

Esperienza di laboratorio

Amplificatori audio in classe A e B

Gruppo A6
Giacomo Calabria - 2007964
Daniele Venturini - 1195858

14 April 2023

Contents

1	Primo esperimento	3
1.1	Dimensionamento del circuito - prelab	4
1.2	Analisi in frequenza del circuito - prelab	5
1.3	Risultati laboratorio: prima parte	5
1.4	Risultati laboratorio: seconda parte	6
1.5	Risultati laboratorio: terza parte	8
1.6	Risultati laboratorio: ultima parte	9
2	Secondo esperimento	10
2.1	Assemblaggi e settaggi	10
2.2	Procedura di valutazione e risultati	11
2.2.1	Lettore MP3	12
2.2.2	Commenti	12
3	Terzo esperimento	12
3.1	Considerazioni sul circuito	12
3.2	Assemblaggi e settaggi	13
3.3	Procedura di valutazione e risultati	13
4	Amplificatore audio in classe AB	15
4.1	Dimensionamento circuito	15
4.2	Procedura di valutazione e risultati	15
5	Conclusioni	17

INTRODUZIONE

Lo scopo dell'esperienza di laboratorio è studiare e valutare mediante misure di laboratorio le proprietà degli stadi di potenza degli amplificatori in classe A e B. Verranno poi valutate le distorsioni di crossover di ciascuno stadio, implementando una metodologia per la riduzione della distorsione di crossover mediante l'uso della retroazione.

Il circuito realizzato in questa esercitazione è un amplificatore adatto per amplificare il segnale generato da una piccola radio o da un lettore MP3.

Strumentazione necessaria:

- Generatore di forma d'onda arbitraria
- Oscilloscopio a 2 canali
- Alimentatore da banco
- 1 connettore BNC a "T"
- 2 connettore BNC maschio/banana femmina
- 1 connettore BNC femmina-femmina
- 1 cavo BNC
- Cavo 1 mm
- Spellafili
- Lettore MP3

1 Primo esperimento

In questo primo esperimento si vuole dimensionare, costruire e studiare un amplificatore in classe A con specchio di corrente. Il circuito è rappresentato in Figura 1 ed è composto da tre blocchi principali:

- Il primo stadio a sinistra è un buffer, connesso a una rete RC (R_1 e C_1), che ha lo scopo di filtrare la componente continua del segnale V_{in} (che, una volta amplificata, potrebbe danneggiare l'altoparlante).
- Il secondo amplificatore operazionale è connesso in configurazione invertente, e serve a controllare il volume. Il volume massimo è limitato dalla presenza della resistenza R_2 .
- Il terzo stadio (stadio di uscita) è un amplificatore in classe A, alimentato da uno specchio di corrente. I due transistor dello specchio sono bipolari di potenza e - per ottenere prestazioni ottimali - dovrebbero avere caratteristiche simili tra loro.

Sono stati utilizzati i seguenti componenti:

- Q_1, Q_2, Q_3 : transistor NPN di potenza con dissipatore, codice TIP41CG
- Integrato operazionale a doppia uscita *Rail to Rail*, codice MCP6002
- $C_1 = 220$ nF, film condensatore di accoppiamento
- $R_1 = 220$ k Ω , 0.25 W resistenza di ingresso
- R_2 resistenza limitazione volume da calcolare, 0.25 W
- R_{var} potenziometro di regolazione volume da 10k Ω logaritmico
- $R_L = 8$ Ω , 2 W resistenza di carico
- R_S resistenza specchio di corrente da calcolare, 2 W
- Altoparlante 8 Ω , 0.2 W codice AS05008PR-2-R

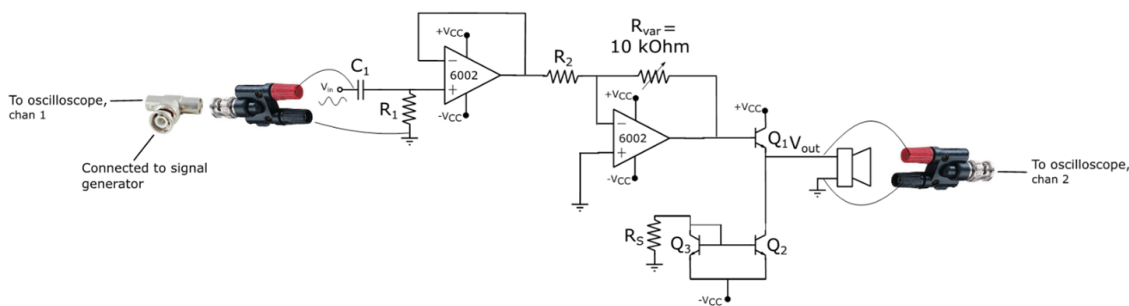


Figure 1: schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale: $\pm V_{CC} = \pm 3V$. Siccome si è a conoscenza che durante l'esperienza i BJT e le resistenze di carico raggiungono temperature elevate, sono stati utilizzati i dissipatori per i transistor bipolari ed è stata prestata particolare attenzione a non toccare tali componenti.

