

KEINOVERKKO

Rakenne, ominaisuudet ja mittaukset

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tekniikan ala

Tietotekniikka

Tietokone-elektronikka

Opinnäytetyö

Kevät 2010

Timo Vaskin

Lahden ammattikorkeakoulu
Tietotekniikka

VASKIN, TIMO:

Keinoverkko
Rakenne, ominaisuudet ja mittaukset

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö 38 sivua, 20 liitesivua

Kevät 2010

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyöni käsittelee keinoverkon toimintaa, rakennetta ja ominaisuuksia. Keinoverkko rakennettiin Endeleo Oy:lle. Yritys tarvitsee kaupallisia keinoverkkoja kehitettyneemmän version tehdäkseen omia alustavia mittauksia suunnitelmilleen ja rakentamilleen laitteille.

Keinoverkon tehtävänä on toimia testattavan laitteen ja mittauslaitteen, eli spektrianalysaattorin, liitäntälaitteena. Keinoverkko tuottaa testattavalle laitteelle standardin syöttöimpedanssin. Testattava laite tuottaa häiriöitä sähköverkkoon, tässä tapauksessa keinoverkkoon, joita mitataan spektrianalysaattorilla.

Euroopan ja kansainväliset standardit määräävät sähkölaitteille tietyn häiriötason, jota ne eivät saa ylittää. Näitä häiriötasoja pystytään mittaamaan ainoastaan standardin mukaisella keinoverkolla.

Käytännön osuus koostui keinoverkon suunnittelusta Endeleo Oy:lle. Tätä keinoverkkoa verrattiin kaupallisiin keinoverkkoihin.

Avainsanat: keinoverkko, spektrianalysaattori, liitäntälaite, standardi, häiriö

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in computer electronics

VASKIN, TIMO: The structure, features and measurements
of Line Impedance Stabilization Network

Bachelor's Thesis in computer electronics 38 pages, 20 appendices

Spring 2010

ABSTRACT

This Bachelor's thesis deals with the operation, structure and features of Line Impedance Stabilization Network (LISN). The LISN was built to the Endeleo Oy. It needs more improvement LISN than commercial LISNs, for making initial measurements on the devices it designs and builds.

The purpose of a LISN is to connect the device under test to the measuring device, spectrum analyzer. LISN produces standard input impedance to the device being tested. The device produces noise to the grid, in this case LISN, which is measured by the spectrum analyzer.

European and international standards determine the noise level, which the electrical device must not exceed. These noise levels can only be measured with LISNs that meet the standard.

The practical part consisted of designing a LISN for Endeleo Oy, and this LISN was compared to commercial LISNs.

Key words: Line Impedance Stabilization Network, LISN, spectrum analyzer, standard, noise

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	ENDELEO OY	2
3	EMC-PERUSTEET	3
4	KEINOVERKKO	5
4.1	Keinoverkon perusteet	6
4.2	Endeleo Oy:n keinoverkko	7
4.3	Keinoverkon rakenne	21
4.4	Kelan rakenne ja toiminta	24
5	SÄHKÖVERKON HÄIRIÖT	27
6	KEINOVERKON MITTAUKSET	31
7	MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI	34
8	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	37
	LIITTEET	

LYHENNELUETTELO

AC-jännite	Vaihtojännite
ATK	Automaattinen tietojenkäsittely
DC-jännite	Tasajännite
DUT	Device under test
CISPR	International Special Committee on Radio Interference
EMC	Electromagnetic compatibility, suomeksi sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic interference, suomeksi sähkömagneettinen häiriö.
LISN	Line Impedance Stabilization Network, suomeksi keinoverkko
RF	Radio frequency, suomeksi radiotaajuus. Tarkoitetaan korkeaa taajuutta.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni käsittelee keinoverkkoa. Työpaikkani, Endeleo Oy, tarvitsi keinoverkkoa tehdäkseen omia alustavia mittauksia suunnittelemlleen ja rakentamilleen laitteille. Keinoverkolta tarvittiin ominaisuuksia, joita ei kaupallisissa keino-verkoissa ollut, joten yhtiö päätti suunnitella oman keinoverkon. Opinnäytetyöni käsittelee keinoverkon ominaisuuksia ja Endeleon keinoverkon rakennetta sekä testaus- ja mittausprosessia.

Keinoverkon tehtävänä on toimia testattavan laitteen ja mittauslaitteen, eli spektrianalysointilaitteen, liittämälaitteena. Keinoverkko tuottaa testattavalle laitteelle standardoidun syöttöimpedanssin. Kun testattava laite tuottaa häiriötä sähköverkkoon, tässä tapauksessa keinoverkkoon, tämä häiriö mitataan spektrianalysointilaitteella.

Euroopan ja kansainväliset standardit määräävät sähkölaitteille tietyn häiriötason, jota ne eivät saa ylittää. Näitä häiriötasoja mitattaessa pystytään mittaamaan ainoastaan standardin mukaisella keinoverkolla.

Rakentamani keinoverkko mitattiin Lahden ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriossa. Samalla siellä mitattiin vertailumittaukset kaupallisista keinoverkoista, jotka olivat Chase-merkkinen yksivaihekeinoverkko sekä Rohde & Schwarz -merkkinen kolmivaihekeinoverkko.

Opinnäytetyössä käsittelen keinoverkon perusteet sekä rakentamani keinoverkon toiminnan ja ominaisuudet. Perehdyn keinoverkon komponentteihin ja käyn läpi sähköverkon häiriöitä. Lopuksi vertailen EMC-laboratoriossa tehtyjä mittauksia oman keinoverkon ja kaupallisten keinoverkkojen välillä.

2 ENDELEO OY

Endeleo Oy toimii elektroniikan tutkimus- ja tuotekehityspalveluiden tarjoajana. Endeleon erikoisosaamisalueita ovat vaativat tehoelektroniikan järjestelmät, viimeisin hakkuritekniikka, käämikomponenttien matemaattinen mallintaminen ja rakennesuunnittelu sekä radiohäiriöiden vaimennuksen haasteet. Endeleo kehittää asiakaskohtaisia tuotteita erityistarpeisiin, korkean hyötysuhdevaatimuksen soveluksiin sekä myös perinteisiin tehonsyötön tarpeisiin. Endeleo yhdistää perinteistä analogiaelektroniikkaa, viimeisintä puolijohdeteknologiaa ja prosessoritekniikkaa. Endeleossa työskentelee tällä hetkellä kahdeksan työntekijää ja kaksi freelance-suunnittelijaa. (Endeleo Oy 2010.)

Tuotekehityspalveluiden osa-alueena Endeleo tekee tarvittaessa rakenteiden 3D-mallinnuksen. Tämä voidaan tehdä aivan projektin alkuvaiheessa, jolloin saadaan 3D-mallinnus tuotteesta. 3D-mallinnuksella saadaan lisäarvoa myös tuomalla piirilevytiedot lay-out -ohjelmasta mekaniikkamaailmaan. 3D-suunnitteluohjelmasta laitteiston rakenne voidaan siirtää simuloitavaksi, esimerkiksi termiseen suunnitteluohjelmaan. Näin pystytään kiinnittämään huomiota simuloinnilla mahdollisesti

esiin tulleisiin lämpöongelma-alueisiin jo suunnitteluvaiheessa. (Endeleo Oy 2010.)

Endeleon tutkimuspalvelun osa-alueita ovat erilaisten ongelmien ratkaiseminen EMC- ja lämpötilaongelmissa. Endeleon palveluihin kuuluu myös asiakkaiden akuuttien ongelmien ratkaisuavun tarjoaminen. (Endeleo Oy 2010.)

3 EMC-PERUSTEET

EMC-mittaukset koostuvat useista eri mittauksista, mm. johtuvat häiriöt, säteilevät häiriöt, johtuva rf-sieto, säteilevä rf-sieto, nopeat transientit, esd sähköstaattinen purkaus sekä syöksyaalto eli surge.

Sähkölaitteiden sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta säädetään EMC-direktiivissä, joka tuli voimaan 1.1.1996. Uusin direktiivipäivitys tuli 20.7.2009. Sähkömagneettinen yhteensopivuus tarkoittaa lyhyesti, että laitteen on rakenteeltaan oltava sellainen, että sen synnyttämä sähkömagneettinen häiriö ei ylitä tasoa, joka estää radio- ja telelaitteiden sekä muiden laitteiden toimimisen suunnitellulla tavalla. Laitteella on oltava myös riittävä sähkömagneettisten häiriöiden sietokyky, joka tekee laitteen toimimisen mahdolliseksi suunnitellulla tavalla. Käytännössä kaikki sähkölaitteet kuuluvat EMC-direktiivin piiriin, lukuunottamatta poikkeuksia, joille on olemassa omat erilliset määräykset. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2004 sivu 343.)

Sähkömagneettista yhteensopivuutta ei ole helppo mitata. Sen hallinta ja testaaminen on sekä taloudellisesti että teknisesti vaikeampaa kuin perinteisen sähköturvallisuuden testaaminen. Tämä johtuu siitä, että EMC-testaus vaatii suurtaajuustekniikan ja radiotekniikan ymmärtämistä sekä mekaanisten asioiden hallintaa

samanaikaisesti. Lisäksi tarvittava laitteisto ja kaiuton huone ovat kalliita hankkia. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2004 sivu 344.)

Tuotetta testattaessa on olemassa tietyille tuotteille valmiina standardit, joiden mukaan laite tulee testata. Jos kyseessä on uusi laite tai laite, jolle ei ole standardia, käytetään yleisiä, tuotteeseen sopivia standardeja. Näitä on neljä: häiriönpäästö- ja häiriönsietostandardit sekä kotitalous- että teollisuusympäristöön. Kotitalousryhmän laitteissa on matalat häiriötasot ja niiltä vaaditaan matalia häiriöpäästöjä. Kotitalouksissa laitteilta vaaditaan korkeaa häiriösietoa. Teollisuusryhmän laitteissa tilanne on päinvastoin. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2004 sivu 344.)

Johtuvien häiriöpäästöjen mittaamiseen käytetään spektrianalysointia ja keinoverkkoa. Mitattava laite kytketään sähköverkkoon keinoverkon avulla. Keinoverkko toimii suodattimena estäen sähköverkosta tulevien häiriöiden vaikutuksen itse mittaukseen ja mahdollistaen mitattavan laitteen aiheuttamien häiriöiden mittaamisen. (Peltonen, Perkkiö & Vierinen 2004 sivu 344.)

4 KEINOVERKKO

Endeleo Oy tarvitsi keinoverkkoa tehdäkseen itse alustavia mitauksia suunnittelemilleen virtalähteille. Alustavista mittauksista saadaan selville, miten häiriötaso on suhteessa vaadittuun standardiin. Alustavat mittaukset on hyvä tehdä tuotekehitysvaiheessa, sillä viralliset mittaukset maksavat paljon ja niihin on turha mennä testaamaan laitteen toimivuutta.

Endeleo ryhtyi suunnittelemaan ja rakentamaan omaa keinoverkkoa, koska ei ole olemassa kaupallista keinoverkkoa, jolla pystyttäisiin syöttämään 700 V DC-jännitteitä. 700 V:n DC-jännitettä tarvittiin asiakastyön mittaamiseen. Keinoverkkoa suunnitellessa otettiin huomioon myös se, että keinoverkolla pystyttäisiin tekemään normaalit keinoverkolla tehtävät mittaukset eli että laite toimisi myös 400 V:n / 230 V:n 50 Hz:n jännitteellä.

Keinoverkkoa kutsutaan yleisesti joko AMN:ksi tai LISN:ksi. Lyhenteet tarkoittavat kuitenkin täysin samaa asiaa. AMN tulee sanoista Artificial Mains Network, joka on Euroopassa käytetty termi. LISN on amerikkalainen versio ja tulee sanoista Line Impedance Stabilization Network. LISN-lyhenne on kuitenkin eurooppalaista lyhennettä huomattavasti yleisempi. (Elmac 1997.)

Keinoverkolla on neljä päätehtävää. Sen tulee tuottaa testattavalle laitteelle stabioliitu 50 Ω :n impedanssi sekä yhdistää häiriösignaali testattavalta laitteelta mittalaitteelle, spektrianalysaattorille. Keinoverkon tulee myös estää pääjännitteiden suoranaisen yhteyden testattavaan laitteeseen sekä estää pääjännitteeltä tulevien häiriöiden pääsy testattavalle laitteelle sekä mittalaitteelle. (Elmac 1997, Tritonia 2008.)

Keinoverkkoa käytetään, kun halutaan mitata standardien mukaisesti, millaisia häiriöitä laite syöttää sähköverkkoon. Ilman stabiloitua 50 Ω :n impedanssia, sama testattavalle laitteelle tehty mittaus eri paikassa, eri aikaan tai eri keinoverkolla, saataisiin mittaustuloksista aina erilainen. Tämä johtuu siitä, että sähköverkon

impedanssi vaihtelee. Impedanssin stabiilina pysyminen on perusedellytys luotettavien ja vertailukelposten mittaustulosten saamiseksi. (Häiriömittaukset 1999.)

Yleisesti asunnoissa ja toimitiloissa sähköpistorasiat on liitetty ryhmiin. Kun yhteen pistorasiaan liitetään laite, joka tuottaa häiriötä, häiriö leviää kaikkiin samassa ryhmässä oleviin seinäpistorasioihin ja niiden kautta laitteisiin. On siis tärkeää tehdä laitteita, jotka eivät häiritse itseään tai muita laitteita. (Montrose & Nakauchi 2004.)

4.1 Keinoverkon perusteet

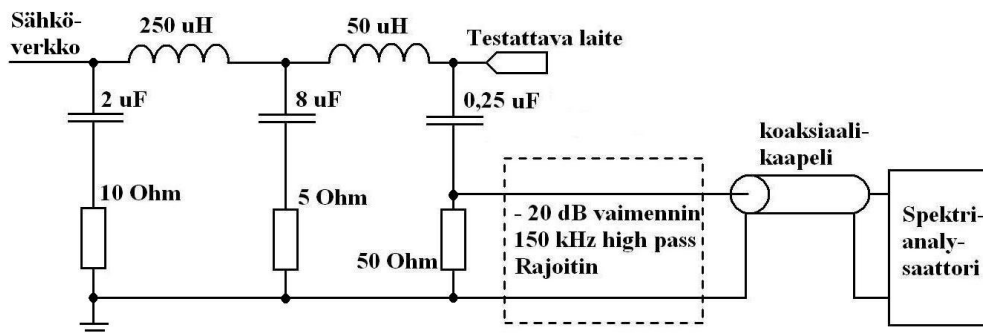
Testattavan laitteen häiriötä mitataan yleensä spektrianalysaattorilla tai mittavastanottimella. Spektrianalysaattorin sisääntuloliittimen sekä koaksiaalikaapelin impedanssi on 50Ω . Tämä on syy testattavalle laitteelle stabiloidun 50Ω :n impedanssin muodostamiselle. (NNB52-keinoverkko 2007.)

CISPR 16-1 standardi määrittelee keinoverkolle standarditiedot, joiden sisään keinoverkon ominaisuuksien tulee sijoittua, jotta saadaan tehtyä standardin mukaisia keinoverkkoja. Yleisin CISPR 16-1 standardin määrittelemistä keinoverkoista on $50 \Omega / 50 \mu\text{H} + 5 \Omega$ -versio. Tämän version mittausalue on 9 kHz:stä 30 MHz:iin. Endeleon keinoverkko on variaatio yleisimmästä versiosta ja se on suunniteltu toimiaan 150 kHz:stä 30 MHz:iin, eli vastaa $50 \Omega / 50 \mu\text{H}$ -standardin mukaista versiota. Standardi määrittelee todella paljon erilaisia variaatioita $50 \Omega / 50 \mu\text{H} + 5 \Omega$ -versiosta, mm. armeija-, avaruus- tai ajoneuvotesteihin. (Elmac 1997.)

4.2 Endeleo Oy:n keinoverkko

Endeleo Oy:n rakentama keinoverkko on kolmivaihekeinoverkko. Se sisältää peruskeinoverkon ominaisuudet, joita on osittain hieman paranneltu, sekä lisäksi siihen on lisätty suodattava tai vaimentava suodatinkortti, jolla voidaan muokata testattavalta laitteelta mitattavia häiriösignaaleita. Keinoverkko voidaan kytkeä kolmivaihe- tai yksivaihesähköverkkoon. Mahdollisuutena on myös käyttää keinoverkkoa DC-jännitteellä. DC-jännite voidaan tuottaa ulkoisella virtalähteellä tai jännite voidaan ottaa akuista.

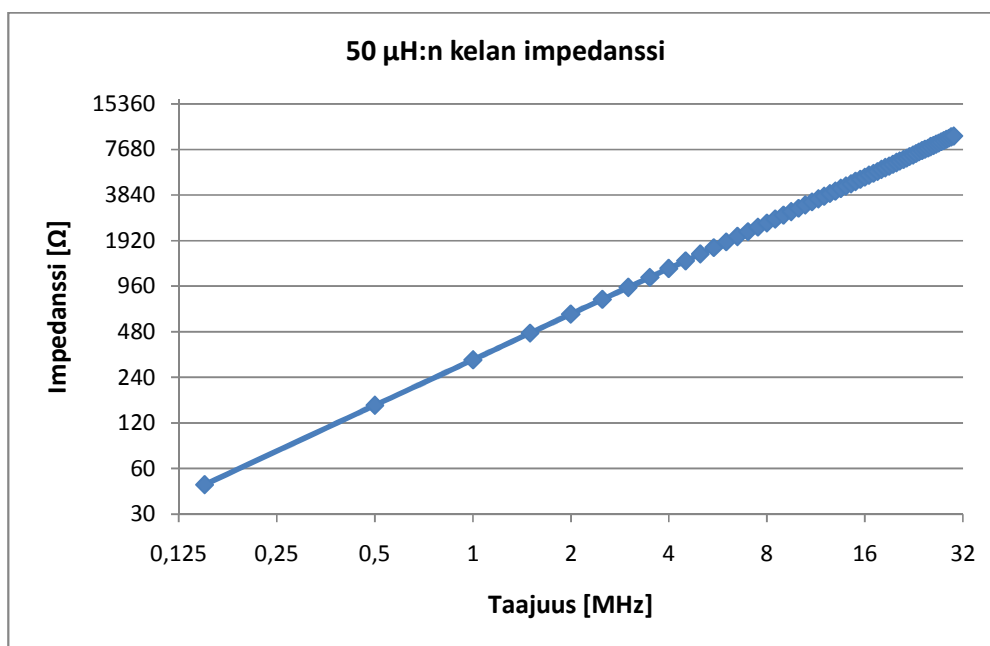
Keinoverkko (liite 1, 2 ja kuvio 1) koostuu vastuksista, kondensaattoreista sekä keloista, jotka yhdessä muodostavat RC-, LC- ja RLC-piirejä. Nämä piirit mm. poistavat sähköverkosta tulevia häiriöitä ja mahdollisia transientteja sekä stabiloivat impedanssin testattavalle laitteelle.



