

Esperienza di laboratorio

Amplificatori operazionali

Gruppo A6
Giacomo Calabria - 2007964
Daniele Venturini - 1195858

10 March 2023

Contents

1	Primo esperimento	3
1.1	Definizione dei valori di R_1, R_2 - prelab	4
1.2	Valutazione del datasheet - prelab	4
1.3	Layout del circuito - prelab	4
1.4	Assemblaggi e settaggi	5
1.5	Risultati	6
1.5.1	Tensione di clipping	6
2	Secondo esperimento	8
2.1	Valutazione del datasheet - prelab	8
2.2	Assemblaggi e settaggi	9
2.3	Procedura di valutazione e risultati	9
2.3.1	Conclusioni	9
3	Terzo esperimento	10
3.1	Assemblaggi e settaggi	10
3.2	Procedura di valutazione e risultati	11
4	Quarto esperimento	12
4.1	Analisi del datasheet	12
4.2	Procedure e risultati	13
4.2.1	Risultati in seguito all'aggiunta di un resistore al morsetto non invertente	14
5	Quinto esperimento	15
5.1	PRELAB	15
5.1.1	Calcolare l'espressione della risposta in frequenza del filtro in Figura 17	15
5.1.2	Definizione dei valori di R_1, R_2	15
5.1.3	Tracciare il diagramma di Bode del modulo e della fase del filtro	16
5.2	Simulazione SPICE con LTspice®	17

5.3	Risultati sperimentali	18
5.4	Conclusioni	19

INTRODUZIONE

Lo scopo dell'esperienza di laboratorio è studiare e valutare mediante misure di laboratorio le non idealità degli amplificatori operazionali. Tramite opportuni esperimenti, si valuteranno gli effetti di: limitazione della tensione di uscita, limitazione della corrente di uscita, slew rate, corrente di bias. Si misurerà infine la risposta in frequenza di un filtro passa-basso basato su operazionali.

Strumentazione necessaria:

- Generatore di forma d'onda arbitraria
- Oscilloscopio a 2 canali
- 1 connettore BNC a "T"
- 2 connettore BNC maschio/banana femmina
- 1 connettore BNC femmina-femmina
- 1 cavo BNC
- Cavo 1 mm
- Spellafili

1 Primo esperimento

In questo primo esperimento si vuole valutare il **clipping** del segnale di uscita, dovuto alla limitazione della massima tensione di uscita dell'operazionale. Il circuito è rappresentato in Figura 1. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale 741, codice LM741CN
- Resistenza di ingresso R_1 , da 0.25W e valore da calcolare
- Resistenza di uscita R_2 , da 0.25W e valore da calcolare

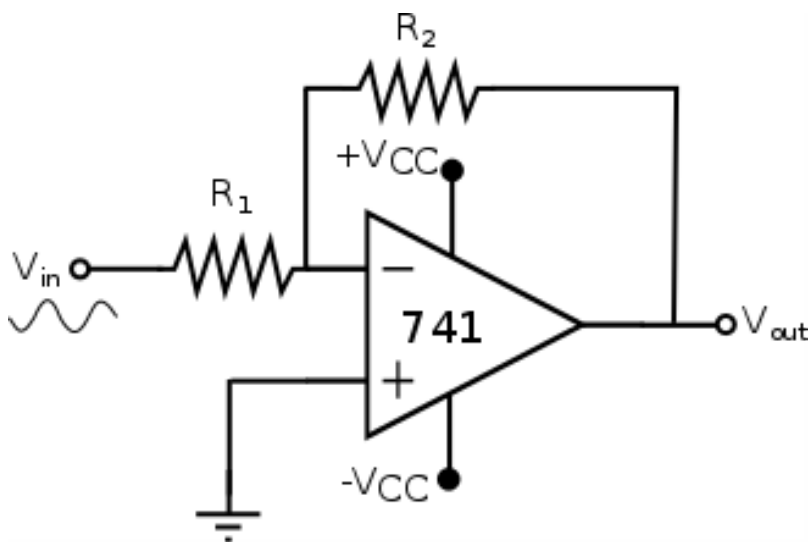


Figure 1: schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale: $\pm V_{CC} = \pm 10V$. I pinout dell'integrato LM741CN sono stati ricavati dal datasheet, riportati in Figura 2

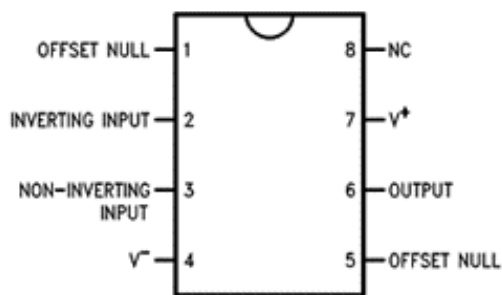


Figure 2: layout dell'integrato LM741CB

Dall'analisi del datasheet inoltre si ricava che la tensione massima di alimentazione è $\pm 18V$.

