

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

Sven-Erik Mölder

VÕIMSUSVÕIMENDI

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Mihhail Pikkov, dotsent.

Tallinn 2015

Autorideklaratsioon

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

Kuupäev:

Autor: Sven-Erik Mölder

.....

/allkiri/

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:

Audio võimsusvõimendi bipolaartransistoride baasil.

Teema päritolu:

Ülikooli poolt väljapakutud teema, mis tundus minu jaoks sobiv oma raskusastme poolest.

Samuti on minu sooviks olnud töötada analoogelektronika skeemi kallal, mis koosneb ainult diskreetelementidest.

Lõputöö eesmärgid:

Etteantud näitajate korral võimsusvõimendi staatiliste parameetrite arvutamine.

Töötava simulatsiooniskeemi esitamine.

Arvutustega leitud komponentide baasil trükkplaadi skeemi koostamine.

Komponentidega trükkplaadi hinnakalkulatsioon.

Oodatavad tulemused:

Arvutatud staatiliste parameetrite alusel koostatud simulatsiooniskeemi korrektne töötamine.

Väljundvõimsusele vastavad väljundpingete ja -voolude suurused ning moonutustevabad voolu- ja pingekõverad.

Lahendatavad küsimused:

Võimendi võimsusele vastavate skeemikomponentide töövoolude ja -pingete leidmine.

Võimendi astmetele sobivate töörežiimide määramine.

Väljundtransitoridele sobiva jahutusradiaatori valik.

Kuupäev:

Üliõpilane:
/allkiri/

Juhendaja:
/allkiri/

Kinnitaja:
/allkiri/

Resümee

Käesolev bakalaureusetöö käsitleb võimsusvõimendi staatiliste parameetrite leidmist, kui on etteantud väljundvõimsus ja koormustakistus. Võimendi on realiseeritud diskreetkomponentidel ja võimenduselementidena kasutatakse bipolaartransistore. Võimendi väljundvõimsuseks on 50W ja koormustakistuseks 4 oomi. Komponentide parameetrite ja režiimide leidmist ning arvutamist alustatakse võimendi väljundist liikudes sisendi poole. Eeskujuks on võetud arvutusmetoodika raamatust "Raadiolülitused" (Abo, L.). Eeldatud on, et võimendit toidetakse stabiliseeritud pigeallikast. Leitud režiimide ja komponentide baasil esitatakse skeem koos simulatsiooniga, kus sisendisse on rakendatud harmooniline vahelduvpinge ja väljundis saadakse väljundvõimsusele vastav pingeamplituud. Töö lõpus on esitatud komponentidega trükkplaat ja selle hinnanguline maksumus.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti **22** leheküljel, **7** peatükki, **13** joonist ja **1** tabelit.

Abstract

This work describes how to find static parameters of a power amplifier when output power and load resistance are set. Amplifier is based on discrete components and bipolar transistors are used as amplification elements. Expected load power is 50W and load resistance is 4 ohms. The analysis of finding suitable working modes for elements is based on logic where calculations are done backwards from the output to the input of the amplifier. Example for the analysis is taken from the book "Raadiolülitused" by L. Abo. It is presumed that amplifier is powered by a stabilized voltage source. Based on found modes and component values schematic with a simulation is presented where to the input of the amplifier is given a harmonic sine voltage and from the output is taken amplified voltage which corresponds with expected power. At the end of this work printed circuit board with components and an approximate cost calculation are presented.

The thesis is in Estonian and contains 22 pages of text, 7 chapters, 13 figures and 1 table.

Lühendite ja mõistete sõnastik

U_m – väljundpinge amplituudväärtus

U_n – väljundpinge efektiivväärtus

U_{CE} – transistori kollektori emitter vaheline pinge

U_{BE} – transistori baasi ja emitteri vaheline pinge

+/- E – kahepoolaarne toitepinge

I_{Cm} - transistori nimivõimsusel läbiva vahelduvvoolu amplituudväärtus

I_q – transistori jõudevool

I_B – transistori baasivool

I_C – transistori kollektorivool

I_E – transistori emitterivool

R_k – koormustakistus

r'_e – emitteri dünaamiline takistus

P_n – nimivõimsus

P_S – alalisvooluvõimsus

P_{Cm} – nimiväljundvõimsusel hajuv võimsus

P_q – jõuderežiimis hajuv võimsus

β – transistori staatiline võimendustegur

K_U – pingevõimendustegur

K'_U – pingevõimendustegur tagasisidestatud võimendis

B – tagasisidetegur

η - efektiivsus

T_J – pooljuhtseadise siirdetemperatuur

T_A – ümbritseva keskkonna temperatuur

θ_{JC} – pooljuhi siirde ja kesta vaheline soojustakistus

θ_{CS} – transistori kesta ja radiaatori vaheline soojustakistus

θ_{SA} – radiaatori soojustakistus

Jooniste ja tabelite nimekiri

Joonis 1. Struktuurskeem.....	11
Joonis 2. Elektriline skeem.....	12
Joonis 3. Simulatsiooni skeem.....	19
Joonis 4. Väljundpinge koormusel.....	20
Joonis 5. Väljundvool koormusel.....	20
Joonis 6. Võimendi võimsusele vastav väljundpinge koormusel.....	21
Joonis 7. Sageduskarakteristik.....	21
Joonis 8. Pinge ja vool koormusel signaali puudumisel.....	22
Joonis 9. Jõudevoolud väljundastmes ja tüürastmes.....	22
Joonis 10. Differentiaalastme emitteri ja koormustakistuse voolud.....	23
Joonis 11. Trükkplaat elementidega.....	24
Joonis 12. Trükkplaat vooluradadega.....	24
Joonis 13. Jahutusradiaator.....	25
Tabel 1. Komponentid ja hinnad.....	26

Sisukord

Sissejuhatus.....	10
1. Võimendi struktuurskeem.....	11
2. Võimendi elektriline skeem.....	11
3. Arvutused	13
3.1 Toitepinge	13
3.2 Väljundaste.....	13
3.3 Pingevõimendi.....	14
3.4 Differentiaalaste	15
3.5 Eeldatav võimendi pingevõimendus	17
3.6 Võimendi efektiivsus	18
4. Simulatsiooni skeem	19
4.1 Simulatsiooni tulemused.....	20
5. Trükkplaat	24
6. Jahutusradiaatori arvutus	25
7. Hinnakalkulatsioon.....	26
Kokkuvõte	27
Kirjandus	28

Sissejuhatus

Käesolev töö käsitleb bipolaartransistoridel audio võimsusvõimendi projekteerimiseks vajalike staatiliste parameetrite leidmist ja komponentide määramist ning nende alusel koostatud skeemi simuleerimist.

Mõningaid mõtteid töö teema vajalikkusest. Audio võimsusvõimendite osas käesoleval ajal puudust ei ole. Turg pakub kõikvõimalikes hinnaklassides, erineva kvaliteedi tasemega ja laias valikus erinevate võimsus näitajatega tooteid. Pakutakse nii eraldiolevaid võimendeid kui ka näiteks ekvalaiseritega integreeritud lahendusi. Seega vajadust sellise võimendi järgi otseselt ei ole. Samas võib mõelda sellele, et kui inimesel on elektroonika alane huvi ja ta soovib midagi praktilist ise ehitada, siis võib sellise raskusastmega skeem olla just paras ülesanne millega töötada. Praktilisuse koha pealt võib mõelda olukorrale, kus soovitakse näiteks maakodu peoõhtule valjemat muusikat ja samas ei soovita hankida selle jaoks eraldi seadmete komplekti, siis antud võimendi puhul piisab kui signaallikana kasutada näiteks nutitelefonit, et saada piisava valjususega heli. Seega võib soovi korral leida antud tööle praktilisi väljundeid. Selle võimendi skeemilahendus ei ole mõeldud seeriatootmiseks, kuid töö lõpuosas on toodud välja trükkplaadi skeem, mille alusel saab võimendit realiseerida. Lisaks on toodud komponentide valik ja ligikaudne hinnakalkulatsioon.

