

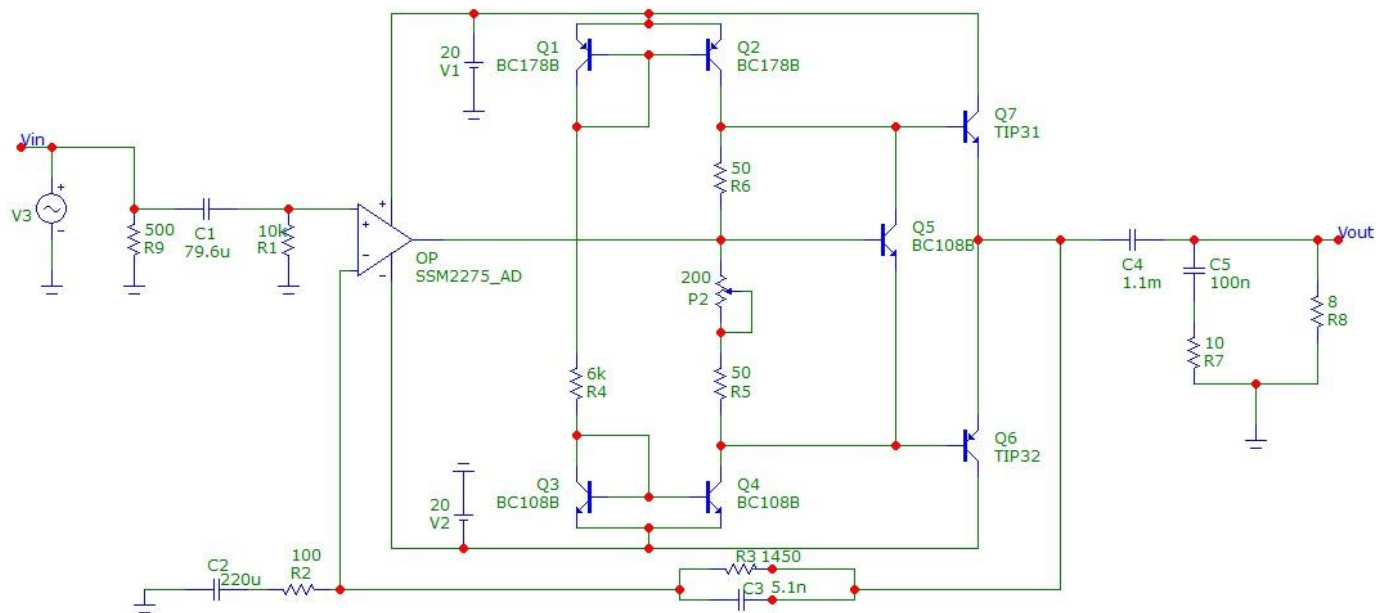
## SADRŽAJ

1. UVOD .....	2
2. ELEKTIČNA ŠEMA KOLA .....	2
3. PRORAČUN I ODABIR KOMPONENTI .....	3
3.1. Proračun pojačanja pojačavača .....	3
3.2. Proračun kondenzatora C1 i otpornika R1 .....	4
3.3. Proračun kondenzatora C3 .....	4
3.4. Proračun kondenzatora C4 .....	5
3.5. Izbor izlaznih tranzistora Q6 i Q7 i napajanja .....	5
3.6. Projektovanje strujnog ogledala .....	6
3.7. Izbor tranzistora Q5 i otpornika R5, R6 i potencijometra P2 .....	6
4. REZULTATI SIMULACIJA .....	7
4.1. Mirne radne tačke tranzistora(dinamička DC analiza) .....	7
4.2. Propusni opseg pojačavača(AC analiza).....	8
4.3. Izlazni signal – tranzijentna analiza .....	9
4.4. Pojačanje kola u linearnom režimu – tranzijentna analiza.....	10
4.5. Maksimalni ulazni napon – tranzijentna analiza „stepping“ .....	11
5. MAKSIMALNI KOEFICIJENT KORISNOG DEJSTVA .....	12
6. ZAKLJUČAK .....	13

## 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  $8\Omega$  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  $\pm 20V$  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 potenciometrom  $P2$  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  $8\Omega$ . S obzirom da je snaga na otporniku jednaka:

$$P = \frac{U_2^2}{2R} \quad (1)$$

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.

