

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond  
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Mehis Kont

## **VÕIMSUSVÕIMENDI**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: dotsent Mihhail Pikkov

Tallinn 2016

## Autorideklaratsioon

*Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole minule teada olevatel andmetel varem akadeemilist kraadi taotletud. Kinnitan, et antud töö koostamisel on kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidatud.*

Kuupäev:

Autor: Mehis Kont

.....

/allkiri/

## Lõputöö ülesanne

**Lõputöö teema:** Võimsusvõimendi.

**Teema päritolu:** Isiklik huvi.

**Lõputöö eesmärgid:** Võimsusvõimendi projekteerimine.

**Oodatavad tulemused:** Võimsusvõimendi elektriskeem ja trükkplaadi disain.

**Lähteandmed:** Võimsusvõimendi  $U_{IN(RMS)} = 1V$  siinus sisendsignaali võimendamine nimivõimsusele  $P_n = 50 W$ , kõlarile mille takistuseks  $8\Omega$ . Kasutades toiteks stabiliseeritud ja ülekoormuskaitsega alalispinge toiteallikat.

**Lahendatavad küsimused:** Elektriskeemi väljatöötamine, skeemi toimimises veendumine simulatsiooni ja arvutuste abil, trükkplaadi projekteerimine.

Kuupäev: .....

Üliõpilane: .....

Juhendaja: .....

Kinnitaja: .....

## **Annotatsioon**

Antud töö käsitleb helisagedusliku võimsusvõimendi elektriskeemi ja trükkplaadi välja töötamist. Lähteandmete abil leiti võimsusvõimendile vajalik toitepinge, elektroonikakomponentide väärtused koos nende funktsiooni ja vajalikkuse põhjendusega. Töö tulemusena valmib helisagedusliku võimsusvõimendi elektriskeem mille nimivõimsus on 50W ning trükkplaadi disain.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 40 leheküljel, 4 peatükki, 12 joonist ja 1 tabelit.

## **Abstract**

The goal of this thesis is to design an audio frequency power amplifier's schematic and printed circuit board with an average output power of 50W. Throughout this work I calculated the required voltage for the power supply and the values of the electrical components provided with explanations of their functions. A printed circuit board and a electrical schema of a power amplifier with a average output power of 50W was achieved.

The thesis is in Estonian and contains 40 pages of text, 4 chapters, 12 figures and 1 tables.

# Sisukord

Lühendite ja mõistete sõnastik.....	7
Jooniste nimekiri.....	8
Sissejuhatus.....	8
1. Võimsusvõimendi ülevaade.....	10
1.1 Võimsusvõimendi elektriskeem.....	11
2. Võimendi arvutused.....	13
2.1 Võimsusvõimendi väljundastme arvutus.....	13
2.1.1 Voolu võimendavad transistorid.....	15
2.1.2 Võimsusvõimendi liigkoormus- ja lühisekaitse väljundastmes.....	18
2.1.3 Zobeli ahel.....	19
2.1.4 Jahutusradiaator väljundastme transistoridele.....	20
2.2 Pingevoimendus.....	21
2.2.1 Püsivooluallikad.....	21
2.2.2 Tüüraste.....	23
2.2.3 Milleri korrektsioon.....	26
2.2.4 Sisendaste.....	26
2.3 Sagedusfilter.....	29
3. Elektriskeemi simulatsioon.....	31
3.1 Simulatsiooni tulemused.....	31
4. Trükkplaadi disain.....	33
Kokkuvõte.....	39
Kirjandus.....	40

## Lühendite ja mõistete sõnastik

<b>THD</b>	<i>Total harmonic distortion</i> Mittelineaarmoonutus, mis näitab, kui suur on puhtale siinusvõnkumisele lisandunud harmooniliste komponentide koguvõimsuse osa põhilaine võimsusest
<b>IPS</b>	<i>Input stage</i> Sisendaste
<b>VAS</b>	<i>Voltage amplifier stage</i> Tüüraste
<b>OPS</b>	<i>Output stage</i> Väljundaste
<b>RMS</b>	<i>Root mean square</i> Ruutkeskmise, mida kasutatakse nimivõimsuse väljendamisel

## Jooniste nimekiri

Joonis 1. Võimsusvõimendi struktuurskeem .....	10
Joonis 2. Võimsusvõimendi elektriskeem.....	11
Joonis 3. Väljundastme transistorid .....	15
Joonis 4. Võimendi tagasiside pingejaguriga.....	27
Joonis 5. Võimendi koos sisendfiltriga.....	29
Joonis 6. Võimendi väljundpinge graafik .....	31
Joonis 7. Võimendi talitlussagedusala .....	32
Joonis 8. Trükkplaat komponentidega .....	33
Joonis 9. Trükkplaat alumiste radadega.....	34
Joonis 10. Trükkplaat ülemiste radadega.....	35
Joonis 11. Trükkplaat puuriaukudega .....	36
Joonis 12. Trükkplaadi kolmemõõtmeline mudel.....	37

## Tabelite nimekiri

Tabel 1. Trükkplaadi komponentide loetelu.....	35
--	----



## Sissejuhatus

Elektroonilise signaali võimsuse võimendamiseks kasutatakse võimsusvõimendeid. Antud töös projekteeritakse võimsusvõimendit, mis võimendab signaali helisageduslikus piirkonnas.

Võimsusvõimendi suurendab signaali allika signaali võimsust toiteallika abil. Toiteallikast saadud energia juhitakse väljundisse, jäljendades sisendsignaali kuju, suurendades selle pinget ja voolu.

Võimendeid saab eristada nende võimenduselementide järgi: transistorvõimendid ja lampvõimendid. Lampvõimendi võimendavad komponendid on elektronlambid. Seetõttu on need võimendid üldiselt mõõtmetelt suuremad ning ebaefektiivsemad, kuna lampide kaudu eraldub väga palju soojusenergiat. Vaatamata suurele soojusenergia kaale, eelistavad paljud siiski lampvõime, kuna nendel arvatakse olevat puhtam ja soojem heli. Transistorvõimendi puhul on võimendavateks komponentideks transistorid, mis on üldiselt oma mõõtmetelt väiksemad kui lampvõimendid ning ka efektiivsemad.

Võimendit iseloomustavad parameetrid on sisendpinge, väljundpinge, väljundvõimsus sagedusala, võimendus ja moonutustegur. Võimsusvõimendi väljundvõimsus on suurim võimsus, mida võimendi annab nimikoormustakistusele milleks on tavaliselt kõlar, ning selle takistus võib varieeruda vahemikus  $2-30\Omega$ . Väljundvõimsus jaguneb nimivõimsuseks ja muusikavõimsuseks. Nimivõimsus on ruutkeskmise võimsus, selline et signaali energiasisaldus on kõigil sagedustel ühesugune. Muusikavõimsus on maksimaalne võimsus, mida võimsusvõimendi suudab taluda vaid lühiajaliselt.

Töö eesmärk on selgeks teha transistorvõimsusvõimendis erinevate skeemi osade funktsioon ning projekteerida võimsusvõimendi elektriskeem ja projekteerida trükkplaat. Selgitada signaali võimendamise juurde kuuluvaid protsesse ja tõestada elektroonikakomponentide tööd arvutuslikult.

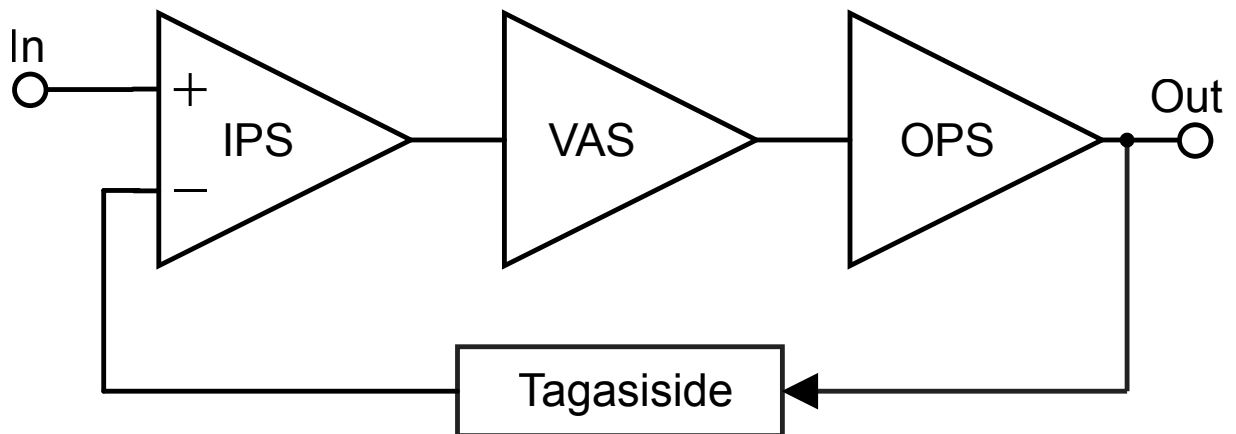
## 1.Võimsusvõimendi ülevaade

Antud töös projekteeritakse AB-klassi võimsusvõimendit mis on kolmeastmelise struktuuriga. AB-klassi võimendi tähistab, et võimendil on B- ja A-klassi tunnuseid.

B-klassi võimendi tähendab, et väljundastme transistorid töötavad vastastaktastmena, sest nad töötavad kahetaktilises režiimis – kummagi õla transistorid juhivad voolu poolperioodide kaupa vaheldumisi.

A-klassi võimendil on väiksemad moonutused kui B-klassil. See on tänu sellele, et voolu võimendav transistor töötab terve siinussignaali tsükli. Pidev voolujuhtimine tähendab aga seda, et transistoril toimub pidev soojuse eraldumine ning nende jahutamiseks on vaja suuri radikaid, mis omakorda muudavad võimendid mõõtmetelt suuremaks ning raskemateks.

