



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# LISN-KEINOVERKKO

Kalle Ruuth

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2016  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka

RUUTH, KALLE:  
LISN-Keinoverkko

Opinnäytetyö 54 sivua, joista liitteitä 6 sivua  
Toukokuu 2016

---

Tämä opinnäytetyö käsittelee keinoverkon suunnittelua, rakentamista, testausta ja toimintaa ja näihin liittyvää teoria- ja standarditietoa. Keinoverkko rakennettiin MSc Electronics Oy:lle, sillä yritys tarvitsi kaupallista keinoverkkoa monipuolisemman keinoverkon. Kaupalliset keinoverkot ovat usein yksivaiheisia eivätkä kestä tarpeeksi suuria virtoja. Yrityksen tarkoituksena on käyttää keinoverkkoa alustaviin johtuvien häiriöiden mittauksiin rakentamilleen- ja suunnitteilla oleville tehoelektroniikkalaitteille.

Keinoverkko toimii sähköverkon ja testattavana olevan laitteen välissä. Keinoverkko tuottaa testattavalle laitteelle stabiilin  $50\Omega$  impedanssin. Se myös estää sähköverkon häiriöiden pääsyn mittalaitteelle ja näin saadaan spektrianalysaattorilla mitattua vain testattavan laitteen aiheuttamat johtuvat häiriöt.

Keinoverkon toimintavarmuus ja turvallisuus testattiin ennen laitteen käyttöä. Keinoverkolle tehtiin useita referenssimittauksia, joissa verrattiin aina saman testilaitteen tuottamia häiriöitä eri keinoverkoilla. Mittauksia tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulun suurjännitelaboratoriossa, sekä yrityksen testausiloissa. Samasta testattavasta laitteesta löytyi myös aiempaa mittausdataa, standardin mukaisella mittausmenetelmällä. Kaikkia tuloksia verrattiin keskenään. Turvallisuus varmistettiin tutkimalla maadoituksen jatkuvuus, lämpömittaus suurella kuormituksella sekä läpilyöntilujuus.

Keinoverkko toimii erittäin hyvin ja riittävällä tarkkuudella alustaviin johtuvien häiriöiden mittauksiin. Mittalaitteen ominaisuudet ovat vähäiset ja käyttöliittymä on epävakaat. Yrityksen tarkoituksena onkin hankkia monipuolisempi mittalaite.

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

RUUTH, KALLE:  
Line impedance stabilization network

Bachelor's thesis 54 pages, appendices 6 pages  
May 2016

---

The purpose of the thesis was to design, build and test line impedance stabilization network (LISN). The study also focused on LISN functions. The LISN was built for MSc Electronics Oy. The company needed a LISN with better features than of commercial LISN. Commercial LISNs are usually only single phase networks and they lack the capability for high current. The LISN is used for preliminary testing at products development stage. It is used for testing power electronic devices that conduct emissions. Conducted emissions must be below international standards limits.

The purpose of LISN is to connect the equipment under test (EUT) to a measuring device. LISN provides stable input impedance ( $50\Omega$ ) for EUT. Power electronic devices causes' noise to the input, which in this case is LISN. With LISN attached, we can measure conducted emissions according to standard. One of line impedance stabilization networks function is to filter incoming noise from a power grid. With these noises filtered, the measurement shows only emissions, produced by EUT.

There are international standards which defines products electromagnetic compatibility (EMC). All products must meet these standards. The product must work properly in the environment, it has been designed for. Devices must work properly under electromagnetic interference (EMI) not to mention those disturbance noises that device produces. These interference levels can only be measured with appropriate LISN.

The most important target was to make it safe for user and get the functions needed with preliminary conducted emissions measurements. The LISN works very well and its accuracy is sufficient for preliminary measurements. The measuring device has a lack of features needed, for example its frequency range is too narrow. The user interface is also unstable. The purpose is to get a measuring device with more functions as soon as possible.

---

Key words: line impedance stabilization network, lisen, eut, emi, standard, noise, conducted emission

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	SÄHKÖVERKON HÄIRIÖT .....	8
2.1	Häiriötyypit .....	8
2.1.1	Jännitekatkot .....	9
2.1.2	Taajuuspoikkeamat .....	9
2.1.3	Jännitetason vaihtelut .....	10
2.1.4	Transienttiyljännitteet .....	10
2.1.5	Yliaallot.....	11
3	EMC-SUOJAUSPERUSTEET .....	12
3.1	Sähkömagneettinen yhteensopivuus .....	12
3.1.1	Kotelointi .....	13
3.1.2	Maadoitus.....	14
3.1.3	Kaapelointi .....	14
3.2	Standardin rajat ja häiriöiden suodatus .....	15
4	KEINOVERKKO .....	19
4.1	Suunnittelu .....	19
4.1.1	Toimintaperiaate .....	20
4.1.2	Toimintavarmuus .....	25
4.1.3	Turvallisuus.....	25
4.2	Rakentaminen .....	26
5	TESTAUKSET.....	33
5.1	Tyypitestausta .....	33
5.1.1	Jännitekestoisuuden testaus.....	34
5.1.2	PE-testaus .....	35
5.1.3	Lämpötestaus.....	37
5.2	Referenssimittaukset .....	39
5.2.1	Mittaustulosten käsittely .....	45
5.3	MSc Electronics Oy:n testausympäristö .....	46
6	POHDINTA.....	47
	LÄHTEET .....	48
	LIITTEET .....	49
	Liite 1. Osaluettelo .....	49
	Liite 2. Piirikaavio .....	50
	Liite 3. OrCAD simuloinnin tulos .....	51
	Liite 4. TAMK:n mittaustulokset vaiheesta L2 .....	52
	Liite 5. TAMK:n mittaustulokset vaiheesta L3 .....	53

Liite 6. TAMK:n mittaustulokset vaiheesta N .....	54
---	----

**LYHENTEET JA TERMIT**

CISPR	International Special Committee on Radio Interference, radiohäiriöihin keskittynyt IEC:n komitea.
EMC	Electromagnetic compatibility, elektromagneettinen yhteensopivuus
EUT	Equipment under testi, testattava laite
EMI	Electromagnetic interference, sähkömagneettinen häiriö
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
LISN	Line Impedance Stabilization Network, keinoverkko
RF	Radio frequency, radiotaajuus

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli MSc Electronics Oy. Yritys valmistaa tehoelektroniikkalaitteita, kuten inverttereitä, verkkoonkytkentälaitteita ja suotimia. Yrityksen pitää testata tuotteitaan tuotekehitysvaiheessa vastaamaan standardeissa määriteltyjä häiriörajoja. Tähän tarkoitukseen MSc Electronics tarvitsi kaupallisia keinoverkkoja monipuolisemman, 3-vaiheisen keinoverkon. Kaupalliset keinoverkot ovat usein 1-vaiheisia ja niiden lupaamat virran kestot eivät riitä tehoelektroniikkalaitteiden testaukseen.

Keinoverkon tarkoituksena on toimia liitäntälaitteena verkon ja testattavan laitteen välissä. Keinoverkko luo testattavalle laitteelle aina stabiilin syöttöimpedanssin, jolloin mittaukset ovat toistettavissa ja saadaan luotettavaa tietoa testattavan laitteen aiheuttamista johtuvista häiriöistä. Tehoelektroniikkalaitteet tuottavat verkkoon häiriöitä ja näitä mitataan keinoverkon mittalaiteliittimen kautta. Keinoverkko suodattaa myös verkosta tulevat häiriöt, jolloin mittauksessa näkyy vain testattavan laitteen tuottamat häiriöt. Standardeissa on määritelty laitteille häiriörajat, joita ei saa ylittää.

Sähkölaitteille on määritelty standardeissa sallitut häiriötasot, joita enempää ne eivät saa häiritä muita laitteita. Tätä kutsutaan EMC-yhteensopivuudeksi. Laitteen tulee myös toimia sille tarkoitettussa ympäristössä. Laitteen aiheuttamia häiriötä voidaan mitata luotetavasti vain keinoverkon avulla.

Johtuvien häiriöiden mittaaminen standardin mukaisesti on hyvin kallista eikä MSc Electronicsilla ole tarkoituskaan tehdä standardin mukaisia mittauksia, sillä se vaatisi mm. EMC-laboratorion, joka on hyvin kallis. MSc Electronics tarvitsee rakentamaani keinoverkkoa tuotteilleen tuotekehitysvaiheessa. Tällöin voidaan tehdä alustavia mittauksia jo aikaisessa vaiheessa, jolloin nähdään, onko laitteen tuottamat häiriöt lähelläkään standardissa määriteltyjä tasoja. Kun häiriöt havaitaan jo aikaisessa vaiheessa, laitteen rakentamiseen on helppo tehdä muutoksia.

## 2 SÄHKÖVERKON HÄIRIÖT

Idealisessa sähköverkossa jännite ja virta ovat sinimuotoista. Tähän ei kuitenkaan yleensä päästä. Sähköverkossa esiintyy häiriöitä, joita voivat aiheuttaa sähköntuottajat ja kuluttajat. Yleisimmin häiriöt johtuvat kuluttajista. Yleisimpiä ongelmia aiheuttavia häiriötyyppejä ovat virta – ja jännitepiikit, yliaallot sekä jännitetason muutokset. Pahimmillaan häiriöt voivat aiheuttaa sähkökatkoksia, jotka voivat olla tuotannon prosesseista riippuen hyvinkin kalliita yritykselle.

SFS-EN 50160 määrittelee jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuuksia. Jännitteen nimellistaajuuden tulee olla 50Hz. Yhteiskäyttöverkoissa taajuuden tulee olla 49,5–50,5Hz 99,5 % vuodesta (SFS-Käsikirja 600-2).

Yleisesti sähkönlaatu ymmärretään toimitusvarmuuden ja jännitteen laadun muodostamana kokonaisuutena. Kuluttajalle yleisimpiä ongelmia sähkön laadussa ovat laitteiden lyhentyneet eliniät ja hajoamiset sekä kohonneet loistehomaksut. Sähkön laatuun suurimmat vaikuttavat tekijät ovat kokoajan kasvamassa olevat epälineaariset kuormatyypit, kuten taajuusmuuttajat ja hakkuriteholähteet, tietokoneet, muuntajien ja kompensointilaitteistojen huoltojen puute ja yleisesti sähköverkon kuormituksen suuri kasvu ([www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi)).

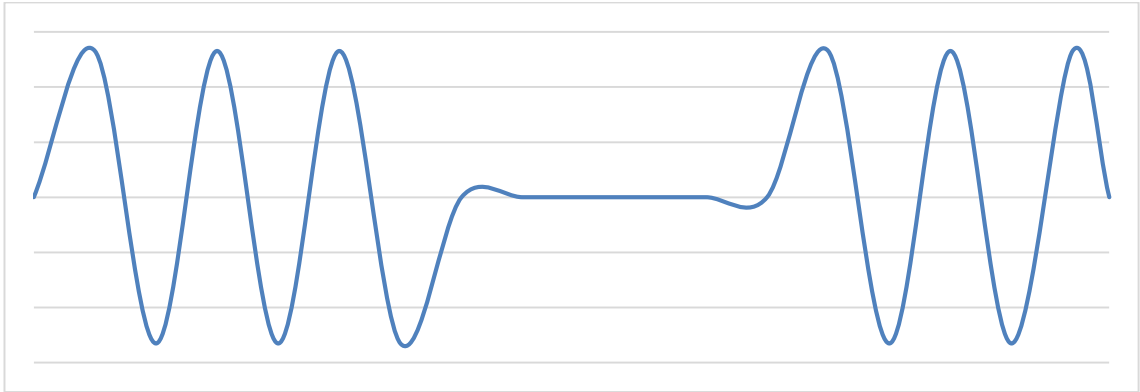
### 2.1 Häiriötyypit

Häiriötyypit voidaan jakaa kahteen pääryhmään, galvaanisesti- ja sähkömagneettisesti johtuviin häiriöihin. Galvaanisia häiriötyyppejä ovat: Maadoitusviat, jännitekatkot, epäsymmetria, jännitetason vaihtelut, yliaallot sekä poikittaiset- ja pitkittäiset transientit. Sähkömagneettisia häiriöitä ovat: radiotaajuiset häiriöt, jännitteiden aiheuttamat sähkökentät sekä virtojen aiheuttamat magneettikentät (ABB TTT-käsikirja).



### 2.1.1 Jännitekatkot

Yksi yleisimmistä häiriöistä on sähkökatko, yleisimmin katko tapahtuu keskijänniteverkon avojohtolinjoilla. Katko voi johtua häiriöstä tai korjaustyöstä. Kuvassa 1 on esitetty syötön katko.

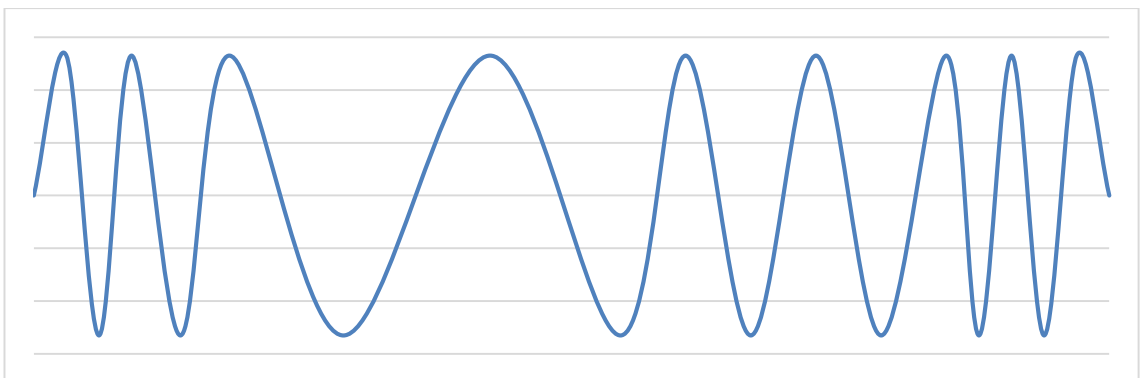


KUVA 1 Jännitekatko

Yleisimpiä katkosten aiheuttajia ovat ukkonen, myrsky, muuntajaviat, puut ja etenkin maankaivuu.

### 2.1.2 Taajuuspoikkeamat

Taajuuspoikkeamia esiintyy erittäin harvoin. Niitä voi kuitenkin esiintyä mm. pienillä jakelualueilla, kuten saarilla ja varavoimakonekäytöissä. Taajuuspoikkeaman jännitteen käyrämuoto on esitetty kuvassa 2.

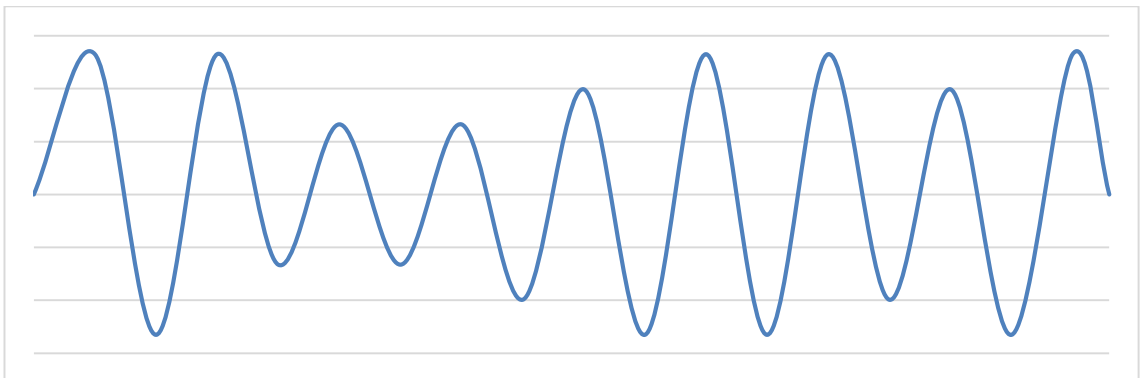


KUVA 2 Taajuuspoikkeama

Taajuuspoikkeamat johtuvat yleensä nopeista kuormituksen muutoksista yksittäisillä generaattoreilla (ABB TTT-käsikirja).

### 2.1.3 Jännitetason vaihtelut

Jännitetasoon vaikuttaa sähköasemilla olevat jännitteensäätäjät sekä verkon mitoitus ja kuormitus tilanne. Kuvassa 3 on esitetty jännitetason vaihtelut. Jännitetaso voi nousta tai laskea hyvinkin nopeasti.

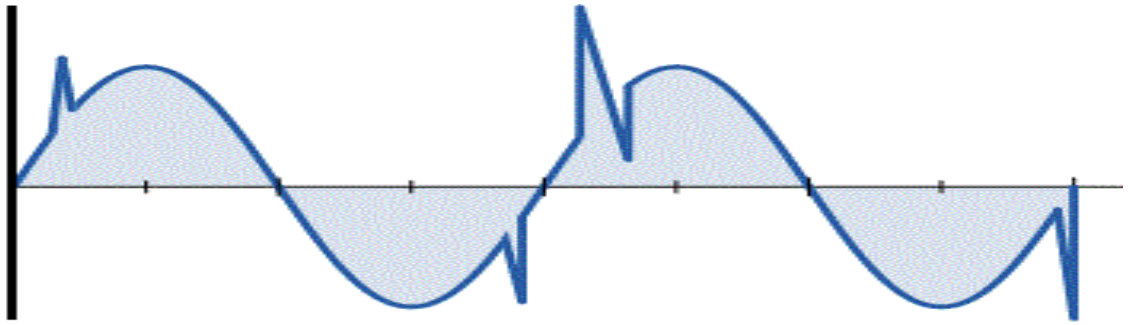


KUVA 3 Jännitetason vaihtelut

Nopeat jännitetason vaihtelut johtuvat yleensä epäsymmetrisistä vioista, mm. suurien kuormitusten kytkeytymisestä päälle ja pois. Ne voivat myös johtua luonnon ilmiöistä, kuten ukonilmasta. Salama voi indusoida linjaan jännitettä, jolloin jännitetaso kasvaa (ABB TTT-käsikirja).