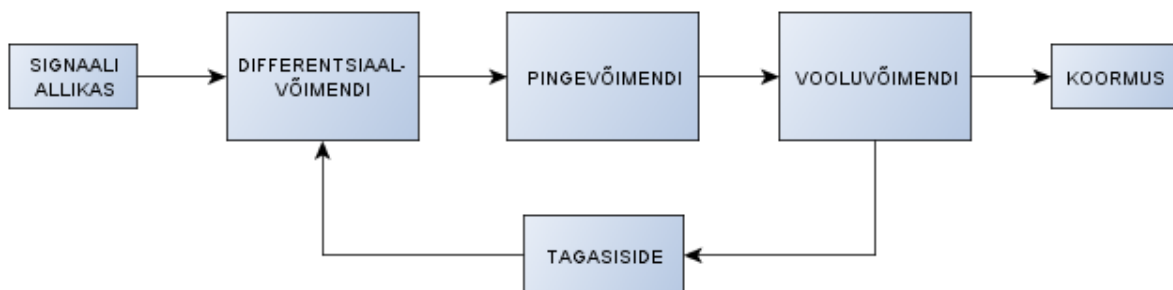
Võimsusvõimendi projekteeritavaks võimsuseks on 50W ja koormuseks 4 oomi. Esitatud on ainult ühe kanali skeem. Stereo lahenduseks tuleks kasutusele võtta kaks sellist skeemi. Võimendi ülesehituse aluseks on võetud klassikaline kolmeastmeline arhitektuur. Konkreetne skeem on kombinatsioon erinevatest kirjanduses olevatest näidetest. Arvutuste aluseks on võetud näited raamatutest L.Abo „Raadiolülitused“ ja П.Щкритек „Справочное руководство по звуковой схемотехнике“.

Antud töö on ülesehitatud järgnevalt. Ülevaade valitud lahenduse struktuurskeemist. Elektriskeem ja selle osade selgitus. Arvutused. Simulatsiooniskeem ja tulemused. Jahutusradiaatori arvutus. Hinnakalkulatsioon. Kokkuvõte.

1. Võimendi struktuurskeem

Võimsusvõimendi aluseks on kolmeastmeline arhitektuur. Esimese astme moodustab differentsiaalvõimendi, mille ülesandeks on signaali allika pingele muutused muundada voolumuutusteks ja lahutada sisendsignaalist tagasisidesignaali. Teise astme moodustab pingevõimendi, mis töötab A-klassi režiimis ja annab differentsiaalastmelt saadud signaali pingele maksimaalse amplituudi, mis jääbki võimendi väljundpingeks. Vooluvõimendi töötab AB-klassi režiimis ja annab suure vooluvõimenduse. Võimendi on haaratud 100%-lise negatiivse tagasisidega alalisvoolu järgi. Tänu sellele on kahepoolarse toite korral võimalik muuta signaali puudumisel alalisvoolu koormusel nullilähedaseks.

Joonis 1. Struktuurskeem



2. Võimendi elektriline skeem

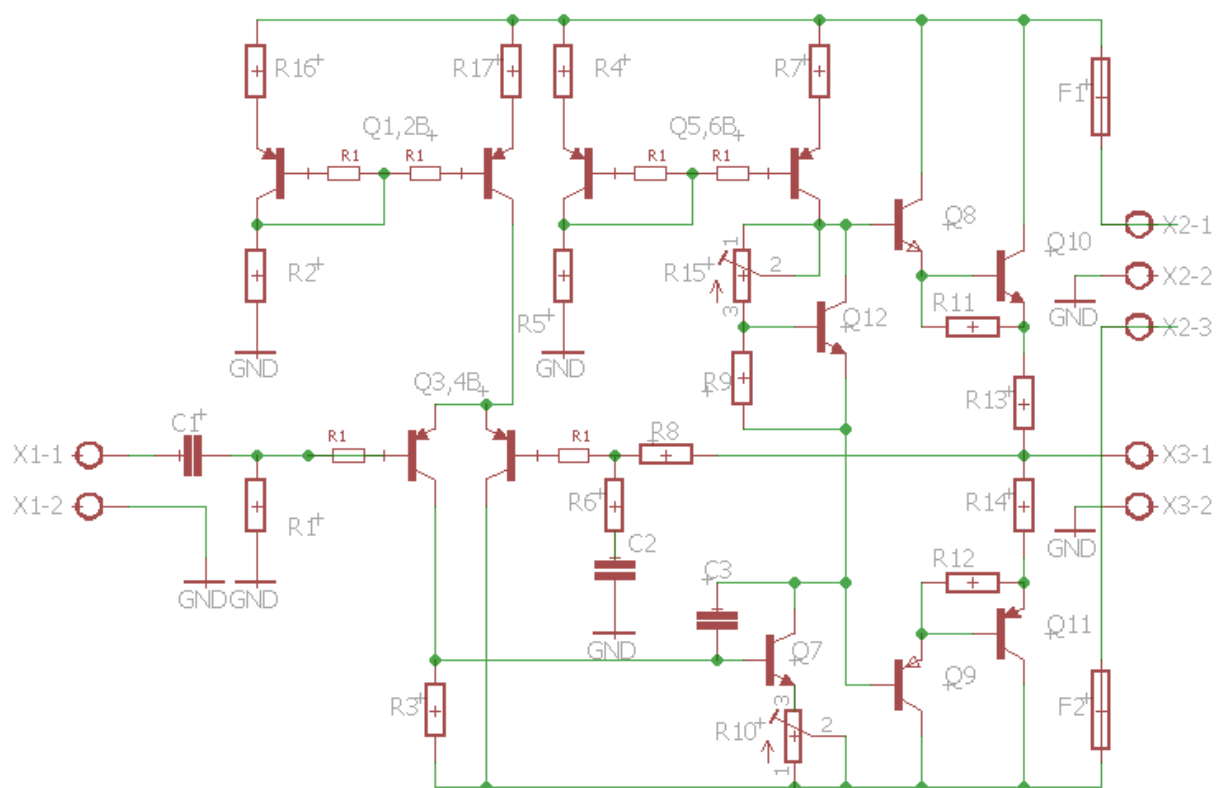
Võimendi sisendastme moodustab pnp-tüüpi transistoridest differentsiaalvõimendi. Võimendatud pingele võetakse ühes õlas olevast kollektori takistist. Stabiilne emittervool antakse ette kahest pnp-tüüpi transistorist koosneva voolupeegliga, mille tulemusena vähendatakse sünfaasse signaali võimendust.

Pingevõimendustamiseks on ühise emitteriga lülites npn-tüüpi transistor. Maksimaalse moonutusteta väljundpinge saamiseks on astme koormusena kasutusel kahest npn-tüüpi transistorist koosnev voolupeegel. Selle tulemusena jääb ära pingevõimendustastme suur koormustakistus, mis piiraks baasipinget ülemise õla väljundtransistoril ja ei võimaldaks sellel täielikult avaneda. Kollektori ahelas on temperatuuristabiilsuse tagamiseks transistorist ja takistitest koosnev lülitus, mille seadetakistiga saab reguleerida transistoril olevat pinget ja sellega väljundastme jõudevoolu. Emitteri ahelas on seadetakisti, millega saab reguleerida

kollektori pinget, mis omakorda määrab selle, milline on voolude tasakaal väljundastme transistoridel.