I pinout dell'integrato MCP6002 sono stati ricavati dal datasheet, riportati in Figura 2

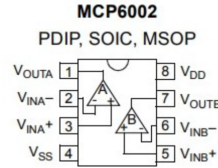


Figure 2: Layout dell'integrato MCP6002

1.1 Dimensionamento del circuito - prelab

Considerato lo specchio di corrente in Figura 3. Per prima cosa è stato calcolato il valore della resistenza R_S in modo da garantire una corrente sul carico ($R_L = 8 \Omega$) pari a 0.3 A anche quando il transistor Q_1 è spento. Per determinare tale valore è stata utilizzata la (1)

$$I = \frac{V_{CC} - V_{BE,3}}{R_S} \implies R_S = 3.33 \Omega \quad (1)$$

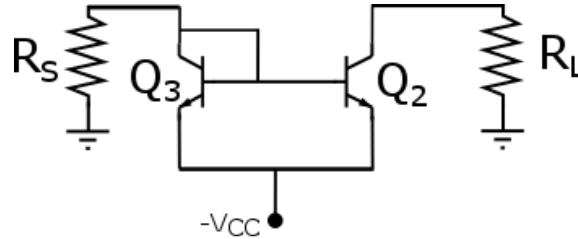


Figure 3: Schema circuito dello specchio di corrente

Data la disponibilità del laboratorio si è poi scelto di utilizzare una resistenza da $8 \Omega, 2 W$.

La resistenza R_2 è utilizzata per limitare il volume massimo del circuito ed evitare il surriscaldamento dei transistor. La specifica di progetto impone di limitare il guadagno dello stadio invertente (V_A/V_F) al valore massimo di 26.0 dB, quindi con l'ausilio delle formule seguenti

$$(A_v)_{dB} = 20 \log_{10} A_v \quad \text{e} \quad A_v = -\frac{R_{var}}{R_2} \quad (2)$$

si è ricavato il valore di R_2 che risulta pari a 501.25Ω . In laboratorio è stata utilizzata una resistenza da 500Ω .

1.2 Analisi in frequenza del circuito - prelab

Infine è stata calcolata la frequenza di taglio del filtro RC in ingresso.

$$\omega_C = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_1 C_1} = 20.66 \quad [\text{rad/s}] \quad (3)$$

Il diagramma di Bode della funzione di trasferimento V_F/V_{in} è riportato in Figura 4.

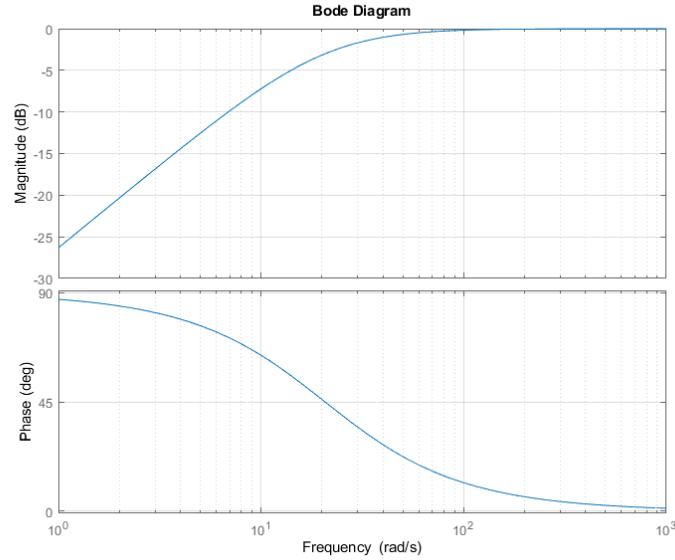


Figure 4: Diagramma di Bode

1.3 Risultati laboratorio: prima parte

Dopo aver montato lo specchio di corrente (Figura 3) sulla breadboard, lo si è polarizzato a $-V_{CC} = -3 \text{ V}$ e sono state misurate con il multimetro le correnti sulle resistenze R_S e R_L

$$I_{R_S} = 0.28 \text{ mA} \quad I_{R_L} = 0.27 \text{ mA}$$

Si può riscontrare una minima differenza fra i due valori di corrente, data dalle tolleranze tra i componenti.

1.4 Risultati laboratorio: seconda parte

Successivamente si è proceduto ad analizzare lo stadio di filtraggio ed amplificazione del segnale. Per questa parte è stato scollegato lo specchio di corrente per evitare l'inutile riscaldamento dei transistor durante le misure. Quindi sono stati montati il filtro e il preamplificatore in Figura 5

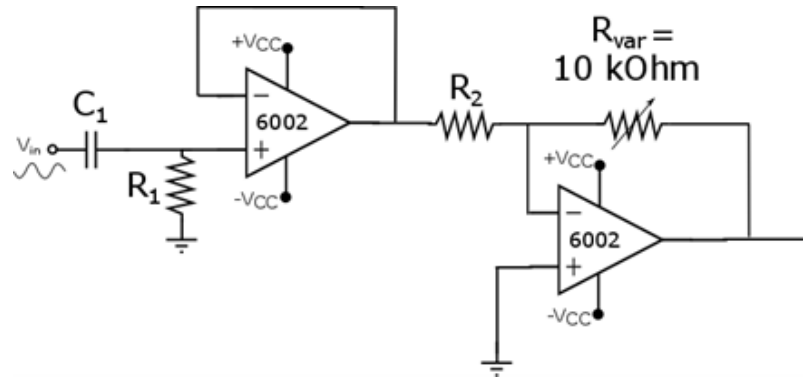


Figure 5: Schema circuito filtro e preamplificatore

In seguito è stato collegato il connettore a "T" BNC all'uscita del generatore; una terminazione all'ingresso del circuito V_{in} e l'altra estremità al canale 1 dell'oscilloscopio. Infine l'uscita dell'amplificatore invertente al canale 2 dell'oscilloscopio. Come si vede dai collegamenti in Figura 6

