

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko

**Gregor Babič**

# **Predajačevalnik**

Seminarska naloga

pri predmetu  
Elektronska vezja

V Kompoljah, junij 2007

## KAZALO

<b>KAZALO .....</b>	<b>2</b>
<b>UVOD.....</b>	<b>3</b>
MOTIVACIJA.....	3
FUNKCIONALNI OPIS VEZJA.....	3
<b>GLAVNI DEL.....</b>	<b>4</b>
HEMA.....	4
OPIS DELOVANJA.....	5
ELEMENTI.....	6
TISKANO VEZJE.....	7
<b>MERITVE.....</b>	<b>9</b>
PRENOSNA KARAKTERISTIKA.....	9
PRESLUH.....	10
ŠUM.....	11
SKUPNO HARMONIČNO POPAČENJE (THD).....	12
<b>ZAKLJUČEK.....</b>	<b>13</b>
MOREBITNE TEŽAVE.....	13
SKLEPNE UGOTOVITVE.....	13
MOŽNOSTI NADGRADNJE.....	13
ZAHVALE.....	13

## UVOD

### MOTIVACIJA

Že med srednjo šolo sem, kot večina nadebudnih elektronikov, z zanimanjem sestavljal takšne in drugačne močnostne ojačevalnike. Nekatere osnovane na integriranih vezjih, druge iz diskretnih komponent.

Nekako je pa naneslo, da se nikoli nisem lotil izgradnje pravega predojačevalnika, ki bi, če ne drugega, opravljal vlogo nastavljanja glasnosti, drugače preglasnim izhodnim stopnjam. Eden od razlogov je bil verjetno to, da je veliko preprosteje in ceneje končni stopnji dodati enostaven potenciometer, ki do neke mere opravi svojo dolžnost.

In ker smo morali pri predmetu Elektronska vezja izdelati poljubno delujoče vezje, sem se odločil, da dokončam projekt katerega sem začel v letih srednjega šolanja in ni nikoli prišel dlje, kot do izdelave tiskanega vezja.

### FUNKCIONALNI OPIS VEZJA

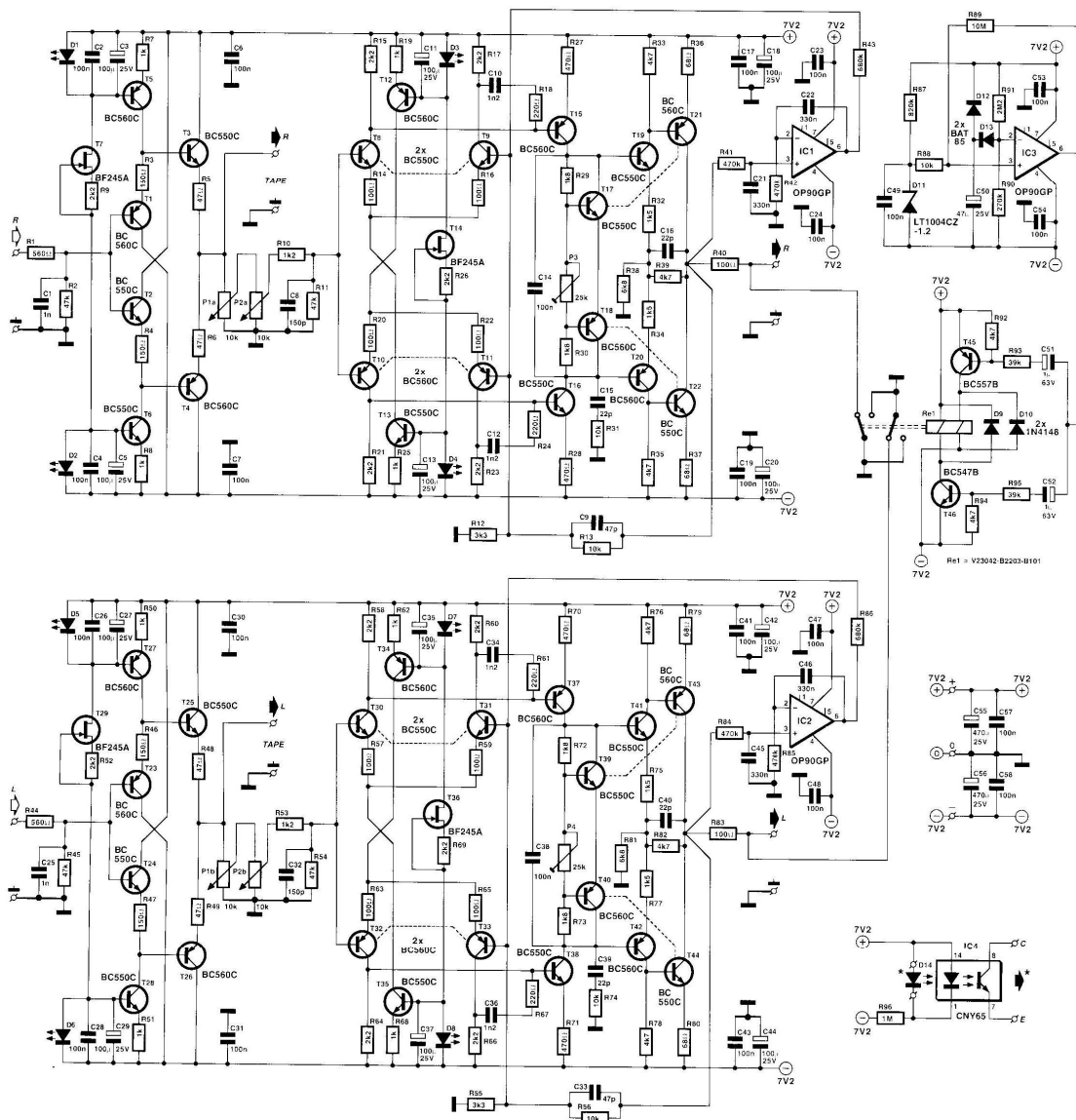
Načrt za moj predojačevalec sem že pred leti našel v angleški reviji Elektor Electronics (številki januar in februar 1997). V osnovi gre za ojačevalnik višjega kvalitetnega razreda, ki mu je v želji po čimmanjših motnjah dodana možnost napajanja iz baterij. Vendar pa sem zaradi nedobavljivosti nekaterih komponent, ki skrbijo za nadzor polnjenja in praznjenja baterij, moral ta del vezja izpustiti. Tako da je ostal samo še navaden predojačevalnik z možnostjo izbire med šestimi vhodi, nastavitvijo glasnosti in izravnave kanalov.

