

Simo Rautio

SÄHKÖSTAATTISEN
KAIUTTIMEN SUUNNITTELU
Muuntajan vaikutus taajuusvasteeseen

Opinnäytetyö
Information Technology


Toukokuu 2016




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 30.05.2016
Tekijä(t) Simo Heikki Juhana Rautio	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Information technology
Nimeke Sähköstaattisen kaiuttimen suunnittelu	
Tiivistelmä Kaiuttimen tehtävänä on muuntaa sille syötetty sähköinen signaali ääneksi mahdollisimman tarkasti. Kaiuttimen tuottamaan ääneen vaikuttaa suuresti myös kuunteluympäristö ja sen heijastukset, joiden usein haitallista vaikutusta äänentoistoon sähköstaattinen kaiutin pyrkii vähentämään mm. suuntaamalla äänen kohti kuulijan korvia. Sähköstaattiset kaiuttimet ovat erittäin suuntaavia ja kaiuttimia tulee kuunnella niiden välisellä keskilinjalla sekä etäisyyden tulee olla sama molempiin kaiuttimiin. Opinnäytetyössäni käsittelen sähköstaattisen hybridikaiuttimen suunnittelua, rakennetta sekä joitakin teknisiä yksityiskohtia sekä rakensin toimivan kaiutinparin. Kaiuttimen bassotoiston parantamiseksi suunnitelin ja rakensin transmissiolinjaperiaatteella toimivan bassokotelon. Lisäksi tutkin sähköstaattisen kaiuttimen jännitteenkorotusmuuntajan vaikutusta taajuusvasteeseen kolmella erilaisella muuntajalla sekä mitasin muuntajien sähköisiä ominaisuuksia.	
Asiasanat (avainsanat) Sähköstaattinen kaiutin, Elektrostaattinen kaiutin, audiomuuntaja, taajuusvaste, transmissiolinja bassokaiutin	
Sivumäärä 35 + liitteet 4	Kieli Suomi
Huomautus (huomautukset liitteistä)	
Ohjaavan opettajan nimi Osmo Ojamies	Opinnäytetyön toimeksiantaja Oma aihe

DESCRIPTION

	Date of the bachelor's thesis 30.05.2016
Author(s) Simo Heikki Juhana Rautio	Degree programme and option Information technology
Name of the bachelor's thesis Design of electrostatic loudspeaker	
Abstract <p>The purpose of loudspeakers is transforming an electrical audio signal to sound with maximum precision. Listening room echoes affect sound and usually decrease subjective sound quality.</p> <p>Electrostatic loudspeakers are very directional. The sound is heard in a small area. This is not necessarily convenient, but it usually means improved sound quality in a given space. The listener must be situated precisely in the center line of each speaker and the distance from each speaker to the listener must be equal.</p> <p>In this diploma work I will design a hybrid electrostatic loudspeaker and explain some basic details of its mechanical construction and frequency response. For better bass reproduction I will design and build a transmission line speaker box for a conventional dynamic loudspeaker to use with the electrostatic speaker.</p> <p>I did some research of audio step-up transformer electrical parameters and the effect on frequency response using three different transformers. I also measured the electrical parameters and the effect on frequency response.</p>	
Subject headings, (keywords) Electrostatic loudspeaker, ESL, transformer, frequency response, transmission line woofer.	
Pages 35 + appendix 4 pages	Language Finnish
Remarks, notes on appendices	
Tutor Osmo Ojamies	Bachelor's thesis assigned by Own work

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	KAIUTTIMEN TOIMINTA	2
2.1	Kaiutinelementtien toimintaperiaatteita.....	2
2.2	Sähköstaattisen kaiuttimen ominaisuuksia	4
2.3	Sähköstaattisen kaiuttimen osat	6
2.4	Staattorit.....	7
2.4.1	Staattorin rakentamisen vaiheita	8
2.4.2	Reunan eristäminen.....	12
2.5	Kalvo.....	13
2.6	Kalvon käsittely	14
2.7	Kokoonpano.....	16
3	BASSO-OSA.....	18
3.1	Bassokotelon rakentaminen	20
4	ELEKTRONIIKKAOSA	24
4.1	Muuntajat.....	25
4.2	Polarisaatiojännitelähde	26
5	MITTAUKSET	27
5.1	Muuntajien mittaustaulukot	27
5.2	Kaiuttimen mitatut taajuusvasteet eri muuntajilla	30
6	LOPPUPÄÄTELMÄT	33
	LÄHTEET	35

LIITTEET

- 1 Hammond 125E muuntajan kytkentävaihtoehdot
- 2 Trafomic RS audiomuuntajan muuntajan mittaustaulukot
- 3 Noratel 230/6 verkkomuuntajan mittaustaulukot
- 4 Hammond 125E muuntajan mittaustaulukot

1 JOHDANTO

Äänentoistoketjun viimeinen komponentti, kaiutin, muuntaa sähköisen signaalin ilmassa eteneviksi paineenvaihteluiksi, jotka me kuulemme äänenä tai tunnemme fyysisenä värähtelynä. Sähköstaattinen kaiutin, toiselta nimeltään elektrostaattinen kaiutin eli lyhyesti ESL, on varmasti monelle hieman tavallista, perinteistä dynaamista kaiutinta vieraampi. Lyhenne ESL tulee englanninkielisestä sanoista ElectroStatic Loudspeaker. Sähköstaattisella kaiuttimella on mahdollista toteuttaa tavanomaista dynaamista kaiutinta suuntaavampi, pienempisäröinen sekä vaihetoistoltaan tarkempi kaiutin.

Ääni on korvan havaitsemia paineenvaihteluita ilmassa, yleensä taajuusalueella 20 – 20 000 hertsiä. Taajuuden yksikkönä käytetään hertsiä, Hz, joka vastaa yhtä värähdystä sekunnissa. Värähtelyn taajuus vaikuttaa aistitun äänen sävelkorkeuteen. Pienemmät taajuudet kuullaan matalina ja suuremmat taajuudet korkeampina ääнинä (Tuomela 2001). Äänen voimakkuuden yksikkönä käytetään yleisesti desibeliä, dB, joka on logaritminen yksikkö. Desibelin vertailuarvo 0 dB on 20 mikropascalin painetta vastaava teho, joka vastaa noin kolmen metrin päässä lentävän hyttysen ääntä (Wikipedia 2016). Äänenpaineen kymmenkertaistuminen vastaa kymmenen desibelin ja satakertaistuminen kahdenkymmenen desibelin kasvua.

Sähköstaattisen kaiuttimen kehitys juontaa juurensa vuoteen 1923, jolloin Edward W. Kellogg ja Chester W. Rice saivat Bell'in laboratoriossa tehtäväkseen kehittää musiikin toistamiseen sopivaa laitetta. Kellogg saikin vuonna 1934 patentin sähköstaattiselle kaiuttimelle. Kaupallisesti ensimmäinen merkittävä sähköstaattinen kaiutin oli englantilaisen Peter Walkerin suunnittelema Quad-kaiutin, joka tuli markkinoille 1957. Tämän jälkeen markkinoille tuli sähköstaattisia kaiuttimia lukuisilta muiltakin yrityksiltä kuten KLH, Acoustat, Stax ja MartinLogan.

Tässä lopputyössä on tarkoituksena käydä läpi hieman sähköstaattisen kaiuttimen toimintaperiaatetta, ominaisuuksia, rakennetta sekä suunnitella ja rakentaa sähköstaattinen hybridikaiutin. Tutkin myös kolmen erilaisen muuntajan vaikutusta sähköstaattisen kaiuttimen taajuusvasteeseen erilaisilla ensiöpiirin sarjavastusten arvoilla. Samalla on tarkoitus tutkia mitkä muut asiat vaikuttavat sähköstaattisen kaiuttimen taajuusvasteeseen. Koska sähköstaattinen kaiutin ei kykene kovin voimakkaaseen bassotoistoon,

suunnittelin sekä rakensin myös bassokaiuttimen, joka toimii myös sähköstaattisen kaiuttimen jalustana.

2 KAIUTTIMEN TOIMINTA

Hyvän kaiuttimen tulisi mielestäni kyetä toistamaan taajuusalue noin 20 ja 20000 hertsin välillä mahdollisimman tasapainoisesti, pienellä säröllä sekä tuottamaan riittävä, vähintään noin 100 dB maksimiäänepaine kuuntelupaikalle. Transienttitoiston, eli kuinka nopeasti kaiutin pystyy reagoimaan signaalin alkamiseen ja loppumiseen, tulisi myös olla hyvä. Myöskin ajallinen tarkkuus, eli äänisignaaliin samaan aikaan olevat äänet, tulisivat saapua kuuntelijan korvaan myös samaan aikaan.

Kuuntelutilan lattiasta tai seinistä heijastuneet äänet joutuvat kulkemaan pidemmän matkan kuin suoraan tuleva ääni. Heijastuneiden ääniaaltojen pidempi kulkumatka aiheuttaa niihin vaihesiirtoa suoraan ääneen verrattuna. Jos heijastuneessa äänessä on samaan aikaan paineen huippukohta ja suorassa äänessä paineen minimikohta, ääniaallot kumoavat toisiaan. Vastaavasti paineen huippukohtien sattuessa samaan aikaan ääniaallot vahvistavat toisiaan. Heijastukset tekevät kaiuttimen taajuusvasteesta epätasaisen, jossa on vuorotellen korostumia sekä kuoppia. (Tuomela, 2001). Äänen heijastuksessa edestakaisin huoneessa syntyy seisovia aaltoja, jotka tekevät varsinkin bassoalueella taajuusvasteen epätasaiseksi.

2.1 Kaiuttimelementtien toimintaperiaatteita

Kaiuttimien toimintaperiaatteita on olemassa useita, näistä voisin mainita pietsosähköisen, dynaamisen, magnetostaattisen ja sähköstaattisen sekä myös ilman varsinaista kartiota toimivan plasmakaiuttimen. Ehdottomasti yleisin näistä on dynaaminen (Tuomela 2001). Dynaamisessa kaiuttimelementissä, riippumatta onko se basso, keskiäänielementti vai diskanttielementti, ilmaa liikuttaa kalvo johon on kiinnitetty magneettikentässä liikkuva puhekela. Bassoelementeissä liikkuva kalvo on useimmiten kartion muotoinen, kun taas diskanttielementeissä suositaan kalotin muotoa. Kaiuttimen liikkuvaa kalvoa, riippumatta sen muodosta, kutsutaan yleensä kaiuttimen kartioksi.

Kaiuttimen kartioon kiinnitetty puhekela, joka on yleensä käämitty joko lakkaeristeisestä kupari- tai alumiinijohtimesta, on ripustettu joustavalla ripustuksella kaiuttimen runkoon. Ripustus antaa puhekelalle mahdollisuuden liikkua eteen- ja taaksepäin, mutta

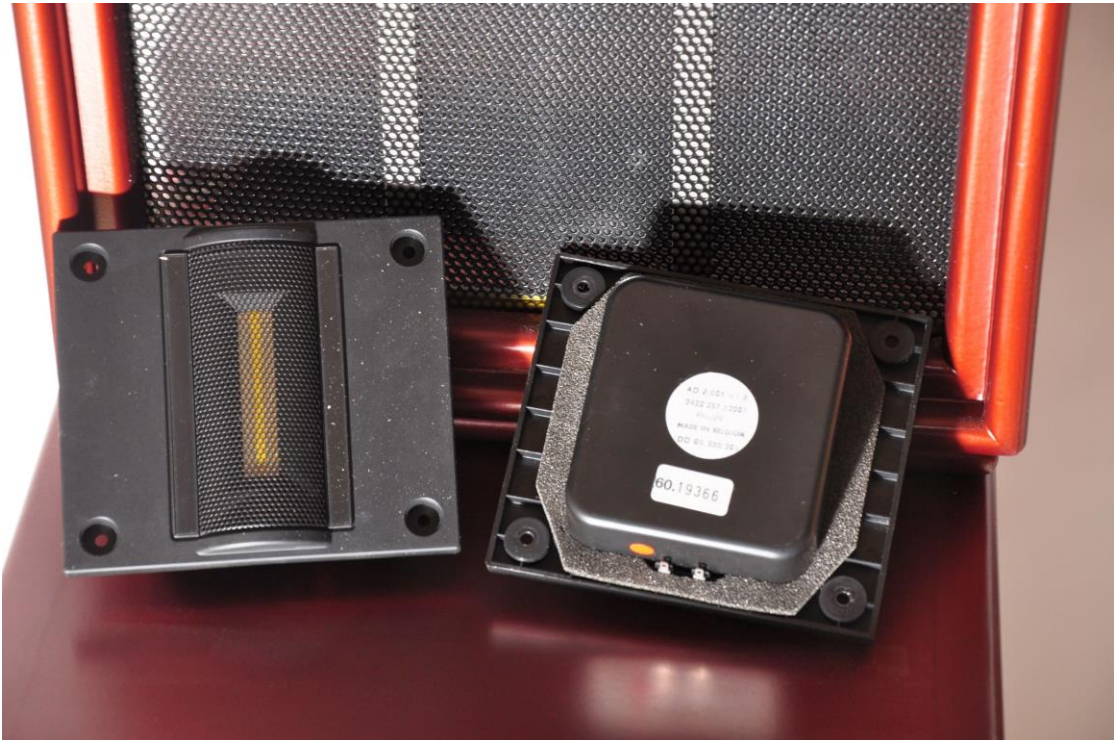
pyrkii pitämään puhekelan sivusuunnassa tarkasti paikallaan. Kartio on myös ulkoreunastaan kiinnitetty ilmatiiviisti kaiuttimen runkoon (Tuomela, 2001).

