



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Југославија
Деканат: 021 350-413; 021 450-810; Централа: 021 350-122
Рачуноводство: 021 58-220; Студентска служба: 021 350-763
Телефакс: 021 58-133; e-mail: ftndean@uns.ns.ac.yu



Сертификован
систем
квалитета



PROJEKAT

IZ PROJEKTOVANJA ELEKTRONSKIH KOLA POMOĆU RAČUNARA

NAZIV PROJEKTA:

Audio pojačavač

TEKST ZADATKA:

Projektovati audio pojačavač tako da je otpornost zvučnika 8Ω i snaga 15W.

MENTOR PROJEKTA:

Prof. dr Miodrag Brkić

PROJEKAT IZRADILI:

Križov David, EE85/2019
Gutić Milija, EE153/2019

U Novom Sadu, 30.07.2023

SADRŽAJ

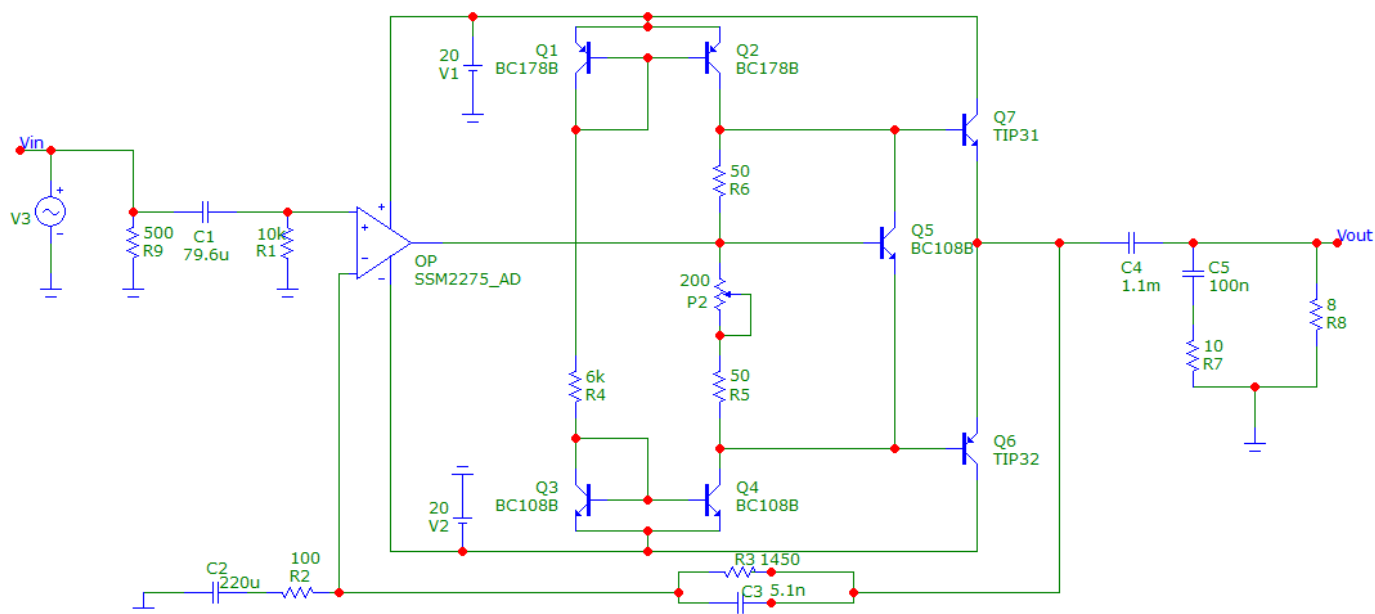
1. UVOD	2
2. ELEKTIČNA ŠEMA KOLA.....	2

3.PRORAČUN I ODABIR KOMPONENTI	4
3.1. Proračun pojačanja pojačavača	4
3.2. Proračun kondenzatora C1 i otpornika R1	4
3.3. Proračun kondenzatora C3.....	5
3.4. Proračun kondenzatora C4	5
3.5. Izbor izlaznih tranzistora Q6 i Q7 i napajanja.....	6
3.6. Projektovanje strujnog ogledala	6
3.7. Izbor tranzistora Q5 i otpornika R5, R6 i potencijometra P2.....	7
4.REZULTATI SIMULACIJA	8
4.1. Mirne radne tačke tranzistora(dinamička DC analiza).....	8
4.2. Propusni opseg pojačavača(AC analiza)	9
4.3. Izlazni signal – tranzijentna analiza	10
4.4. Pojačanje kola u linearnom režimu – tranzijentna analiza	11
4.5. Maksimalni ulazni napon – tranzijentna analiza „stepping“	12
5.MAKSIMALNI KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA	13
6.ZAKLJUČAK	14

1.UVOD

Potrebno je projektovati audio pojačavač koji će sadržati naponski pojačavački stepen i A izlazni stepen. Pojačavač je potrebno projektovati tako da se na njegovom izlazu koristi zvučnik otpornosti 8Ω i snage 15W. Električna šema ovog projekta je realizovana u programu *Micro-Cap* u kom su takođe izvršene simulacije i analize kako bi se proverila funkcionalnost električnog kola.