Napajalni del vezja bo preprost dvovalni usmernik z izhodnimi filtri, za zmanjšanje bruma.

## GLAVNI DEL

### HEMA

Shema je za današnje čase integriranih komponent kar nekoliko nenavadna, vendar pa je kot taka dober poligon za test razumevanja snovi, ki smo jo obdelali v prvem semestru pri predmetu elektronska vezja.



## OPIS DELOVANJA

Vežje je kljub uporabi nekaj integriranih vežij, ki skrbijo za kompenzacijo ničelnih napetosti predojačevalca, sestavljeno primarno iz diskretnih komponent. In tudi vsa obdelava signala je izvedena samo z diskretnimi komponentami. Omeniti velja tudi, da na poti signala ne najdemo nobenega kondenzatorja, kar pomeni, da je predojačevalnik sposoben obdelati tudi enosmerne signale.

Ker je predojačevalnik stereo, je vežje podvojeno zato si oglejmo delovanje le enega kanala.

V grobem lahko vežje razdelimo na štiri dele. Vhodni del sestavljajo tranzistorji T1 do T7, kateremu sledita potenciometra za nastavljanje glasnosti in izravnave kanalov. Ojačevalni del gradijo tranzistorji T8 do T22. Integrirano vežje IC1 skrbi za kompenzacijo offset napetosti na izhodu. Vežje IC3 in rele pa skrbita za vklopno zakasnitev izhoda in detekcijo napajalne napetosti.

Na vhodu imamo nizkopasovni filter, ki prepreči vhod visokofrekvenčnih motenj v ojačevalnik.

Sledi buffer ki ga sestavlja kaskadna vezava dveh emitorskih sledilnikov T1 – T3 in T2 – T4. To nam omogoča da sta vhod in izhod te stopnje brez offset napetosti, kar je pogoj za enosmerno povezavo ojačevalnih stopenj. Za optimalno delovanje je treba poskrbeti, da imajo pari tranzistorjev karseda enak faktor ojačanja in prazno napetost  $U_{be}$  in morata biti termično sklopljena.

Napajanje vhodne stopnje predstavljata tokovna vira, ki ju predstavljata par tranzistorja in referenčne diode, ki morata biti termično sklopljena kar prepreči drift, da je tok konstanten poskrbi T7. Vhodna stopnja deluje v razredu A.

Vhodno vežje pelje signal na potenciometra za kontrolo glasnosti in izravnave, ter tudi na neregulirani izhod iz predojačevalnika (t.i. tape-out).

Design ojačevalne stopnje je pravtako popolnoma simetričen, da se izognemo offset napetostim.

