

REALIZZAZIONE DI UNA VERSIONE SEMPLIFICATA DI CATENA ELETTRONICA PER UN RIVELATORE DI RADIAZIONE

In questa esperienza verrà realizzata una semplice catena elettronica composta da un circuito preamplificatore di carica, uno shaper compensato e uno stadio finale di amplificazione lineare. Si tratta di uno schema tipico nell'amplificazione analogica di piccoli segnali provenienti da sensori di radiazione o altri dispositivi analoghi.

Lo scopo di questa esperienza è capire il funzionamento di questi blocchi sia individualmente che una volta messi insieme, con particolare riguardo agli aspetti di frequenza, essendo in particolare i primi due stadi dei classici filtri analogici.

NOTA: i circuiti realizzati con componenti reali possono generare dei livelli di continua sotto i segnali che andremo ad analizzare:

(1) usare sempre l'oscilloscopio in DC;

(2) considerare lo "zero" dei segnali come il livello di continua che si vede subito prima degli stessi (baseline) posizionando lì un primo cursore e usando il secondo per la misura. Ad esempio: un segnale che ha il max a 1.2V ma presenta una baseline di 0.2V avrà un'ampiezza effettiva di $(1.2-0.2) = 1.0$ V.

TERZA GIORNATA – PREAMPLIFICATORE E FORMATORE SEMPLICE

1) GENERATORE DEI SEGNALE E PREAMPLIFICATORE DI CARICA (90' – 120')

1.1) Generatore di impulsi di corrente

- Utilizzeremo il generatore di funzioni per simulare i segnali del rivelatore, generando un impulso negativo quadrato di tensione con in serie una resistenza adeguata, che equivale a un *impulso negativo di corrente* con resistenza in parallelo. L'impulso di corrente, come vedremo più avanti, è il tipico segnale prodotto dalla radiazione nel volume attivo del sensore.
- Impostare sul CH1 del generatore la forma "PULSE". Frequenza **200 Hz**, livello di tensione di riferimento (*high*) a **0** e ampiezza negativa (*low*) a **-1.0 V**, durata dell'impulso **T=5 µs** (si ottiene impostando il *duty cycle* al 99.9% oppure 4995 µs, perché è negativo...).
- Verificare con l'oscilloscopio che la forma e la durata dell'impulso siano corrette.

NOTE:

- la durata dell'impulso T è realizzata digitalmente dal generatore di funzioni sfruttando il clock interno ad alta frequenza, ed è pertanto molto precisa (incertezza trascurabile per quello che ci riguarda). La verifica con l'oscilloscopio serve solo per essere sicuri di aver impostato correttamente il generatore. Come misura della durata dell'impulso potete quindi registrare direttamente il valore impostato sul generatore di funzioni senza incertezza (es. $T = 5$ µs).

- Anche l'ampiezza dell'impulso è realizzata digitalmente, ma in questo caso il suo valore all'ingresso del circuito dipende dall'accoppiamento generatore-cavo-circuito, per cui può essere diverso dal valore impostato. Come misura dell'ampiezza dell'impulso fate quindi sempre affidamento sulla misura diretta dell'oscilloscopio nel punto di ingresso (in questo caso, ovviamente, con relativa incertezza).

- Recuperare i componenti come indicato nella combinazione assegnata dal docente al proprio gruppo. Misurarli con i multimetri, facendo attenzione a non confonderli dopo.

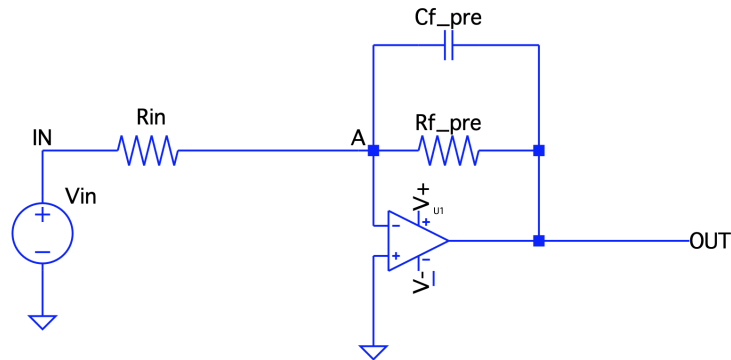


fig. 1: schema generatore e preamplificatore

1.2) Preamplificatore di carica

- Assemblare il circuito di figura 1 con il primo operazionale in dotazione, la capacità C_{f_pre} e la resistenza R_{f_pre} .
- Inserire il segnale del generatore (impulso quadrato) in IN, misurare l'altezza del segnale V_{in} con l'oscilloscopio e calcolare quindi la quantità di carica prevista Q_{in} che arriva sul preamp in $5\ \mu s$.
- Calcolare il tempo caratteristico τ_{pre} atteso e il valore atteso massimo V_{pre}^{MAX} di tensione in uscita dal preamp.