2.ELEKTIČNA ŠEMA KOLA



Slika 1 Električna šema kola

Na slici 1 je prikazana šematska realizacija audio pojačavača koji radi u A klasi. Napajanje celog kola je simetrično sa $\pm 20\text{V}$ i realizovano je uz pomoć dva diskretna izvora napona koji su na slici označeni sa V1 i V2. Ulazni signal predstavlja sinusni signal amplitude 1V i frekvencije u opsegu od 20Hz do 20000Hz, pri čemu je početna usvojena vrednost 1kHz.

Operacioni pojačavač korišćen za naponski pojačavački stepen je *SSM225/AD*, jer je to jedini operacioni pojačavač za audio signale koji postoji u programskom alatu *Micro-Cap*. Važan podatak za navesti je da ovaj operacioni pojačavač ima koeficijent harmonijskog izobličenja 0.0006% što je jako dobro za kvalitet snage električnog sistema. Otpornici R2 i R3 određuju naponsko pojačanje ovog pojačavača koje iznosi 15,5 što će u nastavku biti detaljnije objašnjeno.

Izlazni puš-pul stepen čine tranzistori Q6 i Q7, koji su ustvari *TIP31* i *TIP32*. Koristimo ih jer imaju velike strujne mogućnosti. Tranzistori Q1, Q2, Q3 i Q4, zajedno sa otpornikom R4 predstavljaju strujno ogledalo. Tranzistor Q6, zajedno sa otpornicima R5 i R6 i potencijetrom P2 služi za polarizaciju tranzistora Q6 i Q7 i određivanje mirne radne tačke izlaznih tranzistora.

Kondenzator C1 služi za odvajanje jednosmernog dela kola od ulaznog signala i sa otpornikom R1 čini VF filter. Kondenzator C2 sprečava pojačanje jednosmernih komponenti i takođe predstavlja VF filter sa otpornikom R2. Kondenzator C4 služi za odvajanje jednosmernog dela kola od izlaza, odnosno zvučnika(i on predstavlja VF filter sa otpornikom R8).

Kondenzator C5 i otpornik R7 predstavljaju Zobelovo kolo koje ima ulogu da eliminiše induktivnost koja se javlja u zvučniku na visokim frekvencijama. Na visokim frekvencijama impedansa zvučnika postaje veća zbog induktivne komponente pa se taj efekat smanjuje time što je R7 u paraleli sa zvučnikom.

Kondenzator $C3$ se koristi za eliminaciju visokih učestanosti. S obzirom da je ovo audio pojačavač i da je potrebno pojačati signale u opsegu od 20Hz do 20kHz, potreban je i jedan NF filter koji će eliminisati sve frekvencije veće od 20kHz. Upravo to je zadatak kondenzatora $C5$ paralelno vezanog otporniku $R5$.

3. PRORAČUN I ODABIR KOMPONENTI

3.1. Proračun pojačanja pojačavača

Potrebno je projektovati pojačavač čija će izlazna snaga 15W, a otpornost 8Ω . S obzirom da je snaga na otporniku jednaka:

$$P = \frac{U^2}{2R} \quad (1)$$

Ova formula važi ako je na izlazu sinusoidni oblik signala. Iz ove formule možemo dobiti vrednost amplitude izlaznog signala.

$$V_{out} = \sqrt{P * 2 * R} \quad (2)$$

Nakon što uvrstimo vrijednosti za snagu i otpornost dobijamo:

$$U = \sqrt{15 * 2 * 8} = 15.5V$$

S obzirom da je amplituda ulaznog signala 1V, zaključujemo da pojačanje treba biti oko 15.5V.

$$A\beta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R3}{R2} \quad (3)$$

$$15.5 = 1 + \frac{R3}{R2}$$

$$\frac{R3}{R2} = 14.5$$

Izabrane vrednosti otpornika su $R3 = 1450\Omega$ i $R2 = 100\Omega$.

3.2. Proračun kondenzatora $C1$ i otpornika $R1$

Pošto je potrebno odvojiti ulazni signal od jednosmerne komponente u kolu, na ulaz se mora dodati kondenzator $C1$. Potrebno je odrediti i vrednost ovog kondenzatora.

Kako je ulazna otpornost operacionog pojačavača velika (u idealnom slučaju je beskonačna), potrebno je dodati otpornik, recimo od 10k, paralelno ulazu u pojačavač. Kondenzator $C1$ zajedno sa otpornikom $R1$ čini VF filtar, potrebna granična frekvencija ovog filtra iznosi 20Hz. Pomoću ovih podataka možemo izračunati vrednost kondenzatora $C1$.

$$fd = \frac{1}{(2*\pi*R1*C1)} \quad (4)$$

$$C1 = \frac{1}{(2*\pi*R1*fd)} \quad (5)$$

$$C1 = \frac{1}{(2*\pi*6k\Omega*20Hz)} = 79.6 \mu F$$

3.3. Proračun kondenzatora C3

Pomoću kondenzatora $C3$, realizovan je NF filtar granične učestanosti fg koja iznosi $fg = 20kHz$. Po analogiji sa (4) imamo:

$$fg = \frac{1}{(2*\pi*R3*C3)}$$

$$C3 = \frac{1}{(2*\pi*R3*fg)}$$

$$C3 = \frac{1}{(2*\pi*1450\Omega*20kHz)} = 5.5nF$$

Međutim, analizom je utvrđeno da sa ovakvom vrednošću kondenzatora dobijamo da je gornja granična učestanost tek manja od željene tako da je izabran kondenzator od 5.1nF.