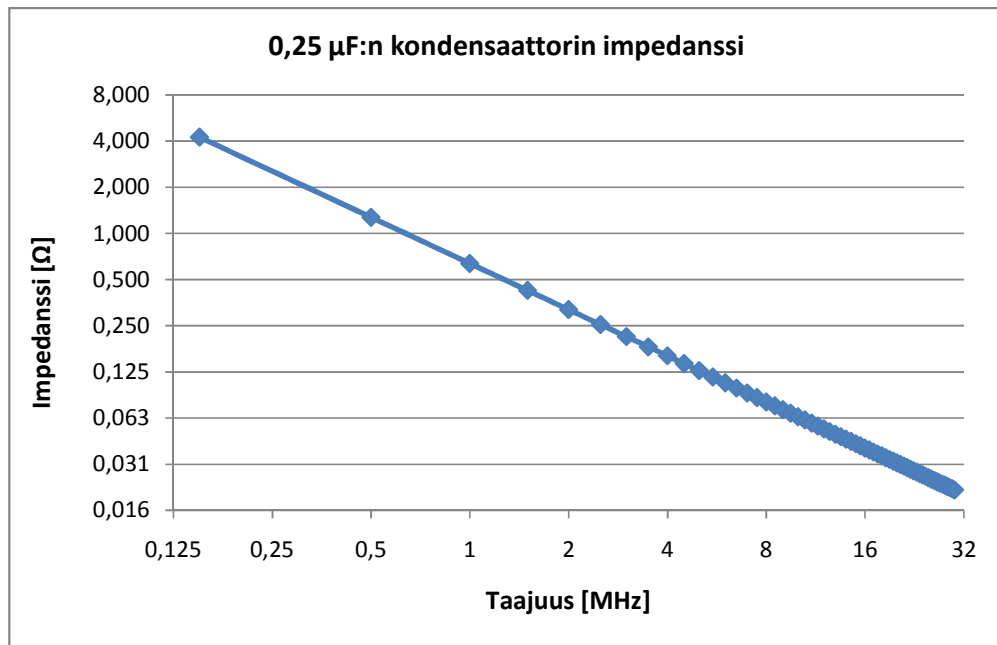
KUVIO 1. Keinoverkon komponentit ja kytkentä

Endeleon keinoverkon kaikki neljä vaihetta, eli vaiheet L1 – 3, sekä N, ovat identtisiä kytkennöiltään ja komponenteiltaan. Sähköverkko kytetään 250 μH :n kelaan sekä 2 μF kondensaattoriin ja 10 Ω :n vastukseen. Yhdessä nämä komponentit poistavat sähköverkosta tulevia transientteja ja häiriöitä. Häiriötön sähköverkko kytketty 50 μH :n kelaan, joka on 8 μF :n kondensaattorin ja 5 Ω :n vastuksen kanssa määrätty standardissa. Nämä kolme komponenttia yhdessä 0,25 μF :n kondensaattorin kanssa stabiloi testattavalle laitteelle 50 Ω :n impedanssin.

Testattavaa laitetta mitataan johtuvien häiriöiden mittauksella. Mittausalue on 150 kHz:tä 30 MHz:iin. 50 μH :n kelan impedanssi kasvaa ja 0,25 μF :n kondensaattorin impedanssi alenee taajuuden noustessa. 50 μH :n kelan impedanssi on 150 kHz:n taajuudella noin 47 Ω , ja 30 MHz:n taajuudella noin 9,4 k Ω . 0,25 μF :n kondensaattorin impedanssi 150 kHz:n taajuudella on noin 4,3 Ω ja 30 MHz taajuudella noin 2,1 m Ω . Kelan impedanssi lasketaan $X_L = 2 * \pi * f * L$. Kondensaattorin impedanssi lasketaan $X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C}$. Kuvioissa 2 ja 3 esitetään impedanssin käyrä taajuuteen nähden.



KUVIO 2. 50 μH :n kelan impedanssikäyrä taajuuden funktiona



KUVIO 3. 0,25 µF:n kondensaattorin impedanssikäyrä taajuuden funktiona

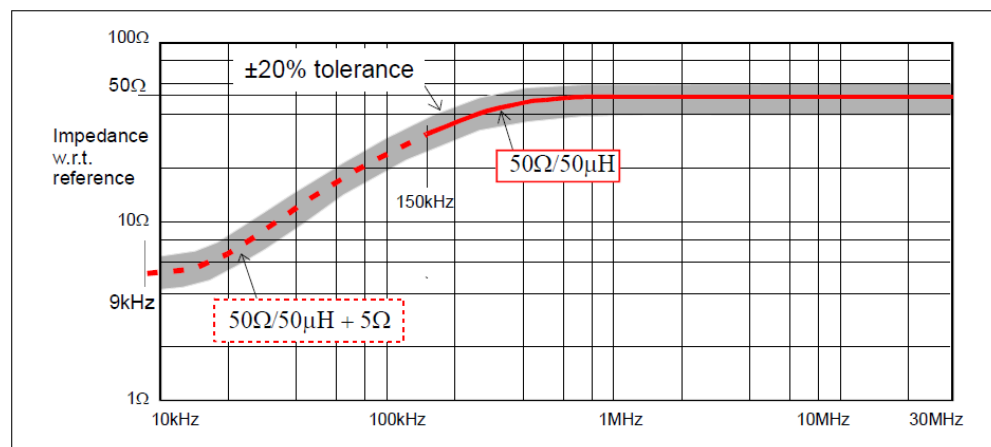
Keinoverkon impedanssi muodostuu 50 µH:n kelan, joka on 8 µF:n kondensaattorin ja 5 Ω:n vastuksen muodostamasta RLC-piiristä, joka on rinnan kytketty sarjassa olevien 0,25 µF:n kondensaattorin sekä 50 Ω:n vastuksen kanssa. 50 Ω:n vastus kuvaa spektrianalysaattorin tuloimpedanssia. Keinoverkon impedanssiin vaikuttaa myös sähköverkon häiriöitä poistava RLC-piiri (250 µH, 2 µF, 10 Ω), mutta sen impedanssi on mittausalueella lähes nolla, joten käytännössä sen oletetaan olevan oikosulussa.

CISPR 16-1 standardi nimeää 150 kHz:sta alkavan keinoverkon version cut-down-versioksi. Siinä on vähemmän komponentteja ja sen impedanssin stabilointi on hyvä ainoastaan 150 kHz:n yläpuolella. Sähköverkon häiriöitä poistavat komponentit ovat korvattu ainoastaan yhdellä yhden faradin kondensaattorilla, myös liitântäkondensaattorina toimivan 0,25 µF:n kondensaattorin voisi mielummin korvata 0, 1 µF:n kondensaattorilla. Näillä komponenteilla saadaan täysin riittävä tarkkuus johtuvien häiriöiden mittaukseen 150 kHz:n ja 30 MHz:n välillä. (Elmac 1997.)

Endeleon keinoverkko on komponenteiltaan kykeneväinen mittaamaan jo 9 kHz:sta, mutta Endeleolla ei ole toistaiseksi ollut tarvetta mitata häiriöitä 150

kHz:n alapuolelta. Endeleo käyttää sähköverkon häiriöitä poistavia komponentteja, sillä RLC-piiri poistaa häiriöt huomattavasti paremmin, kuin pelkkä yksi suuri kondensaattori. Endeleon keinoverkkoa syötetään usein variakin kautta, josta saadaan huomattavasti suurempaa jännitettä kuin kiinteästi asennetuista kolmivaihesähköpistorasioista. Jännitteen kasvaessa, myös häiriöiden suuruus kasvaa. AC-verkon särö saa olla enintään viisi prosenttia, joten jännitteen kasvaessa myös särön suuruus kasvaa. Esimerkiksi 400 V:lla jännitteen särö saa olla 20 voltia, ja 700 V:lla 35 voltia. (Sähköverkon särö 1996.)

CISPR 16-1 standardissa mainittiin $50 \Omega / 50 \mu\text{H} + 5 \Omega$ -versio. Tässä versiossa keinoverkon toiminta-alue oli 9 kHz:stä 30 MHz:iin. Sähköverkon häiriöitä poistavan RLC-piirin merkitys tulee esille, kun mittausalue on alle 150 kHz:n.



KUVIO 4. Testattavalle laitteelle tehty impedanssi taajuuden funktiona (Elmac 1997.)

Kuviossa 4 esitetään testattavan laitteen impedanssikäyrä läpi mittausalueen. Kuviossa näkee, että pienemmillä taajuuksilla impedanssi on huomattavasti pienempi, kuin 50Ω , ja se saavutetaan noin 600 kHz:n taajuuden kohdalla. Endeleon keinoverkon impedanssikäyrä on yhtenäisen viivan mukainen.

Opinnäytetyöni työpaikalta oleva ohjaava henkilö, Seppo Varpa, laski Endeleon keinoverkon impedanssin taajuuden funktiona. Impedanssikäyrä myös simuloitiin OrCAD:n Spice-simulointiohjelmalla.

Laskukaavan suorittamiseksi keinoverkko jaettiin kolmeen osaan (kuvio 5): sähköverkon häiriöitä poistava osuus (LV, CV ja RV), määrätty komponentit (LM, CM ja RM), sekä spektrianalysaattorin puoleiset komponentit (CS ja RS). Impedanssi täytyy laskea suuntavektoreina, jotta saadaan laskettua impedanssi vektoreiden suunnan ja pituuden mukaan. Suuntavektorit ovat nimetty TX, TY ja TZ, vektoreiden suunnan mukaisesti.

Seuraavassa lasketaan TX, eli verkon puoleisen osan impedanssi. Jokaisen komponentin impedanssi summataan yhteen ja siitä saadaan TX:n pituus.

$$TX = RV + [2 * \pi * fl * CV * (i)]^{-1} + 2 * \pi * fl * LV * (i).$$

$$TY = [2 * \pi * fl * CM * (i)]^{-1} * RM$$

$TZ = RS + [2 * \pi * fl * CS * (i)]^{-1}$. TVX on testattavan laitteen impedanssi, jossa TX ja TY ovat rinnan ja ne yhdessä 50 μ H:n kelan kanssa ovat sarjassa.

$$TVX = \left[\left(\frac{1}{TX} \right) + \left(\frac{1}{TY} \right) \right]^{-1} + 2 * \pi * fl * LM * (i).$$

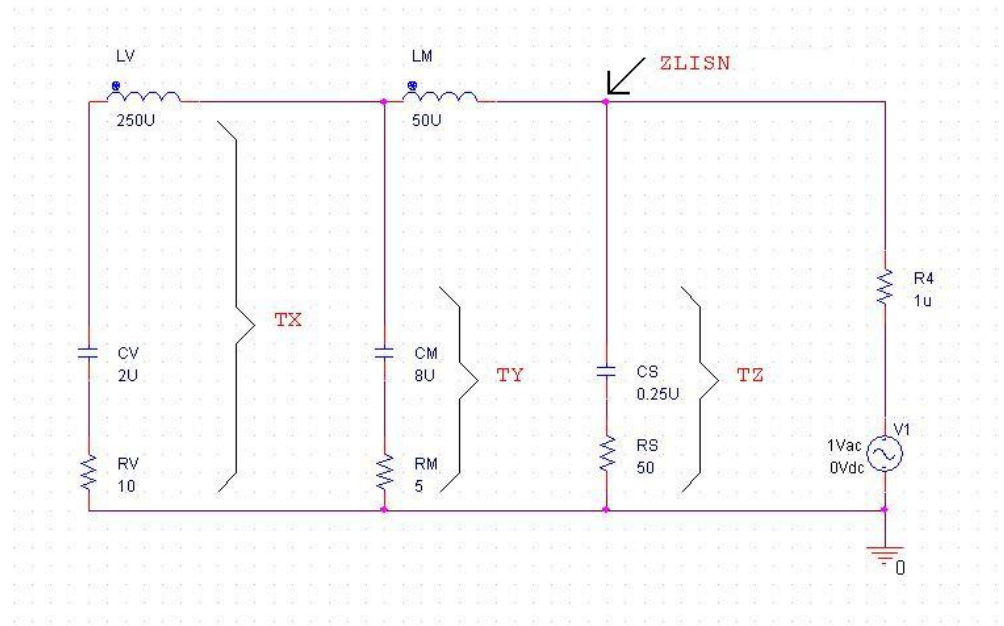
Kun lasketaan impedanssi rinnan kytketyistä TVX:stä ja TZ:sta.

$$ZLISN = \left[\left(\frac{1}{TVX} \right) + \left(\frac{1}{TZ} \right) \right]^{-1}.$$

Esimerkiksi kun $fl = 7$ MHz saadaan $ZLISN = 49.976 + 1.045i$.

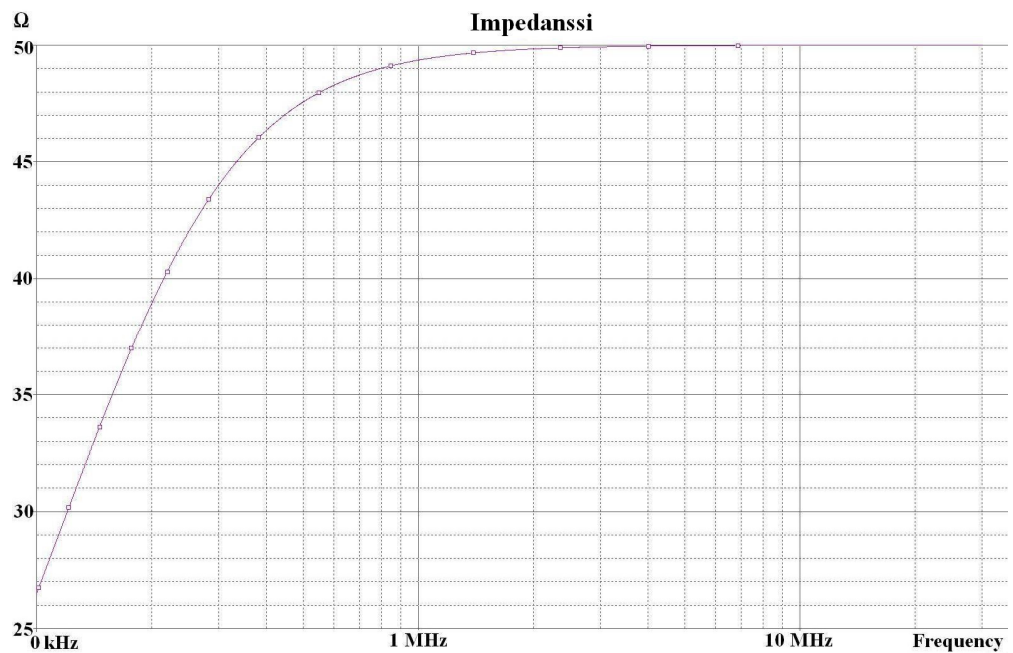
ZLISN itseisarvo kertoo testattavan laitteen keinoverkosta näkemän impedanssin $|ZLISN| = 49.987$. Vastus R4 on simulaattoriin tarvittava virranmittausvastus.

Vektorilaskuilla saatu impedanssikäyrä on yhtenevä OrCAD Spice –simuloinnin kanssa.



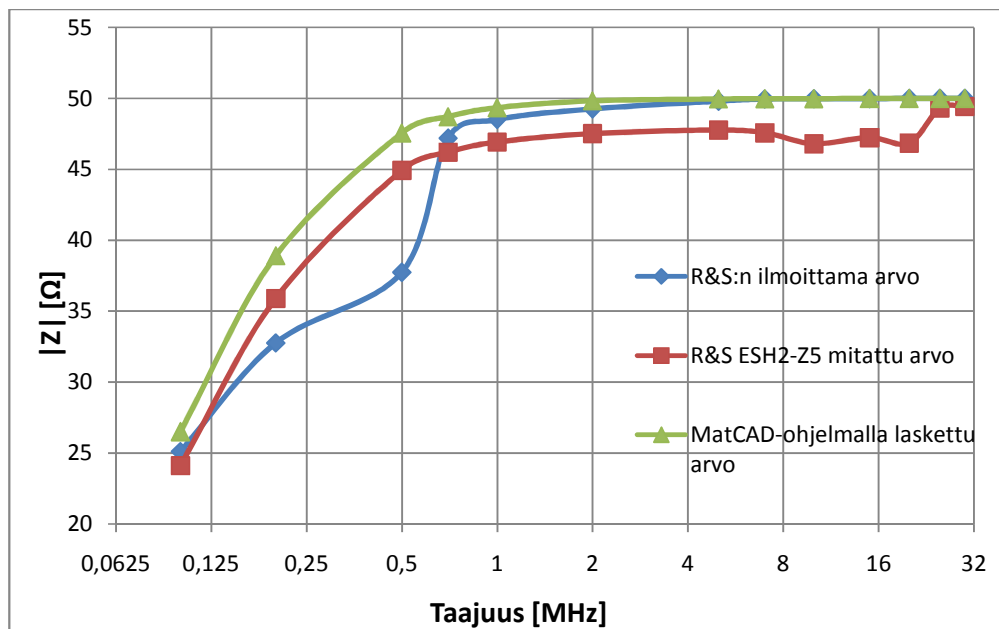
KUVIO 5. Endeleon keinoverkon impedanssimulointi

Spice-simulaattorilla simuloitiin kuvion 5 kytkentä ja simulointitulokseksi tulee kuvion 6 mukainen käyrä. Simuloitu käyrä on hyvin samanlainen kuin kuvion 4 ja menee hyvin 20 %:n toleranssin sisään.



