

Četverokanalno audio miješalo

Halambek, Fran

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:506918>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 159

ČETVEROKANALNO AUDIO MIJEŠALO

Fran Halambek

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 159

ČETVEROKANALNO AUDIO MIJEŠALO

Fran Halambek

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 159

Pristupnik: **Fran Halambek (0036514554)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektronika
Mentor: prof. dr. sc. Igor Krois

Zadatak: **Četverokanalno audio miješalo**

Opis zadatka:

Zadatak rada je dizajn, analiza i izrada četverokanalnog audio miješala. Svaki sklop kanala treba imati diferencijske ulaze XLR i TRS tipa, kontrolu pojačanja, visokopropusni filter, ekvalizatorski stupanj, panorama kontrolu te kontrolu glasnoće. Izlaz uređaja mora biti stereo. Uređaj treba biti napajan vanjskim napajanjem, te imati 48 V fantomsko napajanje na ulazu svih kanala. U radu je potrebno posebnu pozornost obratiti na mehaničku i električku izvedbu miješala te na montažu konektora.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 159

ČETVEROKANALNO AUDIO MIJEŠALO

Fran Halambek

Zagreb, Rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 159

ČETVEROKANALNO AUDIO MIJEŠALO

Fran Halambek

Zagreb, Rujan 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 159

Pristupnik: **Fran Halambek (0036514554)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektronika
Mentor: prof. dr. sc. Igor Krois

Zadatak: **Četverokanalno audio miješalo**

Opis zadatka:

Zadatak rada je dizajn, analiza i izrada četverokanalnog audio miješala. Svaki sklop kanala treba imati diferencijske ulaze XLR i TRS tipa, kontrolu pojačanja, visokopropusni filter, ekvalizatorski stupanj, panorama kontrolu te kontrolu glasnoće. Izlaz uređaja mora biti stereo. Uređaj treba biti napajan vanjskim napajanjem, te imati 48 V fantomsko napajanje na ulazu svih kanala. U radu je potrebno posebnu pozornost obratiti na mehaničku i električku izvedbu miješala te na montažu konektora.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| Uvod | 1 |
| 1. Blok shema sklopa..... | 2 |
| 2. Ulazni stupanj..... | 4 |
| 2.1. Ulazna zaštita i kontrole | 4 |
| 2.2. Pretpojačalo | 5 |
| 3. Obrada signala | 9 |
| 3.1. Visokopropusni filter..... | 9 |
| 3.2. Tropojasni ekvilizator..... | 12 |
| 3.3. Mjerenje karakteristike ekvilizatorskog stupnja..... | 16 |
| 4. Detektor razine signala | 18 |
| 5. Kontrola glasnoće kanala..... | 22 |
| 6. Stupanj miješala..... | 24 |
| 7. Izlazni stupanj uređaja | 27 |
| 8. Napajanje sklopa..... | 28 |
| 9. Konstrukcija | 30 |
| Zaključak | 36 |
| Literatura | 37 |
| Sažetak..... | 38 |

Uvod

Stolovi za miješanje audio signala, *miks pultevi*, *mikseri*, audio miješala mnogi su nazivi za uređaj kojem je cilj primiti audiosignale različitih razina, frekvencijskih i dinamičkih karakteristika, te ih obraditi, prilagoditi i prenijeti drugim uređajima, pojačalima ili zvučnicima za snimanje ili reprodukciju. Rangiraju sve od malih, dvokanalnih miješala pa sve do ogromnih 90-kanalnih pulteva koji se koriste za potrebe obrade zvuka za televiziju, radio, živu muziku, studijske glazbene snimke i mnoge druge potrebe.

Iako u području analogne audioelektronike nema više mnogo prostora za istraživanjem, mnogi se ljudi još bave audioelektronikom i pokušavaju doći što čistiji zvuk za užitak slušanja glazbe.

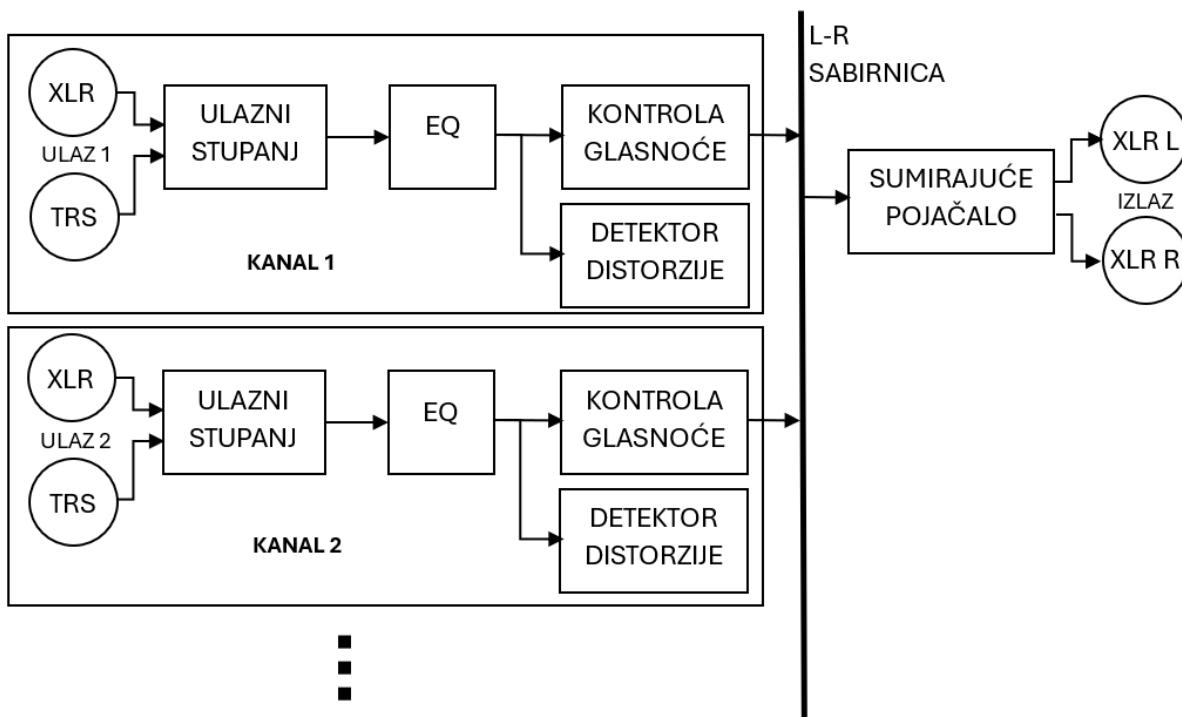
Ovaj rad bavi se analizom generalne funkcije jednog četverokanalnog miješala zvuka, te opisom izrade takvog audio miješala napravljenog za osobne potrebe, od izrade sheme, dizajna PCB-a, odabira komponenti do fizičke konstrukcije samog uređaja. Dizajn sklopa ostvaren je uz pomoć *KiCad* programa za crtanje shema i dizajn PCB-a, a simulacije i mjerenja ostvarena su uz pomoć alata *LTspice* i *Audacity*.

1. Blok shema sklopa

Blok shema uređaja prikazana je na Slici 1, i sadrži elemente koji se standardno pronalaze u komercijalnim analognim miješalima, poput Behringer Xenyx serije, Allen Heath PA serije, Allen Heath ZED serije, i sl.. Miješalo se sastoji od četiri kanala i sumirajućeg pojačala te izlaznog stupnja za balansiranje izlaznog signala. Iako ovo miješalo ima samo četiri kanala, nadogradivo je s teoretski neograničenim brojem kanala koji svi mogu biti zbrojeni sumirajućim pojačalom. U praksi smo ograničeni napajanjem sklopa.

Svaki od četiri kanala je identičan i sadrži:

- ulazni stupanj s ulaznom zaštitom i pretpojačalom,
- stupanj za frekvencijsku obradu signala s visokopropusnim filterom i tropojasnim ekvilizatorom,
- indikator distorzije signala,
- izlazni stupanj kanala s kontrolom glasnoće i panorame



Slika 1 - Blok shema audio miješala

Na ulazu svakog kanala nalaze se konektori XLR i TRS tipa, a na izlazu uređaja nalaze se dva konektora XLR tipa za *stereo* izlaz. Svaki kanal za kontrolu signala ima 7 potencijometara, jedan prekidač i tri gumba. Za kontrolu izlaznog signala koriste se dva klizna potencijometra, za lijevi i desni kanal.

Navedeni ulazni konektori su odabrani zbog svoje raširenosti u audioindustriji, gdje se smatraju standardom. Skoro svaki mikrofoni i većina DI-kutija imaju XLR izlaze, dok klavijature, *sampleri*, *DJ playeri* i konzole i slični uređaji u većini slučajeva imaju 6.35 mm TRS izlazne konektore. XLR kabeli su odlični u prenošenju slabog diferencijalnog signala na velike udaljenosti, i zbog toga se koriste za spajanje skoro svih mikrofona.

Za kontrolu glasnoće svakog od kanala postoji obični potencijometar. Želja mi je bila na svakom kanalu imati klizni potencijometar za kontrolu glasnoće, no to bi drastično povećalo cijeli uređaj. Zbog prenosivosti uređaja, donijela se odluka da samo kontrola izlazne glasnoće bude ostvarena kliznim potencijometrima

S obzirom na to da su sva četiri kanala identična, u ovom radu će se obraditi put signala samo jednog od kanala.

2. Ulazni stupanj

2.1. Ulazna zaštita i kontrole

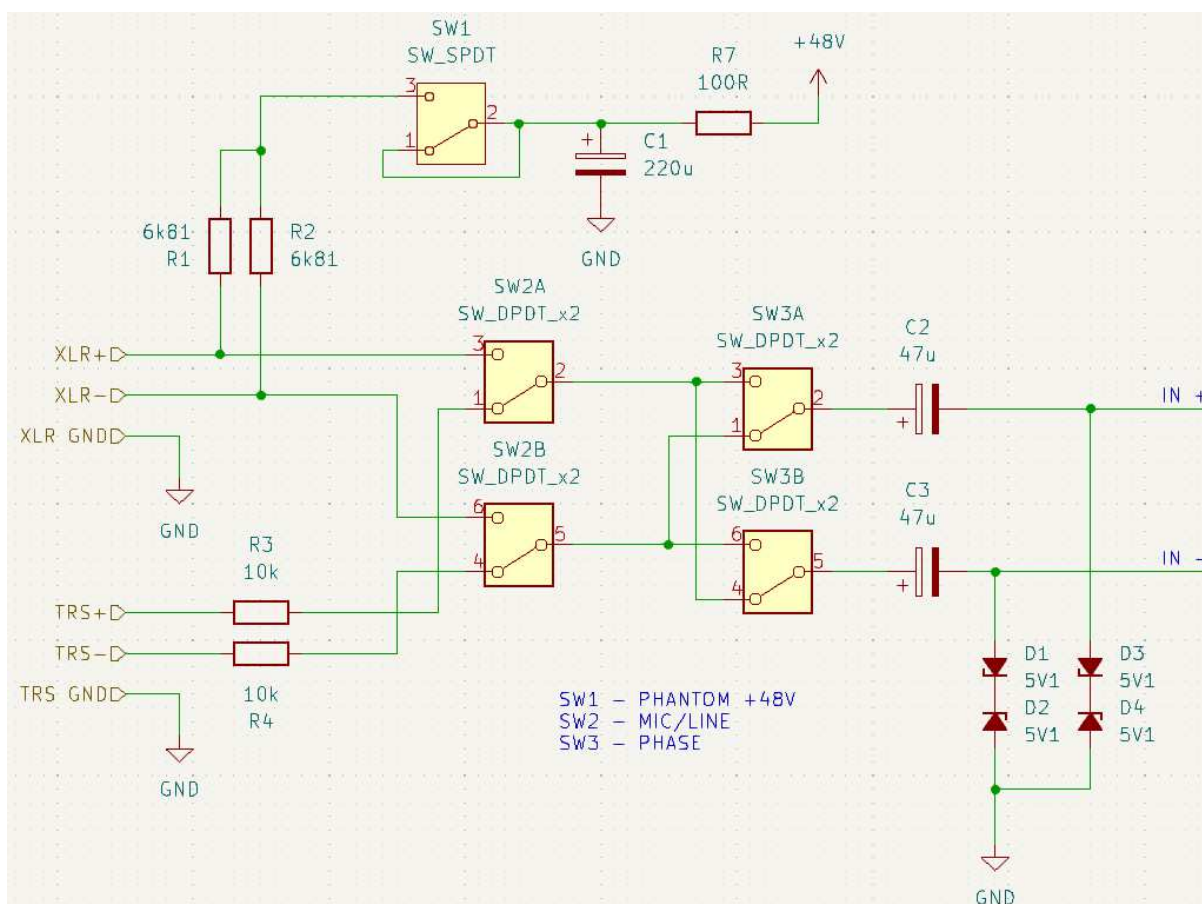
Ulazi ovog sklopa su diferencijski ulazi XLR tipa (za mikrofone) i TRS tipa (za uređaje s linijskim izlazom). Na ulazu svakog kanala je prekidač (SW2) koji služi za odabir konektora s kojega dolazi signal.

XLR ulaz ima mogućnost fantomskog napajanja na 48 V, za napajanje izvora signala spojenih na taj konektor, kao što su kondenzatorski mikrofoni ili DI-kutije. Standardi za razine fantomskog napajanja u industriji su 12 V, 24 V i 48 V, ali 48 V je daleko najraširenije korištena razina i zato se koristi u ovom sklopu. Fantomsko napajanje na ulaz dolazi preko otpornika R1 i R2 vrijednosti 6.81 k Ω , jer je vrijednost tih otpornika standardizirana. Kondenzator C1 služi za uklanjanje smetnji s izvora napajanja. Gumb SW1 služi za paljenje fantomskog napajanja na kanalu.