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

$$15.5 = 1 + \frac{R_3}{R_2}$$

$$\frac{R_3}{R_2} = 14.5$$

Izabrane vrednosti otpornika su  $R_3 = 1450\Omega$  i  $R_2 = 100\Omega$ .

### 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  $C_1$ . 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  $C_1$  zajedno sa otpornikom  $R_1$  čini VF filtar, potrebna granična frekvencija ovog filtra iznosi 20Hz. Pomoću ovih podataka možemo izračunati vrednost kondenzatora  $C_1$ .

$$f_d = \frac{1}{(2\pi \cdot R_1 \cdot C_1)} \quad (4) \quad C_1 = \frac{1}{(2\pi \cdot R_1 \cdot f_d)} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi \cdot 6k\Omega \cdot 20\text{Hz})} = 79.6 \mu\text{F}$$

### 3.3. Proračun kondenzatora C3

Pomoću kondenzatora  $C_3$ , realizovan je NF filtar granične učestanosti  $f_g$  koja iznosi  $f_g = 20\text{kHz}$ . Po analogiji sa (4) imamo:

$$f_g = \frac{1}{(2\pi \cdot R_3 \cdot C_3)} \quad C_3 = \frac{1}{(2\pi \cdot R_3 \cdot f_g)}$$

$$C_3 = \frac{1}{(2\pi \cdot 1450\Omega \cdot 20\text{kHz})} = 5.5\text{nF}$$

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 filter. Slično proračunu za kondenzator C1, donja granična učestanost je 20Hz i važi slična formula:

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

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

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:

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{R8} = \frac{15.5V}{8\Omega} = 1.94A$$

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:

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

Komponenta koja određuje struju strujnog ogledala je otpornik  $R4$  i njegovu vrednost biramo na sledeći način:  $R4 = \frac{V_{cc} - V_{ss} - 0.6V - 0.6V}{6.45mA} = 6k\Omega$

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:

$$V_{ce5} = V_{be6} + V_{be7} = 2V_{be}$$

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

$$V_{ce5} = (1 + \frac{R6}{R5}) * V_{be5}$$

Iz ovih jednačina dobijamo da je  $R6 = R5$ . Otpornici  $R5$  i  $R6$  su izabrani da budu 100 $\Omega$ .

