

Opinnäytetyö (AMK)
Elektronikka
Tietoliikennejärjestelmät
2015

Hannu Hedborg

KUULOKEJÄRJESTELMÄ SIMULTAANITULKKAUSTA VARTEN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Tietoliikennejärjestelmät

2015 | 60 sivua

Ohjaaja: Yliopettaja Juha Nikkanen

Hannu Hedborg

KUULOKEJÄRJESTELMÄ SIMULTAANITULKKAUSTA VARTEN

Tämän työn lähtökohtana oli kehittää mahdollisimman edullinen simultaanitulkkausjärjestelmä käyttäen langallisia kuulokkeita. Suunnittelun tavoitteena ei ollut järjestelmän kaupallistaminen, vaan toteuttaminen talkootyöllä ja pienellä budjetilla. Lisäksi tarkoituksena on ollut järjestelmän ja sen suunnittelulähtökohtien dokumentoiminen vastaavien talkooprojektien toteuttamista varten.

Järjestelmä perustuu ideaan syöttää ääni kaikkiin saman tulkkauskielen kuulokkeisiin samalla vahvistinkanavalla, sekä sovittaa kuulokkeita syöttävän vahvistimen ja kuulokkeiden jännite- ja impedanssitasot keskenään kaiutinlinjamuuntajien avulla. Keskusradio- ja äänievakuointijärjestelmissä käytettävät kaiutinlinjamuuntajat osoittautuivatkin testimittauksissa hyväksi tavaksi toteuttaa järjestelmä. Yhdellä muuntajalla voidaan sovittaa useita kuulokkeita 70 V:n tai 100 V:n kaiutinlinjaan tai jopa tavanomaisemman vahvistimen lähtöön. Kuulokesignaalin jakelussa käytetyt korkeammat jännite- ja impedanssitasot mahdollistavat myös ohuemman kaapeloinnin käytön vahvistimen ja muuntajien välissä.

ASIASANAT:

simultaanitulkkaus, äänentoisto, muuntaja, kuulokkeet

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Telecommunication systems

2015 | 60 pages

Instructor: Juha Nikkanen, Lic.Sc (Tech), Principal lecturer

Hannu Hedborg

HEADPHONE SYSTEM FOR SIMULTANEOUS INTERPRETATION

The purpose of this Bachelor's thesis was to develop and document a design concept for a cost effective simultaneous interpretation headphone system. The main design idea was to use only one power amplifier channel for a language. Loudspeaker line transformers were used to adapt voltage levels and impedance levels of headphone and amplifier with each other.

The theoretical part of the briefly introduces simultaneous interpretation and the technical needs for simultaneous interpretation. Existing speech transmission methods for interpretation system are compared with each other on the usability and economical viewpoints. The theory of human voice, audio transformers and matching impedance and voltage levels with a transformer is covered more thoroughly.

On the practical side a 36 seat interpretation system for two languages was built for a local church. Audio measurements on the manufactured system gave proof that the design concept was usable. The audio quality of the system was proven to be even more than adequate for a speech system.

KEYWORDS:

simultaneous translation, sound transmission, transformer, headphones

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	VII
1 JOHDANTO	1
2 YLEISTÄ TULKKAUKSESTA JA SEN TEKNIIKASTA	2
2.1 Langattomat järjestelmät	3
2.1.1 Infrapunakuulokkeet	3
2.1.2 Radiotaajuudella toimivat kuulokkeet	4
2.2 Langalliset järjestelmät	4
2.2.1 Aktiiviset analogiset järjestelmät	5
2.2.2 Digitaalinen järjestelmä	5
2.2.3 Passiivinen signaalinjakelu	6
3 LANGALLISEN KUULOKEJÄRJESTELMÄN TEKNIikka JA SUUNNITTELU	7
3.1 Puheäänen ominaisuuksia	7
3.2 Kuulokkeet	8
3.2.1 Kuulokkeiden impedanssi	8
3.2.2 Kuulokkeiden taajuusvaste ja resonanssit	9
3.3 Audiomuuntajat	11
3.3.1 Muuntajien päätyypit käyttötarkoituksen mukaan	12
3.3.2 Audiomuuntaja matalilla taajuuksilla	13
3.3.3 Muuntaja impedanssi- ja jännitetasojen sovituksessa	15
3.4 Päätevahvistintyyppit ja niiden erot	15
3.4.1 Tavalliset päätevahvistimet	15
3.4.2 PA-vahvistimet eli vahvistimet 70:n ja 100 V:n kaiutinlinjoille	16
3.5 Kuulokkeiden ja vahvistinten sovittaminen	17
4 TOTEUTUS	21
4.1 Kuulokkeiden valinta	21
4.2 Mekaaninen toteutus	24
4.3 Sähköinen ja sähkömekaaninen toteutus	25
4.4 Toteutuksen taloudellisuus	32
5 MITTAUKSET	33
5.1 Alustavat testit ja mittaukset	33

5.1.1 Impedanssimittaukset	34
5.1.2 Taajuusvastemittaukset	37
5.2 Mittaukset valmiille järjestelmälle	38
5.3 Taajuusvastemittaukset	39
5.4 Impedanssimittaukset	40
5.4.1 Impedanssimittausjärjestely ja sen verifiointia	41
5.4.2 Impedanssimittaukset järjestelmälle	44
5.4.3 Muuntajan oikosulku- ja lähtöimpedanssit	46
5.4.4 Väliinkytkentävaimennuksen laskeminen lähtöimpedanssin perusteella	49
5.5 Särömittaukset	50
5.5.1 THD-mittaukset	51
5.5.2 THD+N mittaukset	55
5.6 Yhteenveto mittauksista	57
6 YHTEENVETO	58
LÄHTEET	59

KUVAT

Kuva 1. Kuusilähtöinen kuulokevahvistin ohjelmavalintamahdollisuudella	5
Kuva 2. Kuulokkeen impedanssi ja resonanssi.	10
Kuva 3. Esimerkki audiomuuntajista putkivahvistimessa. [16]	11
Kuva 4. Mikrofonisisäänmenoon tarkoitettu sisäänmenomuuntaja.	12
Kuva 5. Muuntajan ja etuvastuksen jännitteet 40 Hz:n taajuudella. [18]	14
Kuva 6. Muuntajan ja etuvastuksen jännitteet 34 Hz:n taajuudella. [18]	14
Kuva 7. ITR 701501 -muuntajan liitinnastat	18
Kuva 8. Valitut kuulokkeet roikkumassa tuolin selkänojaputkessa.	22
Kuva 9. Rikkinäinen muoviosapari.	23
Kuva 10. Ehjien kuulokkeiden suorat ja rikkinäisten kiharaiset johdot.	23
Kuva 11. Putkenkiinnitin.	24
Kuva 12. Kuulokepalkki Spannfix-kuminauhoilla tuoliriviin kiinnitettynä.	25
Kuva 13. Tulkkausjärjestelmän lohkoakaavio.	26
Kuva 14. Kuulokeliittimen mekaaninen toteutus.	26
Kuva 15. Kuulokeliittimen sähköinen kytkentä ja käytetyt osat.	27
Kuva 16. Kuulokeliitinpalkin liitosjohto ja ketjutusliitin.	28
Kuva 17. Liitosjohdon ruuvirimaliitin kouruosan pohjassa.	29
Kuva 18. Kaapeliankkuri kuulokeliittimien kaapelointia varten.	30
Kuva 19. Muuntajan kaapelointi.	31
Kuva 20. Kuulokeliittinten kaapelointia kiinnitettynä kansiosaan.	31
Kuva 21. REW-ohjelman impedanssimittausjärjestely. [23]	34
Kuva 22. Muuntajan ja 10 kuulokkeen impedanssit samassa kuvassa.	35

Kuva 23. Alustava taajuusvastemittaus.	37
Kuva 24. Tyypillinen mittausjärjestely SysTunella. [17]	38
Kuva 25. Kuulokeliittimestä mitattuja taajuusvasteita erilaisilla kuulokemäärillä.	40
Kuva 26. Jännitettä mittaavan kanavan 1. kalibrointi-ikkuna.	42
Kuva 27. Kalibroimattoman kanavaeron vaikutus impedanssimittaustulokseen. Ylempi, musta kuvaaja mitattu ilman kalibrointia, punainen kalibroituna.	42
Kuva 28. Impedanssimittausjärjestely.	43
Kuva 29. Impedanssimittausjärjestelyn lohkoakaavio.	43
Kuva 30. 10:n kuulokepalkin impedanssit tyhjänä ja puolella kuulokemäärällä.	44
Kuva 31. 10:n kuulokepalkin impedanssin vaiheet ilman kuormaa ja puolella kuulokemäärällä.	45
Kuva 32. Yhden kuulokepalkin impedanssi erilaisilla kuormituksilla	46
Kuva 33. Muuntajan oikosulkuimpedanssit eri tapitusvaihtoehdoilla.	47
Kuva 34. Muuntajan lähtöimpedanssit.	48
Kuva 35. Äänikortin omat säröt.	52
Kuva 36. Muuntajan säröt 20 V:n sisäänmenotasolla ja 4 Ω :n kuormalla.	54
Kuva 37. Muuntajan harmoninen särö ilman kuormaa.	55
Kuva 38. Särö- ja kohinaetäisyys mitattuna kolmella eri signaalitasolla.	56
Kuva 39. THD+N prosenttiasteikolla esitettynä.	57

TAULUKOT

Taulukko 1. ITR 701501 -muuntajan mitatut ja laskennalliset muuntosuhteet.	18
Taulukko 2. Kustannuserät ja niiden osuus istumapaikkaa kohden.	32

KÄYTETYT LYHENTEET

AD-muunnin	laite tai laitteen osa joka muuntaa analogisen signaalin digitaaliseksi.
CF	crest factor eli huippuarvokerroin, kertoo signaalin huippuarvon ja tehollisen arvon suhteen
DA-muunnin	laite tai laitteen osa joka muuntaa analogisen signaalin digitaaliseksi
dB	dimensioton logaritminen yksikkö, jolla voidaan vertailla tehoon vaikuttavien suureiden suhteita keskenään
DF	vaimennuskerroin, kuvaa vahvistimen kykyä kiihdyttää ja jarruttaa kaiutinelementin liikettä
di-box	ammattiäänentoistossa impedanssitason muuntoon käytetty laite
Faraday-suoja	muuntajan rakenneosana, maadoitettuna estää ensiön ja toision välistä kapasitiivista kytkentää
FFT	nopea fourier-muunnos, muuntaa signaalin aikatasosta taajuustasoon
<i>I</i>	virta
IR	infrapuna
<i>P</i>	teho
<i>P_{nom}</i>	nimellisteho
PA	public address, julkisten tilojen äänentoisto
<i>U</i>	jännite
<i>R</i>	<i>resistanssi</i>
SPL	äänenpainetaso
THD	harmoninen kokonaissärö
THD+N	harmoninen kokonaissärö ja kohina
Z	impedanssi

1 JOHDANTO

Työn lähtökohtana oli rakentaa pieneen niin sanottuun vapaiden suuntien seurakuntaan edullinen kuulokejärjestelmä simultaanitulkkaukselta varten. Seurakunta sijaitsee lähiössä, jossa asuu paljon maahanmuuttajia, ja aiempi langaton kuulokejärjestelmä oli käynyt liian pieneksi. Kustannussyistä järjestelmä oli tarkoitus toteuttaa langallisena. Lisäksi järjestelmä perustuu siihen, että kaikkiin saman kielen kuulokkeisiin ääni syötetään yhdellä tehovahvistinkanavalla. Koska vahvistin ei kuitenkaan pystyisi aivan liian pienen kokonaisimpedanssin takia ajamaa useita rinnankytkettyjä kuulokkeita, tarvittiin tapa sovitaa kuulokkeiden impedanssi vahvistimelle sopivaksi. Tehovahvistimien lähtöjännitetaso on myös suhteettomasti isompi kuin mitä kuulokkeet kestävät. Jännite ja impedanssitasojen sovitukset päätettiin tehdä kaiutinlinjamuuntajin.

Kaiutinlinjamuuntajilla toteutetusta tulkkauks- tai kuulokejärjestelmästä ei löytynyt opinnäytetyötä. Vahvistinlähdössä käytettäviä kaiutinlinjamuuntajia sen sijaan käsittelee Pasi Jaakkolan insinööriö ”Linjamuuntajayksikön suunnittelu PA-järjestelmään”

Työn tarkoituksena oli suunnitella helposti rakennettava ja myöhemmin laajennettavissa oleva kuulokejärjestelmä, joka perustuu yksinkertaiseen kytkentäideaan. Toisaalta tarkoituksena oli myös dokumentoida järjestelmän suunnitteluperusteet ja toteutustavat, jotta vastaavia järjestelmiä samankaltaisiin tarpeisiin voitaisiin toteuttaa muuallakin.

Luvussa 2. on lyhyt katsaus tulkkaukseen ja sen avuksi tarvittavaan tekniikkaan. Ihmisen ääneen, kuulokkeisiin ja muuntajiin liittyvää teoriaa käydään läpi luvussa 3. Toteutettu järjestelmä esitellään luvussa 4. ja siihen liittyvät alustavat ja lopulliselle järjestelmälle tehdyt mittaukset luvussa 5.

2 YLEISTÄ TULKKAUKSESTA JA SEN TEKNIIKASTA

Tulkkaus on tarpeen järjestettäessä tilaisuuksia tai tapahtumia monikieliselle yleisölle. Mikäli tilaisuudessa käytetään vain kahta kieltä, voidaan tulkkaus järjestää konsekutiivitulkkauksena. Konsekutiivitulkkauksessa tulkki puhuu lähtökielisen puhujan lopetettua puhumisen. Tällainen vuorottaisuus toisaalta lisää saman asian välittämiseen menevää aikaa, mutta myös lisää tulkin mahdollisuutta lauseen tai tulkattavan jakson asiasisällön ymmärrettävämpään tulkkaukseen. Konsekutiivitulkkauksessa ei tarvita erityisiä tulkkauslaitteita, tosin tavallisemmat äänentoistolaitteet voivat olla tarpeen, jotta sekä tulkki että yleisö kuulevat puheenvuorot. [1]

Simultaanitulkkaus on järkevämpi vaihtoehto, kun tulkausta tarvitseva osallistujaryhmä on vähemmistönä yleisöstä tai ryhmiä ja siten niiden tarvitsevia kieliä on useampia. Simultaanitulkkauksessa pyritään mahdollisimman pieneen tulkkauksiin 3 – 4 saanaan tulkin puhuessa yhtä aikaa puhujan kanssa. Simultaanisuus tarkoittaa siis, sitä että tulkki yhtä aikaa vastaanottaa ja välittää eteenpäin viestiä. Simultaanitulkausta pidetään tulkkauslajeista hankalimpana aikarajoitteen takia. Simultaanitulkkauksessa käytetään apuna laitteistoa, jolla tulkki tai tulkit kuulevat puhujan puheen tulkkikoppiin tai koppeihin ja jolla tulkin ääni välitetään tulkkauksuulokkeisiin. [1] [2]

Kuiskaustulkkaus on muunnelma simultaanitulkkauksesta, siinä tulkki on salissa ja tulkkaa hiljaisella äänellä joko ympärillään istuville tai mikrofonin kautta tulkkauksuulokkeisiin.

Järjestettäessä tulkkausjärjestelmää yksittäiseen tilaisuuteen tai tapahtumaan järjestelmän vuokraus on tietenkin harkinnan arvoinen vaihtoehto. Jos kuitenkin tarvitaan tulkkausäänijärjestelmää toistuvasti samassa tilassa, laitteiston hankinta saattaa tulla kannattavaksi.

Pienen kuulijamäärän tulkkausjärjestelmät voidaan toteuttaa kohtuullisen kustannustehokkaasti langattomilla infrapuna- tai radiokuulokkeilla. Kuitenkin tarvittaessa isommille kuulijamäärille tulkkauslaitteistoa tulee yksittäisten kuulokkeiden hinta merkittäväksi tekijäksi laitteiston kokonaishinnassa. Lisäksi langattomien kuulokkeiden käyttöön liittyy omat ongelmansa, kuten pattereiden vaihdosta tai akkujen lataamisesta huolehtiminen. Infrapunakuulokkeiden ongelma on myös niiden vaatima näköyhteys lähetinpaneeliin.

Paneeleita voi kylläkin olla useita, jotta jostain suunnasta voitaisiin vastaanottaa signaali, vaikka toisessa suunnassa oleva lähetin on esteen, esimerkiksi toisen ihmisen takana.

Mikäli tilaisuuden luonne on sellainen, että kuulijat ovat tilaisuuden ajan istuinpaikoillaan, saattaa langallinen tulkkaujärjestelmä olla sekä toimintavarmin että kustannustehokain. Langallisessa järjestelmässä voidaan käyttää edullisia, jopa alle 10 €:n kuulokkeita ja järjestelmän hinta määräytyykin pitkälti tekniikasta ja teknisistä ratkaisuista, joilla ääni syötetään kuulokkeisiin.

Loppukäyttäjän tarpeet ovat hyvin tärkeitä huomioida suunniteltaessa kuulokejärjestelmää tai muita järjestelmiä. Kuulokejärjestelmän suunnitteluun vaikuttavat tarpeet voivat olla hyvin erilaisia riippuen käyttäjistä ja käyttötarkoituksesta. Tässä luvussa vertaillaan erilaisten tekniikoiden soveltuvuutta erilaisiin käyttötarkoituksiin.

2.1 Langattomat järjestelmät

Langattomien järjestelmien selkein etu on mahdollistaa käyttäjien vapaampi liikkuminen ja sijoittuminen tilassa. Infrapunajärjestelmissä on kuitenkin rajoitteena näköyhteysvaatimus vastaanottimen ja lähettimen välillä. Radio ja infrapunayhteyksiin perustuvissa järjestelmissä vastaanottimet toimivat akuilla tai paristoilla, joiden lataaminen tai vaihto aiheuttaa jatkuvan ylläpitotarpeen.

2.1.1 Infrapunakuulokkeet

Infrapunakuulokkeiden lähettimessä lähetettävä ääni moduloidaan ensin radiotaajuiseksi ja moduloitu signaali lähetetään infrapunavalona. Yleensä lähetinpaneelit koostuvat useista infrapunadiodeista. Paneeli ja modulaattori voivat olla integroituna samaan laitteeseen tai omina erillisinä yksiköinä. Monikielisissä järjestelmissä eri taajuuksille säädettyjä modulaattoreita voi olla useita ketjutettuna. Näin niille voidaan käyttää yhtä tai useampaa yhteistä ir-emitteripaneelia eli lähetinpaneelia. [3]

IR-kuulokejärjestelmissä voidaan käyttää kahta eri taajuusaluetta. 40 kHz – 1MHz:n taajuusalueella äänisignaali lähetetään yleensä FM-moduloituna. 2 – 6MHz taajuusalueella modulaation on yleensä digitaalinen. [4]

Haluttaessa suojautua salakuuntelulta infrapunälähetteen etu on se, että sen vuotaminen esimerkiksi neuvottelutilasta ulos vaatii näköyhteyden ulkopuolelle. Toki infrapunajärjestelmiä on saatavana myös digitaalisina salattuina versioina.

Infrapunakuulokkeet eivät sovellu käytettäväksi ulkona tai tiloissa joihin tulee runsaasti auringonvaloa. Myös loisteputkivalaisimet, joiden liitäntälaitteissa eli elektronisissa kustrimisissa käytetään korkeaa taajuutta, voivat häiritä varsinkin analogista infrapunayhteyttä. [4] [5]

Infrapunatulkkausjärjestelmän suunnittelu ja asennus vaativat ammattitaitoa. Hanka- luutta aiheuttavat järjestelmän mahdollinen monikielisyys ja kattavuuden järjestäminen varsinkin monimuotoisissa tiloissa.

2.1.2 Radiotaajuudella toimivat kuulokkeet

Radiokuulokkeiden etu infrapunakuulokkeisiin verrattuna on radioaaltojen tasaisempi le- viäminen ja parempi esteiden läpäisykyky. Toisaalta tämä voi olla haitta, jos esimerkiksi kongressijärjestelmässä halutaan estää salakuuntelu vaikkapa viereisissä tiloissa. Siksi käytettäessä arkaluontoisissa tapahtumissa radiokuulokkeita on käytettävä salattua jär- jestelmää.

Tavallisempaan käyttöön radiokuulokkeilla syntyy pieni järjestelmä näppärästi kotikäyt- töön tarkoitetuilla kuulokkeilla. Niiden rajoituksena on kuitenkin usein pieni valittavissa olevien taajuuksien määrä, eikä kaikkia valittavissa olevia taajuuksia välttämättä voi käyt- tää samanaikaisesti häiriöttä.

2.2 Langalliset järjestelmät

Kaapeloitujen järjestelmien etuna on langattomia järjestelmiä pienempi ylläpitotarve. Kaapeloitu järjestelmä voidaan toteuttaa monin tavoin. Tavanomaisessa analogisessa järjestelmässä signaali voidaan jakaa esimerkiksi ammattiäänentoistojärjestelmissä yleis-esti käytettävällä +4 dBu:n nimellisellä signaalitasolla käyttäjäkohtaisille kuulokevahvis- timille. Kuvassa 1. on esimerkki pienestä kuuden kuulokeparin vahvistimesta, jossa on jokaiselle kuulokelähdölle ohjelmavälintakytkin ja voimakkuussäätö. Digitaalinen signaa- lin jakelu mahdollistaa useiden eri kielten välittämisen samassa kaapeloinnissa sekä myös salauksen. Molemmat tavat vaativat tietenkin myös käyttöjännitteen syöttämisen

kuulijakohtaisille kojeille. Mikäli järjestelmää halutaan yksinkertaistaa mahdollisimman pitkälle, vaihtoehdoksi jää kunkin tulkkauskielen kuulokkeiden syöttäminen yhdestä paikasta yhteisellä vahvistimella. Tällainen tapa vaati kuitenkin jonkin tavan kuulokekuorman ja vahvistimen sovittamiseen keskenään.

2.2.1 Aktiiviset analogiset järjestelmät

Analoginen järjestelmä voidaan toteuttaa suhteellisen edullisesti kuulijakohtaisilla kuulokevahvistimilla. Sopivalla tuotteella voidaan mahdollistaa jopa kielivalinta. Kuulokevahvistimien tarvitseman käyttöjännitteen lisäksi pitää huolehtia lisäksi siitä, että niitä syötävän äänilähteen, esimerkiksi mikserin lähtöimpedanssi on tarpeeksi matala. Esimerkiksi kahdenkymmenen kuulokevahvistimen, joissa on 20 k Ω :n sisäänmenot, aiheuttama impedanssi rinnankytkettyinä on 1 k Ω :a. Koska ammattikäyttöön tarkoitettujen audiolaitteiden tyypillinen lähtöimpedanssi on 150 – 200 Ω :a, on tämä hyväksyttävä arvo, koska sisäänmenoimpedanssit eivät kuormita lähdettä niin että lähtöjännite merkittävästi muuttuisi.



Kuva 1. Kuusilähtöinen kuulokevahvistin ohjelmavalintamahdollisuudella

2.2.2 Digitaalinen järjestelmä

Digitaalisia järjestelmiä voi olla sekä langallisesti että langattomasti toteutettuja. Digitaalisia kaapeloitujen järjestelmien etu on mahdollisuus useamman yhtäaikaisen äänen siirtoon radiolähteessä tai yksinkertaisessa, esimerkiksi lähiverkkokaapeloinnissa. Kaapelointi kuitenkin aiheuttaa kuulijoiden paikoille rajoitteet, joten yleensä kaapeloidut digitaaliset järjestelmät ovat kongressijärjestelmiä. Osallistujan kojeessa ei siis ainoastaan ole mahdollisuutta valitun kielen kuunteluun vaan lisäksi mikrofoni omia puheenvuoroja varten ja jopa äänestysmahdollisuuskin. Toki kongressijärjestelmiäkin on saatavana langattomina, mutta kiinteästi kaapeloituja järjestelmiä pidetään toimintavarmempina ja huoltovapaampina. [6]

2.2.3 Passiivinen signaalinjakelu

Passiivisilla järjestelmillä tarkoitetaan kaapelointi- ja impedanssisovitusjärjestelmää, jolla yhdeltä vahvistimilta tuleva signaali jaetaan ja sovitetaan kuulokkeille. Kuten edellisessä luvussa on esitetty, passiivikomponenteilla sovitusta voidaan tehdä impedanssi- ja vastusjakoon pohjautuen tai audiomuuntajia hyväksikäyttäen. Koska muuntajatoteutus on helpommin muunneltava ja yleispätevämpi ja riippumattomampi kuulijoiden istuinpaikkojen sijoittelusta ja sen muodosta, on tässä työssä esiteltävä järjestelmä toteutettu muuntajin.