3.4. Proračun kondenzatora C4

Ovaj kondenzator zajedno sa otpornošću zvučnika $R8$ čini VF filtar. Slično proračunu za kondenzator $C1$, donja granična učestanost je 20Hz i važi slična formula:

$$fd = \frac{1}{(2*\pi*R8*C4)}$$

$$C4 = \frac{1}{(2*\pi*R8*fd)}$$

$$C4 = \frac{1}{(2*\pi*8\Omega*20Hz)} = 1mF$$

Međutim, analizom je utvrđeno da sa ovakvom vrednošću kondenzatora dobijamo da je donja granična učestanost tek veća od željene tako da je izabran kondenzator od 1.1mF.

3.5. Izbor izlaznih tranzistora Q6 i Q7 i napajanja

Maksimalna amplituda napona na zvučniku je 15.5V, to znači da je maksimalna struja kroz zvučnik:

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{R_8} = \frac{15.5V}{8\Omega} = 1.94A$$

To znači da je potrebno odabrati tranzistore čija je kolektorska struja veća od navedene. Takođe potrebno je i uračunati i struju mirne radne tačke (koja bi trebala biti u opsegu od 10mA do 100mA), pa je maksimalna struja koju tranzistor mora izdržati, za najgori slučaj, jednaka:

$$I_{max} = 1.94A + 0.1A = 2.04A$$

Tranzistori *TIP31* i *TIP32* imaju maksimalnu kolektorsku struju od 3A, što znači da su i više nego dovoljni za ovaj opseg.

S obzirom da je potrebno obezbediti amplitudu ulaznog signala priližno 15.5V, potrebno je odabrati napajanje tako da na izlazu dobijemo neizobličen signal. Maksimalni izlazni signal je jednak naponu napajanja (u teoriji), međutim, u praksi imamo padove napona na tranzistorima Q6 i Q7. Da bi se izbegla izobličenja, uzeto je napajanje od +20V i -20V tako da se problem sa izobličenjem sigurno izbegne.

3.6. Projektovanje strujnog ogledala

Pošto strujno pojačanje tranzistora Q6 i Q7 iznosi 15.5, a njihova mirna radna struja 100mA, dolazimo do zaključka da je potrebna bazna struja u tom slučaju:

$$I_b = \frac{I_c}{h_{fe}} = \frac{100mA}{15.5} = 6.45mA$$

Komponenta koja određuje struju strujnog ogledala je otpornik R4 i njegovu vrednost biramo na sledeći način:

$$R_4 = \frac{(V_{cc} - V_{ss} - 0.6V - 0.6V)}{6.45mA} = 6k\Omega$$

Struja ogledala je 6.45mA i potrebno je odabrati tranzistore koji mogu dati tu struju. Tranzistori *BC178B* i *BC108B* mogu dati kolektorsku struju od 100mA što je i više nego dovoljno.

3.7. Izbor tranzistora Q5 i otpornika R5, R6 i potencijometra P2

Tranzistor $Q5$ je izabran da bude isti kao i tranzistori u strujnom ogledalu odnosno $BC108B$.

Ukoliko važi da su naponi baza-emiter, tranzistora $Q5$, $Q6$ i $Q7$ identični (što u praksi skoro nikad nije slučaj), tada važi:

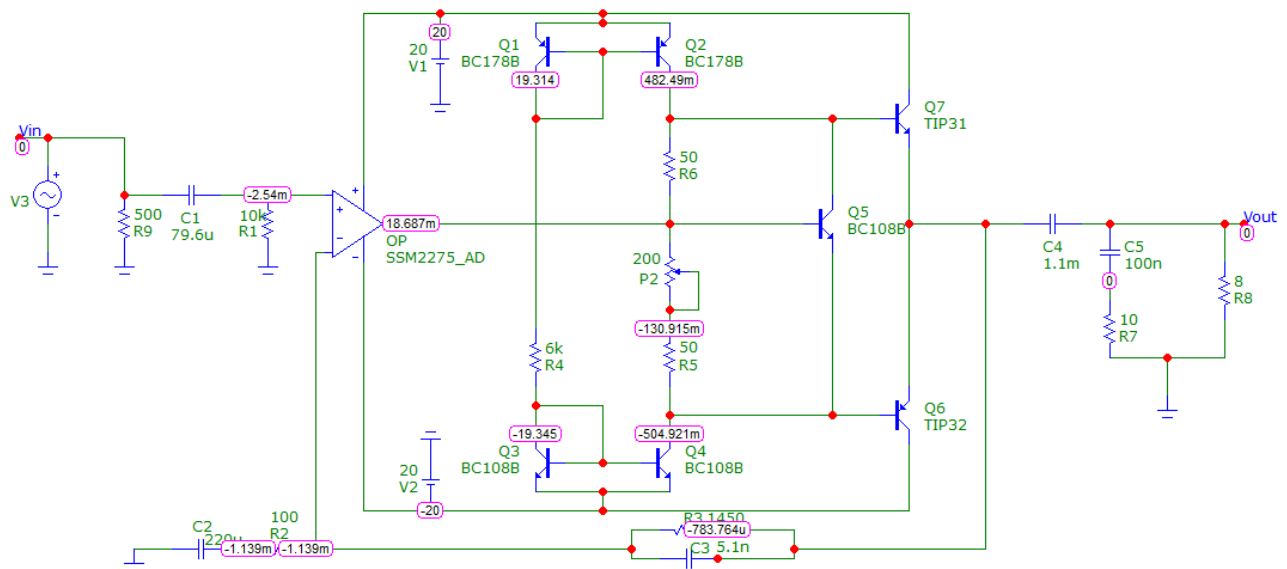
$$V_{ce5} = V_{be6} + V_{eb7} = 2V_{be}$$

