

Opinnäytetyö (AMK)
Elektroniikka
Elektroniikkasuunnittelu
2016

Kasper Rautio

A-LUOKAN KUULOKEVAHVISTIN


TURKU AMK
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikan koulutusohjelma | Elektroniikkasuunnittelu

2016 | 30 sivua

Kasper Rautio

A-LUOKAN KUULOKEVAHVISTIN

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin audiovahvistimiin ja rakennettiin A-luokan kuulokevahvistin. A-luokan topologia valittiin, koska se mahdollistaa hyvin suunniteltuna parhaimman lineaarisuuden. Alun perin tavoite oli suunnitella vahvistin kokonaan itse diskreeteillä komponenteilla, mutta koska se osoittautui lopulta liian haastavaksi, päätettiin vahvistin rakentaa alan asiantuntijan suunnitteleman kytkennän mukaan.

Aluksi kerrotaan hieman vahvistinteoriaa ja esitellään eri vahvistinluokat. Valitun kuulokevahvistimen toiminta selostetaan mahdollisimman tarkasti ja esitetään simulaatiotulokset.

Lopuksi kerrotaan hieman piirilevyn layoutin suunnittelusta ja esitellään mittaustulokset. Mittaukset jouduttiin tässä tapauksessa tekemään koekytkentäalustalla, koska vahvistinta ei ehditty saamaan täysin valmiiksi piirilevylle.

ASIASANAT:

audioelektroniikka, vahvistimet, kuulokevahvistimet, A-luokka

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics degree programme | Electronics Design

2016 | 30 pages

Kasper Rautio

CLASS A HEADPHONE AMPLIFIER

This thesis concentrates on audio amplifiers and on building a class A headphone amplifier. Class A topology was chosen because when well designed, it allows for the highest linearity of all classes. Originally the objective was to design the amplifier completely with discrete components which are elementary electronic device constructed as a single element. However, because that proved to be too challenging, it was decided to build an amplifier circuit that was designed by an audio electronics expert.

The thesis starts with a brief introduction of amplifier theory and presents the various amplifier classes. The operation of the selected headphone amplifier is described as precisely as possible, and the results of simulations are shown.

Finally, the design of the printed circuit board (PCB) layout and the results of the measurements are presented. The measurements had to be carried out on a circuit that was built on breadboard, because the PCB of the amplifier could not be finalized properly in time.

KEYWORDS:

audio electronics, amplifier, headphone amplifier, class A

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 VAHVISTINTEORIAA	8
2.1 Vahvistinluokat	10
2.2 Tärkeimmät parametrit ja käsitteet	15
2.3 Negatiivinen takaisinkytkentä	16
3 KUULOKEVAHVISTIN	18
3.1 Kytkenän valinta	19
3.2 Selostus kytkennän toiminnasta	20
3.3 Vahvistimen simulointi	23
3.4 Piirilevyn layout-suunnittelu	25
3.5 Mittaukset	27
4 LOPUKSI	29
LÄHTEET	30

KUVAT

Kuva 1. Tyypillisen transistorivahvistimen lohkokaavio. [7]	9
Kuva 2. A-luokan pääteaste. [8]	10
Kuva 3. B-luokan pääteaste. [8]	11
Kuva 4. AB-luokan pääteaste. [8]	12
Kuva 5. D-luokan vahvistimen lohkokaavio. [10]	13
Kuva 6. G-luokan vahvistin, jossa on AB-luokan pääteaste. [11]	14
Kuva 7. Kahden eri vahvistimen amplitudivasteet. [12]	15
Kuva 8. Negatiivisen takaisinkytkennän toimintaperiaate. [12]	17
Kuva 9. Kuulokevahvistimen yhden kanavan kytkentä.	20
Kuva 10. Push-pull EF-asteen transistorien virrat. [5]	22
Kuva 11. Taajuusvaste 100 pF:n C3:lla. $f_H = 3,2$ MHz.	23
Kuva 12. Taajuusvaste 2 nF:n C3:lla. $f_H = 120$ kHz.	23
Kuva 13. Transienttialyyysin virta- ja jännitekuvaajat.	24
Kuva 14. Kohina-analyysin tulos.	24
Kuva 15. Piirilevyn yläpuoli.	25
Kuva 16. Piirilevyn alapuoli.	25
Kuva 17. Valmiin piirilevyn yläpuoli.	26

Kuva 18. Valmiin piirilevyn alapuoli.

26

KÄYTETYT LYHENTEET

BJT	bipolaaritransistori (Bipolar Junction Transistor)
RF	radiotaajuus (Radio Frequency)
SPL	äänenpaine (Sound Pressure Level)
RMS	tehollisarvo (Root Mean Square)
PWM	pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
THD+N	harmoninen kokonaissärö (Total Harmonic Distortion)
VAS	jännitteenvahvistusaste (Voltage Amplifier Stage)
SNR	signaali-kohina- suhde (Signal to Noise Ratio)
EF	emitteriseuraaja (Emitter Follower)
A_{ol}	avoimen silmukan vahvistus (Open-Loop Gain)
A_{cl}	suljetun silmukan vahvistus (Closed-Loop Gain)

1 JOHDANTO

Signaalien vahvistaminen on osattu jo melko pitkän aikaa. Triodin, ensimmäisen elektronisesti vahvistavan laitteen, kehitti amerikkalainen keksijä Lee De Forest vuonna 1906. Tämä keksintö loi pohjan elektroniputkien kehitykselle ja siten mullisti koko elektroniikkateollisuuden. Triodeja käytettiin laajalti elektroniikan eri osa-alueilla ainakin 1960-luvulle asti, kunnes transistorit alkoivat syrjäyttää ne. Putkitekniikkaa käytetään silti vielä tänäkin päivänä, etenkin audiovahvistimissa. [1]

Kuulokevahvistimista on tullut suosittu tee-se-itse-projekti hifi- ja elektroniikkaharrastajien keskuudessa. Yksi syy niiden suosioon on varmasti se, että ne ovat suhteellisen helppoja rakentaa, varsinkin valmiiden ohjeiden avulla. Internetistä löytyy paljon sekä täysin valmiita rakennussarjoja ja piirilevyjä että myös pelkkiä kytkentäkaavioita. Viimeksi mainittuja on tarjolla täysin ilmaiseksi, ja rakennussarjoja sekä piirilevyjä voi ostaa varsin kohtuuhintaan.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä audiovahvistimiin sekä suunnitella ja rakentaa A-luokan kuulokevahvistin. A-luokan topologiaan päädyttiin sen mahdollistaman erittäin hyvän lineaarisuuden takia. Hyötysuhde sen sijaan on A-luokassa yleisesti ottaen todella huono, mutta koska kuulokevahvistimen tapauksessa tehonkulutus on suhteellisen vähäistä, niin huonoa hyötysuhdetta ei pidetty suurena ongelmana.

Opinnäytetyön alussa kerrotaan hieman vahvistimista yleisesti sekä tutustutaan eri vahvistinluokkiin. Vahvistinsuunnittelun käsitteisiin ja audiovahvistimen ominaisuuksiin perehdytään. Myöhemmissä luvuissa selostetaan valitun kuulokevahvistimen toiminta, esitellään simulointitulokset ja piirilevyn layout sekä mittaustulokset.

2 VAHVISTINTEORIAA

Vahvistin on laite, joka vahvistaa signaalin voimakkuutta. Teholähteestä otetun energian avulla vahvistin kasvattaa signaalin amplitudia pitäen signaalin muodon kuitenkin mahdollisimman samanlaisena. Vahvistin voi olla kokonaan erillinen laite tai pelkkä kytkentä toisen laitteen sisällä. [2]