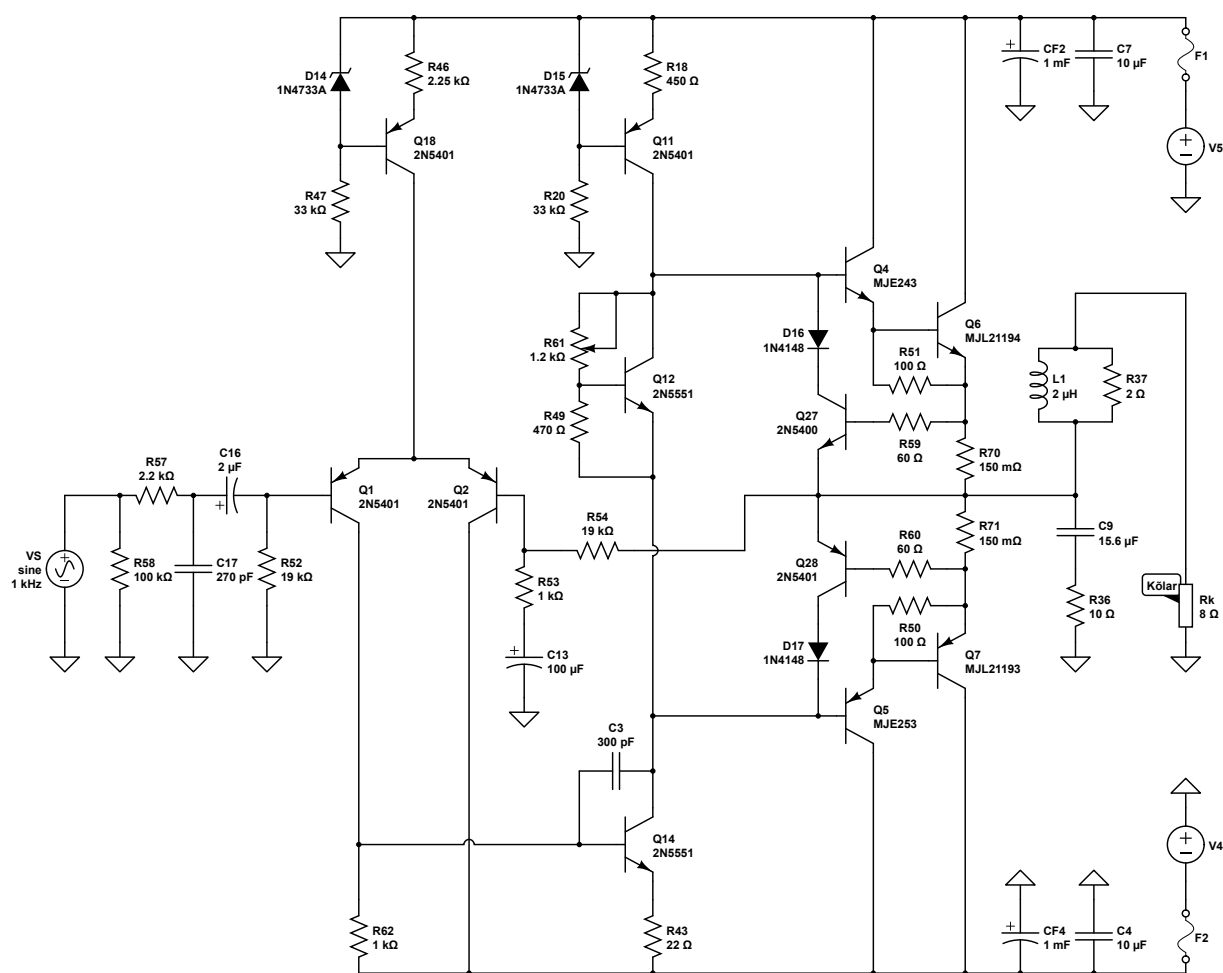
AB-klassi peamine tunnus on, et väljundastme transistoride astemoonutus on viidud minimaalsele tasemele, kuna mõlemad transistorid juhivad natuke voolu ka signaali vastaspoolperioodi ajal. Selline olukord tekitatakse vastava eelpingestusega näiteks diodide või transistori abil, mis hoiab mõlemaid väljundastme transistore lahti ka sisendsignaali puudumisel.



Joonis 1. Võimsusvõimendi struktuurskeem

Töös oleva võimsusvõimendi esimesene aste on IPS ehk sisendaste, mis koosneb diferentslülitusest ja püsivooluallikast. Diferentslülitus muundab signaali allika pingemuutused voolumuutusteks ja lahutab sisendsignaali tagasisidesignaali. Teine aste on VAS ehk pingevõimendusaste, mis töötab A-klassi režiimis ja annab sisendastmelt saadud signaali pingele maksimaalse amplituudi, mis jääb võimendi väljundpingeks. Kolmas aste on OPS ehk väljundaste, mis võimendab voolu AB-klassi režiimis.

## 1.1 Võimsusvõimendi elektriskeem



Joonis 2. Võimsusvõimendi elektriskeem

Joonisel 2 on kujutatud antud töö detailne elektriskeem. Sisendisse juhitakse signaal  $U_{IN(RMS)} = 1V$  mis läbib madalpääsfiltri ja kõrgpääsfiltri, et võimendi ei võimendaks mittesoovitud signaale. Seejärel liigub signaal sisendastme diferentslülituses oleva Q1 transistori baasile. Diferentsaste hoiab alalispinge võimendi väljundis nulli lähedal, nii et väljundtransistoride alalisvool koormust ei läbi. Diferentslülituse teisele transistorile Q2 baasile rakendub vahelduvpingevastuside pingejaguri R54 ja R53 kaudu. Sisendastme koormustakistilt R62 läheb signaal tüürastme transistori Q14 baasile. Selle koormuseks on püsivooluallikas Q11. Väljundastme transistorid Q4-Q7 võimendavad voolu ning nendele vajaliku jõudevoolu määrab transistor Q12. Väljundisse saadakse signaal nimivõimsusega 50W.

## 2. Võimendi arvutused

Võimsusvõimendi elektriskeemi staatiliste parameetrite leidmiseks tuleb alustada arvutustega võimendi koormuse juurest ning liikuda võimendi sisendi suunas.

### 2.1 Võimsusvõimendi väljundastme arvutus

Selleks, et koormustakistusega  $R_K = 8\Omega$  võimsusvõimendi väljundisse saaks siinussignaali nimivõimsusega  $P_n = 50W$  tuleb arvutada väljundpinge efektiivväärtus  $U_n$  kasutades valemit [1]:

$$U_n = \sqrt{P_n R_K} = \sqrt{50W \cdot 8\Omega} = 20V.$$

Väljundpinge amplituudväärtuse  $U_m$  saab arvutada valemi abil [1]:

$$U_m = \frac{U_n}{0.707} = \frac{20V}{0.707} = 28,3V$$

kus väljundpinge efektiivväärtus  $U_n$  on jagatud siinussuuruse ruutkeskmise väärtusega 70.7%.

Ühe õla vajaliku toitepinge leidmiseks tuleb liita väljundpinge amplituudväärtusele järgmised pingelangud:

- Väljundastme liitransistori baas-emitter pinged, ligikaudu 1V siirde kohta seega kokku  $U_{BE} \approx 2V$
- Emittertakisti R71 pingelang, mis valitakse kuni  $0,1U_n$ , seega  $U_{R71} = 2V$ . [1]
- Pingelang takistil R18  $\approx 1V$
- Transistori Q11 kollektori ja emitter vaheline pinged  $U_{CE(Q11)} \approx 1V$

Ligikaudne vajalik toitepinge on:

$$E = U_m + U_{BE} + U_{R70} + R18 + U_{CE(Q11)} = 28,3V + 2V + 2V + 1V + 1V = 34,3V.$$

Kuna toide on valitud stabiliseeritud pingega siis võib pingeks valida natuke suurema väärtuse  $+E = 35V$  ja  $-E = -35V$ .

Väljundtransistori Q6 nimivõimsusel läbiva vahelduvvoolu amplituudiväärtuse  $I_{Cmax(Q6)}$  saab leida valemiga [1]:

$$I_{Cmax(Q6)} = \sqrt{\frac{2P_n}{R_K}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 50W}{8\Omega}} = 3,53A.$$

Selle voolu keskvväärtus  $I_C$  [1]:

$$I_C = \frac{I_{Cmax}}{\pi} = \frac{3,53}{\pi} = 1,13A$$

Seega tarbib väljundtransistor alaldi ühest poolest  $1,13A$  voolu. Transistori kollektoripinge  $U_{CE(Q6)}$  maksimaalse väärtuse saame valemist [1]:

$$U_{CE(Q6)} = E + U_m = 35V + 28,3V = 63,3V$$

Kollektoripingest  $U_{CE}$  ja kollektorivoolu amplituudi väärtusest  $I_{Cmax}$ , tulenevalt on valitud ka väljundtransistorid.

Teades pingelangu emittertakistil  $U_{R70,71} = 2V$  ja väljundvoolu  $I_{Cmax(Q6)} = 3,53A$ . Saame arvutada emittertakisti R71 takistuse:

$$R71 = R70 = \frac{U_{R70}}{I_{Cmax}} = \frac{2V}{3,53A} = 0,56\Omega.$$

Emittertakistil ligikaudne hajuv võimsus:

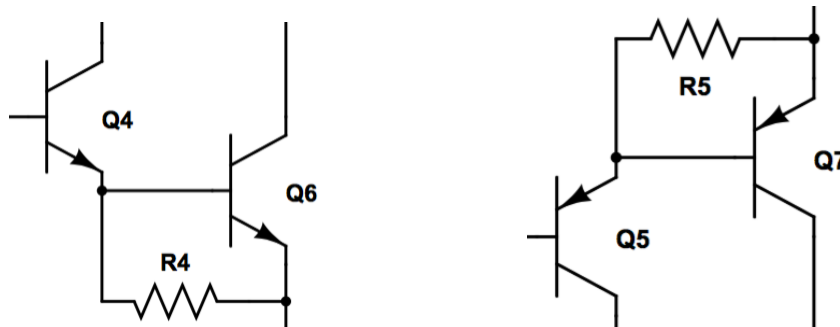
$$P_{R70,R71} = 0,5U_{R70} \cdot I_{Cmax(Q6)} = 0,5 \cdot 2V \cdot 3,53A = 3,5W.$$

### 2.1.1 Voolu võimendavad transistorid

Üks võimalus väljundastmes voolu võimendamiseks on võtta kasutusele bipolaartransistorite erinevaid kombinatsioone ehk liittransistorid, mida saab käsitleda kui ühe transistorina. Enimtuntud kombinatsioonid on:

1. Järjestikku ühendatud sama tüüpi juhtivusega kaks või enam transistorit nii, et esimese transistori emitter oleks teise transistori baasiga otse ühendatud. Sellist võimendusastet nimetatakse Darlingtoni paariks. Kui väljundastet läbiv vool on liiga suur ühe Darlingtoni paari jaoks tuleb sellele lisada veel üks transistor või isegi mitu.
2. Kombinatsiooni, kus juhtivale transistorile järgneb vastupidise juhtivustüübiga transistor, ning see on oma baasiga ühendatud eelmise transistori kollektroiga, võib seda nimetada komplementaartransistoritest liittransistoriteks või Sziklai paariks [1]. Sarnaselt nagu Darlingtoni' lülituse korral, kui väljundastet läbiv vool on liiga suur kahe transistori jaoks, tuleb lisada kolmas transistor või enamgi.

Väljundastme Darlingtoni paari lõppt transistorid on Q6 ja Q7. Joonisel 3 on kujutatud väljundastmes voolu võimendavad liittransistorid Q4-Q7, kus positiivse poolperioodi sisend-



Joonis 3. Väljundastme transistorid

signaalist võimendavad transistorid Q4-Q6 ja negatiivse poolperioodi Q5-Q7 ehk kumagi öla transistorid juhivad poolperioodide kaupa vaheldumisi. Seda nimetatakse ka vastastaktastmeks.

