



KANDIDAATINTYÖ

Juho-Tuomas Matero

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019



KANDIDAATINTYÖ

Tehovahvistin ultraäänilähttimelle.

Juho-Tuomas Matero

Ohjaaja: Kari Määttä

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA**

2019

Matero J-T. (2019) Tehovahvistin ultraäänilähttimelle. Oulun yliopisto, elektronikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma, Kandidaatintyö, 22 s.

TIIVISTELMÄ

Tässä kandidaatintyössä suunniteltiin tehovahvistin, joka vahvistaa logiikkatasoisen signaalin 60 W tehoksi ultraäänilähttimelle. Suunnittelussa käytettiin apuna piirisimulaattoria. Suunnitellusta vahvistinpiiristä toteutettiin piirilevy EDA-ohjelmistolla. Rakennetun tehovahvistimen toimintaa tutkittiin mittamalla jännitesignaaleja resistiivisten kuormien sekä ultraäänivahvistimen yli.

Asiasanat: Tehovahvistin, Ultraääni, Elektronikka

Matero J-T. (2019) Power amplifier for ultrasonic transmitter. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering, Bachelor's Thesis, 22 p.

ABSTRACT

This bachelor's thesis consists of the design process of an amplifier, which amplifies a logic level signal to 60 W power for ultrasonic transducer. Circuit simulator was used for designing the circuit. Circuit board was designed from designed amplifier circuit using EDA-software. Operation of the assembled power amplifier was studied by measuring voltage signals across resistive loads and ultrasonic transducer.

Key words: Power Amplifier, Ultrasound, Electronics

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYS	4
LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET.....	5
1. JOHDANTO.....	6
2. TYÖN TEORIAA	7
2.1 Ultraäänilähetimet	7
2.2 Tehovahvistimet	8
3. TEHOVAHVISTIMEN SUUNNITTELU JA SIMULOINNIT	13
3.1 Pääteasteen suunnittelu.....	13
3.2 Ohjausasteen suunnittelu	15
3.3 Piirilevyn suunnittelu	17
4. MITTAUKSET	18
4.1 Mittaukset resistiivisillä kuormilla.....	18
4.2 Mittaukset ultraäänilähettimellä	19
5. POHDINTA.....	20
5.1 Kehityskohteita.....	20
5.2 Muita huomioita	20
6. YHTEENVETO	21
7. LÄHTEET	22

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

EDA	Electronic Design Automation
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
NMOS	n-kanavainen MOSFET
PMOS	p-kanavainen MOSFET
I_D	MOSFET:n nieluvirta
V_{DS}	MOSFET:n nielun ja lähteen jännite-ero
V_{GS}	MOSFET:n hilan ja lähteen jännite-ero
V_T	MOSFET:n kynnysjännite
A	Ampeeri, sähkövirran yksikkö
nF	Nanofaradi, kapasitanssin yksikkö
pF	Pikofaradi, kapasitanssin yksikkö
μ F	Mikrofaradi, kapasitanssin yksikkö
kHz	Kilohertsi, taajuuden yksikkö
V	Voltti, jännitteen yksikkö
W	Watti, tehon yksikkö
Ω	Ohmi, resistanssin yksikkö
k Ω	Kilo-ohmi, resistanssin yksikkö
m Ω	Milliohmi, resistanssin yksikkö
mil	Tuuman tuhannesosa, pituuden yksikkö
mm	Millimetri, pituuden yksikkö

1. JOHDANTO

Ultraäänilähettimeä käytetään nykyään esimerkiksi mittalaitteissa, lääketieteellisessä kuvantamisessa sekä ultraäänipesureissa. Ultraäänilähettimet vaativat perinteisten kaiuttimien tapaan tehoa, joten niitä syöttämään tarvitaan tehovahvistin.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli suunnitella tehovahvistin, joka vahvistaa logiikkatasoisen signaalin 60W:n tehoksi BJC-6860T-49SS ultraäänilähettimelle. Työhön kuului vahvistimen suunnittelu, simulointi, rakentaminen sekä mittaaminen. Suunnittelussa keskeisiä asioita olivat piirin rakenteen suunnittelu, sekä oikeiden komponenttien valinta. Vahvistimen säröominaisuuksilla ei ollut tässä työssä juurikaan merkitystä, joten suunnittelussa keskityttiin saamaan lähettimelle riittävä määrä tehoa välittämättä signaalin muodosta.

Työn suunnitteluosassa käytettiin LTspice IV-simulaattoria, jotta saatiin kokeiltua erilaisten komponenttien ja rakenteiden vaikutusta piirin käyttäytymiseen. Rakennetun vahvistimen mittaustuloksia oli myös hyvä verrata simuloimalla saatuihin tuloksiin. Suunnitellusta piirikaaviosta tehtiin piirilevy, joka suunniteltiin EDA-ohjelmistolla. Tässä työssä EDA-ohjelmistona toimi Autodesk EAGLE, jonka ilmainen versio riitti tämän työn tarpeisiin.

2. TYÖN TEORIAA

2.1 Ultraäänilähetimet

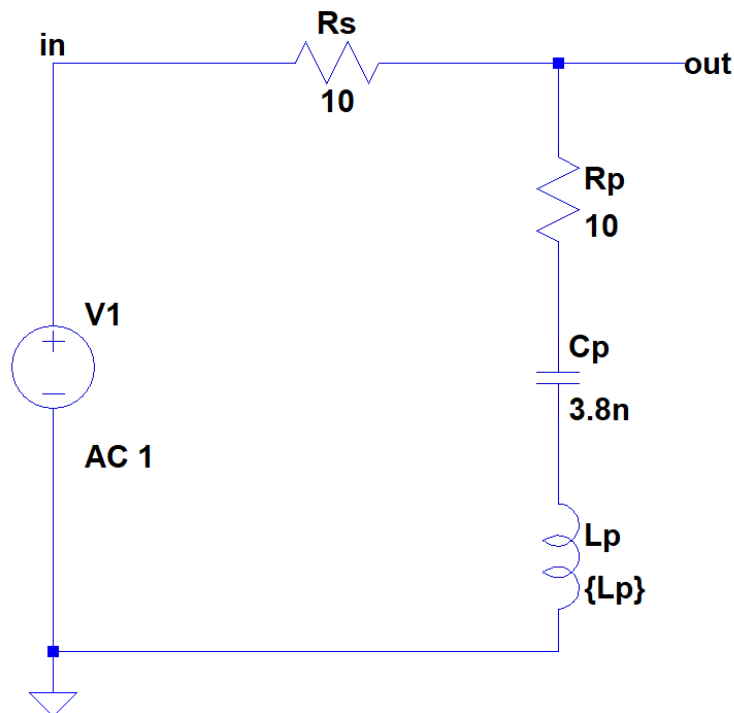
Ultraääniksi kutsutaan ääniä, joiden taajuus on ihmisen kuuloalueen yläpuolella. Ihmisen kuuloalueen ylärajan ajatellaan yleisesti olevan noin 20 kHz.