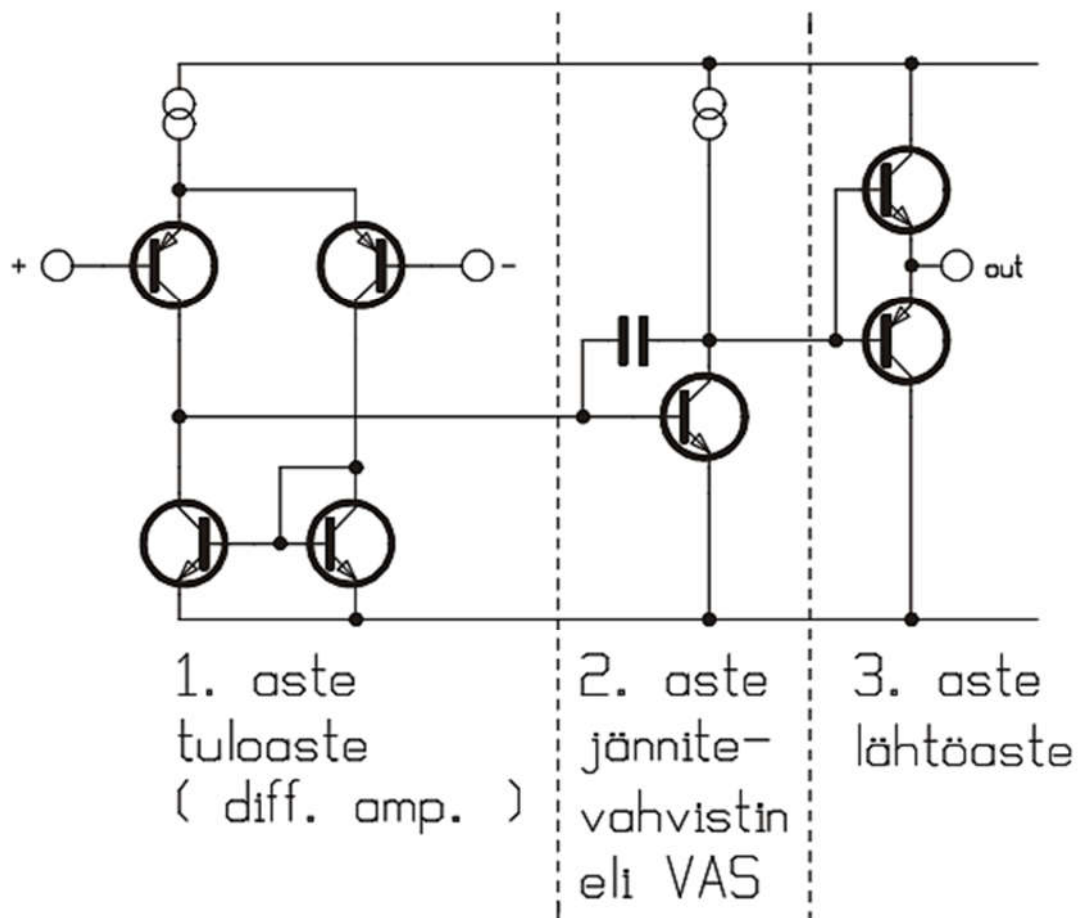
Vahvistimia on neljää eri tyyppiä, koska on olemassa kahdenlaisia signaaleja (jännite ja virta) sekä kahdenlaisia signaaliliitännöitä (tulo ja lähtö). Vahvistintyypit ovat: jännitevahvistin, transkonduktanssivahvistin, virtavahvistin ja transimpedanssivahvistin. Näiden lisäksi vahvistimia voidaan kategorisoida myös vahvistettavan signaalin taajuuden perusteella: audiovahvistin vahvistaa signaaleja audioalueella eli 20 Hz - 20 kHz:n taajuuksilla, RF-vahvistin vahvistaa radiotaajuusalueella eli välillä 20 kHz - 300 GHz. Tässä työssä keskitytään audiovahvistimiin ja niiden toimintaan. [2],[3]

Audiovahvistimen tehtävä on kasvattaa piensignaalin amplitudia käyttökelpoiselle tasolle säilyttäen kuitenkin pienemmän signaalin yksityiskohdat. Tästä käytetään termiä lineaarisuus. Mitä suurempi on vahvistimen lineaarisuus, sitä paremmin vahvistimen lähtösignaali vastaa tulosignaalia. [4]

Selkeästi yleisin ja eniten käytetty vahvistintyyppi on jännitevahvistin. Niissä on jännitesisääntulo korkealla impedanssilla ja jännitelähtö matalalla impedanssilla. Kaikki tavalliset operaatiovahvistimet ovat itsessään jännitevahvistimia, mutta ne saadaan sopivalla takaisinkytkennällä toimimaan minkä tahansa vahvistintyyppin tavoin. Transkonduktanssivahvistimella tuleva jännitesignaali, yleensä differentiaalinen eli eromuotoinen, muunnetaan virtalähdöksi. Sillä on muuntosuhde $A = I_{out} / V_{in}$. Virtavahvistin nimensä mukaisesti vahvistaa virtaa, eli ottaa virtaa sisään ja antaa virtaa ulos. Transimpedanssivahvistin toimii siten, että se ottaa tulosignaalin virtaa ja antaa lähdössä jännitteen. Sillä on siis muuntosuhde $A = V_{out} / I_{in}$. Jännitteenvahvistusaste eli VAS on audiovahvistimissa useimmiten toteutettu transimpedanssivahvistimella. [3]

Päätevahvistimen perusrakenne

Selkeästi yleisin transistorivahvistimen rakenne on kolmiasteinen. Ensimmäinen aste on differentiaaliaste (transkonduktanssivahvistin), toinen aste on transimpedanssivahvistin ja kolmas aste jännitteenseuraja (vuorovaihekytketty virtavahvistin). Myös tässä opinnäytetyössä tehty vahvistin on rakenteeltaan kolmiasteinen. Rakenne on esitetty kuvassa 1.



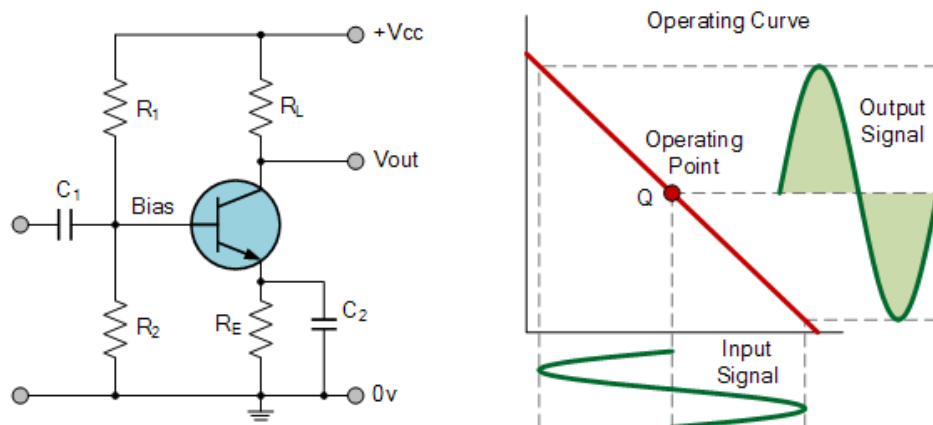
Kuva 1. Tyypillisen transistorivahvistimen lohkokaavio. [7]

2.1 Vahvistinluokat

Vahvistimet jaotellaan eri luokkiin pääteasteen toimintaperiaatteen mukaan. Luokat A ja AB olivat pitkän aikaa ennen transistorin keksimistä ainoat korkealaatuisen äänentuo-
tanton soveltuvat vaihtoehdot. Puolijohdetekniikka toi paljon lisää vapautta suunnitte-
luun ja sen jälkeen on kehitetty monia erityyppisiä ratkaisuja. Tässä luvussa esitellään
audiokäytössä yleisimmät vahvistinluokat eli A, B, AB, D ja G. Luokkien toiminta on esi-
tetty kuvissa 2, 3, 4, 5 ja 6. [5]

A-luokka

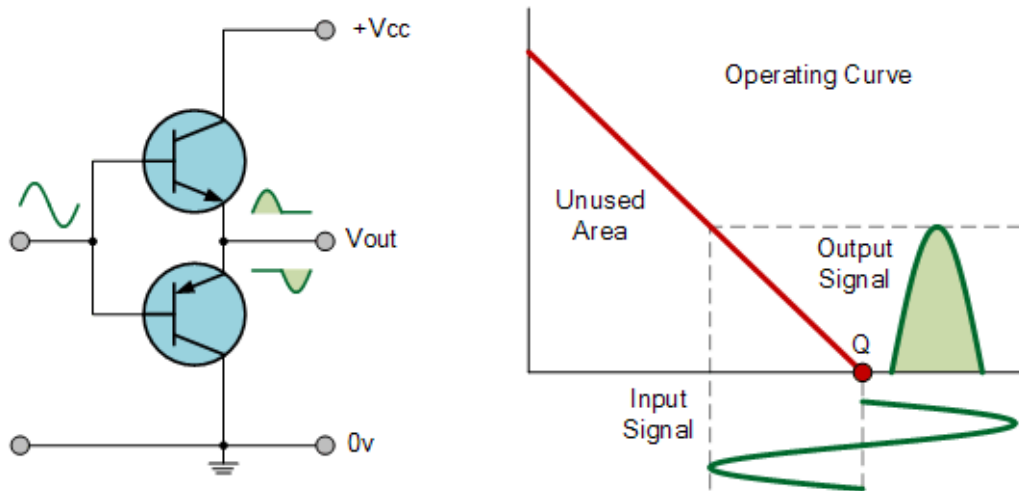
A-luokan vahvistimessa pääteasteen transistorit johtavat koko ajan eli täyden 360° ,
vaikka transistorin kantaan ei tulisiakaan signaalia. Tällöin vältetään kokonaan transisto-
rien kytkemisestä ja katkaisemisesta aiheutuva niin sanottu ylimenosärö. A-luokassa
transistorit vaativat suuren lepovirran: tarkemmin sanottuna lepovirran tulee olla suu-
rempi kuin suurin mahdollinen signaalivirta kuormaan. A-luokan vahvistimen suurin etu
muihin luokkiin verrattuna on sen erittäin hyvä lineaarisuus. Heikkoutena on huono hyö-
tysuhde: käytännössä päästään parhaimmillaankin vain 15 – 25 %:iin. [6],[7]



Kuva 2. A-luokan pääteaste. [8]

