

QUADERNO DI LABORATORIO

Francesco Pasa

francescopasa@gmail.com - Gruppo A5

1 Sorgente di corrente costante e sommatore pesato

16 settembre 2014

1.1 Obiettivo

Nella prima sessione di laboratorio abbiamo ripassato gli amplificatori operazionali, costruendo due semplici circuiti: un generatore di corrente costante e un sommatore pesato di tensioni.

1.2 Materiali e circuiti

Per costruire i due circuiti in esame, mostrati in figura 1.1, abbiamo utilizzato i seguenti materiali:

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale UA741.
- Resistenze: $3.9\text{ k}\Omega$, $50\text{ k}\Omega$, $100\text{ k}\Omega$ e una variabile per simulare un carico con impedenza non costante. Nel nostro caso abbiamo usato una resistenza con un range operativo da 0 a $10\text{ k}\Omega$.
- Alimentatore di corrente continua.
- Generatore di funzioni d'onda Agilent 33120A.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A, con generatore di funzioni d'onda integrato (purtroppo questo modello ha solo 2 canali di input, per il test del sommatore sarebbe stato meglio avere un oscilloscopio con almeno 3 input).

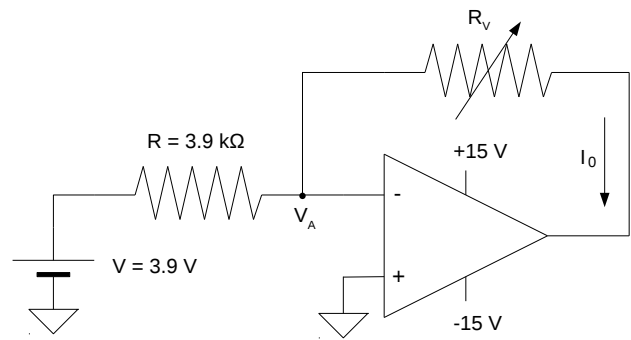
1.3 Dati e risultati

1.3.1 Generatore di corrente costante.

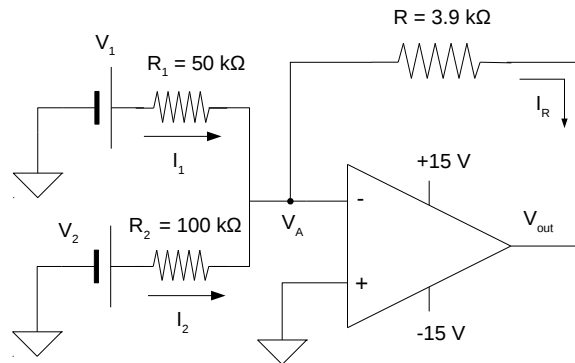
Il generatore di corrente costante è stato costruito come nello schema in figura 1.1a. La scelta della tensione di input V è stata dettata dal valore della resistenza R a nostra disposizione e dalla corrente che volevamo generare: 1 mA . Infatti il polo invertente dell'operazionale è un ground virtuale (cioè $V_A = 0$), quindi la corrente I_0 , tenuto conto del fatto che il polo assorbe una corrente trascurabile, vale V/R (1 mA appunto).

Poiché abbiamo usato una resistenza R con una tolleranza del 5%, che assumo come incertezza sul valore della stessa, e che l'incertezza di risoluzione sulla tensione V è di 0.005 V , il valore atteso della corrente con l'incertezza è $I_0 = 1 \pm 0.05\text{ mA}$.

Abbiamo misurato con il multimetro la corrente I_0 al variare del valore della resistenza R_v , per



(a) Generatore di corrente costante



(b) Sommatore pesato di tensioni

Figura 1.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

verificare il funzionamento del generatore. La noiosa tabella 1.1 mostra che la corrente non varia al variare della resistenza di carico, proprio come volevamo realizzare. Il circuito si comporta come una sorgente di corrente costante.

