

# **D-luokan vahvistimen suunnittelu ja mittaus**

Eerik Thurlin

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2012  
Tietotekniikka  
Sulautetut järjestelmät ja  
elektroniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

THURLIN, EERIK:

D-luokan vahvistimen suunnittelu ja mittaus

Opinnäytetyö 39 sivua, josta liitteitä 5 sivua  
Huhtikuu 2012

---

Työssä tutustuttiin D-luokan vahvistimen ja PWM-ohjatun H-sillan toimintaan ja mahdollisuuksiin. Työssä suunniteltiin, rakennettiin ja mitattiin D-luokan vahvistin. Vahvistin suunniteltiin tyhjältä pöydältä käyttäen erilliskomponentteja.

Suunnittelu aloitettiin hahmottamalla koko kytkennän lohkoakaavio, jonka avulla määritettiin tarvittavat signaalit ja tasot. Jokainen lohko suunniteltiin erillisenä osana, joiden toimintaa voitaisiin optimoida muista lohkoista riippumatta. Kytkennästä jätettiin kolmioaaltogeneraattori pois ja tilalla käytettiin funktiogeneraattoria, koska kytkennässä haluttiin tutkia kytkentätaajuuden merkitystä.

Työtä varten teetettiin piirilevyt suuren reikämäärän, komponenttien pienten juotostäplien ja juotteenestopinnoitteen vuoksi. Piirilevyt kasattiin käsin ja juottaminen tehtiin paistinpannulla. Korjauksiin käytettiin juotinta.

Vahvistimen käyttöönotossa jokaisen lohkon toiminta mitattiin erikseen. Lohkojen oikean toiminnan varmistamisen jälkeen ne liitettiin toisiinsa.

Laite toimi riittävän hyvin, jotta vahvistimen audiosuorituskyky pystyttiin mittaamaan. Mittauksissa käytettiin kuormana 8 ohmin kaiutinta ja taajuusvaste oli hieman mutkainen, mutta kaikki taajuudet toistuivat 20 kHz asti halutuissa määrin. Muissa mittauksissa pienillä tehoilla lähdön kohina heikensi mittauksia selvästi, mutta suuremmilla tehoilla kohina jäi suhteessa pienemmäksi ja tulokset paranivat tehon kasvaessa. Harmoniseksi säröksi saatiin parhaimmillaan 0,5 %, signaali-kohinasuhteeksi 52 dB ja SINAD:ksi 45 dB. Hyötysuhde noin 90 % teholla oli 83 %.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Information Technology  
Embedded systems and electronics

THURLIN, EERIK:  
Class-D Amplifier Design and Measurements

Bachelor's thesis 39 pages, appendices 5 pages  
April 2012

---

Objective of this study was to gather information about designing a class-D amplifier from zero. This included designing a circuit and PCB and then building the amplifier and measuring it.

The study was carried out as a project. The schematic was based on two earlier encounters: a demonstration of pulse width modulation with an op-amp, and an H-bridge based motor driver from an earlier project.

The results suggest that homemade class-D amplifier is viable, but they come with their own problems. And as a build from zero, some issues were expected. While this version is subpar to commercially available units, there is no doubt that it couldn't be improved vastly. At the output of the amplifier was significant noise that afflicted the measurements, especially at low output levels. Total Harmonic Distortion was measured to be 0,5 % at best while at worst it was over 10 %. Signal-to-Noise ratio was measured to peak around 52 dB and SINAD was at best at 45 dB. The efficiency of the amplifier was poor at low power levels, but when nearing the full power of the amplifier it peaked at 83%.

Further research is needed to perfect the design, but for a first prototype the amplifier was a success. The PWM controlled H-bridge can also be used for different purposes. Swapping the load from a speaker to a coil of a transformer, the amplifier could be used to synthesize AC voltages, or be used as a part of UPS.

---

Key words: class-D, amplifier, audio.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KYTKENNÄN SUUNNITTELU .....	6
2.1	Lohkokaavio .....	6
2.2	Pulssinleveysmoduloidun signaalin generointi.....	6
2.3	Nousevan reunan viive.....	8
2.4	H-silta.....	9
2.5	Lähtösignaalin suodatin .....	11
2.6	Takaisinkytkentä.....	12
2.7	Kolmioaalto generaattori .....	13
2.8	Piirikaavio .....	14
3	KOMPONENTTIEN VALINTA .....	15
3.1	Komparaattori .....	15
3.2	H-siltaohjain.....	15
3.3	Transistorit .....	16
3.4	Nousevan reunan viive.....	16
3.5	Muut komponentit.....	17
4	PIIRILEVYN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN .....	18
4.1	Piirilevyn suunnittelu .....	18
4.2	Piirilevyjen kokoonpano .....	19
4.3	Käyttöönotto .....	20
5	MITTAUSTULOKSET .....	22
5.1	Taajuusvaste.....	23
5.2	Signaali-kohinasuhde.....	24
5.3	Kokonaisharmoninen särö .....	25
5.4	SINAD .....	25
5.5	Hyötysuhde .....	26
5.6	Häiriömittaus .....	28
5.7	Mittausten yhteenveto.....	29
6	YHTEENVETO .....	31
	LÄHTEET.....	33
	LIITTEET .....	34

## 1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena oli suunnitella ja valmistaa toimiva D-luokan vahvistin alusta loppuun. Laitteen suorituskyky mitattaisiin ja sen toimintakyky arvioitaisiin.

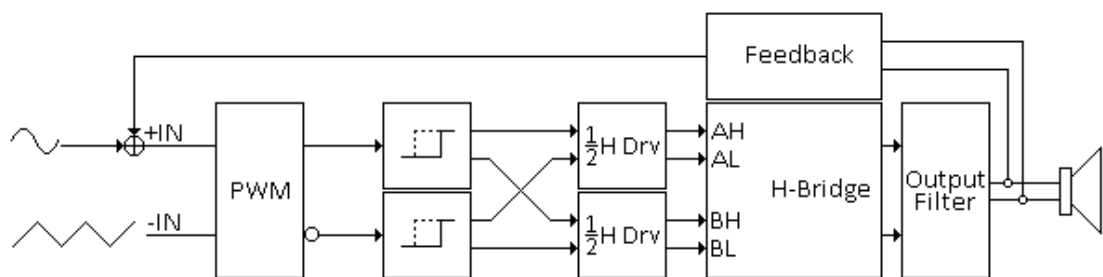
Työn lähtökohtana oli operaatiovahvistimella toteutettu pulssinleveysmodulaation demonstraatio ja sen yhdistäminen aikaisempaan projektiin, jossa DC-moottoria ohjattiin H-sillan avulla. Tavoitteena oli rakentaa erilliskomponenteista mono-vahvistin, jonka ominaisuudet määräytyisivät käytettyjen komponenttien perusteella. Vahvistimelta ei odotettu täydellistä toimintaa, vaan tarkoituksena oli tutustua D-luokan vahvistimen suunnittelussa ja valmistuksessa vahvistinluokalle ominaisiin ongelmiin ja niiden estämiseen.

Työssä käytäisiin läpi kaikki vaiheet kytkennän suunnittelusta, piirilevyn valmistuksen ja kasauksen kautta toimivan laitteen mittaukseen. Lisäksi mahdolliset ongelmat pyrittäisiin korjaamaan niiden esiintyessä.

## 2 KYTKENNÄN SUUNNITTELU

### 2.1 Lohkokaavio

Kytettä voidaan jakaa erillisiin lohkoihin niiden funktion perusteella. Lohkokaavio on esitetty kuvassa 1. Lohkot ovat pulssinleveysmoduloidun signaalin generointi, nousevan reunan viive, H-silta, lähtösuodatin ja takaisinkytkentä. Vahvistimen seuraavaan iteraatioon lisättäisiin myös kolmioaalto generaattori, joka tuottaisi korkeataajuuksisen vertailusignaalin. Lohkojen suunnittelussa piti ottaa huomioon niihin liitettävät toiset lohkot. Esimerkkinä nousevan reunan viiveen logiikka käyttää 5 voltin jännitettä, joten tulon syötettävän pulssinleveysmoduloidun signaalin loogisten tasojen tulisi olla yhteensopivat, kuten myös nousevan reunan viiveen ohjaaman H-sillan tulisi toimia näillä jännitetasoilla.



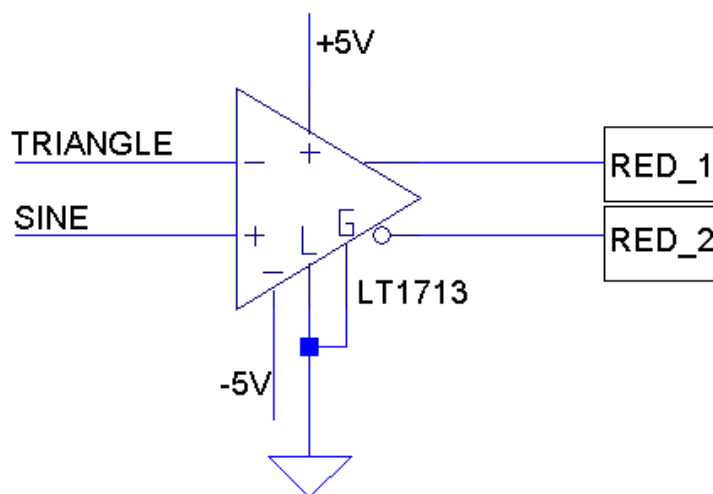
Kuva 1. Kytännän lohko kaavio

### 2.2 Pulssinleveysmoduloidun signaalin generointi

Pulssinleveysmodulaatio eli Pulse Width Modulation, on modulaatiotapa, jossa informaatio on liitetty pulssinleveyteen. Yksinkertaisimmillaan pulssinleveysmodulaatiota voidaan tuottaa komparaattorin avulla. Negatiiviseen tulon syötetään korkeataajuuksista kolmioaaltoa ja positiiviseen tulon hyötysignaali. Kolmioaallon taso vaihtelee  $\pm 5$  voltin välissä ja mikäli positiivinen tulo on kytketty maahan, lähtö vaihtaa tilaa, kun kolmioaalto ohittaa nollatason. Näin syntyy 50 % pulssisuhde. Mikäli hyötysignaali on esimerkiksi +1 V, tapahtuu lähdön kytkentä ylempänä ja pulssisuhde muuttuu. Ja vastaavasti mikäli hyötysignaali olisi -1 V, sama tapahtuisi, mutta pulssisuhde muuttuisi toiseen suuntaan.

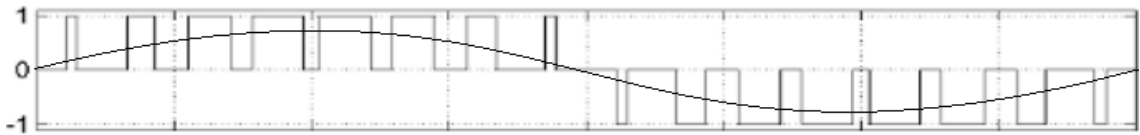
PWM-signaalin generointi tapahtuu komparaattorin avulla, jonka lähtö on kytkettynä piiriin, joka viivästää nousureunaa. Jotta välttyttiin tasomuuntimilta, päätettiin käyttää PWM-signaalissa tasoja 0 ja 5 voltia. Komparaattorin käyttäminen on tässä kytkennässä hyvin yksinkertaista, piirin toiminnan kannalta ainoastaan jännitelinjojen suodatuskondensaattorit ovat tarpeelliset. Suodatuskondensaattoreilla on kuitenkin suuri merkitys kytkennän toiminnan kannalta. Komparaattorin nopeuden vuoksi transienttivirrat ovat suhteellisen suuret, ja täten kondensaattorien tuli olla mahdollisimman lähellä komparaattoria ja niiden tuli olla tarkoitukseen sopivat. PWM-lohko simuloitiin LTSpice-ohjelmalla. Simuloinnin tarkoituksena oli todeta kytkennän toimivuus ja tutkia lähdön käyttäytymistä, mikäli hyötysignaali ylittäisi kolmioaallon jännitteen.

Kuvassa 2 on esitetty komparaattorin kytkentä ja kytkennän lähtösignaali on esitetty kuvassa 6. Kuvassa TRIANGLE on suuritaajuuksinen kolmioaalto, joka kellottaa ja ohjaa SINE-nastan jännitteen muunnosta pulssinleveysmoduloiduksi signaaliksi. Komparaattorin lähdöt on kytketty viivepiireihin RED\_1 ja RED\_2.