→ logbook: valori misurati dei componenti con relative scale di lettura; valore misurato di V_{in} ; valori previsti di Q_{in} e V_{max}^{PRE} e τ_{pre}

- Visualizzare sull'oscilloscopio il segnale di uscita OUT verificando l'effetto di integrazione della carica e il successivo smorzamento esponenziale.
- Misurare l'altezza del massimo V_{pre}^{MAX} (rispetto alla baseline!)
- Misurare il tempo caratteristico di scarica τ_{pre} con una singola misura
- Confrontare il valore massimo atteso e il tau con quelli misurati. Se uno di questi si discosta oltre il 10%¹ dalle attese consultare il docente.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti; misura del τ_{pre}

1.3) Verifica della linearità del preamplificatore

- Variare la quantità di carica iniettata modificando la durata dell'impulso di ingresso e misurare l'altezza massima del segnale del preamplificatore. Si può modificare T variando sia il *Duty cycle*, che la larghezza direttamente (*Width*), che la frequenza di ripetizione degli impulsi, facendo attenzione che quest'ultima non superi i 500 Hz.
- Eseguire 8-9 misure tra $2 \leq T \leq 10\ \mu s$ e costruire il grafico V_{pre}^{MAX} vs. Q_{in} per verificare la linearità della risposta del circuito.

Cosa rappresenta la pendenza del fit lineare?

NOTA: è opportuno che il periodo di ripetizione degli impulsi sia molto più grande del tempo caratteristico del preamp, in modo da permettere alla carica immagazzinata nel condensatore di feedback di scaricarsi completamente. In laboratorio usiamo componenti tali per cui il τ_{pre} è dell'ordine di $200\ \mu s$, quindi servirà una distanza temporale tra gli impulsi di almeno $2\ ms$ (ovvero frequenza $\leq 500\ Hz$).

¹ Questo valore di scostamento del 10% (come altrove nel seguito) non ha nulla a che vedere né con la tolleranza dei componenti e né con la precisione finale delle misure. E' un valore indicativo: in condizioni normali lo scostamento dovrebbe essere ben inferiore e pertanto lo sfioramento di questo valore è indice di probabile malfunzionamento del circuito.

Il nostro generatore di funzioni permette però al massimo di settare il duty cycle al 99.9%, quindi il T minimo ottenibile con 500 Hz sarà di $2 \mu s$. Variando poi il duty cycle a step di 0.1% avremo variazioni di $2 \mu s$.

E' possibile ottenere valori diversi più vicini impostando direttamente il controllo della Width e modificando quella. Il valore minimo sarà comunque quello associato al 99.9% di DC (ovvero $2 \mu s$ con 500 Hz)

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; grafico V_{pre}^{MAX} vs. Q_{in} con fit lineare semplice

1.4) Risposta in frequenza

- Calcolare la frequenza di taglio attesa per il circuito integratore f_t^{PRE}
- Misurare la risposta in frequenza con una dozzina di punti tra 10 Hz e 1 MHz, di cui in particolare 3-4 punti attorno alla frequenza di taglio calcolata in precedenza.
- Costruire il grafico di Bode e verificare il tipico andamento da circuito integratore. In fase di analisi dati estrarre la miglior stima della frequenza di taglio da confrontare con le previsioni teoriche.

Fate anche in laboratorio una misura diretta rapida della f_t^{PRE} dai dati raccolti e verificate che sia ragionevolmente simile alle aspettative, se sfora oltre il 10% contattare i docenti.

→ logbook: valore calcolato di f_t^{PRE} ; valori misurati e relative scale di lettura; grafico di bode; valore misura diretta di f_t .