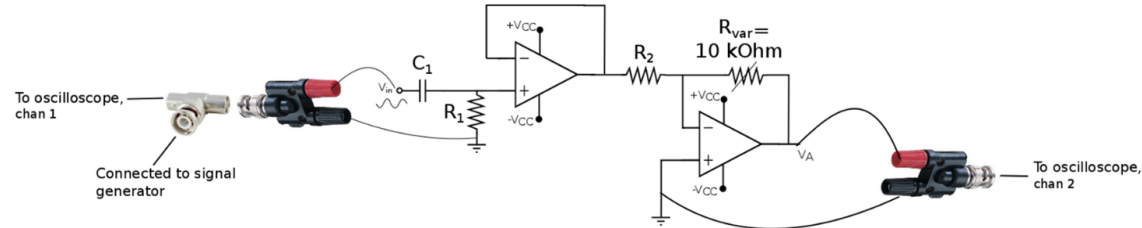


Figure 6: Schema di collegamento della strumentazione

Si è impostato il generatore di funzioni per fornire in ingresso al circuito il segnale:

- Forma d'onda: sinusoidale
- Frequenza: variabile tra 1 Hz e 1000 Hz
- Ampiezza: 100 mV picco-picco

Il potenziometro R_{var} è stato regolato in modo di avere il massimo guadagno, che corrisponde ad avere il potenziometro a 10 k Ω . Quindi è stata fornita l'alimentazione $\pm V_{cc} = \pm 3$ V all'integrato e è stato misurato con l'oscilloscopio il segnale di uscita del circuito alle varie frequenze di ingresso. Si riporta in Tabella 1 le misure effettuate e il guadagno $|V_A/V_{in}|_{dB}$ del circuito.

Frequenza (Hz)	$V_{A_{pp}}$	$ V_A/V_{in} _{dB}$
1	610mV	15.119
3	1.34V	21.954
5	1.68V	23.919
10	1.9V	24.987
30	1.99V	25.389
50	1.99V	25.389
100	1.99V	25.389
300	2V	25.433
500	2.01V	25.476
1000	2.03V	25.562

Table 1: Misura del guadagno $|V_A/V_{in}|_{dB}$

Il diagramma di Bode in Figura 7, tracciato a partire dai dati in Tabella 1, è stato confrontato con l'andamento teorico calcolato nella Sezione 1.1, si nota che il valore R_2 scelto permette effettivamente di limitare il guadagno del circuito a 26.0 dB. Inoltre il diagramma in Figura 4 è stato tracciato considerando il solo filtro, con relativo buffer e non lo stadio di amplificazione; questo giustifica il discostamento dal diagramma di Bode in Figura 7.

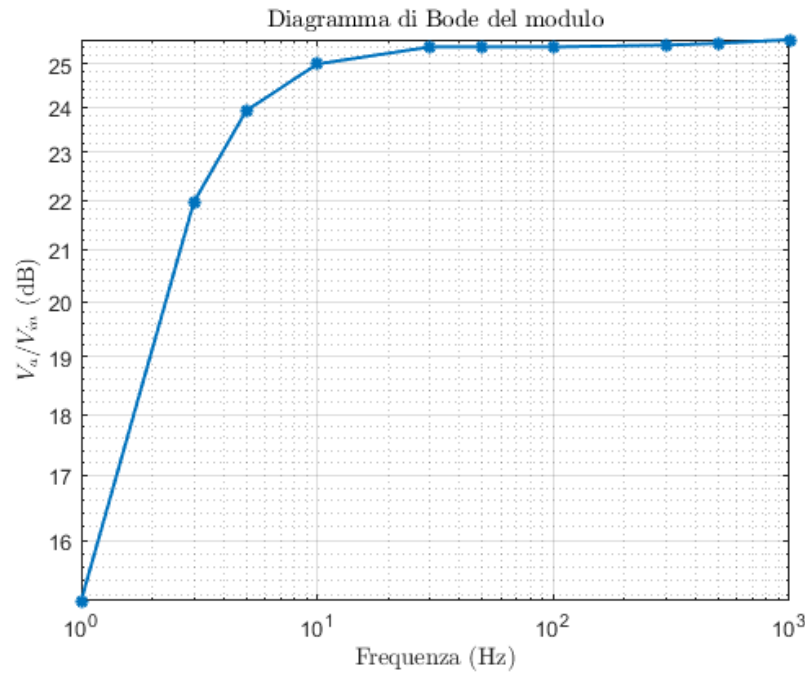


Figure 7: Diagramma di Bode dai dati della Tabella 1

1.5 Risultati laboratorio: terza parte

Lo stadio in classe A è stato collegato al filtro, come indicato in figura 1. Il circuito è stato connesso all'alimentazione, al generatore di segnale e all'altoparlante.

