



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



PROJEKTOVANJE ELEKTRONSKIH KOLA POMOĆU RAČUNARA

NAZIV PROJEKTA:

Audio pojačavač snage 40W izlazne impedanse 8 Ω

MENTOR PROJEKTA:

Dr Miodrag Brkić

PROJEKAT IZRADILI:

Nenad Petrovic EE69/2018

SADRŽAJ

1. UVOD.....	3
2. SCHEMATIC.....	4
3. SUBBLOCKS I PRORACUNI DELOVA.....	6
3.1 PRORAČUN POJAČANJA	6
3.2 PRORAČUN KOMPONENTI R_1 I C_1	6
3.3 PRORAČUN KONDENZATORA C_6	7
3.4 PRORAČUN KONDENZATORA C_5	7
3.5 IZLAZNI PUSH-PULL TRANZISTORI (Q_5 I Q_6) I V_{DD}	7
3.6 V_{BE} MNOZAC.....	8
4. Q POINTS.....	9
5. BANDWIDTH POJAČAVAČA	10
6. GAIN & SATURATION	11
7.OUTPUT VOLTAGE.....	12
8.POWER.....	13
9. EFFICENCY (η).....	14
10. ZAKLJUČAK.....	15
11.DODATAK.....	15

1. UVOD

Zadatak je definisan na sledeci nacin :

Projektovati audio pojacavac. Mora sadržati naponski pojacavacki stepen i AB izlazni stepen. Realizovati pojacavacki stepen pomoću tranzistora ili OP, sloboda u izboru. Izlazni AB stepen realizovati pomoću tranzistora. Tranzistor moze biti bipolarni ili MOSFET. Izabrati sve komponente i objasniti njihov izbor, prikazati proracun kritičnih komponenti. Proracunati maksimalni koeficijent korisnog dejstva.

Izvršiti simulaciju kola u Microcap-u. Preko DC analiza proveriti mirne radne struje pojačavača. Preko tranzijentnih simulacija proveriti funkcionisanje rada kola, pronaci max ulazni napon, izmeriti pojačanje kola u linarnom rezimu. Preko AC analize proveriti propusni opseg pojacavaca. Parametri zvučnika su otpornost $R = 8\Omega$ i snaga $P = 40W$.

U daljem izlaganju bice objasnjena svaka pojedinačna komponenta , zasto je korisćena i koja je alternativa. Bice ukratko diskutovani karakteristicni signali i pomenute koje su analize korisćene i zasto.

Kolo sadrzi sledece vazne podblokove :

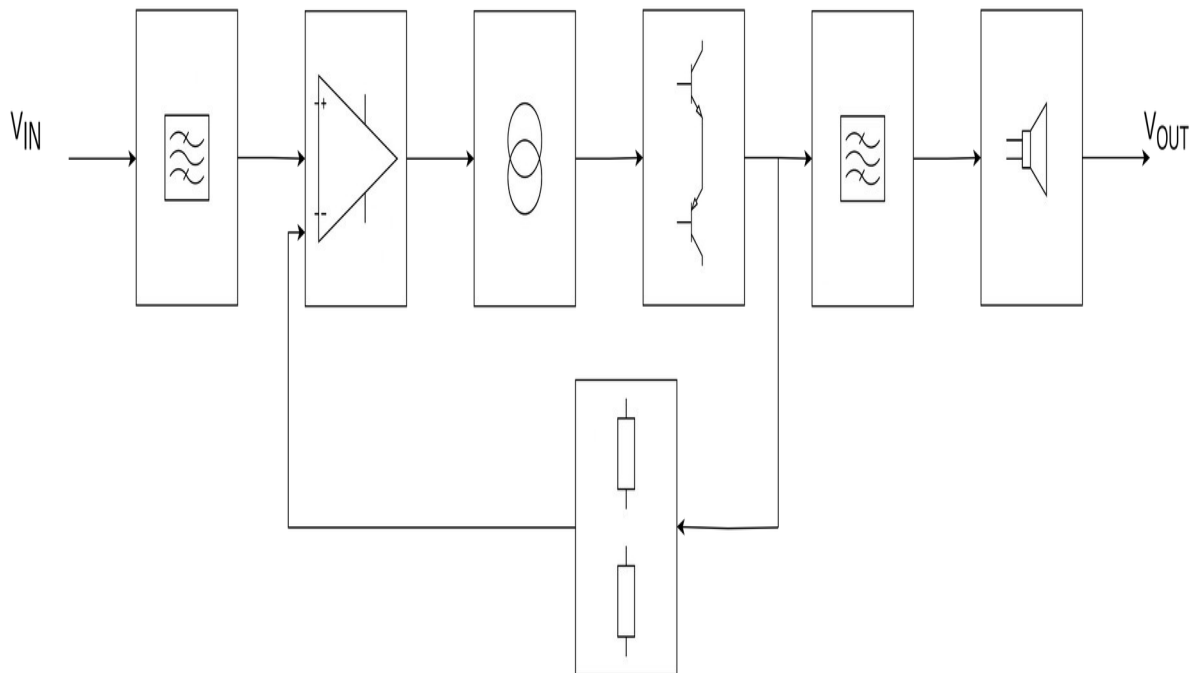
1. Ulazni filter
2. OP amp
3. Bias kolo
4. AB stepen (pjacavac snage)
5. Izlazni filter
6. Negativnu povratnu spregu

Ulazni filter je odabran jer je potrebno pojacati AC signal , a potisnuti DC signal. Ulazni i izlazni filter zajedno cine bandpass filter , gde su gornja i donja frekvencija birane tako da koristan signal bude i cujnom opsegu coveka (20-20kHz).

OP amp služi da pojava ulazni signal i zajedno sa negativnom povratnom spregom elimise smetnje.

Bias kolo je neophodni pomocni blok za izlazni pojacavacki stepen klase AB.

