

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Priit Kukumägi

VÕIMSUSVÕIMENDI

Bakalaureusetöö

Juhendaja: dotsent Mihhail Pikkov

Tallinn 2015

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 arvametele jmt viidatud.

Kuupäev:

Autor: Priit Kukumägi

.....

/allkiri/

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema: Võimsusvõimendi

Teema päritolu: Isiklik huvi

Lõputöö eesmärgid: Väljundvõimsusega $P_n=50$ W võimsusvõimendi projekteerimine.

Lähteandmed: Võimsusvõimendi $V_{in\ m}=1$ V siinus sisendsignaali võimendamine väljundvõimsuseks $P_n=50$ W, $4\ \Omega$ takistusega kõlarile. Kasutades toiteks $+E=+32$ V ja $-E=-32$ V, stabiliseeritud ja ülekoormuskaitsega alalispinge toiteallikat.

Lahendatavad küsimused: Transistoride voolude ja võimsuste arvutamine. Jahutuseks vajalike radiaatorite arvutamine. Vajalike skeemi elementide (takistite, kondensaatorite) väärtuste arvutamine.

Kuupäev:

Üliõpilane:

/allkiri/

Juhendaja:

/allkiri/

Kinnitaja:

/allkiri/

ANNOTATSIOON

Töö eesmärk on projekteerida $P_n=50$ W väljundvõimsusega transistorvõimsusvõimendi helisagedus piirkonnas. Võimsusvõimendi toiteks on stabiliseeritud ja ülekoormuskaitsega toiteallikas.

Töö käigus kontrollitakse võimsusvõimendi vajalikku toitepinget, valitakse võimsusvõimendile vajalikud transistorid, diodid ja takistused. Põhjendatakse ära elektroonikakomponentide töö ja vajalikkus. Arvutatakse võimsusvõimendile vajaliku jahutusradiaatori soojustakistus.

Töö tulemuseks valmis $P_n=50$ W väljundvõimsusega helisageduslik võimsusvõimendi.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 35 leheküljel, 6 peatükki, 18 joonist ja 1 tabelit.

ABSTRACT

The goal of this thesis is to design audio frequency power amplifier with output power of $P_n=50$ W. Power supply for the power amplifier is stabilized and with overload protection.

In this thesis we checked the necessary voltage of the power supply and chose suitable electronical components. We explained how the electronical components act and why they are needed. There is calculated the necessary thermal resistance of the heatsink.

The result of this work is a audio frequency power amplifier with output power of $P_n=50$ W.

The thesis is in Estonian and contains 35 pages of text, 6 chapters, 18 figures and 1 table.

SISUKORD

1. Võimsusvõimendi.....	8
2. Võimsusvõimendi väljundastme arvutus.....	10
2.1 Liittransistoride vooluvõimendus.....	12
2.1.1 Vooluvõimenditena töötavad transistorid T14 ja T15.....	12
2.1.2 Vooluvõimenditena töötavad transistorid T12 ja T13.....	14
2.1.3 Vooluvõimenditena töötavad transistorid T10 ja T11.....	16
3 Pingevõimendus.....	18
3.1 Vooluallikadena töötavad transistorid T5 ja T6.....	18
3.2 Diferentsiaalvõimendi pingevõimendus.....	20
3.3 Pingevõimendi.....	22
4. Ribafilter.....	24
4.1 Kõrgpääsfilter.....	24
4.2 Madalpääsfilter.....	25
4.3 Sageduskarakteristik.....	25
5. Jahutusradiaator.....	27
6 Trükkplaadi väljatöötamine.....	29
6.1 Trükkplaadi disain.....	29
6.2 Komponendid.....	31
KOKKUVÕTE.....	34
KIRJANDUS.....	35

SISSEJUHATUS

Elektroonilise signaali võimendamiseks kasutatakse võimsusvõimendeid. Võimsusvõimenditega puutuvad kokku kõik, kuid enamus ei tea kuidas võimendamine toimub. Selles töös uuritakse helisageduslikku võimsusvõimendit ja selgitatakse, kuidas elektroonikakomponendid signaali võimendavad.

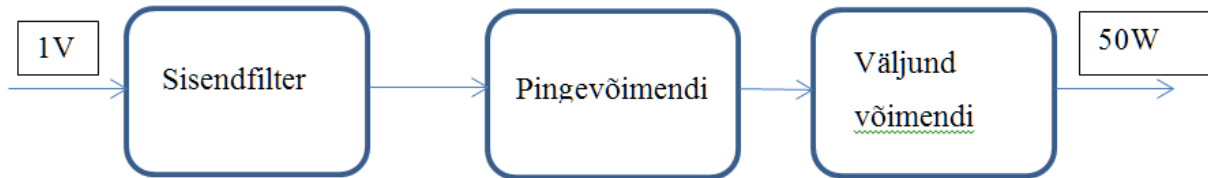
Võimsusvõimendi suurendab signaali allika signaali võimsust. See saavutatakse toiteallikast võetava energia juhtimisega väljundisse, matkides sisendsignaali kuju, aga suurendades amplituudi. Helivõimendid jagunevad reeglina eelvõimendiks, millega võimendatakse pinget ja lõppvõimendiks ehk võimsusvõimendiks, millega võimendatakse võimsust. Elektroonikas kasutatakse kahte põhilist tüüpi võimendeid: transistorvõimendid ja lampvõimendid. Lampvõimendi võimendavad komponendid on elektronlambid, mistõttu on lampvõimendid tavaliselt suuremad ja kasutavad rohkem energiat. Lampvõimendeid eelistatakse parema kõla pärast. Transistorvõimendi puhul on võimendavateks komponentideks transistorid, mistõttu transistorvõimendid on üldjuhul väiksemad ja ökonoomsemad.

Võimendit iseloomustavad põhilised parameetrid on sisendpinge, sagedusala ja väljundvõimsus. Võimsusvõimendi väljundvõimsus on suurim võimsus, mida võimendi annab nimikoormustakistusele, harilikult 4 või 8 Ω . Helivõimendite puhul jaguneb väljundvõimsus nimivõimsuseks ja muusikavõimsuseks. Nimivõimsus on ruutkeskmise võimsus, mille juures on antud mittelineaarMoonutuse nimiväärtus. Muusikavõimsus on maksimaalne võimsus, mida võimsusvõimendi suudab taluda vaid lühiajaliselt.

Töö eesmärk on projekteerida transistorvõimsusvõimendi ja omandada elektroonikaalaseid kogemusi. Selgitada signaali võimendamise juurde kuuluvaid protsesse ja määrata elektroonikakomponentide väärtused.

1. Võimsusvõimendi

Võimsusvõimendi struktuurskeem on toodud joonisel 1.1:

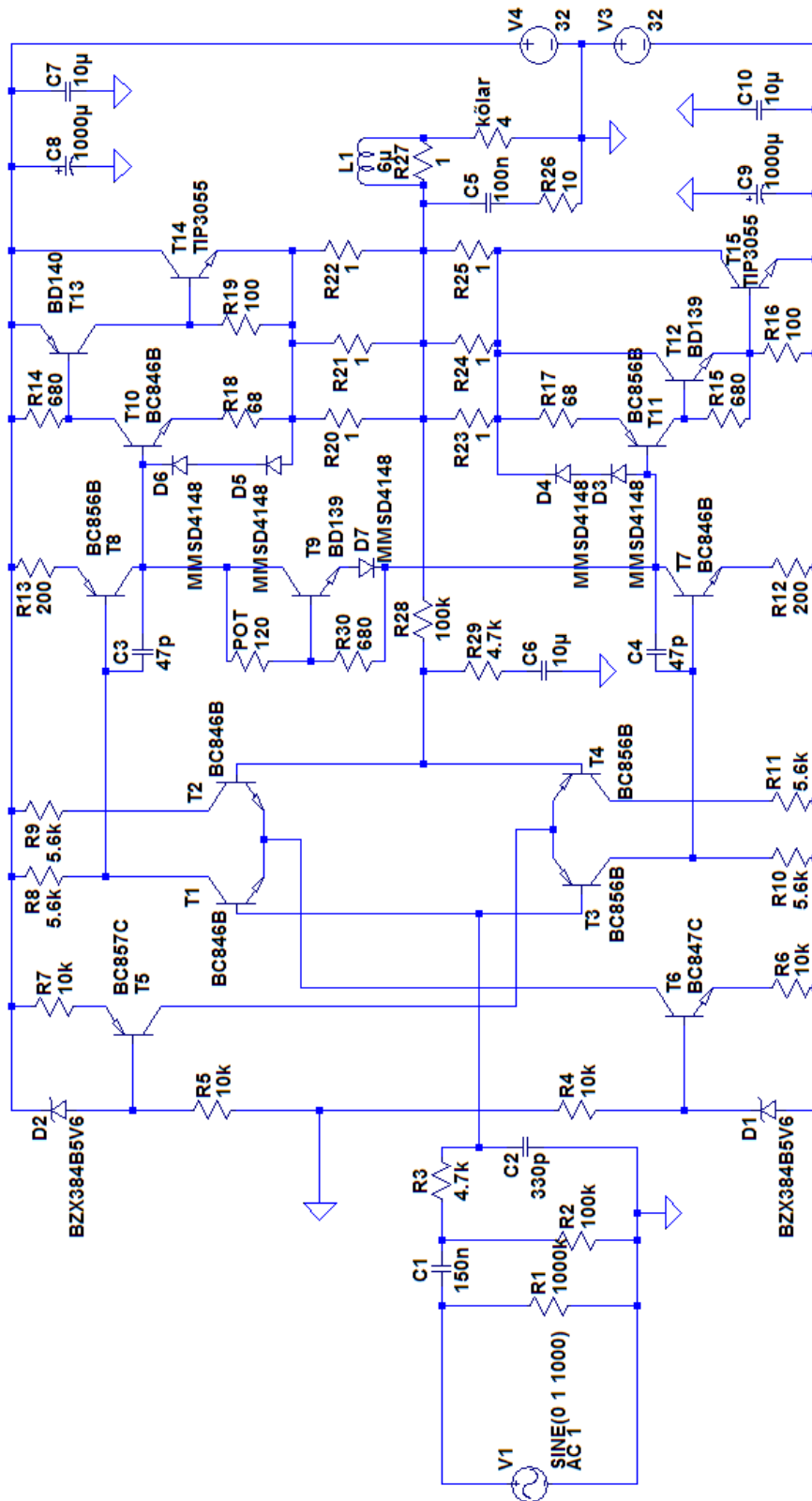


Joonis 1.1 Võimsusvõimendi struktuurskeem

Võimsusvõimendi elektriskeemilt on toodud joonisel 1.2. Võimsusvõimendi elektriskeemi sisendpinge $V_{in,m}=1$ V läbib pääsufiltri, kus tõkestatakse sagedused alla 10 Hz ja üle 100 kHz. Pääsufiltrist liigub signal suure sisendtakistusega topelt-diferentsvõimendi vasakpoolsesse sisendisse. Diferentsvõimendi teise sisendisse saabub väljundist pingejaguri kaudu vastuside signaal, mis vähendab moonutusi ning muudab sisendsignaali puudumisel väljundsignaali nulliks. Pingejaguri takistuste suhe määrab pingevõimenduse.

Transistoride T1, T3 kollektoriahelasse ühendatud transistorid T7, T8 võimendavad signaali liittransistoride tüürimiseks vajaliku tasemini. Transistor T9 loob liittransistoridele vajaliku eelpinge, nii et nad on pidevalt aktiivses tööolekus.

Endaergutuse mahasurumiseks on ühendatud koormusega rööbiti R26 ja C5. See ahel tagab võimendi stabiilsuse ka kõlari lahtiühendamisel. Pool L1 ja R27 suurendavad võimendi stabiilsust mahtuvusliku iseloomuga koormuse korral. Analoogsetel võimenditel on mittelineaarsete moonutuste tegur 0,05%.



Joonis 1.2 Võimsusvõimendi elektriskeem

2. Võimsusvõimendi väljundastme arvutus

Võimsusvõimendi väljundisse soovime me saada siinussignaali nimivõimsust $P_n=50$ W. Selleks arvutame väljundpinge amplituudväärtuse kasutades valemit [1]:

$$U_m = \sqrt{2P_n R} \quad (2.1)$$

Kus:

U_m on väljundpinge amplituudväärtus.

P_n on nimivõimsus.

R on kõlari takistus.

Kõlari takistuseks on meil $R=4 \Omega$. Seega saame, et väljundpinge amplituudväärtus $U_m=20$ V. Võimendi ühe õla vajalik toitepinge peab ületama väljundpinge amplituudi, liittransistori baas-emitter pinget (ligikaudu 1 V siirde kohta) ja pingelang emittertakistil võrra. Pingelang emittertakistil, valitakse kuni $0,1U_n$ [1].

$$U_n = \sqrt{P_n R} \quad (2.2)$$

Kus:

U_n on väljundpinge efektiivväärtus.

P_n on nimivõimsus.

R on kõlari takistus.

Siit saame, et väljundpinge efektiivväärtus $U_n=14,14$ V ja pingelang emittertakistil $U_{Re}=1,4$ V.

Ning ligikaudne vajalik toitepinge on

$$E = 20 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1,4 = 24,4 \text{ V}$$

Seega $+E=+32$ V ja $-E=-32$ V toiteallikas on piisav.

Järgnevalt saame välja arvutada väljundtransistori nimivõimsusel läbiva vahelduvvoolu amplituudiväärtuse valemist [1]:

$$I_{cm} = \sqrt{\frac{2P_n}{R}} \quad (2.3)$$

Kus:

I_{cm} on voolu amplituudi väärtus.

P_n on nimivõimsus.

R on kõlari takistus.

Siit saame, et $I_{cm}=5$ A. Transistori kollektoripinge maksimaalse väärtuse saame valemist [1]:

$$U_{ce}=E+U_m \quad (2.4)$$

Kus:

E on toiteallika ühe õla pinge.

U_m on väljundpinge amplituudiväärtus.

Siit saame

$$U_{ce}=32V+20V=52 V$$

Kollektoripingest U_{ce} ja kollektorivoolu amplituudi väärtusest I_{cm} , tulenevalt valime ka väljundtransistori.

Teades pingelangu emittertakistil $U_{Re}=1,4$ V ja väljundvoolu $I=5$ A. Saame arvutada emittertakisti takistuse

$$R_E=1,4V/5A=0,28 \Omega$$

ja ligikaudse võimsuse

$$P=0,5*1,4V*5A=3,5 W$$

Nii väikese takistusega ja suure võimsusega takisteid ei ole, seega kasutame kolme paralleelset 1Ω $3 W$ takistit.

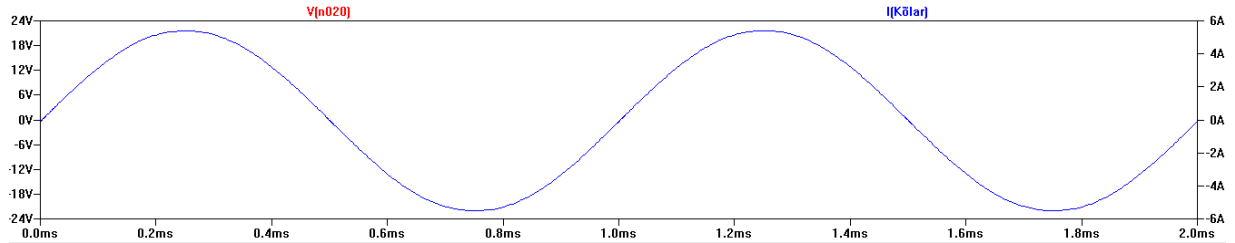
$$1/R_E=(1/1)+(1/1)+(1/1)=3/1 \Rightarrow R_E= 0,333 \Omega$$

Seega R_{20} kuni $R_{25}=1 \Omega$.

Emitterjärgurina toimival väljundastmel on kalduvus hakata genereerima väljundtransistoride ülemise piirsageduse lähedal. Endaergutuse mahasurumiseks ühendatakse rööbiti koormusega

RC-ahel. Antud juhul $R_{26}=10\ \Omega$ ja $C_5=100\ \text{nF}$, $L_1=6\ \mu\text{H}$ ja $R_{27}=1\ \Omega$ parandavad võimendi stabiilsust.

Graafikult (Joonis 2.1) on näha, et väljundpinge ja väljundvool on lähedased arvutuslikele.