### 2.1.4 Transienttilyijännitteet

Transienttilyijännitteet jaotellaan niiden keston perusteella pitkiin (yli 100 $\mu$ s), keskipitkiin (1-100 $\mu$ s) ja lyhyisiin (alle 1 $\mu$ s). Pitkät transientit voivat aiheutua mm. sulakkeen palamisesta tai kompensointilaitteiston kytkemisestä. Keskipitkät transientit voivat aiheutua mm. katkaisijat toiminnasta tai linjaan osuneesta salamasta (ABB TTT-käsikirja). Kuvassa 4 on esitetty transienttijännitteen aiheuttama käyrämuoto. Lyhyet transientit aiheutuvat paikallisten kuormien kytkennästä.

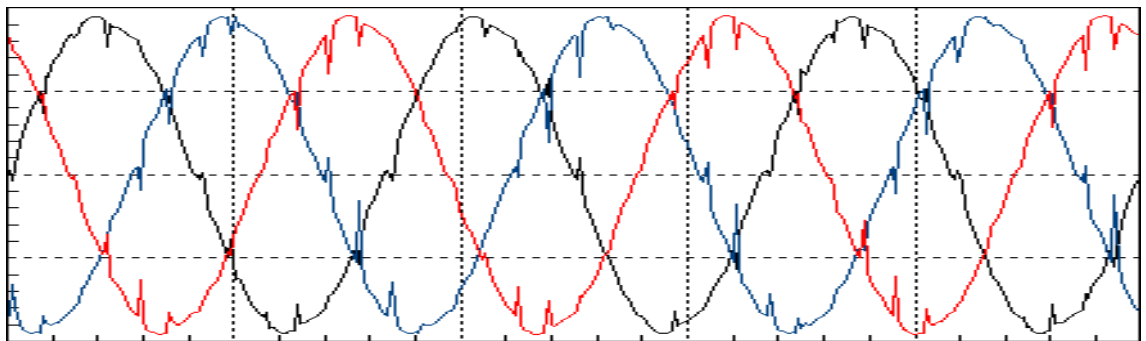


KUVA 4 Transienttiylijännite (www.nepsi.com, muokattu)

Transientteja aiheuttaa myös eristeen tai eristimen läpilyönti. Transientit voivat olla erittäin haitallisia esimerkiksi tietokoneille. Transientit saattavat käynnistää laitteita itsestään ja vahingoittaa niitä. Ne voivat myös tuhota tiedostoja (ABB TTT-Käsikirja).

### 2.1.5 Yliaallot

Yliaallot voidaan jakaa kahteen osaan, harmonisiin- ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Näiden suurin aiheuttaja on ylikuormitetut muuntajat, hakkuriteholähteet, tasasuuntaajat, taajuusmuuttajat, purkauslamput, tyristorikäytöt sekä epäsymmetriset kuormitukset. Kuvassa 5 on esitetty yliaaltojen vaikutukset jännitteen käyrämuotoon.



KUVA 5 Esimerkkikuva säröytyneistä kolmivaihejärjestelmän jännitteistä (<http://www.pqsoft.com/waveforms/harm7.htm>, muokattu)

Suurimmat yliaaltolähteet ovat taajuusmuuttajat ja vastaavat säädettävät tehoelektronikkalaitteet. Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa häviöiden kasvua ja ylikuormittavat muuntajia. Ne aiheuttavat myös mittareiden virhenäyttämiä, suojareleiden virhelaukaisuja ja nollajohtimen ylikuormitusta (ABB TTT-käsikirja). Jakelujännitteen kokonaissärökertoimen, THD tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. Särökertoimeen lasketaan mukaan kaikki yliaaltojännitteet järjestyslukuun 40 asti (SFS-Käsikirja 600-2).

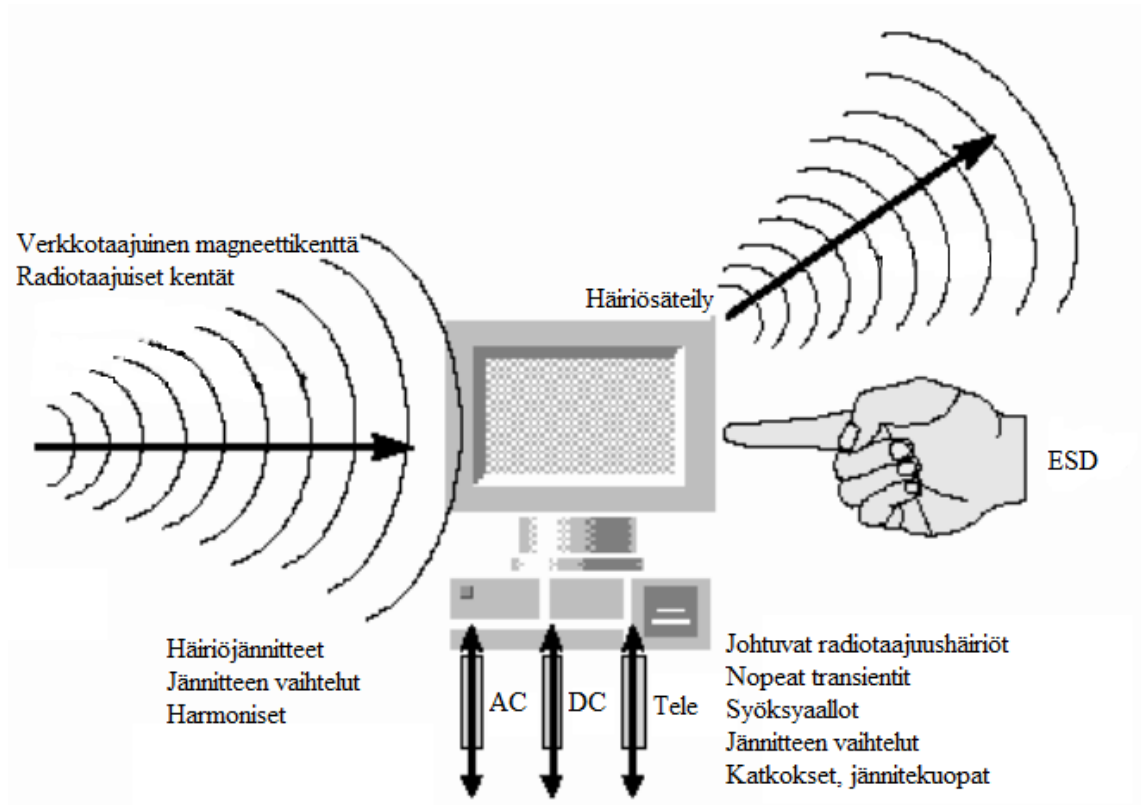
### 3 EMC-SUOJAUSPERUSTEET

Kansainvälinen IEC-komissio johtaa EMI standardin kehittämistä. Standardi on julkaistu nimellä EN50081. Standardissa on määritelty säteilevien ja johtuvien häiriöiden rajat käyttötarkoituksen mukaan. Käyttötarkoituksia on teollinen ja kaupallinen käyttö sekä kuluttajakäyttö. Normaalisti kuluttajakäytössä laitteen rajat ovat huomattavasti tiukemmat.

EMC yhteensopivuus pohjautuu EMI standardiin. Häiriöiden osalta standardi pohjautuu laitteiden kykyyn toimia häiriölähteenä, siirtää tai kytkeä häiriöitä tai ottaa häiriöitä vastaan niin, että toiminta häiriintyy. Teknisesti tarvitaan nämä kaikki kolme osaa ja mikäli yksikin osa saadaan poistettua, ei laitteella ole häiriöongelmaa.

#### 3.1 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähköisten laitteiden sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta on säädetty myös EMC-direktiivissä. Uuden EMC-direktiivin 2014/30/EU soveltaminen aloitetaan 20.4.2016 jolloin vanha EMC-direktiivi 2004/108/EY poistuu käytöstä. Käytännössä kaikkien sähköisten laitteiden pitää olla sähkömagneettisesti yhteensopivia. Tämä tarkoittaa, että laitteen tulee toimia luotettavasti sille tarkoitettussa toimintaympäristössä. Laite ei saa myöskään tuottaa sähkömagneettista häiriötä niin paljoa, että se häiritsisi muita laitteita. Tämä koskee myös tietenkin laitteeseen kuuluvia osia. Erilaisia häiriötyyppejä ovat johtuva RF-häiriö, säteilevä RF-häiriö, sähkömagneettinen pulssi, sähköstaattinen purkaus sekä erilaiset transienttihäiriöt. Alla olevassa kuvassa 6 on havainnollistettu normaalia tilannetta, jossa laite aiheuttaa -ja sietää häiriöitä standardin mukaisesti.



KUVA 6 Laite normaalissa käyttöympäristössään ([http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs\\_vaatimukset\\_1.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/EMCs_vaatimukset_1.pdf), muokattu)

Yleisesti esimerkiksi kotitalouksissa, pistorasiat on ryhmitelty. Mikäli yhteen pistorasiaan liitettäisiin häiriötä tuottava laite, sen tuottamat häiriöt leviävät samassa ryhmässä oleviin muihinkin pistorasioihin ja niiden kautta muihin laitteisiin. Tämä saattaa aiheuttaa mm. laitteiden kestoajan lyhenemistä ja jopa herkkien laitteiden hajoamista.

Suunniteltaessa sähköisiä laitteita, pitää kokoajan ottaa huomioon sen vaikutus laitteen tuottamiin ja vastaanottamiin häiriöihin. Näihin vaikuttaa tässä kappaleessa esiintuodut asiat laitteen rakenteesta.

### 3.1.1 Kotelointi

Sähkömagneettisia häiriöitä vähentää suuresti laitteen kotelointi. Mikäli kotelo on täysin umpinainen ja valmistettu sähköä johtavasta materiaalista, se toimii Faradayn häkin tapaan, jolloin staattinen sähkökenttä tai RF-taajuinen sähkömagneettinen säteily ei pääse lävitse. Tätä tapaa käytetään useissa arkipäivistä tutuissa laitteissa mm. mikro ja TV. MSc Electronicsin valmistamat tehoelektroniikkalaitteet noudattavat tätä periaatetta. Kotelo

on valmistettu metallista ja siihen on tehty vain pakolliset jäähdytysaukot sekä johtojen läpiviennit. Jäähdytysaukkojen koko on suunniteltu siten, että kun tiedetään laitteen aiheuttamat RF-taajuiset säteilevät häiriöt, ne eivät pääse aallonpituuden takia aukoista ulos. Huonosti suunniteltu kotelo saattaa jopa kasvattaa häiriöiden määrää sekä vastaanottaa niitä helpommin. Aallonpituus voidaan laskea kaavalla:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1)$$

jossa  $\lambda$  on aallonpituus,  $v$  on aallon etenemisnopeus (valonnopeus) ja  $f$  on taajuus.

Jäähdytysaukkojen koon määrittämisessä voidaan käyttää  $\lambda/16$  aukon koon raja-arvona. Kun aukon läpimitta on suurempi kuin tämä, alkaa siitä päästä säteilyä lävitse.

### 3.1.2 Maadoitus

Tärkein muistettava asia suunnitteluvaiheessa on laitteen riittävä maadoitus. Maadoituksella on suurin vaikutus laitteen sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen. Maadoituksen tarkoituksena on toimia piirin virtojen paluureittinä. Tällöin sen tulee olla mahdollisimman matala impedanssinen. Maadoitus aiheuttaa ison osan galvaanisesti kytkeytyvistä häiriöistä suoraan johtumalla, induktiivisesti tai kapasitiivisesti sekä RF-säteilyn kautta.

### 3.1.3 Kaapelointi

Kun kaapelointi suunnitellaan huolellisesti, saadaan niiden aiheuttamat ja vastaanottamat häiriöt huomattavasti pienemmäksi kuin huonolla suunnittelulla. Vaihtovirralla johtimissa esiintyy induktanssia. Varsinkin johdinsilmukoita tulee välttää, sillä tällöin johdin toimii kelan tavoin. Johtimien keskinäisillä sijainneilla on myös paljon vaikutusta induktanssiin. Induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu magneettikentän avulla johtimien ollessa liian lähellä toisiaan (ABB TTT-käsikirja). Induktiivinen kytkeytyminen voidaan johtaa induktiolaista:

$$e = M \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

jossa  $M$  on keskinäisinduktanssi (Hietalahti 2011. Tehoelektroniikan perusteet)

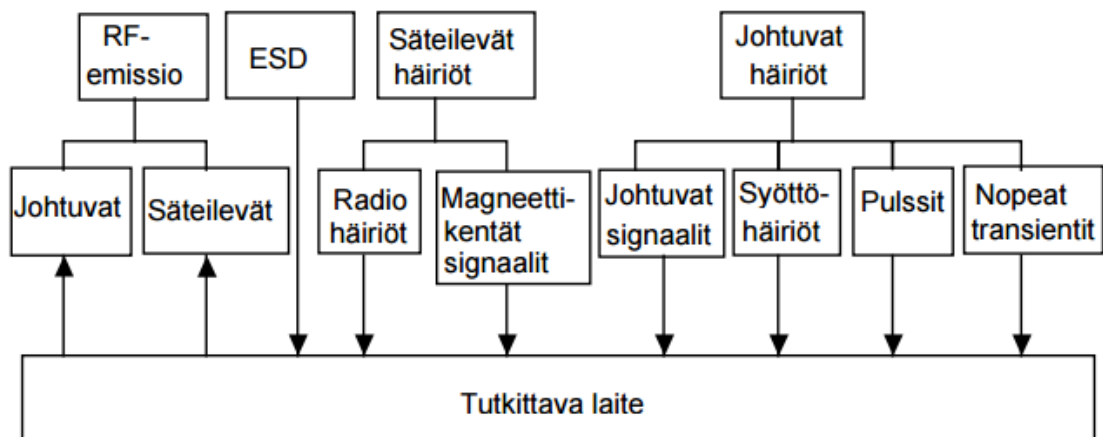
Kapasitiivinen kytkeytyminen syntyy hajakapasitanssien seurauksena johtimien sähkökentän välityksellä. Nämä ovat usein hyvin pieniä. Nämä pitää kuitenkin ottaa huomioon, mikäli tehosignaalin kytkentätaajuus on jopa 100kHz. Kapasitiivinen kytkeytyminen voidaan johtaa kaavasta:

$$i = C \frac{dv}{dt}, \quad (3)$$

jossa  $C$  on kapasitiivinen kytkeytyminen (Hietalahti 2011. Tehoelektroniikan perusteet).

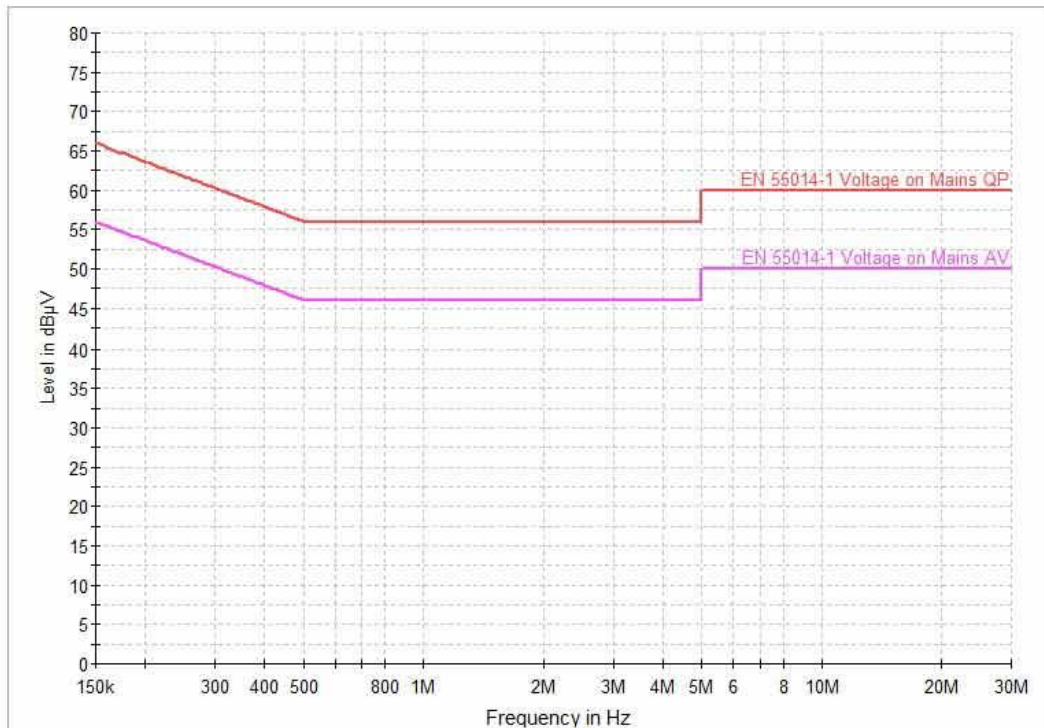
### 3.2 Standardin rajat ja häiriöiden suodatus

Kuvassa 7 on esitetty lohkokaaviona sähkölaitteiden sähkömagneettisen yhteensopivuuden eri osatekijät. Laitteen tulee läpäistä kaikki osa-alueet standardin mukaisesti.