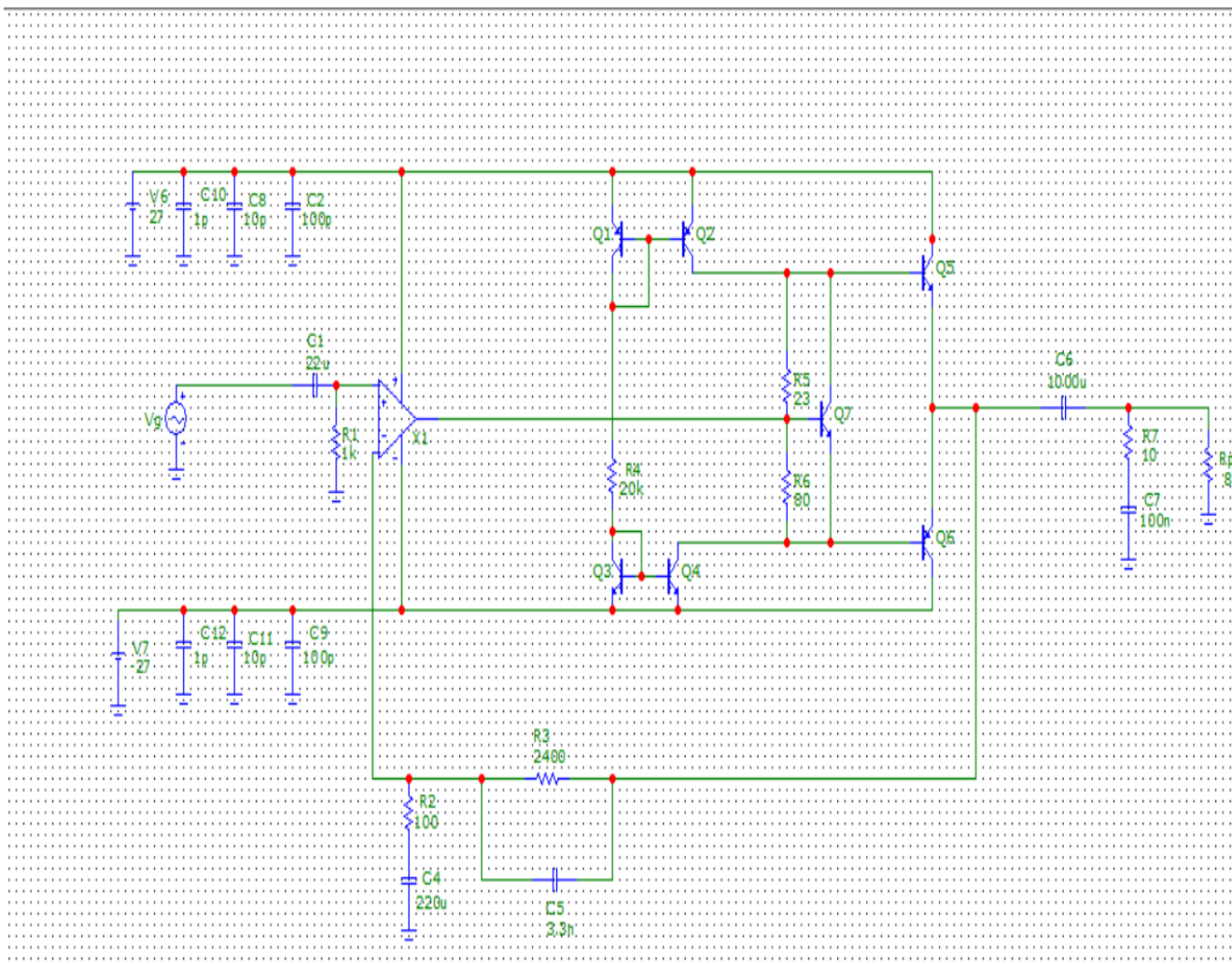
Izlazni stepen je uzet da bude klase AB , jer je tako definisano u zadatku , ali naravno ova klasa je vrlo popularna jer ima jako velik stepen iskoriscenja i jako male (prakticno nikakve) THD-je.



Slika 1. Blok sema kola

Na blok semi su uzostavljena napajanja i bypass kondenzatori koji obicno idu sa njima , takodje nije prikazano koji konktreno elementi su u povratnoj sprezi o cemu ce biti reci vise. Za sada je bitno znati samo da ulazni korisni signal v_m mora biti filtriran , naravno konfiguracija neinvertujuceg pojacavaca pojacava ovaj koristan signal. Ova konfiguracija je pogodna iz vise razloga , velika ulazana diferencijalna otpornost i mala ulazna kapacitivnost kao i mala bias struja samog op ampa i jako velika ulazna otpornost koju vidi filter. Veliko pojanje odredjeno samo kolom negativne povratne sprege i naravno mala izlazna otpornost. Bias kolo je ovde apstrakovano u blok koji nosi znak strujnog izvora , detalji ce biti diskutovani kasnije. Push-pull stepen u klasi AB je pojacavacki deo , kao sto je vec receno i naravno izlazni filter , kako bi se dobio bandpass filter. U blok semi stoji zvucnik , dok je u semi kola ovo otpornik jako male otpornosti , sto je donkle uporscena aproksimacija , jer je zanemarana induktivnost koja moze doci do izrazaja.

2. SCHEMATIC



Slika 2. Schematic

Ulazni CR filtar služi da potisne DC komponentu ulaznog signala V_g i propusti AC korisnu komponentu, naravno treba birati vrednosti tako da donja granicna učestanost bude oko 20Hz. On sadrži delove C_1 , R_1 .

Napajanje je bipolarno $\pm 27V$, jer je pojačanje veliko pa da ne dodje do klipovanja signala. Korisceno je nekoliko bypass kondenzatora oko napajanja.

OP amp i optornici koji cine negativnu povratnu spregu su blok zaduzen za naponsko pojačanje.

BJT Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 kao i R_4 su nista drugo nego strujno ogledalo, Q_1 i Q_2 su current source, dok su Q_3 i Q_4 current sink, R_4 igra ulogu strujnog izvora i menjanjem njegove vrednosti dobija se zeljena struja koja ide kroz Q_1 i Q_3 koja se posle kopira kroz Q_4 i Q_3 i mnozi nekim konstantim koeficijentom.

Q_7 kao i R_5 i R_6 su poznati V_{be} mnozac i služi kao podblok klase AB za podesavanje mirne radne tacke i struja kroz tranzisore Q_5 i Q_6 . U sustini ovo je bolja verzija nego dve diode. R_6 moze da bude i promenljiv sto daje vecu fleksibilnost u namestanju struje.

Q_5 i Q_6 su delovi klase AB u konfiguraciji push-pull. Ovo je jednostavna konfiguracija bez dodatih dioda koje bi cinile totem-pol izlaz, i nije implementiran strujni limiter odnosno, nema strujne zastite..

Izlazni filter cine C_6 i R_7 , treba izabrati C_6 da se odredi kriticka frekvencija filtra.

C_7 služi da smanji izlaznu otpornost na visim frekvencijama.

