

# Es05B: Circuiti lineari con Amplificatori Operazionali

Gruppo 1G.BT  
Francesco Sacco, Lorenzo Cavuoti

8 Novembre 2018

## Scopo dell' esperienza

Misurare le caratteristiche di circuiti lineari realizzati con un op-amp TL081 alimentati tra +15 V e -15 V.

## 1 Amplificatore invertente

Si vuole realizzare un amplificatore invertente con un' impedenza di ingresso superiore a 1 k $\Omega$  e con un amplificazione a centro banda di 10.

### 1.a Scelta dei componenti

Si monta il circuito secondo lo schema mostrato in figura 1, utilizzando la barra di distribuzione verde per la tensione negativa, quella rosso per la tensione positiva, e quella nera per la massa. Si sono scelti  $R_1 = 1.2k\Omega$  e  $R_2 = 12k\Omega$  nominali in quanto risolvendo il circuito considerando un OpAmp ideale si trova  $A_V = R_2/R_1$

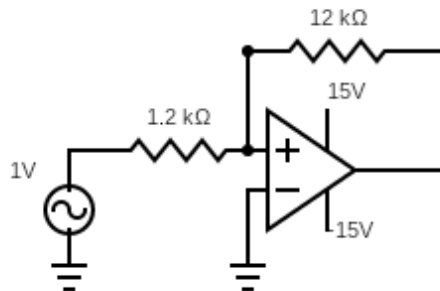


Figura 1: Schema di un amplificatore invertente

Le resistenze selezionate hanno i seguenti valori, misurati con il multimetro digitale, con il corrispondente valore atteso del guadagno in tensione dell' amplificatore.

$$R_1 = (1.19 \pm 0.01) \text{ k}\Omega, \quad R_2 = (12.2 \pm 0.1) \text{ k}\Omega, \quad A_{exp} = (10.2 \pm 0.1)$$

### 1.b Montaggio circuito

### 1.c Linearità e misura del guadagno

Si fissa la frequenza del segnale ad  $f_{in} = (5.59 \pm 0.06) \text{ kHz}$  e si invia all' ingresso dell' amplificatore. L'uscita dell' amplificatore è mostrata qualitativamente in Fig. 2 per due differenti ampiezze di  $V_{in}$  (circa 424mV Vpp e 4.32V Vpp). Nel primo caso l' OpAmp si comporta in modo lineare mentre nel secondo caso si osserva clipping.

Variando l' ampiezza di  $V_{in}$  si misura  $V_{out}$  ed il relativo guadagno  $A_V = V_{out}/V_{in}$  riportando i dati ottenuti in tabella 1 e mostrandone un grafico in Fig. 3. Il fit è stato fatto sulla retta  $V_{out}$  vs  $V_{in}$  usando la funzione `curve_fit` di `scipy` con `ablosute_sigma=False`, sono stati considerati anche gli errori sulla x.