B-luokka

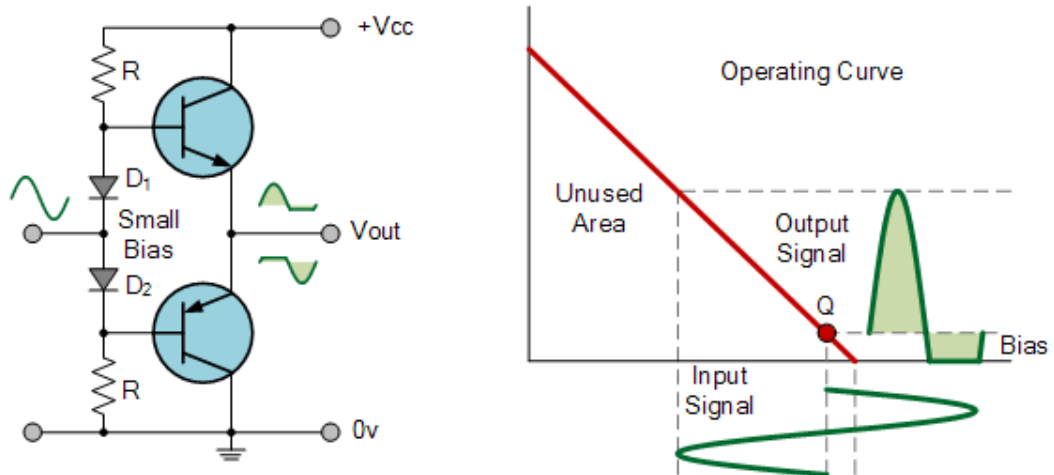
B-luokan pääteaste eli niin kutsuttu vuorovaiheaste keksittiin ratkaisuna A-luokan hyötysuhde- ja kuumenemisongelmiin. Toisin kuin A-luokan pääteasteessa, jossa virta kulkee transistorissa jatkuvasti, B-luokassa transistorit johtavat vuorotellen. Toinen transistorista johtaa signaalin positiivisella puolijaksolla ($+180^\circ$) ja toinen negatiivisella puolijaksolla (-180°). Tästä ns. push-pull -toiminnasta aiheutuu haittapuolena ylimenosäröä, koska transistori vaatii johtaakseen noin 0,7 V jännitteen kannan ja emitterin välille. B-luokan pääteasteen hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin A-luokan (teoriassa maksimissaan n. 78,5 %). Parannuksena säröongelmaan on kehitetty AB-luokka, josta kerrotaan seuraavaksi tarkemmin. [6],[7]



Kuva 3. B-luokan pääteaste. [8]

AB-luokka

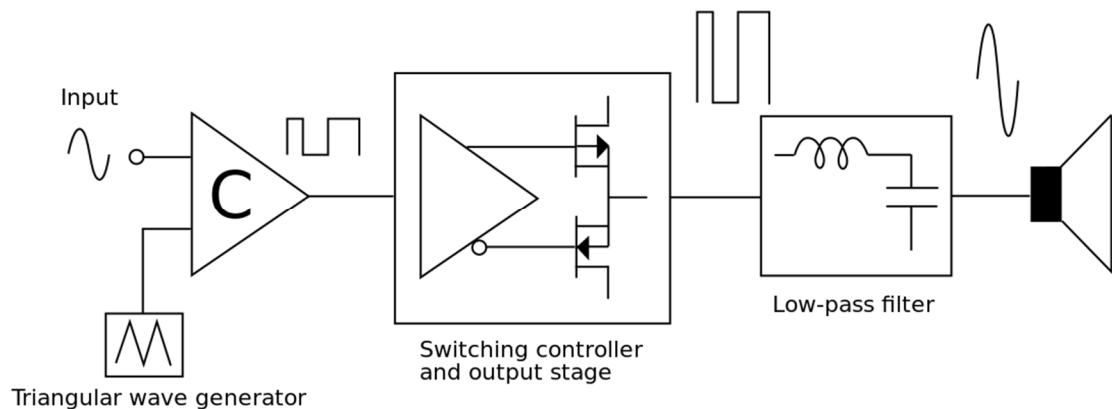
AB-luokan pääteaste on A- ja B-luokkien yhdistelmä ja se on myös yksi eniten käytetyistä. Sen ideana on asteen läpi jatkuvasti kulkeva pieni lepovirta, jonka avulla saadaan B-luokalle tyypillinen ylimenosärö lähes kokonaan eliminoitu. Transistorit johtavat hieman yli puolijakson ajan. AB-pääteaste toimii pienillä signaalitasoilla A-luokassa ja suurilla signaalitasoilla B-luokassa. Tästä luokasta toiseen siirtymisestä aiheutuu säröä, minkä takia AB-pääteaste ei ole niin lineaarinen kuin A-luokan aste. Käytännössä AB-pääteaste on siis sopivasti biasoitu B-luokan vuorovaiheaste. Yleinen toteutustapa on diodi-biasointi, jollainen on myös kuvassa 4 esitetyssä kytkennässä. [6],[7]



Kuva 4. AB-luokan pääteaste. [8]

D-luokka

D-luokan vahvistimen toiminta perustuu pulssinleveysmodulaatioon (PWM). Sen ensimmäinen lenkki on komparaattori, jonka tuloihin tuodaan vahvistettava signaali sekä kolmioaaltosignaali. Lähtönä saadaan PWM-signaali, joka ohjataan B-luokan pääasteelle ja sieltä alipäästösuodattimen kautta kaiuttimelle. D-luokan etuja on erittäin hyvä hyötysuhde (jopa 90 %) sekä pienempi koko ja paino. Huonoina puolina sen lineaarisuus ei ole aivan parhaasta päästä ja tasainen amplitudivaste saadaan vain yhteen kuormaimpedanssin arvoon. [5],[9]

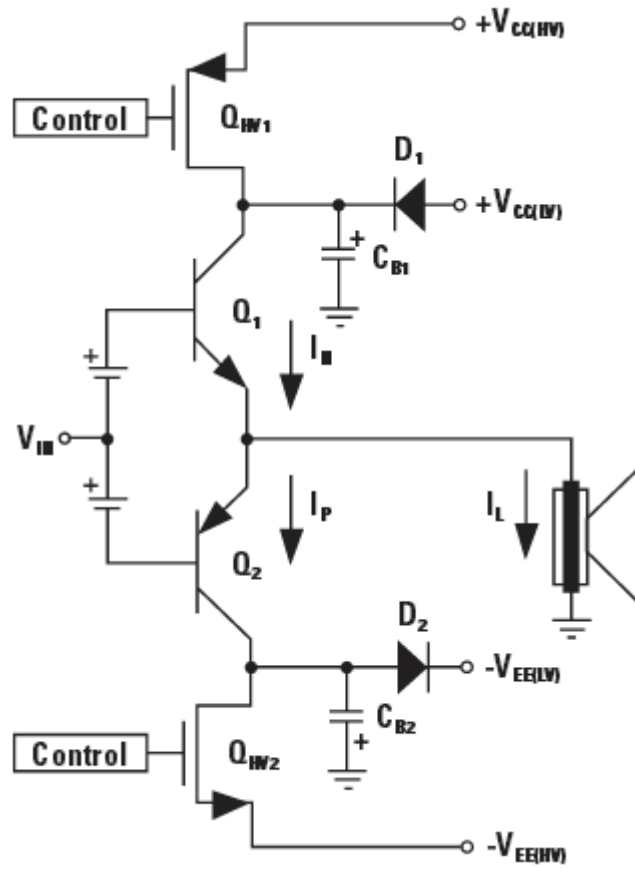


Kuva 5. D-luokan vahvistimen lohkokaavio. [10]

G-luokka

Musiikkisignaali on suurimman osan ajasta pieniampplitudista, sisältäen kuitenkin voimakkaita transientteja. G-luokan vahvistin perustuu tämän faktan hyödyntämiseen. G-luokan topologia on modifikaatio toisesta vahvistinluokasta, yleisimmin B- tai AB-luokasta. Sen tavoite on tehohäviöiden minimointi eli siten hyötysuhteen parantaminen. Tämä saavutetaan hyödyntämällä useampaa, vähintään kahta, eri käyttöjännitettä. Laite käyttää pienempää jännitettä, kunnes lähdön ns. headroom käy liian pieneksi, jolloin vaihdetaan

lähtöasteelle suurempi käyttöjännite. Kun lähtösignaali putoaa alle määrätyn tason, vaihdetaan takaisin pienemmälle jännitteelle. [11]



Kuva 6. G-luokan vahvistin, jossa on AB-luokan päätteaste. [11]

2.2 Tärkeimmät parametrit ja käsitteet

Vahvistinvalmistajat ilmoittavat vahvistimiensa spesifikaatioita vaihtelevalla tarkkuudella. Useimmiten on kerrottu kuitenkin vähintään maksimiteho, taajuusvaste ja kohina- sekä säröominaisuudet. Nämä ovat myös vahvistimen suunnittelussa tärkeimpiä huomioon otettavia seikkoja.

Teho

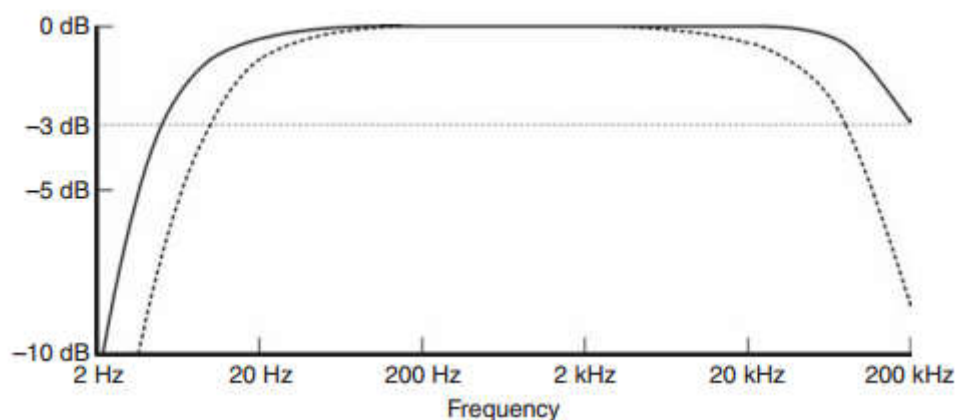
Suurin saatavissa oleva lähtöteho on lähes aina ilmoitettu huomioiden kuorman impedanssi. Audiotehovahvistimien tapauksessa impedanssit ovat 8 Ω ja 4 Ω . Kuulokkeiden ja kaiuttimien ajamiseen tarvittava teho riippuu niiden herkkyydestä, mutta hyvä peukalosääntö on, että kuulokkeet vaativat noin tuhannesosan kaiuttimien vaatimasta tehosta.