Kui vastastaktastmes on sisendsignaali puudumisel mõlema öla transistoride baasi ja emitter vaheline pinge  $U_{BE}$  null ja transistorid peaaegu suletud võib selle tagajärjel väljundsignaal moonutada ning seda nimetatakse astemootuseks. Võimendi häälestamisel tuleb jälgida väljundsignaali kuju ostsillograafi ekraanil ja astemootuse ilmlemisel jõudevoolu suurendada. Väljundtransistoride eelpeuge ja seega jõudevoolu tarviliku väärtuse saab valida seadetakistiga R61.

Soovitav on valida pigem tugevam jõudevool kui nõrgem, kuna nõrga jõudevoolu korral on võimsustransistoride siirdel on peaaegu ümbruse temperatuur. Kui saabub tugev koormusvoolu impulss, siis siire hetkeliselt kuumeneb, tema juhtivus kasvab kiiresti ning vastusideahelasse läheb alalispingeline veasignaali, mis muudab kõigi astmete režiimi ja ka nende vooluvõimendustegurit. Tagajärjeks on dünaamiline infrahelisageduslik moonutus [1]. Väljundtransistori jõudevool  $I_{q(Q6)}$  valitud selliselt [1]:

$$I_{q(Q6)} = 0,03I_{Cmax} = 0,03 \cdot 3,53A \approx 0,1A.$$

Siis hajub transistoril Q6 jõuderežiimis võimsus  $P_{q(Q6)}$  [1]:

$$P_{q(Q6)} = I_{q(Q6)} \cdot E = 0,1 \cdot 35V = 3,5W.$$

Nimiväljundvõimsusel hajuva võimsuse  $P_{C(Q6)}$  leitakse valemiga [1]:

$$P_{C(Q6)} = \frac{E^2}{\pi^2 \cdot R_K} + P_{q(Q6)} = \frac{35V^2}{\pi^2 \cdot 8\Omega} + 3,5 \approx 19W.$$

Transistorid Q6 ja Q7 on valitud MJL21194 ja MJL21193 mille maksimaalne  $I_C = 16A$  ning maksimaalne kollektoripinge  $U_{CE} = 250$  [4]. Teades transistori minimaalset vooluülekanndetegurit, saame välja arvutada baasivoolu  $I_{B(Q6)}$  järgmise valemiga

$$I_{B(Q6)} = \frac{I_{Cmax}}{h_{fe}} = \frac{3,53A}{25} \approx 0,14A$$

Seega peaks baasivool olema ligikaudu 0,14A , et kollektoris oleks vool 3,53A.



Transistorid Q4 ja Q5 on eeltransistorid väljundastme Darlingtoni paaris. Neid transistore läbib ka nõrga sisendsignaali ajal teatav vool, kuna nende emitteriahelais on lisatoitetakistid R51 ja R50. Need takistid ühtlustavad transistorite Q4, Q5 väljundtakistusi ning Q6, Q7 sisendtakistusi, suurendades õlgade sümmeetriat. Edaspidi on eeldatud et kõikide transistoride baasipinge võrdub  $U_B = 0,6V$  [1].

Takisteid läbivaks vooluks on valitud  $I_{R51,R50} = 6 mA$ . On teada, et pingelang takistil on võrdne järgmise transistori baas-emitter pingega, seega:

$$U_{R51} = U_{R50} = U_{BE(Q6)} = U_{BE(Q7)} = 0,6V, \text{ siis } R51 = R50 = \frac{U_{R51}}{I_{R51,R50}} = \frac{0,6V}{6mA} = 100\Omega$$

Takistil hajuv võimsus:

$$P_{R51} = P_{R50} = U_{R50} \cdot I_{R51,R50} = 0,6V \cdot 6mA = 0,0036W.$$

Transistori Q4 summaarne jõudevool koosneb takisti R51 läbivast voolust  $I_{R51} = 6mA$  ja transistorisse Q6 hargnevast baasivoolust  $I_{B(Q6)} = 0,14A$ . Q4 kollektorivoolu suurim amplituud leitakse voolude liitmisel:

$$I_{q(Q4)} = I_{q(Q5)} = 6mA + 140mA = 146mA.$$

Kollektoripinge  $U_{C(Q4)}$  väärtus on valitud võimalikult lähedale  $U_{C(Q6)}$  väärtusele  $U_{CEmax} > 63.3V$ . Transistori Q4 ja Q5 valimiseks tuleb arvutada kõigepealt kollektorivoolude suurima amplituudi:

$$I_{C(Q4)} = I_{C(Q5)} \approx \frac{I_{Cmax(Q6)}}{h_{fe(Q6)}} = \frac{3,53A}{25} = 0,14A.$$

Transistoritel Q4 ja Q5 hajuv võimsus leitakse valemiga [1]:

$$P_{Cmax(Q4)} = \frac{P_{Cmax(Q6)}}{h_{fe(Q6)} + I_{R51} \cdot E} = \frac{3,53A}{25 + 0,006A \cdot 35V} = 0,14W$$

Nendest andmetest lähtudes on Q4 transistoriks valitud MJE243 mille maksimaalne kollektoripinge  $U_{CE} = 100V$ , maksimaalne kollektorivool  $I_C = 8A$ . Transistoriks Q5 on valitud MJE253 millel on sarnased väärtused [5]. Võimendi millel on  $8\Omega$  koormustakistus, omab väljundastmes tavaliselt pingevõimendust  $A_{OPS} = 0,96$  [2]

### 2.1.2 Võimsusvõimendi liigkoormus- ja lühisekaitse väljundastmes

Võimsusvõimendil on väga väike väljundtakistus, mistõttu transistor läbiv vool võib kergesti ulatuda ohtliku väärtuseni nii sisendpinge ülemäärasel tõusmisel kui ka koormustakistuse vähenemisel. Esimesel juhul on tegu liigkoormusega ehk ohtliku ülekoormusega. Koormustakistuse vähenemise tüüpiliseks on võimendi väljundi otseühendus maaga. Näiteks lühise tõttu kõlari ühendusjuhtmeis, kõlari või transistori kollektori ja emitter juhuslikul kokkuühendamisel.

Väljundi lühis on eriti ohtlik, sellepärast, et siis lakkab toimimast pingevastuside, mille tagajärjel võimendus kasvab mitmekümnekordseks ja väljundastme transistoride vool võib isegi väikse sisendsignaali korral ületada lubatud väärtuse  $I_{Cmax}$ . Ühtlasi võib seejuures ülemääraseks kasvada ka transistoridel hajuv võimsus. Võimendi häälestamisel ja korrastamisel on väljundi juhuslik lühistamine küllaltki tõenäoline. Seepärast, et iga valeühenduse pärast poleks vaja hakata asendama kalleid väljundtransistore, tuleb iga võimsusvõimendi varustada liigkoormus- ja lühisekaitsega.

Transistoridega Q27-28 kaitseb väljundastme transistore Q4-7 nii sisendi liigkoormuse kui ka väljundi lühise korral. Emittertakistite R70 ja R71 takistused on valitud, et kuni nimivõimsuseni on pingelang neil sedavõrd väike, et sellest ei piisa kaitsetransistoride Q27-28 avamiseks. Seega ei mõjuta nad võimendi normaaltalitlust. Kui väljundastme sisendsignaali positiivse poolperioodi amplituud suureneb siis kasvab ka

pingelang takistil R70. Kui see ulatub transistori emittersiirde avanemise läviväärtuseni 0,6V siis transistor Q27 ja Q28 avaneb, tema kollektori-emitter vahemik sildab liittransistori Q4 ja Q6 sisendi, transistoride baasi ja emitter vaheline pinge alaneb ja järelikult väljundvool kasvada ei saa. Seega tuleb emittertakistite väärtuse leida valemiga:

$$R_{70} = R_{71} = \frac{U_{BE}}{1,1I_{Cmax(Q6)}} = \frac{0,6}{1,1 \cdot 3,53} = 0,15\Omega$$

Kui väljundtransistori Q6 kollektorvool tõuseb lubatust kõrgemaks, näiteks  $I_{C(Q6)} = 4A$  siis pingelang takistil:

$$U_{R70} = R70 \cdot I_{C(Q6)} = 0,15\Omega \cdot 4A = 0,6V$$

Kui väljundtransistoride kollektorvool  $I_{Cmax(Q6)} = 4A$ , avanevad kaitsetransistorid.

Piiramistakistid R59-60 takistuse on valitud 60Ω. Nende ülesandeks on kaitsta transistoride Q27 ja Q28 emittersiiret suurte voolutippude eest. Diodid D16, D17 on valitud 1N4148 mudelid, mis suurendavad kaitseülituse tundlikust liigvoolu kasvu suhtes. Valime Q27-28 transistorideks 2N5401 ja 2N5400 [6].

### 2.1.3 Zobeli ahel

Väljundis olev RC ahelat nimetatakse Zobel'i ahelaks, mis ühendatakse paralleelselt väljundkoormusega ehk valjuhääldiga, et neutraliseerida kõlarimembraani mähises tekkivat induktiivsust.

Kuna valjuhääldis olev mähis on oma olemuselt induktiivpool, siis kõlari impedants tõuseb koos sageduse kasvuga. Zobel'i ahelat kasutataksegi eesmärgiga, et tagada valjuhääldi nominaalimpedants kõrgetel sagedustel, mille abil saab kõlar töötada palju efektiivsemalt.

8 Ohmise kõlari puhul tuleb takisti R36 valida vähemalt takistusega 8Ω. Kondensaatori C9 valimisel tuleb kasutada valemit [10]:

$$C9 = \frac{L_K}{R_K^2} = \frac{1mH}{64\Omega} = 0,0000156F = 15,6\mu F.$$

Kus  $L_K$  on kõlari mähise oletatav induktiivsus. Väljundisse ühendatud lüli L1 ja R37 suurendab võimendi stabiilsust mahtuvusliku iseloomuga koormuse korral. L1 väärtuse võib valida  $2\mu\text{H}$  ning  $R37 = 2\Omega$ . Maksimaalselt hajuv võimsus takistitel R37, R36:

$$P_{R37,R36} = U_{R70} \cdot I_C = 2V \cdot 3,53A = 7,06W$$

#### 2.1.4 Jahutusradiaator väljundastme transistoridele

Radiaatori ülesanne on soodustada transistoris eralduva soojuste eemalejuhtimist seadise ümbritseva õhu vahelise soojustakistuse vähendamise teel. Jahutusradiaatorid erinevad oma konstruktsiooni ja materjalide ning sellest tulenevalt ka soojusjuhtivuse poolest. Kuna väljundastme transistoridest läheb läbi palju voolu, eraldub ka nendelt suur soojushulk.

Transistoridel Q4, Q5 tegelik hajuv võimsus  $P_C = 0,14W$ , mistõttu pole nendel eralduv soojushulk kriitiline.