Ako pretpostavimo da je $P2$ u krajnjem gornjem položaju tj. kratkom spoju:

$$V_{ce5} = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) * V_{be5}$$

Iz ovih jednačina dobijamo da je $R_6 = R_5$. Otpornici R_5 i R_6 su izabrani da budu 100Ω .

Potencijometar $P2$ je dodat da bi bilo moguće menjati mirnu radnu tačku tranzistora $Q6$ i $Q7$. On je izabran da ima vrednost 200Ω kako bi struja bila u opsegu od 10mA do 100mA (mirna radna struja).



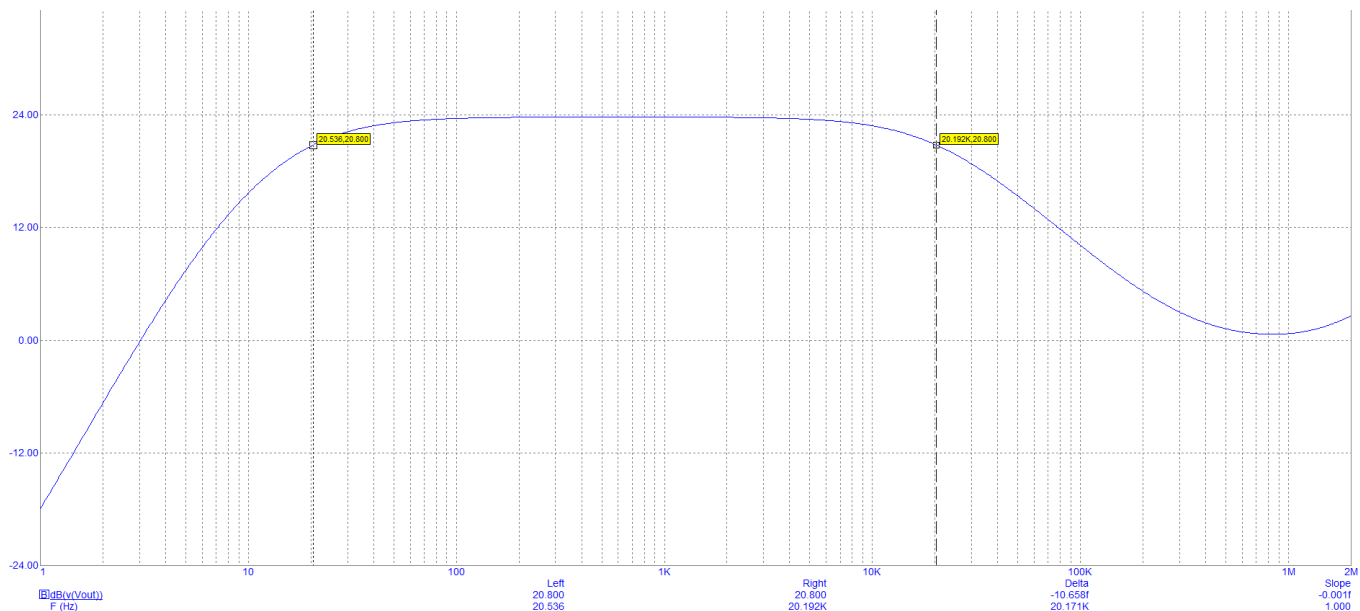
Slika 3 Dinamička DC analiza – naponi

4.2. Propusni opseg pojačavača(AC analiza)

Propusni opseg audio pojačavača određujemo iz AC analize. Propusni opseg audio pojačavača treba da bude u opsegu od 20Hz do 20kHz. Pojaćanje iznosi 15.5 što u decibelskoj skali prestavlja:

$$A[db] = 20\log(15.5) = 23.8dB$$

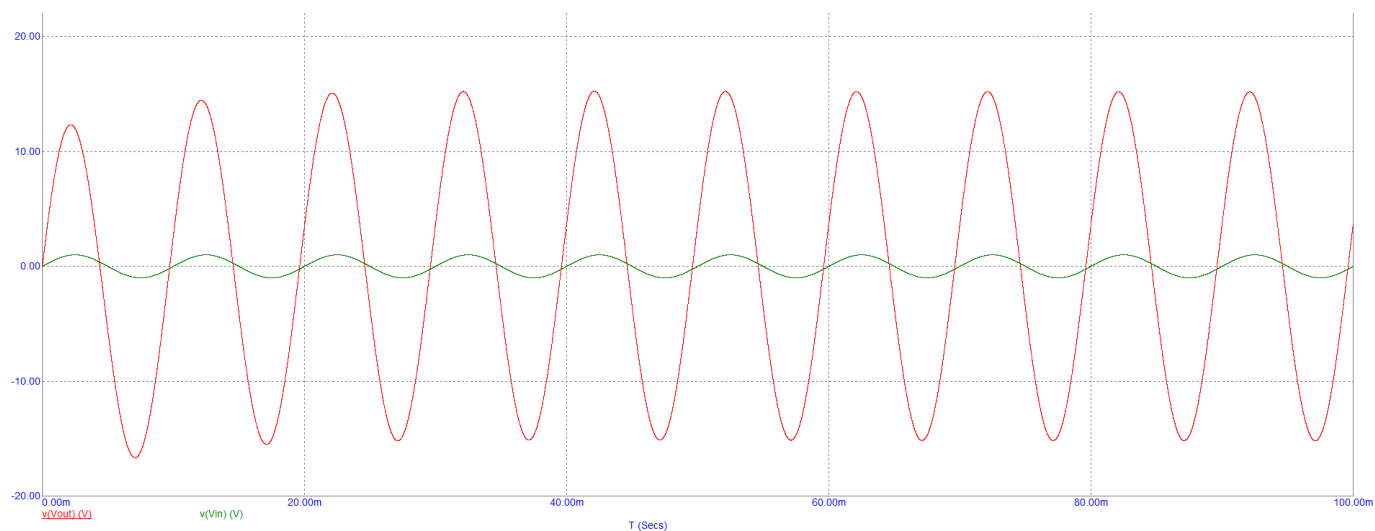
Granične frekvencije se nalaze na vrednostima na kojima je ovo decibelsko pojaćanje opalo za 3dB, tj. tamo gdje je 20.8dB, što možemo videti na slici 4. Donja granična frekvencija je približno 20Hz, a gornja je približno 20kHz.



Slika 4 Propusni opseg pojačavača

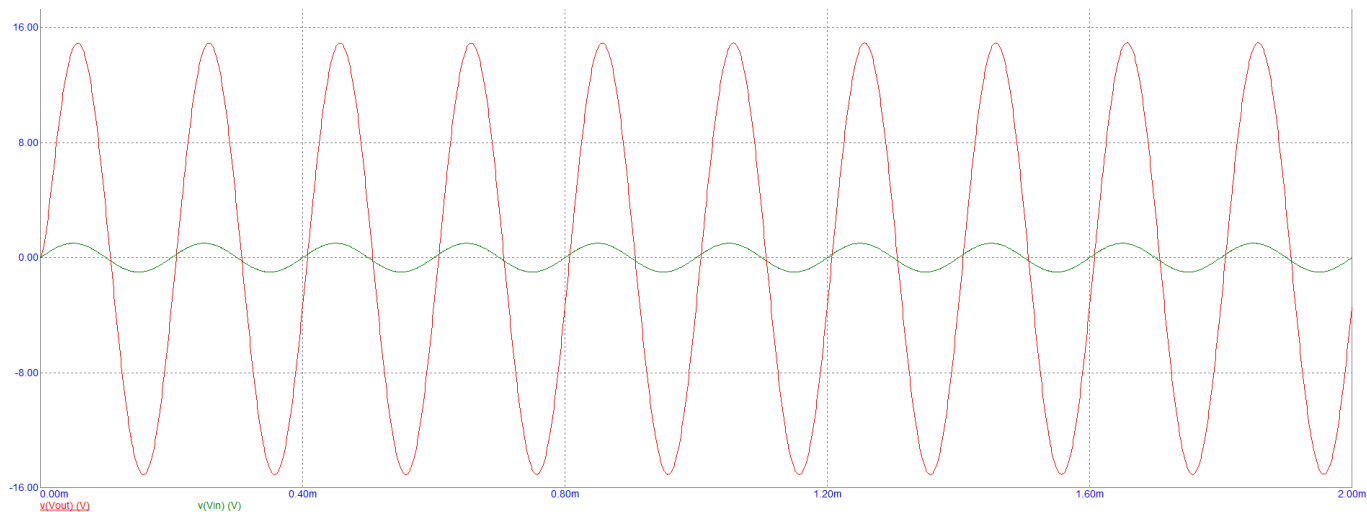
4.3. Izlazni signal – tranzijentna analiza

Pomoću tranzijentne analize pokazano je da nema izobličenja signala ovog pojačavača što je jedna od najvažnijih osobina. Izvršene su analize za 3 različite frekvencije ulaznog signala. Na slici 5 prikazan je izgled izlaznog signala kada je doveden sinusni signal frekvencije 100Hz.