2) CIRCUITO FORMATORE (90' – 120')

WARNING: non smontare l'integratore! costruire lo shaper in un'altra zona libera della basetta. L'integratore servirà successivamente quando assemblerete la catena completa.

2.1) Shaper base CR-RC

- Assemblare il circuito formatore di base di figura 2 utilizzando le due capacità uguali $C_{sh1/2}$ e le due resistenze uguali $R_{sh1/2}$. Disaccoppiare i due stadi CR – RC utilizzando un secondo amplificatore operazionale come buffer.
- Calcolare il tempo caratteristico approssimato τ_{sh} assumendo gli RC uguali.
- Inserire sull'ingresso B un'onda quadra di frequenza sufficientemente bassa (~ 100 Hz) e di ampiezza $V_{pre}^{ideal} = +1.0$ V (tra 0V e 1V) che simula il comportamento di un preamplificatore ideale che mantiene il segnale alto per un tempo indefinito.
- visualizzare sull'oscilloscopio il segnale di uscita OUT e misurare le grandezze caratteristiche: valore del massimo (V_{sh}^{MAX}) e tempo corrispondente (t_{sh}^{MAX}). Misurare anche l'altezza V_{IN} del segnale di ingresso.
- Verificare anche che dopo $10 \tau_{sh}$ il segnale sia tornato prossimo alla baseline.

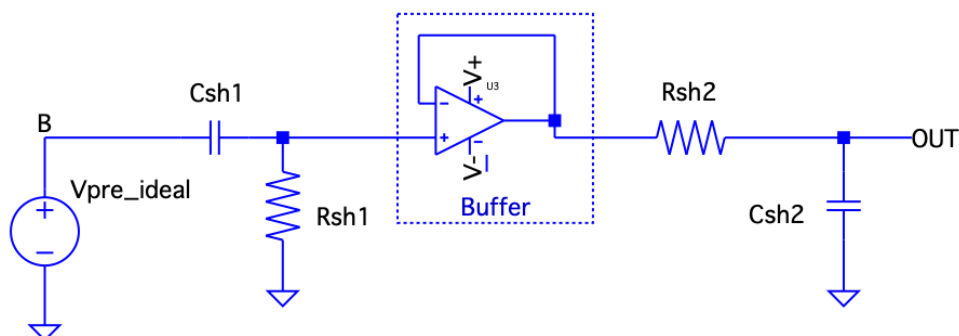


fig.2: schema shaper CR-RC

- Calcolare i valori attesi e confrontarli con i valori misurati. Se si discostano oltre il 10% dalle attese consultare il docente.
- Registrare infine la forma della curva, da confrontare poi in fase di analisi dati con la forma d'impulso prevista: salvare la curva sulla chiavetta USB e/o prendere un sufficiente numero di misure in laboratorio utilizzando l'oscilloscopio.

→ *logbook: valori calcolati di V_{sh}^{MAX} e t_{sh}^{MAX} ; valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di esempio con V_{in} e V_{out} sovrapposti.*

2.2) Risposta in frequenza dello shaper base

- Calcolare la frequenza caratteristica attesa per il circuito formatore f_t^{sh} , assumendo in prima approssimazione che sia un valore unico ben definito.
- Misurare la risposta in frequenza con una dozzina di punti tra 50 Hz e 1-2 MHz, di cui in particolare 2-3 punti attorno alla frequenza di taglio calcolata in precedenza.
- Costruire il grafico di Bode, verificando il tipico andamento da derivatore prima e integratore poi.

Fate anche in laboratorio una misura veloce della f_t^{sh} dai dati raccolti e verificate che sia ragionevolmente simile alle aspettative, in caso contrario contattare i docenti.

→ *logbook: valore calcolato di f_t^{sh} ; valori misurati e relative scale di lettura; grafico di bode; valore approssimato misurato di f_t .*

Integrazione dell'analisi dati per l'eventuale presentazione

1. calcolare le incertezze strumentali di tutte le misure eseguite e rifare i grafici con le barre di errore
2. fare i grafici dei residui dei fit e commentare la bontà dei fit
3. calcolare le incertezze delle grandezze derivate e le compatibilità tra i valori misurati e quelli attesi
4. Simulare i circuiti realizzati con LTspice e confrontare la simulazione con i dati sperimentali: sovrapponete le curve generate con Spice ai grafici dei vostri dati, ove utile evidenziando le differenze con un grafico tipo grafico dei residui (dati – sim)