Kaiuttimen moottori koostuu viidestä peruskomponentista. Nämä ovat magneettiasetelman etulevy ja napakappale jotka muodostavat ilma- ja magneettikentän, puhekela sekä magneettiasetelman takalevy. (Dickason, 2006). Puhekelaan, joka on ilma- ja magneettikentän sisällä, johdetaan muuttuva sähkövirta, se aiheuttaa sähkömotorisen voiman joka vuorostaan liikuttaa kaiuttimen kartiota sähkövirran tahdissa (Tuomela, 2001).



KUVA 1. Erilaisia dynaamisia kaiuttimelementtejä, taustalla sähköstaattinen kaiutin

Nauhakaiuttimessa ei ole erillistä kartiota, vaan magneettikentässä oleva, useimmiten alumiinista tehty ohut nauha toimii samanaikaisesti sekä puhekelana että kartiona. Tästä on vielä erityinen muunnos, jossa alumiininen nauhaspiraali on kiinnitetty esimerkiksi kapton-muovista tehtyyn tasokalvoon.



KUVA 2. PhilipsAD21601RT/8 dynaamiset tasokalvoelementit, taustalla sähköstaattinen elementti.

Tasokalvoisia dynaamisia elementtejä kutsutaan monesti, tosin hieman virheellisesti, myös nauhaelementeiksi.

Plasmakaiuttimessa ääni muodostetaan korkeataajuuksisen sähkövirran, joka aiheuttaa hallitun valokaaren yleensä torven sisällä, amplitudia moduloimalla. Koska plasmakaiuttimella ei ole ollenkaan kartiota, se kykenee toistamaan korkealle ultraäänialueelle saakka. Matalien taajuuksien voimakas toisto ei ole ainakaan vielä nykytekniikalla saatavissa, mutta luonnosta löytyy tästäkin jokakesäinen esimerkki, salamaniskusta tullut ukkosen ääni.

2.2 Sähköstaattisen kaiuttimen ominaisuuksia

Sähköstaattisessa kaiuttimessa kalvon liikuttamiseen käytetään magneettikentän sijasta sähkökenttää. Kaiuttimessa on erittäin ohut ja kevyt, sähköisesti varattu kalvo kahden kiinteän johdinhilan, eli staattorin, välissä. Kun staattoreiden välille kytketään kalvon molemmin puolin vastakkaisvaiheisena jännite, toinen staattori pyrkii vetämään ja toinen työntämään kalvoa. Vaikka sähkökentän aiheuttama voima on pieni verrattuna dy-

naamisen kaiutinelementin magneetin ja puhekelan aiheuttamiin voimiin, on myös kalvon massa lähes olematon. Myös kalvoon vaikuttava sähköinen voimakenttä on lähes homogeeninen, eli kalvon joka kohtaan vaikuttava voima on tasainen. Tämä tarkoittaa, että kalvo liikkuu joka kohdalta samassa vaiheessa koko pinta-alaltaan, lukuun ottamatta aivan kalvon kiinnityskohtien lähialueita.

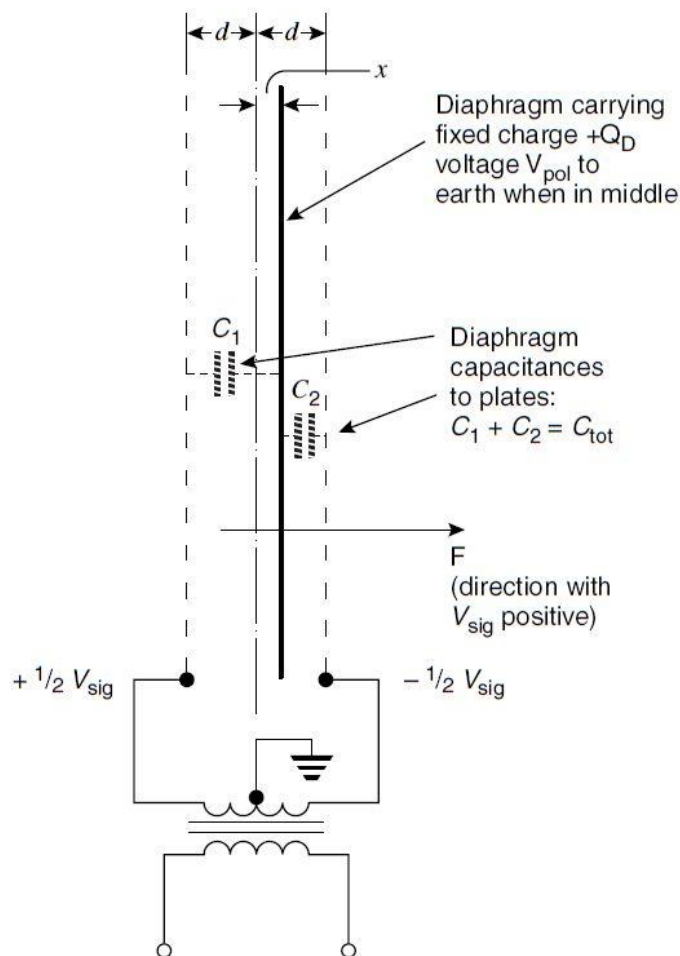
Sähköstaattisen kaiuttimen etuina tavalliseen dynaamiseen kaiuttimeen verrattuna ovat erittäin pieni särö, liikkuvien massojen vähäisyydestä johtuva nopeus sekä suuri suuntaavuus. Normaalissa kuunteluhuoneessa tavallisen kaiuttimen äänestä suuri osa tulee eri pintojen kautta heijastuneina ja tämä sotkee äänentoistoa sekä ajallisesti että taajuustoiston kautta. Sähköstaattinen kaiutin on toistoalueellaan melko suuntaava, eli kaiutin säteilee ääntä lähes kohtisuoraan eteen- sekä taaksepäin. Matalammilla taajuuksilla suuntaavuus perustuu dipolirakenteeseen ja korkeammilla taajuuksilla säteilevän pinnan suuruuteen.

Normaalin dynaamisen kaiuttimen säteilemä äänikenttä on matalilla taajuuksilla lähes pallomainen, kun taas suora sähköstaattinen kaiutin säteilee äänen lähes tasoaaltona suoraan eteen ja taaksepäin. Tällä on vaikutusta varsinkin äänitteen stereokuvan hahmottamiseen, sillä huoneesta heijastuvat äänet vaikeuttavat äänen suunnan paikallistamista. Tuomelan mukaan huoneessa heijastunut ääni kulkee pidemmän matkan kuin suoraan saapuva ääni, ja tästä kulkuaikeerosta tulee kaiuttimen taajuusvasteeseen joillekin taajuuksille korostumia ja vastaavasti joillekin taajuuksille vaimentumaa. Kaiuttimen voimakkaasta suuntaavuudesta on myös haittaa, sillä paras kuuntelupaikka on varsin pieni, ja yleensä vain yksi ihminen kerrallaan pystyy kuuntelemaan kaiutinta parhaassa kuuntelupaikassa.

Sähköstaattisella kaiuttimella on myös teknisiä rajoitteita. Matalien bassoäänien toistaminen riittävällä äänenvoimakkuudella vaatisi epäkäytännöllisen suurikokoisen paneelin, kun taas dynaamisella bassoelementillä bassotoisto saadaan toteutettua suhteellisen helposti ja pieneen kokoon. Tässä opinnäytetyössä päädyin käyttämään sähköstaattista elementtiä keskiääni- ja diskanttitaajuuksien toistamiseen ja dynaamista elementtiä bassotaajuuksien toistamiseen.

2.3 Sähköstaattisen kaiuttimen osat

Sähköstaattinen kaiutin koostuu yksinkertaisimmillaan kahdesta sähköä johtavasta, useimmiten metallisesta reikälevystä eli staattoreista, ja näiden väliin sopivalla eristemateriaalilla erotetusta, ohuesta ja mahdollisimman tiukalle pingotetusta muovikalvosta. Tämän muovikalvon, joka on käsitelty hieman sähköä johtavaksi, sekä staattoreiden väliin muodostetaan jännitelähteen avulla muutaman tuhannen voltin staattinen polarisaatiojännite. Jotta kalvoon vaikuttavat sähköstaattiset voimat olisivat suoraan suhteessa sähköiseen signaaliin, tulisi kalvolla olla vakio sähkövaraus tasaisesti joka kohdassa. Audiovahvistimelta tulevan musiikkisignaalin jännite nostetaan muuntajilla 30-100 kertaiseksi ja kytketään vastakkaisvaiheisina staattoreille, jolloin toisella puolella oleva staattori työntää ja samalla vastakkaisella puolella oleva vetää kalvoa puoleensa.



KUVA 3. Sähköinen toimintaperiaate (Borwick, 2001)

Jännite kalvon sekä staattorin välillä aiheuttaa mekaanisen voiman joka on suhteessa jännitteeseen. Voima on samansuuntainen jännitekentän kanssa. Kalvoon vaikuttava voima saadaan kaavasta

$$F = \varepsilon_0 A \left[\frac{2 V_{pol}^2 x}{d^3} + \frac{V_{pol} V_{sig}}{d^2} \right]$$

KAAVA 1. (Borwick, 2001. 111)

Jossa F = voima (N)

A = kalvon pinta-ala (m^2)

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m

V_{pol} = polarisaatiojännite (V)

V_{sig} = signaalijännite (V)

d = kalvon ja staattorin välimatka (m)

x = kalvon poikkeama staattoreiden välisestä keskipisteestä (m)

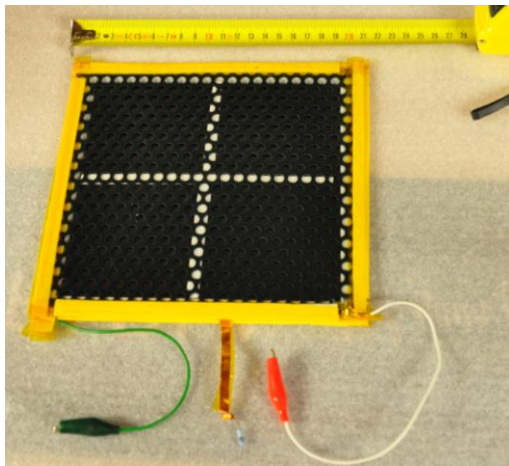
2.4 Staattorit

Staattorit voidaan toteuttaa monella eri tavalla, joista yleisimmät ovat rei'itetty teräs tai alumiinilevy taikka kehikkoon pingotettu johdinverkko. Sandersin mukaan reikälevyn reikien tulisi olla kooltaan korkeintaan staattorin ja kalvon välisen matkan suuruinen ja avoimelta pinta-alaltaan vähintään 40 prosenttia (Sanders 1995, 35-37). Reiän halkaisijan tulisi myös olla vähintään kaksinkertainen levyn paksuuteen nähden. Staattorin tulisi myös olla sähköisesti hyvin eristetty, sillä staattoreiden ja kalvon välillä on useiden tuhansien volttien jännite sekä musiikkia soittaessa etummaisesta ja taaimmaisesta staattorilevyn välillä on myös korkeajännite.

Koska sähkövarauksella on taipumus hakeutua kappaleen teräviin kohtiin, niitä tulee kaikin keinoin välttää (Hautala, 1998). Korkea jännite aiheuttaa vaaran koronapurkaukselle ja läpilyönneille, jos staattorissa on teräviä kulmia. Tästä syystä staattorin reunat tulee hioa mahdollisimman pyörittäviksi ja välttää teräviä kulmia. Staattori tulee myös pinnoittaa sekä käyttöturvallisuuden että läpilyöntien välttämiseksi sähköä johtamattomalla eristeellä.

2.4.1 Staattorin rakentamisen vaiheita

Ensimmäisen sähköstaattisen kaiuttimen kokeilukappaleen rakensin reikälevystä, jossa oli 6 mm reiät 10 mm kolmiojaolla. Kalvon kiristämiseen kokeilin kuumailmapuhallinta, jolla lämmittämällä kalvon sai kutistettua ja samalla kiristettyä. Kalvon kireys ei ollut kuitenkaan lähellekkään riittävä, joten kaiuttimen herkkyys ja maksimiäänepaine jäivät kauas tavoitteista. Johtuen kalvon liian vähäisestä pingoittamisesta, polarisaatiojännitettä nostettaessa kalvolla oli taipumus takertua jompaankumpaan staattorilevyyn.