Izlazni zvucnik je modelovan otpornikom R_p male otpornosti.

Komponente	Komada
Kondenzator	x10
Otpornik	x7
OP amp	X1
BJT	X7
Napajanje	x2
Zvucnik	x1

Tabela 1 .Komponente I njihov broj

3. SUBBLOCKS I PRORACUNI DELOVA

3.1 PRORAČUN POJAČANJA

Zadatak je projektovati pojačavač na čijem izlazu je zvučnik otpornosti 8Ω , a izlazna snaga pojačavača $40W$.

Data nam je srednja snaga u prostoperiodicnom režimu i izlazna otpornost potrošača u ovom slučaju zvučnika 8Ω . Znamo formulu za snagu u prostoperiodicnom režimu,

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{2 R_p} \quad (1)$$

Dakle

$$V_{out} = \sqrt{(P_{out} * R_p) * 2} = \sqrt{(40 * 8 * 2)} = \sqrt{640} \approx 25$$

Totalno pojačanje je

$$A = \frac{V_{out}}{V_i} = \frac{25}{1} = 25 \quad (2)$$

, jer je amplituda ulaznog signala $1V$.

Posto OP amp radi u konfiguraciji neinvertujućeg pojačavača onda je

$$A = 1 + \frac{R_3}{R_2} \quad (3)$$

Odatle sledi da je $\frac{R_3}{R_2} = 24$.

Ovde je zgodno jer pojačanje zavisi od odnosa otpornosti, a ne od njihovih pojedinačnih vrednosti, što poboljšava dizajn kola jer se otpornici menjaju usled poraste temperature, starenja i fizički nikad nisu isti.

Posto se isti rezultat dobija za više vrednosti razlomka, treba naći optimalne vrednosti. Izabrano je da to budu 2400 i 100Ω .

Biranje ovih vrednosti utiče na izabir kondenzatora C_4 i C_5 . Tipično su manji otpornici poželjni jer imaju manje izražen termički sum i manje tolerancije pogotovo u SMD verziji.

3.2 PRORAČUN KOMPONENTI R I C_1

Kondenzator C_1 blokira DC komponentu signala V_g sa ulaza.

Ulazna otpornost OP amp je ogromna (reda $10M\Omega$).

Kao što je već rečeno na ulazu postoji high-pass filter pa je potrebno naći kritičnu frekvenciju. Znaajući da je vremensta konstanta je data izrazom

$$\tau = (R_1 \parallel R_{inopamp}) C_1 \quad (4)$$

, odatle je kružna frekvencija (ω) pa i frekvencija f data sa

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (5)$$

dobij se da je $C_1 = 10\mu\text{F}$.

Medjutim neće škoditi ako se uzme da je C_1 malo veće jer OP i sam ima ulazne parazite kapacitivnosti i ljudsko čulo praktično nikad neće čuti razliku između 20Hz i 30Hz tako da nije potrebno da ova vrednost bude jako precizna.

3.3 PRORAČUN KONDENZATORA C_6

Pošto je potrebno odvojiti jednosmernu komponentu kola od zvučnika C_6 će upravo ovo uraditi međjutim bilo bi dobro da bude velike vrednosti. Kondenzator C_6 služi da blokira DC komponentu pre samog izlaza (koje nastala usled suma ili usled offseta op ampa ili bilo kog drugog razloga). Ovaj kondenzator nema veze sa Zobelovim kolom na izlazu (R_7 , C_7) koje služi da poboljša izlaznu impendansu na visim frekvencijama, kompenzovajući induktivni karakter zvučnika (potrosaca) sa kapacitivnim karakterom kondenzatora C_7 .

Istim rezonovanjem kao i pre dobija se

$$C_6 = \frac{1}{2\pi f_g (R_7 \parallel R_p)} \quad (6)$$

Dakle $C_6 \approx 1000\mu\text{F}$.

3.4 PRORAČUN KONDENZATORA C_5

Uz pomoć kondenzatora C_5 je realizovan NF filter granične učestanosti $f_g = 20\text{kHz}$. Ovo kolo je audio pojačavač i frekvencije od interesa treba da budu u skladu sa čujnim opsegom ljudskog uva.

$$C_5 = \frac{1}{2\pi f_g R_3} \quad (7)$$

U ovom slučaju $C_5 \approx 40\text{nF}$.

3.5 IZLAZNI PUSH-PULL TRANZISTORI (Q_5 I Q_6) I VDD

S obzirom da je maksimalna amplituda napona na zvučniku 20V, to znači da je maksimalna struja kroz zvučnik data izrazom :

$$I_{\max} = \frac{V_{\max}}{R_p} = \frac{25\text{ V}}{8\ \Omega} = 3.125\text{ A} \quad (8)$$

To znači da je potrebno odabrati tranzistore čija je kolektorska struja veća od navedene, jer se deo struje mora vratiti kroz povratnu spregu ka masi.

Sa ovim na umu treba naći tranzistore koji se stave u push-pull stepen, koji imaju velike β_{forward} i mogu

da podnesu velike struje reda par ampermetra. Takodje treba videti sta se desava sa $\beta_{forward}$ na visim frekvencijama odnosno da li ce tranzistor imati dovoljno "juice"-a da da veliko pojacanje.

Tranzistor ZXTP2009 (PNP) ima maksimalnu kolektorsku struju od -5.5A i impulsnu struju od -15A max i ogroman probojni napon V_{ce} kao i malu struju curenja u off stanju , pa ce biti dovoljan za ovaj pojacavac.

Za NPP je biram ZXTN2020F , sa strujom od 4A u ustaljenom rezimu i malom disipacijom i velikim probojnim naponom.

Posto je pojacanje 25 , treba dovesti napajanje od barem 25V na pojacavac , naravno u praksi treba uzeti dosta vece napajanje jer i sam push-pull stepen nema full voltage swing , pa bi bilo sta izmedju 25 i 30V bilo i vise nego dosta.

Zbog ovoga je uzeto 27V za napon napajanja.

3.6 VBE MNOZAC

Tranzistori Q_1 do Q_4 i Q_7 su isti tj koriscen je model BC108A.naponi na baza – emiter, tranzistora Q_5 , Q_6 i Q_7 identični.

Za klasu AB nam treba polarizacija koja ima tipicnu vrednost pada napona na 2 diode i 2 strujna izvora.

U ovom slucaju strujni izvori su dati preko Q_2 i Q_4 , dok ulogu 2 diode ima Q_7 zajedno sa R_5 i R_6 .

