

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Waldemar Haszlakiewicz

Mosfet Hi-Fi Ojačevalnik

Seminarska naloga

pri predmetu
Elektronska vezja

V Grosuplju, junij 2004

1.0 UVOD

1.1 Zgodovina in odločitev za projekt.

2.0 GLAVNI DEL

2.1 Opis delovanja vezja ter njegovih podsklopov s shematskim prikazom

2.1.1 Malo signalna (linearna) analiza ojačevalnika

2.1.2 Omejitev izhodnega kratkostičnega toka

2.1.3 Nastavitev mirovnega toka tranzistorjev T12,T13 (temperaturni izklop, temperaturna kompenzacija)

3.0 ZAKLJUČEK

3.1 Sklepne ugotovitve

1.0 UVOD

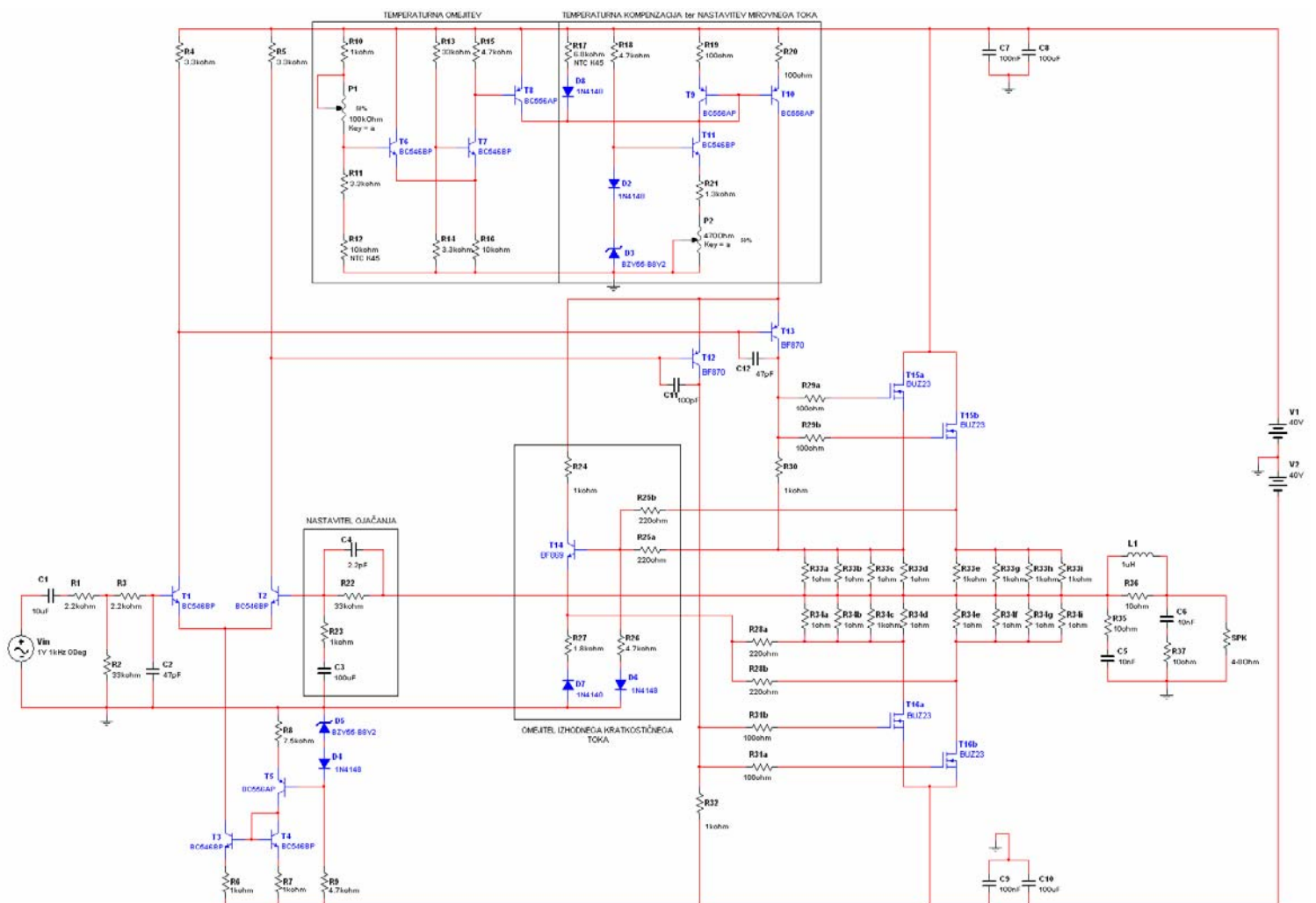
1.1 Zgodovina in odločitev za projekt

Problem mladostnikov današnjega časa je, da glasba nikoli ni dovolj naglas. Ker sem bil tudi jaz tak, sem še v srednji šoli naredil močnostni ojačevalnik, ki bi zadovoljil moje potrebe po glasnosti. S tem sem pri iskanju primerne kvalitete ter moči naletel na mosfet ojačevalnik približno 160W moči ter kvalitete srednjega razreda (Elektor Electronics February 1989). Ker mi takratne izkušnje niso omogočile, da bi naredil boljše tiskano vezje ima ojačevalnik nekaj pomankljivosti, ki pa sem jih poskušal kasneje odpraviti. Vendar ker ljudje odraščamo