1.1 Definizione dei valori di R_1, R_2 - prelab

Il circuito amplificatore, riportato in Figura 1 è in configurazione invertente, di conseguenza il guadagno è

$$G_1 = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

Il cui valore, espresso in decibel, deve essere, come da consegna, $23.5dB$

$$G_1|_{dB} = 20\log_{10}(|G_1|) = 23.5dB \quad (2)$$

Da cui si può ricavare il rapporto tra R_1 e R_2 pari a

$$\frac{R_2}{R_1} = 10^{\frac{23.5}{20}} = 15 \quad (3)$$

Si sono quindi scelti i seguenti valori per le resistenze R_1 e R_2 :

- $R_1 = 1k\Omega$
- $R_2 = 15k\Omega$

1.2 Valutazione del datasheet - prelab

Sulla base delle informazioni contenute nel datasheet, si è stimata la massima tensione raggiungibile dall'uscita del circuito a fronte di una alimentazione $\pm V_{CC} = \pm 10V$

$$V_{outMAX} = \pm 9.33V$$

NB: nel datasheet non vengono riportati i valori relativi all'alimentazione usata, il valore di tensione massimo è stato stimato utilizzando i dati a disposizione applicando una proporzione.

1.3 Layout del circuito - prelab

Utilizzando il software Tinkercad è stato possibile rappresentare un possibile layout del circuito su breadboard, visibile in Figura 3

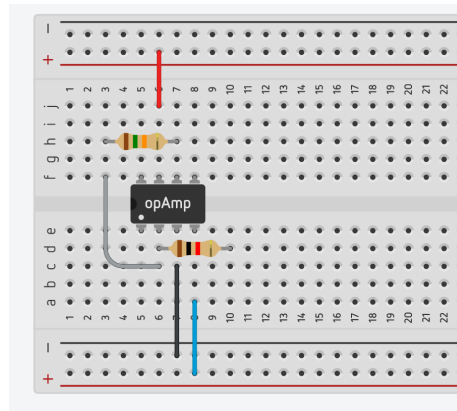


Figure 3: Circuito su breadboard

1.4 Assemblaggi e settaggi

Una volta montato il circuito in Figura 1 secondo il layout definito in fase di prelab al punto 1.3, è stata collegata l'alimentazione duale $\pm V_{CC} = \pm 10V$, come in Figura 4.

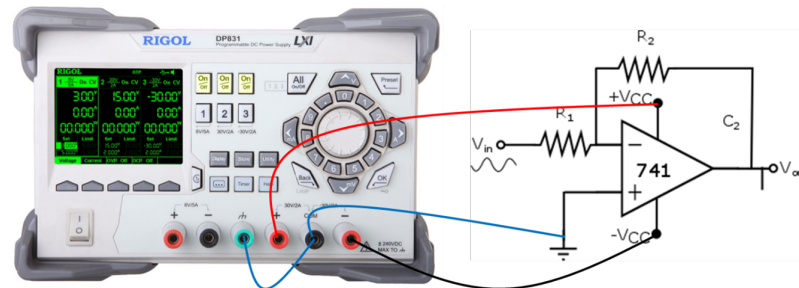


Figure 4: Schema di collegamento dell'alimentazione

In seguito è stato collegato la "T" BNC all'uscita del generatore di funzione; una delle terminazioni della "T" al canale 1 dell'oscilloscopio e l'altra al circuito. Infine l'uscita del circuito è stata connessa al canale 2 dell'oscilloscopio. Come si vede in Figura 5

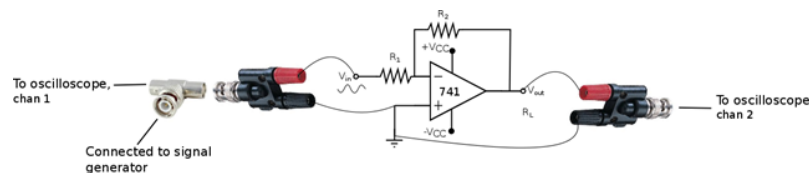


Figure 5: Schema di collegamento dei segnali e oscilloscopio

Il generatore di forma d'onda è stato impostato con il seguente segnale:

- Forma d'onda: quadra
- Ampiezza: $100mV$ picco-picco
- Frequenza: $300Hz$
- Duty cycle: 50%

Dopo aver verificato la corretta connessione dei componenti del circuito, la giusta regolazione delle impedenze degli ingressi dei canali dell'oscilloscopio e dell'uscita del generatore di funzione; è stato acceso il generatore di alimentazione.

1.5 Risultati

L'oscilloscopio è stato impostato in modo da visualizzare simultaneamente i segnali V_{in} e V_{out} , come si vede in Figura 6

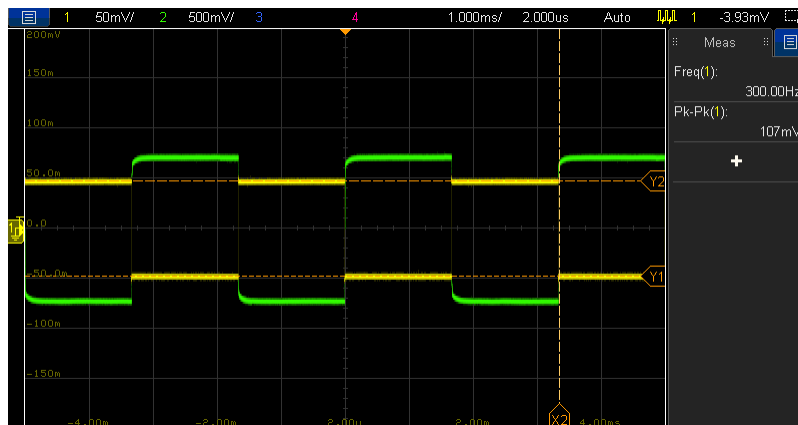


Figure 6: Forme d'onda catturate dall'oscilloscopio (le scale di tensioni dei due canali sono diverse)

Successivamente sono stati misurati i parametri presentati in tabella, utilizzando le funzioni integrate e i cursori.