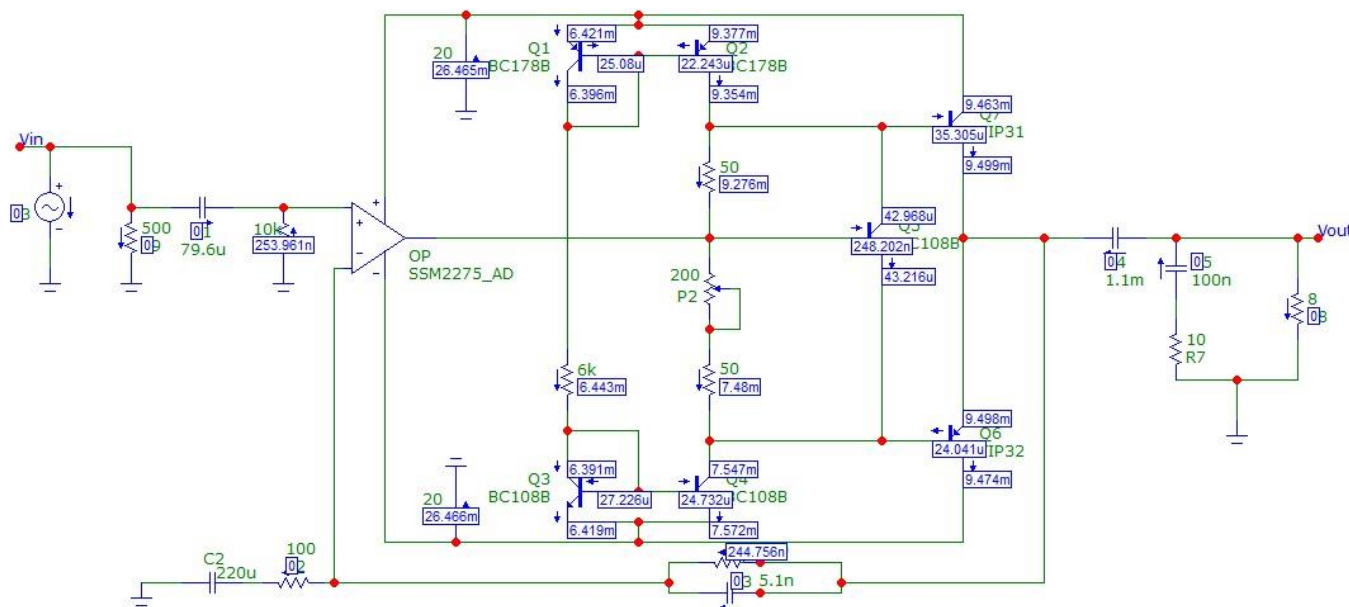
Potencijometar  $P2$  je dodat da bi bilo moguće menjati mirnu radnu tačku tranzistora  $Q6$  i  $Q7$ . On je izabran da ima vrednost 200 $\Omega$  kako bi struja bila u opsegu od 10mA do 100mA (mirna radna struja).

## 4. REZULTATI SIMULACIJA

### 4.1. Mirne radne tačke tranzistora(dinamička DC analiza)

Određivanje mirne radne tačke izvršeno je u programskom alatu *Micro-Cap*, korišćenjem dinamičke DC analize.

Na slici u nastavku prikazane su struje svih komponentata u mirnim radnim tačkama.