KUVA 7 EMC–vaatimukset (ABB TTT-käsikirja 2000–07)

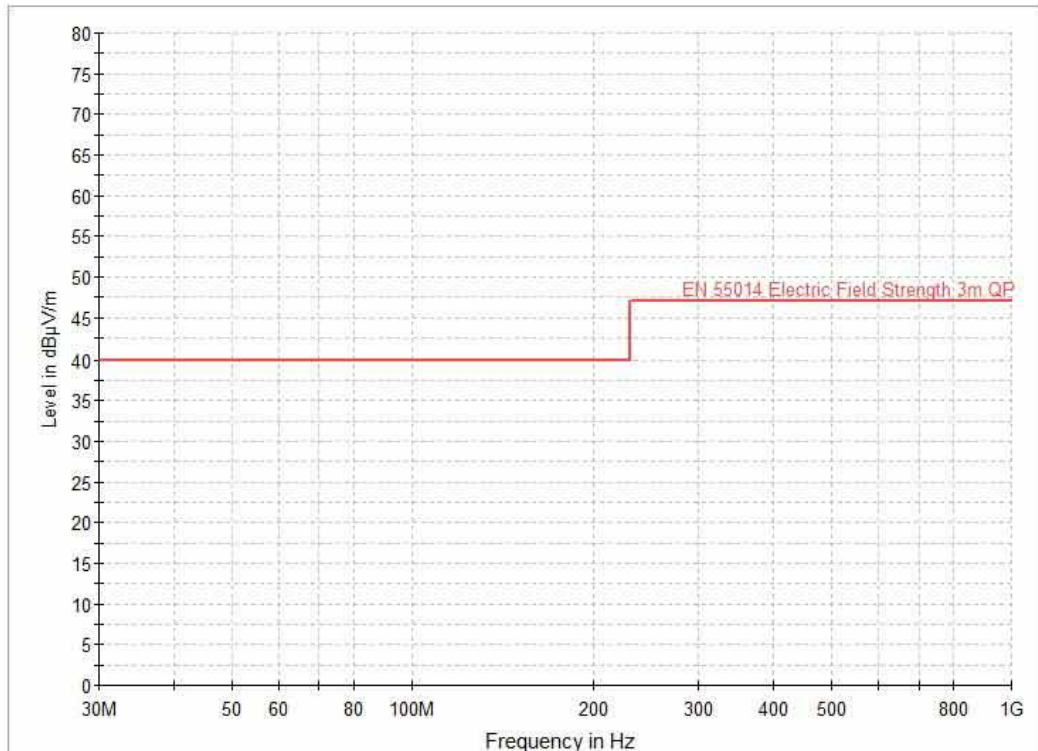
Laitteen tuottamat johtuvat häiriöt pitää olla standardissa määriteltyjen raja-arvojen alapuolella 150kHz-30MHz taajuusalueella. Kuvassa 8 on esitetty standardin mukaiset raja-arvot johtuville häiriöille quasipeak ja average mittauksissa.



KUVA 8 Johtuvien häiriöiden standardin mukaiset raja-arvot (<http://www.rfemcdevelopment.eu/en/emc-emi-standards/en-55014-1-2006>)

Laitteen tuottamat säteilevät häiriöt jaetaan yleisesti kapeakaistaisiin ja laajakaistaisiin häiriöihin. Kapeakaistaisiin kuuluu mm. radiolähettimien synnyttämät kantoaallot. Kuitenkin, suurin osa sähkölaitteista tuottaa laajakaistaista häiriötä. Näitä matalataajuisia häiriötä esiintyy erityisesti jakeluverkossa suurivirtaisten muuntajien ja kaapeleiden ympärillä. Säteilevien häiriöiden standardin mukaiset raja-arvot on esitetty kuvassa 9.





KUVA 9 Säteilevien häiriöiden standardin mukainen raja-arvo (<http://www.rfemcdevelopment.eu/en/emc-emi-standards/en-55014-1-2006>)

Johtuvien ja säteilevien häiriöiden raja-arvot on esitetty yksiköillä dBµV ja dBµV/m. Tämä helpottaa mittausdatan lukemista, kun jännite ilmaistaan desibeliarvona ja vertailuarvona on 1 mikrovolti. Desibeli mikrovoltteista voidaan laskea todelliset jännite-arvot kaavalla:

$$dB\mu V = 20 \log_{10} \left[ \frac{V}{1\mu V} \right]. \quad (4)$$

Sama kaava pätee voltteihin ja voltteihin metriä kohden.

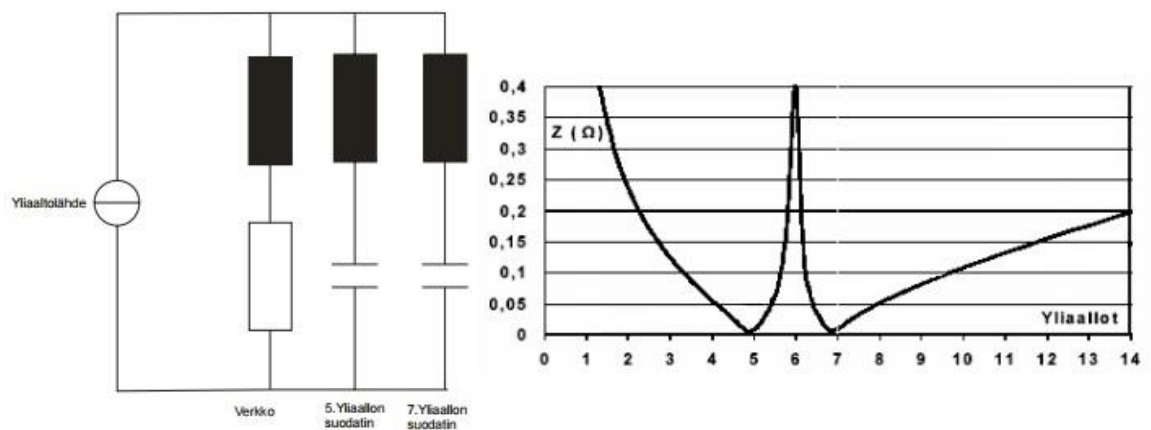
Häiriöiden suodattamiseen teollisuusverkoissa on useita tapoja. Verkko voidaan ylimitoitaa, jolloin yliaalloilta suojautumisen lisäksi voidaan pyrkiä hallitsemaan verkon loistehontarpeen vaihteluita. Verkon ylimitoittaminen ei ole taloudellisesti kannattava ratkaisu. Verkossa olevat yliaaltolähteet voidaan myös pyrkiä minimoimaan. Tämä tarkoittaa sitä, että käytetään parempia suuntaajia. Suuntaajien pulssilukua kasvattamalla se tuottaa vähemmän yliaaltoja. Yliaaltolähteiden vähentäminen on myös melko vaikeaa ja suurella

pulssiluvulla olevat suuntaajat ovat hyvin kalliita. Paras ratkaisu yliaaltojen suodattamiseen on lisätä verkkoon suotimia ns. imupiirejä. Suodattimet jaetaan passiivisuotimiin ja aktiivisuotimiin.

Passiivisuodin koostuu kondensaattorin ja kelan sarjaresonanssipiiristä. Suodatin on resonanssitilassa, kun kondensaattorin ja kelan impedanssit kumoavat toisensa, eli piirin kokonaisimpedanssi on lähes nolla. Resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (5)$$

jossa  $L$  on kelan induktanssi ja  $C$  kondensaattorin kapasitanssi. Kuvassa 10 on esitetty 5. – ja 7. yliaallon suodatuskomponentit sekä impedanssikuvaaja yliaaltojen funktiona. Kuvasta huomataan, että 5. – ja 7. yliaallon kohdalla piirin impedanssi on lähellä nollaa. Tämä mahdollistaa verkon yliaalloille pieni-impedanssisimman reitin.



KUVA 10 Yliaaltojen suodatus (Ukkonen 2003)

Aktiivisuodattimen tavoitteena on muuttaa verkosta otettu virta mahdollisimman sinimuotoiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että aktiivisuodatin pyrkii syöttämään verkkoon yliaaltojen kanssa samaa taajuutta, mutta vastakkaisvaiheisia virtakomponentteja verkkoon. Tällöin ne kumoavat toisensa (Ukkonen 2003).

## 4 KEINOVERKKO

CISPR 16-1 standardi määrittelee keinoverkolle raja-arvot, joiden sisään keinoverkon ominaisuuksien pitää asettua. Standardissa on määriteltynä useita erityyppisiä keinoverkkoja, joista yleisin käytössä oleva on  $50\Omega / 50\mu\text{H} + 5\Omega$ . Tästäkin on useita erilaisia variaatioita eri käyttökohteiden mukaan. Rakentamani keinoverkko mukailee tätä standardia. Keinoverkon piirikaavio on esitetty liitteessä 2. Rakentamaani keinoverkkoa käytetään mittausalueella 150kHz-30MHz. Keinoverkon tarkoitus on tuottaa testattavalle laitteelle stabiili  $50\Omega$  impedanssi, jolloin mittauksesta saadaan jokaisella kerralla standardi. Se suodattaa korkeataajuisen häiriön, jota tulee syöttävästä verkosta, tällöin mittaustuloksessa ei näy ylimääräisiä häiriöitä, vaan vain laitteen itsensä tuottamat häiriöt. Keinoverkko yhdistää testattavan laitteen tuottamat häiriösignaalit mittalaitteelle. Mikäli keinoverkko ei tuottaisi stabiilia impedanssia, tulokset olisivat jokaisella mittauksella erilaisia.

Ennen työn aloittamista, piti tutustua muiden rakentamiin keinoverkkoihin sekä muuhun materiaaliin, jota verkosta löytyi. Tämän jälkeen ennen kuin keinoverkkoa ryhdyttiin varsinaisesti rakentamaan, piti suunnitella ja hankkia tarkoitukseen sopivat käytettävät komponentit. Valitut komponentit on esitetty liitteessä 1. Pohdittiin, että käämitäanko kelat itse vai tilataanko ne valmistajalta mittatilaustyönä. Päädyttiin tilaamaan valmistajalta, sillä käämimisessä olisi mennyt turhan kauan aikaa. Keloiksi valittiin ilmasydämiset kelat. Tällöin magneettinen saturaatio ei ole ongelma (Williams 2007, 133), mutta keloista tulee ilmasydäminä melko suuria, joten kotelon hankintaa jouduttiin viivästyttämään, kunnes kelat saapuivat. Kun kelat saapuivat, tarvitsi pohtia rakentamisen vaihtoehtoja. Työ piti toteuttaa siten, että lopputulos olisi käyttötarkoituksen ja käyttöympäristöjen kannalta edullisin. Keinoverkosta piti tulla myös sellainen, että se olisi mahdollista kuljettaa.

### 4.1 Suunnittelu

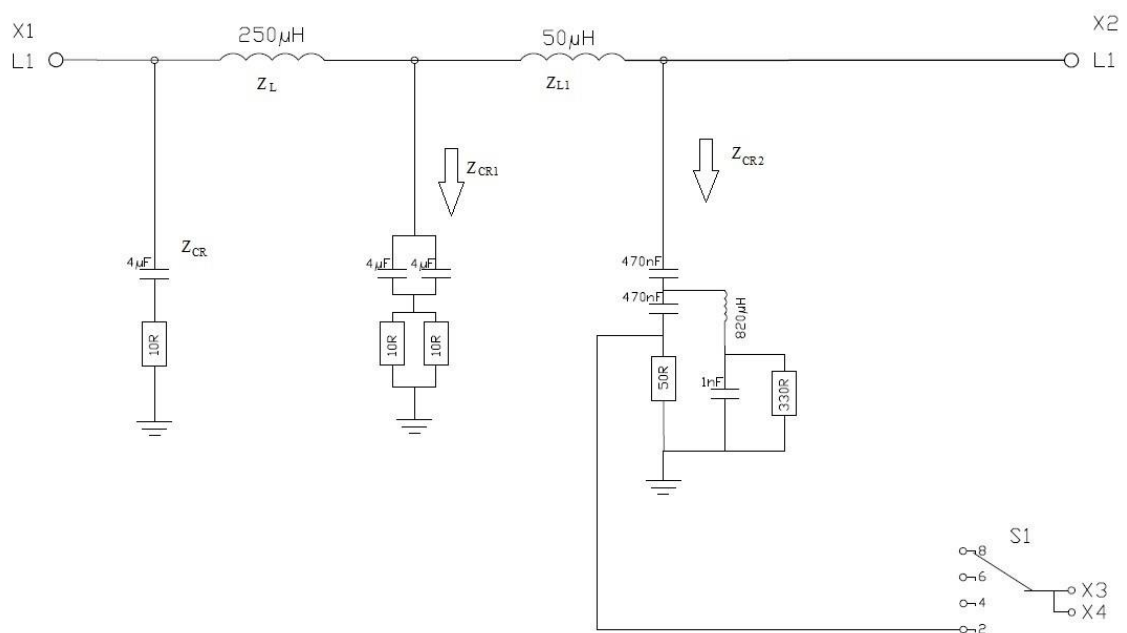
Rakentamisvaiheen alussa piti toteuttaa huolellinen suunnittelu, jotta välttyttäisiin virheiltä rakennusvaiheessa. Keloista tehtiin pahiset muotit, sillä kelojen koko käytännössä

määräsi kotelon suuruuden. Yritykseltä löytyi pieni sähkökaappi, jota kokeiltiin myös koteloiksi keinoverkolle. Tästä olisi kuitenkin tullut niin hankala rakentaa sekä komponentit olisivat olleet liian lähellä toisiaan. Esimerkiksi kelat eivät voi olla liian lähellä toisiaan, sillä tällöin niiden magneettikentät häiritsevät toisiaan. Niinpä tilattiin uusi tilavampi kotelo. Kotelon malli on esitetty liitteessä 1.

#### 4.1.1 Toimintaperiaate

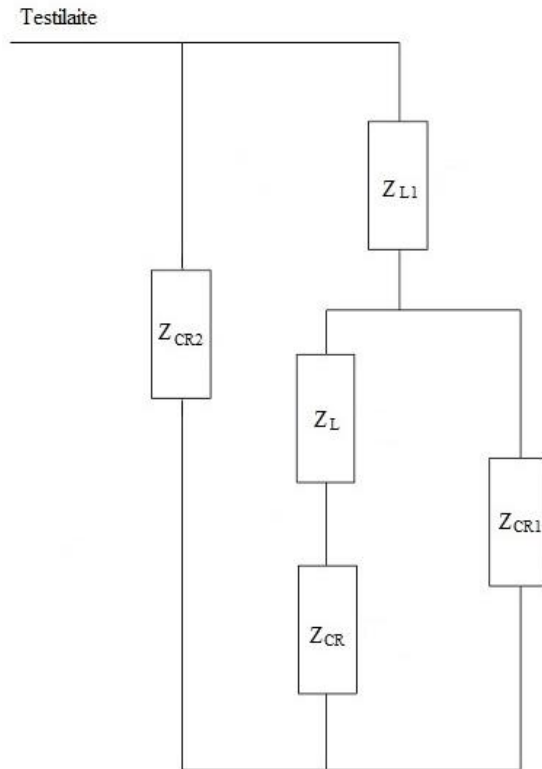
Mittalaitteelle luodaan keinoverkolla stabiili impedanssi. Se, että se on juuri  $50\Omega$ , johtuu siitä, että koaksiaalikaapelin sekä mittalaitteen sisääntuloliittimen impedanssi on kyseinen  $50\Omega$ . Keinoverkko suodattaa sähköverkosta tulevan korkeataajuisen häiriön. Keinoverkko toimii siis myös alipäästösuotimena. Keinoverkko tuottaa korkean impedanssin ulkopuolelta tulevalle radiotaajuiselle häiriölle, kuitenkin päästäen matalataajuisen tehon testattavalle laitteelle. Tällöin verkossa esiintyvät häiriöt eivät näy mittauksissa. Keinoverkko luo myös turvallisen liitännän mittalaitteelle. Spektrianalysaattorit ovat hyvin herkkiä laitteita ja rikkoutuvat helposti jos niitä ylikuormitetaan.

Kuvassa 11 on esitetty keinoverkon vaiheen L1 piirikaavio. Vaikka keinoverkko on rakennettu standardin mukaan, tarkastellaan vielä, että testilaitteen liittimessä X2 on todella  $50\Omega$  impedanssi.



KUVA 11 Keinoverkon yhden vaiheen piirikaavio

Tarkastellaan keinoverkkoa testilaitteen suunnasta. Testilaitte näkee keinoverkon kuvan 12 mukaan.