ter se izpopolnjujemo, se je tako tudi moja glasba ter občutek za kvaliteto. Tako je sedaj opisani ojačevalnik šel v pokoj, saj so ga zamenjali aktivni studijski monitorji, s katerimi pa se ne more primerjati tudi, če bi si želel.

Odločitev za opis dotičnega ojačevalnika pa je bil zelo preprost -> dobro poznavanje njegovih karakteristik ter delovanja.

2.0 GLAVNI DEL

2.1 Opis delovanja vezja, ter njegovih podsklopov s shematskim prikazom



Slika 1. Shematski prikaz celotnega ojačevalnika

V osnovi so ojačevalniki z mosfet končnimi stopnjami precej preprosti, saj potrebujejo za svoje delovanje le prilagoditev gonilne napetosti. Torej so predhodnje ojačevalne stopnje zelo preproste in ne kot pri bipolarnih tranzistorjih, kjer moramo skozi ojačevalnik ojačevati moč.

Če pogledamo ojačevalnikove podsklope vidimo, da je osnovni ojačevalnik zgrajen okoli diferencialnih ojačevalnikov T1-T2, T12-T13 ter mosfet izhodnje stopnje T15a,b-T16a,b. Negativna povratna zanka je pripeljana čez "uporovni delilnik R22/R23". Za stabilno delovanje pa so dodani še "omejevalnik izhodnega kratkostičnega toka", "temperaturni izklop" ter "kompenzator pozitivnega temperaturnega koeficienta mosfetov".