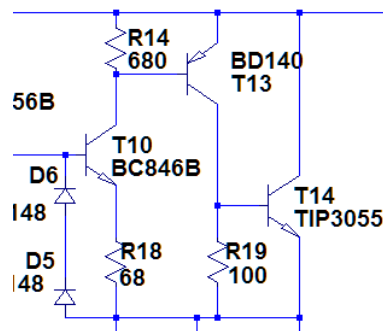
Joonis 2.1 Väljundpinge ja väljundvoolu graafik

2.1 Liittransistoride vooluvõimendus

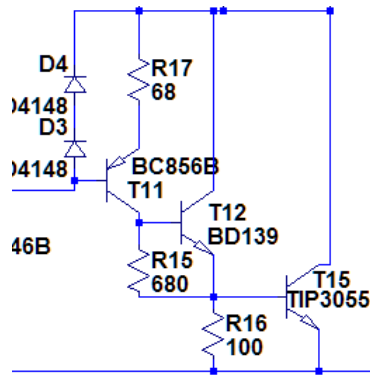
Väljundvõimsuse suurendamiseks kasutatakse liittransistore. Liittransistorideks nimetatakse kahte või kolme niiviisi ühendatud bipolaartransistori, et lülitusi saab käsitleda ühe transistorina. Sellekohast kolme väljastusega transistorikombinatsiooni tuntakse ka Darlingtoni või Sziklai lülitusena. Liittransistori võib koostada juhtivustüübilt ühesugustest, NPN või PNP, või erisugustest, NPN ja PNP, transistoridest. Viimaseid nimetatakse täiend- ehk komplementaartransistorideks. [1]

2.1.1 Vooluvõimenditena töötavad transistorid T14 ja T15

Transistorid T14 (Joonis 2.2) ja T15 (Joonis 2.3) on TIP3055 transistorid. Mõlemad transistorid on NPN juhtivusega. Maksimaalne kollektori vool $I_C=15\ \text{A}$, maksimaalne kollektor-emitter pinge on $V_{CER}=70\ \text{V}$ ja vooluülekangetegur h_{fe} on 15 kuni 120. [2]



Joonis 2.2 Vooluvõimendi elektriskeem



Joonis 2.3 Vooluvõimendi elektriskeem

Valime väljundtransistori jõudevooluks [1]

$$I_q = 0,01 I_c = 0,01 * 5A = 0,05 A$$

Siis hajub sellel transistoril jõuderežiimis võimsus [1]

$$P_q = I_q * E = 0,05A * 32V = 1,6 W$$

Nimiväljundvõimsusel hajuva võimsuse saame valemiga [1]:

$$P_C = [E^2 / (\pi^2 * R_k)] + P_q \quad (2.5)$$

Kus:

P_C on transistoril hajuv võimsus.

P_q on jõuderežiimis hajuv võimsus.

R_k on nimikoormustakistus.

Nimiväljundvõimsusel hajuv võimsus

$$P_C = [32^2 / (\pi^2 * 4)] + 1,6 \approx 27,5 W$$

Takistid R16 ja R19 ühtlustavad T13 ja T14 väljundtakistusi ning T14 ja T15 sisendtakistusi, suurendades õlgade sümmeetriat. Takisteid R16 ja R19 läbiv vool valitakse vahemikus 3 kuni 10 mA [1]. Valime takistit R16 läbivaks vooluks $I_{R16} = 6 \text{ mA}$ ja baasipingeiks $U_{BE(T15)} = 0,6 \text{ V}$. Kasutades Ohmi seadust, saame $R16 = 0,6V / 0,006A = 100\Omega$. Seega ka $R19 = 100\Omega$.

Teades transistori vooluülekangetegurit, saame välja arvutada baasivoolu. Arvutamiseks kasutan valemit [3]:

$$h_{fe} = I_c / I_b \quad (2.6)$$

Kus:

h_{fe} on vooluülekanalitegur

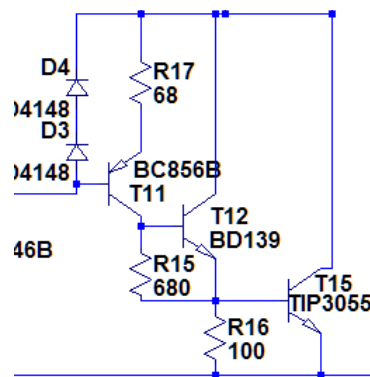
I_c on kollektori vool

I_b on baasi vool

Avaldades baasivoolu I_b valemist (2.6) saan $I_b = I_c / h_{fe}$. Kasutades TIP3055 andmelehel [2] saadud vooluülekanalitegurit saan, et $I_b = 5A/30 = 0,167$ A. Seega baasivool peaks olema ligikaudu 0,167 A selleks, et saada kollektori vooluks 5 A.

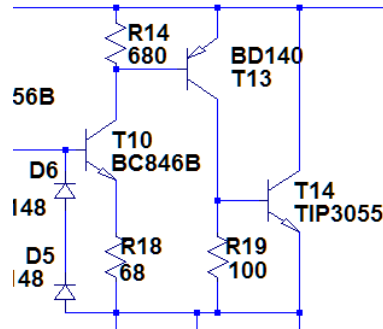
2.1.2 Vooluvõimenditena töötavad transistorid T12 ja T13

Transistor T12 (Joonis 2.4) on NPN juhtivusega BD139. Maksimaalne kollektoripinge $U_{CE} = 80V$, maksimaalne kollektorivool $I_c = 1,5$ A ja vooluülekanalitegur h_{fe} on 25 kuni 250.[4]



Joonis 2.4 Vooluvõimendi elektriskeem

Transistor T13 (Joonis 2.5) on PNP juhtivusega BD140. Maksimaalne kollektoripinge $U_{CE} = -80V$, maksimaalne kollektorivool $I_c = -1,5$ A ja vooluülekanalitegur h_{fe} on 25 kuni 250.[5]



Joonis 2.5 Vooluvõimendi elektriskeem

Kollektortakistid R14 (Joonis 2.4) ja R15 annavad lisatoidet transistoridele T12 ja T13, et liittransistorid töötaks normaalselt ka minimaalse sisendvoolu korral ja kõrgel ümbrustemperatuuril. Valime lisatoiteks $I=1 \text{ mA}$. Teame, et pingelang takistil on võrdne järgmise transistori baas-emitter pingega, seega $U(R14)=U(R15)=U_{BE(T13)}=0,6 \text{ V}$. Saame välja arvutada takisti takistuse

$$R14=U/I=0,6\text{V}/1\text{mA}=600 \Omega$$

Takistuseks valime natuke suurema standartse väärtuse $R14=R15=680 \Omega$.

Transistorid T12 ja T13 võimendavad signaali transistoride T14 ja T15 jaoks. Teame, et transistori T14 ja T15 baasivoolud peavad olema ligikaudu 167 mA ning takisti R19 vool on $I_{R19}=6 \text{ mA}$. Transistori T13 kollektorivool on

$$I_c=I_{b(T14)}+I_{R19}=167\text{mA}+6\text{mA}=173 \text{ mA}$$

Peaaegu sama vool on ka T12 kollektoril. 173 mA kollektorivoolu juures BD140 vooluülekanalitegur $h_{fe}=90$ ja BD139 jaoks $h_{fe}=90$. Saame välja arvutada T12 ja T13 ligikaudse baasivoolu kasutades valemit (2.6). Seega BD140 ja BD139 baasivoolud peavad olema ligikaudu

$$I_b=173\text{mA}/90=1,92 \text{ mA}$$

Transistori T13 jõudevool koosneb takistit R19 läbivast voolust $I_{R19}=6\text{mA}$ ja transistorisse T14 hargnevast voolust

$$I_{b(T14)}=I_{q(T14)}/h_{fe(T14)}=150\text{mA}/30=5 \text{ mA}$$

Seega same jõudevooluks

$$I_{q(T13)}=5\text{mA}+6\text{mA}=11\text{ mA}$$

Sama jõudevool läbib transistori T12. Transistoril T13 hajuva võimsuse saame valemiga [1]:

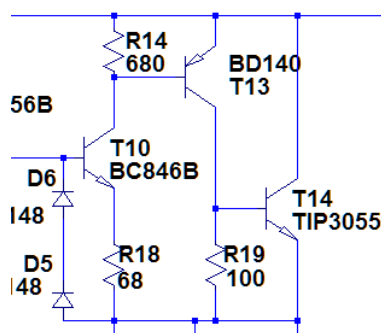
$$P_{C(T13)}=(P_{C(T14)}/h_{fe(T14)})+I_{R19}\cdot E \quad (2.7)$$

$$\text{Seega } P_{C(T13)}=(27,5/30)+0,006\cdot 32\approx 1,1\text{ W}$$

Sama võimsus hajub ka transistoril T12.

