

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Elektroniikkasuunnittelu

2011

Jussi Karjala

D-LUOKAN VAHVISTIN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Elektroniikkasuunnittelu

2011 | 36 sivua

Ohjaajat

ins. Ville Huhtinen, tekn. toht. Timo Tolmunen

Jussi Karjala

D-LUOKAN VAHVISTIN

Turun ammattikorkeakoulun elektroniikkasuunnittelun suuntautumisvaihtoehdon opiskelijoille tarvittiin valmis D-luokan vahvistinmoduuli, jota voidaan käyttää harjoitustöissä. Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja rakennettiin edellä mainittu audiokäyttöön tarkoitettu D-luokan vahvistin, jolla on lähes 90 %:n hyötysuhde ja pieni koko antotehoon nähden. Työssä verrattiin perinteisiä vahvistintyyppisiä D-luokkaan ja käytiin läpi etuja ja haittoja.

Vahvistimen tehona tavoiteltiin 10–20 W:a 4–8 Ω :n kaiuttimelementtiin, ja piirilevyn koko yritettiin saada mahdollisimman kompaktiksi. Työssä rakennettiin pelkkä vahvistinmoduuli ilman laitekoteloa ja tehölähdettä.

D-luokan vahvistimen suunnittelu aloitettiin sen toimintaperiaatteen pohjalta, jonka jälkeen syvennyttiin tarkemmin vahvistimen eri toimintalohkoihin. Vahvistimen toimintaperiaatteen opiskelun jälkeen voitiin aloittaa varsinainen laitesuunnittelu. Suunnittelussa päädyttiin käyttämään integroitua vahvistinpiiriä työn yksinkertaistamiseksi. D-luokan vahvistinpiirinä käytettiin Texas Instrumentsin valmistamaa TPA3001D1-vahvistinpiiriä, jolle valmistaja ilmoittaa 20 W:n maksimitehon 4 Ω :n kaiuttimeen.

Vahvistimen rakentamisen jälkeen valmis laite testattiin ja mitattiin laboratoriossa. Maksimitehoksi saatiin 4 Ω :n kaiuttimeen 10 W:n teho ilman säröytymistä. Hyötysuhde 10 W:n teholla oli 89 %, mutta tehoa kasvattamalla 18 W:iin päästiin jopa 98 %:n hyötysuhteeseen. Kokonaisharmoninen särö oli vaihteli 0,5–0,7 % välillä 19 kHz:n taajuuteen asti.

Opinnäytetyössä tehty D-luokan vahvistin suoriutui testeistä toivotulla tavalla, joten sitä voidaan käyttää opiskelijaharjoitustöissä valmiina moduulina tai aktiivikauttimen vahvistimena kotistereoympäristössä.

ASIASANAT: äänentoistolaitteet, vahvistimet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics| Electronics Design

2011| 36 pages

Instructors

Ville Huhtinen B.Eng., Timo Tolmunen, D.Sc., Principal Lecturer

Jussi Karjala

CLASS D AMPLIFIER

In this thesis a Class D amplifier for the audio use was designed and built. The amplifier has an almost 90 % efficiency and a small size compared to the power output. In this thesis traditional amplifier types were compared to the Class D amplifier also in the light of advantages and disadvantages.

As output power of the amplifier a 10–20 W power for a 4–8 Ω speaker element was pursued and the circuit board size was attempted to make compact. Only the amplifier without any device housing and power source was built.

The design of the amplifier was initiated on the basis of the basic Class D theory which proceeded deeper into operation. After the theoretical study the actual design of the device could be started. At first it was intended to design a Class D amplifier from separate modules but in the end it was decided to use an integrated amplifier circuit to simplify the project. For the circuit the TPA3001D1 Class D amplifier circuit manufactured by Texas Instruments was chosen. The manufacturer announces a 20 W maximum output power to a 4 Ω speaker.

The amplifier was built and the circuit board was designed according to the manufacturer's datasheets. The ready built device was tested and measured in the laboratory. The measurements and tests showed that the result was a high performance and compact Class D amplifier.

In the measurements the maximum output power was 10 W to a 4 Ω speaker without distortion. The efficiency at a 10 W power was 89 %, but by increasing the power to 18 W, even an efficiency of 98 % was reached. Total harmonic distortion varied between 0.5–0.7 % from 22 Hz to 19 kHz.

The Class D amplifier made in this thesis performed well in all the tests so it can be used as a module in student training projects. It can also be used as an amplifier of an active speaker in a home stereo environment.

KEYWORDS: amplifiers, sound playback devices

SISÄLTÖ

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	1
2	VAHVISTINTYYPPIEN VERTAILU	2
2.1	AB-luokan vahvistin	2
2.2	AB- ja D-luokan hyötysuhde	3
2.3	D-luokan vahvistin	4
2.4	Puolisilta	5
2.5	Kokosilta	6
2.6	D-luokan vahvistintopologioiden edut ja haitat	7
3	VAHVISTIMEN SPESIFIOINTI	8
3.1	Spesifioinnin suunnittelu	8
3.2	Vahvistimen toiminnallinen määrittely	8
4	SUUNNITTELU	10
4.1	Kytkentä	10
4.2	Vahvistimen erilliskomponenttien toiminta	11
4.3	Layoutin suunnittelu	15
4.4	Valmistus	18
5	VAHVISTIMEN TESTAUS JA MITTAUS	20
5.1	Vahvistimen testaus	20
5.2	PWM-signaalin aiheuttamat ongelmat	22
5.3	Alipäästösuodatin mittalaitteelle	22
5.4	Vahvistimen mittaus	27
5.4.1	Kokonaisharmoninen särö ja kohina (THD+N)	28
5.4.2	Kohina	30
5.4.3	Amplitudivaste	30
5.4.4	Vaihevaste	31
5.4.5	Hyötysuhdemittaus	32
6	POHDINTA	34
7	YHTEENVETO	35
	LÄHTEET	36

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

<i>C</i>	Kondensaattori, kapasitanssi
<i>I</i>	Virta
<i>L</i>	Kela, induktanssi
<i>P</i>	Teho
<i>T</i>	Jaksonaika
<i>U</i>	Jännite
η	Hyötysuhde
φ	Vaihekulma
<i>ESR</i>	Equivalent-Series-Resistance, ekvivalenttinen sarjaresistanssi
<i>IC</i>	Integrated Circuit, integroitu piiri
<i>MOSFET</i>	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, kanavatransistori
<i>N</i>	Noise, kohina
<i>PSRR</i>	Power Supply Rejection Ratio, käyttöjännitteen vaimennussuhde
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
<i>RMS</i>	Root Mean Square, tehollisarvo
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ratio, signaalikohinasuhde
<i>THD</i>	Total Harmonic Distortion, kokonaisharmoninen särö
<i>XLR</i>	Äänitekniikassa käytetty liitin

1 JOHDANTO

Transistorin keksimisestä asti audiovahvistimet ovat kehittyneet yksinkertaisesta A-luokan vahvistimesta AB-luokkaan. Tällaisen perinteisen vahvistimen etuja ovat yksinkertaisuus ja edullinen hinta, mutta haittapuolena suurehko koko ja keskinkertainen hyötysuhde. 2000-luvulla on kuitenkin alettu vähitellen käyttää täysin toisella tavalla toimivaa vahvistinta, joka luokitellaan D-luokan vahvistimeksi. D-luokan vahvistin on kuitenkin vielä hiukan tuntematon kuluttajien keskuudessa, joten tämä työ toimii hyvänä mallina sille, millainen toimiva kuluttajakäyttöön suunnattu D-luokan vahvistin voi olla.

Korkea hyötysuhde on D-luokan vahvistimen suuri etu, sillä pienen tehohäviön vuoksi se on erinomainen valinta akkukäyttöisiin sovelluksiin, ja lisäksi D-luokan vahvistimen pieni koko on eduksi akkukäyttöisissä sovelluksissa, kuten esimerkiksi matkapuhelimen piirilevyllä, missä tilaa on muutenkin rajoitettu määrä. Tässä opinnäytetyössä mitataan valmistettavan D-luokan vahvistimen hyötysuhde, mistä voi päätellä tämän vahvistinluokan sopivan juuri akkukäyttöön.

D-luokan vahvistin on tee-se-itse-näkökulmasta hankala toteuttaa toimintatapansa takia. Vastaavanlainen opinnäytetyö on tehty aikaisemmin vuonna 2004, ja siinä vahvistin oli toteutettu erilliskomponenteilla huonoin tuloksin (Palojoki 2004). D-luokan vahvistin on muutenkin aika harvinainen vahvistintyyppi, kun puhutaan vahvistimen valmistamisesta itse, sillä työhön ei löytynyt mitään kirjallisuutta, missä olisi perehdytty tämän tyyppiseen vahvistimeen. Ainoastaan PWM-modulaatioon ja suodattimiin paneutuvaa kirjallisuutta löytyi. Lähteinä jouduttiin tyytymään lähinnä internetlähteisiin.

Tässä työssä käsitellään audiosignaalin vahvistamista D-luokan vahvistimella. Aluksi työssä vertaillaan erityyppisten vahvistinluokkien etuja ja haittoja ja syvennyttään D-luokan vahvistimen toimintaan. Lopuksi käydään läpi vahvistimen toiminta, suunnittelu, piirilevysuunnittelu ja piirilevyn valmistus, testaaminen ja mittaaminen. Mittaustuloksissa verrataan saatuja arvoja valmistajan datalehtien arvoihin.

Vahvistin rakennetaan valmiista IC-piiristä ja pintaliitoskomponenteista, sekä piirilevy suunnitellaan huolellisesti suurtaajuussuunnittelua hyväksikäyttäen. Lopuksi valmis vahvistin testataan laboratorioissa ja tuloksia arvoidaan teorian pohjalta. Vahvistin tulee opetuskäyttöön, ja sitä voidaan käyttää valmiina moduulina harjoitustöissä.

2 VAHVISTINTYYPPIEN VERTAILU

Viimeisimmän 15–20 vuoden aikana audiotekniikassa vahvistinten osa-alueella on kehittynyt uudenlainen teknologia, joka on tuonut huomattavia etuja yleismaailmallisiin A- ja AB-luokan topologioihin. Uutta topologiaa kutsutaan D-luokaksi, jonka suurin etu on sen korkea hyötysuhde. (Moreno & Elliott 2005.)

2.1 AB-luokan vahvistin

AB-luokan vahvistin on perinteisesti toteutettu transistoreilla. Tämäntyyppisellä vahvistimella pääteaste on toteutettu kahdella tehotransistorilla, joista toinen on johtavassa tilassa positiivisella puolijaksolla ja toinen negatiivisella puolijaksolla.

AB-luokan vahvistimella on ongelmana ylimenosärö, joka täytyy eliminoida päätetransistorien kantojen väliin laitettavilla biasointidiodeilla, joiden 0,7 V:n kynnysjännite kumoaa transistorien kanta-emitteriliitoksen 0,7 V:n kynnysjännitteen. AB-luokan vahvistimella on myös ongelmana korkeammilla audiotaajuuksilla päätetransistorien nousuaika eli slew-rate, joka vääristää signaalia ja saa sinimuotoisen signaalin näyttämään kolmioaallolta.

Perinteinen vahvistin tarvitsee tehokkaan teholähteen. Yleensä audiokäyttöön sovelletuissa vahvistimissa käytetään teholähteissä rengassydänmuuntajaa, koska se aiheuttaa erittäin vähän erilaisia häiriötekijöitä ja sen hyötysuhde on tavallista pakkamuuntajaa parempi. Rengassydänmuuntaja on kuitenkin kalliimpi muuntajatyyppejä. Muuntajan teho tulee mitoittaa yleensä kertomalla vähintään kaksi kertaa vahvistimen suurin jatkuva teho. Esimerkiksi 50 W:n audiovahvistimelle laskettuna saataisiin tuloksena 100 VA:n muuntaja, jolloin käytännössä valittaisiin 120 VA:n muuntaja.

Edellä mainituista ongelmista huolimatta AB-luokan vahvistin on todella yleisesti audioalueella käytetty vahvistintyyppi ja komponentit ovat hyvin edullisia lukuunottamatta muuntajaa ja helposti saatavissa. Vahvistimen kytkentä voidaan toteuttaa perinteisillä edullisilla läpivientikomponenteilla, sillä vahvistinkytkentä ei ole erityisen herkkä komponenttien arvojen muutoksille.

Mitä suuremmalla tulosignaalla AB-luokan vahvistinta ajetaan, sitä lämpimämpänä pääteastetransistorit käyvät. Päätetransistori ottaa teholähteestä virtaa aina, kun se on johtavassa tilassa. Tällöin päätetransistorit tarvitsevat suurehkon jäähdytyspinta-alan

ja valmistuskustannuksiin vaikuttaa myös jäähdityslevyn koko. Tyypillisellä AB-luokan vahvistimella hyötysuhde on käytännössä noin 55 %, kun taas D-luokan tapauksessa päästään yli 90 %:in. (Moreno ja Elliott 2005.)

Perinteinen AB-luokan vahvistin voidaan rakentaa helposti erilliskomponenteilla, kun vain osataan vahvistinsuunnittelun perusasiat. D-luokan vahvistimen suurien käyttötaajuuksien takia toimivan tee-se-itse-vahvistimen valmistaminen erilliskomponenteilla on käytännössä mahdotonta. D-luokan vahvistimen komponenteilla ei saa olla liian suuria toleransseja eikä hajasuureita. Siis tavallisia läpivientikomponentteja tulee ehdottomasti välttää. Tällä tyyllä rakennettu D-luokan vahvistin saattaa toimia mutta ei kunnolla. Tässä työssä valmistettavassa laitteessa on käytetty ainoastaan pintaliitoskomponentteja pois lukien piikkirima, joihin lukeutuvat integroitu vahvistinpiiri sekä vastukset, kondensaattorit ja ferriitit. (Moreno ja Elliott 2005.)

2.2 AB- ja D-luokan hyötysuhde

Klassisissa AB-luokan vahvistimissa pääteaste on aina johtavassa tilassa, jolloin se luovuttaa ylimääräisen tehon lämpönä ilmaan. Pääteasteen läpi on kuljettava pieni määrä virtaa koko ajan, jotta vältettäisiin ylimenosäro. Tämän tyyppinen ratkaisu kuluttaa jatkuvasti tehoa, joka lopulta haihtuu hukkalämpönä ilmaan jäähdityksen kautta. Tämän takia AB-luokalla saavutetaan noin 55 %:n hyötysuhde. D-luokan vahvistimella voidaan saavuttaa noin 90 %:n hyötysuhde ja teoriassa 100 %. D-luokan vahvistimen korkea hyötysuhde mahdollistaa käytön ilman jäähdityslevyä, koska laite ottaa virtaa vain, kun pääteasteet ovat johtavassa tilassa. (Moreno ja Elliott 2005.)