[12]

Amplitudivaste

Audiovahvistimen amplitudivasteen täytyy olla tasainen vähintään koko audioalueella eli välillä 20 Hz – 20 kHz. Modernit vahvistimet tavallisesti ylittävät tämän vaatimuksen selkeästi. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki audiovahvistimen amplitudivasteesta. Tavanomaisesti määritetään taajuudet, joilla vahvistus on laskenut 3 dB referenssipisteestä. Näiden taajuuksien välisestä taajuusalueesta käytetään nimitystä 3 dB:n kaistanleveys.

[12]



Kuva 7. Kahden eri vahvistimen amplitudivasteet. [12]

Kohina

Vahvistimen tuottama kohina on aina läsnä riippumatta äänenvoimakkuudesta, joten on tärkeää, että kohinaa esiintyisi mahdollisimman vähän. Kohinataso määritellään tavallisesti desibeleinä suhteessa joko lähtötehoon tai 1 W:iin. Kohinanmääritys voi olla painotettu tai painottamaton. Painottamattomana kohina ilmoitetaan koko 20 kHz:n, tai laajemmalle, kaistalle. Painotetussa tavassa otetaan huomioon korvan herkkyys kohinalle eri kohdissa taajuusspektriä. [12]

Särö

Yleisin ja merkittävin särömääritys on harmoninen kokonaissärö. Se ilmoitetaan tavallisesti joko yhdellä tai kahdella taajuudella, tai määrätyllä taajuusvälillä. Käytännössä harmoninen kokonaissärö ilmoitetaan muodossa THD+N, jossa N viittaa kohinaan. THD+N voidaan mitata syöttämällä siniaaltoa, kaistanestosuodattamalla lähtö ja vertailemalla keskenään lähtösignaalien suhdetta siniaallon kanssa ja ilman siniaaltoa. [12]

2.3 Negatiivinen takaisinkytkentä

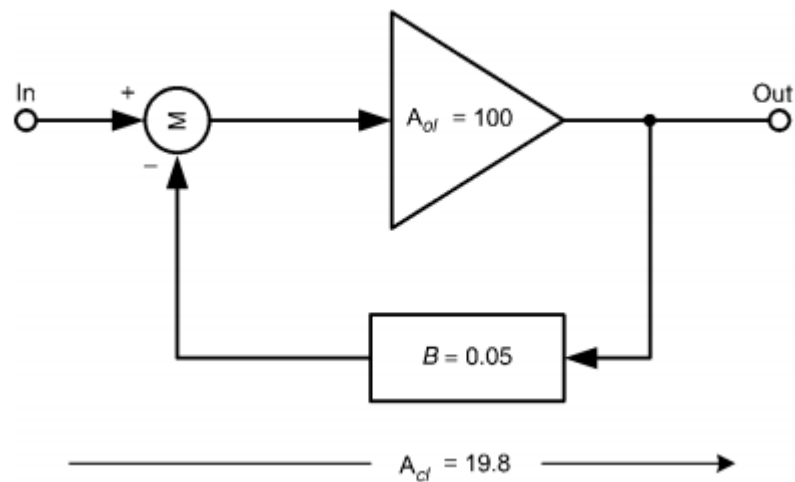
Negatiivisen takaisinkytkennän keksi amerikkalainen elektroniikkainsinööri Harold Black vuonna 1927. Hänen tavoite oli keksinnöllään parantaa puhelinvahvistimien taajuusvastetta ja vahvistuksen hallintaa sekä vähentää niissä esiintyviä säröjä. [12]

Negatiivinen takaisinkytkentä on elektroniikassa erittäin hyödyllinen ja paljon käytetty konsepti. Sitä hyödynnetään lähes aina audiovahvistimen suunnittelussa. Negatiivinen takaisinkytkentä on mahdollista tehdä neljällä eri tavalla: se voidaan ottaa lähdöstä kahdella tavalla (jännite- tai virtatakaisinkytkentä) ja kytkeä sisääntuloon kahdella tavalla (sarja- tai rinnankytkentä). Negatiivisen takaisinkytkennän merkittävimmät hyödyt ovat vahvistuksen stabiloituminen, epälineaarisen särön väheneminen, kaistanleveyden laajeneminen sekä tulo- ja lähtöimpedanssien muuttaminen. [3]

Vahvistimella on avoimen silmukan vahvistus A eli kokonaisvahvistus tulosta lähtöön ilman negatiivista takaisinkytkentää. Negatiivinen takaisinkytkentä toimii siten, että osa lähtösignaalista syötetään uudelleen sisääntuloon vastakkaisvaiheisena. Osuus lähtösignaalista on takaisinkytkentäkerroin ja sitä merkitään kirjaimella β . A :n ja β :n tulona saadaan silmukavahvistus ja suljetun silmukan vahvistus voidaan laskea kaavalla:

$$G = \frac{A}{1 + A\beta}$$

Kuvassa 8 on esitetty negatiivisesti takaisinkytketyn vahvistimen lohkokaavio, jossa A_{of} = avoimen silmukan vahvistus ja A_{cl} = suljetun silmukan vahvistus.



Kuva 8. Negatiivisen takaisinkytkennän toimintaperiaate. [12]

3 KUULOKEVAHVISTIN

Kuulokevahvistin on yksinkertaistettuna pienitehoinen audiovahvistin, joka on suunniteltu suurempien kaiuttimien sijasta ajamaan kuulokkeiden sisällä olevia pieniä kaiuttimia. Kuulokevahvistin löytyy integroituna laitteista, joissa on kuulokeliitäntä, kuten kannettavat musiikkisoittimet ja televisiot. Erillisiä kuulokevahvistimia kuitenkin tarvitaan parhaan äänenlaadun aikaansaamiseksi, ja niitä käyttävät etenkin audioharrastajat ja musiikin ammattilaiset. Suuri-impedanssisten *high-end* -kuulokkeiden kanssa erillinen vahvistin on jopa aivan välttämätön. Kuulokevahvistimia on markkinoilla sekä edullisia kuluttajamalleja että huomattavasti kalliimpia, ammattikäyttöön tarkoitettuja malleja. [1]

Teknisesti katsottuna kuulokevahvistin on vahvistin, jolla on korkea tuloimpedanssi (ideaalisesti ääretön) ja alhainen lähtöimpedanssi (ideaalisesti nolla). Kuulokevahvistimen suurimmat erot verrattuna audiotehovahvistimeen ovat lähtöteho ja kuorman sallittu impedanssi. Audiotehovahvistimen lähtöteho on monisatakertainen verrattuna kuulokevahvistimeen ja ne on useimmiten suunniteltu ajamaan 2 – 8 Ω :n kuormia, kuulokevahvistimet sen sijaan n. 16 – 600 Ω kuormia. [13]

Kuulokevahvistin voidaan tehdä eri tekniikoilla: elektroniputkilla (myös tyhjiöputki, radio-putki), operaatiovahvistimilla tai transistoreilla. Myös näiden yhdistelmiä voidaan käyttää; tällöin on kyseessä hybridivahvistin, jonka tavoite on hyödyntää molempien tekniikoiden parhaita puolia. [14]

