

# Es05A: Applicazioni non-lineari di amplificatori operazionali

Gruppo 1.AC  
Matteo Rossi, Bernardo Tomelleri

22 novembre 2021

## Misura componenti del circuito

Resistenze [ $\Omega$ ]	$R$	$\sigma R$	Capacità [nF]	$C$	$\sigma C$
$R_1$	100.6	0.8	$C$	50	2
$R_2^a$	7.04	0.06			
$R_2^f$	9.85 k	0.08 k			
$R_S$	998	8			

Tabella 1: Valori di resistenza e capacità misurate per i componenti dei circuiti studiati.

Resistenze [ $\Omega$ ]	$R$	$\sigma R$	Capacità [nF]	$C$	$\sigma C$
$R_1$	993	8	$C$	48	2
$R_2^a$	5.09 k	0.04 k			
$R_2^f$	9.94 k	0.08 k			
$R_3$	993	8			
$R_S$	992	8			

Tabella 2: Valori di resistenza e capacità misurate per i componenti dei circuiti studiati.

Riportiamo per completezza anche i valori delle tensioni di alimentazione continue per l'op-amp misurate con il multimetro

$$V_{CC} = 4.99 \pm 0.03\text{V}$$

$$V_{EE} = -4.99 \pm 0.03\text{V}$$

Non è stato possibile misurare i valori di capacità dei condensatori nel circuito con il multimetro, che ha un rumore di fondo abbastanza alto da saturare sempre il fondo scala da 2 nF, per cui al posto delle loro misure prendiamo i valori nominali e relativa tolleranza.

## 1 Circuito amplificatore di carica

### 1.a Progettazione del circuito

Si è costruito un amplificatore di carica a partire da un op-amp TL081CP come quello in figura ??

In condizione di op-amp ideale gli ingressi  $+$ ,  $-$  sono dei circuiti aperti, per cui la stessa corrente scorre attraverso  $R_1$  ed  $R_2$ :  $V_+ = V_- \approx 0$ . Questo implica che

$$R_{\text{in}} \approx R_1 \tag{1}$$

allora per soddisfare la richiesta  $5 \leq A_v \leq 10$  basta imporre  $5R_1 \leq R_2 \leq 10R_1$ .

Dunque una volta fissata  $R_1 = 1 \pm 1\% \text{ k}\Omega$ , dobbiamo avere  $5 \text{ k}\Omega \leq R_2 \leq 10 \text{ k}\Omega$ , di conseguenza scegliamo  $R_2 = 5.1 \pm 1\% \text{ k}\Omega$ , che corrisponde ad un guadagno di centro banda  $A_{v,\text{atteso}} = 5.1 \pm 2\%$

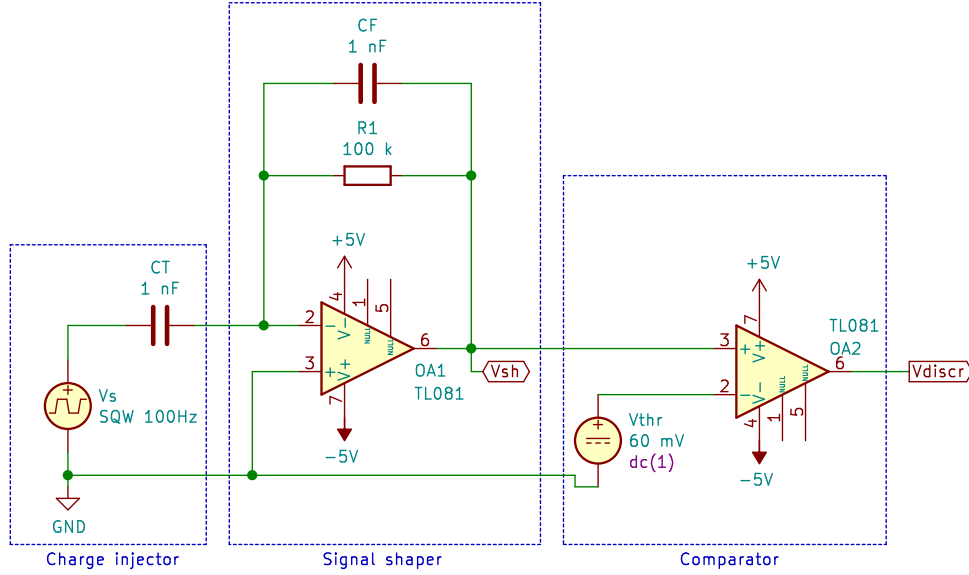


Figura 1: Schema circuitale dell'amplificatore di carica costruito.