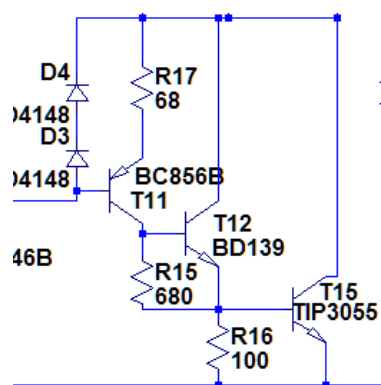
2.1.3 Vooluvõimenditena töötavad transistorid T10 ja T11

Transistor T10 (Joonis 2.6) on NPN juhtivusega BC846B. Maksimaalne kollektoripinge $U_{CE}=65\text{V}$, maksimaalne kollektorivool $I_C=100\text{ mA}$ ja vooluülekangetegur h_{fe} on 200 kuni 450.[11]



Joonis 2.6 Vooluvõimendi elektriskeem

Transistor T11 (Joonis 2.7) on PNP juhtivusega BC856B. Maksimaalne kollektoripinge $U_{CE}=-65\text{V}$, maksimaalne kollektorivool $I_C=-100\text{ mA}$ ja vooluülekangetegur h_{fe} on 220 kuni 475.[12]



Joonis 2.7 Vooluvõimendi elektriskeem

Transistorid T10 ja T11 võimendavad signaali transistoride T12 ja T13 jaoks. T10 ja T11 kollektorivool

$$I_c = I_{b(T13/T14)} + I_{RC} = 1,92\text{mA} + 1\text{mA} = 2,92\text{ mA}$$

Antud I_c juures BC856B vooluülekangetegur $h_{fe} = 300$ ja BC846B jaoks $h_{fe} = 320$. Saame välja arvutada T10 ja T11 ligikaudse baasivoolu kasutades valemit (2.6). Seega transistori T11 baasivool peab olema ligikaudu

$$I_b = 2,92\text{mA} / 300 = 0,00973\text{ mA} = 9,73\text{ }\mu\text{A}$$

Ja transistori T12 baasivool

$$I_b = 2,92\text{mA} / 320 = 0,00913\text{mA} = 9,13\text{ }\mu\text{A}.$$

Emittertakistid R17 ja R18 valitakse

$$R_{17} = 0,1 R_{15} = 0,1 \cdot 680\Omega = 68\text{ }\Omega$$

Analoogselt $R_{18} = 68\text{ }\Omega$.

Transistori T10 jõudevool koosneb takistit R14 läbivast voolust $I_{R14} = 1\text{mA}$ ja transistorisse T13 hargnevast voolust

$$I_{B(T13)} = I_{q(T13)} / h_{fe(T13)} = 11\text{mA} / 90 \approx 0,12\text{ mA}$$

Saame transistori T10 jõudevooluks

$$I_{q(T10)} = 0,12\text{mA} + 1\text{mA} = 1,12\text{ mA}$$

Sama jõudevool läbib transistori T11. Transistoril T10 hajuva võimsuse saame valemiga (2.7)

$$P_{C(T10)} = (1,1/90) + 0,001 \cdot 32 \approx 0,044\text{ W}$$

Peaaegu sama võimsus hajub ka transistoril T11.

Dioidid D3...D6 on liigkoormuskaitseks väljundi lühise korral. Väljundi lühise korral lakkab toimimast pingevastuside, mille tagajärjel võimendus kasvab mitmekümnekordseks. [1]

3 Pingevoimendus

Diferentsiaallülituses sisendastmes võimendatakse pinget. Pingevoimendi koosneb diferentsiaalvoimendist, vooluallikast ja tüüraastmest.

3.1 Vooluallikatena töötavad transistorid T5 ja T6

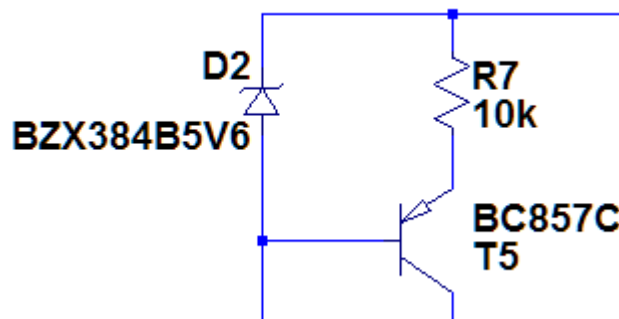
Et diferentsiaalvoimendi reageeriks üksnes sisendpingete vahele, mitte aga baasipingete absoluutväärtustele, peab transistoride kollektorivoolude summa olema võimalikult püsiv. Selleks kasutatakse püsivooluallikat.

Transistor T5 on PNP juhtivusega BC857C. Maksimaalne kollektorivool $I_C = -100$ mA, maksimaalne kollektor-emitter pingeline on $V_{CE} = -45$ V [6].

Transistor T6 on NPN juhtivusega BC847C. Maksimaalne kollektorivool $I_C = 100$ mA, maksimaalne kollektor-emitter pingeline on $V_{CE} = 45$ V [7].

Zener diodid D1 ja D2 on BZX384B5V6. Maksimaalne päriivool $I_F = 250$ mA, tööpinge $V = 5,6$ V.[8]

Transistorid T5 ja T6 töötavad vooluallikatena (Joonis 3.1). Nende väljundvooluks valime $I_C = 0,5$ mA. Nende taga asuvad Zener diodid tekitavad baasile pingelangu, et transistor saaks aktiivrežiimis tööle lülituda. Takistid R4 ja R5 määravad voolu Zener diodidel.[1]



Joonis 3.1 Vooluallika elektriskeem

Voolu tekitamiseks R7 ja R6 väärtuse leidmine [1]:

$$R_E = U_{E0}/I_{C0} \quad (3.1)$$

Kus:

R_E on emittertakistus.

U_{E0} on emitteri pinge maa suhtes.

I_{C0} on kollektori vool.

Kollektorivoou valisime $I_C = 0.5 \text{ mA}$. Ja emitteri pinge maa suhtes on pingelang emittertakistil. Saame arvutada emittertakisti väärtuse valemiga: [1]

$$R_7 = (U_{B0} - U_{BE})/I_C \quad (3.2)$$

Kus:

U_{B0} on pingelang zener dioodil.

U_{BE} on baas emitter pinge.

I_C on kollektori vool.

Saan, et $R_7 = (5,6\text{V} - 0,6\text{V})/0,5\text{mA} = 10 \text{ k}\Omega$. Seega $R_7 = R_6 = 10 \text{ k}\Omega$.

Transistori kollektoripinge ulatub väärtuseni

$$U_{CE} = E - U_{(RE)} = 32\text{V} - 5\text{V} = 27 \text{ V}$$

Ja transistoril hajuv võimsus

$$P = 27\text{V} \cdot 0,5\text{mA} = 0,0135 \text{ W}.$$

Teades, et dioodi maksimaalne päri vool $I_F = 250 \text{ mA}$ ja takistite R4 ja R5 maksimaalne pingelang

$$V(R) = E - V(D) = 32\text{V} - 5,6\text{V} = 26,4 \text{ V}$$

Kasutades Ohmi seadust saame arvutada

$$R_4 = R_5 = 32\text{V}/250\text{mA} = 128 \Omega$$

Seega minimaalne takistus peab olema 128 Ω . Selleks, et temperatuuristabiilsus oleks parem ja takistitel R4 ja R5 hajuv võimsus oleks väiksem valitakse need takistid suuremad, näiteks standardsete toodetavate takistite seast R4=R5=10 k Ω . Sellisel juhul diodi läbiv vool

$$I_{D2}=V(R5)/R5=26,4V/10k\Omega=2,64 \text{ mA}$$

Ja diodidel D1 ja D2 hajuv võimsus

$$P=5.6V \cdot 2,64mA=14,8 \text{ mW}$$

3.2 Diferentsiaalvõimendi pingevõimendus

Diferentsastmes kasutatakse vähemalt 2 transistori. Sellises lülituses on väljundpingeks transistoride kollektoripingete vahe, mis on võrdeline sisenditesse rakendatud pingete vahe- ehk diferentspingega. Kahte diferentsiaalvõimendit kasutatakse selleks, et pingevõimendustegur püsiks kindlalt etteantud väärtusel.

