

# Es04B: Circuiti lineari con Amplificatori Operazionali

Gruppo 23M

Alessandro Costanzo Ciano, Luca Palumbo

21 novembre 2023

## Scopo dell' esperienza

Scopo dell'esperienza di oggi è lo studio di alcuni circuiti esplicativi in cui gli amplificatori operazionali vengono utilizzati sia in modalità lineare, vista anche nella scorsa esperienza, che non lineare. I circuiti che saranno studiati sono l'amplificatore di carica ed un circuito astabile.

## Amplificatore di carica

### Primo impatto

Il circuito TOT in esame (fig. 1) è stato realizzato in due fasi: inizialmente montando solo la parte del rivelatore e del formatore con i seguenti valori dei componenti indicati:

$$\begin{aligned} R_1 &= (100 \pm 1) \text{ k}\Omega \\ C_T = C_F &= (1.00 \pm 0.05) \text{ nF} \end{aligned}$$

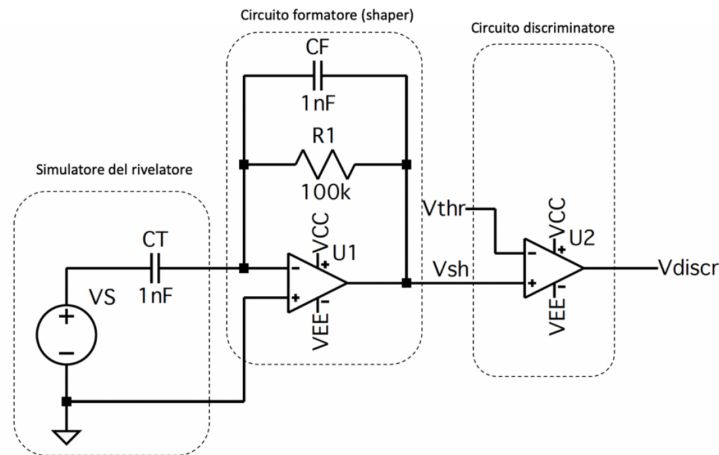


Figura 1: Circuito TOT

In seguito si è inviata in ingresso un'onda quadra di frequenza circa 100 Hz e ampiezza circa 2 Vpp, che simula una iniezione di carica  $Q_{in} = C_T \cdot V_{pp,S}$ ; Si verifica che effettivamente il formatore si comporta da amplificatore invertente, considerando come ingresso l'uscita del rivelatore. Si veda figura 2.

## Discriminatore

Si è montato il circuito discriminatore collegandolo in serie ai due precedenti. Utilizzando il secondo generatore di tensione dell'analog discovery è stato inviato un segnale continuo all'ingresso invertente dell'amplificatore operazionale di 60 mV.

Il segnale  $V_{sh}$  che ci aspettiamo è:

$$V_{sh} = -\frac{C_T}{C_F} V_{pp,S} e^{-\frac{t}{RC_F}}$$

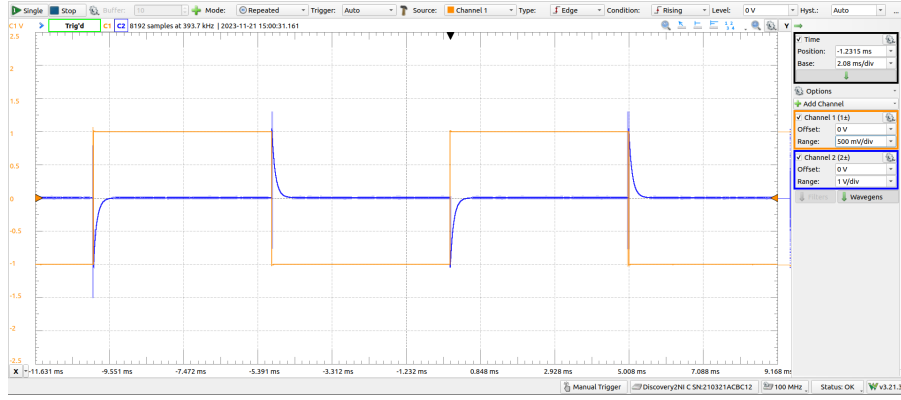


Figura 2: Segnali  $V_s$  (channel 1) e  $V_{sh}$  (channel 2)

$V_{discr}$  invece, a partire dall'impulso positivo in ingresso si mantiene a  $V_{sat}$  finchè  $V_{sh}$  rimane sopra  $V_{thr}$ . Ha quindi la forma di un'onda quadra. Entrambi gli andamenti descritti vengono osservati sperimentalmente (fig. 3).