Frequenza del segnale di ingresso	300.0Hz
Ampiezza picco-picco del segnale di ingresso	94.5mV
Ampiezza picco-picco del segnale di uscita	1.41V
Guadagno di tensione dell'amplificatore	23.47dB

Table 1: Risultati misure oscilloscopio

NB: il guadagno di tensione è stato calcolato con $20 \log_{10} \frac{1.41V}{94.5mV} = 23.47dB$

1.5.1 Tensione di clipping

Nella seconda parte del primo esperimento si vuole misurare la tensione di clipping del segnale in uscita. Si è impostato il generatore di forma d'onda come segue

- Forma d'onda: sinusoidale
- Ampiezza iniziale: 100mV picco-picco
- Frequenza: 300Hz

Si è poi aumentata l'ampiezza picco-picco del segnale di ingresso fino a quando si è osservato il clipping della tensione di uscita. Esso si è verificato alla tensione di ingresso di 1.22V. Come possiamo vedere dalla Figura 7 la semionda negativa assume la distorsione tipica di un segnale clippato.

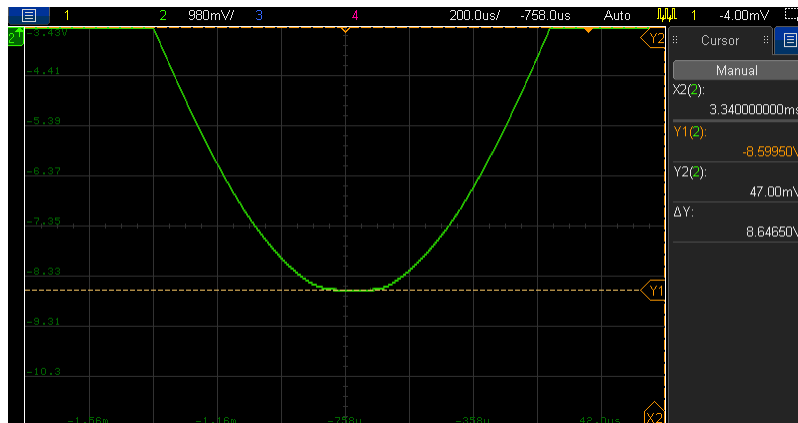


Figure 7: Segnale di uscita clippato

In questa condizione di misura abbiamo preso nota dei seguenti parametri:

Tensione di ingresso a cui si instaura il clipping del segnale in uscita	1.22V
Tensione di clipping del segnale di uscita, semionda positiva	8.637V
Tensione di clipping del segnale di uscita, semionda negativa	-8.600V
Differenza tra la tensione di clipping positiva e alimentazione positiva	$8.637V - 10V = -1.363V$
Differenza tra la tensione di clipping negativa e alimentazione negativa	$-8.6 - (-10V) = 1.4V$

Table 2: Risultati delle misurazioni del segnale in clipping

2 Secondo esperimento

Lo scopo di questo esperimento è valutare la **limitazione della corrente di uscita** dovuta alla massima corrente erogabile dall'operazionale LM741CN. Il circuito è rappresentato in Figura 8. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale 741, codice LM741CN
- Resistenza di ingresso $R_1 = 1k\Omega$, da 0.25W
- Resistenza di uscita $R_2 = 15k\Omega$, da 0.25W
- Resistenza di carico $R_L = 27\Omega$, da 0.25W

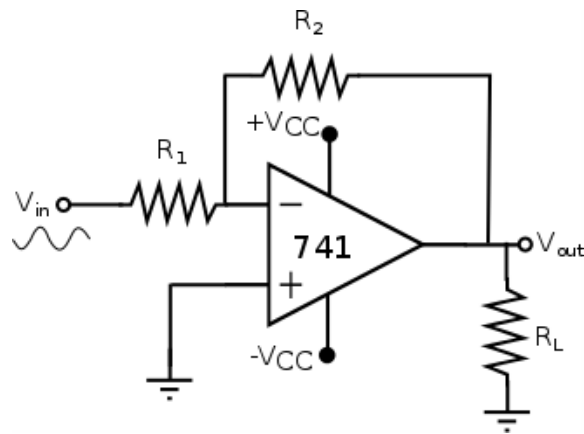


Figure 8: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale: $\pm V_{CC} = \pm 10V$.

2.1 Valutazione del datasheet - prelab

Sulla base delle informazioni contenute nel datasheet del componente, la massima corrente erogabile dall'amplificatore operazionale LM741CN, a fronte di una alimentazione $\pm V_{CC} = \pm 10V$, è:

$$I_{out_{MAX}} = 25mA$$

Da cui si ricava, applicando la legge di Ohm a partire dal valore determinato precedentemente, la massima tensione raggiungibile dall'uscita dell'operazionale:

$$V_{out_{MAX}} \approx R_L I_{out_{MAX}} = 0.675V$$

Nota bene: il valore della tensione massima è stato trovato applicando la legge di Ohm sulla resistenza di carico. La corrente sulla resistenza di retroazione, essendo dell'ordine dei μA , quindi circa tre ordini di grandezza più piccoli, è stata trascurata.