Kuva 2. Komparaattorin kytkentä

Kytkeä suunniteltaessa päädyttiin kaikkein yksinkertaisimpaan tapaan tuottaa PWM-signaalia. Seuraavan version mahdollisuuksiin lisättiin monimutkaisempi tapa tuottaa ohjaussignaali. Perinteisessä tavassa H-sillan transistoriparit vaihtavat vuoroa joka kellojaksolla. Eräs tapa vähentää häiriöitä on antaa toisen parin hoitaa tulon positiiviset jaksot ja toisen H-sillan puolen negatiiviset jaksot. Kuvassa 3 on havainnollistettu edistyneempää ohjaustapaa.

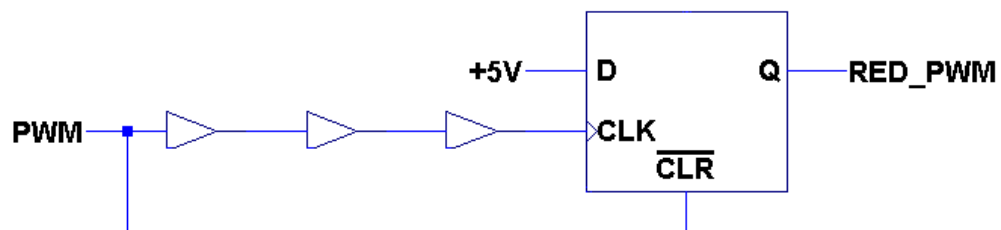


Kuva 3. H-sillan ohjausversio 2. 1-0 välillä ohjataan toista puolikasta kokonaisesta sillasta ja -1-0 välillä toista puolikasta. [1, muokattu]

### 2.3 Nousevan reunan viive

H-sillan ohjauksessa on pyrittävä estämään tilanne, jossa saman puolen kytkimet johtavat samaan aikaan. Tilaa kutsutaan H-sillan läpilyönniksi, läpilyönnissä käyttöjännite oikosulkeutuu maahan. Riippuen käytettyjen kytkimien resistanssista ja käyttöjännitteestä saattaa virta olla useita ampeereita, ja se todennäköisesti rikkoo kytkiminä käytetyt transistorit. Läpilyönnin estämiseksi H-siltaohjaimille tulevan ohjaussignaalin nousevaa reunaa viivästytetään, jotta toinen transistoripari ehtii sulkeutumaan ennen toisen parin avautumista. Viiveen ei kuitenkaan tule olla liian pitkä, sillä se aiheuttaa vääristymää PWM-signaaliin. [2]

Komponenttien epäideaalisuuksista johtuen viiveen tuli olla säädettävä. Viive saadaan aikaan kytkemällä sarjaan buffereita. Buffereiden viive vaikuttaa myös laskevaan reunaan, joten pelkät bufferit eivät riitä. Ongelma ratkaistiin käyttämällä reunaherkkää komponenttia, tässä tapauksessa D-kiikkua. Kuvassa 4 on esitetty nousevan reunan viiveen kytkentä.

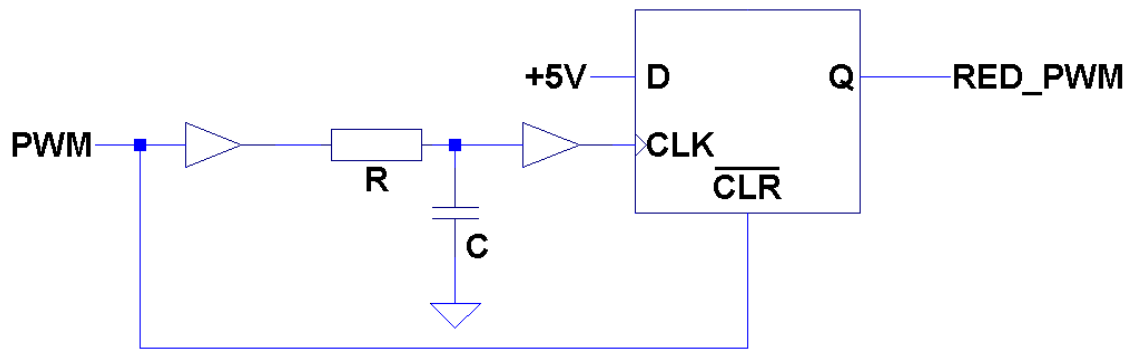


Kuva 4. Nousevan reunan viiveen kytkentä

Käytetyssä D-kiikussa reset-nasta on hallitseva. Kun tulossa oleva signaali on 0, on reset aktiivinen ja D-kiikun lähtö on 0. Kun signaali vaihtuu positiiviseksi, reset lakkaa vaikuttamasta. Positiivinen reuna siirtyy buffereiden lävitse D-kiikun kellolle. Kello siirtää tulon lähtöön ja D-kiikun lähtö on nyt viivästetty 1. Kun taas signaali laskee nolnaan, reset aktivoituu ja lähtö laskee takaisin nolnaan. Muuttamalla buffereiden



määrää voidaan viivettä lisätä tai vähentää. Kuvassa 5 on esitetty vaihtoehtoinen tapa viiveen muokkaamiseksi.



Kuva 5. Vaihtoehtoinen tapa muokata nousevan reunan viiveen pituutta.

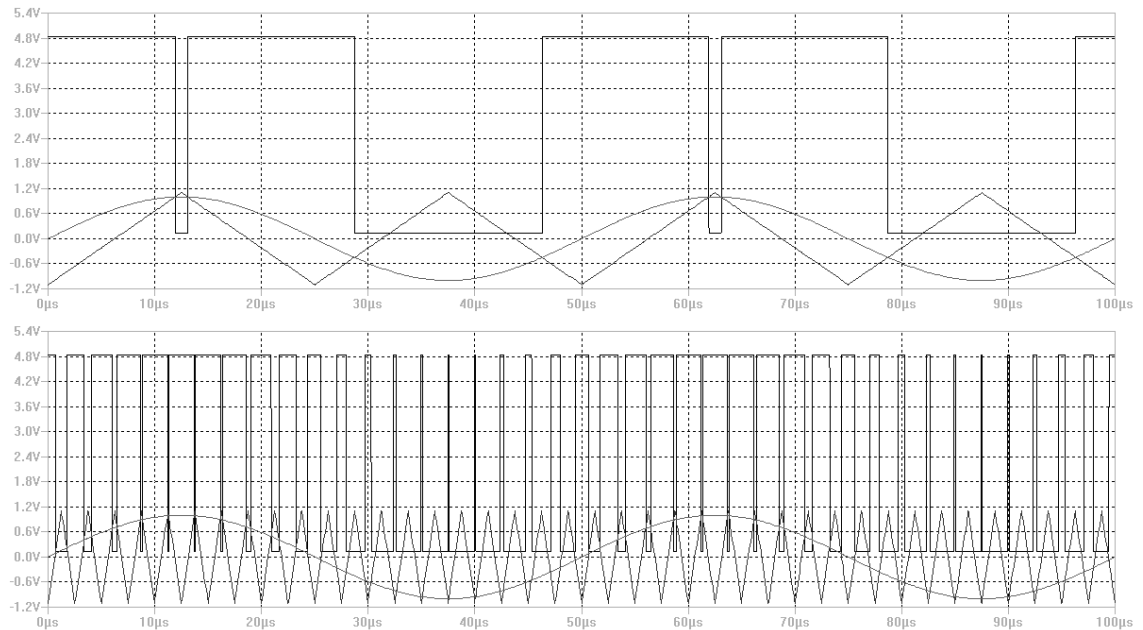
Lisäämällä vastus ja kondensaattori ja näiden arvoja muokkaamalla voidaan signaalia hidastaa. RC-aikavakion mukaisesti kasvattamalla vastuksen kokoa hidastuu kondensaattorin lataaminen ja täten viive muuttuu.

## 2.4 H-silta

H-sillan voi toteuttaa hyvin monella eri tavalla, käyttöjännitteen ja taajuuden ollessa merkittävimmät suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Koska suunnitelmana oli audiosignaalin vahvistaminen, laitteen kytkentätaajuus olisi 500 kHz tai suurempi. Tämä rajaa rele- ja IGBT-pohjaiset kytkennät pois ja jäljelle jäävät transistorit. H-silta voi olla joko kokonainen tai puolikas. Tässä tapauksessa päädyttiin käyttämään kokonaista H-siltaa, koska käyttöjännite on yksipuoleinen. Puolikkaan H-sillan etuihin kuuluu pienempi komponenttimäärä, mutta ongelmana on mahdollinen käyttöjännitteen pumppaaminen. Valitsemalla kokonainen H-silta lähtösuotimen rakenne muuttuu monimutkaisemmaksi ja kuormasta tulee kelluva, eli kumpikaan kaiuttimen navoista ei ole kytkettyä jatkuvasti maahan. [2]

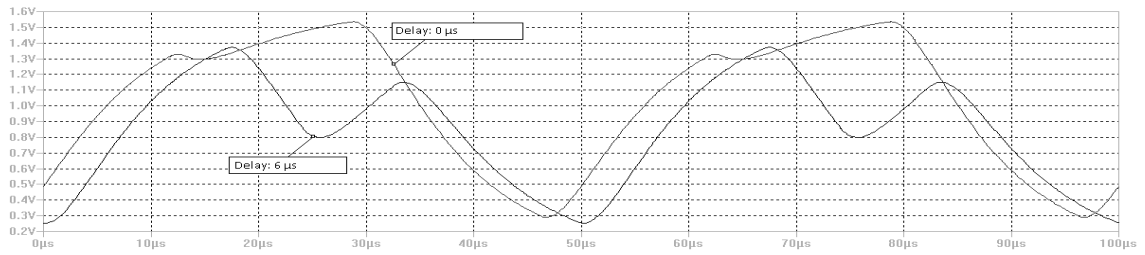
H-sillan topologian valinnan jälkeen suunnittelua ohjaavat seuraavat päätökset: H-sillan käyttöjännite, teho ja kytkentätaajuus. Nämä vastaavasti vaikuttavat hyvin voimakkaasti komponenttivalintoihin. H-sillan maksimikäyttöjännitteeksi valittiin 35 voltia, syynä tähän oli valmiina oleva toisessa vahvistimessa käytetty 35 voltin teholaähde. Komponentit mitoitettiin 8 ohmin kuormalle. Kytkentätaajuus olisi 500 kHz ja 1 MHz välissä. 500 kHz minimitaajuuteen päädyttiin, koska vahvistimen olisi tarkoitus toistaa kaikki taajuudet aina 20 kHz asti. Riippuen transistoreiden kytkentänopeudesta ja

lähtösuodattimen rakenteesta kytkentätaajuuden tulee olla huomattavasti suurempi kuin Nyquistin taajuus. Kuvassa 6 on havainnollistettu 20 kHz siniaallon pulssinleveysmodulaatiota vertailutaajuuksien ollessa 40 kHz ja 400 kHz.



Kuva 6. Komparaattorin lähtö simuloituna eri vertailutaajuuksilla. Ylemmässä on 40 kHz vertailutaajuus, alemmassa 400 kHz.

Nyquistin taajuudella tässä tapauksessa tarkoitetaan pienintä kytkentätaajuutta, millä hyötysignaalin mallinnus on suurempi kuin nollataso. Suurempi kuin nollataso tarkoittaa, että 20 kHz signaalin tehollisarvo ei ole välttämättä halutulla tasolla, mutta taajuus on havaittavissa. Hyötysignaalin mallinnuksen taso riippuu vertailusignaalin ja hyötysignaalin synkronisuudesta, mikäli vertailupisteet osuvat hyötysignaalin maksimikohtiin mallintuu signaali lähelle oikeaa, kun vastaavasti mikäli vertailu tapahtuu lähellä nolaa, signaali vääristyy. Jotta informaatio voidaan irrottaa lähes täydellisesti pulssinleveysmoduloidusta signaalista, kytkentätaajuuden tarvitsee olla merkittävästi suurempi. Kuvassa 6 on 40 kHz tapauksen paras mahdollinen tilanne, kuvassa 7 on kuvan 6 pulssinleveysmoduloinen signaali viety 20 kHz yksinapaisen RC-alipäästösuodattimen läpi. Toinen käyrästä on viivästetty ja tämä saa aikaan muutoksen vertailusignaalin ja hyötysignaalin leikkauskohdissa.

