore C_5 nel circuito, ed abbiamo ripetuto la procedura al punto **b.** al fine di determinare la nuova frequenza di taglio. Inoltre, si è verificato come l'offset in ingresso venisse annullato in uscita.

5 Risultati

5.1 Amplificatore non invertente

Dai calcoli abbiamo ricavato l'amplificazione

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{A_d}{1 + \beta \cdot A_d} = \\ &= \frac{A_d}{1 - \frac{R_9}{R_{10}} \cdot A_d} = \\ &= \frac{200k}{1 - \frac{22k}{100k} \cdot 200k} = \\ &= -4.55 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{in} &= R_9 + \frac{R_o + R_{10}}{1 + A_d} = \\ &= 22k + \frac{100 + 100k}{1 + 200k} = \\ &\approx 22 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

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

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° tra l'ingresso e l'uscita.

5.3 Amplificatore differenziale

Chiudendo lo switch S8, creiamo una maglia priva di resistenze dove, per l'appunto, la tensione sul morsetto non-invertente è pari a quella sul morsetto invertente ($V_2 = V_i$); a causa di ciò, la differenza tra le due tensioni è nulla ed il guadagno dell'amplificatore differenziale sarà unitario, ovvero non vi sarà una variazione del segnale.

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

Chiudendo lo switch S9, creiamo una maglia in cui è presente la resistenza R_6 ; a causa di ciò, si avrà una diminuzione della tensione sul morsetto non-invertente rispetto alla tensione sul

morsetto invertente ($V_2 = \frac{2}{3} \cdot V_i$).

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

Chiudendo lo switch S10, creiamo una maglia in cui è presente la resistenza R_6 ed R_7 ; a causa di ciò, si avrà una diminuzione della tensione sul morsetto non-invertente rispetto alla tensione sul morsetto invertente ($V_2 = \frac{1}{3} \cdot V_i$) che porterà ad un incremento, in modulo, del guadagno dell'amplificatore, come riscontrabile dai calcoli.

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

Chiudendo lo switch S11, colleghiamo, direttamente, il morsetto non-invertente alla massa e, quindi, avremo che la tensione su di esso sarà nulla, rendendo l'amplificatore un amplificatore invertente.

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

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, abbiamo riscontrato differenze dell'ordine dei centesimi ($0.01 \div 0.09$), ma tendenzialmente la differenza è molto minore.

I calcoli effettuati sono stati svolti utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti.

5.4 Amplificatore AC/DC

a.

Frequenza	V_i [mV]	V_u [V]	A_v
100 Hz	324	2.96	9.14
1 kHz	324	2.96	9.14
10 kHz	380	2.88	7.58
100 kHz	360	1.80	5.00

b.

$$20 \log \frac{V_{u,f_T}}{V_u} = -3$$

$$\frac{V_{u,f_T}}{V_u} = 10^{-\frac{3}{20}}$$

$$\begin{aligned} V_{u,f_T} &= 10^{-\frac{3}{20}} \cdot V_u = \\ &= 0.707 \cdot 2.88 = \\ &= 2.04 \text{ V} \end{aligned}$$



Figura 10: Segnale alla frequenza di taglio ($f = 86.08 \text{ kHz}$).

c.

N.B. Il condensatore C_3 preso in esame ha un valore di 15 pF e non di 10 nF come riportato nel testo dell'esercitazione; ciò ha portato ad un'esperienza che si discosta da quella che era stata pensata per l'esercitazione.



Figura 11: Segnale alla frequenza di taglio ($f = 54 \text{ kHz}$).

$$A_{v,DC} = \frac{V_{u,140m}}{V_{i,140m}} =$$

$$= \frac{1.4}{140m} =$$

$$= 10$$

$$A_{v,DC} = \frac{V_{u,180m}}{V_{i,180m}} =$$

$$= \frac{1.8}{180m} =$$

$$= 10$$

d.



Figura 12: Segnale alla frequenza di taglio ($f = 83 \text{ kHz}$).

$$A_{v,DC} = \frac{V_{u,140m}}{V_{i,140m}} = \frac{140m}{140m} = 1$$

$$A_{v,DC} = \frac{V_{u,180m}}{V_{i,180m}} = \frac{180m}{180m} = 1$$

e.



Figura 13: Segnale alla frequenza di taglio ($f = 84 \text{ kHz}$).

$$A_{v,DC} = \frac{V_{u,140m}}{V_{i,140m}} = \frac{0}{140m} = 0$$

$$A_{v,DC} = \frac{V_{u,180m}}{V_{i,180m}} = \frac{0}{180m} = 0$$