### 1.b Amplificazione di piccoli segnali

Si è inviato all'ingresso di entrambi i circuiti un segnale sinusoidale di ampiezza  $v_{in} = 200 \pm 2$  mV ad una frequenza fissata  $5.01 \pm 0.05$  kHz.

Dunque abbiamo misurato l'ampiezza del segnale in uscita dal circuito con  $R_2^a = 5$  k $\Omega$ , che risulta  $v_{out} = 1022 \pm 8$  mV, ottenendo così una stima del guadagno dell'amplificatore  $A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = 5.11 \pm 0.06$ .

Consideriamo il sotto-circuito formato dal condensatore  $C_T$  e dal circuito di formazione. La funzione di trasferimento che lega  $V_{in}$  a  $V_{sh}$  è data di fatto da quella di un amplificatore invertente con impedenze complesse: in trasformata di Laplace

$$\tilde{A}(s) = -\frac{\left(\frac{1}{R_1} + sC_F\right)^{-1}}{\frac{1}{sC_T}} = -\frac{C_T}{C_F} \frac{s}{s + \frac{1}{\tau}}$$

con  $\tau := R_1 C_F$ . In ingresso abbiamo un'onda quadra di periodo  $2T$  (che prendiamo nulla per tempi negativi) che possiamo scrivere come

$$V_{in}(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k f(t - kT) \quad \text{dove} \quad f(t) = V_0 [\theta(t) - \theta(t - T)]$$

In trasformata di Laplace si ha

$$\tilde{f}(s) = V_0 \left[ \frac{1}{s} - \frac{e^{-sT}}{s} \right]$$

da cui

$$\tilde{V}_{in}(s) = \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k \tilde{f}(s) e^{-kTs} = \tilde{f}(s) \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k e^{-kTs}$$

La risposta del circuito in trasformata è

$$\tilde{V}_{sh}(s) = \tilde{A}(s) \tilde{V}_{in}(s) = \tilde{A}(s) \tilde{f}(s) \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k e^{-kTs} = \tilde{g}(s) \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k e^{-kTs} = \mathcal{L} \left[ \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k g(t - kT) \right] (s)$$

Ora

$$\tilde{g}(s) = -V_0 \frac{C_T}{C_F} \left[ \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} - \frac{e^{-sT}}{s + \frac{1}{\tau}} \right]$$

da cui, anti-trasformando

$$g(t) = -V_0 \frac{C_T}{C_F} \left[ e^{-t/\tau} \theta(t) - e^{-(t-T)/\tau} \theta(t - T) \right]$$

Ma allora la risposta del circuito nel dominio del tempo è

$$\begin{aligned} V_{\text{sh}}(t) &= -V_0 \frac{C_T}{C_F} \left\{ \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k e^{-\frac{t-kT}{\tau}} \theta(t-kT) - \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k e^{-\frac{t-(k+1)T}{\tau}} \theta(t-(k+1)T) \right\} \\ &= -V_0 \frac{C_T}{C_F} \left\{ e^{-\frac{t}{\tau}} \theta(t) - 2 \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k e^{-\frac{t-kT}{\tau}} \theta(t-kT) \right\} \end{aligned}$$

ovvero, ignorando il transiente iniziale e supponendo  $\tau \ll T^1$ ,

$$\begin{aligned} V_{\text{sh}}(t) &\approx 2V_0 \frac{C_T}{C_F} \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k e^{-\frac{t-kT}{\tau}} \theta(t-kT) \\ &\approx 2V_0 \frac{C_T}{C_F} \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k e^{-\frac{t-kT}{\tau}} \chi_{[kT, (k+1)T]}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Per il circuito in esame i valori nominali sono  $C_T = C_F = 1 \text{ nF}$ ,  $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ , da cui  $\tau = 100 \text{ }\mu\text{s}$ , e  $2T = 10 \text{ ms}$ . Dopo un transiente  $t \ll \tau$  in uscita ci aspettiamo quindi di osservare dei picchi esponenzialmente decrescenti di segno alterno e di ampiezza pari al doppio del segnale in ingresso.

