

Progetto

Maturità:

Amplificatore

Audio a

componenti

discreti 25 watt

RMS x 2 @ 8 ohm

Per progettare un amplificatore audio a componenti discreti, una volta stabilita la potenza, bisogna prima progettare il suo alimentatore, per fare ciò bisogna calcolare innanzitutto la sua tensione di alimentazione. Poiché la potenza RMS è data dalla tensione di alimentazione diviso due volte il carico (8 OHM) si avrà :

$$P_{rms} = (V_{cc})^2 / 2R$$

$$P_{picco \text{ o musicale}} = (V_{cc})^2 / R$$

La prima è la potenza basata sull'effetto joule data dal valore assoluto della semionda, quindi la potenza reale, la seconda è la potenza di picco, data dal valore di picco della semionda (verrà considerata solo la potenza RMS, ma è stato spiegato anche cos'è la potenza musicale, poiché essa viene riportata in molti amplificatori).

Alla tensione di alimentazione si dovrà aggiungere oltre alla tensione che cade effettivamente sul carico, anche la caduta di tensione sui transistor finali e sulle resistenze di stabilizzazione termica dei finali. La prima si trova sul datasheet e corrisponde, nei casi più estremi alla sua  $V_{ce}$  di saturazione, la seconda è standard e varia da circa 1/10 a 1/15 della tensione di alimentazione, perciò la formula diventa :

$$Watt_{RMS} = (V_{cc} - V_{ce} - 1/10 V_{cc})^2 / 2R$$

Per calcolare la tensione di alimentazione sono necessari alcuni passaggi algebrici :

$$Watt_{RMS} * 2R = (V_{cc} - V_{ce} - 1/10 V_{cc})^2$$

$$\sqrt{Watt_{RMS} * 2R} = V_{cc} - V_{ce} - 1/10 V_{cc}$$

Come transistor finali si utilizzano i darlington bdx53c (NPN) e bdx53c (PNP) che presentano  $V_{ce \text{ sat}}$  2,5V perciò :

$$V(25 \cdot 16) = V_{cc} - 2,5 - 1/10 V_{cc}$$

$$20 + 2,5 = V_{cc} - 1/10 V_{cc}$$

$$22,5 = V_{cc}(1 - 1/10)$$

$$(22,5/9) \cdot 10 = V_{cc}$$

$$V_{cc} = 25V$$

La tensione di alimentazione sarà di 25 V continui. Perciò si sceglierà un trasformatore con due secondari da 18 V poiché i 25 V sono in valore assoluto e per calcolare la tensione alternata, prima che sia raddrizzata si usa la seguente formula:

$$V_{cc} / \sqrt{2} = V_{cc} / 1.414 = 17.68 \Rightarrow \pm 18V$$

Normalmente la tensione di alimentazione degli amplificatori non va stabilizzata, poiché la potenza d'uscita non è continua ma impulsiva, si mettono però valori di condensatori elevati, per ridurre il ripple quando lo stadio finale deve erogare una forte corrente, dell'ordine ad esempio dei 10000uF.

La soluzione che ho adottato è quella di mettere due condensatori da 4700uF in parallelo anziché uno da 10000 uF perché così si ha un minor ESR.

La corrente massima che erogherà si verificherà nel caso di utilizzare due altoparlanti da 4 ohm e varrà :

$$I_{max} = 25/4 \cdot 2 = 3.125A$$

Poiché l'amplificatore è a due canali la corrente è doppia quindi 6.25 A.

Per calcolare il ripple si usa la seguente formula:

$$\Delta V = I / (2 \cdot f \cdot C) = 6.25 / (2 \cdot 50 \cdot 0.0094) = 6.65V$$

La massima ondulazione di segnale sarà 6.65, un ripple accettabile considerando che l'amplificatore fornisce una corrente impulsiva, quindi il ripple sarà notevolmente ridotto.

I diodi del ponte raddrizzatore vanno scelti in base alla corrente media che li attraversa ovvero  $I/2 = 3,125$ .

Poiché si usa un trasformatore a presa centrale (per ottenere la tensione duale), andranno utilizzati dei diodi con  $V_{rrm}$  (massima tensione inversa) di almeno il doppio della tensione di secondario ovvero di 18 V.