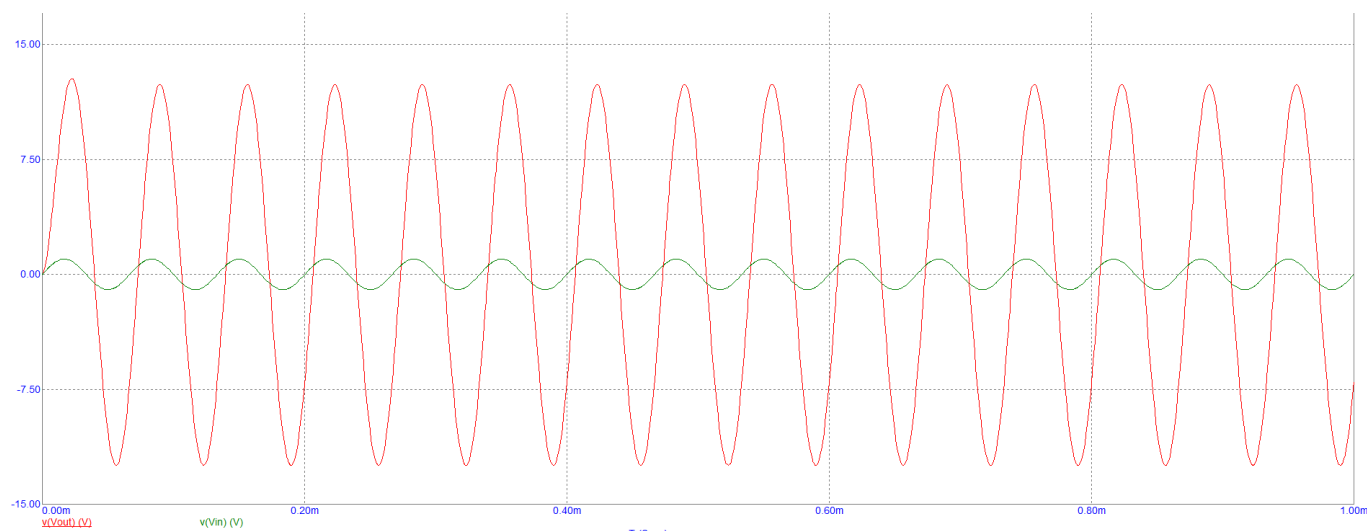
Slika 5 Izlazni signal frekvencije 100Hz

Na slici 6 prikazan je izgled izlaznog signala kada je na ulaz doveden sinusni signal frekvencije 5kHz.



Slika 6 Izlazni signal frekvencije 5kHz

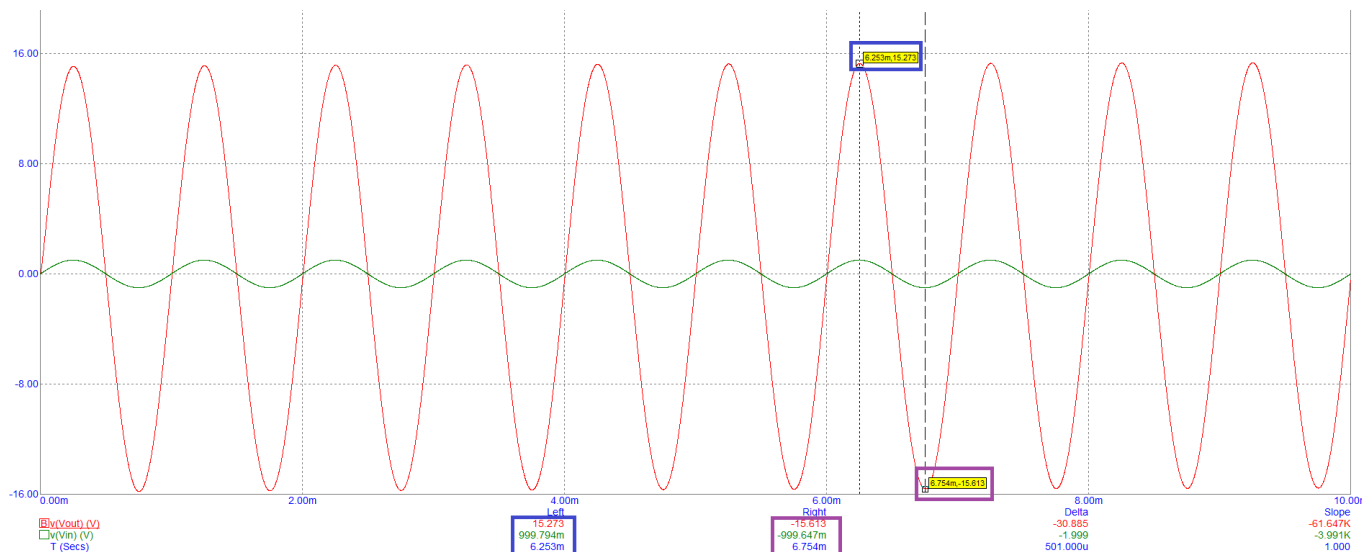
Na slici 7 je izgled izlaznog signala kada je na ulaz doveden sinusni signal frekvencije 15kHz.



Slika 7 Izlazni signal frekvencije 15kHz

4.4. Pojačanje kola u linearnom režimu – tranzijentna analiza

Pojačanje kola u tranzijentnoj analizi se dobija kao odnos izlaznog i ulaznog napona. Na slici 8 su prikazani ulazni i izlazni signal uz proračun pojačanja.