KUVA 12 Impedanssit testilaitteen näkökulmasta

Keinoverkko on jaettu palasiin, joka helpottaa laskentaa. Kuvassa 12 esitetyt merkinnät tarkoittavat kuvan 11 komponentteja seuraavasti vasemmalta oikealle, ylhäältä alas:

$$Z_{CR2} = 50\text{Hz suodin}$$

$$Z_{L1} = 50\mu\text{H kela}$$

$$Z_L = 250\mu\text{H kela}$$

$$Z_{CR1} = 8\mu\text{F} + 10\Omega$$

$$Z_{CR} = 4\mu\text{F} + 5\Omega$$

$250\mu\text{H}$  induktanssi,  $4\mu\text{F}$  kapasitanssi ja  $10\Omega$  vastus on testattavan laitteen näkökulmasta sarjassa. Tämä sarjakytkentä on  $8\mu\text{F}$  kapasitanssin ja  $10\Omega$  vastuksen rinnalla. Tämän rinnankytkentäpiirin kanssa sarjassa on  $50\mu\text{H}$  induktanssi. Koko tämä piiri on testattavan laitteen näkökulmasta  $50\text{Hz}$  suodinkytkennän rinnalla. Lasketaan piirin kokonaisinduktanssi paloittain:

Kondensaattorin reaktanssi lasketaan kaavalla:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} * (-i) \quad (6)$$

Kelan reaktanssi lasketaan kaavalla:

$$X_L = \omega L * i \quad (7)$$

Valitaan tarkasteluun jokin taajuus mitta-alueelta, esimerkiksi 9MHz. Testilaitte näkee 50Hz suotimen niin, että 0,47μF suodin on sarjassa 820μH haaran sekä 0,47μF+50Ω haaran rinnankytkennän kanssa. Lasketaan suotimen impedanssi  $Z_{CR2}$ :

$$Z_{CR2} = \frac{1}{2\pi * 9MHz * 0,47\mu F} * (-i) + \left( \frac{1}{2\pi * i * 9MHz * 820\mu H + \left( \frac{1}{330\Omega} + \frac{1}{\frac{1}{2\pi * 9MHz * 1nF} * (-i)} \right)^{-1}} + \frac{1}{50\Omega + \frac{1}{2\pi * 9MHz * 0,47\mu F} * (-i)} \right)^{-1}$$

$$Z_{CR2} = (50 - 0,021316i)\Omega$$

Seuraavaksi voidaan laskea toista impedanssihaaraa, joka koostuu neljästä impedanssi-komponentista. Nimitetään  $Z_L$  ja  $Z_{CR}$  sarjakytkentää  $Z_{LCR1}$ . Lasketaan kuitenkin ensin rinnankytkettyjen haarojen  $Z_{LCR1}$  ja  $Z_{CR1}$  kanssa sarjassa oleva  $Z_{L1}$ :

$$Z_{L1} = 2\pi * 9MHz * 50\mu H * i = 2827,43i\Omega$$

Lasketaan  $Z_{LCR1}$ :

$$Z_{LCR1} = 2\pi * 9MHz * 250\mu H * i + \frac{1}{2\pi * 9MHz * 4\mu F} * (-i) + 10\Omega$$

$$Z_{LCR1} = (10 + 14137,2i)\Omega$$

Lasketaan vielä tämän rinnalla oleva impedanssihaara  $Z_{CR1}$ :

$$Z_{CR1} = \frac{1}{2\pi * 9MHz * 8\mu F} * (-i) + 5\Omega$$

$$Z_{CR1} = (5 - 0,00221i)\Omega$$

Lasketaan kokonaisimpedanssi:

$$Z_{kok} = \left( \frac{1}{Z_{L1} + \left( \frac{1}{Z_{LCR1}} + \frac{1}{Z_{CR1}} \right)^{-1}} + \frac{1}{Z_{CR2}} \right)^{-1}$$

$$Z_{kok} = \left( \frac{1}{2827,43i\Omega + \left( \frac{1}{(10 + 14137,2i)\Omega} + \frac{1}{(5 - 0,00221i)\Omega} \right)^{-1}} + \frac{1}{(50 - 0,021316i)\Omega} \right)^{-1}$$

$$Z_{kok} = (49,9836 + 0,862566i)\Omega$$

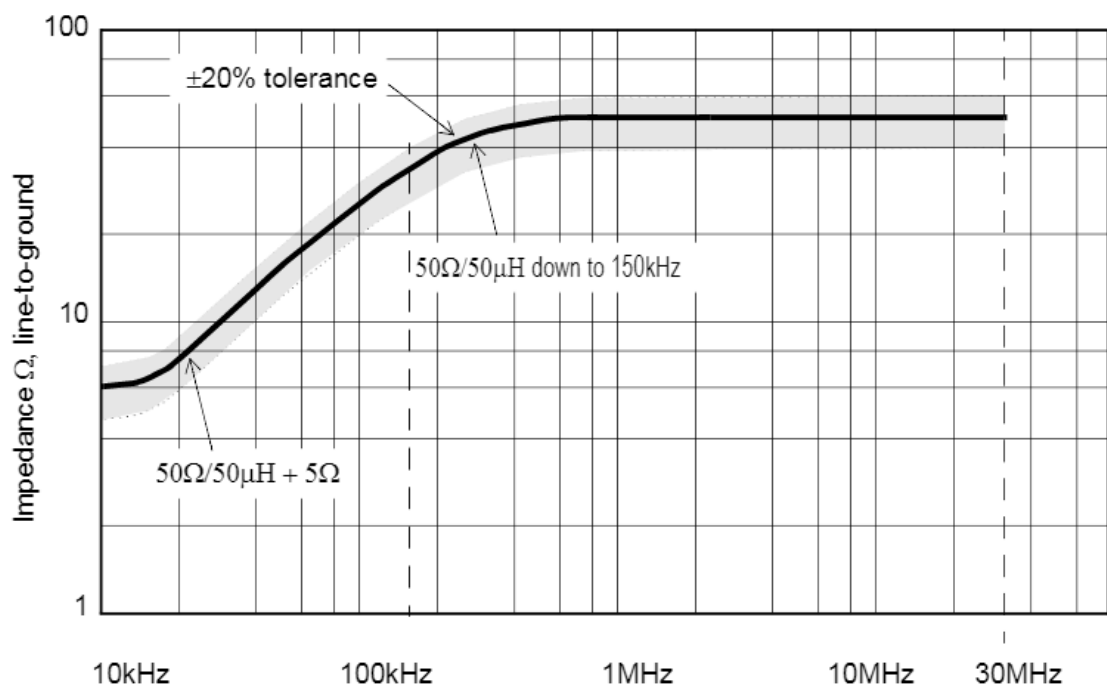
$$Z_{kok} = 49,991 \angle 0,998^\circ \Omega$$

Seuraavalla sivulla esitetyssä taulukossa 1 on esitetty keinoverkon impedanssilaskennan tulokset eri taajuuksilla.

TAULUKKO 1 Impedanssi eri taajuuksilla

Taajuus	Impedanssi
5kHz	3,7 $\Omega$
10kHz	5,3 $\Omega$
80kHz	21,6 $\Omega$
150kHz	32,8 $\Omega$
300kHz	43,2 $\Omega$
600kHz	48,0 $\Omega$
1MHz	49,3 $\Omega$
10MHz	49,99 $\Omega$
30MHz	49,999 $\Omega$

Taulukosta huomataan, että impedanssi tasoittuu n. 50 $\Omega$  600kHz taajuudesta eteenpäin. Impedanssiarvoista saadaan piirrettyä kuvan 13 mukainen impedanssikäyrä taajuuden funktiona.



KUVA 13 Keinoverkon impedanssi taajuuden funktiona (Williams 2007, 132)

Keinoverkon referenssimaan pitää olla vähintään 4m<sup>2</sup> tai sen tulee olla kaiuttoman huoneen lattia tai seinä. Referenssimaan tulee olla esimerkiksi alumiinia, kuparia tai terästä. Referenssimaan paksuudella ei ole suurimmassa osassa mittauksia merkitystä, mutta esimerkiksi 150kHz taajuudella tunkeutumasyvyys alumiinilla on 0,2mm. Tätä suuremmilla taajuuksilla paksuus ei juurikaan vaikuta maadoituksen impedanssiin. Kuitenkin, mikäli



testattava laite aiheuttaa voimakkaita matalataajuisia magneettikenttiä pitää maadoituslevyn paksuus olla yli 1mm. Magneettikentistä aiheutuu maadoituslevyyn pyörrevirtoja, jotka taas voivat aiheuttaa potentiaalieroja maadoituslevyn eri osiin (Elmac Services 1997).

#### **4.1.2 Toimintavarmuus**

Toimintavarmuuden takaamiseksi, keinoverkko piti rakentaa niin, että se kestää kuljetuksessa aiheutuvat tärinät. Kaikki kondensaattorit kiinnitettiin hyllyihin sikaflexillä. Kyseistä saumausliimaa löytyi hyllystä, joten tarkastettiin, että valmistaja lupaa sille myös korkeaa lämpötilan kestoja. Kondensaattorit itsessään eivät lämpene hirveästi, mutta kotelon sisällä lämpötila saattaa nousta melko korkeaksi. Lisäksi se vaimentaa mekaanisen värähtelyn kulkua, jolloin kondensaattorit pysyvät tukevasti kiinni myös kuljetuksen aikana.

Koska laitetta käytetään suurilla virroilla ja uusilla testaamattomilla tehoelektroniikkalaitteilla, on aina vaarana, että keinoverkko ja mitattava laite aiheuttavat resonanssitilan komponenttien välille. Resonanssitilassa keinoverkon komponentit voivat vioittua kun virta tai jännite kasvaa suureksi. Tämän johdosta, suunnittelin keinoverkon rakenteen siten, että monimutkaisuudesta huolimatta, se olisi myöhemmin purettavissa ja uudelleenkasattavissa. Niinpä käytettiin pultti-mutteri – liitoksia. Mikäli kondensaattorit vioittuvat, sikaflex on siitakin hyvä materiaali, että sen saa myöhemmin vähällä työllä irti.

#### **4.1.3 Turvallisuus**

Keinoverkkoa suunniteltaessa piti ottaa huomioon useita turvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Käytettävien materiaalien pitää olla sellaisia, että kestävät suurista virroista aiheutuvan lämmön. Tutustuttiin useampaan materiaalivaihtoehtoon sekä pohdittiin erilaisia rakentamistapoja, lopulta päädyttiin hyllymäiseen ratkaisuun. Hyllylevyiksi valittiin itsestään sammuvaa PVC-muovia. Koska keinoverkon kotelo on metallia, se piti myös saada turvalliseksi. Tuloliittimen PE on kytketty suoraan koteloon. Kotelossa oli myös koko takaseinän kokoinen maadoituslevy, johon kaikki maadoituspisteet on kytketty.

Kun keinoverkkoon on kytketty verkkojännite, vaiheen ja maan välillä on noin  $12\mu\text{F}$  kapasitanssi. Tällöin nollavirta on noin  $0,9\text{A}$ . Tämä virta on hengenvaarallinen, mikäli maadoitukset eivät ole kunnossa.

Syöttävä verkko tuottaa paljon erilaisia transientteja, jotka voivat nousta jopa  $1\text{kV}$  tasolle. Keinoverkko on suunniteltu vaimentamaan näitä transientteja, mutta ei voida taata, että ne pysyvät aina turvallisella tasolla. Mikäli testattavalta laitteelta katkaistaan äkisti sähköt, keinoverkossa olevat kelat voivat aiheuttaa suuria transientteja, jotka voivat rikkoa herkän mittalaitteen.

Jotta näiltä ongelmilta vältyttäisiin, keinoverkon turvallisuutta parannettiin vielä niin, että ulkopuolelle, takaseinään ja pohjaan tuli yhtenäinen maadoituslevy. Tällöin referenssiin kytkeminen helpottuu.

## 4.2 Rakentaminen

Kun komponentit oli saatu kasaan, voitiin aloittaa itse rakentaminen. Kuvassa 14 on esitetty rakentamisen alkuvaihe ja kelojen kiinnityksen suunnittelua.



KUVA 14 Rakentaminen/Suunnittelu

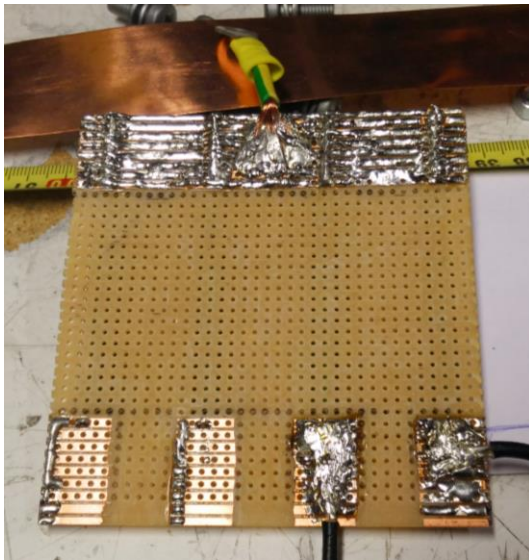
250 $\mu$ H kelojen kiinnitystä piti pohtia monelta kannalta. Kelat eivät saa liikkua kuljetuksessa ja toisaalta kelan lämpötila kuormitettuna piti ottaa myös huomioon. Aluksi oli tarkoitus laittaa kelojen sisähalkaisijan kokoinen sisäputki, mutta todettiin tämän olevan huono tapa, sillä kelan jäähtytys heikkenisi. Kelojen ylä – ja alapuolella on PVC-muovilevyt, jotka jo itsessään pitävät keloja hieman paikallaan. Kelojen kiinnitysmekanismi on esitetty kuvassa 15.



KUVA 15 Kelojen kiinnitysmekanismi

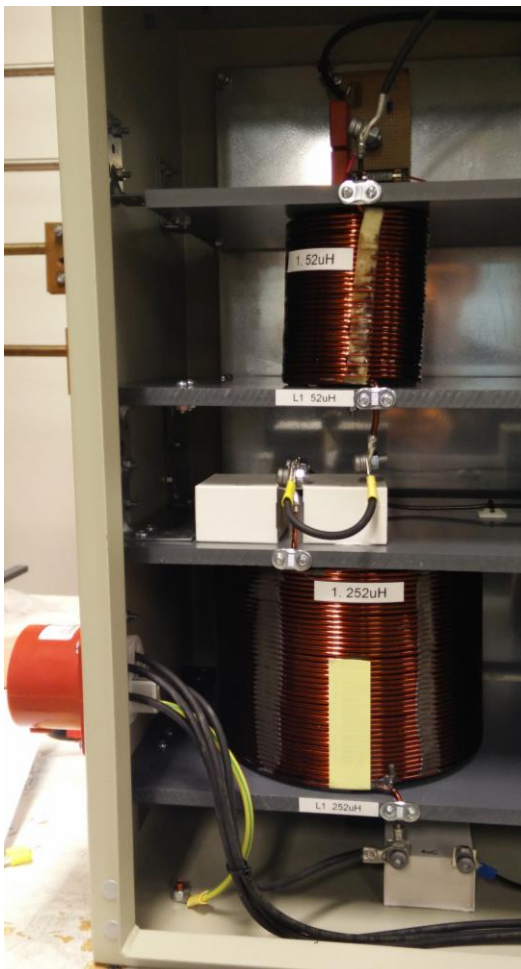
Muovilevyihin porattiin reikiä, jotta kelan sisäpinnoilla saadaan myös ilma kiertämään. Kelaa pitää paikallaan kelan sisähalkaisijan pituinen muovi, joka kiinnitettiin pulttiliitoksella levyyn. Se on kiinnitetty kelan alapuoliseen muovilevyyn ja on noin sentin paksuinen. Metalliruuvi toimii käytännössä rautasydämenä kelan sisällä, mutta niin vähäisesti, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Kelojen tukevasti paikallaan pysymisen takaamiseksi, kelojen liittimille tehtiin urat muoviin ja niiden päälle vielä varmistukseksi metallilevyt ruuvein (KUVA 17).

Kuvassa 16 on esitetty jokaisen vaiheen ja nollan vastusten kytkennät. Vastukset juotettiin reikälevylle, josta otettiin ylimääräinen kontaktipinta välistä pois. Molemmat 10 $\Omega$  ja 5 $\Omega$  vastukset kytkettiin samalla tavalla, 5 $\Omega$  kytkennässä vain on jokaisella vaiheella rinnakkaiset 10 $\Omega$  vastukset. Vastukset kytkettiin maihin lyhyen 16mm<sup>2</sup> kuparikaapelin kautta (KUVA 11, KUVA 16).



KUVA 16 Vastusten kytkentä

Vastuspaketit sijoitettiin kotelon pohjalle sekä toiselle hyllylle, kondensaattorien kanssa sarjakytkentään. Kuvassa 17 on esitetty keinoverkon vaiheen L1 kytkennät sekä tuloliitinten kytkentä ja johdotus.



KUVA 17 Keinoverkon L1-vaiheen kytkentä

Tulopuolella johtimet on viety yhtenä pakettina eteenpäin ja suojamaadoitus suoraan liittimestä laitteen runkoon. Kaikki liitokset on tehty pulttiliitoksin, komponenttien vaihdon helpottamiseksi.

Kuvassa 18 on esitetty hyllyjen tukirakenne ja lähtöliittimelle menevien johtimien reititys. Hyllyt ovat melko pitkiä ja niille tuli paljon painoa, joten ne tarvitsivat keskituen. Keskituet ovat kulmaraudoilla pulttiliitoksin.