Ultraääniä voidaan tuottaa pietsosähköisen ilmiön avulla. Pietsosähköisessä kiteessä syntyy sähkökenttä, kun siihen kohdistuu muodonmuutos. Tämä ilmiö johtuu varausten epäsymmetrisyydestä kiderakenteessa. Pietsosähköinen ilmiö toimii myös toisinpäin: kiteessä syntyy muodonmuutos, kun siihen kohdistuu sähkökenttä. Tämä muodonmuutos saa ympäröivässä väliaineessa aikaan värähtelyä, jonka taajuus on sama kuin pietsosähköiseen kiteeseen kohdistetulla sähkökentällä. Ultraääntä syntyy siis, kun pietsosähköiseen kiteeseen kohdistetaan yli 20 kHz:n taajuinen jännitesignaali. [1 s. 89]

Värähtelevän pietsokiteen sijaiskytkentä on vastuksen, kondensaattorin ja kelan sarjakytkentä, joten sille on mitattavissa resonanssitaajuuksia, joilla kiteen impedanssi minimoituu, ja kide värähtelee eniten [1 s. 92]. Resonanssitaajuudet voidaan mitata kuvan 1 mukaisella kytkennällä, josta voidaan mitata pietsokiteen ekvivalenttinen resistanssi:

$$R_{ua} = \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \cdot R_s, \quad (1)$$

missä R_{ua} on pietsokiteen ekvivalenttinen resistanssi. R_p , C_p ja L_p ovat pietsokiteen sijaiskytkentä. Resonanssitaajuudet ovat tulosignaalin taajuuksia, joilla ekvivalenttinen resistanssi on pienimmillään.



Kuva 1. Ultraäänilähtetimen mittauskytkentä.

Työssä käytetty ultraäänilähetin oli mallia BJC-6860T-49SS, ja sille oli mitattu ennen työn aloittamista seuraavat resonanssitaajuudet ja ekvivalenttiset resistanssit:

Taulukko 1. Lähettimen resonanssitaajuudet ja ekvivalenttiset resistanssit

Taajuus	Ekvivalenttinen resistanssi
30,020 kHz	11,6 Ω
69,924 kHz	9,7 Ω
85,998 kHz	6,3 Ω
137,907 kHz	3,4 Ω

Valmistajan internetsivuilta [2] löytyi myös seuraavat vahvistimen suunnittelussa hyödylliset tiedot:

Taulukko 2. Ultraäänilähettimen ominaisuuksia

Taajuus	68 kHz \pm 1 kHz
Teho	60 W
Kapasitanssi	3800 pF
Resistanssi resonanssitaajuudella	10 – 20 Ω

Simuloinneissa käytetyn induktanssin L_p arvo voidaan määrittää simulaattorin paramkomennolla niin, että resonanssitaajuudella lähettimen kapasitanssi ja induktanssi kumoavat toisensa. Induktanssin lausekkeeksi tulee siis:

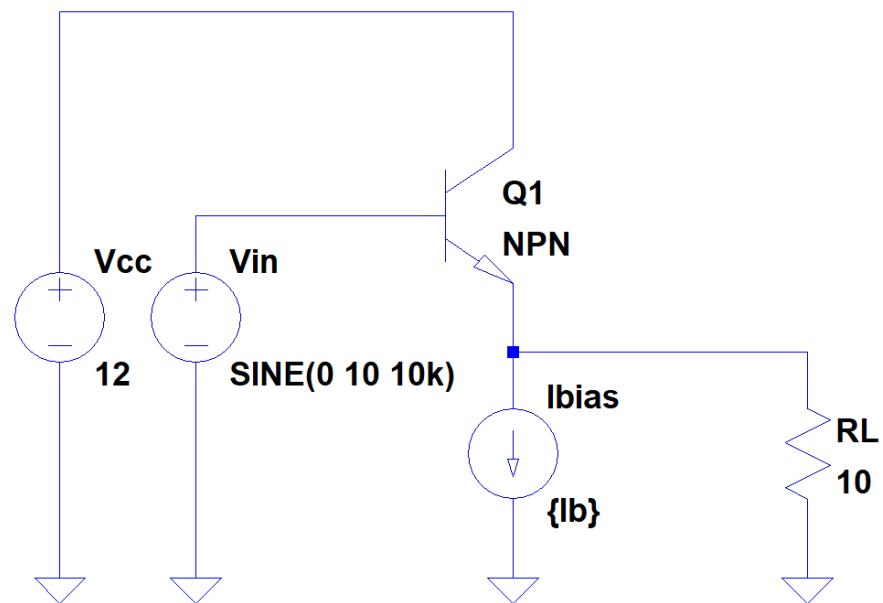
$$L_p = \frac{1}{(2\pi f)^2 \cdot C_p}. \quad (2)$$

2.2 Tehovahvistimet

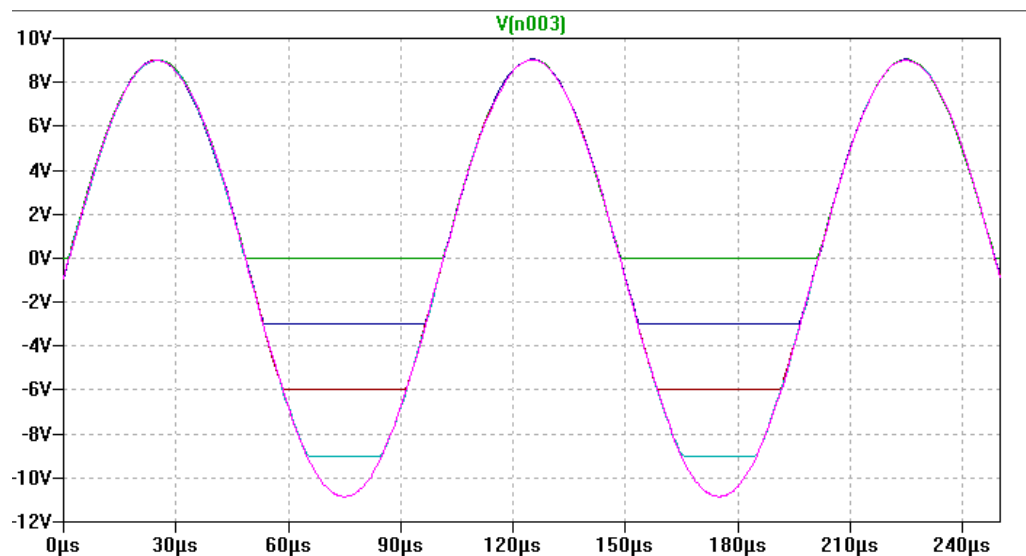
Tehovahvistimet ovat vahvistinasteita, joiden tarkoituksena on riittävän tehotason syöttäminen kuormaan. Tehovahvistimet voidaan jakaa rakenteen ja toimintaperiaatteen mukaan erilaisiin luokkiin, joista äänen vahvistamiseksi soveltuvat esimerkiksi A-, B-, sekä AB-luokat. Kaikki nämä voidaan toteuttaa bipolaari- ja kanavatransistoreilla. [3 s. 645]

A-luokan tehovahvistimissa transistori johtaa koko tulosignaalin jakson ajan. A-luokan tehovahvistimet kuluttavat jatkuvasti biasvirtaa, joten ne kärsivät huonosta hyötysuhteesta. A-luokan vahvistin voidaan toteuttaa esimerkiksi emitteriseuraajalla. [3 s. 620 - 623]

Kuvassa 2 on havainnollistettu emitteriseuraajan perusrakenne NPN-transistoria käyttäen. Kuvasta 3 nähdään jännite kuorman yli biasvirran arvoilla 0 A; 0,3 A; 0,6 A; 0,9 A ja 1,1 A, kun tulosignaalinä on ± 10 V sinimuotoinen jännite. Lähtösignaalin negatiivinen puolijakso leikkautuu aiemmin pienemmällä biasvirran arvoilla. Tässä esimerkissä biasvirran tulisi olla siis 1,1 A.



Kuva 2. Emitteriseuraajan perusrakenne.