Slika 8 Pojaćanje

Za ulazni napon od 999.794mV izlazni napon je 15.273V, pa je pojaćanje jednako:

$$A\beta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{15.273V}{999.794mV} = 15.28 \approx 15.5$$

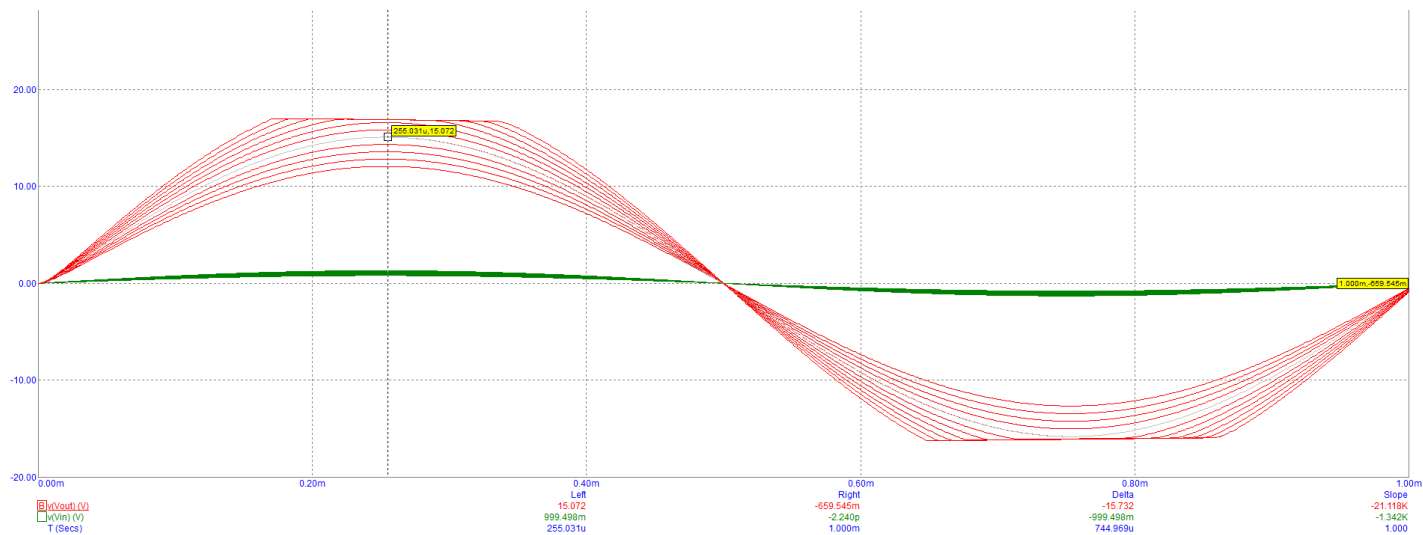
Za ulazni napon od -999.647mV izlazni napon je -15.613V, pa je pojaćanje jednako:

$$A\beta = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-15.613V}{-999.647mV} = 15.62 \approx 15.5$$

4.5. Maksimalni ulazni napon – tranzijentna analiza „stepping“

U programskom alatu *Micro-Cap*, u okviru tranzijentne analize imamo funkciju „stepping“ pomoću koje možemo menjati određenu komponentu u zadatim koracima. Ovde je potrebno menjati amplitudu ulaznog signala i posmatrati izlazni signal, tako da odredimo za koju maksimalnu vrednost ulaznog signala, izlazni signal ostaje neizoblićen.

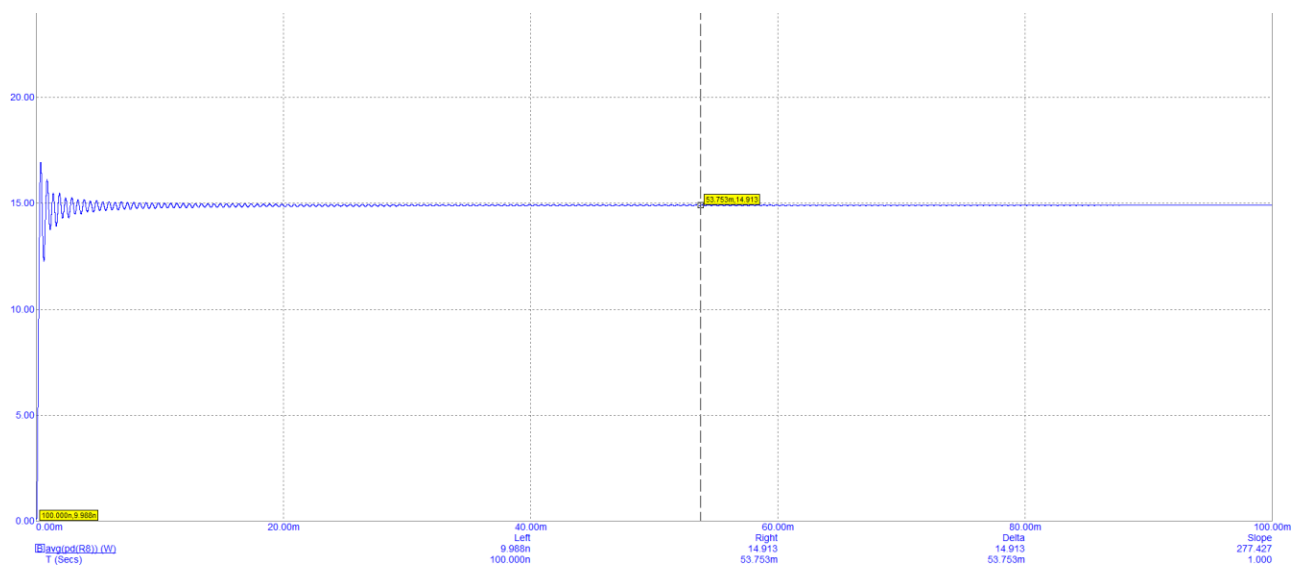
Uzet je opseg od 1V do 2V, sa korakom od 25mV. Na slici 9 su prikazani rezultati ove analize.