Sestavljata ga komplementarni diferencialni stopnji zgrajeni okoli tranzistorjev T8 do T11. Vsaka od diferencialnih stopenj pa ima svoj diskretni tokovni vir, ki je podobno kot v vhodni stopnji zgrajen s parom tranzistorja in diode. Zaradi želje po čimvečji stabilnosti vežja moramo poskrbeti da so pari tranzistorjev v diferencialnih stopenjah termično sklopljeni in uparjeni glede na že zgoraj omenjene paramtere.

Izhod diferencialnih stopenj krmili push-pull stopnjo T15 – T16, ki skrbi za krmiljenje izhodne stopnje.

Prečni tok izhodne stopnje mora biti karseda konstanten za kar skrbita tranzistorja T21 in T22, preko "zenner" tranzistorjev T17 in T18, za nastavitev toka (približno 2 mA) poskrbi trimer P3. Odprtozančno ojačenje stopnje je okoli 1700, pasovna širina pa okoli 2 kHz, za kompenzacijo skrbijo pari R18 – C10, R24 – C12, R31 – C15 in kondenzator C16.

Ker so naše uporabljene komponente neidealne moramo računati, na prisotnost izhodne offset napetosti, katero kompenziramo s pomočjo integriranega vezja IC1, ki predstavlja operacijski ojačevalnik z nizko vhodno offset napetostjo (samo okoli 0.13 mV).

Vsaka offset napetost prisotna na izhodu predojačevalnika se pelje na diferencialno stopnjo, zato je izhodna offset napetost v vseh primerih minimalna.

Zadnji del vezja predstavlja relejski del, ki poskrbi da se motnje ob vklopu in izklopu vezja ne prenesejo na izhod ojačevalnika in posledično na zvočnike, kar lahko povzroči neprijetne pike v zvočnikih. Na žalost je uporabljeni rele bistabilni, in ga nisem mogel dobiti, zato je ta del vezja na mojem ojačevalniku izpuščen. Za zaščito zvočnikov pa se bom v končni izvedbi zanašal na zaščito ki je prisotna na izhodu močnostne stopnje.