Väljundastmeks on AB režiimis töötavate komplementaartransistoride paarid, mis on realiseeritud Darlington lülituses. Et transistore läbiks ka nõrga sisendsignaali ajal teatav vool on Darlingtonpaari emitteriahelais lisa takistid. Võimendusastet toidab keskväljavõttega kahepolaarne toiteallikas. Eeldatud on, et toitepinge on stabiliseeritud. Ülekoormusvoolu eest on võimendi kaitstud sulavkaitsmetega.

Joonis 2. Elektriline skeem



3. Arvutused

Staatiliste parameetrite leidmisel liigun võimendi koormuse juurest võimendi sisendi suunas. Alustan teadaolevatest väärtustest, milleks on väljundvõimsus ja koormustakistus.

$$P_n = 50\text{W} \quad R_k = 4\Omega$$

3.1 Toitepinge

1. Leian väljundpinge amplituudväärtuse ja efektiivväärtuse:

$$U_m = \sqrt{2P_n R_k} = \sqrt{2 \times 50 \times 4} = 20\text{V} \quad U_n = \sqrt{P_n R_k} = \sqrt{50 \times 4} = 14,1\text{V}$$

2. Ühe öla vajaliku toitepinge leidmiseks liidan väljundpinge amplituudväärtusele järgmised pingelangud:

- väljundtransistoride baasi ja emitterite pingelangud, mis on u. 1V siirde kohta, kokku 2V;
- pingelang emittertakistil R13, mis valitakse $0,1U_n \approx 1,4\text{V}$;
- pingelang takistil R7 on $\approx 1\text{V}$;
- transistoril Q10 on $U_{CE} \approx 1\text{V}$;

Kokku tuleb $E = 20 + 2 + 1,4 + 1 + 1 = 25,4\text{V}$. Kuna on tegemist stabiliseeritud pingega siis valin pingeks $+E = 26\text{V}$ ja $-E = -26\text{V}$.

3.2 Väljundaste

1. Väljundtransistori Q10 nimivõimsusel läbiva vahelduvvoolu amplituudväärtus:

$$I_{cmQ10} = \sqrt{2P_n/R_k} = \sqrt{2 \times 50/4} = 5\text{A}$$

2. Valin väljundtransistori Q10 jõudevooluks $I_{qQ10} = 0,03I_{cmQ10} = 0,03 \times 5 = 0,15\text{A}$.

Jõude režiimis hajub võimsus $P_{qQ10} = I_{qQ10}E = 0,15 \times 26 \approx 4\text{W}$.

3. Nimiväljundvõimsusel hajub Q10 transistoril: $P_{cmQ10} = E^2/(\pi^2 R_k) + P_{qQ10} = 26^2/(\pi^2 4) + 4 \approx 21\text{W}$.

4. Transistori Q10 kollektoripinge U_{CE} maksimaalväärtus on $E + U_m = 26 + 20 = 46\text{V}$.

Väljundtransistoride valimisel lähtun tingimusest kus arvatud I_{cm} ja U_{CE} korrutan 1,5-ga ja P_C korrutan 2-ga. Teise öla transistori valik käib analoogselt.

5. Vastuvoolusidet tekitavate emittertakistite väärtused leian tingimusest:

$$R_{13}, R_{14} \leq 0,1R_k \approx 0,39 \Omega.$$

6. Et ka nõrga sisendsignaali korral läbiks transistore Q8, Q9 vool on nende emitteriahelatesse lisatud takistid R11 ja R12. Eeldades, et jõudeolekus läbib takistit R11 vool $I_{R11} = 6\text{mA}$ ja baasipinge on $U_{BEQ10} = 0,6\text{V}$, siis $R_{11} = U_{BEQ10} / I_{R11} = 0,6 / 0,006 = 100\Omega = R_{12}$.

7. Transistori Q8 jõudevoolu moodustavad voolud $I_{R11} = 6\text{mA}$ ja transistori Q10 baasivool. Eeldan, et võimsustranistori beeta on 30.

$$I_{BQ10} = I_{qQ10} / \beta_{Q10} = 0,15 / 30 = 5\text{mA} \quad I_{qQ8} = 6 + 5 = 11\text{mA} = I_{qQ9}$$

8. Transistori Q8 kollektorivoolu suurim amplituud:

$$I_{CmQ8} = I_{CmQ10} / \beta_{Q10} = 5 / 30 \approx 0,17\text{A}$$

Kollektoripinge peab olema samasuur kui Q10-l, $U_{CE} \geq 46\text{V}$.

Kollektoril hajuv võimsus: $P_{CmQ8} = P_{CmQ10} / \beta_{Q10} + I_{R11}E = 21 / 30 + 0,006 \times 26 = 0,86\text{W}$
Q9-l samad andmed.

9. Ülekoormuskaitseks valin sulavkaitsemed, mille nimivoolu võtan 1,5 korda väiksema kui on väljundtransistori nimivõimsusel läbiva voolu amplituud.

$$I_{CmQ10} = 5\text{A}$$

Valin kaitmed nimivooluga $I_n = 3\text{A}$.

3.3 Pingeõimendi

1. Pingeõimendi koormuseks on vooluallikas, mille kollektorivool I_{CQ6} peab olema suurem Q8 baasivoolust. Eeldan, et transistori Q8 beeta on 100.

$$I_{BQ8} = I_{CQ8} / \beta_{Q8} = 0,17 / 100 = 1,7\text{mA}$$

Vooluallika vooluks valin $I_{CQ6} = 5\text{mA}$. Transistoril Q6 ja Q5 hajub siis võimsus $P_{CQ5,6} = I_{CQ6}E = 0,005 \times 26 \approx 0,13\text{W}$.

Voolupeegli emitterite ahelatesse on lisatud väike takistus selleks, et vähendada tüürastme poolt tekitatud pingemuutuste mõju, mis muutuva kollektori (Q6) pinge korral tekitab väikeseid muutusi Q6 baas-emitteri pinges ja põhjustab väljundvoolu muutust. Et emittertakistil saada 0,25 voldist pingelangu valin takistuseks 50Ω [5, lk 89].

Voolupeegli seadevoolu takistuse saan, kui ülemise õla toitepingest lahutan pingelangu, mis tekib peegli seadevoolu transistori emitter-baasil ja emitter takistil. Allesjääva pinge jagan seadevooluga.

$$R5 = (+E - U_{BEQ6} - U_{R4}) / I_{CQ6} = 26 - 0,7 - 0,25 / 0,005 = 5010\Omega$$

Valin $5,1\text{k} \Omega$.

2. Temperatuuristabiilsuse tõstmiseks on Q7 kollektori ahelas transistorist ja takistitest koosnev lülitus. Seadetakistiga R15 on võimalik sujuvalt reguleerida transistori Q12 kollektori ja emitteri vahelist pinget, millega määratakse väljundastme jõudevool. Pingejaguri arvutamisel lähtun sellest, et väljundastmetes voolu tekkimiseks peab iga transistori baasile langema $\sim 0,7V$, see on kokku $\Delta U = 2,8V$. Takistite väärtused leian valemiga:

$$U_{CEQ12} = U_{BEQ12} (1 + R15/R9).$$

$$\Delta U = U_{CEQ12} \quad U_{BEQ12} \approx 0,7V$$

$2,8 = 0,7(1 + R15/R9)$, takistite suhteks saame 3. Näiteks valin $R9 = 1k \Omega$ ja varuga $R15 = 4,7k \Omega$.

$$\text{Transistoril Q12 hajuv võimsus } P_{Q12} = I_{CQ6} \Delta U = 0,005 \times 2,8 = 0,014W$$

3. Tüürastme baasi ja kollektorit sildab tagasiside kondensaator, mille ülesanne on hoida ära endaergutust kõrgetel sagedustel. Valin sellele kirjanduses leitud suuruse $47pF$ [4, lk 63].