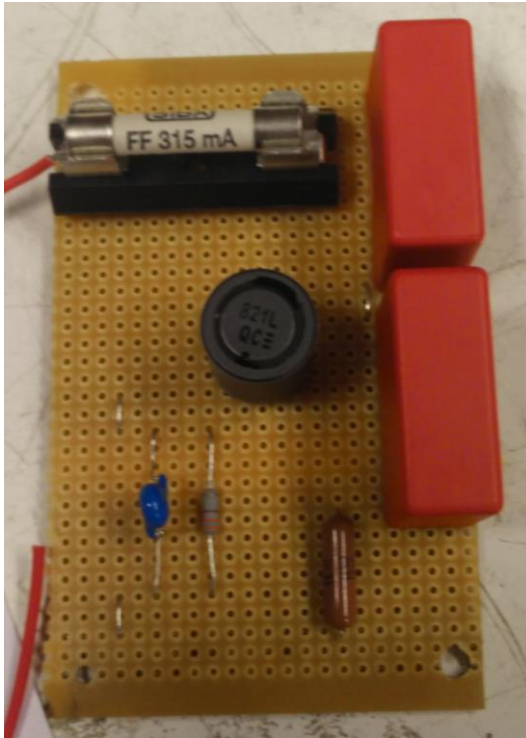


KUVA 18 Johtimien reititys ja hyllykön tukirakenne

50 $\mu$ H kelojen jälkeen johtimet vietiin etäällä toisistaan, mahdollisen ylikuulumisen estämiseksi. Johtimille onkin tehty ylimmällä hyllyllä sijaitsevaan pystylevyyn (KUVA 18) johdinreiät riittävät etäälle toisistaan. Kuvassa 18 näkyy myös vaiheiden L2 ja L3 johdotukset ja liitokset.



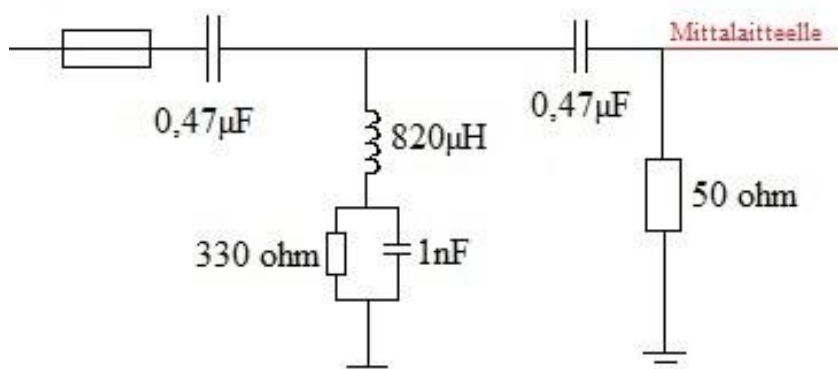
Kuvassa 19 on esitetty ylipäästösuodin. Suodin on sijoitettu mittalaitteen BNC-liittimien välittömään läheisyyteen. Komponenttien lisäksi, suotimeen lisättiin vielä sulake, mittalaitteen suojaus.



KUVA 19 Ylipäästösuodin

Sulakkeen lisääminen virtapiiriin aiheuttaa hieman induktanssia, mikä voi häiritä mittaustulosta. Laite testattiin tällä kokoonpanolla ja todettiin, että sulakkeesta ei aiheutunut merkittävää haittaa.

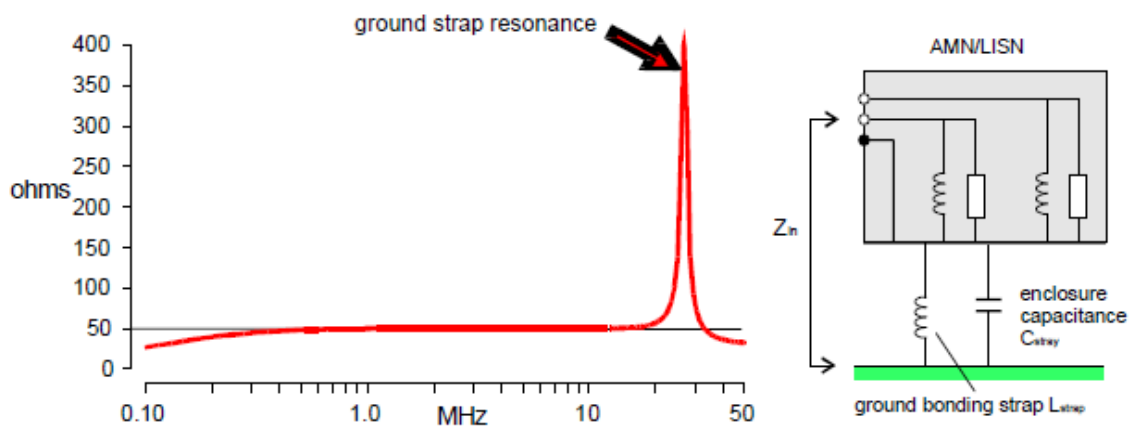
Kuvassa 20 on esitetty ylipäästösuotimen piirikaavio. Suotimilta vietiin mittaustieto valintakytkimen kautta mittalaitteen liittimille.



KUVA 20 Ylipäästösuotimen piirikaavio

Signaalista on hyvä suodattaa pois kaikki mitta-alueen alapuolella olevat taajuudet, sillä ne pääsisivät muuten mittalaitteelle ja häiritsisivät mittausta. Mittausalueen ulkopuolella olevat taajuudet kuormittavat turhaan mittalaitetta ja saattaisivat myös aiheuttaa ylikuormitusriskin. Simuloin suotimen taajuusvasteen OrCAD simulointiohjelmalla. Simulointitulokset on esitetty liitteessä 3.

Referenssimaan hyvä kytkeytyminen on yksi keinoverkon toiminnan kannalta tärkeimmistä ominaisuuksista. Referenssimaan kytkeytymisen pitää olla mahdollisimman matala-induktanssinen. Tyypillisen keinoverkon maakapasitanssi on 500pF, joten kun induktanssi on alle 40nH, resonanssipiste asettuu mitta-alueen yläpuolelle. Maadoituksen resonanssipiste on esitetty kuvassa 21.



KUVA 21 Maadoituksen resonanssi (Elmac Services 1997)

Tällöin keinoverkon maadoituksen maksimipituus on 5cm. Standardissa CISPR 16-2 on esitetty, että sen impedanssin tulee olla alle  $10\Omega$  30MHz taajuudella ja suositus on, että johtimen pituuden suhde leveyteen ei olisi suurempi kuin 3:1 (Elmac Services 1997). Kuvasta 22 nähdään, että keinoverkon sisällä on lähes takaseinän kokoinen metallilevy, joka toimii maadoituspisteenä. Maadoitusongelmien välttämiseksi maadoitusta parannettiin vielä lisäämällä takaseinään ja pohjaan ulkopuolelle yhtenäinen maadoituslevy, joka on suoraan yhteydessä keinoverkon sisällä olevaan levyyn. Tällöin keinoverkon maadoitus voidaan toteuttaa laskemalla koko keinoverkko maadoituskupariköyden päälle. Ulkopuolella on myös mahdollisuus kytkeä maadoitusliitin.



KUVA 22 Valmis keinoverkko

Hyllyjen kiinnitykset runkoon tehtiin molemmin puolin kahdella kulmaraudalla ja kiinnitys kotelon seiniin tehtiin pulttiliitoksella (KUVA 22). Keinoverkon lähtöpistoke tuli sijoittaa mahdollisimman kauas referenssimaadoituksesta, kuitenkin siten, että PE-johtimen yhteys referenssimaahan on mahdollisimman lyhyt. Testattavan laitteen pistoke eli keinoverkon lähtö sijoitettiin ylös ja etureunaan (KUVA 22) (Williams 2007).



## 5 TESTAUKSET

Kun rakentaminen oli saatu valmiiksi, keinoverkko piti testata. Testaukset ovat tärkeitä, sillä niissä todetaan, että laite toimii halutulla tavalla ja ennen kaikkea, että se on turvallinen käyttää.

### 5.1 Tyypitestausta

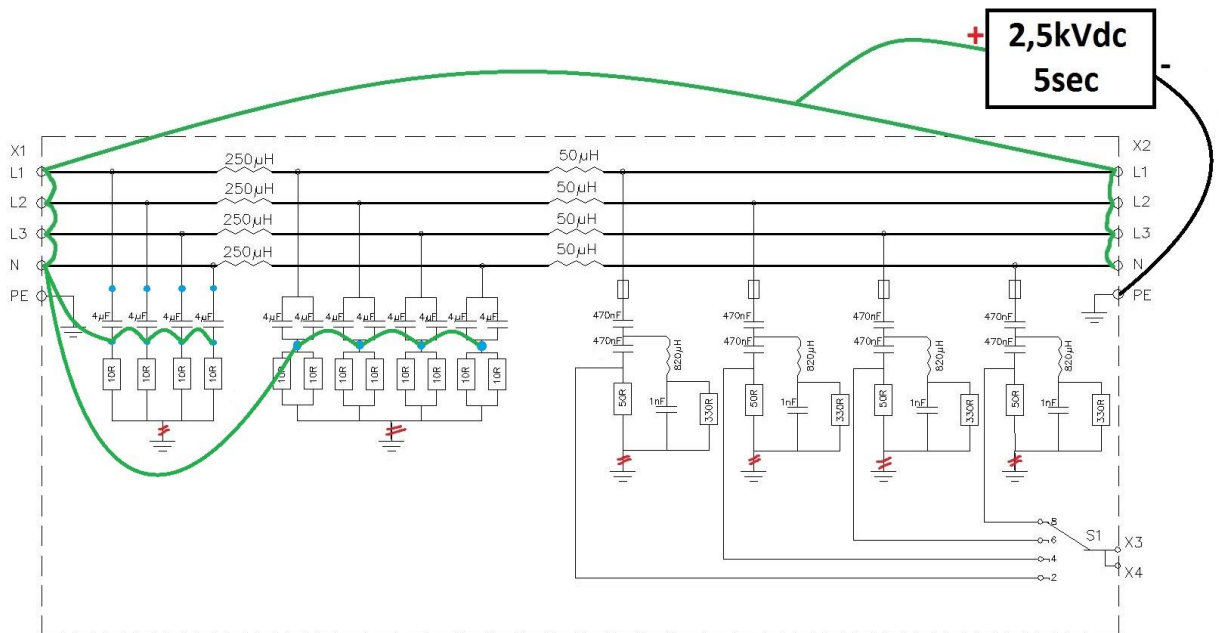
Tyypitestauksessa todetaan laitteen jännitekestävyys sekä maadoituksen toimivuus. Ennen testauksien aloittamista, kelojen ja kondensaattorien valmistajien ilmoittavat arvot tarkastettiin Meterman LCR 55 – mittalaitteella (TAULUKKO 2).

TAULUKKO 2 Komponenttien arvojen tarkastuksen tulokset

Komponentti	Vaihe	Mittaustulos
250 $\mu$ H kela	L1	252 $\mu$ H
250 $\mu$ H kela	L2	249 $\mu$ H
250 $\mu$ H kela	L3	250 $\mu$ H
250 $\mu$ H kela	N	248 $\mu$ H
50 $\mu$ H kela	L1	52 $\mu$ H
50 $\mu$ H kela	L2	52 $\mu$ H
50 $\mu$ H kela	L3	52 $\mu$ H
50 $\mu$ H kela	N	52 $\mu$ H
4 $\mu$ F kondensaattori	L1	4,11 $\mu$ F
4 $\mu$ F kondensaattori	L2	4,06 $\mu$ F
4 $\mu$ F kondensaattori	L3	4,11 $\mu$ F
4 $\mu$ F kondensaattori	N	3,99 $\mu$ F
8 $\mu$ F (4 $\mu$ F+4 $\mu$ F rinnan)	L1	8,02 $\mu$ F
8 $\mu$ F (4 $\mu$ F+4 $\mu$ F rinnan)	L2	8,22 $\mu$ F
8 $\mu$ F (4 $\mu$ F +4 $\mu$ F rinnan)	L3	8,16 $\mu$ F
8 $\mu$ F (4 $\mu$ F +4 $\mu$ F rinnan)	N	8,13 $\mu$ F

### 5.1.1 Jännitekestoisuuden testaus

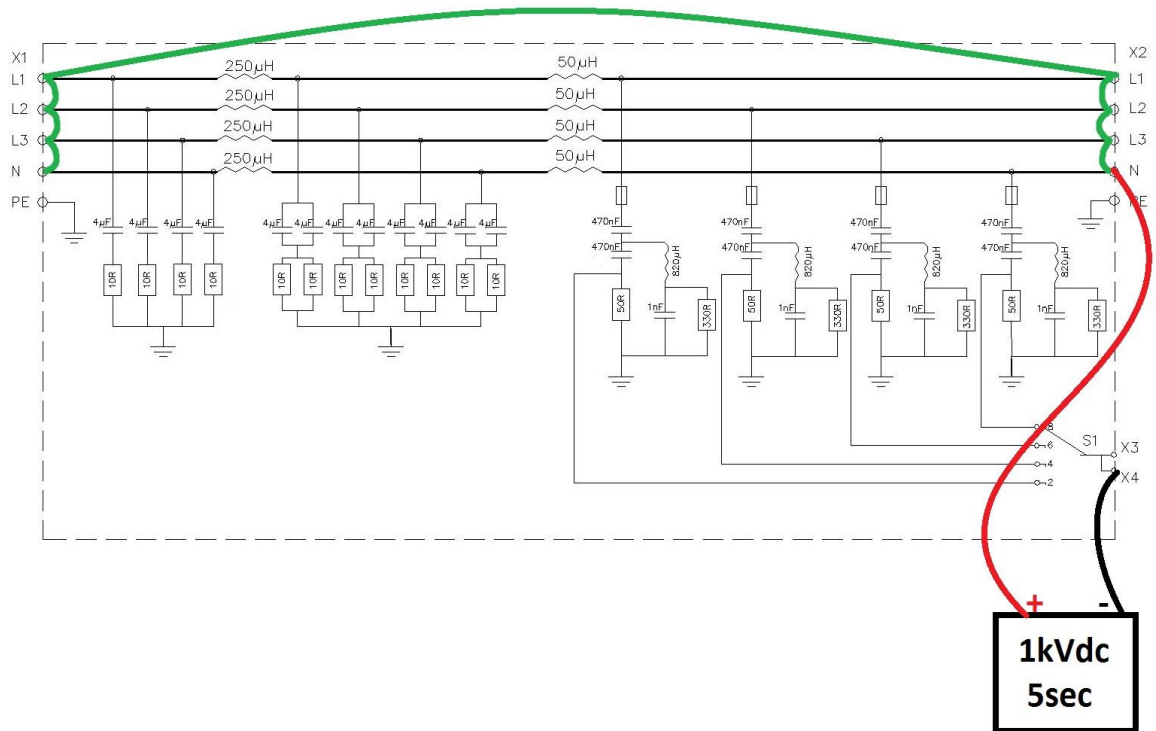
Jännitekestoisuuden testauksen ensimmäinen vaihe suoritettiin siten, että ensin irrotettiin verkon häiriönpöistön, impedanssin stabiloinnin sekä 50Hz suotimien maadoitukset. Nämä on kuvassa 1 merkitty punaisilla poikkiviivoilla. Liittimien X1 ja X2 L1→L2, L2→L3, L3→N kytkettiin oikosulkuun sekä kaapeli X1:L1 → X2:L1 välille. Nämä on kuvassa 1 esitetty vihreillä viivoilla. Oikosuljettujen vaiheiden ja PE:n välille syötettiin 2,5kV tasajännitettä viiden sekunnin ajan (KUVA 23).



KUVA 23 Jännitekestoisuuden testaus 1

Kuvassa 23 on esitetty sinisillä palloilla pisteet, joihin jännite tuotiin. Testaus oli onnistunut, sillä kaikki komponentit kestivät testauksen, eikä läpilyöntejä tapahtunut.

Jännitekestoisuuden testauksen toinen vaihe suoritettiin siten, että testauksessa 1 irrotetut maadoitukset olivat kytkettyinä ja liittimien X1 ja X2 L1→L2, L2→L3, L3→N oikosulussa ja kaapeli X1:L1→X2:L1 välillä. Oikosuljettujen vaiheiden ja liittimien X3/X4 välille syötettiin 1kVdc viiden sekunnin ajan (KUVA 24). Jokainen mittaussignaali mitattiin erikseen (kytkimen asennot 2, 4, 6, 8).



KUVA 24 Jännitekestoisuuden testaus 2

Jännitekestoisuuden mittauksissa ei ilmennyt mitään ongelmia, joten sen suhteen keinoverkko toimi hyvin. Alla olevassa taulukossa (TAULUKKO 3) on esitetty jännitekestoisuuden kriteerit ja mittaustapa.