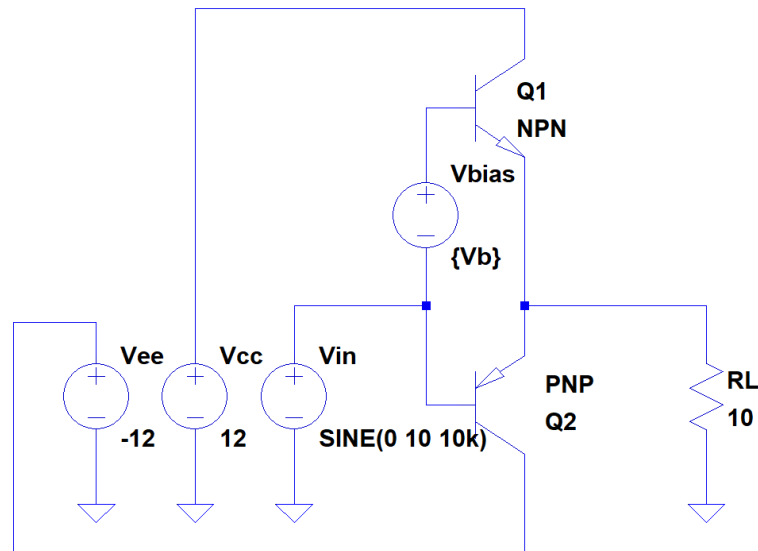


Kuva 3. Jännite kuorman yli eri biasvirran arvoilla emitteriseuraajassa.

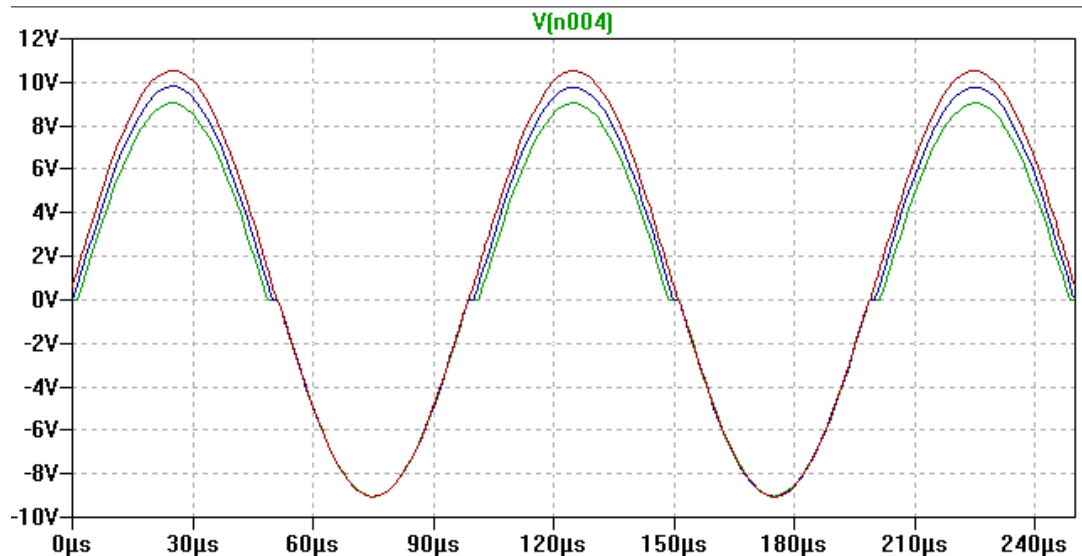
A-luokan vahvistimien huonoon hyötysuhteeseen tuovat parannusta B-luokan vahvistimet, joissa transistorit johtavat puolen tulosignaalin jakson ajan. B-luokan vahvistimet ovat usein push-pull -tyyppisiä, jossa eri polarisuuden omaavat transistorit johtavat vuorotellen puolen jakson ajan. Push-pull -vahvistimissa on kuitenkin ylimesosäröä, joka johtuu transistorien cut-off tilasta tulosignaalin ollessa lähellä nollaa. Ylimesosäröllä on merkitystä audiosovelluksissa, joissa särö voitaisiin kuulla. Ylimesosäröä voidaan vähentää lisäämällä toisen transistorin tuloon biasjännitettä, jolloin toinen transistoreista johtaa yli puolet jaksonajasta. Tällöin kyseessä on AB-luokan

vahvistin. Push-pull -vahvistimet tarvitsevat toimiakseen kaksipuoleisen käyttöjännitteen. [3 s. 623 - 625]

Push-pull -vahvistimien rakennetta on havainnollistettu kuvassa 4 yhtä NPN- ja yhtä PNP-transistoria käyttäen. Kuvassa 5 on jännite kuorman yli biasjännitteen arvoilla 0 V; 0,75 V ja 1,5 V, kun tulosignaalinä on ± 10 V sinimuotoinen jännite. Yli-
menosäro pienenee biasjännitteen kasvaessa.



Kuva 4. Push-pull -vahvistimen perusrakenne.



Kuva 5. Jännite kuorman yli eri biasjännitteen arvoilla push-pull -vahvistimessa.

Joihinkin sovelluksiin sopiva tapa toteuttaa tehovahvistinaste on kokosiltakytkentä, jossa kuorma sijoittuu kahden transistoriparin väliin. Nämä parit koostuvat PMOS- ja NMOS-transistoreista, joiden hiloilla on yhteinen tulosignaali. Kuorman eri puolilla olevilla transistoripareilla on oltava vastakkaisvaiheiset tulosignaalit, jotta transistoriparin yli ei synny oikosulkuja. Tulosignaalit ohjaavat transistoreja niin, että kuorman

toisella puolella PMOS on johtavassa tilassa, jolloin samaan aikaan toisella puolella johtaa NMOS. Kokosiltakytkennän etuna saadaan kuorman yli vaihtojännite ilman suuria biasvirtoja, vaikka käytössä on pelkästään positiivinen käyttöjännite. Kytkentää ohjaamaan tarvitaan kanttimuotoiset signaalit. Kokosiltakytkentää käytetään yleisesti ohjaamaan sähkömoottoreita. [4]

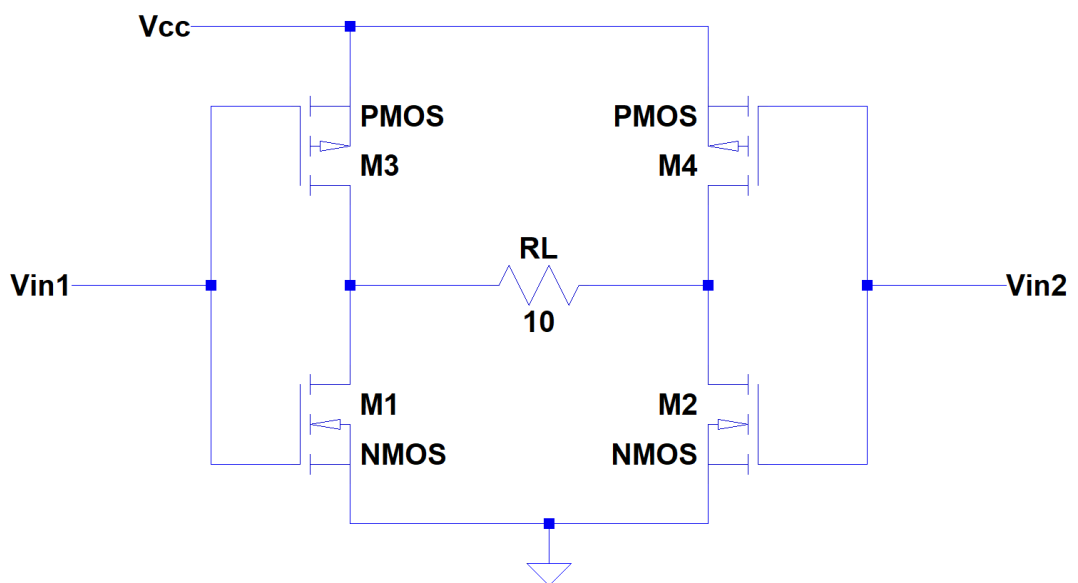
Edellä mainittu toiminta saadaan aikaan kytkemällä PMOS:ien lähteet positiiviseen käyttöjännitteeseen ja NMOS:ien lähteet maapotentiaaliin, jolloin NMOS on johtavassa tilassa, kun

$$V_{GS} > V_T, \quad (3)$$

eli hilajännite on suurempi kuin transistorin kynnyksjännite. PMOS on johtavassa tilassa, kun

$$V_{SG} > V_T, \quad (4)$$

eli hilajännite on kynnyksjännitteen verran pienempi kuin lähdejännite. Nämä ehdot ja edellä mainittu toiminta täyttyvät, kun transistoripareja ohjaavina signaaleina ovat vastakkaisvaiheiset positiiviset käyttöjännitteiden suuruiset kanttiaallot. Kokosiltakytkentää on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Kokosiltakytkennän perusrakenne.