3 LANGALLISEN KUULOKEJÄRJESTELMÄN TEKNIikka JA SUUNNITTELU

Lähtökohtainen tarve on siis järjestelmä audiopäätevahvistimen ja kuulokkeiden väliin. Päätevahvistimen kannalta ajateltuna pitää huolehtia sille sopivasta kuormaimpedanssista. Jotta voitaisiin käyttää mahdollisimman pientä ja edullista vahvistinta, järjestelmän hyötysuhde pitää myös olla kohtuullisen hyvä, eli suurin osa vahvistintehosta tulee siirtyä kuulokkeisiin.

Kuulokkeiden kannalta ajateltuna järjestelmän on pystyttävä siirtämään sopiva määrä tehoa kuulokkeisiin niiden herkkyyteen nähden, jotta saavutetaan riittävä äänenvoimakkuus. Jotta kuulokkeiden impedanssivaste ei vaikuttaisi niiden taajuusvasteeseen, tulee niitä syöttävän impedanssin olla riittävän alhainen.

Kaapeloinnin tulee olla mahdollisimman helppoa, joten on eduksi, jos voidaan käyttää kaapelia jonka johtimissa on suhteellisen pieni poikkipinta-ala. Lisäksi järjestelmä ei saa rajoittaa kaapeloinnin topologiaa esimerkiksi niin että kaapeloinnin olisi kuljettava aina istuinpaikkariviltä seuraavalle tai niin että jokaiselle riville olisi tuotava oma kaapelinsa vahvistimelta.

3.1 Puheäänien ominaisuuksia

Ihmisäänen taajuuskaista on noin 80 – 10000 Hz:ä ja se vaihtelee puhujan tai laulajan mukaan. Puheäänien perustaajuus on miehillä keskimäärin 100 – 130 Hz:ä ja naisilla n. 220 – 280 Hz:ä. Perustaajuuden kuuleminen puheessa tai instrumenttien äänessä ei ole välttämättä tarpeen, koska aivot pystyvät ylä-äänesten eli perustaajuuden kerrannaisten perusteella tajuamaan perustaajuuden. Puhe koostuu äänneistä eli vokaaleista ja konsonanteista. Konsonantit ja niin sanottu preesensalue n. 2 – 8 kHz:a ovat tärkeitä puheen ymmärrettävyyden kannalta. Puheen ymmärrettävyyteen vaikuttavat monet erilaiset seikat, kuten puheen ja taustamelun tai häiriön taso, särö sekä käytetyn äänentoistolaitteiston laatu. Huonetilassa puhetta kuunneltaessa ymmärrettävyyteen vaikuttavat myös akustiikkaan liittyvät asiat kuten kaiku-aika ja heijasteet. [7] [8]

Kuulokejärjestelmässä akustiset ongelmat ovat tietenkin hyvin vähäisiä. Kuulokkeiden kannattaa yleensä olla ääntä eristävät, jotta ulkopuolinen ääni ei häiritse tulkkauksen kuuntelua ja jottei kuulokkeiden ääni häiritse vieressä istuvia.

3.2 Kuulokkeet

Kuulokkeet ovat elektroakustisia muuntimia. Pääosa kuulokkeista on dynaamisia. Dynaamisissa kuulokkeissa on magneetti ja puhekela. Magneetin ilmaraossa olevaan puhekelaan syötettävä vaihtojännite saa puhekelan ja siihen kiinnitetyn kuuloke-elementin kalvon värähtelemään. Dynaamiset kuulokkeet toimivat siis samalla periaatteella kuin pääosa kaiuttimistakin.

Kuulokkeita voidaan luokitella toimintaperiaatteen lisäksi sen mukaan miten ne ovat korvan ympärillä, korvalehden päällä, korvalehden sisällä (nappikuulokkeet) tai korvakäytävässä (in-ear). Korvalehden ympäröivät (circumaural) ja korvalehden päällä pidettävät (supra-aural) kuulokkeet voidaan vielä jakaa suljettuihin ja avoimiin. Tämä viittaa siihen onko kuuloke-elementin takapuoli avoin vai koteloitu. Myös hieman epämääräistä termiä puoliavoin käytetään, ja se tarkoittaa että koteloitu ei ole täysin umpinainen.

Kuulokkeiden etuna on parempi äänenlaatu verrattuna samanhintaisiin kaiuttimiin. Lisäksi huoneakustiikka ei vaikuta äänenlaatuun ja esimerkiksi puheen ymmärrettävyyteen. Varsinkin nappikuulokkeiden, in-ear -kuulokkeiden ja suljettujen kuulokkeiden etuna on yksityisyys ja äänen vuotamattomuus ulkopuolelle. Koska kuulokkeiden ääni kuuluu hyvin vaimeasti niiden ulkopuolelle, voidaan niillä turvallisemmin kuunnella arkaluontoisempaa äänimateriaalia. Toisaalta esimerkiksi kirjastossa tai tämän työn tapauksessa simultaanitulkkauksjärjestelmässä kuulokkeiden ääni ei häiritse lähellä tai vieressä olevia muita ihmisiä [9]

3.2.1 Kuulokkeiden impedanssi

Koska tässä työssä on tarkoituksena sovittaa kuulokkeiden impedanssi ja jännitetaso vahvistimen – tai oikeastaan 70 V:n kaiutinlinjan – kanssa sopivaksi yhteensopivaksi, on kuulokkeiden impedanssi tärkeä tekijä järjestelmää suunniteltaessa. Impedanssi vaikuttaa herkkyden ohella jännitteeseen, jonka kuulokkeet tarvitsevat tuottaakseen halutun

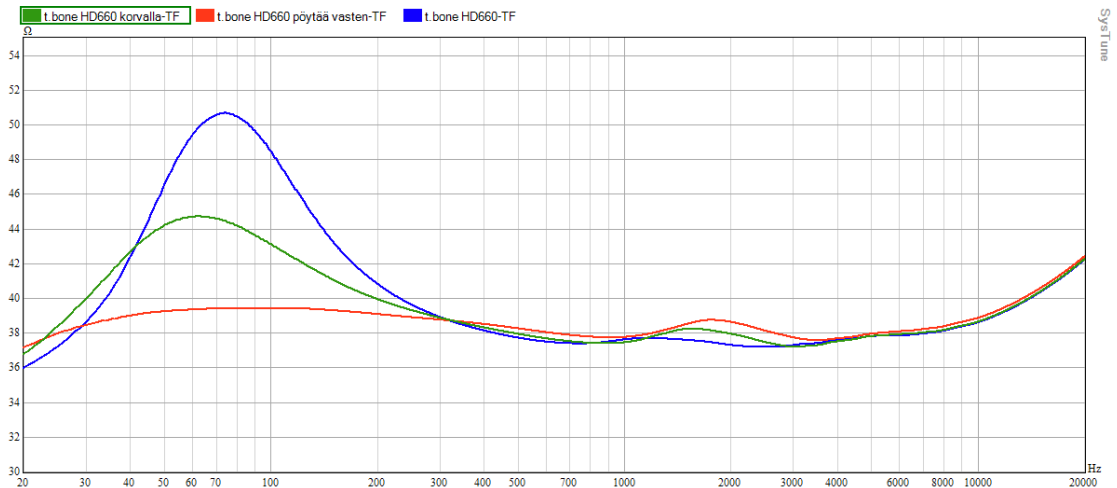
maksimiäänepaineen. Kuulokkeiden impedansseissa voi olla hyvinkin isoja eroja. Yleisimmin kuulokkeiden impedanssi vaihtelevat välillä 16 – 600 Ω :a Jopa samasta kuulokemallista saattaa olla saatavilla eri impedanssisia variantteja, kuten Beyerdynamicin mallista DT-100. DT-100 -kuulokkeista on saatavilla 16 Ω :n ja 400 Ω :n nimellisimpedanssiset mallit. [10] [11]

Miksi sitten kuulokkeita valmistetaan erilaisilla impedansseilla? 1960 – 1980 -luvuilla yleinen tapa tehdä kotistereoiden kuulokelähtö oli ottaa signaali kuulokeliittimeen kaiutinlähdön rinnalta isoarvoisilla vastuksilla. Vuonna 1996 julkaistu IEC 61938 -standardi määritteli kuulokelähdön impedanssiksi 120 Ω :a. Siksi varsinkin aiemmin kuulokkeiden impedanssien oli syytä olla suuria, muuten suurin osa kuulokelähdön jännitteestä olisi hävinnyt kuulokelähdön vastuksiin. Kannettavien CD-soitinten ja varsinkin iPodien ja muiden vastaavien kannettavien musiikintoistolaitteiden yleistymisen johti sekä kuulokkeiden että kuulokelähtöjen impedanssien pienenemiseen. Pienempiin impedansseihin oli pakko siirtyä, koska ladattavissa laitteissa haluttiin käyttää pieniä akkujännitteitä käyttöajan pidentämiseksi. Yleisin akkujännite on arvatenkin nykyisenä älypuhelimien aikana 3,7 V:a eli yhden litium-ioni -akkukennon jännite. Korkeampiin kuulokeimpedansseihin ei pystyttäisi syöttämään tarpeeksi jännitettä riittävien äänenpainoiden aikaansaamiseksi. Korkeamman käyttöjännitteen muodostaminen kuulokevahvistimelle akkujännitteestä puolestaan lisäisi kuluja, vaatisi tilaa laitteen sisältä sekä huonontaisi hieman hyötysuhdetta. [10] [12]

3.2.2 Kuulokkeiden taajuusvaste ja resonanssit

Koska kuulokkeet ovat sähköakustisia muuntimia, niihin saattaa liittyä resonansseja kuten kaiuttimiinkin. Liikkuvaa massaa heilutetaan sähköllä ja liikkuvan massan liikemäärä pyrkii säilymään. Kuulokkeissa liikkeen muuttuminen ilmanpaineen vaihteluksi voi vähentää kuuloke-elementin resonanssia, mutta toisaalta suljetuissa tai puoliavoimissa kuulokkeissa voi olla takakammioon liittyviä resonansseja. Myös akustinen kytkentä ulkomaailmaan voi vaikuttaa kuulokkeen resonanssiin. Kuvassa 2. on tämän työn lopullisessa toteutuksessa käytetyn kuulokkeen impedanssikuvaajat. Impedanssikuvaajien huippukohdat paljastavat resonanssit. Ylimpänä käyvässä sinisessä kuvaajassa kuulokkeet ovat irrallaan pöydällä ja elementti pääsee vapaasti resonoimaan koska sitä ei ole akustisesti kuormitettu. Vihreä kuvaaja on kuulokkeen impedanssi korvalla ja siinä reso-

nanssi on hieman vaimentunut ja resonanssitaajuus madaltunut. Resonanssiltaan pienimmässä punaisessa impedanssikuvaajassa kuuloke on puristettu tiiviisti pöydän pinta vasten.



Kuva 2. Kuulokkeen impedanssi ja resonanssi.

Kuulokkeen taajuusvasteeseen ei tietenkään voida vaikuttaa, muuten kuin hankkimalla kuulokkeet, missä on miellyttävimmän kuuloisin vaste tai muokkaamalla vastetta kuulokkeita signaaliketjussa edeltävällä elektroniikalla. Vaikka resonanssitaajutta vaimennettaisiin taajuuskorjaamalla kuulokkeisiin syötettävää signaalia jää kuulokkeisiin silti pyrkimys jäädä ”soimaan” pieneksi hetkeksi resonanssitaajuudellaan.

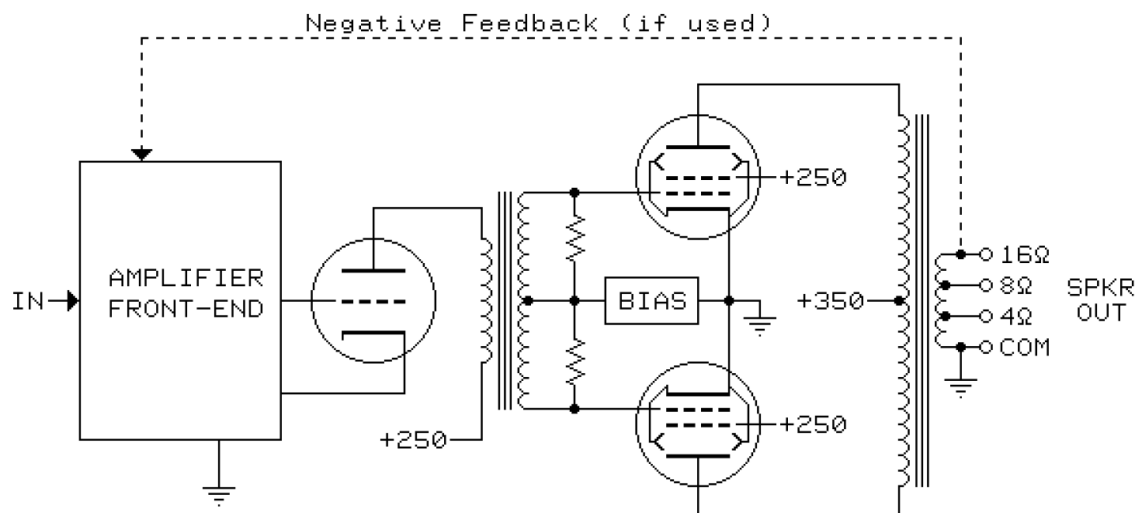
Kuulokevalmistajat voivat kuulokkeita suunniteltaessa vaimentaa kuuloke-elementin resonansseja kahdella eri tavalla. Mekaanisessa vaimennuksessa alivaimennus jättää elementin värähtelemään hetkeksi ja liika vaimennus pilaa elementin kyvyn seurata nopeita signaalien muutoksia. Mekaaninen vaimennus on siis kompromissi. Sähköisessä vaimennuksessa kuuloke tai kaiutinelementti pakotetaan sähköisellä ohjauksella haluttuun liikkeeseen tai liikkeen pysähtymiseen. Tämä perustuu siihen, että värähtelemään jäänyt elementti indusoi liitimiinsä jännitteen joka oikosuljetaan kuuloketta syöttävällä impedanssilla. Siksi kuuloke- tai kaiutinelementtiä syöttävän impedanssin on oltava merkittävästi pienempi kuin elementin oma impedanssi. Useimmiten kaiuttimia ajateltaessa vahvistimen lähtöimpedanssia merkittävämpiä ovat kaapelin ja elementin impedanssit. Muutamilla vahvistinvalmistajilla onkin erilaisia tapoja pienentää kaapeloinnin vaikutusta. Tiedettäessä vaikkapa kiinteässä asennuksessa kaiutinkaapelin resistanssi voidaan se kompensoida vahvistimessa pois, jos vahvistimella on kyky mitata syöttämäänsä virtaa. [12] [13] [14]

3.3 Audiomuuntajat

Muuntaja on sähkömagneettinen laite, jonka toiminta perustuu keskinäisinduktioon. Muuntajan pääominaisuudet ovat kyvyt muuttaa vaihtojännitteiden ja virtojen suuruuksia sekä erottaa galvaanisesti ensiö- ja toisiokäämit. Muuntajia käytetään yleisesti heikko- ja vahvavirtatekniikassa. Muuntajassa yksinkertaisimmillaan kaksi käämiä eli kela. Käämien magneettivuot pyritään kytkemään mahdollisimman hyvin toisiinsa, eli huolehtimaan siitä että ensimmäiseen käämiin syötetyn vaihtojännitteen aiheuttamasta vuosta mahdollisimman suuri osa kulkee myös toisen lävitse. Tämän takia muuntajan käämit käämitään muuntajasydämen päälle. [15]

Äänitekniikassa käytetään muuntajia useisiin eri tarkoituksiin. Isossa osassa äänentoisto ja -siirtolaitteita tarvitaan muuntajia jo käyttöjännitteiden takia.

Varhaisessa äänentoistotekniikassa ennen transistorien käyttöönottoa muuntajia tarvittiin laitteiden sisälläkin esimerkiksi signaalin siirtämiseen etuvahvistinasteelta pääteasteelle. Samalla muuntajia voitiin käyttää esimerkiksi bias- ja käyttöjännitteiden syöttöön radioputkille sekä tasavirtakomponentin poistoon kaiutinlähdestä. Kuva 3. on esimerkki audiomuuntajien käytöstä putkivahvistimessa. Vaikka nykyaikaisessa äänentoistoelektronikassa putkien käyttö on hyvin harvinaista, yksi käyttökohde tulee kuitenkin mieleen. Osassa kitaravahvistimia käytetään edelleenkin radioputkia niiden miellyttävän kuuloisuuden särön takia. [16]



Kuva 3. Esimerkki audiomuuntajista putkivahvistimessa. [16]

Elektroniikan kehittyessä eli varsinkin transistorin ja IC-piirien keksimisen jälkeen on muuntajien käyttöä vähennetty audioelektronikassa kustannussyistä. [17]

3.3.1 Muuntajien päätyypit käyttötarkoituksen mukaan

Äänentoistotekniikassa muuntajia käytetään hyvin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Muuntajia voidaan käyttää jännite- tai impedanssitasojen muuntoon tai apuna häiriönpoistossa. Lisäksi suhteellisen leveä 3:n dekadin taajuuskaista aiheuttaa omat ongelmansa audiomuuntajien suunnittelussa. Muutos jolla saadaan parannettua ominaisuuksia matalilla taajuuksilla, voi huonontaa korkeataajuusominaisuuksia.

Audiomuuntajat voidaan karkeasti jaotella sisäänmeno- ja ulostulomuuntajiin. Sisäänmeno- ja ulostulomuuntajilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia. Toki joissain tapauksissa muuntajilta vaaditaan molempiin päätyypeihin liittyviä ominaisuuksia. Sisäänmenomuuntajia käytettäessä kuorma on yleensä hyvin pieni kapasitanssiltaan ja suuri resistanssiltaan. Tyypillinen käyttökohde on esimerkiksi laitteen sisääntulon ja ensimmäisen vahvistinasteen välissä.

Kuvassa 4. on mikrofonisisäänmenoon tarkoitettu muuntaja. Koska signaalitaso on yleensä pieni, sisäänmenomuuntajissa käytetään usein sekä faraday-suojaa että magneettista suojaa. [16]



Kuva 4. Mikrofonisisäänmenoon tarkoitettu sisäänmenomuuntaja.

Ulostulomuuntajia käytettäessä signaalitaso on yleensä suuri ja siksi ne eivät yleensä tarvitse magneettista suojausta. Lisäksi nämä muuntajat usein syöttävät pitkää siirtolinjaa. Koska pitkät siirtolinjat ovat melko kapasitiivisiä, on muuntajan pieneen lähtöimpe-

danssiin korkeilla taajuuksilla panostettava. Siksi muuntajalla on oltava pieni hajainduktanssi. Muuntajan käämintätavalla on suuri merkitys sen hajainduktanssiin. Primäärin ja sekundäärin käämintä vuorokerroksin on parempi kuin toisen käämiminen kokonaan toisen alle. Hajavuon kannalta paras käämintätapa on multifilaarinen tai bifilaarinen käämintätapa. Multifilaarinen tarkoittaa useamman langan käämimistä yhtä aikaa. Bifilaarinen tarkoittaa käämintää kahdella langalla yhtä aikaa. Näistä langoista toinen on primäärikäämiä ja toinen sekundääriä. Lopputuloksena pitäisi olla shakkiruudun tapainen poikkileikkaus, jossa primääri ja sekundäärikäämien langat vuorottelevat siirryttäessä sivu- tai pystysuunnassa. [16]

Tässä työssä käytetty Intertrafon muuntaja on käämitty vähintäänkin kerroksittain. Kaikki toisiokäämin tapitusvälit on käämitty kahdella langalla niin, että toinen on sisempänä ja toinen on ulompana. Ensiökäämilangan alkupää menee aivan muovisen kelarungon pintaan ja loppupää tulee pinnasta liitimelle.

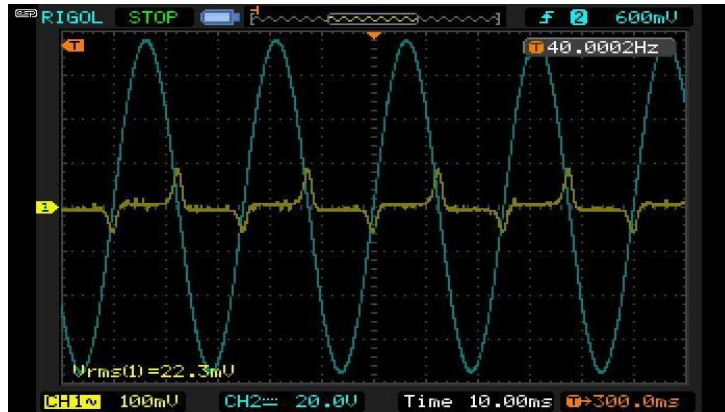
3.3.2 Audiomuuntaja matalilla taajuuksilla

Mikä tahansa muuntaja kuormittamattomana käyttäytyy primääripuolellaan kuten kela. Siksi kuormittamaton muuntaja sitä syöttävälle lähteelle näkyy induktiivisena impedanssina Z_L . Koska Z_L :n kaavassa 1. on taajuus f tulon tekijänä, niin impedanssi pienenee taajuuden pienentyessä.

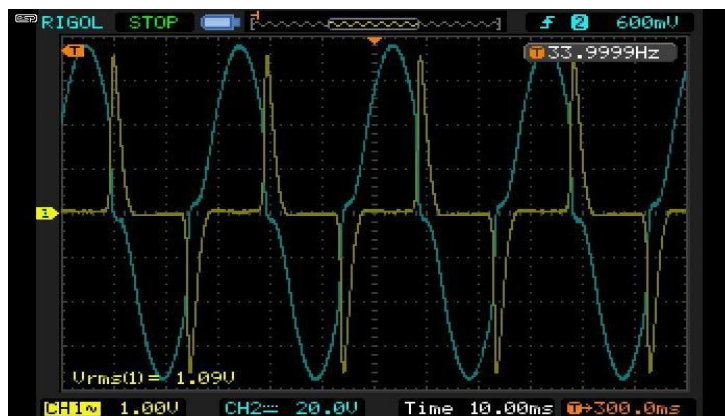
$$Z_L = j\omega L = j2\pi fL \quad (1)$$

Mikäli muuntajaa yritetään käyttää pienemmillä taajuuksilla, kuin mille se on suunniteltu, voi muuntajan tyhjäkäynti-impedanssi olla jopa pienempi kuin sekundääri käämistä primääriin aiheutuva impedanssi voi muuntajaa täysin kuormitettaessa edes olla. Siksi esimerkiksi keskusradiojärjestelmissä, joissa käytetään 70:n tai 100 V:n kaiutinlinjoja ja muuntajia kaiuttimissa jännitteen pudottamiseen ja suurimmassa osassa vahvistimia nostamiseen, ylipäästösuotimilla estetään vahvistimien ylikuormittuminen matalien taajuuksien takia. Ylipäästösuotimia käytetään myös muuntajan saturoitumisen estämiseen. Muuntaja saturoituu jos siihen syötetään tarpeeksi suurta tasajännitettä tarpeeksi kauan. Vastaava tapahtuu myös laskettaessa taajuutta, koska signaalin aaltomuoto pysyy tarpeeksi kauan saman napaisena. Tilanne on pahin jos muuntaja on kuormittamaton. Kuvissa 5. ja 6. on esitetty testijärjestely jossa kuormittamattomaan toroidimuuntajaan on syötetty 75V jännite 40 Hz ja 34 Hz taajuuksilla 0,1 Ω :n etuvastuksen läpi. Kanavan 2.

vaaleansiniset kuvaajat ovat jännite muuntajan ensiökäämin jännite. Keltaiset kanavan 1. kuvaajat ovat etuvastuksen jännite. Kanavan 1. kuvaajat siis ilmaisevat muuntajan ensiön virtaa. Huomaa etuvastuksen jännitteen kuvaajien eri asteikot. Kuvan 5. mittauksessa on virran hetkellinen huippuarvo ollut hieman vajaa 1 A. Kuvan 6. mittauksessa asteikko on kymmenkertainen ja virran hetkellinen huippuarvo on n. 35 A:a.