Jõuderežiimis on Q7 peal ühe öla toitepinge, siis $P_{Q7} = I_{CQ6} E = 0,005 \times 26 = 0,13W$.

Dünaamilises režiimis peab U_{CEQ7} olema valmis taluma kahekordset toitepinget. Valin U_{CEQ7} , mis on $1,5 \times 2E$.

Q7 emitterahelas on kasutusel seadetakisti R10, mille ülesanne on baasi ja emitteri vahelise pinget muutmiseks reguleerida tüürastme kollektori pinget, millest sõltub väljundtransistoride voolude tasakaal ja seega pinget ning vool koormustakistil signaali puudumisel.

3.4 Differentsiaalaste

1. Differentsiaalastme emitterivoolu valin järgmiselt:

$$\text{Eeldan, et transistori Q7 beeta on } 100. \quad I_{BQ7} = I_{CQ7} / \beta_{Q7} = 0,005 / 100 = 50 \mu A$$

Leitud suuruse korrutan 10-ga ja saan diff.astme emitterivoolu.

$$I_{CQ2} = 10 I_{BQ7} = 500 \mu A$$

2. Emitterivoolu tekitava voolupeegli voolu leian sarnaselt pingevõimendusastme jõudevoolu leidmisega.

Vooluallika vooluks on $I_{CQ2} = 500 \mu A$. Transistoril Q1 ja Q2 hajub siis võimsus $P_{CQ1,2} =$

$$I_{CQ1,Q2} E \approx 0,0005 \times 26 \approx 0,013W.$$

Et emittertakistil saada 0,25 voldist pingelangu valin takistuseks 500Ω .

Voolupeegli voolu määrav takistus:

$$R2 = (+E - U_{BEQ1} - U_{R16}) / I_{CQ1} = 26 - 0,7 - 0,25 / 0,0005 = 50100 \Omega$$

Valin $51k \Omega$.

3. Differentiaalastme baaside takistused valin võrdsed, et oleks tagatud tasakaal alalispinge osas [5, lk 237]. Suurused valin lähedased kirjanduse näidetele [1, lk 350].

4. Vahelduvvoolu tagasisideahela takisti leian järgnevate valemitega [2].

$V_U = \sqrt{P_n/R_k} / U_{SIS}$, kus U_{SIS} on võimendi sisendpinge, antud juhul 1V, siis:

$$V_U = \sqrt{P_n/R_k} = \sqrt{50 \times 4} = 14,14V$$

Kasutan valemit $R_6 = R_8 / (V_U - 1)$. Ühe takistustest annan ette: $R_8 = 10k \Omega$.

Saan väärtuseks $R_6 = 10000 / 13,14 = 761 \Omega$.

Valin 750Ω .

5. Koormustakistuse R_3 valin järgnevalt. Eeldan, et tüürastme Q7 avamispiiril hoidmiseks on vaja baasi emitteri vahel $\sim 0,7V$. Samuti eeldan, et diff.astme emitterivool jaguneb pooleks. Sellest saan:

$$I_{CQ3} = I_{CQ2} / 2 = 250\mu A \quad U_{BEQ7} / I_{CQ3} = 0,7 / 0,00025 = 2800\Omega$$

Selleks, et Q7 emitteriahelas oleva seadetakistiga saaks suuremas ulatuses reguleerida kollektori tööpunkti ja sellega seada väljundtransistoride voolude tasakaalu, tõstan koormustakistuse suurendamisega Q7 baasi pinget. Korrutan leitud takistuse väärtuse 2-ga.

$$R_3 = 2800 \times 2 = 5600 \Omega$$

Sellisel juhul on eeldatav pingelang $U_{R3} = I_{CQ3} R_3 = 0,00025 \times 5600 = 1,4V$

R10 seadetaksiti reguleerimisulatust valides eeldan, et Q7 minimaalne avanemispinge on $\sim 0,6V$. Siis:

$$1,4V - 0,6V = 0,8V \quad 0,8V / I_{qCQ7} = 0,8 / 0,005 = 160 \Omega$$

Transistoride erinevuste tõttu ja sellest tingitud voolude erinevuste pärast valin reguleertakisti reguleerimisulatuse suurema varuga ja korrutan saadud suuruse 2-ga. Valin reguleerimisulatuse vähemalt 300Ω .

6. Sisendsignaali ja tagasiside kondensaatorid valin kirjanduses toodud näidete järgi $10 \mu F$ ja $47 \mu F$ [4, lk 63].

3.5 Eeldatav võimendi pingevõimendus

1. Kõigepealt leian differentsiaalastme pingevõimenduse valemitega [3, lk 319,320,617]:

$$K_{Udiff} = R3 / 2 r'_e \quad r'_{ediff} = 25\text{mV} / I_E$$

$$R3 = 5,6\text{k} \Omega$$

$$I_E - \text{differentsiaalastme emitterivool jagatud kahega } I_{CQ2} = 500 \mu\text{A} / 2 = 250 \mu\text{A}$$

$$r'_{ediff} = 0,025 / 0,00025 = 100 \Omega \quad K_{Udiff} = 5600 / 2 \times 100 = 28$$

2. Leian tüüraastme pingevõimenduse:

Transistori Q10 jõudevooluks eeldan 150mA ja beetaks 30. Leian Q10 emitteri takistuse.

$$r'_{Q10e} = 25\text{mV} / I_{EQ10} = 25\text{mA} / 150\text{mA} = 0,167 \Omega$$

$$\text{Q10 baasi sisendtakistus} = r'_{Q10e} \beta_{Q10} = 0,167 \times 30 = 5 \Omega$$

Q10 baasitakistusega on rööbiti takisti R11=100 Ω . Kogutakistus on seega $\approx 5 \Omega$

Antud takistus on jadamisi Q10 emittertakistuse ja koormusega, mis teeb kokku:

$$R' = 5 + 0,39 + 4 = 9,4 \Omega$$

Transistori Q8 jõudevooluks on 11mA ja beetaks eeldan 100. Leian Q8 emitteri takistuse.

$$r'_{Q8e} = 25\text{mV} / I_{EQ8} = 25\text{mA} / 11\text{mA} = 2,3 \Omega$$

Transistori Q8 emitteri takistusele lisandub eelnevalt leitud summarne takistus R', seega

$$\text{Q8 baasi sisendtakistus} = (r'_{Q8e} + R') \beta_{Q10} = (2,3 + 9,4) \times 100 = 1170 \Omega$$

Leian Q7 emitteri takistuse: $r'_{Q7e} = 25\text{mV} / I_{EQ7} = 25\text{mA} / 5\text{mA} = 5 \Omega$

Sellele lisandub seadetakisti R10 takistus, milleks eeldan $r_{Q7e} = 100 \Omega$, kokku 105 Ω .