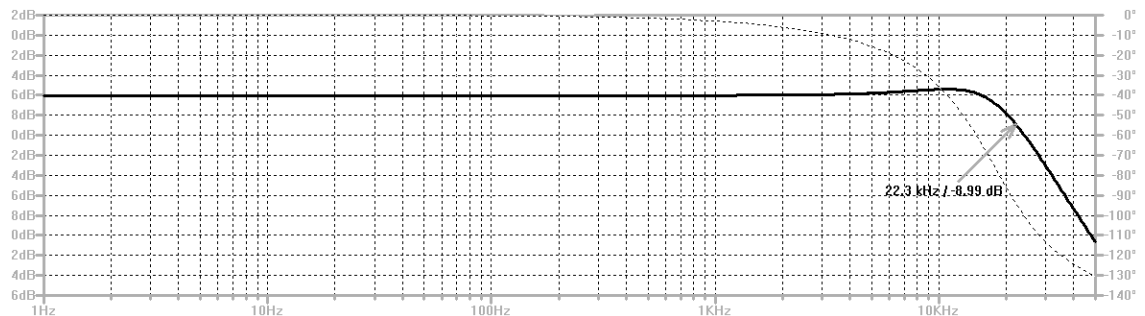


Kuva 7. 6  $\mu\text{s}$  synkronointieron aikaansaama muutos matalilla kytentäaajuuksilla.

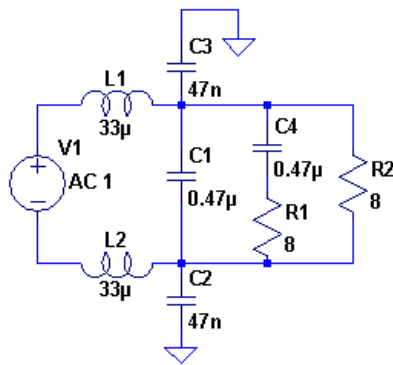
## 2.5 Lähtösignaalin suodatin

Lähtösuodattimen suunnitteluun olisi voitu käyttää enemmän aikaa kuin varsinaiseen työhön muuten. Suodattimessa on tilanne, jossa niin sanotusti kaikki vaikuttaa kaikkeen. Valmiin prototyypin toimintaa hiottaessa lähtösuotimessa on useita parametreja, joita muuttamalla voidaan saada toimintaa halutunlaiseksi. Lähtösuodattimen piirikaavio otettiin National Semiconductorin Class D Amplifier FAQ:ssa esittelystä kaaviosta. [3]

Kytentä simuloitiin LTSpice-ohjelmalla. Simuloinnissa oli otettava huomioon vastuksen ja kaiutinelementin erot. Ohjelmassa kuormavastuksen resistanssi pysyy kiinteästi 8 ohmissa, mutta oikean kaiutinelementin impedanssi muuttuu taajuuden myötä ja nimellinen 8 ohmia todennäköisesti saavutetaan vain jollain tietyllä pistetaajuudella. Suodattimessa on lisäksi myös Zobel-piiri, jossa kuorman rinnalle kytetään vastus ja kondensaattori. Teorian mukaan, kun taajuus kasvaa, kaiutinelementti alkaa käyttäytyä kelan tavoin nostoen kaiuttimen impedanssia. Tätä yritetään korjata kondensaattorilla, jonka impedanssi laskee korkeilla taajuuksilla ja täten Zobel-piiri yhdessä kaiutinelementin kanssa pysyvät halutussa 8 ohmin impedanssissa. Kuvissa 8 ja 9 on esitetty lähtösuodattimen taajuusvaste ja piirikaavio. [3]



Kuva 8. Lähtösignaalin suodattimen simuloitu taajuusvaste.



Kuva 9. Lähtösuodattimen simuloinnissa käytetty piirikaavio. Jännitelähteen V1 navat vastaavat H-sillan kytkentäpisteitä ja R2 esittää kuormaa.

Taajuusvasteen -3 dB piste sijoittuu 22 kHz paikkeille, joka on hieman vähemmän kuin Class D Amplifier FAQ tekstissä esitetty 27 kHz. Tämän poikkeaman ei katsottu olevan merkittävä, sillä kaiutinelementin taajuuskäyttäytyminen oikeassa tilanteessa todennäköisesti aiheuttaisi suurempia poikkeamia.

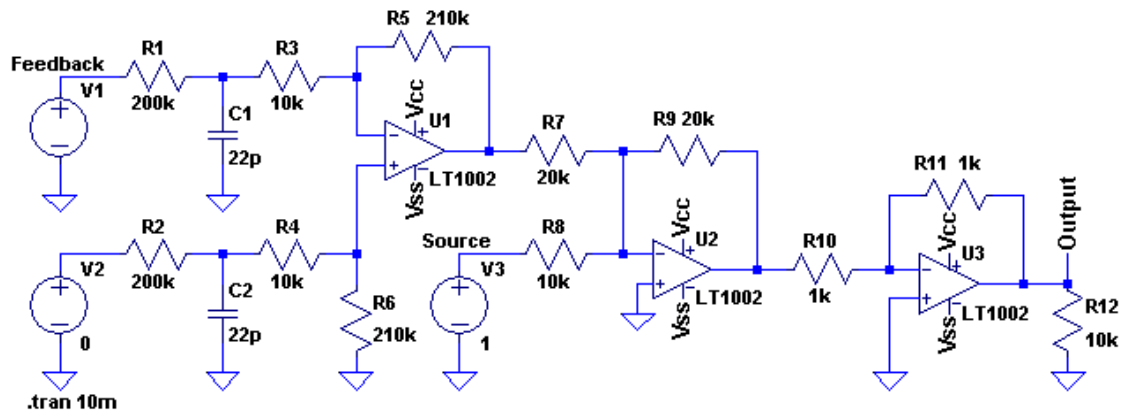
## 2.6 Takaisinkytkentä

Vahvistimen lähdössä oleva signaali saattaa poiketa syötetystä signaalista merkittävästi. Syynä voi olla mm. lähtösuotimen ongelmat, H-sillan käyttöjännitteen notkahdukset tai kuorman epäideaalisuudet. Muodostamalla vahvistimen lähdön ja tulon erotuksesta virhesignaali, voidaan poikkeamia korjata lisäämällä virhesignaali tuloon.

Yksinkertaistetussa esimerkissä vahvistimen vahvistuskerroin on 2. Tuloon syötetään yhden voltin tasajännite ja lähdöstä mitataan 2,2 voltin jännite. Virhettä on 0,2 voltia. Hyötysignaali vahvistuu liikaa, eli yliohtautuu. Koska kytkennän vahvistuksen pitäisi olla 2, lähdön arvo jaetaan kahdella (vahvistuskerroin) ja se lisätään tuloon negatiivisena. Kyseisessä esimerkissä yhden voltin signaalista siis vähennetään 0,1 ja näin lopullinen ohjaussignaali on 0,9 voltia. Näin kyseisen esimerkin tilanteessa vahvistuskertoimen ollessa 2,2 oletetun 2 sijaan, lähtö on  $0,9 \text{ V} * 2,2 = 1,98 \text{ V}$ .

Takaisinkytkennän tulo on kytketty kuorman rinnalle. Lähtösuotimen jälkeen signaalissa on vielä kytkentätaajuusjäämiä, joista suurimmat yritetään suodattaa takaisinkytkennän tulossa olevalla alipäästösuotimella. Koska lähtö on kelluva, tarvitaan kytkentään differentiaalivahvistin, joka vertaa kuorman molempien napojen jännitettä ja antaa ulos näiden jännitteiden erotuksen. Tämä signaali sovitetaan

samantasoisiksi tulossignaalin kanssa, jakamalla se vahvistuskertoimella ja lopuksi tämä virhesignaali summataan tuloon. Kytkentä simuloitiin LTSpice-ohjelmalla. Takaisinkytkennän piirikaavio on kuvassa 10.



Kuva 10. Takaisinkytkennän piirikaavio. V1- ja V2-jännitteet ovat kaiuttimen navat ja V3 on tulossignaali.

Koko vahvistimen vahvistuskerroin määräytyy komparaattorin vertailusignaalin ja H-sillan käyttöjännitteen suhteesta. Vahvistus on kaavan 1 mukainen, jossa  $V_H$  on H-sillan käyttöjännite ja  $V_{comp}$  on komparaattorin vertailujännitteen arvo.

$$Av = \frac{V_H \cdot 2}{V_{comp}} \quad (1)$$

Koska vahvistus on suoraan verrannollinen käyttöjännitteeseen, on käyttöjännitevaimennus PSRR 0 dB. Esimerkiksi mittauksissa käytetyssä tilanteessa, jossa  $V_H$  oli 20 V ja  $V_{comp}$  oli 10V, saadaan vahvistukseksi 4. Käyttöjännitteen 1 voltin notkahdus laskee vahvistuskertoimen 3,8:aan.

## 2.7 Kolmioaaltogeneraattori

Koko kytkennän kellona toimii kolmioaaltosignaali, joka saa komparaattorin lähdön vaihtamaan tilaa. Vahvistinta suunniteltaessa päätettiin, että tätä osaa ei rakennettaisi. Perusteena oli funktiogeneraattorin käyttö, jonka avulla voitaisiin tutkia eri parametrien, kuten taajuuden ja jännitteen, merkitystä kytkennän toimintaan huomattavasti helpommin kuin itse rakennetulla kytkennällä. Tarkoituksena oli saada ensimmäinen

prototyyppi mahdollisimman nopeasti valmiiksi ja sen pohjalta voitaisiin lähteä kehittämään muita osia kuten kolmioaalto generaattoria.

## **2.8 Piirikaavio**

Piirikaaviossa on erityisesti nousevan reunan viiveen yhteydessä ylimääräisiä vastuksia, joiden tarkoituksena on viiveen pituuden muokkaaminen. Lisäksi kytkennässä on kaksi ylimääräistä liitintä, joihin voitaisiin tarvittaessa kytkeä lisää viivettä. Kytkennän piirikaaviot on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1. Piirikaaviosta puuttuu takaisinkytkentä.

### 3 KOMPONENTTIEN VALINTA

Komponentit valittiin pääperiaatteiden mukaan. Lähes kaikkien komponenttien tuli olla pintaliitettäviä, mutta kuitenkin helposti käsin juotettavissa ja komponentit valittaisiin mieluummin liian hyväksi kuin rajamailla riittäviksi. Vaikka komponenttien hintoja vertailtiin, ei niihin kiinnitetty liiaksi huomiota, tärkeämpänä oli komponenttien välitön saatavuus ja parametrien riittävyys.

#### 3.1 Komparaattori

Komparaattorin parametreissa kiinnitettiin huomiota komparaattorin nopeuteen ja käyttöjännitteisiin. Komparaattoriksi valittiin lopulta LTSpice-ohjelman kirjastoista löytynyt LT1713. Tämä komparaattori on erittäin nopea ja kaikkein tärkeimpänä ominaisuutena siinä on kaksi lähtöä, joista toinen on invertoitu. Valmiiksi invertoitu lähtö säästää vaivalta tehdä oikein ajoitettu käänteinen PWM-signaali ulkoisesti. Komparaattori käyttää kaksipuoleista jännitettä, mutta lähtö on positiivisen käyttöjännitteen ja maan välillä. Tämä helpottaa entisestään komparaattorin käyttöä kytkennässä.

#### 3.2 H-siltaohjain

H-siltaohjaimiksi haettiin nopeimpia mahdollisia komponentteja. Tarjolla on useita puolisilta- ja kokosiltaohjaimia. LM5101A-piiriin päädyttiin sen nopeuden ja kotelon vuoksi. LM5100A-malli olisi ollut vielä aavistuksen verran nopeampi, mutta sen logiikka on CMOS-tasoista, ja 12 voltin jännitteellä loogisen ykkösen taso on korkeammalla kuin nousevan reunan viiveenä käytettyjen piirien antama 5 voltia. Kokosiltaohjaimissa oli usein myös valmis nousevan reunan viive, joka oli pienimmilläänkin liian suuri. LM5101-piirin A-malli valittiin, koska sille on luvattu 3 ampeerin transistorien ohjausvirta B- ja C-mallien 2 ja 1 ampeerin virtojen sijaan.

### 3.3 Transistorit

Transistoreiden valinnassa on hyvin monta parametria, jotka vaikuttavat olennaisesti kytkennän toimintaan. Näitä parametreja ovat transistorin tulokapasitanssi, kytkentäajat päälle ja pois, maksimijännitekesto, maksimivirrankesto, kotelo ja  $R_{ds(on)}$ -resistanssi.