2.2 Assemblaggi e settaggi

Si realizza il circuito in Figura 8 connettendo opportunamente il generatore di segnali e due canali dell'oscilloscopio; come si vede in figura 9

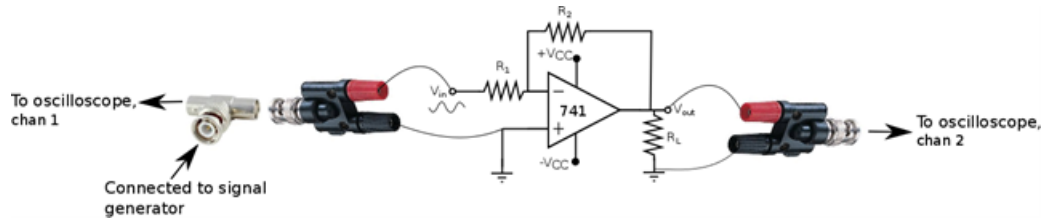


Figure 9: Collegamento del generatore di funzioni e dell'oscilloscopio

Il generatore di forma d'onda si imposta con le specifiche seguenti:

- Forma d'onda: sinusoidale
- Ampiezza iniziale: $50mV$ picco-picco
- Frequenza: $300Hz$

2.3 Procedura di valutazione e risultati

Dopo aver acceso l'alimentazione. Si aumenta gradualmente, con step di $10mV$ l'ampiezza della tensione di ingresso, osservando la forma d'onda del segnale di uscita con l'oscilloscopio fino a quando si verifica il clipping del segnale in uscita.

Alla tensione di $MaxV_{out} = 670mV$ si è riscontrato il clipping del segnale.

In queste condizioni si è calcolato il valore della corrente che scorre sulle resistenze R_L e R_2 , confrontandolo con il valore massimo della corrente erogabile in uscita dall'amplificatore operazionale. I valori delle correnti sono riassunte nella Tabella 3

$MaxI_{R_L} =$	$24.81mA$
$MaxI_{R_2} =$	$44.67\mu A$
$MaxI_{out} =$ (misurata)	$24.8547mA$
$MaxI_{out} =$ (datasheet)	$25mA$

Table 3: Tabella risultati

2.3.1 Conclusioni

La differenza tra il valore calcolato della corrente massima in uscita con quello fornito dal costruttore può essere dovuta alle tolleranze dei componenti passivi, alla incertezza delle misurazioni e dal particolare chip usato durante l'esperienza.

3 Terzo esperimento

Lo scopo di questa esperienza è la valutazione dello **slew-rate** dell'amplificatore operazionale LM741CN, mediante l'utilizzo di un circuito buffer inseguitore (di tensione).

Il circuito, riportato in Figura 10, è alimentato dalla tensione duale $\pm V_{CC} = \pm 10V$.

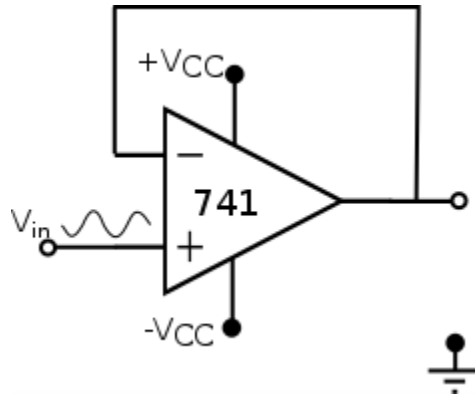


Figure 10: Schema circuito

3.1 Assemblaggi e settaggi

Si riporta in Figura 11 il setup sperimentale, con ingresso V_{in} connesso - mediante "T" - al generatore di forma d'onda e uscita V_{out} connessa la canale 2 dell'oscilloscopio.

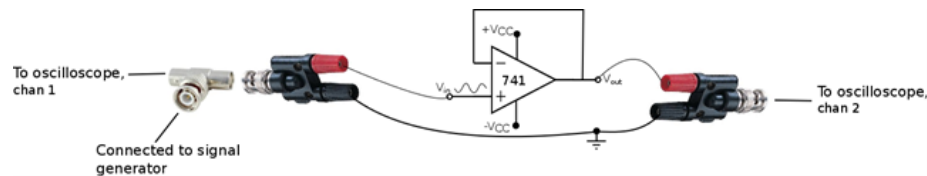


Figure 11: Schema di collegamento

Il generatore di forme d'onda è stato impostato per fornire in uscita la forma d'onda con le seguenti caratteristiche:

- Forma d'onda: quadra
- Frequenza: 20 kHz
- Tensione picco-picco: 10V
- Duty-cycle: 50%

3.2 Procedura di valutazione e risultati

Tramite i cursori dell' oscilloscopio è stato misurato lo slew rate, come si vede in Figura 12