Il trasformatore dovrà avere una potenza pari o superiore a quella fornita sul carico più quella dissipata dai transistor e dalle resistenze di emettitore :

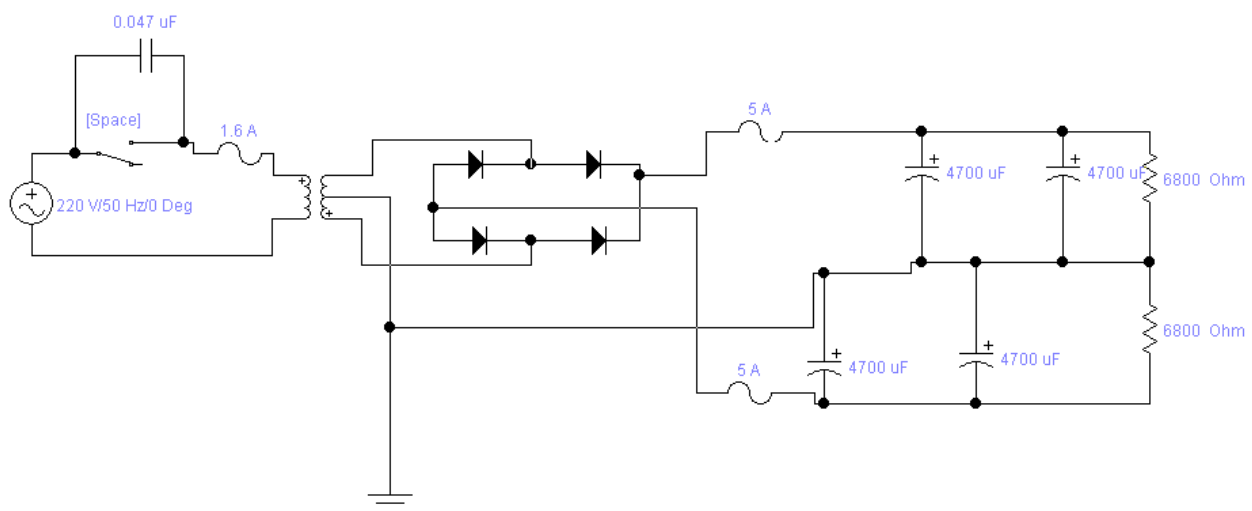
quella dissipata dal transistor è data dalla sua  $V_{CE} \cdot I_{max}$  e vale  $3 \cdot 3,125 = 9,375$  Watt

quella dissipata dalla resistenza è  $1/10 \cdot V_{CC} \cdot I_{max} = 7,812$  Watt (questo valore corrisponderà anche al valore della potenza nominale della resistenza)

Quella sul carico sarà di 50 watt nel caso di altoparlanti da 4 ohm.

Perciò la potenza totale è di:  $50 + 7,812 + 9,375 = 67,187$  Watt

Valore che va moltiplicato per 2 visto che l' amplificatore è a due canali :  $67,187 \cdot 2 = 134,37$  watt, il trasformatore andrebbe preso maggiorato, da 150 watt poiché una minima potenza viene dissipata anche dagli stadi precedenti e dal relè di ritardo per gli altoparlanti. Il circuito dell' alimentatore sarà perciò il seguente :