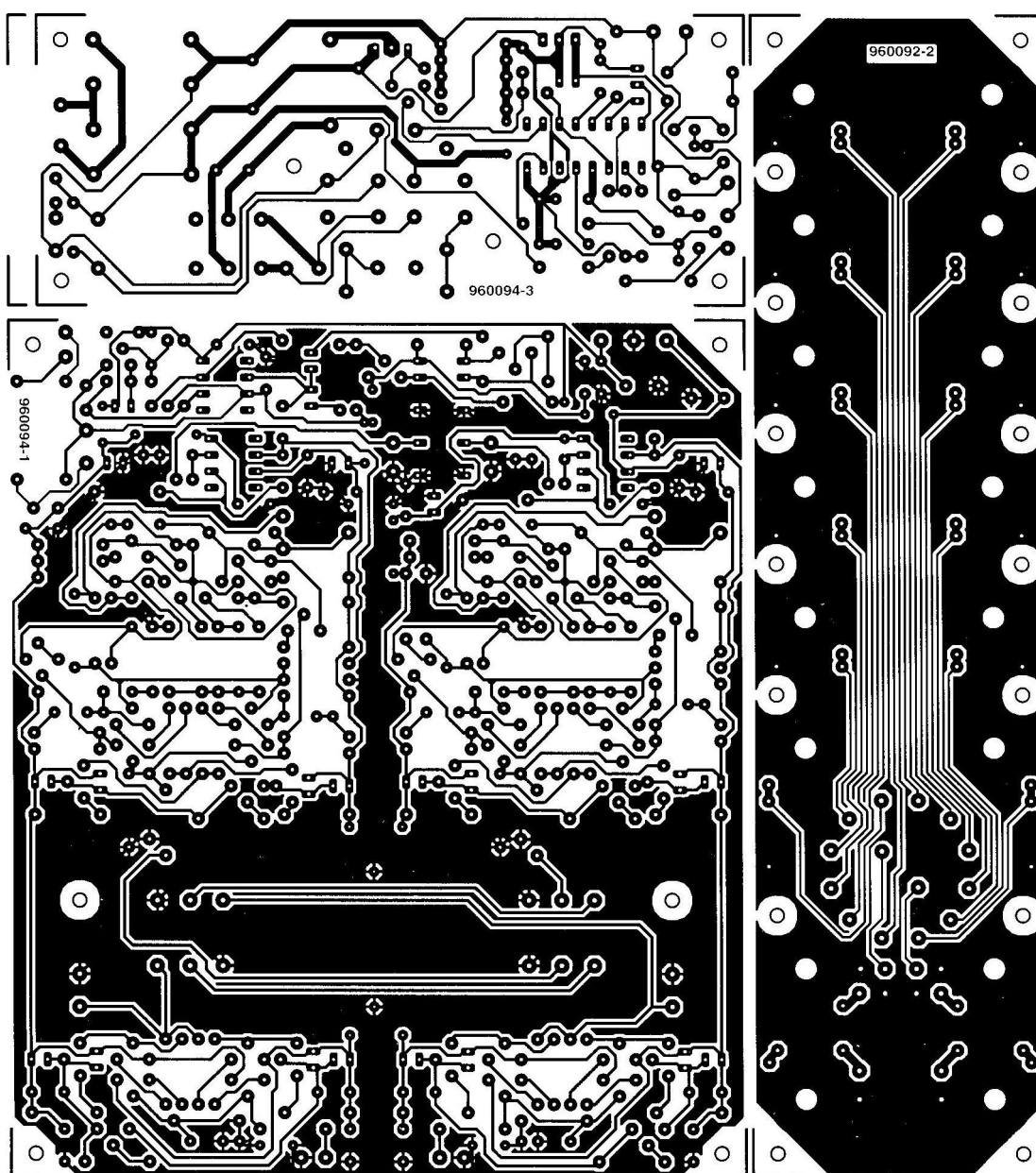
## ELEMENTI

Z dobavljivostjo uporabljenih komponent večinoma ni težav. Gre za kopico bipolarnih transistorjev BC550 in BC560, nekaj uporov, kondenzatorjev, LED diod in drugih malenkosti, ki jih dobimo v vsaki trgovini.

Seveda pa ne gre brez izjem, na tem vezju so to operacijski ojačevalniki OP90GP, ki jih proizvaja Analog Devices. To so operacijski ojačevalniki z nizko porabo in dobrimi PSRR in CMRR, ker je predojačevalnik v osnovi namenjen uporabi z baterijami so te lastnosti zelo dobrodošle. Vendar v moji izvedbi ne bo imela bistvenega vpliva. Te operacijske ojačevalnike mi je priskrbel sošolec Robert Medvešek, za kar se mu še posebej zahvaljujem.

## TISKANO VEZJE

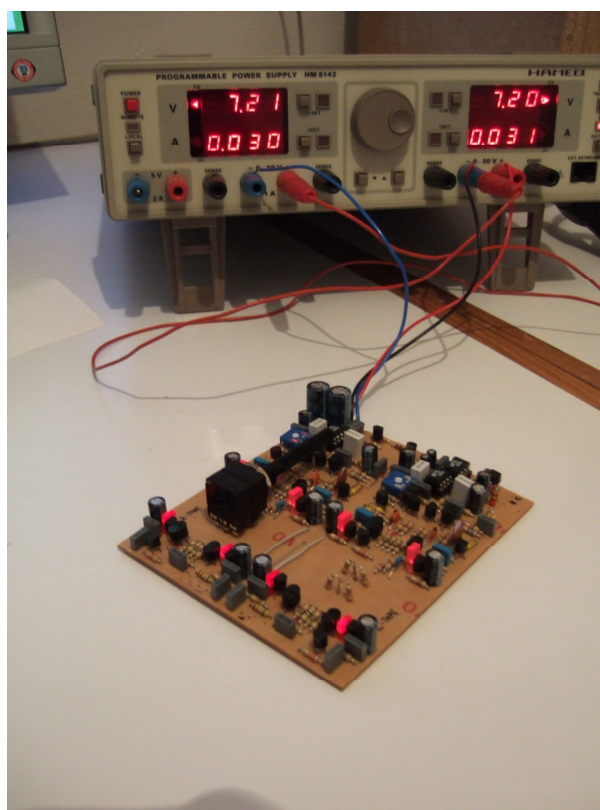
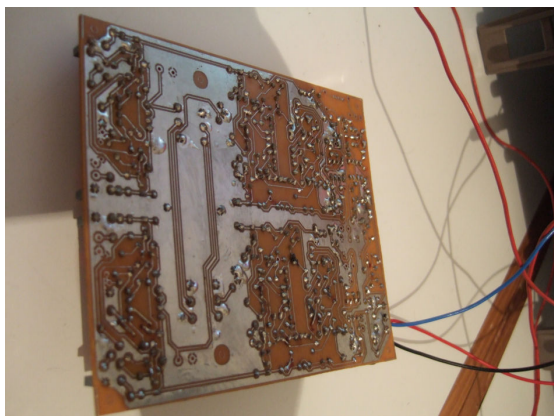
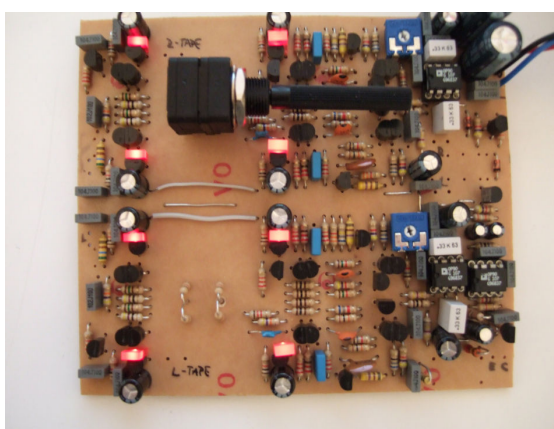
Ker sem načrt za predojačevalnik dobil v reviji, so bile zraven priložene tudi predolge za izdelavo tiskanih vezij. To je izjemno olajšalo izdelavo projekta, saj načrtovanje tiskanega vezja s toliko komponentami vzame veliko časa. Kljub temu pa ni šlo brez težav. Kot je v navadi za načrte iz revije Elektor Electronics, so povezave na tiskaninah zelo tanke in velikokrat problematične za izdelavo v domači delavnici. Na mojem vezju sem zaradi tega pridelal nekaj slabih povezav, kar je pomenilo da vezje ni delovalo takoj in je bilo potrebno iskati napake, kar vzame veliko časa.