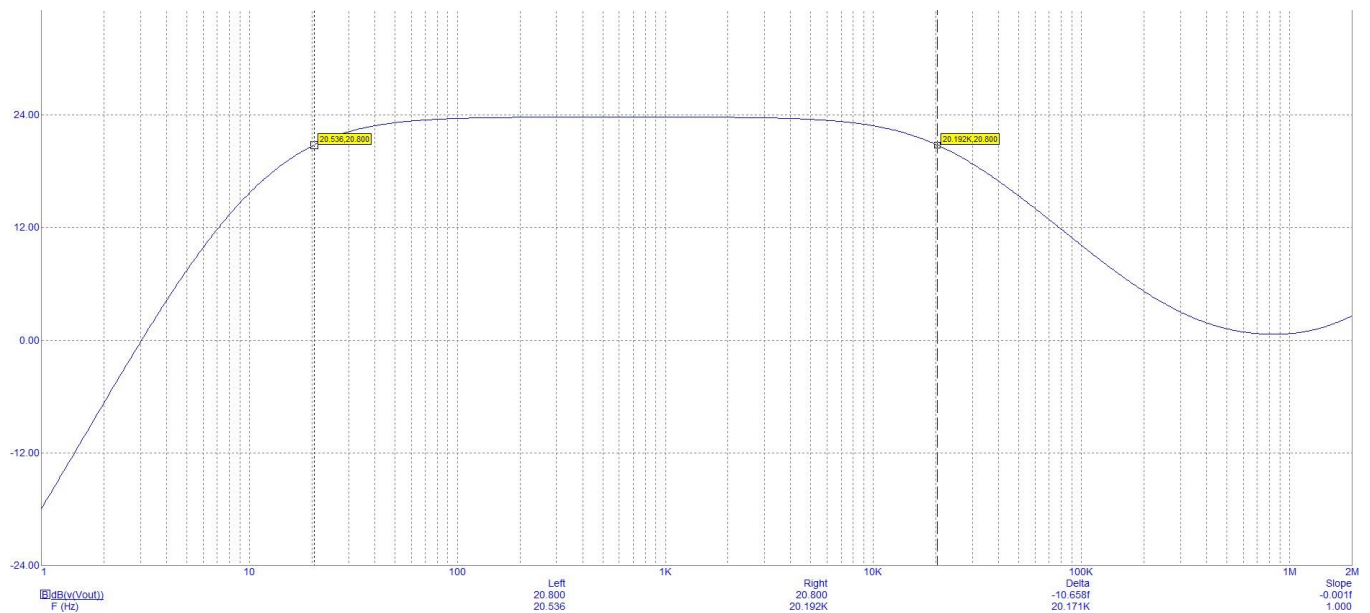
Slika 2 Dinamička DC analiza – struje

Kao što možemo videti na slici 2 radna struja kroz otpornik iznosi približno  $6.5\text{mA}$  kao što je ranije pomenuto. Takođe mirna radna struja izlaznih puš-pul tranzistora je oko  $90\text{mA}$  što je u intervalu koji je ranije pomenut (od  $10\text{mA}$  do  $100\text{mA}$ ).

Na slici 3 prikazani su naponi svih komponentata u mirnim radnim tačkama.