Tüüraastme koormuse leidmisel lähtun sellest, et kollektoril on jadamisi jõudevoolu reguleerimistransistor takistitega ja voolupeegel ning rööbiti sellega Q8 sisendtakistus. Kuna viimane on eelnevatest oluliselt väiksem võtangi selle Q7 koormustakistuseks. Siis kasutan valemit:

$$K_{UQ7} = r_{CQ7} / (r'_{Q7e} + r_{Q7e}) = 1170 / 105 = 11,14$$

3. Väljundastme emitterjärguri jaoks kasutan valemit:

$$K_{UQ8,Q10} = r_e / (r'_e + r_e)$$

r_e = eelpool leitud R'

$$r'_e = r'_{Q8e}$$

$$K_{UQ8,Q10} = 9,4 / (2,3 + 9,4) = 0,8$$

4. Astme kogu pingevõimendus ilma tagasisideta:

$$K_U = K_{Udiff} K_{UQ7} K_{UQ8,Q10} = 28 \times 11,14 \times 0,8 \approx 250$$

5. Võimendi võimendus negatiivse tagasisidega :

$$K'_U = K_U / (1 + B K_U), \text{ kus } B \text{ on tagasiside tegur}$$

$$B = R_6 / R_8 = 750 / 10000 = 0,075$$

$$K'_U = 250 / (1 + 250 \times 0,075) = 12,65$$

3.6 Võimendi efektiivsus

Leian võimendi poolt tarbitava alalisvoolu. Selleks liidan voolu labi kahe voolupeegli ja maksimaalse väljundtransistori voolu. Transistori voolu saan:

$$I_{CQ10} = U_{CEq} / R_k + R_{13} = 26 / 4,4 = 5,9A$$

$$\text{Siinuse keskväärtus: } 0,318 I_{CQ10} = 0,318 \times 5,9 = 1,88A$$

Voolupeeglite voolud on I_{CQ10} võrreldes väikesed ja neid ma ei arvesta.

Alalisvooluvõimsus, mida võimendi tarbib on $P_S = 2E \times 1,88 = 52 \times 1,88 = 97,7W$

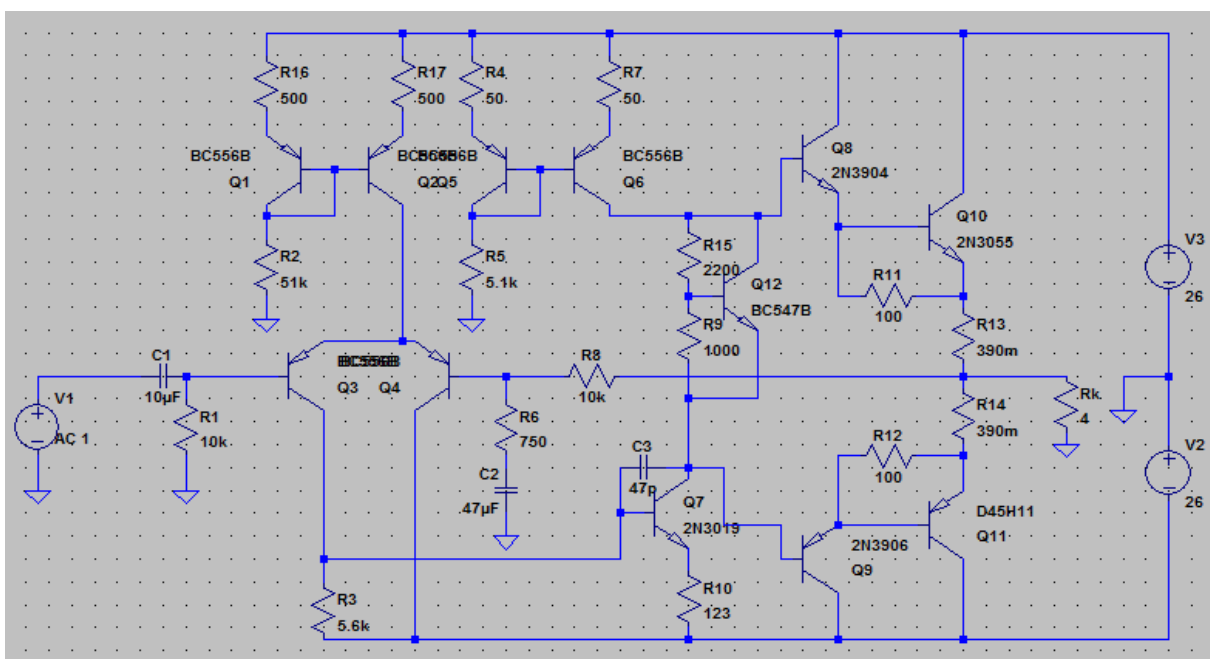
Effektiivsuse leian võimendi nimivõimsusel $P_k = 50W$.

$$\eta = (P_k / P_S)100\% = (50 / 97,7) \times 100\% = 51,1\%$$

4. Simulatsiooni skeem

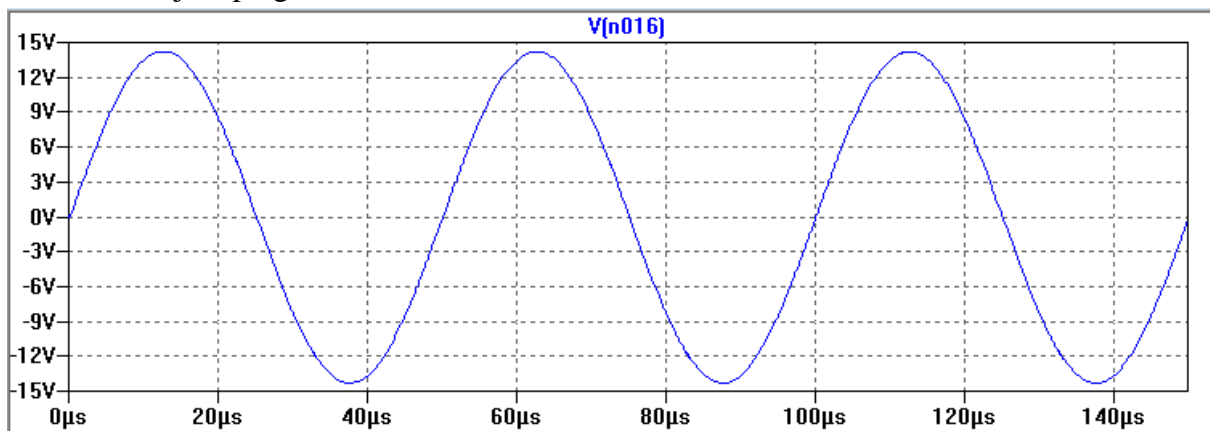
Skeemi simuleerimiseks kasutan LTSpice tarkvara. Skeemi transistorid on valitud arvutustega sarnaste parameetritega. Passiivelementidele on valitud arvutatud suurustele kõige lähedasemad standardväärtused. Koormuseks on võetud 4 oomine takistus. Sisendsignaalsiks 1 voldine siinus, ilma alalispingeta, sagedusel 20kHz. Signaali puudumisel on võetud sisendamplituudiks 0 volti. Toiteks on kaks alalispingeallikat, mis on ühendatud jadamisi. Keskväljavõtte on maandatud.