Da visoki DC napon fantomskog napajanja ne bi došao do ulaza pretpojačala, postavljeni su blokadni kondenzatori C2 i C3. Bilo je važno paziti da ti kondenzatori mogu izdržati barem 50 V, zbog razine fantomskog napajanja od 48 V.

Zener diode služe kao zaštita ulaza pretpojačala od prenapona i tranzijentnih pojava.

Uz kontrolu fantomskog napajanja i odabira ulaza, na ulaznom stupnju nalazi se i kontrola za obrtanje faze signala. *Phase-flip* se najčešće koristi u slučaju kad imamo dva mikrofona pozicionirana izvan faze jedan od drugoga, kako bismo spriječili destruktivnu interferenciju signala i ostale interferentne efekte (npr. stvaranje češljastog filtra) između ta dva mikrofona. Faza se obrće pritiskom na gumb SW3, tako da se linija neinvertiranog signala s ulaza prespoji na liniju invertiranog signala prema pretpojačalu, i obrnuto.

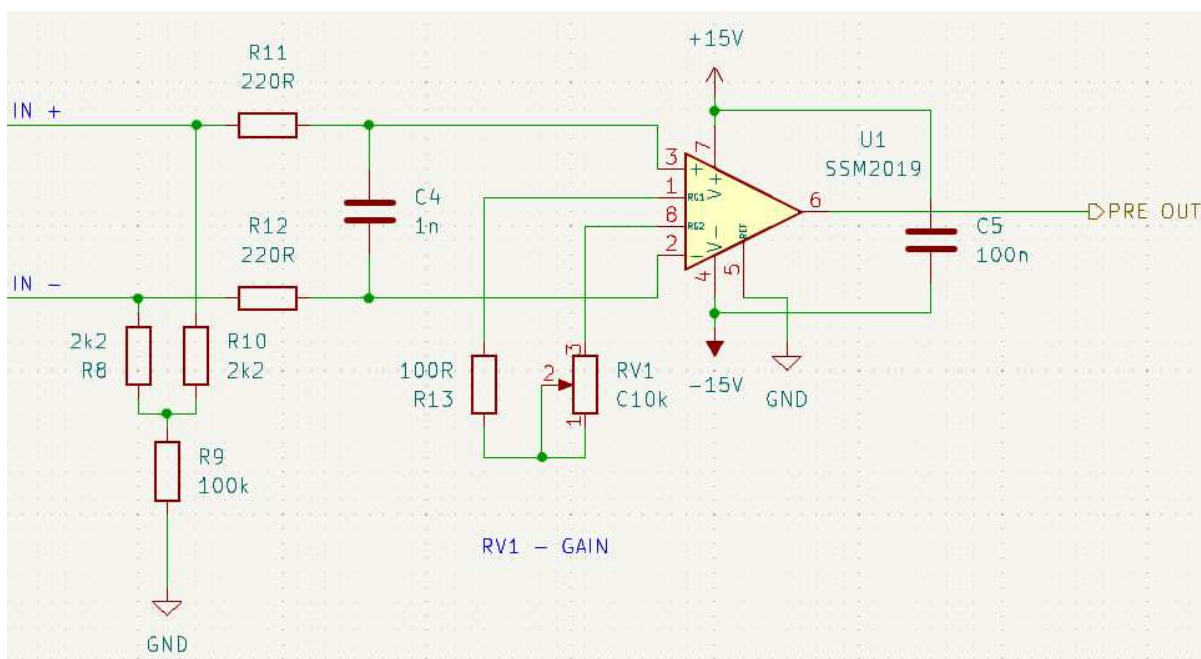


Slika 2 - Shema ulaznog stupnja

2.2. Pretpojačalo

Pretpojačalo ovog sklopa ostvareno je integriranim krugom *SSM2019* (mikrofonsko pretpojačalo s podesivim pojačanjem). Ono je odabrano zbog cijene i jednostavnosti implementacije u sklop.

Ostale opcije koje su se razmatrale bile su pretpojačalo s transformatorom, koji bi dao najbolji CMRR diferencijalnog signala (ali je daleko najskuplja opcija), ili izrada diskretnog pretpojačala uz pomoć bipolarnih tranzistora ili izrada instrumentacijskog pojačala (što bi bilo malo skuplje i puno kompliciranije nego korištenje integriranog pretpojačala).



Slika 3 - Shema pretpojačala

Sklopovlje na ulazu čipa *SSM2019* (Slika 3) služi za zaštitu čipa od tranzijentnih pojava pri ukopčavanju i iskopčavanju mikrofona i ostalih uređaja u ulaz sklopa, a napravljeno je prema preporuci proizvođača iz *datasheet*-a.

Pojačanje pretpojačala određuje se otporom spojenim između 1. i 8. kontakta čipa. Pojačanje se računa po formuli:

$$G = \frac{10 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1 \quad (1)$$

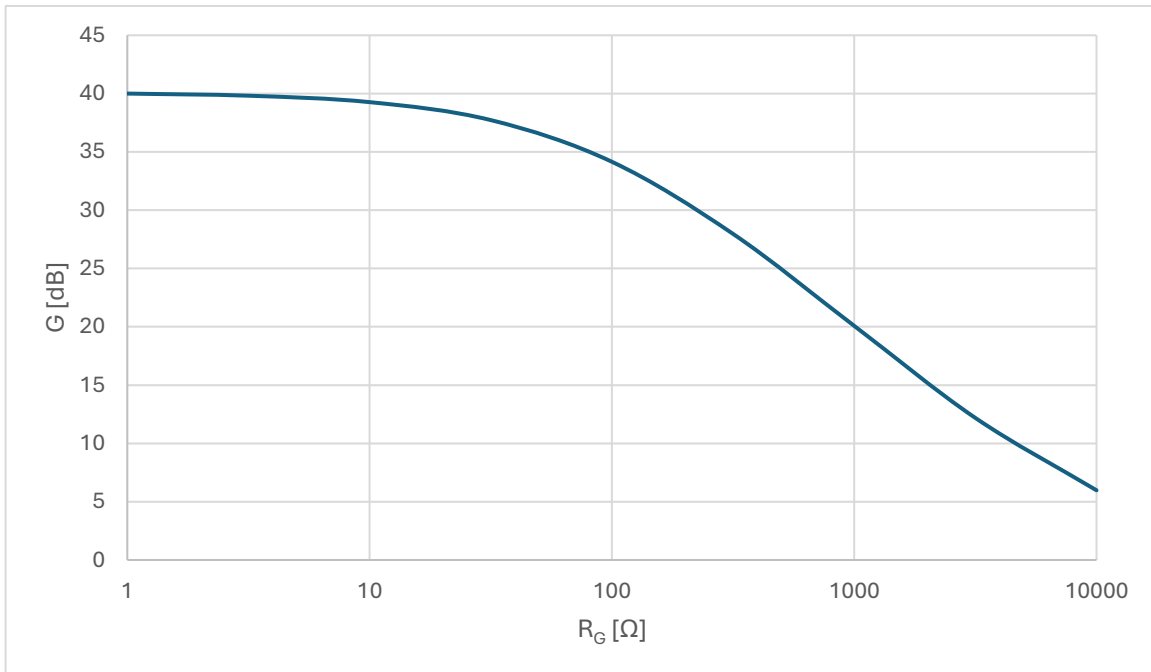
Gdje je R_G u ovom slučaju jednak:

$$R_G = R_{13} + RV1 = 100 \Omega + RV1 \quad (2)$$

$$RV1 = 10 \text{ k} \Rightarrow G = \frac{10 \text{ k}}{10.1 \text{ k}} + 1 \approx 6 \text{ dB} \quad (3)$$

$$RV1 = 0 \Rightarrow G = \frac{10 \text{ k}}{100} + 1 \approx 40 \text{ dB} \quad (4)$$

Prema tome, za potenciometar RV1 vrijednosti $10\text{ k}\Omega$ dobivamo vrijednosti pojačanja od 6 dB do 40 dB. Otpornik R13 je u seriji s potenciometrom jer nam nije potrebno pojačanje veće od 40 dB.



Graf 1 - Ovisnost pojačanja pretpojačala o otporu potenciometra

Mjerenje na Slici 4 prikazuje odnos signala na ulazu sklopa i signala na izlazu pretpojačala. Na ulaz sklopa doveden je diferencijalni signal frekvencije 1 kHz, a vrijednost otpornika RV1 postavljena je na $1\text{ k}\Omega$. S obzirom na to da je signal diferencijalni, na ulaz pretpojačala dolazi signal duplo veće amplitude od one izmjerene (mjerena je samo pozitivna komponenta ulaznog signala).

Teoretski izračun daje nam pojačanje:

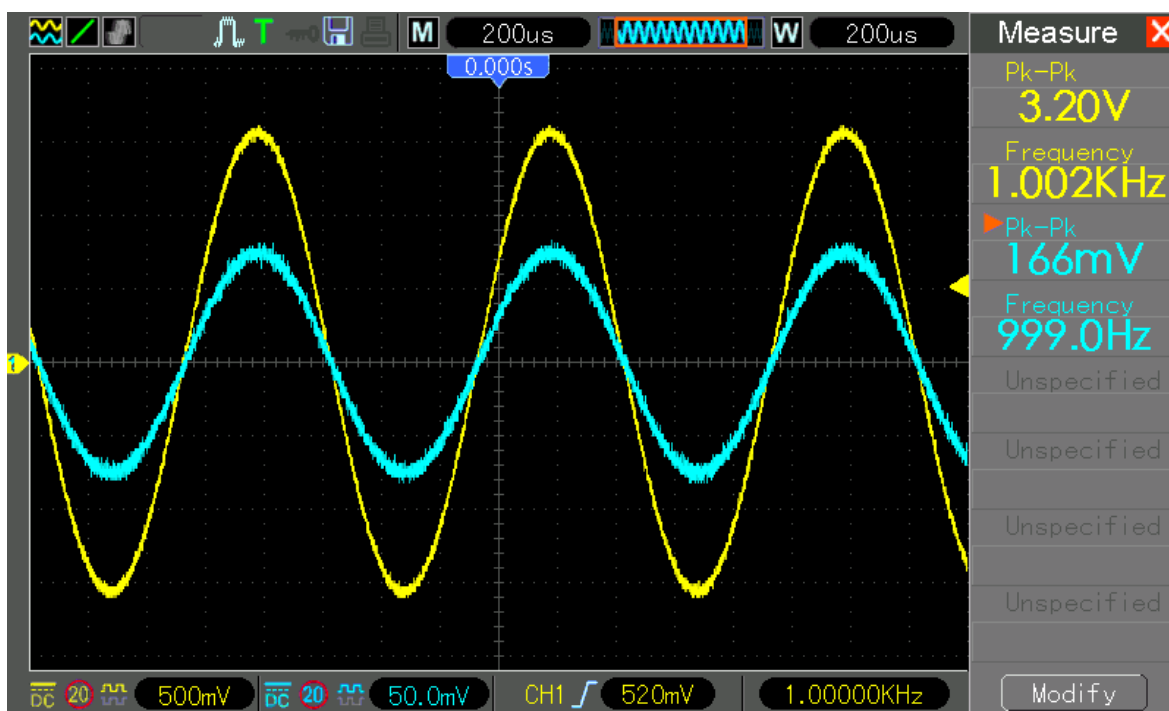
$$G = \frac{10\text{ k}\Omega}{1\text{ k}\Omega + 100\ \Omega} + 1 = 20.1\text{ dB} \quad (5)$$

Iz očitavanja mjerenja računamo:

$$A_V = \frac{U_{iz_pp}}{U_{ul_pp}} = 20 \log \frac{3.20 \text{ V}}{0.332 \text{ V}} \text{ dB} \quad (6)$$

$$A_V = 19.7 \text{ dB} \quad (7)$$

Može se vidjeti kako se dobiveno pojačanje poklapa s teoretskim izračunom pojačanja pretpojačala



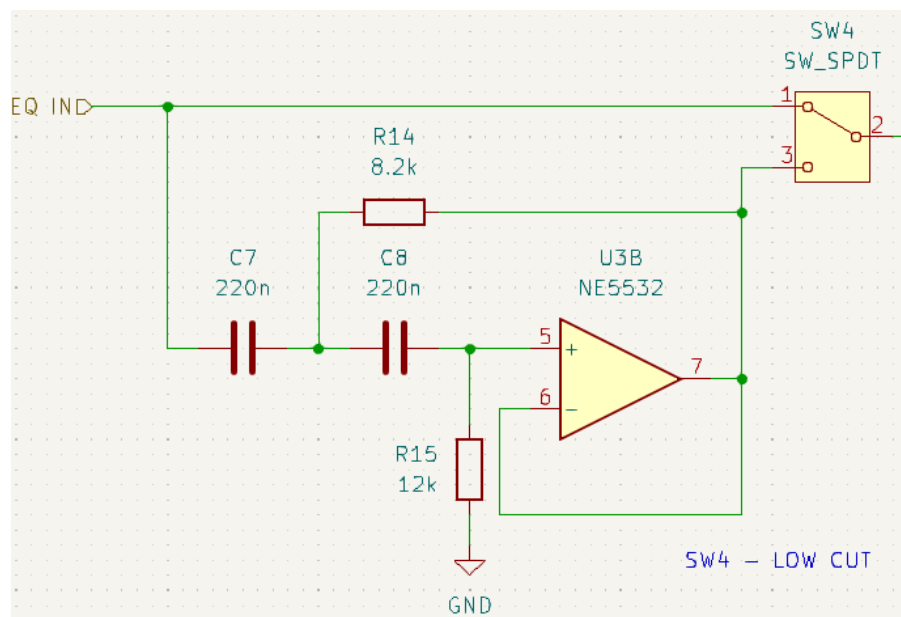
Slika 4 - Mjerenje odnosa signala na ulazu sklopa (plavo) i signala na izlazu pretpojačala (žuto)

3. Obrada signala

3.1. Visokopropusni filter

Visokopropusni filter koji se koristi u ovom sklopu je aktivni filter drugog reda izveden u Sallen-Key topologiji. Takav filter je izabran kao kompromis između jednostavnosti izvedbe i jačine filtriranja. Za jednostavniju izradu mogao se koristiti jednostavni pasivni RC-filter, a za agresivnije filtriranje mogao se koristiti filter višeg reda, koji bi imao više komponenti i bio kompliciraniji za izraditi. Slika 5 prikazuje shemu visokopropusnog filtera u ovom sklopu.