Tämän takia D-luokan vahvistin tarvitsee pienikokoisemman muuntajan teholahteeseensä kuin perinteinen AB-luokan vahvistin, sillä D-luokan vahvistin ei korkean hyötysuhteensa ansiosta luovuta juurikaan ylimääräistä tehoa ilmaan jäähdityksen kautta. Jäähdityslevyn puuttuminen mahdollistaa laitteen kevyen rakenteen, mutta laitteen toimiminen korkeilla taajuuksilla aiheuttaa lisätyötä piirilevysuunnittelussa. Piirilevy tulee suunnitella samoilla periaatteilla, joita sovelletaan mihin tahansa suurtaajuussovelluksiin. D-luokan vahvistimen piirilevy on huomattavasti pienempi kuin vastaavan tehoisen AB-luokan vahvistimen. (Moreno ja Elliott 2005.)

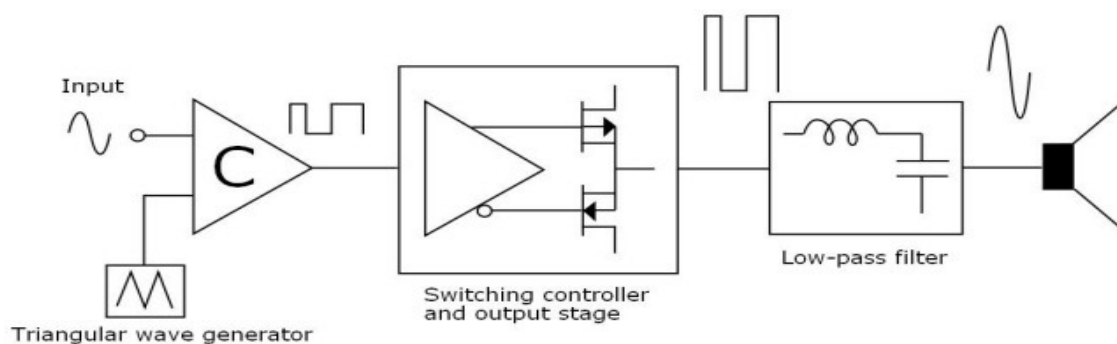
2.3 D-luokan vahvistin

D-luokan vahvistimen (kuva 1) toiminta perustuu piensignaalin modulointiin kolmio- tai sahalaita-aallolla. MOSFET-päätetransistoreita kytketään päälle ja pois, joten tiloja kutsutaan "on" ja "off". (Moreno ja Elliott 2005.)

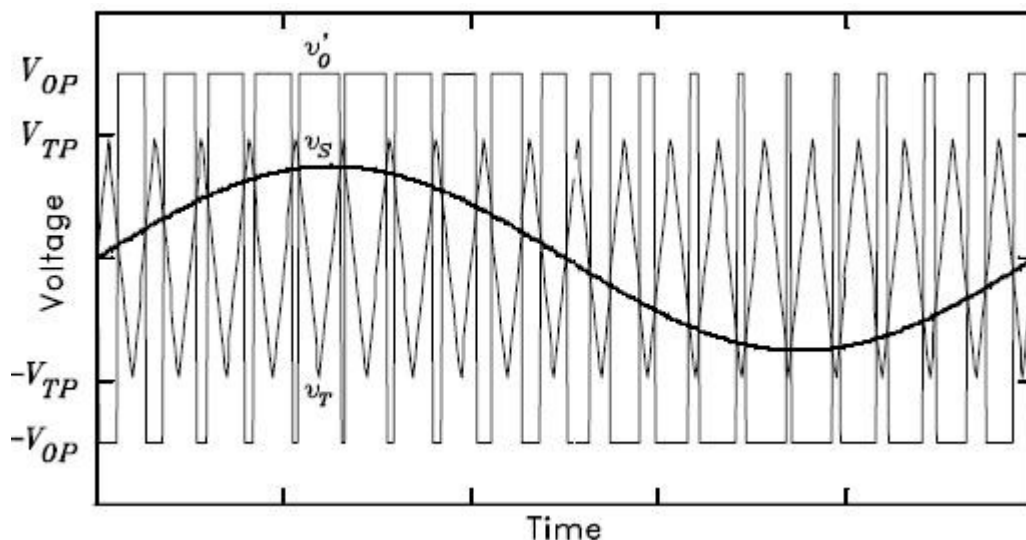
D-luokan vahvistimen toiminta perustuu MOSFET-transistoreihin ja pulssinleveysmodulaatioon, päätetransistorit tarvitsevat suorakaideaaltoa toimiakseen halutulla tavalla, eli pääteastetta kytketään päälle ja pois. piensignaali ohjataan pääteasteeseen PWM-modulaattorin jälkeen. (kuva 1.) (Leach 2001.).

Kun päätetransistori on "on"-tilassa, sen nielusta lähteeseen kulkee tietyn suuruinen virta, eikä teoriassa nielun ja lähteen välillä ole johtavassa tilassa jännitettä. Tällöin transistori ei kuluta tehoa lainkaan ja päästään teoriassa lähelle 100 %:n hyötysuhdetta. Kun transistori on "off" -tilassa, se ei johda, jolloin nielun ja lähteen välillä on tietty ylimenevä jännite, mutta virtaa ei kulje, eli transistori ei luovuta tehoa lämpönä ilmaan. (Moreno ja Elliott 2005.)

Kuvassa 1 vahvistamaton piensignaali tuodaan vahvistimen pulssinleveysmodulaattoriin, jossa ulkoisen oskillaattorin tuottamaa sahalaita- tai kolmioaaltoa moduloidaan audiosignaalilla. Modulaation tuloksena syntyy suorakaideaaltoa, PWM-signaalia, jonka amplitudi ja taajuus ovat vakiot, mutta pulssisuhde muuttuu audiosignaalin taajuuden muuttuessa. Kun pulssisuhde on 50 %, audiosignaalin amplitudi on nollakohdassa. Pulssisuhteen ollessa lähellä 0 % audiosignaalin amplitudi on maksimiarvossaan ja lähellä 99 % minimiarvossaan. Sinimuotoinen piensignaali siis aiheuttaa pulssisuhteen muutoksen 0 %:n ja 99 %:n välillä (kuva 2). Modulaatiossa syntyneellä PWM-signaalilla ohjataan päätetransistoreita johtavan ja johtamattoman tilan välillä. (Moreno ja Elliott 2005.)



Kuva 1. D-luokan vahvistimen peruslohkokaavio (Wikipedia 2006)



Kuva 2. D-luokan vahvistimen PWM-modulaatio (Leach 2001)

Yleensä D-luokan vahvistimissa käytetään taajuuksia 100 kHz–1 MHz, joten tarvitaan myös suurtaajuussovelluksiin tarkoitettuja puolijohteita. Laitteen kustannukset nousevat suuremmiksi, mikäli halutaan matalampia säröarvoja ja levempää taajuuskaistaa. Tehtäessä esimerkiksi audiovahvistinta bassokaiuttimelle voidaan tinkiä vahvistimen kaistanleveydestä ja saada hintaa alhaisemmaksi. (Moreno ja Elliott 2005.)

Oskillaattorin taajuuden valinnalla on merkitystä, sillä siinä täytyy ottaa huomioon Nyquistin teoreema, jonka mukaan näytteenottotaajuuden täytyy olla vähintään kaksinkertainen signaaliin nähden. Käytännössä taajuuden täytyy olla 5–50-kertainen vahvistettavaan signaaliin nähden liiallisen säröytymisen estämiseksi. Audiokäytössä riittää 500 kHz:n taajuus.

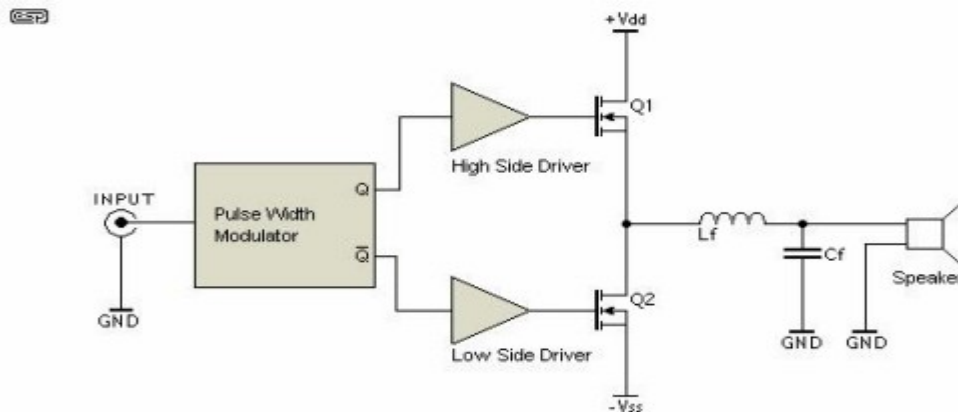
Vahvistetussa PWM-signaaliassa on mukana matalataajuinen komponentti, joka on vahvistettu kopio alkuperäisestä audiosignaalista, sekä korkeammat taajuuskomponentit, jotka ovat PWM-modulaattorin tuottamia. Nämä taajuuskomponentit pitää suodattaa ennen signaalin viemistä kaiuttimeen. Suodattimena käytetään alipäästötyyppistä LC-suodatinta, koska se on käytännössä lähes häviötön.

2.4 Puolisilta

D-luokassa on olemassa 2 eri vahvistintopologiaa: puolisolilla (kuva 3) ja kokosilla (kuva 4). Puolisillassa on 2 pääteastetta ja kokosillassa 4. Kummallakin topologialla on omat etunsa ja haittansa.

Puolisiltatopologian toiminta on seuraavanlainen: Kun PWM-signaalin positiivisella jaksolla MOSFET-transistori Q_1 on johtavassa tilassa (kuva 3), virta alkaa kulkemaan kelan L_f läpi. Tällöin Q_2 on estotilassa.

PWM-signaalin negatiivisella puolijaksolla asetelma kääntyy vastakkaiseksi. MOSFET Q_2 on johtavassa tilassa ja Q_1 estotilassa. Tällöin kelan virta alkaa pienentymään. Kelan virta on kolmioaaltomaista.



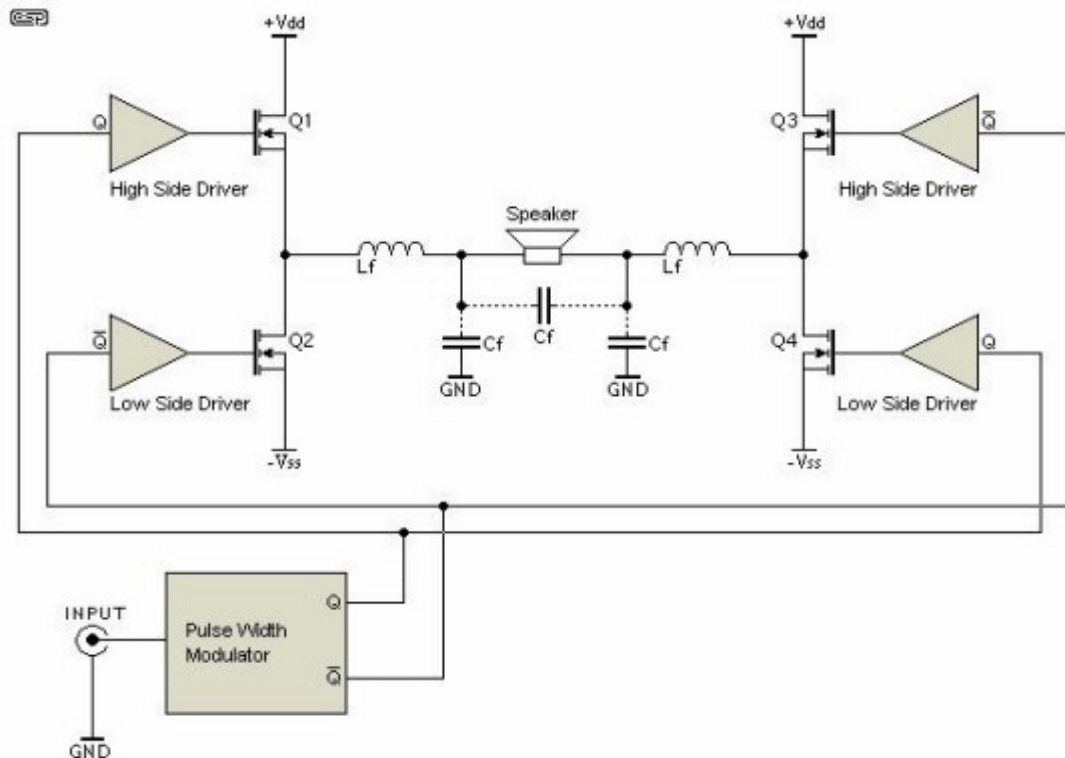
Kuva 3. Puolisiltakytkennällä toteutettu D-luokan vahvistin

2.5 Kokosilta

Kokosillan toiminta on lähestulkoon samanlainen kuin puolisillan. Tällä topologialla saadaan puolella jännitteellä sama teho kuin puolisillassa.

Kuvassa 4 voidaan nähdä kytkennän periaate, eli kokosillassa on toinen pääteaste, jota ohjataan invertoidusti. Kun PWM-signaalin positiivisella jaksolla Q_1 on johtavassa tilassa, on samaan aikaan Q_4 myös johtavana ja Q_2 ja Q_3 estotilassa. Negatiivisella jaksolla ovat vuorostaan Q_2 ja Q_3 johtavana ja Q_1 sekä Q_4 estotilassa.

Kokosiltaa suunniteltaessa voidaan puoliasteen tapauksessa poikkeavasti valita joko yksipuolinen tai kaksipuolinen käyttöjännite. Tällöin teholähteen suunnittelu on vapaampaa.



Kuva 4. Kokosiltakytkennällä toteutettu D-luokan vahvistin

2.6 D-luokan vahvistintopologioiden edut ja haitat

Puolisilta on yksinkertaisempi ja joustavampi rakenne kuin kokosilta, mutta se saattaa tuoda mukanaan ongelmia, kuten ”bus pumping”-ilmiön, joka siirtää virtaa tehollähteeseen ja tällöin lähteen jännite nousee. Tämä saattaa aiheuttaa ei-toivottuja tilanteita vahvistimelle, tehollähteelle ja kaiuttimelle. Kokosillassa pääteasteet vaativat vain puolet käyttöjännitteestä samaa tehoa varten kuin puolisillassa, mutta sen rakenne on monimutkaisempi. Kokosilta tarvitsee vain yksipuolisen käyttöjännitteen, mutta myös kaksipuolista käyttöjännitettä voidaan käyttää. (Moreno ja Elliott 2005.)