QUARTA GIORNATA – FORMATORE COMPENSATO E STADIO FINALE

2) CIRCUITO FORMATORE – CONTINUAZIONE (60' – 90')

2.3) Shaper CR-RC con compensazione Polo-Zero

- Collegare ora l'uscita del preamplificatore sull'ingresso B dello shaper (vedi fig. 2) e ripristinare le condizioni del punto 1.2 (cioè le condizioni iniziali con l'impulso in ingresso quadrato negativo di durata 5 us).
- Controllare che il segnale in uscita dal preamplificatore (ovvero sull'ingresso dello shaper) corrisponda a quello misurato in precedenza. Prendere nota della tensione massima raggiunta dal preamplificatore V_{pre}^{MAX} : se si discosta significativamente dal valore misurato la volta precedente avvisare i docenti.
- Visualizzare il segnale di uscita dallo shaper, che dovrebbe ora presentare il tipico undershoot: rimisurare i valori del massimo V_{sh}^{MAX} , il tempo corrispondente e l'ampiezza massima dell'undershoot.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di V_{in} e V_{out} sovrapposti che mostri bene l'undershoot.

- Calcolare il valore richiesto di R_{pz} per compensare l'effetto del Polo-Zero e inserire una resistenza di pari valore (eventualmente come serie di più resistenze) in parallelo a C_{sh1} (figura 3).
- Tenendo sempre in ingresso il segnale del preamp, visualizzare il segnale di uscita per verificare l'effetto di compensazione: misurare la tensione dopo $10 \tau_{sh}$ e verificare che sia compatibile con lo zero (inteso sempre come baseline). In caso contrario provare a modificare R_{pz} fino a quando il segnale risulta correttamente compensato.

Chiamare il docente per controllare e confermare il corretto funzionamento del circuito prima di procedere.

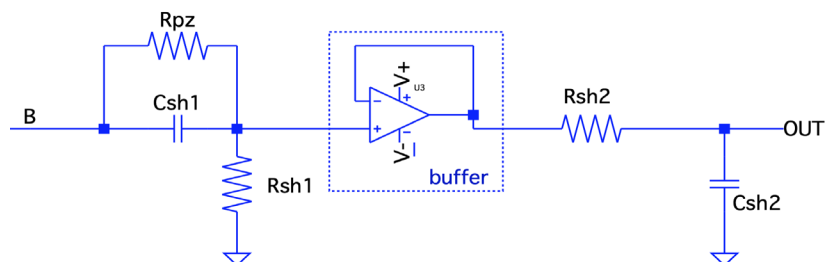


fig.3: schema shaper CR-RC con compensazione pole-zero

→ logbook: valore calcolato di R_{pz} ; valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di V_{in} e V_{out} sovrapposti che mostri bene la compensazione.

2.4) Effetto dello shaping-time

- Verificare qualitativamente l'effetto di integrazione-derivazione dello shaper al variare dello shaping time: sostituire alle resistenze $R_{sh1/2}$ una coppia di resistenze di valore ridotto ($R_{sh}' \ll R_{sh}$, es. tra 1.0 kΩ e 2.2 kΩ), in modo da modificare il τ_{sh} senza alterare significativamente la compensazione del PZ.
- Visualizzare il segnale di uscita.

Cosa è successo? provate a spiegarvi la forma del segnale ottenuto

- Salvare la forma d'onda su chiavetta USB, da confrontare poi in fase di analisi dati con quelli prodotti dalla simulazione. Utilizzare l'immagine dell'oscilloscopio per estrarre a casa le informazioni utili per l'analisi della misura.

→ *logbook: valori misurati e relative scale di lettura; screenshot di Vin e Vout sovrapposti*

- Ripristinare infine le Rsh1/2 originali.

3) STADIO FINALE E CATENA ELETTRONICA COMPLETA (120' – 150')

3.1) Circuito amplificatore in tensione non invertente

Il segnale prodotto fin qui ha la forma corretta, ma l'ampiezza è piccola rispetto ai tipici range di input delle DAQ. Le schede di acquisizione di uso nei nostri laboratori hanno range tipici di ingresso che variano tra i 2V e i 10V, talvolta tra 0 e V_{FS} (es. da 0 a 3.3V), altre volte tra $-V_{FS}$ e $+V_{FS}$ (es. da -1V a +1V).