Prekidač SW4 zaobilazi visokopropusni filter, i mora se pritisnuti ako se filter želi uključiti u put signala.



Slika 5 – Shema visokopropusnog filtera

Vrijednosti otpornika i kondenzatora su izabrane kako bi se postigla granična frekvencija od $f_g = 70$ Hz i faktor dobrote $Q = 0.707$ (Butterworthova aproksimacija). Faktor dobrote od 0.707 je specifičan zbog toga što daje najstrmije moguće koljeno bez stvaranja nepoželjnog pojačanja pri graničnoj frekvenciji filtra.

Za početak, odabrao sam otpor $R = 10 \text{ k}\Omega$ i graničnu frekvenciju $f_g = 70 \text{ Hz}$. Prema tome sam dobio vrijednosti kondenzatora u filtru:

$$f_g = \frac{1}{2\pi * R * C} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{2\pi * R * f_g} = 227 \text{ nF} \approx 220 \text{ nF} \quad (9)$$

Dalje su vrijednosti otpornika prilagođene za $Q = 0.707$ po formuli:

$$R_{14} = R * Q = 7.07 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

$$R_{15} = \frac{R}{Q} = 14.14 \text{ k}\Omega \quad (11)$$

S obzirom na to da dobivene vrijednosti nisu standardne vrijednosti otpora, odlučio sam ih prilagoditi na E12 niz i tako dobio vrijednosti:

$$R_{14} = 8.2 \text{ k}\Omega \quad (12)$$

$$R_{15} = 12 \text{ k}\Omega \quad (13)$$

Ti granična frekvencija i faktor dobrote iznose:

$$f_g = \frac{1}{2\pi * \sqrt{R_{14} * R_{15} * C_7 * C_8}} = 73 \text{ Hz} \quad (14)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_{14} * R_{15} * C_7 * C_8}}{R_{14} * (C_7 + C_8)} = 0.605 \quad (15)$$

Na Slici 6 mogu se vidjeti frekvencijske karakteristike nekoliko vrsta filtera dobivene simulacijom u programu *LTspice*.

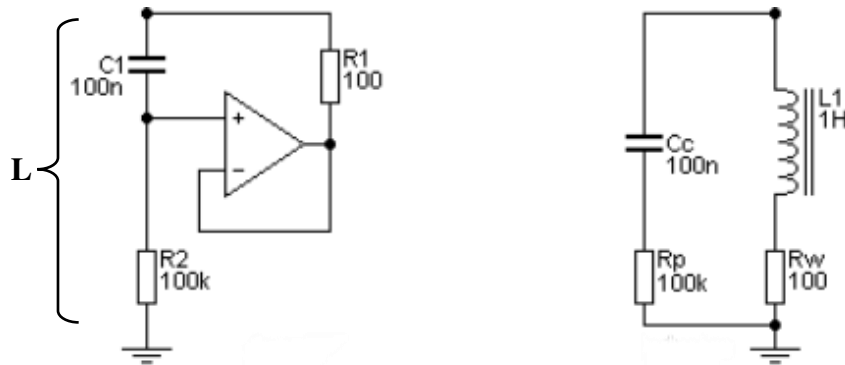
- Krivulja „out3“ prikazuje pasivni RC filter
- Krivulja „out“ prikazuje visokopropusni filter korišten u *miks-pultu* Behringer Xenyx 1202 - taj filter je ovdje kao primjer kompliciranijeg filtra
- Krivulja „out2“ prikazuje korišteni filter sa savršenim vrijednostima otpora (7.07 k i 14.14 k)
- Krivulja „out4“ prikazuje konačnu karakteristiku visokopropusnog filtera korištenu u ovom uređaju.



Slika 6 - Usporedba frekvencijskih karakteristika niskopropusnih filtara

3.2. Tropojasni ekvilizator

Ekvilizatorski stupanj ovog sklopa su tri pojasna filtra ostvarena uz pomoć giratora, za niske, srednje i visoke frekvencije (Slika 8). Giratori su korišteni jer sam htio ostvariti ekvilizator s drukčijom vrstom filtera od „standardnih“ aktivnih filtera. Giratori u filterima oponašaju induktivitet, a u izvedbi su puno jeftiniji od zavojnica, pa ih je poželjno koristiti.



Slika 7 - Girator ostvaren pomoću operacijskog pojačala (lijevo), i njemu ekvivalentni induktor (desno)

Induktivitet giratora sa Slike 7 računamo po formuli:

$$L = (R2 - R1) * R1 * C1 \quad (16)$$

Otpor R1 je ekvivalentan serijskom otporu induktora R_w , a kapacitet i otpor C1 i R2 su ekvivalentni gubitcima u jezgri induktora (Cc i Rp).

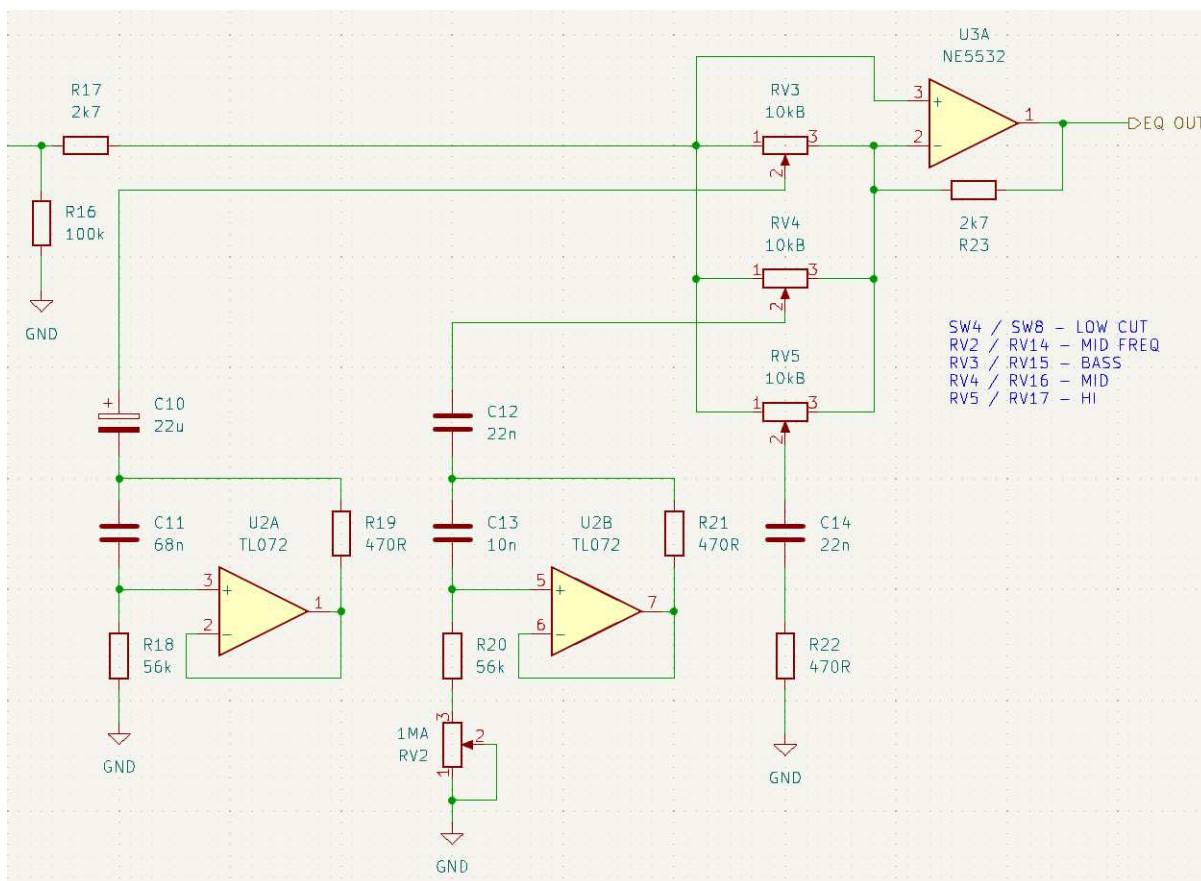
S obzirom na to da je R1 zanemariv u odnosu na R2, formulu možemo pojednostaviti:

$$L \approx R2 * R1 * C1 \quad (17)$$

Iz toga možemo izračunati rezonantnu frekvenciju pojasnog filtra za niske frekvencije sa Slike 8:

$$f_{r_LF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L * C10}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R18 * R10 * C11 * C10}} \quad (18)$$

$$f_{r_LF} = 25.4 \text{ Hz} \quad (19)$$



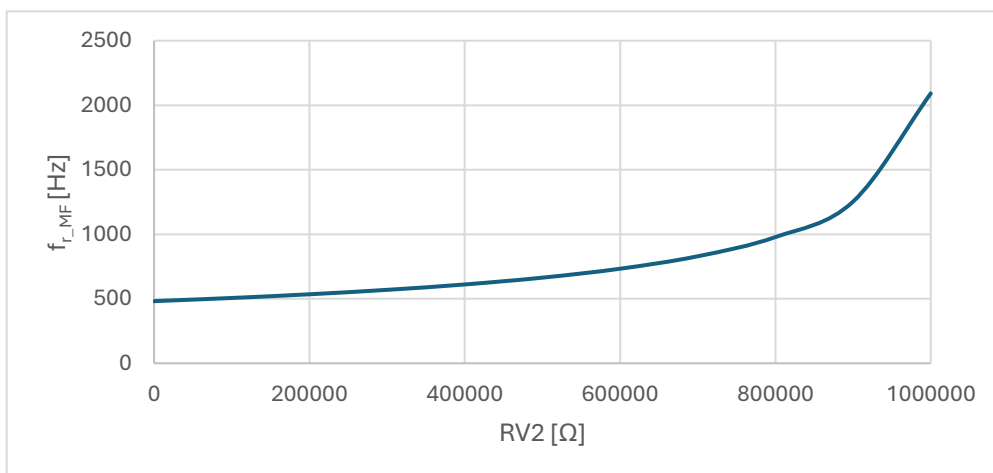
Slika 8 - Shema tropojnog ekvilizatora

Kako bi se ekvilizator mogao efikasnije koristiti, filter za frekvencije srednjeg pojasa konstruiran je tako da ima podesivu rezonantnu frekvenciju. Krajnje vrijednosti možemo izračunati:

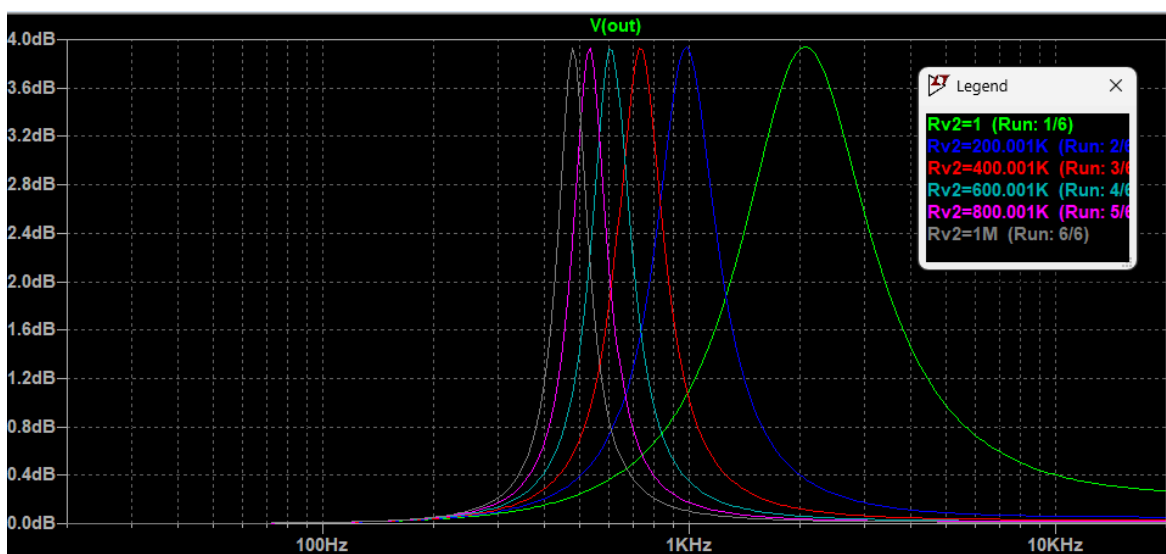
$$f_{r_MF} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(R20 + RV2) * R21 * C12 * C13}} \quad (20)$$

$$f_{r_MF_min} = 482 \text{ Hz}, \quad f_{r_MF_max} = 2092 \text{ Hz} \quad (21)$$