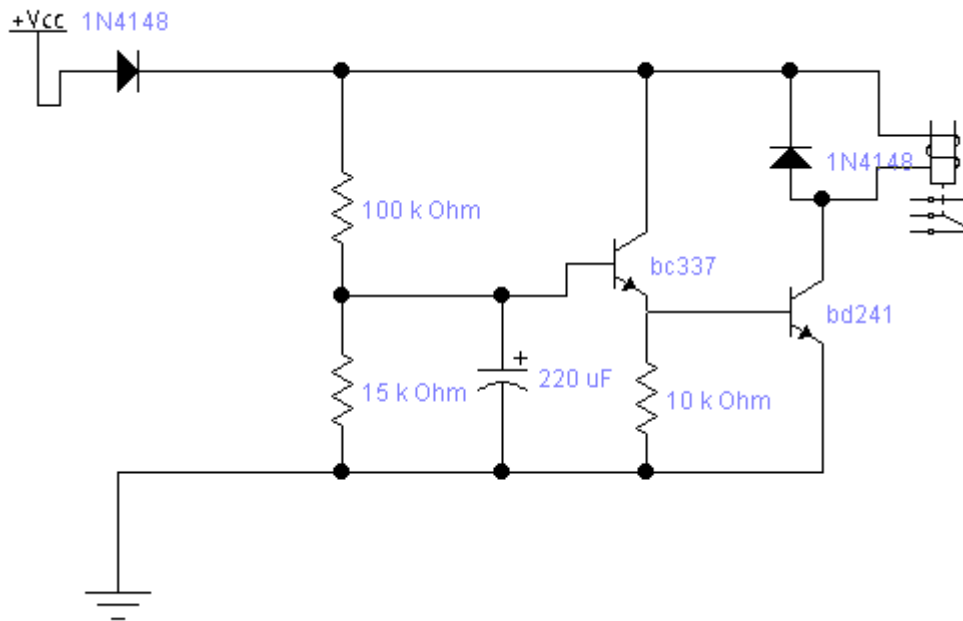


Le resistenze ai capi dei condensatori servono a scaricarli una volta spento l' amplificatore.

Ora si passa alla progettazione del circuito di ritardo per gli altoparlanti.

Gli altoparlanti vanno infatti accesi con un leggero ritardo poiché altrimenti all'accensione si sentirebbe un forte botto dovuto all'eccessiva corrente per caricare i condensatori. Per rimediare a questo inconveniente, si usa mettere un circuito con un relay che ritardi l'accensione dell'uscita.

Poiché il relay funziona a 12 volt, si farà uso dell'integrato LM7812 per ottenere questa tensione stabilizzata. Mentre il circuito di ritardo è il seguente:



Il funzionamento del circuito è molto semplice, il condensatore da 220uF, inizialmente scarico, si caricherà e manderà in conduzione prima il transistor uno e successivamente il secondo.

La relazione che lega il tempo di carica a 1,4 V (tensione di conduzione di entrambi i transistor, poiché  $V_{be} = 0,7 \text{ V}$ ).

Per trovare il tempo di accensione del relay basta calcolare la costante di tempo del circuito.

Il condensatore inizialmente scarico ci metterà per arrivare a 1,5 V il tempo dettato dalla seguente relazione :

$$T = R * C * \ln((V_{fin} - V_{in}) / (V_{fin} - V_t))$$

Dove R e C sono la costante di tempo e vale : 22s

Dove  $V_{fin}$  è la tensione a cui tende il condensatore, ovvero  $V_{cc}-V_{diode}=11,3\text{ V}$

$V_{in}$  è la tensione iniziale del condensatore (0V)

$V_t$  è la tensione che deve raggiungere il condensatore nel lasso di tempo stabilito (1,4V).

Sostituendo a R e C la costante di tempo si otterrà un tempo di carica di :

$$T = 22 \ln 11.3 / (11.3 - 1.4) = 22 \ln 1.141 = 22 * 0.132 = 2.9s$$

Gli altoparlanti verranno accesi con circa 3 secondi di ritardo.

Passiamo ora a progettare l' amplificatore.

Un' amplificatore audio può essere paragonato ad un potente operazionale, deve perciò avere: resistenza di ingresso infinita, resistenza d' uscita nulla, guadagno in banda passante infinito. Per fare ciò dovrà avere :

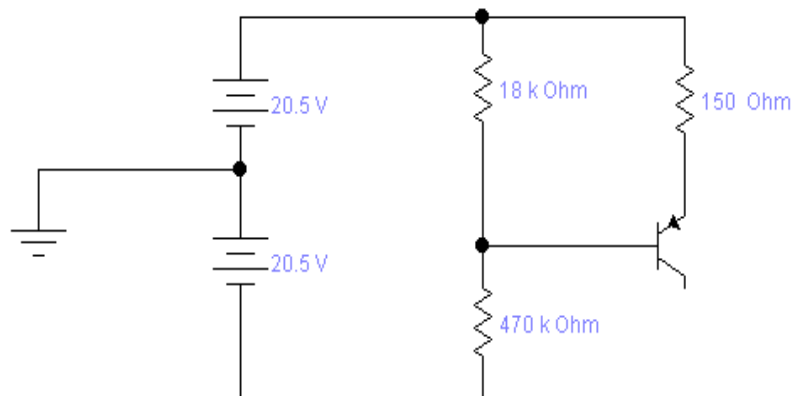
1° stadio : stadio d' ingresso differenziale