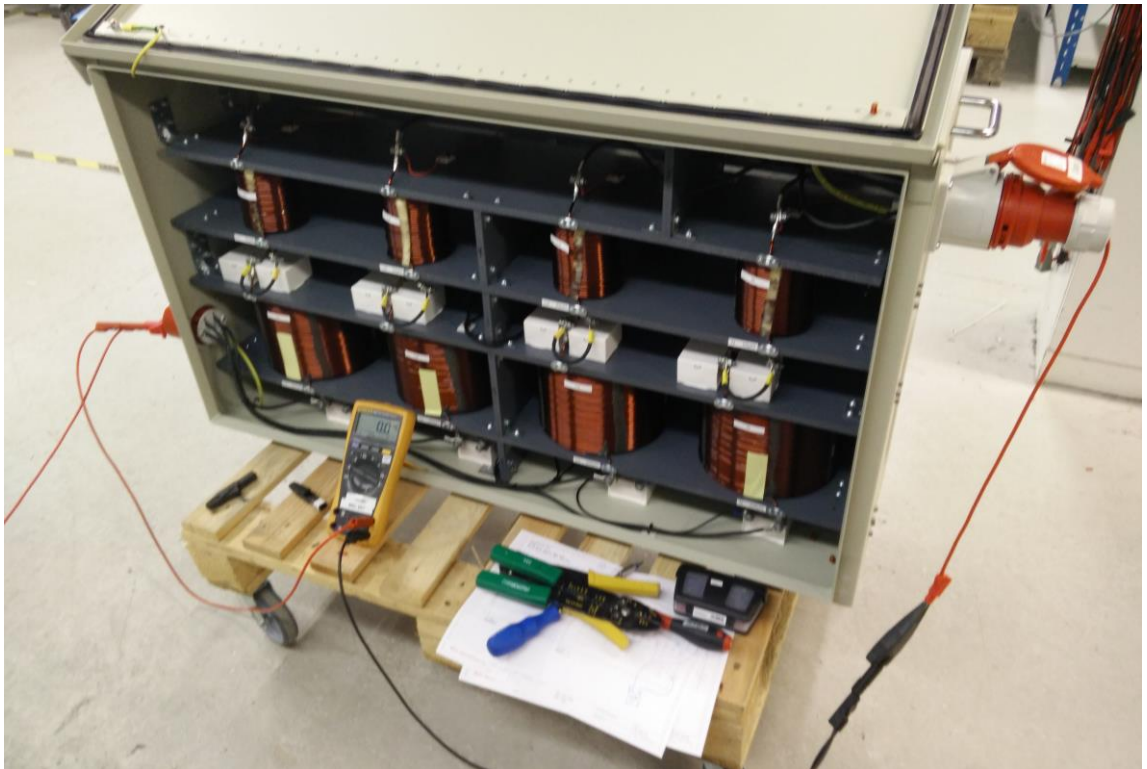
TAULUKKO 3 Jännitekestoisuuden tulokset

Jännitekeston testaus (IEC 61800-5-1)	Hyväksyntäkriteerit
1. X1/X2:L1,L2,L3,N - PE	2,5kVDC / 5s
2. X1/X2:L1,L2,L3,N - X3/X4	1kVDC / 5s

Mittaukset pohjautuvat IEC-standardiin ja sen mukaan mittauksessa ei saa syntyä läpilyöntiä missään tapauksessa.

### 5.1.2 PE-testaus

PE-testaus suoritettiin siten, että johdot kytkettiin liittimen X1 PE-nastan ja eri mittauspisteen välille ja syötettiin 15A virtaa. Virta luettiin testauspöydästä ja jännite mitattiin Fluke 179-yleismittarilla (KUVA 25).



KUVA 25 PE-testausjärjestely

PE-testauksessa mitataan maadoituksen jatkuvuutta (TAULUKKO 4). IEC-standardissa on määritelty maadoituksen suurimmat sallitut jännitteen nousut. Mikäli jännite jollain välillä nousee, se tarkoittaa, että välillä on resistanssia. Tällöin virta ei kulje kunnolla, joka tarkoittaa, että maadoitus ei toimi oikein.

TAULUKKO 4 PE-testin tulokset

PE-testi (IEC 61800-5-1)	Mittaustulos	Hyväksyntäkriteerit
1. X1:PE - X2:PE	0,4V	0,54V max / 15Aac
2. X1:PE - Kotelo	0,16V	0,54V max / 15Aac
3. X1:PE - Kansi	0,2V	0,54V max / 15Aac
4. X1:PE - Maadoituslevy	0,24V	0,54V max / 15Aac
5. X1:PE - Ulkoinen maadoituspiste	0,22V	0,54V max / 15Aac

Kaikkien maadoituspisteiden pitää johtaa virtaa mahdollisimman hyvin, jotta laite on käyttäjälle turvallinen. Mikäli jännite nousisi esimerkiksi kolmannessa mittauspisteessä (kansi) ja käyttäjä koskisi siihen, saattaisi se olla hengenvaarallinen.

### 5.1.3 Lämpötestaus

Lämpötestauksella selvitetään valittujen komponenttien – sekä materiaalien kestävyyskovalla teholla (suurella virralla). Todellisuudessa teho saattaa olla vielä testausta suurempi, mutta huomattavasti lyhempi kestoinen. Lämpötestauksessa keinoverkon tuloliitin kytkettiin verkkoon ja lähtöön kytkettiin taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajalla ohjattiin sähkömoottoria, joka pyörittää toista sähkömoottoria (=generaattori). Tämä generaattori oli kytkettyä verkkoon. Taajuusmuuttajan taajuusohje oli 50,38 eli hieman verkkotaajuutta suurempi. Pääjännite oli verkon 400V ja keinoverkon läpikulkeva vaihevirta 25A. Kotelon sisällä oli lämpöanturi, jolla tarkkailtiin, tarvitseeko laitteeseen vielä rakentaa tuuletusrivat ja tuuletin. Ympäristön lämpötila tarkoittaa tehtaan sisälämpötilaa keinoverkon läheisyydessä. Mittauksia otettiin 15 minuutin välein 135 minuutin ajan (TAULUKKO 5).

TAULUKKO 5 Lämpötestin tulokset

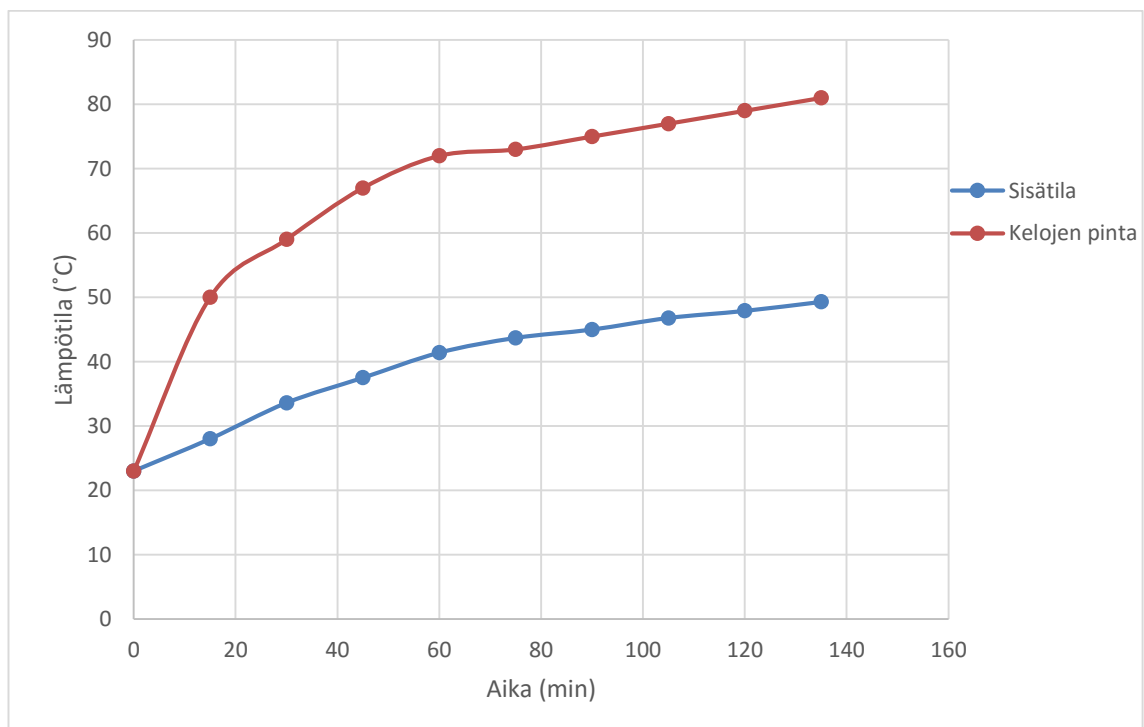
Aika t / min	Sisätila T / °C	Kelojen pinta T / °C	Ympäristö T / °C
0	23	23	23
15	28	50	23
30	33,6	59	23
45	37,5	67	23
60	41,4	72	23
75	43,7	73	23
90	45	75	23
105	46,8	77	23
120	47,9	79	23
135	49,3	81	23

Kelojen pintalämpötilan mittaus suoritettiin Fluke Ti20 Thermal imager – lämpökameralla (KUVA 26). Jokaisella mittaushetkellä otettiin kaksi kuvaa mittarin muistiin, toinen 250 $\mu$ H kelasta ja toinen 50 $\mu$ H kelasta.



KUVA 26 50 $\mu$ H kelan pintalämpötila ajanhetkellä 75min

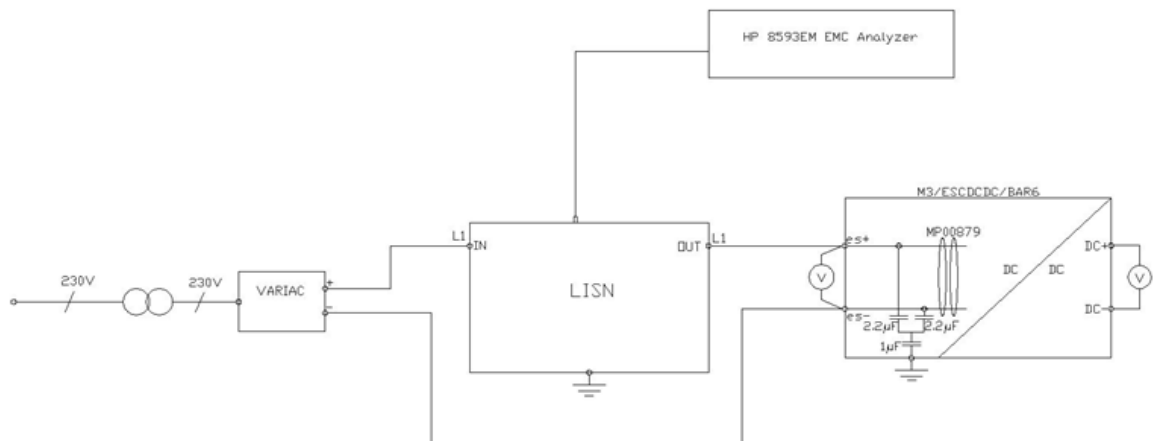
Mittausta suoritettiin niin kauan, että lämpötilan nousu alkaa tasoittumaan jollekin tasolle (KUVA 27). Kuvasta huomataan, että alussa lämpötilat nousevat melko rajusti mittausten välillä, mutta sisälämpötila rupeaa tasoittumaan noin 40 asteen tasolle ja kelojen pintalämpötila noin 80 asteen tasolle.



KUVA 27 Lämpötestin mittaustulosten kuvaaja

## 5.2 Referenssimittaukset

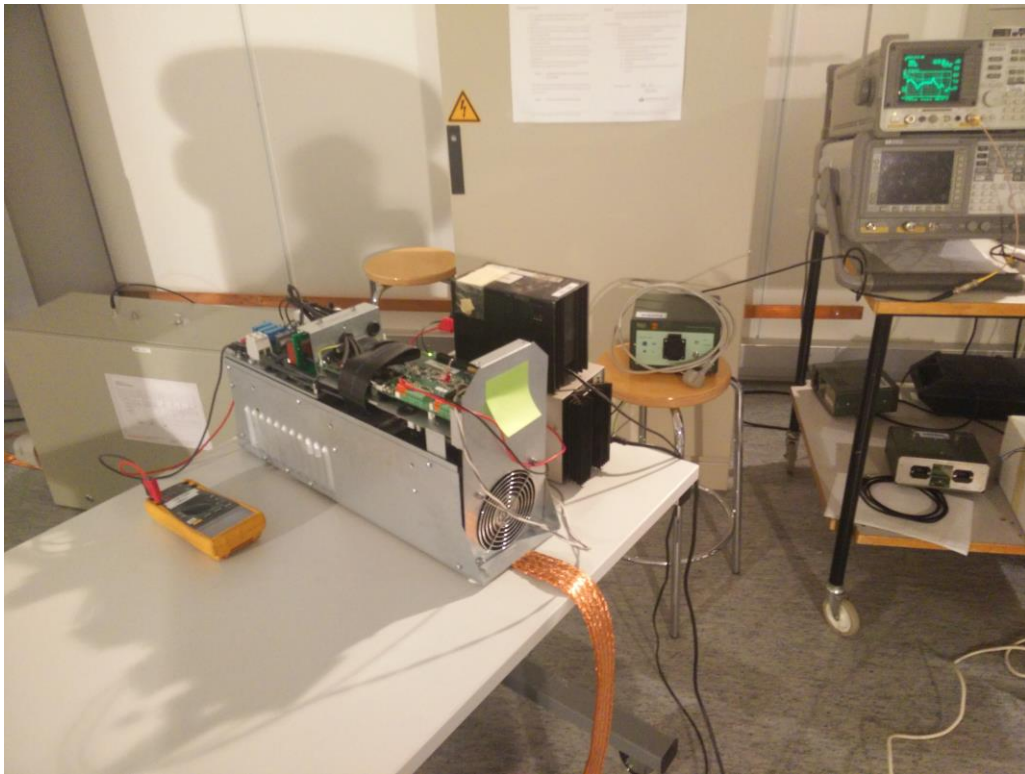
Kävimme TAMK:n suurjännite-laboratoriossa tekemässä referenssimittauksia. Rakennettua keinoverkkoa pitää verrata toiseen, vastaavaan versioon. Eleforss on tehnyt jo aiemmin EMC-mittaukset ESCDCDC/BAR6 konvertterille, joka on MSc Electronicsin omavalmiste, joten otimme kyseisen laitteen mukaan testattavaksi. Konvertterille tehtiin vastaavat 150kHz-30Mhz mittaukset rakennetulla keinoverkolla (KUVA 28).



KUVA 28 Referenssimittauksen kytkentäkuva

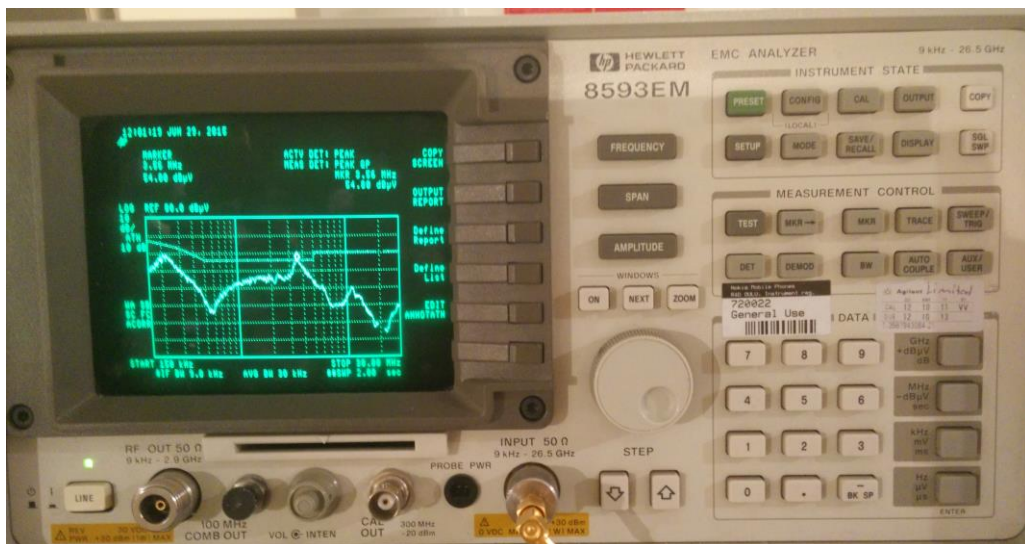
Mittaukset suoritettiin keinoverkon jokaiselle vaiheelle (L1, L2, L3 ja N). Tulo – ja lähtöliittimistä oli kytkettynä sama vaihe ja valintakytkimestä valittiin mittalaitteelle vastaava vaihe. Mittausjärjestelyissä LISN ja kuormalaite olivat maadoitettuina kuparinauhalla päällä (KUVA 29) ja kytkentä oli kytkentäkuvan mukainen.





KUVA 29 Mittausjärjestely

Mittaustuloksia analysoitiin HP 8593EM EMC Analyzerin avulla (KUVA 30)



KUVA 30 TAMK:n mittalaite

Jokaisesta mittauksesta otettiin varmuudeksi kaksi pyyhkäisyä tulosteelle. Tällöin saadaan varmennus laitteen toimivuudesta, kun kuvaajat vastaavat toisiaan. Yhdellä mittauksella ei voida olla varmoja saaduista tuloksista. Kuvassa 31 on esitetty vaiheen L1 mit-taustulokset TAMK:n suurjännitelaboratoriossa.