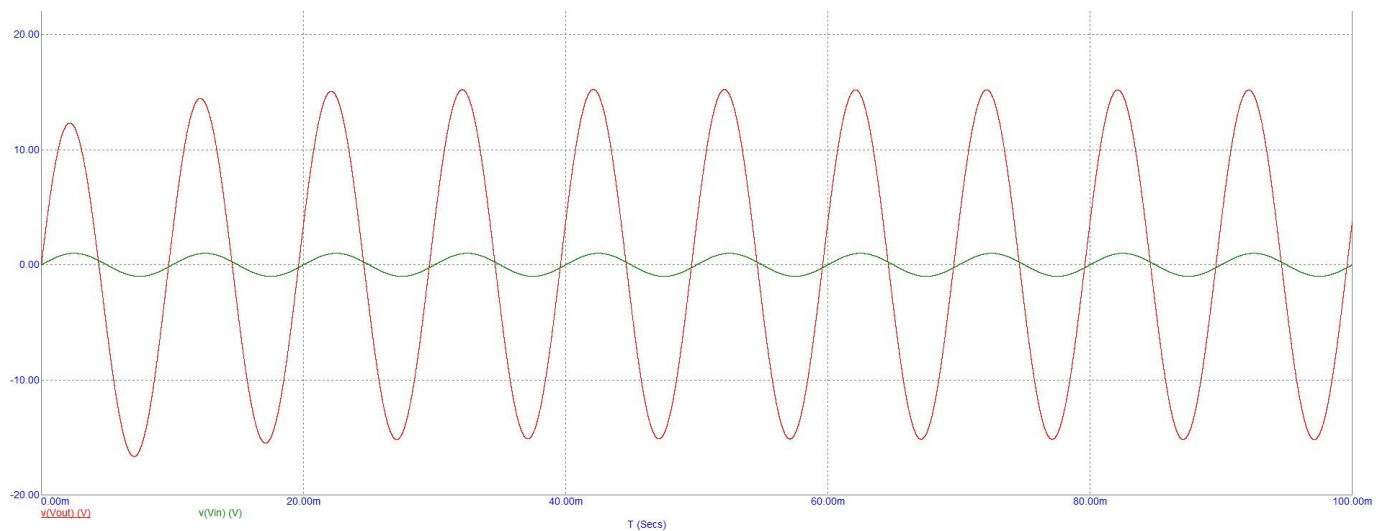




*Slika 4 Propusni opseg pojačavača*

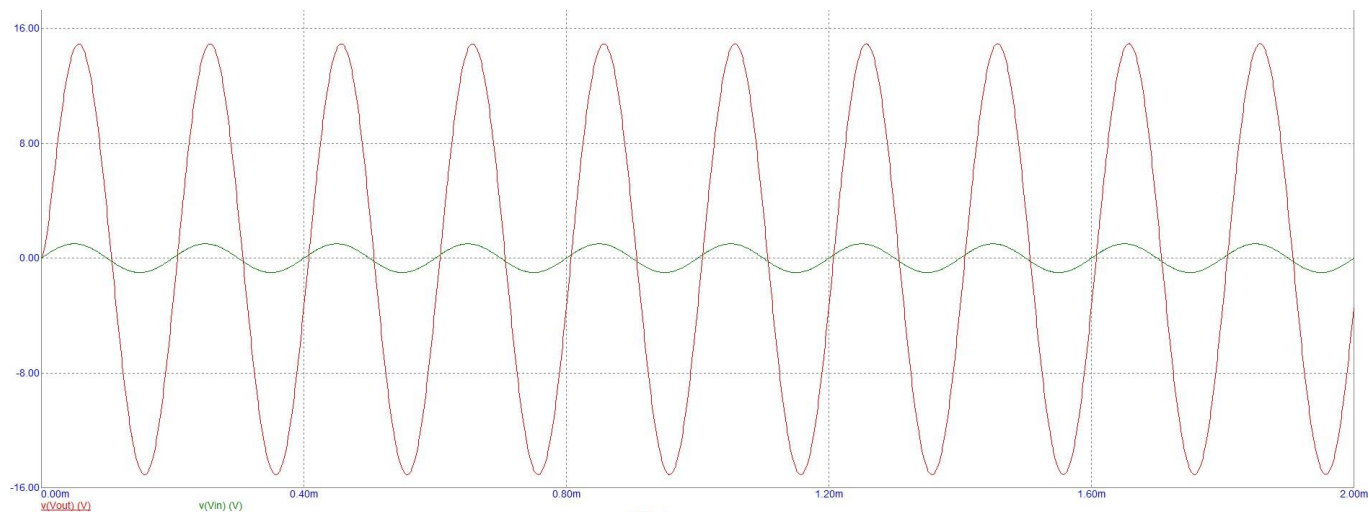
### 4.3. Izlazni signal – tranzijentna analiza

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.



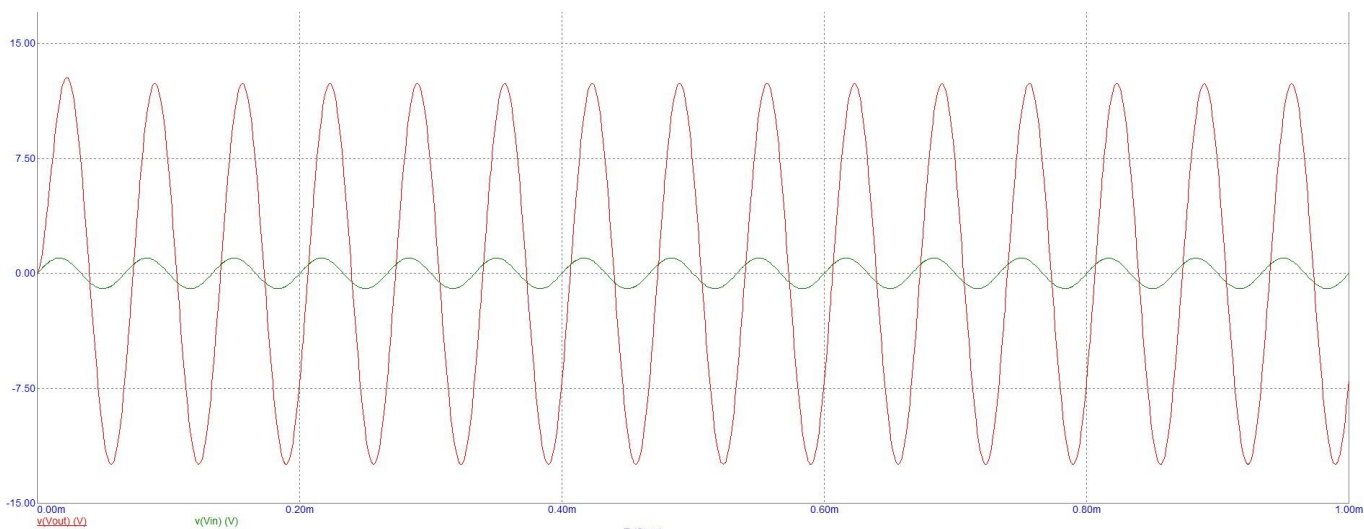
*Slika 5 Izlazni signal frekvencije 100Hz*