Kaiutin ”kelluu” käytettäessä yksipuolista käyttöjännitettä. Kaiutin on kytketty differentiaalisesti vahvistimeen, joten se ei näe ollenkaan DC-jännitettä. Tämä saattaa toisinaan olla vahvistimelle vaarallista, mikäli toinen kaiuttimen navoista pääsee koskettamaan laitteen runkoa, jolloin vahvistimen lähtö oikosulkeutuu maahan. Tällöin vahvistin rikkoutuu. Lähdön suodatin voidaan toteuttaa joko kytkemällä yksittäinen kondensaattori kaiuttimen kanssa rinnalle, tai kondensaattorit kumpaankin kaiuttimen napaan maata vasten tai käyttää kumpaankin toteututusta yhtä aikaa. (Moreno ja Elliott 2005.)

3 VAHVISTIMEN SPESIFIOINTI

3.1 Spesifioinnin suunnittelu

Aluksi vahvistinta lähdettiin suunnittelemaan aivan alkutekijöistä. Ensimmäinen ajatus oli suunnitella vahvistin diskreeteistä komponenteista, mutta simuloitaessa eri toimintalohkojen toimintaa, tultiin siihen tulokseen, että vahvistin olisi erittäin vaikea rakentaa erillisistä lohkoista, kuten kolmioaaltogeneraattori, komparaattori ja pääteasteet.

Tämän tyyppinen ratkaisu olisi tuonut mukanaan lisäongelmia, kuten erilaiset viiveet ja yhteensopimattomuudet. Esimerkiksi D-luokan vahvistimen pääteasteen MOSFET-transistorien tulee olla hyvin identtisiä nousuajoiltaan ja kolmioaaltogeneraattorin tulisi tuottaa mahdollisimman puhdasta aaltoa.

Vahvistin tulisi kotikäyttöön kaiutinkotelon sisään. Aivan aluksi suunnitelmista jätettiin pois toinen kanava, eli vahvistimesta tulisi monovahvistin yksinkertaistamisen vuoksi.

Koska vahvistinta ei tehtäisi diskreeteistä komponenteista, alettiin tutkimaan, olisiko olemassa valmiita IC-piirejä, jotka sisältävät kolmioaaltogeneraattorin, pääteasteiden ohjauksen ja pääteasteet. Tämän tyyppisiä ratkaisuja löytyi lukuisia muutamalta valmistajalta, mutta Texas Instrumentsin TPA3001D1-piiri vastasi spesifikaatioita riittävän hyvin. Texas Instruments lupaa maksimitehoksi 20 W 4 Ω :iin, joten siitä oli hyvä lähtöä liikkeelle. TPA3001D1 tarvitsee lisäksi useita kondensaattoreita, vastuksia ja diodeita toimiakseen.

3.2 Vahvistimen toiminnallinen määrittely

Vahvistimen toiminnallinen määrittely tehtiin mukaillen valmistajan ilmoittamia spesifikaatioita. Näin vahvistimen suunnittelussa oli helpompi edetä. Vahvistimen alustana käytettiin Texas Instruments TPA3001D1 -vahvistinpiiriä.

Spesifikaatiot

- | | |
|--------------|---|
| 1. Teho | 20 W/4 Ω |
| 2. Vahvistus | Säädettävissä: 12 dB, 18 dB, 23,6 dB ja 36 dB |
| 3. Särö | $\leq 1 \% @ 10 \text{ W}/4 \Omega$ |
| 4. Kohina | -81 dB _u ilman painotusta (unweighted) |

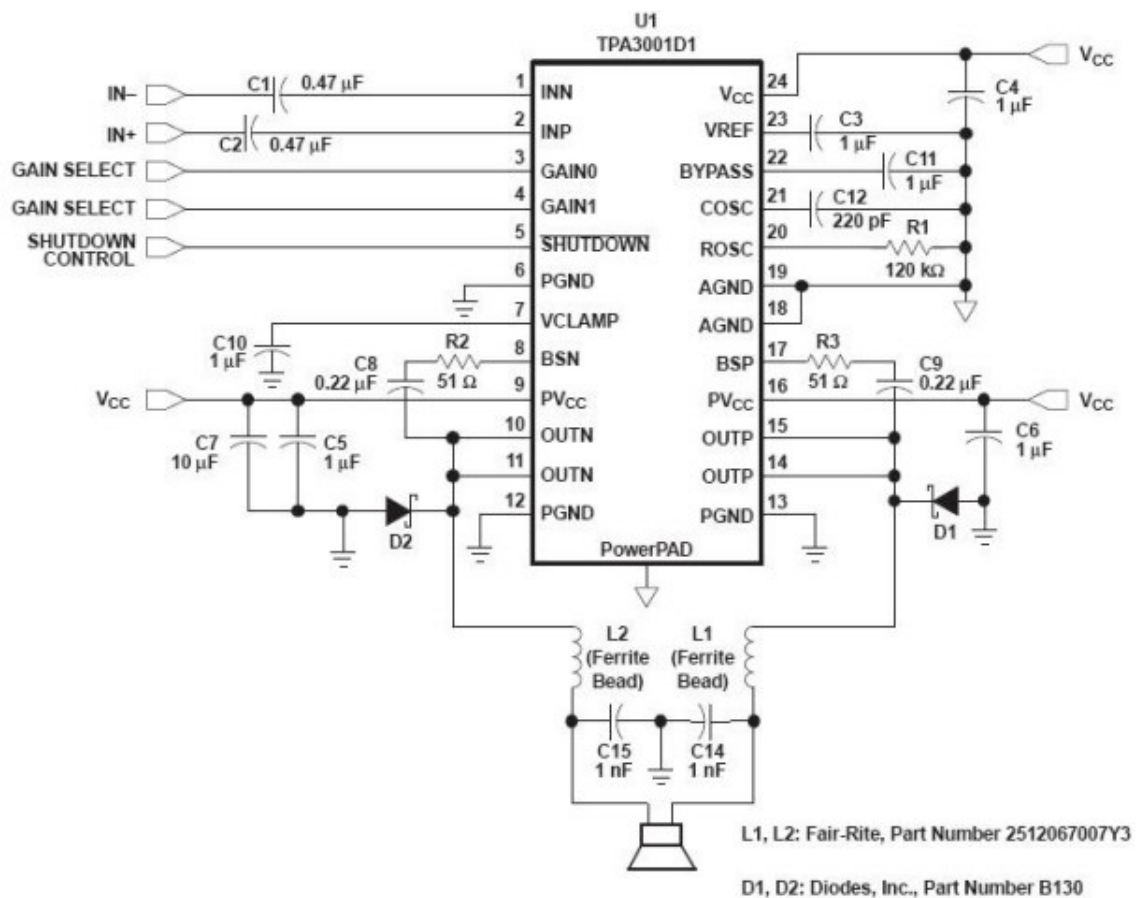
5. Käyttöjännite	8–18 V
6. Kuorman impedanssi	$\geq 3,6 \Omega$
7. Tuloimpedanssi	23 k Ω
8. Käyttölämpötila	-40 °C – +85 °C
9. Piirilevyateriaali	FR4
10. Piirilevyn pintakäsittely	Silkipainatus, läpikuparointi, kultaus
11. Piirilevyn mitat	49 mm x 27 mm
12. Vastukset	0805-pintaliitoskotelolla toleranssi $\pm 5 \%$
13. Kondensaattorit	1206-pintaliitoskotelolla toleranssi $\pm 10 \%$
14. Schottky-diodit	1206-pintaliitoskotelolla
15. Ferriittit	1206-pintaliitoskotelolla

Vahvistinta lähdettiin suunnittelemaan edellä mainittujen arvojen mukaan. Myös mittauksissa verrattiin saatuja tuloksia näihin arvoihin. Spesifioidut arvot ovat valmistajan mittaamia arvoja, joiden rajojen sisällä tulee pysyä vahvistinpiirin rikkoutumisen estämiseksi.

4 SUUNNITTELU

4.1 KytKentä

Vahvistimena päätettiin käyttää Texas Instrumentsin TPA3001D1-piiriä jossa on integroituna D-luokan vahvistimen toiminnallisesti tärkeimmät ja kriittisimmät lohkot. Kuvassa 5 oleva laitteen vaatima kytkentä saatiin hyödynnettyä vahvistimen datalehdeltä.



Kuva 5. Texas Instruments TPA3001D1 –vahvistimen esimerkkikytkentä

Alkuperäistä valmista kytkentää muutettiin vähän yksinkertaisemmaksi. Vahvistimen lepotilaan asettaminen, eli shutdown-ohjaus laitettiin suoraan laitteen käyttöjännitteeseen, koska valmistajan mukaan näin voi tehdä sen sijaan, että shutdownia ohjattaisiin erillisellä kytkimellä joko maahan tai käyttöjännitteeseen. Shutdown mahdollistaa laitteen kytkemisen lepotilaan, eli laite on pois päältä, mutta käyttöjännite on silti päällä. Kun laite herätetään lepotilasta kytkemällä shutdown

käyttöjännitteeseen, ei vahvistimeen kytketty kaiutin toista päällekytkentätransienttia, sillä pääteasteiden jännite ei heilahtele samalla tavalla, kuin kytkettäessä käyttöjännite päälle. Shutdown sammuttaa vain vahvistimen tulo puolen, eli pääteasteeseen ei pääse signaalia. (Texas Instruments 2002.)

Tällöin vahvistimen käynnistyttyä kaiuttimesta ei kuulu mitään. Shutdown-linja olisi myös voinut olla viiveellä ohjattuna puolijohdereleellä toteutettuna tai erillisellä päälle/pois-kytkimellä.

4.2 Vahvistimen erilliskomponenttien toiminta

Tuloimpedanssi ja vahvistuksen säätö

Vahvistimen vahvistusta voidaan säätää kahdella erillisellä jumpperilla *GAIN1* ja *GAIN0*, joiden avulla saadaan vahvistukset 12, 18, 23,6 ja 36 dB (taulukko 1). Jumpperin oikosulkeminen näkyy vahvistimelle loogisena nollana '0' ja jumpperin katkos loogisena ykkösenä '1'. (Texas Instruments 2002.)

Eri vahvistusarvot saavutetaan muuttamalla vahvistimen tuloresistanssia. Kun kahden jumpperin yhdistelmää muutetaan oikosulkemalla, saadaan aikaan eri tuloimpedanssit.

Taulukko 1. Vahvistuksen valitsemisen vaikutus tuloimpedanssiin (Texas Instruments 2002)

GAIN1	GAIN0	AMPLIFIER GAIN (dB)	INPUT IMPEDANCE (kΩ)
		TYP	TYP
0	0	12	241
0	1	18	168
1	0	23.6	104
1	1	36	33

Tulokondensaattorit C1 ja C2

Tulokondensaattorit vaaditaan, jotta vahvistin pystyy biasoimaan tulosignaalin oikealle dc-tasolle optimaalisen toiminnan mahdollistamiseksi. Tässä tapauksessa vahvistimen tuloimpedanssi Z_i ja tulokondensaattori C_i muodostavat ylipäästösuodattimen, jonka rajataajuus määräytyy kaavan

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot C_i \cdot Z_i}$$

mukaan. (Texas Instruments 2002.)

C_i :n arvo on kriittinen, sillä vahvistimen bassotoiston (alataajuuksien toiston) tehokkuus määräytyy suoraan tulopuolen ylipäästösuodattimen mukaan. (Texas Instruments 2002.)

Teholähteen suodatus

TPA3001D1 on korkeasuorituskykyinen CMOS-audiovahvistin ja näin ollen tarvitsee riittävän suodatuksen tehonsyöttöön, jotta voidaan varmistaa kaiutinlähtöön riittävän alhainen kokonaisharmoninen särö. Suodatuksella ehkäistään myös piirin värähtelyä käytettäessä pitkiä kaiutinkaapeleita vahvistimen ja kaiuttimen välillä. Optimaalinen suodatus saavutetaan käyttämällä kahta erityyppistä kondensaattoria, jotka vaikuttavat eri kohinatyyppeihin tehonsyöttökaapeleissa. Korkeataajuisille häiriöille, kuten transienteille sopii keraaminen kondensaattori matalalla *ESR*-arvolla. Tyypillisesti käytetään 1 μF :n keraamista kondensaattoria mahdollisimman lähellä vahvistimen käyttöjännitejohdinta (U_{cc}). Matalataajuisia häiriöitä varten käytetään tyypillisesti 10 μF :n tai suurempaa alumiinielektrolyyttikondensaattoria, joka kytketään mahdollisimman lähelle vahvistinta. Tässä työssä on käytetty 10 μF :n keraamista kondensaattoria. (Texas Instruments 2002.)

BSN- ja BSP-kondensaattorit ja –vastukset (Bootstrap-piiri)

Kokosillan pääteaste käyttää vain NMOS-transistoreita. Pääteaste tarvitsee tämän takia kumpaankin lähtöpuoleen bootstrapiksi kutsuttua piiriä, jotta se voisi käynnistyä kunnolla. Bootstrap-piirissä on sarjassa kondensaattori ja vastus. NMOS-transistori tarvitsee tarpeeksi positiivisen varauksen hilaan ($U_{GS} > U_{th}$), jotta se voi käynnistyä. (Texas Instruments 2002.)

Kummastakin lähdöstä tulee kytkeä 0,22 μF :n keraaminen kondensaattori 25 V:n jännitekestolla vastaavaan bootstrap-tuloon. Kondensaattori kytketään *OUTP*-lähdestä *BSP*-tuloon ja *OUTN*-lähdestä *BSN*-tuloon. (Texas Instruments 2002.)

Bootstrap-kondensaattorien latausvirta tulee rajoittaa n. $50 \Omega \pm 10 \%_{\text{max}}$:n sarjavastuksilla. Virta on rajoitettu korkeintaan 500 μA :in. (Texas Instruments 2002.)

VCLAMP-kondensaattori

Jotta varmistettaisiin, ettei NMOS-päätteiden suurin sallittu hila - lähde-jännite ylitä, sisäinen regulaattori rajoittaa hilan jännitteen. *VCLAMP*-liittimen ja maatasen välille kytketään 1 μF :n kondensaattori, jonka täytyy kestää vähintään 25 V:n jännite. *VCLAMP*-liittimen jännite muuttuu U_{cc} :n mukaan, joten siitä ei saa ottaa käyttöjännitettä muiden piirien käyttöön. (Texas Instruments 2002.)

Käyttöjännitteen puolivälin ohituskondensaattori (midrail bypass capacitor)

Ohituskondensaattori on kriittisin kondensaattori, jolla on useita eri tehtäviä. Käynnistyksen tai shutdown-palautumisen aikana kondensaattori C_{BYPASS} määrittää ajan jonka aikana vahvistin käynnistyy. Kondensaattorin toinen tehtävä on vähentää teholahteen aiheuttamaa kohinaa vahvistimen lähtöön. Tämä kohina aiheutuu vahvistimen sisäisestä käyttöjännitteen puolivälin muodostuksesta, joka ilmenee *PSRR*:n ja *THD+N*:n heikentymisenä. Suositeltava kondensaattori on keraaminen tai tantaalinen matala-*ESR* 0,47 μF –1 μF :n kondensaattori, jotta saavutetaan paras suorituskyky *THD+N*:n ja pokahtukseneston osalta. (Texas Instruments 2002.)