KUVIO 6. Simuloitu keinoverkon impedanssikäyrä

Lahden ammattikorkeakoulussa olevan Rohde & Schwarzin kolmivaihekeino-verkko ESH2-Z5:n kalibrointitodistuksessa mainitaan kyseisen keino-verkon mitattu impedanssi sekä ohjeimpedanssi taajuuksittain. Edellisten laskujen perusteella kuviossa 7 esitetään Rohde & Schwarzin mitattujen ja ohjeen mukaisten impedanssien sekä OrCAD- ja MathCAD-ohjelmilla laskettujen arvojen käyrät.

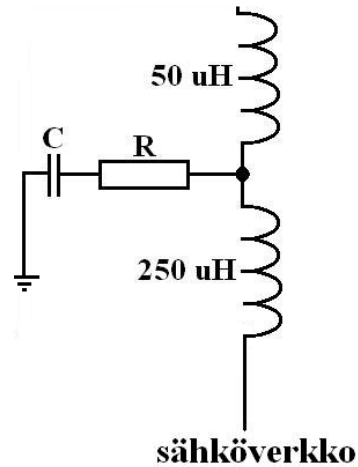


KUVIO 7. Keino-verkon impedanssi

Keino-verkon läpi kulkeva virta menee kelojen läpi testattavalle laitteelle. Kun testattavalta laitteelta katkaistaan äkisti sähkö, keloissa oleva energia saattaa aiheuttaa jopa yhden kilovoltin transienttipiikin. Tämä transienttipiikki voi helposti rikkoa mittauslaitteen, eli spektrianalysointilaitteen, sillä mittauslaite on kytketty ainoastaan suodinpiirikortin kautta pääpiiriin. Näitä transienteja poistamaan on suunniteltu standardissa määrätty $8 \mu\text{F}$:n kondensaattori ja 5Ω :n vastus. (Elmac 1997.)

Standardissa määrätty $8 \mu\text{F}$:n kondensaattori ja 5Ω vastus vaimentavat myös keloissa tapahtuvaa resonanssia. Resonanssi muodostuu, kun sähköverkon induktanssi ja kapasitanssi yhdessä kelan induktanssin ja keloissa muodostuvan hajakapasitanssin sekä piirikorteilla olevien kondensaattoreiden kapasitanssi rupeaa aiheuttamaan värähtelyä esiintyvillä taajuuksilla. Standardissa määrätty kondensaattori ja vastus muodostaa RC-piirin, joka vaimentaa alkavan resonanssin. RC-piiri on

sijoitettu mahdollisimman lähelle keloja, jotta sen vaikutus olisi hyvä. Kuviossa 8 esitetään kelojen sekä RC-piirin kytkentä.



KUVIO 8. Kelojen läheisyydessä oleva rc-piiri

Endeleon keinoverkossa $8 \mu\text{F}$:n kondensaattorin rinnalle on sijoitettu kaksi kappaletta $22 \text{ k}\Omega$:n vastuksia sarjaan. Niiden tehtävänä on purkaa kondensaattorit, jotta kondensaattoreiden varaus ei aiheuta turhia sähköiskuja. Vastukset purkavat myös $2 \mu\text{F}$:n kondensaattorin, joka on $250 \mu\text{H}$:n kelan kanssa sarjassa. Esimerkiksi vaiheen yksi $2 \mu\text{F}$:n kondensaattorit ovat sarjassa olevat $1 \mu\text{F}$:n kondensaattorit C1 ja C12.

Kaikkien kelojen läheisyydessä olevien RC-piirien tehtävänä on myös toimia alipäästösuotimina, eli päästää pienet taajuudet läpi. Molemmiin puolin $250 \mu\text{H}$:n kela on vastukset pehmentävät kelassa tapahtuvan värähtelyn seurauksena mahdollisesti tulevia transienttipiikkejä.

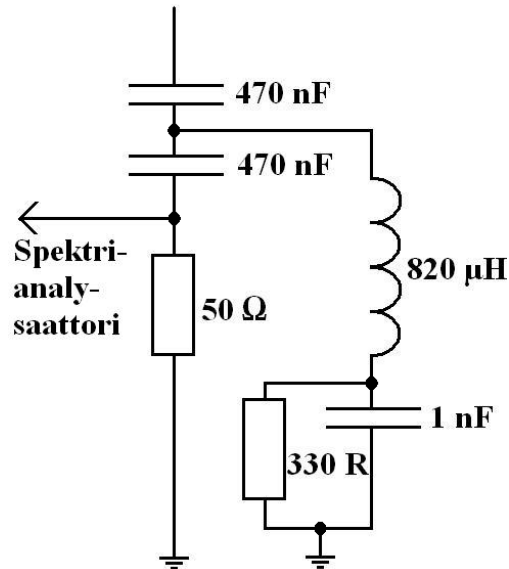
Endeleon keinoverkossa on suodinpiirikortti, jonka läpi testattavan laitteen tuottama häiriösignaali kytketään 50Ω :n liittimeen, eli spektrianalyysatorille. Suodinpiirikortilta pystytään valitsemaan kolme suodinta: -20 dB :n vaimennin, 150 kHz :n ylipäästösuodin sekä rajoitin. Jos epäillään testattavan laitteen tuottavan paljon suuria häiriöjännitepiikkejä mittauksiin, on suositeltavaa käyttää rajoitinta. Rajoitin rajoittaa testattavalta laitteelta spektrianalyysatorille suurien häiriöjännit-

teiden pääsyn. Rajoittimessa on zener-diodi, jonka arvo määrää kuinka suuri jännite pääsee spektrianalysaattorille. Zener-diodin arvo on määrätty tarpeeksi matalaksi, jotta suuret jännitteet eivät pysty rikkomaan herkkää spektrianalysaattoria.

Suodinpiirikortilla on myös - 20 dB:n vaimennin. Vaimenninta käytetään samoissa tilanteissa kuin rajoitinta, eli jos epäillään suuria häiriöjännitteitä. Suuret häiriöjännitteet voivat mennä spektrianalysaattorin mitta-alueen yli, jolloin oikeaa mittaustulosta ei saada mitattua, voidaan asettaa - 20 dB:n vaimennin päälle. Vaimennin tiputtaa koko häiriöjännitteen tason 20 dB:ä alemmas, jolloin spektrianalysaattorin mitta-alue pystyy mittaamaan suurimmatkin häiriöjännitepiikit. - 20 dB:n vaimennus täytyy ottaa huomioon mitaustuloksia analysoidessa.

Suodinpiirikortin kolmas ominaisuus on 150 kHz:n ylipäästösuodin. Eli suodin poistaa kaikki alle 150 kHz:n alapuolella olevat signaalit. 150 kHz taajuus on valittu johtuvien häiriöiden mittauksen aloitustaajuuden mukaan. Ylipäästösuodin on tarpeen, jos tiedetään testattavan laitteen tuottavan voimakasta häiriötä alle 150 kHz:n. Mitta-alueen alapuolella olevat korkeat häiriötasot voivat leikkautua spektrin etuasteissa ja aiheuttaa harmonisten muodossa virhenäyttöjä spektrissä.

Sähköverkon AC-jännite tulee 50 Hz:n taajuudella, se tulee helposti suodinpiireistä läpi. Tämän takia Endeleon keinoverkossa on ylimääräinen suodin 50 Hz:n taajuutta vastaan. Suodin on sijoitettu juuri ennen spektrianalysaattorille menevää 50 Ω :n liitintä. Niin sanottu kytkentäkondensaattori, eli 0,25 μ F:n kondensaattori on Endeleon keinoverkossa toteutettu kahdella, sarjaan kytketyllä 470 nF:n kondensaattorilla. Näiden kondensaattoreiden välistä lähtee 820 μ H:n kuristin sekä tämän sarjaan kytketty RC-piiri, eli 1 nF:n kondensaattori ja 330 Ω :n vastus (Kuvio 9.)



KUVIO 9. 50 Hz:n vaimennin

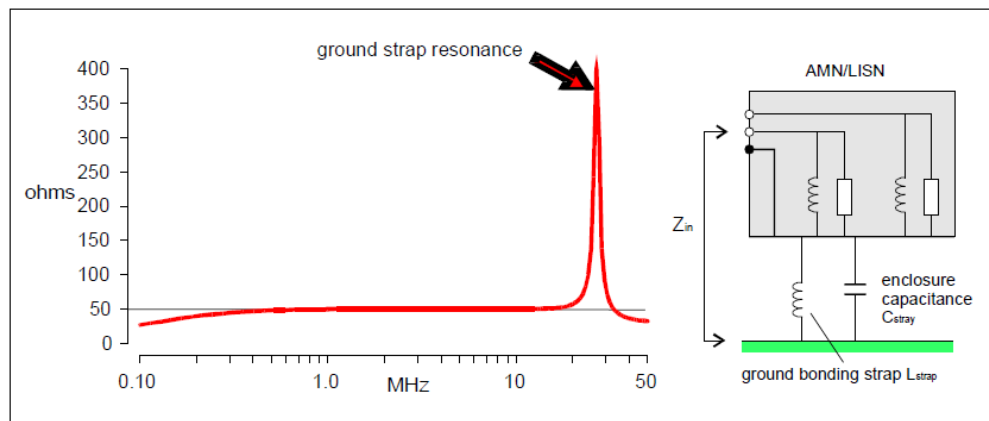
Tämä 50 Hz:n ylimääräinen vaimennin myös optimoi 20 – 30 MHz:n mittausalueella olevan häiriön kolmen desibelin sisään. 20 - 30 MHz:n mittausalueella on muuta mittausaluetta enemmän virhettä, johtuen rakenteessa olevasta hajakapasitanssista johon testattava laite kytketään. 20 – 30 MHz:n mittausalueen suurempi virhe saattaa johtua myös mahdollisesta maadoituksen puutteesta.

CISPR 16-1 standardin mukaan, maadoituslevy kuuluu olla joko keinoverkon alla tai lähietäisyydellä pystyssä. Keinoverkosta tulee olla mahdollisimman lyhyt ja hyvä maadotuskontakti maadoituslevyyn. Maadoituslevyn tulee olla vähintään kaksi kertaa kaksi metriä, tai sen tulee olla ferriittihuoneen lattia tai seinä. (Elmac 1997.)

Maadoituslevy voi olla esimerkiksi alumiinia, kuparia tai terästä, maadoituslevyn paksuudella ei ole väliä, kunhan maadoituslevyn päätarkoitus on tuoda kapasitiivinen yhteys testattavalle laitteelle. Kuitenkin 150 kHz:lla mitatessa, alumiinisen levyn tunkeumasyyvyys on 0,2 mm. Taajuuden kasvaessa tunkeumasyyvyyden paksuus pienenee ja tästä syystä ylimääräinen levyn paksuus ei suoranaisesti vaikuta levyn impedanssiin. Tunkeumasyyvyys kertoo, kuinka syvälle johtavaan levyyn radiotaajuinen sähkövirta pääsee tunkeutumaan. (P-N Designs Inc. 2010, Elmac 1997.)

Jos testattava laite tuottaa voimakkaita matalataajuisia magneettikenttiä, joita esimerkiksi tehollähde saattaa tuottaa, se voi indusoida pyörrevirtoja maalevyyn. Jos maalevyn impedanssi on liian suuri, pyörrevirrat saattavat tuottaa jännite-eroja maalevyn yli. Nämä tekevät virheitä mittaustuloksiin. Tämänkaltaisissa testeissä alumiinisen tai kuparisen maadoituslevyn paksuus olisi hyvä olla yksi millimetri tai paksumpi. (Elmac 1997.)

Kun keinoverkko yhdistetään maadoituslevyyn johtimella, niiden välille syntyy kapasitanssia. Tämä alkaa resonoimaan maadoituslevyyn yhdistävän johtimen induktanssin kanssa. Näistä komponenteista syntyvä resonanssitaajuus näkyy impedanssipeikkinä 10 – 100 MHz:n välillä, joka sekoittaa mittaustulokset. Tyypillinen keinoverkon ja maadoituslevyn välinen kapasitanssi on 500 pF. Resonanssitaajuus sijoittuu yli 30 MHz:n, eli mittausalueen ulkopuolelle ainoastaan, jos maadoitusjohtimen induktanssi on 40 nH:ä tai alle. 40 nH:n induktanssin saavuttamiseksi maadoitusjohdin ei saa olla yli viittä senttimetriä pidempi. CISPR standardissa suositellaan, että johtimen pituus saa olla kolme kertaa niin pitkä kuin johtimen leveys. Kuviossa 9 näytetään testattavalle laitteelle näkyvä impedanssi sekä impedanssipeikki, joka syntyy resonanssipiiristä. Kuvion 10 kapasitanssi on 500 pF:a ja induktanssi on 100 nH:ä. (Elmac 1997.)

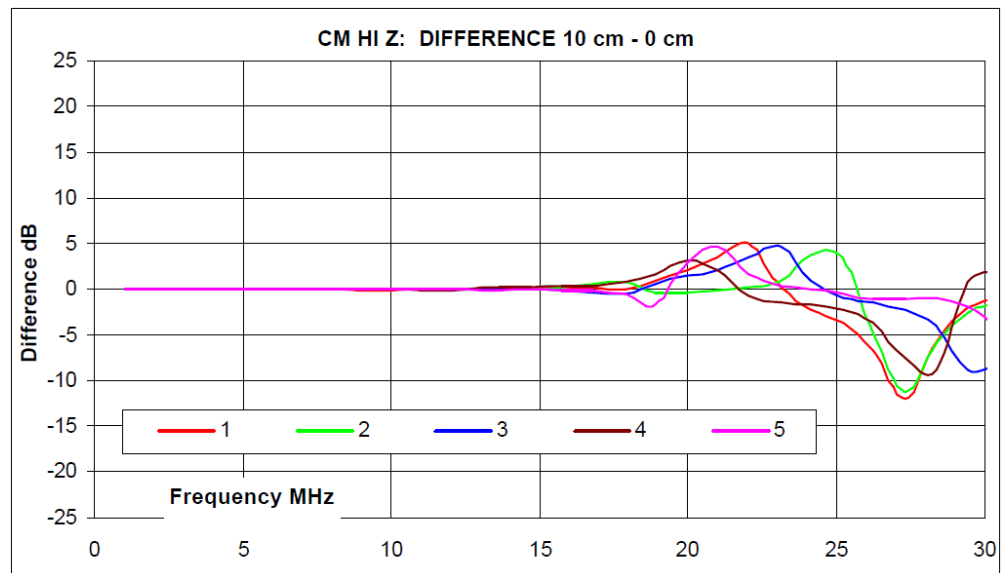


KUVIO 10. Resonanssipeikki (Elmac Inc.1997.)

Elmac Inc. on tehnyt testejä viidellä eri kaupallisella keinoverkolla. Yksi näistä keinoverkoista on Rohde & Schwarzin ESH3-Z5, eli sama kuin Lahden ammatti-

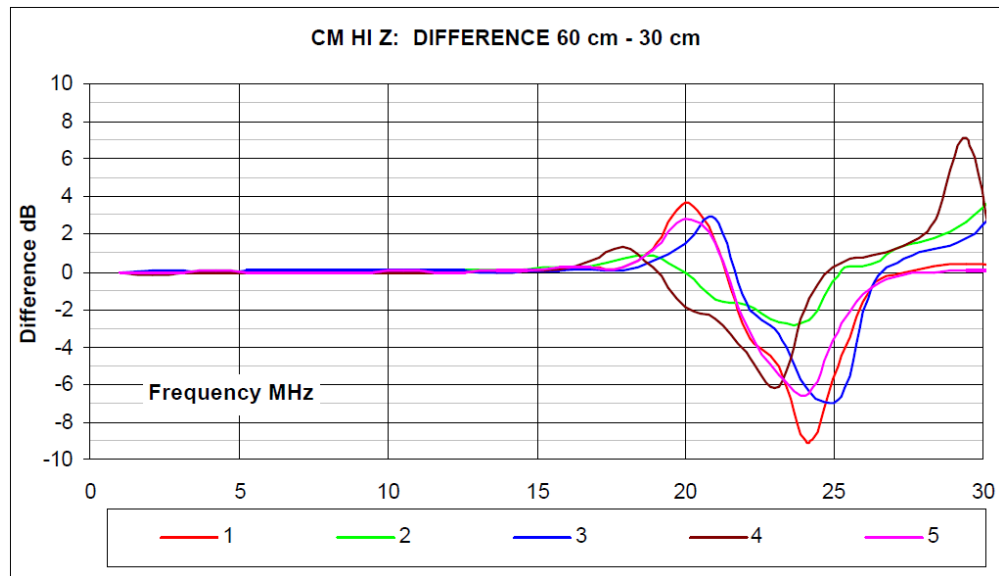
korkeakoululla, jota käytin vertailukohteena. Kuvioissa 10 ja 11 maadoituslevy mittaauksia tehdessä on erillinen pystysuunnassa oleva maadoituslevy ja kuviossa 12 maadoituslevy on vaakasuunnassa.

Kuviossa 11 keinoverkko on kytketty maadoituslevyyn 30 senttimetrin pituisella 10 mm^2 johtimella. Kuviossa esitetään ero, kun keinoverkkoa siirretään maadoituslevyn kyljestä 10 senttimetrin päähän. Tässä keinoverkon ja maadoituslevyn välinen kapasitanssi muuttuu. 150 MHz:n jälkeen mittaustuloksissa on huomattavissa eroja. Osa kaupallisten keinoverkkojen mittaustuloksista poikkeaa jopa yli kymmenen desibeliä kapasitanssin muuttuessa.