Kuna lõpptransistoridel Q6, Q7 hajub nimivõimsusel võimsus  $P_C \approx 19W$ , mis tähendab, et transistoridel eraldub ka palju soojust. Transistoril vaja mineva radiaatori minimaalse soojustakistuse  $\Theta_{CA}$  leiab valemiga [11]:

$$\Theta_{CA} = \frac{T_j - T_A}{P_C} - \Theta_{jC} = \frac{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{19W} - 0,7 \approx 5,8^\circ\text{C}/W$$

Kus  $T_A$  on keskkonna temperatuur,  $T_j$  transistori siirde lubatav maksimaalne temperatuur ja  $\Theta_{jC}$  on transistori siirde ja kesta vaheline soojustakistus. Jahutusradiaator on valitud TO-264 transistori kestile mõeldud mudel MA-102-55E [13] mille soojustakistus  $\Theta_{CA} = 5,2^\circ\text{C}/W$  ning pindala on  $29,097\text{mm}^2$

## 2.2 Pingevõimendus

Sisendastmes ja tüürastmes võimendatakse pinget ning nendel astmetel peab olema suur võimendustegur, sest nendelt vajatakse suurt pingevõimendust. Neid läbiv vool peab olema võimalikult püsiv, mis saavutatakse püsivooluallikatega.

### 2.2.1 Püsivooluallikad

Püsivooluallikaid kasutatakse transistorfiltreis, pingestabilisaatoreis, tugipingeallikais, samuti võimenduslülitides. Püsivooluallikad on kasutusel ka iseseisvate voolustabilisaatoritena, näiteks akude laadimiseks. Ideaalset vooluallikat läbiv vool ei sõltu tema klemmipingest. Seepärast jääb muutuvat koormustakistust läbiv vool püsivaks. Reaalne püsivooluallikas stabiliseerib voolu seda paremini, mida suurem on tema väljundtakistus koormustakistuse suhtes. Püsivooluallikat võib vaadelda ka pinge-vool-muundurina, mis muundab sisendpinge väljundvooluks. Püsivooluallikaid saab konstrueerida bipolar- ja väljatransistoride ning operatsioonvõimendite baasil.

Püsivooluallika komponentideks on transistor Q11, mis tagab ühtlase voolu tüürastmes ja Q18, mis tagab ühtlase voolu sisendastme transistoridele. Emittertakistid R18 ja R46 määravad voolu tugevuse  $I_C$  ahelates. Et koormusvool oleks sõltumatu toitepinge  $E$  muutustest, tuleb rakendada transistori baasile stabiilse pingetugipingeallikas, näiteks zener diood. Transistoridega rööbiti asuvad zener diodid, mis tekitavad baasile pingelangu, et transistorid saaksid aktiivrežiimis tööle lülituda. Takistid R20 ja R47 määravad voolu zener dioodidel. Koormusvoolu saab lugeda võrdseks transistori kollektorvooluga.

Tüürastme vooluallika stabiltroniks ehk zener dioodiks D15 saab valida mis tahes väikse võimsusega eksemplari millel tööpinge on väiksem kui totiepinge  $U_z < E$ . Sellest lähtudes valime stabiltroni mudeliks BZX384B5V1, mille tööpinge  $U_z = 5,1V$  ja maksimaalne päriivool  $I_{Zmax} = 250mA$  [8]. Q11 võib olla väikese võimsusega pnp transistor näiteks 2N5401[6], mille maksimaalne kollektorvool  $I_C = 600mA$  ja maksimaalne kollektor-emitter pinget on  $V_{CE} = 150V$ . Kuna Q4 väljundastme transistor baasivool peab olema:

$$I_{B(Q4)} = \frac{I_{C(Q4)}}{h_{fe(Q4)}} = \frac{0,14A}{15} = 9,3mA.$$

Seda arvesse võttes on Q11 kollektorivooluks valitud  $I_{C(Q11)} = 10mA$  ja emittertakisti takistus:

$$R_{18} = \frac{U_{R18}}{I_{C(Q11)}} = \frac{U_{Z(D15)} - U_{BE(Q11)}}{I_{C(Q11)}} = \frac{5,1V - 0,6V}{10mA} = 450\Omega.$$

Emittertakistil hajuv võimsus:

$$P_{R18} = U_{Z(D15)} \cdot I_{C(Q11)} = 5,1V \cdot 10mA = 0,051W.$$

Kui baasitakistit läbiv maksimaalne vool on 250mA, same arvutada selle takistuse

$$R_{18} = \frac{E - U_{Z(D15)}}{I_{D14}} = \frac{35V - 5,1V}{250mA} = 120\Omega.$$

Seega peab baasitakisti minimaalne takistus olema 120Ω. Selleks, et temperatuuristabiilsus oleks parem ja hajuv võimsus oleks väiksem valitakse need takistid suuremad, näiteks 33kΩ [2]. Baasitakistil hajuv võimsus:

$$P_{R20} = \frac{(E - U_{Z(D15)})^2}{R_{20}} = \frac{(35V - 5,1V)^2}{33000\Omega} = 0,027W.$$

Diiodi läbiv vool:

$$I_{D15} = \frac{E - U_{Z(D15)}}{R_{20}} = \frac{35V - 5,1V}{33000\Omega} = 0,9mA$$

Diiodil hajuv võimsus:

$$P_{D15} = U_{Z(D15)} \cdot I_{D15} = 5,1V \cdot 0,9mA = 4,6mW.$$

Sisendastme püsivooluallika komponentide väärtuste leidmiseks saab kasutada sarnast arvutuskäikku nagu tüürastme püsivooluallikal. D14 Zener diiodiks on valitud mudel BZX384B5V1 ja Q18 transistoriks on 2N5401, mille soovitud kollektorvool on  $I_{C(Q18)} = 2mA$ .

Emittertakisti takistus:

$$R_{46} = \frac{U_{R46}}{I_{C(Q18)}} = \frac{U_{Z(D14)} - U_{BE(Q18)}}{I_{C(Q18)}} = \frac{5,1V - 0,6V}{2mA} = 2250\Omega.$$

Emittertakistil hajuv võimsus:

$$P_{R46} = U_{Z(D14)} \cdot I_{C(Q18)} = 5,1V \cdot 2mA = 0,01W.$$

Kui baasitakisti minimaalne takistus leitakse sarnaselt nagu tüürastme vooluallikal  $R_{47} = 33 k\Omega$  ning baasitakistil hajuv võimsus  $P_{R47} = 0,027W$ . Diodi läbiv vool  $I_{D14} = 0,9mA$  ja sellel maksimaalne hajuv võimsus  $P_{D14} = 4,6mW$ .

### 2.2.2 Tüüraste

Väljundastmele vajaliku amplituudiga tüürpinget andva tüürastme transistori Q14 kollektorvool, mis praktiliselt võrdub stabiliseerimisahela vooluga, peab olema selline, et sisendsignaali puudumisel oleks väljundtransistoride baaside vahel küllaldane pinge  $U_{BQ4-BQ5}$ , et vältida astemoonutust. Väljundastme transistoridele baaside vaheline eelpinge ning seega tarviliku jõudevoolu väljundtransistoridele tekitatakse transistoriga Q12 koos pingejaguriga R61 ja R49.

$U_{BQ4-Q5}$  pinge võib ulatuda kuni toitepingeni E, sest püsivooluallika vool jääb püsivaks Q11 kollektori ja emitter vahelise pinge muutumisel suures ulatuses. Püsivooluallika vool peab olema väljundtransistori Q4 ja Q5 maksimaalsest baasivoolust nii palju, et sellest piisaks ka Q12 lahtihoidmiseks. Väljundtransistoride eelpinge ja seega jõudevoolu tarviliku väärtuse saab valida pingevastusidetakisti R49 abil, kusjuures sisendsignaali puudumisel rakendub  $U_{BQ4}$  ja  $U_{BQ5}$  vahele pinge, mis avaldub valemiga [1]:

$$U_{CE(Q12)} \approx U_{BE(Q12)} \cdot \left(1 + \frac{R61}{R49}\right)$$

Seadetakisti  $R_{61} = 1,2k\Omega$ ,  $R_{49}=470\Omega$  ja  $U_{BE(Q12)} = 0,6V$  korral saab baasidevahelist pinget muuta vahemikus:

$$U_{BE(Q12)} < U_{CE(Q12)} < U_{BE(Q12)} \cdot 3,5V, \text{ siis } 0,6V < U_{CE(Q12)} < 2,1V$$

See on piisav et hoida aktiivrežiimis transistori Q12. Transistori Q12 kollektoripinge võib ulatuda väärtuseni  $U_{CE} = 35V$  ning transistori läbiv vool on peaaegu voolallika Q11 toodetud 10mA voolust. Vool mis läbib takisteid R61 ja R49 on umbes 1mA, mistõttu hajuv võimsus takistitel:

$$P_{R61,R49} = E \cdot I = 35V \cdot 1mA = 0,035W.$$

Transistoriks Q12 sobib mistahes väikese võimsusega transistor mida on lihtne kinnitada ühe väljundtransistori radiaatorile, näiteks 2N5551, mille maksimaalne kollektorvool  $I_C = 600mA$  ja maksimaalne kollektor-emitter pinge on  $V_{CE} = 160V$ .

Emittertakisti R43 väärtus on valitud selliselt, et kogu emitterahela takistus, mis koosneb takistist R43 ja transistori Q14 emitteri takistusest  $r'_{Q14e}$ , oleks 10 korda suurem kui esialgselt. Kui tüüraastme transistori Q14 emittertakistus 10mA juures on  $r'_{Q14e} = 2.6\Omega$ , siis valime  $R_{43} = 22\Omega$ , mis teeb kogu ahela takistuseks  $R'=25\Omega$ . Kusjuures emittertakisti muudab tüüraastme ka lineaarsemaks. Eeldusel, et väljundastme transistoride Q4,Q5 ja Q6,Q7 vooluvõimendustegurid on  $\beta_{Q4,Q5}=100$  ja  $\beta_{Q6,Q7}=50$ , siis vooluvõimendus nende kahe transistori paari koosmõjul  $\beta=100 \cdot 50=5000$ , ning kui antud võimsusvõimendi väljundkoormus on  $8\Omega$  siis väljendub see tüüraastmel väljundkoormusena  $Z_{VAS}$ :

$$Z_{VAS} = 5000 \cdot 8\Omega = 40k\Omega.$$

Seega tüüraastme eeldatav võimendustegur  $A_{VAS}$  on leitav järgmiselt:

$$A_{VAS} = \frac{Z_{VAS}}{R'} = \frac{40k\Omega}{25\Omega} = 1600$$



Kuna antud skeemi puhul on soovituslik arvestada ka *Early effect* nähtusega, siis tuleb tüürastme transistori Q14 väljundtakistus  $r_0$  leida valemiga:

$$r_0 = \frac{V_{A+E}}{I_C} = \frac{100V + 35V}{10mA} = 13.5k\Omega$$

kus  $V_A = 100V$  on eeldatav *Early effect*'ist tulenev pinge 2N5551 transistoril. Kuna transistor Q14 koos emittertakistiga R43 suurendas emitterahela kogutakistust 10 kordseks, saab kogu emitterahelataakistust hinnata valemiga [2]:

$$R_{out} = r_0 \cdot 10 = 135k\Omega.$$

Kuna *Early effect* toimib kui takistus, mis on paralleelselt transistori Q14 kollektori ja emitter ahelas, siis emitterahela  $Z_{VAS}$  kogutakistus on leitav ohmi seadusega:

$$Z_{VAS} = \frac{R_{out} \cdot Z_{VAS}}{R_{out} + Z_{VAS}} = \frac{135k\Omega \cdot 40k\Omega}{135k\Omega + 40k\Omega} = 31k\Omega.$$

Seega eeldatav tüürastme võimendustegur on sellisel juhul:

$$A_{VAS} = \frac{R_{VAS}}{R_{Q14,R43}} = \frac{31k\Omega}{25\Omega} = 1240.$$

Hajuv võimsus takistil:

$$P_{R43} = 10mA \cdot 35V = 0,35W.$$

Q12 ja Q14 on valitud 2N5551 npn transistor, mille maksimaalne kollektorivool  $I_C = 600 mA$ , maksimaalne kollektor-emitter pinge on  $U_{CE} = 160 V$  [6].