VREF-irtikytkentäkondensaattori

VREF-liitin on vahvistinpiirin sisäisen 5 V:n jännitelähteen lähtönasta, joka on sisäistä oskillaattoria ja vahvistuksen säätölogiikkaa varten. *VREF* tarvitsee 0,1–1 μF :n kondensaattorin maatasoon kytkettynä, jotta sisäinen 5 V:n regulaattori pysyisi vakaana. Tätä regulaattoria ei voida käyttää käyttöjännitteenä muille piireille. (Texas Instruments 2002.)

DIFFERENTIAALINEN TULO

Vahvistimen differentiaalinen tuloaste vaimentaa molemmissa tulolinjoissa ilmenevän kohinan. Vahvistinta voidaan käyttää joko differentiaalitulolla, jolloin positiivinen audiosignaali kytketään *INP*-nastaan ja negatiivinen audiosignaali *INN*-nastaan, tai single-ended-tyyppisesti yksipuolisella audiotulolla kytkemällä audiosignaali *INP*-nastaan ja maadoittamalla *INN*-nasta kondensaattorilla, johon kytketään syöttävän linjan maataso. Jotta saavutettaisiin paras suorituskyky, maadoitus on hyvä tehdä syöttävän laitteen puolella vahvistimen sijasta. (Texas Instruments 2002.)

Toimintataajuuden asettaminen

Vahvistimen hakkurin toimintataajuus määritellään käyttämällä R_{OSC} - ja C_{OSC} -nastoihin kytketyillä vastuksella ja kondensaattorilla. Taajuus voi vaihdella 225 kHz ja 275 kHz:n välillä, kun R_{OSC} -vastuksen ja C_{OSC} -kondensaattorin arvoja vaihdellaan.

Komponenttiarvot voidaan laskea kaavalla

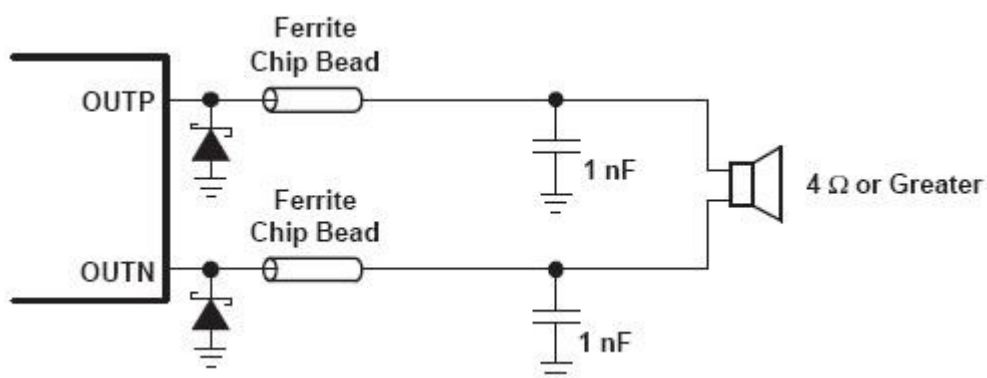
$$f = \frac{6,6}{R_{osc} \cdot C_{osc}}$$

missä R_{osc} on vastus, C_{osc} kondensaattori ja f on taajuus. (Texas Instruments 2002.)

Shutdown-toiminto

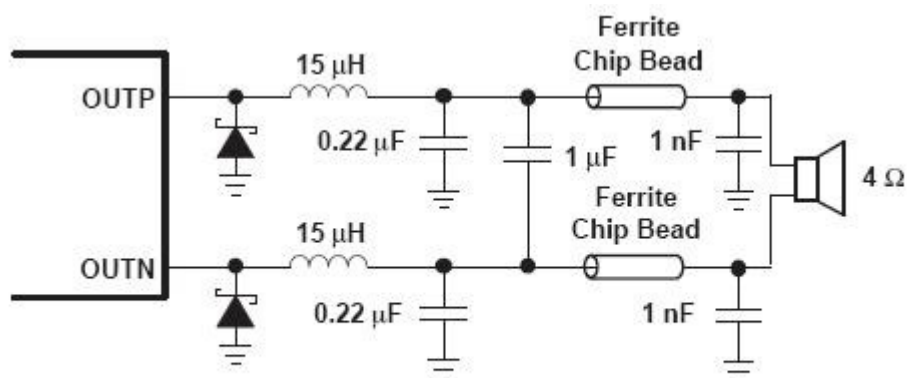
Vahvistimessa on shutdown-sammutustoiminto, joka on suunniteltu akkukäyttöä varten. Vahvistimen lähtö voidaan sammuttaa alasvetämällä shutdown-nasta, jolloin vahvistin kuluttaa erittäin vähän virtaa n. 1 μ A:n verran. Shutdownia ei saa koskaan jättää kytkemättä mihinkään, sillä muuten vahvistimen toiminta voi olla ennalta-arvaamatonta. Ihannetilanteessa shutdown on alasvedettynä vahvistimen käynnistyksen aikana ja käynnistyksen jälkeen shutdown viedään ylös. Mikäli toimintoa ei haluta käyttää, voidaan shutdown kytkeä suoraan käyttöjännitteeseen. (Texas Instruments 2002.)

Lähdön suodatin



Kuva 6. Alipäästösuodatin vahvistimen lähdössä (Texas Instruments 2002)

Vahvistimen lähtöön tulee laittaa alipäästösuodattimeksi ferriittit, jotta vahvistin läpäisisi CE:n asettamat EMI-päästöspezifikaatiot ja jos laitteen lähellä on yli 1 MHz:n taajuudella toimiva piiri (kuva 7). Ferriittisuodatin vaimentaa EMI:a 1 MHz:n ja sitä suuremmilla taajuuksilla. Ferriittiä valitessa tulee valita sellainen, millä on korkea impedanssi korkeilla taajuuksilla, mutta millä on hyvin matala impedanssi matalilla taajuuksilla. Mikäli käytetään pitempiä kuin 30 cm:n kaiutinjohtoja tai lähellä on alle 1 MHz:n taajuudella toimivia laitteita, tulisi käyttää LC-tyyppistä lisäsuodatinta sarjassa vahvistimen lähdön kanssa. (Texas Instruments 2002.)



Typical LC Output Filter for 4-Ω Speaker, Cutoff Frequency of 27 kHz

Kuva 7. Lisätty LC-suodatin lähtöön (Texas Instruments 2002)

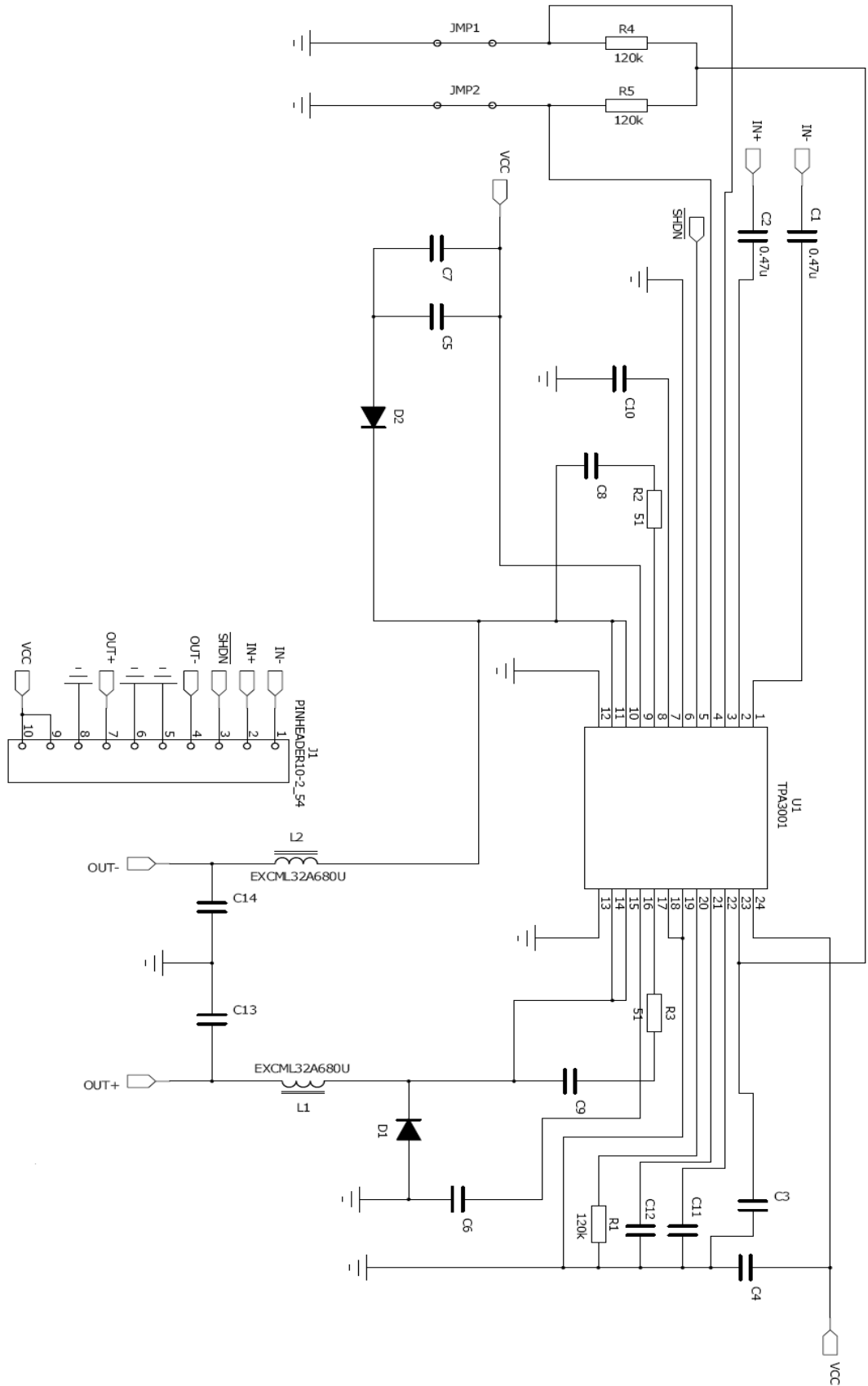
4.3 Layoutin suunnittelu

Suunnittelussa tuli ottaa huomioon signaalikohinasuhde (*SNR*) ja hajasuuret suurista taajuuksista johtuen. Muun muuassa tämän vuoksi piirilevyn fyysisistä mitoista tuli suhteellisen pienet verrattaen vastaavantehoiseen AB-luokan vahvistimeen. Pienellä koolla on myös etuna se, että vahvistin voidaan asentaa suoraan kaiutinkotelon sisään. Vahvistinkytkennässä on se verran vähän komponentteja, että se myös rajoitti piirilevyn koon pieneksi.

Kytkenän piirtäminen ennen piirilevysuunnittelua toteutettiin Pads 2005 Pads Logic -ohjelmalla. Kytkentä piirrettiin mukailen TPA3001D1-vahvistimen datalehdeltä löytyvää esimerkkikytkentää, josta itse toteutettiin vahvistuksen säätäminen *GAIN0* ja

GAIN1-jumperilla. Näille jumpereille tehtiin piirilevyille omat juotoskohdat, joihin voi halutessa juottaa oikosulut jumpereiksi.

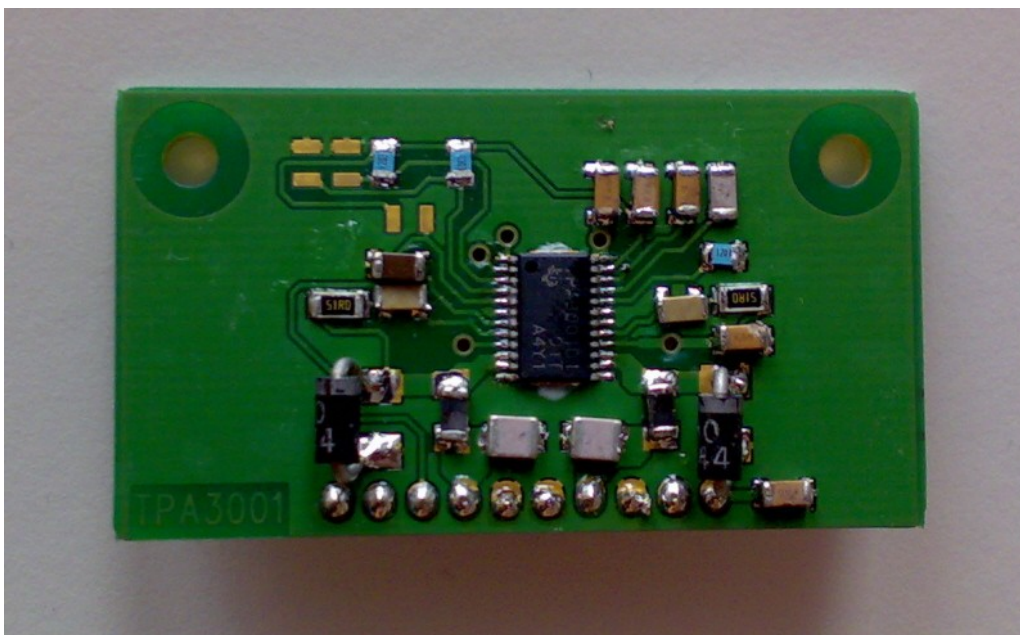
Toiseksi shutdown-toiminto eliminoitiin kytkemällä se suoraan käyttöjännitteeseen. Kytkeä haluttiin saada mahdollisimman yksinkertaiseksi.



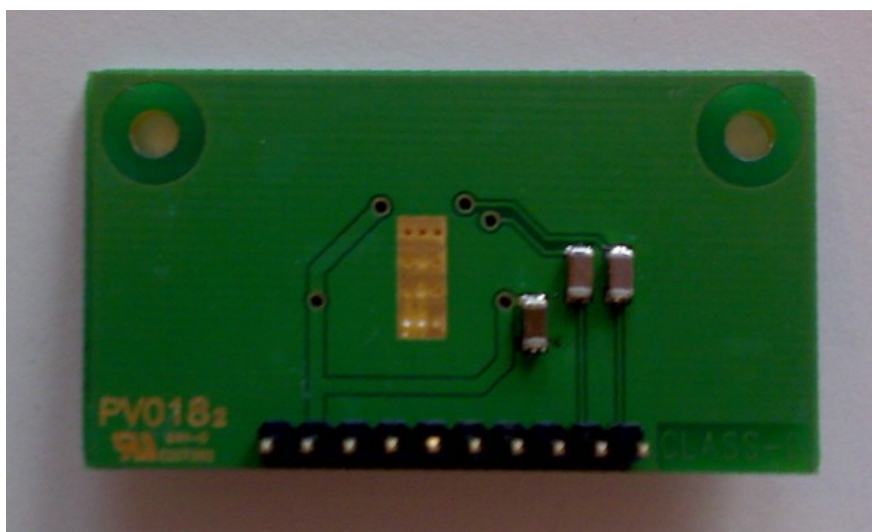
Kuva 8. Lopullinen kytkentä

4.4 Valmistus

Piirilevyllä olevien pienien eristevälien ja läpivientien takia se päätettiin valmistaa teettämällä piirilevyjä valmistavassa yrityksessä. Lopputuloksena saatiin hyvin tarkoituksenmukainen piirilevy, jossa on silkkipainatus ja kullatut juotospinnat. Valmiiksi juotettu D-luokan vahvistin näkyy kuvissa 9 ja 10.