Il segnale applicato in ingresso ha le seguenti caratteristiche

- Forma d'onda: sinusoidale
- Frequenza: 330 Hz (nota Mi)
- Ampiezza: 100 mV picco-picco

Il potenziometro del volume R_{var} è stato regolato in modo da raggiungere un'ampiezza di $1 V_{pp}$ sul segnale di uscita.

L'oscilloscopio è stato impostato in modo da misurare il segnale di ingresso V_{in} e di uscita V_{out} . Si riporta in Figura 8 la schermata dell'oscilloscopio con i due segnali

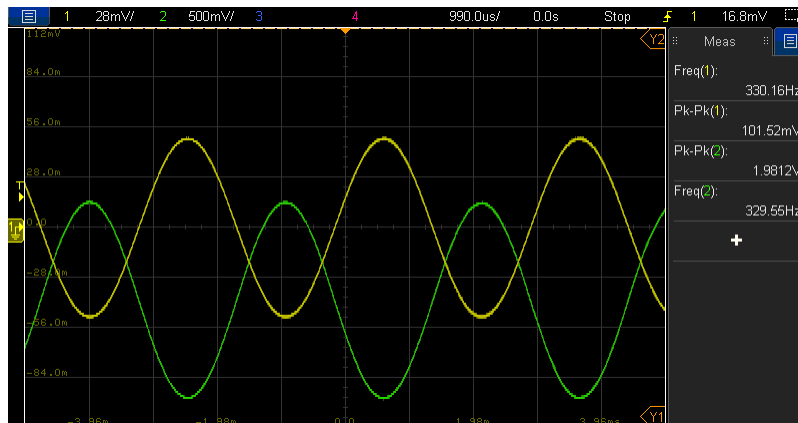
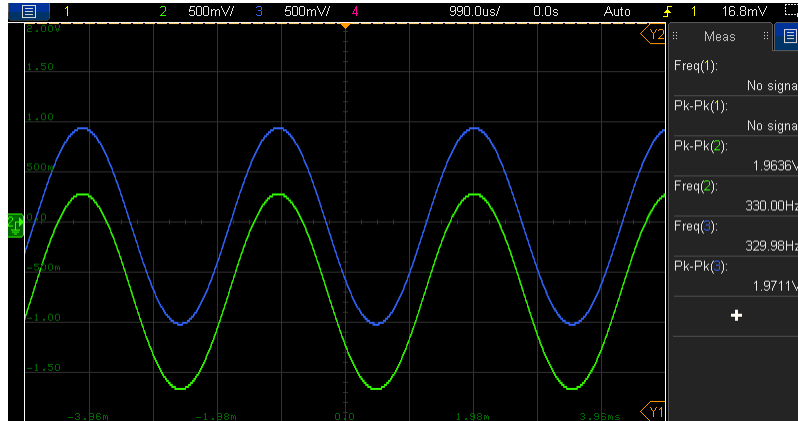
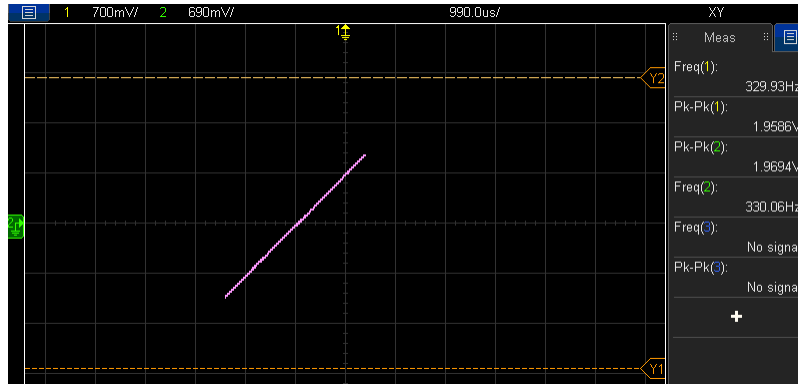


Figure 8: Segnale in ingresso e in uscita dall'amplificatore

Non si è arrivato a $1 V_{pp}$ in quanto le componenti non lo permettevano. Infatti si può vedere che pur portando il potenziometro a fondo scala il segnale di uscita V_{out} è rimasto a $1.9812 V_{pp}$.

Poi sono stati misurati i segnali V_{out} e $V_{B,Q1}$. In Figura 9 è riportata la schermata di acquisizione in modalità "normale" e in Figura 10 la schermata di acquisizione in modalità XY, con l'intento di misurare la differenza tra i due segnali.

Figure 9: Segnali V_{out} e $V_{B,Q1}$ Figure 10: Segnali V_{out} e $V_{B,Q1}$ in modalità XY

Dalla Figura 9 si può ben apprezzare che la differenza tra i due segnali è costante in tutto il periodo, infatti in modalità XY (Figura 10) si è ottenuta una retta. Come si poteva facilmente prevedere la differenza è pari a V_{be} . Analizzando la Figura 9 notiamo che in corrispondenza dello zero del segnale 1 (asse X corrispondente a V_{out}) abbiamo un offset del segnale 2 (asse X corrispondente a $V_{B,Q1}$) pari a circa $\sim +700$ mV, che è appunto la differenza tra i due segnali.