### 2.2.3 Milleri korrektsioon

Iga võimendusaste pöörab alates teatud sagedusest signaali faasi 90 kraadi. Kui väljundsignaal on ühendatud inverteerivasse sisendisse, on esialgu tegemist negatiivse tagasisidega. Sageduse kasvades, kui ületatakse 2 korda võimendusastme piirsagedus, pööratakse kummaski astmes signaali samuti 90 kraadi võrra ning kokkuvõttes on sisendisse juhitud signaal samas faasis esialgse signaaliga ning võimendatav signaal on seetõttu hoopis suurem, tekib positiivne tagasiside ning võimendi võib hakata kas ostsilleerima ehk väljundsignaal hakkab võnkuma sõltumata sisendsignaalist või väljundsignaal saavutab maksimaalse väärtuse ning ei sõltu samuti enam sisendsignaalist. Selle probleemi vältimiseks kasutatakse milleri korrektsiooni ehk võimendi väljund ja sisend ühendatakse piisavalt väikse kondensaatoriga, mis hakkab võimendi võimendust vähendama juba väiksematel sagedustel ja võimendus kaob madalamatel sagedustel, kui on astmete enda piirsagedused. Seega kaob positiivse tagasiside oht aga samas väheneb ka võimendus. [9] Ülemiseks piirsageduseks valitakse üldiselt piisavalt madal väärtus, et tagada tagasiside stabiilsus. Sageduse kõrgemaks sättimisel on oht, et tagasiside kaotab stabiilsuse. Valime piirsageduseks  $f_c = 500\text{kHz}$ , kus võimendus hakkab vähenema 20db dekaadi kohta.

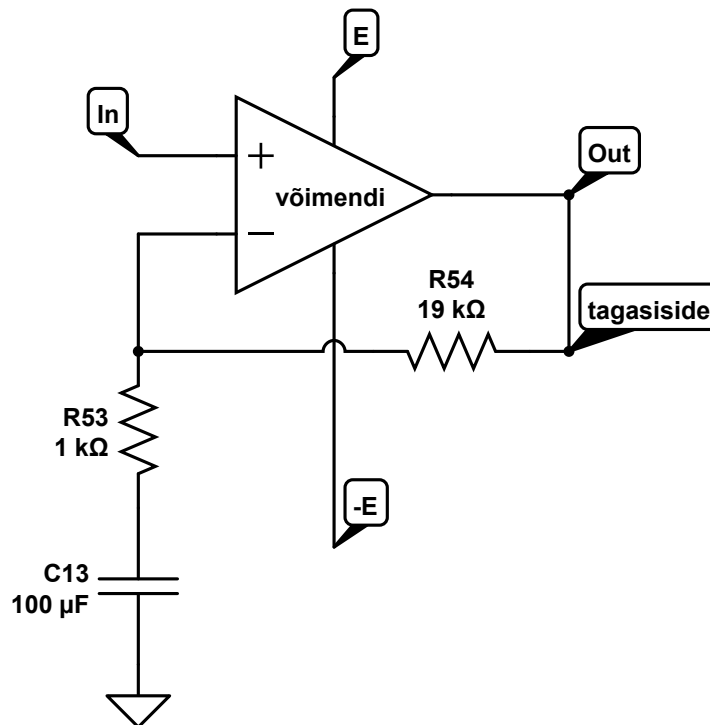
$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot r_{Q1e} + r_{Q2e} \cdot A} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 500000 \cdot 52\Omega \cdot 20} = 306\text{pF}$$

Kus A on ideaalne võimendi võimendustegur ja  $r_{Qe}$  on transistori emittertakistus. Valitud on standardsema väärtusega kondensaator, näiteks  $C_3 = 300\text{pF}$ .

### 2.2.4 Sisendaste

Sisendastmes võimendatakse pinget diferentslülitusega, kus on kaks ühesugust transistori ühendatud toitepinge suhtes rööbiti ning selle vooluallikaks on Q18, mis tagab mõlema Q1 ja Q2 kollektorahelasse 1mA. Sellises lülituses on väljundpingeks transistoride kollektoripingete vahe, mis on võrdeline sisenditesse rakendatud pingete vahe- ehk diferentspingega. Diferentslülitus on samuti vajalik selleks, et kahe polaarse toitega võimendis negatiivse tagasiside abil muuta sisendsignaali puudumisel alalispinge koormusel, väljundtransistoride emitteritel, võimalikult nullilähedaseks. Tavaliselt kasutatakse võimendeid koos

tagasisidestusega kuna see võimaldab võimendi võimendust stabiliseerida ehki vähendab võimendus ning vähendab võimendi mittelineaarmoonutusi. Joonis 4 on lihtsustatud skeem tagasisidest, kus positiivseks sisendiks on transistori Q1 baas ja negatiivseks sisendiks on transistor Q2 baas.



Joonis 4. Võimendi tagasiside pingejaguriga

Võimendi ideaalse võimendusteguri saab arvutada järgmise valemi abil:

$$A = \frac{U_m}{U_{IN}} = 1 + \frac{R54}{R53} = \frac{28,3V}{1,4V} \approx 20$$

Kus  $U_m$  on väljundpinge amplituudi väärtus ja  $U_{IN}$  sisendpinge amplituudi väärtus.

Kui võimendustegur on 20 siis saab valida takistid  $R54 = 19k\Omega$  ja  $R53 = 1k\Omega$ . Takistid R54 ja R53 moodustavad pingejaguri mille abil juhitakse 1/20 väljundsignaalist Q2 transistori baasile seda saab nimetada tagasisideteguriks  $\beta = 1/20$ . Koormustakisti R62 arvutus:

$$A = 20 \cdot R_{62} \cdot I_{C(Q1)} = 20 \cdot 1k\Omega \cdot 1mA = 20.$$

A on võimendi maksimaalne pingevõimendustegur, R62 on kollektortakistus,  $I_{C(Q1)}$  on kollektori vool. Et pingevõimendus oleks 20 korda peab R62 olema 1000Ω. R62 hajuv võimsus:

$$P_{R62} = I_C \cdot U_{BE(Q14)} = 1mA \cdot 0,6V = 0,6mW$$

Kollektorvoolu korral  $I_C = 1mA$  on transistori Q1 ja Q2 emittertakistus  $r'_e = 26\Omega$  seega sisendastme eeldatava võimendusteguri saab leida valemiga,

$$A_{IPS} = \frac{R_{62}}{r_{Q1e} + r_{Q2e}} = \frac{1k\Omega}{26\Omega + 26\Omega} \approx 19,2$$

selline  $A_{IPS}$  kehtiks sellisel juhul, kui tüürtransistori Q14 vooluvõimendus oleks lõpmatu. Kui oletada, et tüürastmes Q14 vooluvõimendustegur on 100, ja kogutakistus koos takisti R43'ga on  $R' = 25\Omega$  siis tüürastme sisendtakistus  $Z_{VAS} = 100 \cdot 25\Omega = 2500\Omega$ . Kuna R54 on rööbiti tüürastmega siis sisendastme tegeliku emitterjärguri takistuse saab arvutada valemi järgi, kus  $Z_{IPS}$  on sisendastme kollektorahela koormus:

$$Z_{IPS} = \frac{R_{99} \cdot Z_4}{R_{99} + Z_4} = \frac{1000 \cdot 2500}{1000 + 2500} = 714\Omega$$

Mille abil saab järgmisena arvutada sisendastme tõenäolisema võimenduse,

$$A_{IPS} = \frac{Z_{IPS}}{r_{Q1e} + r_{Q2e}} = \frac{714\Omega}{26\Omega + 26\Omega} \approx 13,7$$

Transistoride Q1 ja Q2 kollektoripinge võib ulatuda väärtuseni  $U_{CE} = E = 35V$ . Sisendastme transistorid Q1 ja Q2 on valitud 2N5401.

Võimendi võimendustegur ilma tagasisideta on kõikide astmete võimendustegurite korrutis.

$$A = A_{IPS} \cdot A_{VAS} \cdot A_{OPS} = 13,7 \cdot 1240 \cdot 0,96 = 16300,$$

$$\text{seega } 20\log(16300) = 84\text{db}$$

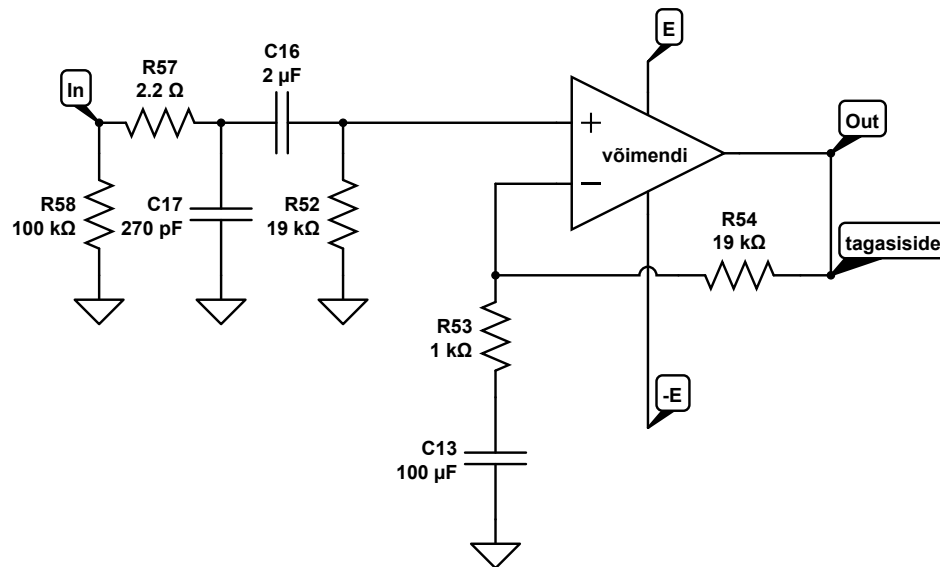
Kuna tagasiside vähendab väljundsignaali 20 korda, on selle tagasisidesilmuse võimendus:

$$A_{TS} = \frac{16300}{20} = 815, \quad \text{seega } 20\log(815) = 58\text{db}$$

Kui võimendi väljundis on 20V siis sisendpingete vahe Q1 ja Q2 transistorite baasil peab olema ainult  $20V/16300 = 1,2\text{mV}$ . Ideaalse võimendi parameetrid oleksid väljundpinge 20V korral  $20V/20 = 1\text{mV}$ . Seega peab sisendpinge olema ainult 0,2mV suurem et saavutada väljundpinge 20V, mis on küllaltki hea tulemus [2].