Kuva 5. Muuntajan ja etuvastuksen jännitteet 40 Hz:n taajuudella. [18]



Kuva 6. Muuntajan ja etuvastuksen jännitteet 34 Hz:n taajuudella. [18]

Lisäksi koska virran huippuarvot ajoittuvat jännitteen nollakohtiin, on tilanne hankalin mahdollinen vahvistimen transistoreille, koska vahvistimen lähtöjännitteen ollessa 0 V:a on transistorin ylitse täysi käyttöjännite. Transistorit siis saavat muuntajalta huimat virtapurskeet hankalimmilla mahdollisilla jaksonhetkillä ja niissä tapahtuva hetkellinen tehohäviö on erittäin suuri. [18]

Liian matalien taajuuksien suodatus pois kaiutinlinjoista, joissa käytetään muuntajia, on siis erittäin tärkeää. Suodatuksella voidaan säröytymisen lisäksi myös estää tehohukkaa.

3.3.3 Muuntaja impedanssi- ja jännitetasojen sovituksessa

Muuntajan muuntosuhde μ on muuntajan tärkeä tunnusluku. Se kertoo ensiökäämin kierrosluvun N_p ja toisio käämin kierrosluvun N_s lisäksi nimellisjännitteiden U_p ja U_s sekä toisio- ja ensiövirtojen I_s ja I_p suhteen. Ideaalisella muuntajalla jossa ei ole tehohäviöitä pätee kaava 1. sekä kaava 2. [19]

$$\mu = \frac{N_p}{N_s} = \frac{U_p}{U_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2)$$

$$U_p I_p = U_s I_s = \frac{U_s^2}{Z_{load}} \quad (3)$$

Näistä voidaan johtaa kaava 3., jolla toisioon kytketyn kuorman impedanssi Z_{load} voidaan redusoida eli muuntaa vastaamaan vaikutustaan ensiöpiiriin. [19]

$$Z'_{load} = \mu^2 Z_{load} \quad (4)$$

Mahdollisuus muuttaa kuorman impedanssitaso pitkään siirtoon sopivaksi on tärkein syy käyttää muuntajia kuulusjärjestelmissä. Esimerkiksi käytettäessä 4 Ω :n kuulutuskaiuttimessa muuntajaa, jonka muuntosuhde μ on 25, kaiuttimen impedanssi kaiutinlinjalle on 2500 Ω :a. 100 V:n kuulusjärjestelmässä kaiuttimen nimellistehoksi tulee 4 W:a ja 70 V:n järjestelmässä 2 W:a.

3.4 Päätevahvistintyytit ja niiden erot

Tässä kappaleessa käsitellään 70 tai 100 V:n kaiutinlinjoille tarkoitettujen PA-vahvistinten (Public Address) erilaista mitoituksen ajattelumallia verrattuna tavallisiin päätevahvistimiin, jotka on tarkoitettu esimerkiksi 4:n tai 8 Ω :n kaiutinkuormalle. 70 V:n kaiutinlinjajännite on alun perin ollut määritelmältään $\pm 100 V_{peak}$. Siniaallolla $\pm 100 V_{peak}$ vastaa tehollista 70,7 V:n jännitettä. Siksi yleisempää 70 V:n ja tarkempaa 70,7 V:n merkintää käytetään tarkoittaen samaa asiaa. [20]

3.4.1 Tavalliset päätevahvistimet

Vahvistimien ilmoitettu teho riippuu suurimmasta jännitteestä, jonka ne pystyvät antamaan kuormaan säröytymättä, sekä kuorman impedanssista. Yleensä teho on tapana ilmoittaa 16:sta, 8:n tai 4 Ω :n kuormaan. Parhaat vahvistimet pystyvät syöttämään jopa

1:n tai 2 Ω :n kaiutinkuormaa. Vahvistimien teho ei kuitenkaan välttämättä kaksinkertaistu, kun kuorman impedanssi puolittuu. Tämä johtuu häviöistä esimerkiksi vahvistimen virtalähteessä. Kääntäen ajatellen isoin vahvistimesta saatava jännite pääsääntöisesti saadaan laskettua tehosta, joka on ilmoitettu isoimmalle kuormalle. Tässä työssä käytetylle vanhalle Crown Com Tech 420 -vahvistimelle luvataan tehoksi 220 W:a 8 Ω :n kuormaan ja 240 W:a 4 Ω :n kuormaan. [21]

Laskettaessa vahvistimen teho jännitteeksi 8 Ω :n kuormalla tai kuormalla jonka impedanssi on isompi, tulee siis käyttää 8 Ω :n tehoarvoa. Tehon kaavasta saadaan johdettua kaava jännitteelle:

$$P = UI = \frac{U^2}{R} \rightarrow U = \sqrt{PR} \quad (5)$$

Vahvistimen isoin antojännite 4 / 8 Ω :n toimintamoodissa on siis noin 42 V:a. Mikäli vahvistin korvattaisiin esimerkiksi 4 kertaa tehokkaammalla, on sekä vahvistimen lähtöjännitteen että virran kaksinkertaistuttava.

3.4.2 PA-vahvistimet eli vahvistimet 70:n ja 100 V:n kaiutinlinjoille

Kaiutinlinjoissa ajattelu toimii hieman kuin sähköverkossa. Julkisissa tiloissa käytettävillä kuulutusvahvistimilla eli PA-vahvistimilla on nimellinen lähtöjännite ja teho. Kaiuttimien tapituksella ja niiden voimakkuussäätimillä valitaan haluttu äänenvoimakkuus. Myös sähköverkossa on samaa jännitettä käyttäviä hyvin eritehoisia laitteita. Laitteiden verkosta ottama näennäisteho määräytyy niiden impedanssista ja pätöteho näennäistehon resistiivisestä komponentista.

PA-vahvistimista saatava teho määräytyy niiden myös niiden kuorman perusteella. Vahvistimilla on kuitenkin nimellisteho, jonka ne pystyvät enimmillään antamaan. PA-vahvistimien nimellistehosta P_{nom} ja kaiutinlinjajännitteestä U_{nom} voidaan laskea alin vahvistimen kestävä impedanssi Z_{min} .

Kuulutusjärjestelmien käyttöönotossa kaiutinlinjojen impedanssien mittaus on tärkeä työvaihe, joka pitää tehdä ennen linjojen kytkemistä vahvistimien lähtöihin.

$$P_{nom} = \frac{U_{nom}^2}{Z_{min}} \rightarrow Z_{min} = \frac{U_{nom}^2}{P_{nom}} \quad (6)$$

Helipot laskukaavat 70:n (70,7:n) ja 100 V:n PA-vahvistimien minimikuormaimpedansseille ovat siis:

$$Z_{min} = \frac{5000}{P_{nom}} \text{ tai } Z_{min} = \frac{10000}{P_{nom}} \quad (7)$$

3.5 Kuulokkeiden ja vahvistinten sovittaminen

Tässä kappaleessa käsitellään vahvistimen ja kuulokkeiden jännite- ja impedanssitasojen sovittamista muuntajan avulla.

Jännitesovitus

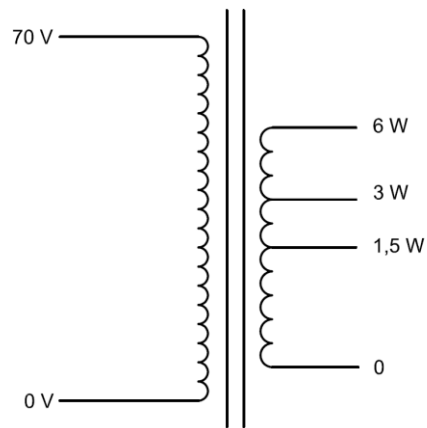
Valitaan kuulokkeet joilla on matalahko impedanssi 16 – 40 Ω :a. Herkkyyden tulee olla riittävä, mielellään n. 105 dB/mW. Tällaiset kuulokkeet ovat siis tyypilliset nykyisiin älypuhelimiin tarkoitettut, joihin viitataan kappaleessa 3.2.1. Muuntajan muuntosuhde valitaan niin, että päätevahvistimen maksimilähtöjännitteellä muuntajan toisiossa saadaan n. 1 V kuulokkeille. Tämä perustuu iPad 2:sta ja iPad Air:in kuulokeliitimistä maksimitasoisella sinisignaaliilla mitattuun jännitteeseen. iPhone 4S:stä mitattiin puolestaan n. 10 dB:ä matalampi maksimilähtötaso. Isompi jännitetaso on syytä valita puheen dynamiikan takia.

Valitaan siis tiettyyn käyttötarkoitukseen valmistetut kuulokkeet ja syötetään niille niiden tavanomainen jännite. Muuntajan toisiossa saadaan n. 1 V:n jännitetaso, kun muuntajasta valitaan tapitus jolla muuntosuhde on lähimpänä päätevahvistimen suurinta mahdollista RMS-lähtöjännitettä.

Laskuesimerkki:

Vahvistin, jolle on ilmoitettu lähtötehoksi 100 W:a 8 ohm:in. Laskuesimerkin muuntajana käytetään tässä työssä käytettyä ITR 701501 -muuntajaa.

Muuntajan muuntosuhteet on ensimmäiseksi selvitettävä. Muuntosuhteet voidaan selvittää laskemalla mitatuista ensiö- ja toisiojännitteistä tai laskemalla muuntajan nimellisarvoista. Kyseiselle kaiutinmuuntajalle on ilmoitettu nimellinen ensiöjännite U_{pri} , mutta toisiojännitteiden merkinnät on ilmaistu nimellistehona P nimelliseen kuormaimpedanssiin R , joka on 4 Ω :a. Kuvassa 7. on muuntajan liitinnastojen merkinnät.



Kuva 7. ITR 701501 -muuntajan liittinnastat

Kaavalla 8. saadaan laskettua muuntosuhteet nastan 0 ja nastojen 1,5 W, 3 W tai 6 W väliltä. Kaavalla 9. voidaan laskea muuntosuhteet käytettäessä muuntajan lähtönä mitä tahansa toision liittinnastojen väliä.

$$\mu = \frac{U_{pri}}{U_{sec}} = \frac{U_{pri}}{\sqrt{PR}} \quad (8)$$

$$\mu = \frac{U_{pri}}{U_{sec}} = \frac{U_{pri}}{\sqrt{P_2R} - \sqrt{P_1R}} \quad (P_2 > P_1) \quad (9)$$

Kaavojen P , P_1 ja P_2 viittaavat Muuntajan toision liittinnastojen nimellistehoihin 4 Ω :in kuormalla. R on muuntajan nimelliskuorma eli 4 Ω :a. U_{pri} on ensiön nimellisjännite 70 V:a.

Esimerkiksi primäärin ja toision liittinastavälille 3 W – 6 W saadaan muuntosuhteeksi:

$$\mu_{3-6} = \frac{U_{pri}}{U_{sec}} = \frac{U_{pri}}{\sqrt{P_2R} - \sqrt{P_1R}} = \frac{70}{\sqrt{6 \times 4} - \sqrt{3 \times 4}} \approx 48,8$$

Taulukossa 1. ovat kyseisen muuntajan muuntosuhteet. Mitatut muuntosuhteet on saatu syöttämällä kuormittamattoman muuntajan ensiöön 1 kHz:n sinimuotoinen vaihtojännite ja mittaamalla sekä jännitteen arvo sekä ensiöstä että kaikkien toision nastojen välistä. Näistä mitatuista jännitearvoista on saatu laskettua mittaukseen perustuvat μ :n arvot. Laskennalliset μ :n arvot on saatu kaavoilla 8. ja 9.

Taulukko 1. ITR 701501 -muuntajan mitatut ja laskennalliset muuntosuhteet.

Tapitusväli $P_1 - P_2$	Mitattu μ	Laskennallinen μ
1,5 – 3 W	69,5	69
3 – 6 W	46,4	48,8
1,5 – 6 W	27,8	28,6
0 – 1,5 W	27,8	28,6
0 – 3 W	19,9	20,2
0 – 6 W	13,9	14,3

Kaavalla 5. saadaan vahvistimen lähtöjännite:

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{100 \text{ W} \times 8 \Omega} \approx 28,3 \text{ V}$$

Sivun 19. taulukon 1. perusteella siis valitaan 1 – 1,5 W:n tapitusvaihtoehto, jonka muuntosuhde on jokseenkin 28.

Impedanssisovitus eli vahvistimen

Muuntajien induktiivisuus matalilla taajuuksilla kuormittaa vahvistinta, joten se pitää huomioida käytettävää muuntajamäärää mitoitettaessa. Kuulokemäärän lisäksi siis matalilla taajuuksilla muuntajien lukumäärä vaikuttaa vahvistimen kuormitukseen. Kuulokkeiden aiheuttama lisä vahvistimen kuormitukseen voidaan kuitenkin laskea.

Lähtötiedot:

- Pienen päätevahvistimen kestävä kuormaimpedanssi $Z_{min} = 8 \Omega$
- kuulokeparin impedanssi elementit rinnankytkettyinä $Z = 16 \Omega$
- valittu muuntosuhde $\mu = 19,9$

Yhden kuulokkeen impedanssi redusoidaan kaavalla 4. muuntajan primääripuolelle ja lasketaan, montako kuuloketta vahvistin teoriassa ideallisella muuntajalla kestäisi:

$$Z_{min} = \frac{Z'}{N} = \frac{\mu^2 Z}{N}$$

$$N = \frac{Z'}{Z_{min}} = \frac{\mu^2 Z}{Z_{min}} = \frac{(27,8)^2 \times 16 \Omega}{8 \Omega} = 1545$$

Koska muuntajan induktiivisuudella on suuri vaikutus vahvistimen kuormaimpedanssiin matalilla taajuuksilla, on ylipäästösuotimen käyttö erittäin suositeltavaa vahvistimen ylikuormittumisen estämiseksi. Lisäksi ennen käyttöönottoa on syytä mitata vahvistimen kuormaimpedanssi, mieluiten useammilla eri taajuuksilla. Laskennalliseen impedanssiin ei tule siis luottaa.

4 TOTEUTUS

Tässä luvussa käsitellään varsinaiseen toteutusta: käytettyjen osien ja materiaalien valintaa, käytettyjä mekaanisia ja sähkömekaanisia ratkaisuja.

4.1 Kuulokkeiden valinta

Kuulokkeiden vaikutus lopputulokseen monessakin mielessä oli itsestäänselvyys. Kuulokkeet vaikuttavat oman äänenlaatunsa kautta merkittävästi lopputulokseen. Tämän lisäksi kuulokkeet vaikuttavat herkkyytensä ja impedanssinsa kautta muun järjestelmän teknisiin vaatimuksiin. Kuulokkeet ovat tietenkin eniten myös käyttömukavuuteen vaikuttava tekijä, koska ne ovat lähes ainoa järjestelmän osa jonka kanssa käyttäjät ovat tekemisissä. Siksi kuulokkeiden valintaan käytettiin erityistä huolta. Kuulokevertailu tehtiin tilaamalla kahdesta verkkokaupasta kuulokkeita koekäyttöä ja -kuuntelua varten.

Hinta oli myös merkittävä tekijä kuulokkeiden valinnassa, koska koko järjestelmän kehityksen idea oli rakentaa mahdollisimman edullinen ja helposti toteutettava järjestelmä, joka olisi kuitenkin hyvä äänenlaadultaan sekä yksinkertaisuuden takia toimintavarma.

Kuulokkeiden valintaperusteina olivat:

- äänenlaatu, erityisesti puheen selvyys
- käyttömukavuus
- sopiva impedanssi
- riittävä herkkyys
- kuulokejohto: mahdollinen yksipuolisuus ja vaikutelma kestävyydestä
- vaikutelma kuulokkeiden kestävyydestä
- mahdollinen voimakkuussäätö

Kuulokkeiksi valittiin t.bone HD660 -kuulokkeet. Kuvassa 8. kuulokkeet roikkuvat tuolin selkänojan tukiputkessa, mikä olisi mahdotonta tai hyvin hankalaa jos johto olisi kaksipuolinen eli haaroittuisi ennen kuulokkeita.



Kuva 8. Valitut kuulokkeet roikkumassa tuolin selkänöjaputkessa.

Kuulokkeiden johto on myös päällystetty kankaisella verkkosukalla joka lisää kestävyttä. Johdon mitta 1,5 m:ä on myös sopiva: se on riittävän lyhyt, ettei johto oli istuttaessa käyttäjän jaloissa, mutta sallii silti kuulokkeiden käytön myös seistessä. Kuulokkeiden hyvänä puoleena oli myös johdon väliin asennettu voimakkuussäätö. Näin jokaisella kuulijalla on mahdollisuus säätää kuunteluvoimakkuus mieleisekseen.

Kuulokkeiden ainoaksi huonoksi puoleksi todettiin vertailussa pään ylittävän pannan ja sangan säätävien alaosien välinen löysyys. Metalliset alaosan sangat liukuvat ne pääpantaan yhdistävissä muovikappaleissa liiankin liukkaasti. Liikaa löysyyttä rajoitettiin laittamalla pienet mustat nippusiteet pääpannan ja säätövarren ympärille.

Myöhemmin havaittiin ensimmäisessä tilatussa isommassa kuuloke-erässä toinenkin heikkous, joka sekini liittyi pannat ja säätösangat yhdistäviin muoviosiin. Muovi josta yhdistävät osat oli selvästikin kovempaa ja hauraampaa kuin testatuissa kuulokkeissa. Kuvasa 9. on yksi murtunut muoviosapari.



Kuva 9. Rikkinäinen muoviosapari.

Ensimmäisestä tilatusta 12 kuulokkeen erästä 10 oli viallisia heti tullessaan. Ne olivat hyvin todennäköisesti eri tuotantoerää kuin tilauksessa tulleet kaksi ehjää paria ja aiemmin vertailun yhteydessä tilattu pari. Oletusta rikkinäisten kuulokkeiden eri tuotantoerästä puoltavat myös niiden kiharaisemmat johdot, jotka näkyvät kuvan 10. oikealla reunalla.



Kuva 10. Ehjien kuulokkeiden suorat ja rikkinäisten kiharaiset johdot.

Rikkinäisten tilalle toimitettujen ja myöhemmin tilatun isomman erän kestävyyttä täytyy seurata. Onneksi kuitenkin verkkokaupan takuu kuulokkeille on 3 vuotta koska ne tilattiin yksityishenkilönä. Mikäli viimeksi toimitetut kuulokkeet osoittautuvat kestävämmiksi tai verkkokaupan kolmen vuoden takuu toimii, voidaan kuulokevalintaa pitää onnistuneena. 9,90 €:a parilta maksaneiden kuulokkeiden vuosihinnaksi jää 3,30 €, vaikka heti takuuajan päätyttyä pitäisikin hankkia uudet.

4.2 Mekaaninen toteutus

Koska alustavien testien ja mittausten perusteella idea sähköisestä kytkennästä oli toimivaksi todettu, oli toteutuksen suunnittelu hyvin pitkälle mekaanisten asioiden ratkomista. Tuote päätettiin koteloida Ductelin eloksoituun 65 × 65 mm:n kokoiseen eloksoituun alumiiniseen sähkökouruun. Kouru on myös kooltaan riittävä, jotta kaiutinlinjamuuntajat voidaan koteloida sen sisään.

Hankalimmaksi asiaksi osoittautui kourusta tehtyjen kuulokeliitinpalkkien kiinnittäminen tuoleihin. Tuolit seurakuntasalissa johon tulkkaujärjestelmä asennettiin, ovat irtonaisia. Vaikka tuolit on yhdistetty toisiinsa laudalla, ne pääsevät hieman liikkumaan suhteessa toisiinsa. Alkuperäinen idea sähköputken kiinnikkeiden käyttämisestä, ei siis olisi onnistunut, koska kuvassa 11. oleva kiinniketyyppi ei salli tuolien pientäkään liikettä. Penkkien välinen liike olisi siis voinut joko rikkoa kiinnikkeen tai irrottaa palkin kiinnityksistään.



Kuva 11. Putkenkiinnitin.

Ennen kuin kiinnitystapa oli päätetty, ei kuulokepalkkeja voitu valmistaa, koska erilaisella kiinnitystavalla palkit olisivat mahdollisesti olleet eri kohdassa suhteessa tuoliriviin ja kuulokeliittimet väärässä kohtaa. Kiinnitystavan miettimiseen oli siis käytettävä aikaa. Lopulta kiinnitystavaksi keksittiin tarpeeksi jämää ja silti joustava kuminauha. Kuvassa 12. on kiinnitykseen käytetty Spanifix-kuminauha. Kuminauhan alkuperäinen käyttötarkoitus on lavaverhojen ripustaminen esimerkiksi konserteissa käytettäviin alumiinikehikoihin.



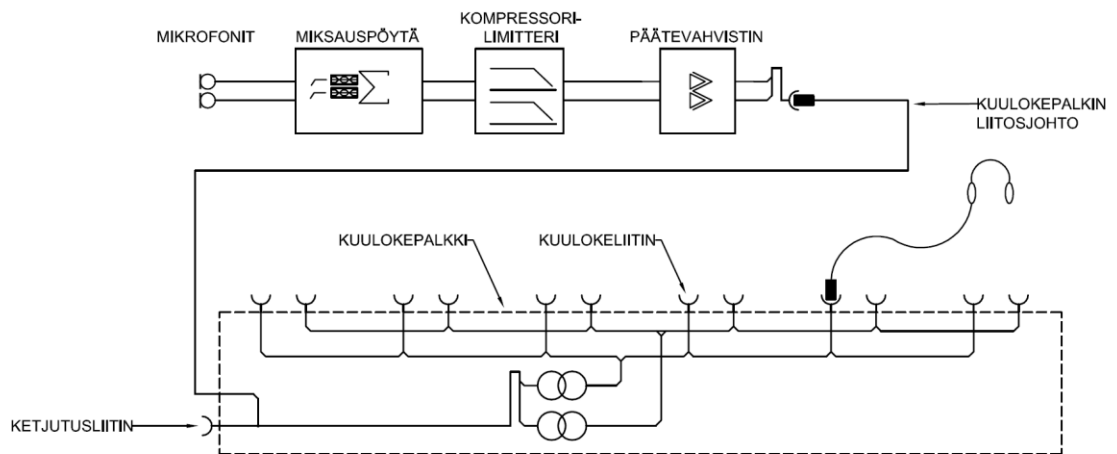
Kuva 12. Kuulokepalkki Spanifix-kuminauhoilla tuoliriviin kiinnitettynä.

Kiinnitystavan ratkettua voitiin jatkaa kuulokepalkin liittimien ja muiden osien sijoitteluun liittyvää mitoitussuunnittelua. Osien kiinnittämisessä käytettiin useita eri tapoja kuten pop-niittausta, mutteriniittejä, ruuveja, tarraa ja reikien poraamista ja kierteyttämistä.