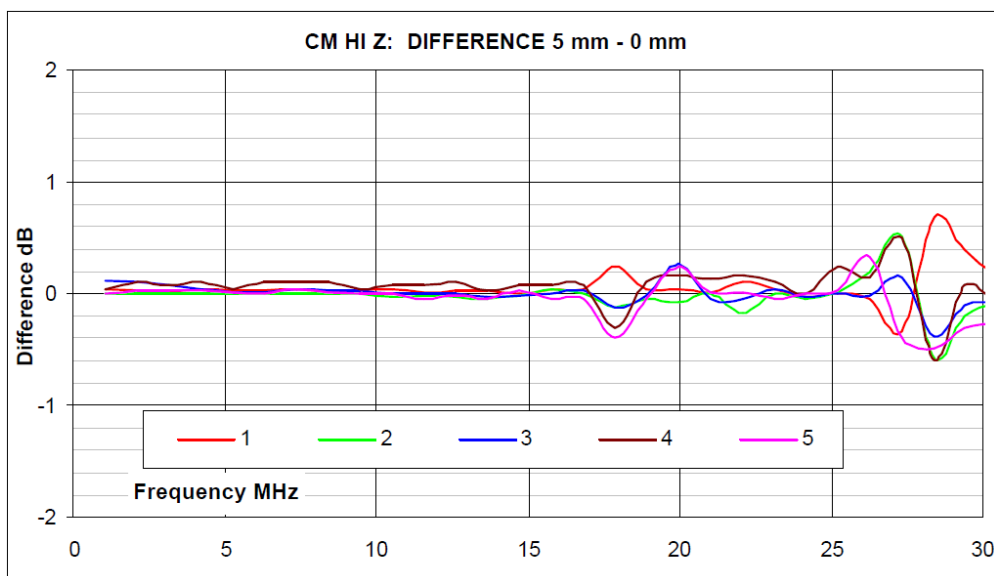
KUVIO 11. Keinoverkon ja maadoituslevyn välisen kapasitanssin kasvattaminen (Elmac Inc.1997.)

Kuviossa 12 esitetään mittauskäyrä, kun keinoverkot on sijoitettu yhden senttimetrin päähän maadoituslevystä ja keinoverkon ja maalevyn yhdistävän johtimen pituutta vaihdetaan 60 senttimetrinä 30 senttimetriin. Muutos johtimen pituudessa vaikuttaa suurilla taajuuksilla huomattavasti.



KUVIO 12. Keinoverkon ja maadotuslevyn yhdistävän johtimen induktanssin kasvattaminen (Elmac Inc. 1997.)

Kuviossa 13 esitetään mittaustulos, jossa keinoverkko on liitetty maadotuslevyyn erittäin lyhyellä johtimella. Keinoverkko on sijoitettu horisontaalisesti olevan maadotuslevyn päälle ja keinoverkon etäisyyttä on muutettu nolasta viiteen millimetriin. Mittaustulosten perusteella suuremmilla taajuuksilla mittaustulos eroaa jo viiden millimetrin etäisyyden kasvattamisella reilun puolidesibeliä.



KUVIO 13. Keinoverkon etäisyyden kasvattaminen maadoituslevyyn nähden (Elmac Inc. 1997.)

Optimaalinen johdin keinoverkon ja maadoituslevyn välissä on tarpeeksi suuri pinta-alaltaan ja hyvin johtavaa materiaalia. Kuviossa 13 esitetään Elmacin versio hyvästä maadoituksesta horisontaaliseen maadoituslevyyn. Kyseistä maadoitusta on käytetty kuvion 14 mittauksissa.



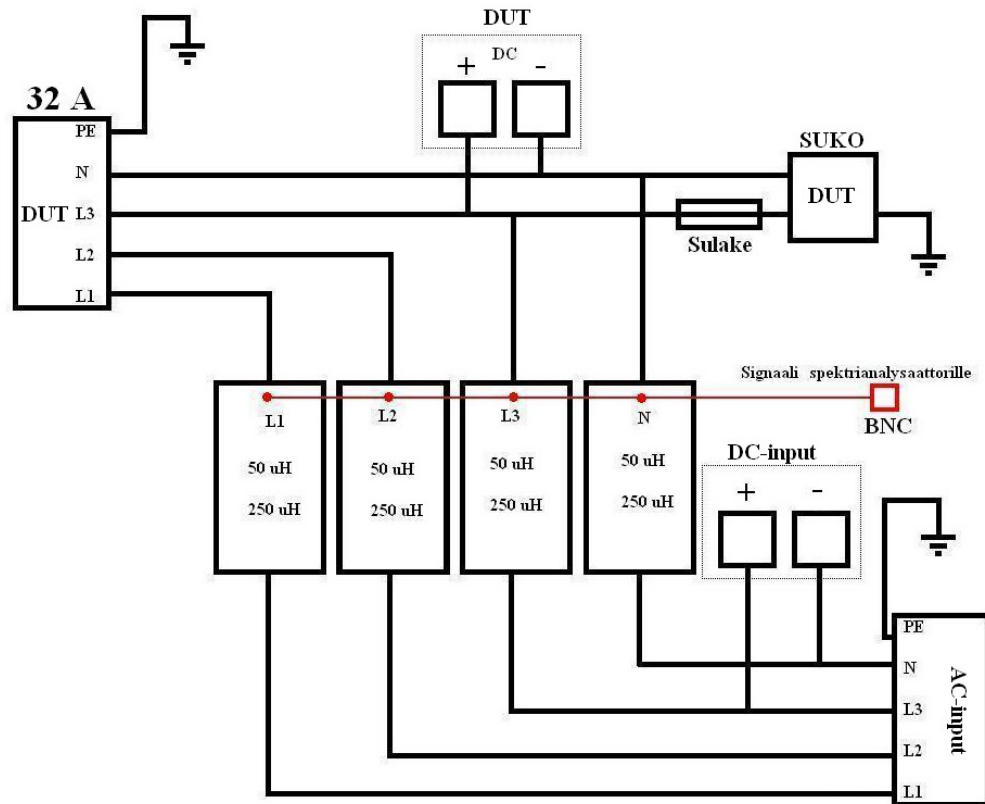
KUVIO 14. Optimaalinen maadoitus keinoverkon ja horisontaalisen maadoituslevyn välille (Elmac Inc. 1997.)

4.3 Keinoverkon rakenne

Keinoverkon kotelo (liite 2 ja 3) on myös Endeleon oma suunnittelema. Se koostuu laitteen vaippaosasta, päätyseinistä, kelojen kannatinlevyistä sekä etu- ja takaseinistä. Vaippaosaa on alumiinia ja muut kotelon osat terästä. Kelojen kannatinlevyt ovat piirilevymateriaalista FR4, eli lasikuidun ja epoksiliiman yhdisteestä tehdyt tasot. Teräsosat on maalattu mustan tai valkoisen värisiksi.

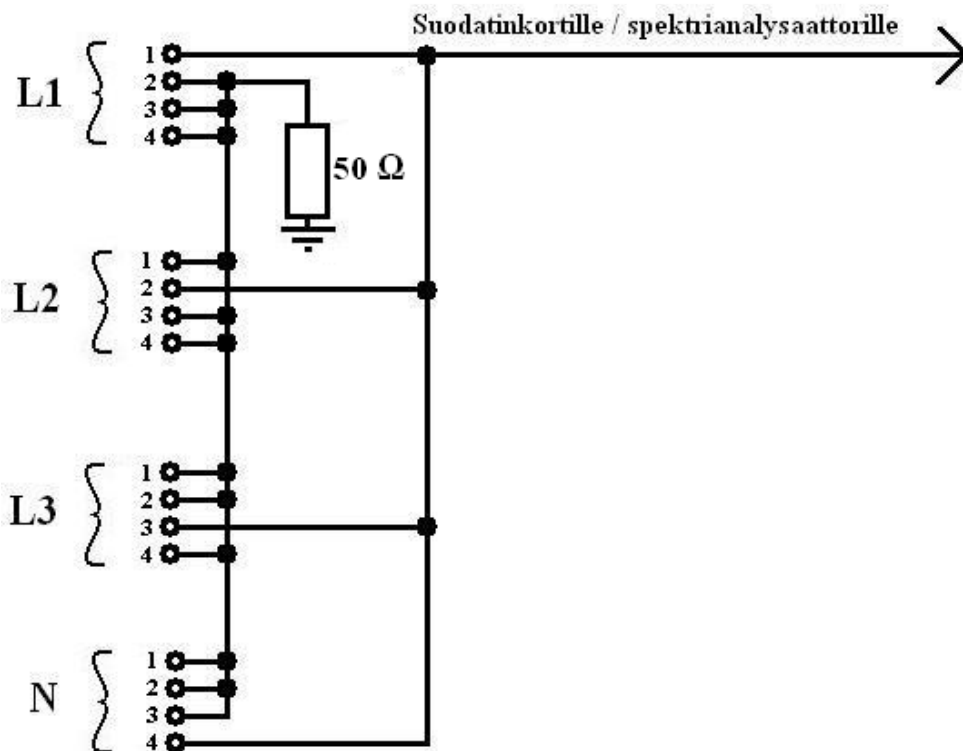
Keinoverkkoon pystytään syöttämään sähköä (liite 4) joko kolmivaihepistorasias- ta tai DC-jännitettä käyttäen kahta banaani-liittintä. Testattava laite pystytään liittämään keinoverkkoon (liite 5) kolmivaihepistorasian tai suko-liittimen kautta. Myös DC-jännitteisen laitteen pystyy liittämään keinoverkkoon, laitteen päällä sijaitsevien kahden banaani-liittimen kautta. DC-jännitteistä laitetta mitattaessa laitteen päällä on maadoituspistoke, johon laite maadoitetaan. Maadoitus on yhteydessä laitteen runkoon. Maadoitus on erittäin tärkeä, sillä keinoverkossa on kondensaattoreita, joiden kapasitanssi on noin 10 μF jokaisen vaiheen ja maan välillä. Esimerkiksi laitteen ollessa kytkettynä sähköverkkoon 230 V ja 50 Hz, näiden kondensaattoreiden läpi kulkee virtaa lähes 0,9 A. Jännitteen kasvaessa myös virran määrä lisääntyy. Tämän suuruinen virta voi olla kohtalokas, jos liitos maahan ei ole kunnollinen. Testattavan laitteen tuottamia häiriöitä mitataan BNC-liittimen kautta, johon spektrianalysaattori kytketään koaksiaalijohtimella. (EMC for systems and installations 2000 sivu 241)

Testattavan laitteen suko-liittimen toinen johdin ja DC-jännitteen toinen banaani-liitin on liitetty laitteen L3-vaiheeseen. Toinen johdin ja toinen banaani-liitin on liitetty N-vaiheeseen. Suko-pistorasian ja L3-vaiheen välissä on 15 A:n sulake. Kuviosta 15 näkee laitteen johdoituskuvan.



KUVIO 15. Keinoverkon johdotuskuva

Sähkö syötetään laitteen alareunasta (liite 2), 3-vaihe tai DC-pistokkeesta. Pistokkeista sähkö kulkee piirikortille ja keloille. $50 \mu\text{H}$ kelan jälkeen sähkö jakaantuu kelan jälkeiselle suodinpiirikortille ja testattavalle laitteelle. Testattava laite saa häiriötöntä sähköä, ja kelan jälkeinen suodinpiirikortti johtaa testattavan laitteen tuottamat häiriöt koaksiaalikaapelilla laitteen yläosassa sijaitsevaan valintakytkimeen (liite 5), jolla valitaan mitattava vaihe. Valintakytkimeltä signaali kulkee suodatinkortille ja sen jälkeen BNC-liittimeen. BNC-liittimeltä signaali mitataan koaksiaalikaapelin kautta spektrianalysointilaiteella.



KUVIO 16. Valintakytkimen johdotuskaavio

Kuviossa 16 on esitetty valintakytkimen johdotuskaavio. Valintakytkimessä on neljä asentoa ja neljä kanavaa. Koaksiaalikaapelilla on tuotu jokaiselle kanavalle kunkin vaiheen signaali. Valintakytkimellä valitaan, mikä signaali menee suodatinkortille ja siitä eteenpäin BNC-liittimelle.

Valintakytkimen asento osoittaa, mikä kanava on valittu. Asennossa yksi vaiheen L1 signaali pääsee läpi, mutta muut vaiheet on kytketty maahan 50 Ω:n vastuksen kautta, jotta niistä ei tulisi ei-toivottuja häiriöitä. Asennossa kaksi vaiheen L2 signaali pääsee läpi ja muut vaiheet ovat kytkettynä maahan. Vaiheilla L3 ja N valintakytkin toimii samalla periaatteella.

50 μH kelojen jälkeen johtimet eivät saa kulkea rinnakkain, sillä siinä saattaa tapahtua ylikuulumista, joka aiheuttaa virhettä mittaukseen.. Johtimille on rakennettu 50 μH kelan yläosaa paikallaan pitävän kannatinlevyn päälle reitit (liite 6), joita pitkin ne kulkevat tarpeeksi erillään toisistaan.

Kelat on kytketty tukevasti toisiinsa kiinni ruuvilla ja mutterilla (liite 7). Samasta liitoksesta lähtee leveä kuparifolio piirikorteille. Tässä kohtaa on tärkeää käyttää leveää kuparifoliota, sillä keloissa kulkee päävirta ja folioilla taataan pieni induktanssi kelojen ja rungon välille.

Maadoitettaessa piirikorttia kortin ja maatason välissä pitää olla mahdollisimman pieni induktanssi. Tämä täytyy olla sen takia, jotta piirilevyillä olevat komponentit, kuten kondensaattorit ja vastukset, toimivat suunnitellulla tavalla. Jos liitoksissa käytettäisiin pyöreitä johtoja kuparifolioiden tilalla, induktanssit olisivat suuremmat. Laitessa on valintakytkimen jälkeen suodinkortti (liite 7).

4.4 Kelan rakenne ja toiminta

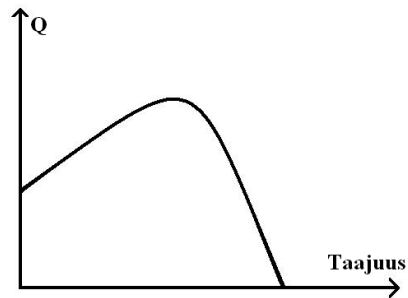
Kelat ovat Endeleo Oy:n suunnittelemia. Kelat ovat ilmasydämissä. Kelan käämirakenteessa kierrosten ja kerrosten välissä on ilmaeristys (liite 8). Kerrosten välinen ilmaeristys on toteutettu laittamalla lasikuitutikkuja jokaisen kerroksen väliin. Ilmaeristys täytyy olla suuri, jotta keloissa syntyvä hajakapasitanssi olisi mahdollisimman pieni. Kun keloissa syntyvä hajakapasitanssi on pieni kelan resonanssitaajuus on suuri.

Kelan induktanssi, joka on 50 μH tai 250 μH , ja kelan kierrosten ja kerrosten väliin syntyvä hajakapasitanssi alkavat aiheuttaa resonanssia tietyllä taajuudella. Resonanssitaajuuden tulee olla yli 30 MHz, sillä se on suurin taajuus, jota mitataan johtuvien häiriöiden mittauksessa. Jos resonanssitaajuus on liian pieni, se tulee mittaus-alueelle ja vääristää mitattavan laitteen tuottaman häiriön mittausta.

Kelat ovat yleisesti lähekkäisiksi silmukoiksi kierrettyä lankaa. Tämä edistää johtimiin syntyvän induktion syntymistä, sillä virran synnyttämä magneettikenttä ulottuu useisiin silmukoihin samanaikaisesti ja tämä tehostaa induktion kasvua. Myös kelan kerrosten määrä vaikuttaa induktanssin määrään, sillä magneettikenttä ulottuu kierroksista toiseen, myös kerroksista toiseen. Kun kierrokset ovat aivan kiinni toisissaan, ilmaeristeisen kelan induktanssi on noin 1,5 nH / mm langan pituuden mukaan. (Hajakapsitanssi 2006.)

Keloja käytetään kondensaattoreiden kanssa resonanssipiireissä ja suodattimissa. Niiden pitää olla laskettu oikean kokoisiksi induktiivisiksi reaktansseiksi, koska ilmakelojen induktanssi on joka tapauksessa säädettävä kohdalleen, ei hajakapasitanssin vaikutus tule häiritseväksi, kunhan toimitaan resonanssitaajuuden alapuolella. Kapasitanssi rajoittaa kelan käyttökelpoista taajuusaluetta. (Hajakapasitanssi 2006.)

Keloja vertailtaessa tulee esiin kelan Q-arvo, tämä on kelan hyvyysluku. Mitä suurempi on kelan Q-arvo, sitä pienemmät ovat kelan häviöt. Kelan Q-arvo nousee taajuuden funktiona pienillä taajuuksilla, mutta tippuu äkisti lähestyttäessä omaresonanssia. Hyvä Q-arvo saavutetaan muutamalla hyvällä tavalla. Kun kelas-
sa käytetään paksua lankaa, johtimessa on pieni resistanssi. Kun kierrokset pidetään erillään, hajakapasitanssit ovat pienet ja näin resonanssitaajuus on suuri. Kuviossa 17 esitetään Q-arvon käyrä taajuuteen nähden. (Hajakapasitanssi 2006.)