### 2.3 Sagedusfilter

Vältimaks ebavajalike signaalide võimendamist võimendis, on sisendis ja tagasiside ahelas kõrgpääs- ja madalpääsfiltrid. Joonisel 5 on lihtsustatud skeem võimendi sisendis ja vastuse ahelas paiknevatest komponentidest, mis moodustavad aktiiv kõrgpääs- ja madalpääsfiltrid.



Joonis 5. Võimendi koos sisendfiltriga

Võimendi sisendis on Takisti R57 ja kondensaator C17, mis moodustavad madalpääsfiltri. See takistab kõrgematel sagedustel sisendisse pääsemist. Soovitud ülempiiri mahalöikesageduse -3db juures oleks  $f_c = 270kHz$ . Kondensaatori C17 väärtuse saab arvutada valemiga:

$$C_{17} = \frac{1}{2\pi f_c R_{57}} = \frac{1}{2\pi \cdot 270kHz \cdot 2,2k\Omega} = 270pF$$

Kondensaator C16 koos takistusega R52, moodustab kõrgpääsfiltri, mis vähendab võimendustegurit madalamatel sagedustel. Soovitud pääsuala alampiir -3db võrra oleks  $f_c = 5hz$  juures, mida saab arvutada valemi abil:

$$C_{16} = \frac{1}{2\pi f_c R_{52}} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 19k\Omega} = 2\mu F$$

R52 takistus valitakse sarnaselt R54'ga. Kondensaator C13 jadamisi ühendatud takistiga R53, moodustavad kõrgpääsfiltri, mis vähendab võimendustegurit madalamatel sagedustel. Soovitud pääsuala alampiir -3db võrra oleks  $f_c = 5hz$  juures, mida saab arvutada valemi abil:

$$C_{13} = \frac{1}{2\pi f_c R_{57}} = \frac{1}{2\pi \cdot 5 \cdot 2,2k\Omega} = 38\mu F$$

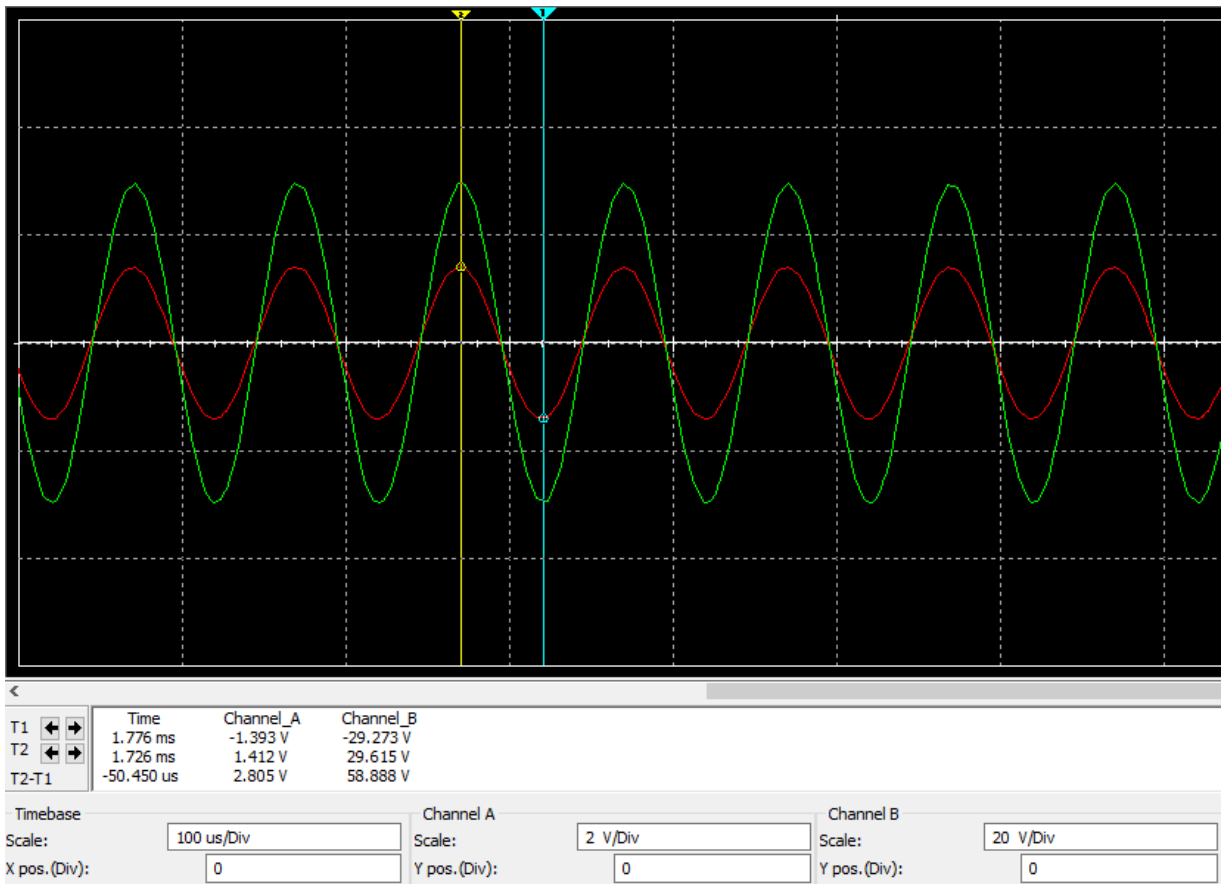
Tavaliselt kasutatakse siiski sellises lahenduses kõrge kvaliteediga kondensaatorit mille mahtuvus on  $C_{13} = 100\mu F$ . [2] R58 takistab sisendsignaali kõikumise alalisvoolu korral.

### 3. Elektriskeemi simulatsioon

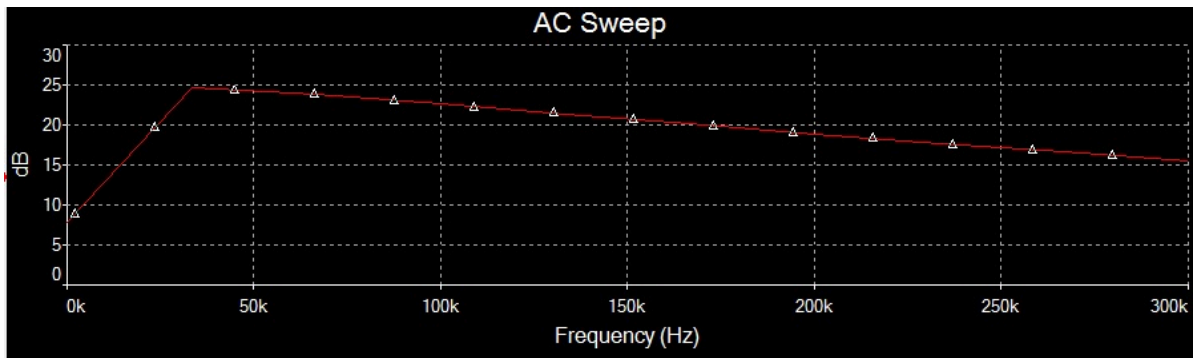
Skeemi simuleerimiseks kasutasin tarkvara Multisim 14. Skeemi komponendid on valitud arvutustega sarnaste või identsete parameetritega.

#### 3.1 Simulatsiooni tulemused

Joonisel 6 on kujutatud graafik, kus on sisendpinge amplituud  $U_{IN} = 1,41V$  punase siinussuurusega kanal A ja väljundpinge amplituud  $U_{OUT} = 29.2V$  koormusel roheline siinussuurusega, kanal B. Suurused on ligilähedased arvutustega, millest võib järeldada, et skeem toimib nii nagu ettenähtud.



Joonis 6. Võimendi väljundpinge graafik



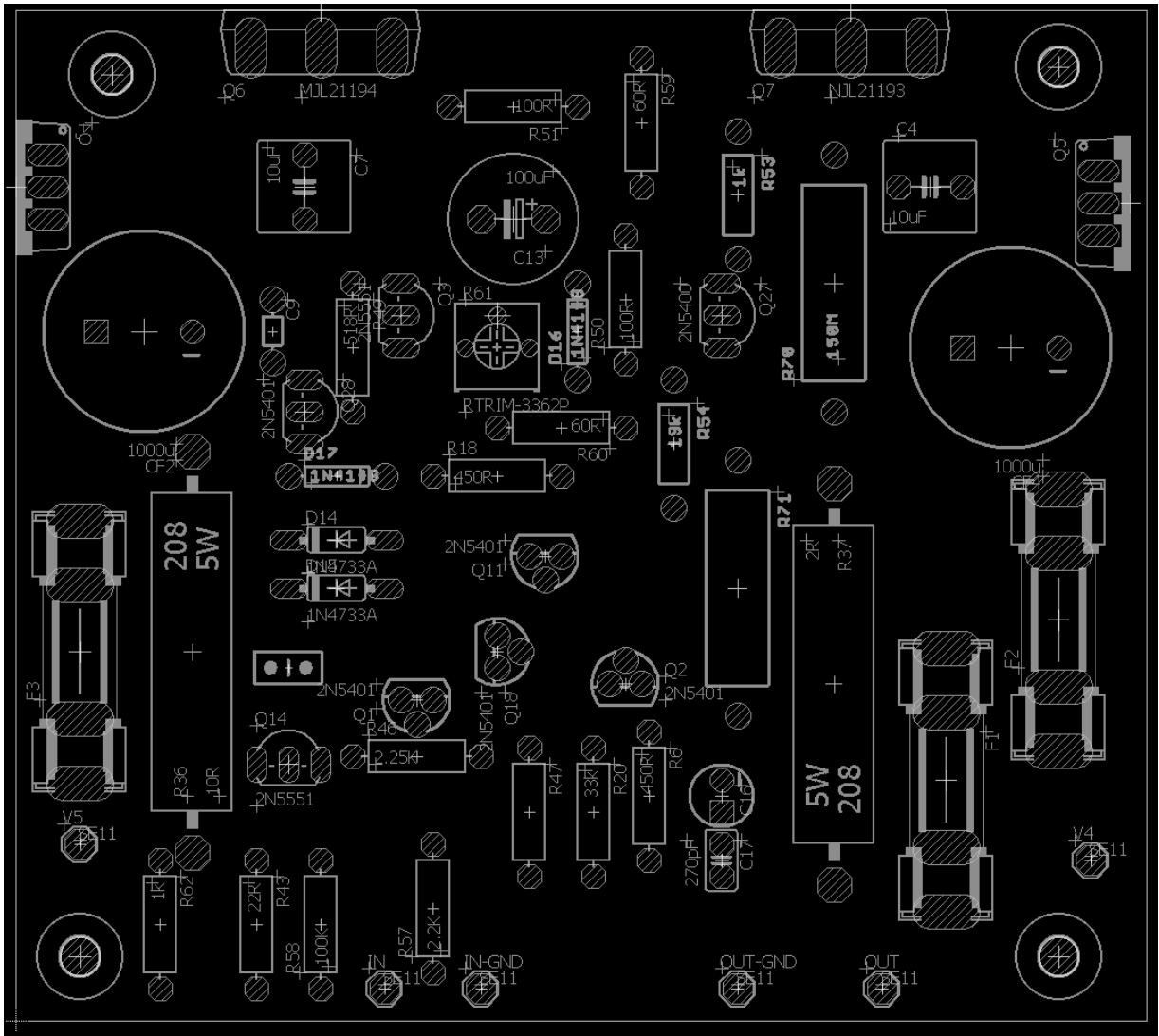
Joonis 7. Võimendi talitlussagedusala

Joonisel 7 on graafik, kus on kujutatud võimendi talitlussagedusala 5Hz – 270kHz, mis on ligilähedane arvutuslikele tulemustele.