4.3 Sähköinen ja sähkömekaaninen toteutus

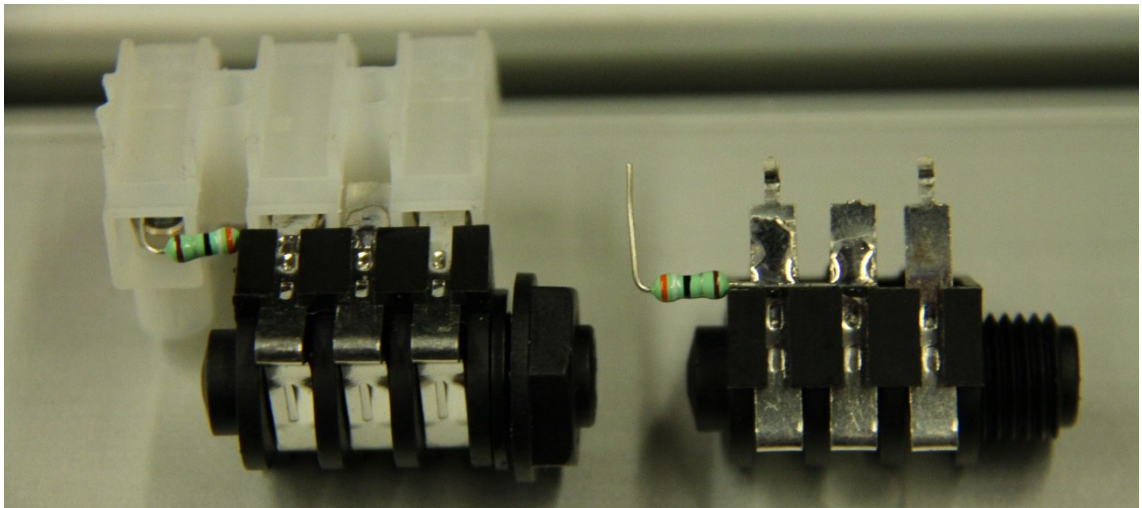
Sähköinen toteutus perustui lähes täysin alustavissa testeissä käytettyyn kytkentään, ainoastaan muuntajan tyyppi oli hieman muuttunut. Samalla kuormittamattoman muuntajan ensiön impedanssi matalilla taajuuksilla oli valitettavasti pienentynyt. Kuulokeliittimiä on myös vähemmän muuntajaa kohti, kuin mitä ennen järjestelmän toteutusta tehdyissä testeissä käytettiin. Kaikki 6 saman kielen kuulokeliittintä kytkettiin rinnan muun-

tajansa toisioon. Kuvassa 13. on esitetty toteutetun kaksikielisen järjestelmän signaaliketju lähtien tulkkien mikrofoneista ja päätyen tulkkauskuulokkeisiin. Kuvasta puuttuu lattiakielen syöttö saliaänijärjestelmästä tulkin kuulokkeisiin. Kuvassa on esitetty vain yksi kuulokepalkki, loput palkeista on ketjutettu kytkemällä liitosjohto edellisen palkin ketjutusliittimeen.



Kuva 13. Tulkkaujärjestelmän lohkokaavio.

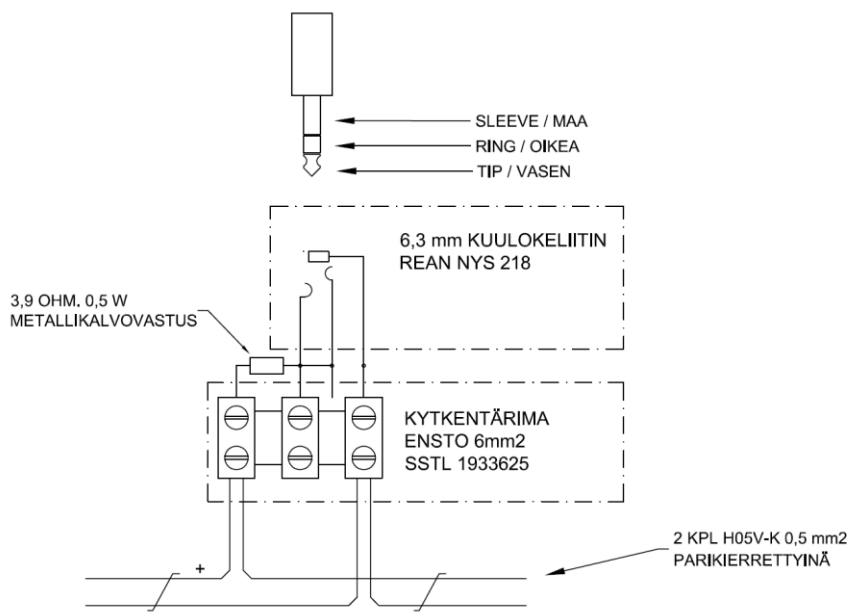
Kuulokeliittimissä on kuvassa 14. näkyvät $3,9 \Omega$:n etuvastukset, joita käytettiin myös alustavissa testeissä ja mittauksissa. Etuvastusten tarkoituksena on ainoastaan estää hajonnutta kuulokeliitinadapteria oikosulkemasta muuntajan toisiota vaikka kuulokeliitin menisikin rikkiinäisen liitinadapterin takia oikosulkuun.



Kuva 14. Kuulokeliittimen mekaaninen toteutus.

Stereokuulokeliittimen kontakteista käytetään termejä tip, ring ja sleeve, jotka tarkoittavat kärkeä, välirengasta ja runkoa. Kuvassa 13. kontaktit ovat vasemmalta oikealle yllä luetellussa järjestyksessä. Kuulokeliitin työnnettäisiin kuvan asennossa oleviin liittimiin paikalleen oikealta päin. Kuulokkeissa tip-kontakti on kytketty kuulokkeiden vasempaan kuuloke-elementtiin, ring-kontakti oikeaan elementtiin ja sleeve on molempien kuuloke-elementtien yhteinen maakontakti. Koska tulkkaujärjestelmässä välitetään monoääntä, on tip ja ring-kontaktit yhdistetty toisiinsa juottamalla esivastuksen jalka molempiin kiinni. Tip-kontakti on kiinnitetty ruuvirimaliittimen pätkään eli ns. sokeripalaan on vain koska näin liittimet saadaan pysymään tukevasti yhdessä. Keskimmäiseen ruuvirimaliittimen napaan ei siis kytketä johtoa.

Kuulokeliittimen ja kytkentärیمان tyypit vaalitin keskinäisen yhteensopivuuden perusteella. Kuulokeliittimen kontaktien välinen rasteri on 6,35 mm:ä. Lisäksi valitussa mallissa on valmistajan valikoiman pisimmät piirikorttijalat. Kytkentärیمان rasteri on puolestaan 12mm. Ruuvirimaliittimen väljät liitinpesät sallivat pienen mittaheiton rastereissa. Kuulokeliittimeksi valittiin riittävän pitkäjalkainen malli, jotta sen jalat yltyvät riittävän syvälle ruuvirimaliittimeen ja pysyvät luotettavasti kiinni. Lisäksi valitussa ruuvirimaliittintyyppissä on suojaliuskat ruuvin ja kytkettävien johtojen väliin. Ne estävät liittimen ruuveja katkomasta hienosäikeisen johtimen säikeitä tai esimerkiksi murskaamasta esivastuksen jalkaa. Kuvassa 15. esitetään liittinyhdistelmän sähköinen kytkentä. Lisäksi kuvasta käy ilmi kuulokeliittimen osien nimet ja käyttötarkoitukset.



Kuva 15. Kuulokeliittimen sähköinen kytkentä ja käytetyt osat.

Muuntajan toision ja kuulokeliittimien väliseksi kaapeloinniksi tuli valittua pvc-eristeiset 0,5mm hienosäikeiset johtimet. Ne kierrettiin toistensa ympärille akkuporakoneen avulla. Kaapeloinniksi olisi voitu valita jotain muutakin kuten esimerkiksi mso 2x0,75. Valinta peruste olikin helpoin saatavuus. Toisaalta eriväristen johtimien käyttö toimi samalla värikoodauksena kielivaihtoehdoille, eikä johtimia ollut tarpeen merkitä.

Kaiutinlinjan kytkentä palkkiin tehtiin puolikiinteällä liitosjohdolla. Liitosjohdon kaapelityypiksi valittiin LIYCY 4x0,5 SQMM. Kaapelissa on 4 johdinta joiden poikkipinta on 0,5 mm² sekä ristiinpunottu suojavaippa niiden ympärillä. Vaipan etuna on sen kaapelin signaali-johtimille tarjoama mekaaninen lisäsuoja. Kuvassa 16. on palkin liitosjohto sekä pääty-laippaan asennettu ketjutusliitin, johon kytketään seuraavan kuulokepalkin liitosjohto.

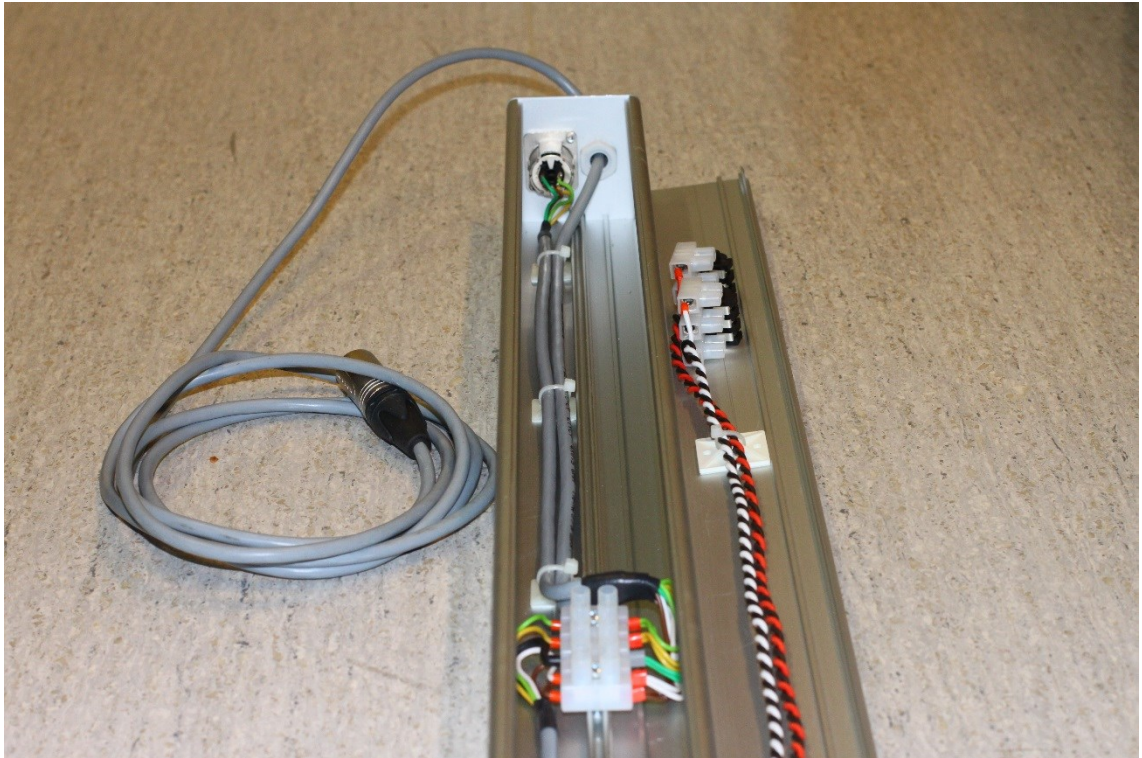


Kuva 16. Kuulokeliitinpalkin liitosjohto ja ketjutusliitin.

Liittimen tyyppiä valittiin xlr. Xlr-liittimet ovat ammattikäyttöön tarkoitettua ääni- ja valaistustekniikassa yleisesti käytettyjä ja kestäviksi havaittuja. Napaluvuksi valittiin 5, koska se mahdollistaa kahden kaiutinlinjan kytkemisen lisäksi myös palkkien maadoittamisen, jos niin halutaan. Palkkeja ei ainakaan vielä ole maadoitettu, mutta kaiutinlinjojen miinuspuolet ovat vahvistimen kautta maadoitetut. Lisäksi kaiutinlinjamuuntajat eristävät galvaanisesti palkkia syöttävät kaiutinlinjat palkin sisäisestä kuulokeliittimien kaapeloinnista. Siksi palkkien rungot ja kuulokekaapelointi eivät ole galvaanisesti yhteydessä

muuntajaan eivätkä edes toiseen palkkiin. Muuntajien käyttö on siis myös sähköturvallisuuden kannalta etu.

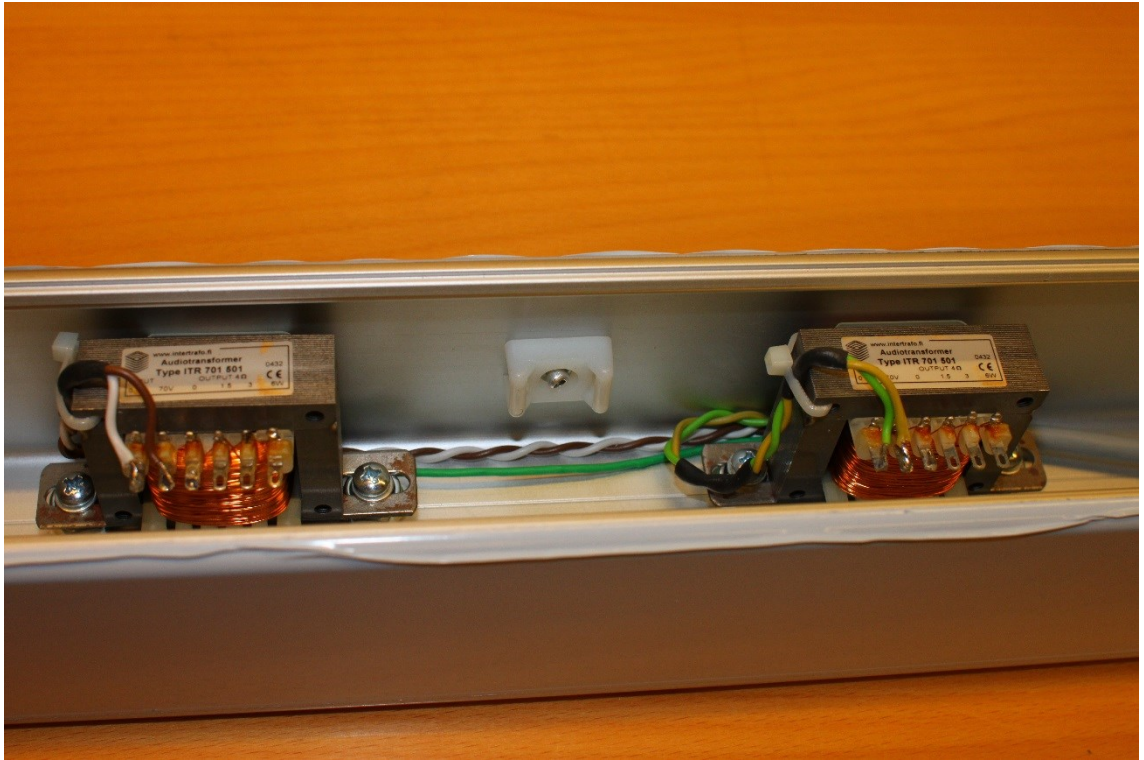
Liitosjohto kytkettiin palkin sisällä ruuvirimaliittimeen, jotta sen vaihto mahdollisen vaurion jälkeen olisi helpompaa. Kuvassa 17. näkyvää ruuvirimaliitintä on myös käytetty kaiutinlinjojen haaroittamiseen muuntajalle ja ketjutusliittimeen.



Kuva 17. Liitosjohdon ruuvirimaliitin kouruosan pohjassa.

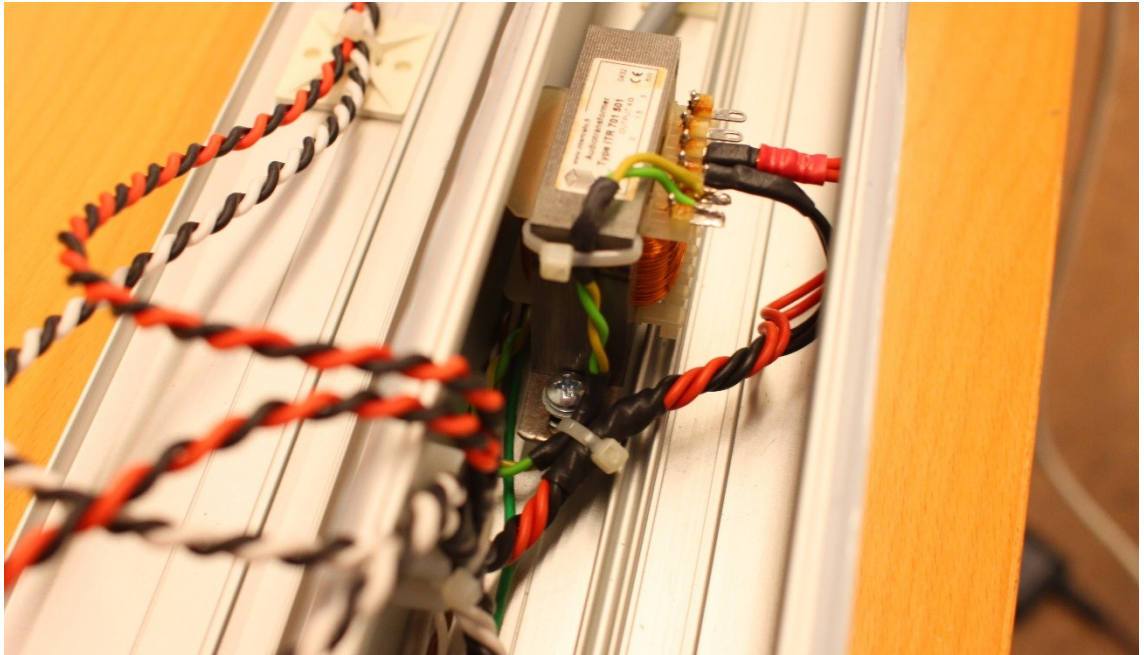
Liitin ja muuntajat sijoiteltiin kourun pohjaosassa niin, että jos myöhemmin palkkeihin lisätään kuuntelumahdollisuus kahdelle lisäkielelle, mahtuvat muuntajat ja liittimet olemaan nykyisillä paikoillaan lisääntyvästä kuulokeliittimien ja muuntajien määrästä huolimatta. Muuntajat myös sijoitettiin keskelle palkkia, jotta palkista saatiin tasapainoisempi. Toinen syy sijoittaa muuntajat keskelle palkkia oli mahdollisuus kääntää palkin kansi ympäri jos kuulokeliittimien kaapelointi viedään pohjakourusta kanteen keskeltä. Kääntömahdollisuutta varten muuntajien väliin asennettiin myös kuvassa 18. näkyvä kaapeliliiankkuri, jottei käännön yhteydessä kuulokeliittinten kaapelointi repeytyisi irti muuntajista.

Kansiosan käännöllä on merkitystä, jos kuulokepalkki halutaan kääntää toisinpäin jotta liitosjohdot saadaan lähtemään halutulle puolelle. Kääntämällä kansi saadaan liittimiin myöhemmin lisättävät merkinnät pysymään oikein päin ja luettavina.



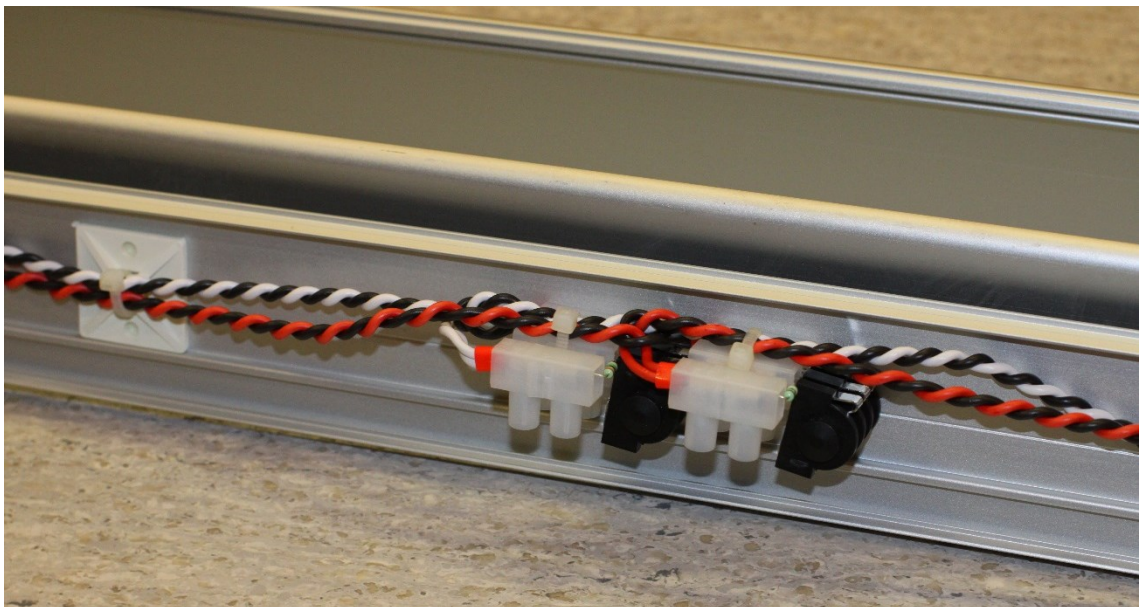
Kuva 18. Kaapeliankkuri kuulokeliittimien kaapelointia varten.

Kaapelointi muuntajilta kuulokeliittimille tehtiin hienosäikeisillä $0,5 \text{ mm}^2$ johtimilla, jotka oli akkuporakoneella pyöritetty yhteen. Kuulokekaapelointien maajohdin kuten kaiutinlinjan johtimetkin juotettiin muuntajan napoihin. Kuulokkeiden signaalijohtimet kuitenkin kytkettiin muuntajiin apiko-liittimiä käyttäen. Kuvassa 19. punaisissa johtimissa näkyvän tyyppisiä apiko-liittimien käyttö mahdollistaa ns. muuntajan tapittamisen eli muuntosuhteen vaihtamisen. Hankittujen kuulokkeiden herkkyydellä äänenpaine riittää käytettäessä vahvistinta 70 V :n tilan sijasta $4/8 \Omega$:n tilassakin hyvin. Järjestelmään käy siis hyvin tavallinenkin vahvistin, mikäli sen tehoksi on ilmoitettu $100 - 200 \text{ W}$:a 8Ω :iin. Itseasiassa järjestelmän tapitusta muutettiin myöhemmin niin, että kuulokkeille otetaan syöttö tapitusvälistä $1,5 \text{ W} - 3 \text{ W}$. Vaikka tässä tapitusvälistä on muuntajan pienin lähtöjännite äänenpaine riittää silti hyvin vahvistimella, joka antaa n. 200 W :a 8Ω :n kuormaan.



Kuva 19. Muuntajan kaapelointi.

Kansiosan kuulokeliittimien kaapelointi kiinnitettiin tiheästi, jottei se kannen mahdollisen käännön yhteydessä jäisi väliin ja turmeltuisi. Samalla kaapeloinnista tuli erittäin siistin näköinen. (Kuva 20.)



Kuva 20. Kuulokeliittinten kaapelointia kiinnitettynä kansiosaan.

4.4 Toteutuksen taloudellisuus

Taloudellisesti ajateltuna toteutus kannatti, koska se tehtiin talkootyönä. Toisaalta lähtökohtaisesti järjestelmää ei edes suunniteltu suurempiin tuotantoeriin tai kaupalliseen valmistukseen, jolloin olisi voitu käyttää työmäärää vähentäviä ratkaisuja. Taloudellista kannattavuutta paransi myös ilmaiseksi saatu käytetty vahvistin. Lisäksi tulkin mikrofonit, etuvahvistimena käytetty miksauspöytä ja kompressori-limiteri olivat vanhastaan olemassa.

Suurin yksittäinen kustannuserä istuinpaikkaa kohden muodostui mekaanisesta koteloinnista, josta täytyi tehdä tukeva irtotuolien liikkumisen takia. Mikäli järjestelmä olisi toteutettu kiinteisiin penkkiriveihin, olisi muuntajien kotelointi voitu tehdä penkin pohjaan ja kuulokeliittimet asentaa sirompaan ja edullisempaan metalliistaan selkänojaan. Koteloinnin jälkeen suurin kustannuserä olivatkin kuulokkeet. Taulukossa 2. on toteutuskustannukset.