Kuva 9. Valmiiksi juotettu D-luokan vahvistin



Kuva 10. Valmis D-luokan vahvistin alapuolelta

Levyjä valmistettiin 55 kpl, sillä valmistajan yhteen piirilevyaihioon mahtui tämän kokoisia piirilevyjä se määrä. Lisäksi tässä työssä käsiteltävä D-luokan vahvistin tulee palvelemaan opetuskäytössä. Opiskelijat voivat rakentaa valmiille piirilevyille komponentit lisäämällä valmiin ja toimivan D-luokan vahvistimen.

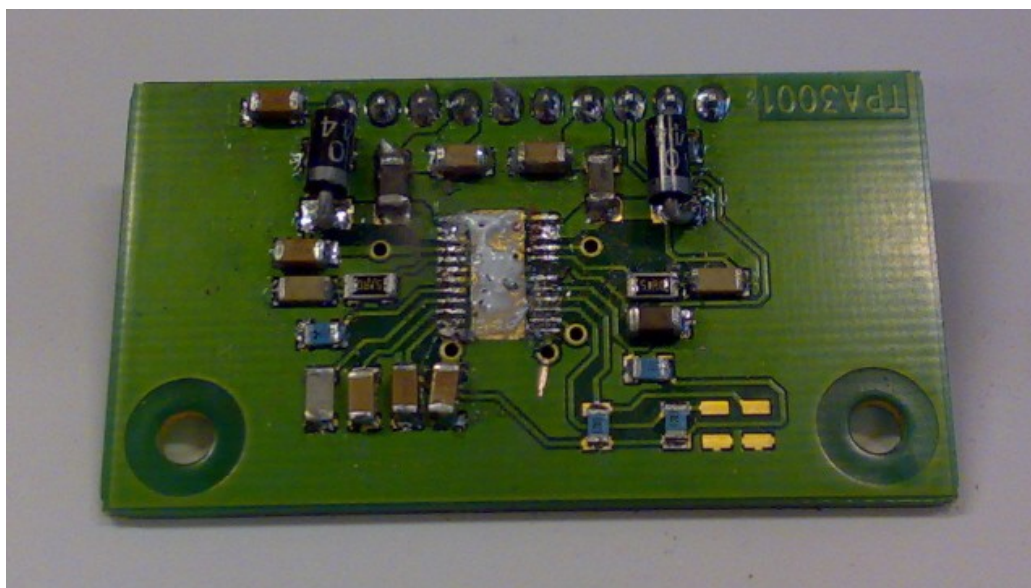
Komponentit juotettiin vahvistimen piirilevyille käsin. Apuna käytettiin mikroskooppia, sekä fluksia parantamaan juotettavuutta. TPA3001D1-piirin käsinjuottaminen vaatii erityistä tarkkuutta ja vakaata kättä. Juottamisen vaikeutta lisäsi piirilevyllä oleva thermal pad, eli jäähdytyspinta jonka kautta vahvistimen IC-piiri siirtää ylimääräisen lämmön piirilevyyn. IC-piirin ja thermal padin väliin laitettiin piitahnaa lämmönjohtavuuden parantamiseksi. IC-piirin jalat juotettiin myös käsin fluksia eli juoksutetta hyväksikäyttäen. Ensin thermal padille laitettiin piitahnaa, jonka jälkeen IC-piiri aseteltiin varovasti oikeaan asentoon juotoskohtiin. Tämän jälkeen piirin jaloille laitettiin fluksia. Fluksin laittamisen jälkeen jalat pystyttiin juottamaan pienikärkisellä kolvilla mikroskoopista katsomalla, koska fluksi auttaa tinaa juottumaan juuri oikeisiin kohtiin, eikä piirin jalkojen väliin muodostu oikosulkuja.

5 VAHVISTIMEN TESTAUS JA MITTAUS

5.1 Vahvistimen testaus

Vahvistimen testaus aloitettiin kytkemällä ensin vain käyttöjännite päälle. Käyttöjännitteenä käytettiin 15 V:n tasajännitettä. Tässä vaiheessa tarkastettiin että vahvistin käy vakaasti eikä lähde oskilloimaan. Ensimmäisellä yrityksellä vahvistimen ollessa käyttöjännitteessä oskilloskoopin mittapää oikosulki signaalin virheellisesti vahvistimen signaalin positiivisen navan ja maan, jolloin vahvistinpiirin toinen pääteaste rikkoutui. TPA3001D1-piiri jouduttiin irrottamaan piirilevystä ja juottamaan uusi tilalle (kuva 11).

Ennen tätä vaihetta olisi pitänyt lukea tarkemmin valmistajan datalehteä, jossa olisi informoitu vahvistimen lähdöstä. Vahvistimessa on differentiaalinen lähtö, jolloin kaiutin kelluu käyttöjännitteiden välillä ja tällöin vahvistin on helppo rikkoa varomattomalla työskentelyllä.



Kuva 11. Palanut vahvistinpiiri irrotettu piirilevystä

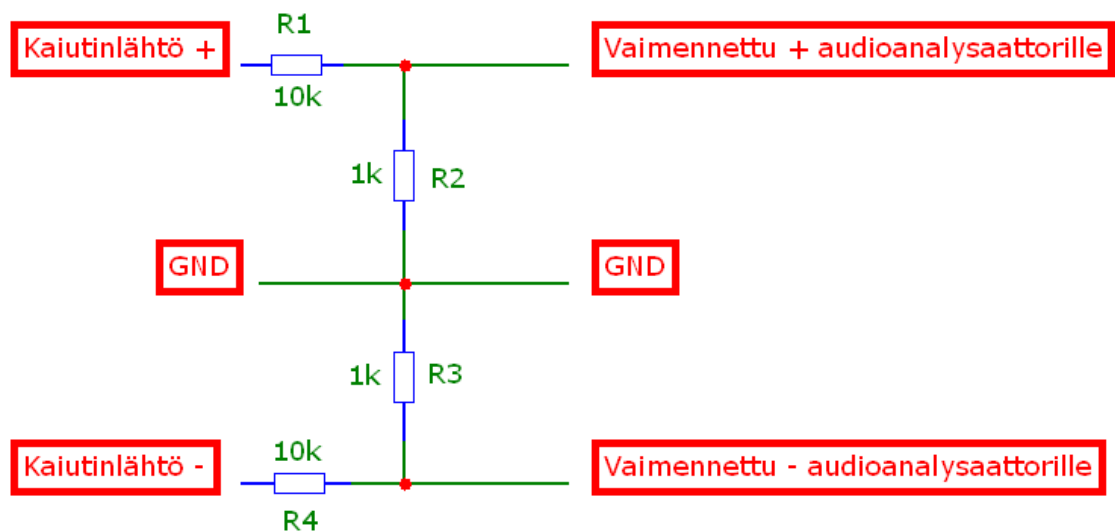
Piirin vaihdon jälkeen suoritettiin uusi käynnistys. Teholähteen virtamittarista oli hyvä tarkistaa käyntivirran tasaisuus. Vahvistimen tyhjäkäyntivirta oli 20–30 mA. Tarkkaa tulosta ei tiedetä teholähteen virtamittarin epätarkkuuden vuoksi, mutta tulos oli suuntaa-antava ja kytkentä näytti toimivan oikein.

Ensin kytkentään syötettiin 1 kHz:n sinisignaalia signaaligeneraattorista ja kuormana käytettiin tehodekadivastusta jonka resistanssiksi valittiin 8 Ω . Käyttöjännitteksi valittiin 15 V sekä testaukseen, että mittaamiseen.

Vahvistinta testattiin tässä vaiheessa nostamalla tulosignaalin tasoa ja tarkkailemalla virtamittaria. Testi osoitti vahvistimen toimivan kuten pitääkin, koska vahvistin otti virtaa sitä enemmän mitä enemmän tulosignaalin tasoa kasvatettiin.

Testauksen toisessa vaiheessa tehodekadivastuksen paikalle vaihdettiin 10 W:n ja 4 Ω :n kaiutin ja korvalla kuuntelemalla todettiin vahvistimen äänenlaatu. Tässä vaiheessa vahvistimeen syötettiin edelleen signaaligeneraattorista sinimuotoista signaalia. Äänenlaadullisesti vahvistin vaikutti toimivalta, sillä äänessä ei ollut nopealla kuuntelemisella havaittavissa säröä eikä sivuhäiriöitä.

Testauksen viimeisessä vaiheessa siirryttiin käyttämään audioanalysaattoria, josta saa tulostettua mittaustulokset taajuuden funktiona. Audioanalysaattorilla testattaessa säästettäisiin aikaa ja saataisiin riittävän tarkat tulokset. Vahvistinkytkennälle piti rakentaa audioanalysaattoria varten mittauskaapelit XLR-liittimillä varustettuna. Näin välttyttiin huonolta kontaktilta ja saatiin vääristämättömät tulokset. Vahvistimen lähtöön kytkettiin kuorman rinnalle kuvassa 12 näkyvä 1 k Ω ja 10 k Ω vastuksista tehty vaimennin, joka vaimentaa suuren lähtösignaalin 1/10 osaan. Audioanalysaattoriin ei saa syöttää vahvistettua signaalia, sillä se on tarkoitettu piensignaaleille.



Kuva 12. 1/10 vaimenninkytkentä

5.2 PWM-signaalin aiheuttamat ongelmat

Mittauksissa todettiin vahvistimen suuren toimintataajuuden sekoittavan audioanalysaattorin mittaustuloksia. Vahvistin antaa lähtöön suoraan sen tuottamaa 500 kHz:n pulssinleveysmodulaation, jossa on paljon särökomponentteja. Tästä syystä audioanalysaattori antoi erittäin korkeita $THD+N$ -arvoja, koska vahvistettu sinimuotoinen signaali on moduloituna pulssijonoihin. Myös oskilloskoopilla tarkasteltaessa lähdön signaalia sinimuotoinen testisignaali saatiin näkymään, mutta siinä oli vielä sekoittuneena korkeataajuisia komponentteja, jotka saattoi nähdä terävinä piikkeinä sinisignaalissa. Tämän vuoksi ennen analysaattoria piti suunnitella ja rakentaa alipäästösuodatin, jonka rajataajuudeksi valittiin 25 kHz, jotta audioanalysaattori ottaisi huomioon pelkät audioalueen (20–22 kHz) signaalit.

Suodatuksen päätarkoituksena on suodattaa pois PWM-signaali. Muuten mittaustulokset olisivat epäluotettavat, koska useimmissa audioanalysaattoreissa on sisäiset suodatinlohkot, jotka eivät pysty käsittelemään nopeita PWM-signaalin nousevia reunoja. (Texas Instruments 2004.)

5.3 Alipäästösuodatin mittalaitteelle

Texas Instrumentsin mukaan suodattimena voidaan käyttää passiivista RC -suodatinta, mutta tässä työssä käytettiin aktiivista sallen-key-suodatinta, sillä sen todettiin olevan passiivista jyrkempi suodatinvaihtoehto. (Texas Instruments 2004.)

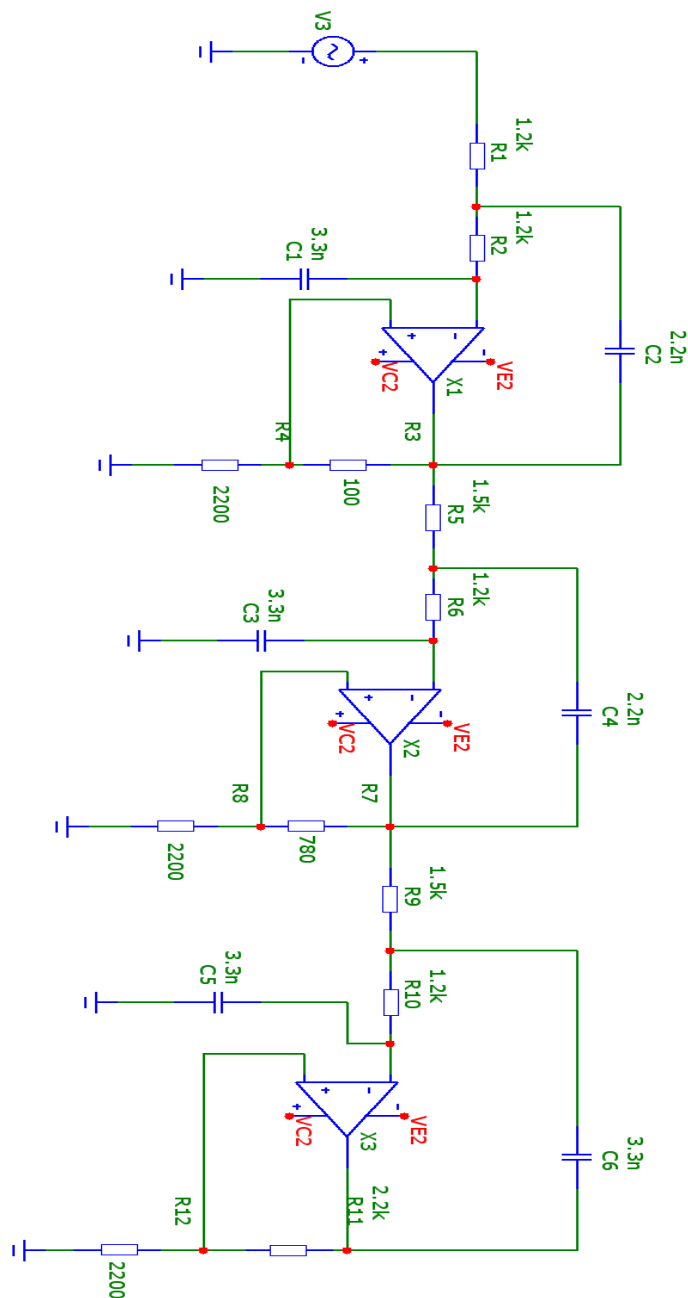
Suodattimeksi valittiin kuudennen kertaluokan sallen-key-tyyppinen aktiivinen alipäästösuodatin (kuva 13), jonka ylärajataajuus on 22 kHz. Simuloinnissa kuitenkin päädyttiin 20 kHz rajataajuuteen, koska se voidaan saavuttaa todellisilla komponenttiarvoilla helposti. Vaihevasteesta voidaan nähdä, että vaihe kääntyy rajataajuudella 200° , mutta sillä ei ole mittausten kannalta suurta merkitystä. Vahvistusta tuli kolmella peräkkäisellä aktiivisella suodattimella 9 dB, joten simuloinnista kuvassa 14 voidaan lukea -3 dB:n piste 6 dB:n kohdalta.