**Discriminatore** Ignorando ora il condensatore  $C_1$  che ha il solo scopo di rimuovere il rumore ad alte frequenze dal generatore, il sotto-circuito **X2** è un discriminatore con tensione di soglia  $V_t$  data dal partitore di tensione collegato al terminale “-” dell’OpAmp

$$V_t = (1 - 2\alpha)V_G$$

dove  $0 \leq \alpha \leq 1$  è la “frazione” di resistenza data dal potenziometro e  $V_G = 20 \text{ V}$  (valore nominale) è la tensione di alimentazione. In altri termini la tensione di soglia è variabile da  $-20 \text{ V}$  a  $20 \text{ V}$ . Supponendo di essere sempre in regime di saturazione, l’uscita del circuito è data da

$$V_{\text{out}} = V_G \operatorname{sgn}(V_{\text{sh}} - V_t).$$

Più esplicitamente, usando  $V_{\text{in}} = 6 \text{ V}$  ci aspettiamo  $V_{\text{sh}} = 10 \text{ V}$  (ampiezze picco-picco), pertanto:

- se  $V_t > 6 \text{ V}$ ,  $V_{\text{out}} = -V_G$  costante.
- se  $0 \text{ V} < V_t < 6 \text{ V}$ , ci aspettiamo (in un periodo)

$$V_{\text{out}}(t) = \begin{cases} V_G & 0 < t < h \\ -V_G & h < t < 2T \end{cases}$$

dove  $h$  è il tempo in cui il picco esponenzialmente decrescente è maggiore della tensione di soglia, ovvero

$$h = \tau \log \left( \frac{C_F}{C_T} \frac{V_{\text{in}}}{V_t} \right). \quad (3)$$

- se  $-6 \text{ V} < V_t < 0 \text{ V}$ , ci aspettiamo (in un periodo)

$$V_{\text{out}}(t) = \begin{cases} V_G & 0 < t < T \\ -V_G & T < t < T + h' \\ V_G & T + h' < t < 2T \end{cases}$$

dove  $h'$  è il tempo in cui il picco esponenzialmente crescente è minore della tensione di soglia, ovvero

$$h' = \tau \log \left( \frac{C_F}{C_T} \frac{V_{\text{in}}}{|V_t|} \right).$$

- se  $V_t < -6 \text{ V}$ ,  $V_{\text{out}} = -V_G$  costante.

$v_{\text{in}}(\text{mV})$ (nom.)	$v_{\text{in}} \pm \sigma(v_{\text{in}})$ [mV]	$v_{\text{out}} \pm \sigma(v_{\text{out}})$ [V]	$A_v \pm \sigma(A_v)$
40	$40.1 \pm 0.2$	$283 \pm 1.7$ m	$7.06 \pm 0.06$
60	$59.8 \pm 0.3$	$410 \pm 2$ m	$6.86 \pm 0.06$
80	$79.9 \pm 1.1$	$564 \pm 3$ m	$7.06 \pm 0.06$
100	$100.1 \pm 1.2$	$705 \pm 4$ m	$7.04 \pm 0.06$
200	$200 \pm 2$	$1412 \pm 8$ m	$7.06 \pm 0.06$
400	$401 \pm 3$	$2882 \pm 17$ m	$7.04 \pm 0.06$
600	$601 \pm 5$	$4.24 \pm 0.02$	$7.05 \pm 0.06$
800	$801 \pm 6$	$5.78 \pm 0.03$	$7.21 \pm 0.06$
900	$900 \pm 6$	$6.32 \pm 0.04$	$7.00 \pm 0.06$
1000	$1000 \pm 7$	$7.04 \pm 0.04$	$7.02 \pm 0.06$

Tabella 3: Misure di guadagno al variare della tensione in ingresso all'amplificatore con  $R_2^a = 7 \text{ k}\Omega$ . Le ampiezze per questo circuito sono riportate per comodità in ampiezza picco-picco. A partire da valori di ampiezza (picco-picco) di 1 V del segnale in ingresso la parte inferiore dell'onda in uscita viene "tosata".