2.1.1 Malo signalna (linearna) analiza ojačevalnika (slika 2):

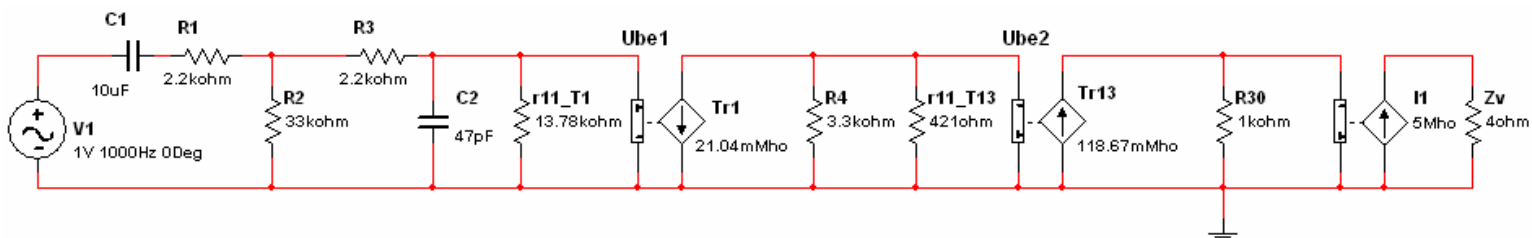
Tokovno zrcalo T3-T4 nam vsiljuje mirovni tok (1.09mA) v diferencialni ojačevalnik T1-T2, kar nam ob deljenju toka na dva dela da $g_{21}=21.04\text{mS} \rightarrow g_{11}=g_{21}/\beta \rightarrow r_{11}=13.78\text{k}\Omega$ - > podobno za diferencialni ojačevalnik T12-T13 (mirovni tok je 6.08mA, ki je bil nastavljen s simulacijo -> P2 nastavimo na tako vrednost, da nam teče skozi izhodne tranzistorje približno 100mA na tranzistor, kar nam postavi ojačevalnik v AB razred -> pri realnem ojačevalniku sem tok nastavil na malo večjo vrednost, kar je povečalo območje, v katerem je ojačevalnik deloval v A razredu, torej sem si pri majhnih vhodnih signalih izboljšal kvaliteto zvoka -> izmerjena stabilna temperatura je bila malo več kot 36°C -> torej, če se pošalim, je bil ojačevalnik živ in zdrav). Pri izhodnjih mosfeti izračunamo g_m s pomočjo naslednje enačbe:

$$g_m = \sqrt{\frac{2C_0 W_{\mu m}}{L} * I_D} = \sqrt{A * I_D}$$

Iz podatkov o elementu (datasheet) izračunamo konstanto A, nato pa vstavimo vrednosti za naš ojačevalnik -> $I_D = 100\text{mA}$.

Opozoriti je treba tudi na to, da so vse vrednosti zgolj orientacijske, saj bi morali izračunati obe skrajni vrednosti -> "best and worst," medtem ko sem jaz uporabil srednje vrednosti (ob implementaciji negativne povratne zanke se te razlike zmanjšajo do take mere, da nimajo dosti vpliva na sam ojačevalnik).

Ob malo signalni analizi ojačevalnika (slika 2) vidimo, da nam sekundarna diferencialna stopnja s svojo r_{11} vrednostjo upora (samo 420Ω) kviri ojačanje prve diferencialne stopnje -> napetostno ojačanje je samo 7.9 (pri analizah ojačevalnikov smo ugotovili, da če želimo čim boljše šumne lastnosti ojačevalnika, mora imeti prva stopnja največje ojačanje, kar v našem primeru ne velja, saj ima sekundarna diferencialna stopnja ojačanje 119), to je tudi eden od razlogov zakaj ojačevalnik spada v razred srednje kvalitete.