Tabella 1.1: La corrente nel circuito 1.1a rimane costante al variare della resistenza di carico R_v . Le incertezze riportate sul valore di corrente sono incertezze di risoluzione del multimetro (metà della risoluzione), mentre sui valori di resistenza non sono riportate perché non rilevanti (sono comunque dell'ordine di qualche ohm).

$I_0[\text{mA}]$	$R_v[\text{k}\Omega]$
1.009 ± 0.0005	10
1.009 ± 0.0005	9
1.009 ± 0.0005	8
1.009 ± 0.0005	7
1.009 ± 0.0005	6
1.009 ± 0.0005	5
1.009 ± 0.0005	4
1.009 ± 0.0005	3
1.009 ± 0.0005	2
1.009 ± 0.0005	1

1.3.2 Sommatore pesato di tensioni.

Il sommatore pesato di tensioni che abbiamo realizzato è il circuito 1.1b, ed è pensato per fornire il seguente output

$$V_{\text{out}} = R \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \quad (1.1)$$

Come nel circuito precedente si ha che $V_A = 0$ (ground virtuale) e che l'amplificatore operazionale assorbe una quantità di corrente trascurabile, per cui la corrente di retroazione I_R è data dalla somma di I_1 e I_2 (per la conservazione della carica). Le resistenze R_1 e R_2 trasformano le tensioni in ingresso nelle correnti I_1 e I_2 , pesandole secondo l'inverso dei valori delle stesse. Questo implica che I_R dipende dalle tensioni in input pesate, e quindi anche $V_{\text{out}} = RI_R$ dipende da esse.

La resistenza R determina il guadagno del circuito. Per esempio per la tensione V_1 il guadagno vale

$$G = \frac{V_{\text{out}}}{V_1} = \frac{R}{R_1} = 0.078 \pm 0.006 \quad (1.2)$$

dove ho considerato incertezze sulle resistenze pari al 5%.

Per verificare il corretto funzionamento del circuito abbiamo generato due segnali, usando il generatore di forme d'onda a nostra disposizione e quello integrato nell'oscilloscopio, e li abbiamo dati in input al circuito. Poi con l'oscilloscopio abbiamo verificato che l'output si comportasse secondo la (1.1). Il risultato è stato positivo: abbiamo provato diverse combinazioni di sinusoidi, onde quadre, rampe e triangoli e in tutti i casi il circuito si è comportato correttamente.

Purtroppo l'oscilloscopio a nostra disposizione non ha 3 canali in ingresso (che sarebbero stati utili per vedere contemporaneamente i due input e l'output), per cui abbiamo dovuto usare la funzione di persistenza, che non permette di salvare i dati.

1.4 Conclusione

Purtroppo a causa del disguido nel salvataggio dei dati di persistenza non sono riuscito ad inserire nemmeno un grafico dell'output del sommatore pesato.

Tuttavia questa è stata la sessione introduttiva, volta più che altro a familiarizzare con il nuovo corso, e la giornata è stata più che altro un'introduzione e un ripasso degli amplificatori operazionali. Come tale posso dire che l'esperienza è stata positiva, sia perché siamo riusciti a montare i circuiti correttamente sia perché abbiamo usato per la prima volta il generatore integrato nell'oscilloscopio. Inoltre, ora che abbiamo capito meglio come funziona questo strumento, eviteremo di fare errori simili nelle prossime esperienze.

2 Amplificatore operazionale reale: parte 1

24 settembre 2014

2.1 Obbiettivo

Osservare praticamente le caratteristiche di un amplificatore operazionale reale che lo differenziano da un operazionale ideale. Tra queste ci concentreremo sulla tensione di offset e sulle correnti di polarizzazione, misurando queste quantità per avere un'idea del loro ordine di grandezza e quindi di quando diventi importante considerarle nelle applicazioni.