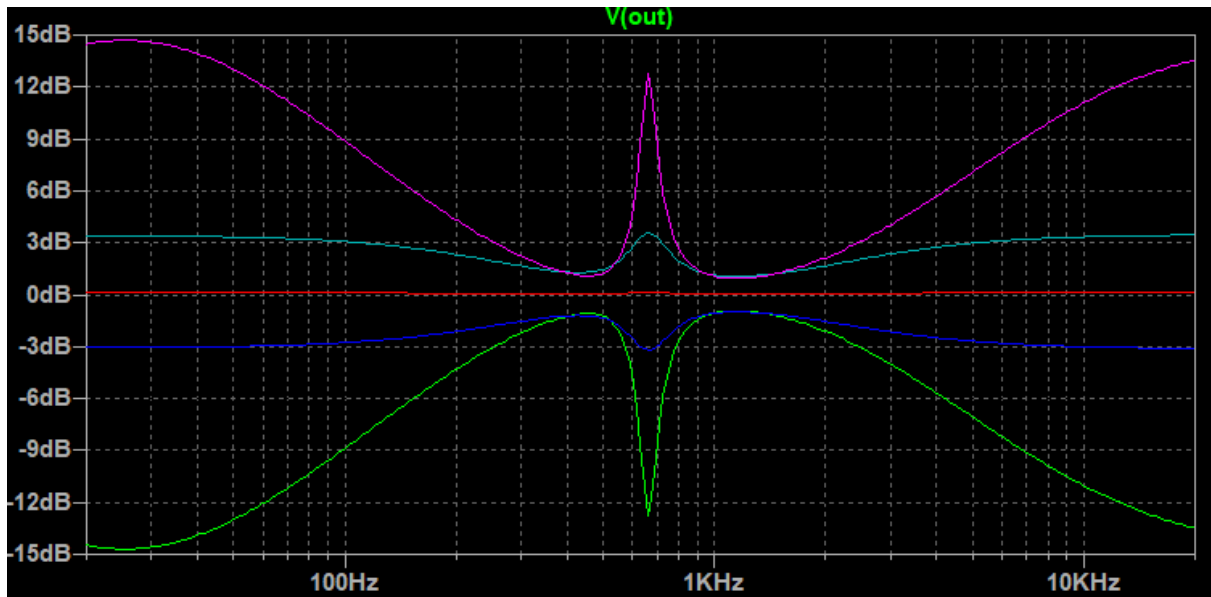
Slika 9 je simulacija frekvencijske karakteristike filtera za srednje frekvencije, i prikazuje pomak pojasa na koji filter djeluje. Kako bi se uvjerali da uređaj u stvarnosti radi dobro, snimljen je spektrogram bijelog šuma nakon obrade kroz uređaj (Slika 11). Na spektrogramu se može primijetiti kako se skok u amplitudi kreće od 500 Hz do 2 kHz, točno kako je izračunato i simulirano.



Graf 2 - Ovisnost rezonantne frekvencije filtra za srednje frekvencije o položaju potenciometra RV2



Slika 9 - Pomak pojasnopropusne karakteristike u ovisnosti o RV2



Slika 10 – Simulacija maksimuma frekvencijske karakteristike ekvilizatora

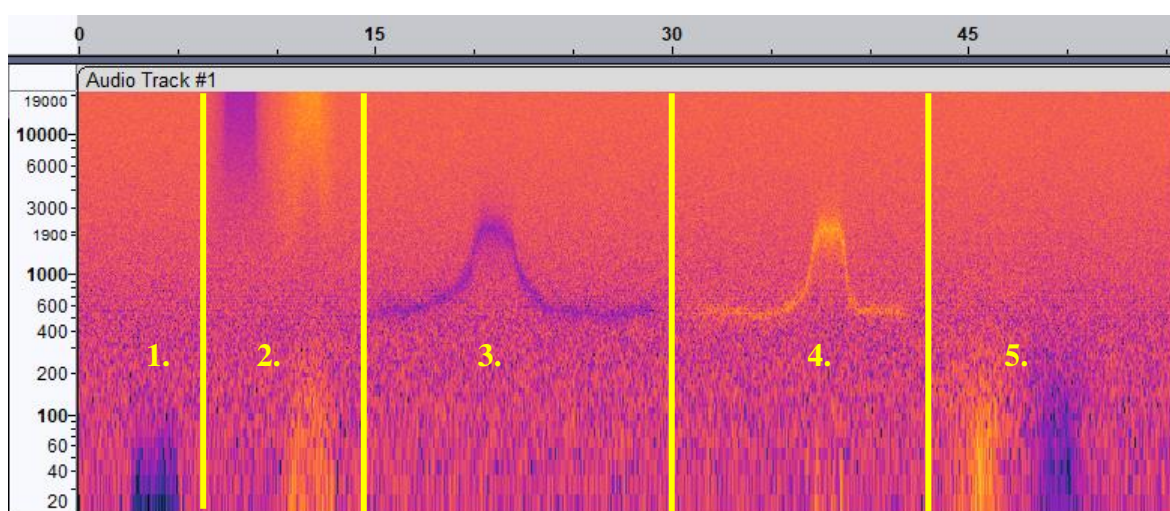
U programu *LTspice* simuliran je cijeli trobojasni ekvilizator, i time je dobivena maksimalna frekvencijska karakteristika ekvilizatora. Iz simulacije se vidi da sva tri pojasa mogu na svojoj rezonantnoj frekvenciji pojačati ili smanjiti signal za 13 do 15dB. Uz to, vidimo da srednjepojasni filter ima jako uski pojas djelovanja, ali to je kompenzirano time što je frekvencija djelovanja srednjepojasnog filtera podesiva.

Kod obrade zvuka je ta mogućnost korisna za imati, jer se u srednjim frekvencijama najčešće nađe neka frekvencija koja je jako prodorna i narušava zvučnu sliku – ovom kontrolom možemo odabrati točnu frekvenciju koju želimo eliminirati.

3.3. Mjerenje karakteristike ekvilizatorskog stupnja

S obzirom na to da nije bilo jednostavnog načina za napraviti Bodeov dijagram mjerenja, mjerenje karakteristike provedeno je puštanjem bijelog šuma u sklop i provedbom spektralne analize tog bijelog šuma na izlazu sklopa.

Bijeli šum se generirao i snimao u programu *Audacity*, a za reprodukciju ulaznog i snimanje izlaznog signala koristila se zvučna kartica *Steinberg UR22 MkII*. Spektralna analiza provedena je nad snimljenim signalom u programu *Audacity* (Slika 11)



Slika 11 - Spektrogram bijelog šuma obrađenog ekvilizatorom sklopa.

x os prikazuje vrijeme u sekundama, y os frekvenciju u Hertzima, a boja ovisi o pojačanju (tamnija boja znači manje pojačanje)

Za vrijeme trajanja mjerenja mijenjao sam vrijednosti potencijometara u ekvilizatorskom stupnju kako bi se promjene vidjele u spektrogramu. Spektrogram je podijeljen na sektore, ovisno o tome koja se kontrola koristila:

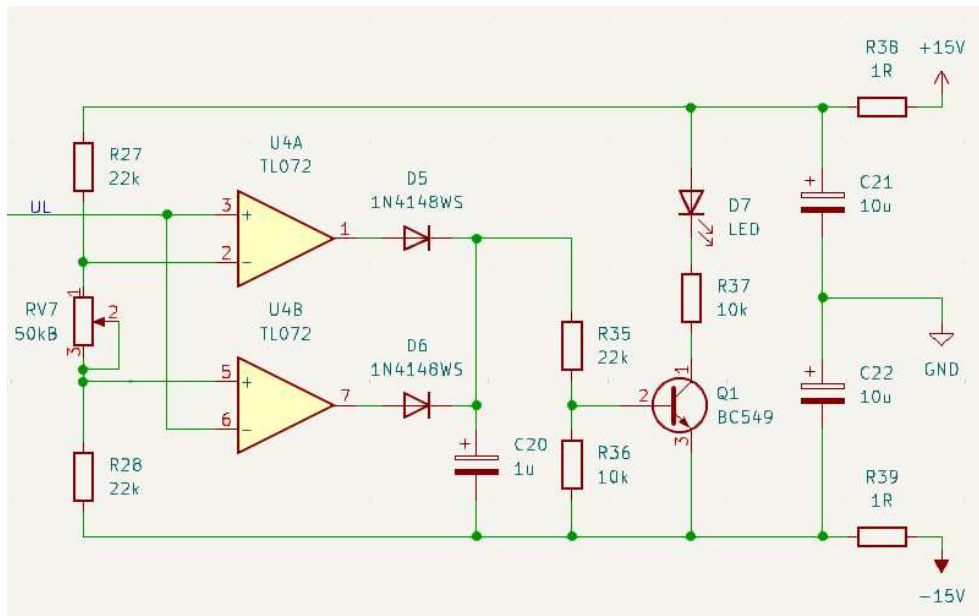
1. Paljenje visokopropusnog filtra. - Na spektrogramu se može vidjeti rezanje niskih frekvencija ispod 70 Hz, točno kako je i izračunato
2. Smanjivanje i povećavanje vrijednosti potencijometra za kontrolu visokih frekvencija. Prilikom pojačavanja visokih frekvencija došlo je do distorzije signala,

pa se zbog toga u mjerenju vidi i blago pojačanje na niskim frekvencijama. To nije normalan režim rada i treba se izbjegavati, zbog gubitka kvalitete zvuka.

3. Smanjivanje vrijednosti potenciometra za kontrolu srednjih frekvencija i okretanje potenciometra za kontrolu rezonantne frekvencije srednjepojasnog filtra. Iz mjerenja se jasno vidi da se frekvencija može kontrolirati od otprilike 500 Hz do 2 kHz, kao što je i izračunato u jednadžbi (18).
4. Pojačanje frekvencija srednjeg pojasa i okretanje potenciometra za kontrolu frekvencije. Iz mjerenja se vidi ista stvar kao u 3. sektoru spektrograma, samo što su u ovom slučaju frekvencije pojačane. Pri pojačanju srednjeg pojasa također je došlo do distorzije što se očituje pojačanjem u niskim frekvencijama na spektrogramu, ali u blažoj mjeri nego pri povećanju visokog pojasa frekvencija.
5. Povećanje i smanjenje vrijednosti potenciometra za kontrolu niskih frekvencija. Vidi se da potenciometar djeluje na malo širem pojasu nego visokopropusni filter u 1. sektoru spektrograma.

4. Detektor razine signala

Kod pojačanja signala, nepoželjno je da se signal distorzira. Zbog toga ovaj uređaj na svakom kanalu ima detektor razine signala (Slika 12) koji upali indikatornu LED-icu kad se razina signala približi distorziranju.



Slika 12 - Shema detektora razine signala

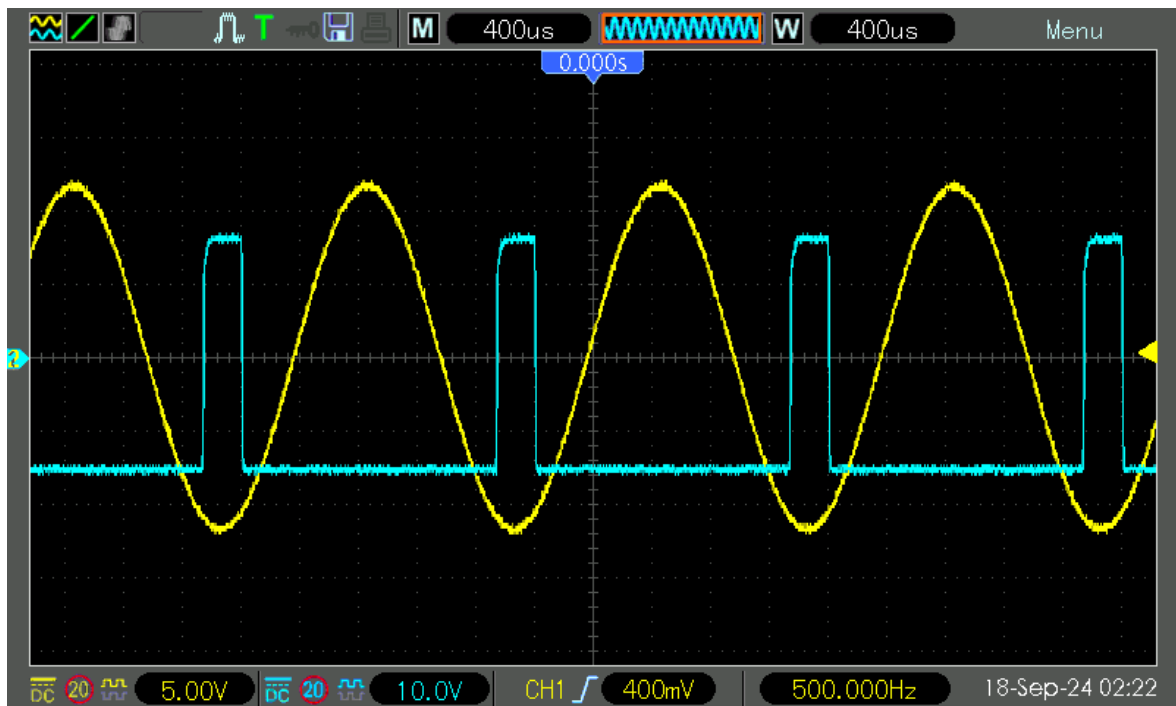
Indikator funkcioniše na principu *window*-komparatora, što znači da će se aktivirati svaki put kad apsolutna razina signala na ulazu bude veća od granične razine napona.

$$|U_{IN}| > U_{tresh} \quad (22)$$

U_{tresh} podešavamo trimmer potencijetrom RV7. U mreži s otporima R27 i R28, trimmerom se mijenja napon s kojim komparatori uspoređuju razinu ulaznog napona. Kad bar jedan od komparatora detektira prijelaz graničnog napona, tranzistor Q1 provede i LED-ica se upali.