Il segnale proveniente dalla shaper è positivo e già formato e basterà quindi un'amplificazione lineare, eventualmente con un bias DC, per adattarlo al range della DAQ e utilizzare al meglio la conversione AD.

Se arrivati a questo punto avete ancora abbastanza tempo a disposizione potete provare (*consigliato*) a costruire un **amplificatore non invertente con bias**, altrimenti potete optare per un circuito amplificatore non invertente semplice.

- Impostare la durata più lunga per il segnale sul generatore (Q_{IN} maggiore) pari a 10 μs e misurare l'ampiezza del segnale di uscita dallo shaper V_{sh}^{MAX} .

Per l'amplificatore semplice (alternativo a quello con bias):

- Calcolare l'amplificazione necessaria affinché questo segnale raggiunga l'altezza di 3 V (supponendo di avere a disposizione una scheda di acquisizione con range [0V, +3.3 V]).
- Calcolare le resistenze da mettere nel circuito ($R_i > 4 \text{ k}\Omega$) in modo da ottenere l'amplificazione desiderata.

Per l'amplificatore con bias DC (alternativo a quello semplice):

- Calcolare l'amplificazione necessaria affinché questo segnale raggiunga l'altezza di 1.8 V (supponendo di avere una scheda di acquisizione con range [-1 V, +1 V]).
- Calcolare le resistenze necessarie da mettere nell'amplificatore ($R_i > 4 \text{ k}\Omega$) per ottenere l'amplificazione richiesta e un bias di -0.9 V. Per il bias DC avete a disposizione le linee di alimentazione degli opamp (*senza modificare la tensione!*) oppure l'uscita fissa da 5 V.
- Inserite quindi il segnale in uscita dallo shaper sull'ingresso del vostro amplificatore e verificate di aver ottenuto l'output previsto. Se l'ampiezza dell'output si discosta oltre il 10% dal valore previsto avvisare il docente.

→ *logbook: valori misurati dei componenti utilizzati e relative scale di lettura; valore misurato di V_{sh}^{MAX} e valore calcolato di amplificazione richiesta; valore previsto e valore misurato dell'amplificazione (ev. anche per la tensione di bias); screenshot di Vin e Vout sovrapposti*

3.2) Linearità della catena elettronica completa

- Variate la quantità di carica iniettata modificando la durata dell'impulso di ingresso e misurate l'altezza massima del segnale in uscita dall'amplificatore. Eseguite una dozzina di misure variando T tra 0.5 μ s e 10-12 μ s e costruite il grafico V_{out}^{MAX} vs. Q_{IN} per verificare la linearità della risposta della catena elettronica complessiva.

NOTA: ora il segnale di output è molto più corto, grazie allo shaper. Possiamo quindi utilizzare anche frequenze di ripetizione dell'impulso più alte e quindi durate dell'impulso T più piccole (tipo 0.5 μ s, 1 μ s, 1.5 μ s...).

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; grafico di V_{out}^{MAX} vs. Q_{IN} con fit lineare semplice.

3.3) Risposta in frequenza della catena elettronica completa

- Misurate la risposta in frequenza del circuito con una dozzina di punti per frequenze tra 10 Hz e 1 MHz. Costruite il grafico di Bode.

L'andamento dei punti corrisponde alle aspettative?

- Ricavate in modo approssimato già in laboratorio il valore BW della larghezza di banda della catena elettronica completa. In fase di analisi dati affinerete il confronto tra misure e teoria.

→ logbook: valori misurati e relative scale di lettura; grafico di bode; valore approssimato misurato di BW

Integrazione dell'analisi dati per l'eventuale presentazione

1. calcolare le incertezze strumentali di tutte le misure eseguite e rifare i grafici con le barre di errore
2. fare i grafici dei residui dei fit e commentare la bontà dei fit
3. calcolare le incertezze delle grandezze derivate e le compatibilità tra i valori misurati e quelli attesi
4. Simulare i circuiti realizzati con LTspice e confrontare la simulazione con i dati sperimentali: sovrapponetle le curve generate con Spice ai grafici dei vostri dati, ove utile evidenziando le differenze con un grafico tipo grafico dei residui (dati – sim)