Taulukko 2. Toteutetun järjestelmän kustannukset.

Tarvike	Kokonaiskustannus sis. alv	Kustannus / istuinpaikka sis. alv
alumiinikourut	554	15,40
yhdistyslaudat ja kiinnityskuminauhhat irtotuoleihin	90	2,50
kuulokkeet	356	9,90
muuntajat	100	2,80
kuuloke- ruuvirimaliittimet	100	2,80
kaapelit johtimet ja muut liittimet	250	7,00
ruuvit ym. kiinnitystarvikkeet	80	2,20
Yhteensä	1540	42,50

Vaikka mekaaniseen toteutus aiheutti yllättävän suuret kulut, tuli järjestelmästä silti kotikäyttöön tarkoitettuja radiokuulokkeita edullisempi istuinpaikkaa kohti.

5 MITTAUKSET

Järjestelmän toimivuuden ja muunneltavuuden varmistamiseksi tehtiin sähköisiä mittauksia ennen ja jälkeen järjestelmän toteuttamisen. Mittausten tarkoitus oli siis varmistaa rakennettavan järjestelmän toimivuus. Toinen tarkoitus oli tutkia muunneltavuutta eli sitä miten kytkentä toimii käytettäessä isompaa kuulokemäärää tai eri impedanssisia kuulokkeita. Alustavat mittaukset tehtiin hieman ylimalkaisemmin ja vaatimattomammilla mittausrjestelyillä, kuin toteutuksen jälkeen tehdyt. Alustavien mittausten tarkoitus olikin lähinnä tutkia onko kytkentä toteuttamiskelpoinen.

5.1 Alustavat testit ja mittaukset

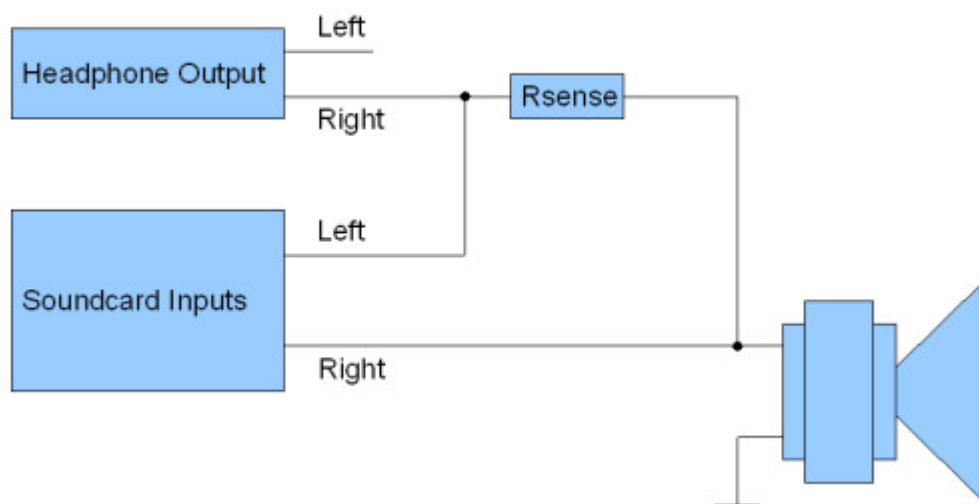
Alustavat testit ja mittaukset tehtiin Intertrafon Audicolle valmistamalla ITR 701 506 -muuntajalla. Lopullinen versio toteutettiin lähes vastaavalla muuntajatyypillä ITR 701 501. Molemmat ovat 70 V:n kaiutinlinjalle ja 4 Ω :n kaiuttimelle tarkoitettuja samankokoiseen runkoon käämittyjä muuntajia. Muuntajien muuntosuhteissa on pienet erot, niin että Audicolle valmistetun tyypin nimellisen lähtötehon tapitusvaihtoehdot ovat 1 W, 2,5 W ja 5 W ja Intertrafon oman tyypin 1,5 W, 3 W ja 6 W. ITR 701 506 -muuntajaa on käytetty ainakin Audico VSP 140 sarjan kaiuttimissa. Kaiuttimien taajuusvasteeksi luvataan 200 – 18000 Hz \pm 5dB. Tästä päätellen muuntajan pitäisi olla riittävä puheäänijärjestelmään. [22]

Mittauksia tehtiin tietokoneella käyttäen Room Eq Wizard -ohjelmiston versiota REW 5.01 Beta17 sekä RME Babyface -äänikorttia. Kuulokkeiden impedanssivaste mitattiin NTI Minirator PRO -signaaligeneraattorilla terassin välein. Muuntajan käämiresistanssit mitattiin Fluke 87 -yleismittarilla. Lisäksi järjestelmän arvioinnissa käytettiin Crown Com-Tech 420 -vahvistinta, BSS AR-133 -di-boxeja sekä Sony MDR-210 -kuulokkeita. Testien tarkoitus oli varmistaa se, että muuntajakytkennällä saavutetaan tarvittava äänenpaine ja laatu. Lisäksi tutkittiin kytkennän vahvistimelle aiheuttamaa kuormaimpedanssia.

5.1.1 Impedanssimittaukset

Impedanssimittausten tarkoitus oli lähinnä varmistua siitä että kuulokekuorma soveltuu vahvistimelle. Toinen tarkoitus oli arvioida, kuinka paljon kuulokkeita voidaan kytkeä yhteen muuntajaan äänenlaadun kärsimättä. Myös kuulokemäärästä, jota päätevahvistimella voidaan syöttää, syntyi karkea arvio. Kuulokkeiden impedanssivaste mitattiin, jotta voitiin tutkia kuulokeliittimiin asennettujen etuvastusten vaikutusta kuulokeliittimien vasteeseen kuulokkeiden resonanssitaajuudella.

REW-ohjelmassa mitattavaan kuormaan syötetään tunnetun esivastuksen kautta jännite. (Kuva 23.) Kuvasta poiketen äänikortin lähdön (headphone output) jälkeen signaaliketjussa käytettiin Crown-vahvistinta sekä di-boxeja äänikortin sisäänmenojen edessä sisäänmenoimpedanssien korottamiseen.



Kuva 21. REW-ohjelman impedanssimittausjärjestely. [23]

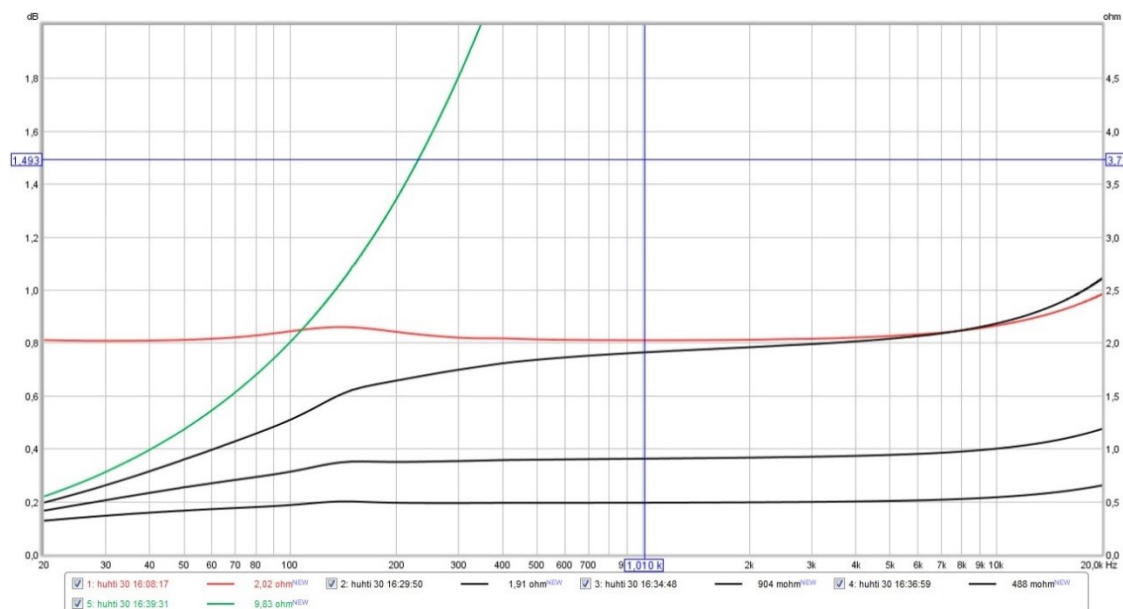
Mittausjärjestelmän mittausmahdollisuus REW-ohjelmaan on toteutettu niin, että lähdön ja molempien sisäänmenojen maat voivat olla samassa potentiaalissa. Tämä on hyvä ominaisuus haluttaessa käyttää tavallista tietokoneen äänikorttia, mutta impedanssin laskeminen on hieman monimutkaisempaa kuin mitattaessa kuorman ja referenssivastusten jännitteet suoraan omilla sisäänmenokanavillaan. Ohjelman edellyttämässä kytkennässä referenssivastuksen jännite joudutaan laskemaan left- ja right-kanavien jännite-erosta. Impedanssi saadaan kaavalla:

$$Z_{dut} = \frac{U_{dut}}{I_{dut}} = \frac{U_{dut}}{I_{Rsense}} = \frac{U_{dut}}{\frac{U_{Rsense}}{R_{Rsense}}} = R_{sense} \frac{U_{Right}}{U_{Left} - U_{Right}}$$

Kaavassa oleva jännitteiden vähennyslaskutoimitus vähentää hieman tarkkuutta.

Impedanssimittauksissa oli muitakin varsinkin korkeilla taajuuksilla ja korkeilla impedansseilla virheitä aiheuttavia tekijöitä. Impedanssimittauksen mahdollisista virheistä ja niiden syistä lisää kerrotaan lisää valmiille järjestelmälle tehtyjen impedanssimittauksen yhteydessä. Alla on kuitenkin esitetty vähintään noin 30 % tarkkuudella mitattuja impedanssikuvajia.

Kuvassa 22. on esitetty 10:n rinnankytketyn Sony MDR-210 impedanssit etuvastukseen (punainen). Mustilla ja vihreällä kuvaajilla on esitetty muuntajan primääristä mitattuja impedansseja. Koska ohjelma ei salli valita impedanssikuvajien asteikon suurimaksi arvoksi yli 1000 Ω :n impedanssia, on primääri-impedansseja mitatessa ohjelman rajoitus kierretty keinotekoisesti. Referenssivastuksen arvoksi ohjelmalle ilmoitettiin tuhannesosa oikeasta arvosta. Punaista käyrää lukuun ottamatta pitää siis oikealla puolella kuvaajia olevaa impedanssiasteikkoa luettaessa käyttää kerrointa 1000.



Kuva 22. Muuntajan ja 10 kuulokkeen impedanssit samassa kuvassa.

Muuntajan muuntosuhteet ovat:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{1nom}}{\sqrt{P_{nom} \times Z_{nom}}} = \frac{70 \text{ V}}{\sqrt{P_{nom} \times 4 \Omega}}$$

Testeissä käytetyn muuntajan muuntosuhteet ovat siis n. 35, 22 ja 16. Ideaalisen muuntajan toisioon kytketty impedanssi Z_2 näkyy ensiöpuolella impedanssina Z'_2 :

$$Z'_2 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \left(\frac{U_{1nom}}{\sqrt{P_{nom} \times Z_{nom}}} \right)^2 = \frac{4900 \text{ V}^2}{P_{nom} \times 4 \Omega}$$

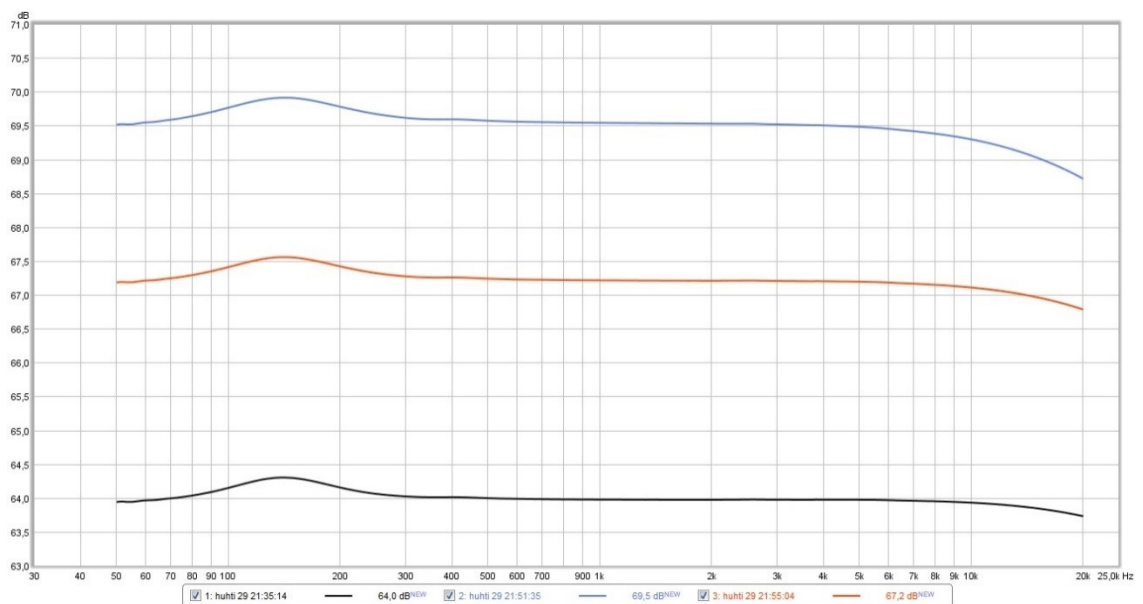
Sijoittamalla nimellistehon, P_{nom} :n tilalle tehotapitus vaihtoehdot saadaan teoreettisiksi ideaalisen muuntajan impedanssien välisiksi suhteiksi: 1225, 490 ja 245. Alimman kuvaajan, joka on suurimman 5 W:n tehotapitusvaihton impedanssi mitattuna primäärin puolelta, mitattu impedanssisuhde vastaa parhaiten laskennallista. Muuntaja on kuitenkin kuormitettu nimellisimpedanssiaan puolet pienemmällä kuormalla, joka on siis tarkoittaa 100 %:n ylikuormaa. Laskettaessa impedanssisuhteet vaikkapa 1 kHz:lla takaisin muuntosuhteiksi voidaan todeta, että nimellistä hankalammalla kuormallakin muuntajan muuntosuhteet ovat alle laskennallisen ja siten toisista pitäisi saada laskennallista isompi jännite ulos 5 W:n tapitusvaihtoehtoa lukuunottamatta. Tämä on selvästi muuntajavalmistajan varautumista muuntajahäviöihin ja kaiutimen impedanssiminimeihin. Kaiuttimen impedanssi esitetään yleensä lukuarvona, ei vasteena. Impedanssin lukuarvo on keskiarvoistettu impedanssivasteesta. Siksi mitoitettaessa järjestelmää on lukuarvon perusteella on syytä varata hieman pelivaraa.

Primääri-impedanssien kuvaajista voidaan myös havaita selkeä lasku matalia taajuuksia kohti mentäessä. Jopa kuormittamattomalla muuntajalla primääri-impedanssi laskee hyvin lähelle kuormitettujen tilanteiden impedansseja. Tämä ei silti tarkoita että muuntaja söisi niin paljon tehoa matalilla taajuuksilla kuin impedanssikuvaajista voi ymmärtää. Muuntajan impedanssi matalilla taajuuksilla on hyvin induktiivinen, joten muuntajan ottama virta olisi sähkövoimatekniikan terminologialla ilmaistuna loisivirtaa. Virta johtuu siitä, että kuormittamaton muuntaja toimii kuin kela. Primäärikäämin induktanssi yhdessä taajuuden kanssa määrää kuormittamattoman muuntajan induktiivisen reaktanssin. Reaktanssin lisäksi on tietenkin käämin resistanssi, joka mitattiin yleismittarilla n. 20 Ω :ksi. Kokonaisimpedanssi on siis vahvasti reaktanssin hallitsema jopa 20 Hz:n taajudella, jossa kuormittamattoman muuntajan primääri-impedanssi on noin 500 Ω :a.

5.1.2 Taajuusvastemittaukset

Taajuusvastemittausten tarkoituksena oli tutkia vahvistimen, muuntajan, kuulokeliitinkytken ja kuulokkeen muodostaman järjestelmän taajuusvastetta ja kuulokkeiden impedanssivasteen vaikutusta taajuusvasteeseen. Kuulokkeiden vasteen mittaamiseen ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta, eikä sitä edes nähty tarpeelliseksi. Toki kuulokkeiden äänenlaatuun kiinnitettiin mallia valittaessa, mutta arvio äänenlaadusta tehtiin koekuuntelulla.

Taajuusvastetta mitattiin kytkemällä 10 kpl Sony MDR-210 etuvastusten kautta ITR 701506 -muuntajan toisioon. Erona valmistettuun järjestelmään on siis muuntajan ja kuulokkeiden tyyppi. Kuulokkeita oli myös 4 kpl enemmän kytkettynä muuntajaan, kuin valmiissa järjestelmässä on mahdollista kytkeä. Kuvassa 23. on taajuusvasteet mitattu kuulokkeiden rinnalta. Sininen käyrä 5 W:n, punainen 2,5 W:n ja musta 1 W:n tapituk-sella. Kuulokkeiden impedanssimaksimi näkyy lievänä korostumana n. 150 Hz:n taajuudella ja muuntajan hajainduktanssi pienenä laskuna 20 kHz:llä. Kaikki mitatut taajuusvasteet pysyvät ± 1 dB:n toleranssissa.



Kuva 23. Alustava taajuusvastemittaus.

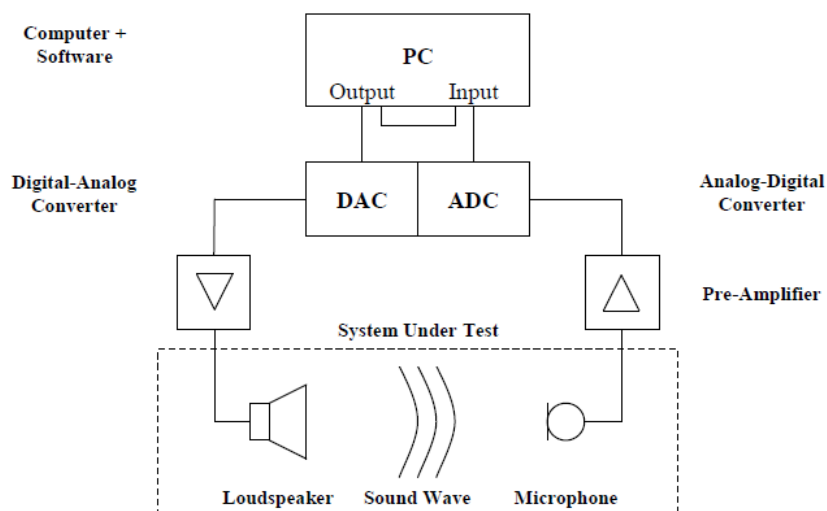
Alustavien mittausten hyvien tulosten perusteella oli selvää että kytkentäkonsepti oli toteuttamiskelpoinen ja tulkkaujärjestelmä päätettiin toteuttaa sen pohjalta.

5.2 Mittaukset valmiille järjestelmälle

Mittausten tarkoitus oli tutkia rakennetun järjestelmän äänenlaatua mittausten avulla. Mittaukset tehtiin pääosin tietokoneella käyttäen Easera SysTune Pro sekä Room Eq Wizard 5.01 (REW) -ohjelmistoja. Lisäksi mittauksiin tarvittiin RME Babyface -äänikorttia, Klark Teknik DN100 -DI-boxeja sekä toteutetussa järjestelmässäkin käytettävää Crown Com-Tech 420 -päätevahvistinta. Lisäksi mittausjärjestelyiden toiminnan varmistamiseen käytettiin Fluke 87 -yleismittaria ja NTI Minirator MR-PRO -signaaligeneraattoria. Särömittauksiin käytettiin REW-ohjelmaa ja Audio Precision System 1 Dual Domain -mittalaitteistoa.

REW on ilmainen Home Theatre Shack -verkkosivustolta saatavissa oleva kotiteatteri-äänilaitteistojen mittaukseen ja virittelyyn tarkoitettu ohjelma.

Easera Systune Pro on mittaohjelmisto joka on tarkoitettu lähinnä konsertti- ja saliäänentoistojärjestelmien virittämiseen. Ohjelman parhaita puolia on mahdollisuus käyttää mittaamiseen periaatteessa mitä tahansa äänijärjestelmään syötettävää signaalia, kunhan se sisältää taajuuksia, joita halutaan mitata. Signaali voidaan syöttää myös ohjelmasta itsestään. Ohjelma tekee sekä järjestelmään syötettävälle referenssisignaaliin että järjestelmän läpi menneelle signaalille FFT-muunnokset ja laskee niistä impulssivasteen. (kuva 24.) [24]



Kuva 24. Tyypillinen mittausjärjestely SysTunella. [17]

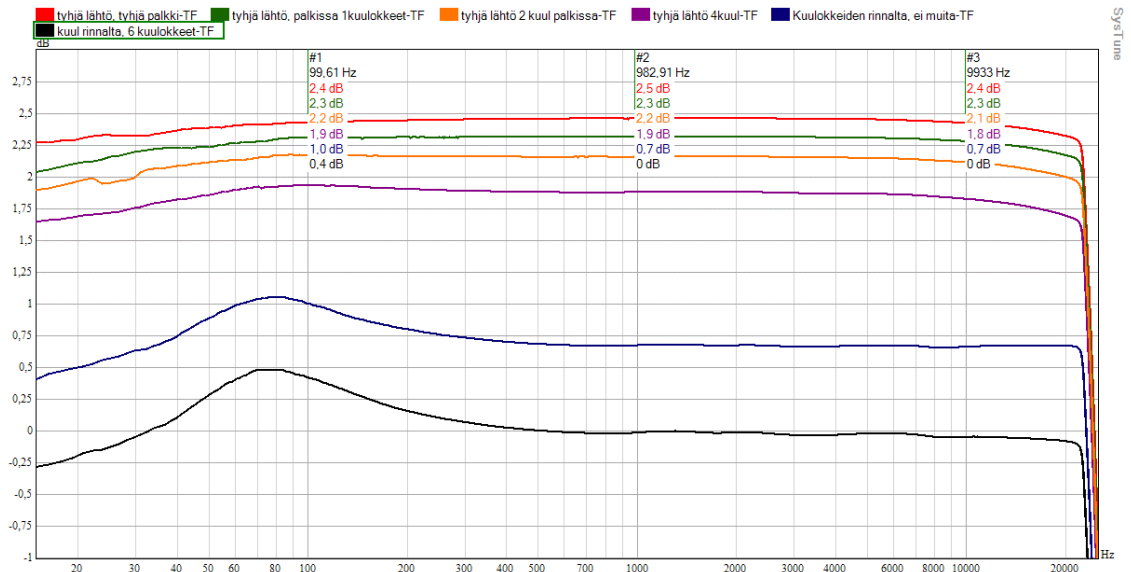
Kuvassa 24. mittasignaali tehdään ohjelmistolla tietokoneessa ja referenssisignaali reititetään ohjelmistossa sisäisesti verrattavaksi järjestelmän läpi kulkeneen signaalin kanssa. Mikäli käytössä on kaksi tai useampikanavainen äänikortti voidaan referenssisignaalin takaisinreititys tehdä ylimääräisestä ulostulosta ylimääriseen sisäänmenoon. Tällöin äänikortin aiheuttamat taajuus- ja vaihevasteiden virheet kompensoituvat pois, kunhan äänikortin kanavat ovat vasteiltaan riittävän identtisiä.