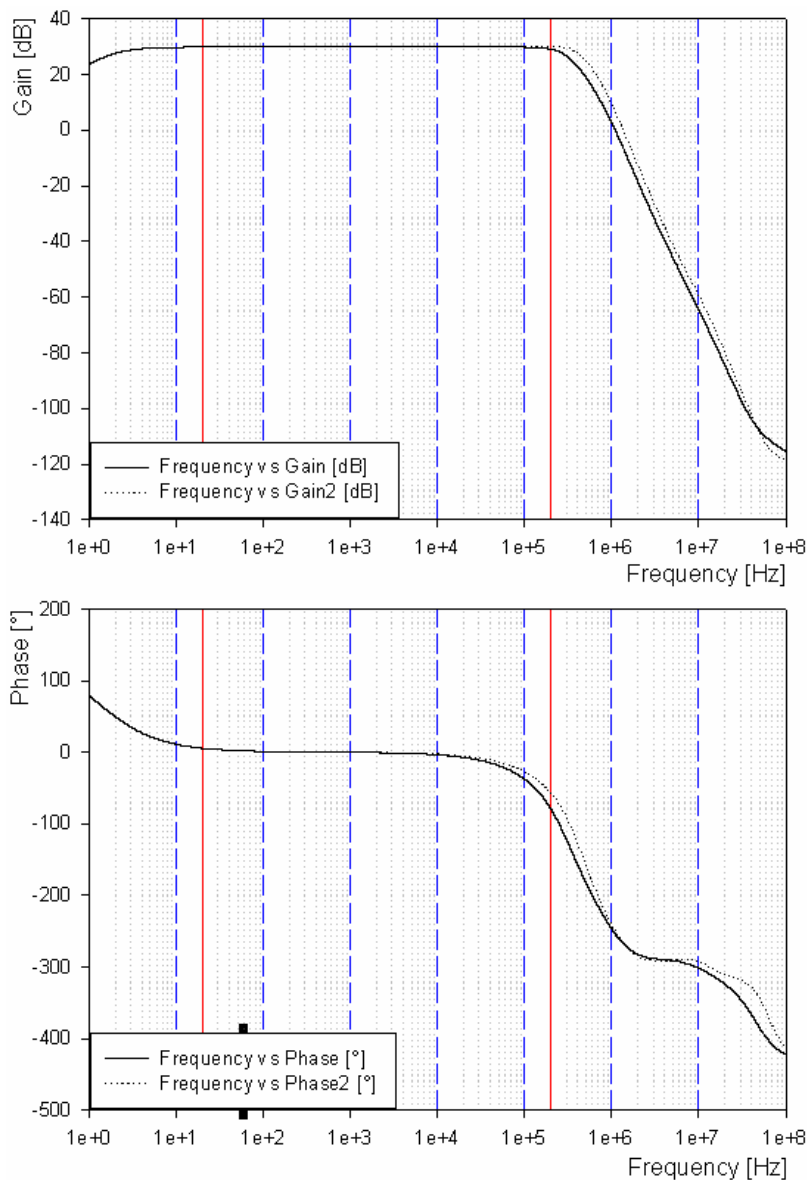


Slika 2. Shema malo signalnega ojačanja polovice ojačevalnika
Opozorilo: Mho pomeni Simens(prevodnost)

Če sedaj izračunamo skupno ojačanje odprte zanke dobimo:

$A_{u_{T1-T2}} = 7.9$, $A_{u_{T12-T13}} = 118.5$ ter $A_{u_{T15a,b}} = 40$ ($A_u = 2 * A_u$ posameznega mosfeta, saj sta vezana vzporedno -> vsak vsiljuje tok enake velikosti v breme) => $A_{u_{skupna}} = 91.5\text{dB}$.

Iz $A_{u_{skupna}}$ lahko sklepamo, da lahko ojačevalnik obravnavamo kot malo močnejši operacijski ojačevalnik. Če sedaj pogledamo negativno povratno vezavo, lahko za analizo prve stopnje odstranimo kondenzatorja C3, ki ima vpliv le na enosmerno napetost (za sofazno krmiljenje -> enosmerne razmere) ter C4, ki pa ima ničlo ter pol daleč nad frekvenco sluha (20kHz) (C4 je v vezju zato, da ojačevalnik ne ojačuje visokofrekvenčnega pasu). Iz tega sledi, da imamo v negativni povezavi preprost uporovni delilnik, ki nam nastavi ojačanje ojačevalnika na približno $A_U = 34$ torej 30.6dB => izračun lahko potrdimo tudi s simulacijo. Za omejitve frekvenčnega odziva imamo v ojačevalniku kondenzatorje C11 ter C12 (to si včasih želimo zaradi raznih elektro-magnetnih motent -> lahko omenim, da je ojačevalnik včasih lovil tudi radio -> no dodati pa je treba, da ni bil v ohišju torej v Faraday-evi kletki). Na sliki 3 se lepo vidi, kakšen vpliv imata kondenzatorja na pasovno širino (črtkano je brez kondenzatorjev).