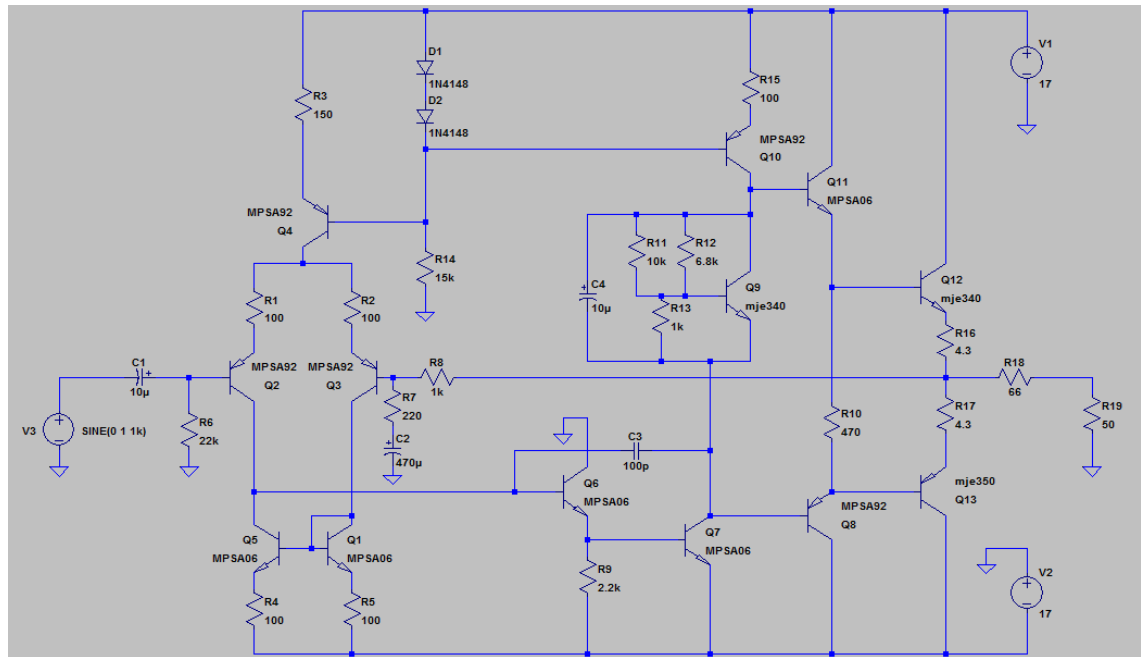
Elektroniputket ovat jo yli 100 vuotta vanhaa tekniikkaa. Niiden toiminta perustuu termiseen emissioon eli elektroniputken tapauksessa elektronien virtaamiseen kuumalta katodilta tyhjiöön. Transistorit sen sijaan ovat paljon uudempaa tekniikkaa ja niillä toteutetut vahvistimet ovat tyypillisesti putkiratkaisuja halvempia ja tuottavat tarkemman, mutta vähemmän ”pehmeän” äänen. Käytännössä suurin havaittava ero putkiin nähden on särötyminen. Putket säröytyvät ns. pehmeämmin, mutta kestävät myös paremmin hetkelistä ylikuormitusta. Ikävältä kuulostavat jännitepiikit voivat jäädä putkivahvistimilla kuulematta. [1],[3]

Kuulokkeilla on laajan impedanssiskaalan lisäksi myös eri herkkyystasoja. 600 Ω kuulokkeet vaativat vähintään kymmenkertaisen jännitteen saavuttaakseen saman äänenpaineen kuin 32 Ω kuulokkeet. Suurin osa nykyään markkinoilla olevista kuulokkeista mahtuu herkkyudessa välille +110...+130 dB SPL/V. Perinteinen ratkaisu impedanssi- ja herkkyyseroihin on lisätä 50 – 100 Ω vastus sarjaan vahvistimen lähdön kanssa. Kunhan sarjavastuksella on tarpeeksi hyvä tehonkesto, se tekee vahvistimesta myös oikosulkuuojatun ja vakaan mihin tahansa mahdolliseen kuormaan ilman, että tarvitaan ns. Zobel-verkkoja tai keloja ulostuloon. [3]

3.1 Kytkenän valinta

Tarkan perehtymisen ja eri vaihtoehtojen tutkimisen jälkeen toteutettavaksi kytkennäksi valittiin Douglas Selfin suunnittelema A-luokan kuulokevahvistin. Douglas Self on brittiläinen elektroniikkainsinööri, joka on kirjoittanut viisi kirjaa audioelektronikasta. Valittu kytkentä on hänen teoksestaan Small Signal Audio Design (2. painos), jota on muutenkin käytetty lähteenä tässä opinnäytetyössä.

Kyseinen, kuvassa 9 esitetty vahvistin, on rakenteeltaan varsin perinteinen ja suhteellisen yksinkertainen, mutta sen toimintakyky on silti erittäin hyvä. Kytkenä on myös pääosin samanlainen kuin mitä itse oli ajateltu, mutta siinä on muutamia merkittäviä parannuksia. Yksi näistä parannuksista on pääteasteen push-pull -rakenne, joka nostaa vahvistimen hyötysuhdetta verrattuna yhden päätetransistorin malliin. Toinen yksinkertainen, mutta tehokas parannus on emitteri-seuraaja Q6, joka on lisätty VAS-takaisinkytkentälleenkin sisälle vähentämään 2. asteen tuottamaa säröä.



Kuva 9. Kuulokevahvistimen yhden kanavan kytkentä.

3.2 Selostus kytkennän toiminnasta

Tämä kuulokevahvistin on siis rakenteeltaan perinteinen 3-asteinen vahvistin. Sisääntulon transistorit Q2 ja Q3 muodostavat differentiaalisen parin, josta käytetään nimitystä *long-tailed pair* (LTP). Nimitys on peräisin ns. häntävirrasta (tail current), joka syötetään differentiaaliasteelle vakiovirtalähteellä. Vakiovirtalähteen muodostavat komponentit Q4, R3, D1, D2 ja R14. Häntävirraksi on mitoitettu 4 mA.

Q5 ja Q1 muodostavat virtapeilin, jolla varmistetaan tarkasti yhtä suuret virrat Q2:n ja Q3:n kollektoreille. Näin saadaan myös kaksinkertaistettua avoimen silmukan vahvistus, kun molempien tuloasteen transistorien kollektorivirrat tulevat käyttöön. Huonompi ratkaisu olisi käyttää pelkkiä vastuksia näiden transistorien, tai ainoastaan Q2:n, kollektoreilla. [3]

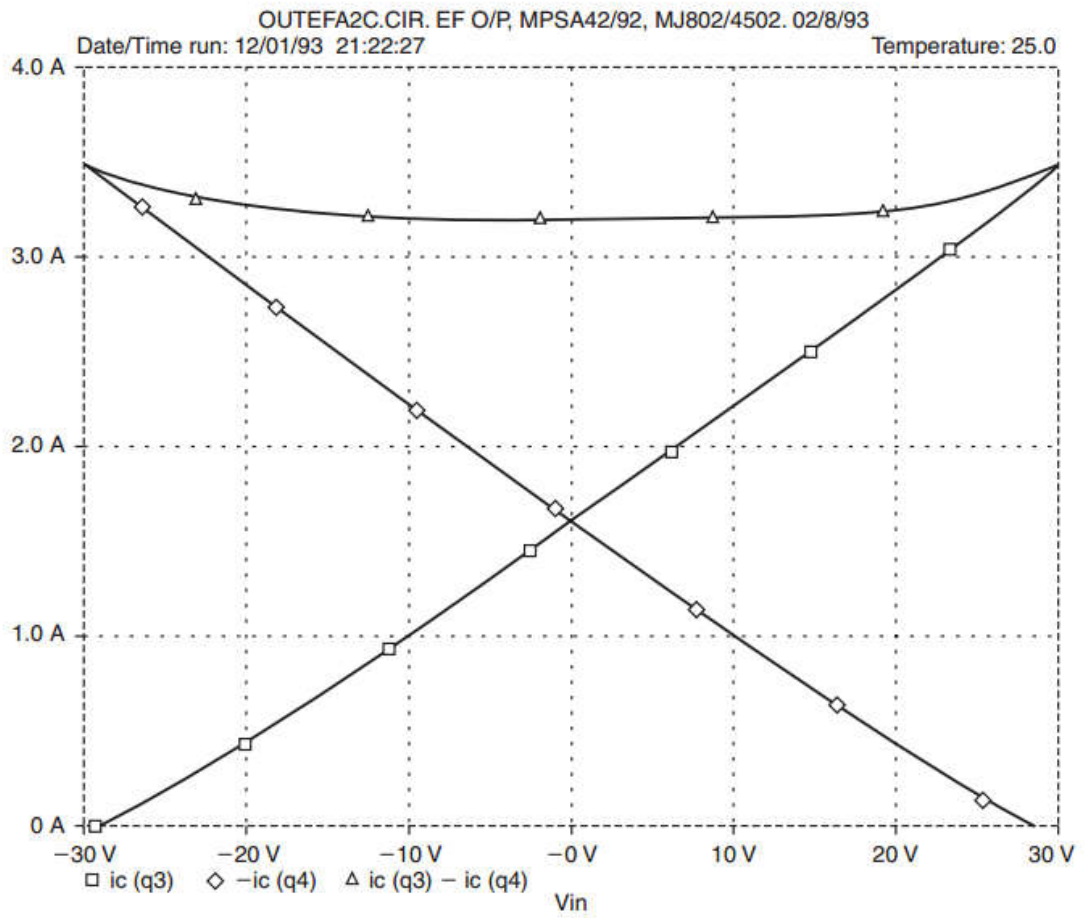
Tuloasteen transkonduktanssivahvistin vertailee siihen syötettyä tulosignaalia murtoosaan lähtösignaalista. Tämä lähtösignaalin osuus riippuu vastusten R7 ja R8 suhteesta, joka myös määrää suljetun silmukan vahvistuksen. Differentiaalinen jännitetulo muutetaan virtalähdöksi, joka vieään Q2:n kollektorilta 2. asteelle transadmittanssivahvistimelle. [3]

2. asteella transistori Q7 Miller-kondensaattori C3:n kanssa muuntaa tulevan virran jännitteeksi. Q7:llä on sisäinen kollektori-kanta- kapasitanssi C_{bc} , joka vaihtelee kollektori-kanta- jännitteen V_{cb} mukaan ja siten tuottaa 2. harmonista säröä korkeilla taajuuksilla. Ongelma on ratkaistu lisäämällä transistori Q6, jonka pieni-impedanssille emitterille epälineaarisuudet absorboituvat. Toinen ratkaisu asteen säröntuotantoon olisi kytkeä kaksi VAS-transistoria kaskodiin, mutta silloin tarvittaisiin enemmän komponentteja.