## IZDELAVA IN KONČNI IZDELEK

Ker sem v preteklosti že večkrat izdeloval podobne projekte in sem dokaj večš spajkalnika, nisem imel posebnih težav pri sestavljanju vezja. Je pa prišlo do raznih zapletov pri izdelavi, ki pa so bile predvsem posledica površnosti. Zaradi ogromne količine bipolarnih tranzistorjev se mi je zgodilo, da sem zamenjal nekaj komponent med sabo, kar sem ugotovil šele na koncu izdelave, ko je zmanjkalo tranzistorjev, ki so bili pomotoma prispajkani drugam.

Zaenkrat izdelek še ni našel primernega ohišja, in se tako nahaja med zbirko polizdelkov, ki čakajo na moje usmiljenje.



Velja omeniti da je potrebno pri izdelavi izvesti karseda dober stik med pari tranzistorjev in diod, saj tako zmanjšamo neželjeno lezenje karakteristik predojačevalnika, s spremembo temperature.

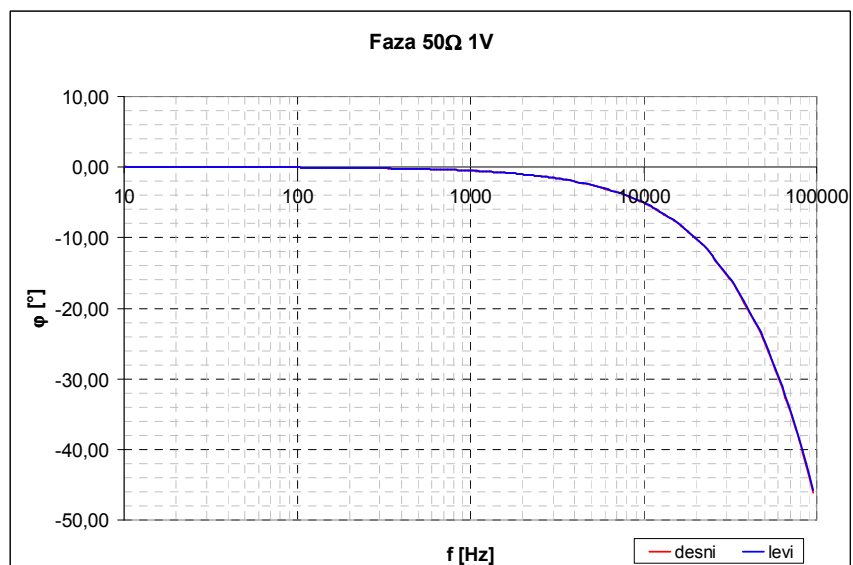
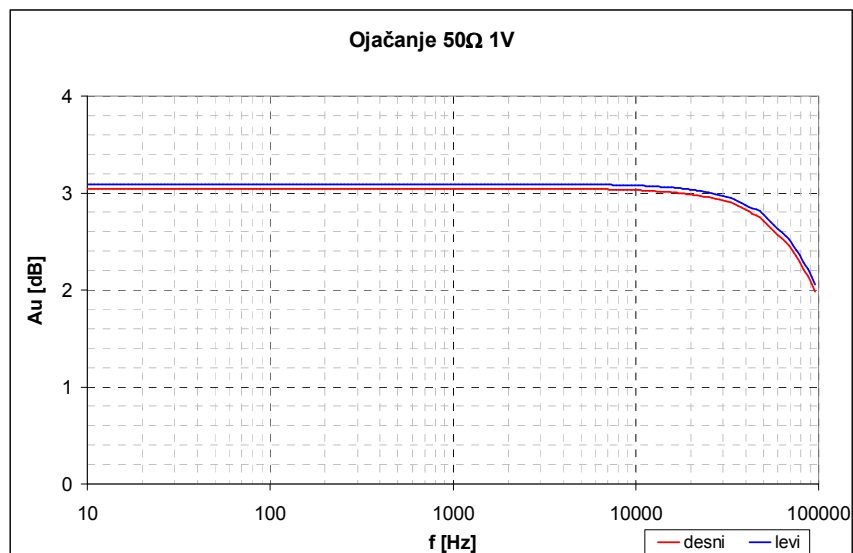