1.6 Risultati laboratorio: ultima parte

Infine si è stimata l'efficienza del circuito in queste condizioni, la V_{OP} è stata misurata pari a 0.2766 V da cui abbiamo poi ricavato

$$\eta = \frac{\text{load power}}{\text{supply power}} = \frac{1}{2} \frac{V_{OP}^2}{R_L} \frac{1}{2V_{CC}I} = \frac{1}{4} \frac{V_{OP}^2}{IR_L V_{CC}} = 0.7969\% \quad (4)$$

Si può apprezzare come l'amplificatore in classe A sia praticamente esente da distorsioni ma soffre di una efficienza bassissima, questo si è notato anche durante gli esperimenti in quanto i componenti

del finale di potenza si sono particolarmente surriscaldati.

Si conclude l'esperienza connettendo un dispositivo con jack a 3.5mm all'uscita del circuito, tuttavia l'altoparlante non funzionava correttamente quindi si è deciso di usare una resistenza da 8Ω . Tale resistenza è stata utilizzata anche nelle esperienze successive in sostituzione dell'altoparlante.

2 Secondo esperimento

In questo esperimento si vuole costruire e studiare un amplificatore in classe B, realizzato tramite push-pull. Il circuito è riportato in Figura 11.

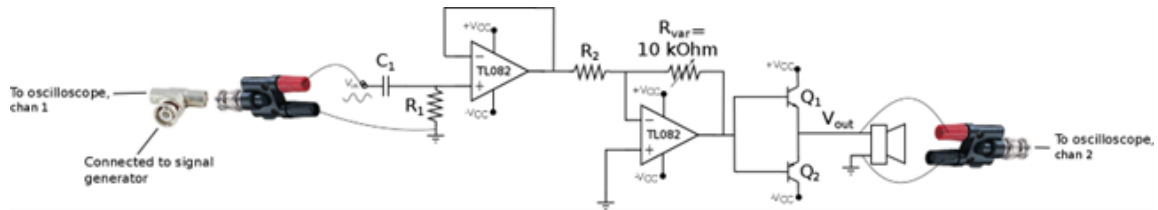


Figure 11: Schema circuito

Il circuito è alimentato dalla tensione duale: $\pm V_{CC} = \pm 3V$.

Il funzionamento per i primi 2 stadi è uguale a quanto detto nel Paragrafo 1, mentre lo stadio di uscita permette di avere un rendimento migliore di quello ottenuto nell'esperienza precedente. L'efficienza di questo tipo di stadio è dovuta all'attivazione di un solo transistor per semionda. Tuttavia, come si vedrà successivamente, questo circuito ha l'inconveniente di una sensibile distorsione di crossover, dovuta alla soglia di conduzione dei transistor.

2.1 Assemblaggi e settaggi

Il circuito in Figura 11 è stato realizzato modificando direttamente lo schema in classe A (Figura 1) con uno stadio in classe B e sostituendo l'integrato MCP6002 con l'integrato TL082CP.

Lo stadio in classe B push-pull è stato realizzato utilizzando l'accoppiamento di un transistor di potenza NPN (Q_1), codice TIP41CG e un transistor PNP di potenza (Q_2), codice TIP42CG. Le altre componenti sono rimaste invariate dal Primo esperimento

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

- Forma d'onda: sinusoidale
- Ampiezza iniziale: $100mV$ picco-picco
- Frequenza: $330Hz$ (nota Mi)

2.2 Procedura di valutazione e risultati

Dopo aver acceso l'alimentazione, l'oscilloscopio è stato impostato in modo da visualizzare il segnale di ingresso e il segnale di uscita. Il potenziometro che regola il volume è stato regolato in modo di raggiungere un'ampiezza di $1V_{pp}$ sul segnale di uscita.

Le forme d'onda visualizzate sono riportate in Figura 12

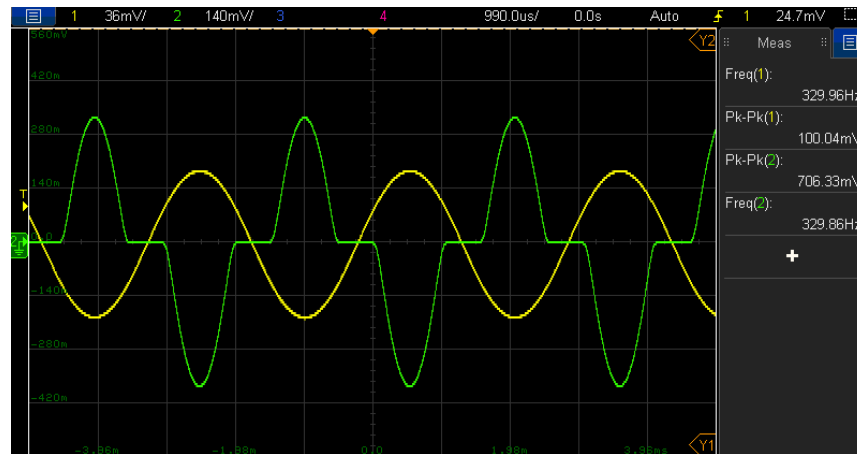


Figure 12: Segnali di ingresso e uscita dell'amplificatore in classe B

Si è proseguito con la misura del tempo morto dovuto alla distorsione di crossover.