2.2 Materiali e Circuiti

Abbiamo realizzato i circuiti schematizzati in Figura 2.1. Ci siamo serviti dei seguenti materiali:

- Breadboard, cavi a banana e cavetti da breadboard.
- Amplificatore operazionale UA741.
- Resistenze: 10 Ω , 10 k Ω , 100 k Ω e una variabile per aggiustare l'offset dell'amplificatore operazionale. Nel nostro caso abbiamo usato una resistenza trimmer con un range operativo da 0 a 10 k Ω .
- Alimentatore di corrente continua.
- Multimetro Agilent 34410A.
- Oscilloscopio Agilent DSO-X 2002A.

2.3 Dati e risultati

2.3.1 Tensione di offset

Un amplificatore operazionale ideale amplifica la differenza tra i due segnali in ingresso. Questo significa che se i due segnali sono uguali, l'output deve essere zero. Negli operazionali reali, questo non è vero; esiste infatti una tensione di offset V_{offset} tra gli ingressi per la quale l'output è nullo, e questa tensione è diversa da zero. Questa tensione è dovuta al processo produttivo di costruzione degli operazionali. Un amplificatore ha uno stadio di amplificazione differenziale in ingresso costruito utilizzando transistor, che non possono mai essere prodotti in maniera perfettamente uguale. Differenti transistor rispondono in modo anche abbastanza diverso agli input e questo causa uno sbilanciamento negli ingressi dell'operazionale, che varia in base al tipo di transistor utilizzati.

L'esistenza della tensione di offset implica anche che un cosiddetto ground virtuale abbia in realtà una tensione diversa da zero. In pratica si può anche vedere V_{offset} come la differenza di potenziale tra gli ingressi.

Esistenza della tensione di offset. La figura 2.2 mostra la differenza tra la situazione reale e quella ideale. Come è ben visibile in figura, è necessario applicare una tensione di offset per avere un output nullo. In altre parole, collegando i due input allo stesso potenziale, nel caso ideale la tensione dovrebbe essere nulla, ma in quello reale non lo è. Per verificare questo fatto abbiamo montato il circuito 2.1a e abbiamo misurato la tensione di output. È risultato che l'output era in saturazione negativa (come in Figura 2.2), ovvero $V_{\text{out}} = -12.80 \pm 0.005$ V. Collegando l'ingresso invertente con tensioni negative fino a -15 V e vedendo che l'uscita restava circa costante (a -15 V ha raggiunto -12.94 ± 0.005 V), ci siamo accertati di essere realmente in saturazione. Abbiamo quindi verificato l'esistenza della tensione di offset.

Misura della tensione di offset. Per misurare la tensione di offset abbiamo utilizzato il circuito 2.1b. Il circuito sfrutta l'amplificatore operazionale per amplificare la tensione V_{offset} in modo da renderla facilmente misurabile. Poiché la differenza di potenziale tra gli ingressi è non nulla, $V_A \neq 0$. Si ha quindi (facendo riferimento alla figura 2.3):

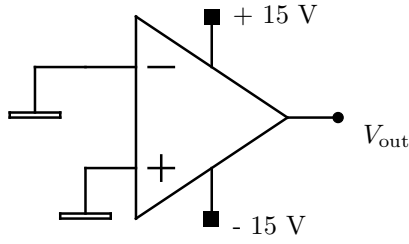
$$I_1 = \frac{V_A}{R_1}, \quad I_2 = I_1 - I_p^- = \frac{V_A}{R_1} - I_p^- \quad (2.1)$$

da cui, usando la legge di Ohm, si ottiene

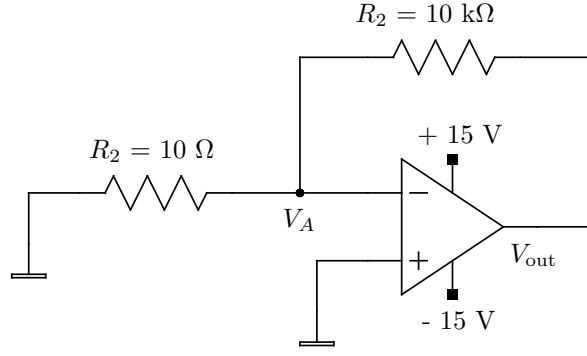
$$V_{\text{out}} = V_A + R_2 I_2 = V_A + \frac{R_2}{R_1} V_A - R_2 I_p^- \quad (2.2)$$