11:58:55 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
54.46 dB $\mu$ V

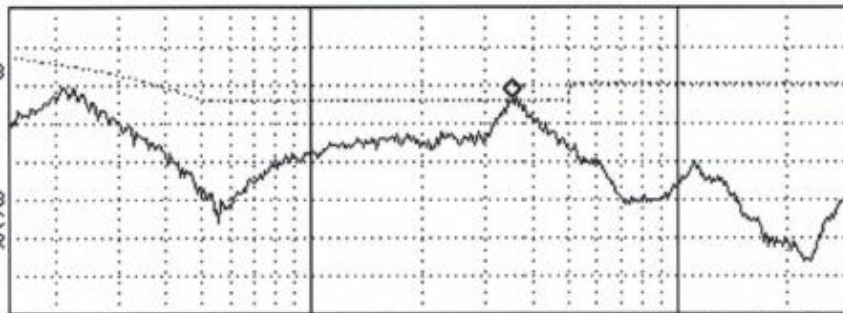
ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
54.46 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz #IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz STOP 30.00 MHz ##SWP 2.00 sec

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

11:59:32 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
55.45 dB $\mu$ V

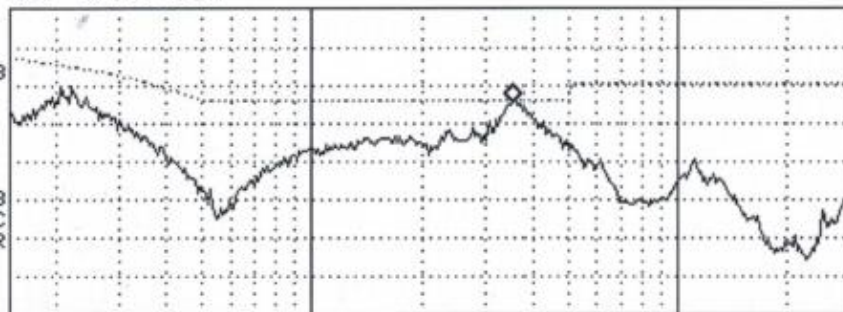
ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
55.45 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz #IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz STOP 30.00 MHz ##SWP 2.00 sec

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

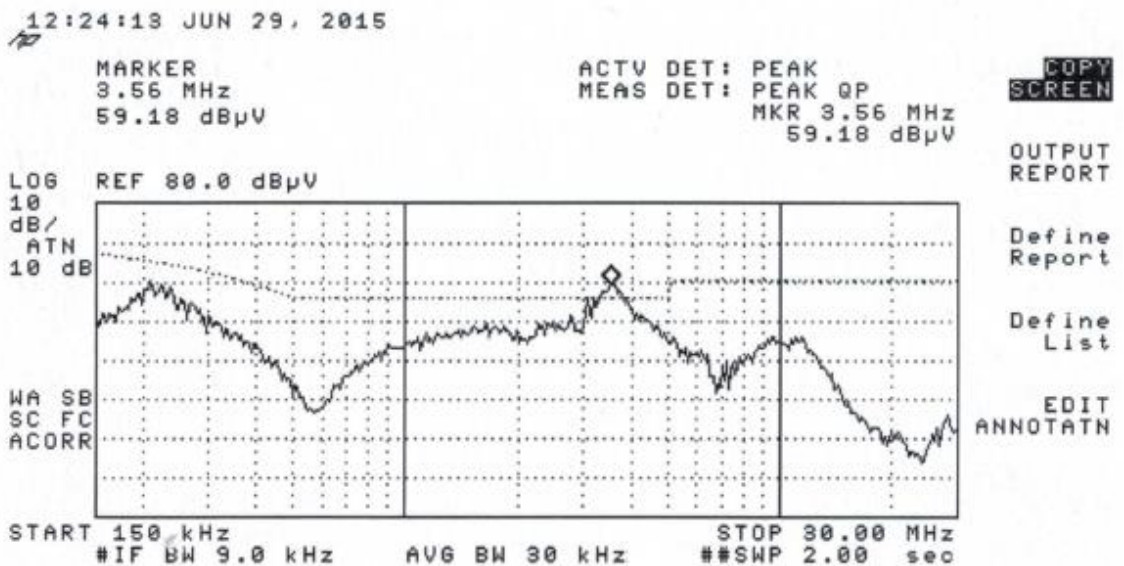
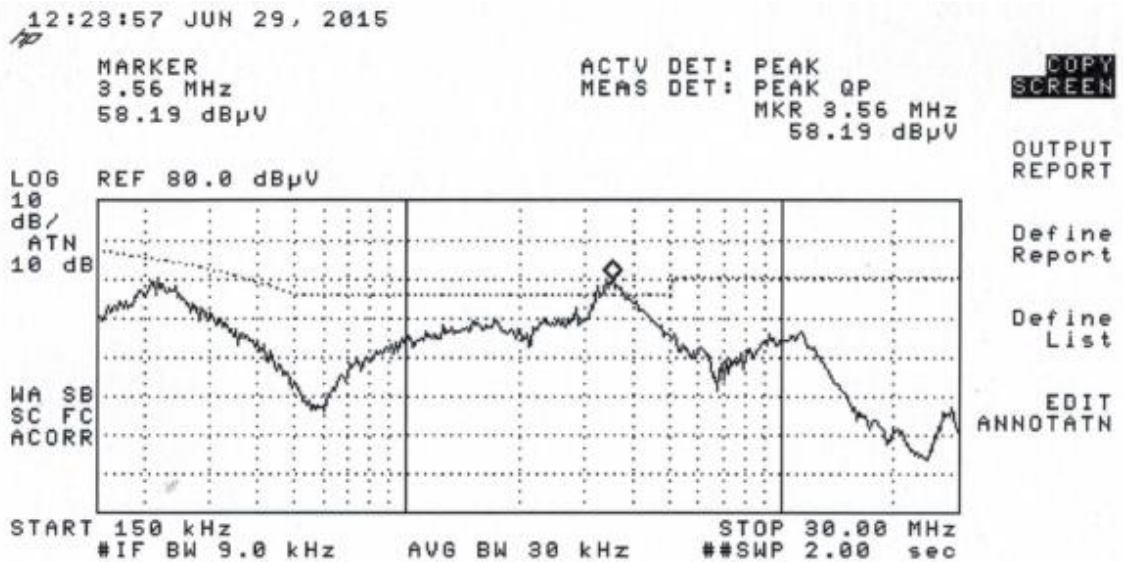
KUVA 31 LISN vaiheen L1 mittaustulokset

Muiden vaiheiden ja N:n mittaustulokset on esitetty liitteistä 4, 5 ja 6.

Vastaava mittaus suoritettiin myös TAMK:n laboratoriosta löytyvällä kaupallisella yksi-  
vaiheisella keinoverkolla. TAMK:n keinoverkko on esitetty kuvassa 32. Mittaustulokset  
kyseisellä keinoverkolla on esitetty kuvassa 33.



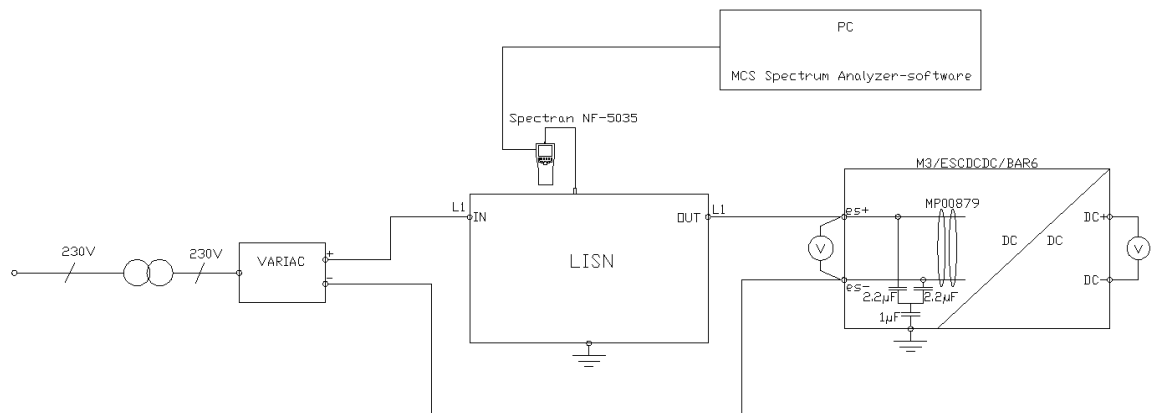
KUVA 32 EMC Master Artificial mains network / LISN PD-30



KUVA 33 Mittaustulokset kaupallisella keinoverkolla

Rakennetun keinoverkon toimivuudesta saadaan tällöin luotettavaa mittaustuloksia, kun olosuhteet sekä kuormalaite pysyvät samoina, mutta keinoverkko vaihtuu. Mittaustuloksia silmäilemällä voidaan havaita, että kaikki käyrämuodot ja arvot ovat hyvin lähellä toisiaan.

Vastaavat mittaukset suoritettiin myös MSc Electronicsin tiloissa vastaavalla mittauskytkennällä ja samalla testilaitteella (KUVA 34).



KUVA 34 Kytkentäkuva MSc Electronicsin tiloissa

Mittauksessa testataan yrityksen testausympäristön soveltuvuus johtuvien häiriöiden mittaukseen sekä käytössä olevan Aaronia Spectran NF-5035 – mittalaitteen toiminta. Kuvassa 35 on esitetty johtuvien häiriöiden mittaustulos, joka saatiin MCS Spectrum Analyzer-sovelluksesta. Mittaus suoritettiin MSc Electronicsin testausalueella.

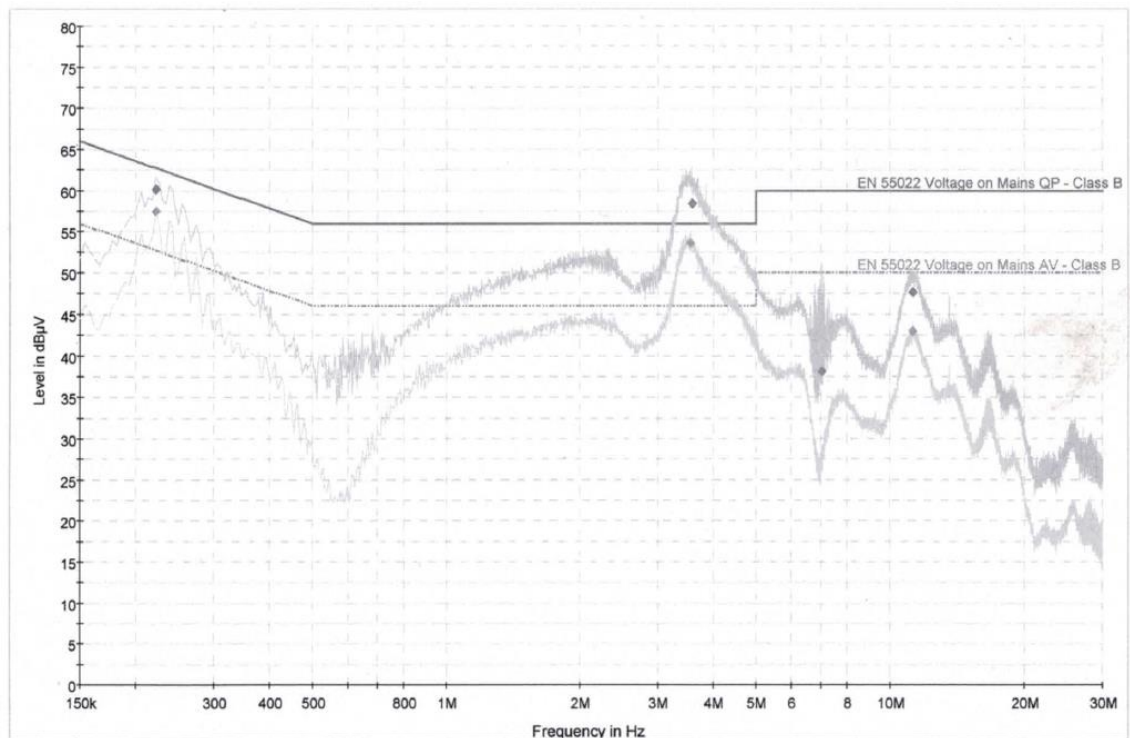


KUVA 35 Mittaustulos MSc:n testausympäristössä

Mittalaite kykenee mittaamaan vain 20MHz asti. Yrityksen on tarkoitus hankkia parempi, 30MHz asti mittaava mittalaite. MCS Spectrum Analyzer – sovellus on myöskin vielä

kehitysvaiheessa eikä siinä ollut kaikkia vaadittuja ominaisuuksia. Sovellus on mittalaitteiden käyttäjien kehittämä.

MSc Electronicsilla oli myös aiempaa, virallisen tahon (Eleforss Oy) mittausdataa kyseisestä DC/DC-konvertterista. Kuvassa 36 on esitetty Eleforssin johtuvien häiriöiden mitaus kyseiselle ESCDCDC/BAR6 – konvertterille.



KUVA 36 Mittaustulokset, Eleforss Oy

Eleforssin mittaukset on suoritettu standardin mukaisesti EMC-laboratoriossa.

### 5.2.1 Mittaustulosten käsittely

TAMK:n mittaustuloksista huomataan, että kaikkien vaiheiden kuvaajat ovat hyvin samanmuotoisia. PEAK-arvo eri mittauksissa on 54,46dBµV:in ja 56,01dBµV:n välillä. Vaihtelu on hyvin pieni ja voi johtua verkon häiriöiden vaihtelusta. Mittaustulokset ovat myös hyvin lähellä TAMK:n kaupallisella keinoverkolla saatuja arvoja. Kun vielä verrataan MSc Electronicsin testausympäristössä tehtyjä mittauksia ja TAMK:n laboratoriossa tehtyjä mittauksia Eleforssin virallisiin tuloksiin, huomataan, että käyrämuodot ja arvot



ovat hyvin lähellä toisiaan. Taulukkoon 6 on koottu jokaisella keinoverkolla tehtyjen mittaustulosten arvoja samoilla taajuuden arvoilla.

TAULUKKO 6 Mittapisteiden vertailu

	200kHz	550kHz	2MHz	3,5MHz	7MHz	12MHz
Eleforss	57,5dB $\mu$ V	37,5 dB $\mu$ V	55 dB $\mu$ V	62,5 dB $\mu$ V	42,5 dB $\mu$ V	50 dB $\mu$ V
TAMK	57,5 dB $\mu$ V	30 dB $\mu$ V	45 dB $\mu$ V	55 dB $\mu$ V	30 dB $\mu$ V	40 dB $\mu$ V
MSc	52,5 dB $\mu$ V	42 dB $\mu$ V	47 dB $\mu$ V	55 dB $\mu$ V	37,5 dB $\mu$ V	47,5 dB $\mu$ V

Aiemmassa kappaleessa esitettyjä mittaustuloskuvaajia sekä taulukon 6 arvoja vertailemalla voidaan tulkita, että rakentamani keinoverkko toimii hyvin. Laite soveltuu hyvin alustaviin johtuvien häiriöiden mittauksiin, joissa mittauksien ei tarvitsekaan olla täysin tarkka.

### 5.3 MSc Electronics Oy:n testausympäristö

On tärkeää, että kun mittauksia tehdään MSc Electronicsilla, testausalueella ei ole muita mittauksia käynnissä! Mittaustulokset vääristyvät kun toinen testaus on samaan aikaan käynnissä. Alla olevassa kuvassa 37 on sama tilanne kuin aiemmin esitetystä kuvassa 35, mutta alueella oli toinen testaus meneillään.



KUVA 37 Vääristynyt mittaustulos

Muilta osin testausympäristö soveltuu alustavien mittauksen tekoon.

## 6 POHDINTA

Opinnäytetyön teko oli melko haastavaa. Ennen työn aloittamista oli käsite keinoverkko täysin vieras. Työ oli erittäin opettavaista yleisesti tehoelektroniikasta sekä häiriöiden mittaamenetelmistä ja laitteiden testauksista. Keinoverkon rakennetta tutkittiin erilaisten kirjallisten lähteiden avulla. Taustatutkimuksia tehtiin myös tutustumalla muiden itse rakentamien keinoverkkojen rakenteisiin.

Keinoverkon rakentaminen vaati melko suuren kokonaisuuden hallintaa, koska keinoverkko suunniteltiin ja rakennettiin alusta asti itse. Rakentamisessa piti tutustua paljon erilaisiin materiaaleihin ja löytää näistä tarkoitukseen sopivimmat. Keinoverkosta piti tulla myös huoltoystävällinen, jotta myöhemmin voidaan komponentteja vaihtaa. Tämä toi omat haasteensa komponenttien sijoituksille ja kiinnitysmekanismeille.

Keinoverkon rakentaminen onnistui todella hyvin. Laitteesta tuli turvallinen ja se toimii odotetulla tavalla. Mittauksien heikkous kuitenkin on mittalaite, jonka mittausalue ei riitä standardissa määriteltyyn. Tämä ei kuitenkaan ole suuri ongelma, sillä mittaukset ovat vain alustavia. Yrityksellä on kuitenkin tarkoitus hankkia uusi mittalaite.

## LÄHTEET

ABB TTT-käsikirja 2000–07. Luettu 25.3.2016

Elmac Services. 1997. Calibration and use of artificial mains networks and absorbing clamps. Luettu 28.3.2016.

[http://www.elmac.co.uk/pdfs/ff26\\_report.pdf](http://www.elmac.co.uk/pdfs/ff26_report.pdf)

Fingrid Oyj. Luettu 4.4.2016

[www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi)

Honkanen, H., Antennitekniikka, Kajaanin ammattikorkeakoulu. Luettu 15.3.2016.