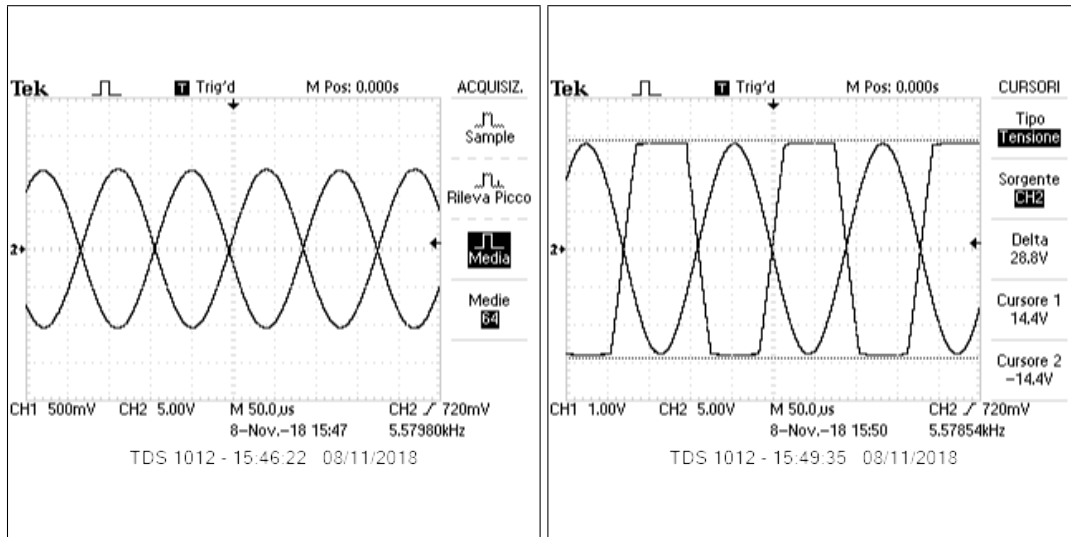


Figura 2: Ingresso ed uscita di un amplificatore invertente con OpAmp, in zona lineare (a sinistra) e non (a destra)

Tabella 1:  $V_{out}$  in funzione di  $V_{in}$  e relativo rapporto.

$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (V)	$A_V$
$66 \pm 3m$	$680 \pm 30m$	$10.2 \pm 0.6$
$290 \pm 10m$	$2.9 \pm 0.1$	$10.1 \pm 0.6$
$730 \pm 30m$	$7.4 \pm 0.3$	$10.1 \pm 0.6$
$1.26 \pm 0.05$	$12.7 \pm 0.5$	$10.1 \pm 0.6$
$2.7 \pm 0.1$	$27 \pm 1$	$10 \pm 0.6$

Si determina il guadagno mediante fit dei dati ottenuti:

$$A_{best} = 10.07 \pm 0.03 \quad \chi^2 = 0.02$$

Il circuito si comporta linearmente fino a  $V_{in} \approx 2.8V$ , questo rispecchia il funzionamento dell'OpAmp, infatti con una ddp di alimentazione  $\approx 30V$  e con un guadagno atteso di 10.2 ci aspettiamo che il clipping avvenga a circa 3V, in accordo con quanto misurato. Da questo si può dedurre che alzando o abbassando la ddp di alimentazione il clipping avverrà a una ddp maggiore o minore, rispettivamente.

## 2 Risposta in frequenza e *slew rate*

### 2.a Risposta in frequenza del circuito

Si misura la risposta in frequenza del circuito, riportando i dati in Tab. 2 e in un grafico di Bode in Fig. 4, stimando la frequenza di taglio inferiore e superiore. osservando la frequenza alla quale il guadagno risulta -3dB del massimo, l'errore è stato valutato variando la frequenza fino a che non si osserva un cambiamento nell'ampiezza del segnale di uscita.

$$V_{in} = (1.14 \pm 0.05) V$$

$$f_L = (7.5 \pm 0.3) \text{ Hz} \quad f_H = (210 \pm 4) \text{ kHz}$$

### 2.b Misura dello *slew-rate*

Si misura direttamente lo *slew-rate* dell'op-amp inviando in ingresso un' onda quadra di frequenza di  $\sim 2.11 \text{ kHz}$  e di ampiezza  $\sim 2.70 \text{ V}$ . Si ottiene:

$$SR_{misurato} = (7.7 \pm 0.3) \text{ V}/\mu\text{s} \quad \text{valore tipico } (13) \text{ V}/\mu\text{s}$$

Lo slew rate misurato risulta circa la metà rispetto a quello atteso e non sappiamo perchè