Slika 9 Određivanje maksimalne amplitude ulaznog signala

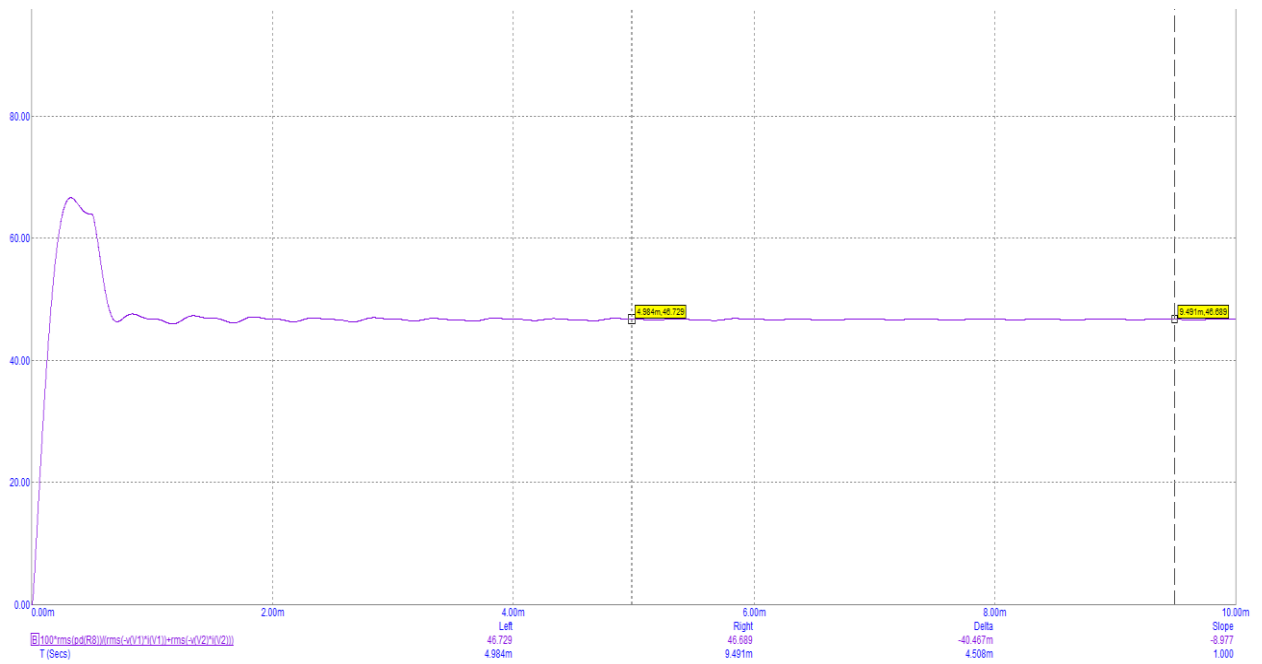
Sa slike 9 vidimo(sivom bojom) da maksimalna amplituda ulaznog signala iznosi približno 1.0 V.

5. MAKSIMALNI KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA



Slika 10 Izlazna snaga

Sa slike se može videti da je izlazna snaga približno 15W, što je i bio uslov zadatka.



Slika 11 Koeficijent korisnog dejstva

Koeficijent korisnog dejstva ovog kola dobijamo iz sledeće formule:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{V_{outmax}^2}{2 \cdot R_8}}{\frac{2 \cdot U^2}{\pi \cdot R_8}} = \frac{V_{outmax}^2}{4 \cdot U^2} = \frac{(15.072V)^2 \cdot \pi}{4 \cdot (20V)^2} \approx 46\% \text{ (Klasa A)}$$

Kao što se može videti sa slike, koeficijent korisnog dejstva se poklapa sa koeficijentom dobijene preko gore navedene formule.

6. ZAKLJUČAK

Audio pojačavači zahtevaju veoma stroge karakteristike kako bi obezbedili visokokvalitetno pojačanje signala koje obuhvata širok spektar frekvencija od 20Hz do 20kHz. Bitno je da pojačavač ima što veći frekventni opseg kako bi osigurao visok kvalitet zvuka, a da pojačanje u tom opsegu ne opada za više od 3dB. U simulacijama je potvrđeno da ovaj uslov zadovoljava zahtevane specifikacije.

Pojačavač mora efikasno pojačati signal, koji može varirati od nekoliko stotina mikrovolti do nekoliko volti, pri čemu se mogu javiti nagli prelasci od malih ka velikim amplitudama. Najvažnije je da pojačanje ne unosi nikakva izobličenja u signal, bilo harmonijska, amplitudska ili fazna. Simulacije su pokazale da ove zahteve zadovoljava kolo koje se razmatra.

Važno je rešiti i problem mešanja šuma sa korisnim signalom. Šumovi mogu biti štetni jer umanjuju razumljivost i kvalitet reprodukcije. Da bi se ovo smanjilo, pažljivo se biraju elementi sa što manjim tolerancijama i obraća se pažnja na raspored elemenata u kolu. Upotrebljavaju se metalfilm otpornici, tantal kondenzatori i druge komponente koje doprinose boljoj eliminaciji šuma.

Važno je napomenuti da se ovde ne radi o stvarnoj, fizičkoj realizaciji, već o simulacijama koje pružaju realan opis ponašanja kola.