Sallen-key-suodattimen peruskytkentä on toteutettu operaatovahvistimen ja kahden vastuksen ja kondensaattorin avulla. Suodattimen etuna ovat sen yksinkertaisuus ja helppo mitoittavuus.

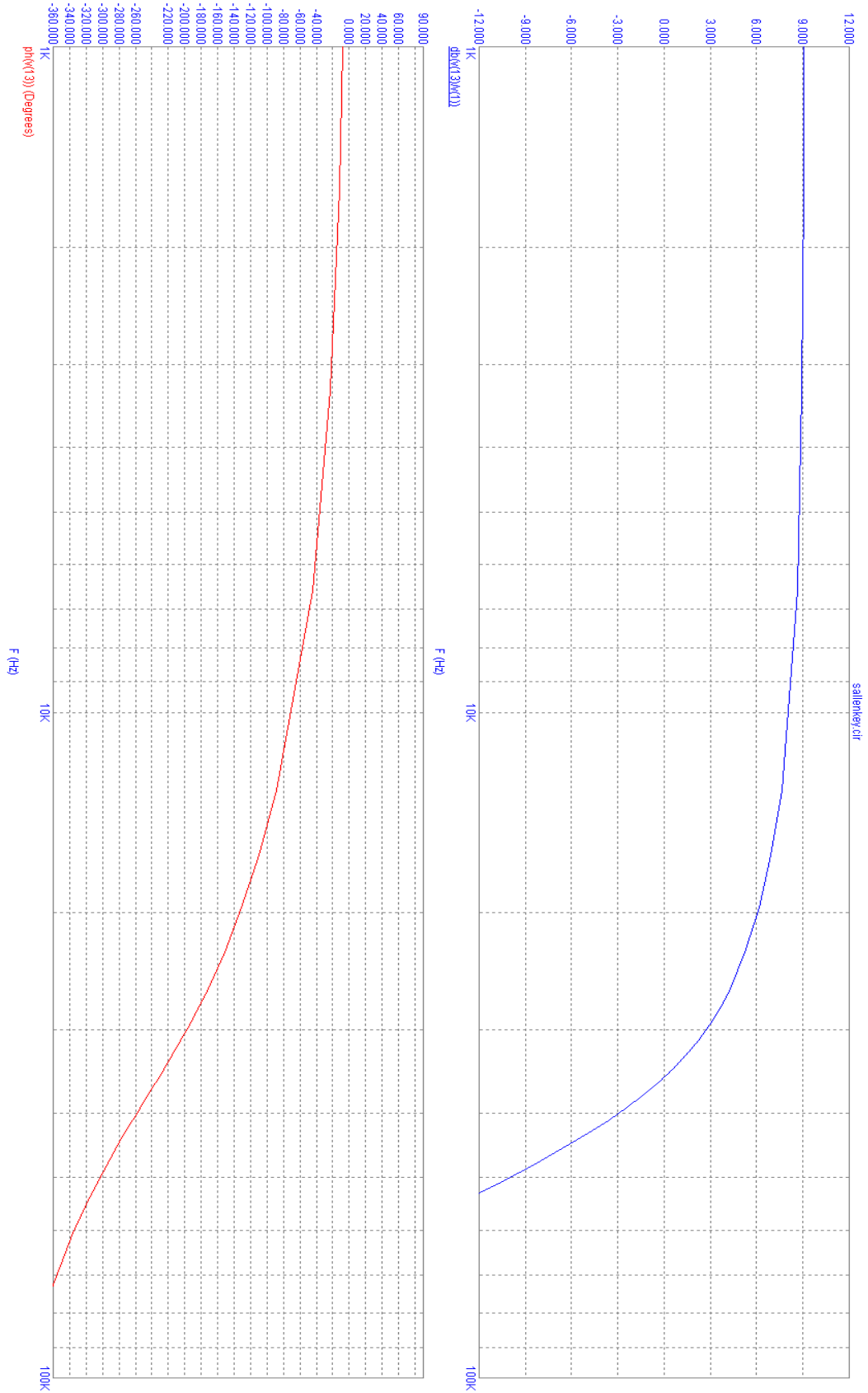
Suodattimen haittapuolena on kovin suuri herkkyys komponenttiarvojen muutoksille, joten sitä ei kannata toteuttaa käytännössä halvoilla läpivientikomponenteilla, joilla on

suuri toleranssi. Tämän vuoksi suodatin suunniteltiin rakennettavaksi pintaliitoskomponenteilla. Rakennushetkellä oli helposti saatavilla vastuksia, joiden toleranssi oli $\pm 5\%$, ja kondensattoreita joilla oli $\pm 10\%$.

Suodattimen tulo ja lähtö ovat differentiaaliset, koska vahvistimen lähtö ja analysaattorin tulo ovat myös differentiaaliset. Täten suodatin toteutettiin laittamalla rinnakkain kaksi kuudennen asteen suodatinlohkoa, joilla on yhteinen käyttöjännite ja maataso. Kuvassa 13 suodattimen lähtö on operaatiovahvistin X_3 lähdössä.



Kuva 13. Suodattimen kytkentä



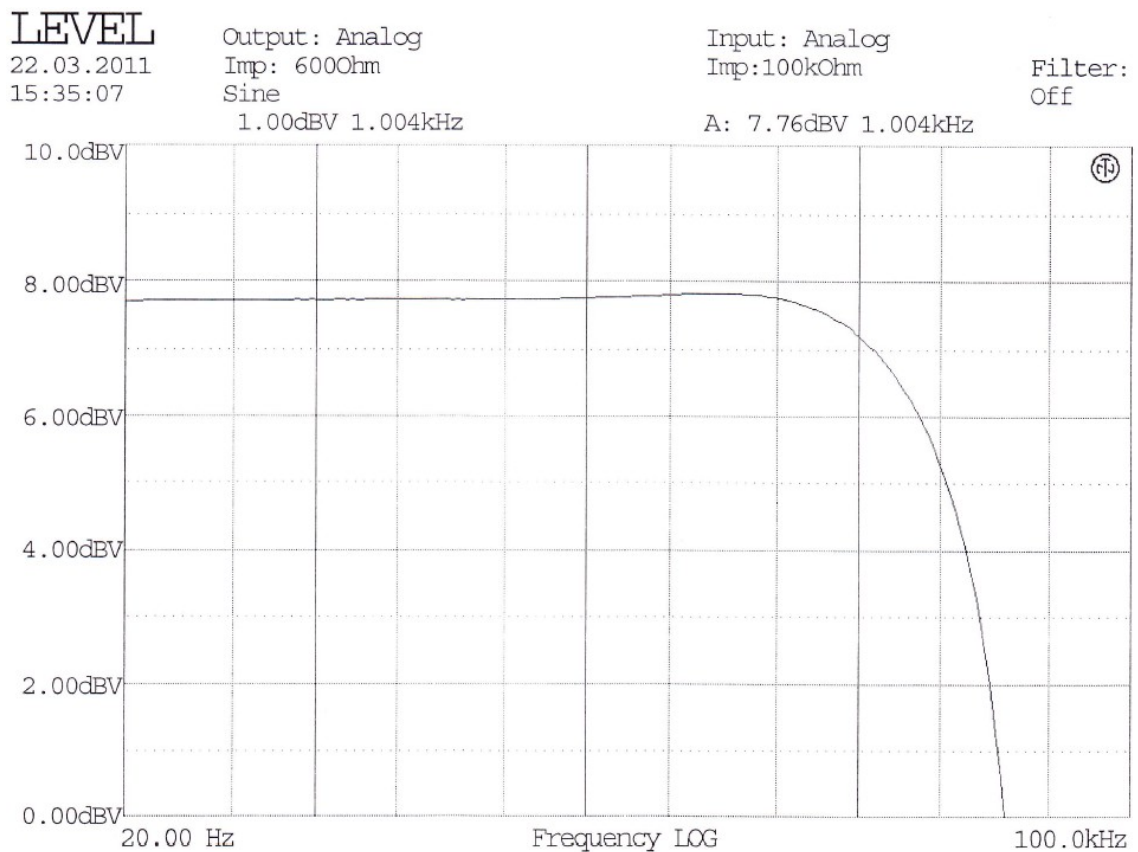
Kuva 14. Alipäästösuodattimen amplitudivaste ja vaihevaste simuloituna Microcapilla

Mittauksissa todettiin (kuva 15), että tavoiteltu rajataajuus ja vahvistus saavutettiin tarkasti. Rajataajuus sijoittui noin 22 kHz taajuudelle, kun alun perin tavoiteltu taajuus oli 22 kHz, eli simulaatiossa päästiin lähelle tavoitetta. Suodattimen vahvistukseksi saatiin 7,76 dB. Vahvistus ei ollut aivan odotettu, mutta se oli riittävä, sillä merkittävämpää oli saada rajataajuus kohdalleen.

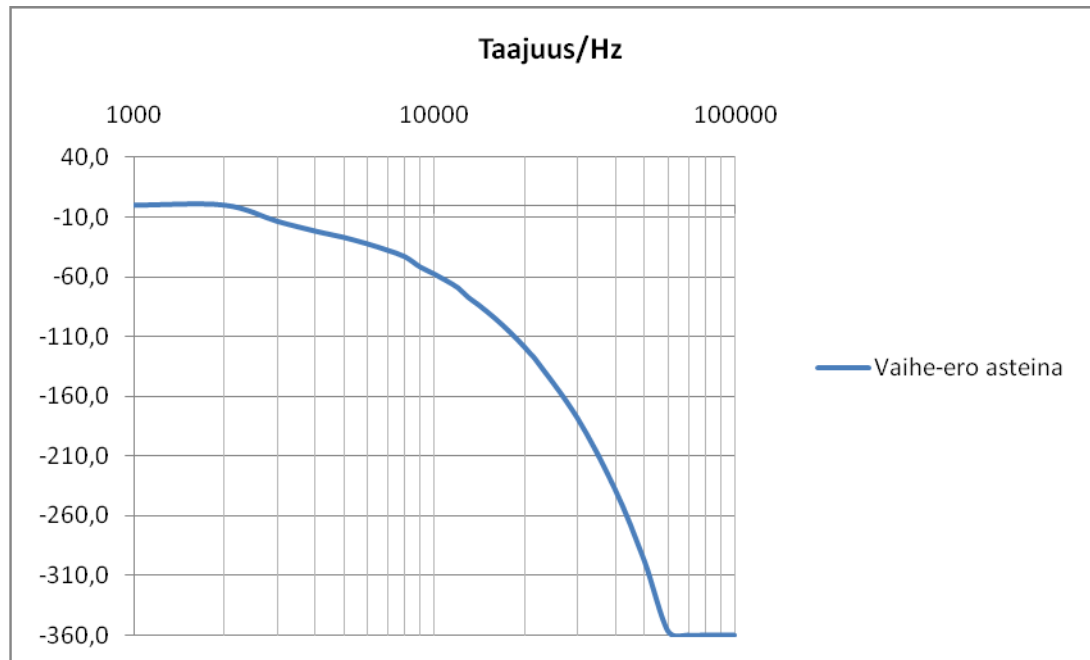
Vaihevaste mitattiin oskilloskooppia käyttäen (kuva 16) ja tiettyjen taajuuksien kohdilta mitattiin tulevan ja lähtevän signaalin aikaero Δt . Vaihevasteessa päästiin erittäin lähelle teoreettista arvoa. Vaihe-ero saadaan laskettua kaavalla

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ, \text{ kun } T = \frac{1}{f},$$

missä φ on vaihekulma, t on aika, T on jaksonaika ja f on taajuus.