Joonis 3. Simulatsiooni skeem



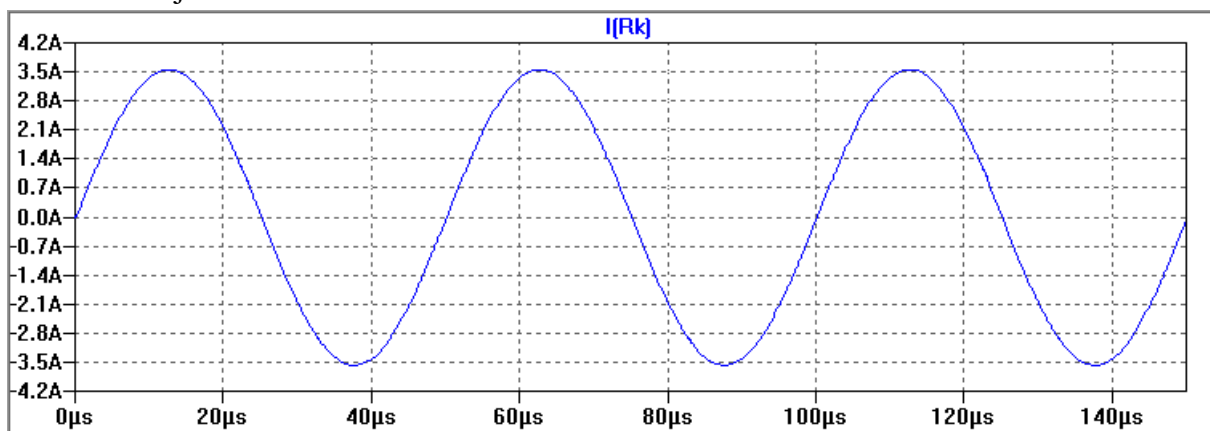
4.1 Simulatsiooni tulemused

Joonis 4. Väljundpinge koormusel



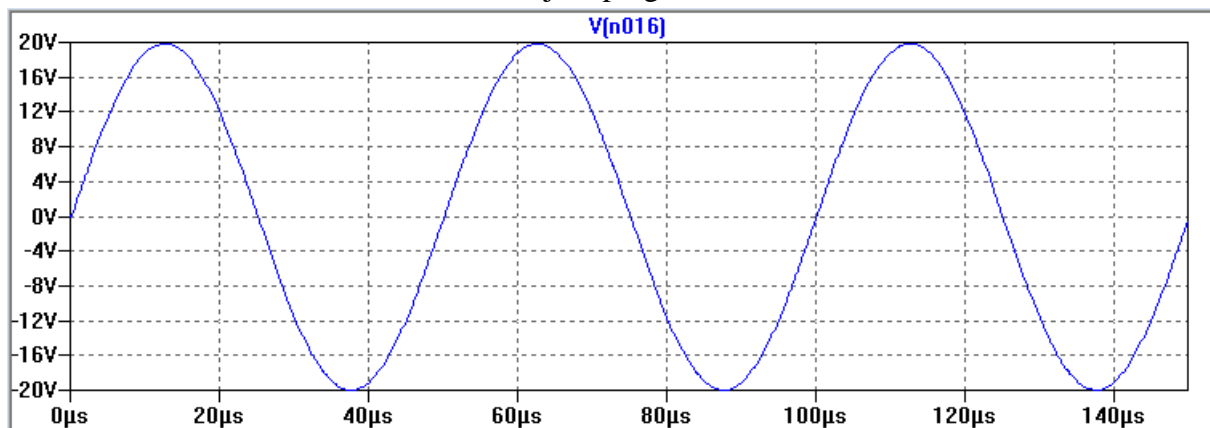
1V amplituudiga sisendpinge korral on võimendi koormusel väljundpinge amplituud $U_m = 14,7\text{V}$. Antud tulemus on samas suurusjärgus eelneva arvutusega tagasisidestatud võimendi pingevõimenduse kohta, mis oli 12,65.

Joonis 5. Väljundvool koormusel



Vooluamplituud 1 voldise sisendpinge amplituudi juures on 3,5A.

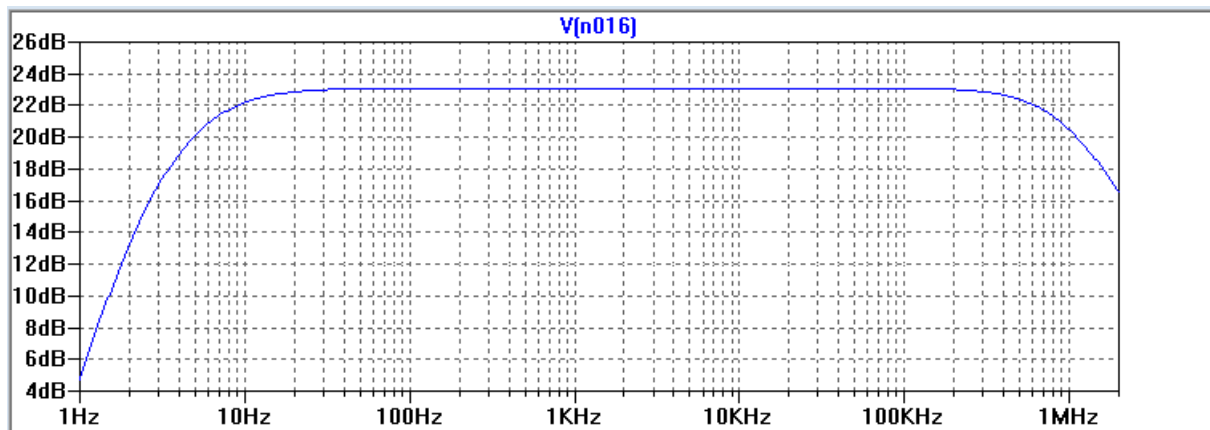
Joonis 6. Võimendi võimsusele vastav väljundpinge koormusel



1,4V sisendpinge amplituudi juures on koormusel pinge amplituud 20V, mis vastab püstitatud võimendi võimsusele 50W.

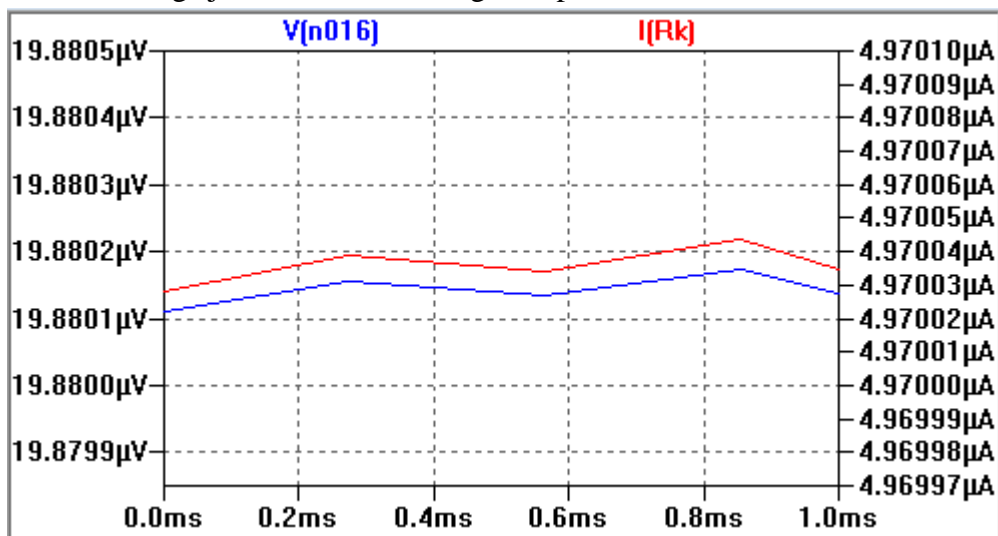
$$P_n = (2U_m)^2 / 8 R_k = 1600 / 32 = 50W$$