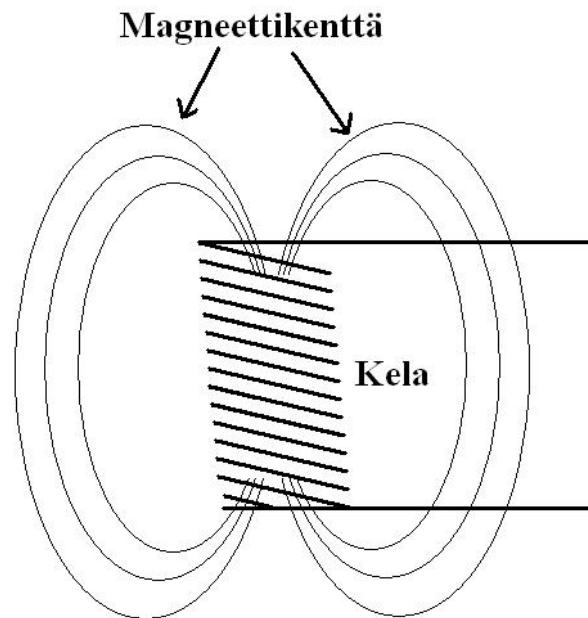


KUVIO 17. Kelan Q-arvo taajuuden funktion nähden

Jos ilmaeristeiseen kelaan halutaan paljon induktanssia, vaatii kela paljon suuria kierroksia. Ilmakelan magneettikenttä ulottuu kauas melko voimakkaana, jolloin lähistön johtimiin indusoituu suhteellisen voimakas signaalivirta. Kelojen keskinäisen kytkennän välttämiseksi ilmakelat on sijoitettava riittävän etäälle toisistaan tai käytettävä metalliseiniä kelojen välissä. Kohtisuoraan toisinsa nähden olevat kelat kytkeytyvät heikommin kuin samansuuntaiset.

Kelan tuottamat magneettikentät on otettu huomioon keinoverkkoa suunnitellessa. Keinoverkon vaiheiden välille on jätetty riittävästi tilaa, jotta magneettikentät ei-

vät häiritse viereisen vaiheen keloja (liite 2). Kuviossa 18 on esitetty kelan magneettikentän suunnat. (Hajakapsitanssi 2006.)



KUVIO 18. Kelan magneettikentät

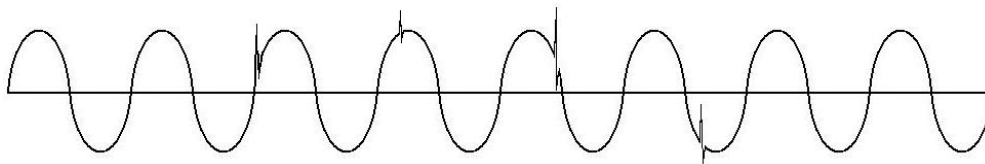
5 SÄHKÖVERKON HÄIRIÖT

Sähköverkossa esiintyy häiriöitä, jotka johtuvat sähkön tuottajasta ja käyttäjistä. Yleisempi lähde häiriöille on käyttäjä. Tavallisia sähköverkosta johtuvia häiriöitä ovat yliaallot, transientit, pitkäaikaiset yli- ja alijännitteet, jännitepiikit ja jännitekatkokset.

Yleisimpiä sähköverkon kautta tulevia häiriöitä ovat transientit eli häiriöpiikit. Transientti on verkkojännitteen hetkellinen muutos, jonka kestoaika on alle 100 μs . Transientteja aiheuttavat mm. tyristoriohjaukset, kontaktorit, hitsaaminen ja valaistus. Transientit etenevät sähköverkkoa pitkin ja pääsevät laitteisiin pistorasioiden kautta. Verkkojohtoa pitkin etenevä häiriö voidaan estää käyttämällä verkkosuodattimia, esimerkiksi ylijännitesuojia. (Sähkön laatu 2000.)

Transientit jaotellaan häiriöpiikin keston perusteella pitkiin, keskipitkiin ja lyhyisiin transientteihin. Pitkät transientit ovat yli 100 μs pitkiä. Nämä syntyvät esimerkiksi sulakkeen palamisesta. Keskipitkät transientit, pituudeltaan 1 μs – 100 μs , syntyvät valokatkaisimen toiminnasta. Lyhyet transientit, alle 1 μs , aiheutuvat kun kuorma kytketään sähköverkkoon. Transientteja synnyttää myös ylijännitesuojan toimiminen ja eristeen tai eristimen läpilyönti. (Sähkön laatu 2000, Elovaara Sähkön Laatu 2004.)

Transientit aiheuttavat usein ongelmia tietokoneiden käyttäjille. Tietoa saattaa tuhoutua tai tietokone saattaa käynnistyä uudelleen tai jopa vahingoittua. Esimerkki transienttiylijännitteen käyrämuodosta on esitetty kuviossa 19. (Sähköverkon häiriöt 2009.)

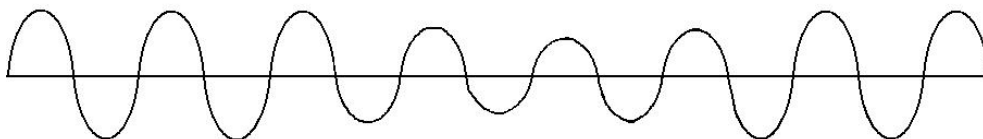


KUVIO 19. Transienttiylijännite

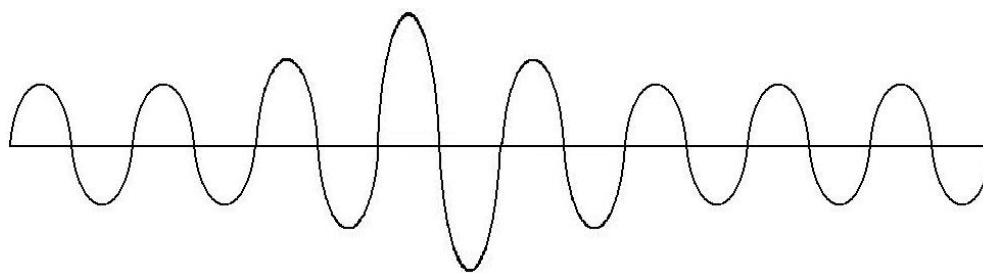
Pitkäaikaiset yli- ja alijännitteet:

Pitkäaikaiset jännitemuutokset syntyvät lähinnä vuorokausivaihteluista aiheutuvien jännitemuutosten yhteisvaikutuksesta. Pitkäaikainen ylijännite on yksi haitallisimmista häiriötyypeistä. Se saattaa vaurioittaa vakavasti herkkiä elektroniikkalaitteita, kuten ATK-laitteita. Pitkäaikainen alijännite saattaa aiheuttaa ATK-laitteiden sammumisia ja virhetoimintoja. Vähäinen jännite saa sähkömoottorit käymään kuumina ja tehottomina. (Sähkön laatu 2000.)

Nopeat jännitteen muutokset, jännitekuopat ja jännitteen nousu aiheutuvat yleensä suurien kuormitusten päälle- ja poiskytkemisistä ja nopeista jälleenkytkennöistä. Nopeat jänniteenmuutokset aiheuttavat valojen välkyntää ja joskus ongelma herkille kuormille, esimerkiksi tietokoneille ja vastaaville laittelle. Jännitteen kuoppa ja jännitteen nopean nousun käyrämuodot on esitelty kuvioissa 20 ja 21. (Sähkön laatu 2000.)



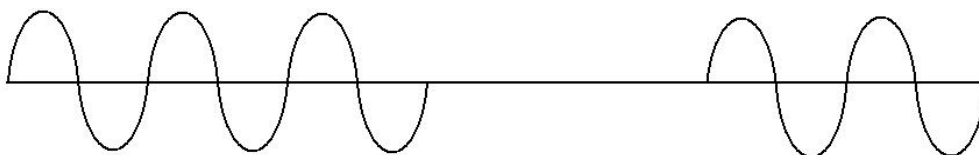
KUVIO 20. Jännitekuoppa



KUVIO 21. Nopea jännitteenousu

Keskeytykset:

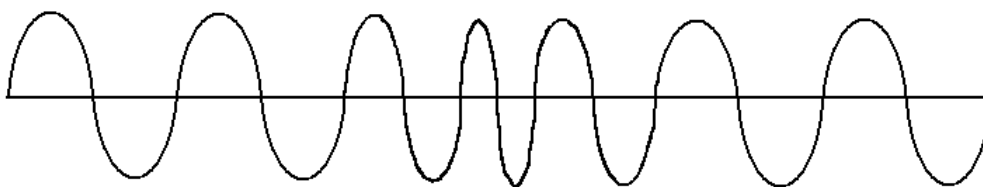
Yksi yleisimmistä sähköverkon häiriöistä on sähköjakelun keskeytys. Keskeytys voi olla joko suunniteltu korjaus- tai rakennustoimenpiteen vaatima keskeytys tai häiriökeskeytys. Joskus joudutaan myös rajoittamaan sähkötoimitusta tuotanto- tai siirtokapasiteettiongelmiin takia. Häiriökeskeytysten aiheuttajia ovat yleensä ukkonen, myrskyt, generaattoriviat, muuntajaviat, maankaivu, puut ja eläimet. Esimerkki jännitteen keskeytyksestä kuviossa 22. (Sähkön laatu 2000.)



KUVIO 22. Keskeytys

Taajuuspoikkeamat:

Suurien sähkölaitosten jakelualueella taajuuspoikkeamat ovat melko epätavallisia. Yleensä niitä esiintyy verkon varavoimakonekäytöissä ja pienillä jakelualueilla, kuten saarilla. Pääasialliset syyt taajuuspoikkeamiin ovat nopeat kuormitusmuutokset yksittäisillä generaattoreilla sekä joskus epästabiili ja ylikuormitettu maaseutuverkko. Esimerkki taajuuspoikkeamasta kuviossa 23. (Sähkön laatu 2000.)

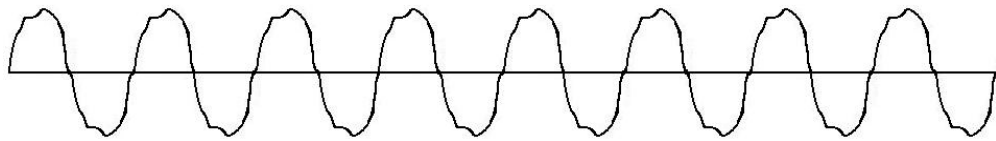


KUVIO 23. Taajuuspoikkeama

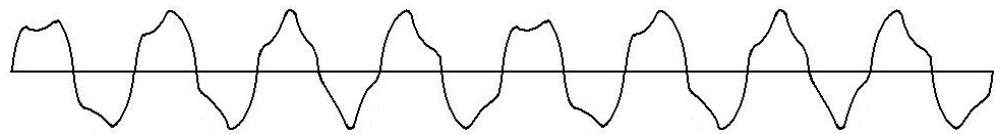
Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot:

Pääasialliset harmonisten ja epäharmonisten yliaaltojännitteiden synnyttäjät ovat ylikuormitetut muuntajat, epäsymmetriset kuormitukset, hakkuriteholähteet, tasasuuntaajat, taajuusmuuttajat, tyristorikäytöt ja purkauslamput. Taajuusmuutta-

jien ja vastaavien sähkölaitteiden lisääntyminen viime vuosina on lisännyt harmonisten yliaaltojännitteiden määrää sähköverkoissa. Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot aiheuttavat häviöiden kasvua verkossa, muuntajien ylikuormittumista, laitteiden kuormitettavuuden alenemista, mittareiden virhenäyttämiä, suojarleiden virhetoimintoja, äänihäiriöitä sekä nollajohtimien ylikuormittumista. Esimerkit harmonisista ja epäharmonisista jännitteistä on esitetty kuvioissa 24 ja 25. (Sähkön laatu 2000, Sähköverkon häiriöt 2009.)



KUVIO 24. Harmoniset yliaallot



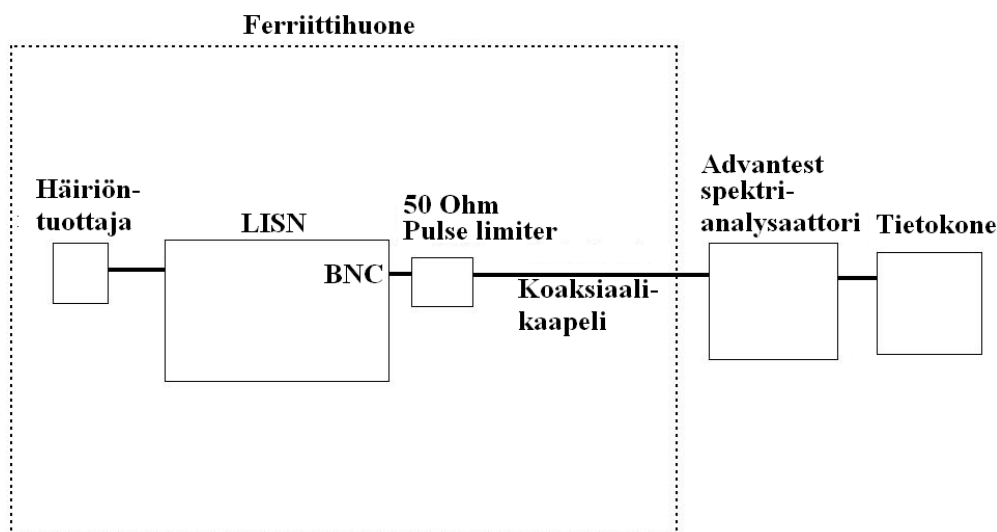
KUVIO 25. Epäharmoniset yliaallot

6 KEINOVERKON MITTAUKSET

Ensimmäiset mittaukset keinoverkkoon tein työpaikallani. Mittaukset tein HP network analyzer 8752A -piirianalyssaattorilla. Piirianalyssaattorilla mittasin vaiheiden välisiä eromuotoisia vaimennuksia sekä yhteismuotoisia vaimennuksia kanavakohtaisesti. Näistä mittauksista saatiin selville taso, jolla laite toimii ja jonka mukaisia tuloksia pystyttiin odottamaan myöhemmin tehtävissä, varsinaisissa mittauksissa.

Varsinaiset mittaukset tehtiin Lahden ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriossa. Laboratorio on englantilaiselta yhtiöltä tilattu laboratoriotila, jossa pystytään tekemään mittauksia, jotka ovat tarkkuudeltaan lähes EMC-standardien mukaisia. Laboratoriossa on mittaushuone, joka on sisäpuolelta vuorattu ferriitillä. EMC-laboratorio ei voi myöntää mitatuista laitteista virallista todistusta elektroniikkalaitteiden EMC-yhteensopivuudesta, mutta siellä voidaan tehdä erityisesti prototyypeille pre-compliance-mittauksia, joilla saadaan suuntaa antavaa tietoa laitteiden EMC-ominaisuuksista.

EMC-laboratoriossa verrattiin Endeleon rakentamaa keinoverkkoa ja koulun keinoverkkoja, jotka ovat Rohde & Schwarz sekä Chase -merkkisiä (liite 9). Endeleon ja Rohde & Schwarz -keinoverkot ovat kolmivaihekeinoverkkoja ja Chase-merkkinen keinoverkko on yksivaiheinen keinoverkko.



KUVIO 26. Mittausjärjestelmä

Testattavana laitteena emme käyttäneet normaalia testattavaa laitetta, koska sen tuottama signaali saattaisi muuttua eri mittausjärjestelyissä. Mitattavana laitteena meillä oli tasaista häiriösignaalia tuottava elektroninen häiriögeneraattori (liite 10). Häiriögeneraattori ei ollut kytkettynä sähköverkkoon, vaan se toimii omalla 9 V:n paristolla ja tuottaa 3-vaihepistorasiaan liitteen 14 mukaista häiriösignaalia. Kun käytimme häiriögeneraattoria, joka oli irti sähköverkosta, meidän ei tarvinnut huolehtia maadoituksista johtuvista mittausvirheistä.

Keinoverkon BNC-liittimeen oli kytketty piikkirajoitin. Piikkirajoitinta ei käytetty yksivaihekeinooverkon mittauksessa. Piikkirajoittimelta lähti koaksiaali-kaapeli spektrianalysaattorille, josta tieto siirrettiin tietokoneelle. Kuviossa 26 esitetään keinoverkon mittausjärjestelmä. Spektrianalysaattorilla mitattiin johtuvia häiriöitä peak- ja quasipeak-mittausmenetelmillä.

Häiriögeneraattorin (liite 12) ideana on tuottaa tasaista häiriötä (liite 11), joka kulkee keinoverkon läpi spektrianalysaattorille. Spektrianalysaattorilla tutkitaan millä tavalla tuotettu häiriö muuttuu keinoverkon läpi mentäessä. Häiriögeneraattori tuottaa kolmea eri taajuista häiriösignaalia, 50 kHz, 500 kHz ja 2 MHz yliaaltoineen. Nämä häiriöt summautuvat ja tuottavat myös harmonista värähtelyä.

Häiriögeneraattori toimii omalla 9 V:n paristolla. Tämä jännite reguloidaan 5 V:iin, jolla oskillaattori piiri toimii. Tämä piiri tuottaa tasaisen taajuuden, josta RC-piireillä tuotetaan eri taajuiset häiriösignaalit.

7 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Ensimmäiseksi Lahden ammattikorkeakoulussa mitattiin Rohde & Schwarzin ja Chasen keinoverkkojen tuottamat referenssihäiriöjännitteet (liite 13 ja 14). Näitä referenssijännitteitä verrataan Endeleon keinoverkkoon. Chase-yksivaihekeinoverkon referenssijännitteeseen täytyy lisätä 10 dB:ä mittaustuloksiin, sillä mittaustilanteessa keinoverkossa oli - 10 dB:n vaimennin päällä. Mittaukset on tehty peak-mittauksena, vaikka liitteissä lukee quasipeak. Yksi mittauksesta tehtiin kahteen kertaan. Tällä tarkistettiin, että mittaustulokset eri mittauskertojen välillä olivat pysyneet muuttumattomina.

Liitteessä 15 esitetään Endeleon keinoverkon vaimennusvirhe. Vaimennusvirhe kertoo kuinka paljon keinoverkko eroaa tietyllä taajuudella standardin mukaisesta mittaustuloksesta. Liitteen 16 kuvioissa vertaillaan Endeleon keinoverkkoa kaupallisiin keinoverkkoihin. Endeleon keinoverkosta verrataan jokaista kanavaa kaupallisten keinoverkkojen yhteen vaiheeseen. Rohde & Schwarzin keinoverkossa vertaillaan sen N-vaiheeseen. Rohde & Schwarzin keinoverkon N-vaihe on kalibroitu Rohde & Schwarzin antamien kalibrintitietojen avulla. Chase-yksivaihekeinoverkkoa ei ole kalibroitu, sillä siihen ei saatu kalibrintitaulukkoa. Vertailu tapahtuu Chasessa ainoastaan mittaustuloksiin.