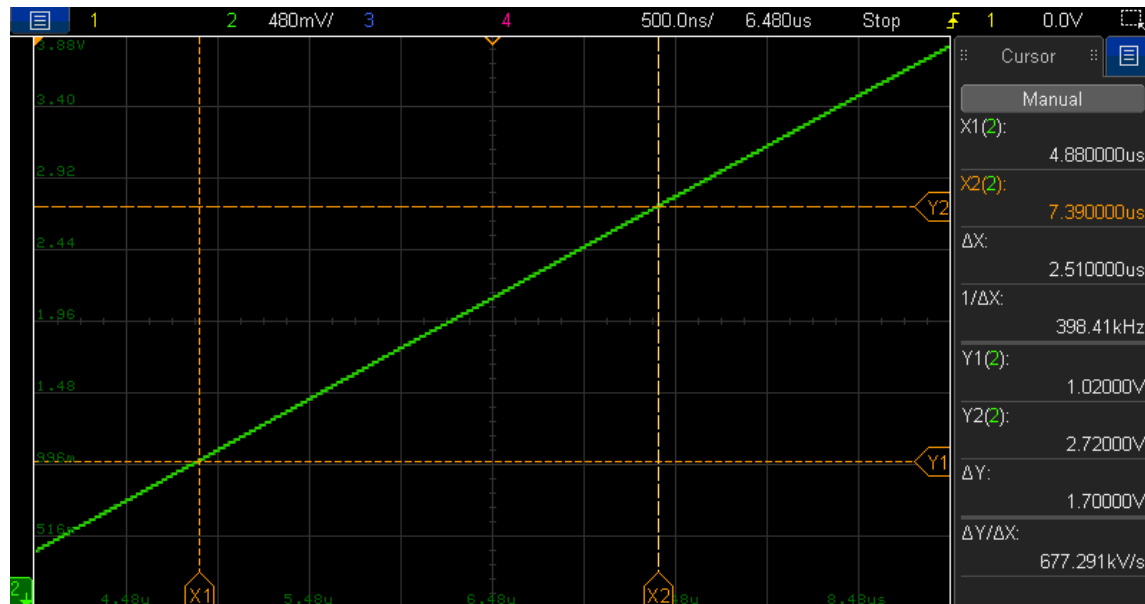


Figure 12: Misura dello slew rate dall'oscilloscopio

Il cui valore è

$$\text{SlewRate} = 0.6773V/\mu s \quad (4)$$

4 Quarto esperimento

Lo scopo di questa esperienza è la valutazione dell'effetto delle **correnti di bias** sulle prestazioni di un circuito integratore. Per questo esperimento si è scelto l'amplificatore operazione 1458, dal momento che ha una corrente di bias piuttosto elevata (questo di solito è considerato un difetto, specialmente se si realizzano circuiti integratori). Il circuito è riportato in Figura 13. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale 1458, codice MC1458
- Condensatore a film $C = 100nF$
- Resistenza $R = 330k\Omega$,
- Interruttore a bottone FSM2JART

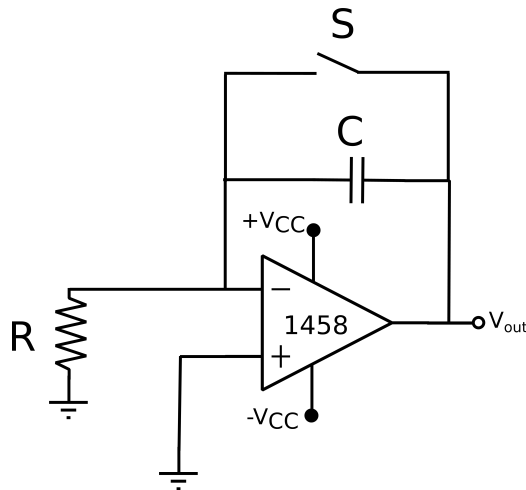


Figure 13: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale $\pm V_{CC} = \pm 10V$.

4.1 Analisi del datasheet

Sulla base delle informazioni contenute nel datasheet del 1458, si è ricavata la corrente di bias tipica

$$I_{bias} = 80nA$$

4.2 Procedure e risultati

Abbiamo connesso un multimetro digitale all'uscita V_{out} , come si vede in Figura 14

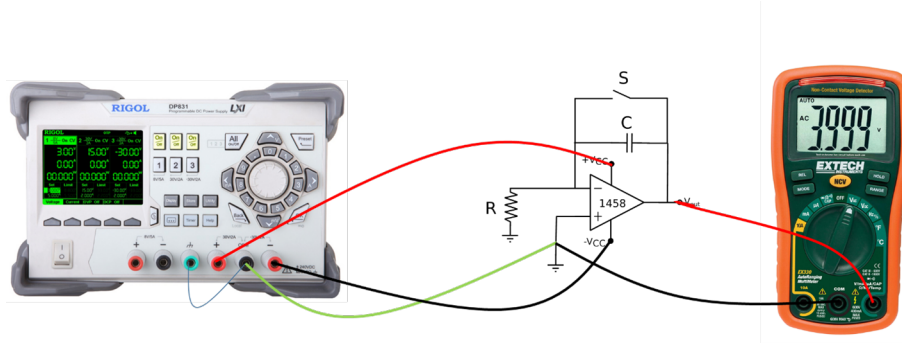


Figure 14: Schema di collegamento del circuito in Figura 13

Durante il controllo preliminare, con il circuito disalimentato e la capacità C scarica, è risultata una lettura di 0V sul multimetro.

Una volta alimentato, data la non idealità dell'amplificatore operazionale, la tensione di uscita V_{out} ha mostrato un aumento lineare nel tempo fino alla saturazione. Questo effetto è dovuto alla corrente di bias che viene integrata dall'operazionale, generando una cauta di tensione sul condensatore C .