### 1.d Misure di guadagno al variare di $v_{\text{in}}$

Misurando con l'oscilloscopio l'ampiezza dei segnali in ingresso  $v_{\text{in}}$  e in uscita  $v_{\text{out}}$  dall'amplificatore possiamo ricavare una misura del guadagno del circuito dal rapporto  $A_v = \frac{v_{\text{out}}}{v_{\text{in}}}$ .

Con un fit lineare possiamo stimare il guadagno dell'amplificatore a partire dal grafico di  $v_{\text{out}} = A_v v_{\text{in}}$  al variare di  $v_{\text{in}}$ . Riportiamo quanto trovato per il primo circuito: Da cui troviamo i seguenti parametri per la

Figura 2: Fit lineare per l'andamento dell'uscita rispetto al segnale in ingresso.

retta di best-fit

$$\begin{aligned} \text{intercetta} &= -0.6 \pm 0.4 \text{ mV} & \text{pendenza} &= 5.124 \pm 0.003 & \text{correlazione} &= -0.72 & \chi^2 &= 0.2 & d.o.f. &= 10 \\ \text{coefficiente angolare/senza intercetta} &= 5.120 \pm 0.002 & \chi^2 &= 0.2 & d.o.f. &= 11 \end{aligned}$$

Il valore atteso per il guadagno dal valore dei componenti in questa configurazione del circuito è pari a

$$A_{v,\text{exp}} = -\frac{R_2}{R_1} = -5.13 \pm 0.12$$

Questo è in ottimo accordo con quanto trovato sperimentalmente dalla nostra analisi.

Per completezza riportiamo in un grafico anche le misure che non abbiamo considerato nel fit perché oltre la regione in cui l'op-amp ha comportamento lineare

Figura 3: Andamento reale dell'uscita al variare dell'ampiezza del segnale in ingresso oltre il regime lineare dell'amplificatore misurati per il circuito con  $R_2^a = 5.1 \text{ k}\Omega$

### 1.e Durata impulso per carica di test

Abbiamo misurato per  $V_s = 999 \pm 8 \text{ mV}$  di ampiezza dell'onda quadra in ingresso, frequenza  $f = 100.0 \pm 1.6 \text{ kHz}$ , dunque come carica  $Q_{\text{in}} = C_T \cdot V_s = 0.99 \pm 0.04 \text{ nC}$ .

L'impulso in uscita ha durata pari a  $415 \pm 5 \text{ }\mu\text{s}$ .

### 1.f Andamento di TOT al variare di $Q_{\text{in}}$

Per 40 mV l'impulso si deforma in una parabola Sotto i 20 mV non c'è segnale apprezzabile in uscita.

## 2 Trigger di Schmitt

<sup>1</sup>La buona definizione della somma è assicurata dal fatto che (tralasciando le costanti fisiche)

$$\sum_{k \geq 0} \theta(t-k) e^{-(t-k)} = \sum_{k=0}^{\lfloor t \rfloor} e^{-(t-k)} \leq \frac{e}{e-1} e^{-\{t\}}.$$