Questa formula riassume il funzionamento del circuito. Misurando V_{out} è possibile ricavare facilmente il valore di V_A , assumendo che il contributo dato da I_p^- sia trascurabile. Dato che la tensione di offset è la tensione che esiste tra i terminali di input dell'operazionale (uno è messo a comune), cioè $V_A = V_{\text{offset}}$, possiamo così misurare V_{offset} .

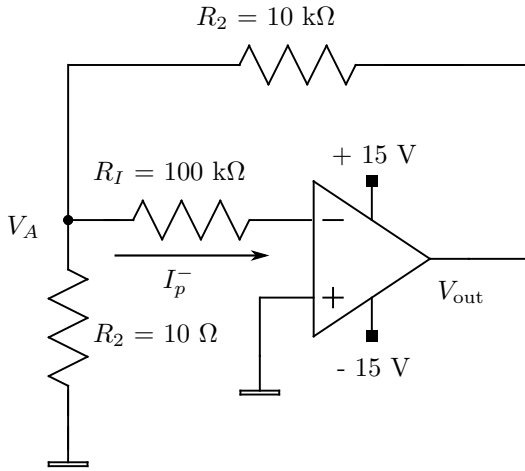
Grossomodo, il funzionamento di questo circuito può essere pensato intuitivamente nel seguente modo. Supponiamo che la tensione di offset tra non invertente ed invertente sia positiva (cioè se il non invertente è a 0 V, l'invertente è a V_{offset} V.). All'accensione dell'alimentazione, $V_A = 0$ V, per cui, essendo l'amplificatore non ideale, l'uscita sarà positiva (ricordo che un amplificatore operazionale segue una legge del tipo $V_{\text{out}} = G(V^+ - V^- + V_{\text{offset}})$, dove G è il guadagno differenziale). Il ramo di feedback tende quindi ad alzare la d.d.p. in V_A e la avvicina a V_{offset} , riducendo V_{out} . Il ciclo di feedback si ripete (o meglio tutto si bilancia quasi istantaneamente)



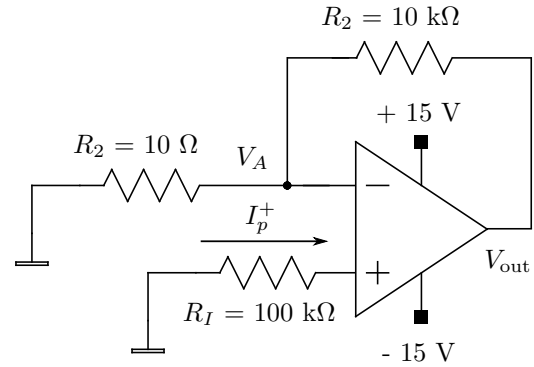
(a) Circuito utilizzato per osservare l'esistenza della tensione di offset.



(b) Circuito per misurare V_{offset} . Questo circuito sfrutta l'amplificatore per amplificare il valore della tensione di offset e renderla più facilmente misurabile.



(c) Circuito per la misura della corrente di polarizzazione I_p^- . Questo circuito richiede la cancellazione della tensione di offset per funzionare.



(d) Circuito per la misura della corrente di polarizzazione I_p^+ . Questo circuito richiede il bilanciamento della tensione di offset per funzionare.

Figura 2.1: Circuiti costruiti durante l'esperienza

finché V_A non diventa praticamente indistinguibile da V_{offset} (grazie al fatto che il guadagno di un operazionale è enorme, circa 10^5).