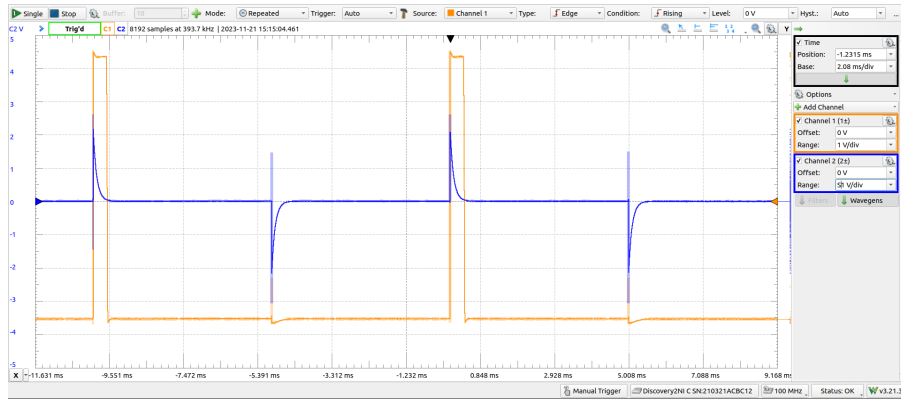


Figura 3: Segnali  $V_{sh}$  (channel 1) e  $V_{discr}$  (channel 2)

## Durata dell'impulso in uscita

Si è misurato la durata dell'impulso d'uscita per un singolo valore di carica iniettata. Per farlo si sono usati i cursori di *waveforms*. Per la posizione del secondo cursore si è prestato cura nel posizionarlo al momento in cui il segnale inizia a decrescere.

L'incertezza associata al posizionamento di ogni cursore è dato da  $1/10$  del fondo scala ( la distanza tra due tacchette mostrate sull'oscilloscopio ) moltiplicato per  $1/\sqrt{12}$  (l'ipotesi di distribuzione costante).

La misura risulta  $T = (374 \pm 2)$  us

Si osserva in figura 4 che il fronte di discesa non è a scalino. Questo succede perchè  $V_{sh}$  decresce lentamente, quindi si osserva un "transiente" in cui l'operazionale è in regime di linearità.

## Ampiezza minima di carica per ottenere un segnale

L'ampiezza minima di carica in ingresso per cui si osserva un segnale all'uscita  $V_{discr}$  è stato determinato abbassando gradualmente la tensione  $V_S$  fino ad ottenere un segnale in uscita che mostri l'operazionale solo in fase lineare.

Risulta essere  $Q_{min} = V_{pp,min}C = (8.6 \pm 0.3) \times 10^{-11}C$ . [ COME SI INTERPRETA QUESTO? ]

### 0.a Dipendenza di $T$ da $Q_{in}$

Si è a questo punto misurato  $T$  a diverse ampiezze di ingresso, quindi a diverse  $Q_{in}$

La dipendenza di  $T$  da  $Q_{in}$  è data da:

$$T = RC_F \ln \left( \frac{Q_{in}}{C_F V_{thr}} \right)$$

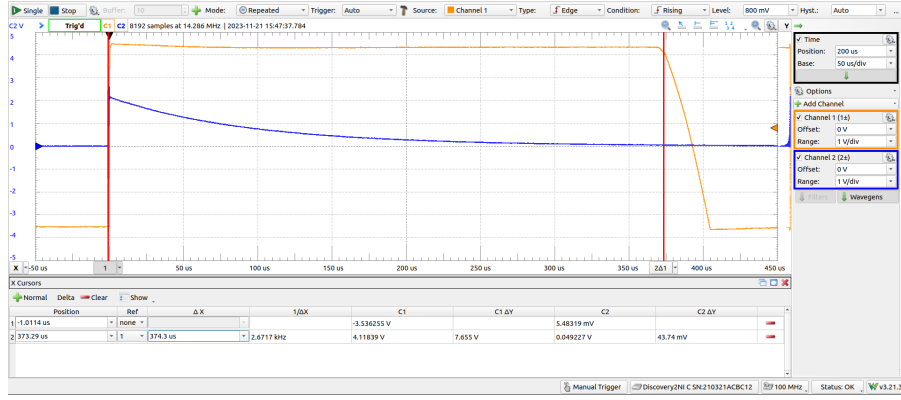


Figura 4: Misurazione della durata dell'impulso

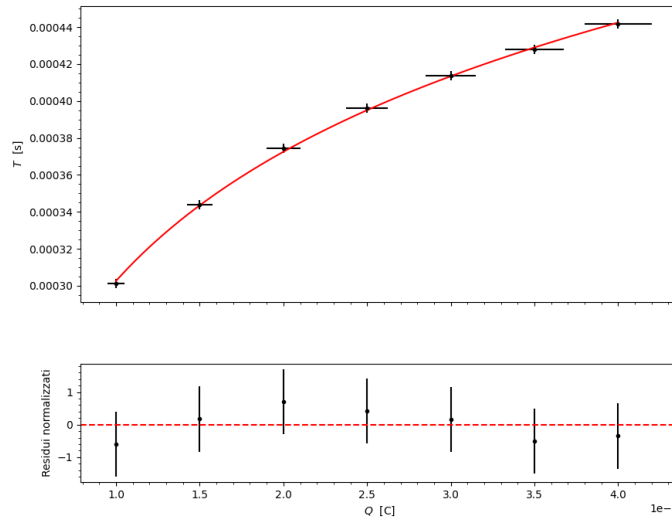


Figura 5: Grafico di fit e residui normalizzati

Si è effettuato un fit a due parametri con la seguente espressione come modello:

$$T = \tau \ln \left( \frac{Q_{in}}{B} \right)$$

Ci aspettiamo che i due parametri risultino  $\tau = (0.100 \pm 0.005) \text{ms}$  e  $B = (6.0 \pm 0.3) \times 10^{-11} \text{C}$ . I risultati del fit sono:

$$\tau = (0.101 \pm 0.001) \text{ms} \quad B = (5.0 \pm 0.2) \times 10^{-11} \text{C}$$

Con  $\chi^2/ndof = 1.5/5$ .

Quindi abbiamo ottenuto  $V_{thr} = B/C_F = (50 \pm 3) \text{mV}$ , non in accordo con quanto atteso.

## 1 Multivibratore astabile

### Descrizione

Il circuito riportato in figura 6 è un multivibratore astabile, composto da un trigger Shmith invertente con in serie un integratore RC che fa da feedback.  $V_-$  supera i valori di soglia in modo ciclico. Il periodo di oscillazione risulterà quindi  $T = T_+ + T_-$  dove:

$$T_+ = \tau \ln \left( \frac{V_{OH} - \beta V_{OL}}{V_{OH}(1 - \beta)} \right)$$

$$T_- = \tau \ln \left( \frac{\beta V_{OH} - V_{OL}}{-V_{OL}(1 - \beta)} \right)$$

con  $\tau = R_3 C_1$  e  $V_{OH}$  e  $V_{OL}$  rispettivamente tensioni rispettivamente massima e minima di  $V_{out}$  in saturazione.

Abbiamo misurato  $V_{OL} = -3.51 \pm 0.03V$  e  $V_{OH} = 4.15 \pm 0.03V$  (l'incertezza associata è dovuta al fatto che  $V_{out}$  ha una leggera pendenza).