$$\text{Dead time} = 503.125\mu s$$

Esso è risultato piuttosto rilevante, considerato che la forma d'onda data in ingresso ha periodo di $T = 3\text{ms}$. Si riporta in Figura 13 il dettaglio della distorsione di crossover

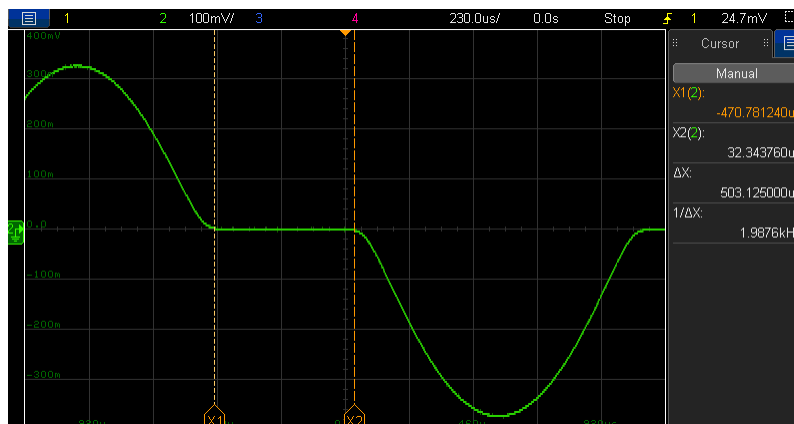


Figure 13: Dettaglio misurazione distorsione crossover

2.2.1 Lettore MP3

Come spiegato nella prima esperienza, si è deciso di utilizzare una resistenza di 8Ω al posto dell'altoparlante, quindi non si è potuto svolgere la prova della riproduzione di una traccia audio. L'obiettivo era quello di sentire l'effetto della distorsione di crossover.

2.2.2 Commenti

Le prestazioni di questo amplificatore sono buone, anche se con qualche compromesso. Infatti a livello teorico il rendimento è molto alto, ci sono poche dispersioni di potenza. Come contro, questo circuito ha una distorsione del segnale di uscita decisamente elevata.

3 Terzo esperimento

In questo esperimento si vuole costruire e studiare un amplificatore *push-pull* in classe B con retroazione e valutare l'effetto della retroazione sulla distorsione di crossover. Il circuito, riportato in Figura 14, è lo stesso utilizzato nell'esperienza precedente, l'unica modifica attuata è quella di introdurre una retroazione tra l'uscita e il morsetto invertente dell'operazionale del secondo stadio. Il circuito viene alimentato dalla tensione duale $\pm V_{CC} = \pm 12V$.

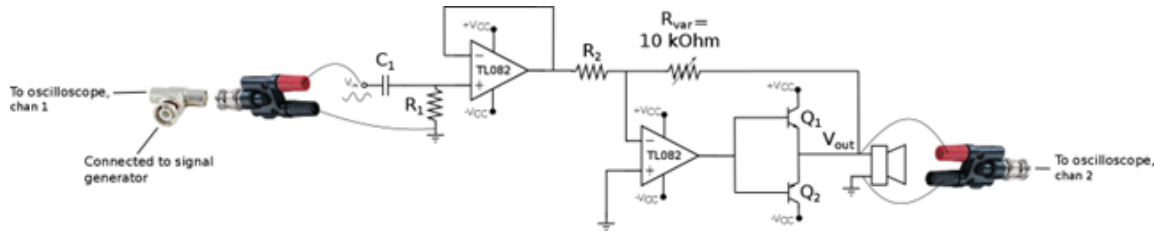


Figure 14: Schema circuito

3.1 Considerazioni sul circuito

Attraverso l'implementazione della retroazione si ottiene l'effetto di attenuazione della zona di crossover in uscita, dato che la retroazione è introdotta dopo i transistor, quindi tiene già in considerazione la caduta di tensione sulle giunzioni base-emettitore dei BJT.

- Se $V_I = 0$ entrambi i transistor sono spenti e $V_O = 0$.
- Se $V_I > 0.5V$ Q_1 si comporta come un inseguitore di emettitore e $V_O = V_I - V_{beQ1}$, mentre Q_2 è spento.
- Se $V_I < -0.5V$ Q_2 si comporta come un inseguitore di emettitore e $V_O = V_I + V_{beQ2}$, mentre Q_1 è spento.

In questo esperimento è stato scelto l'operazione TL082 tenendo in considerazione il valore elevato dello slew rate dell'integrato. Si riporta in Tabella 2 un semplice confronto con lo slew rate degli operazionali LM741 e LM1458 utilizzati negli esperimenti precedenti.

Integrato	Slew rate
TL082	13 $\text{V}/\mu\text{s}$
LM741	0.5 $\text{V}/\mu\text{s}$
LM1458	0.5 $\text{V}/\mu\text{s}$

Table 2: Slew rate degli integrati

Si preferisce utilizzare operazionali con slew rate elevato in quanto ad alte frequenze uno slew rate troppo basso comporta un'accensione/spengimento continuo dei transistor, che è quello che si vuole evitare.