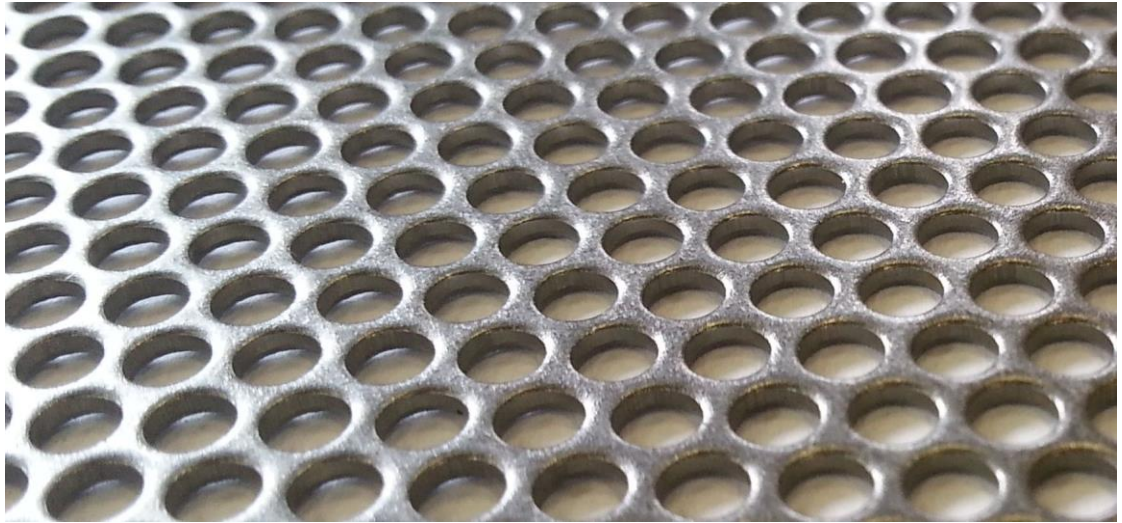


KUVA 4. Ensimmäinen prototyypikaiutin oli kooltaan vain 21 x 21 cm

Toisen prototyypin rakennettuani, joka oli kooltaan noin 20 x 80 cm, huomasin levyn reunojen terävien kärkien poistamisen tarpeellisuuden. Vaikka kaiutin toimi jo huomattavasti edellistä paremmin, ongelmana oli taas polarisaatiojännitteen nosto riittävälle tasolle. Jännitettä nostaessa staattorin reunoilta kuului pientä suhinaa, kun koronapurkaukset levyn reunoilta tekivät pikkuhiljaa tuhojaan eristeenä olleelle kaksipuoleiselle teipille. Kun teippi oli ollut aikansa altistettuna koronapurkaukselle, sen rakenne muuttui hiiltyneeksi ja palanut teippi alkoi johtaa sähköä tuhoisin seurauksin. Kun kalvon staattinen varaus vuoti pois ja äänenvoimakkuus pieneni, lisäsin hieman tehoa vahvistimelta, jolloin tapahtui staattoreiden välillä läpilyönti. Tämän läpilyönnin aiheuttama valokaari poltti kalvoon reiän ja käristi samasta kohtaa eristemaalit staattorilevystä. Myös käytössä ollut päätevahvistin pääsi tämän jälkeen huollettavien laitteiden joukkoon.

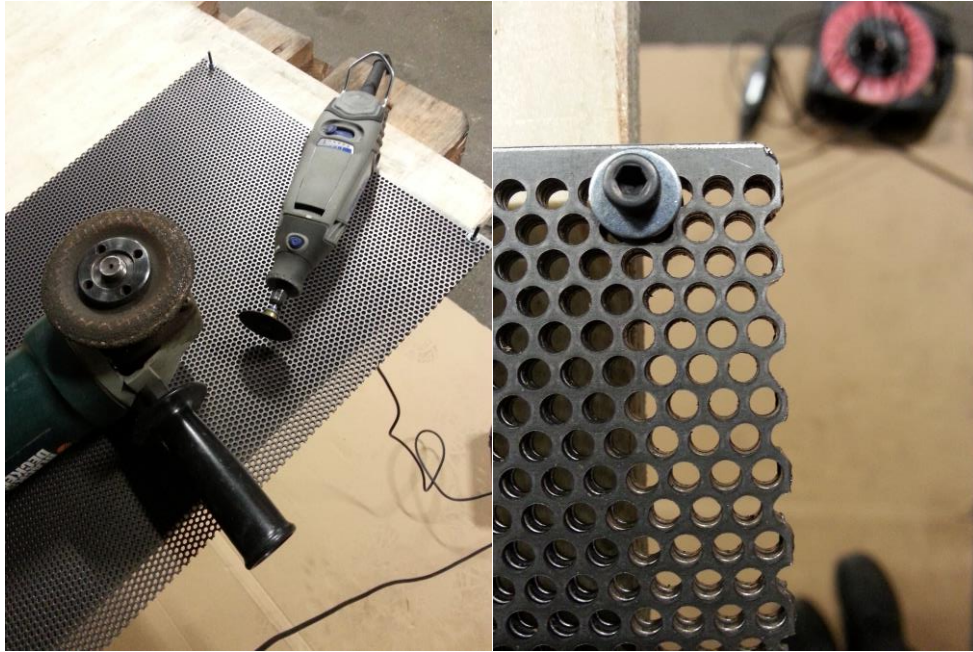
Nykyiseen kehitysversioon tilasin Perfo Oy toimittamat tanskalaisen RMIG AS:n valmistamat SMJ0340 reikälevyt. Tämän levyn valitsin, koska halusin mahdollisimman

suuren avoimen reikien pinta-alan ja tällä levyllä se oli 51 %. Levyt olivat kooltaan 1000 mm x 2000 mm ja ne leikattiin 1000 mm x 310 mm kokoisiksi Mikkelin Ammatikorkeakoulun materiaalitekniikan laboratoriossa.



KUVA 5. Lähikuva RMIG SJM0340 reikälevystä. Reikien halkaisija on 3 mm. Huomaa myös reikien reunojen pyöristys, joka johtuu levyn rei'ityksestä perforaattorilla.

Leikatuista levyistä valitsin neljä mahdollisimman suoraa reikälevyä. Levyjä leikatessa materiaalitekniikan laboratoriossa jäi huomaamatta metallileikkurin vastinraudan pieni säätövirhe, jonka seurauksena levyt olivat toisesta päästään noin millimetrin pidempiä kuin toisesta. Tämä virhe sitten kertautui jokaista seuraavaa levyä leikatessa, joten levyjen reunoilta joutui hiomaan hieman tarkoitettua enemmän, koska levyistä tuli suorakulmaisen sijaan suunnikkaita. Koska levyjen rei'itys on tehty levyyn perforaattorilla, reiän toinen puoli on hieman pyörtävä ja se kannattaa sijoittaa kalvon puolelle. Levyn reunaan jääneet vajaat reiät hioin pois mahdollisimman tarkasti.



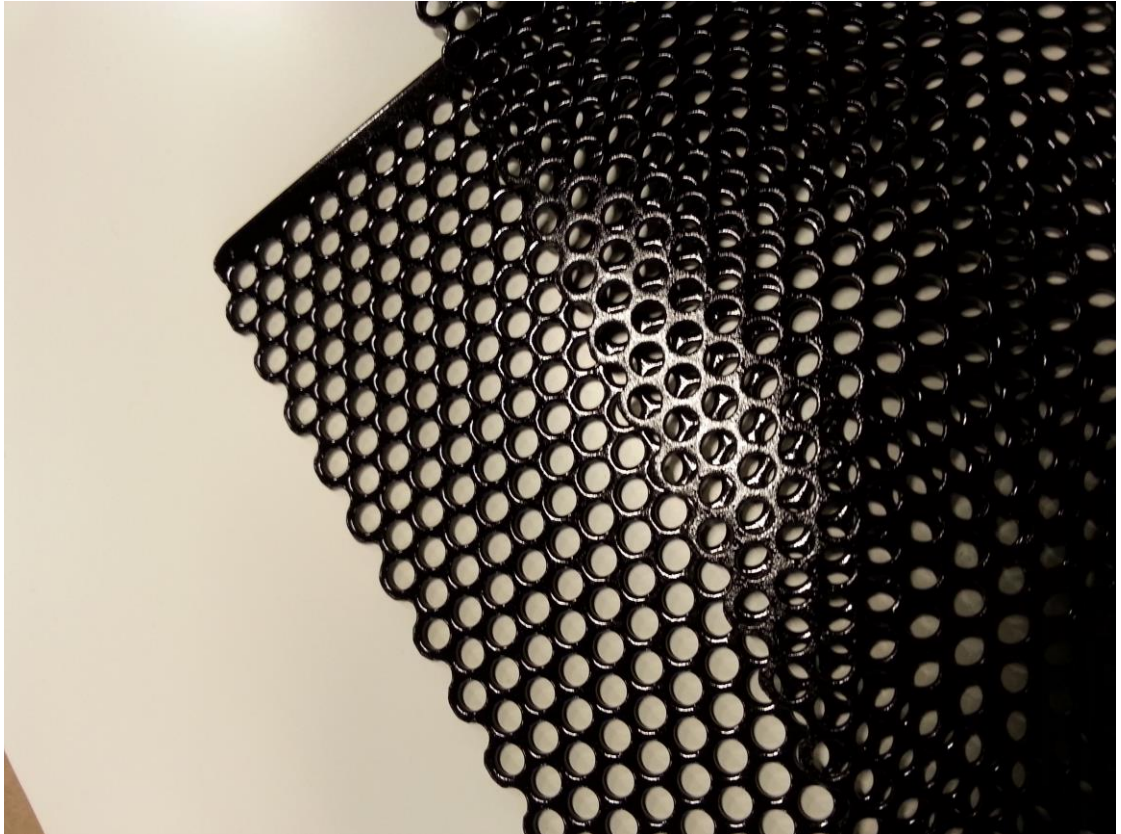
KUVA 6. Staattorin reunan hiominen pyörtäväksi koronapurkauksien välttämiseksi. Neljä reikälevyä on kiinnitetty ruuvilla ja mutterilla toisiinsa, jotta saataisiin varmasti samankokoiset paneelit.

Koska staattorilla on musiikkia soittaessa melko suuri jännite, jopa useita tuhansia voltteja, on tärkeää eristää reikälevy hyvin sähköiskujen välttämiseksi. Käytin eristämiseen kaksi kerrosta harmaata spraypohjamaalia ja tämän päälle kaksi kerrosta mustaa spraymaalia. Jokainen kerros on maalattu niin että reikälevy on käännetty roikkumaan aina vuorotellen toiselta pitkältä sivultaan. Tämän jälkeen verkot on lakattu muutamaan kertaan.



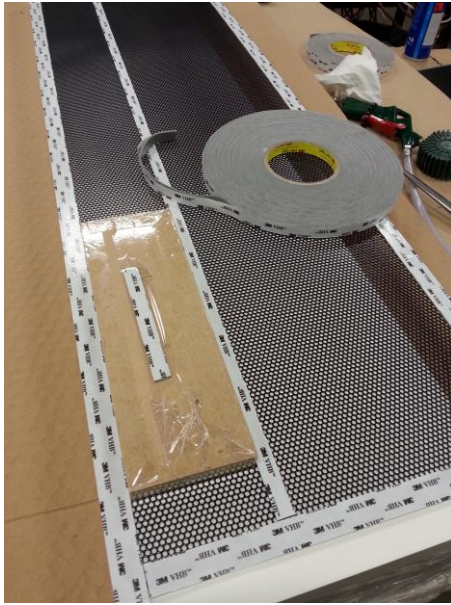
KUVA 7. Staattorilevyt ripustettu maalausta varten

Maalaamalla spraymaaleilla on melko vaikeaa saada maalia reikien sisäpinnalle, joten jauhemaalauksessa ensin hienojakoista muovijauhetta ruiskutetaan staattisen sähkön avulla kappaleen pintaan ja tämän jälkeen kappaletta kuumennetaan, kunnes muovi sulaa ja tarttuu kappaleen pintaan.



KUVA 8. Staattorin reunat pyöristettynä ja pinta maalattuna

Viimeisenä kerroksena staattoreissa on elektroniikan suojalakka, jolle ilmoitetaan läpilyöntikestävyys peräti 80 kilovolttia/millimetri.