Diferentsiaalvõimendi esimesse sisendisse tuleb filtreeritud signaal ja teise sisendisse pingejaguri R28, R29 ja C6 kaudu positiivne tagasiside. Tagasiside parandab võimendi sagedusmoonutustegurit. Tagasisidestatud võimendi töötab stabiilselt, sest tagasiside vähendab ja püsistab võimendust. Pingevõimendust reguleeritakse pingejaguriga ja pingevõimendustegur saadakse valemiga [1]:

$$K_n=R_{28}/(R_{29}+X_C) \quad (3.3)$$

K_n on pingevõimendustegur.

X_C on kondensaatori reaktiivtakistus.

Pingevõimenduse minimaalse väärtuse saame valemist [1]:

$$K_n=(U_m+1)/U_s \quad (3.4)$$

U_m on väljundpinge amplituudi väärtus.

U_s on sisendpinge amplituudi väärtus.

Siit saame, et pingevõimendus peab olema vähemalt

$$K_n=(20V+1)/1V=21$$

Diferentsiaalvõimendi kummagi öla teoreetilise pingevõimendusteguri saame valemiga [9]:

$$K_v = 20R_K I_{K0} \quad (3.5)$$

K_v on pingevõimendustegur.

R_K on kollektortakistus.

I_{K0} on kollektori vool.

Valime kollektori takistuseks $R_K = 5600 \Omega$. Sellisel juhul maksimaalne pingevõimendustegur

$$K_v = 20 \cdot 5600 \Omega \cdot 0,00025 A = 28$$

Saadud pingevõimendustegur on meie võimendi jaoks piisav, seega takistid $R_8 \dots R_{11} = 5600 \Omega$.

Valime $R_{28} = 100 \text{ k}\Omega$ ja kondensaatori mahtuvuse jätame hetkel arvestamata, kuna kõrgetel sagedustel on reaktiivtakistus $X_C \approx 0$. Siis saame valemi (3.3) järgi

$$R_{29} = 100 \text{ k}\Omega / 21 = 4,76 \text{ k}\Omega$$

Valime takistuseks standartse väärtuse $R_{29} = 4,7 \text{ k}\Omega$. Kondensaatori mahtuvus peab olema piisavalt suur, et 20 Hz sageduse juures oleks pingevõimenduse kadu võimalikult väikene.

Valime kondensaatori mahtuvuseks $C_6 = 10 \mu\text{F}$. Kasutades valemit [1]

$$X_C = 1 / (2 \cdot \pi \cdot F \cdot C) \quad (3.5)$$

Kus:

X_C on kondensaatori reaktiivtakistus.

F on sagedus.

C on kondensaatori mahtuvus.

Saame arvutada reaktiivtakistuse sagedusel 20 Hz

$$X_{C(20\text{Hz})} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 20 \text{ Hz} \cdot 10 \mu\text{F}) = 796 \Omega$$

Sellisel juhul saame pingevõimendusteguriks

$$K_{n(20\text{Hz})} = 100 \text{ k}\Omega / (4700 \Omega + 796 \Omega) = 18,2$$

Seega pingevõimendustegur on 20 Hz sageduse korral

$$\Delta K_n = 21 - 18,2 = 2,8$$

võrra väiksem, mis ei ole väga suur kadu.

Transistoride T1...T4 kollektoripinge võib ulatuda väärtuseni $U_{CE}=E=32V$. Transistori läbiv vool on pool vooluallika voolust $I_C=0,5 \cdot 0,5mA=0,25mA$ ja hajuv võimsus $P=32V \cdot 0,25mA=0,008 W$

Transistorideks valime T1,T2- BC846B ja T3,T4- BC856B.

3.3 Pingevõimendi

Diferentsastmest läheb signaal tüürastme transistoride T7 ja T8 baasile. Vool, mis läbib emittertakisteid peab olema piisav, et hoida avatuna stabiliseerimislülituses transistori T9 ja suurem, kui T10, T11 baasivool. Valime $I_{C(T7)}=4 mA$. Saame arvutada [1]

$$R_{12}=(U_{R10}-U_{BE})/ I_{C(T7)}$$

Teame, et

$$I_{R10}=0,5I_{C(T5)}=0,5 \cdot 0,5mA=0,25 mA$$

ja

$$U_{R10}=I_{R10} \cdot R_{10}=0,25mA \cdot 5600\Omega=1,4 V$$

seega

$$R_{12}=(1,4V-0,6V)/4mA=200 \Omega$$

analoogselt $R_{13}=200 \Omega$.

Transistoride T7, T8 kollektoripinged võivad ulatuda väärtuseni

$$U_{CE}=E+U_m=32V+20V=52 V$$

Seega sobivad transistorid on BC846B ja BC856B. Nimiväljundvõimsusel hajub transistoridel võimsus

$$P =4mA \cdot 32V=0,128 W$$

Kondensaatorid C3,C4 hoiavad ära võimaliku endaergutuse kõrgetel sagedustel. Tavaliselt valitakse $C3=C4=47 pF$. [1]

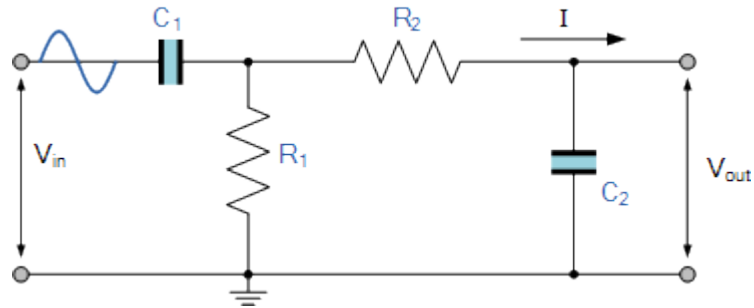
Võimendusastme stabiliseerimiseks ühendatakse T9 emitteriahelasse diood D7. Kui toitepinge väljundsignaali tugevnedes langeb, siis alaneb ka T9 baasipinge, kuid diodi mittelineaarsuse tõttu jääb emitterpinge püsivaks. [1]

Temperatuuristabiliseerimise tõhustamiseks peab transistor T9 olema soojuslikus kontaktis väljundtransistoride radiaatoriga.

Seadetakistiga POT saab reguleerida väljundtransistoride jõudevoolu. Parema reguleerimistäpsuse saamiseks kasutame takistit $R_{30}=470 \Omega$. Võimendi töölelülitamisel reguleerime jõudevoolu 40 kuni 70 mA.

4. Ribafilter

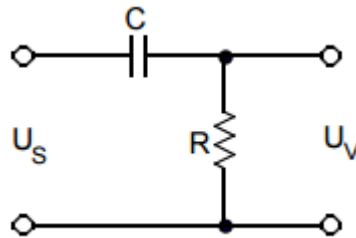
Ribafilter (Joonis 4.1) on filter millest pääsevad läbi ainult vajalikud sagedused. Lihtsaima ribafiltri saame kui ühendame järjestikku kõrgpääsfiltri ja madalpääsfiltri. [13]



Joonis 4.1 Ribafiltri elektriskeem

4.1 Kõrgpääsfilter

Kõrgpääsfilter (Joonis 4.2) moodustub kondensaatorist ja takistist. Selle põhiline ülesanne on madalsagedusliku signaali tõkestamine. [13]



Joonis 4.2 Kõrgpääsfiltri elektriskeem

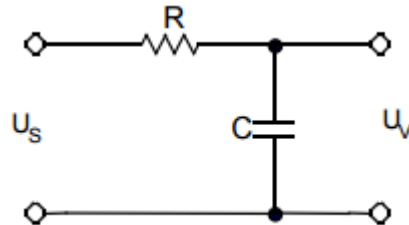
Sellise filtri pääsusagedus sõltub takistusest ja kondensaatori mahtuvusest. Pääsusageduse arvutamiseks kasutan valemit [1]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.1)$$