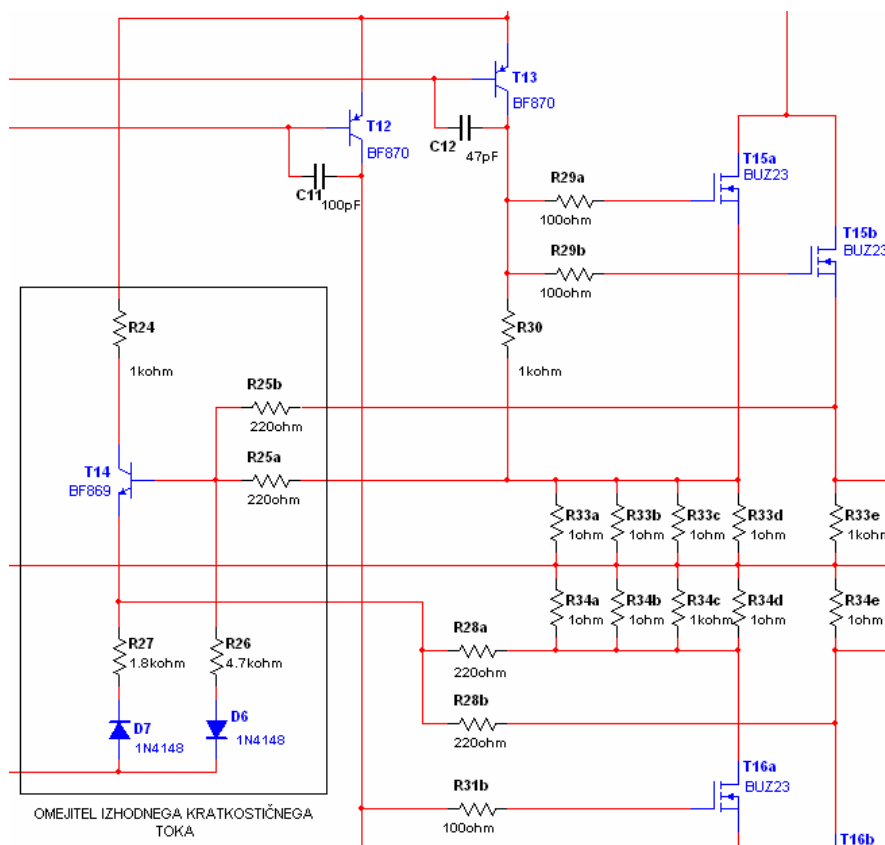
Slika 3. Frekvenčni odziv ojačevalnika z ter brez kondenzatorjev C12 ter C13

Kondenzatorja povzročata lokalno negativno povratno zanko in s tem omejita pasovno širino tranzistorjev, le-ta pa imata močan vpliv na sam ojačevalnik.

Edino podvezje v ojačevalniku, za katerega ne vem, kakšno vlogo ima, je izhodni filter okoli tuljave L1 -> njegov vpliv se začne šele okoli 1MHz ter zmanjša amplitudo za 6dB od 10Mhz naprej.

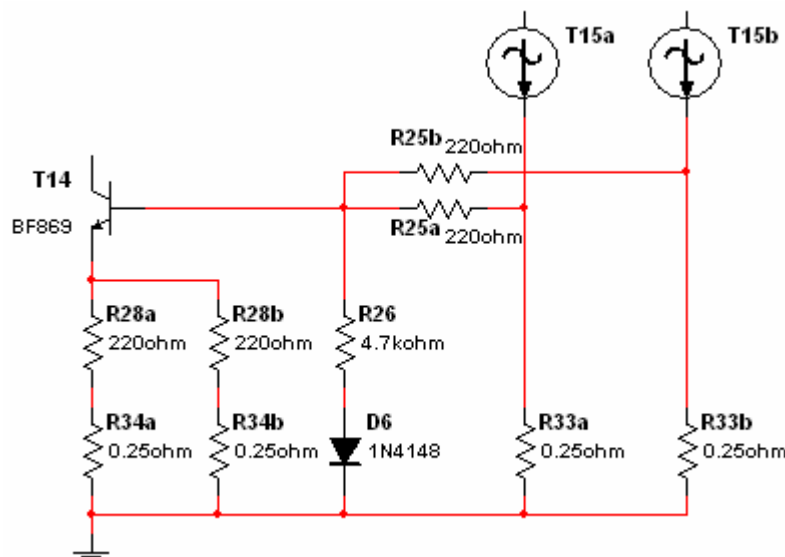
2.1.2 Omejitev izhodnjega kratkostičnega toka (slika 4):