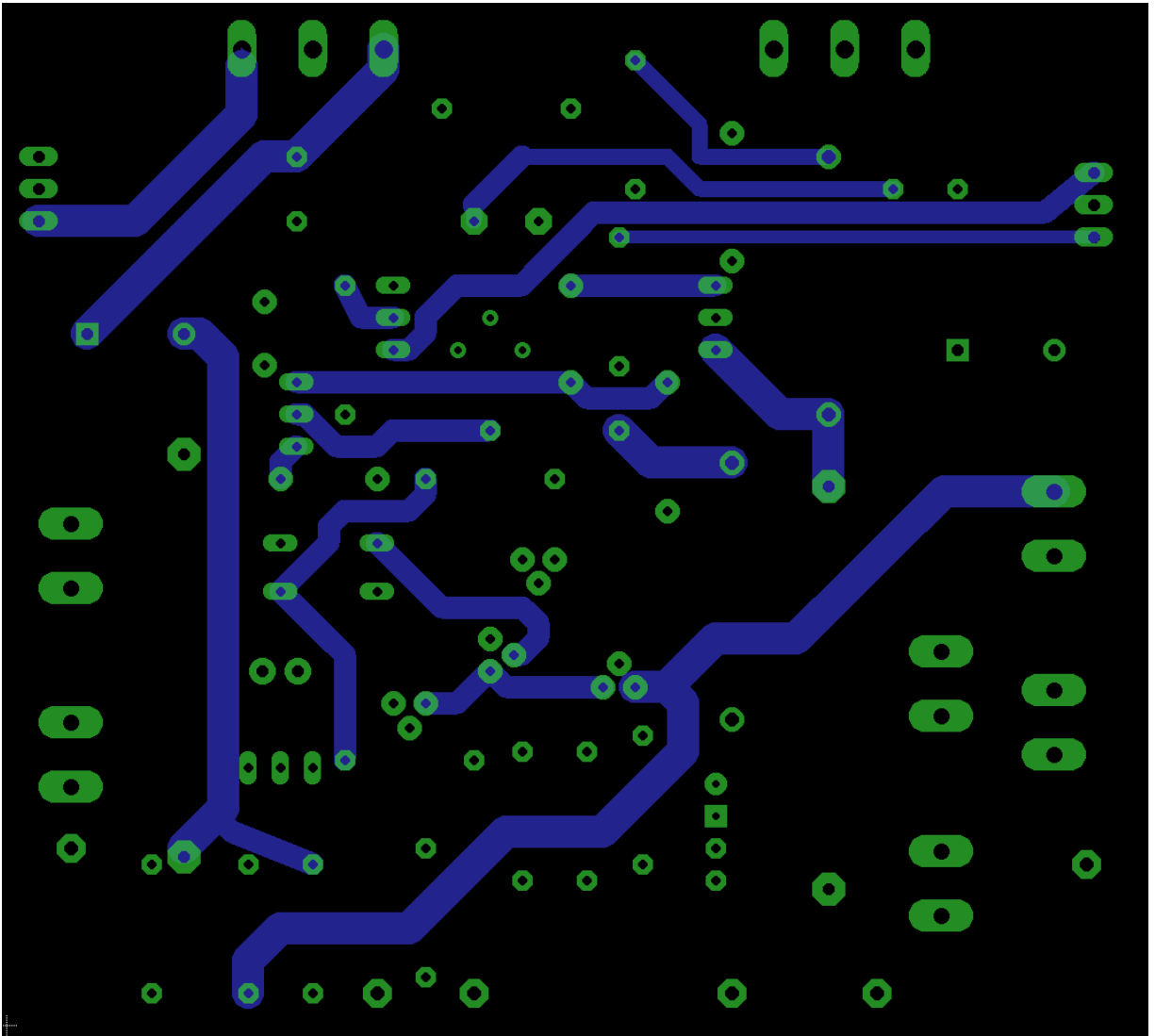


## 4. Trükkplaadi disain

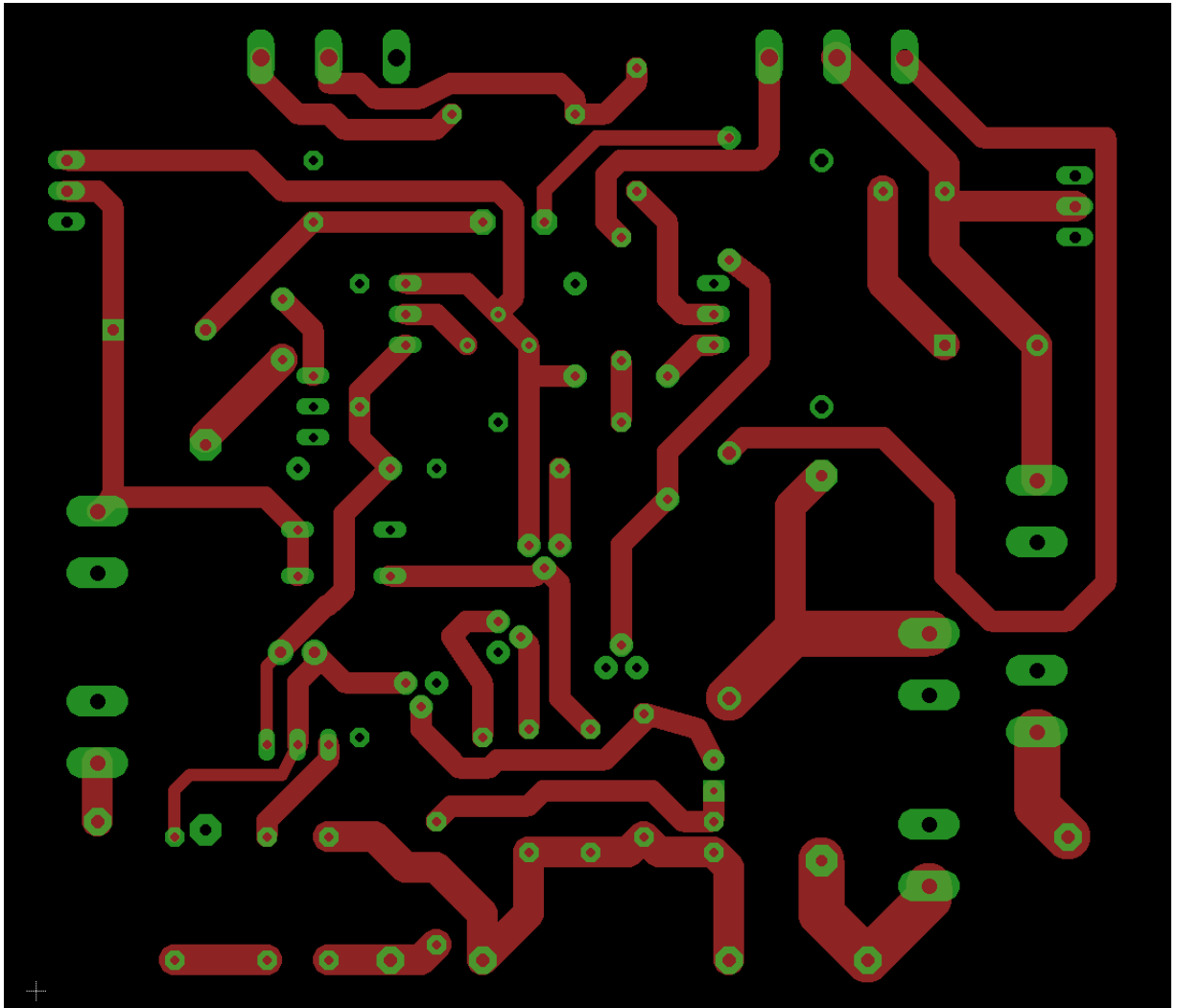
Trükkplaadi disaini tegemiseks kasutati tarkvara Eagle. Trükkplaat on kahepoolne ning on kasutatud ainult aukmontaaži komponente. Alumise pinna voolurajad on kujutatud sinisega värviga ning ülemised punasega. Väljundtransistorid on asetatud trükkplaadil võimalikult äärde, et need oleks võimalik ühendada jahutusradiaatoriga. Trükkplaadi mõõtudeks on 100mm x 80mm ning pakus 1,6mm. Antud trükkplaadi kõikide komponentide umbkaudne maksumus kokku on 40 eurot.