$v_{in}(\text{mV})$ (nom.)	$v_{in} \pm \sigma(v_{in})$ [mV]	$v_{out} \pm \sigma(v_{out})$ [V]	$A_v \pm \sigma(A_v)$
50	$50.0 \pm 0.4$	$256 \pm 2$ m	$5.12 \pm 0.06$
100	$100.0 \pm 0.8$	$511 \pm 4$ m	$5.11 \pm 0.06$
150	$150.0 \pm 1.2$	$767 \pm 6$	$5.11 \pm 0.06$
200	$200 \pm 1.6$	$1022 \pm 8$	$5.11 \pm 0.06$
250	$250 \pm 2$	$1278 \pm 11$	$5.11 \pm 0.06$
300	$300 \pm 2$	$1534 \pm 12$	$5.11 \pm 0.05$
350	$349 \pm 3$	$1790 \pm 14$	$5.13 \pm 0.06$
400	$399 \pm 3$	$2046 \pm 16$	$5.13 \pm 0.06$
450	$449 \pm 4$	$2302 \pm 18$	$5.13 \pm 0.06$
500	$499 \pm 4$	$2.56 \pm 0.02$	$5.13 \pm 0.06$
550	$549 \pm 4$	$2.82 \pm 0.02$	$5.13 \pm 0.06$
600	$599 \pm 5$	$3.07 \pm 0.02$	$5.13 \pm 0.06$
700	$699 \pm 6$	$3.55 \pm 0.03$	$5.07 \pm 0.06$
800	$799 \pm 6$	$3.82 \pm 0.03$	$4.78 \pm 0.05$
900	$899 \pm 7$	$3.86 \pm 0.03$	$4.28 \pm 0.05$
1 V	$999 \pm 8$	$3.86 \pm 0.03$	$3.86 \pm 0.04$
1.2 V	$1199 \pm 9$	$3.86 \pm 0.03$	$3.22 \pm 0.04$
1.4 V	$1399 \pm 11$	$3.88 \pm 0.03$	$2.78 \pm 0.03$
1.6 V	$1599 \pm 12$	$3.89 \pm 0.03$	$2.43 \pm 0.03$
1.8 V	$1799 \pm 14$	$3.90 \pm 0.03$	$2.17 \pm 0.02$
2 V	$1999 \pm 15$	$3.92 \pm 0.03$	$1.96 \pm 0.02$

Tabella 4: Misure di guadagno al variare della tensione in ingresso all'amplificatore con  $R_2^a = 5.1 \text{ k}\Omega$ . Oltre i 600 mV di ampiezza del segnale in ingresso la forma d'onda in uscita inizia a manifestare difetti dovuti al clipping dell'op-amp al di fuori del regime lineare.

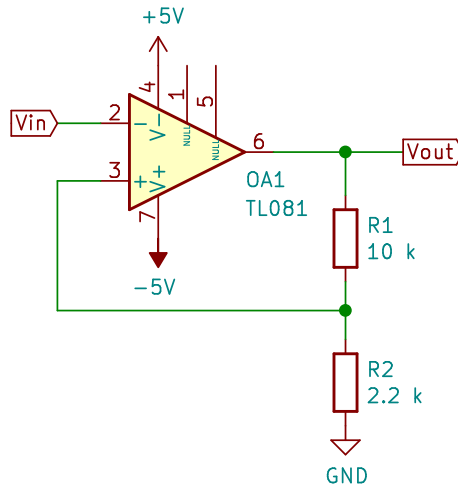


Figura 4: Schema circuitale del trigger di Schmitt costruito.

## 2.a Risposta ad un'onda sinusoidale

Con l'aiuto dei cursori abbiamo misurato come guadagno a centro banda per il circuito amplificatore con resistenza  $R_2^a = 5.1 \text{ k}\Omega$   $A_M = 14.18 \pm 0.09 \text{ dB} = 5.12 \pm 0.05$  dunque abbiamo ricavato una stima della frequenza di taglio dell'amplificatore invertente dal punto in cui il guadagno diminuisce di  $-3.01 \text{ dB}$  rispetto ad  $A_M$ :  $f_A = 388.0 \pm 1.1 \text{ kHz}$

Figura 5: Plot di Bode ottenuto dallo scan con Network tra  $100 \text{ Hz}$  e  $5 \text{ MHz}$  con un segnale sinusoidale in ingresso all'amplificatore invertente di ampiezza costante  $v_{\text{in}} = 200 \text{ mV}$ .

Per caratterizzare le frequenze di taglio misurate possiamo ricavare un valore atteso con cui confrontarle a partire dal valore del prodotto banda guadagno (GBW) riportato nel datasheet dell'op-amp:  $4 \text{ MHz}^2$ .

## 2.b Saturazione dell'OpAmp

Abbiamo inviato in ingresso all'amplificatore un'onda quadra di ampiezza  $1999 \pm 15 \text{ mV}$  e frequenza  $1000 \pm 16 \text{ Hz}$ , al fronte di discesa dell'onda abbiamo trovato una rampa come segnale in uscita. Questo permette di misurare lo slew rate dell'amplificatore direttamente dalla pendenza della rampa.