Ovo kolo je pozanti V_{be} mnozac i dosta je popularan.

Napon V_{ce} od Q_7 je dat preko naponskog razdelnika i drugog Kirhofovog zakona za Q_5 i Q_6

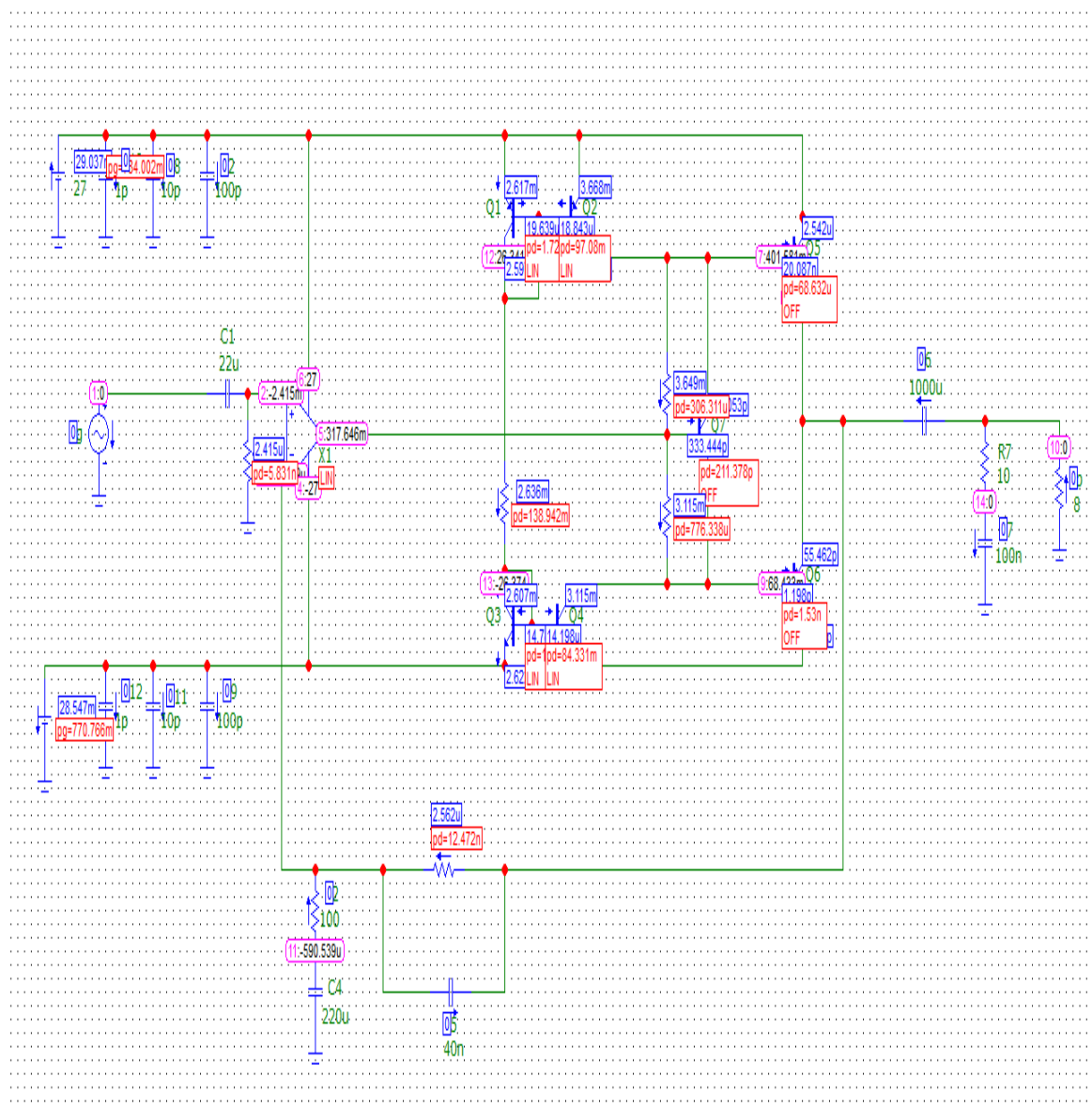
$$V_{ce} = 2 V_{be} \quad (9)$$

$$V_{ce} = \left(1 + \frac{R_5}{R_6} \right) V_{be} \quad (10)$$

Iz ovoga sledi da je $R_5 = 23\Omega$, a $R_6 = 80\Omega$.

4. Q POINTS

Odredjivanje mirne radne tacke se vrši putem DC analize , fiksira se temperature i SPICE odredi sve struje i napone u DC rezimu.



Slika 3. DC analiza kola

5. BANDWIDTH POJAČAVAČA

Propusni opseg je od 20Hz do 20kHz. Tokom projektovanja kola, svi NF i VF filtri u kolu su napravljeni na taj način da dobijemo upravo ovaj opseg učestanosti na izlazu.

Da bi se ovo postiglo treba napraviti bandpass filter koji propusta frekvencije od interesa i sece nezelenje frekvencije. Ovo je vec uradjeno uz pomoc high-pass i low-pass filtera za koje su se birali kondenzatori.

Dc gain je odredjen faktorom β povratne sprege jer postoji jaka negativna povratna sprega i pa je pojacanje dato sa

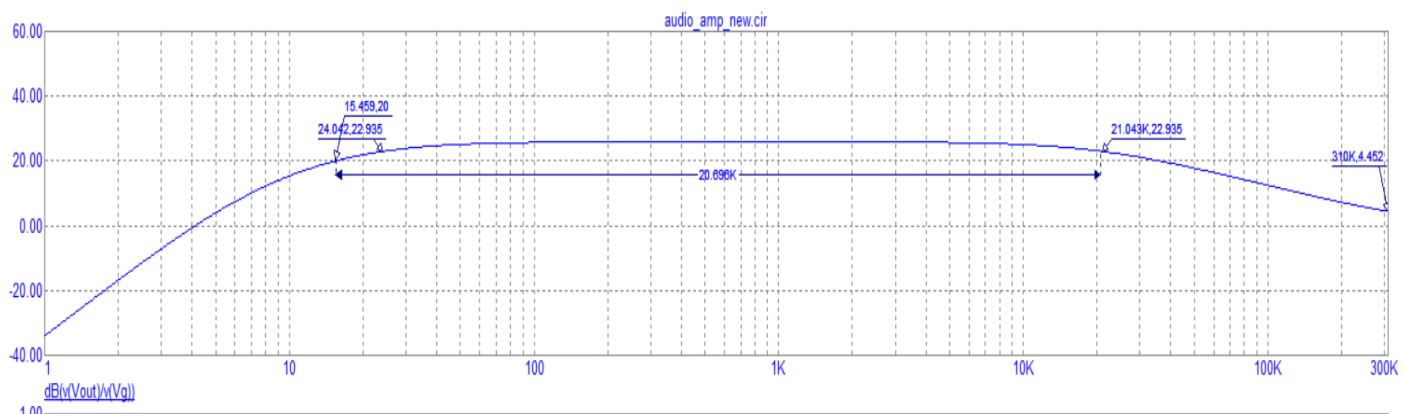
$$A \approx \frac{1}{\beta} \quad (11)$$