Premendo l'interruttore S è possibile scaricare il condensatore; invece quando l'interruttore viene rilasciato riparte il processo di integrazione della corrente di bias.

Partendo dallo stato di capacità C scarica, al rilascio dell'interruttore si fa partire un cronometro e lo si ferma quando il valore della tensione di uscita ha raggiunto 2.5V. Si è deciso di compiere 5 misure di tempo e di svolgere la media in modo da avere un risultato più accurato.

$$t(V_{out} = 2.5V) = 13.72s \quad (5)$$

Successivamente è stata stimata la corrente di bias dell'amplificatore operazionale

$$I_{Bias} = 18.22nA \quad (6)$$

Il calcolo è stato svolto utilizzando la relazione tensione-corrente del condensatore

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} \implies I_{Bias} = C \frac{V}{t} \quad (7)$$

Tale valore si discosta dal valore fornito dal produttore in quanto nel datasheet è fornita la corrente di bias tipica al caso peggiore.

4.2.1 Risultati in seguito all'aggiunta di un resistore al morsetto non invertente

Come si vede dalla Figura 15 è stato aggiunto un secondo resistore al morsetto non invertente, con lo scopo di ridurre significativamente l'effetto della corrente di bias.

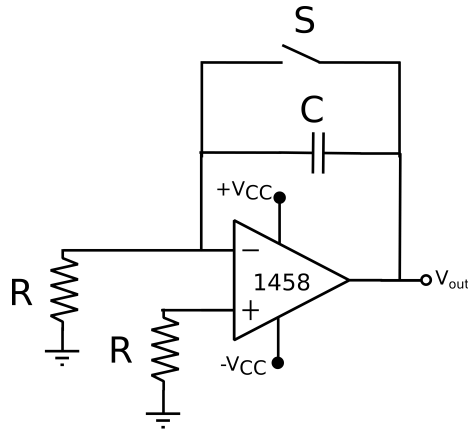


Figure 15: Schema circuito con resistenza al morsetto non invertente

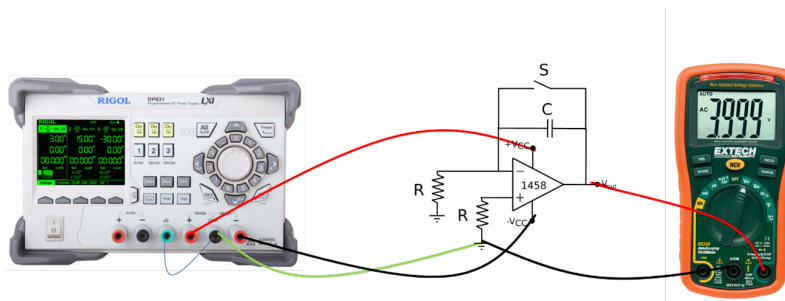


Figure 16: Schema di collegamento del circuito in Figura 15

Ripetendo la modalità di misurazione del punto precedente si è osservato che la tensione aveva un andamento decrescente, non arrivando di fatto mai al valore di 2.5V. Questo è dovuto sempre alle asimmetrie dell'operazionale e quindi ad una corrente I_{OS} negativa.

5 Quinto esperimento

Lo scopo di questa esperienza è la misurazione sperimentale delle caratteristiche (guadagno, frequenza di taglio, diagrammi di Bode) di un **filtro passa-basso** basato sull'operazionale LM1213. Il circuito è riportato in Figura 17. Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale 1213, codice ML1213
- Condensatore a film $C = 100nF$
- Resistenza R_1 , da 0.25W e valore da calcolare
- Resistenza R_2 , da 0.25W e valore da calcolare

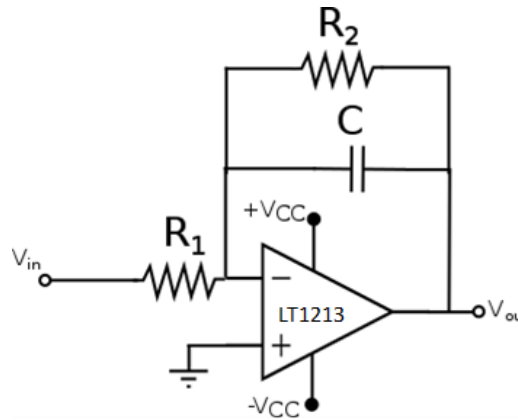


Figure 17: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale $\pm V_{CC} = \pm 10V$.

5.1 PRELAB

5.1.1 Calcolare l'espressione della risposta in frequenza del filtro in Figura 17

Si ricavano le due impedenze: $Z_1 = R_1$ e $Z_2 = \frac{R_2}{sC}$. L'espressione della risposta in frequenza del filtro passa basso è

$$G(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + sCR_2} \quad (8)$$

5.1.2 Definizione dei valori di R_1, R_2

E' richiesto di determinare i valori di R_1, R_2 affinché il filtro passa-basso ha guadagno in bassa frequenza pari a 0dB e frequenza di taglio pari a 1kHz. Dalla funzione di trasferimento del filtro si ottiene l'espressione del guadagno a bassa frequenza

$$A_0 = -\frac{R_2}{R_1} = 0dB \implies \frac{R_2}{R_1} = 1 \implies R_2 = R_1 \quad (9)$$