5.3 Taajuusvastemittaukset

Taajuusvastemittaukset tehtiin vaaleanpunaisella kohinalla. Vaaleanpunainen kohina soveltuu siniaaltopyyhkäisyä paremmin sellaisen järjestelmän mittaamiseen, jossa signaaliketjussa on päätevahvistin. Päätevahvistimien värähtelynestosuojapiirit saattavat vaimentaa ulostulon syötettäessä korkeataajuisia signaalia suurella tasolla. Tämä olikin ongelmana REW-ohjelmalla tehdyissä alustavissa mittauksissa sekä THD-mittauksissa.

Äänikortin ulostulosta saatu signaali jaettiin päätevahvistimen sisäänmenoon sekä toiseen äänikortin sisäänmenoon. Toisella äänikortin sisäänmenolla mitattiin kuulokeliittimestä saatavaa signaalia. Ohjelma ja mittalaitteisto siis mittaavat päätevahvistimeen syötetyn signaalin ja kuulokeliittimestä saadun signaalin taso- ja vaihe-eroja. Kuvassa 25. neljä ylintä käyrää on mitattu kuulokeliittimestä niin, että kuulokepalkin muihin liittimiin on kytketty 0, 1, 2 tai 4 kuuloketta. Käyrien 0,6 dB:n tasoero selittyy muuntajan lähtöimpedanssilla. Alimmat 2 käyrää on mitattu kuulokkeiden rinnalta niin että palkissa on 1:t ja 6:t kuulokkeet. Kahden ylimmän eli punaisen ja vihreän käyrän ero on siis muuntajassa tapahtuvat häviöt, kun muuntajaa kuormitetaan yksillä kuulokkeilla. Toiseksi ylimmän vihreän ja toiseksi alimman tummansinisen kuvaajan ero on puolestaan kuulokeliittimen etuvastuksessa tapahtuva häviö. Täysin kuormitetun palkin 2,5 dB:n kokonaishäviöistä siis n. 1,8 dB:ä johtuu etuvastuksesta ja loput n. 0,7 dB:ä muuntajasta.

Vaikka kuulokeliittimien etuvastukset aiheuttavat vaimenemaa voimakkuustasoon, niiden vaikutus taajuusvasteeseen on kuitenkin hyvin pieni. Kuvan 2. sinisessä kuvaajassa näkyvän kuulokkeen impedanssin n. 35 %:n vaihtelu aiheuttaa ainoastaan 0,5 dB:n heiton taajuusvasteeseen. Lisäksi kuulokkeiden impedanssikäyrä suoristuu, mikäli ne ovat päässä, tai niiden voimakkuussäätö ei ole täysillä. Taajuusvasteen ($\pm 0,5$ dB 20 Hz – 20 kHz) puolesta järjestelmää voidaan pitää onnistuneena.



Kuva 25. Kuulokeliittimestä mitattuja taajuusvasteita erilaisilla kuulokemäärillä.

5.4 Impedanssimittaukset

Systune-ohjelmiston Pro-versiolla voidaan tehdä mittauksia myös impedanssivasteelle. Impedanssimittaukset päätettiin tehdä ohjelman käytön ja sillä vastaisuudessa tehtävien impedanssivasteen mittausten harjoittelemiseksi. Impedanssivasteen mittaamisesta on varmasti myöhemmin hyötyä esimerkiksi kaiuttimien kunnon tarkastamisessa. Kaiuttimien impedanssivasteesta voidaan tutkia elementtien kunnon lisäksi esimerkiksi refleksikaiuttimissa ilmapuotoja, jotka näkyvät impedanssivasteen minimikohtissa. [25]

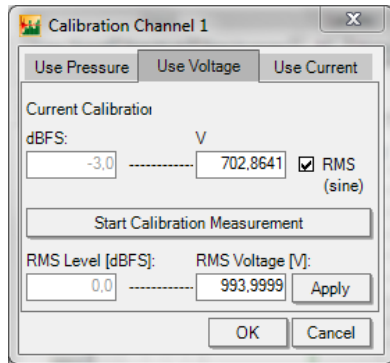
Tässä työssä impedanssimittausten tarkoitus on kuitenkin tutkia käytetyn kytkennän vaikutusta vahvistimen näkemään kuormaan sekä kuulokeliittimien lähtöimpedanssiin. Kytkennän vahvistimelle aiheuttamalla kuormaimpedanssilla on merkitystä vahvistimen valintaan sekä laskettaessa vahvistimen kestävästä maksimikuulokemäärästä. Kuulokeliittimen lähtöimpedanssilla voi toisaalta olla vaikutusta taajuusvasteeseen, jos kuulokkeiden impedanssivaste on hankala. Jos yhdellä muuntajalla syötetään useita kuulokkeita, voi myös muuntajan lähtöimpedanssilla olla vaikutusta signaalitasoon tai taajuusvasteeseen.

5.4.1 Impedanssimittausjärjestely ja sen verifiointia

Impedanssia mitattaessa ohjelman referenssikanava kalibroidaan virta-arvolla. Sisään-
tulokanava voidaan ohjelman Pro-versiossa kalibroida äänenpaineen tai jännitteen li-
säksi virta-arvolla. Sitä ennen on kuitenkin syytä tarkistaa äänikortin ja muun mittauslait-
teiston sisääntulojen kanavatasapaino. Taajuus ja vaihevasteidenkin olisi hyvä olla mah-
dollisimman lähellä toisiaan. Pienikin ero vaikuttaa erityisesti impedanssimittauksiin.
Koska impedanssimittauksissa on tarkoitus mitata myös korkeita impedansseja lähinnä
kaiutinlinjajamuuntajan primääripuolta, kun sekundääri on kuormittamaton, tarvitaan myös
apuvälineet impedanssitason muuntoon. Äänikortin sisäänmenoimpedanssiksi on ilmoit-
tettu $2\text{ k}\Omega$:a joten se aiheuttaisi enimmillään noin 1 %:n virheen, vaikka mitattavan lait-
teen impedanssi ja referenssivastus olisivat n. $20\ \Omega$:n luokkaa. Kuormittamattoman
muuntajan primäärin impedanssi isoimmillaan on ainakin dekadia suurempi kuin $2\text{ k}\Omega$:a,
joten mittaus äänikortilla ilman apuvälineitä olisi täysin mahdotonta.

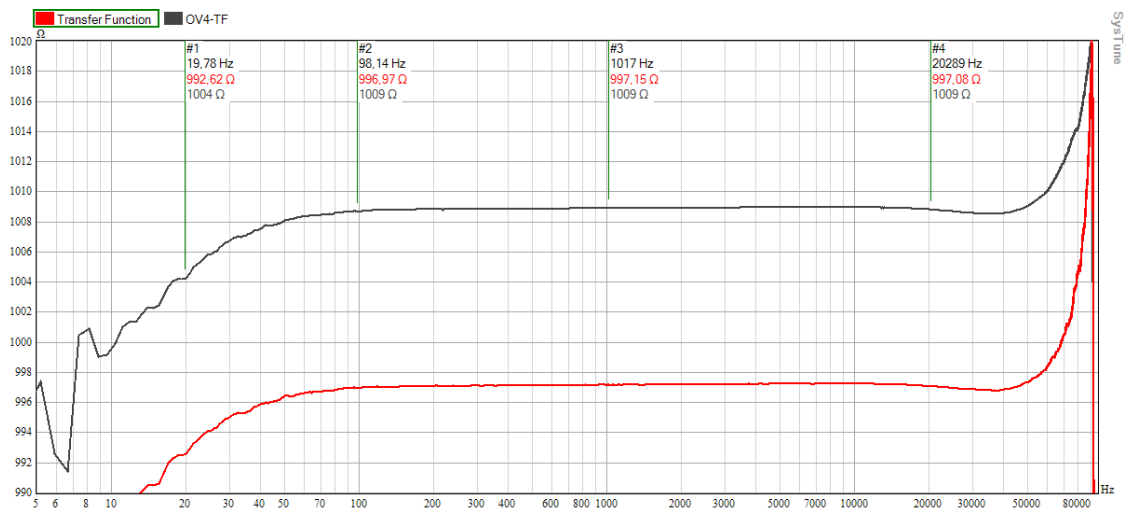
Lisäksi kytkennässä ovat mitattava laite ja referenssivastus sarjassa, ja testijännitteen
jakautumista niiden ylitse mitataan kahdella eri kanavalla. Galvaaninen erotuskin on siis
tarpeen, etteivät äänikortin sisäänmenot tuhoudu mittausjännitteestä tai jompikumpi mi-
tattavista jännitteistä tule oikosuljetuksi. Mittauslaitteiston sisäänmenoimpedanssien
nostoon päätettiin käyttää aktiivisia DI-boxeja. Valituiksi tulivat Klark Teknik:in DN100 -
di-boxit.

Mittausohjelmassa pitää kalibroida jännitearvolla tutkittavan impedanssin jännitettä
mittaava kanava 1. sekä virta-arvolla referenssivastuksen virtaa mittaava kanava 2.
Koska aaltomuodon kuvaajista ei ole tarpeen lukea todellisia jännite ja virta-arvoja,
kalibrointia voidaan hieman yksinkertaistaa. Voisimme siis todellisten jännite ja virta-
arvojen sijasta kalibroida jännitekanavan 1 V :n arvolla ja virtakanavan ampeeriarvolla,
joka on referenssivastuksen resistanssin käänteisluku. Käänteislukuakaan ei tarvitse
laskea, jos jännitekanavaan syötetään V -arvoksi vastuksen resistanssi ja virtakanavan
 1 A :a. Kuvassa 26. on kalibrointi-ikkuna johon on V -arvoksi suötetty referenssivastuksen
arvo $994\ \Omega$:a.



Kuva 26. Jännitettä mittaavan kanavan 1. kalibrointi-ikkuna.

Edelleenkin on kalibroimatta kanavien välinen pieni vahvistusero. Koska mittavana impedanssina oli mittausjärjestelmän testissä vastus, jonka arvoksi yleismittarilla mitattiin 997 Ω :a, kuvan 27. kalibroimatta mitatusta mustasta kuvaajasta näemme virheellisen 1009 Ω :n arvon. Punainen kuvaaja on saatu kalibroimalla kanavan 1 vahvistusta $-0,102$ dB:llä.

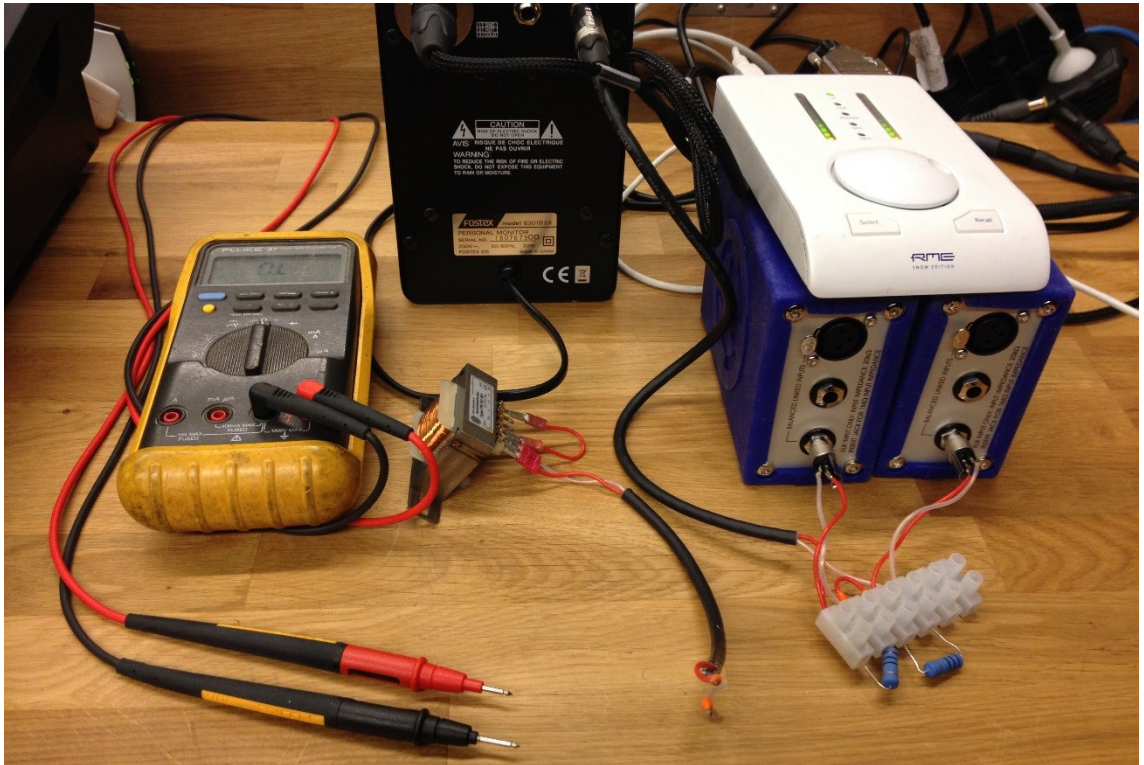


Kuva 27. Kalibroimattoman kanavaeron vaikutus impedanssimittaukseen. Ylempi, musta kuvaaja mitattu ilman kalibrointia, punainen kalibroitu.

Mittavien impedanssitason muuttuessa eri suuruusluokkaan vaihdettiin virranmittausvastus suunnilleen samaan kokoiseksi kuin mitattava impedanssi. Lisäksi mittaohjelma kalibroitiin uudestaan käyttäen referenssinä vastusta, jonka resistanssi oli mitattu yleismittarilla.

Kuvassa 28. valmistaudutaan impedanssimittaukseen. Mittajärjestelmän virranmittausvastuksen ja kalibrointiin käytetyn vastuksen arvot on tarkistettu yleismittarilla. Pientä

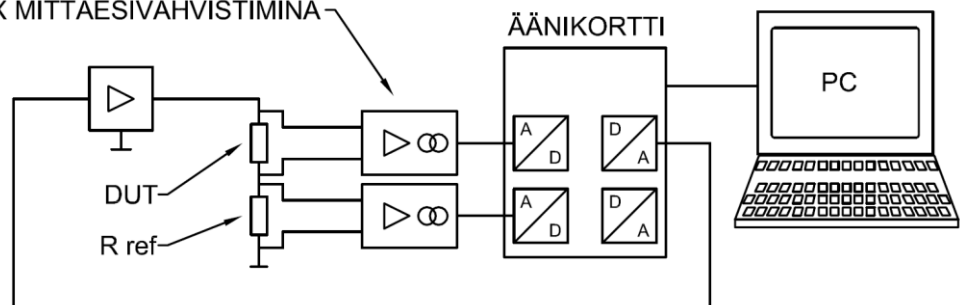
kaiutinlähdöllistä aktiivikaiutinta käytetään vahvistimena, ettei äänikortin lähtö ylikuormitu.



Kuva 28. Impedanssimittausjärjestely.

Kuvassa 29. on kytkentä esitetty lohkokaaviona.

2 KPL DI-BOX MITTAESIVAHVISTIMINA



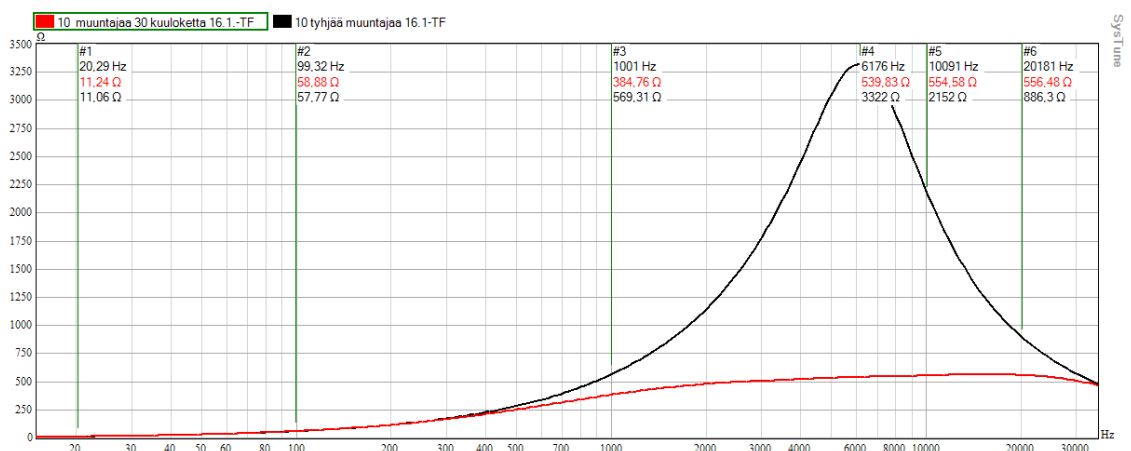
Kuva 29. Impedanssimittausjärjestelyn lohkokaavio.

Kuvassa 29. ylempi di-box:in ja äänikortin yhdistelmä mittaa DUT:n eli testattavan laitteen navoissa olevaa jännitettä. Alempi yhdistelmä mittaa tunnetun vastuksen R_{ref} jännitettä, jonka perusteella mittaohjelma laskee virran.

Impedanssimittauksen suurimmat virheet aiheutuvat pienillä impedansseilla yleismittarin epätarkuudesta mitattaessa virranmittaukseen käytetyn vastuksen sekä kalibrointiin käytetyn vastuksen arvoa. Myös mittajohdot voivat aiheuttaa virhettä. Suuremmilla impedanssitasoilla kapasitanssista tulee helposti häiritsevin tekijä. Sekä kaapeloinnin että mittaavan laitteiston sisäänmenojen kapasitanssit haittaavat mittaustuloksen tarkkuutta. Vaikka kuvassa 28. onkin käytetty mahdollisimman lyhyitä johtoja mittauskytkenän eli ruuvirimaliittimen ja mittaesivahvistimena toimivien sinisten di-boxien välissä haittaa di-boxien sisäänmenojen kapasitanssi silti korkeiden impedanssien mittausta korkeilla taajuuksilla. Vaikka sisäänmenon impedanssiksi onkin ilmoitettu 1 M Ω :a todettiin sen kahdella eri tavalla olevan 20 kHz:llä vain hieman yli 100 k Ω :a.

5.4.2 Impedanssimittaukset järjestelmälle

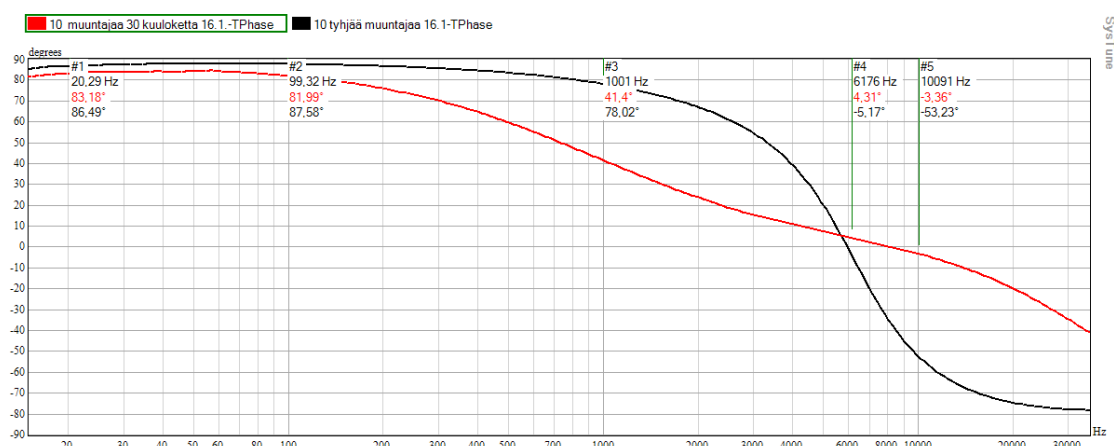
Järjestelmän mitoittamisen kannalta ehkä kiinnostavin impedanssi on vahvistimen kuorma. Vahvistinta kuormittavat siihen kytketyt kuulokepalkit ja niiden kuulokkeet. Muuntajien induktiivisuuden takia kuulokepalkit kuormittavat varsinkin matalilla taajuuksilla vahvistinta ilman kuulokkeitakin. Koska yhden kuulokkeettoman kuulokepalkin impedanssi on hankalan iso mitattavaksi, päätettiin mitata 5:en kuulokepalkin impedanssi niin, että kuulokepalkkien molemmat kielivaihtoehdot oli kytketty yhteen. Näin siis saatiin aikaiseksi tilanne, joka vastaa kymmenen kuulokepalkin kuormitusta vahvistimelle. Mitatut impedanssit ovat siis kymmenesosa yhden kuulokepalkin impedanssista. Kuvassa 30. on 10:en tyhjän kuulokepalkin impedanssi (musta kuvaaja) ja 10:en palkin impedanssi, kun niihin kuhunkin on kytketty 3:t kuulokkeet (punainen kuvaaja). Kuulokkeiden voimakkuussäädöt oli säädetty täysille, jolloin niiden impedanssi on pienimmillään.



Kuva 30. 10:n kuulokepalkin impedanssit tyhjänä ja puolella kuulokemäärällä.

Tämä impedanssimittaus tuli valitettavasti tehtyä käyttäen 10 k Ω :n etuvastusta virranmittaukseen. Liian iso etuvastus suhteessa di-boxin sisäänmenon impedanssiin aiheuttaa virhettä erityisesti korkeilla taajuuksilla. Isoin noin 20 %:n virhe äänitaajuusalueella on 20 kHz:n taajuudella. Kuvaajista näkee silti hyvin vahvistimen kuorman luonteen ja vaihteluvälin suuruuden.

Kuvassa 31. on kuulokepalkin impedanssin vaiheen kuvaajat. Musta kuvaaja on ilman kuormaa ja punainen kuvaaja 3:lla kuulokeella kuulokepalkkia kohden. Tämä on siis edelliseen impedanssi kuvaajaan liittyvä impedanssin vaiheen kuvaaja. Kuormittamattomien kuulokepalkkien impedanssi (musta) on hyvin induktiivinen n. 6 kHz:n resonanssitaajuuden alapuolella. Resonanssitaajudella impedanssi on resistiivinen ja resonanssin yläpuolella kapasitiivinen. Kuormitetulla muuntajalla impedanssi on matalia taajuuksia lukuunottamatta hieman resistiivisempi, mutta koska muuntaja on kuormitettu mitoitustaan isommalla impedanssilla

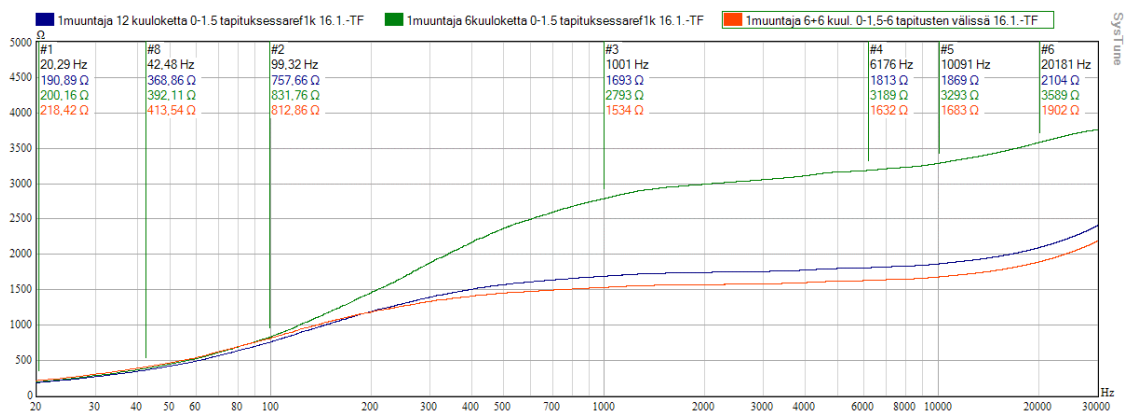


Kuva 31. 10:n kuulokepalkin impedanssin vaiheet ilman kuormaa ja puolella kuulokemäärällä.

Muuntajan mitattu kapasitiivisuus korkeilla taajuuksilla johtuu kahdesta tekijästä: kapasitanssista primäärikäämin kierrosten välillä sekä kapasitanssista sekundäärikäämin kierrosten välillä. Lisäksi faraday-suojattomissa muuntajissa on kapasitiivista kytkentää ensiön ja toision välillä.