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



*Slika 6 Izlazni signal frekvencije 5kHz*

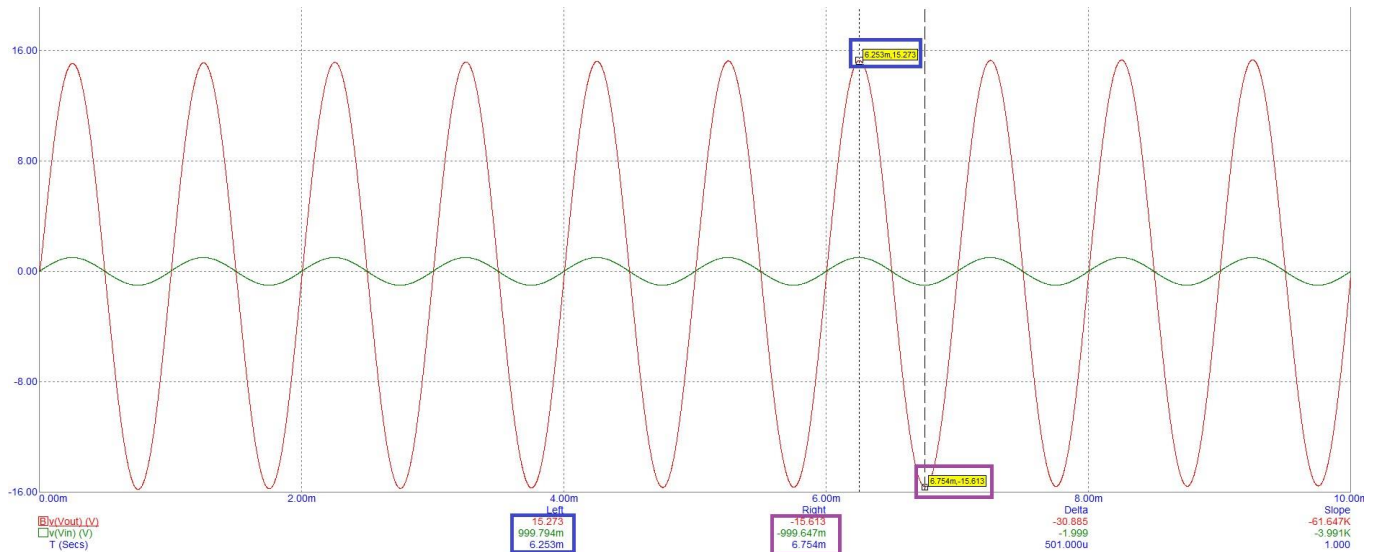
Na slici 7 je izgled izlaznog signala kada je na ulaz doveden sinusni signal frekvencije 15kHz.