I valori che ci attendiamo di  $T_+$  e  $T_-$  sono quindi:

$$T_{+,att} = 0.99 \pm 0.04ms \quad T_{-,att} = 1.14 \pm 0.04ms$$

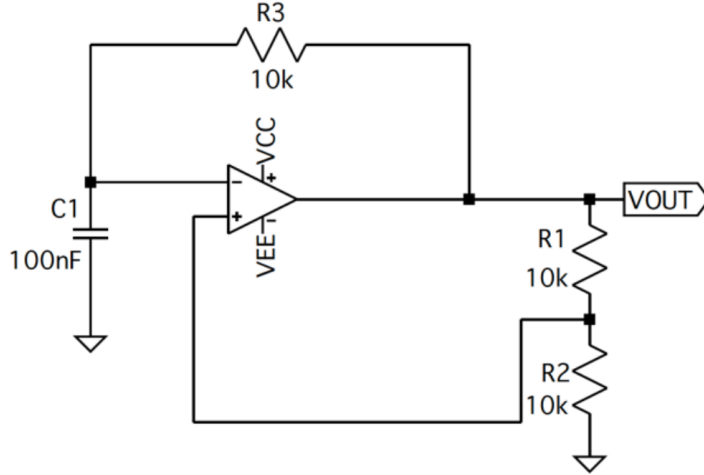


Figura 6: Circuito multivibratore astabile

## Andamenti

Si è montato il circuito con le seguenti componenti:

$$\begin{aligned} R_1 &= (9.9 \pm 0.3) \text{ k}\Omega \\ R_2 &= (10.0 \pm 0.3) \text{ k}\Omega \\ R_3 &= (9.9 \pm 0.3) \text{ k}\Omega \\ C_1 &= (98.0 \pm 0.3) \text{ nF} \end{aligned}$$

Si osserva in figura 7 che  $V_{out}$  risulta un'onda quadra. Anche  $V_+$  risulta un'onda quadra ma con l'ampiezza dimezzata.  $V_-$  segue invece un andamento determinato dalle seguenti equazioni, a seconda della condizione iniziale di  $V_{out}$ :

$$V_-(t) = V_{OL} + (V_{Th} - V_{OL})e^{\frac{-t}{\tau}}$$

con  $V_{OL}$  valore minimo della tensione di uscita  $V_{out}$  e  $V_{Th}$  e

$$V_-(t) = V_{OH} + (V_{OH} + \beta V_{OL})e^{\frac{-t}{\tau}}$$

una volta raggiunte le tensioni  $V_{TL}$  e  $V_{TH}$  di threshold si osserva rispettivamente una inversione di  $V_{out}$ , e dunque  $V_-(t)$  evolve passando ciclicamente da un'equazione all'altra.

I valori massimi e minimi di  $V_+$  e  $V_-$  misurati sono:

$$V_{+,max} = V_{-,max} = (2.096 \pm 0.004)V \quad V_{+,min} = V_{-,min} = (-1.707 \pm 0.003)V$$

## Periodo e duty-cycle

Per valutare il duty cycle (fig. 8) di  $V_+$  si è misurato  $T_+$  e  $T_-$  considerando soltanto la zona di saturazione (l'opamp per un breve periodo si trova in linearità):

$$T_+ = 1.09 \pm 0.03ms \quad T_- = 1.03 \pm 0.03ms$$

$$\text{duty cycle} = \frac{T_+}{T_+ + T_-} = 0.51 \pm 0.01$$

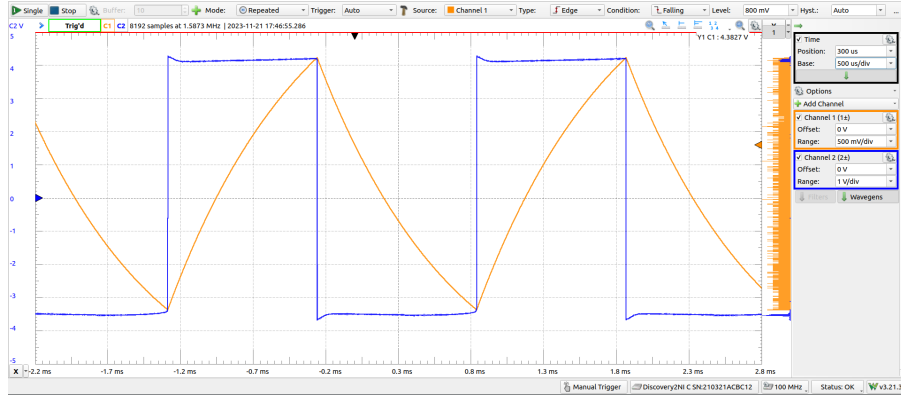


Figura 7: Segnali  $V_-$  (channel 1) e  $V_{out}$  (channel 2)