Vahvistimen kuorman yli tarvittava jännite voidaan laskea kaavalla:

$$V = \sqrt{P \cdot R}, \quad (5)$$

eli vaaditun tehon ja kuormaresistanssin avulla voidaan laskea vaadittu käyttöjännitteen suuruus, kun oletetaan vahvistimen transistoreissa tapahtuvat jännitehäviöt mität-

tömän pieniksi. Taulukoiden 1 ja 2 perusteella voitiin tässä työssä käyttää kuormaresistanssin arvona 10Ω . Vaadittu teho on 60 W . Sijoittamalla nämä arvot kaavaan 5 saatiin vaaditun käyttöjännitteen arvoksi $24,495 \text{ V}$, joka voitiin pyöristää 25 V :iin.

Työssä suunniteltua vahvistinta ei voitu toteuttaa emitteriseuraajalla sen huonon hyötysuhteen vuoksi. Push-pull -tyyppinen vahvistin taas tarvitsee toimiakseen kaksipuoleisen käyttöjännitteen. Kokosiltakytkentä ei tarvitse biasvirtaa, ja se toimii positiivisella käyttöjännitteellä. Lisäksi ultraäänilähetintä voidaan ajaa kantimuotoisella jännitesignaalilla. Näillä perusteilla suunniteltava vahvistin päätettiin toteuttaa kokosiltakytkennällä.

3. TEHOVAHVISTIMEN SUUNNITTELU JA SIMULOINNIT

3.1 Pääteasteen suunnittelu

Vahvistimen suunnittelu aloitettiin simuloimalla kokosiltakytkentää, jossa kuormana käytettiin kuvan 1 mukaista pietsokiteen sijaiskytkentää. Kuormaresistanssina käytettiin taulukoiden 1 ja 2 perusteella 10Ω arvoa. Kapasitanssina käytettiin taulukosta 2 otettua $3,8 \text{ nF}$ kapasitanssiarvoa. Induktanssin määrittämiseen käytettiin kaavaa 2.

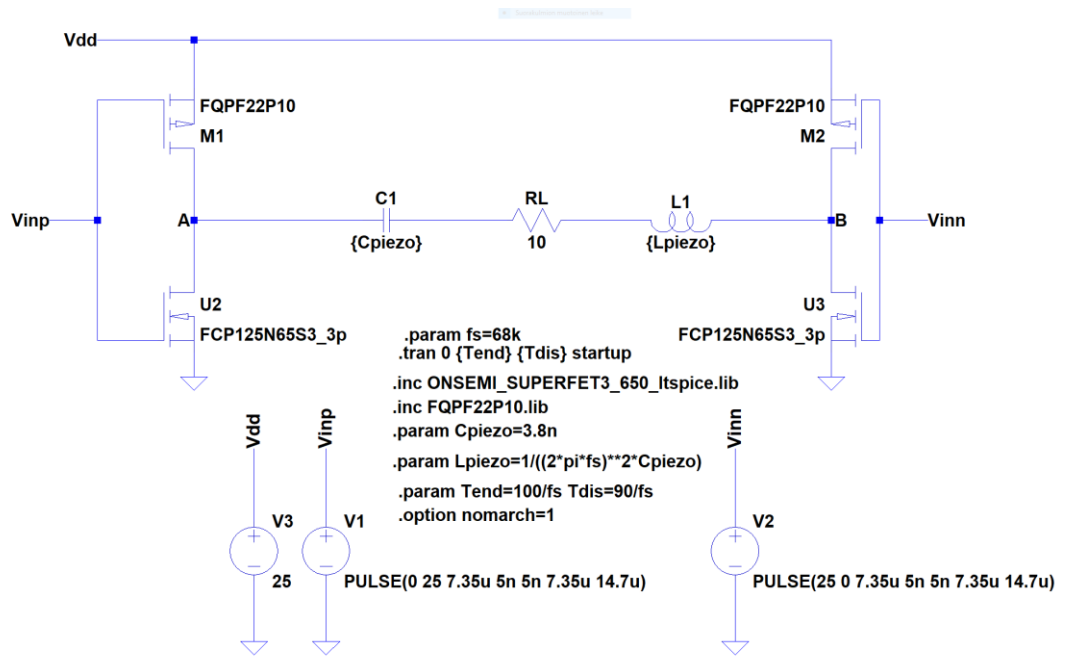
MOSFET-transistorien hilojen ajamiseen käytetään usein hilaohjainpiiriä (gate driver), jota mallinnettiin kahdella vastakkaisvaiheisella 25 V kanttaaltosignaaliilla. Näiden signaalien taajuutena voitiin käyttää taulukoiden 1 ja 2 perusteella valmistajan ilmoittamaa 68 kHz arvoa.

Pääteasteen transistorien tuli kestää vähintään 25 V V_{DS} - ja V_{GS} -jännite sekä vähintään $2,5 \text{ A}$ nieluvirta. Transistorien kanavaresistanssien tuli olla häviöiden minimoimiseksi myös mahdollisimman pieni. Transistoreille piti olla saatavilla myös simulointimallit, jotta pääteasteen toimintaa voitiin simuloida tarkasti ennen vahvistimen rakentamista. Kaikki komponentit haluttiin rakentamisen helpottamiseksi läpivientikoteloissa. Valittujen transistorien tärkeimmät ominaisuudet on esitetty taulukossa 3.