Poiché, come è evidente dalla (2.2), anche I_p^- ha un certo rilievo, abbiamo scelto i valori $R_1 = 10 \Omega$ e $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, in modo da rendere il contributo del secondo termine molto grande rispetto a quello dell'ultimo termine.

Dalle nostre misure è risultato:

$$V_{\text{out}} = -970 \pm 30 \text{ mV} \quad (2.3)$$

da cui si calcola (abbiamo assunto 5% di incertezza sui valori delle resistenze)

$$V_{\text{offset}} = \frac{V_{\text{out}}}{1 + R_2/R_1} = -0.97 \pm 0.07 \text{ mV} \quad (2.4)$$

in accordo con i valori tipici per un operazionale economico come l'UA741.

Abbiamo inoltre misurato direttamente il valore di V_A , perché in questo caso è stato possibile farlo con il multimetro a nostra disposizione, ottenendo $V_{\text{offset}} = 1.07 \pm 0.005 \text{ mV}$, risultato questi compatibile con quello precedente.

2.3.2 Correzione della tensione di offset

La tensione di offset può essere di qualche millivolt, come visto nel paragrafo precedente, e per alcune applicazioni di precisione questo può essere un grosso limite. In tal caso è necessario usare un amplificatore operazionale con una tensione di offset minore oppure si può annullarla utilizzando gli appositi piedini.



Figura 2.2: La figura mostra la tensione in uscita in funzione della differenza di tensione agli input di un operazionale reale e di uno ideale. La pendenza e V_{offset} sono esagerate (la pendenza è molto minore di quella reale, mentre la tensione di offset è molto più grande) per motivi di chiarezza grafica. In un amplificatore reale, oltre al fatto che esiste una tensione di offset, le tensioni di saturazione non coincidono con quelle di alimentazione ed inoltre non sono simmetriche e neppure esattamente costanti (su un intervallo V_{diff} da 0 a -15 V abbiamo misurato una variazione di 0.14 V) e il guadagno non è infinito.

Gran parte degli amplificatori operazionali è infatti munita di due piedini di regolazione dell'offset che vanno collegati agli estremi di una resistenza variabile. Il piedino centrale della resistenza va collegato all'alimentazione. Sbilanciando la resistenza in modo la tensione alimentazione-offset sia diversa per i due piedini, andiamo a polarizzare lo stadio differenziale in ingresso all'opamp, aggiustando in questo modo la risposta del circuito. Riusciamo così a ridurre V_{offset} a qualche μV .

Dopo aver eseguito l'operazione, abbiamo misurato la nuova tensione di offset con lo stesso circuito di prima (il circuito 2.1b). Abbiamo ottenuto

$$V_{\text{offset}} = 3 \pm 3 \mu\text{V} \quad (2.5)$$

che è notevolmente minore della precedente. Notare che in questo caso sarebbe stato molto più difficile misurare direttamente questa differenza di potenziale, dato che è molto piccola.

2.3.3 Correnti di polarizzazione

Oltre alla tensione di offset, un'altra deviazione dall'idealità importante degli opamp reali è l'esistenza delle correnti di polarizzazione. Un amplificatore reale, al contrario di quello ideale, assorbe infatti una minima quantità di corrente attra-

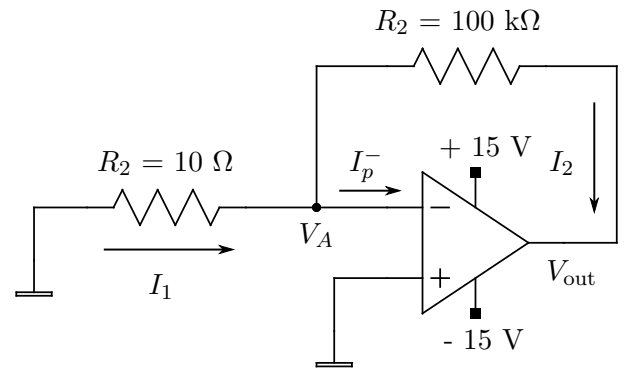


Figura 2.3

verso gli ingressi. Queste correnti variano da qualche nanoampere a qualche femtoampere a seconda del tipo di transistor utilizzati per la costruzione dell'operazionale.