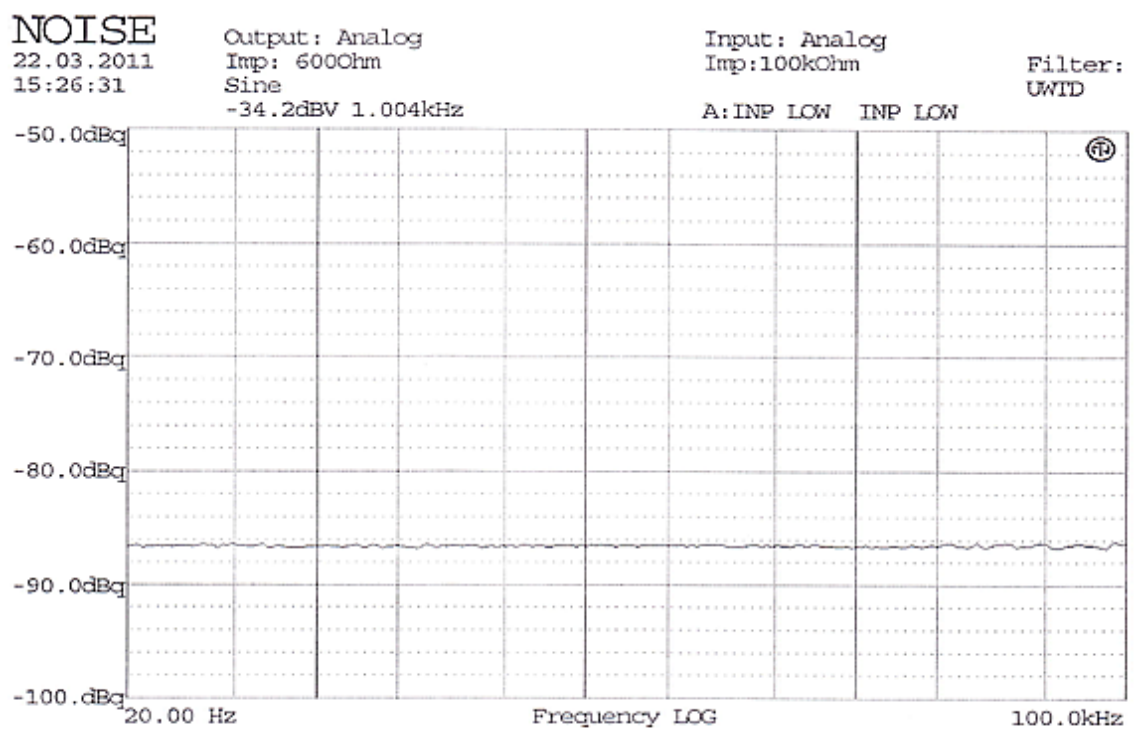


Kuva 15. Suodattimen mitattu amplitudivaste



Kuva 16. Suodattimen vaihevaste

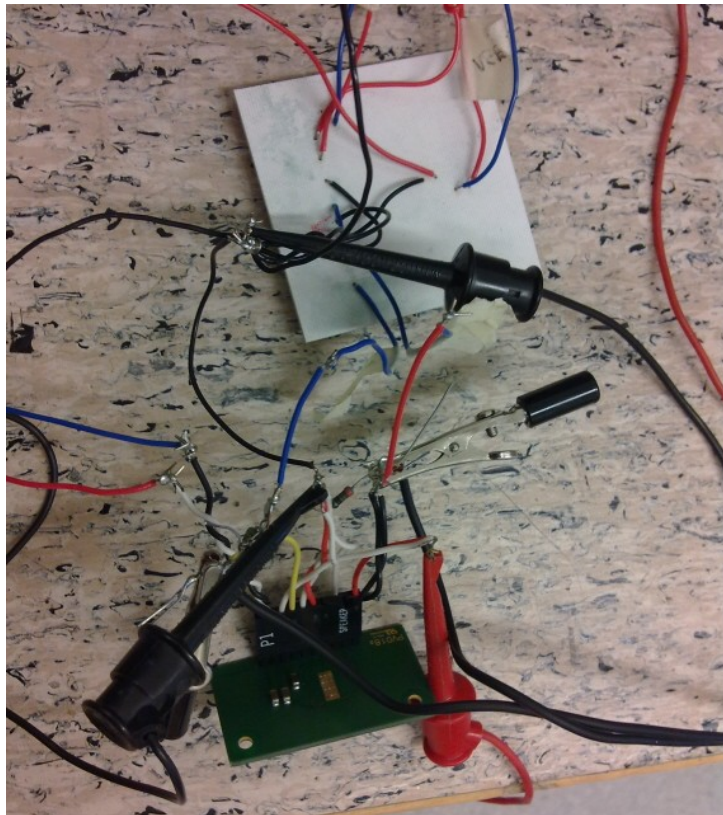
Suodattimen valkoinen kohina täytyi myös mitata (kuva 16), sillä vahvistin oli mittauksen aikana kiinni suodattimessa käytännön syistä. Vahvistimen ja suodattimen kokonaiskohinasta voidaan vähentää suodattimen tuottama kohina. Suodattimen kohinaksi mitattiin -86 dB_u :ä. Analysaattorin -108 dB_u :n pohjakohina on referenssitasona.



Kuva 17. Suodattimen kohina

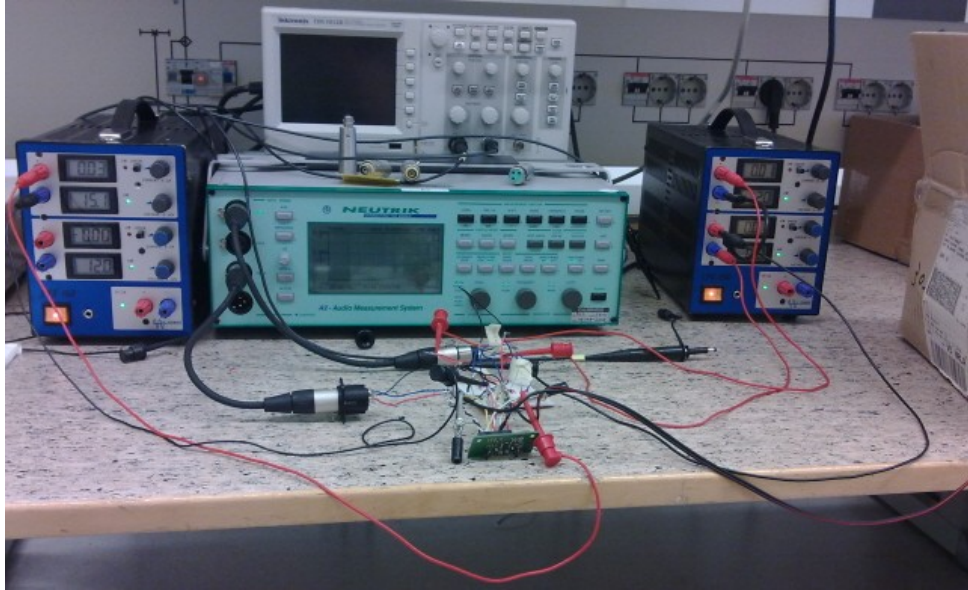
5.4 Vahvistimen mittaus

Suodattimen valmistumisen ja testaamisen jälkeen se asennettiin D-luokan vahvistimen lähdon ja audioanalysaattorin tuloon väliin (kuvat 18 ja 19). Asetelmassa audioanalysaattorin lähtö on kytketty vahvistimen tuloon, jonne analysaattori syöttää testisignaalia.



Kuva 18. Suodatin (vaalea piirilevy) kytkettynä vahvistimeen

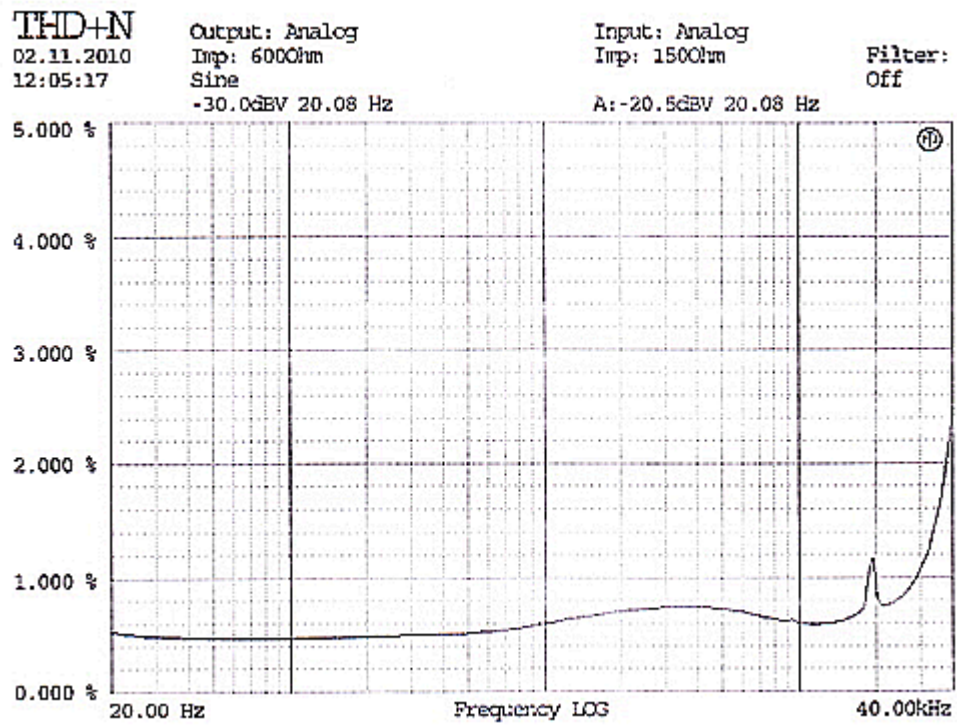
Suodattimen kytkemisen jälkeen mittaukset voitiin varsinaisesti aloittaa, sillä suodattimen ansiosta ei pitäisi olla mittauksia häiritseviä tekijöitä. Mittauksissa käytettiin audioanalysaattoria, oskilloskooppia, kaiutinta ja kahta teholähdettä (kuva 19). Tuloksissa tulee ottaa huomioon vahvistimen ja mittalaitteen välillä oleva suodatin, joka antaa tuloksiin oman kohinansa ja särönsä. Lisäksi tason mittaustuloksissa tulee ottaa huomioon 1/10 vaimennin (kuva 12), joka on kytketty vahvistimen jälkeen ennen suodatinta.



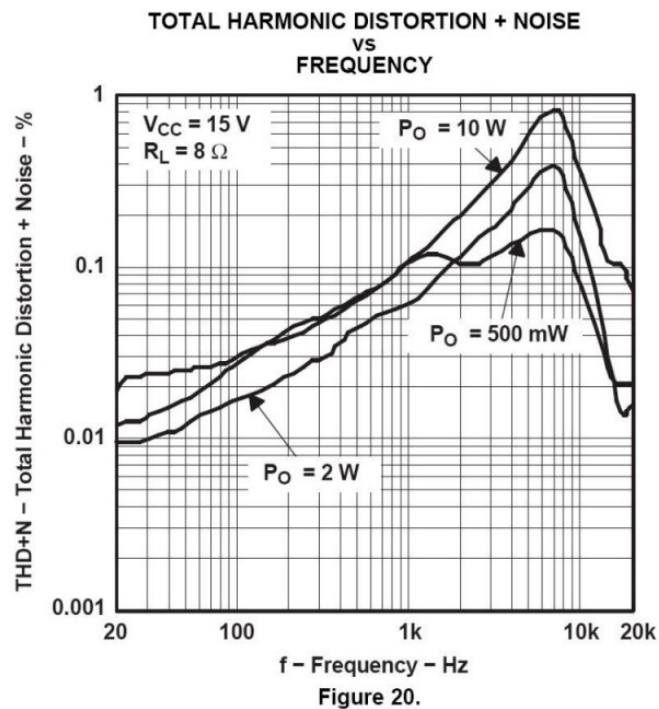
Kuva 19. Koko mittauskoonpano laboratoriossa

5.4.1 Kokonaisharmoninen särö ja kohina (THD+N)

Mittausten ensimmäisessä vaiheessa mitattiin vahvistimen säröarvot. Tulos oli hyvä, sillä valmistajan ilmoittamat säröarvot olivat hyvin samankaltaiset (kuva 21). Särö oli 0,5–0,7 % 19 kHz taajuuteen asti, jossa se alkoi vähitellen nousta 2,5 %:in (kuva 20). Mittauksen pyyhkäisyalueena käytettiin 20 Hz–40 kHz.



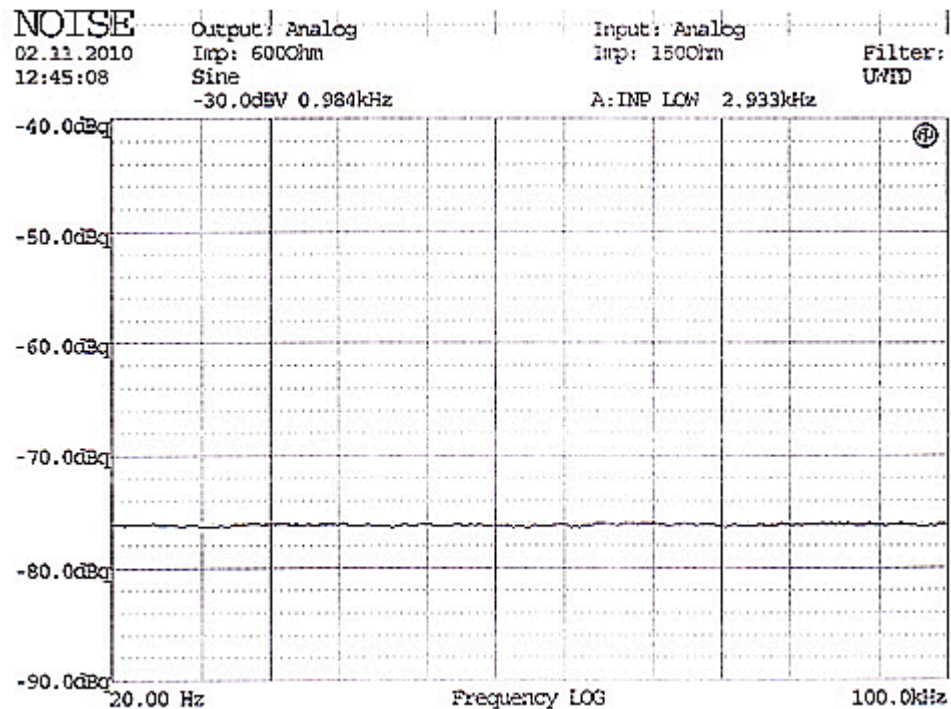
Kuva 20. Vahvistimen kokonaisharmoninen särö ja kohina



Kuva 21. Valmistajan ilmoittama kokonaisharmoninen särö ja kohina

5.4.2 Kohina

Särömittauksen jälkeen mitattiin vahvistimen ja suodattimen tuottama valkoinen kohina (kuva 22). Koska mittaustuloksessa on mukana suodattimen -86 dB_u :n kohina, täytyy se ottaa huomioon. Vähentämällä -86 dB_u :n kohina (joka vastaa $50,1 \mu\text{V}$:a) -76 dB_u :stä (joka vastaa $158,5 \mu\text{V}$:a) saadaan $108,4 \mu\text{V}$, joka vastaa -79 dB_u :ä. Valmistajan ilmoittama kohinajännite on -81 dB_u :ä, mikä osoittaa sen, että vahvistimen suunnittelu ja rakennus oli onnistunut (Texas Instruments 2002). 2 dB_u :n ero mitatun ja ilmoitetun arvon välillä saattaa johtua esimerkiksi käytetyistä mittaussuodattimista. Audioanalysaattorin pohjakohinaksi ilmoitettiin -108 dB_u :ä, joten niin pientä kohinaa ei tarvitse ottaa tuloksissa huomioon. Lisäksi vaimenninkytkentä tuottaa oman kohinansa, joka on myös niin pientä, että se on analysaattorinkin pohjakohinaa pienempää.