2° stadio : stadio di amplificazione

3° stadio : stadio d' uscita o buffer di corrente

Il primo consiste in un differenziale a transistor e presenta elevata resistenza d' ingresso e ingresso differenziale (un fattore importante che ci permetterà di reazionare negativamente l' amplificatore), nonché il primo stadio gode di una modesta amplificazione. Tra il primo stadio e quello di amplificazione che sarà un transistor a emettitore comune, ci sarà un altro transistor “buffer” connesso come collettore comune a disaccoppiare il primo stadio dal secondo. Questo buffer si ripeterà tra il 2 e il terzo stadio ma con una piccola modifica, sull' emettitore del secondo buffer ci sarà un circuito chiamato moltiplicatore di  $V_{be}$  che servirà per polarizzare a riposo i finali e farli lavorare in classe AB. L' ultimo stadio è composto da due darlington con resistenze di stabilizzazione termica per i finali connessi in push-pull (ovver il transistor NPN amplificherà la sola semionda positiva mentre quello PNP amplificherà la negativa).

Per il primo stadio, il secondo e lo stadio pilota sarà necessario un generatore di corrente costante. Per avere un generatore di corrente costante bisogna polarizzare un transistor. Il circuito è il seguente e sul collettore si avrà l' uscita in corrente :



Il transistor che si userà è il BC 327 e presenta per un  $I_c = 10\text{mA}$  un  $H_{fe}$  di 100. Perciò la corrente di base sarà  $I_b = I_c/H_{fe} = 0,1\text{mA}$  quindi la resistenza nel primo ramo sarà  $(25,5 - (-25,5))/I_b = 510\text{kohm}$

per la prima resistenza bisogna avere una tensione molto bassa, per aumentare la dinamica dell' amplificatore, perciò scegliamo 2V, quindi il valore della resistenza sarà :

$$R1 = 510000 * 2/51 = 20000 = \text{valore standard } 18\text{kohm}$$

$$R2 = 425000 * 49/51 = 490\text{k} = \text{valore standard } 470\text{kohm}$$

ora poiché su  $R1$  ci sono circa due volt sulla resistenza di emettitore ci saranno i due volt meno la  $V_{be}$  del transistor che è circa 0,7. La relazione che lega  $I_e$  è :

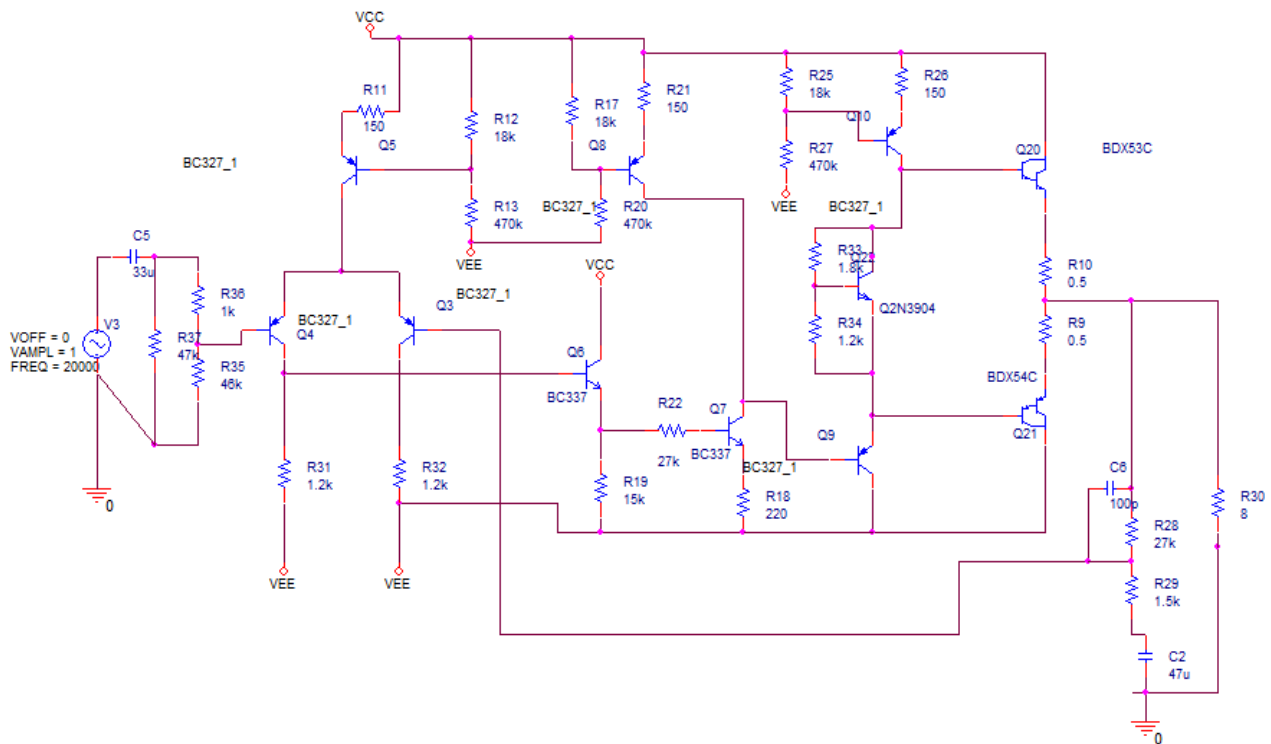
$$I_e = I_b + I_c \text{ poiché } I_b \text{ è trascurabile rispetto a } I_c, I_e = I_c \text{ da cui segue che } R_e = V_e/I_e$$