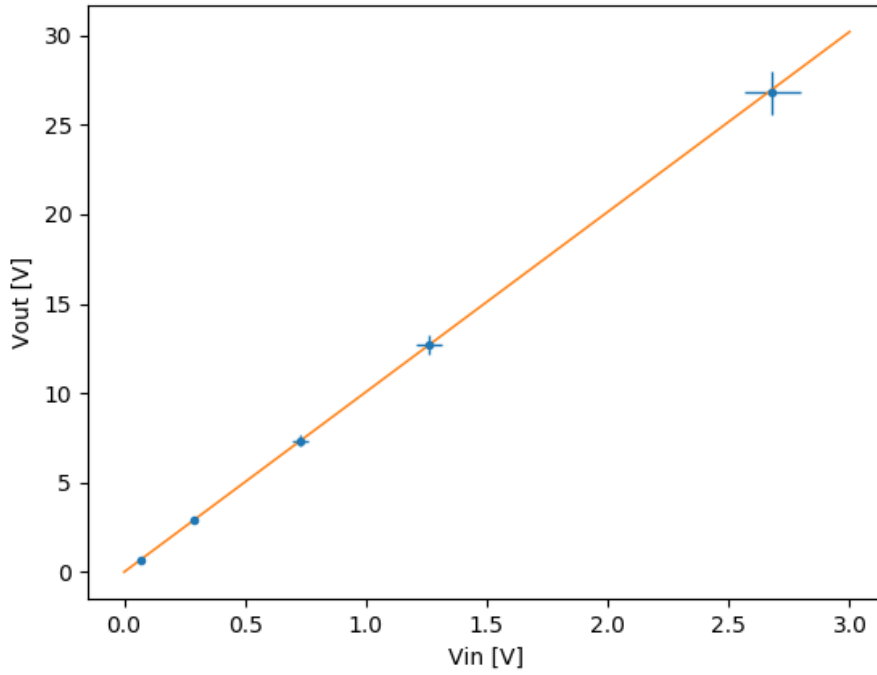


Figura 3: Linearità dell' amplificatore invertente

Tabella 2: Guadagno dell' amplificatore invertente in funzione della frequenza.

$f_{in}$ (kHz)	$V_{out}$ (V)	$A$ (dB)
$2.58 \pm 0.3$	$3.8 \pm 0.2$	$3.3 \pm 0.2$
$172.0 \pm 2$	$11.6 \pm 0.5$	$10.2 \pm 0.6$
$5.56 \pm 0.06k$	$11.5 \pm 0.5$	$10.1 \pm 0.6$
$67.7 \pm 0.7k$	$11.0 \pm 0.5$	$9.6 \pm 0.6$
$952 \pm 10k$	$2.5 \pm 0.1$	$2.2 \pm 0.1$

### 3 Circuito integratore

Si monta il circuito integratore con i seguenti valori dei componenti indicati:

$$R_1 = (0.990 \pm 0.008) \text{ k}\Omega, \quad R_2 = (9.83 \pm 0.08) \text{ k}\Omega, \quad C = (49 \pm 2) \text{ nF}$$

#### 3.a Risposta in frequenza

Si invia un' onda sinusoidale e si misura la risposta in frequenza dell' amplificazione e della fase riportandoli nella tabella 3 e in un diagramma di Bode in Fig. 5.

$$V_{in} = (1.03 \pm 0.04) \text{ V}$$

Si ricava una stima delle caratteristiche principali dell'andamento (guadagno a bassa frequenza, frequenza di taglio, e pendenza ad alta frequenza) e si confrontano con quanto atteso. Non si effettua la stima degli errori, trattandosi di misure qualitative. I valori attesi sono stati ottenuti calcolando il guadagno del circuito:

$$A_V = \left| \frac{Z_2}{Z_1} \right| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{(\omega C R_2)^2 + 1}}$$

Si nota subito che il massimo si ha per  $\omega = 0$ ,  $A_V = R_2/R_1$ , la frequenza di taglio si ottiene ponendo  $\omega R_2 C = 1$   $f_H = 1/2\pi R_2 C$ , infine in guadagno ad alta frequenza può essere approssimato con  $A_V = 1/\omega C R_1$ .