Transistori Q9 sekä vastukset R11, R12 ja R13 säätelevät lepovirran suuruuden. Vahvistimen lepovirraksi on mitoitettu 90 mA. Bias-säätöä ei tarvita, koska A-luokassa lepovirta ei ole kriittinen.

3. aste eli lähtöaste on toteutettu push-pull-emitteriseuraaja -rakenteella. Push-pull -metodilla saadaan parannettua hyötysuhdetta ja lineaarisuutta. Kuvassa 10 on esimerkkikuvaaja luokan A push-pull -toiminnasta. Siitä näkyy, miten päätetransistorien virta vaihtelee kyseisessä konfiguraatiossa. Virtojen summa on lähes vakio, mikä helpottaa biasointia.

A-luokalle ominaisesti lähtöasteen säröntuotto on hyvin vähäistä maltillisellakin negatiivisella takaisinkytkennällä, joten sen suhteen ei ole ollut huolta suunnittelussa. Suurten tehohäviöiden takia päätetransistoreiksi on valittu TO-220 -koteloidut transistorit, ja koska niillä on suhteellisen alhainen vahvistuskerroin β , on niiden pareiksi valittu TO-92 -transistorit. [3]

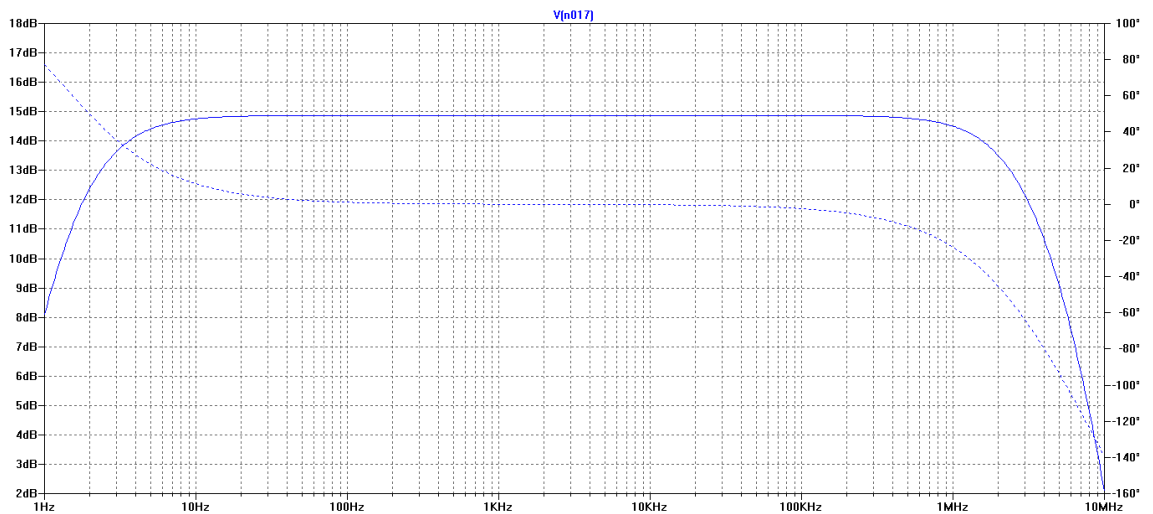


Kuva 10. Push-pull EF -asteen transistorien virrat. [5]

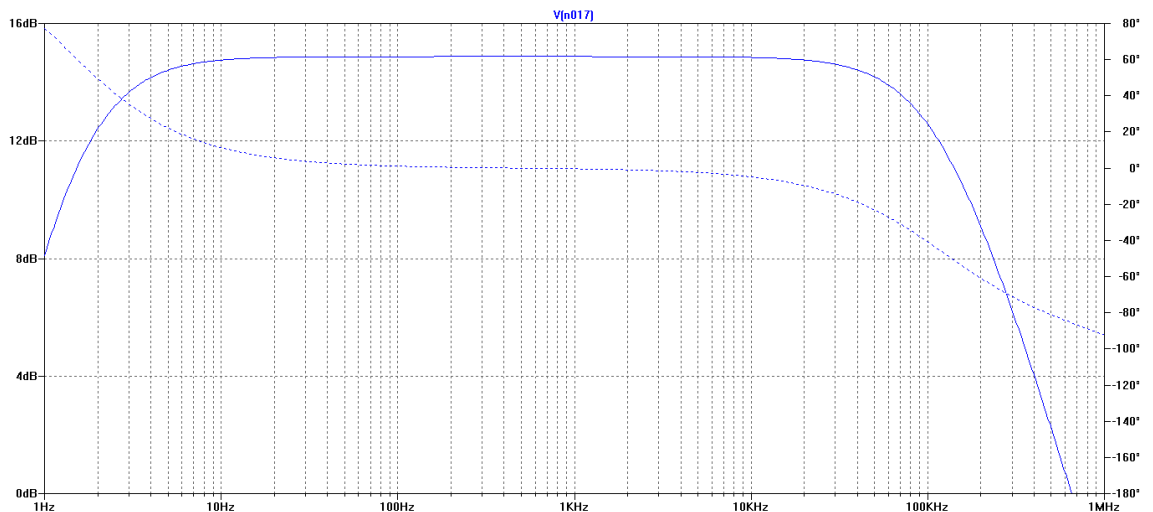
3.3 Vahvistimen simulointi

Simuloinnit suoritettiin ohjelmilla LTspice IV ja Tina-TI 9, jotka molemmat ovat ilmaiseksi ladattavissa. Kummankaan ohjelman käytöstä ei ollut aiempaa kokemusta, mutta peruskäyttö oli helppo oppia.

Kuvassa 11 näkyy vahvistimen taajuusvaste. Alarajataajuus f_L on n. 1,8 Hz. Ylärajataajuus 3,2 MHz on turhan suuri ja sitä voisi laskea kasvattamalla kondensaattori C3:n kapasitanssia (Kuva 12). Vaihevaste on tasainen lähes koko audioalueella.

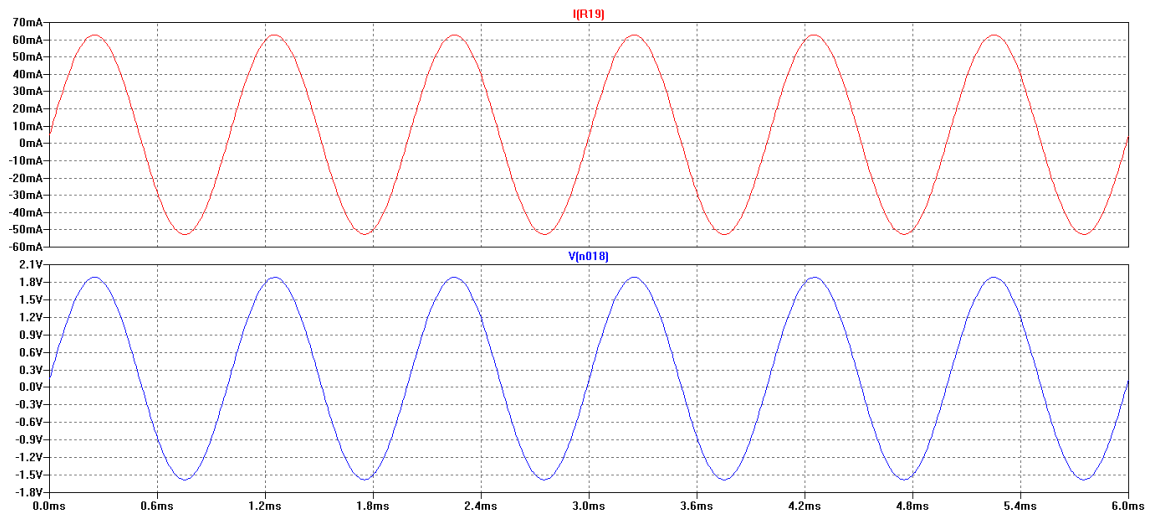


Kuva 11. Taajuusvaste 100 pF:n C3:lla. $f_H = 3,2$ MHz.



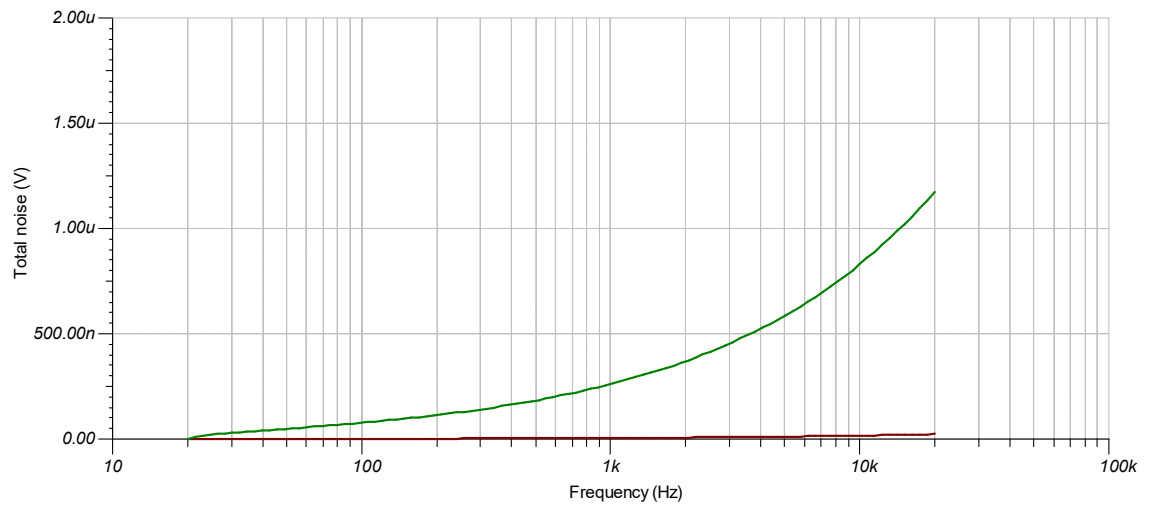
Kuva 12. Taajuusvaste 2 nF:n C3:lla. $f_H = 120$ kHz.