## MERITVE

Pri opravljanju meritve na predojačevalniku mi je veliko pomagal asistent Marko Jankovec. Izvedene so bile s spektralnim analizatorjem, med meritvami pa se je predojačevalnik napajal, tako kot je bilo mišljeno v osnovi, iz svinčenih akumulatorjev. Napetost napajanja je bila  $\pm 13\text{V}$ , ojačevalnik pa zaradi prilagodljive zasnove deluje v območju napajalnih napetosti od  $5\text{V}$  do  $20\text{V}$ . Med meritvami je bil predojačevalnik zaprt v kovinskem ohišju, da bi karseda zmanjšali zunanje vplive motenj.

## PRENOSNA KARAKTERISTIKA

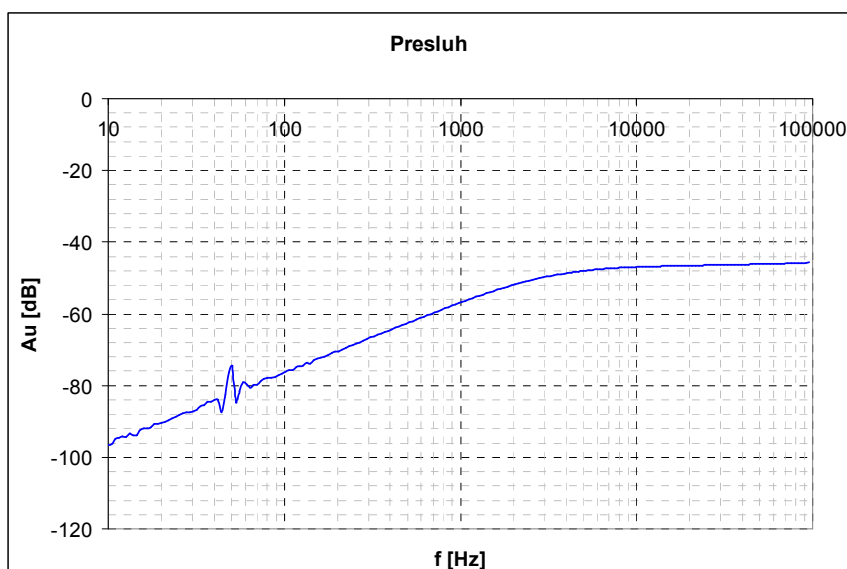
Prenosna karakteristika je bila izmerjena s sinusnim vhodnim signalom amplitue  $1\text{V}$ , kot breme pa je služil sam spektralni analizator ki ima vhodno impedanco  $50\Omega$ .



Rezultati meritev kažejo odlične karakteristike predajačevalnika. Ojačanje obeh kanalov je popolnoma linearno vse do 20kHz, kar je teoretična meja človeškega sluha. Še več, tudi pri višjih frekvencah ojačenje ne pade pod -1dB vse do frekvence 100kHz. Zmoti nekoliko nizko ojačenje, le 3dB, po premisleku zakaj je temu tako, smo ugotovili, da je kriva kombinacija visoke izhodne upornosti predajačevalnika,  $100\Omega$ , z nizko vhodno impedanco spektralnega analizatorja,  $50\Omega$ . V primeru praktične priključitve predajačevalnika pred izhodno stopnjo, ki ima tipično vhodno impedanco  $1k\Omega$ , bi bilo ojačenje višje od 12dB.

## PRESLUH

Meritev je bila opravljena tako, da je bil na vhodu enega kanala vhodni signal amplitude 1V, medtem ko je bil na drugem kanalu vhod kratko sklenjen. Merjena je bila amplituda signala na izhodu drugega kanala.