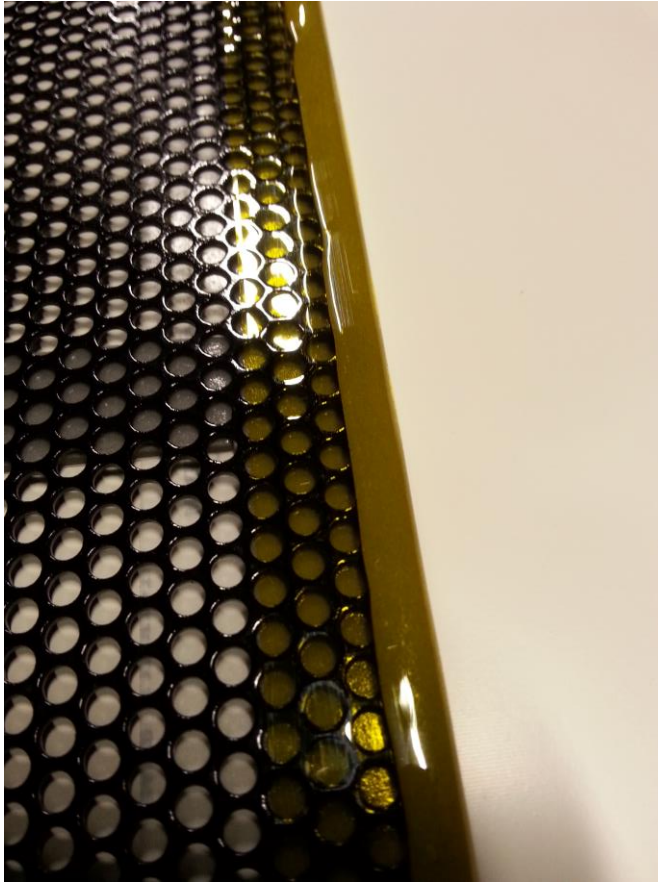


KUVA 9. Kalvon kiinnittäminen staattorilevyihin on toteutettu vahvalla kaksipuoleisella teipillä

Eristettyyn staattoriin kiinnitin 3M:n valmistamalla VHB™ RP62 kaksipuoleisella teipillä 6 mikrometriä paksun mylar-kalvon. Tämä kyseinen teippi on paksuudeltaan noin 1,55 mm, joten kiinnityksen ohella se samalla luo myös riittävän välimatkan kalvon ja staattoreiden välille. Teipillä on käytettyihin materiaaleihin erinomainen tarttuvuus sekä korkea sähköinen läpilyöntikestävyys, yli 20 kV sekä melko pieni suhteellinen permittiivisyys, joka auttaa pitämään staattorin kapasitanssin pienenä. Staattori on jaettu pystysuunnassa kolmeen kaistaan, joten kalvon vapaa värähtelypituus jäi noin 90 millimetriin.

2.4.2 Reunan eristäminen

Koska staattorilevyjen reunoihin tarvitsi RP62 teipin lisäksi eristeeksi teippiä, jolla on hyvä jännitteenkesto ja joka olisi melko venymätöntä, päädyin käyttämään siinä Kapton® polyimiditeippiä. Tällä teipillä on myös hyvä lämpötilankesto, yli 260 °C. Tätä teippiä käytin myös kalvolle tulevan kupariteipin, jolla staattinen jännite kytketään kalvolle, eristämiseen. Ennen reunan eristämistä juotin staattoreihin pätkät silikonieristeistä sähköjohtoa kytkentää varten.



KUVA 10. Staattorin reunan eristäminen

2.5 Kalvo

Kaiuttimen ääntä säteilevä kalvo on 6 µm paksuinen Mylar-kalvo, joka tunnetaan myös polyetyleenitereftalaattina eli PET-muovina. Muovi on periaatteessa sama kuin paistopusseissa käytetty muovi, tosin vain paljon ohuempana. Kalvo on kiristetty staattoreiden väliin paineilmalla toimivalla kiristyspöydällä, jossa kalvo kiristetään niin, että sillä on noin 2 % venymä sekä pituus että leveyssuunnassa. Kiristyspöytään on hyvä piirtää pienet viivat esim. 200 mm välein, johon on hyvä verrata ryppyttömäksi esikiristettyyn kalvoon tussilla tehtyjen merkkien avulla kalvon venymää.

Kiristyspöydässä on muutaman senttimetrin staattoripaneelia suurempi levy ja sen ympärille on kiristetty polkupyörän sisärenkas. Kalvo asetetaan pöydälle ja kiinnitetään esim. teipillä pöydän alapintaan. Kun sisärenkaaseen pumpataan ilmaa, kiristää rengas kalvoa tasaisesti joka puolelta. Sisärenkaaseen pumpataan ilmaa, kunnes kalvoon 200 mm välein tehdyt merkit ovat 204 mm päässä toisistaan. Tämä venymä on hyvin lähellä kalvon repeämispistettä, ja kiristettäessä on oltava tarkkana. Kun kalvo on liimattu kaksipuoleisella teipillä toiseen staattorilevyistä, tulee kalvo käsitellä hieman sähköä johtavaksi. Jos kalvoa ei kiristetä riittävän tiukalle, on vaarana, että kalvo tarttuu kiinni

staattorilevyyn, kun polarisaatiojännite kytketään kalvolle. Kalvon kireys ja vapaa värähtelypituus vaikuttavat myös kalvon ominaisresonanssitaajuuteen sekä kaiuttimesta saatavaan maksimiäänepaineeseen. Mitä kireämmälle kalvon saa kiristettyä, sitä suuremman äänenpaineen voi kaiuttimesta saada, tosin samalla kalvon ominaisresonanssitaajuus nousee.

Kalvon ominaisresonanssitaajuus on yleensä 50 ja 150 hertsin välillä, ja se riippuu huoneresonanssin lisäksi kalvon liikuttaman ilman massasta, kalvon pinta-alasta, massasta, kireydestä ja kiristys suunnasta, tukipisteiden välimatkasta sekä ilmanpaineesta, lämpötilasta ja kosteudesta. (Sanders 1995, 17). Kalvon ominaisresonanssitaajuudella kalvon liikematka saattaa kasvaa niin suureksi, että kalvo osuu staattorilevyihin. Tämä saattaa myös tapahtua bassoelementin tuottaman äänenpaineen liikuttaessa sähköstaattisen elementin kalvoa.

2.6 Kalvon käsittely

Jotta sähköstaattisen kaiuttimen toisto saataisiin mahdollisimman lineaariseksi, tulisi kalvon säilyttää ennemminkin vakio sähkövaraus kuin vakiojännite. Jos pintaresistanssi on liian pieni, sähkövaraukset pääsevät liikkumaan kalvolla ja kalvon taipuessa varaukset pyrkisivät staattorilevyä lähimpään pisteeseen.

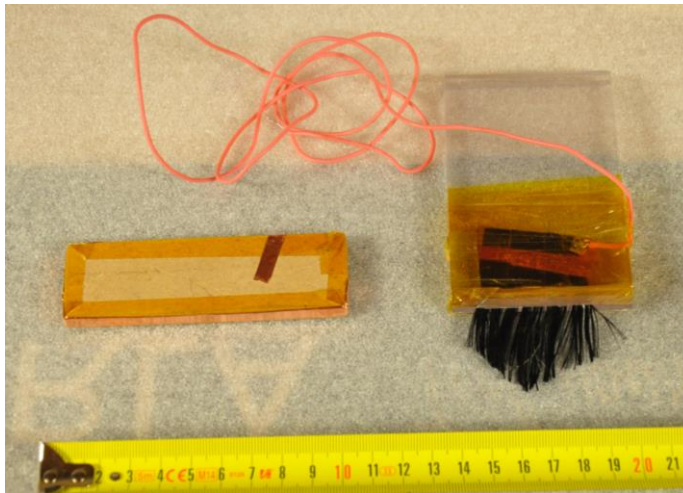
Sähköstaattisen kaiuttimen kalvon pintaresistanssin tulisi Baxandallin sekä Sandersin mukaan olla melko suuri, vähintään $10^6 \Omega$ mutta mielellään $10^9 \Omega - 10^{11} \Omega$ neliölle.

Aikaisemmin monet rakentajat ovat käyttäneet hienojakoista grafiittia kalvon tekemiseen sähköä johtavaksi, mutta tällä on muutama huono ominaisuus. Grafiitilla päällystetyn kalvon liimaaminen on hankalaa, koska liimat ja teipit eivät juuri tartu siihen. Myös kalvon pintaresistanssi on yleensä liian pieni, eli kalvo johtaa sähköä liian hyvin. Kalvon liiallinen sähkönjohtavuus lisää kalvon vahingoittumisen tai jopa palamisen riskiä läpilyöntitilanteessa (Sanders 1995). Kaiuttimen koekappaleissa kokeilin grafiitin lisäksi Contact Chemien Antistatik 100 suihkutettavaa antistaattista pinnoitetta. Tämä toimi kaiuttimessa muutaman kuukauden jonka jälkeen aine ilmeisesti oli haihtunut pois ja kaiutin lopetti toimintansa. Charlie Nimbs suositteli Techsprayn Licron Crystal antistaattiseen suojaukseen tarkoitettua pinnoitusainetta, jolla pitäisi saada mylar-kalvoon hyvin kiinnittyvä ja pitkäikäinen sähköä heikosti johtava pinnoite aikaiseksi. Sen sähkönjohtokyvyn ominaisuudet sopivat erinomaisesti tähän käyttöön.



KUVA 11. Kalvo kiinnitettynä toiseen staattorilevyyn ja valmiina pinnoitettavaksi Licron Crystal –suihkeella

Kun kalvon pintakäsittelyaine olio kuivunut, päätin yrittää mitata pinnoitteen pintaresistanssia. Koska kalvon repeämisvaaran vuoksi kalvoon ei voinut koskea tavallisilla yleismittarin piikeillä, rakensin mittapäät itse. Toinen elektrodi tuli kapton-teipillä eristetyistä levynpalasesta, jonka reunaan liimasin kupariteipin. Toisen elektrodin rakensin kahdesta polykarbonaattilevyn palasesta, joiden väliin on teipattu hiilikuituja. Paksu polykarbonaattimuovi auttoi eristämään hiilikuidut niin, että vuotovirrat jäivät niin pieniksi, etteivät ne haitanneet mittausta.



KUVA 12. Kalvon sähkönjohtavuuden tutkimista varten tehdyt mittapäät.

Itse mittaaminen on helpointa toteuttaa kytkemällä jännitelähde suuren vastuksen, tässä tapaksessa 10 megaohmin, kanssa sarjaan ja mittaamalla jännite vastuksen yli. Kalvon pintaresistanssin arvo riippui suuresti myös hiilikuituharjan kosketuspinta-alasta, joten mitään täsmällisiä ja toistettavia mittaustuloksia en saanut, mutta pintaresistanssi oli selvästi yli 10 MΩ/cm.

2.7 Kokoonpano

Kun kalvon pinnoite oli kuivunut, liimasin staattorin ulkoreunalle ohuesta kupariteipistä renkaan polarisaatiojännitteen kytkemiseksi kalvolle. Tähän kupariteippiin tinasin myös silikonieristeisen sähköjohdon kytkentää varten. Tämän jälkeen liimasin toisen staattorilevyn paikalleen ja annoin kaksipuoleisen teipin liimautua kunnolla. Käyttämani 3M:n VHB teippi vaatii noin vuorokauden ennen kuin sauma saavuttaa lopullisen kestävyuden. Mittasin myös staattoreiden välisen kapasitanssin, joka oli noin 1,18 nF. Staattorilevyjen pinta-alan, 0,3m² sekä etäisyyden, 3,2 mm perusteella voidaan laskea kapasitanssi C kaavalla

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\frac{A}{d} \right)$$

KAAVA 2. (Hautala 1998, 233)

jossa A = staattoreiden pinta-ala 0,3 m² ja d = välimatka 0,0032 m, saadaan arvoksi 0,83 nF. Koska teippien suhteellinen permittiivisyys on noin 2-3, sekä välimatka perustuu teipin paksuuteen, mitattu arvo on teorian mukainen.

Koska sähköstaattiset elementit tarvitsevat jonkinlaisen tukikehikon, rakensin sellaisen MDF-levystä.



KUVA 13. Sähköstaattisen elementin tukikehikon kasaus

Tukikehikkoon etupuolelle suunnittelin uran kaiutinkangaskehikkoa varten. Koska kaiuttimessa on useiden tuhansien volttien jännite, sähköstaattinen kaiutin kerää itseensä huoneilmasta varautuneita pölyhiukkasia. Takapuolelle jätin hieman enemmän tilaa, koska tarkoitus olisi tulevaisuudessa kokeilla sähköstaattisen elementin taakse säteilemän äänen ja ominaisresonanssin vaimentamista, esimerkiksi ohuella vaahtomuovilevyllä tai vastaavalla.



KUVA 14. Kaiuttimien osia pohjamaalattuna

Kaiuttimen kotelot sekä kehikot hioin sekä maalasin pohjamaalilla ja kittasin viimeistelynaulaimen jättämät naulanjäljet piiloon. Pintamaalauksen kaiuttimille teki Ruosteestokeskus.

3 BASSO-OSA

Koska sähköstaattinen kaiutin ei pysty toistamaan tehokkaasti matalia taajuuksia, päädyin tekemään kaiuttimeen dynaamisella bassoelementillä toimivan, erilliseen koteloon rakennetun basso-osan. Bassotoistoa varten suunnittelin ja rakensin kaiuttimeen transmissiolinjaperiaatteella toimivan bassokotelon. Koska Bassoelementin tulisi pystyä toistamaan taajuusalue noin 25 - 300 hertsin väliltä, päädyin valitsemaan bassoelementiksi tanskalaisen Scan-Speakin valmistaman Discovery sarjan 26W4543G00 elementit.