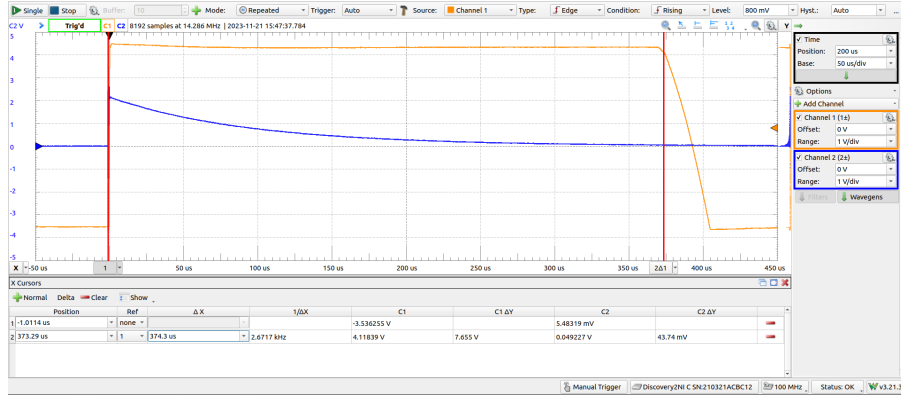


Figura 8: Misura di tempoSegnali  $V_-$  (channel 1) e  $V_{out}$  (channel 2)

## Massima frequenza possibile

Vogliamo stimare la massima frequenza del segnale di un onda quadra che è possibile generare. Ricordando che lo slew rate tipico dell'operazionale usato è  $13V/\mu s$  possiamo pensare di dividerlo per la differenza  $V_{+,max} - V_{-,min}$ . Si otterrebbe così una frequenza dell'ordine del mega hertz. A questa frequenza si dovrebbe avere il fronte di discesa che inizia appena termina il fronte di salita. Questa però è una sovrastima della frequenza massima troppo larga.

Sostituendo le resistenze e condensatori con componenti dal valore nominale più basso, si osserva che il segnale generato non è più propriamente un "onda quadra". Infatti nel fronte di salita si osserva la velocità di risposta. Questo è evidente in 9, dove si è usato  $R = 1k\Omega$  e  $C = 1nF$ . Misurando il periodo in queste condizioni si ottiene  $T' = 28 \pm 2\mu s$ , che implica una frequenza massima per le onde quadre di  $f' = 35 \pm 3kHz$ .

Si osserva inoltre che a basse frequenze il periodo non è più lineare con il parametro  $\tau$ , Infatti diminuendo la quantità  $\tau$  di un fattore 1000, il periodo diminuisce solo di un fattore  $T/T' = 75 \pm 5$ . Il parametro che entra in gioco per spiegare questa non linearità è la capacità parassita del opamp.

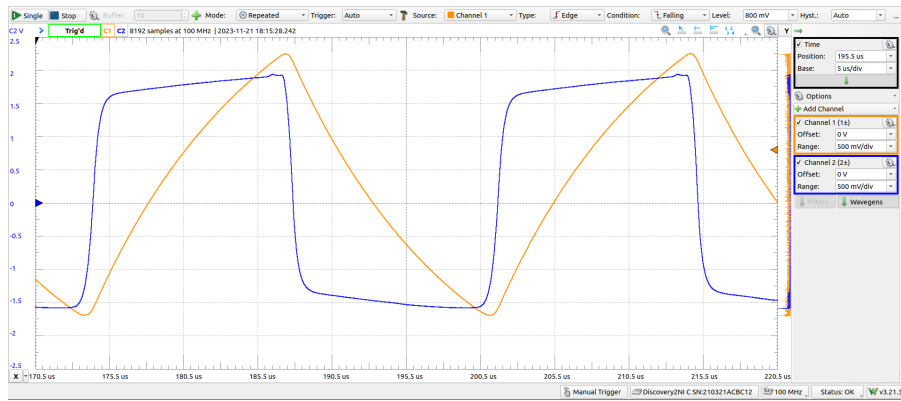


Figura 9: Resistenza  $R = 1k\Omega$  nominale, condensatore  $C = 1nF$  nominale