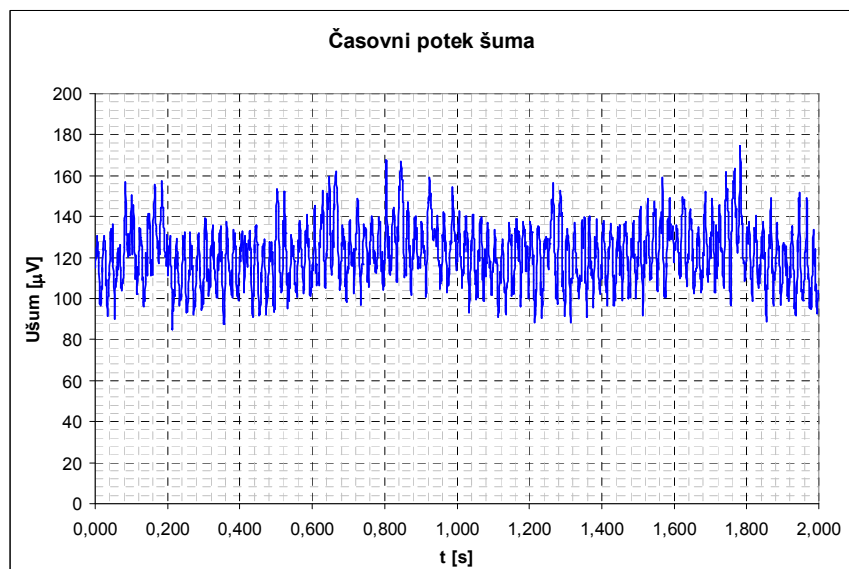
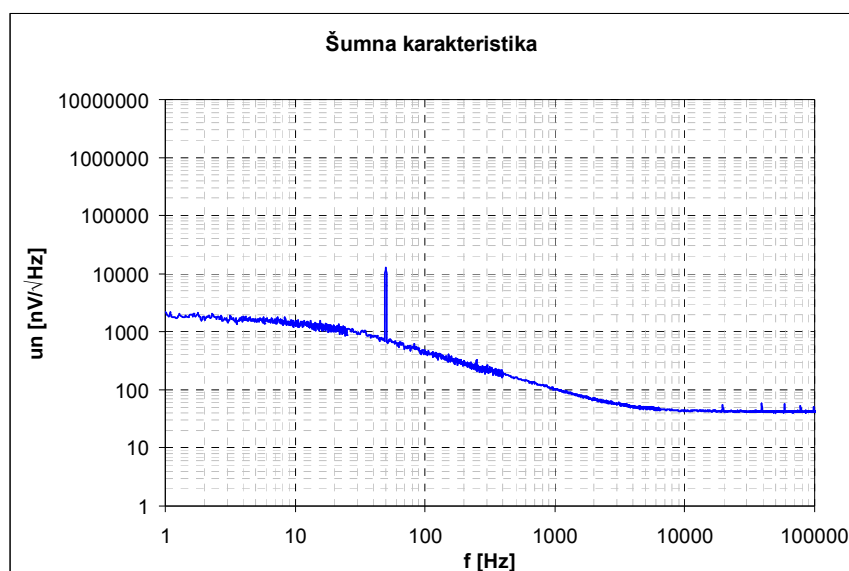


Zaradi izvedbe predajačevalnika na enem tiskanem vezju se vplivu presluha skorajda ne moremo izogniti, tako nekaj povezav levega in desnega kanala potuje vzporedno predvsem na vhodi stopnji v okolici potenciometrov za nastavljanje glasnosti in balance. Poleg tega imata oba kanala deljeno napajanje, kar še dodatno pripomore k slabši karakteristiki. Vendar so rezultati zadovoljivi in skladni s tistimi, ki jih obljublajo tehnične specifikacije v reviji.

Konica v diagramu pri 50Hz ni posledica presluha, ampak motnja omrežne napetosti.

## ŠUM

Meritev je bila izvedena tako da je bil vhod v kratkem stiku merili pa smo amplitudo na izhodu vezja.