KUVA 15. Scan-Speak 26W4534G00 10-tuumainen bassoelementti

Elementissä on kokoonsa nähden melko kevyt anodisoitu alumiinikartio, matala ominaisresonanssitaajuus sekä käyttötarkoitukseen sopivan matala Qts-arvo. Elementin teknisissä tiedoissa ollessa taajuusvastekäyrässä ei myöskään ollut näkyvissä häiritseviä kartioresonansseja alle kilohertsin taajuuksilla.

Bassokoteloista kokeilin ensiksi dipolia käyttäen kahta bassoelementtiä päällekkäin noin 30 x 60 cm kokoisessa levyssä, johon oli laitettu ylhäältä katsottuna H-kirjaimen muotoon, mutta tällä vaihtoehdolla ei bassotoistossa ollut tarvittavaa voimaa eikä toisto ulottunut voimakkaana kovin alas. Taajuusvasteen olisi voinut kyllä oikaista, mutta ongelmaksi olisi tullut elementin tehonkesto sekä matalilla taajuuksilla maksimiliikepoikkeama. Hyvinä puolina tällä rakenteella olisi ollut sähköstaattisen elementin kaltainen dipolimainen suuntakuvio ja pienemmät huoneresonanssit.

Suljettu- sekä refleksikotelo olivat myös vaihtoehtoina bassokoteloiksi, mutta ne karsiutuivat pois liian tavanomaisina, sekä Sandersin mukaan transienttitoistoltaan myöskin huonoina vaihtoehtoina. Itselläni on myös aiempaa kokemusta transmissiolinjatoimisista bassoista. Torvikuormitteinen bassokotelo olisi ollut myös yksi vaihtoehto, mutta bassoalueella tehokkaasti toimiva torvikotelo on poikkeuksetta erittäin kookas, joten sekin rajautui pois epäkäytännöllisenä ratkaisuna.

Transmissiolinjan suunnittelu alkoi tarvittavan linjan pituuden ja siten myös alarajataajuuden miettimisellä. Koska kotelon koko ei saisi olla aivan järjettömän suuri, päätin linjan teholliseksi pituudeksi 2,5 metriä. Koska transmissiolinjassa matalin

resonoiva taajuus on noin neljännes aallonpituudesta, saadaan Sandersin mukaan resonanssin taajuuden kaavaksi seuraava:

$$f = \left(\frac{1}{4}\right) * \left(\frac{343 \left(\frac{m}{s}\right)}{l}\right)$$

KAAVA 3. Vaimentamattoman transmissiolinjan alin resonanssitaajuus

f = taajuus (Hz)

l= transmissiolinjan pituus (m)

äänen nopeus ilmassa 343 m/s.

Tämän perusteella 2,5 metrin pituinen transmissiolinja toimisi noin 34 Hz taajuuteen asti, jonka jälkeen taajuusvaste alkaisi laskea. Tämä siis koskee vaimentamatonta transmissiolinjaa, joka vastaisi toiminnaltaan lähinnä urkupillää.

Jottei transmissiolinjassa syntyisi keskiäänialueelle voimakkaita resonansseja, linja on vaimennettu koko matkalta polyesterivanulla. Tämä Baxandallin mukaan hidastaa äänennopeutta linjassa ja samalla madaltaa alarajataajuutta noin 20-30 prosenttia. Näin pitäisi päästä noin 25 hertsin alarajataajuuteen. Käytännössä vaimennusaineen määrä ja ominaisuudet vaikuttavat tämän, joten liiallisesti vaimennettu transmissiolinja alkaa muistuttaa taajuusvasteeltaan suljettua koteloa.

3.1 Bassokotelon rakentaminen

Bassokotelo on tehty 22mm MDF levystä PVAc puuliimalla liimaamalla sekä käyttäen viimeistelynaulainta. Levyt sahasin pääasiassa pöytäsiirkkelillä ja elementin reiän tein yläjyrsimellä.



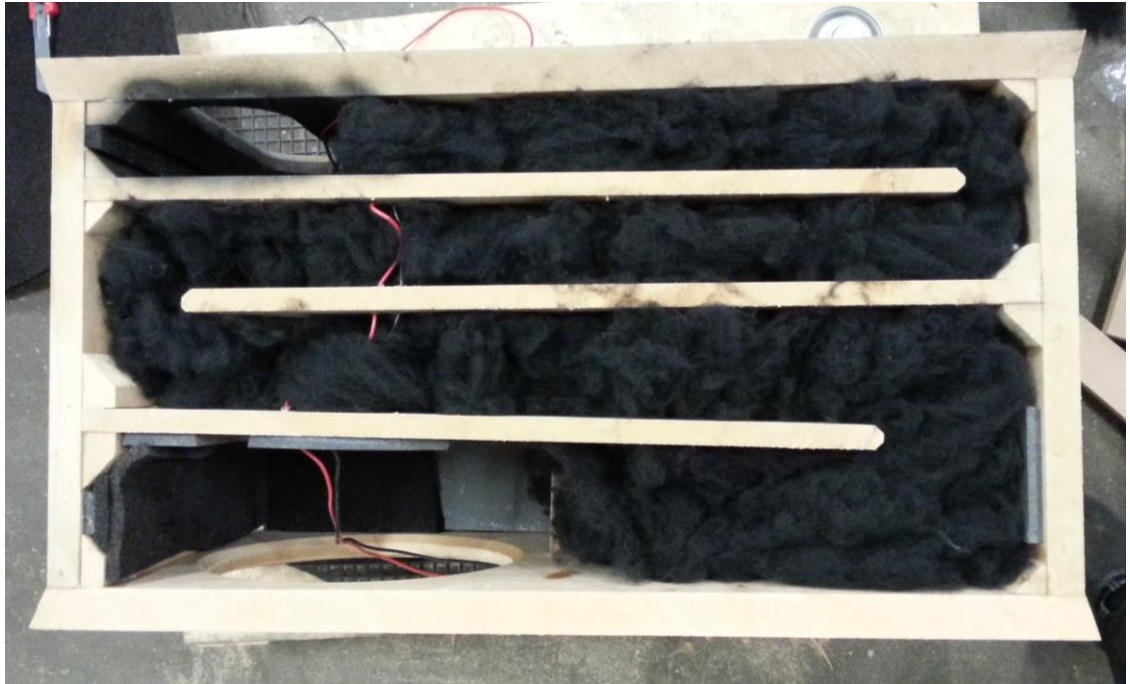
KUVA 16. Bassokotelon sivuseinien mitoitusta

Transmissiolinjakotelo on siis rakenteeltaan bassoelementin takaa aukeava, tässä tapauksessa laskostettu, vaimennettu kanava.



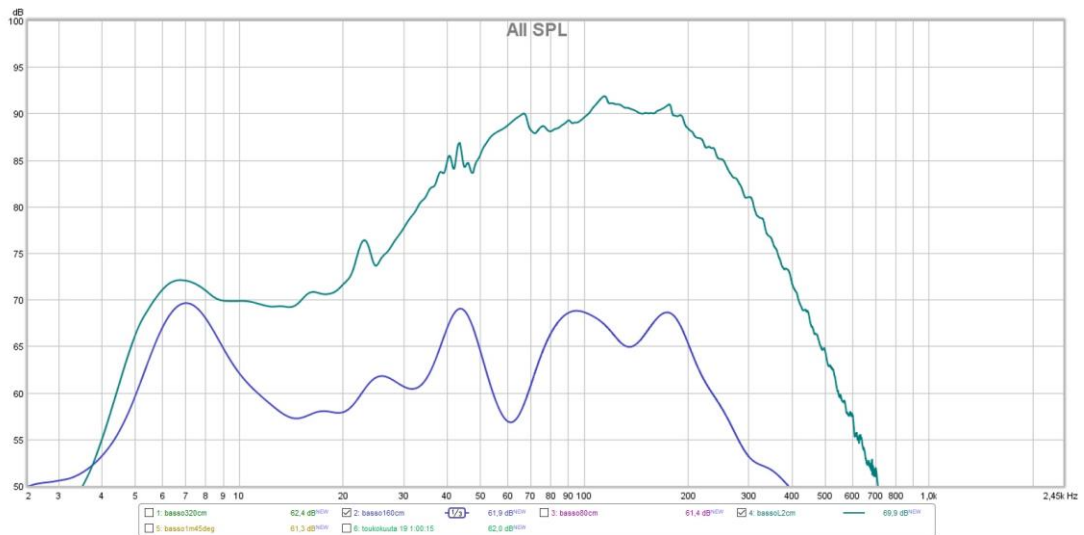
KUVA 17. Basso-osan transmissiolinjan sisäinen rakenne

Elementin takaa linjan poikkipinta-ala vastaa likipitään bassoelementin kartion tehollista pinta-alaa. Transmissiolinjan poikkipinta-ala pienenee mitä kauemmas elementistä mennään, ja juuri ennen linjan toisen pään ulostuloaukkoa pinta-ala on vähentynyt noin puoleen alkuperäisestä.



KUVA 18. Transmissiolinja on täytetty löysästi polyesterivanulla

Koska transmissiolinjaan saattaa muodostua melko voimakkaitakin keskiäänialueen resonansseja kotelon sisään muodostuvista seisovista aalloista, tulee linja täyttää vaimennusvanulla lähes kokonaan. Samalla korkeammat taajuudet imeytyvät lähes täysin vaimennusaineeseen, kun taas matalimmat taajuudet eivät vaimene niin paljoa. Koska transmissiolinja aiheuttaa viritystaajuutensa lähistöllä vaihesiirtoa, bassoelementin takasäteily linjan läpi kuljettuaan on lähes samassa vaiheessa bassoelementin eteenpäin säteilemän ääniaallon kanssa.



KUVA 19. Transmissiolinjaketelon mitayyju taajuusvaste. Ylempi on elementin lähikenttävaste 2 cm etäisyydeltä ja alempi taajuusvaste huoneessa ilman sähköisiä korjauksia.

Lähikenttävaste on muodoltaan melko lähellä bassoelementin valmistajan ilmoittamaa taajuusvastetta.

Transmissiolinjaketelon huoneessa mitatussa taajuusvasteessa näkyy huoneen aiheuttamia seisovia aaltoja 40 hertsistä ylöspäin sekä noin 7 hertsin kohdalla oleva huoneen mitoista sekä kotelosta johtuva resonanssi. Kuuntelun perusteella nämä yli 40 hertsin taajuuksilla olevat huoneresonanssit kuuluivat selvästi korostuneina.

MiniDSP prosessorilla näitä huoneresonansseja pystyy varsin hyvin vaimentamaan. Tämä tapahtuu mittaamalla taajuusvaste kuunteluhuoneessa muutamasta pisteestä kuuntelupaikalta ja sen lähistöltä. Mitatuista vasteista kannattaa katsoa keskimääräiset korostuneet taajuudet ja vaimentaa niitä. Tämän jälkeen bassoalueen yleistaso saattaa joutua hieman nostamaan. Lopulliset säädöt kannattaa tehdä kuuntelun perusteella, ennemmin korostumia vaimentaen kuin vaimentuneita taajuuksia korostaen.

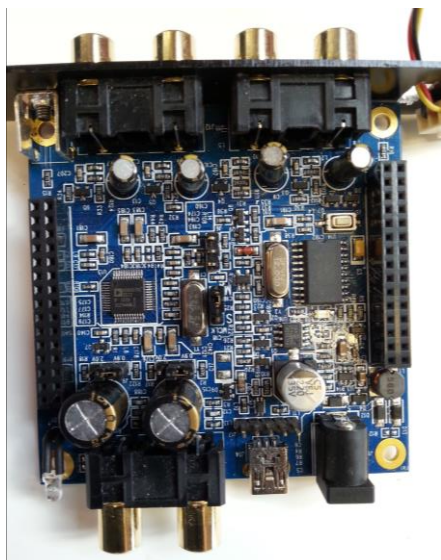


KUVA 20. Valmis kaiutin edestä, sivulta ja takaa ilman kangaskehikoita

Kaiuttimen basso-osan soundi oli mielestäni varsin onnistunut kompromissi basson napakkuuden, matalien taajuuksien voiman sekä sähköstaattisiin kaiuttimiin integroitumisen suhteen. Varsinkin bassotoiston transienttitoisto, eli kuinka nopeasti esimerkiksi bassoääni alkaa ja vaimenee, oli mielestäni hyvä.

4 ELEKTRONIIKKAOSA

Kaiuttimen elektroniikkaosa koostuu staattoreiden audiomuuntajista, joilla vahvistimelta tuleva jännite nostetaan noin 30-100 kertaiseksi sekä säädettävästä korkeajännitelähteestä. Korkeajännitelähde sisältää LM317 säädettävän regulaattorin jonka jälkeen on kylmäkatodiloisteputken invertteri, joka muuntaa 5-12 voltin tasajännitteen 300 – 800 voltin vaihtosähköksi. Invertterin toimintataajuus on noin 20 kHz ja sen jälkeen on diodeista ja kondensaattoreista koostuva jännitekertaaja.