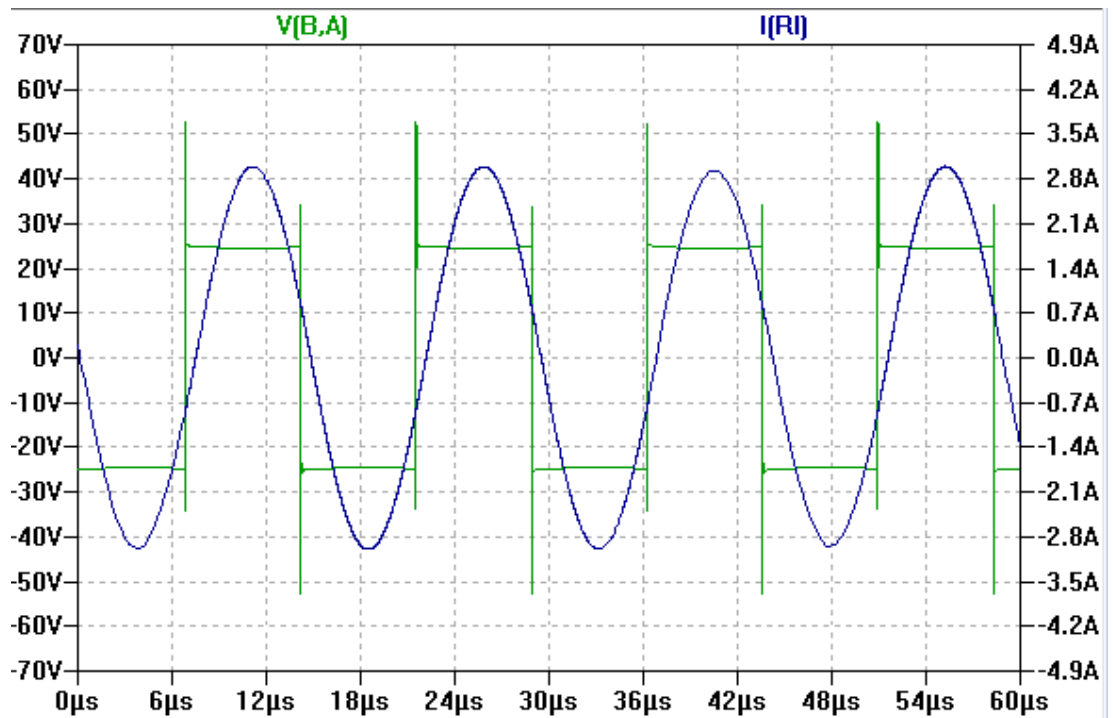
Taulukko 3. Pääteasteen transistorien ominaisuuksia

	NMOS	PMOS
Malli	FCP125N65S3	FQPF22P10
I_D (max)	15 A	-9,3 A
V_{GS} (max)	$\pm 30 \text{ V}$	$\pm 30 \text{ V}$
V_{DS} (max)	650 V	-100 V
R_{DS}	105 m Ω	96 m Ω
Kotelointi	TO-220	TO-220

Pääteastetta simuloitiin kuvan 7 mukaisella kytkennällä, jolla saatiin kuorman yli kuvan 8 mukaiset jännite- ja virtasignaali. Huomattiin, että virtasignaali kuorman yli oli pyörinyt lähes sinimuotoiseksi. Pääteaste toimitti kuormaan lähes halutun tehon, joten seuraavaksi voitiin siirtyä suunnittelemaan MOS-transistorien ohjausta.



Kuva 7. Pääteasteen simulointiin käytetty piiri parametreineen.



Kuva 8. Jännite- ja virtasignaalit pääteasteen simuloinnissa.

3.2 Ohjausasteen suunnittelu

Hilaohjainpiirit toimivat seuraavalla periaatteella: tuloihin tulee logiikkatasoinen signaali, jolloin lähtö ajetaan käyttöjännitteeseen tai muuhun ennalta määritettyyn jännitteeseen, kun tulo on tilassa 1. Muutoin lähtö ajetaan maahan. Invertoiva tulo ajaa lähdön maahan, kun tulossa on 1, muutoin lähtö ajetaan edellä mainittuun jännitteeseen.

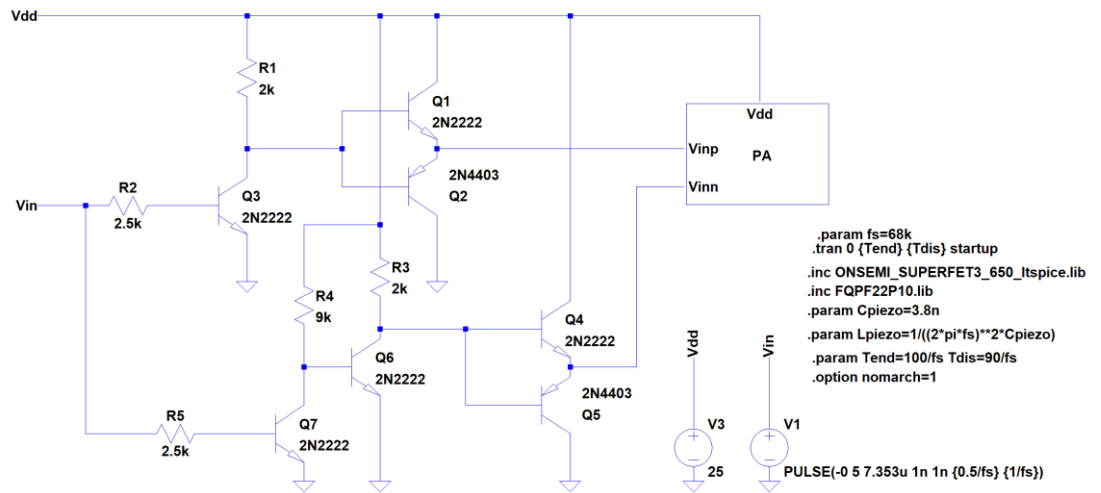
Pääteasteen transistoreita ohjaamaan tarvittiin ohjainpiiri, jossa oli kaksi lähtöä, invertoiva ja ei-invertoiva tulo, kyky ajaa lähdöt vähintään 25 V jännitteeseen sekä riittävä nopeus 68 kHz:n taajuudelle. Muita ominaisuuksia ohjainpiiriltä ei vaadittu. Hilaohjaimeksi löytyi datalehtien perusteella vaatimukset täyttäviä valmiita IC-piirejä, mutta niille ei löytynyt simulointimalleja, joten ohjausaste päätettiin suunnitella itse.

Pääteasteen hilojen ajaminen onnistuu kappaleessa 2.2 esitellyllä push-pull -vahvistinasteella, joten ohjausasteeseen suunniteltiin ensin kaksi tällaista vahvistinta. Kyseisten vahvistinasteiden vahvistus on lähellä yhtä, joten niiden tulosignaali oli vahvistettava jollain tavalla käyttöjännitteen suuruiseksi. Tämä vahvistus saatiin aikaan yhteisemitterivahvistimilla, joiden vahvistus oli asetettava tarpeeksi suureksi saturoimaan niiden kollektorijännitteet käyttöjännitteeseen. Vahvistus sekä kanta- ja kollektorivirrat asetettiin sopiviksi 2 k Ω ja 9 k Ω kanta- ja kollektorivastuksilla. Toisen yhteisemitteriasteen perään suunniteltiin vaiheen kääntämiseksi ylimääräinen yhteisemitterivahvistin. Näin pääteasteen hiloille saatiin vastakkaisvaiheiset signaalit.