Slika 13 prikazuje aktivaciju komparatora kad ulazni napon prijeđe razinu graničnog napona.

Zbog trimmer potencijetra, ovaj dio sklopa se može podesiti da samo detektira signal, ili da javlja informaciju kad je signal blizu distorzije, ovisno o tome na koju razinu se U_{tresh} postavi.



Slika 13 – Mjerenje,
ulazni signal u komparator (žuto) i signal na izlazu komparatora U4B (plavo)

U_{tresh} se određuje formulom:

$$U_{tresh} = U_{cc} / \left(\frac{R_{27}}{0.5 * RV7} + 1 \right) \quad (23)$$

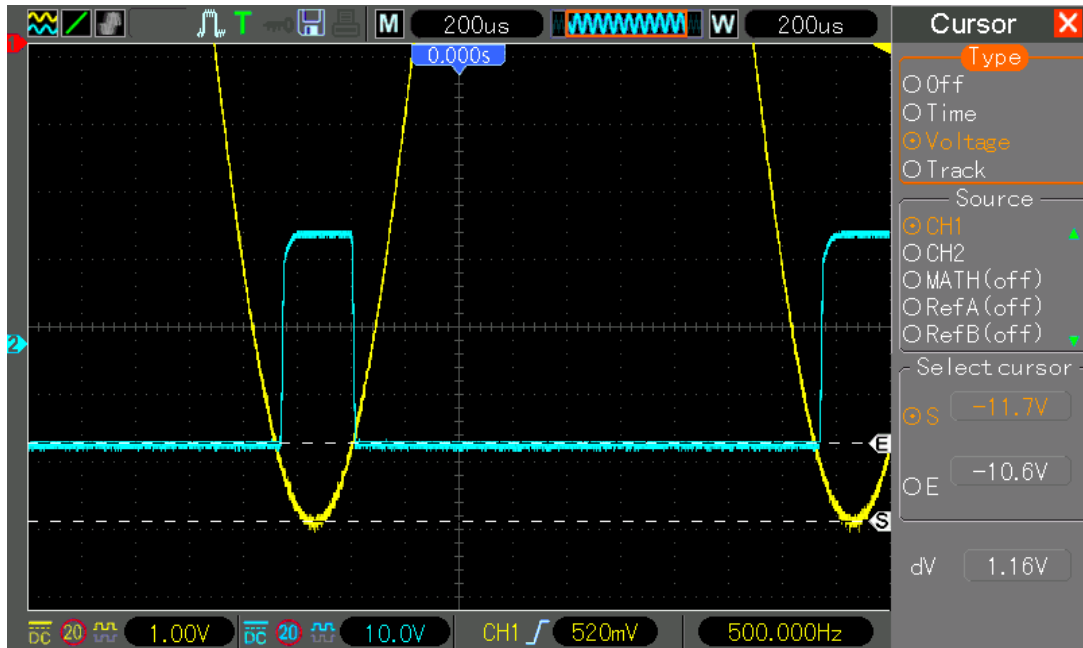
Prema tome, ako postavimo trimer potencijetar na vrijednost $RV7 = 20 \text{ k}$, vrijednost napona praga bit će:

$$U_{tresh} = 15 \text{ V} / \left(\frac{10 \text{ k}}{0.5 * 20 \text{ k}} + 1 \right) \quad (24)$$

$$\Rightarrow U_{tresh} = 7.5 \text{ V} \quad (25)$$

Pa će detektor razine signala paliti LED-icu svaki put kad razina signala prijeđe $\pm 7.5 \text{ V}$.

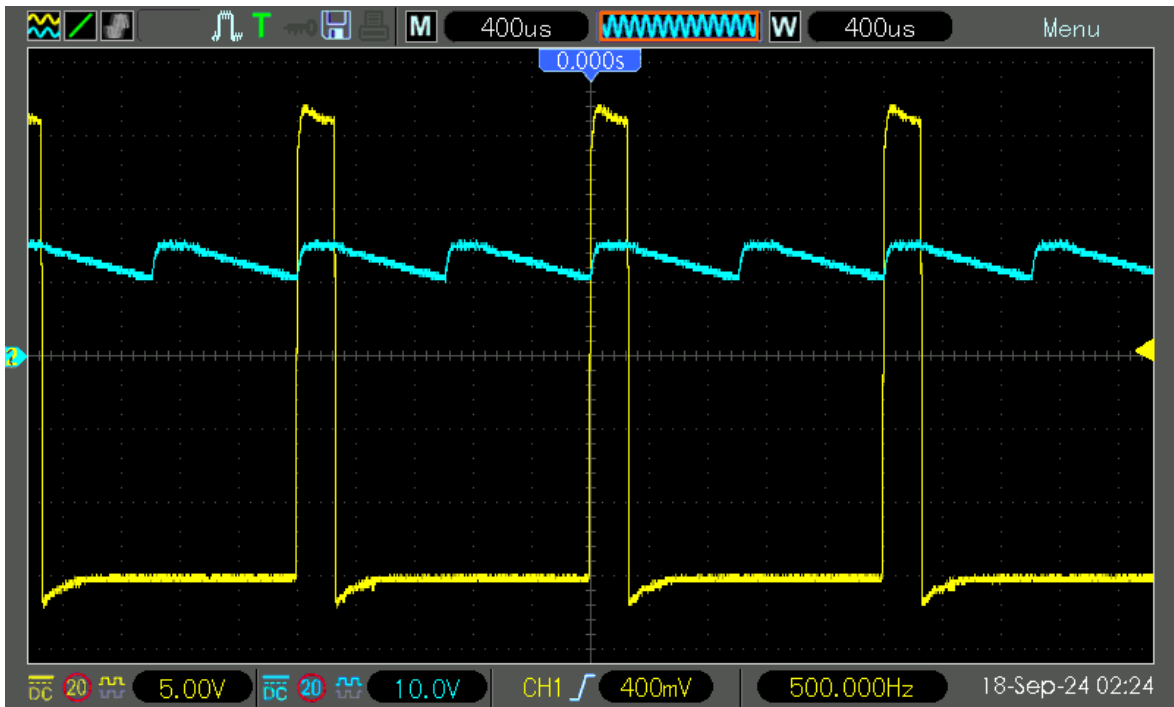
U uređaju su svi potencijetri postavljeni da se LED-ica upali kad razina signala prijeđe $\pm 10.5 \text{ V}$. Umjeravanje se radilo tako da se multimetrom pratio napon na trimer potencijetru dok se vrijednost trimer potencijetra polako podešavala. Mjerenje na slici 14 prikazuje da se komparator za detekciju negativne poluperiode aktivira upravo na tom naponu.



Slika 14 - Mjerenje, *cursor* 'E' mjeri napon ulaznog signala na kojem se komparator aktivira

Mjerenje sa Slike 14 provedeno je tako da se na osciloskopu *cursor*-om mjerio napon u trenutku kad komparator promijeni svoje stanje. Dobivena vrijednost je -10.6 V, što se poklapa s postavljenom vrijednošću graničnog napona od ± 10.5 V.

Odabirom vrijednosti kondenzatora C20 može se regulirati koliko dugo LED-ica stoji upaljena, te koliko kratke tranzijente detektor može uloviti. Veća vrijednost kondenzatora znači da će LED-ica ostati dulje upaljena, ali sklop neće detektirati kratke skokove napona iznad granične vrijednosti. Manja vrijednost znači da će se moći detektirati kraće pojave, ali će isto tako LED-ica kratko svijetliti i može se dogoditi da korisnik propusti vidjeti informaciju o distorziji signala. Mjerenje na slici 15 prikazuje napon na kondenzatoru kad ulazni napon prelazi postavljeni granični napon.



Slika 15 - Mjerenje, signal na izlazu komparatora (žuto) i napon na kondenzatoru C20 (plavo)

Kondenzator C20 se prazni preko otpornika R35 i R36, pa se može izračunati vrijeme pražnjenja:

$$\tau = C20 * (R35 + R36) \quad (26)$$

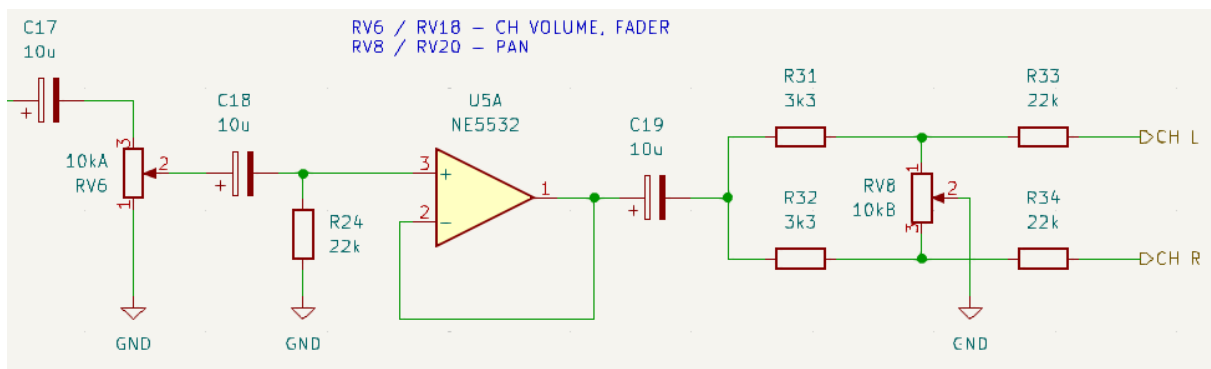
$$\tau = 1 \mu * (22 \text{ k} + 10 \text{ k}) = 32 \text{ ms} \quad (27)$$

$$t_{fall} = 2.2\tau = 70.4 \text{ ms} \quad (28)$$

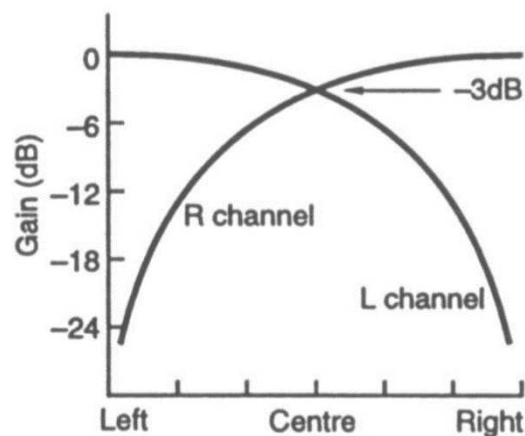
5. Kontrola glasnoće kanala

Na izlazu svakog kanala nalaze se potencijometri za kontrolu glasnoće kanala i panorama kontrola. Uz kontrole, tu se nalazi još jedan izlazni *buffer* signala.

Panorama regulator služi za kontrolu balansa signala, odnosno regulira koliko signal kanala ide u lijevu sabirnicu miješala, a koliko u desnu. Promjenom balansa signala dobije se prividna promjena pozicije s koje zvuk dolazi, ako se zvuk sluša u *stereo* okruženju. Karakteristika panorama regulatora može se vidjeti na Slici 16.



Slika 17 - Shema izlaznog stupnja jednog kanala miješala



Slika 16 - Karakteristika panorama regulatora ovisno o položaju potencijetra

U ovoj konfiguraciji, panorama regulator uzrokuje pad napona od 3dB u slučaju kad je potenciometar postavljen u jednu od krajnjih pozicija. Pad amplitude signala se može izračunati iz mjerenja na Slici 18, i izračunati preko vrijednosti otpora:

$$\frac{RV_{8_{10k}} \parallel R_{33}}{RV_{8_{10k}} \parallel R_{33} + R_{31}} = 0.676 = -3.4 \text{ dB} \quad (29)$$

$$20 \log \left(\frac{2.52 \text{ V}}{3.72 \text{ V}} \right) = -3.38 \text{ dB} \quad (30)$$



Slika 18 - Odnos signala na izlazu *buffer-a* U5A (žuto) i signala na izlazu panorama regulatora (plavo)

Pošto nije poželjno gubiti jačinu signala kroz uređaj, pad amplitude na panorama regulatoru kompenzirat će se pojačanjem na sumirajućem pojačalu, koje na putu signala dolazi odmah nakon panorama regulatora.

6. Stupanj miješala

Signali sa svakog od kanala dolaze na lijevu i desnu sabirnicu, koje ulaze u stupanj miješala. Miješalo je izvedeno kao transimpedancijsko sumirajuće pojačalo, što znači da pretvara strujni signal na ulazu u naponski signal na izlazu.

Trimer RV9 služi za podešavanje pojačanja miješala, u slučaju da je potrebno dodatno pojačati izlazni signal. U slučaju ovog uređaja, trimer potenciometrom podešeno je pojačanje od 3dB, kako bi se kompenzirao pad amplitude signala na panorama regulatorima kanala (Slika 19). Pošto svaki kanal ima jednak pad napona, nije problem kompenzirati ga pojačanjem sumirajućeg pojačala.