Liitteessä 15 Endeleon keinoverkon vaimennusvirhe on todella hyvä. Vaimennusvirhe on ainoastaan kolmen ja miinus kahden desibelin välissä. Myös Liitteen 16 tulokset osoittavat mittaustulosten olevan hyvin lähellä kaupallisia versioita.

Endeleolla on nyt tarkat tulokset kalibroituun Rohde & Schwarzin kolmivaihekeinoverkkoon. Näillä tiedoilla saadaan Endeleon keinoverkkoon kalibrintitaulukko tehtyä. Tämä on erittäin hyvä, sillä jos tulevaisuudessa Endeleo tekee lisää keinoverkkoja, niitä voidaan aina verrata tähän opinnäytetyössä mitattuun keinoverkkoon ja sitä kautta tehdä niille omat kalibrintitaulukot.

Liitteessä 17 esitetään keinoverkossa olevan suodinpiirikortin toiminnot. Toiminnot käytetään keinoverkon L3-vaiheessa. Vaihetta verrataan samoihin vertailu-

kohtiin, kuin edellisessä mittauksessa. Suodinpiirikortin toimintoja mitataan yksi kerrallaan sekä useampi suodin kerralla. Mittaustuloksista huomaa suodinpiirikortin toimintojen toimivan. Erot 150 kHz:n ylipäästösuotimen ja suodattamattoman L3-vaiheen sekä rajoittimen ja suodattamattoman L3-vaiheen välillä ovat melko pieniä, mutta kuitenkin järkeviä.

Viimeisenä mittauksena keinoverkosta mitattiin vaiheiden välinen ylikuuluminen. Mittaus tapahtui syöttämällä häiriösignaalia L3-vaiheeseen ja mittaamalla spektrianalyysaattorilla L2-vaihetta. Ylikuuluminen on vähäistä vaiheiden välillä. Suurimmat vaiheiden väliset ylikuulumiset tapahtuivat juuri häiriögeneraattorin tuottamien suurien häiriösignaaleiden kohdalla.

8 YHTEENVETO

Keinoverkon ominaisuuksia, fyysistä rakennetta sekä mittaustuloksia tarkastellessa Endeleon keinoverkko on onnistunut todella hyvin, ehkä jopa yli odotusten. Keinoverkko toimii hyvin suunnitellulla tavalla ja mittaukset ovat luotettavia. Nyt kun sitä on verrattu kaupallisiin keinoverkkoihin, on Endeleon keinoverkossa myös kalibroititaulukko. Teoria kohtaa hyvin valittuihin komponenttivalintoihin sekä komponenttirakenteisiin. Tulevaisuudessa keinoverkon alaosaan tulee tehdä maadoituspistoke, josta keinoverkko pystytään maadoittamaan mittaushuoneen maadoituspisteeseen. Tämä puute tuli ilmi opinnäytetyötä tehdessä. Endeleon keinoverkossa on tällä hetkellä kaksi maadoituspistoketta, mutta ne ovat liian kaukana laitteen alareunasta.

Opinnäytetyötä tehdessä minulle tuli todella paljon uusia sähköisiä ilmiöitä eteen, joita täytyi opiskella. Opiskeltavana oli myös erilaisten mittalaitteiden käyttö. En ollut käyttänyt ennen opinnäytetyöni mittauksia spektrianalysointia tai piirianalysointia. Näiden mittalaitteiden käyttö onnistui kuitenkin hyvin osaavien työkalureideni ohjeistuksella. Kokonaisuutena Endeleon keinoverkko on hyvä. Se on hyvin muotoiltu, helppo liikuttaa, helppo käyttää ja se on hyvin varmatoiminen.

LÄHTEET

Elmac Services ltd. 1997. LISN calibration [30.5.2010]. Saatavissa:
http://www.elmac.co.uk/pdfs/ff26_report.pdf

Endeleo Oy. 2010. Tietoa Endeleo Oy:stä [11.4.2010]. Saatavissa:
<http://www.endeleo.fi/fi/palvelut/>

Fingrid. 2004. Elovaara Sähkön Laatu [17.11.2009]. Saatavissa:
http://powersystems.tkk.fi/opinnot/S-18.113/113_luento_2004_9_1.pdf

Hajakapasitanssi. 2006. Suurtaajuuspiirien perusteet. [31.3.2010]. Saatavissa:
http://kehittaminen.turkuamk.fi/hgylen/Suurtaajuus/Osa1_RCL_s06.pdf

Häiriömittaukset. 1999. Häiriökysymykset häiriömittauksissa. [17.11.2009].
Saatavissa:
<http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/haimit.pdf>

Kopponen, O. 2009. Sähköverkon häiriöt [17.11.2009]. Saatavissa:
http://home.tamk.fi/~okopponen/k9203sahkosuunnittelu/sahkoverkon_hairiot.htm

Montrose, M. I & Nakauchi, E. M. 2004. Testing for EMC compliance. Institute of electrical and Electronics Engineers Inc. New Jersey.

NNB52-keinoverkko. 2007. Teseq:n keinoverkko. [24.3.2010]. Saatavissa:
http://www.teseq.com/com/en/products_solutions/emc_radio_frequency/line_impedance_stabilisation_networks_lisn/NNB_52_e.pdf

Ott, H.W. 2009. Electromagnetic compatibility engineering. John Wiley & Sons Inc. New Jersey.

Peltonen, H. Perkkiö, J. Vierinen, K. 2004. Insinöörin (AMK) fysiikka osa II. Lahden teho-opetus Oy. Saarijärvi

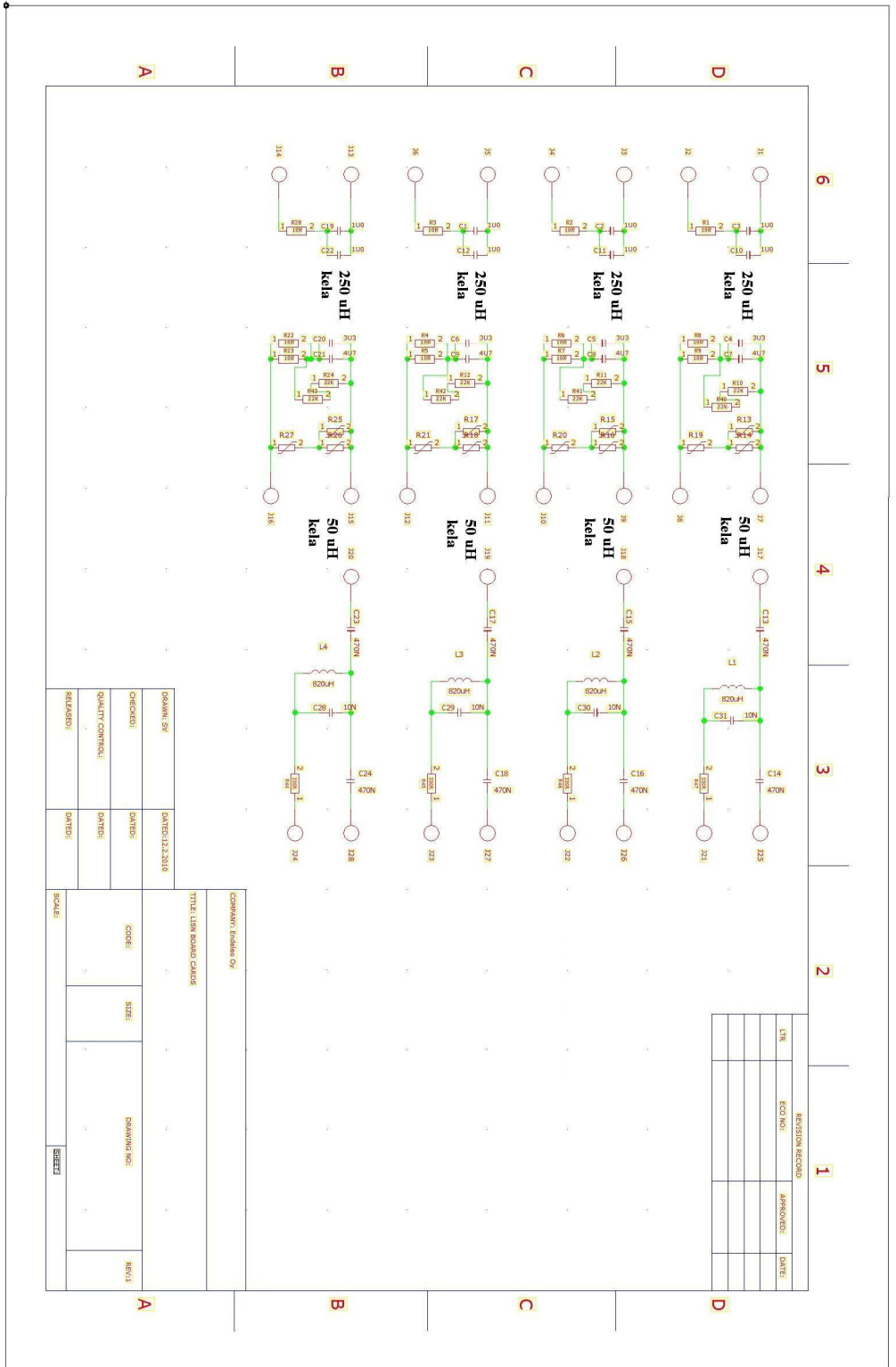
P-N Designs Inc. 2010. Tunkeumasyyvyys [8.6.2010]. Saatavissa:
<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/skindepth.cfm>

Sähkön laatu. 2000. Sähköverkon sähkön laatu [17.11.2009]. Saatavissa:
[http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/\\$FILE/040_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/c46d5509d325d21ac225695b002fb07b/$FILE/040_0007.pdf)

Yliaalto-opus. 1996. Sähköverkon särö [15.6.2010]. Saatavissa:
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>

TRITONIA. 2008. Sähkömagneettisten häiriöiden huomioiminen suoja-alueen testausjärjestelmissä [17.11.2009]. Saatavissa:
https://www.tritonia.fi/en/kokoelmat/gradu_nayta_pdf.php?id=3346

LIITE 1. Keinoverkon kytkentä

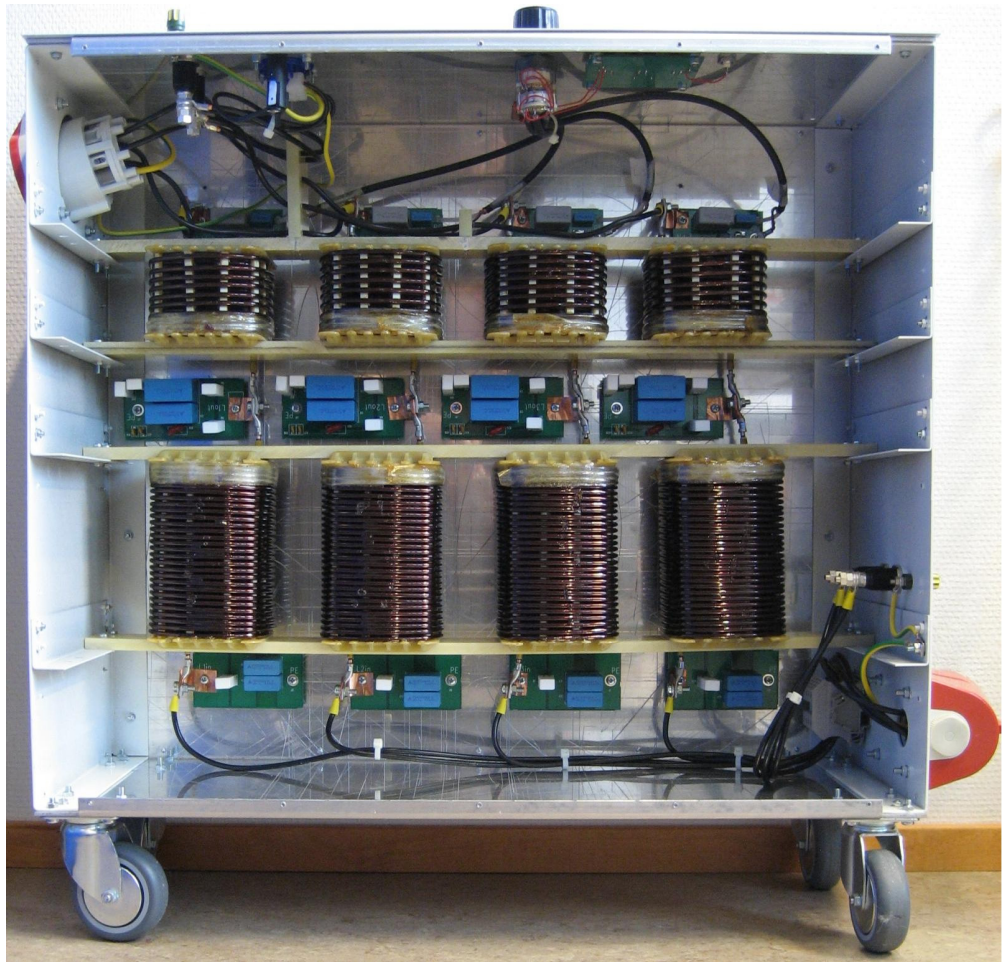


REVISION RECORD			
LTR	ECO NO.	APPROVED	DATE

DESIGNER:	SV	DATE:	2023.12.20
CHECKER:		DATE:	
QUALITY CONTROL:		DATE:	
RELEASED:		DATE:	

COMPANY: Ecodes Oy			
TITLE: IEM BOARD CASE			
CODE:	SIZE:	DRAWING NO:	
SCALE:	SHEET:		

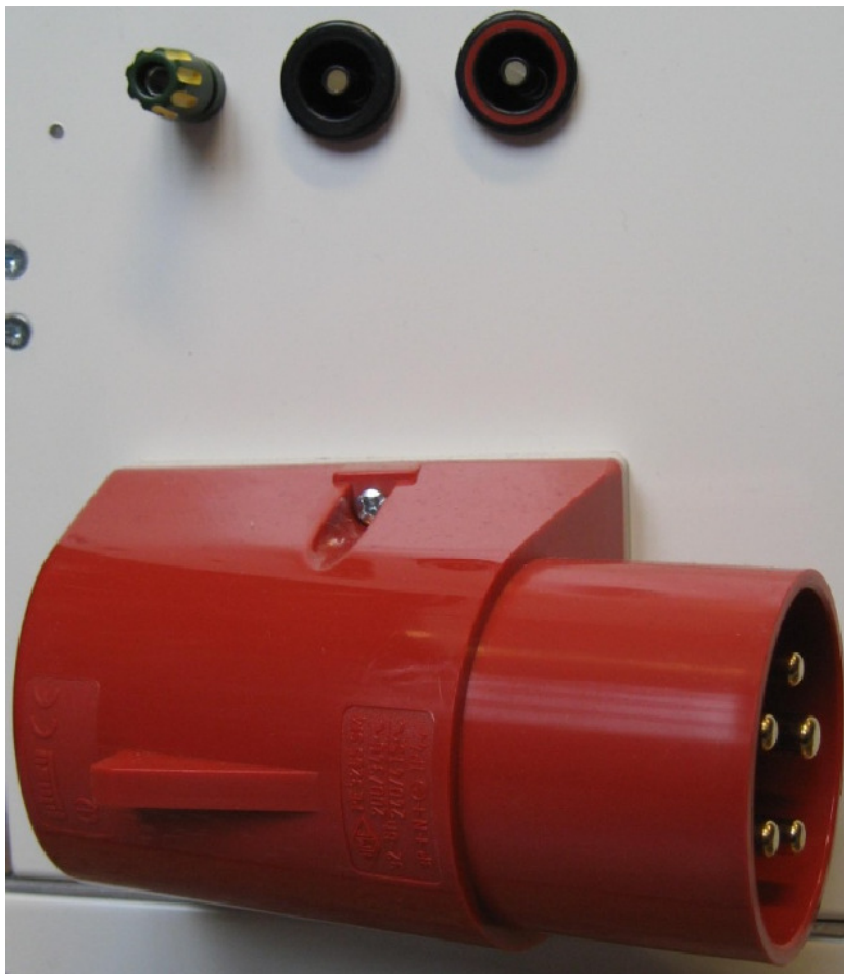
LIITE 2. Auki oleva keinoverkko



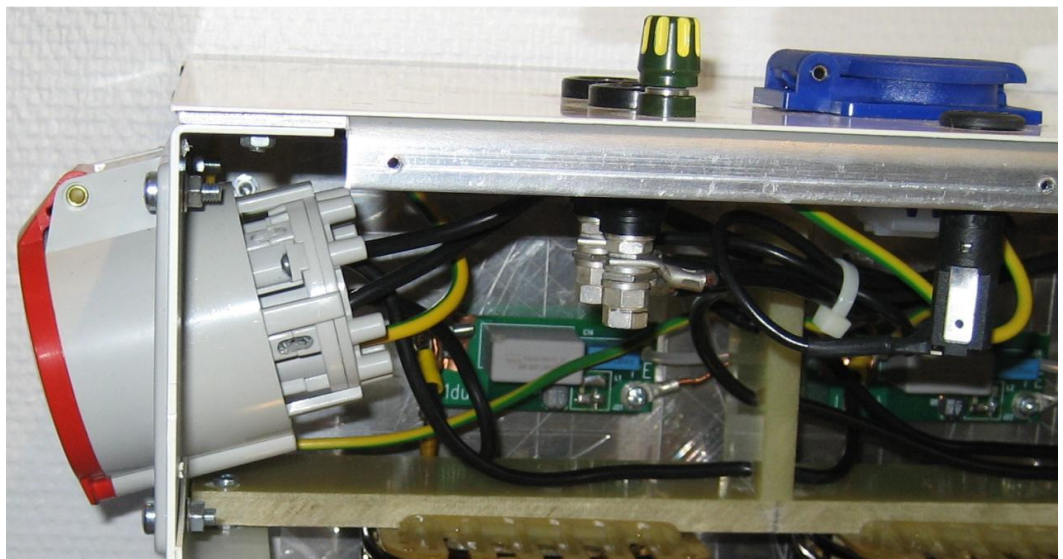
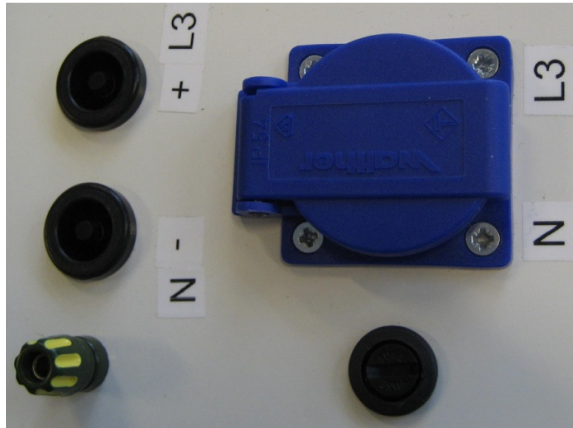
LIITE 3. Koteloitu keinoverkko