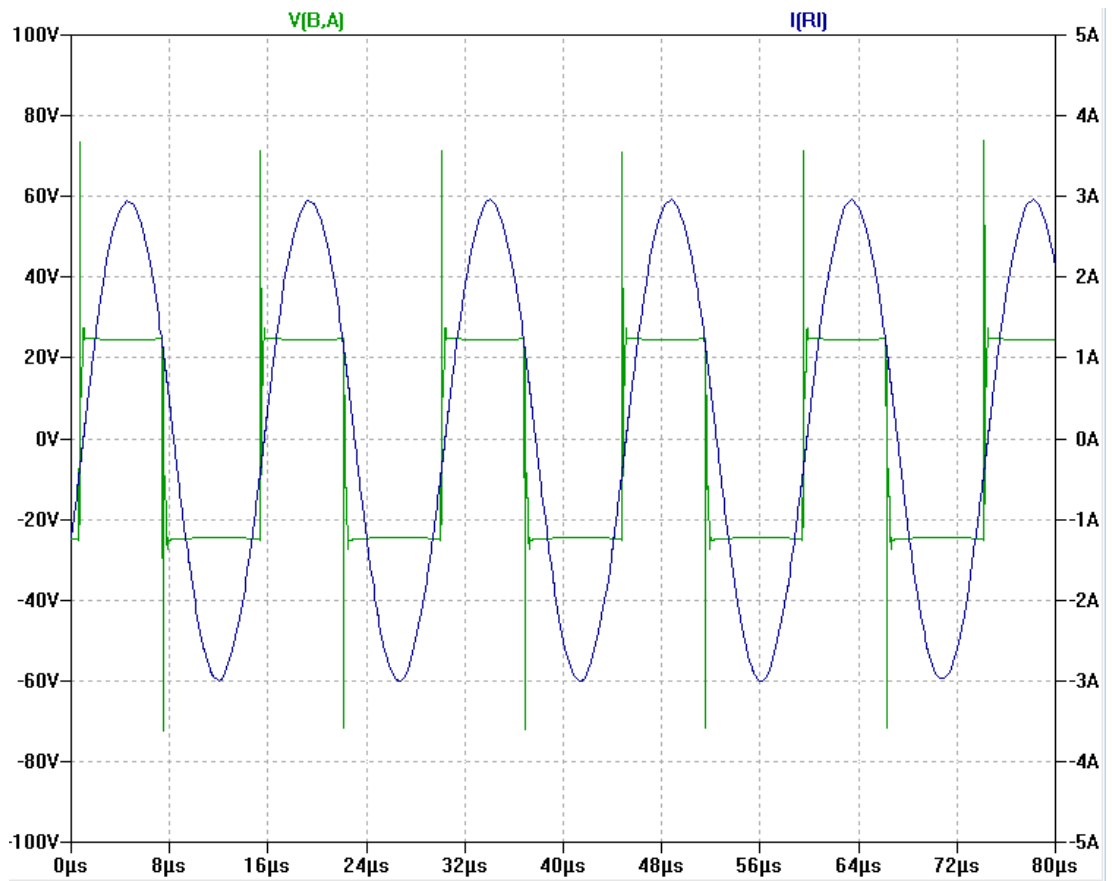
Ohjausaste päätettiin toteuttaa bipolaaritransistoreilla. Vaatimuksena näille transistoreille oli vähintään 25 V jännitekesto V_{CE} :lle. Vaatimukset täyttävät transistorit olivat PN2222A sekä 2N4403, jotka ovat yleiskäyttöön sopivia transistoreita TO-92-kotelossa. Transistorien tärkeimmät ominaisuudet on esitelty taulukossa 4. Vahvistimen piirikaavio kokonaisuudessaan sekä simulointitulokset on esitetty kuvissa 9 ja 10. Kuvan 10 signaalit ovat hyvin samankaltaisia kuvan 8 signaalien kanssa, joten ohjausasteen rakenne katsottiin toimivaksi. Kuvan 7 pääteaste on piirretty kuvaan 9 selkeyden vuoksi omana lohkonaan.

Taulukko 4. Ohjausasteen transistorien ominaisuuksia

	NPN	PNP
Malli	PN2222A	2N4403
I_C (max, jatkuva)	600 mA	-600 mA
V_{CE} (max)	30 V	-40 V
V_{BE}	5 V	-5 V



Kuva 9. Vahvistimen piirikaavio.

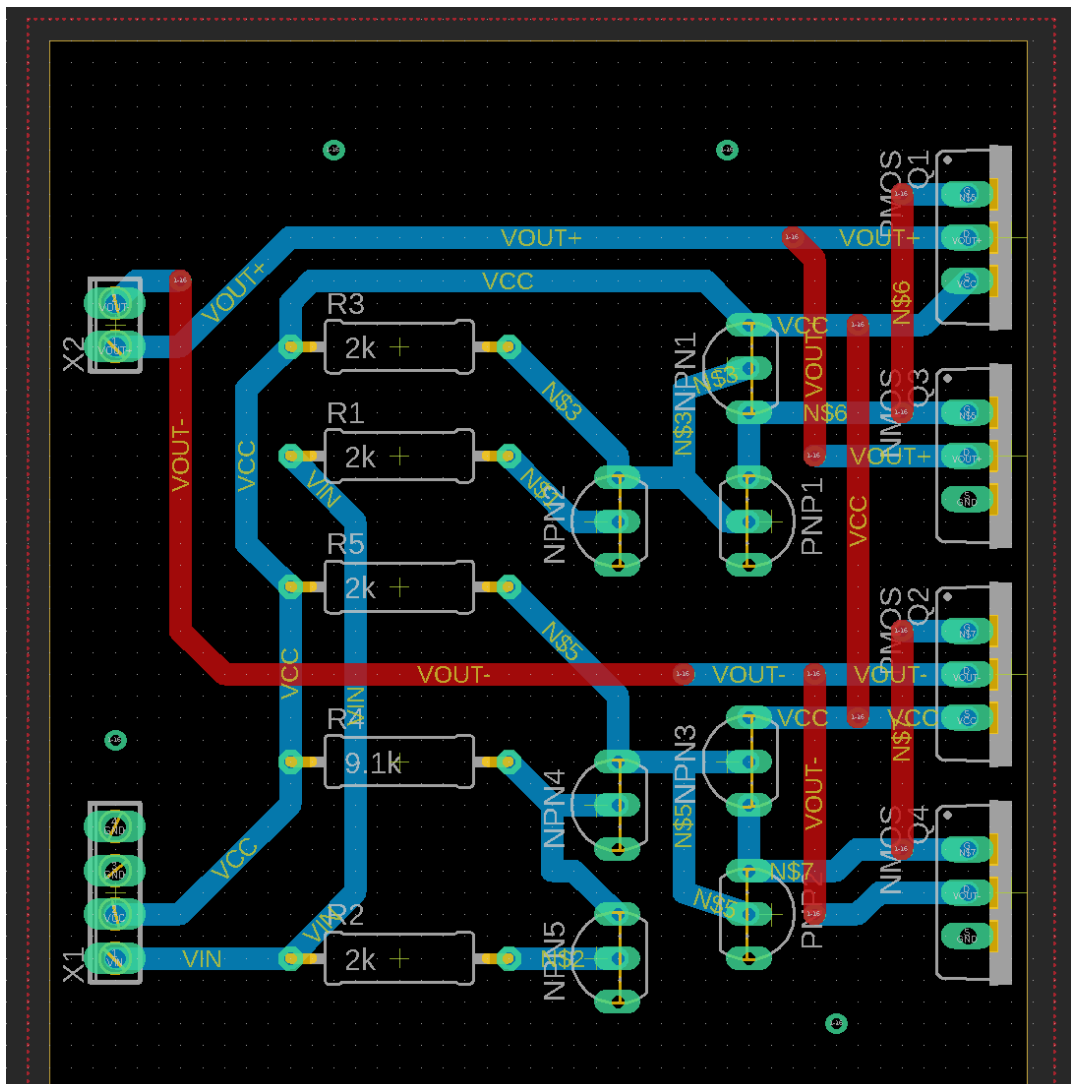


Kuva 10. Vahvistimen simuloititulokset.

3.3 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevyn suunnittelu aloitettiin piirtämällä suunnittelutyökalulla vahvistimen piirikaavio liitännöineen. Suunnittelutyökaluna käytettiin Autodesk EAGLE:n ilmaista versiota. Piirikaavion komponentit valittiin EAGLE:n komponenttikirjastosta oikea kotelo ja jalkajärjestys huomioiden. Käyttöjännite-, maa-, tulo- sekä lähtöliitännöiksi valittiin testauksen helpottamiseksi ruuvattavat riviliittimet.