Kytkenässä käytettyihin BSZ165N04NS G -transistoreihin päädyttiin, koska niiden ominaisuudet kaikilla osa-alueilla olivat keskivertoa paremmat. Kotelo on jalaton TSDSON-8, joka auttaa eliminoimaan hajainduktanssia, jota saattaisi esiintyä esimerkiksi TO-220 koteloidun komponentin jaloissa. Jännitteen kesto on 40 voltia, virran kesto 31 A ja  $R_{ds(on)}$ -resistanssi on 16 m $\Omega$ . Hilakapasitanssin koko vaikuttaa suoraan kytkentäaikoihin. Mitä nopeammin hilakapasitanssi saadaan ladattua täyteen, sitä nopeammin transistori avautuu ja taas mitä nopeammin se saadaan tyhjäksi, sitä nopeammin transistori voi sulkeutua. Transistorin hilakapasitanssi on alle 1000 pF ja LM5101A-datalehdessä on ohjainpiirin luvattu ohjaavan kyseistä kuormaa 8 ns nousu- ja laskuajoilla. Lisäksi transistorille luvatut turn-on delay time, rise time, turn-off delay time ja fall time olivat pienet ja hyvin lähellä toisiaan. Eri mallien ja eri valmistajien transistoreissa oli usein ongelmana juuri nämä ajat. Ne olivat joko hyvin suuressa epäsuhteessa toisiinsa nähden tai transistorit olivat vain muuten hitaita. Lisäksi vertailua hankaloitti jokaisen valmistajan erilaiset mittausjärjestelyt. Merkittävin ero eri valmistajien mittauksissa on käytetty tuloresistanssi, joka suorassa suhteessa vaikuttaa hilakapasitanssin lataus- ja purkuaikoihin. [4]

### 3.4 Nousevan reunan viive

Nousevan reunan viive suunniteltiin n. 8 ns suuruiseksi, mutta piirilevyllä tehtiin mahdollisuus kasvattaa tätä viivettä. Buffereiden valinnassa nopeus ja käyttöjännite ratkaisivat. Jotta viivettä voitaisiin säätää sopivin askelin, piirit eivät saisi olla liian nopeita, mutta eivät myöskään liian hitaita. Käytettyjen komponenttien keskimääräinen nopeus on 3 ns.

D-kiikun valinnassa oli olennaista valita piiri, jossa oli master reset -nasta. Lisäksi olisi hyvä, jos piiri olisi suhteellisen nopea. Valitulla piirillä datan siirtyminen kellopuls sillta lähtöön ja lähdön nollaantuminen resetillä ovat yhtä nopeat, joten D-kiikku on aikaneutraali.



### 3.5 Muut komponentit

Piirilevyllä käytettiin 1206-koteloituja pintaliitosvastuksia ja -kondensaattoreita. Palakokoon 1206 päädyttiin sen helpon käsiteltävyyden vuoksi. Kytkenässä haluttiin käyttää ainoastaan keraamisia kondensaattoreita, mutta piirilevyllä jouduttiin käyttämään myös muutamia tantaali- ja elektrolyyttikondensaattoreita. Tantaaleita käytettiin suuremman kapasitanssin saamiseksi 12 voltin linjaan, jossa niiden rinnalla on pienempi keraaminen kondensaattori. Elektrolyytit ovat ainut taloudellinen mahdollisuus suurehkoon kapasitanssiin H-sillan käyttöjännitesuodatuksessa. Näiden komponenttien kanssa oli syytä kiinnittää huomiota niiden käyttötarkoitukseen. 5 voltin ja 12 voltin käyttöjännitelinjojen tasaukseen tarkoitettut 100 nF kondensaattorit ovat 50 voltin kestoisia. H-sillan käyttöjännitteessä olevat komponentit on valittu 40 voltin maksimikäyttöjännitteen mukaan.

Lähtösuodattimen komponentit on mitoitettu lasketun maksimivirran mukaan. Lisäksi lähtösuotimen kelat on valittu tarkoituksella toroidi-mallisiksi vähentämään hajakenttähäiriöitä.

## 4 PIIRILEVYN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

Toiminnan ja häiriöiden minimoimisen kannalta paras vaihtoehto olisi ollut käyttää nelikerrospiirilevyä, jossa signaalikerrokset olisi voitu laittaa maa- ja käyttöjännitetasojen väliin. Nelikerrospiirilevyjen ongelmaksi muodostui hinta ja toimitusaika. Tämän vuoksi piirilevy on vain kaksikerroksinen. Kaksipuoleiselle levyllä pohjakerros olisi edelleen varattu pelkästään maatasoksi. Piirilevyt teetettäisiin piirilevytehtaalla suuren reikämäärän, toimivuuden maksimoimisen, pienten komponenttien ja kaksikerroksisuuden vuoksi. Tehdasvalmisteisessa piirilevyssä olisi myös juotteenestopinnoite, joka helpottaisi komponenttien juottamista.

Valitun toimittajan tarjouksen perusteella piirilevyn maksimikoko olisi 10x10 cm. Reikien määrää ei ollut rajoitettu ja valmistaja kykenee valmistamaan piirilevyjä 0,15 mm vällys- ja vetotiheydellä, mutta suosittaa 0,20 mm tiheyksien käyttämistä. Piirilevy oli siis suunniteltava näissä rajoissa.

### 4.1 Piirilevyn suunnittelu

Vaikka taajuudet suurimmilta osin tulisivat pysymään alle 1 MHz, tason muutokset kuitenkin tapahtuisivat nanosekunneissa. Tämä tarkoittaa, että suunnittelussa siirrytään RF-alueelle. Tämän työn rajoissa ei ollut mahdollista perehtyä syvästi RF-piirilevy-suunnitteluun. Suunnittelussa pyrittiin pitämään vedot mahdollisimman lyhyinä ja maksimoimaan yhtenäisen maatason pinta-ala. Myös jokaisen lohkon virtasilmukan kokoa yritettiin minimoida.

Piirilevyn suunnittelu tehtiin kuvan 1 esittämissä lohkokaaavion moduuleissa. Suunnitteluvaiheessa havaittiin, että 1206-koteloisten komponenttien sijaan olisi kannattanut käyttää 0805-koteloituja komponentteja, koska piirilevyllä on merkittävä määrä käyttöjännitteen suodattamiseen tarkoitettuja kondensaattoreita. Suurempien komponenttien käyttö kasvatti merkittävästi moduulien pinta-alaa. Komparaattorin ja H-siltaohjaimien datalehdissä on esitetty suositeltu komponenttien sijoittelu ja molemmissa yhteyksissä käytettiin esitettyä tapaa. Piirilevyn suunnittelu sinällään oli hyvin yksinkertaista, mutta aikaa käytettiin paljon minimoimaan vetojen pituus. Lisäksi ongelmaa tuotti nousevan reunan viiveen pituuden säätäminen, ratkaisuna piirilevyllä

lisättiin tila asentaa ylimääräisiä piirilevyjä, joilla viivettä voitaisiin kasvattaa. Piirilevyn osasijoittelu, kuparikerrokset ja osalista on esitetty liitteissä 2, 3 ja 4.

Massiiviset lähtösuotimen kelat, 1206-koteloiset komponentit ja halu säästää pohjataso mahdollisimman puhtaasti maatasoksi, aiheuttivat sen, että takaisinkytkennän mahdolluttaminen levyille olisi vaatinut liikaa aikaa. Takaisinkytkentä ei ole toiminnan kannalta olennainen osa, ja takaisinkytkentä voitaisiin suunnitella erityisesti tälle kytkennälle sen toiminnan ja parametrien mukaan. Erilliselle piirilevyille rakennettuna takaisinkytkennän rakenteen muuttaminen ja komponenttien vaihtaminen olisi helpompaa ongelmatilanteissa.

Piirilevyä suunniteltaessa päätettiin olla järjestämättä erillistä jäähdytystä transistoreille ja H-siltaohjaimille. Transistorit on kytketty suuriin kuparitasoihin ja sen lisäksi myös kelat toimivat osittaisina jäähdyttiminä. Tarpeen tullen transistoreille voitaisiin järjestää ylimääräistä jäähdytystä, mikäli siihen olisi tarvetta. Mikäli laite kuitenkin koteloitaisiin, olisi jäähdytyksen miettiminen olennaisempaa, mutta D-luokan toimintaperiaatteen vuoksi lämmöntuoton pitäisi olla minimaalista.

## **4.2 Piirilevyjen kokoonpano**

Transistoreiden ja H-siltaohjaimien kotelosta johtuen niitä ei voi juottaa perinteisellä juottimella. Vaihtoehtoina oli käyttää joko kuumailmajuotinta tai paistaa piirilevyt uunissa. Tässä työssä piirilevyt paistettiin paistinpannulla, jonka lämpötilaa tarkkailtiin. Massiivisen maatasen vuoksi tämä oli uunissa paistamisen lisäksi lähes ainut tapa saada juotospasta leviämään kuumentamatta komponentteja tarpeettomasti.

Juotostäpliin levitettiin juotospastaa, joka ajoi tässä kahta asiaa. Se pitäisi komponentit paikoillaan, kunnes pasta leviäisi, ja tinaisi komponentit paikoilleen. Pasta annosteltiin käsin, mutta havaittiin, että pastan tarttuminen pieniin juotostäpliin oli hyvin huonoa, lisäksi tarvittavan pastan määrän arviointi oli hyvin hankalaa. Mikäli piirilevyjä kasattaisiin enemmän, olisi järkevää tilata stensiilit, joiden avulla juotospastan annostelu ja levittäminen nopeutuisi ja helpottuisi merkittävästi.

Komponenttien juottaminen paistinpannulla onnistui hyvin lukuun ottamatta nousevan reunan viiveen buffereita ja D-kiikkua. Pastan annosteluongelmat korostuivat juuri

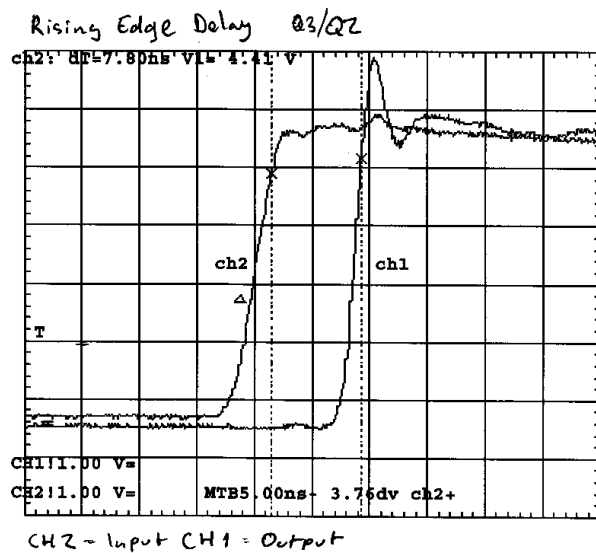
näiden komponenttien kohdalla, tinaa ei ollut lainkaan tai sitä oli liikaa. Ongelmia havaittiin myös korjausjuotosten yhteydessä, käytettäessä normaalia juotinta. Koska komponenttien jalat ja juotostäplät ovat hyvin pienet, on vaikeaa saada riittävästi lämpöä siirtymään juottimen kärjestä itse liitoskohtaan. Ongelma voitaisiin korjata kasvattamalla komponenttien juotostäplien kokoa, jolloin komponentit voitaisiin juottaa helpommin käsin.

### 4.3 Käyttöönotto

Piirilevyt oli suunniteltu siten, että jokaisen lohkon karkea toiminta voitaisiin mitata, ennenkö se liitettäisiin seuraavaan lohkoon kiinni. Tällä pyrittiin estämään tilanteita, joissa H-silta olisi jatkuvassa oikosulussa käynnistyksen yhteydessä. Jännitelähteiden virranrajoitukset oli asetettu hyvin pieneksi mahdollisten ongelmien varalta. Käyttöönotossa paljastuikin, että toinen D-kiikuista oli asennettu väärinpäin ja aiheutti oikosulun +5 voltin ja maan välille. Toinen mahdollinen ongelmatilanne on laitteen käyttöönotossa, mikäli kytkentään ei syötetä komparaattorille vertailusignaalia, on toinen transistoripari jatkuvasti päällä. Tämä ei ole ongelmallista, mikäli kuormana on vastus, mutta tämä saattaisi aiheuttaa ongelmia kaiuttimelle. Tämä on kytkennälle ominaista, mutta tilanteesta on syytä olla tietoinen. Samaan asiaan liittyen, koska H-sillan lähtö on kelluva, on mahdollista oikosulkea käyttöjännite ylemmän transistorin kautta. Jälkimmäinen ongelma korostuisi erityisesti kaupallisessa versiossa, jossa kaiuttimen johdot saattaisivat osua jonkin maadoitetun laitteen runkoon.

Toimintaa mitattaessa havaittiin, että oskilloskoopin mittapäiden vakio maajohto on liian pitkä. Linjoja mitattaessa reunat soivat merkittävästi ja tarkkojen mittausten tekeminen on vaikeaa. Tämä ongelma korjattiin käyttämällä lyhyttä kuparilankaa, joka liitettiin mittapään maahan, näin maalenkin pituus lyheni noin 15 cm:stä muutamiin sentteihin.