Joonis 7. Sageduskarakteristik



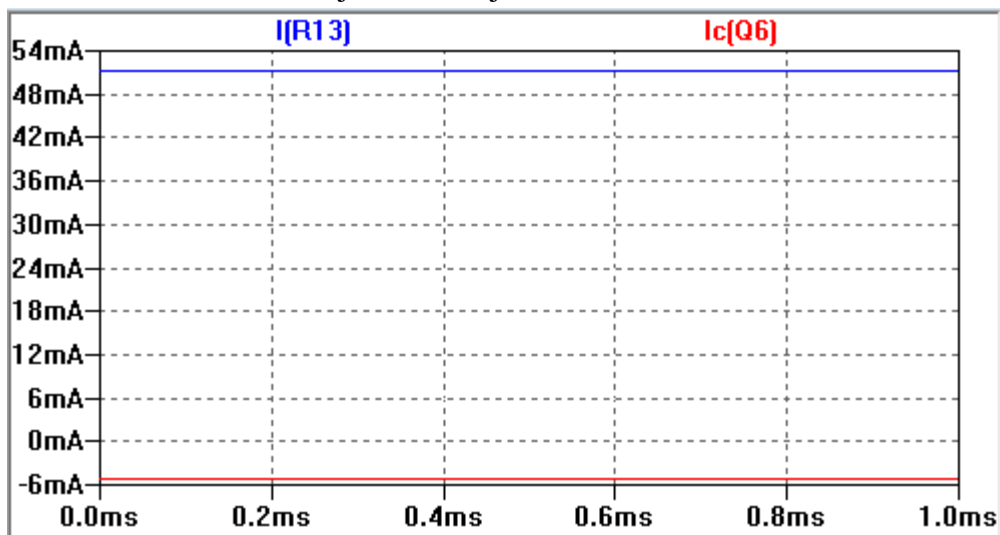
Võimendi talitlussagedusala 5Hz – 1MHz. Maksimaalne võimendus 23,1dB.

Joonis 8. Pinge ja vool koormusel signaali puudumisel



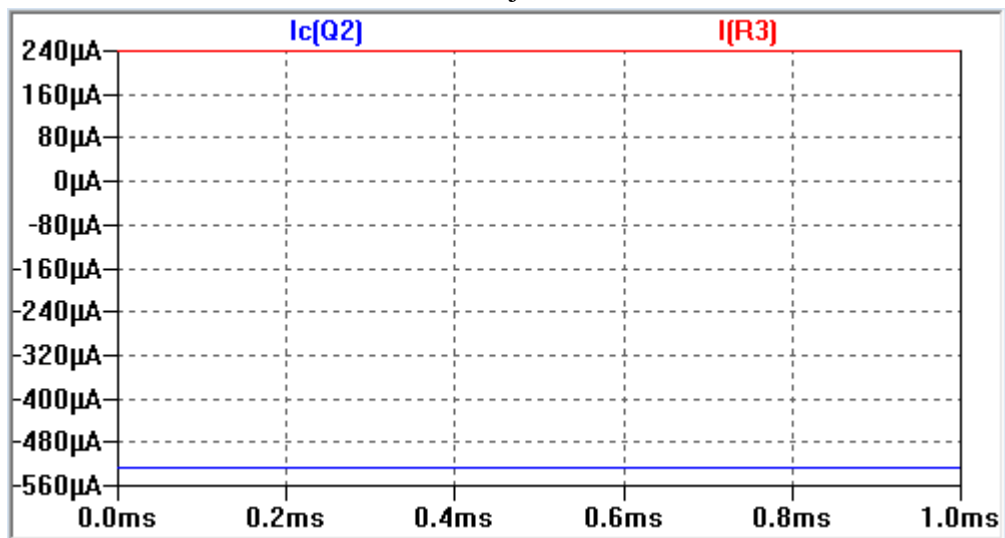
Signaali puudumise korral on tänu tüürastme emitteri seadetakistuse reguleerimisele võimalik viia vool ja pinge koormusel olematuks.

Joonis 9. Jõudevoolud väljundastmes ja tüürastmes



Väljundastme jõudevool on valitud seadetakistiga R15 ~50mA. Tüüraste annab arvutatud voolu 5mA.

Joonis 10. Differentiaalastme emitteri ja koormustakistuse voolud

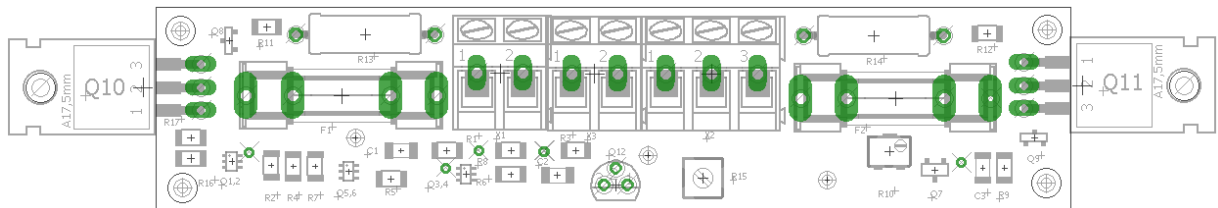


Mõlemad voolud on lähedased arvutustes näidatud suurustele: 500 ja 250 μA .

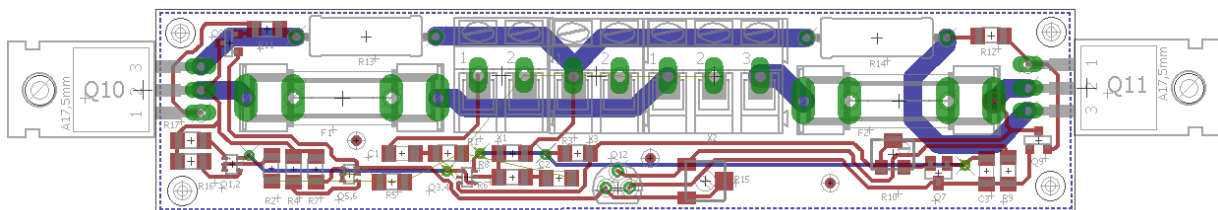
5. Trükkplaat

Trükkplaat on ühepoolne. Voolurajad paiknevad nii ees- kui tagaküljel. Väljundtransistorid on toodud trükkplaadilt välja võimalikult teineteisest eemale, et suure radiaatori pinnal toimuks soojuse hajutamine ühtlasemalt. Termostabiilsuse tagamise transistor on mõeldud samuti olema kontaktis radiaatoriga. Kuna tegemist ei ole seeriatootmise trükkplaadiga, siis montaaži käigus saab transistori kinnitada plaadile nii ülevalt kui altpoolt, sõltuvalt sellest kuidas on võimalik saada parem kontakt. Trükkplaadi mõõtudeks on 100 x 22 mm.

Joonis 11. Trükkplaat elementidega.



Joonis 12. Trükkplaat vooluradadega.



6. Jahutusradiaatori arvutus

Eelnevate arvutustega oli näidatud, et nimiväljundvõimsusel hajub Q10 ja Q11 transistoril 21W. Kollektori maksimaalvool on $I_{Cm} = 5A$ ja kollektoripinge $U_{CE} = 46V$. Komponenti valikul võtan voolu ja pingearvu 50% ja võimsusel 100%.

Nõutud tingimustele vastab NTE Electronics'i NTE54 ja komplementaarne NTE55, millel on $R_{thJC} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Radiaatori leidmisel lähtun valemist:

$$T_J = T_A + (\theta_{JC} + \theta_{CS} + \theta_{SA})P \quad \theta_{SA} = (T_J - T_A) / P - \theta_{JC} - \theta_{CS}$$

T_J – pooljuhtseadise siirdetemperatuur, mille antud juhul võtan $125 \text{ } ^\circ\text{C}$ (maksimaalne $150 \text{ } ^\circ\text{C}$)

T_A – ümbritseva keskkonna temperatuur, milleks valin $50 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\theta_{JC} = R_{thJC} = 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

P – transistoril hajuv võimsus 21W

θ_{CS} – transistori kesta ja radiaatori vaheline soojustakistus, valin $0,2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$

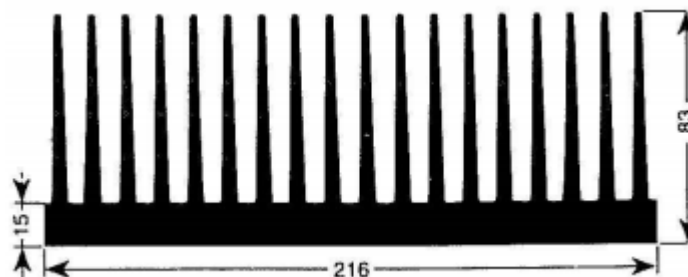
θ_{SA} – radiaatori soojustaksitus

$$\theta_{SA} = (125 - 50) / 21 - 2,5 - 0,2 = 0,87 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

Kuna võimendil on kaks väljundtransistori siis paigutan nad ühele radiaatorile suurendades radiaatori pinda kaks korda. Radiaatori valikul lähtun soojustakistusest $0,43 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Sellisele takistusele vastab radiaator mõõtmetega 216x125x83 mm.