Transienttiansalyysin tulos on esitetty kuvassa 13. Syöttöjännite on 1 V @ 1 kHz sini-aalto ja kuormavastus 30 Ω . Lähtövastus R18:n takia suurin lähtöjännite on n. 1,9 V.



Kuva 13. Transienttiansalyysin virta- ja jännitekuvaajat.

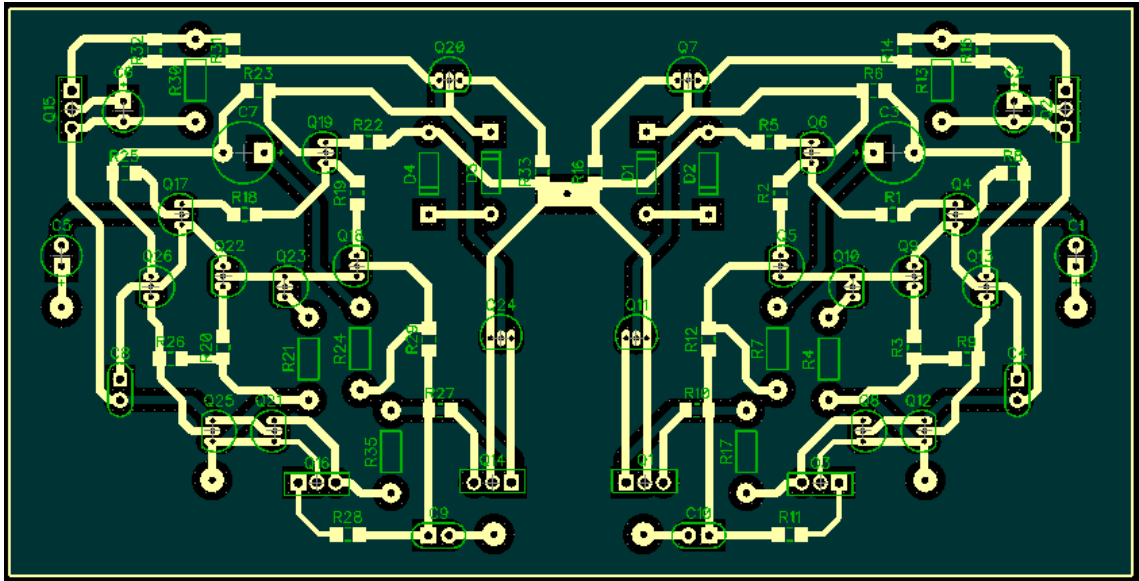
Kuvassa 14 on kohina-analyysin tulos. 10 kHz taajuudella lähdön kohinataso on n. -119 dBu.



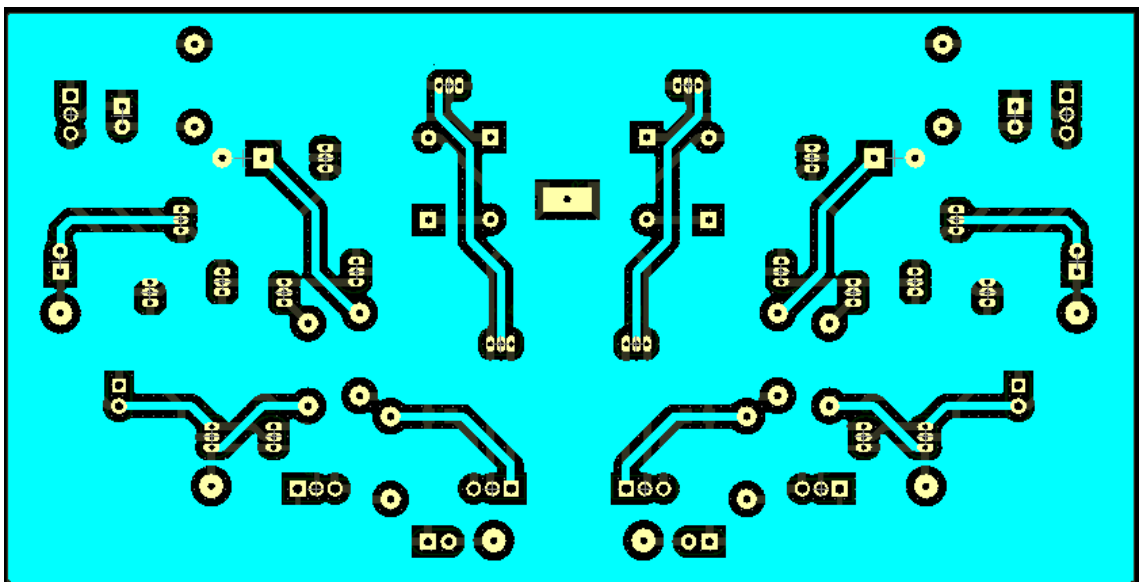
Kuva 14. Kohina-analyysin tulos.

3.4 Piirilevyn layout-suunnittelu

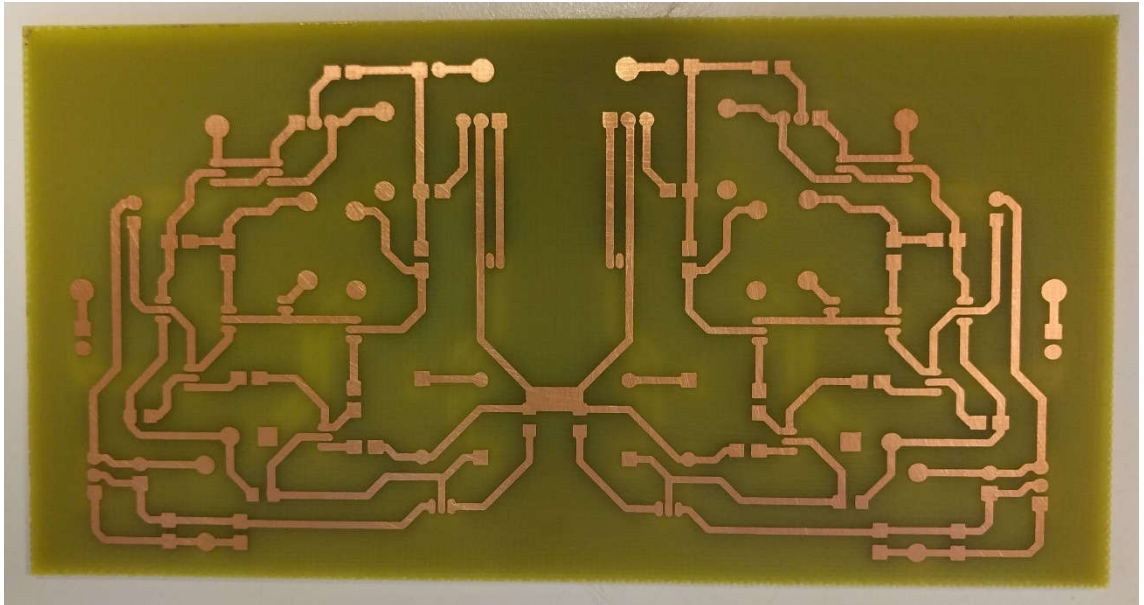
Piirilevyn layout suunniteltiin ja tehtiin DipTrace- ohjelmistolla. Layout tehtiin symmetriseksi kummankin kanavan suhteen ja läpivientejä pyrittiin tekemään mahdollisimman vähän. Levyn toiselle puolelle tehtiin laaja kuparialue maatasoksi. Kuvissa 15 ja 16 on valmiit layout-suunnitelmat, kuvissa 17 ja 18 valmis piirilevy.