β je nista drugo nego impedansa mreza data sa R_3, R_2, C_5 i C_4 , Ovde se moze videti uticaj kondenzatora C_4 i njegovim podevanjem se menja i DC pojacanje bandpass filtera.

Maksimalno pojacanje pojacavaca je 25.935dB, pa je propusni opsego dredjen kao razlika gornje i donje kriticne frekvencije

$$BW = f_g - f_d \quad (12)$$

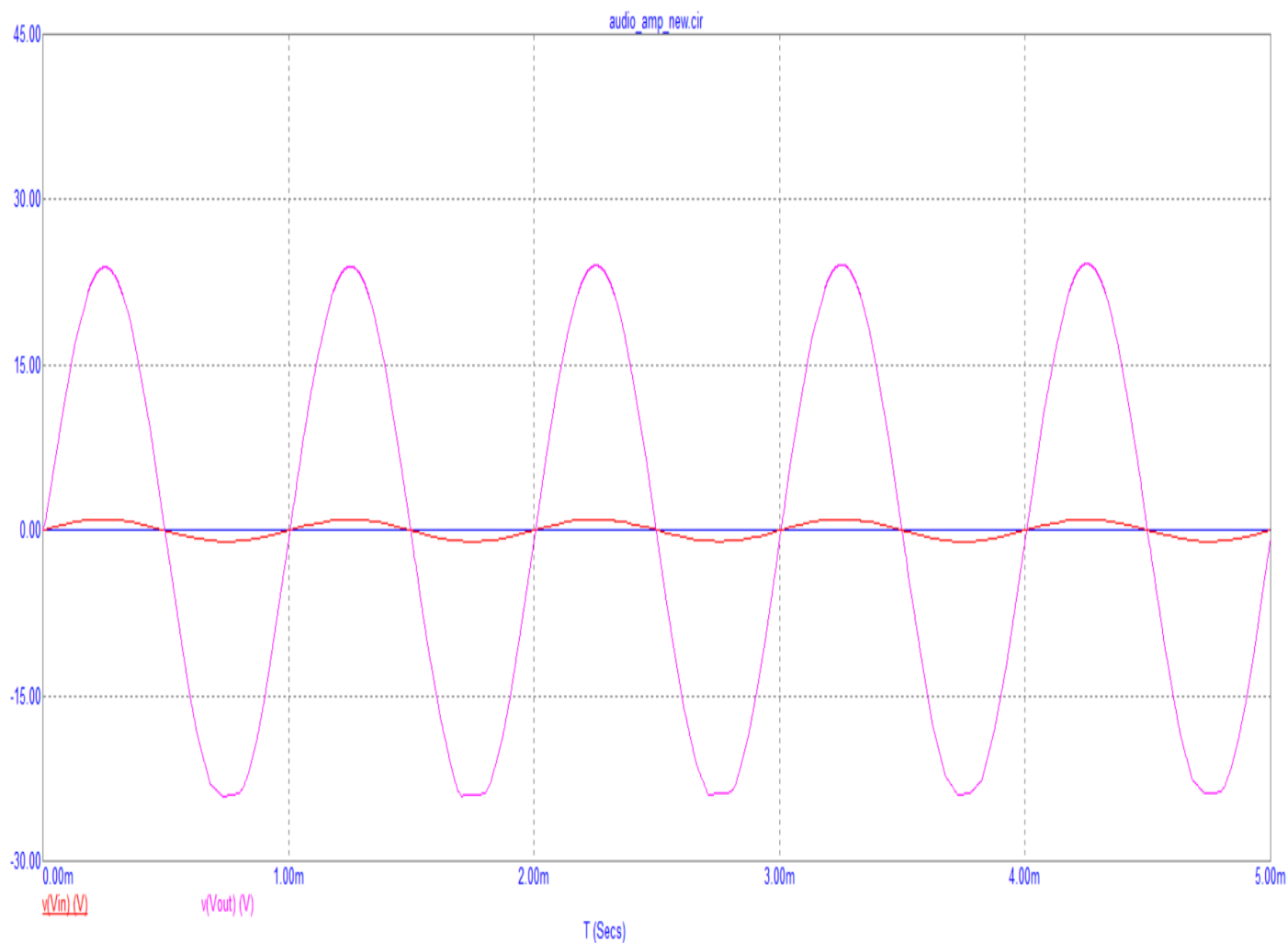
Grafickom metodom ovo je nadjeno trazanjem frekvencija gde DC pojacanje opadne za 3dB po dekadi