Kuvassa 32. on mitattu yhden kuulokepalkin impedansseja. Vihreä kuvaaja on normaali-tilanne, jossa kuulokepalkiin on kytketty 6:t kuulokkeet. Lisäksi testattiin miten muuntajan syöttämän kuulokemäärän kaksinkertaistaminen vaikuttaisi. Sininen käyrä kuvaa tilannetta, jossa kaikki kuulokkeet on kytketty samaan 0 – 1,5 W tapitusväliin. Punaista kuvaajaa mitattaessa kuusi kuuloketta oli kytketty tapitusvälissä 0 – 1,5 W ja toiset 6

kuuloketta tapitusvälissä 1,5 – 6 W. Näistä tapitusväleistä saadaan ainakin teoriassa sama jännite. Jaettaessa kuulokkeet eri tapitusväleihin saadaan kuulokkeiden impedanssin ja muuntajan lähtöimpedanssin välistä suhdetta kasvatettua ja häviöitä pienennettyä. Punaisen kuvaajan impedanssi onkin pienempi, koska jaettaessa kuorma koko toisiokäämin mitalle, saadaan häviöt sekä käämilangassa että ensiön ja toision välisessä kytkennässä pienemmään. Muuntajan häviöiden pieneminen siis tavallaan vastaa ensiön ja toision väliisä olevan vastuksen pienenemistä. Siksi myös muuntajan ensiöpuolelta mitattu impedanssi putoaa.



Kuva 32. Yhden kuulokepalkin impedanssi erilaisilla kuormituksilla

Kuulokekuorman jakamisella kahdelle eri käämin osalle on merkitystä, mikäli totutettua järjestelmää vaikkapa halutaan laajentaa kytkemällä muuntajallisiin kuulokepalkkeihin toiset muuntajattomat laajennuspalkit.

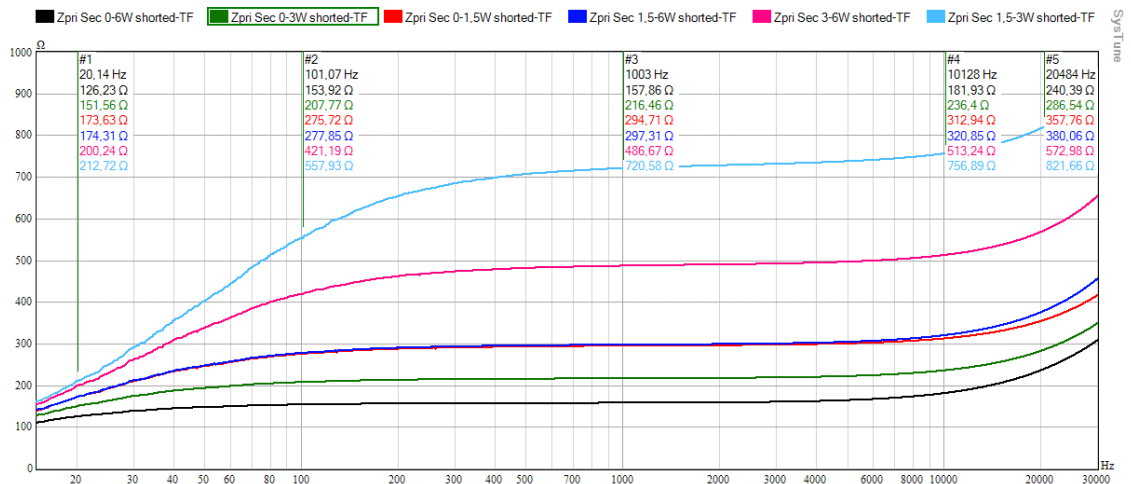
5.4.3 Muuntajan oikosulku- ja lähtöimpedanssit

Lähtöimpedanssimittaukset tehtiin jotta voidaan laskea muuntajan häviöt voidaan laskea erilaisilla kuormilla ja eri tapituksilla. Oikosulkumpeansseistakin voitaisiin laskea muuntajan häviöitä, mutta ne myös kertovat, millainen kuorma muuntaja on vahvistimelle, mikäli sen toisio tai toision osa menee oikosulkuun.

Muuntajan oikosulkuimpedanssi mitataan ensiöpuolelta niin, että toisiokäämi tai sen tietty osa on oikosuljettu. Vastaavasti ulostuloimpedanssi mitataan toisiopuolelta niin, että ensiöpuoli on oikosuljettu.

Kuvassa 33. on muuntajan oikosulkuimpedanssit niin että koko toisiokäämi (alin musta kuvaaja) tai sen osa on oikosuljettuna. Oikosulkuimpedanssi on siis pienin kun, koko

toisiokäämi on oikosuljettu. Suurin oikosulkuimpedanssi (ylin vaaleansininen kuvaaja) on matalajänniteisimmällä 1,5 – 3W tapitusvälillä.



Kuva 33. Muuntajan oikosulkuimpedanssit eri tapitusvaihtoehdoilla.

Kuvan 34. oikosulkuimpedanssin kuvaajat on mitattu oikosulkemalla toisiokäämistä seuraavat tapitusvälit:

- musta: 0 – 6 W
- vihreä: 0 – 3 W
- punainen : 0 – 1,5 W
- sininen: 1,5 W – 6 W
- roosa: 3 W – 6 W
- vaaleansininen: 1,5 W – 3 W

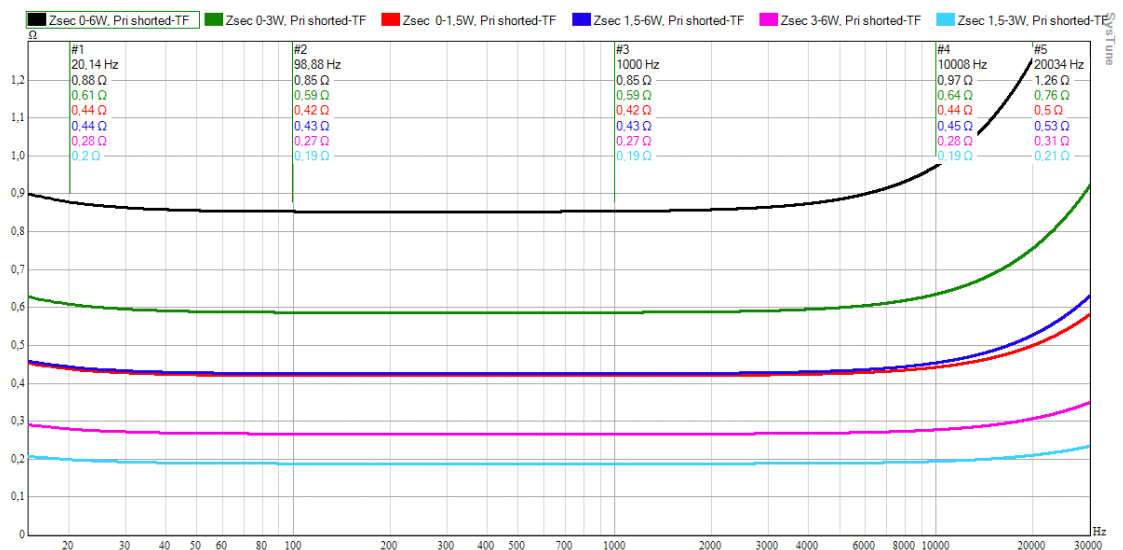
Oikosulkuimpedanssiin vaikuttavat muuntajan häviöt. Häviöitä aiheuttavat mm. ensiö ja toisiokäämien resistanssit ja rautasydämen häviöt ja hajavuo. [16]

Verrattaessa alinta mustaa ja ylintä vaaleansinistä kuvaajaa on nähtävissä toisiokäämin resisitanssin muuntuminen ensiöpuolelle. Kuormittamattomalla muuntajalla voidaan yleismittarilla mitata 0 – 6 W tapitusvälistä jännite, joka on 5 kertaa suurempi kuin 1,5 W – 3 W -tapitusvälistä. Mitattu muuntosuhteen ero on siis 5. Siten 0 – 6 W tapitusvälin käämissä on 5 kertaa enemmän kierroksia kuin tapitusvälin 1,5 W – 3 W. Jos käämilangan kierrokset oletetaan samanmittaisiksi, resistanssisuhde on 5:1. Pienempi-resistanssin lyhyempi toisiokäämi näkyy kuitenkin suurempana oikosulkuimpedanssina johtuen muuntajan impedanssi muunoksesta, joka esitettiin kaavassa 4. Koska pienemmälle käämin osalle muuntosuhde on 5-kertainen, impedanssisuhteen ero verrattuna

koko toisiokäämiin on 25 -kertainen. Siksi eron pitäisi olla $1/5 \times 25 = 5$. Kuvan 32. kuvaajista 1 kHz:n kohdalta luettaessa ero on 4,6 -kertainen. Tästä voidaan päätellä toisiokäämin olevan merkittävä tekijä häviöissä. Johtuen impedanssimuunnoksen ja käämiresistanssin erilaisista muutoksista muuntosuhteen vaihtuessa, suhteelliset häviöt toisiokäämissä myös pahenevat käytettäessä pienemmän lähtöjännitteen tapitusvaihtoehtoa.

Muuntajan lähtöimpedanssit mitattiin toisiokäämistä ja sen osista oikosulkemalla ensiö. Kuvan 33. lähtöimpedanssit on mitattu seuraavista tapitusväleistä:

- musta: 0 – 6 W
- vihreä: 0 – 3 W
- punainen : 0 – 1,5 W
- sininen: 1,5 W – 6 W
- roosa: 3 W – 6 W
- vaaleansininen: 1,5 W – 3 W



Kuva 34. Muuntajan lähtöimpedanssit.

Lähtöimpedanssi kuvaa muuntajan virransyöttökykyä toisioon kytkettyyn kuormaan. Mitä pienempi lähtöimpedanssi on suhteessa kuorman impedanssiin, sitä vähemmän virta aiheuttaa jännitehäviötä muuntajassa.

5.4.4 Väliinkytkentävaimennuksen laskeminen lähtöimpedanssin perusteella

Muuntajan häviöistä aiheutuva vaimentuma on periaatteessa yksi mitoitukseen vaikuttava tekijä. Koska muuntajan tehtävä useimmiten on muuntaa jännitetaso sopivaksi, ei signaalin jännitteellä sinänsä ole tekemistä vaimennuksen kanssa.

Muuntajan lähtöimpedanssin ja häviöiden välisen yhteyden testaamiseksi lasketaan alla muutama esimerkki toteutettuun järjestelmään liittyen.

Lähtötiedot:

- kuulokkeiden impedanssi 1kHz:llä on 37,6 Ω :a puolta kohden eli 18,8 Ω :a (kuva 2, sininen kuvaaja)
- kuulokeliittimen etuvastus 3,9 Ω :a
- kuulokeliittimen kuorma muuntajalle 22,7 Ω :a (edellisistä)
- muuntajan lähtöimpedanssi 0 – 1,5 W tapituksella 1 kHz:llä 0,42 Ω :a

Vaimennus muuntajan lähdössä kun kytkettynä 2 kuulokeparia:

$$A = 20 \times \log \left(\frac{U_{load}}{U_{gen}} \right) = 20 \times \log \left(\frac{U_{gen} \times Z_{load}}{U_{gen}(Z_{load} + Z_{out})} \right)$$

$$A = 20 \times \log \left(\frac{Z_{load}}{(Z_{load} + Z_{out})} \right) = 20 \times \log \left(\frac{22,7/2}{(22,7/2 + 0,42)} \right) = -0,32\text{dB}$$

Vastaavasti 4:lle kuulokkeelle saadaan $A = -0,62$ dB

Mikäli halutaan muuntajan lähtöimpedanssin vaimennuksen lisäksi huomioida kuulokeliittimen etuvastus Z_{load} -muuttujasta Z_{out} :iin. 1:lle kuulokeparille saadaan vaimennukseksi:

$$A = 20 \times \log \left(\frac{Z_{load}}{(Z_{load} + Z_{out})} \right) = 20 \times \log \left(\frac{18,8}{(18,8 + 3,9 + 0,42)} \right) = -1,80\text{dB}$$

Ja kuudelle kuulokeparille:

$$A = 20 \times \log \left(\frac{18,8/6}{(18,8 + 3,9)/6 + 0,42} \right) = -2,55\text{dB}$$

Kaikki yllälasketut vaimennusarvot täsmäävät kuvasta 23. luettavissa oleviin vaimennusarvoihin.

Toteutetussa järjestelmässä muuntajan väliinkytkentävaimennus maksimikuormitustilanteessa 1,5 W:n tapituksella on

$$A = 20 \times \log \left(\frac{(18,8 + 3,9)/6}{(18,8 + 3,9)/6 + 0,42} \right) = -0,91 \text{dB}$$

Maksimikuormitustilanne muuntajalle on silloin, kun samaan 6:en tuolipaikan kuulokelpalkkiin on kytketty saman kielen liittimiin 6:t kuulokkeet ja kuulokkeiden voimakkuussäädöt ovat täysillä.

5.5 Särömittaukset

Järjestelmän THD eli harmoninen kokonaissärö mitattiin käyttäen lopullisen järjestelmän vahvistinta, ylimääräistä linjamuuntajaa sekä keinokuormavastuksia. Järjestelmän vahvistimessa on se hyvä puoli mittausten kannalta, että siinä ei ole lähtömuuntajaa, josta voisi aiheutua muuntajille tyypillisiä säröjä. Mittauksissa havaitut säröt ovat siis mitä varmin peräisin tulkkauksjärjestelmän kaiutinlinjamuuntajista. THD mittaukset tehtiin molemmilla mahdollisilla tavoilla eli mitaten THD eli pelkkä särö sekä THD+N eli särö ja kohina.

Yhteistä molemmille mittauksille on että ne tehdään siniaaltopyyhkäisyllä halutun taajuusalueen yli. Siniaallon taajuutta siis muutetaan jatkuvasti niin että se kattaa koko taajuusalueen. Käytännössä digitaalisissa mittausjärjestelyissä järjestelmän taajuutta muutetaan pykälittäin, mutta pykälät voivat olla niin tiheitä, että taajuuden muuttuminen mitatasignaalia kuunneltaessa kuulostaa jatkuvalta. Siniaaltopyyhkäisy voidaan tehdä joko taajuutta laskien tai nostaen.

Molemmissa mittaustyypeissä myöskin esitetään mitattavassa järjestelmässä tapahtuvaa häiriötä syötettäessä mittaustaajuus sisään. THD+N:ssä esitetään särön ja signaalin suhde kokonaissignaaliin ja THD:ssä säröjen suhde kokonaissignaaliin. Siksi kuvaajia lukiessa on hyvä pitää mielessä, että ne kuvaavat järjestelmän lisäämää ylimäärää, joka tulee järjestelmästä ulos. Esimerkiksi mitattaessa 3kHz taajuisella signaalilla tuloksena voi olla 6, 9, 12, 15, 18 kHz jne. särökomponentit sekä myös kohinaa, jos kyseessä on THD+N -mittaus. Kuitenkin kaikki nämä häiriöt piirretään yhteenlaskettuina kuvaajaan 3 kHz:n kohdalle.

THD mitataan siniaaltopyyhkäisyllä käyttäen FFT-ohjelmistoa, joka laskee tehosuomana yhteen särökerrannaiset mitattavalla kaistalla. Tämän tavan etuna on se, että ohjelmisto voi esittää myös eri särökerrannaisten kuvaajat.

THD+N mitataan myös siniaaltopyyhkäisyllä, mutta audiomittalaitteessa on kapeakaistainen estosuodatin, joka seuraa herätetaajuutta ja poistaa sen särö- ja häiriökomponentin mittaustuloksesta. Näin voidaan sisään palaavasta signaalista verrata kohinan ja särön tasoa suodattamattoman paluusignaalin kokonaistasoon ja piirtää tästä suhteesta kuvaaja. Tämän mittaustavan etuna on parempi vastaavuus todellisuuteen, koska useasti kohina on hallitsevampi häiriö kuin särö. Toisaalta muuntaja ei juurikaan itsessään kohise, ainakaan jos ei siihen indusoidu tai kytkeydy kapasitiivisesti ulkopuolisia häiriöitä. Lisäksi audiomuuntajien ongelmina voivat olla varsinkin matalilla taajuuksilla esiintyvät säröt, joten tämän työn kannalla on kuitenkin pelkkien säröjen mittaaminen mielenkiintoisempaa.

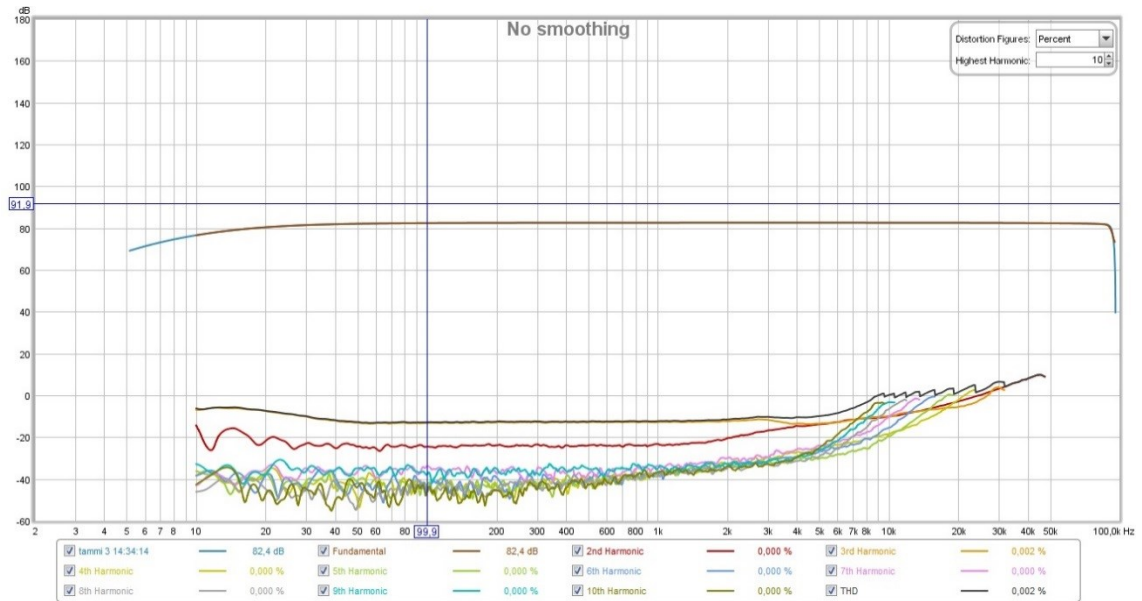
5.5.1 THD-mittaukset

Mittauksissa käytettiin REW 5,01 Beta 24 -ohjelmaa, RME Babyface -äänikorttia, Crown -vahvistinta, ylimääräiseksi jäänyttä linjamuuntajaa ja kuormavastuksia. Mittauksissa vaihdeltiin muuntajaan syötettävää signaalitasoa ja muuntajan toisioon kytkettyä kuormaa. Vahvistimen HF- eli korkeataajuusvärähtelysuojapiirin aktivoitumien isommilla signaalitasoilla esti mittaukset yli 20 V:n jännitteillä. Mittausohjelma ei anna käyttää äänikortin kalibrointitiedostoa särömittausten kanssa ja siksi kuvaajissa näkyvä taajuusvasteen vaimentuma matalilla taajuuksilla johtuu tosiasiasa äänikortista. Diskantin 1 dB:n vaimentuma puolestaan on todellinen ja johtuu muuntajasta tai vahvistimesta.

Äänikortin valmistaja ilmoittaa kortin sisäänmenon THD-arvoksi: < -100 dB, < 0.001 % ja THD+N arvoksi: < -98 dB, < 0.0012 %. Ulostulolle ilmoitetut arvot ovat: THD: - 104 dB, 0.00063 % ja THD+N: -100 dB, 0.001 %. Valmistajan käyttöohjeesta löytyvät arvot ovat hieman epätieteellisesti ilmoitetut, koska THD:lle ei ole ilmoitettu korkeinta mittauksessa huomioitua särökerrannaista, eikä käytettyä signaalitasoa. THD+N:lle pitäisi puolestaan ilmoittaa käytetty kaistanleveys ja signaalitaso. [27] [28]

Mittausjärjestelyn tarkistamiseksi äänikortin säröarvoja tutkittiin mittaamalla sitä itsellään. Oikea kanava osoittautui hieman huonommaksi kuin vasen. Oikeassa kanavassa

oleva mahdollisuus ohjelmallisesti kytkeä se korkeaimpedanssiseksi instrumenttisisäänmenoksi saattaa vaikuttaa asiaan. Tästä johtuen vasen sisäänmenokanava valittiin käytettäväksi särömittauksissa. Vasemman kanavan säröarvoja mitattiin haarukoiden ulostulotasoa 1 dB:n portain alaspäin välillä -6 dBFS ... -20 dBFS. Tasot vastaavat dBu:ina ilmaistuna tasoja 11,5 ... -2,5. Isoimmalla -6 dBFS tasolla oli särövastetta tutkittaessa pienin arvo 10 kHz:llä ja huonoin 100 Hz:llä. Isoimman lähtötason särövaste on esitetty kuvassa 34.



Kuva 35. Äänikortin omat säröt.

Tutkittaessa säröjä 10 kHz:n kohdalla arvot huononivat tasaisesti tasoja laskettaessa. Tämä on äänitekniikassa käytettävien suhteellisen matalien taajuuksien kanssa toimittaessa normaalia, koska signaalitason laskun tuleekin huonontaa signaalin ja särön suhdetta tai ainakin signaalin ja kohinan suhdetta. 100 Hz:n säröt puolestaan laskivat tasaisesti aina -15 dBFS tasoon asti jolla säröetäisyys oli 110,8 dB. Kolmannen särökomponentin hallitsevuus korkeimmalla lähtötasolla ja alle 3 kHz:n taajuuksilla herättikin ajatuksen AD-muuntimen säröytymisestä. Asiaa tutkittiin kytkemällä äänikortin ulostulon ja sisäänmenon väliin vastusvaimennin. Säättämällä signaalitasoja ja äänikortin sisäänmenovahvistusta paljastui, että särö johtuukin ulostulosta eli DA-muuntimesta.