Eden od problemov vsakega ojačevalnika je tudi kratek stik na izhodu ob prisotnosti signala na vhodu. Zamislimo si, kaj bi se zgodilo, če bi na vhod dali signal maksimalne velikosti ter izhod kratko staknili: maksimalno odprti mosfeti imajo notranjo upornost $R_{ON} = 0.2\Omega$, kar bi pomenilo, da bi bil kratkostični tok enak $I_K=200A$ na tranzistor. Očitno preveč, da bi tranzistor "preživel". Torej nekako moramo omejiti kratkostični tok. To naredimo s tem, da vstavimo upor vrednosti 0.25Ω med tranzistorjem ter izhodom (ker bi tak močnostni upor kazal zelo slabe lastnosti, uporabimo 4 upore $1\Omega/1W$ vezane paralelno -> da bi se posamezen upor pregrel, bi moralo čez njega teči $1A$ -> čez vseh 8 uporov (oba tranzistorja) $8A$ -> $P_{OUT}=I^2*R_{IZH}=256W$, kar daleč presega zmoglosti našega ojačevalnika), ter na njem merimo napetost.



Slika 4. Vezje za omejitev izhodnjega kratkostičnega toka

Analizirajmo sedaj poenostavljeno vezje, ki deluje, če sta polno odprta tranzistorja T15a,b (slika 5):



Slika 5. Poenostavljeno vezje kratkostičnega vezja za pozitivni polval signala.

Vezje bi lahko še bolj poenostavili, vendar sem ga namenoma pustil v tej obliki, da bi bil bolj podoben originalnemu vezju, ki nam takoj pokaže, da če se tok čez upora R33a,b poveča preko določene meje, se zaradi tega odpre tranzistor T14. Ta nam odvzame del mirovnega toka tranzistorjev T12,T13, katerima se potem zmanjša ojačanje. Zaradi tega se zmanjša napetost na vratih mosfetov, ta pa se potem delno zapre -> omejitev toka. Vezje nam omeji kratkostični tok na približno 3.3A.

Za negativni polval je vezje podobno, vendar ne deluje tako, da nam "odpira" bazo, ampak nam vleče emitor vse bolj proti negativni napetosti. Torej v obeh primerih nam poveča napetost med bazo ter emitorjem -> odpira tranzistor.

Vprašamo se lahko, ali ta omejitev kaj vpliva na normalno delovanje vezja?

Odgovor je delno da delno ne. Zakaj?

Poglejmo, kakšno moč bi moral ojačevalnik proizvajati pri toku $I_{MOSFET} = 3.3A \Rightarrow$

$P_{OUT} = (2 * I_{MOSFET})^2 * R_{IZH} = 174W$. Torej več kot je predpisana moč -> vezje ne vpliva.

Druga stran medalje pa je, da naše vezje ne deluje kot stikalo, vendar se odziva eksponento -> iz tega sledi, da ko se ojačevalnik približuje svoji maksimalni moči, se vezje že rahlo odziva, kar nam povzroči, da ojačevalnik deluje kot kompresor. Torej nam "plošči" vrhove našega signala -> vezje vpliva.

Če sedaj združimo oba odgovora skupaj, vidimo, da vezje ne bo vplivalo, saj ojačevalnik normalno ne bo deloval pri svoji maksimalni moči.