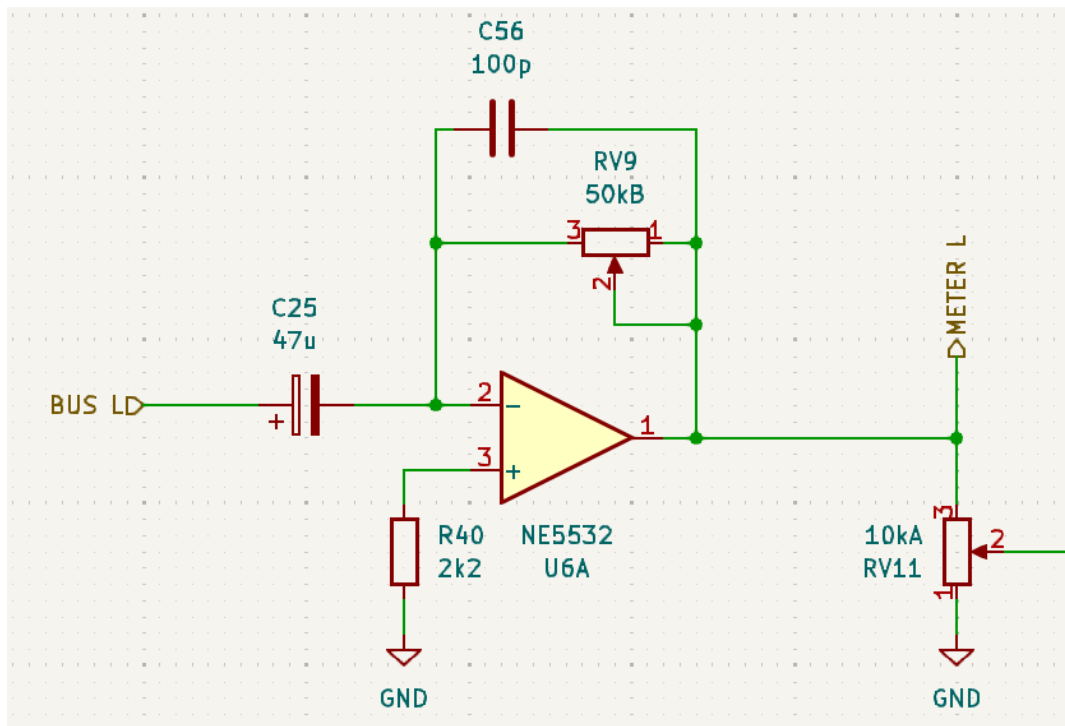


Slika 19 - Odnos signala na panorama regulatoru (žuto) i signala na izlazu sumirajućeg pojačala (plavo)

Kondenzator C56 služi za sprečavanje visokofrekventnih oscilacija. Taj kondenzator prvotno nije stavljen na uređaj, pa su se tijekom prvotnih testiranja pojavile oscilacije velike amplitude iznad 100 kHz. Oscilacije su dodatkom kondenzatora uspješno primirene.

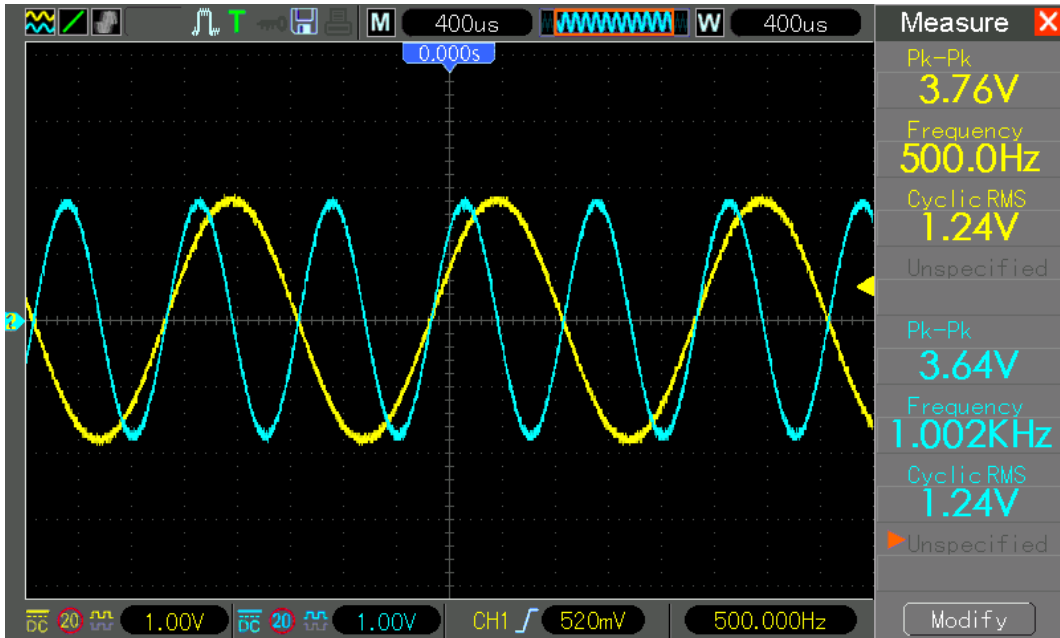
Izlaz sumirajućeg pojačala ide izravno na klizni potenciometar, kojim se finalno podešava razina izlaznog signala.

U uređaju imamo dva sumirajuća pojačala – po jedno za lijevi i desni izlazni kanal. U slučaju da bismo htjeli dodati još pomoćnih izlaza, kao npr. petlja za efekte, izlazi za slušalice i ostali slični izlazi koji se nalaze na komercijalnim miješalima, za svaki od njih bismo trebali imati sabirnicu i sumirajuće pojačalo.



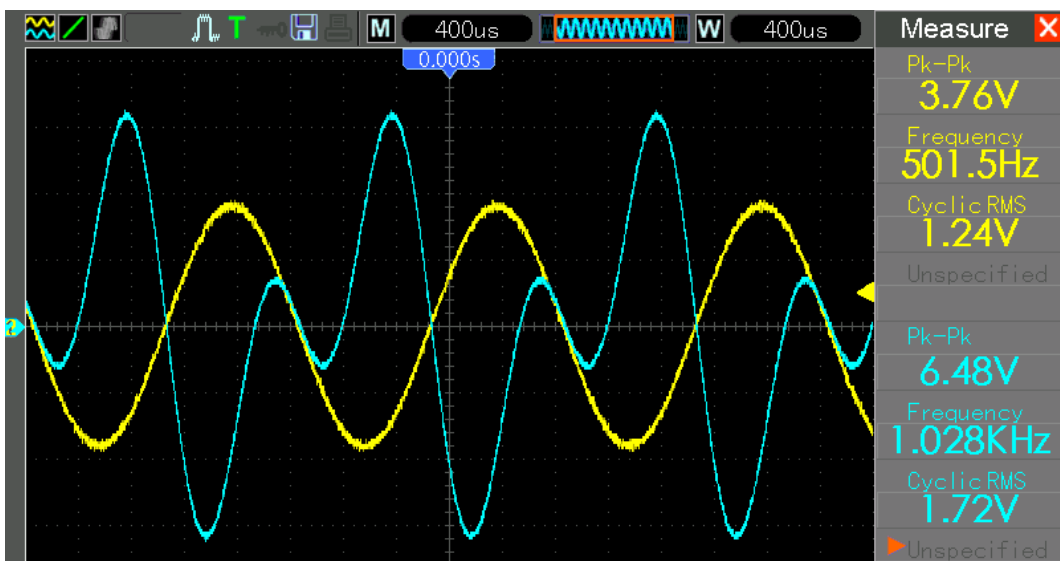
Slika 20 - Shema sumirajućeg pojačala za lijevi izlazni kanal

Izvedena su mjerenja koja demonstriraju mogućnost miješanja signala. Na ulaze dvaju kanala miješala dovedeni su signali frekvencija 1 kHz i 500 Hz (Slika 21). Signali su osciloskopom očitani nakon pojačanja pretpojačalom, i kontrole ekvilizatora su u neutralnom položaju.



Slika 21 - Signali dovedeni na kanale miješala, 1 kHz (plavo) i 500 Hz (žuto)

Na Slici 22 se plavom bojom jasno vidi signal s izlaza sumirajućeg pojačala, gdje su signali s ulaza uspješno zbrojeni.



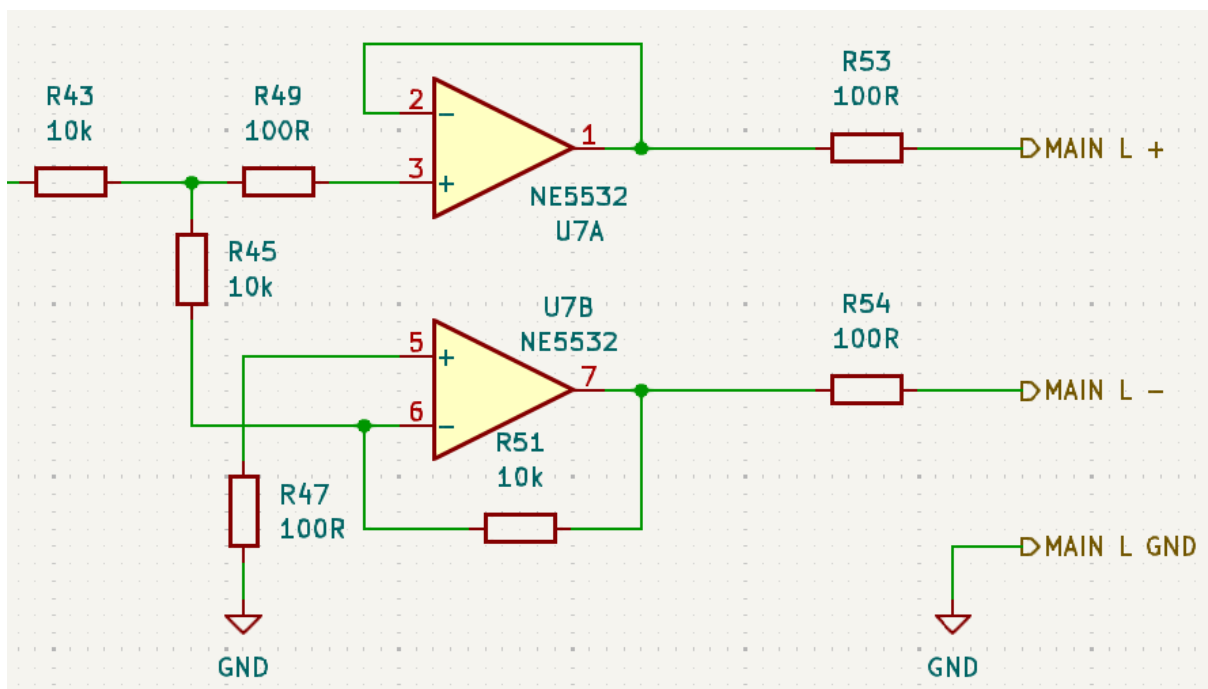
Slika 22 – 500 Hz signal iz kanala (žuto) i sumirani signal na izlazu zbrajala (plavo)

7. Izlazni stupanj uređaja

Izlazni stupanj dolazi nakon kliznog potenciometra za kontrolu glasnoće. S obzirom na to da se na izlazu sklopa nalazi XLR konektor, nebalansirani signal iz miksera treba se pretvoriti u balansirani. Potrebno je napraviti jednako sklopovlje za lijevi i za desni izlazni kanal.

Balansiranje signala ostvareno je uz pomoć dva operacijska pojačala s jediničnim pojačanjem – jedno kao *buffer*, a drugo kao invertirajući buffer, kako bismo dobili diferencijski signal na izlazu

Kao i na ulaznom stupnju, balansiranje signala moglo se riješiti koristeći transformator, ali bi to bila puno skuplja opcija nego korištenje operacijskih pojačala.



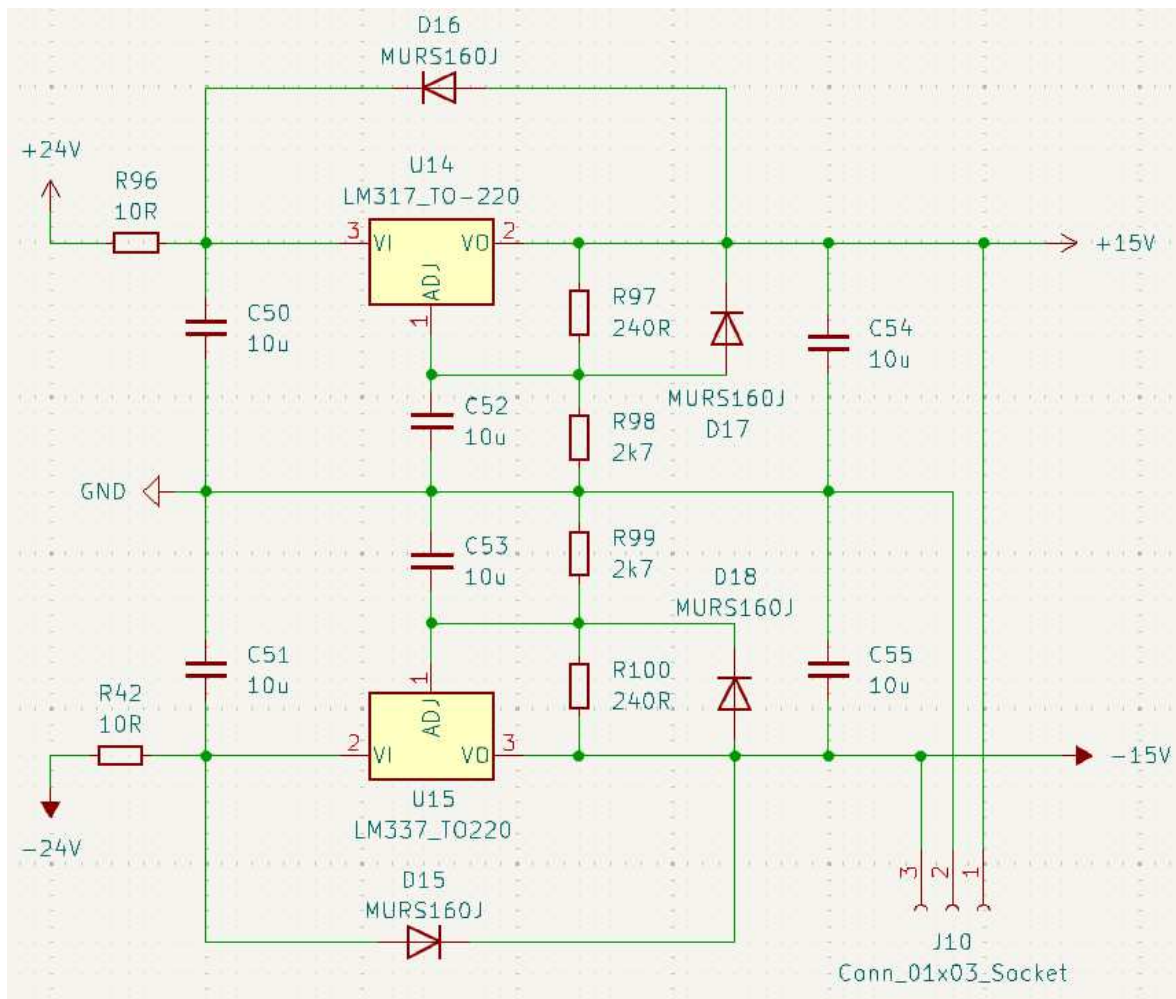
Slika 23 - Shema izlaznog stupnja sklopa za lijevi kanal

Izlazni stupanj desnog kanala uređaja identičan je lijevome.