Slika 4. Propusni opseg pojačavača

6. GAIN & SATURATION

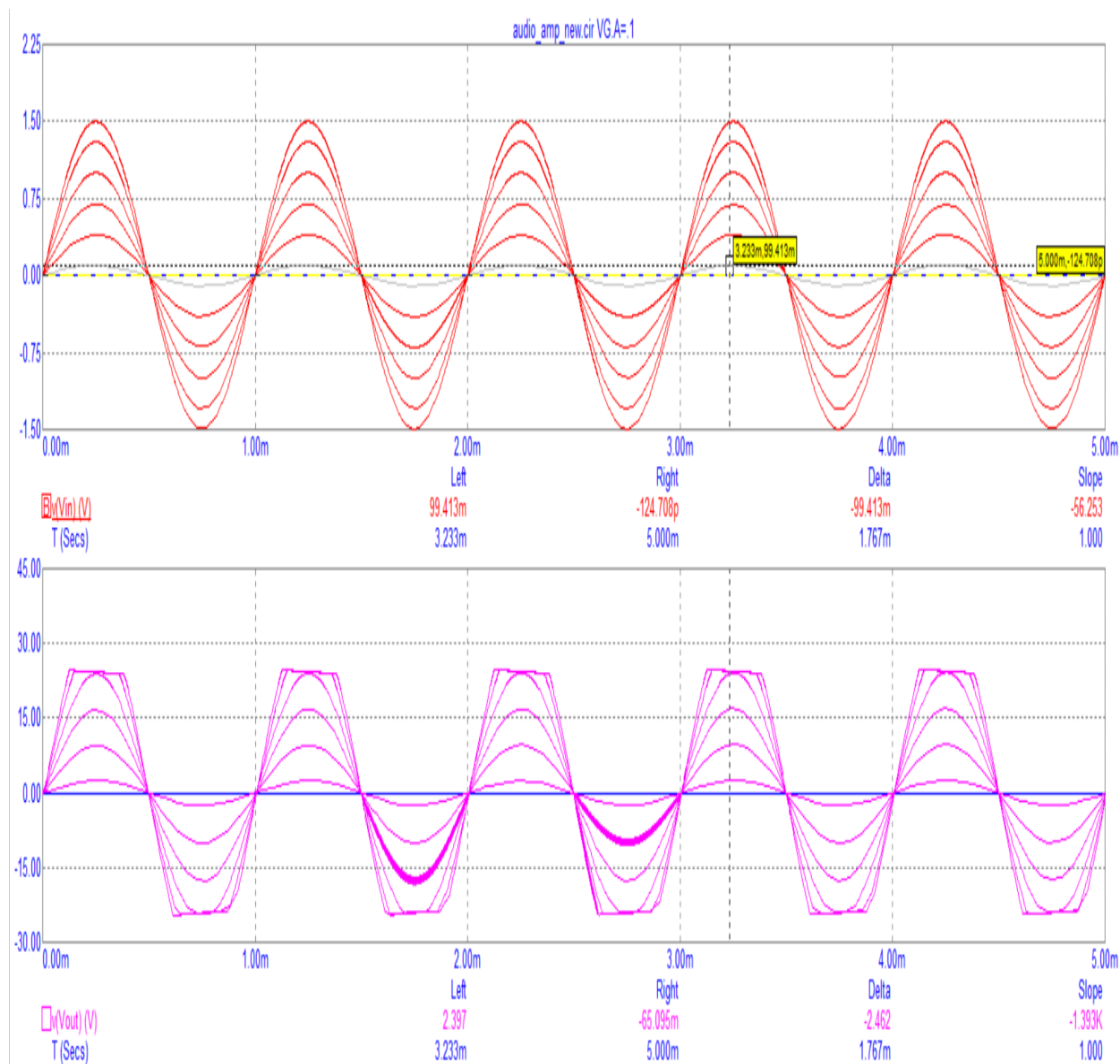
Tranzijenta analiza služi da pokaže izlazni signal u vremenu (crvena boja), naravno ovde postoji pojačanje što je i bio cilj, pa ima smisla pokazati i ulazni signal (plava boja). Sistem je linearan pa je ulazni prostoperiodični signal neke frekvencije na izlazu, pojačan i fazno pomeren, ali ima istu frekvenciju. U ovom slučaju nema faznog pomeraja jer je OP amp u konfiguraciji neinvertujućeg pojačavača. Vidi se očekivano pojačanje od $24 \frac{V}{V}$.



Slika 5. Izlazni signal

7. OUTPUT VOLTAGE

Sada je potrebno videti kada ce doći do zasícenja OP-ampa i odsecanja signala (kada op amp više ne može da pojačava)