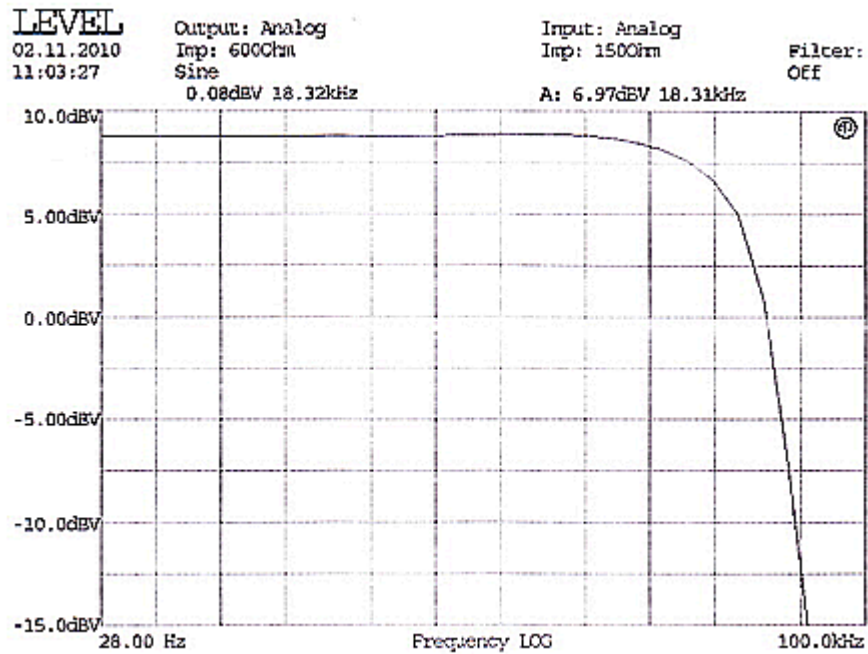


Kuva 22. Vahvistimen ja suodattimen kohinajännite

5.4.3 Amplitudivaste

Kohinamittauksen jälkeen mitattiin vahvistimen amplitudivaste (kuva 20). Pyykäisyalueena käytettiin 22 Hz–100 kHz. Mittaustuloksessa on otettava huomioon alipäästösuodattimen amplitudivaste, joka luonnollisesti lähtee laskemaan sen

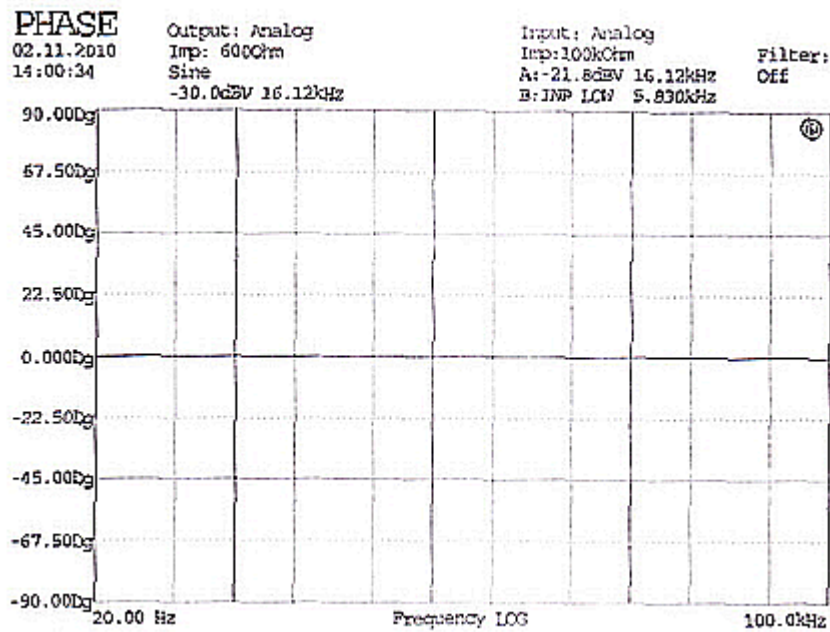
rajaataajuuden mukaan. Vahvistimen vahvistukseksi saatiin 36,5 dB, joka on samaa luokkaa, kuin valmistajan ilmoittama.



Kuva 23. Vahvistimen amplitudivaste

5.4.4 Vaihevaste

Lopuksi mitattiin vahvistimen vaihevaste (kuva 21). Mittaustuloksesta voidaan todeta, että D-luokan vahvistimella on suora ja muuttumaton vaihevaste. Vahvistin siis sopii periaatteessa muuhunkin kuin audiokäyttöön, sillä se ei viivästyä vahvistettavaa signaalia.



Kuva 24. Vahvistimen vaihevaste

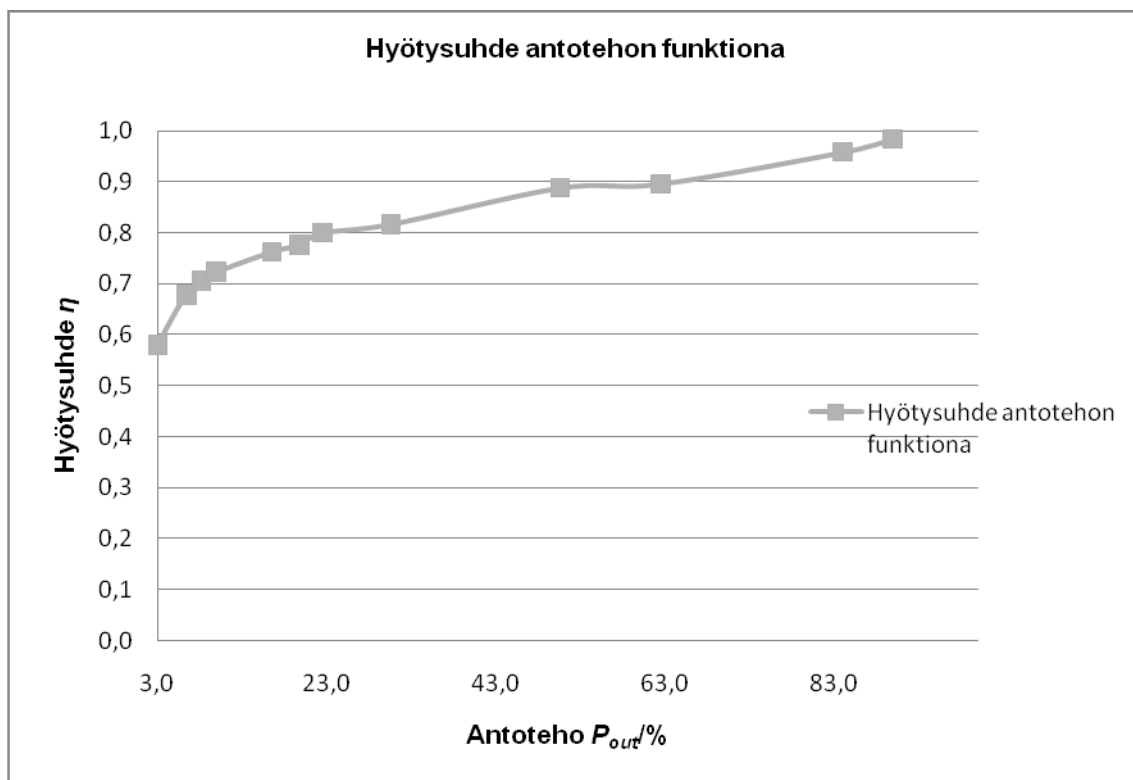
5.4.5 Hyötysuhdemittaus

Viimeisenä mittauksena suoritettiin hyötysuhdemittaus. Vahvistimen käyttövirran kanssa laitettiin sarjaan virtamittariksi yleismittari, joka mittaa yhdellä kymmenyksellä tarkemmin kuin teholähteen oma virtamittari. Virtamittarin näyttämällä virtalukemalla kerrottiin käyttöjännite, jolloin saatiin ottoteho. Vahvistimen lähtöön laitettiin kuorman (8Ω) kanssa rinnakkain jännitemittari, jonka osoittamasta jännitearvosta laskettiin vahvistimen kuormaan syöttämä antoteho. Hyötysuhde lasketaan kaavalla

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}},$$

missä P_{anto} on antoteho, P_{otto} on ottoteho ja η on hyötysuhde.

Kuvan 22 ja taulukon 2 mittaustuloksista voidaan päätellä, että hyötysuhde on jo pienillä tehoilla AB-luokan vahvistimen maksimihyötysuhteen tasolla (yli 55 %). Tulokset osoittavat, että käytännössäkin päästään lähelle 99 %:n hyötysuhdetta, jolloin laite luovuttaa vain 1 % tehosta hukkalämpönä. Vahvistin kuitenkin lämpeni jonkin verran ajettaessa lähes 20 W:n teholla, jolloin se luovuttaa lämpöä noin 200 mW:n teholla. Näin pienen hukatehon vuoksi ei tarvita ylimääräistä jäähdytystä.



Kuva 25. Hyötysuhde antotehon (%) funktiona

Taulukko 2. Hyötysuhteen mittaustulokset

P_{in}/W	P_{out}/W	η	$P_{out}/\%$
1,0	0,6	0,58	3
1,9	1,3	0,68	6
2,3	1,6	0,71	8
2,8	2,0	0,72	10
4,3	3,3	0,76	17
5,1	4,0	0,78	20
5,6	4,5	0,80	23
7,5	6,1	0,82	31
11,4	10,1	0,89	51
14,0	12,5	0,90	63
17,6	16,8	0,96	84
18,3	18,0	0,98	90

6 POHDINTA

Lähdin ideoimaan työtä siltä pohjalta, että aloittamishetkellä ei vielä tiedetty kenenkään rakentaneen toimivaa D-luokan vahvistinta itse. Kaupallisia sovelluksia on ollut markkinoilla muutamia vuosia, mutta D-luokan vahvistimen rakentamista itse on pidetty lähes mahdottomana. Aluksi ideointini lähti liikkeelle siitä, että suunnittelisin vahvistimen erillisillä lohkoilla, kuten PWM-modulaattorilla ja pääteasteilla, mutta lopuksi päädyin Texas Instrumentsin valmistamaan valmiiseen IC-piiriin.

Aluksi vahvistimen suunnittelu ja rakentaminen omien kokemusten ja teorian pohjalta vaikutti suhteellisen helpolta, mutta lopuksi totesin, että ei tämä ollutkaan aivan yksinkertainen projekti toteutettavaksi. Projektin aikana tuli eteen enemmän tai vähemmän hidasteita, kuten vahvistimen palaminen muutamaa otteeseen, laboratorion sulkeminen kesän ajaksi sekä työn ja koulun yhteensovittaminen.

Kun vahvistin saatiin viimein toimimaan ja mittaukset käyntiin, pääsin taas etenemään tämän opinnäytetyön tekemisessä. Ennen mittauksia odotukseni äänenlaadun suhteen eivät olleet kovinkaan korkealla. Odotin ennemminkin sitä, että vahvistin ylipäätään lähtisi jotenkin toimimaan. Kuitenkin mittausten jälkeen tulokset osoittivat, että vahvistin vahvistaa audiosignaalia hifi-laatusesti.

TPA3001D1-piiri osoittautui hyväksi valinnaksi tähän työhön ja mittaustulokset olivat suunnilleen valmistajan lupaamat. Vahvistin sopii erityisen hyvin esimerkiksi aktiivikaiuttimen vahvistimeksi, ja se tarvitsee vain pienikokoisen teholähteen toimiakseen. Aktiivikaiuttimen vahvistimena D-luokan vahvistin pääsee oikeuksiinsa, koska se ei tarvitse isokokoista jäähdytyslevyä eikä teholähdettä. Sen voi asentaa helposti pienenkin kotistereopääkaiuttimen sisään.

Vaikka tämä D-luokan vahvistin ei tuota normaalissa musiikin kuuntelussa juurikaan hukkalämpöä, voisi vahvistimen asentaminen kaiuttimen takapinnalle olla asiallisempaa. Vahvistimen käyttöikä pitenee ja luotettavuus parantuu, kun vahvistinta käytetään matalammassa lämpötilassa. Kaiutinkotelon ulkoseinällä ilma vaihtuu paremmin kuin sisäpuolella. Vahvistin on itse rakennettu käsin, joten tarkkuus ei ole samaa luokkaa kuin teollisuudessa. Kaikki juotokset ovat erilaisia, joista seuraa se, että komponenttien juotoksiin kohdistuu erilaiset rasitukset lämpötilan väännellessä piirilevyä. Tämä lämpötilan aiheuttama piirilevyn vääntyminen saattaa aiheuttaa katkoksia ja pahimmassa tapauksessa vahvistimen rikkoutumisen.

7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja rakennettiin yksikanavainen D-luokan vahvistinmoduli. Työtä aloitettaessa lähdettiin pohtimaan sitä, miten vahvistin toteutettaisiin. Sen jälkeen päädyttiin toteuttamaan vahvistin valmiista IC-piiristä, jolle suunniteltaisiin piirilevy. Erilliskomponenteilla rakennettulla vahvistimella olisi voinut havainnoida tarkemmin vahvistimen toimintaan liittyviä lohkoja, mutta työn luonteesta johtuen integroidun piirin käyttäminen oli välttämätöntä.

Varsinainen suunnittelu lähti liikkeelle D-luokan vahvistimen toiminnan opiskelemisesta, koska tärkeintä tässä työssä oli ymmärtää, miten audiosignaali vahvistetaan D-luokan tekniikalla, ja mitä etuja ja haittoja vahvistintopologia tuo mukanaan. Työn edetessä aika tuntui kuluvan todella nopeasti, sillä uusia asioita tuli todella paljon. D-luokan vahvistimen toimintaperiaate poikkeaa merkittävästi perinteisistä vahvistimista.

D-luokan vahvistin on hyvä ratkaisu, kun halutaan vahvistin, joka sopii pieneen tilaan, on pienikokoinen ja antaa suhteellisen paljon tehoa kokoon nähden. Tämän tyyppinen vahvistin on kuitenkin suhteellisen hankala toteuttaa tee-se-itse-näkökulmasta. Jotta päästäisiin näinkin hyviin tuloksiin, kuin mittaustuloksissa tuli ilmi, vaaditaan huolellista piirilevysuunnittelua. Lisäksi piirilevy on melkein päteettävä alan yrityksessä, jotta päästäisiin hyviin tuloksiin. Pintaliitoskomponentit ovat ehdoton edellytys kelvollisen vahvistimen saamiseksi.

Mittaustuloksissa päästiin samoihin kertaluokkiin, mitä valmistaja ilmoitti datalehden mukaan. Aivan samoihin arvoihin ei päästy, mutta se osoittaa sen, että vahvistin on herkkä epäideaalisuuksille.

Tämä työ toimii hyvin vahvistimen käytön tukena. Siinä on kuvattu vahvistimen toiminta riittävän tarkasti ja tämä työ sopii myös tueksi vahvistimen opetuskäyttöön, jossa sitä voidaan käyttää valmiina moduulina. Vahvistinta voidaan käyttää myös kotistereoympäristössä aktiivikaiuttimen vahvistimena.

LÄHTEET

Sánchez Moreno, Sergio & Elliott, Rod 2005, Elliott Sound Products, Class D Audio Amplifiers – Theory and Design. Viitattu 15.11.2010 <http://sound.westhost.com/articles/pwm.htm>.

Texas Instruments 2002, TPA3001D1 datalehti. Viitattu 3.9.2010
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tpa3001d1.pdf>.

Texas Instruments 2004, RC Filter Box for Class-D Output Power and THD+N Measurement. Viitattu 20.3.2011 <http://focus.tij.co.jp/jp/lit/an/sloa107/sloa107.pdf>.

Leach, W. Marshall, Jr 2001, Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design, Second Edition, The Class-D Amplifier. Viitattu 2.12.2010
<http://users.ece.gatech.edu/mleach/ece4435/f01/ClassD2.pdf>.

Neutrik A2 Audio Test & Measurement System User Manual 1998, V3.0.

Palojoki, J. 2004. D-luokan vahvistin. Opinnäytetyö. Tietoliikennetekniikan koulutusohjelma. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

Wikipedia 2006, Block diagram of a PWM switching amplifier. Viitattu 26.2.2011
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Pwm_amp.svg.