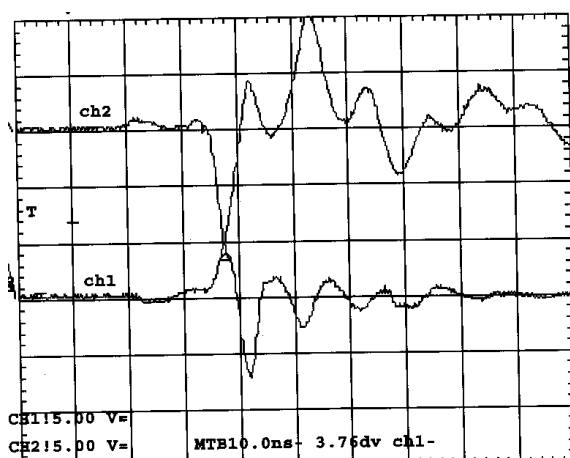
Toiminnan kannalta olennaisia mittauksia ovat nousevan reunan viiveen toiminta ja lähdön kytkimien ajoitukset. Kuvassa 11 on esitetty nousevan reunan viiveen toiminnan mittaustulos.



Kuva 11. Nousevan reunan viive

Nousevan reunan pituus on noin 8 ns, jossa on vain 1 ns verran eroa arvioituun 9 ns viiveeseen verrattuna. Tämä oli täysin odotettua, sillä datalehdessä viiveen pituudelle on ilmoitettu vain arvio, typical propagation delay, eikä tarkkoja arvoja. Teoriassa kytkentä olisi saattanut toimia ilman nousevan reunan viivettä sillä transistoreiden ajoitukset olivat hyvin ideaaliset tätä varten, mutta asiassa oli syytä olla varovainen ja sisällyttää täysi viive. Viiveen pituuden muuttaminen olisi ollut mahdollista, mikäli sille olisi ollut tarvetta.

Nousevan reunan viiveen toiminnan varmistamisen jälkeen se voitiin liittää H-siltaohjaimiin. Lähdössä voidaan nähdä pientä päällekkäisyyttä, mutta ei merkitsevissä määrin. Kuvassa 12 on esitetty lähdön toiminnan mittaustulos.



Kuva 12. Lähtösignaalit. Mittauspisteet ovat H-sillan transistoreiden välissä.

## 5 MITTAUSTULOKSET

Vahvistin mitattiin ilman takaisinkytkentää. Ongelmat itse vahvistimen kanssa siirsivät takaisinkytkennän valmistusta niin paljon, että takaisinkytkentää ei saatu toimimaan ajoissa mittauksia varten. Tulosten perusteella voidaan kuitenkin päätellä takaisinkytkennän tarpeellisuus ja siltä vaadittavia ominaisuuksia. Mittaukset olisi laitteiston salliessa kannattanut suorittaa useilla kaiuttimilla, näin olisi voitu eliminoida kaiuttimien erilaisuudet.

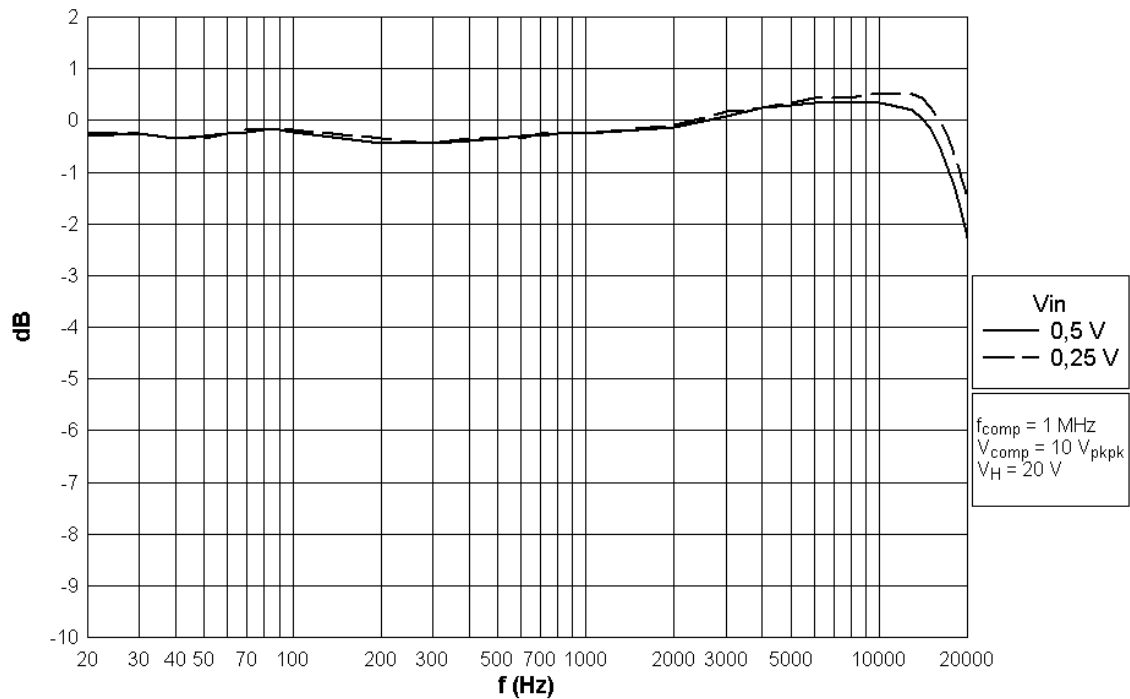
Jännitelähteinä käytettiin laboratorion teholähteitä valmiin omavalmisteisen 35 voltin jännitelähteen sähköturvallisuusongelmien vuoksi. Jännitelähteistä tuotettiin tarvittavat  $\pm 5$ , +12 ja +20 voltin jännitteet. Kolmioaalto tuotettiin funktiogeneraattorilla ja signaalilähteenä oli HP 8903B -audioanalysaattori. Mittauksissa käytettiin tätä audioanalysaattoria, koska se kykenee mittaamaan kelluvia lähtöjä.

Ennen varsinaisten mittausten aloitusta oli selkeästi havaittavissa, että vahvistimen lähdössä on kohinaa, vaikka tulo olisi kytketty maahan. Tilanteessa, jossa lähdön pulssisuhde on 50 %, lähdön pitäisi olla nolla. Kohina on tässä vaiheessa laitteiston ominaisuus ja mittaustulokset vastaavat tätä ominaisuutta. Kohinan vaikutus on havaittavissa eri mittauksissa, esim. SINAD-mittauksessa, jossa mittaussignaali oli kuultavissa korvin 10 mV tulolla, mutta audioanalysaattori ei kyennyt antamaan mittaustulosta. Kohina huonontaa merkittävästi mittaustuloksia pienellä teholla, tämä on havaittavissa kaikissa mittauksissa.

Koska audiosignaali on pulssinleveysmoduloinnalla laitteiston sisällä tulosta aina suodattimen lähtöön saakka, on myös kohinan paikantaminen lähes mahdotonta ilman pulssinleveysmoduloinnin purkamista. Jatkomittauksien kannalta olisi tarpeellista rakentaa erillinen aktiivinen alipäästösuodin, jonka avulla voitaisiin selvittää generoituuko kohina komparaattorissa, nousevan reunan viiveessä, H-siltaohjaimissa vai onko ongelma näistä riippumaton.

## 5.1 Taajuusvaste

Mittausparametreissa  $f_{\text{comp}}$  on kytkentätaajuus,  $V_{\text{comp}}$  on vertailusignaalinjännite ja  $V_{\text{H}}$  on H-sillan käyttöjännite. Kuvassa 13 on esitetty taajuusvaste mitattuna kahdella eri jännitetasolla 8 ohmin kuorman kanssa. Kuvassa 0,5 V mittauksessa tuloa vertaillaan 2 voltin lähtöön ja 0,25 V mittauksessa 1 voltin lähtöön.



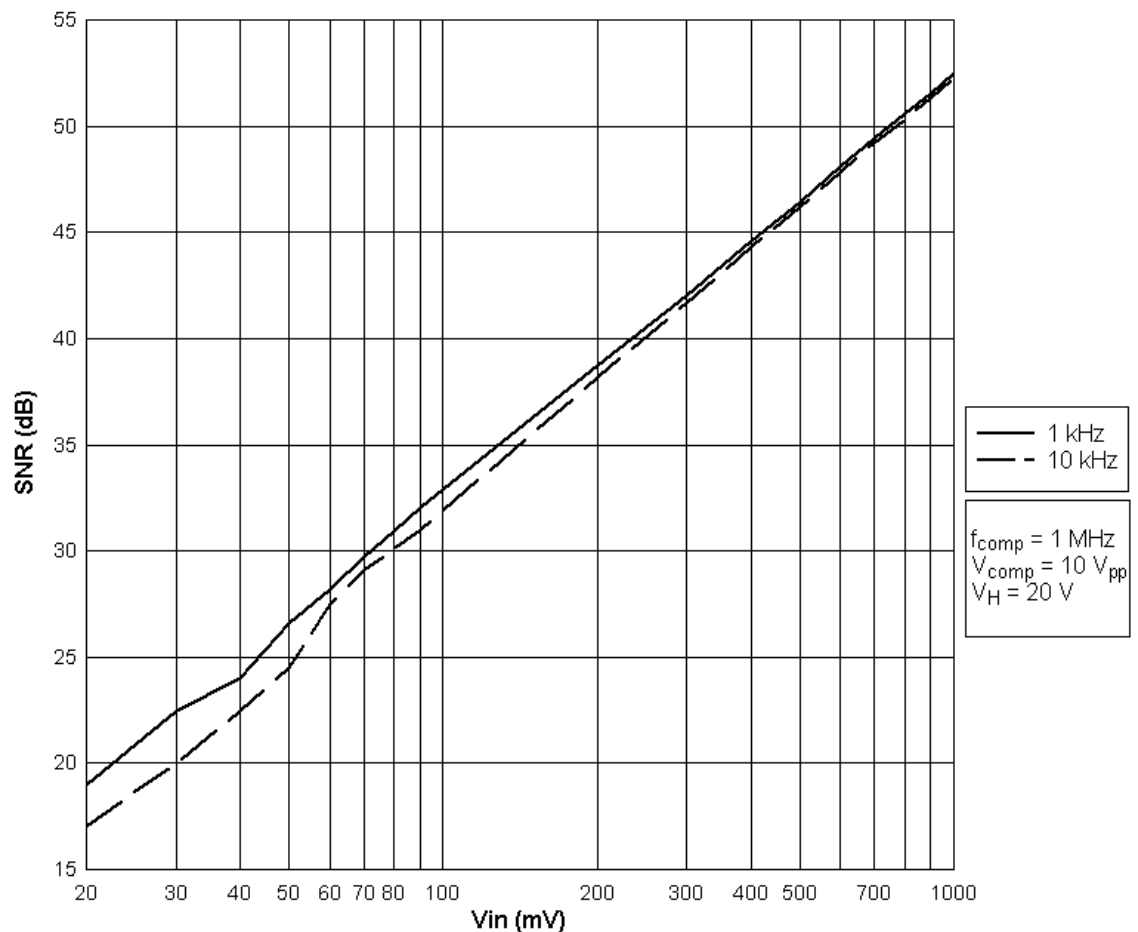
Kuva 13. Taajuusvaste

Audioanalysaattorissa oli kytkettynä 30 kHz alipäästösuodin. Kuvasta 13 havaitaan, että taajuusvaste poikkeaa hieman kuvassa 8 esitetystä simulointituloksesta. Pieni heilahtelu on odotettua, sillä simuloinnissa käytettiin kuormana puhtaasti resistiivistä elementtiä, kun mittauksissa käytettiin kuormana oikeaa kaiutinta. Käytetyssä kaiuttimessa on myös jakosuodin kahden elementin välillä, joka saattaa vaikuttaa mittaustuloksiin.

Mikäli käyriä ennustettaisiin eteenpäin, noin 22 kHz kohdalla kahden voltin lähtö olisi laskenut alle 1,42 voltin, eli -3 dB kohdan. Eri tehotasoilla suoritettut mittaukset vastaavat toisiaan. Taajuusvasteen perusteella voidaan todeta, että takaisinkytkennästä olisi hyötyä. Vaikka heilahtelut eivät ole suuria, ei lähtö ole kuitenkaan suora.