8. Napajanje sklopa

Originalna zamisao za napajanje sklopa bila je iskoristiti vanjsko napajanje od nekog drugog uređaja. S obzirom na to da se nije našlo adekvatno napajanje, i da se nije stiglo isprojektirati i složiti vlastito napajanje, sklop je u ovom stadiju napravljen tako da se napaja laboratorijskim napajanjem.

Sklop se može napajati razinama napona od ± 18 V do ± 37 V. Ulazni napon regulira se na ± 15 V korištenjem simetričnih naponskih regulatora *LM317* i *LM337* (Slika 24). Oni su odabrani zbog prijašnjeg iskustva s korištenjem, jednostavnosti izvedbe, ugrađene prekostrujne zaštite i zaštite od pregrijavanja. Sklopovlje regulatora isprojektirano je prema specifikaciji u *datasheet-u*.



Slika 24 - Regulator napajanja

Razina reguliranog napona računa se po formuli:

$$U_{IZ} = U_{REF} * \left(1 + \frac{R98}{R97}\right) \quad (31)$$

gdje je U_{ref} napon na otporniku R97 i iznosi 1.25 V. Prema tome se dobiva:

$$U_{IZ} = 1.25 \text{ V} * \left(1 + \frac{2.7 \text{ k}\Omega}{240 \Omega}\right) = 15.3 \text{ V} \quad (32)$$

Regulatori rade simetrično, tako da isti račun vrijedi i za negativni napon.

Razina napajanja od ± 15 V je odabrana je kao „industrijski standard“, jer veći broj mikspulteva koristi tu razinu napajanja. Ona omogućava dovoljnu jačinu signala i razinu *headroom-a* na izlazima. Pri odabiru aktivnih komponenti moralo se paziti da one mogu raditi na traženom naponu.

Izmjereno je da uređaj u praznom hodu vuče ukupnu struju od 250 mA, simetrično podijeljenu na pozitivni i negativni izvor napajanja. Struja koju uređaj vuče ne ovisi o varijaciji napona na ulazu u uređaj. Tijekom rada, uređaj vuče do 15 dodatnih miliampera po kanalu, ovisno o jačini signala. Za ulazni napon od ± 20 V, može se izračunati da uređaj ima potrošnju od

$$P = 250 \text{ mA} * 20 \text{ V} = 5 \text{ W} \quad (33)$$

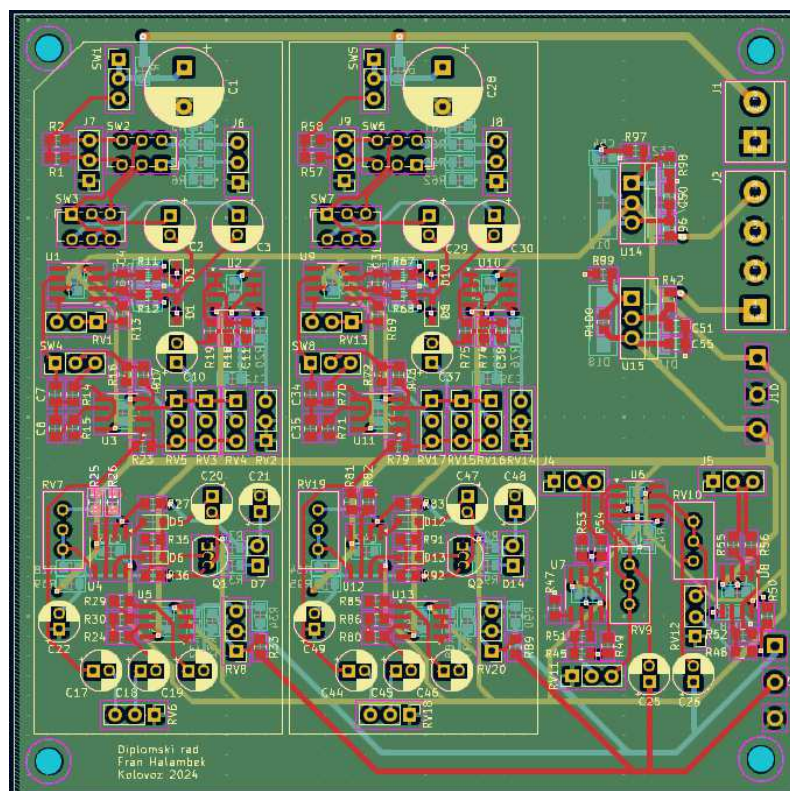
Za 48 V fantomskog napajanja također se koristi vanjsko, laboratorijsko napajanje. Važno je da izvor fantomskog napajanja bude iznimno čist od smetnji, s obzirom na to da se spaja direktno na mikrofonski ulaz uređaja.

9. Konstrukcija

Sheme sklopa i PCB dizajn napravljeni su u programu *KiCad*. Program *KiCad* sam odlučio koristiti jer je *open-source*, i jer od mogućnosti ima sve što mi je bilo potrebno za ovaj projekt, ili već ugrađeno ili dostupno za preuzeti kao *add-on*. Pločica je poslana na proizvodnju tvrtki *JLPCB*, a komponente su naručene sa stranice *Mouser.com*.

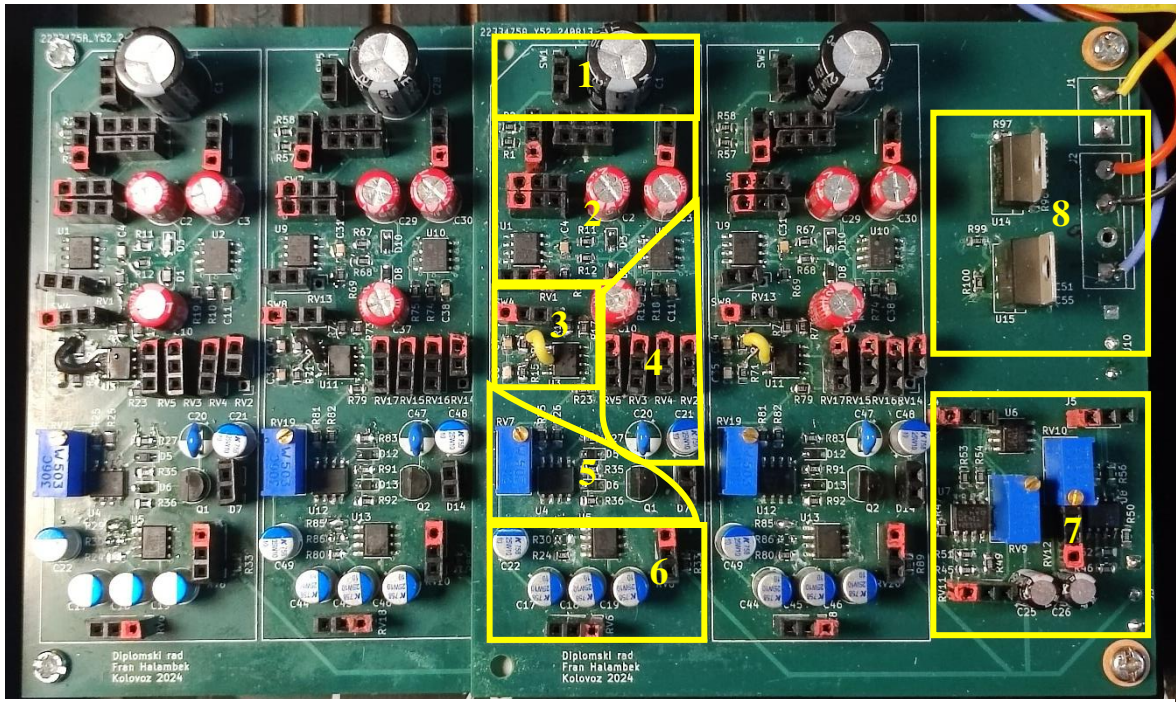
Pločica je četveroslojna radi jednostavnosti dizajniranja – jedan unutarnji sloj je *ground plane*, drugi je *power plane*, a prednjim i stražnjim slojem se vode signali. Zaključio sam da se isplati malo više platiti proizvodnju četveroslojne pločice radi pojednostavljenja crtanja dizajna.

Pločica je formata 10 x 10 cm i na sebi sadrži dva kanala, modul za miksanje i regulator napajanja sklopa. Kako bi se postigao broj od četiri kanala, pločice su napravljene tako da se žicama mogu povezati vodovi napajanja i sabirnice signala koje ulaze u stupanj miješala – time se postiže nadogradivost, i po potrebi se može napraviti uređaj sa 6, 8 i više kanala.

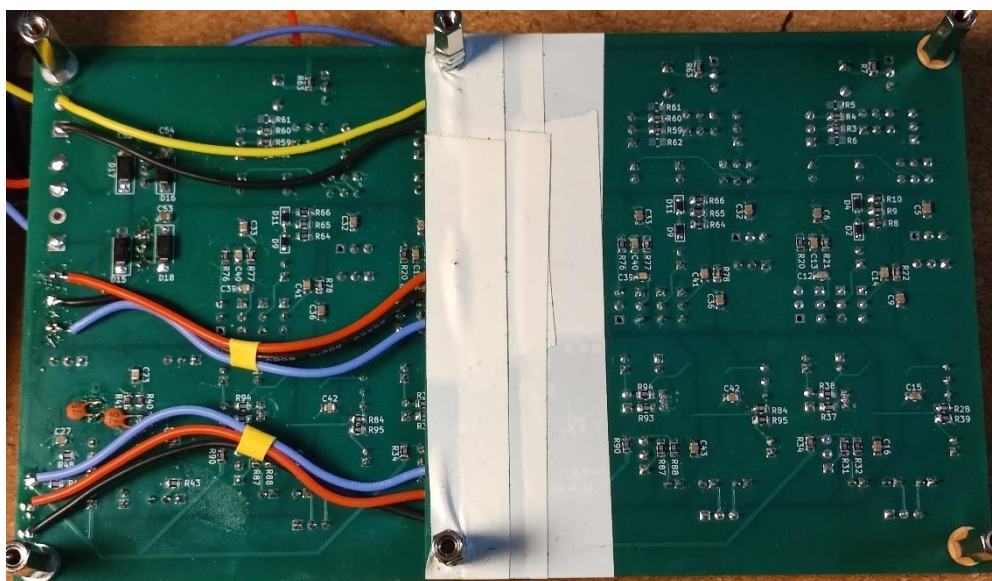


Slika 25 - Dizajn pločice u programu KiCad

Glavni razlog takvog dizajna pločice bila je cijena: proizvodnja pločica formata 10 x 10 cm puno je jeftinija od proizvodnje ikojeg drugog formata većih dimenzija. S obzirom na to da je format od 10 x 10 cm premalen za postaviti kontrole sklopa (potencijometre, gumbe, prekidače i konektore) izravno na pločicu, odlučio sam se izraditi vlastitu prednju ploču na kojoj su sve kontrole, i svaku kontrolu povezati na pločicu *pin header* konektorom. To se na kraju ispostavilo kao velika greška koja je oduzela puno vremena.