Kõrgpääsu sageduseks vajan 20 Hz, kuna see on madalaim inimese kõrvale kuuldav helisagedus. Ühtlase võimenduse huvides 20-20k Hz otsustasin pääsusageduse valida madalama. Takistuse ja mahtuvuse sobitamise teel otsustasin pääsusageduseks jätta 10 Hz. Vastavalt sain takistuseks $R = 100 \text{ k}\Omega$ ja mahtuvuseks $C = 150 \text{ nF}$

4.2 Madalpääsfilter

Madalpääsfilter (Joonis 4.3) moodustub samuti kondensaatorist ja takistist. Madalpääsfiltri ülesanne on kõrgete sageduste tõkestamine. [13]



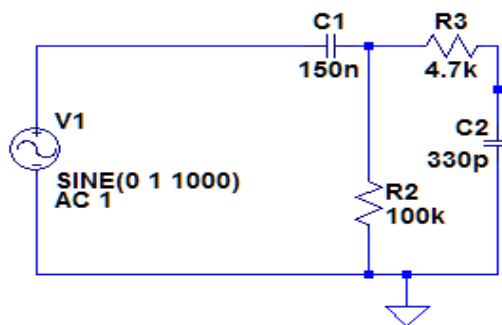
Joonis 4.3 Madalpääsfiltri elektriskeem

Madalpääsfiltri pääsusagedus sõltub samuti takistusest ja kondensaatori mahtuvusest. Pääsusageduse arvutamiseks kasutan valemit (4.1).

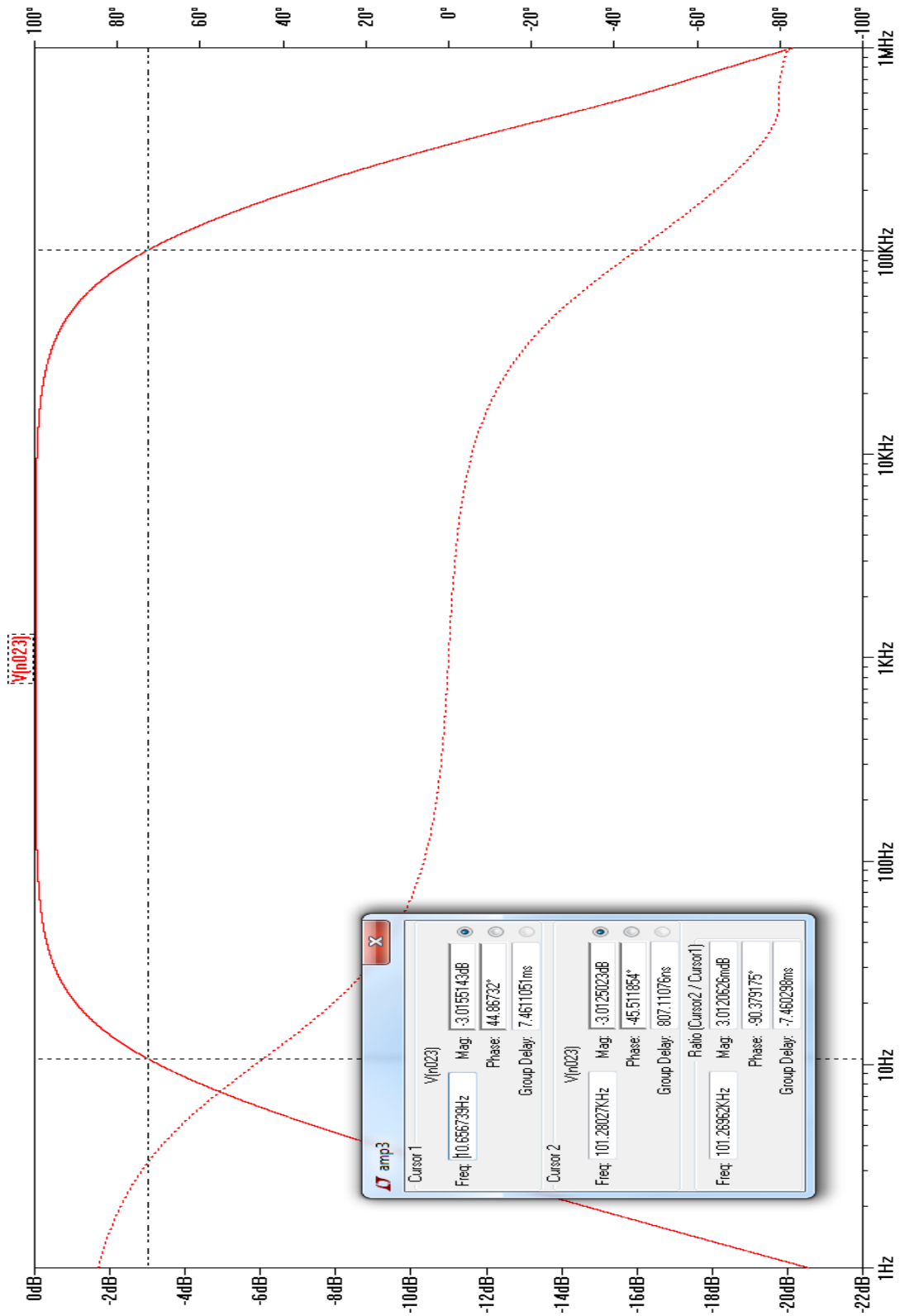
Madalpääsfiltri pääsusageduseks vajan 20 kHz kuna see on kõrgeim helisagedussagedus, mis on inimese kõrvale kuuldav. Sarnaselt kõrgpääsufiltrile otsustasin valida pääsusageduse kõrgema (100 kHz). Sobitamise tulemusena sain takistuseks $R = 4.7 \text{ k}\Omega$ ja mahtuvuseks $C = 330 \text{ pF}$.

4.3 Sageduskarakteristik

Simuleerisin saadud skeemi (Joonis 4.4) 1 Hz kuni 1 MHz. Sageduskarakteristikult (Joonis 4.5) on näha -3 Db mahalõikesagedused ja pääsusagedused jäävad 10 kuni 100 kHz vahele. Faasinihe -3 Db juures on 45° ja -45° .



Joonis 4.4 Ribafiltri elektriskeem



Joonis 4.5 Sageduskarakteristik

5. Jahutusradiaator

Radiaatori ülesanne on soodustada soojuste eemalejuhtimist seadise ja ümbritseva õhu vahelise soojustakistuse vähendamise teel. Radiaatori võib valmistada ise, kuni 5 W võimsuse hajutamiseks, või kasutada standardset toodetavat radiaatorit.

Esmasel ülevaatlusel vajavad jahutusradiaatorit transistorid T12, T13 ja T14, T15.

Valime õhutemperatuuriks $T_a=35\text{ }^\circ\text{C}$.

Transistoride T12, T13 $R_{th\ j-a}=100\text{ }^\circ\text{C/W}$ ja $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ [4][5]. Saame arvutada maksimaalse hajuva võimsuse transistoril ilma jahutusradiaatorita.

$$R_{th}=(T_j-T_a)/P_C \Rightarrow P_C=(T_j-T_a)/R_{th}=(150-35)/100= 1,15\text{ W}$$

Transistoridel T12, T13 hajuv võimsus $P_C=1,1$, mis on väiksem, kui maksimaalne hajuv võimsus. Seega nendele transistoridele jahutusradiaatorit vaja ei ole.

Transistoride T14, T15 $R_{th\ j-a}=35,7\text{ }^\circ\text{C/W}$, $R_{th\ j-c}=1,39\text{ }^\circ\text{C/W}$ ja $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$ [2]. Saame arvutada maksimaalse hajuva võimsuse transistoril ilma jahutusradiaatorita.

$$R_{th}=(T_j-T_a)/P_C \Rightarrow P_C=(T_j-T_a)/R_{th}=(150-35)/35,7= 3,22\text{ W}$$

Transistoridel T14 ja T15 hajuv võimsus on $P_C=27,5\text{ W}$, seega tuleb kasutada jahutusradiaatorit. Jahutusradiaatori valikuks kasutame valemit [1]:

$$R_{th\ r-a}=0,9[(T_j-T_a)/P_C -R_{th\ j-c}-R_{th\ c-r}] \quad (5.1)$$

Kus:

$R_{th\ r-a}$ on radiaatori soojustakistus.

T_j on pooljuhtseadise siirde lubatav temperatuur.

T_a on õhutemperatuur.

P_C on seadisel hajuv temperatuur.