3.2 Assemblaggi e settaggi

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

- Forma d'onda: sinusoidale
- Ampiezza iniziale: 100mV picco-picco
- Frequenza: 330Hz (nota Mi)

3.3 Procedura di valutazione e risultati

Dopo l'accensione dell'alimentazione, l'oscilloscopio è stato impostato in modo da visualizzare il segnale di ingresso e il segnale di uscita. Il potenziometro che regola il volume è stato regolato in modo che il segnale di uscita raggiunga un'ampiezza di $1V_{pp}$.

In Figura 15 si possono vedere le forme d'onda dei segnali di ingresso e uscita

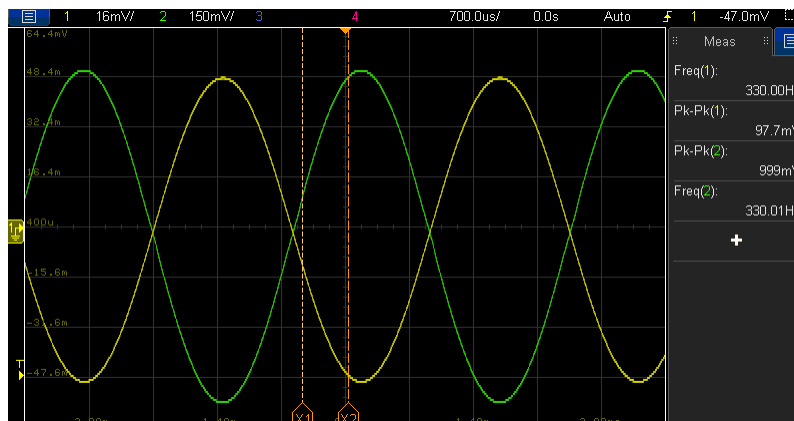


Figure 15: Segnali di ingresso e uscita dell'amplificatore in classe B con retroazione

Si è proseguito misurando, attraverso i cursori dell'oscilloscopio, l'effetto della distorsione di crossover. Tuttavia, come si vede in Figura 16, esso è stato completamente eliminato dalla nuova configurazione del circuito.

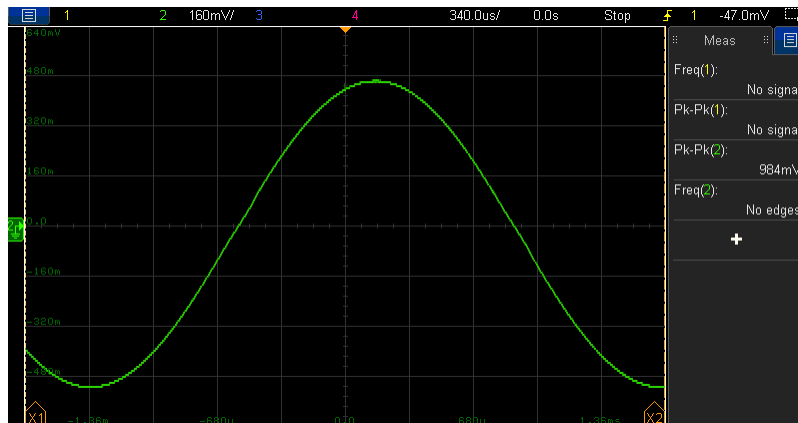


Figure 16: Dettaglio segnale di uscita

L'unica differenza introdotta nel circuito è il feedback fornito all'amplificatore operazionale, antecedente il push-pull di uscita. Questo tipo di retroazione consente al segnale di ingresso di operare già tenendo conto della caduta di tensione ai capi del transistor, ottenendo così un valore di uscita che consente di bypassare parte della distorsione del crossover dovuta alla zona morta di attivazione del BJT.

4 Amplificatore audio in classe AB

In questo esperimento si vuole studiare un amplificatore in classe AB. Il circuito, riportato in Figura 17, è alimentato dalla tensione duale $\pm V_{CC} = \pm 12V$.

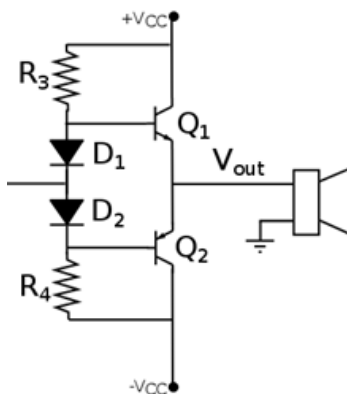


Figure 17: Schema circuito

I due diodi PN (polarizzati dalle resistenze R_3 e R_4) creano una differenza di potenziale circa uguale a $0.6V$ tra il segnale di ingresso e la base dei transistor Q_1 e Q_2 . Di conseguenza, basta che il segnale di ingresso superi di poco la tensione nulla perché uno dei due transistor di uscita entri in conduzione. Rispetto allo stadio in classe B, questo schema presenta una distorsione di crossover trascurabile.

4.1 Dimensionamento circuito

Si è scelto i valori di R_3 e R_4 in modo tale da garantire una corrente di $1mA$ sui diodi D_1 e D_2 (con tensione di ingresso nulla).