## 5.2 Signaali-kohinasuhde

Signaali-kohinasuhde eli Signal to Noise Ratio mittaustulokset on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Signaali-kohinasuhde tulojännitteen funktiona

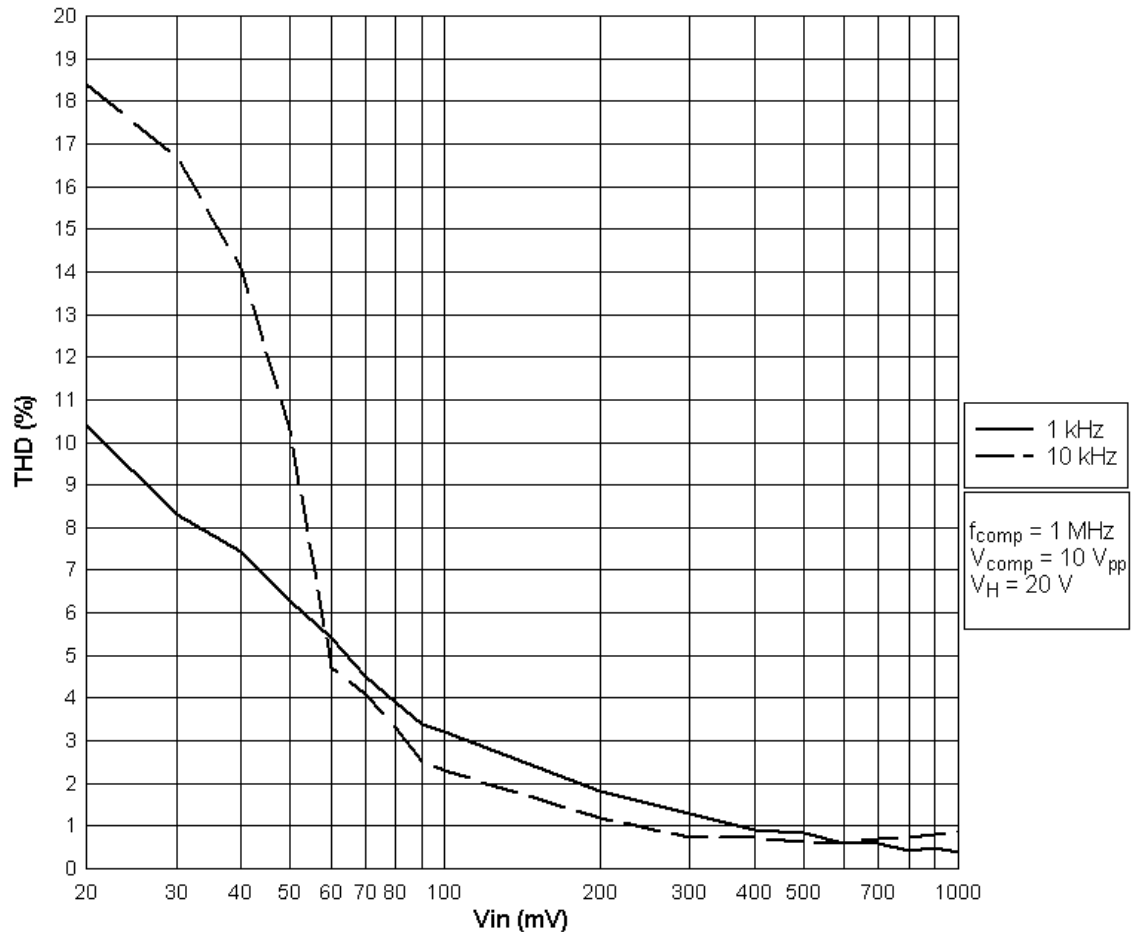
SNR-mittauksissa lähdössä esiintyvän kohinan merkitys korostuu. Tehon kasvaessa signaali-kohinasuhde paranee merkittävästi. 1 kHz ja 10 kHz mittausten välillä on hienoinen ero pienillä tehoilla, mutta suuremmilla erot katoavat. Alkupään eroavuudet johtunevat käytetyn kaiuttimen ominaisuuksista.

Takaisinkytkennän vaikutusta signaali-kohinasuhteeseen on vaikea arvioida lähdön kohinan vuoksi, kohinan takaisinkytkeminen saattaisi aiheuttaa vahvistimen värähtelyä. Vaikka vahvistin on hyvin nopea, ei lähdön signaali siirry tuloon välittömästi ja signaalin kertautuminen olisi mahdollista. Takaisinkytkennän lisäämistä voidaan kuitenkin pitää yleisesti vahvistinta parantavana asiana, ja takaisinkytkennän nopeudesta riippuen tulokset ovat pelkästään hyviä.



### 5.3 Kokonaisharmoninen särö

Kokonaisharmonisen särön, eli Total Harmonic Distortion, mittaustulokset on esitetty kuvassa 15.

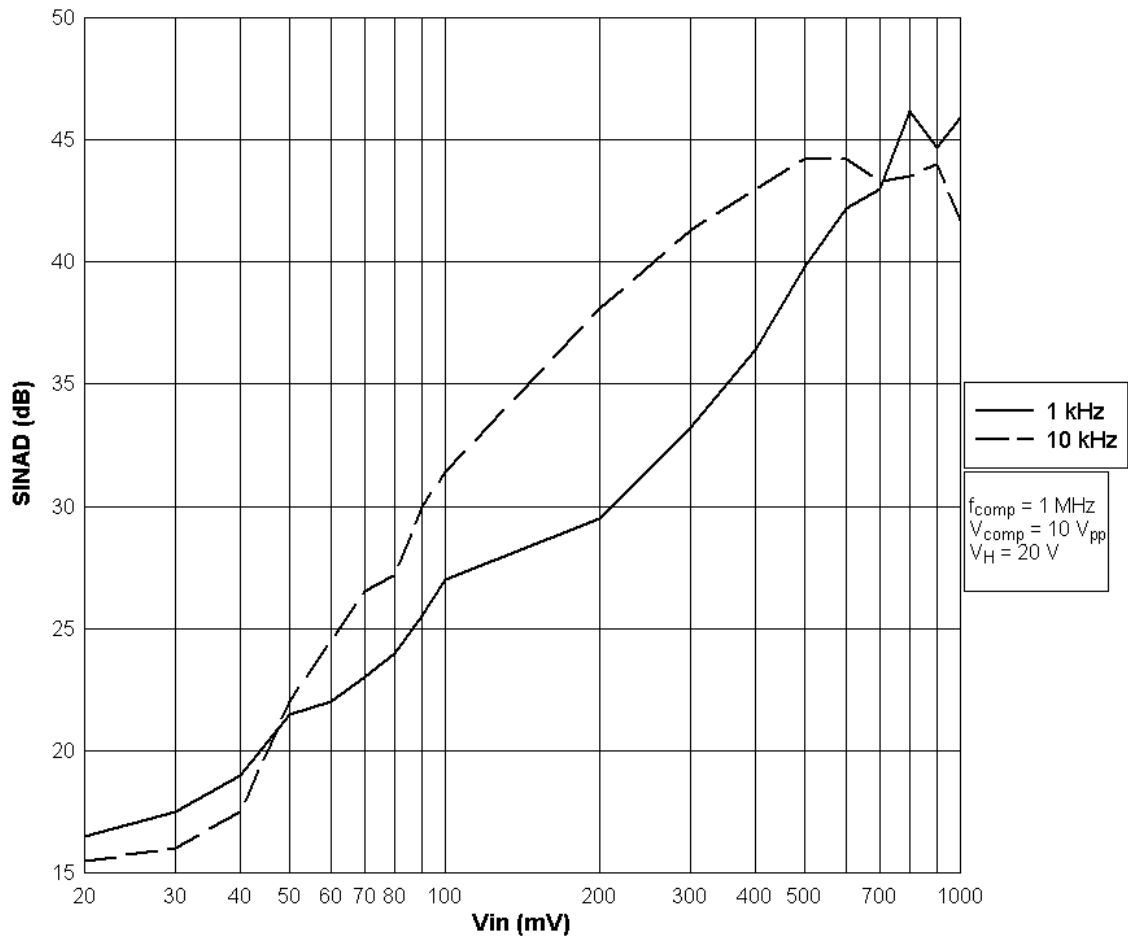


Kuva 15. Harmoninen särö tulojännitteen funktiona

Harmonisen särön mittauksissa on merkittävä ero pienillä tehoilla eri taajuuksilla. Tämä johtuu todennäköisesti lähdön kohinasta, vaikka kaiuttimellakin on todennäköisesti osansa. Takaisinkytkennän toiminta auttaa merkittävästi harmonisten häiriöiden korjaamisessa. Takaisinkytkennän toimintaperiaatteen mukaisesti lähdössä esiintyvät ei-halutut harmoniset signaalit kumotaan tulossa.

### 5.4 SINAD

SINAD mitattiin 1 kHz ja 10 kHz taajuuksilla, kun kuormana oli 8 ohmin kaiutin. SINAD-mittaukset on esitetty kuvassa 15.

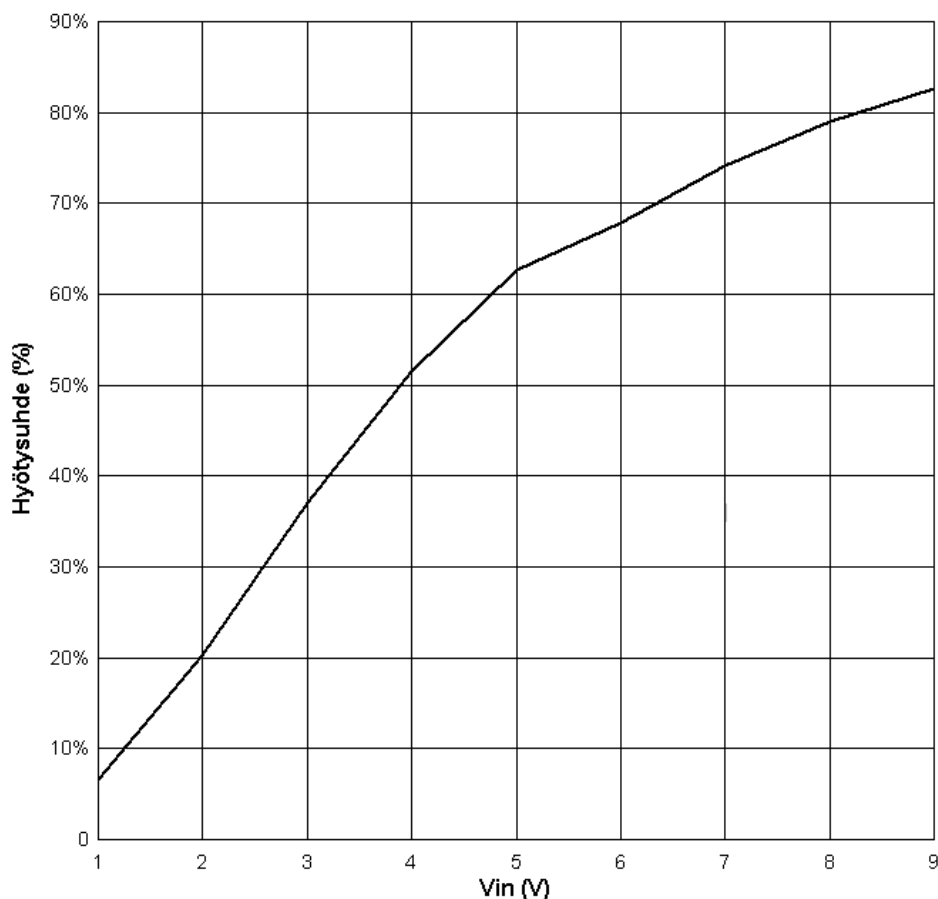


Kuva 15. SINAD tulojännitteen funktiona

SINAD-mittauksissa havaitaan selkeästi, että pienillä tulon tasoilla lähdössä oleva kohina on hallitseva, mutta hyötysignaalin kasvaessa jää kohina pienemmäksi ja täten SINAD paranee. Eri mittaustaajuuksien väliset erot johtuvat todennäköisesti mittauksissa käytetyn kaiuttimen ominaisuuksista, kytkentätaajuuden suhteellisen laskemisen sijaan, 1 kHz signaalin 1000 näytettä vastaan 10 kHz signaalin 100 näytettä per jakso.

## 5.5 Hyötysuhde

Hyötysuhde mitattiin käyttäen kaiuttimen tilalla 8 ohmin tehovastusta. Mittausparametreina käytettiin seuraavia arvoja:  $f_{comp} = 1$  MHz,  $V_{comp} = 10$  V<sub>pkpk</sub>,  $V_H = 20$  V ja  $f_{in} = 1$  kHz. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 16.