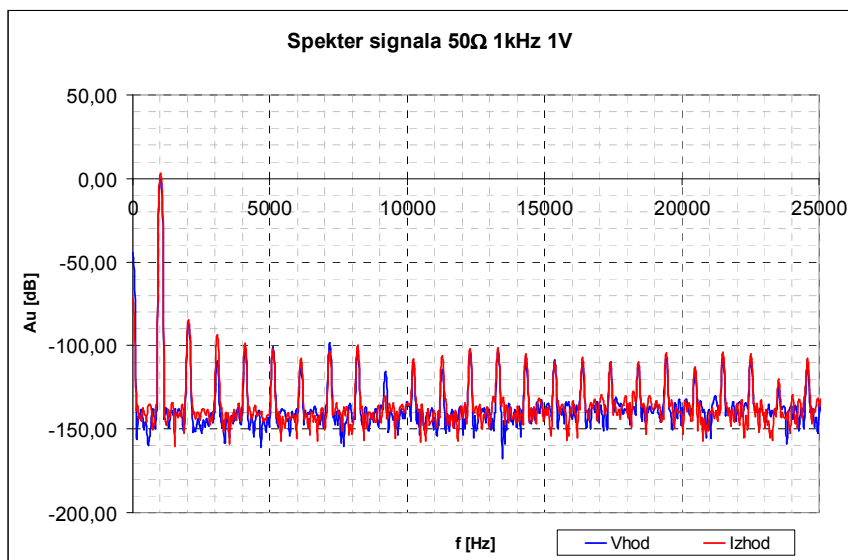


Z rezultati smo lahko zelo zadovoljni, saj razen vpliva motnje omrežne napetosti ni omembe vrednih vplivov. Dobre rezultate lahko pripišemo predvsem uporabi akumulatorjev kot vira napajanja in to, da je bil predojačevalnik med meritvijo zaprt v kovinskem ohišju, ki je preprečil večino zunanjih vplivov.

V realni izvedbi z polnovalnim usmernikom lahko pričakujemo motnjo pri 100Hz in višjih harmonikih te frekvence.

## SKUPNO HARMONIČNO POPAČENJE (THD)

Na vhod predojačevalca smo pripeljali signal sinusne oblike frekvence 1kHz z amplitudo 1V.



Prva meritev je pokazala da je harmonično popačenje izjemno majhno, zato smo na predlog asistenta Marka Jankovca izmerili harmonično popačenje signalnega generatorja v spektralnem analizatorju. Ugotovili smo, da je harmonično popačenje samega signala, ki pride v predojačevalnik (Vhod), na skoraj istem nivoju, kot če vmes priklopimo še predojačevalnik (Izhod), edina razlika je da so vse vrednosti višje za približno 3dB, kar je enako ojačenju predojačevalnika.

Za izračun skupnega harmoničnega popačenja predojačevalnika in signalnega generatorja sem uporabil formulo, ki pravi da je to razmerje korena vsot kvadratov amplitud višjih harmonskih komponent in amplitude osnovne frekvence.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_N^2}}{V_1} = 0,005\%$$

Skupno harmonično popačenje predojačevalnika in signalnega generatorja po preračunu znaša 0,005%. Tehnični podatki v reviji, kjer sem načrt dobil, pa navajajo, da je THD za ta predojačevalnik 0,0007%.

## ZAKLJUČEK

### MOREBITNE TEŽAVE

Razen težav pri sestavi vezja, ki je zaradi velikega števila diskretnih komponent malce zahtevnejša in precej zamudna ni drugih stvari ki bi lahko povzročale preglavice.

Samo vezje je zelo robustno in lahko prenese tudi take neumnosti kot je zamenjava polaritete napajalnih sponk, kar se mi je zgodilo med testiranjem.

Če začnemo z kvalitetno narejenim tiskanim vezjem in malce potrpežljivosti uspeh zagotovo ne izostane.

### SKLEPNE UGOTOVITVE

Projekt se je izkazal zelo pozitivno. Kvaliteta predojačevalca je izjemno visoka, ob ceni ki z nekaterimi poenostavitvami v originalnem načrtu ni previsoka.

Predojačevalnik bo seveda potreboval še primerno ohišje, da bo lahko delal družbo končni stopnji, ki jo doma trenutno uporabljam v kombinaciji z osebnim računalnikom.

Sicer sam računalnik omogoča nastavitve glasnosti prek programske opreme, vendar praktičnosti okroglega gumba za glasnot ne more nadomestiti še tako dobra programska oprema.

### MOŽNOSTI NADGRADNJE

Kot nadgradnjo projekta bi lahko v predojačevalnik dodali še regulacijo jakosti basov in visokih tonov, ali pa bolj napreden "equalizer". Vendar bi se to verjetno ne bi skladalo z zelo audiofilskimi lastnostmi tega predojačevalnika, in bi tudi poslabšalo sicer zelo dobre karakteristike.

Druga možnost pa je izgradnja dela vezja ki skrbi za napajanje predojačevalnika iz baterij, kar bi dodatno pripomoglo k kvaliteti zvoka.

### ZAHVALE

Za konec bi se rad še zahvalil

- asistentu Marku Jankovcu za obilo pomoči pri opravljanju meritev,
- sošolcu Robertu Medvešku za podarjene komponente,
- ter ostalim kolegom, ki so pomagali z nasveti.