$$R_e = 1.3/0,010 = 130 \text{ ohm valore standard } 150 \text{ ohm.}$$

Questo circuito che eroga una corrente costante di 0,01mA andrà bene per tutti gli stadi, infatti per l' ultimo sono necessari, per pilotare i darlington, almeno

$I_{max}/H_{fe} = 3,15/1000 = 3,15\text{mA}$ , perciò i 10 mA del generatore sono sufficienti a permettere ai finali di erogare tutta la corrente necessaria.

Il circuito finale è quello presentato in figura



in alto ci sono i 3 generatori di corrente costante e sotto in ordine c'è il differenziale di ingresso con R31 e R32 come resistenze di carico del differenziale e vanno calcolate ponendo su di loro una piccola caduta di potenziale, in modo da avere la maggior dinamica possibile. Ponendo ad esempio 4,5volt si avrà una resistenza di :

$$4,5/I_e/2=4,5/0,0035=1285\text{ohm, valore standard } 1.2\text{k}$$

la caduta di tensione su R31 sarà la stessa di R19 meno la Vbe del transistor, quindi sarà di  $4,5-0,7=3,8\text{V}$  per avere una corrente basse nello stadio di buffer (0,25mA) varrà la legge di ohm :

$$R31 = V_{R31}/0,25\text{mA}= 15200\text{ohm valore standard } 15\text{k}.$$



Ora nello stadio di guadagno si pone un valore di tensione molto basso su R18 ( in modo da aumentare la dinamica d' uscita), scegliamo 2 Volt e la corrente è data dal generatore di corrente costante che corrisponde a 0,007mA.

$$R18 = 2 / 0,0075 = 266 \text{ ohm valore standard } 220 \text{ ohm}$$

per avere una corrente di base di circa  $I_c / 100 = 0,00007$  si avrà una resistenza di base di :

$$3,8 - 2 - 0,7 = 1,1 \text{ V da cui segue che } R22 = 1,1 / 0,00007 = 15714 \text{ valore standard } 15k$$

Infine il moltiplicatore di  $V_{be}$  serve per polarizzare i finali e farli lavorare in classe AB, altrimenti lavorerebbe in classe B ma si verificherebbe la distorsione di crossover, dovuta al fatto che i finali entrano in conduzione solamente con 0,7 volt tra base e emettitore perciò durante le semionde positive e negative del segnale, i transistor condurranno solo quando quest' ultimo supererà i 0,7 V ( che nel nostro caso saranno 1,4 perché i finali sono darlington).