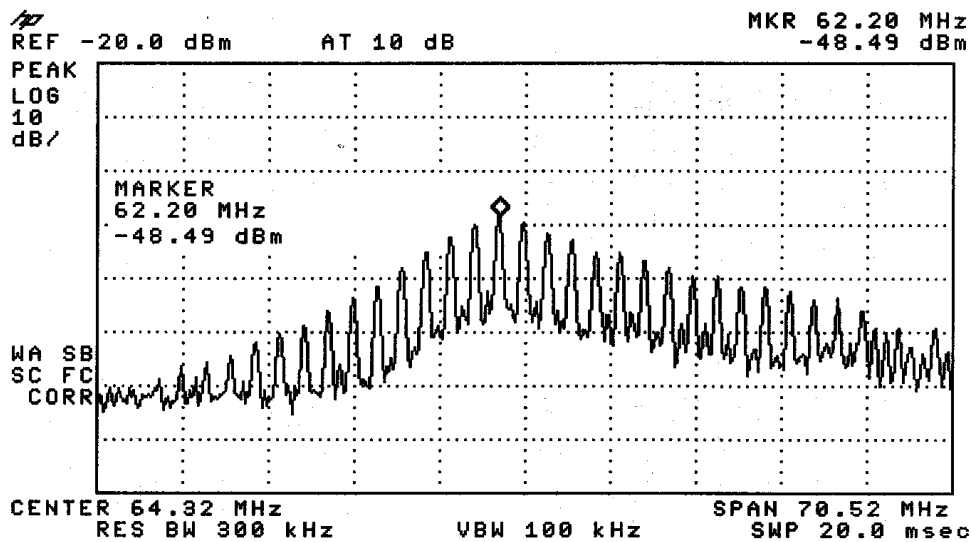
Kuva 16. Hyötysuhde tulojännitteen funktiona. 1 V vastaa noin 10 % tehoa ja 9 V noin 90 % tehoa.

Hyötysuhdetta mitattaessa kävi selväksi, kuinka pientä kapasiteettia vahvistimesta käytettiin muihin mittauksiin. Alle 1 voltin tulolla laitteiston toiminnan ylläpitämiseen kului huomattavasti enemmän tehoa kuin vahvistimesta saatiin ulos. Mutta kuten kuvasta havaitaan, suuremmilla tehoilla D-luokan vahvistimen ominaisuudet nousevat hyvin esiin. 9 voltin tulolla hyötysuhde oli 83 %, reilusti enemmän, mitä perinteisillä tekniikoilla toteutettujen vahvistimien teoreettinen maksimi. [5]

Kuten todettua vahvistimen ylläpitoon kuluva teho on suurehko. Ensimmäisessä mittauspisteessä, 1 voltin tulolla, vahvistin käytti toimiakseen 2 wattia tehoa ja tämä kasvaa 2,7 wattiin maksimitteholla. Tämä korostuu erityisesti pienillä tehoilla, jossa hyötysuhde on alle 10 %. Ylläpitoon kuluva teho pysyy lähes vakiona koko tehoalueella, joten suuremmilla tehoilla sen suhde pienenee. Tätä kautta hyötysuhdetta voitaisiin parantaa maksimitteholla entisestään, kasvattamalla H-sillan käyttöjännitettä.

## 5.6 Häiriömittaus

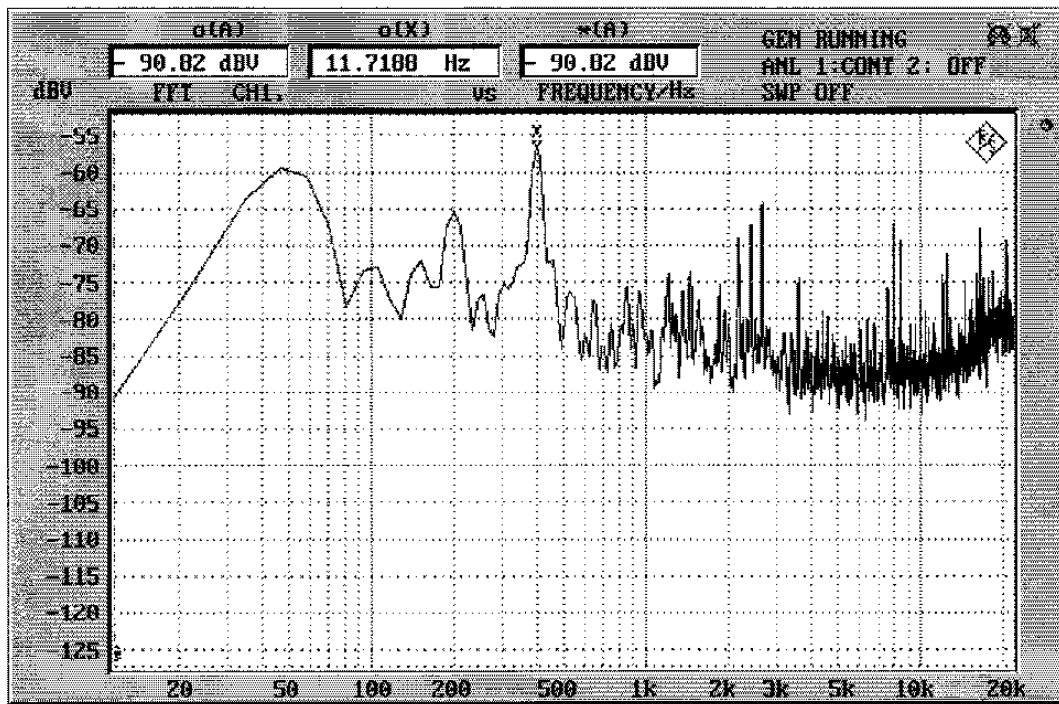
Vahvistimen suurtaajuushäiriötä mitattiin HP 8594E -spektrianalysaattorilla. Mittausjärjestelyt olivat muiden mittausten kanssa muuten identtiset, mutta H-sillan käyttöjännite oli 5 voltia ja kuormana oli kaksi sarjaan kytkettyä 47 ohmin vastusta. Lisäksi tulo oli kytketty maihin. Mittaustulos on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Vahvistimen suurtaajuushäiriöden mittaustulos

Kuvasta 17 nähdään, että kytkentätaajuudesta aiheutuvat häiriöt alkavat kasvamaan n. 36 MHz kohdalla. Piikit toistuvat 2 MHz välein. Häiriöt jatkuvat aina yleisradion taajuuksille asti.

Audioalueen häiriömittauksissa käytettiin R&S UPL -audioanalysaattoria. Mittausjärjestelyt olivat identtiset suurtaajuusalueen mittausten kanssa. Mittaustulos on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Audioalueen häiriöspektri, kun kytkentätaajuus mittaushetkellä on ollut 999998 Hz.

Mittauksissa havaittiin, että kytkentätaajuuden laskiessa 1 Hz siirtyi kuvassa oleva 400 Hz piikki 200 Hz ylemmäksi. Muiden piikkien esiintyminen taajuuden kasvaessa oli huomattavasti enemmän satunnaista, vaikkakin niiden yhteys kytkentätaajuuteen oli selvästi havaittavissa. Kuva vastaa signaali-kohinasuhteen mittaustulosta. Mikäli H-sillan 5 voltin käyttöjännite kompensoidaan vastaamaan SNR-mittauksen 20 voltin käyttöjännitettä, ovat mittaukset käytännössä identtiset.

## 5.7 Mittausten yhteenveto

Kaksi asiaa nousee ylitse muiden tarkasteltaessa mittaustuloksia. Ensimmäinen on mittauksissa käytetty suurin tulojännite. Tuloksia tarkasteltaessa olisi mielenkiintoista nähdä miten vahvistin käyttäytyy suuremmilla tehoilla. Lähtösuodattimen ja mittaustulosten kannalta on olennaista, että kuormana on oikea kaiutin eikä pelkkä resistiivinen vastus. Syynä mittauksissa käytettyihin pieniin tehoihin on laboratorion olosuhteet. Koska tilaa käyttivät muutkin, oli muiden huomioimisen vuoksi tyydyttävä 1 voltin maksimijännitteisiin, ja jo tuolloin melusaaste oli siedettävän rajoilla.

Toinen asia mikä mittauksista nousee esille, on lähdön kohina. Mikäli se saataisiin eliminoitua lähes kokonaan, voisi mittaustuloksia vertailla huomattavasti paremmin

kaupallisten vahvistimien mittaustuloksiin. Kohinaa ei kuitenkaan voi kokonaan poistaa koskaan, mutta kohinan suuruus kielii ongelmista vahvistimen toiminnassa. Mitä suurempia tehoja mittauksissa käytetään sitä lähemmäksi tulokset siirtyvät kaupallisten vahvistimien suorituskykyä, vaikka kertaluokka onkin toistaiseksi aivan eri.

Muuta huomioitavaa on vahvistimen H-siltaohjaimien tehonkulutus. Se nostaa pohjatason virrankulutusta merkittävästi. Ohjaimet kykenevät ohjaamaan isojakin transistoreita ja se näkyy hyötysuhteessa. Mikäli vahvistin olisi suunniteltu pienille tehoille, olisi järkevämpää käyttää pienempiä transistoreita ja heikompia ohjauspiirejä. Markkinoilla on myös useita valmiita yhden piirin D-luokan vahvistimia, mutta niiden maksimitehot ovat usein alle 20 wattia. Tehon kasvaessa vahvistinpiirien kykyjen ulkopuolelle, alkaa myös prototyypin hyötysuhde vaikuttaa pätevältä.

Hyötysuhdemittauksissa tarkkailtiin myös komponenttien lämpiämistä. Lämpötilan tarkkailu suoritettiin käsituntumalla, tarkempia mittauksia ei pidetty tarpeellisena. Transistorit lämpenivät huomattavasti, mutta eivät kuitenkaan polttavan kuumiksi. Myös lähtösuotimen kelojen lämpötila nousi. Vapaassa ilmassa vahvistin tuskin tarvitsisi ylimääräistä jäähdytystä, mutta mikäli se koteloitaisiin, olisi lämpiäminen mahdollinen ongelma.

## 6 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli rakentaa D-luokan vahvistin ja mitata sen toiminta. Työssä oli olennaisena osana tarkoitus suunnitella kytkentä, valita komponentit ja saada niistä toimiva järjestelmä. Tässä onnistuttiin suhteellisen hyvin ja vahvistin toimii suurimmilta osin halutulla tavalla.

Vahvistin siis toimii, vaikka se tarvitseekin toimiakseen funktiogeneraattorin. Ennen seuraavaan prototyyppiin siirtymistä kohinaongelma tulisi ratkaista nykyisessä mallissa. Mikäli kohina johtuu tietyistä lohkoista, voisi sen tilalle rakentaa uuden version, mutta on myös mahdollista, että kohina johtuu komponenttien sijoittelusta ja suhteesta toisiinsa nähden. Esimerkiksi lähtösuodattimen kelat aiheuttavat merkittäviä häiriöitä välittömässä läheisyydessään. Myös H-sillan virtasilmukassa olisi optimoimisen varaa.

Lähtösignaalissa on suodattimen jälkeen edelleen havaittavissa merkittävä kytkentäjäämä. H-sillan toimintaa ja suodatinta optimoimalla häiriötä voitaisiin vähentää, mutta sen poistaminen kokonaan lähdöstä on lähes mahdotonta.

Ennen seuraavaa kehitysversiota tulisi kytkentään lisätä myös takaisinkytkentä. Takaisinkytkennän edut ovat hyvin selkeät, mutta johtuen hyvin häiriöllisestä ympäristöstä sen implementointi ei ole yksinkertaista. Häiriöitä tulee lisäämään takaisinkytkennän erillinen piirilevy ja sen liittäminen sulavasti yhteen nykyisen levyn kanssa.

Nykyisen version mahdollisiin ongelmiin voidaan lisätä yhtenäinen maa. Erityisesti H-sillan ja lopun kytkennän maat tulisi erottaa toisistaan ja kytkeä ne tähtimaa-asetelmaan, mieluiten jokainen lohko omana maanaan. Erityisesti H-sillan käyttöjännitelinjaan tulisi lisätä merkittävästi lisää suodatusta, sillä pitkät johdot, olematon suodatus ja suuret taajuudet ovat ongelmien kerjäämistä. Myös laitteen kotelointia tulisi harkita, sillä suurten reunanopeuksien vuoksi laite säteilee merkittävästi ja saattaa vaikuttaa muiden läheisten laitteiden toimintaan negatiivisesti.

Häiriöiden vähentämiseksi tulisi myös tutkittavaksi aikaisemmin esitetty kolmitasoinen PWM-generointi. Tällä vähennettäisiin transistoreiden tarpeetonta kytkentää ja sitä

kautta häiriötä. Myös hyötysuhde saattaisi nousta, sillä siltaohjaimet tekisivät vähemmän töitä.

Häiriötä voitaisiin minimoida edelleen käyttämällä nelikerrospiirilevyä. Mikäli kuitenkin päädyttäisiin vain kaksikerroksiseen levyyn, olisi syytä harkita lohkojen ns. purkittamista. Erityisesti kolmioaallon tulisi olla mahdollisimman puhdasta. Ongelmat kolmioaallon puhtauden kanssa havaittiin jo ensimmäisen version mittauksissa, jossa pienikin poikkeama kulkeutui järjestelmän läpi ja aiheutti 50 ns pulssin transistoreiden ohjaukseen.