Misurando con l'oscilloscopio di quanto sale la tensione in uscita dall'amplificatore  $\Delta V$  in un certo intervallo di tempo  $\Delta t$  (presi su una porzione lineare della rampa) otteniamo una stima dello slew rate dal loro rapporto; che rispettivamente per i circuiti con  $R_2^a = 5.1$  e  $7$  risulta

$$\begin{aligned} \text{SR} &= \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{6.19 \pm 0.04 \text{ V}}{542 \pm 10 \text{ ns}} = 11.4 \pm 0.2 \text{ V}/\mu\text{s} \\ \text{SR} &= \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{4.10 \pm 0.04 \text{ V}}{354 \pm 10 \text{ ns}} = 11.6 \pm 0.3 \text{ V}/\mu\text{s} \end{aligned}$$

Figura 6: La traccia della rampa in uscita dall'amplificatore visualizzata all'oscilloscopio da cui abbiamo ottenuto la misura diretta dello slew rate.

## 2.c Tensioni di soglia e funzionamento del trigger

## 2.d Limiti fisici del circuito

# 3 Multivibratore astabile

## 3.a Funzionamento del circuito

Sempre usando i cursori abbiamo misurato come guadagno a centro banda per i circuiti derivatori

$$\begin{aligned} A_M &= 20.02 \pm 0.09 \text{ dB} \\ A_M &= 20.01 \pm 0.09 \text{ dB} \end{aligned}$$

Dunque abbiamo ricavato una stima delle frequenze di taglio del circuito dai due punti in cui il guadagno diminuisce di  $-3.01 \text{ dB}$  rispetto a centro banda:  $f_c = 3408 \pm 11 \text{ Hz}$  e  $f_A = 209 \pm 2 \text{ kHz}$ .

Assumendo che il prodotto banda-guadagno rimanga costante possiamo

## 3.b Studio dei segnali in ingresso e uscita

Si è inviato all'ingresso del filtro passa-alto un segnale triangolare di ampiezza  $v_{\text{in}} = 200 \pm 2 \text{ mV}$  e frequenza  $f = 100.0 \pm 1.6 \text{ Hz}$ .

Per frequenze  $f \ll f_c$  il filtro è in regime di taglio, per cui si comporta come un derivatore, dunque la forma d'onda in uscita è un'onda quadra di ampiezza sempre minore al diminuire della frequenza.

Per frequenze  $f_c \ll f \ll f_A$  come ci si aspetta, la forma d'onda in uscita rimane visivamente inalterata rispetto all'onda triangolare in ingresso, che risulta però amplificata di un fattore  $A_M \sim 10$ .

Nel regime intermedio  $f \sim f_c$  all'uscita del filtro RC osserviamo un'onda "a pinna di squalo" caratteristica della carica e della scarica del condensatore con cui abbiamo costruito il nostro filtro passa-alto.

---

<sup>2</sup>Assumendo che il prodotto banda-guadagno sia costante, come frequenza di taglio attesa in funzione del guadagno dell'amplificatore abbiamo  $f_{A,\text{exp}} = \text{GBW}/A_v$

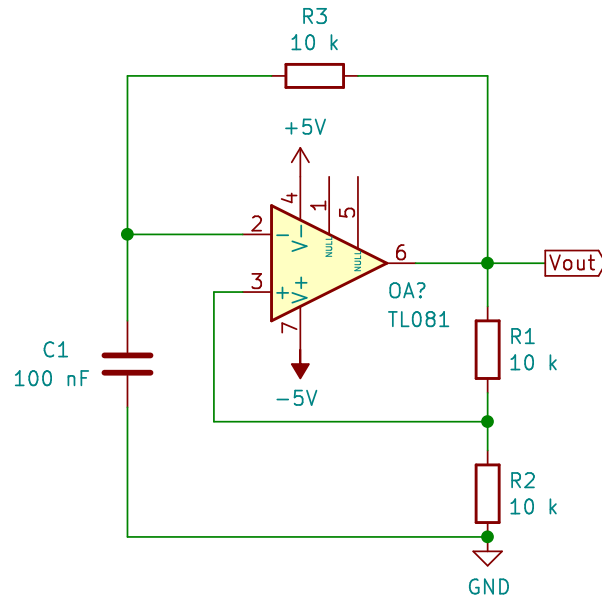


Figura 7: Schema circuitale del multivibratore astabile costruito.