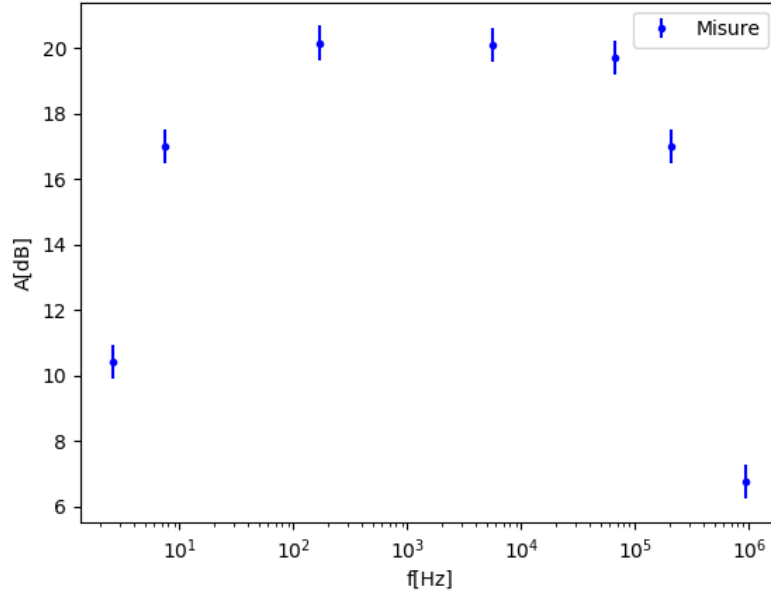


Figura 4: Plot di Bode in ampiezza per l' amplificatore invertente.

Tabella 3: Guadagno e fase dell' integratore invertente in funzione della frequenza.

$f_{in}$ (kHz)	$V_{out}$ (V)	$A$ (dB)	$\Delta t(\mu s)$	$\phi(rad/\pi)$
$10.8 \pm 0.05$	$8.2 \pm 0.4$	$19.9 \pm 0.6$	$(4.52 \pm 0.02) \times 10^{-2}$	$0.976 \pm 0.006$
$(1.08 \pm 0.005) \times 10^2$	$9.5 \pm 0.4$	$19.3 \pm 0.6$	$(4.12 \pm 0.02) \times 10^{-3}$	$0.89 \pm 0.006$
$(1.07 \pm 0.005) \times 10^3$	$3.0 \pm 0.1$	$9.3 \pm 0.5$	$(2.72 \pm 0.02) \times 10^{-4}$	$0.582 \pm 0.005$
$(1.07 \pm 0.005) \times 10^4$	$0.32 \pm 0.01$	$-10.1 \pm 0.5$	$(2.32 \pm 0.01) \times 10^{-5}$	$0.496 \pm 0.003$
$(1.08 \pm 0.005) \times 10^5$	$(4.1 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	$-28.0 \pm 0.6$	$(2.16 \pm 0.01) \times 10^{-6}$	$0.467 \pm 0.003$

$A_M = (19.5) \text{ dB}$	atteso : (19.9) dB
$f_H = (355) \text{ Hz}$	atteso : (330) Hz
$dA_V/df = (-18.6) \text{ dB/decade}$	atteso : (-20) dB/decade

## Risposta ad un' onda quadra

Si invia all' ingresso un' onda quadra di frequenza  $\sim 6.47 \text{ kHz}$  e ampiezza  $\sim 1.09 \text{ V}$ . Si riporta in Fig. 6 le forme d' onda acquisite all' oscillografo per l' ingresso e l' uscita. Il circuito si comporta come un integratore invertente infatti l'uscita presenta un'onda triangolare con minimi e massimi dove  $V_{in}$  passa da alto a basso e basso a alto rispettivamente

Si misura l' ampiezza dell' onda in uscita e si confronta il valore atteso.