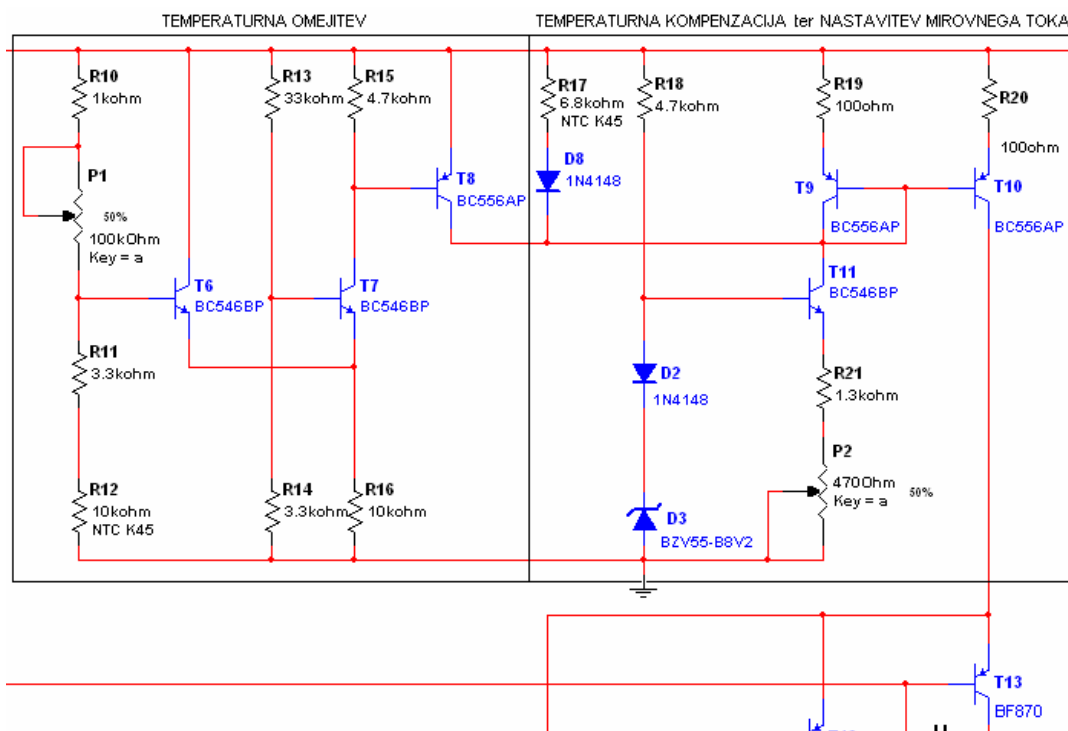
2.1.3 Nastavitev mirovnega toka tranzistorjev T12,T13 (temperaturni izklop, temperaturna kompenzacija) (slika 6):

Na desni strani slike vidimo, da mirovni tok tranzistorjev nastavlja podobno tokovno zrcalo kot pri tranzistorjih T1,T2. Razlika je le v tem, da lahko del toka, ki bi drugače tekkel čez tranzistor T9, teče čez R17-D8 ter čez tranzistor T8. Torej nam ta sekundarni tok zmanjšuje tok čez tranzistor T10 (če se malo zapre tranzistor T9, se malo zapre tudi tranzistor T10).

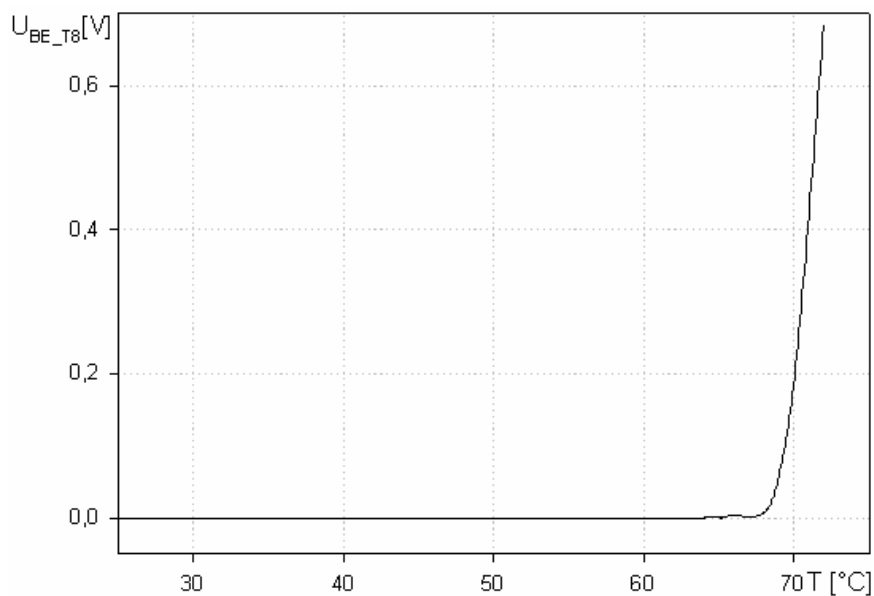
Serijska vezava R17-D8 služi kot temperaturna kompenzacija pozitivnega temperaturnega koeficienta izhodnih mosfetov, vezje na levi strani pa služi kot temperaturni izklop.