Per misurare queste correnti dobbiamo sfruttare l'amplificazione fornita dall'operazionale, poiché le correnti sono troppo piccole per essere misurate con strumenti economici.

Misura della corrente di polarizzazione assorbita dall'ingresso invertente. Abbiamo quindi costruito il circuito 2.1c. Per la misura della corrente di polarizzazione è fondamentale usare un trimmer per eliminare la tensione di offset prima di montare il circuito. In questo caso vale $V_A = R_I I_p^-$. È necessario scegliere R_I grande in modo da rendere V_A più facilmente misurabile. Noi abbiamo optato per una resistenza da 100 k Ω . Il circuito funziona poi come il precedente, vale infatti la stessa analisi circuitale del caso precedente.

In questo caso però quello che vogliamo misurare è I_p^- e non V_A . Sostituendo in (2.2) l'espressione di V_A , risulta:

$$V_{\text{out}} = \left(R_I + \frac{R_2}{R_1} R_I - R_2 \right) I_p^- \quad (2.6)$$

perciò

$$I_p^- = \frac{V_{\text{out}}}{R_I + \frac{R_2}{R_1} R_I - R_2} \quad (2.7)$$

Facendo più misure di V_{out} (l'output variava abbondantemente sul multimetro e sull'oscilloscopio), calcolando I_p^- in ogni caso e poi facendo media e deviazione standard abbiamo ottenuto

$$I_p^- = 27.7 \pm 1.7 \text{ nA} \quad (2.8)$$

anche questo un valore tipico per amplificatori operazionali basati su transistor BJT.

Misura della corrente di polarizzazione assorbita dall'ingresso non invertente. Il procedimento in questo caso è del tutto analogo, ad eccezione del circuito; in questo caso abbiamo usato il 2.1d. La differenza sta nella posizione della resistenza R_I che deve adesso trasformare I_p^+ in una tensione e non I_p^- . Poiché l'offset è stato azzerato (o meglio, reso trascurabile, in queste misure V_A è dell'ordine dei millivolt, mentre la tensione di offset, come mostrato prima è di microvolt) $V_A = R_I I_p^+$. Vale quindi la seguente formula, ricavata come quella del paragrafo precedente:

$$I_p^- = \frac{V_{\text{out}} + R_2 I_p^-}{R_I + \frac{R_2}{R_1} R_I} \quad (2.9)$$

Con lo stesso procedimento di prima abbiamo quindi ottenuto

$$I_p^- = -29 \pm 3 \text{ nA} \quad (2.10)$$

2.4 Conclusione

Dopo aver calcolato le correnti di polarizzazione, ci siamo proposti di ricalcolare il valore di V_{offset} con la formula (2.2) senza però trascurare il valore di I_p^- . Abbiamo quindi inserito il valore della corrente di polarizzazione trovato nei paragrafi precedenti non rilevando alcun cambiamento nelle cifre significative (quelle riportare) di V_{offset} . Allo stesso modo abbiamo verificato che la tensione di offset residua dopo l'azzeramento non variasse facendo i calcoli senza trascurare la tensione di polarizzazione.

Siamo quindi certi che le approssimazioni eseguite non inficiano la correttezza dei risultati presentati in questa relazione. Ci riteniamo soddisfatti di tali risultati, poiché sono in pieno accordo con i valori tipici che ci sono stati riferiti a lezione. È stato inoltre interessante vedere quanto sia facile notare l'esistenza di queste deviazioni dall'idealità di un amplificatore operazionale. L'esperienza è inoltre stata utile per conoscere l'ordine di grandezza di queste deviazioni, in modo da non commettere errori (o almeno avere uno strumento in più per correggerli) nella progettazione e realizzazione di circuiti elettronici.