KUVA 21. MiniDSP audioprosessori

Lisäksi on erillinen miniDSP 2x4 audioprosessori, joka hoitaa järjestelmän aktiivijakosuotimen sekä tarvittavien taajuuskorjausten tekemisen. Tämä DSP prosessori perustuu Analog Devices:in ADAU1701 prosessoriin, jossa on sisäänrakennettuna kaksi A/D muunninta, 28/56 bittinen prosessori sekä neljä D/A muunninta. Prosessorin avulla on mahdollisuus tehdä melko vapaasti säädettävät jakotaajuudet sekä sähköstaattisen elementin alle kilohertsin taajuuksilla vaatima dipolikorjaus. MiniDSP:n ohjaus tapahtuu USB-kaapelilla tietokoneella MiniDSP 2x4 Adv –ohjelmalla, ja tähän ohjelmaan saa myös tuotua REW (Room Eq Wizard) ohjelmassa tehdyt ja optimoidut taajuuskorjaustiedostot.

4.1 Muuntajat

Alun perin kaiuttimia varten tilasin Trafomic Oy:ltä audiokäyttöön tarkoitettuja RS 1:45 muuntosuhteella olevia toroidimuuntajia. Kaiuttimien valmistuttua ääni näiden muuntajien läpi ei ollut aivan odotusten kaltainen, vaan diskanttialue oli pistävän kuuloinen ja samalla hieman tummasoundinen. Muuntajan vaikutusta en osannut edes ensiksi epäillä vaan luulin vian olevan jossain muualla. Vasta kokeiltuani kaiuttimiin Hammond 125E putkivahvistimen EI-sydämistä päätemuuntajaa, alkoi epäily muuntajia kohtaan kasvaa. Muuntajien hajainduktanssin määrä vaikutti aluksi olevan syy vaatimattomaan toistoon. Hammondin muuntajalla oli ääni huomattavasti selkeämpi ja kirkkaampi. Lopulta tilasin Noratelin valmistamat toroidimuuntajat. Mitattuani hajainduktanssit muuntajista, kytkin ne kiinni kaiuttimiin, mutta mitattu taajuusvaste tai soundi eivät parantuneet.

Syy tähän löytyi lopulta käytössä olleesta päätevahvistimesta, joka toimi D-luokassa. Vahvistimen taajuusvaste on kyllä suora resistiiviseen ja hieman induktiiviseen kuormaan. Kyseinen vahvistin ei pystynyt kuitenkaan pystynyt ohjaamaan kuormana ollutta sähköstaattista kaiutinta oikein, ja vahvistimen kaiutinlähdössä ollut alipäästö LC-piiri yhdessä kaiuttimen kapasitiivisen kuorman kanssa vaikutti vahvistimen taajuusvasteeseen, aiheuttaen noin 10 kHz kohdalle korostuksen ja siitä korkeammille taajuuksille vaimentuman. Vahvistimen vaihtaminen AB-luokassa toimivaan korjasi tämän ongelman.

4.2 Polarisaatiojännitelähde

Staattoreiden ja kalvon välille tarvitaan sähköstaattisessa kaiuttimessa korkea jännite, joka tässä tapauksessa on muodostettu säädettävän jänniteregulaattorin, kylmäkatodiloistelampun invertterin sekä diodeista ja kondensaattoreista muodostuvan jännitekertojan avulla.

Jännitekertojassa kokeilin aluksi 1N4007 diodeja, joita monet vastaavien kaiuttimien rakentajat ovat käyttäneet menestyksekkäästi. Omassa koekytkenässä ne eivät kuitenkaan osoittautuneet toimivaksi. Ongelmana oli diodien päästösuuntaisen virran samumisaika jännitteen vaihtuessa estosuuntaiseksi, jolloin diodi johti osan aikaa myös estosuuntaan. Kylmäkatodiloistelampun invertterin toimintataajuus on noin 20 kilohertsiä, ja muut kaiutinrakentajat ovat taas käyttäneet verkkomuuntajia, jolloin taajuus on joko 50 tai 60 hertsiä. Diodien vaihtaminen nopeampiin 1UF4007 malleihin auttoi tähän ongelmaan.

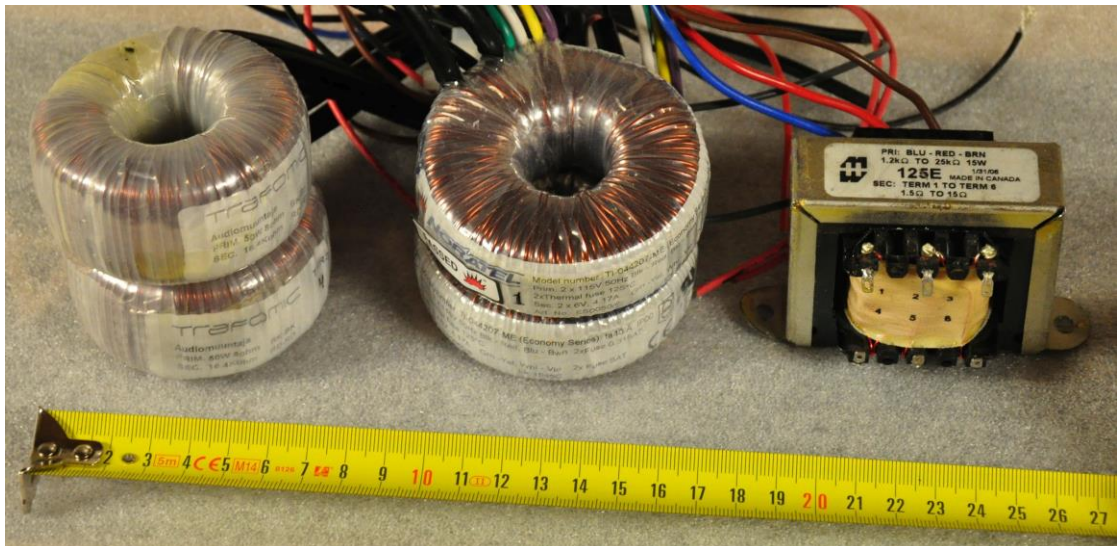
Jännitekertojan jälkeen on viisi kappaletta 10 megaohmin vastuksia rajoittamassa kalvon varautumista. Kalvolle menevä virta menee myöskin CML Innovative Technologiesin valmistaman 2ML -tyyppisen neon merkkilampun läpi, jonka rinnalla on 10 nF kondensaattori. Lamppu on suunniteltu 0,3 mA virralle ja sen kynnysjännite on 90 voltia. Kalvon varautuessa lamppu palaa ja jos kalvolle ei mene virtaa, lamppu ei pala.

5 MITTAUKSET

Kaiuttimien valmistuttua pääsin kokeilemaan kaiuttimia eri muuntajilla sekä eri ensiökäämin sarjavastuksen arvoilla. Koska kaikissa muuntajissa ei ollut vaiheistuksesta mitään merkintää, se piti tutkia kuuntelemalla sekä mittaamalla taajuusvastetta jakotaajuudella. Mielestäni ainoa tapa arvioida kaiuttimien soundia on kuuntelun perusteella tehty arvio.

5.1 Muuntajien mittaustaulukot

Mittasin sähköstaattisiin kaiuttimiin hankkimieni muuntajien hajainduktanssit Mikkelin Ammattikorkeakoululta lainaamallani Hioki 3532-50 LCR mittarilla.



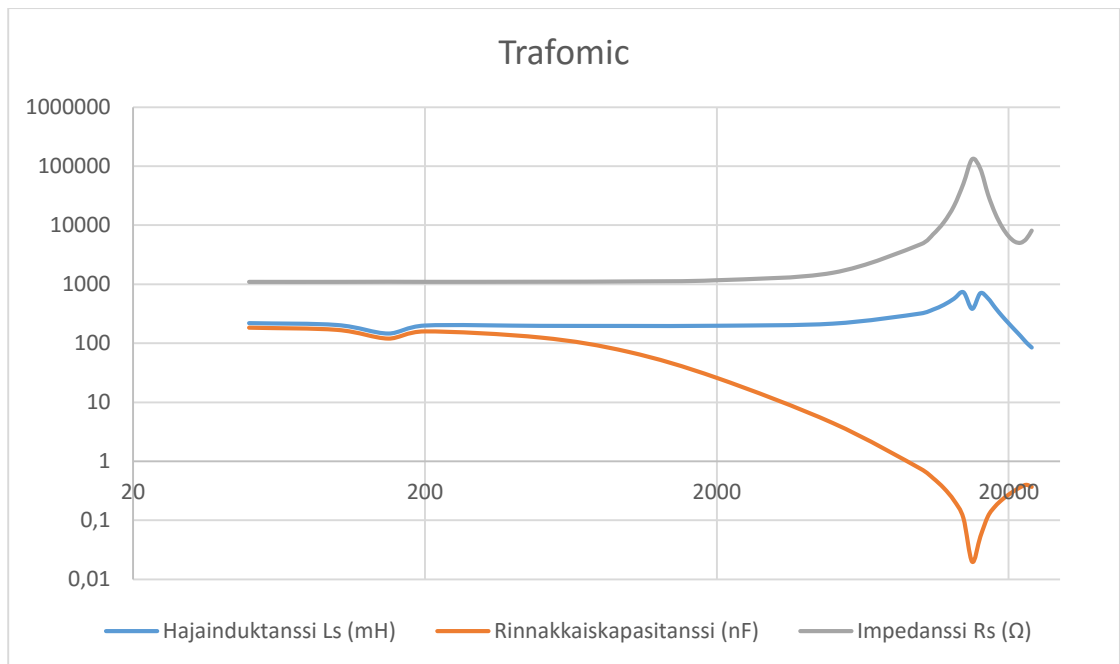
KUVA 22. Trafomic, Noratel ja Hammond -muuntajat

Muuntajina olivat Trafomic Oy:n valmistama RS 50W 1:45 audiomuuntaja, Hammond 125E putkivahvistimen päätemuuntaja sekä Noratel 50VA 6V verkkomuuntaja. Rakenteeltaan Trafomicin sekä Noratelin muuntajat ovat rengassydämissä eli toroidimuuntajia ja Hammondin muuntaja on EI levysydäminen ja jossa on kuusi ensiön kytkentänastaa.

TAULUKKO 1. Muuntajien hajainduktanssi-, kapasitanssi- sekä impedanssi-taulukot

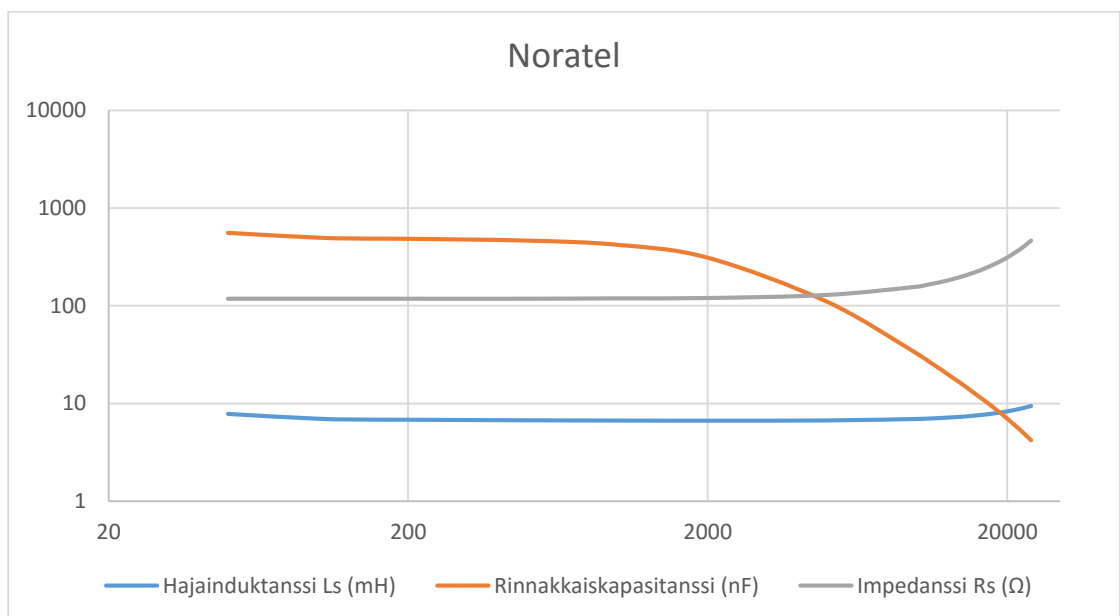
Muuntaja ja muuntosuhde	Trafomic RS 1:45	Hammond 125E 1:32	Noratel 1:38
Hajainduktanssi 100 Hz	150-204 mH	50-70 mH	6,9-7,8 mH
Hajainduktanssi 1 kHz	142-197mH	18-19,5 mH	6,7-6,9 mH
Hajainduktanssi 10 kHz	195-320 mH	16-17 mH	6,9-7,1 mH
Hajainduktanssi 20 kHz	218-296 mH	20-22 mH	8,5-9,5 mH
Rinnakkaiskapasitanssi 100 Hz	120-169 nF	780-800 nF	347-497 nF
Rinnakkaiskapasitanssi 1 kHz	70-71 nF	145-149 nF	279-420 nF
Rinnakkaiskapasitanssi 10 kHz	1,2-0,75 nF	7-8 nF	29-32 nF
Rinnakkaiskapasitanssi 20 kHz	0,14-0,29 nF	2-3 nF	6-7 nF
Sarjaresistanssi 100 Hz	1090-1095 Ω	400-420 Ω	118-150 Ω
Sarjaresistanssi 1 kHz	1108-1109 Ω	320-340 Ω	119-151 Ω
Sarjaresistanssi 10 kHz	2090-4730 Ω	1000-1100 Ω	150-200 Ω
Sarjaresistanssi 20 kHz	6455-25440 Ω	710-730 Ω	310-380 Ω

Taulukkoon on kerätty muutamalla eri taajuudella mitattuja hajainduktanssin, rinnakkaiskapasitanssin sekä muuntajan sarjaresistanssin arvoja. Taulukosta voi huomata Trafomicin muuntajan suuren hajainduktanssin ja sarjaresistanssin korkeammilla taajuuksilla sekä Noratelin muuntajan suuren rinnakkaiskapasitanssin korkeilla taajuuksilla. Seuraavassa on esitetty muuntajien hajainduktanssi, rinnakkaiskapasitanssi sekä impedanssi kaaviokuvina. Asteikot ovat selvyuden lisäämiseksi logaritmiset sekä taajuuden (vaaka-akseli) että mittausarvon (pystyakseli) suhteen.