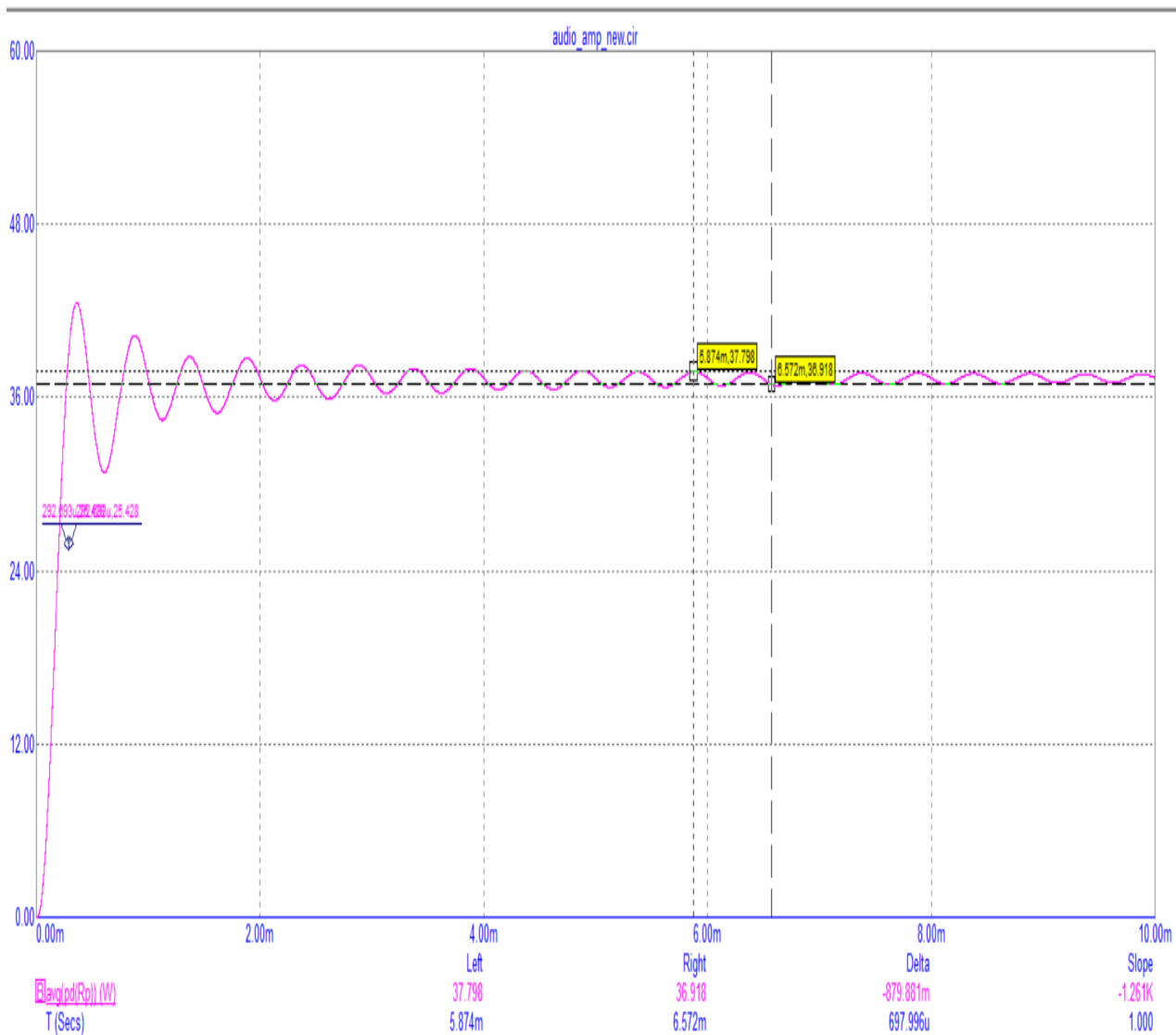


Slika 6. Rezultat stepovanja ulaznog signala

Na osnovu ove simulacije, možemo videti da je maksimalni dozvoljeni napon na ulazu amplitude upravo 1V. Kada je veći napon na ulazu, najpre dolazi do odsecanja negativne poluperiode, zbog unutrašnje konstrukcije OP-ampa.

7. POWER

Jedan od parametara je da izlaza snaga koja se disipira na zvučniku bude 40W. Ovo se može utvrditi posmatranjem proizvoda izlaznog napona i struje, tj njihove srednje vrednosti. Na salici se vidi da je snaga oko 36W, što je skoro 40W. Povećanje bi se moglo postići na račun umanjevanja efikasnosti i povećanja DC izvora



Slika 7. Prosečna snaga na izlazu

9. EFFICENCY η

Koeficijent korisnog dejsta se racuna iz formule :

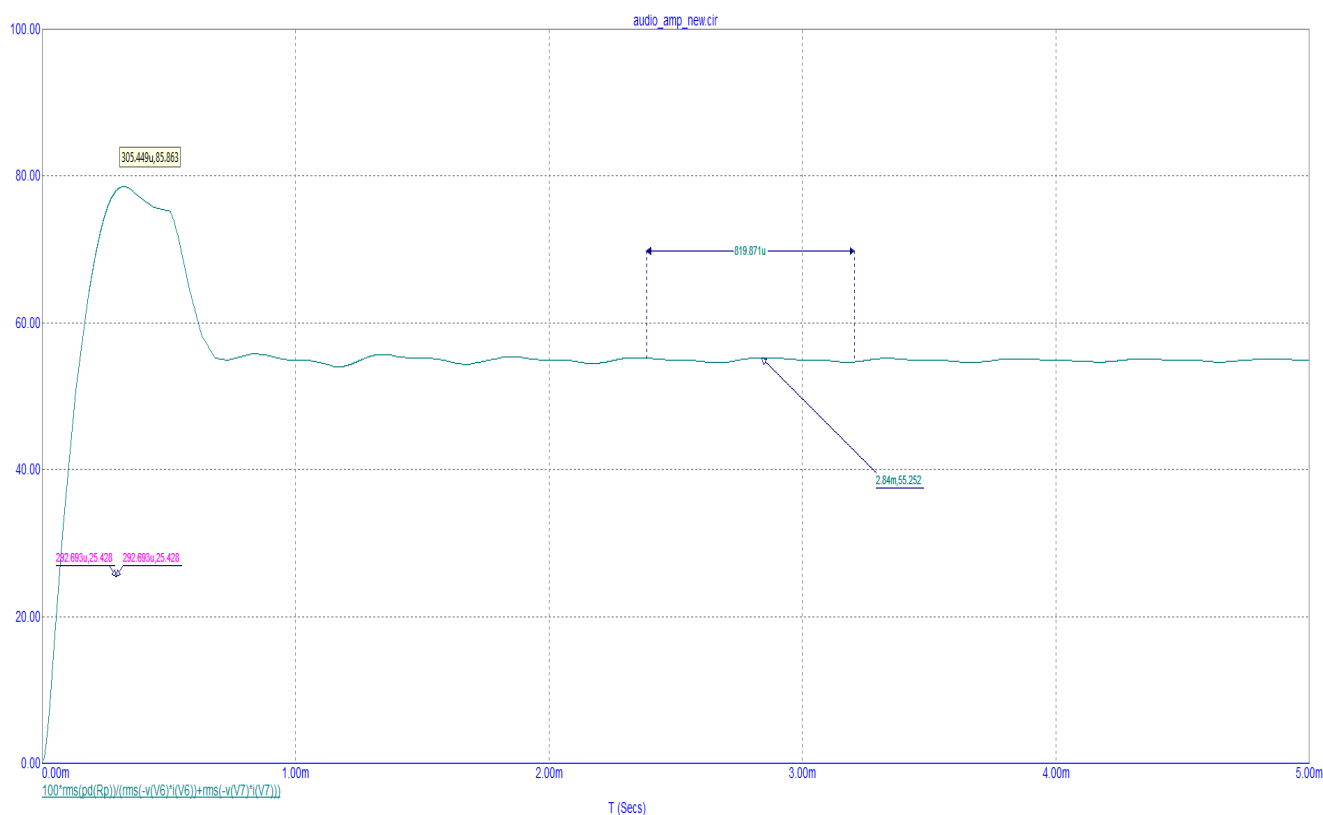
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} [\%] \quad (13)$$

Ovo se svodi na sledece :

$$\eta_{max} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{V_{out}}{V_{dd}} \right)^2 \quad (14)$$

Ovde je bitno napomenutni da se uzima RMS vrednost snage na potrosacu I RMS vrednost ulozenog napona napajanja , koje je bipolarno .Od interesa steady state rezim pa vrednosti u pocetku analize dok se kolo ne prebaci u ustaljeno stanje nema smisla razmatrati , simulator to svakako ne zna I crtace izlacni signal u svakom odbirku I vrsiti interpolaciju.Dakle treba Izabrati tacke koje sigurno odgovaraju ustanjom rezimu I markerom pogledati vrednost koeficijenta iskoriscnenja.Teorijski izlazni stepen koji je AB tipa ima max stepen iskoriscnenja od $\pi/4$ sto je oko 78.5% , naravno tu je uzeta pretpostavka da izlazni napon moze da dostigne Vrednosti napona napajanja sto ovde nije slucaj dakle teorijska vrednost I merena ce odstupati

$$\eta = \frac{RMS(pd(Rp))}{(RMS(-v(VCC)*i(VCC))+RMS(-v(-VCC)*i(-VCC)))}$$



Slika 8. Koeficijent korisnog dejstva η

Prilikom tranzijente analize uzeti su cvorovi V6 sto je VCC I V7 sto je $-VCC$ kao u formuli.