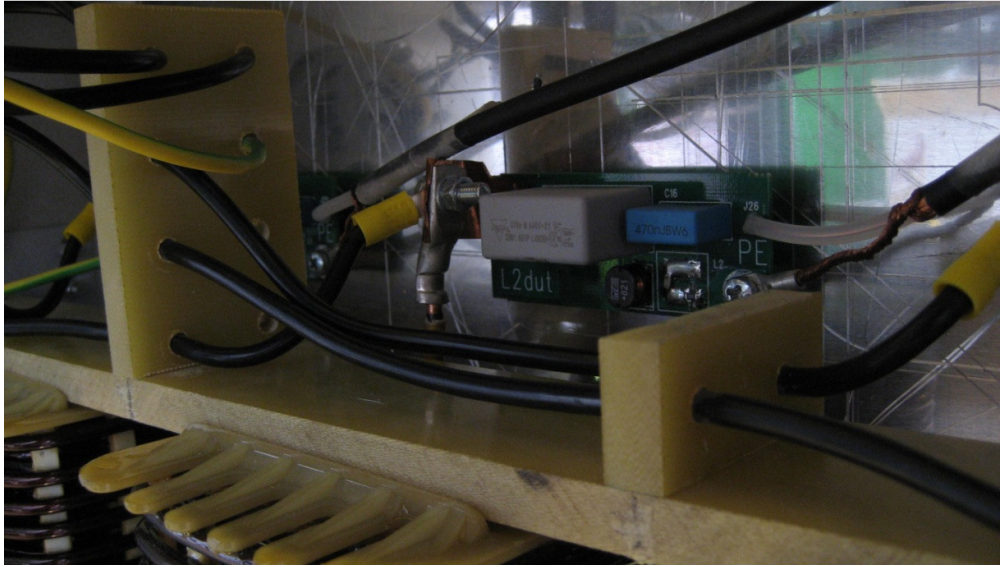
LIITE 4. Keinoverkon sähkönsyöttölittimet



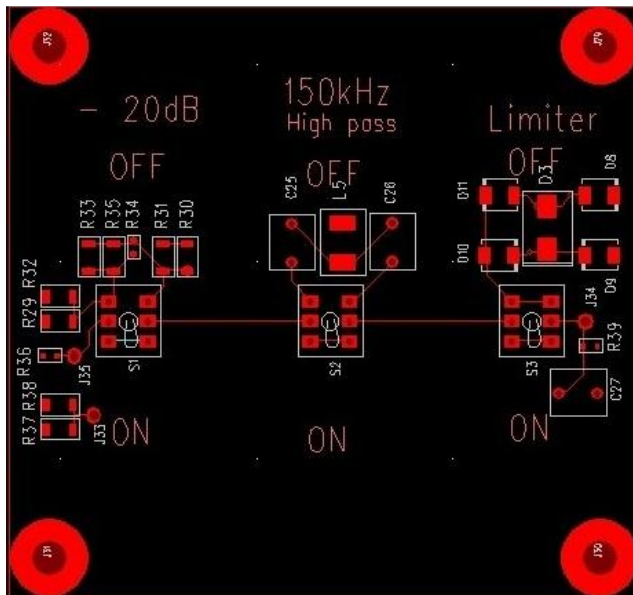
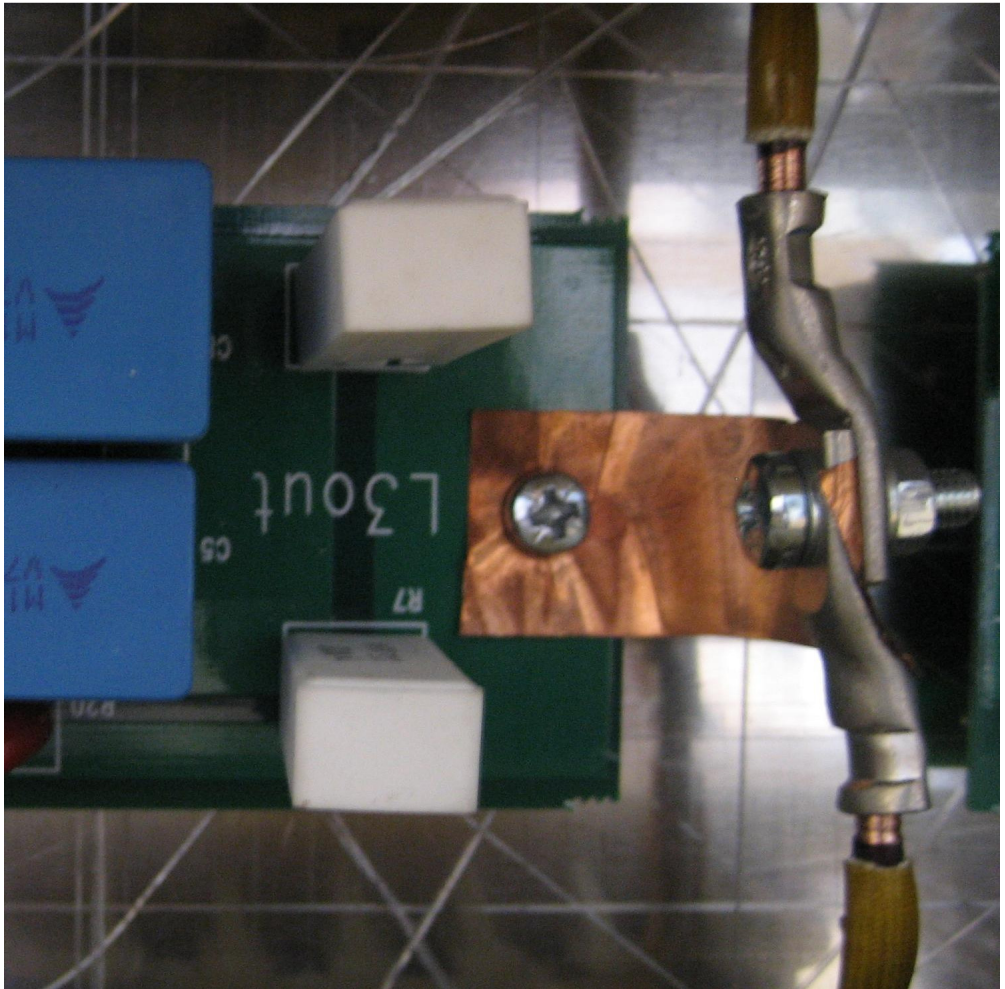
LIITE 5. Testattavan laitteen kytkentäliittimet ja valintakytkin



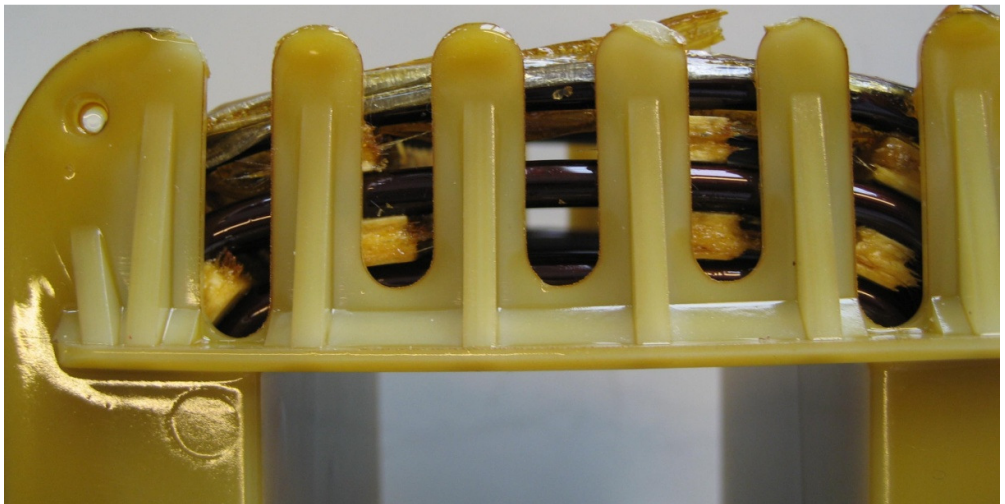
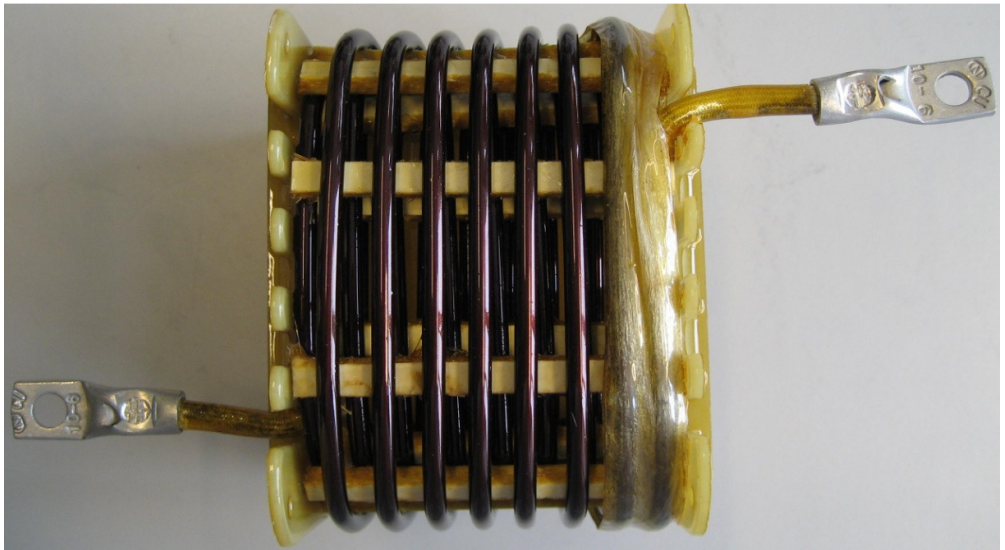
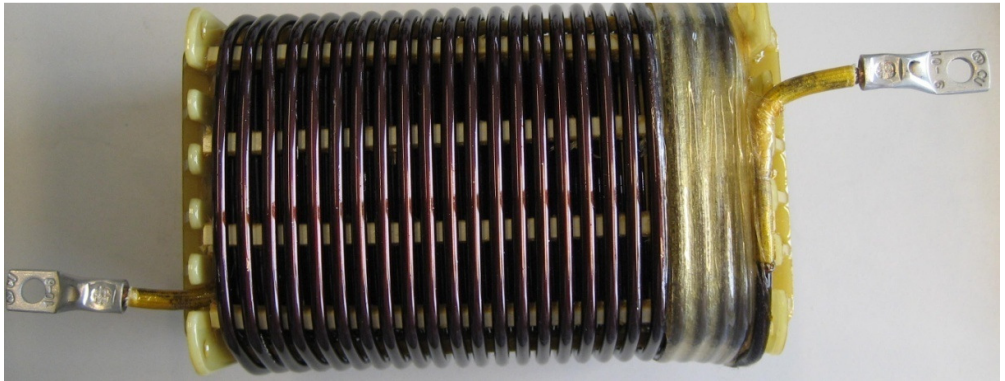
LIITE 6. Johtojen reititinpidikkeet



LIITE 7. Kelojen ja piirikorttien liitos sekä suodinpiirikortti



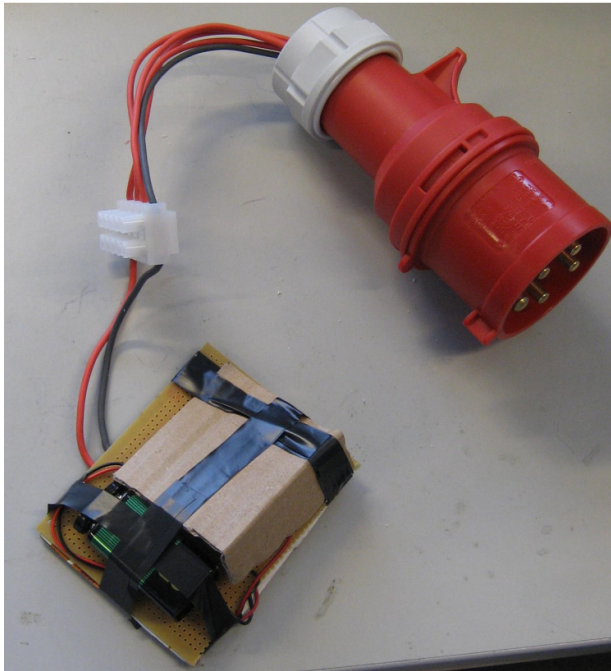
LIITE 8. Kelat ja kelojen kerrosten välinen ilmaeristys