Si è scelto quindi

$$R_3 = R_4 = 10k\Omega$$

4.2 Procedura di valutazione e risultati

Mantenendo la tensione in ingresso $V_{in} = 0$, con il multimetro sono state misurate le correnti sulle resistenze R_3 e R_4

$$I_{R_3} = 1.14mA \quad I_{R_4} = 1.21mA$$

e la caduta di tensione sui due diodi D_1 e D_2

$$V_{D_1} = 0.612V \quad V_{D_2} = 0.606V$$

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

- Forma d'onda: sinusoidale
- Ampiezza iniziale: 1V picco-picco
- Frequenza: 220Hz (nota La)

L'oscilloscopio è stato impostato in modo da misurare il segnale di ingresso e di uscita. Si riporta in Figura 18 la schermata dell'oscilloscopio con i due segnali

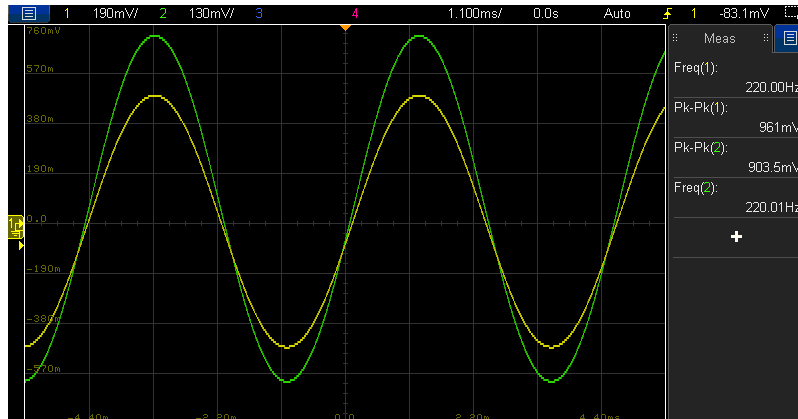


Figure 18: Segnale in ingresso e in uscita dal circuito

Attraverso i cursori dell'oscilloscopio è stata misurata la distorsione di crossover. Come si vede dal dettaglio della Figura 19 è risultato che non è presente alcuna distorsione. Infatti entrambi i diodi a riposo sono polarizzati in zona diretta e permettono di avere i BJT in zona attiva.

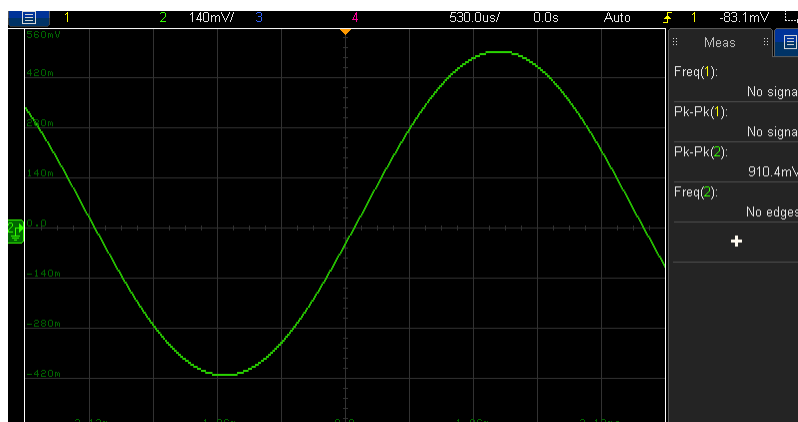


Figure 19: Dettaglio segnale di uscita

5 Conclusioni

Le esperienze di laboratorio hanno lo scopo di introdurre gli amplificatori audio di classe A, B e AB; in particolare la distorsione di crossover e il rendimento dei circuiti. Gli amplificatori di potenza sono classificati in base alla forma d'onda della corrente di collettore del transistor di uscita, che viene generata quando un segnale sinusoidale è applicato all'ingresso.

- L'amplificatore in classe A è caratterizzato da una importante dissipazione di potenza nei transistor sotto forma di calore e l'efficienza è pari a

$$\eta = \frac{\text{load power}}{\text{supply power}} = \frac{1}{2} \frac{V_{OP}^2}{R_L} \frac{1}{2V_{CC}I} = \frac{1}{4} \frac{V_{OP}^2}{IR_L V_{CC}} \quad (5)$$

Dal momento che $V_{OP} < V_{CC}$, e $V_{OP} < I * R_L$, l'efficienza massima si ottiene quando $V_{OP} = V_{CC} = I * R_L$, che è pari al 25%.

- L'amplificatore in classe B è caratterizzato da un intervallo di tensioni di ingresso centrato nell'origine in cui la tensione di uscita è pari a zero, definita distorsione di crossover nel caso in cui l'ingresso del circuito sia sinusoidale. Questa regione è stata verificata nell'esperienza 2. L'efficienza massima è pari a

$$\eta = \frac{\pi}{4} = 78.5\% \quad (6)$$

valore sensibilmente più grande rispetto all'amplificatore di classe A.

- Nell'esperienza 3 si è utilizzato un amplificatore operativo ad alto guadagno retroazionato negativamente per ridurre la distorsione di crossover. Si è potuto constatare che le modifiche sono state efficaci.
- Lo stadio AB è stato utilizzato nell'esperienza facoltativa. Esso si comporta in maniera molto simile allo stadio push-pull (classe B), con la differenza che per bassi valori di V_I entrambi i transistor conducono una piccola corrente. Tale corrente di polarizzazione comporta un maggiore consumo di potenza rispetto allo stadio in classe B.