Figura 8: Plot di Bode ottenuto dallo scan con Network tra 100 Hz e 5 MHz con un segnale sinusoidale in ingresso al derivatore RC attivo di ampiezza costante  $v_{in} = 200$  mV.

Figura 9: Risposta del circuito ad un segnale triangolare di ampiezza 200 mV e  $f = 100$  Hz in ingresso.

Figura 10: Onda a pinna di squalo in risposta ad un triangolo di ampiezza  $200 \pm 2$  mV e  $f = 1000 \pm 16$  Hz in ingresso al circuito derivatore.

Per frequenze  $f \gg f_A$  il filtro torna in regime di taglio, ma ora si comporta grosso modo come un integratore, infatti la forma d'onda in uscita è costituita da una serie di parabole con concavità rivolte verso l'alto e verso il basso con ampiezza sempre minore all'aumentare della frequenza.

Figura 11: Parabole con concavità alternanti in risposta ad un triangolo di ampiezza  $200 \pm 2$  mV e  $f = 1.00 \pm 0.02$  MHz in ingresso al circuito derivatore.

Inserendo tra l'uscita e la massa una resistenza di carico  $R_L$  dello stesso ordine di  $R_{out}$  e misurando la tensione di uscita con o senza resistenza è possibile dare una stima della resistenza in uscita dell'amplificatore. Detta  $V_1$  la tensione misurata senza  $R_L$  e  $V_2$  la tensione misurata con  $R_L$ , vale la formula:

$$\frac{R_{out}}{R_L} = \frac{V_1}{V_2} - 1 \quad (4)$$

Per cui, una volta misurate  $V_1 = 1725 \pm 8$  mV,  $V_2 = 866 \pm 4$  mV e  $R_L = 5.08 \pm 0.05$  k $\Omega$  abbiamo ottenuto come impedenza d'uscita:

$$R_{out} = R_L \left( \frac{V_1}{V_2} - 1 \right)$$

Risulta  $R_{out} = 5.0 \pm 0.1$  k $\Omega$  che è compatibile con la stima iniziale dell'impedenza.

### 3.c Misure di periodo e duty cycle

### 3.d Limite massimo in frequenza del generatore

## 4 Multivibratore monostabile

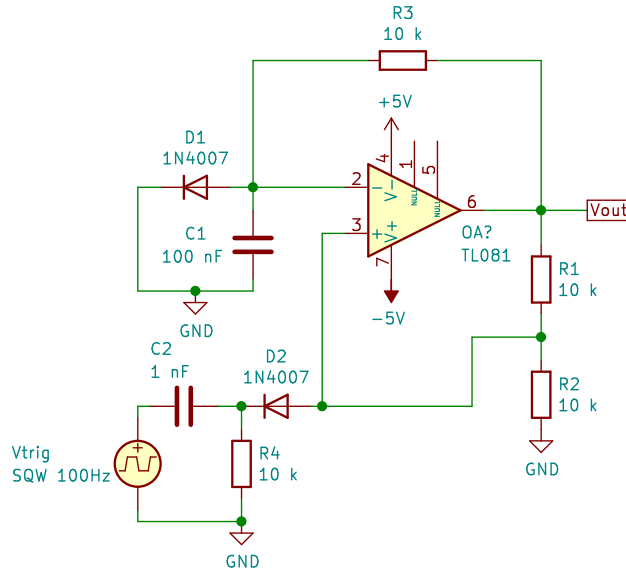


Figura 12: Schema circuitale del multivibratore monostabile costruito.

### 4.a Studio dei segnali in ingresso e uscita

Di nuovo utilizzando i cursori abbiamo misurato come guadagno a centro banda per il circuito integratore attivo  $A_M = 19.92 \pm 0.09$  dB.