risolvendo il circuito si ottiene che

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\omega C R_2 + 1} \approx \frac{1}{R_1 i \omega C} \quad \text{per frequenze alte}$$

sfuttando la linearità del circuito si ottiene che  $V_{out} = \frac{1}{R_1 C} \int V_{in}(t) dt$ , essendo  $V_{in}$  un'onda quadra si può effettuare l'integrale sulla parte positiva dell'onda quadra per ottenere il valore massimo di  $V_{outMax}$ , supponendo che l'onda quadra passa da positivo a negativo a  $t = 0$  si ottiene che

$$V_{outMax} = \frac{1}{R_1 C} \int_0^{T/2} V_{in} dt = \frac{V_{in}}{2 R_1 C f} \approx 0.86 \quad (1)$$

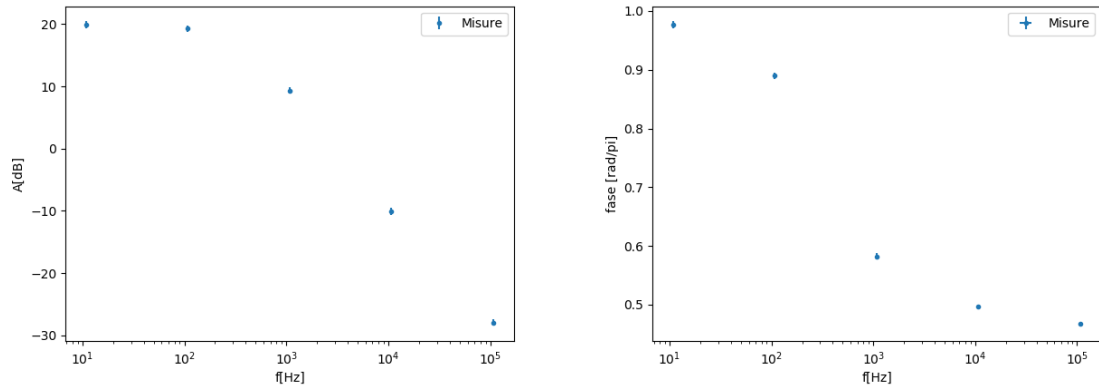


Figura 5: Plot di Bode in ampiezza (a sinistra) e fase (a destra) per il circuito integratore.

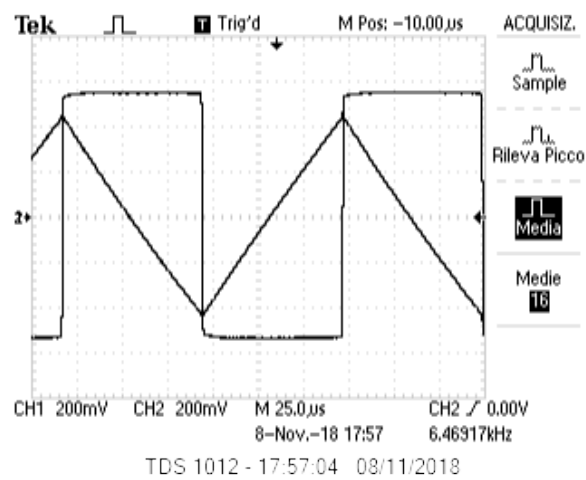


Figura 6: Ingresso (onda quadra) ed uscita (onda triangolare) del circuito integratore per un' onda quadra.

$$V_{out} = (0.86) V$$

$$\text{atteso : } (0.86) V$$

### 3.b Discussione

Come si vede dall'equazione 1 l'ampiezza di  $V_{out}$  è inversamente proporzionale alla frequenza e la fase  $\phi$  del segnale è data da  $\phi = \arctg(\omega CR_2)$ , il circuito rispetta le aspettative, in particolare il guadagno e la frequenza di taglio sono in accordo con le previsioni teoriche.