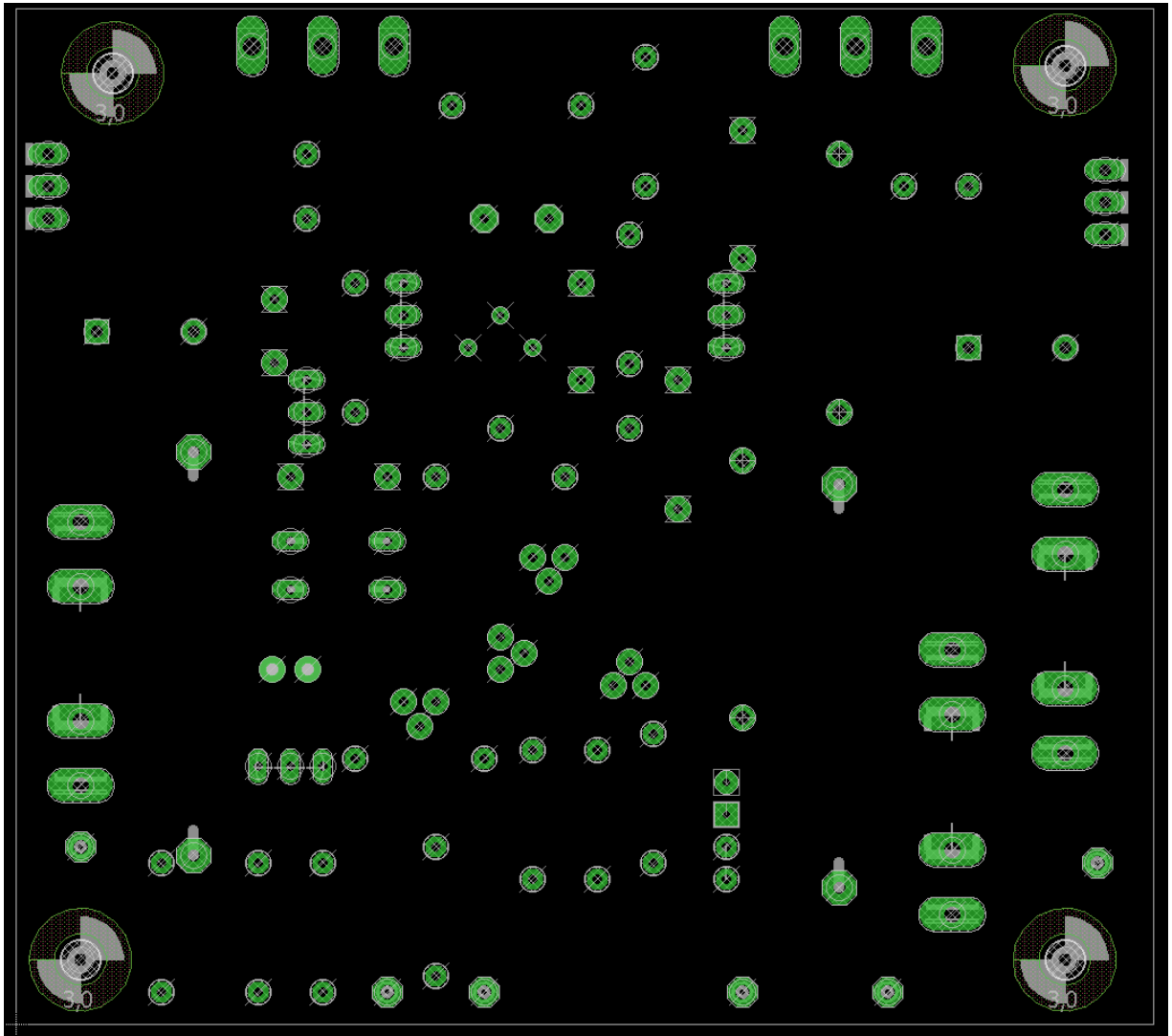
Joonis 8. Trükkplaat komponentidega



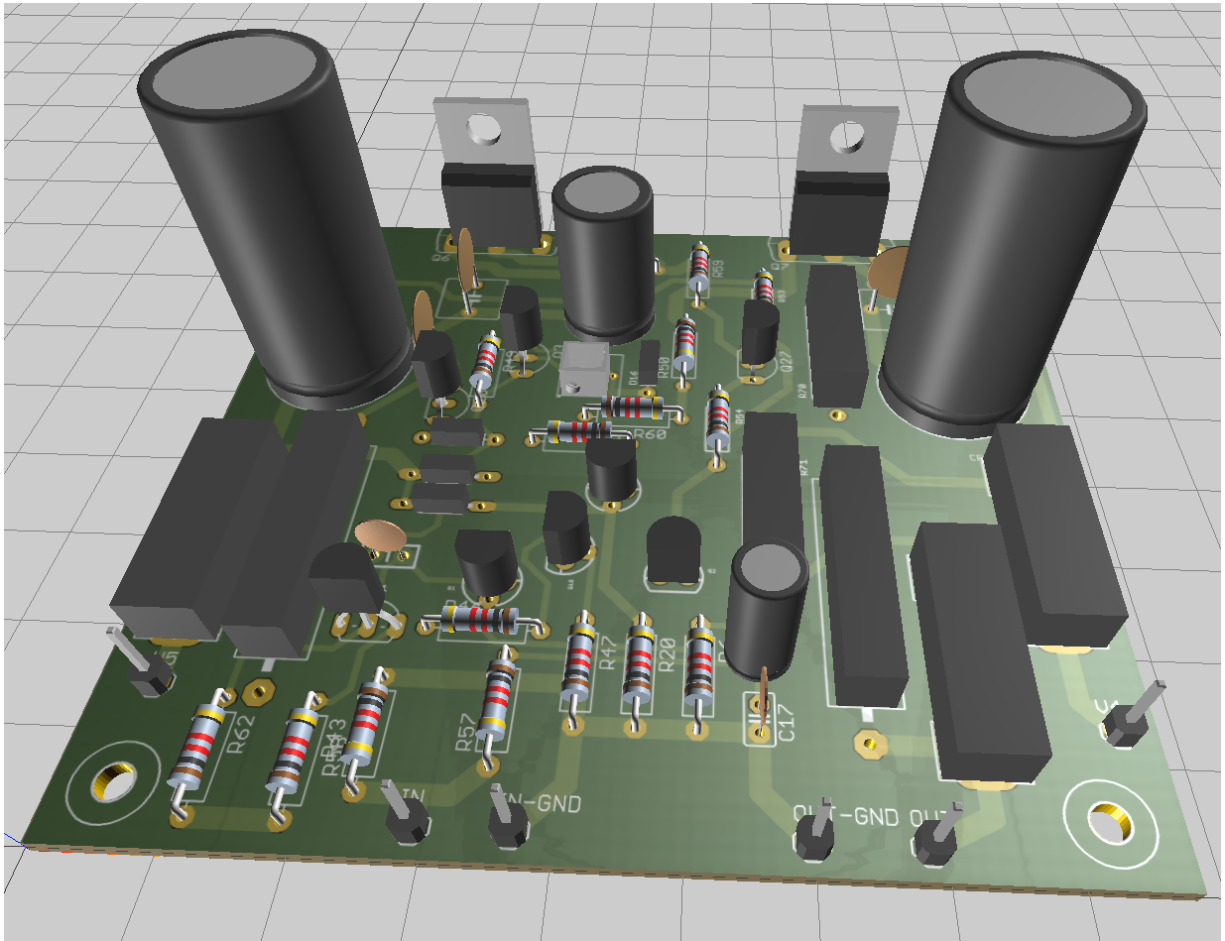
Joonis 9. Trükkplaat alumiste radadega



Joonis 10. Trükkplaat ülemiste radadega



Joonis 11. Trükkplaat puuriaukudega



Joonis 12. Trükkplaadi kolmemõõtmeline mudel

Trükkplaadil kasutatud komponentide nimekirja on kujutatud tabelil 1.

Komponent	Seade	Täpsustus	hind kokku €
C3	CAPACITOR	300pF, 50V, +/-20%	0,8
C4,C7	CAPACITOR	10uF, 50V, +/-20%	1,8
C9	CAPACITOR	16uF, 50V, +/-5%	0,6
C13	CAPACITOR	100uF, 50V, +/-20%	0,8
C16	CAPACITOR	2uF, 50V, +/-20%	0,6
C17	CAPACITOR	270pF, 50V, +/-20%	0,8
CF2,CF4	CAPACITOR	1000uF, 63V, +/-20%	6
D14,D15	DIODE		1,6
D16,D17	DIODE		1,6
J1,J2	RCA		2
L1	SHK20L	2uH	0,8
Q1,Q2,Q11,Q18,Q28	PNP BJT	TO-92	5
Q27	NPN BJT	TO-92	1
Q4	NPN BJT	TO-225-AA	1
Q5	PNP BJT	TO-225-AA	1
Q6	NPN BJT	TO-247-BV	1
Q7	PNP BJT	TO-247-BV	1
Q14,Q12	NPN BJT	TO-92-CBE	2
R18	RESISTOR	450Ω, 250mW, 1%	0,5
R20, R47	RESISTOR	33kΩ, 250mW, 1%	0,5
R36	RESISTOR	10Ω, 7W, 1%	1
R37	RESISTOR	2Ω, 7W, 1%	1
R43	RESISTOR	22Ω, 1W, 1%	0,8
R46	RESISTOR	2,25kΩ, 660mW, 1%	0,8
R49	RESISTOR	470Ω, 250mW, 1%	0,5
R50,R51	RESISTOR	100Ω, 250mW, 1%	1
R53	RESISTOR	1kΩ, 250mW, 1%	0,5
R54	RESISTOR	19kΩ, 250mW, 1%	0,5
R57	RESISTOR	2,2kΩ, 250mW, 1%	0,5
R58	RESISTOR	100kΩ, 250mW, 1%	0,8
R59,R60	RESISTOR	60Ω, 660mW, 1%	1,6
R62	RESISTOR	22Ω, 1W, 1%	0,8
R70,R71	RESISTOR	150mΩ, 5W, 1%	1,4
R61	RTRIM	1,2kΩ, 1W, 1%	1,4
V4,V5	PAD RTM		2,6
F1,F2	FUSE HOLDER		3,1
HEATSINK			6,18

Tabel 1. Trükkplaadi komponentide loetelu

## **Kokkuvõte**

Töö eesmärk oli teha selgeks võimsusvõimendi skeemi osade funktsioon ning leida staatilised parameetrid arvutuste abil ja kontrollida skeemi toimimist simulatsiooni teel. Kõik loetletud punktid eesmärgipüstituses said ka tehtud. Skeemi komponentide väärtused said valdavalt enamuses leitud arvutuste teel, mõned valiti erialakirjanduse soovitude järgi. Töö esimeses osas tutvustati võimsusvõimendi klasse ja antud töös oleva võimendi struktuuri ning elektriskeemi. Töö teises osas tehti vajalikud arvutused komponentide väärtuste leidmiseks ning selgitati nende tähtsust ja funktsiooni. Antud info põhjal sai välja arvutada võimendi astmete võimendustegurid. Kolmandas osas kontrolliti skeemi toimimist simulatsioonidega. Neljandas osas on näidatud trükkplaadi võimalikku disaini ning on lisatud kasutatud komponentide tabel. Leian et antud töös püstitatud eesmärgid seoses arvutuste ja võimendi tööõhimitete selgitamisega saab lugeda täidetuks.

## Kasutatud kirjandus

1. Abo, L. RAADIOLÜLITUSED, Tallinn: Valgus, 1990.
2. Bob Cordell, Designing Audio Power Amplifiers, 2010  
<http://milas.spb.ru/~kmg/files/literature/Designing%20Audio%20Power%20Amplifiers.pdf>
3. Douglas Self, Audio Power Amplifier Design Sixth Edition, 2013
4. [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/MJL21193-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJL21193-D.PDF)
5. [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/MJE243-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MJE243-D.PDF)
6. [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/2N5401-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/2N5401-D.PDF)
7. [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/2N5550-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/2N5550-D.PDF)
8. [http://cache.nxp.com/documents/data\\_sheet/BZX384\\_SERIES.pdf?pspll=1](http://cache.nxp.com/documents/data_sheet/BZX384_SERIES.pdf?pspll=1)
9. [http://kodu.ut.ee/~kalevipo/AE\\_loeng11.pdf](http://kodu.ut.ee/~kalevipo/AE_loeng11.pdf)
10. <http://users.ece.gatech.edu/mleach/ece4445/downloads/zobel.pdf>
11. <http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/How-to-Keep-a-Power-Transistor-Cool-Using-a-Heat-Sink/>
12. [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/1N4148\\_1N4448.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/1N4148_1N4448.pdf)
13. [http://www.mouser.com/ds/2/303/sink\\_m-180248.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/303/sink_m-180248.pdf)