$R_{th\ j-c}$ on seadise siirde ja kesta vaheline soojustakistus.

$R_{th\ c-r}$ on seadise kesta ja radiaatori vaheline soojuslik kontakttakistus.

Kuna kinnitame transistori radiaatorile isoleeritult siis $R_{th\ c-r}=1\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Saame radiaatori maksimaalseks soojustakistuseks

$$R_{th\ r-a}=0,9[(150-35)/27,5 - 1.39-1] \approx 1,61\text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

Kui kinnitada radiaatorile 2 sama võimsusega ja sama soojustakistusega transistori, siis peab jahutusradiaatori soojustakistus olema 2 korda väiksem seega $R_{th\ r-a}=0,5 \cdot 1,61=0,805\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Meile vajalik radiaatori soojustakistus peab olema kas väiksem või võrdne $R_{th\ r-a}=0,805\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ [1]. Sellisele soojustakistusele vastava jahutusradiaatori leidsin mõõtudega 180,0mm x 80,0mm.

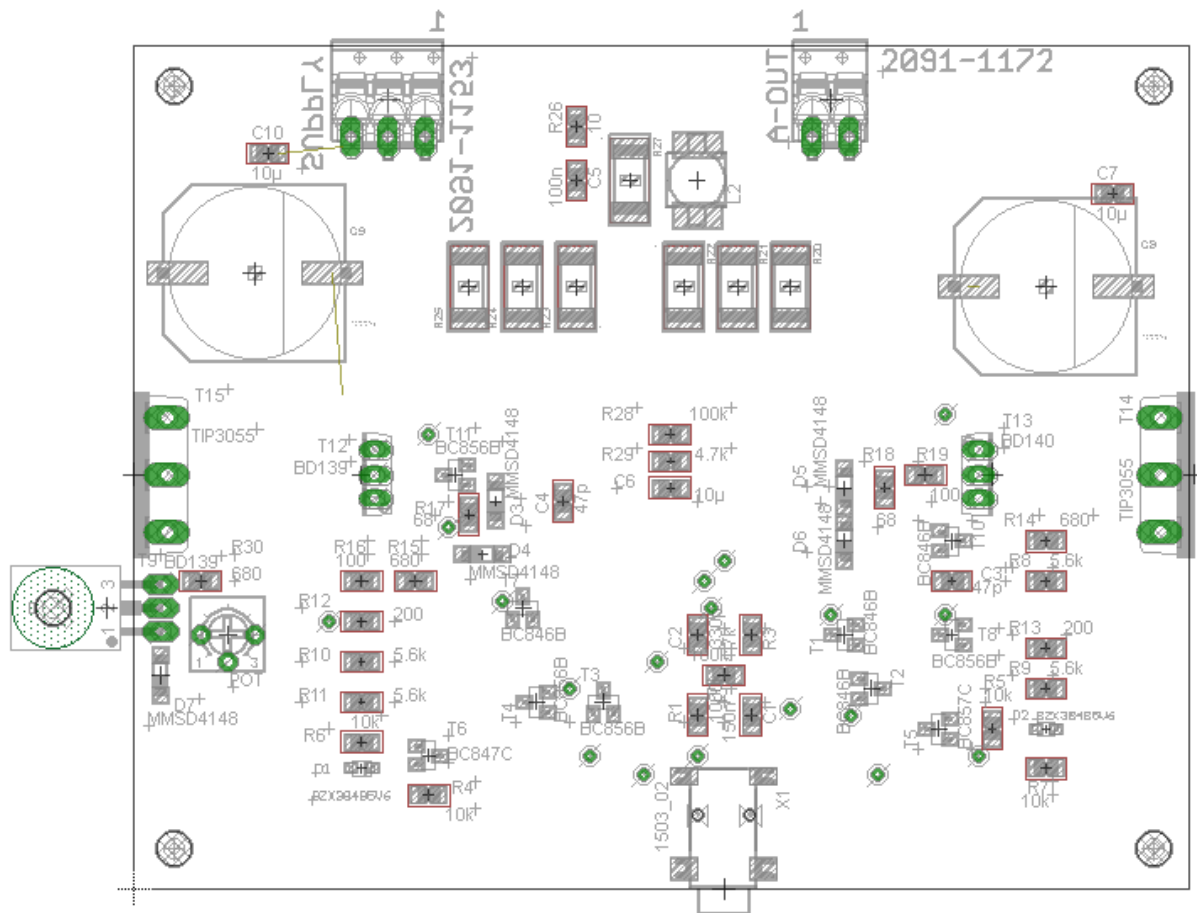
6 Trükkplaadi väljatootamine

Trükkplaadi mõõtmeteks valisin, jahutusradiatori mõõtmetest lähtudes, 100,0 mm x 80,0 mm, paksus 1,6 mm. Komponentideks kasutasin võimalikult palju pindlaotavaid komponente.

Trükkplaadi disainisn programmis *Eagle7.2.0*

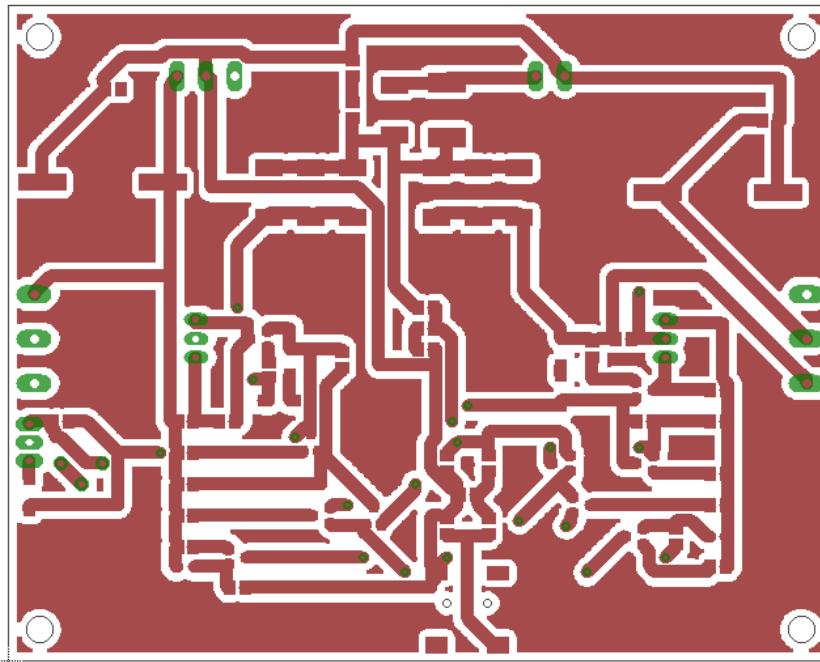
6.1 Trükkplaadi disain

Komponentide paigutus trükkplaadil (Joonis 6.1):



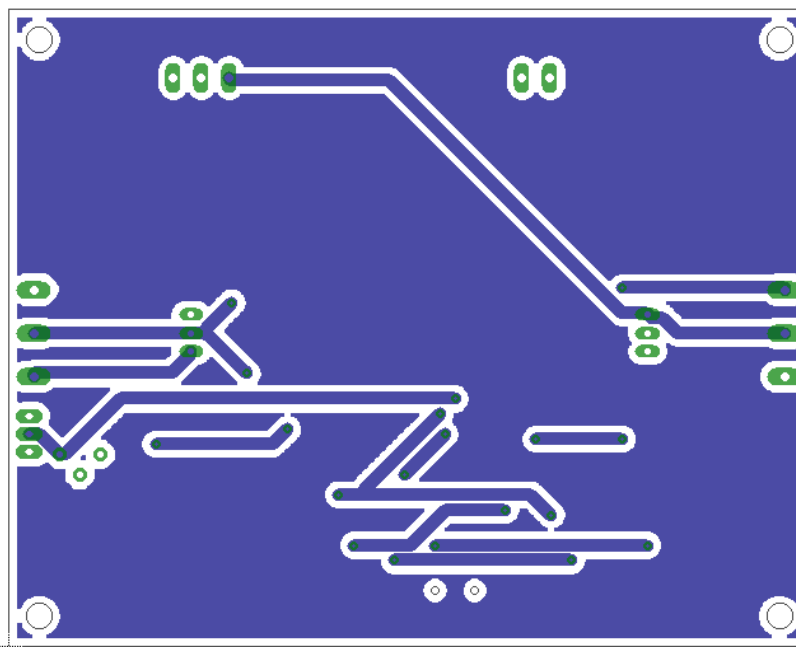
Joonis 6.1 Komponentide paigutus trükkplaadil

Trükkplaadi ülemine kiht (Joonis 6.2):



Joonis 6.2 Trükkplaadi ülemine kiht

Trükkplaadi alumine kiht (Joonis 6.3):



Joonis 6.3 trükkplaadi alumine kiht

6.2 Komponentid

Tabel (6.1) Trükkplaadi komponendid.