*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:

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

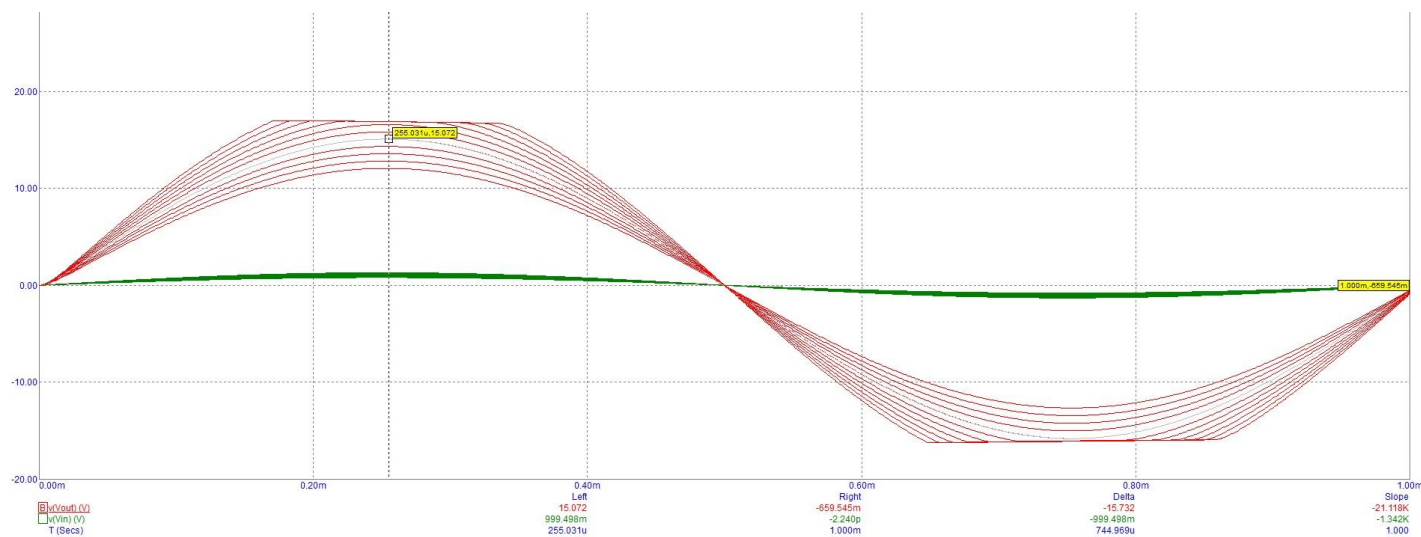
Za ulazni napon od -999.647mV izlazni napon je -15.613V, pa je pojaćanje jednako:

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

#### 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.

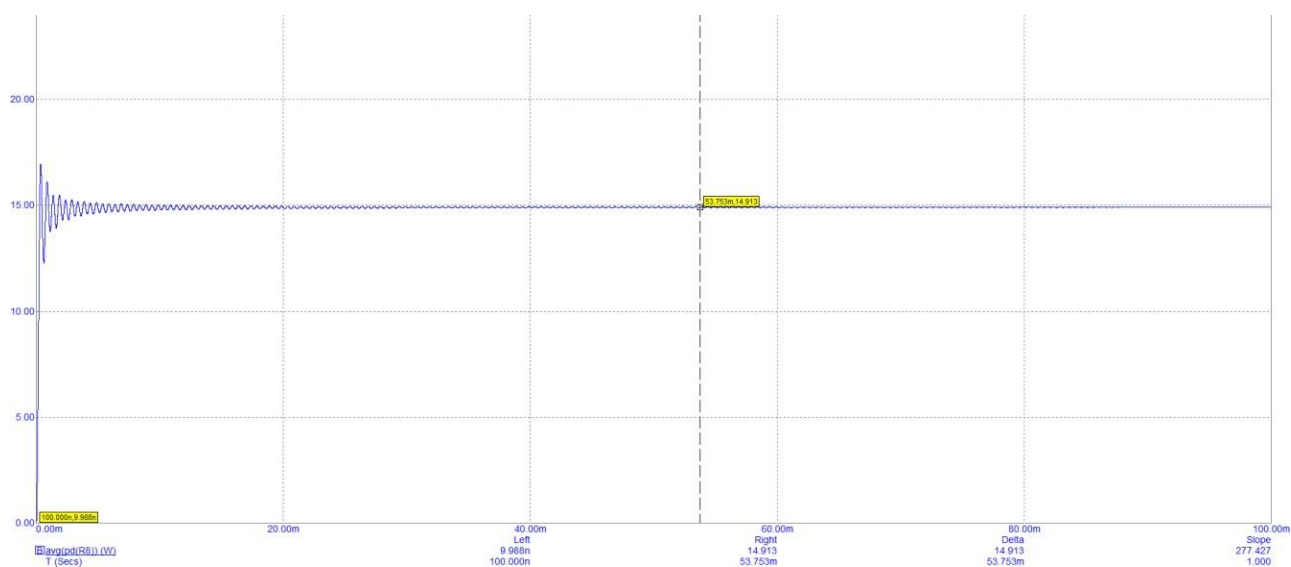
Uzet je opseg od 1V do 2V, sa korakom od 25mV. Na slici 9 su prikazani rezultati ove analize.