SINUSOIDE NORMALE



SINUSOIDE CON DISTORSIONE  
DI CROSS-OVER

Per ovviare a questo inconveniente si può fare uso di diodi o di un circuito moltiplicatore di  $V_{be}$  formato da un transistor polarizzato con due resistenze e alimentato da un generatore di corrente costante.

Il moltiplicatore di  $V_{be}$  risulta migliore poiché inserendo un trimmer si può regolare con precisione la corrente che scorre nei finali a riposo che dovrà essere di circa 40mA. Inoltre montando il transistor sulla stessa aletta di raffreddamento o a contatto con i finali, si manterrà una perfetta linearità delle caratteristiche di uscita del transistor finale. Il circuito è quello presente in figura costituito da R33 (un trimmer da 4,7k in serie a R33) e R34 e il transistor Q22.

Il moltiplicatore di  $V_{be}$  presenta una resistenza tra base ed emettitore e una resistenza di retroazione tra base ed emettitore, se si trascura la corrente di base del transistor si avrà:

$$I_r = V_{be}/R_{34}$$

dove  $I_r$  è la corrente che scorre nel ramo delle resistenze.

La tensione sulla rete di polarizzazione sarà :

$$V_{bb} = I_r \cdot (R_{34} + R_{33}) \text{ da cui segue infine che } V_{bb} = V_{be} \cdot (1 + R_{33}/R_{34})$$

poiché i finali entrano in conduzione a circa 1,2 v per uno si avrà una  $V_{bb}$  di 2,4 perciò una  $R_{33}$  di  $4R_{34}$ , quindi essendo  $R_{34}$  di 1,2k  $R_{33}$  si aggirerà intorno a 4,8k che verrà regolata con precisione dal trimmer posto in serie a una resistenza da 1,8k.

Infine ci vorranno due resistenze di emettitore, che assorbiranno circa  $1/15$  della tensione di alimentazione, per stabilizzare termicamente i transistor ed impedire la “fuga termica”. Perciò se la massima escursione è di  $V_{cc} - V_{ce\text{ Sat}} = 25,5 - 2,5 = 23V$

e la massima corrente è di 3.15 A si avrà una  $R$  di  $23V / 3,15 A \cdot 1/15 = 0,486 \text{ ohm}$

valore standard 0,47 ohm e dovrà dissipare una potenza di  $23 \cdot 3,15 \cdot 1/15 = 4,83 \text{ watt}$ .

Infine si stabilisce il guadagno che è dato da  $1 + R_{28}/R_{29}$  perciò sarà di 23,5

$$\text{in DB è } 20 \cdot \log 23,5 = 27\text{DB}$$

Per minimizzare l' offset si mette una resistenza tra l' ingresso e la massa, dello stesso valore di  $R_{28}$ . Infine si calcolano le frequenze di taglio superiori e inferiori del circuito:

$$\text{La frequenza di taglio passa basso è data da } 1/2 \cdot 3.14 \cdot R_{29} \cdot C_2$$

è stato scelto come frequenza di taglio inferiore 3 Hz che sarà il polo dominante mentre il condensatore di ingresso bloccherà solo le componenti continui e avrà una frequenza molto inferiore.

$C_2$  varrà a questo punto :

$$1/6.28 \cdot 3 \cdot 1500 = 35\mu F \text{ valore standard } 33\mu F$$

Usando lo stesso valore del condensatore anche per l' ingresso si avrà una  $f_t$  inferiore di :

$$1/R_{28} \cdot C_2 \cdot 6,28 = 0,18 \text{ heartz che può andare bene perchè è più piccola di almeno un fattore } 10.$$

la frequenza di taglio superiore è data da  $1/6,28 \cdot R_{28} \cdot C_6$

è stato scelto come valore 60 kHz (valore nettamente superiore alla banda di frequenze audio, ma 60kHz bloccherà sia le radiofrequenze e non introdurrà rotazioni di fase nelle frequenze audio udibili). Quindi  $C_6$  varrà

$1/60000 \cdot 6,28 \cdot 27000 = 98p$  valore standard 100p

La progettazione dell' amplificatore è finita, una volta eseguita la simulazione su PSPICE e successivamente il collaudo su breadboard si potrà saldare su millefori o fare un piccolo PCB utilizzando appositi programmi di sbroglio .

Valerio Gregori