[http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/KAT\\_Antennitekkn.pdf](http://gallia.kajak.fi/opmateriaalit/yleinen/honHar/ma/KAT_Antennitekkn.pdf)

Kauppalehti. Luettu 30.9.2015.

<http://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/msc+electronics+oy/05846179>

RF EMC Development. Luettu 20.3.2016

<http://www.rfemcdevelopment.eu/en/emc-emi-standards/en-55014-1-2006>

SFS-Käsikirja 600-2. 2015. 2. painos. SESKO ry. Suomen standardisoimisliitto SFS ry: Helsinki

Tukes. 2014. EMC – Sähkömagneettinen yhteensopivuus. Luettu 3.2.2016.

<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/Sahkolaitteiden-vaatimukset/EMC---sahkomagneettinen-yhteensopivuus/>

Ukkonen, E. 2003. Yliaallot, suodatus ja kompensointi jakeluverkoissa. Sähkötekniikan osasto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Seminaarityö

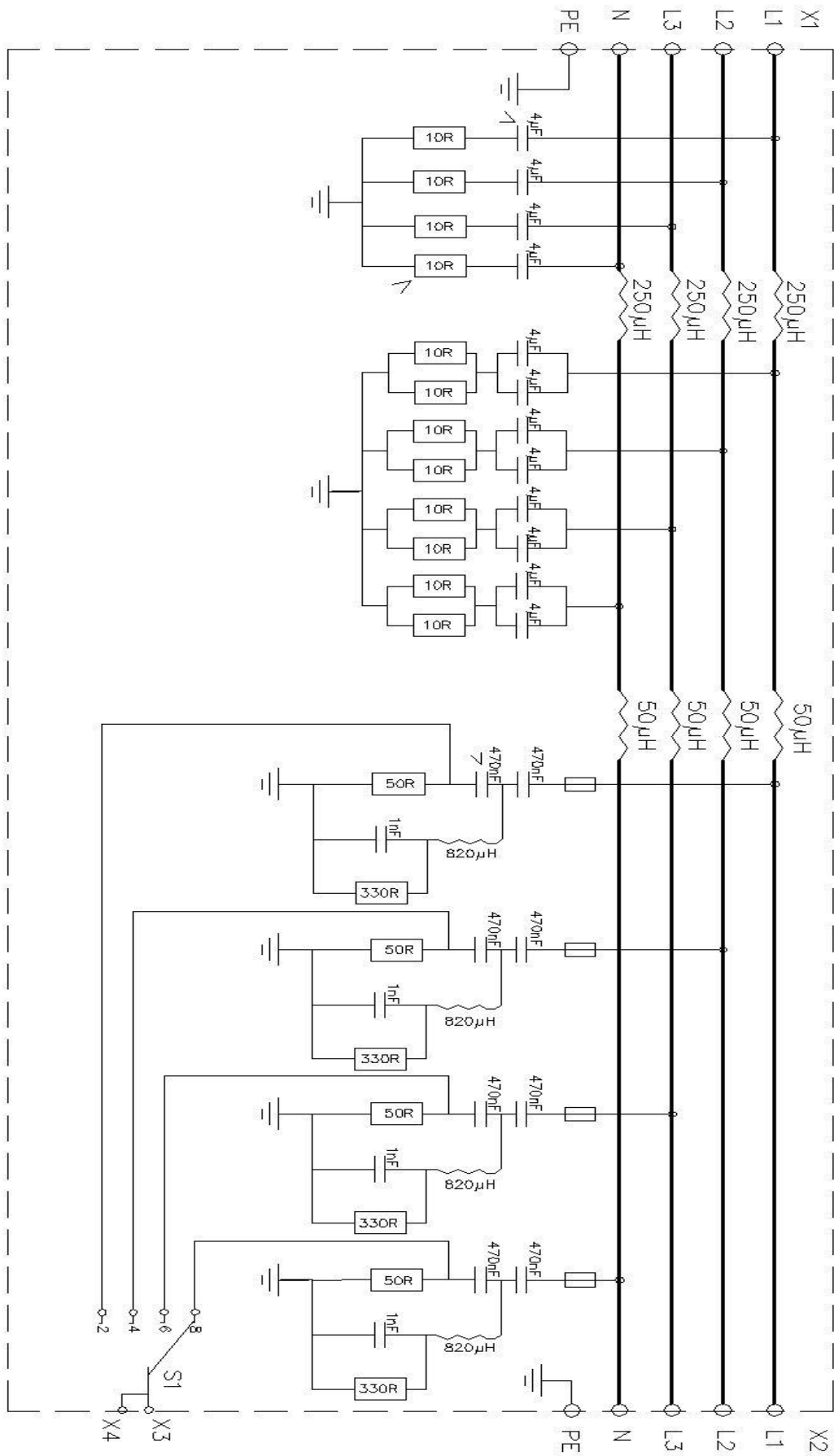


## LIITTEET

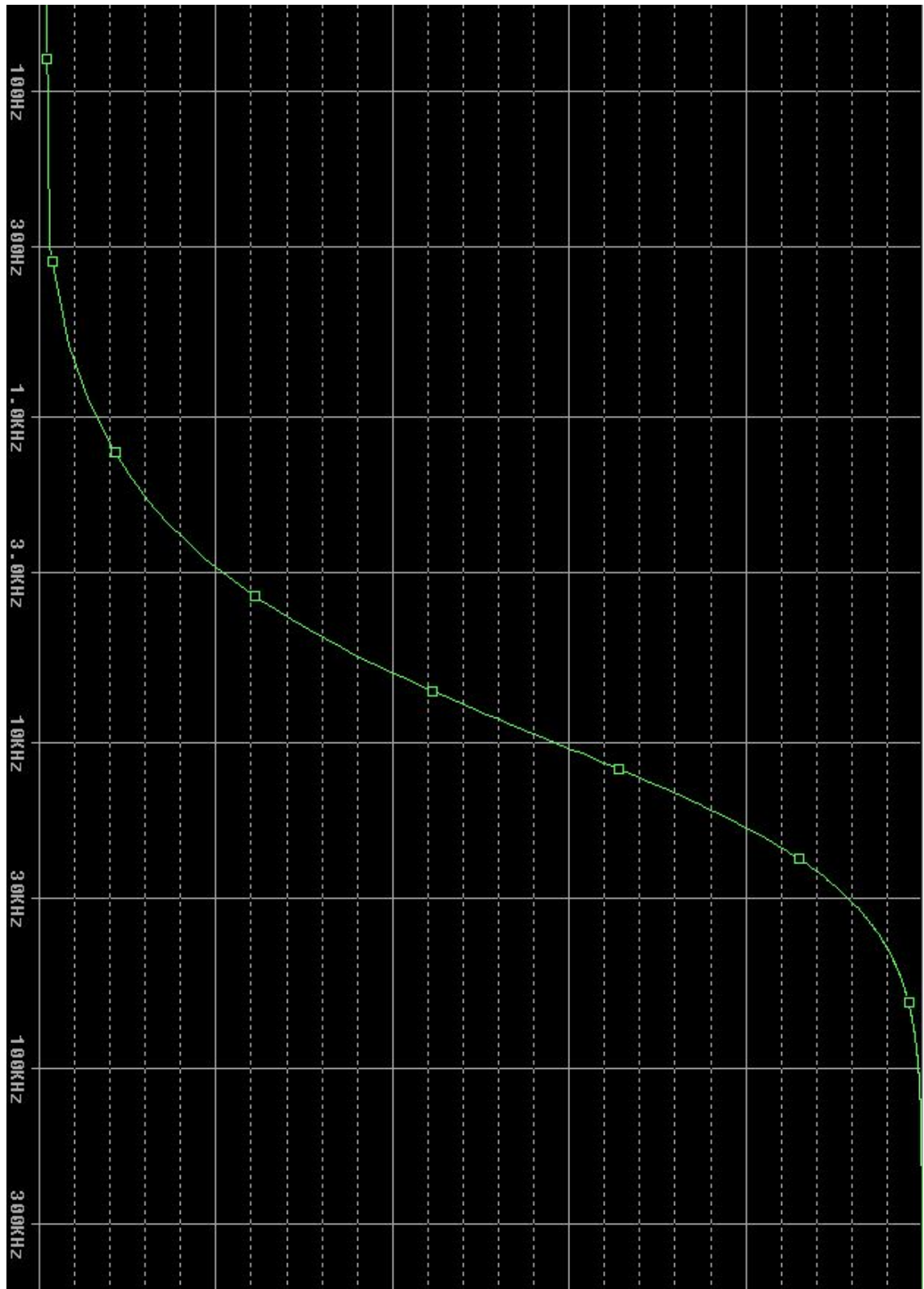
Liite 1. Osaluettelo

Komponentti	Valmistaja	Tuotetiedot	Selitys	Kappalemäärä
Kotelo	Ocotec	MA 1063	MA-laittekotelo	1
Kiertokytkin	LORLIN	PT6434 / BMH	12-asentoinen kiertokytkin	1
Kahva	MENTOR	5583.6611	Kytäinen päähän kahva, siipi	1
Tuloliitin	MENNEKES	1409	3-vaiheinen pistorasja	1
Lähtöliitin	MENNEKES	3451	3-vaiheinen pistorasja	1
Liitin	Amphenol	N6551A1-NT3G-50	RF-koaksiaali, N-tyyppi	1
Liitin	Multicomp	13-22-19 TSS 50R	BNC-liitin	1
Kela	M/S bati Trafo	250µH/25A	Ilmasydäminen kela	4
Kela	M/S bati Trafo	50µH/25A	Ilmasydäminen kela	4
Kela	Panasonic	ELC15E821L 820µH	820µH kela	4
Kondensattori	icel	PMB18544001VP 4µF	Metallikalvokondensattori	12
Kondensattori	ELFA	65-701-88 0,47µF	0,47µF kondensattori	4
Kondensattori	KEMET Electronics	C907U102MZVDBA7317 1000pF	1000pF kondensattori	4
Vastus	Multicomp	MCKNP0ASF100JB00 10Ω/10W	10Ω/10W	12
Vastus	Vishay	CMF6550 000FKEB 50Ω	50Ω	4
Vastus	TT Electronics	MFP1-330R JI 330Ω	330Ω	4
Sulake	SIBA	7017240.0.315	HRC sulake 315mA	4
Sulakepidin	Schurter	0031.8002	Sulakkeen pohja	4

Liite 2. Piirikaavio



Liite 3. OrCAD simuloinnin tulos (Jännite taajuuden funktiona)



## Liite 4. TAMK:n mittaustulokset vaiheesta L2

12:06:45 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
55.78 dB $\mu$ V

ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
55.78 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

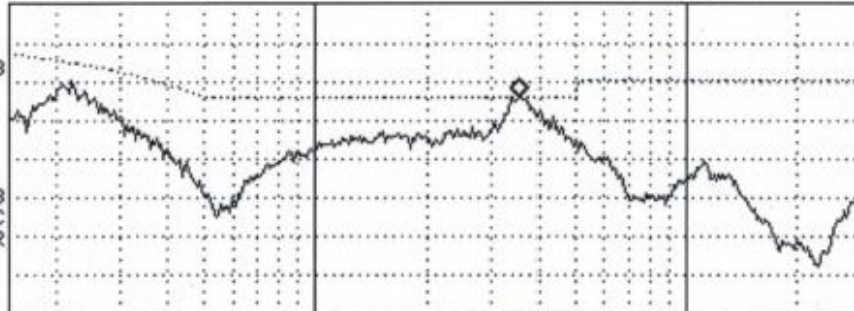
Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz #IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz STOP 30.00 MHz ##SWP 2.00 sec

12:07:00 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
56.33 dB $\mu$ V

ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
56.33 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

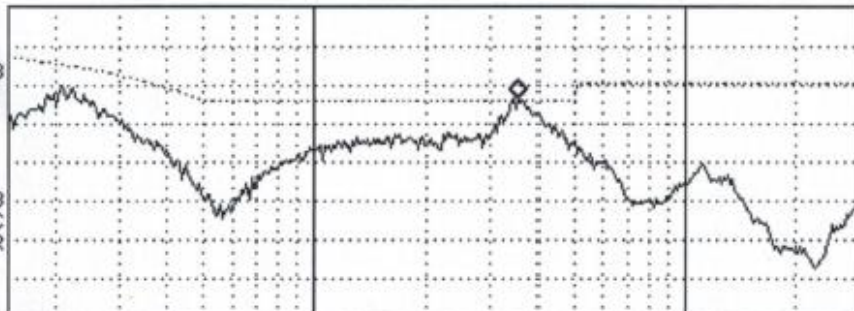
Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz #IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz STOP 30.00 MHz ##SWP 2.00 sec

## Liite 5. TAMK:n mittaustulokset vaiheesta L3

12:12:05 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
56.89 dB $\mu$ V

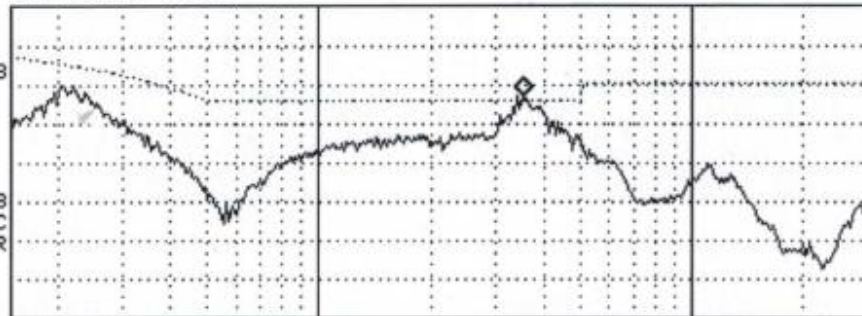
ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
56.89 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz #IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz STOP 30.00 MHz ##SWP 2.00 sec

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

12:12:19 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
55.80 dB $\mu$ V

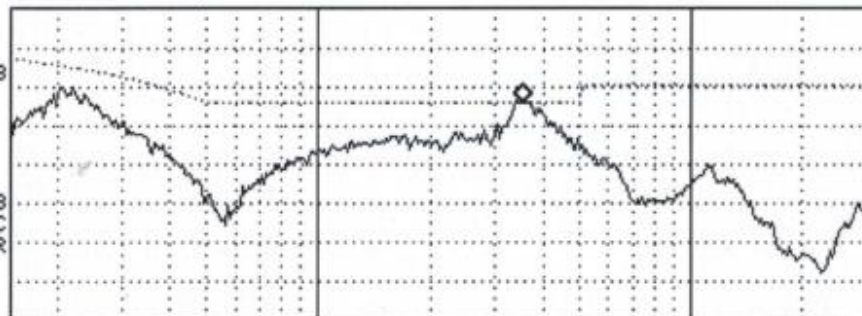
ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
55.80 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz #IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz STOP 30.00 MHz ##SWP 2.00 sec

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

## Liite 6. TAMK:n mittaustulokset vaiheesta N

12:15:56 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
56.01 dB $\mu$ V

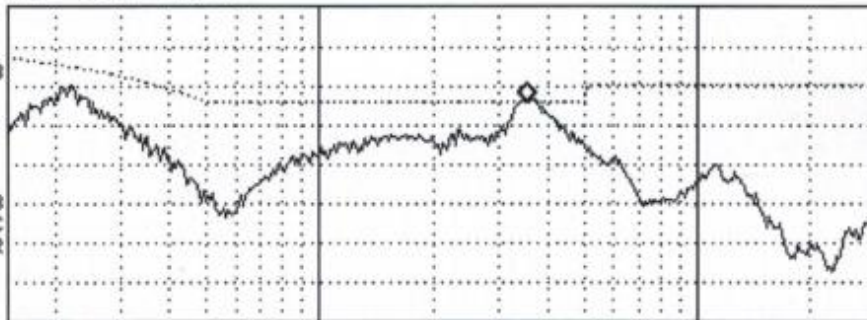
ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
56.01 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz STOP 30.00 MHz  
#IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz ##SWP 2.00 sec

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

Define  
List

EDIT  
ANNOTATN

12:16:11 JUN 29, 2015

MARKER  
3.56 MHz  
55.71 dB $\mu$ V

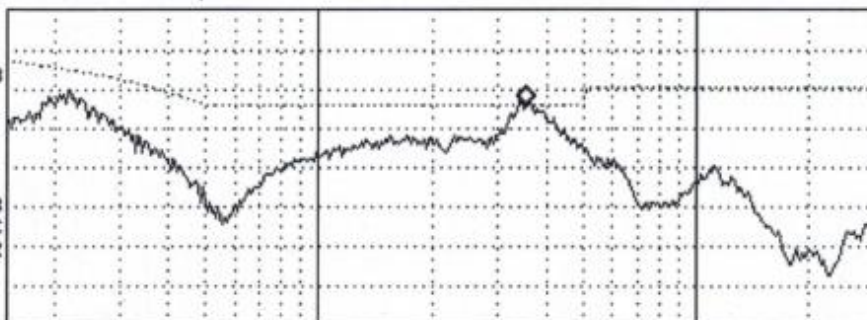
ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP  
MKR 3.56 MHz  
55.71 dB $\mu$ V

COPY  
SCREEN

LOG REF 80.0 dB $\mu$ V

10  
dB/  
ATN  
10 dB

WA SB  
SC FC  
ACORR



START 150 kHz STOP 30.00 MHz  
#IF BW 9.0 kHz AVG BW 30 kHz ##SWP 2.00 sec

OUTPUT  
REPORT

Define  
Report

Define  
List

EDIT  
ANNOTATN