Piirikaavion perusteella saatiin suunniteltua piirilevyn layout sijoittamalla valitut komponentit oikeille paikoilleen. Johtimien ja johtimien välien minimileveydeksi määritettiin 50 mil eli 1,27 mm. Piirilevystä suunniteltiin kaksikerroksinen, jotta levyn jyrsiminen onnistuu yliopiston omissa tiloissa. Piirilevyn johdotukset on esitetty kuvassa 11 selkeyden vuoksi ilman maatasoja. Punaiset johtimet ovat levyn komponenttipuolella, siniset juotospuolella, eli suurin osa johtimista haluttiin sijoittaa juotospuolelle. Piirilevystä tehtiin EAGLE:lla gerber-tiedostot, jotka lähetettiin yliopiston piirilevypajalle työstettäväksi. Piirilevyn paksuudeksi valittiin 1,6 mm, kun taas kuparikerroksen paksuudeksi valittiin 35 µm. Nämä olivat paksuimmat valittavissa olevat arvot. Valmiin piirilevyn mitat olivat 56 mm x 61 mm.



Kuva 11. Piirilevyn johdotukset.

4. MITTAUKSET

4.1 Mittaukset resistiivisillä kuormilla

Valmiiseen piirilevyyn juotettiin komponentit yliopiston Fab Labissa. Samalla aloitettiin vahvistimen toiminnan mittaukset resistiivisillä kuormilla. Tulosignaalksi asetettiin 68 kHz positiivinen kanttaalto, jonka amplitudi oli 5 V. Käyttöjännitteeksi asetettiin 25 V. Kuormana käytettiin tehovastuksia ja niiden yhdistelmiä välillä 1,8 k Ω – 12,9 Ω . Jännite mitattiin oskilloskoopilla kuorman molemmin puolin maatasoon verrattuna, koska differentiaalisia mittapäitä ei ollut saatavilla.

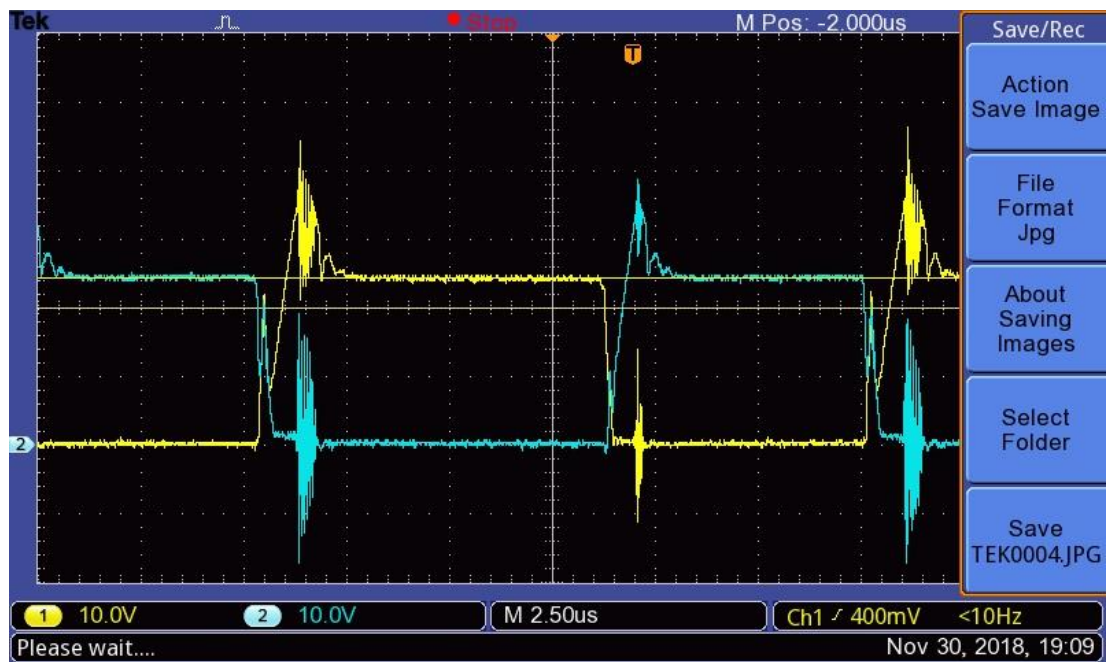
Kuormasta mitattiin likipitäen kuvan 12 kaltaiset jännitekäyrät kaikilla resistiivisten kuormien arvoilla. Resisttiiviseen kuormaan saatu teho voidaan laskea kanttisignaalista Ohmin lain avulla seuraavasti:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (6)$$

jolloin eri kuormaresistanssiarvoilla saatiin kuormaan taulukon 5 mukaiset tehot. Tätä suurempia tehotasoja ei voitu mitata käytössä olleilla tehovastuksilla nostamatta käyttöjännitettä suunniteltua suuremmaksi.

Taulukko 5. Kuormaan saatu teho resistiivisillä kuormilla

Kuormaresistanssi	Teho
1,8 k Ω	0,35 W
134 Ω	4,66 W
72 Ω	8,54 W
33 Ω	18,64 W
12,9 Ω	47,68 W



Kuva 12. Jännitteet resistiivisen kuorman molemmin puolin.

Kuorman yli mitattiin kaikilla kuormaresistanssin arvoilla likipitään käyttöjännitteen suuruinen kanttiaaltosignaali. Jännitesignaalinä näkyy jonkin verran säröytymistä, kun pääteasteen transistorit siirtyvät johtavaan tilaan. Lisäksi pääteasteen transistorien havaittiin kuumenevan voimakkaasti pienillä kuormaresistansseilla. Mittaustulokset näyttivät lupaavilta, joten mittauksia jatkettiin käyttäen kuormana ultraäänilähetintä.

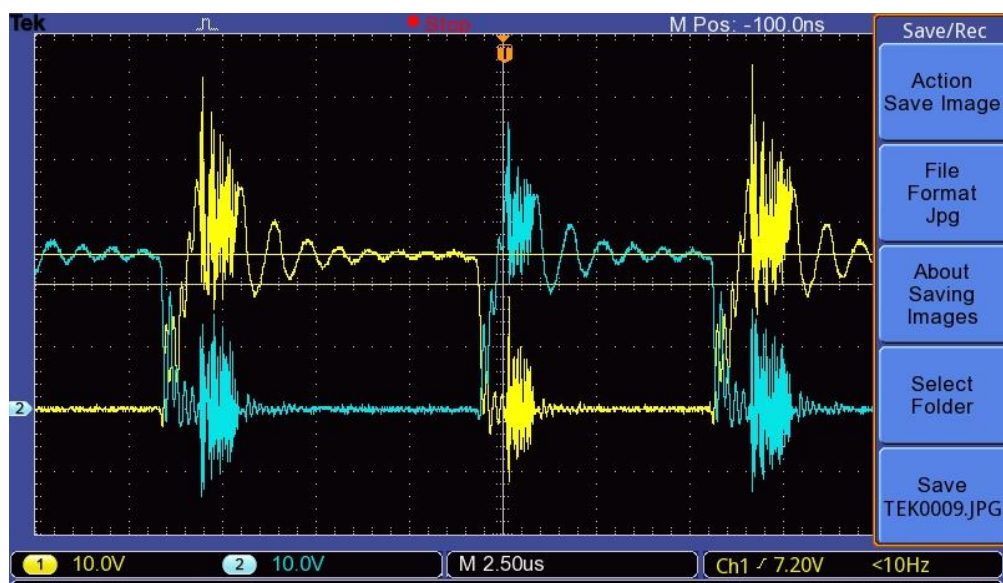
4.2 Mittaukset ultraäänilähettimellä

Vahvistimen mittaaminen käyttämällä kuormana ultraäänivahvistinta toteutettiin samanlaisella kytkennällä, kuin resistiivisen kuorman tapauksessa, eli oskilloskoopin mittapäät kytkettiin mittaamaan jännitettä lähettimen molemmiin puolin. Lähettimen läpi kulkevaa virtaa ei saanut mitattua suoraan ilman differentiaalisia mittapäitä, joten resonanssitaajuutta etsittiin säätämällä tulosignaalin taajuutta mitatun 69,924 kHz resonanssitaajuuden ympäristössä ja seuraamalla käyttöjännitelähteestä otettua virtaa. Jos oletetaan käyttöjännitelähteen mittaavan virran tehollisarvoa, sekä ohjausosan kuluttaman virran olevan huomattavasti kuormavirtaa pienempi, voidaan kuormaan saatu teho laskea kaavalla:

$$P = U \cdot I, \quad (7)$$

missä U on lähettimen yli mitattu jännite ja I on käyttöjännitelähteestä mitattu virta.