Komponent	Väärtus	Seade	Korpus	Tootja	Hind
A-OUT	2091-1152	WAGO3.5MM	P-2091-1152	WAGO	1,10
C1	150n	CAP	C0805	KEMET	0,129
C2	330p	CAP	C0805	KEMET	0,028
C3	47p	CAP	C0805	KEMET	0,017
C4	47p	CAP	C0805	KEMET	0,017
C5	100n	CAP	C0805	KEMET	0,032
C6	10u	CAP	C1210	TDK	0,8
C7	10u	CAP	C1210	TDK	0,8
C8	1000u	POLCAP	CSV-J	PANASONIC	2,02
C9	1000u	POLCAP	CSV-J	PANASONIC	2,02
C10	10u	CAP	C1210	TDK	0,8
D1	BZX384B5V6	ZENER	SOD123	NXP	0,039
D2	BZX384B5V6	ZENER	SOD123	NXP	0,039
D3	MMSD4148	DIODE	SOD123	ON SEMIC.	0,059
D4	MMSD4148	DIODE	SOD123	ON SEMIC.	0,059
D5	MMSD4148	DIODE	SOD123	ON SEMIC.	0,059
D6	MMSD4148	DIODE	SOD123	ON SEMIC.	0,059
D7	MMSD4148	DIODE	SOD123	ON SEMIC.	0,059
L1	MS85	INDUCTOR	MS85	BOURNS	1,35
POT	3362R	TRIMPOT	3362R	BOURNS	1,28
PSUPPLY	2091-1153	WAGO3.5MM	P-2091-1153	WAGO	1,25

R1	1000k	RES	R0805	KOA SPEAR	0,016
R2	100k	RES	R0805	KOA SPEAR	0,094
R3	4.7k	RES	R0805	PANASONIC	0,109
R4	10k	RES	R0805	BOURNS	0,05
R5	10K	RES	R0805	BOURNS	0,05
R6	10k	RES	R0805	BOURNS	0,05
R7	10k	RES	R0805	BOURNS	0,05
R8	5.6K	RES	R0805	MULRICOMP	0,051
R9	5.6K	RES	R0805	MULRICOMP	0,051
R10	5.6K	RES	R0805	MULRICOMP	0,051
R11	5.6K	RES	R0805	MULRICOMP	0,051
R12	200	RES	R0805	PANASONIC	0,134
R13	200	RES	R0805	PANASONIC	0,134
R14	680	RES	R0805	PANASONIC	0,109
R15	680	RES	R0805	PANASONIC	0,109
R16	100	RES	R0805	PANASONIC	0,129
R17	68	RES	R0805	KOA SPEAR	0,018
R18	68	RES	R0805	KOA SPEAR	0,018
R19	100	RES	R0805	PANASONIC	0,129
R20	1	R_2512	R2512	CGS	0,194
R21	1	R_2512	R2512	CGS	0,194
R22	1	R_2512	R2512	CGS	0,194
R23	1	R_2512	R2512	CGS	0,194
R24	1	R_2512	R2512	CGS	0,194

R25	1	R_2512	R2512	CGS	0,194
R26	10	R_2512	R2512	BOURNS	0,059
R27	1	R_2512	R2512	CGS	0,194
R28	100k	RES	R0805	KOA SPEAR	0,094
R29	4.7k	RES	R0805	PANASONIC	0,109
R30	680	RES	R0805	PANASONIC	0,109
T1	BC846B	NPN	SOT23	NXP	0,031
T2	BC846B	NPN	SOT23	NXP	0,031
T3	BC856B	PNP	SOT23	NXP	0,173
T4	BC856B	PNP	SOT23	NXP	0,173
T5	BC857C	PNP	SOT23	NXP	0,034
T6	BC847C	NPN	SOT23	NXP	0,024
T7	BC846B	NPN	SOT23	NXP	0,031
T8	BC856B	PNP	SOT23	NXP	0,173
T9	BD139	NPN	TO126AV	MULTICOMP	0,67
T10	BC846B	NPN	SOT23	NXP	0,031
T11	BC856B	PNP	SOT23	NXP	0,173
T12	BD139	NPN	TO126AV	MULTICOMP	0,67
T13	BD140	PNP	TO126AV	MULTICOMP	0,62
T14	TIP3055	NPN	TO-247	STMICRO	1,5
T15	TIP3055	NPN	TO-247	STMICRO	1,5
X1	1503_02	3.5MM SOCKET	1503_02	LUMBERG	1,53
				Kokku	22,512

KOKKUVÕTE

Töö eesmärk oli projekteerida helisageduslik võimsusvõimendi, selgita signaali võimendamise juurde kuuluvaid protsesse, valida õigete väärtustega elektroonikakomponendid ja tõestada nende tööd arvutustega. Antud eesmärgid said ka töö käigus täidetud.

Töö esimeses osas on selgitatud valminud võimendi tööd lihtsustatult. Töö teises osas on selgitatud ja arvatud väljundastme töö väljundvõimsusel $P_n=50$ W. Arvutati toiteallika pinge $U_m=32$ ja vool $I_m=5$ A. Arvutati väljundtransistoride jõudevool ja nimiväljundvõimsusel hajuv võimsus. Töö kolmas osa käsitleb pingevõimendusastet. Pingevõimendi tekitab väljundastmele vajaliku amplituudiga tüürpinge. Selgitatakse pingevõimenduse juurde kuuluvaid protsesse. Vajalikuks pingevõimendusteguriks saadi $K_n=21$. Töö neljas osa käsitleb sisendfiltrit. Sisendfilter määrab sagedused, mis võimendisse pääsevad. Pääsusagedusteks valiti 10 Hz kuni 20 kHz. Valitakse sisendfiltri elektroonikakomponentide vajalikud väärtused. Töö viiendas osas arvutatakse jahutusradiaatori maksimaalset soojustakistust, milleks saadi $R_{th\ r-a}=0,805$ °C/W . Ja tuuakse välja vastava radiaatori mõõtmed 180mm x 80mm. Töö kuuendas osas on näidatud trükkplaadi võimalikku disaini. Ja lisatud antud trükkplaadi komponentide tabel koos komponentide hindadega.

Lõpptulemuseks sai projekteeritud võimsusvõimendi. Erinevate arvutuste ja selgitustega said võimsusvõimendi tööprotsessid ära põhjendatud. Seega püstitatud eesmärgid saab lugeda täidetuks.

KIRJANDUS

1. Abo, L. RAADIOLÜLITUSED, Tallinn: Valgus, 1990.
2. TIP3055 Andmeleht http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/TIP3055-D.PDF (25.05.2015)
3. Abo, L. ELEKTROONIKAKOMPONENDID, Tallinn, 1997.
4. BD139 Andmeleht <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/philips/BD139-16.pdf> (23.05.2015)
5. BD140 Andmeleht http://alltransistors.com/pdfview.php?doc=bd136_bd138_bd140.pdf&dire=_philips (23.05.2015)
6. BC857C Andmeleht http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BC856_BC857_BC858.pdf (20.05.2015)
7. BC847C Andmeleht http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BC847_SER.pdf (20.05.2015)
8. BZX384B5V6 Andmeleht http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BZX384_SERIES.pdf? (24.05.2015)
9. Diferentsvõimendi <http://www.lr.ttu.ee/~ivom/IRO0020/IRO0020%20%205.%20labor.pdf> (26.05.2015)
10. Filtrite skeemid ja graafikud http://robootika.tech-thing.org/failid/Skeemitehnika/01_passiivfiltrid.pdf (16.05.2015)
11. BC846B Andmeleht <http://www.farnell.com/datasheets/1699731.pdf> (25.05.2015)
12. BC856B Andmeleht <http://www.farnell.com/datasheets/490737.pdf> (25.05.2015)
13. Ribafiltri joonised http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_4.html (16.05.2015)