*Slika 9 Određivanje maksimalne amplitude ulaznog signala*

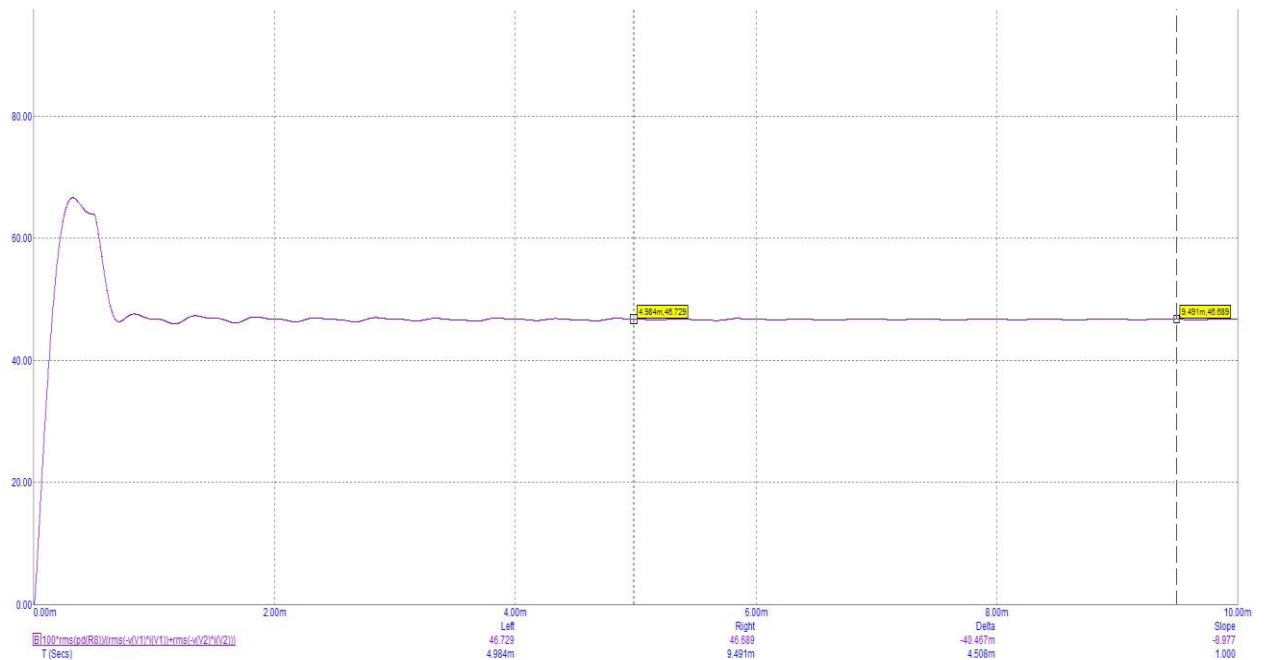
Sa slike 9 vidimo(sivom bojom) da maksimalna amplituda ulaznog signala iznosi približno 1.0 V.

## 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:

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

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.