Če se sedaj malo poglobimo v vezje na levi, vidimo, da to sloni na "vzporedni" vezavi dveh tranzistorjev T6,T7 -> ta sta krmiljena vsak s svojim uporabnim delilnikom, razlika med

njima je, da je napetost baze tranzistorja T6 višja kot napetost baze tranzistorja T7. Zaradi tega je v normalnem delovanju odprt samo tranzistor T6 ($U_{EMITOR_T7} = U_{EMITOR_T6} = U_{BAZE_T6} - U_{BE_T6} \rightarrow$ tranzistor T6 vsiljuje napetost na emitorju tranzistorja T7 $\rightarrow U_{BE_T7} = U_{R14} - U_{EMITOR_T6}$). Sedaj, ko se temperatura na NTC termistorju povečuje \rightarrow njegova upornost pada \rightarrow pada napetost na bazi tranzistorja T6 \rightarrow pada napetost na emitorju T6, T7 \rightarrow raste razlika $U_{BE_T7} \rightarrow$ tranzistor T7 se odpira. Sedaj, ko je tranzistor T7 odprt, steče čez njega tok \rightarrow pojavi se napetost na uporu R15 \rightarrow odpre se tranzistor T8 \rightarrow zmanjša tok čez tranzistor T9, ki povzroči zmanjšanje toka čez tranzistor T10 \rightarrow zmanjša se mirovni tok tranzistorjev T12, T13 \rightarrow zmanjša se ojačanje \rightarrow zmanjša se napetost na vratih mosfetov \rightarrow omejitev moči (oziroma navidezni izklop, saj prevzame tranzistor T8 praktično ves tok tokovnega zrcala).



Slika 6. Nastavitel mirovnega toka tranzistorjev T12, T13



Slika 7. "Napetost" na tranzistorju T8 v odvisnosti od temperature

3.0 ZAKLJUČEK

3.1 Sklepne ugotovitve

Kot smo videli, sami podsklopi ojačevalnika niso težko razumljivi, vendar imajo še vedno veliko potrebo po simulaciji (še posebno vezje za omejitev izhodnega kratkostičnega toka). Na žalost je v reviji delovanje vezja zelo slabo razloženo, zaradi tega ne razumem potrebe po določenih delih (izhodni filter), vendar je to samo moje pomanjkanje znanja. Na koncu bi rad še povedal, da smo v razumevanju ojačevalnika prišli šele na sredino, saj nastopijo ob izdelavi samega vezja še dodatni problemi -> tiskano vezje v reviji je dokaj slabo narisano (problemi z maso) ter kako skrajšati induktivnost nogic mosfetov, da nam ojačevalnik ne začne nizko frekvenčno oscilirati.

Mogoče še majhno priporočilo profesorju, da bi lahko v eno izmed svojih predavanj vstavil tudi popolno razlago enega izmed močnostnih ojačevalnikov. To je bila zame ena večjih pomanjkljivosti predavanj. Izvedeli smo ogromno teorije o ojačevalnikih, ni pa bilo nikjer nobene resne implementacije, razen nekaj zelo kratkih razlag vezij operacijskih ojačevalnikov.