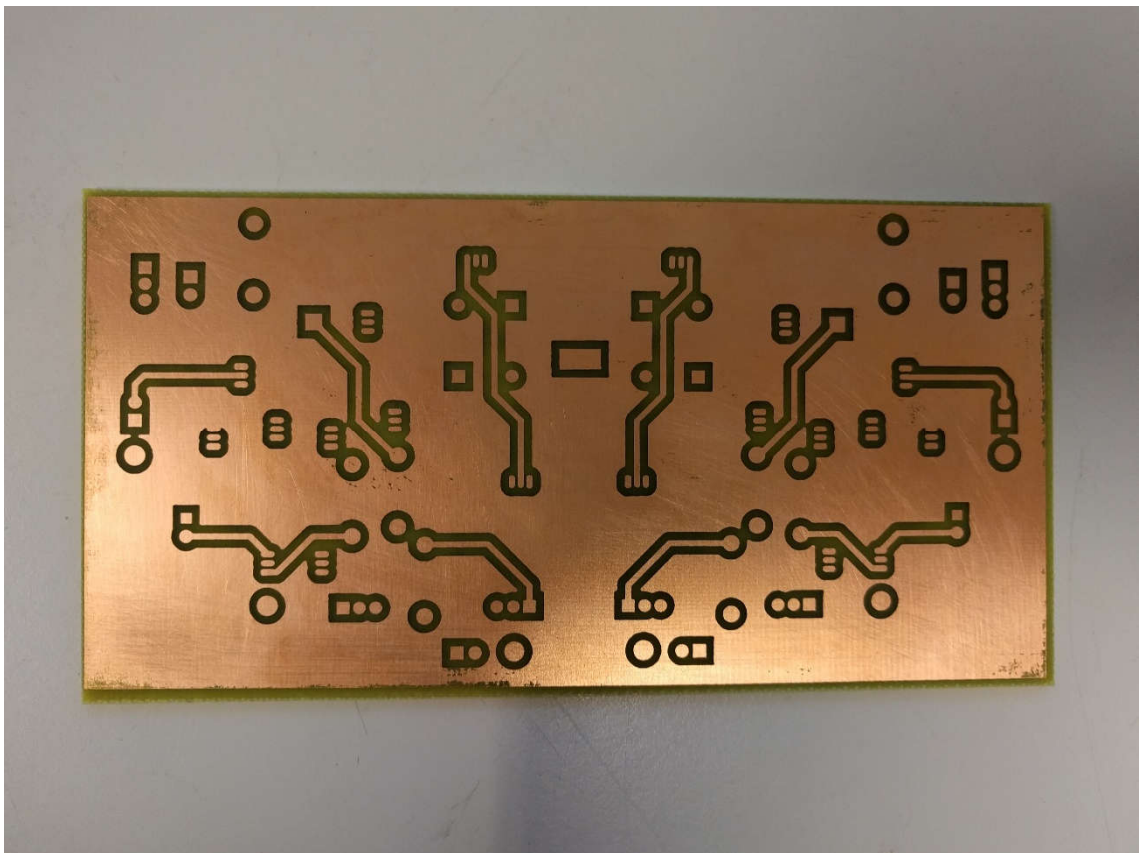
Kuva 15. Piirilevyn yläpuoli.



Kuva 16. Piirilevyn alapuoli.



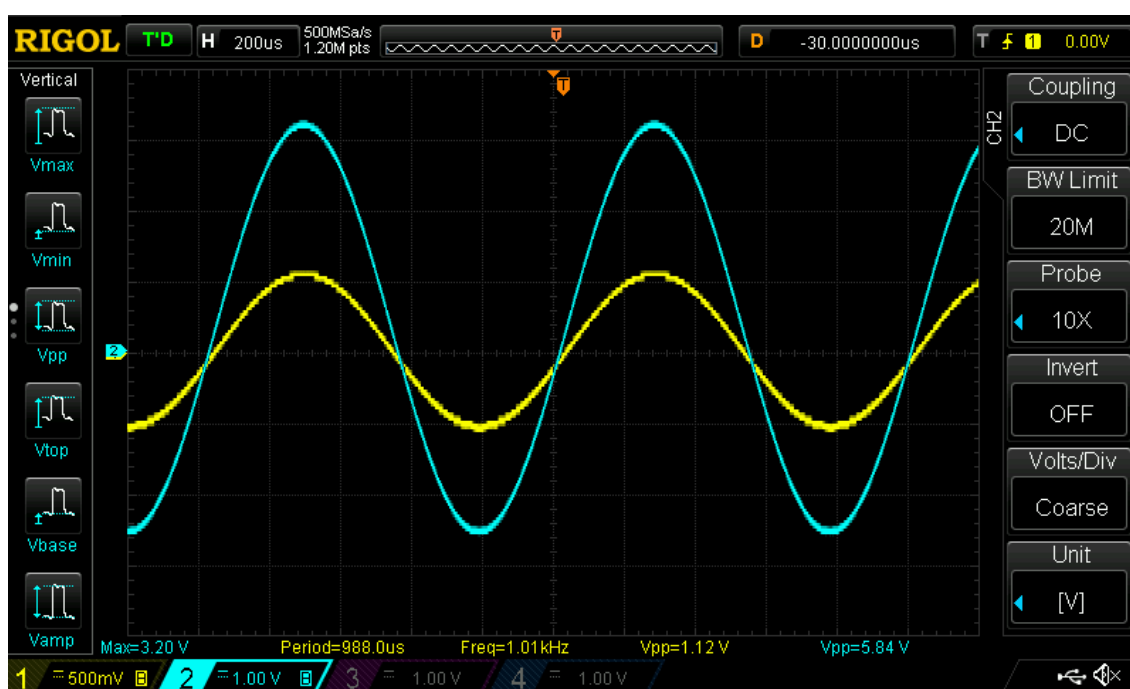
Kuva 17. Valmiin piirilevyn yläpuoli.



Kuva 18. Valmiin piirilevyn alapuoli.

3.5 Mittaukset

Mittaustulokset jäivät tämän työn osalta melko vähäisiksi. Piirilevyn testauksessa ilmeni heti ongelma, kun vahvistimen lähtöön ei saatu ollenkaan signaalia. Todennäköisesti se johtui huonosta tai virheellisestä juotoksesta, mutta ongelmaa ei enää ehditty ratkaista tämän työn tekemiseen jäljellä olevan ajan puitteissa. Varasuunnitelmana vahvistimen yhden kanavan kytkentää testattiin koekytkentäalustalla. Mitattiin yleismittarilla tärkeimmät jännitearvot ja oskilloskoopilla vahvistimen lähtösignaali. Signaalissa näkyi väliillä oskillointia aallon pohjilla ja huipuilla, mutta sen todettiin aiheutuvan hyppylankojen huonoista kontakteista. Testattiin myös syöttämällä musiikkisignaalia ja viemällä lähtösignaali kuulokkeisiin. Ääni säröytyi suuremmilla voimakkuuksilla, mutta tämäkin johtui todennäköisesti hyppylangoista ja koekytkentäalustasta. Kuvassa 18 näkyy oskilloskoopin kuva tulo- ja lähtösignaaleista.



Kuva 18. Vahvistimen tulo- ja lähtösignaalit, kuormavastus 100 Ω.

Mittaustulokset

Mittaustulokset vastasivat melko hyvin simuloinneissa saatuja tuloksia. Vastusten numerointi on sama kuin kuvassa 9 käytetty numerointi.

Vahvistus A @ 1 kHz = 14,58 dB (100 Ω)

$f_L = 10$ Hz

$f_H = 2,5$ MHz

$U_{R3} = 0,63$ V

$U_{R15} = 0,58$ V

$U_{R16} = 0,46$ V

$U_{R10} = 2,10$ V

4 LOPUKSI

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin vahvistimiin ja niiden suunnitteluun sekä rakennettiin A-luokan kuulokevahvistin. Vahvistin päätettiin toteuttaa transistorilla, vaikka elektroniputkien usein sanotaan tuottavan miellyttävämmän äänen. Transistoreihin päädyttiin pääasiassa siksi, koska putkista ei ollut minkäänlaista aiempaa kokemusta. Transistorit olivat ennestään tuttuja, koska niitä oli käsitelty paljon koulussa.

Työn tekeminen aloitettiin perehtymällä aiheeseen monien eri lähteiden kautta. Aiempaa kokemusta audiovahvistimen suunnittelusta ei juurikaan ollut, joten aiheen opiskeluun meni erittäin paljon aikaa. Aikaa meni odotettua enemmän ja sen takia kirjoittamisessa tuli kiire, koska aikataulu ei pitänyt suunnitelmien mukaisesti. Koko työ olisi siis pitänyt aloittaa paljon aikaisemmin.

Alun perin tavoite oli suunnitella vahvistin kokonaan itse erilliskomponenteilla, mutta tästä tavoitteesta jouduttiin luopumaan kesken urakan, koska se osoittautui liian haasteelliseksi omaan osaamiseen nähden. Sen sijaan päätettiin valita lähdekirjallisuudesta sopiva kytkentä ja opetella sen toimintaperiaatteet. Tässä tavoitteessa onnistuttiin, mutta laitteen rakentaminen jäi aikataulullisten ongelmien vuoksi kesken. Jatkosuunnitelmaksi jäikin vahvistimen tekeminen loppuun ja parhaimmassa tapauksessa lopputuloksena olisi omaan käyttöön tuleva kuulokevahvistin.

LÄHTEET

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Triode> (luettu 10.3.2016)
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/Amplifier> (luettu 13.4.2016)
- [3] Douglas Self. 2015. Small Signal Audio Design. 2. painos. Focal Press.
- [4] <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5590> (luettu 10.3.2016)
- [5] Douglas Self. 2002. Audio Power Amplifier Design Handbook. 3. painos, Newnes.
- [6] <https://www.audioholics.com/audio-amplifier/amplifier-classes> (luettu 13.4.2016)
- [7] Ville Huhtinen. Audiotekniikka (opetusmateriaali). Luku 5
- [8] <http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html> (luettu 10.3.2016)
- [9] <http://www.soundonsound.com/sos/jun06/articles/loudandlight.htm> (luettu 13.4.2016)
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Class-D_amplifier (luettu 13.4.2016)
- [11] <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/snua128/snua128.pdf> (luettu 10.3.2016)
- [12] Bob Cordell. 2011. Designing Audio Power Amplifiers. McGraw-Hill.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Headphone_amplifier (luettu 10.3.2016)
- [14] <https://middleclasstech.wordpress.com/2014/09/22/understanding-headphone-amps/> (luettu 10.3.2016)
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermionic_emission (luettu 10.3.2016)