Dunque abbiamo ricavato una stima della frequenza di taglio dell'amplificatore invertente dal punto in cui il guadagno diminuisce di  $-3.01$  dB rispetto ad  $A_M$ :  $f_c = 342.5 \pm 0.5$  Hz

Figura 13: Plot di Bode ottenuto dallo scan con Network tra 10 Hz e 5 MHz con un segnale sinusoidale in ingresso all'integratore RC attivo di ampiezza costante  $v_{in} = 200$  mV.



## 4.b Durata dell'impulso generato

Si è inviato all'ingresso del filtro passa-basso un'onda quadra di ampiezza  $v_{in} = 200 \text{ mV}$  e frequenza  $10.02 \pm 0.12 \text{ kHz}$ .

$$\begin{aligned}v_{in} &= 200 \pm 2 \text{ mV} \\v_{out} &= 107.3 \pm 1.3 \text{ mV} \\A_v &= \frac{v_{out}}{v_{in}} = 0.537 \pm 0.008\end{aligned}$$

Figura 14: Risposta del circuito ad un'onda quadra di ampiezza 200 mV e  $f = 10 \text{ kHz}$  in ingresso.

Partendo da una misura con i cursori del guadagno a centro banda,  $A_V = 19.65 \pm 0.05 \text{ dB} = 9.65 \pm 0.08$ , possiamo ottenere una stima del valore delle frequenze di taglio a bassa  $f_L$  e ad alta frequenza  $f_H$  dai punti in cui il guadagno diminuisce di un fattore  $1/\sqrt{2}$ , cioè di circa  $-3.01 \text{ dB}$  rispetto ad  $A_V$ .

$$\begin{aligned}f_L &= 80.77 \pm 0.12 \text{ Hz} \\f_H &= 646.1 \pm 0.5 \text{ kHz}\end{aligned}$$

Trascurando le capacità delle giunzioni nel transistor ci aspettiamo che la frequenza di taglio "bassa" corrisponda a quella di un filtro passa alto costituito dalla serie  $C_{in} + R_B$

$$f_{L,exp} = \frac{1}{2\pi R_B C_{in}} = 83 \pm 4 \text{ Hz} \quad (5)$$

che è in accordo con il valore misurato.

Mentre per la frequenza di taglio "alta" la resistenza in uscita è data da  $R_C$ , per cui la capacità in serie dev'essere dell'ordine delle centinaia di pF per avere ordine di grandezza compatibile con il valore misurato. Ma nel datasheet risulta al massimo  $C_{ibo} \approx 30 \text{ pF}$ , per cui è difficile stabilire un valore di riferimento per la frequenza  $f_H$  attesa.

Per frequenze  $f \ll f_c$  come è ragionevole aspettarsi, la forma d'onda in uscita non è apprezzabilmente cambiata rispetto all'onda quadra in ingresso, ma risulta soltanto amplificata in ampiezza di un fattore  $A_M \sim 10$ .

Per frequenze  $f \gg f_c$  il filtro è in regime di taglio, per cui si comporta come un integratore, dunque la forma d'onda in uscita è un'onda triangolare di ampiezza sempre minore al crescere della frequenza.

Nel regime intermedio  $f \sim f_c$  all'uscita del filtro RC osserviamo un'onda "a pinna di squalo" che corrispondono alle curve di carica e scarica del condensatore al passaggio da basso ad alto e viceversa dell'onda quadra in ingresso.

Figura 15: Onda a pinna di squalo in risposta ad un'onda quadra di ampiezza 200 mV e  $f = 500 \pm 6 \text{ Hz}$  in ingresso al circuito integratore.

## 4.c Analisi del funzionamento del circuito

### Conclusioni e commenti finali

Si è riusciti a costruire e studiare alcuni dei circuiti più comuni che si possono realizzare con un amplificatore operazionale, tra cui: due filtri attivi, passa-basso e passa-alto, un amplificatore di tensione invertente (e uno non). In particolare siamo riusciti ad apprezzare il differente comportamento dei circuiti (anche in regime non lineare) dare una stima di guadagno, impedenza di ingresso e frequenze caratteristiche della loro risposta in frequenza.

### Dichiarazione

I firmatari di questa relazione dichiarano che il contenuto della relazione è originale, con misure effettuate dai membri del gruppo, e che tutti i firmatari hanno contribuito alla elaborazione della relazione stessa.