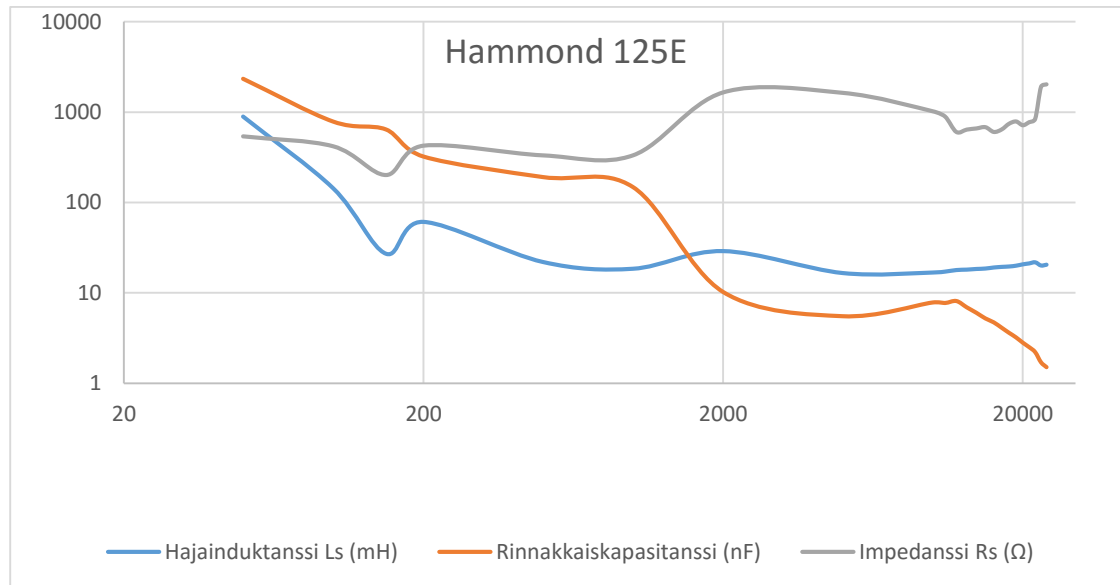
KUVA 23. Trafomic RS 1:45 Audiomuuntajan impedanssikäyrät

Kuvaajista on nähtävissä Trafomicin muuntajan noin 15 kHz kohdalla oleva todella voimakas impedanssihiikki, jonka maksimiarvo on yli 100 k Ω . Myös hajainduktanssilla on kaksihuippuinen piikki samalla taajuusalueella. Rinnakkaiskapasitanssin arvo on pieni.



KUVA 24. Noratel 50VA 6V verkkomuuntajan impedanssikäyrät

Noratelin muuntajan impedanssi nousee loivasti korkeita taajuuksia kohden ja rinnakkaiskapasitanssi laskee kohti korkeita taajuuksia. Hajainduktanssin arvot muutokset ovat melko pieniä.



KUVA 25. Hammond 125E putkivahvistimen päätemuuntajan impedanssikäyrät

Hajainduktanssin, rinnakkaiskapasitanssin sekä impedanssin arvot vaihtelevat melko suuresti koko taajuusalueella. Huomattavaa on impedanssikäyrän lasku 12 ja 22 kHz välillä.

5.2 Kaiuttimen mitatut taajuusvasteet eri muuntajilla

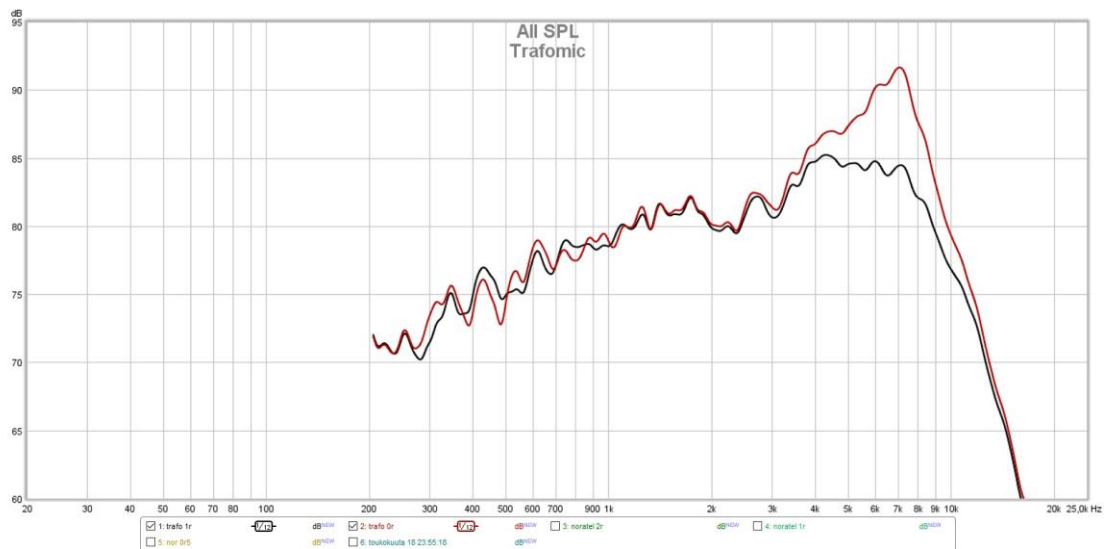
Mittasin sähköstaattisten kaiuttimien taajuusvasteet kolmella eri muuntajalla ja niiden taajuusvasteet ovat alla olevissa kuvissa. Mittalaitteistona oli PC, jossa oli M-Audio Fast Track mikrofoni vahvistin/äänikortti sekä Behringer ECM8000 mittaussmikrofoni. Ohjelmana mittauksessa käytin Room Eq Wizard 5.1 ohjelmaa. Mikrofonin jalustalla oli 120 cm korkeudella lattiasta ja 100 cm etäisyydellä sähköstaattisesta kaiuttimesta, ellei kuvateksteissä toisin mainita. Mittaukset tapahtuivat Hacklab Mikkelin tiloissa. Tilaa ei ole juurikaan akustoitettu ja varsinkin bassoalueella huoneessa on voimakkaita huoneen mitoista johtuvia bassoalueen seisovia aaltoja ja resonansseja.

Mittauksien yhteydessä on mainittu muuntajan ensiön kanssa sarjassa olleesta vastuksesta. Vastuksina käytin kaksi Ohmitec 50W 0,5Ω erittäin matalainduktanssista tehovastusta sekä matalainduktanssista 5 W 1 Ω metallioksiditehovahvistusta.



KUVA 26. Taajuusvasteen mittauslaitteisto ja mittusjärjestely

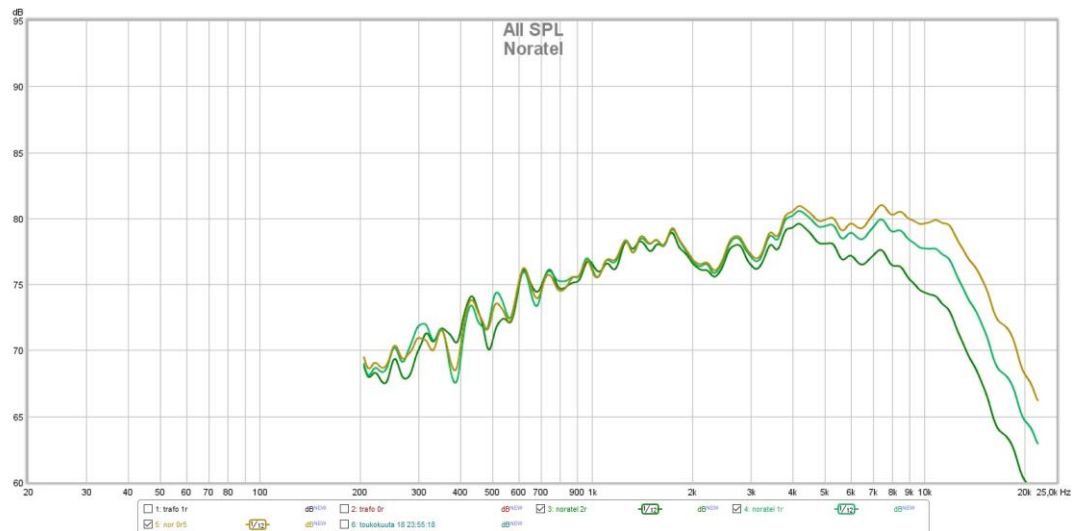
Ensimmäisessä kuvassa on Trafomicin audiomuuntajilla saatu sähkötaattisen kaiuttimen taajuusvaste 1/12 oktaavin tasoituksella 200 Hz – 22 kHz välillä.



KUVA 27. Sähkötaattisen elementin vaste Trafomicin muuntajalla. Musta käyrä on 1 ohmin sarjavastuksella ja punainen 0 ohmia

Kuvasta näkyy, että taajuusvaste alkaa laskea noin 7-8 kHz jälkeen. Trafomicin valmistamaa audiomuuntajaa käytettäessä oli alusta pitäen ongelmia, joiden syyksi en alussa osannut edes epäillä muuntajaa, sillä olihan muuntaja tilattu juuri näitä kaiuttimia varten. Muuntajan mukana tuli kyllä mittauspöytäkirja hajainduktansseista mitattuna 100

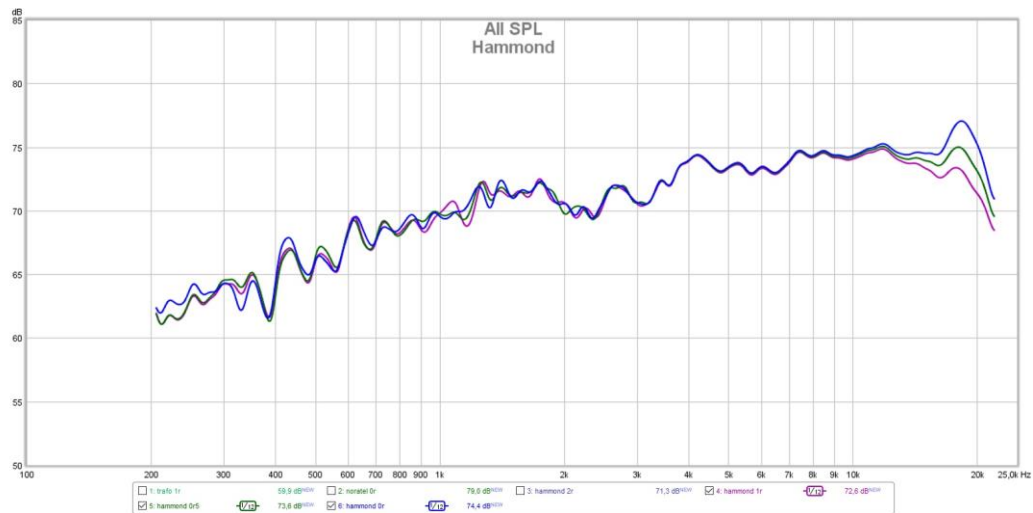
Hz taajuudella, mutta siitä ei ollut paljon apua, sillä ongelma muuntajassa on noin 7 kHz jälkeen laskevassa taajuusvasteessa. Soundi Trafomicin muuntajaa käytettäessä oli pistävä, raaka sekä korkeampien taajuuksien puuttumisen takia todella tumma. 1 ohmin sarjavastus oli mitatuista selvästi paras arvo tälle muuntajalle.