Korkeammilla yli 5 kHz:n taajuuksilla näkyvä särökomponenttien kuvaajien loppujen jyrkkä nousu mietitytti hetken. Säröt tai niiden taajuudelle sattunut säröksi tulkittu kohina, ovat kuitenkin todellisuudessa selkeästi kuuloalueen ulkopuolella. Särökuvaaja piirretään niin että perustaajuuden eli mittasignaalin taajuuden aiheuttamat särökomponentit

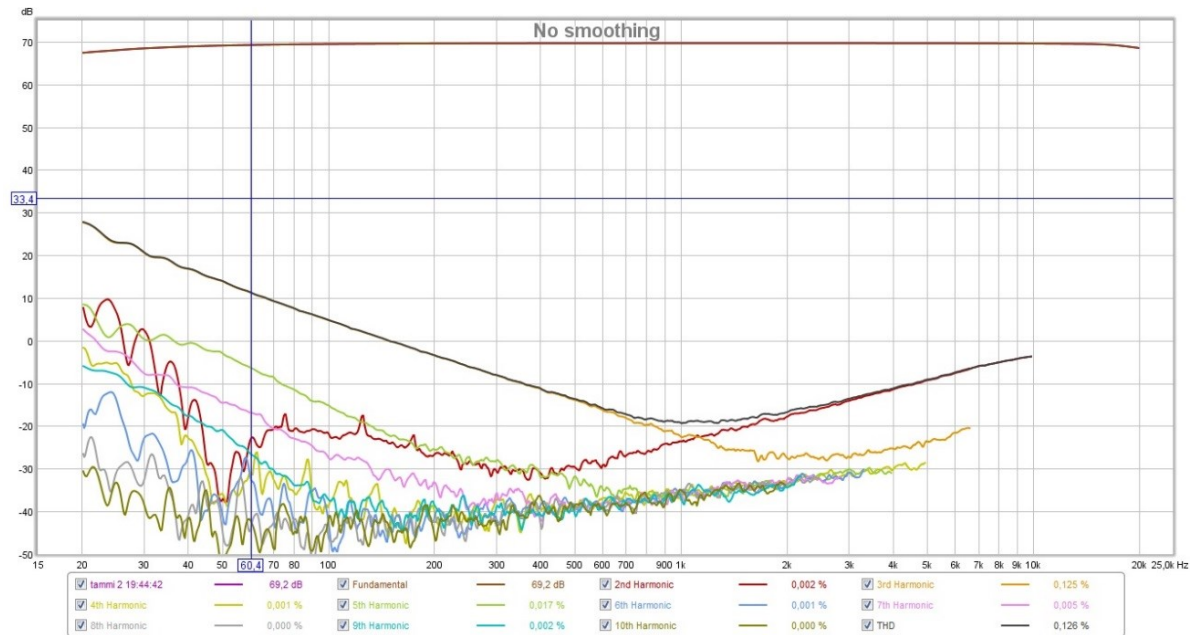
piirretään sen kohdalle ja lasketaan yhteen, jolloin saadaan THD jonka mittasignaalin taajuus on mitattavassa laitteistossa aiheuttanut. Testimittaus ei vastaa korvilla kuultavaa todellisuutta, koska se tehty lähinnä tieteellisestä mielenkiinnosta osittain kuuloalueen ulkopuolisille taajuuksille välillä 5 Hz – 96 kHz. Särökomponenttien häntien nousut ovat siis kuuloalueen ulkopuolella. Esimerkiksi 10:nen komponentin kuvaajan loppu alkaa nousta n. 5kHz kohdalla ja kuvaaja päättyy 9,6 kHz:iin. Tämä tarkoittaa sitä että kuvaajan lopun nousun ovat kyllä aiheuttaneet 5 – 9,6 kHz:n taajuuksia mitattaessa havaitut häiriöt. Nämä kymmenen kertaluvun säröksi tulkitut häiriöt ovat taajuuksilla 50 – 96 kHz:ä. Mittausohjelmalla ei välttämättä ole mitatessaan esimerkiksi 5 kHz taajuudella kykyä erotella, ovatko sen havaitsemat harmoniset kerrannaissärökomponentit todellista säröä, vai vain samalle hetkelle sattunutta kerrannaistaajuuksista kohinaa. Toki säröt voivat olla todellisia, koska ne pahenevat mitä lähemmäs näytetaajuuden puolikasta eli suurinta äänikortin toistamaan ja havaitsemaan pystyvää 96 kHz:n taajuutta mennään. Äänikäyttöön tarkoitettujen AD ja DA-muuntimien muunninten toiminta voi olla tahallaankin optimoitu niin, että häiriöitä ja säröjä on pyritty siirtämään kuuloalueen ulkopuoliselle ylimääräiselle taajuuskaistalle.

Siksi tämä ilmiö voidaan huoletta jättää äänijärjestelmää mittaillaessa huomiotta eikä se edes näy varsinaisissa THD-mittauksissa, koska niissä taajuuspyyhkäisy tehtiin välillä 20 Hz – 20 kHz.

Koska vahvistimen lähtöjännitteen säätö THD-mittauksissa sopivalle tasolle tehtiin pudottamalla äänikortin lähtötaso, ei myöskään äänikortin testailussa havaitusta säröstä alle 3 kHz:n taajuuksilla käytettäessä suurta lähtötaso ole haittaa.

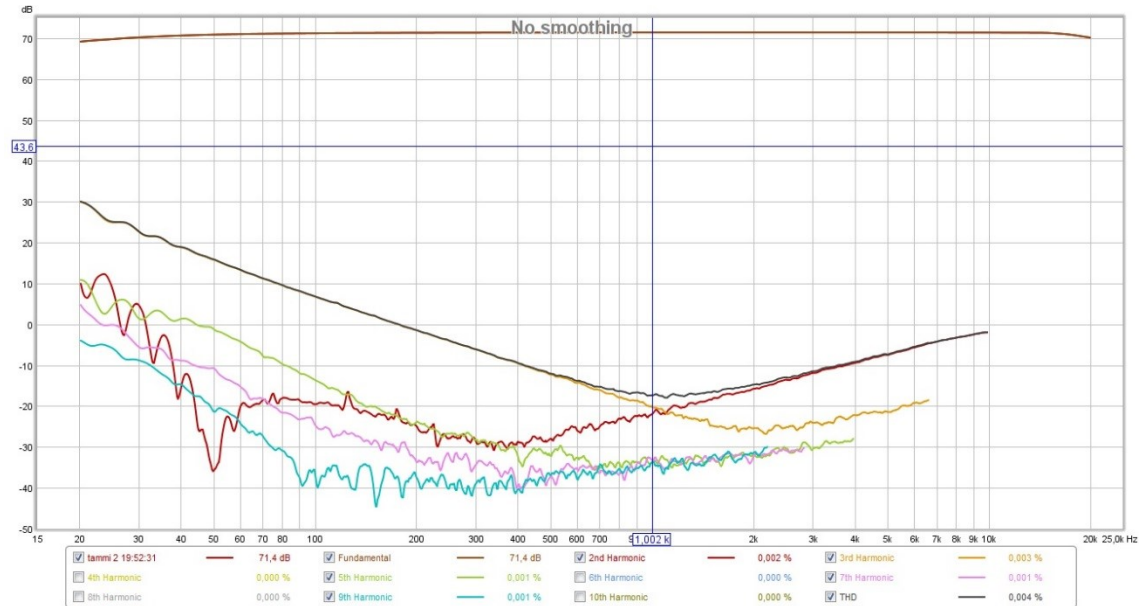
Muutoinkin äänikortin säröarvot ovat mitattavaan laitteistoon verrattuna merkittävästi paremmat. Mittausjärjestely voidaan siis todeta riittäväksi järjestelmän säröjen tutkintaan.

Kuorman vaikutukset säröön osoittautuivat hyvin vähäisiksi. Kuvassa 36. on muuntajan säröt kuormitettaessa toisiota sen nimelliskuormalla eli 4 Ω :lla. Ylimpänä kuvaajista on kokonaissignaali eli taajuusvaste ja seuraavina alaspäin on tummanharmaa harmonisen kokonaissärön kuvaaja, sen kanssa 1 kHz:n alapuolella päällekkäin oleva kolmannen särökomponentin keltainen kuvaaja ja punainen toisen särökomponentin kuvaaja joka puolestaan on merkittävin särökomponentti korkeammilla taajuuksilla ja kulkee siksi n. 2 kHz:stä ylöspäin kokonaissärön kuvaajan kanssa päällekkäin.



Kuva 36. Muuntajan säröt 20 V:n sisäänmenotasolla ja 4 Ω :n kuormalla.

Koska muuntajan sekundääripuolella on kahdet saman suuruiset jännitteet lähtönastojen 0 & 1,5W ja 1,5W & 6W välillä tehtiin kuvan 35. särömittaus vain napojen 0 & 1,5W välistä. Molemmat tapitusvälit olivat siis kuormitettuna 2 Ω :n vastuksilla. Näin saatiin sama signaalitaso seuraaviin mittauksiin joissa ainoastaan ensimmäistä kääminosaa kuormitettiin 2:n, 3:n ja 4 Ω :n kuormilla. Viimeisessä 20 V:n syöttöjännitetasolla tehdyssä mittauksessa muuntajan kuormana oli ainoastaan äänikortin 2 k Ω :n sisäänmenoimpedanssi. Säröarvoissa ei ollut merkittäviä eroja. Kuorman ja muuntajan lähtöimpedanssin aiheuttama vaimentuma kuitenkin väheni niin että se pieneni 0,1 ; 0,5 ; 0,8 ja 1,7 dB:ä. Siksi näistä mittauksista esitetään kuvassa 37. vain viimeinen, 2 k Ω :n kuormalla tehty. Viimeisin mittaus on siis käytännössä tehty ilman kuormaa. Särökomponenttien kuvaajista on myös parilliset poistettu näkyvistä 2. komponenttia lukuun ottamatta. Kuvaajasta ovat tämän takia selvemmin parittomat särökomponentit, jotka ovat yleensä muuntajissa hallitsevimpiä matalilla taajuuksilla, sekä toisen kerrannaisen särö, joka hallitsevin korkeammilla taajuuksilla.



Kuva 37. Muuntajan harmoninen särö ilman kuormaa.

Mittaohjelmasta ei valitettavasti voi muuttaa asteikkoa ilmaisemaan suoraan säröprosenttia. Koska dB-asteikko kuvaa kokonaissignaalin ja säröjen jännitteitä voidaan sitä lukea ruskean kokonaissignaalin ja tummanharmaan THD-kuvaajan välistä seuraavasti:

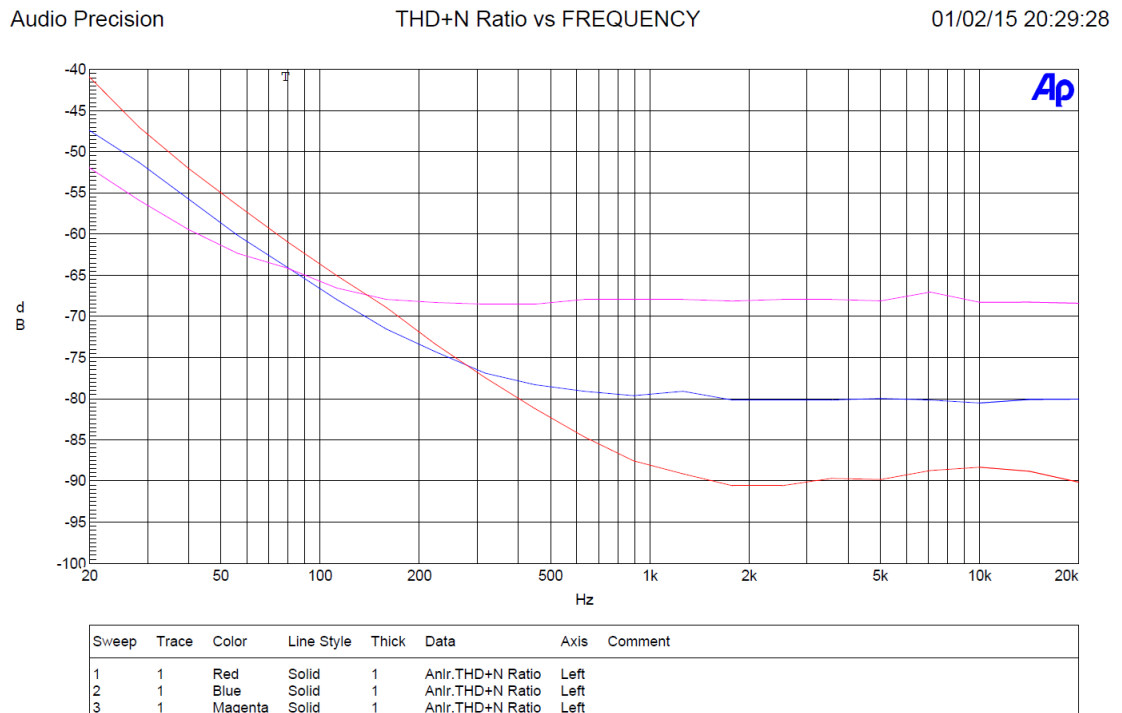
- 4 jakoväliä vastaa 1 %:n säröä
- 5 jakoväliä vastaa 0,3 %:n säröä
- 6 jakoväliä vastaa 0,1 %:n säröä
- 7 jakoväliä vastaa 0,03 %:n säröä jne.

Säröarvot ($\leq 1\%$ 20 Hz – 20 kHz, $\leq 0,1\%$ 70 Hz – 20 kHz) ovat sähköiselle laitteistolle kohtalaiset. Koska sähköisen laitteiston jälkeen signaaliketjussa on kuitenkin halvat kuu- lokkeet, voidaan laitteiston säröt olettaa merkityksettömiksi.

5.5.2 THD+N mittaukset

THD+N Mittaukset tehtiin Audio Precision System 1 Dual domain -audiomittalaitteella ja siihen liitetyn tietokoneen mittaohjelmalla. Koska THD+N -mittauksesta ei nähdä särökomponentteja, ovat kuvaajat yksinkertaisempia. Toisaalta THD+N -mittaus vastaa paremmin todellisuutta, koska siinä huomioidaan myös kohina. Kohina on usein olla isompi häiriö kuin säröt, ja siksi kohinan alle peittyviä säröjä on mielettöntä mitata. Kuvassa 38.

on mitattu vahvistin – muuntaja -yhdistelmän THD+N 3:lla eri signaalitasolla. Signaalitasoa haarukoitiin 12 dB:n portain. Punainen kuvaaja on mitattu vahvistimen lähtötasolla 20 V:a. Sininen kuvaaja on siis 5 V:n lähtöjännitteellä ja violetti 1,26 V lähtöjännitteellä. Kaistanpäästöalue mittausta tehtäessä oli 22 Hz – 22 kHz.



A-A THD+N VS FREQ.at1

Kuva 38. Särö- ja kohinaetäisyys mitattuna kolmella eri signaalitasolla.

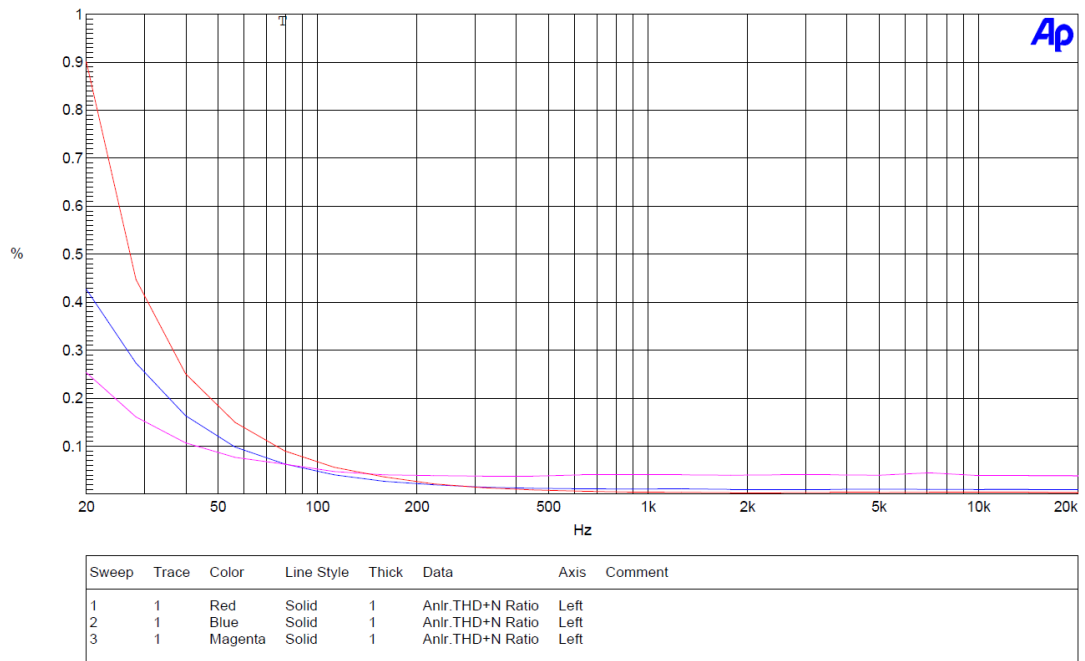
Kuvaajista käy ilmi, että muuntajan säröt pienenevät laskettaessa tasoa. Toinen merkilepantava asia on kohinaetäisyyden pieneminen tasoa laskettaessa. Pieneneminen johtuu siitä että vahvistin kohina ei riipu signaalitasosta. Pienennettäessä signaalitasoa signaali–kohina -suhde tietenkin huononee.

Yleensä THD+N -kuvaajia ei esitetä dB-asteikolla, kuten kuvassa 38. esitettiin dB-asteikolla kohinan merkityksen ymmärtämiseksi. Kuvassa 39. on sama mittaus esitettynä tyypillisemmällä tavalla prosentteina.

Audio Precision

THD+N Ratio vs FREQUENCY

01/02/15 20:29:28



A-A THD+N VS FREQ.at1

Kuva 39. THD+N prosenttiasteikolla esitettyinä.

5.6 Yhteenveto mittauksista

Järjestelmälle tehdyt mittaukset osoittavat sen teknisen toimivuuden. Taajuusvaste osoittautui valmiille järjestelmälle tehdyissä mittauksissa erittäin hyväksi etuvastuksesta huolimatta. Lisäksi järjestelmän kuulokeissa on 1 k Ω :n potentiometrillä toteutettu voimakkuussäätö, joten etuvastuksettomasta kytkennästä ei olisi hyötyä vasteen kannalta, mikäli kuulokkeen voimakkuussäätö ei ole täysillä.

Impedanssivasteista oli hyötyä muuntajan häviöiden laskennassa sekä vahvistimen toimintaedellytysten varmistamisessa. Lisäksi muuntajan lähtöimpedanssimittauksista voidaan päätellä häviöiden vähentyneen, kun muuntajat on tapitettu pienemmälle lähtöjännitteelle, kuin ne olivat taajuusvastemittauksia tehtäessä.

Mitatut säröt ovat puhetaajuuksilla eli 80 Hz:stä ylöspäin riittävän pieniä eli alle 0,1 %:a. Tämä särötaso on niin pieni että se häviää laitteiston kohinan ja tilassa olevan muun äänen alle. Simultaanitulkkausjärjestelmää käytettäessä tilassa on tietenkin muuta ääntä eli äänentoistolaittein vahvistettu ns. lattiakieli ja ihmisten aiheuttama häly.

6 YHTEENVETO

Työn lähtökohta oli edullisen langallisiin ja kuulokkeisiin ja kaiutinlinjajamuuntajiin perustuvan simultaanitulkkauusjärjestelmän toimivuuden tutkiminen, rakentaminen ja dokumentointi.

Lähtökohtana ollut idea käyttää kaiutinlinjajamuuntajien käytöstä simultaanitulkkauuslaitteiston kuulokesignaalin jakelussa osoittautui alustavissa testeissä toimivaksi. Valmiille järjestelmälle tehdyt mittaukset osoittavat, että yksinkertaisella kytkennällä saavutetaan toimintavarmuuden lisäksi myös hyvä äänenlaatu. Alkuperäisestä ajatuksesta poiketen järjestelmän vahvistimiksi käyvät myös edullisemmat tavanomaiset päätevahvistimet, eikä 70:n tai 100 V:n kaiutinlinjalle tarkoitetun vahvistimen käyttö ole välttämätöntä. Järjestelmästä tuli myös helposti laajennettava ja kaapelointitopologialtaan vapaa, mikä oli tavoitteenakin.

Vastaavien järjestelmien toteuttaminen voi tulla sopivin edellytyksin jopa edullisemmaksi kuin tässä työssä esitellyn järjestelmän rakentaminen tuli. Kannattavaksi järjestelmän teki myös se, että toteutetun järjestelmän käyttöaste on hiljalleen noussut järjestelmän valmistumisen jälkeen jopa odotettua enemmän.

LÄHTEET

- [1] "Tulkkausta eri menetelmillä," Suomen kääntäjien ja tulkkien liitto, [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.sktl.fi/kaantaminen_ja_tulkkaus/tulkiksi/tulkkausta-eri-menetelmilla/ (Luettu 27.9.2014).
- [2] Wikipedia, "Tulkkaus," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tulkkaus> (Luettu 27.9.2014).
- [3] [www-dokumentti]. Saatavilla: http://en-us.sennheiser.com/downloads/download/file/4106/SysConfig_Infrared.pdf (Luettu 10.12.2014).
- [4] [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.listentech.com/static/media/uploads/support%20info/listen_technologies_digital_ir_manual.pdf. (Luettu 12.10.2014).
- [5] [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.emsd.gov.hk/emsd/e_download/pee/infrared_interference_emsdweb.pdf (Luettu 7.12.2014).
- [6] Televic conference, "Televic conference products," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.televic-conference.com/en/confidea-wired> (Luettu 7.2.2015).
- [7] Wikipedia, "Ihmisiäni," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Ihmisiäni>. (Luettu 9.2.2015).
- [8] "Äänipää," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.aanipaa.tamk.fi/taajuu_1.htm. (Luettu 9.2.2015.).
- [9] Wikipedia, "Headphones," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://en.wikipedia.org/wiki/Headphones>. (Luettu 14.1.2015).
- [10] Northwest Audio & Video Guy, "Headphone impedance Explained," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://nwavguy.blogspot.fi/2011/02/headphone-impedance-explained.html> (Luettu 14.1.2015).
- [11] Beyerdynamic Gmbh, "Professional Headphones and Headsets," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://north-america.beyerdynamic.com/shop/media/infomaterial/Headphones_Headsets_E_2011.pdf (Luettu 14.1.2015).
- [12] Northwest Audio & Video Guy, "Headphone & Amp impedance," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://nwavguy.blogspot.fi/2011/02/headphone-amp-impedance.html> (Luettu 14.1.2015).
- [13] E. B. A. Lepoluoto, "Audiokirja," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://ari.lepoluo.to/audiokirja/Audiokirja_luku_4.pdf (Luettu 14.1.2015).
- [14] Powersoft, "Damping control," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.powersoft-audio.com/en/downloads/technical-notes/806-damping-control/file> (Luettu 14.1.2015).

- [15] Ahoranta, Lesch ja Sundell, Yleisjakson sähkötekniikka, Porvoo: WSOY, 1994.
- [16] B. Whitlock, "Audio Transformers – Bill Whitlock Chapter 11," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://jensen-transformers.com/wp-content/uploads/2014/09/Audio-Transformers-Chapter.pdf> (Luettu 13.11.2014).
- [17] Sescom, "Audio Transformers History," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.sescom.com/audio-transformers-history.asp> (Luettu 12.1.2015).
- [18] R. Elliott, "High Voltage Audio Systems," Elliot Suond Products, 10. 6. 2012. [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://sound.westhost.com/articles/line-amps.html> (Luettu 14.1.2015).
- [19] J. Hurri, "Piirianalyysi 2, Muuntaja, opintomoniste".
- [20] Crown, "Guide to constant-voltage systems," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.crownaudio.com/media/pdf/amps/138905-1_10-05_constant_voltage.pdf (Luettu 11.2.2015).
- [21] Crown Audio, "Discontinued Amplifier Products," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.crownaudio.com/media/pdf/legacy/128418.pdf> (Luettu 5. 2.2015).
- [22] Audico Systems Oy, "Audico kaiuttimet," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.audico.fi/files/128/VSP140_sarjan_kaiuttimet.pdf (Luettu 31.1.2015).
- [23] "Room Eq Wizard 5.01 -ohjelman käyttöohje".
- [24] AFMG, "Easera SysTune Manual," 2014.
- [25] "Importance of the Impedance Curve," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.mh-audio.nl/impedancecurve.asp> (Luettu 16.12.2014).
- [26] RME, "Latest manual for Babyface, version 2.1 09/2013 (1,11 MB)," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.rme-audio.de/download/bface_e.pdf (Luettu 2.1.2014).
- [27] Rane Corporation, "Audio Specifications," [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.rane.com/note145.html> (Luettu 3.1.2014).
- [28] M. Chasin, "Canadian Acoustics," [www-dokumentti]. Saatavilla: http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCkQFjAB&url=http%3A%2F%2Fjcaa.caa-aca.ca%2Findex.php%2Fjcaa%2Farticle%2Fdownload%2F2166%2F1913&ei=noXUVOy0K-WeywPWuYL4Cw&usq=AFQjCNGw0qev8srqj_hZ_i6WmGDw1mociA&bvm=bv.85464276,d.bGQ (Luettu 6.2.2015).
- [29] E. B. Brixen, "Facts about speech intelligibility," DPA microphones, [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.dpamicrophones.com/en/Mic-University/Tech-Guide/Facts-about-speech-intelligibility.aspx> (Luettu 6.2.2015).