10. ZAKLJUČAK

Nako svih simulacija i proračuna ocito je da se kolo ponasa u skladu sa definisanim zahtevima. Jedino malo odstupa u maksimalnoj izlaznoj snazi na zvucniku.

U dodatku su dati neki karakteristicni signali OP-ampa , i njegove karakteristike .

Takodje se razmatra alternativa za current mirror uz pomoc MOSFET-ova , jer BJT imaju dosta lose nelinearne karakteristike u ovoj konfiguraciji i uticaj temperature kviri karakteristike ovog strujnog izvora jer BJT imaju negativni temperaturni koeficijent. Takodje menjanje struje kod MOSFET current mirror-a se svodi na menjanje geometrije tranzistora sto je povoljno.

Takodje se razmatra implementacija strujne zastite i vidu 2 tranzistora i 2 otpornika koja su current senzori.

11. DODATAK

Sto se tice odabira OP ampa ovo je kljucni korak jer od njega zavisi slew rate , ulazna impedansa i full swing voltage kao i stabilnost samog kola.

Ovde je koriscen LM6164 jedan od poznatih op-amp-ova National Instruments-a. Njega karakterisu odlican slew rate (veoma mali) , ogroman voltage supply range (sto je i trebalo da poseduje) , dosta velik GBW product i jako mali offset voltage. Napravljen je od P tipa differencijanog para na ulazu pa je dosta otporan na sum.

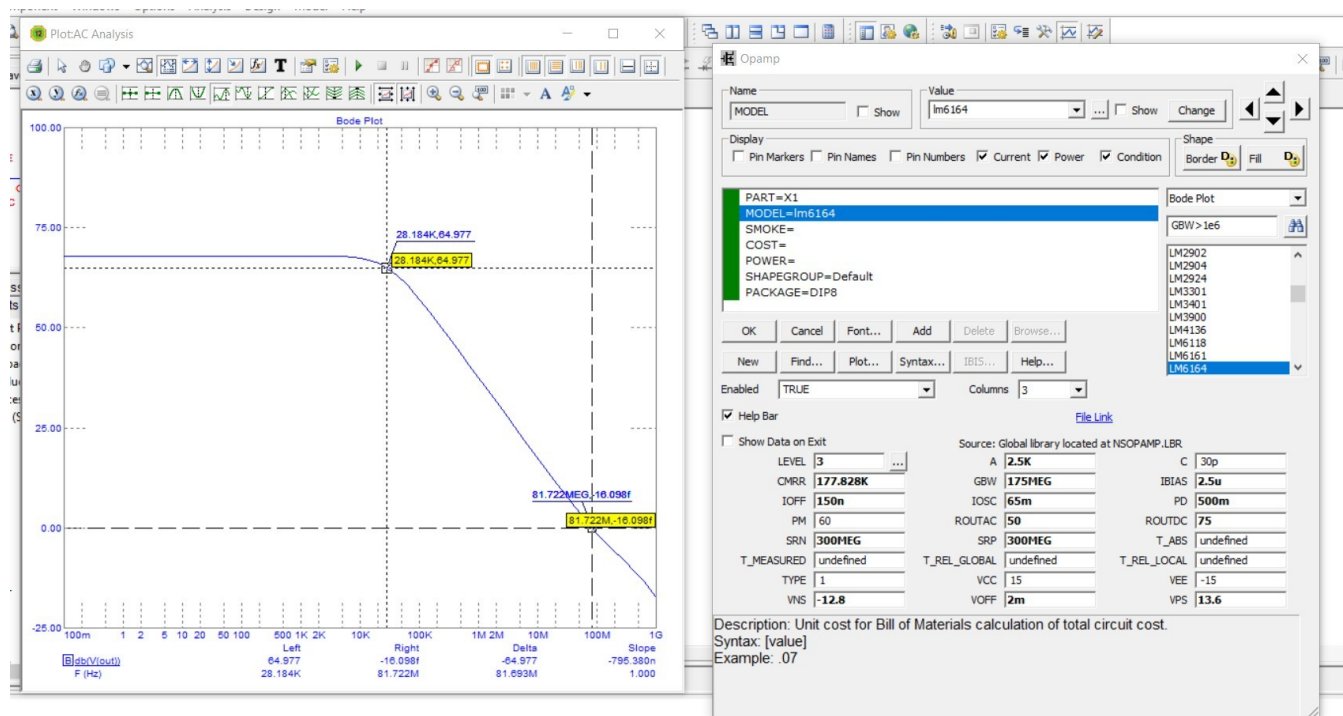
Problem je dosta mala izlazna struja sto se mora popraviti uz pomoc strujnih ogledala , koja su mogla da daju dosta veliku struju .

Jos jedan problem je dosta mala ulazana otpornost , medjutim posto je na ulaz vezan mali otpornik R_1 , to i nije prevelik problem.

Sto se tice current mirror-a tipicno je bolje uzeti CMOS tehnologiju usled ekstremno male struje gejta i struje bulka , i modularnosti. Postoje mnoge topologije koje poboljsavaju karakteristike samog strujnog ogledala povecavajući izlaznu otpornost.

Sto se tice samog BJT ako je potrebno dobiti precizniji strujni izvor moze se koristiti widlar current source ili wilson current source , kao i cascode ili kombinacija CMOS i BJT.

Ako pricamo o izlaznom stepenu strujna zastita je dosta dobra ideja. Ovo se moze postici vezivanjem NPN tranzistora Q_{chief} tako da mu je kolektor vezan na bazu gornjeg tranzistora Q_3 u push pull konfiguraciji. Slicno vazi i za donji tranzistor Q_6 . Treba i vezati i otpornik R_5 izmedju emitera Q_5 i kolektora Q_6 . On ima ologu da napravi dovoljan napon da upali Q_{chief} koji odvlaci struju baze tranzistora Q_5 ka masi , tako smanjuci izlaznu struju i smanjuci pad napona na R_5 gaseci samog sebe. On ne radi nista u ustaljenom stanju kada struja nije iznad dostavljene i R_5 disipira toplotu nepotrebno , medjutim to je cena jednostavnosti ove konfiguracije.



Slika 9. OP amp LM6164