Joonis 13. Jahutusradiaator.



7. Hinnakalkulatsioon

Hinnakalkulatsiooni aluseks on samad skeemi komponendid, mis on trükkplaadil ja mis on validud lähtudes arvutustega näidatud suurustest. Kõik komponendid vastavad standardväärtustele. Arvestades, et antud töös olev skeem ei ole mõeldud seeriatootmiseks, ei ole siin toodud trükkplaadi hinda. Hinnad on eurodes.

Tabel 1. Komponentid ja hinnad.

Symbol	Qty	Part type	Mount.	Package	Specification	Manufact.	Hind
C1	1	CAPACITOR	SMD	1206	T491, 10uF, 20V, +/-20%	Kemet	0,8
C2	1	CAPACITOR	SMD	1206	TLJ, 47uF, 10V, +/-20%	AVX	1,4
C3	1	CAPACITOR	SMD	1206	TLJ, 47pF, 100V, +/-5%	AVX	2,2
Q1-Q6	3	PNP DOUBLE NPN	SMD	SOT363	BC856S, 65V _{ceo} , 100mA, 200mW	NXP	1,6
Q7	1	Transistor NPN	SMD	SOT23BEC	FMMT624TA, 125V _{ceo} , 1A, 625mW	DIODES INC	0,5
Q8	1	Transistor PNP	SMD	SOT23	ZXTN25100DFH, 100V _{ceo} , 2,5A, 1,25W	DIODES INC	1,0
Q9	1	Transistor NPN	SMD	SOT23	ZXTP25100BFH, 100V _{ceo} , 2A, 1,25W	DIODES INC	0,6
Q10	1	Transistor PNP	THD	TO220	NTE54, 150V _{ceo} , 8A, 50W	NTE ELECT.	5,5
Q11	1	Transistor NPN	THD	TO220	NTE55, 150V _{ceo} , 8A, 50W	NTE ELECT.	5,5
Q12	1	Transistor	THD	TO92	45V _{ceo} , 500mA, 625mW	MULTICOMP	1,0
R1,R8	2	RESISTOR	SMD	1206	ERJPO8F1002V, 500V, 660mW, 10K, 1%	PANASONIC	2,0
R2	1	RESISTOR	SMD	1206	ERJPO8F5102V, 500V, 660mW, 51K, 1% CRCW12065K60FK, 200V, 500mW, 5,6K, 1%	PANASONIC	1,0
R3	1	RESISTOR	SMD	1206		VISHAY	1,0
R4,R7	2	RESISTOR	SMD	1206	ERJPO8F49R9, 500V, 660mW, 50ohm, 1%	PANASONIC	2,0
R5	1	RESISTOR	SMD	1206	ERJPO8F5101V, 500V, 660mW, 5,1K, 1%	PANASONIC	2,0
R6	1	RESISTOR	SMD	1206	ERJPO8F7500V, 500V, 660mW, 750ohm, 1%	PANASONIC	1,0
R9	1	RESISTOR	SMD	1206	MCHPO6W2F1001T5E, 200V, 500mW, 1K, 1%	MULTICOMP	1,0
R10	1	TRIMMER	SMD	3224W	3224W, 500ohm, 250mW, 10%	BOURNS	3,8
R11,R12	2	RESISTOR	SMD	1206	CRCW1206100, 200V, 500mW, 100ohm, 1%	VISHAY	0,4
R13,R14	2	RESISTOR	THD	0414/15	6200, 200V, 4W, 0,39ohm, 2%	VISHAY	2,0
R15	1	TRIMMER	SMD	3314J	3314J, 4,7K, 250mW, 20%	BOURNS	4,0
R16,R17	2	RESISTOR	SMD	1206	ERJPO8F5100V, 500V, 660mW, 510ohm, 1%	PANASONIC	2,0
X1, X3	2	CONNECTOR	THD		AK300/2-5,0-GRAU, 250V, 24A	PTR Messt.	2,0
X2	1	CONNECTOR FUSE	THD		AK300/3-5,0-GRAU, 250V, 24A	PTR Messt.	1,0
F1,F2	2	HOLDER	THD		MC000830, 5x20mm PCB, 250V, 6,3A	MULTICOMP HS	1,0
H.SINK	1				411DN, 216x125x83mm	MARTSON	77,0
Summa:							123,2

Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli leida staatilised parameetrid võimsusvõimendile kui on etteantud väljundvõimsus ja koormustakistus. Selle tööga sai see eesmärk saavutatud. Skeemi komponentide töörežiimid ja nominaalid said leitud valdavas enamuses arvutuste teel, mõned tuli valida erialakirjanduse soovitude järgi. Skeemi töökõlblikkuse kinnituseks sai läbi tehtud simulatsioon, mis kinnitas arvutustega määratud töörežiimide toimimist. Samuti näitas simulatsioon, et võimendi suudab töötada väljundvõimsusel ilma väljundpinge kuju moonutuseta. Arvutatud, kogu võimendi, pingevõimendus langes samasse suurusjärku simuleeritud võimendusega erinedes sellest 11%. Probleemiks kujunes diferentsiaalastme koormustakistuse valik, kuna ei õnnestunud leida konkreetset juhist ega arvutusnäidet selle kohta. Seetõttu tuli proovimiste ja teatud rusikareeglite abil leida küllaltki robustne meetodika kuidas seda teha, kuid see takistus sai ületatud. Töö lõpus toodud hinnakalkulatsioon näitas ära sellise võimendi üksiktootmise majandusliku ebaotstarbekuse. Nagu oli välja toodud töö sissejuhatuses on sellise skeemi ise-ehitamine sobilik pigem asjaarmastajatele ja õppuritele. Kuigi antud lõputöö teema ja selle lahendus autori jaoks isiklikult otsest praktilist väärtust ei oma, siis selle töö läbitegemine on olnud kasulik selles mõttes, et on andnud juurde enesekindlust elektroonika skeemidega töötamisel, nende simuleerimisel ja ka ootamatutele taksitustele lahenduste leidmisel.

Kirjandus

1. Abo, L. (1990). Raadiolülitused. Tallinn.
2. Щкритек, П. (1991). Справочное руководство по звуковой схемотехнике. Москва.
3. Malvino, P. (1993). Electronic Principles. 5th ed. New York.
4. Self, D. (2006). Audio Power Amplifier Design Handbook. 4th ed. New York.
5. Horowitz, P., Winfield, H. (1989). The Art of Electronics. 2nd ed. New York.
6. Audio power amplifier [WWW] http://en.wikipedia.org/wiki/Audio_power_amplifier (08.06.15)
7. www.farnell.com (08.06.15)
8. www.vishay.com (08.06.15)
9. www.elfa.se/elfa3~ee_et/elfa/init.do (08.06.15)