Vahvistin ei ole ainut sovellus laitteessa käytetylle kytkennälle. Korvaamalla kuormana oleva kaiutin esimerkiksi muuntajalla laitteesta olisi helppo muokata joko DC-DC -muunnin, invertteri tai taajuusmuunnin. 50 Hz sinin tuottamiseksi voitaisiin kytkentätaajuutta laskea ja vaadittavan jännitteen ja tehon mukaan valita tarkoitukseen sopivat H-sillan kytkinkomponentit. Lisäksi maksimi- ja minimitehot voitaisiin mitoittaa huomattavasti lähemmäksi toisiaan ja näin parantaa laitteen hyötysuhdetta.



## LÄHTEET

1. Quek, Y. Class-D LC Filter Design. Application Report. Texas Instruments. Luettu 21.3.2012. <http://www.ti.com/lit/an/sloa119a/sloa119a.pdf>
2. Honda, J. & Adams J. Application Note AN-1071 Class D Audio Amplifier Basics. International Rectifier. Luettu 21.3.2012. <http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-1071.pdf>
3. Guy, J. Class D Amplifier FAQ. National Semiconductor. Luettu 21.3.2012. <http://www.national.com/assets/en/appnotes/ClassDAmplifierFAQ.pdf>
4. Infineon. BSZ165N04NS G Datasheet. Luettu 21.3.2012. [http://www.infineon.com/dgdl/BSZ165N04NSG\\_rev1.1.pdf?folderId=db3a3043156fd5730115c7d50620107c&fileId=db3a30431689f4420116c48a64960872](http://www.infineon.com/dgdl/BSZ165N04NSG_rev1.1.pdf?folderId=db3a3043156fd5730115c7d50620107c&fileId=db3a30431689f4420116c48a64960872)
5. Elliot, R. 2000. Power Amplifier Efficiency Explained. Luettu 21.3.2012. <http://sound.westhost.com/efficiency.htm>

**LIITTEET**

Liite 1. Piirikaavio

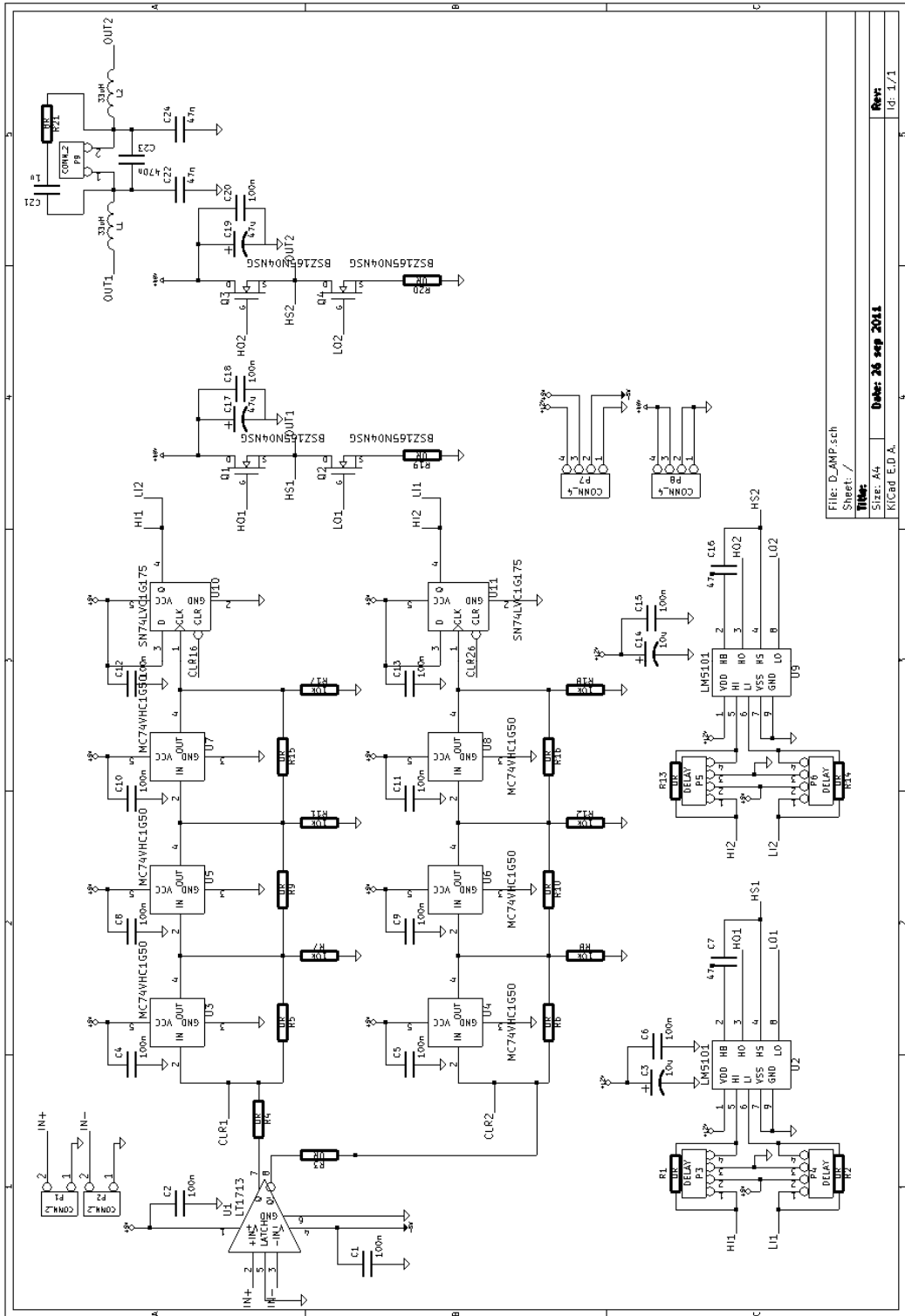
Liite 2. Kuparikerrokset

Liite 3. Osasijoittelu

Liite 4. Osalista

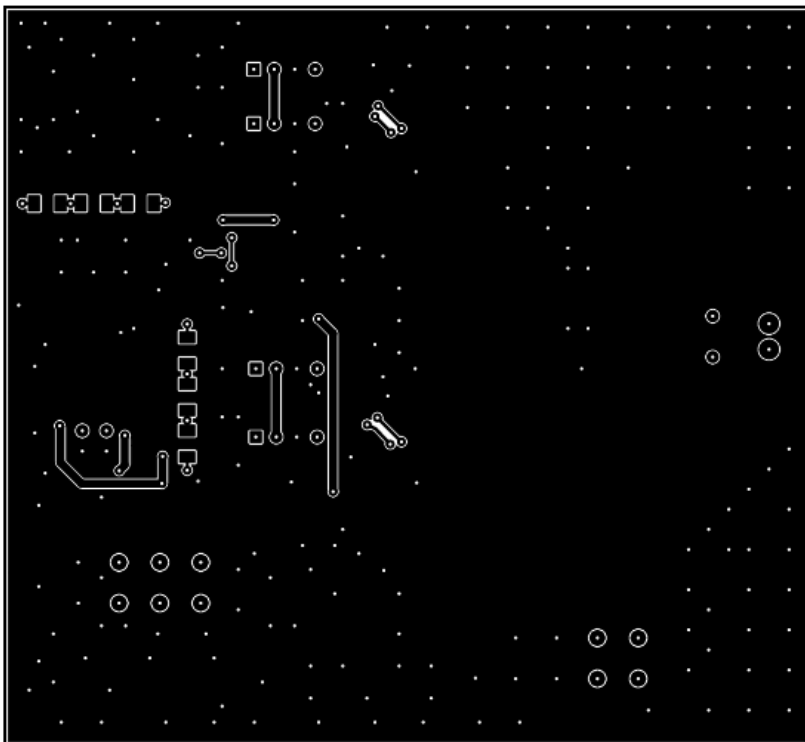
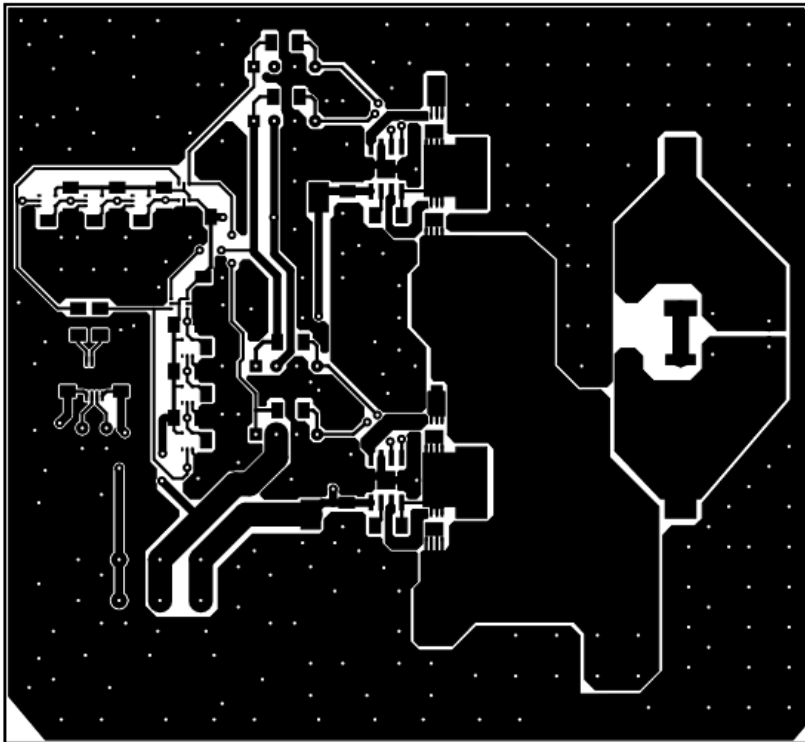
Liite 5. Kuva vahvistimesta

Liite 1. Piirikaavio

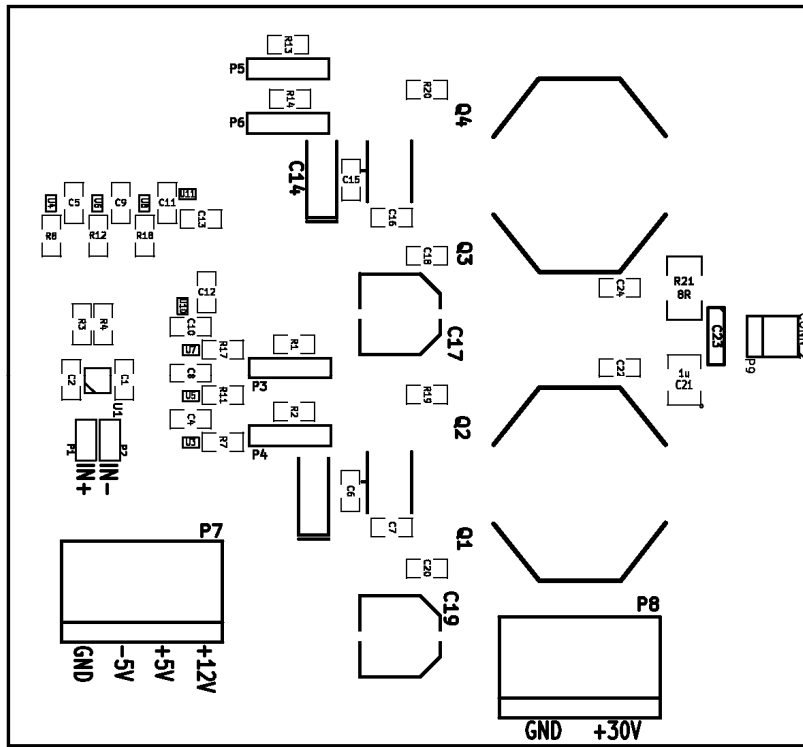


File: D_AMP.sch
Sheet: /
Title:
Date: 26 sep 2011
Size: A4
Rev:
KIGad, E.D.A., Id: 1/1

Liite 2. Kuparikerrokset



## Liite 3. Osasijoittelu



## Liite 4. Osalista

R1-R6, R9, R10, R13-R16, R19, R20	0R
R7, R8, R11, R12, R17, R18	10k
R21	8R
C1, C2, C4-C6, C8-C13, C15, C18, C20	100nF
C3, C14	10uF
C21	1uF
C23	470nF
C7, C16, C22, C24	47nF
C17, C19	47uF
L1, L2	33uH
Q1-Q4	BSZ165N04NSG
U1	LT1713
U2, U9	LM5101
U3-U8	MC74VHC1G50
U10, U11	SN74LVC1G175

Liite 5. Kuva vahvistimesta