Lähettimen yli mitattiin kuvan 13 mukainen jänniteaalto kaikilla tulosignaalin taajuuksilla. Signaali oli lähes käyttöjännitteen suuruista kanttiaaltoa, mutta jännitesignaalinä näkyi enemmän säröytymistä, kuin resistiivisellä kuormalla. Käyttöjännitelähteestä otettiin maksimivirta, kun tulosignaalin taajuus oli 69,641 kHz. Jännitelähteestä otettu maksimivirta oli 1,3 – 1,4 A välissä, joten kaavalla 7 laskettiin kuormaan saaduksi maksimitehoksi noin 30 W. Pääteasteen transistorien havaittiin kuumenevan voimakkaasti myös ultraäänilähetinkuormalla. Mahdollisia syitä maksimitehon jäämiseen tavoitellusta 60 W arvosta on pohdittu kappaleessa 5.



Kuva 13. Jännitesignaali ultraäänilähettimen yli.

5. POHDINTA

5.1 Kehityskohteita

Vahvistimen mittaustuloksista havaittiin, että resistiiviseen kuormaan saatu teho oli lähellä tavoiteltua tehotasoa. Ultraäänilähettimeen saatu teho oli huomattavasti pienempi kuin resistiiviseen kuormaan saatu teho, mikä oli työssä ilmenneistä ongelmista suurin. Tämä johtunee itse lähettimen ominaisuuksista: lähettimeen syötettävä signaali olisi säädettävä hyvin tarkasti lähettimen resonanssitaajuudelle, mitä mittauksissa ei onnistuttu tekemään. Tästä johtuen lähettimen impedanssi jäi tavoiteltua suuremmaksi, jolloin lähettimeen saatu teho pieneni.

Seuraava mittauksissa ilmennyt ongelma oli jännitesignaalin säröytyminen pääteasteen transistorien tilanvaihoissa. Säröytymistä ja värähtelyä esiintyi etenkin lähettimellä tehdyissä mittauksissa. Mittausten jälkeen etsittiin ratkaisua ongelmaan simuloimalla. Simulaattorissa toimivaksi ratkaisuksi osoittautui 0,5 μF kondensaattorien kytkeminen kaikkien pääteasteen transistorien rinnalle. Tällä kapasitanssiarvolla piikitäisy jännitesignaali hävisi lähestulkoon kokonaan nousu- ja laskuaikojen pysyessä riittävän nopeina.

Kolmas mittauksissa ilmennyt ongelma oli pääteasteen transistorien voimakas kuumineminen, mikä voisi johtaa vahvistimen rikkoutumiseen. Transistorien lämpötilaa ei mitattu, mutta ne tuntuivat kuumilta kosketukselle. Kuuminemisestä kärsivät erityisesti PMOS:t, joiden TO-220-koteloiden jäähdytysrivat olivat muovia. Ongelmaa voisi korjata valitsemalla metalliripaiset transistorit sekä käyttämällä jäähdytysiiliä pääteasteen transistorien viilentämiseen.

Vahvistimen jatkokehittelyyn syntyi suunnittelun aikana joitakin ideoita. Vahvistinta voisi käyttää itsenäisenä laitteena lähettimen kanssa lisäämällä siihen virtalähteen sekä tulosignaali-generaattorin. Virtalähteen tulisi muuntaa sähköverkosta saatava vaihtojännite riittävän stabiiliksi 25 V tasajännitteeksi tavalla tai toisella. Tulosignaalin generoiminen toteutettaisiin jonkinlaisella oskillaattorilla.

5.2 Muita huomioita

Työssä pääsi syventymään monipuolisesti aiemmissa opinnoissa esiintyneisiin aiheisiin. Suunnittelun jokainen vaihe tarjosi erilaisia aiemmista opinnoista ei-tuttuja haasteita, joihin oli löydettävä ratkaisut. Tällaisia haasteita olivat esimerkiksi komponenttikirjastojen ja -symbolien lisääminen simulaattoriin sekä piirilevyn suunnittelu EDA-ohjelmistolla. Ratkaisut tämän tyyppisiin ongelmiin löytyivät usein internetistä löytyvistä tutoriaaleista. Tällaisten asioiden opetteleminen palvelee luultavasti myös tulevia opintoja sekä menestymistä työelämässä.

Työn suorittaminen vastasi suurilta osin ennako-odotuksia, vaikka jotkin työvaiheet veivätkin enemmän aikaa kuin etukäteen oli ennakoitu. Eniten aikaa vei suunnittelun alku ja piirin simuloinnit, johtuen puutteellisista taidoista ohjelmistojen kuten simulaattorin käyttämisessä. Työn suorittaminen eteni suoraviivaisesti, kun piirin rakenne oli todettu simulaattorissa toimivaksi.

6. YHTEENVETO

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin 60 W ultraäänilähettimele tehovahvistinaste ja sen ohjausosa käyttäen apuna LTspice IV-piirisimulaattoria. Tehovahvistinaste toteutettiin kokosiltakytkennällä, jossa kytkiminä toimivat MOSFET-transistorit. Ohjausosa toteutettiin yhteisemitterikytketyillä bipolaaritransistoreilla.

Suunnitellusta piiristä suunniteltiin piirilevy käyttäen Autodesk EAGLE-ohjelmistoa. Komponentit valittiin läpivientikoteloissa juottamisen helpottamiseksi. Valmiiseen piirilevyyn juotettiin komponentit yliopiston Fab Labissa.

Rakennetun vahvistimen toimintaa tutkittiin mittaamalla Fab Labissa. Mittauksissa havaittiin, että vahvistin kykeni syöttämään resistiiviseen kuormaan 47 W tehon ilman suurempia ongelmia. Tätä suurempia tehoja ei pystytty mittaamaan resistiivisillä kuormilla sopivien tehovastusten puutteen vuoksi. Ultraäänilähettimeen saatiin syötettyä vain noin 30 W teho, joten mittauksissa jäätin tavoitetehosta. Mittauksissa havaittiin myös, että jännitesignaali kuorman yli oli epätoivottua säröä, ja että pääteasteen transistorit kuumenivat voimakkaasti suuria tehoja syötettäessä.

7. LÄHTEET

- [1] Beeby S. (2004) MEMS Mechanical Sensors, Artech House, Boston
- [2] BJ Ultrasonic (luettu 7.1.2019) Ultrasonic Cleaning Transducers, URL: <https://cdn1.bjultrasonic.com/wp-content/uploads/2012/10/Quote-of-Ultrasonic-Cleaning-Transducer.pdf>
- [3] Razavi B. (2015) Microelectronics, Second Edition, University of California, Los Angeles
- [4] Tantos A. (luettu 21.3.2018) H-Bridges – the Basics, URL: <http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>