Dalla frequenza di taglio si ricava il valore delle resistenze

$$F = \frac{1}{2\pi R_2 C} = 1 \text{ kHz} \Rightarrow R_2 = R_1 = \frac{1}{2\pi C F} \approx 1.6 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

5.1.3 Tracciare il diagramma di Bode del modulo e della fase del filtro

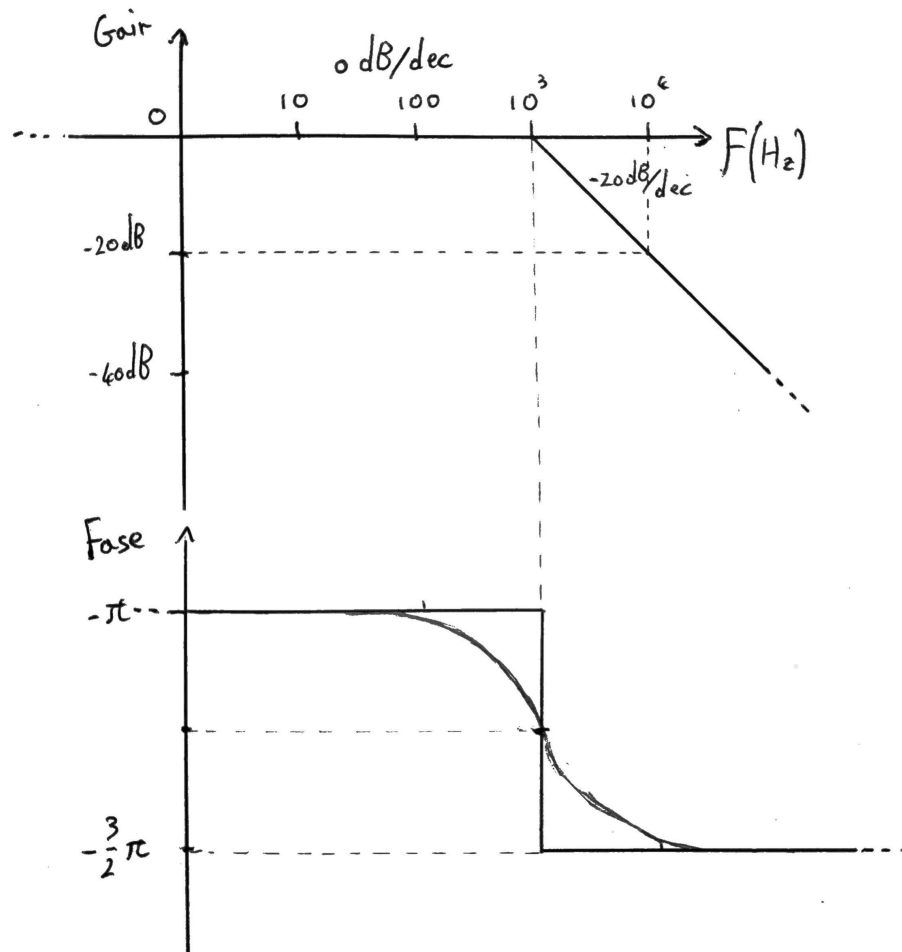


Figure 18: Diagramma di bode

5.2 Simulazione SPICE con LTspice®

Dopo aver riportato lo schematico in Figura 17 su LTspice®, è stata svolta l'analisi in frequenza con la direttiva `.ac dec 100 10 100k` da 10 Hz a 100kHz, il circuito SPICE è mostrato in Figura 19.

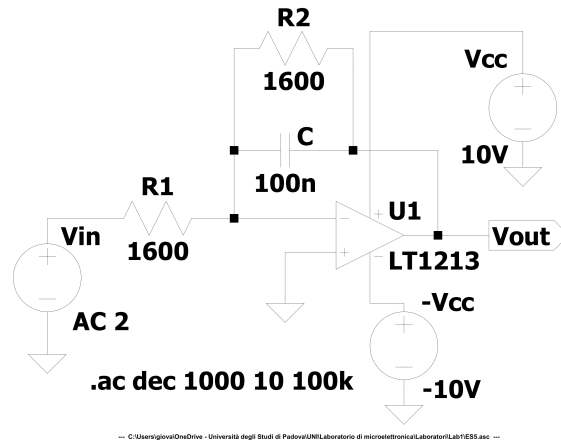


Figure 19: Circuito SPICE

L'analisi in frequenza ha prodotto il seguente diagramma di Bode del modulo e della fase, riportato in figura 20

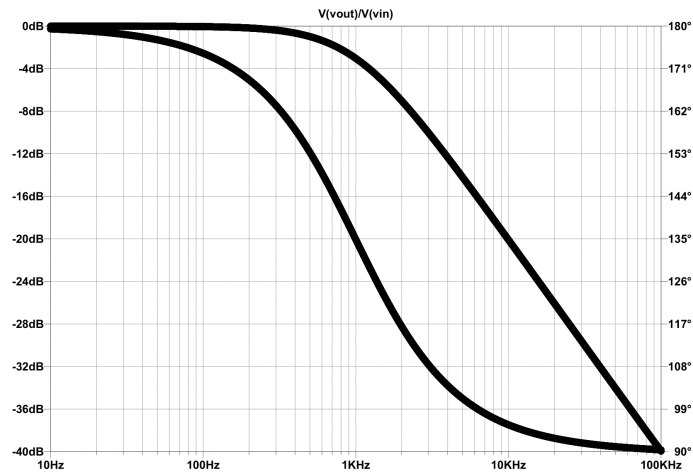


Figure 20: Diagramma di Bode generato da LTspice®

Come si può notare dal diagramma, in corrispondenza della frequenza di taglio a $1kHz$ si ha che la pendenza passa da $0dB/dec$ a $-20dB/dec$, come si prevedeva in base ai calcoli svolti.