KUVA 28. Taajuusvaste Noratelin 230/6V muuntajalla. Ruskea käyrä on 0,5 ohmin, vaalean vihreä 1 ohmin sekä tumman vihreä 2 ohmin sarjavastuksella

Noratelin muuntajat ovat tavallisia 2x115/2x6 voltin rengassydänmuuntajia, joita voidaan myös käyttää sähköstaattisen kaiuttimen ohjaamiseen kytkemällä 6 V käämitykset rinnakkain ja 115 voltin käämitykset sarjaan.

Noratelin muuntajilla taajuusvaste oli selvästi edellistä parempi, taajuusvaste alkaa parhaimmillaan laskea noin 12 kilohertsin jälkeen. Kuuntelussa 0,5 Ω sarjavastuksen kanssa näillä muuntajilla sain omasta mielestäni helpoimmin kuunneltavan soundin. Ylimmän diskanttialueen vaimeneminen ei varsinaisesti häirinyt, ellei tehnyt suoraa vertailua Hammondin muuntajaan. Nämä muuntajat voisivat toimia hyvin hieman pienemmän sähköstaattisen paneelin kanssa.

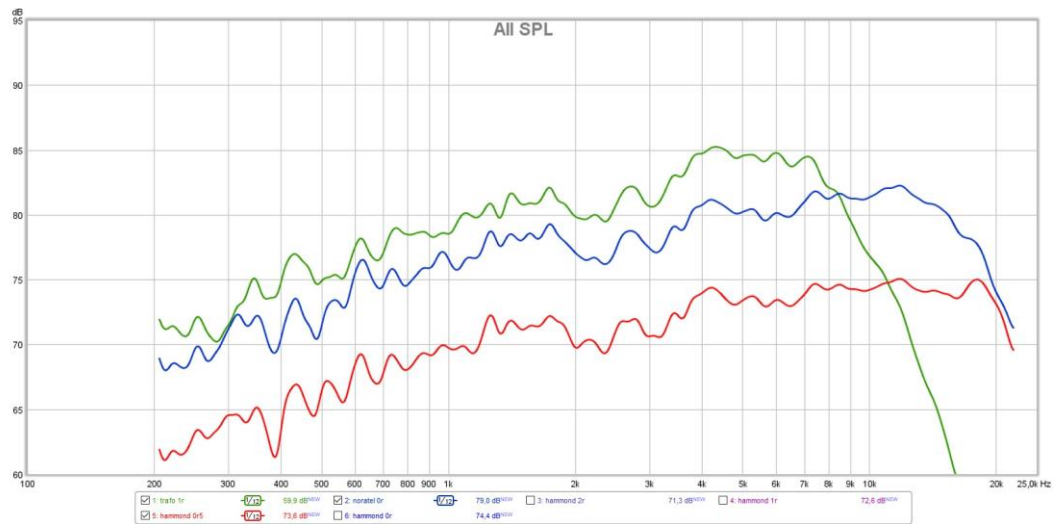


KUVA 29. Hammond 125E muuntajan vasteet; violetti 1 ohmin, vihreä 0,5 ohmin ja sininen 0 ohmin sarjavastus

Hammondin muuntaja on tarkoitettu putkipäättevahvistimen päätemuuntajaksi, mutta sitä voidaan käyttää myös sähköstaattisen kaiuttimen ohjaamiseen. Siinä on mahdollisuus useampiin eri kytkentävaihtoehtoihin, mittauksessa kytkin vahvistimen nastoihin 2 ja 5. Tämän kytkennän olin valinnut alustavien kuuntelutestien perusteella. Muuntajalla on selvästi kahta aikaisempaa muuntajaa parempi taajuusvasteikäyttäytyminen, tosin kaiuttimen herkkyys jää myös muita pienemmäksi. Muuntajalla saa sähköstaattisen kaiuttimen taajuusvasteen ulotettua aivan kuuloalueen korkeimpiin taajuuksiin asti. Soundillisesti Hammond 125E muuntajat sopivat parhaiten näille kaiuttimille. Ääni on kirkas ja ilmava, ilman taipumusta diskanttipään räikeyteen tai vaimauteen. Ehkä ainoa huono puoli näissä muuntajissa on tehonkesto, sillä niille ilmoitetaan vain 15 W 150 Hz – 15 kHz taajuusalueella.

6 LOPPUPÄÄTELMÄT

Muuntajien vaikutus kaiuttimen taajuusvasteeseen ja samalla soundiin oli yllättävän suuri. Muuntajien hajakapasitanssista tai hajainduktanssista ei suoraan voinut päätellä lopullista taajuusvastetta, vaan myös muuntajan sarjaresistanssi eri taajuuksilla vaikutti asiaan.



KUVA 30. Muuntajien erot keskenään, jokaisen muuntajan paras taajuusvaste. Vihreä Trafomic, sininen Noratel ja punainen Hammond.

Kuvassa on muuntajien taajuusvasteet kullekin muuntajalle parhaiten sopivalla etuvastuksen arvolla. Kuvasta näkyy, että Hammond 125E muuntajalla saavutetaan paras taajuusvaste, mutta noin 10 desibelin herkkyuden kustannuksella. Tämän vuoksi vahvistimelta vaadittaisiin noin kymmenkertainen teho verrattuna Trafomicin muuntajiin tuottaakseen saman äänenpaineen. Toisaalta myös suurempitehoisella vahvistimella on mahdollisuus saavuttaa parempi dynamiikka.

Muuntajan ensiön puolella oleva sarjavastus vaikuttaa taajuusvasteeseen myös paljon. Hammondin muuntajassa on vielä monia vaihtoehtoisia kytkentämahdollisuuksia ja niiden läpikäyminen vie oman aikansa. Varsinaisten mittausten jälkeen kokeilin Hammondin muuntajalle kytkentää 2 ja 4 nastojen välillä, jolloin herkkyys parani mutta soundi pysyi hyvänä, eikä taajuusvasteeseen tullut juurikaan muutoksia. Vielä muuntajan kytkentääkin enemmän soundiin vaikuttaa kaiuttimien oikean sijoituskohdan löytäminen sekä DSP-prosessorin säädöt.

Bassotoiston parantamiseksi nykyisestä voisi kokeilla suuremman dipolibasson ja transmissiolinjan yhdistelmää, jolla saataisiin eteenpäin suunnattu kardioidimainen suuntakuvi bassoaalueelle. Sähköstaattisen kaiuttimen toimintaa voisi parantaa moniltakin osin, ensimmäisenä olisi paremmin eristetty ja jauhemaalattu staattori sekä nykyistä vielä kireämmälle pingotettu kalvo. Myös muuntajien ominaisuuksien tutkiminen tarkemmin, sekä eri vaihtoehtojen testaaminen, voisi olla kannattavaa.

Yksi asia mikä on näitä kaiuttimia kuunnellessa varmistunut, on se, että paluu perinteisiin dynaamisiin kaiuttimiin tulisi olemaan vaikeaa.

LÄHTEET

Borwick, John (toim.) 2001. Loudspeaker and headphone Handbook. Oxford: Focal Press.

Dickason, Vance 2006. The Loudspeaker Design Cookbook. Peterborough: Audio Amateur Press.

Hammond Manufacturing 2007. WWW julkaisu. päivitetty 2007 <http://www.hammondmfg.com/125.htm> viitattu 24.5.2016

Hautala, Mikko 1998. Insinöörin (AMK) Fysiikka osa 1. Lahti: Lahden Teho-Opetus Oy

Nimbs, Charlie 2015 WWW julkaisu. Päivitetty 2016. <http://www.jazzman-esl-page.blogspot.com> viitattu 24.5.2016

Sanders, Roger 1995. The Electrostatic Loudspeaker Design Cookbook. Peterborough: Audio Amateur Press

Sanders, Roger 2015. WWW dokumentti. Päivitetty 2015. <http://sanderssoundsystems.com/technical-white-papers/56-transmission-line-white-paper> viitattu 24.5.2016

Tuomela, Pekka 2001. Tee itse hifi-kaiuttimia. Helsinki: Helsinki Media

Wikipedia 2016. WWW dokumentti. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Desibeli> viitattu 24.5.2016

Liite 1(4)

Hammond 125E muuntajan kytkentävaihtoehdot

Hammond 125E putkivahvistimen päämuuntajan kytkentävaihtoehdot sähköstaattiseen kaiuttimeen kytkettäessä.

Sähköstaattisen kaiuttimen impedanssi yhdellä taajuudella saadaan kaavasta

$$Z = \frac{159115}{f * C}$$

Z = sähköstaattisen kaiuttimen impedanssi Ω

f = taajuus

C = staattorilevyjen välinen kapasitanssi (pF)

Vahvistimen kytkentä	Vahvistimen kuormitusimpedanssi Z1(Ω)							Muuntosuhde 1:N
	1.5	2	3.2	4	6	8	12	$\sqrt{\frac{Z2}{Z1}}$
	Sähköstaattisen elementin impedanssi Z2 (Ω), Sinisestä ruskeaan johtimeen							
1 & 2	27,000	-	-	-	-	-	-	134
2 & 3	18,000	24,000	-	-	-	-	-	110
3 & 4	16,500	22,000	-	-	-	-	-	105
4 & 5	10,000	13,500	21,600	27,000	-	-	-	82
5 & 6	8,500	11,000	18,000	22,000	-	-	-	75
1 & 3	5,400	7,200	11,500	15,000	21,600	-	-	60
2 & 4	4,200	5,600	9,000	11,200	16,800	22,500	-	53
3 & 5	3,300	4,400	7,000	8,800	13,200	17,600	26,400	47
4 & 6	2,400	3,200	5,100	6,400	9,600	12,800	19,200	40
1 & 4	2,150	2,900	4,600	5,800	8,700	11,600	17,400	38
2 & 5	1,550	2,050	3,300	4,100	6,150	8,200	12,300	32
3 & 6	1,300	1,700	2,700	3,400	5,100	6,800	10,200	30
1 & 5	-	1,400	2,200	2,800	4,200	5,600	8,400	26
2 & 6	-	-	1,700	2,100	3,150	4,200	6,300	23
1 & 6	-	-	1,200	1,500	2,300	3,000	4,500	19

(Hammond Manufacturing 2007)

Muuntajien sähköiset mittaukset

Trafomic RS Audiomuuntajan mittaustaulukot

Muuntaja nro. 3

Taa-juus (Hz)	Hajainduktanssi Ls (mH)	Rinnakkaiskapasitanssi (nF)	Impedanssi Rs (Ω)
50	220	184	1090
100	204,6	169	1090
150	146,6	120,3	1095
200	200,2	159	1091
500	197,8	125	1096
1000	197,3	71,3	1109
2000	198,7	26	1162
5000	215,6	4,46	1557
10000	320,7	0,748	4728
11000	371,8	0,525	6905
12000	448,7	0,353	11154
13000	569,3	0,218	21030
14000	732,9	0,11	50021
15000	383,7	0,02	130560
16000	705	0,053	89922
17000	576,7	0,118	33000
18000	399,6	0,174	15657
19000	289,7	0,225	9257
20000	218,7	0,274	6455
21000	169,1	0,321	5238
22000	132,6	0,368	5016
23000	103,5	0,401	5827
24000	85,1	0,37	8055

Muuntajien sähköiset mittaukset

Noratel 230/6V verkkomuuntajan mittaustaulukot

Muuntaja nro. 2

Taajuus (Hz)	Hajainduktanssi Ls (mH)	Rinnakkaiskapasitaanssi (nF)	Impedanssi Rs (Ω)
50	7,83	557	118
100	6,99	497	118
150	6,85	486	118
200	6,83	484	118
500	6,74	464	118
1000	6,7	420	119
2000	6,68	310	120
5000	6,72	110	129
10000	6,96	32,3	157
11000	7,03	26,6	166
12000	7,12	22,3	175
13000	7,22	18,8	186
14000	7,32	16,1	198
15000	7,45	13,8	212
16000	7,59	11,9	227
17000	7,74	10,4	245
18000	7,91	9,08	265
19000	8,1	7,96	287
20000	8,31	6,99	313
21000	8,55	6,14	344
22000	8,81	5,42	378
23000	9,1	4,77	419
24000	9,42	4,21	467

Muuntajien sähköiset mittaukset

Hammond 125E muuntajan mittaustaulukot

Muuntaja nro. 1

Taajuus (Hz)	Hajainduktanssi Ls (mH)	Rinnakkaiskapasitanssi (nF)	Impedanssi Rs (Ω)
50	890	2339	540
100	143	785	419
150	27,1	642	202
200	61	322	426
500	22	191	333
1000	18,5	148	333
2000	29	10,2	1650
5000	16,6	5,5	1633
10000	16,8	7,8	1022
11000	17,2	7,7	895
12000	17,9	8,1	604
13000	18,1	6,9	641
14000	18,4	6	660
15000	18,6	5,2	682
16000	19,1	4,7	604
17000	19,4	4,1	643
18000	19,6	3,6	744
19000	20	3,2	788
20000	20,7	2,8	716
21000	21,2	2,5	774
22000	21,8	2,2	842
23000	20,1	1,7	1896
24000	20,5	1,5	2025