Slika 27 - Prednja strana pločice



Slika 26 - Stražnja strana pločice

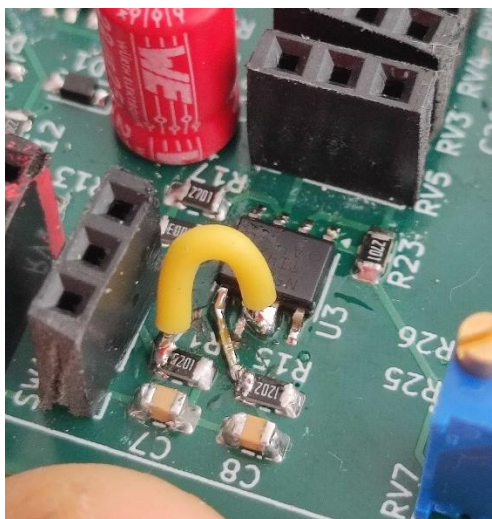
Na slici 27 označeni su svi dijelovi trećeg kanala. To su redom:

1. Ulaz fantomskog napajanja od 48 V u kanal.
2. Ulazni stupanj i pretpojačalo
3. Visokopropusni filter
4. Tropojasni ekvilizator
5. Detektor razine signala
6. Izlazni stupanj kanala
7. Stupanj miješala i izlazni stupanj uređaja
8. Naponski regulator uređaja

Na slici 26 može se vidjeti način spajanja dvije pločice kako bi se dobio četverokanalni uređaj. Površina na kojoj se dvije pločice preklapaju prelijepljena je izolirajućom trakom, kako ne bi došlo do slučajnog kratkog spoja.

Tijekom lemljenja pločice dogodilo se nekoliko grešaka. U nekoliko navrata dogodio se slučajni kratki spoj s viškom lema, i dva čipa su bila zalemljena u krivu stranu. Sve greške su se uspjele naći i eliminirati.

U dizajnu visokopropusnog filtra koji se nalazi na finalnoj pločici, slučajno su zamijenjeni invertirajući i neinvertirajući ulaz operacijskog pojačala U3B, pa se operacijsko pojačalo moralo prelemiti *brick* žicama (Slika 28). To je bila jedina greška u dizajnu pločice.

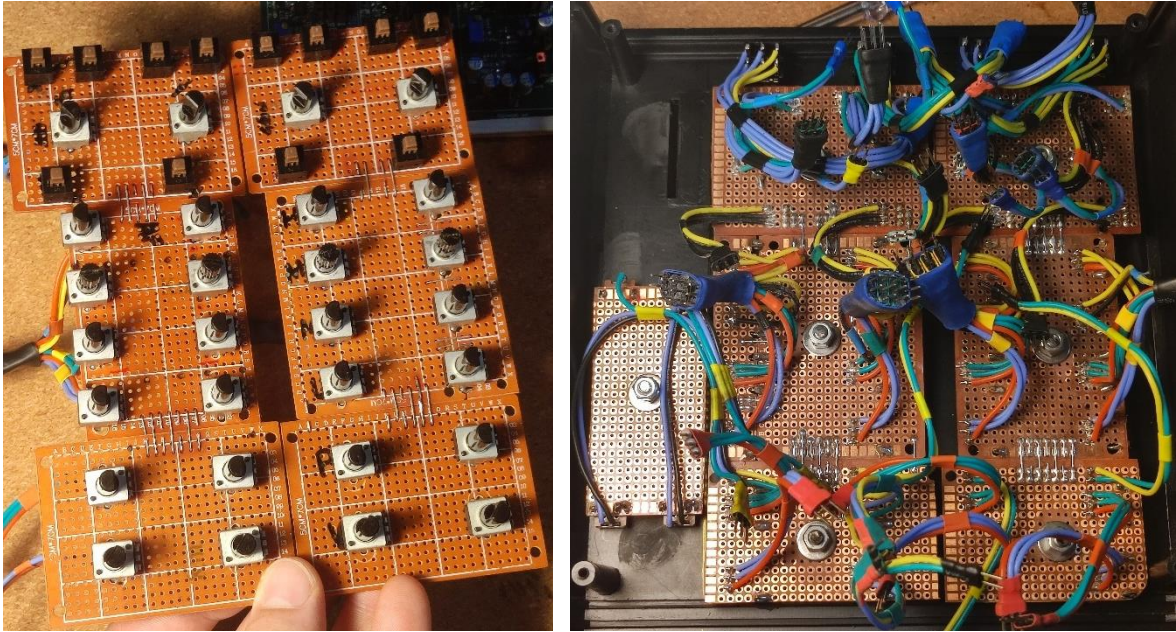


Slika 28 - Popravljanje pogrešnog dizajna rezanjem vodova i brick žicama



Slika 29 - Ploča s konektorima

Slika 29 pokazuje stražnju stranu uređaja – ploču s konektorima. S desne strane ploče nalaze se četiri XLR i četiri TRS ulaza, istim redom kojim su posložene i kontrole svakog kanala na gornjoj plohi. S lijeve strane nalaze se dva XLR izlaza – lijevi i desni, za *stereo* izlaznu sliku.



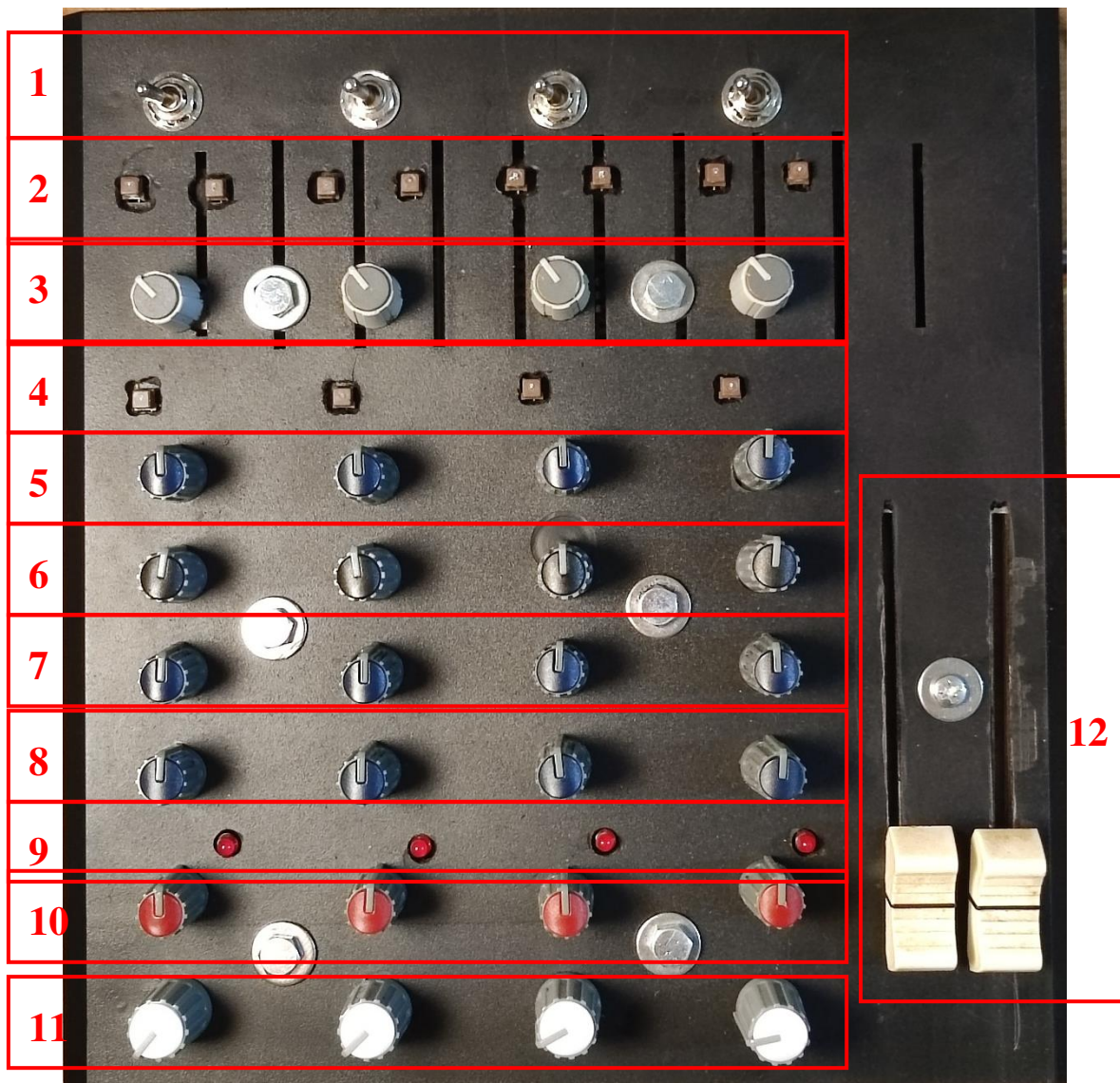
Slika 30 - Gornja strana prednje ploče (lijevo) i donja strana (desno)

Prednja ploča izrađena je tako da svaki potenciometar, gumb i prekidač imaju svoj kabel koji se spaja u glavnu pločicu. Ideja tog načina konstrukcije bila je da se uređaj može lako otvoriti, skinuti prednju ploču i pristupiti glavnoj pločici, ali ta ideja se ispostavila lošom.

Da ponovo radim ovaj sklop, isprojektirao bih jedan kanal sa svim komponentama koji bi ujedno bio i prednja ploča, i koji bi se jednim ravnim kabelom spajao u pločicu na kojoj bi bio samo stupanj miješala i izlazni stupanj.

Na slici 31 vide se sve kontrole ovog uređaja. One su redom:

1. Prekidač za biranje ulaza (XLR ili TRS)
2. Gumbi za aktivaciju fantomskog napajanja i okretanje faze
3. Pojačanje prepojačala
4. Gumb za aktivaciju visokopropusnog filtra
5. Kontrola visokih frekvencija
6. Kontrola podešavanja srednjih frekvencija
7. Kontrola srednjih frekvencija
8. Kontrola niskih frekvencija
9. Indikator distorzije signala
10. Regulator panorame
11. Kontrola glasnoće kanala
12. Kontrola glasnoće izlaza uređaja



Slika 31 - Prednja ploča uređaja u kućištu

Zaključak

Cilj ovog rada bio je dizajnirati, konstruirati i analizirati sklop četverokanalnog audio miješala. Audiomiješalo je dizajnirano korištenjem programa *KiCad*, konstruirano je i funkcionalno je. Ulazi uređaja su XLR i TRS tipa, i uređaj ima mogućnost fantomskog napajanja i okretanja faze ulaznog signala. Pretpojačalo je ostvareno integriranim krugom *SSM2019* i ima maksimalno pojačanje od 40 dB.

Visokopropusni filter je aktivni filter drugog reda, a tropojasni ekvilizator ostvaren je koristeći giratore. Miješalo signala dizajnirano je kao transimpedancijsko sumirajuće pojačalo, a na izlazu sklopa nalaze se dva diferencijiska (balansirana) izlaza XLR tipa kako bi se ostvarila stereo slika izlaznog signala.

Činjenica da se sklop napaja laboratorijskim napajanjem nije bajna. Za ovaj rad nije se uspjelo naći adekvatno napajanje, i mislim da bi to bio prvi korak u poboljšanju ovog sklopa. Uz svoje napajanje, trebao bi se isprojektirati i boost regulator koji će (relativno) mali napon uređaja povećati na 48 V, tako da uređaj ima ugrađeno fantomsko napajanje.

Nisam zadovoljan izvedbom prednje ploče, i potpuno bih promijenio dizajn pločice u idućoj verziji. S elektronikom sklopa sam zadovoljan, ali sklop se i dalje može nadograditi. U sklop bi se trebao montirati mjerač razine izlaznog signala, da korisnik ima vizualnu informaciju o razini zvuka koja izlazi iz uređaja. Također, dobro poboljšanje sklopu bilo bi ugraditi izlaz za efekte te pojačalo za slušalice skupa s PFL kontrolom, s obzirom na to da više manje svako miješalo na današnjem tržištu ima navedene mogućnosti.

Literatura

- [1] Elliot Sound Products, *Project 30.*, Poveznica: <https://sound-au.com/project30.htm>; pristupljeno 16. rujna 2024.
- [2] Analog Devices, *SSM2019* (2011)
- [3] Texas Instruments, *TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers*, (Travanj 2023)
- [4] Texas Instruments, *NE5532x, SA5532x Dual Low-Noise Operational Amplifiers*, (Siječanj 2015)
- [5] Texas Instruments, *LM137, LM337-N 3-Terminal Adjustable Negative Regulators*, (Siječanj 2016)
- [6] Butković Ž., *Elektronika 2*, (2018)
- [7] Fajt, S., Horvat, M., Jambrošić, K., predavanja iz predmeta *Audioprodukcija*, Zavod za Elektroakustiku (2023)
- [8] Đurek, I., Horvat, M., Petrošić, A., predavanja iz predmeta *Audiotehnika*, Zavod za Elektroakustiku (2023)
- [9] Texas Instruments, *Transimpedance Amplifier Circuit*, (Siječanj 2019)
- [10] Elliott, R., *Gyrator Filters*, Poveznica: <https://sound-au.com/articles/gyrator-filters.htm>, pristupljeno 16. rujna 2024.
- [11] Elliott, R., *Active Filters*, Poveznica: <https://sound-au.com/articles/active-filters.htm>, pristupljeno 16. rujna 2024.
- [12] Karki, J., *Analysis of the Sallen-Key Architecture – Application Report*, (Rujan 2002)

Sažetak

U radu je detaljno analiziran način rada četverokanalnog audio miješala po funkcijskim blokovima. Analiziran je i izmjeren frekvencijski odziv tropojasnog ekvilizatora s dodatnim visokopropusnim filtrom. Opisan je način rada *window* komparatora, i dizajnirano je transimpedancijsko miješalo signala. Izrađene su sheme uređaja i dizajnirane tiskane pločice, te su za uređaj izabrane komponente s naglaskom na cijenu i jednostavnost izrade i korištenja. Uređaj je složen u malo plastično kućište s ciljem lake prenosivosti i jednostavnog korištenja. Mjerenja koja su obavljena na uređaju pokazuju njegovu funkcionalnost i točnost izračuna pri dizajniranju sklopa.