Per ricavare il guadagno in bassa frequenza si può utilizzare la direttiva SPICE `.tf v(Vout) Vin` che ci fornisce

$$A_{BF} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -0.999998V/V = 20 \log_{10} (|-0.999998|) = -0.00001737... \approx 0dB \quad (11)$$

Dal grafico si nota che alla frequenza di $1kHz$ il guadagno arriva a -3dB

5.3 Risultati sperimentali

Dopo aver montato il circuito in Figura 17 e averlo connesso al generatore di segnale si è alimentato il circuito con una tensione duale di $\pm V_{CC} = \pm 10V$.

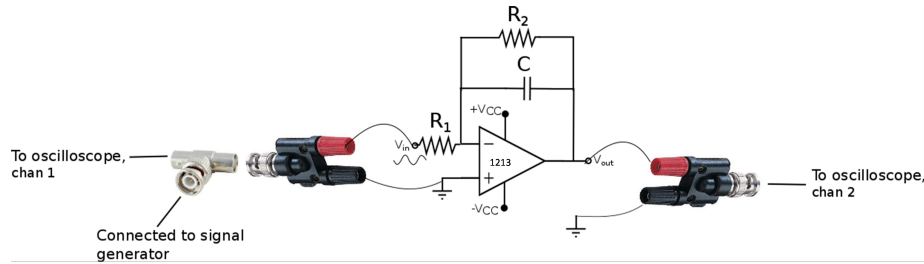


Figure 21: Schema di collegamento del circuito

Il generatore di segnale è stato impostato in modo da applicare in ingresso al circuito il seguente segnale:

- Forma d'onda: sinusoidale
- Ampiezza: $2V_{PP}$
- Frequenza: 10 Hz
- Offset: 0V

Successivamente si sono svolte le misure e il calcolo del guadagno in bassa frequenza del circuito con i valori di tensione picco-picco ricavati dall'oscilloscopio

$$\text{Guadagno BF} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1.00195 =_{dB} 0.016921dB \quad (12)$$

Si è poi concluso misurando il diagramma di Bode del modulo e della fase del filtro in Figura 17, effettuando le misure a diversi valori di frequenza. I risultati sono riportati in Tabella 4

Frequenza (Hz)	V_{outPP} (V)	Guadagno	Guadagno (dB)	Fase
10	1.93125 V	1.0095	0.01692	-179.42°
30	1.93125 V	1.0095	0.01692	-178.3°
50	1.92 V	0.9961	-0.03394	-177.16°
100	1.92 V	0.9961	-0.03394	-174.2°
300	1.8375 V	0.9533	-0.4154	-162.3°
500	1.68825 V	0.8759	-1.1509	-151.5°
1000	1.303 V	0.6760	-3.401	-133.3°
3000	552.4 mV	0.2897	-10.761	-105.3°
5000	358.31 mV	0.1859	-14.614	-99.3°
10000	76.67 mV	0.03977	-28	—°

Table 4: Risultati

I dati rilevati in laboratorio sono stati elaborati con l'ausilio di MATLAB® e riportati nei diagrammi di Bode del modulo e della fase, rispettivamente riportati in Figura 22 e 23.

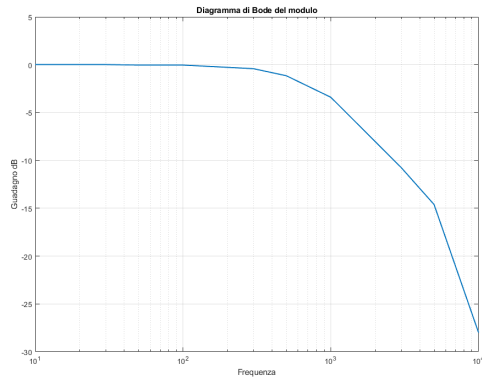


Figure 22: Diagramma di Bode del modulo

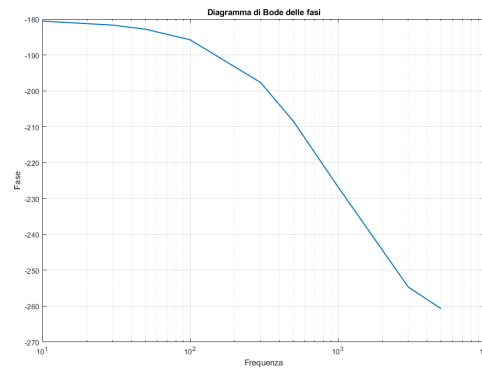


Figure 23: Diagramma di Bode delle fasi

5.4 Conclusioni

Confrontando l'andamento dei diagrammi di Bode misurati, in Figura 22 e 23, con quelli simulati mediante LTspice® si può notare che l'andamento è concorde per quanto riguarda il diagramma dei moduli.

Per quanto riguarda il diagramma della fase il valore misurato alla frequenza di 10kHz non aveva un valore stabile sull'oscilloscopio, per tanto, al fine di non incorrere in errori di misura esso è stato trascurato.