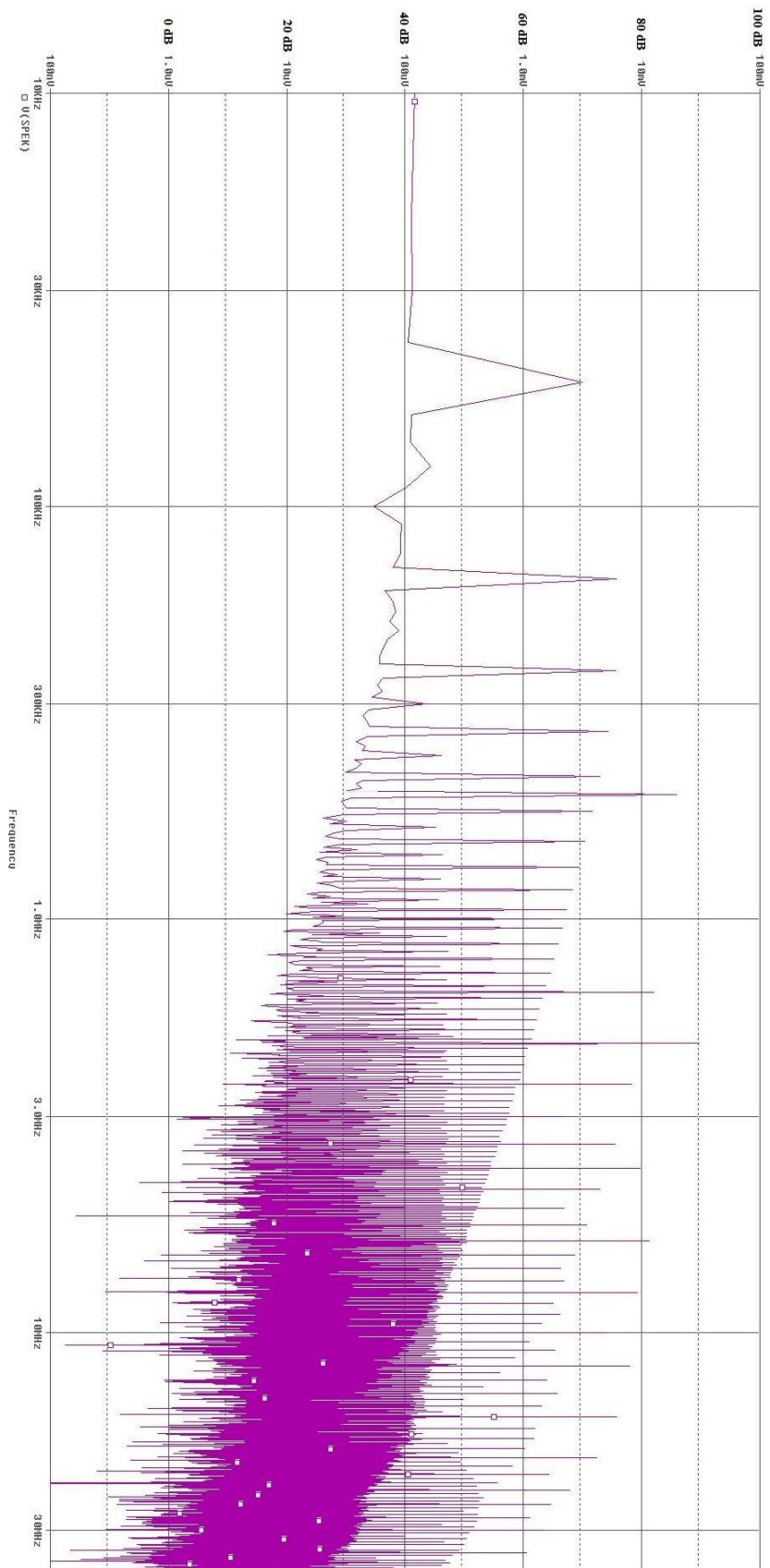
LIITE 9. Koulun keinoverkot



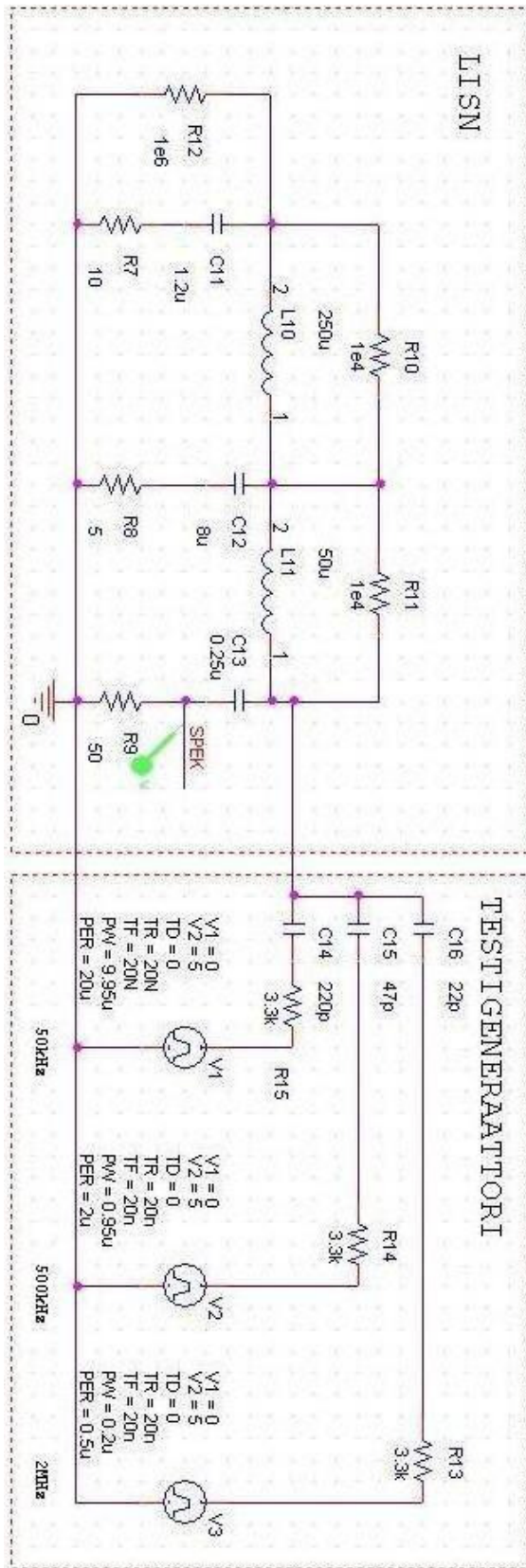
LIITE 10. Häiriögeneraattori



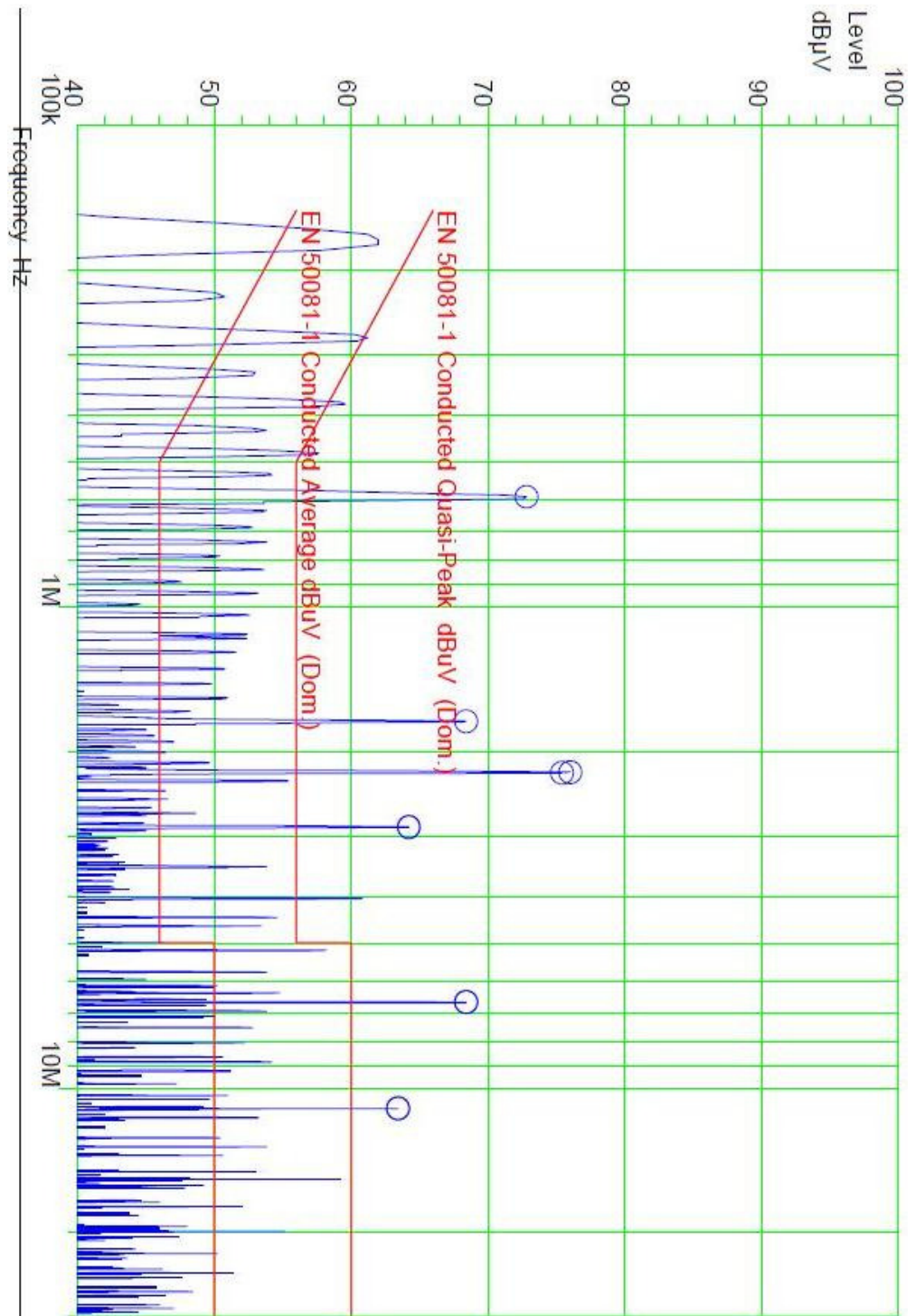
LIITE 11. Häiriögeneraattorin tuottama häiriö



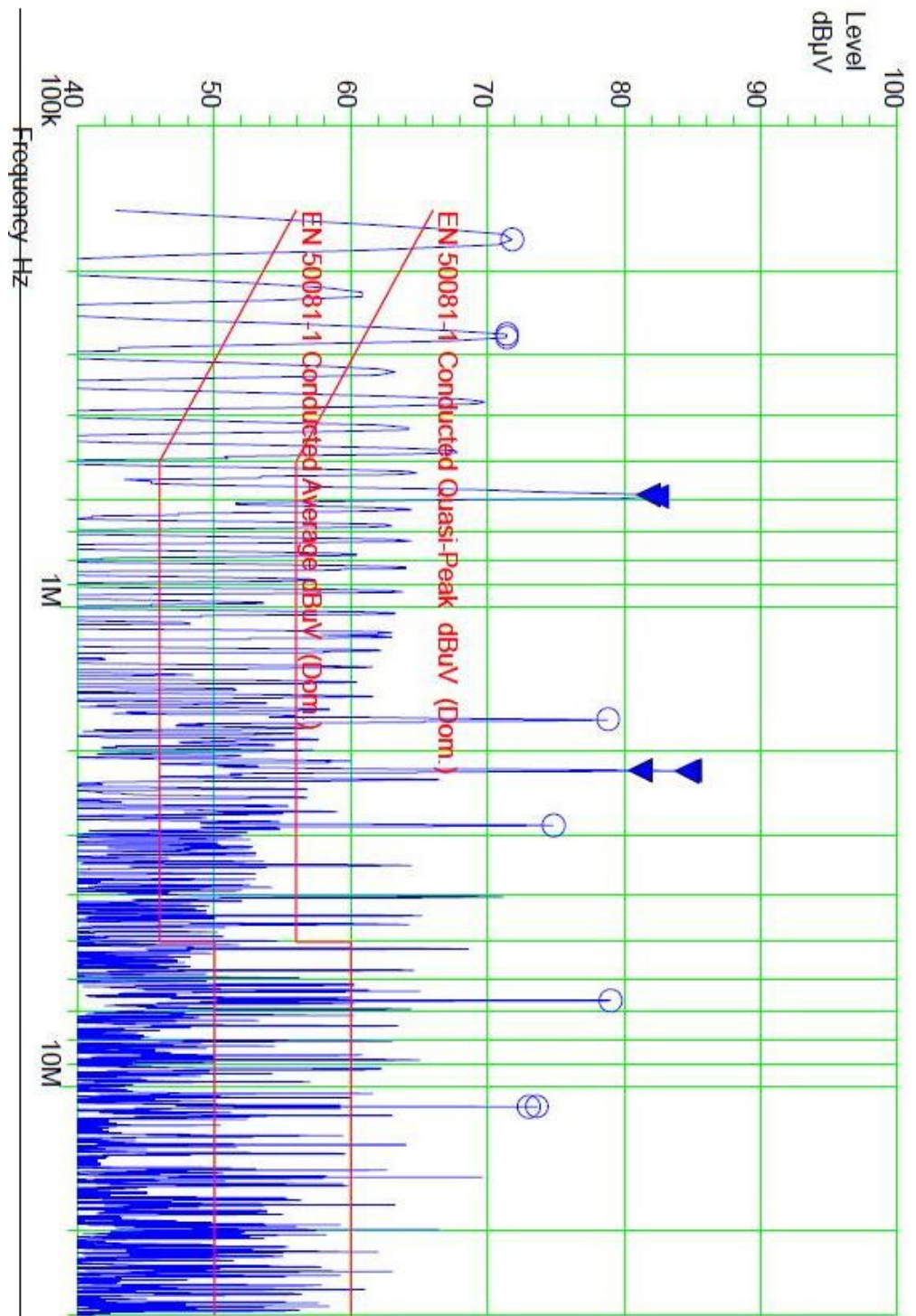
LIITE 12. Häiriögeneraattorin kytkentä



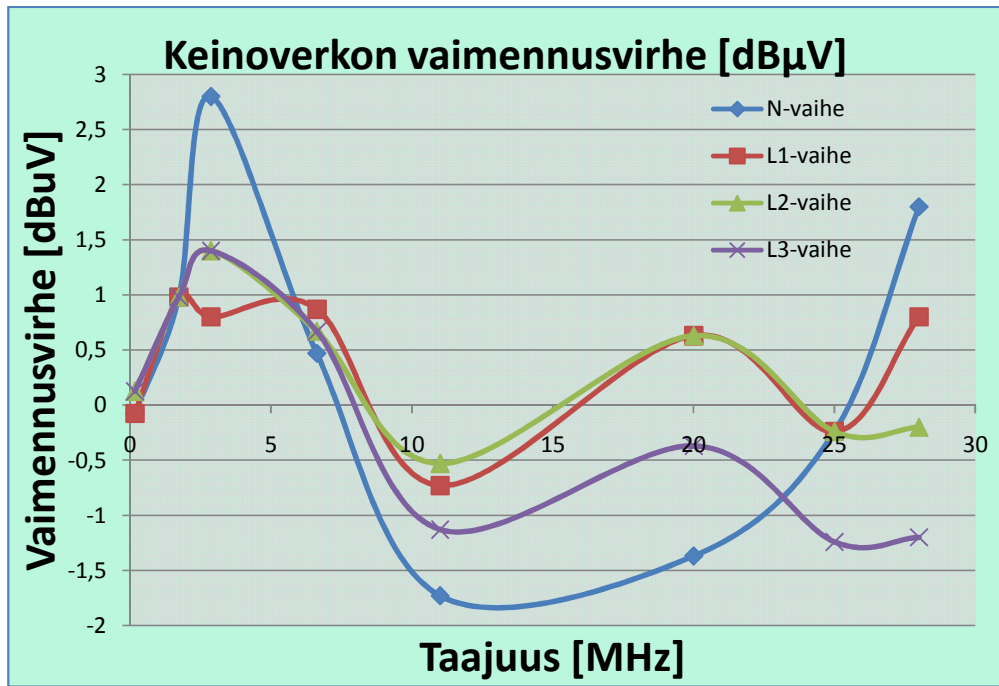
LIITE 13. Chase-yksivaihekeinoverkon referenssijännite häiriösignaalista



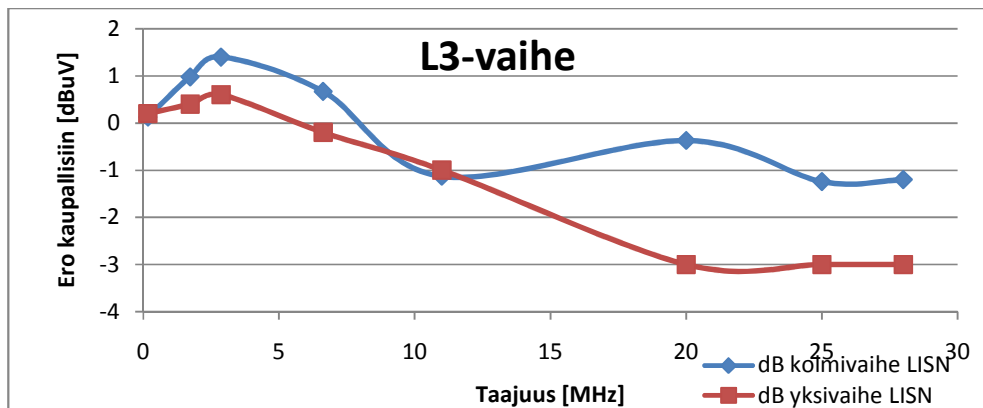
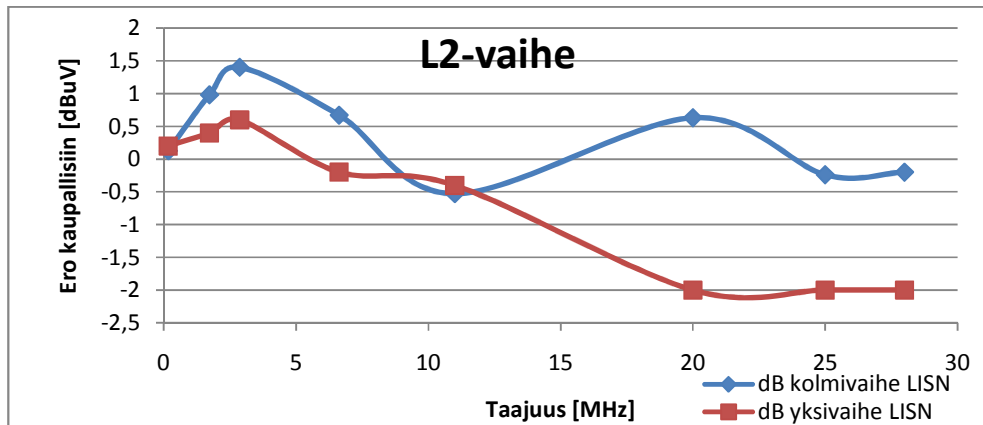
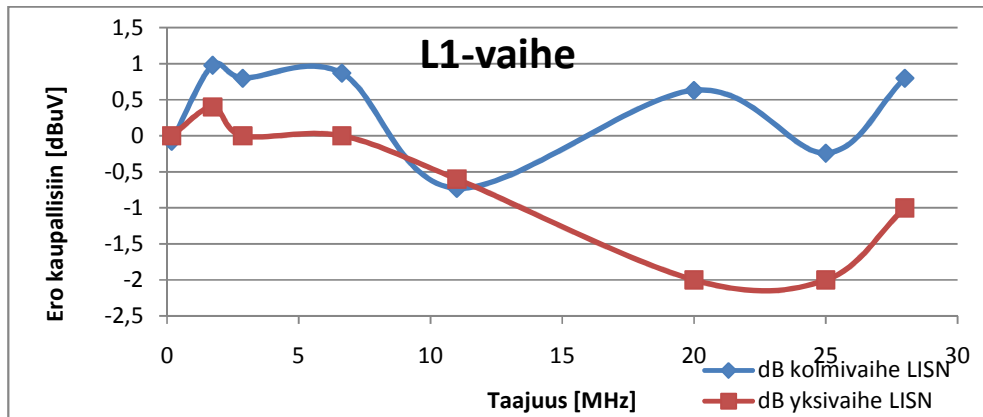
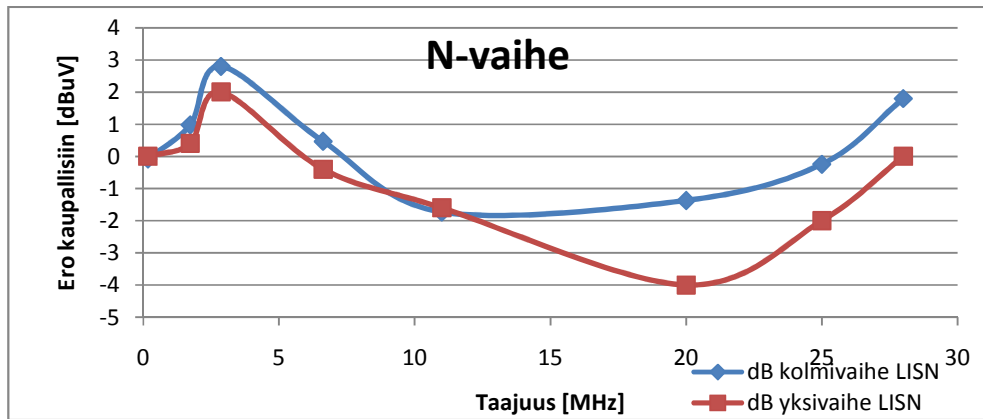
LIITE 14. Rohde & Schwarz kolmivaihekeinoverkon referenssijännite häiriösignaalista



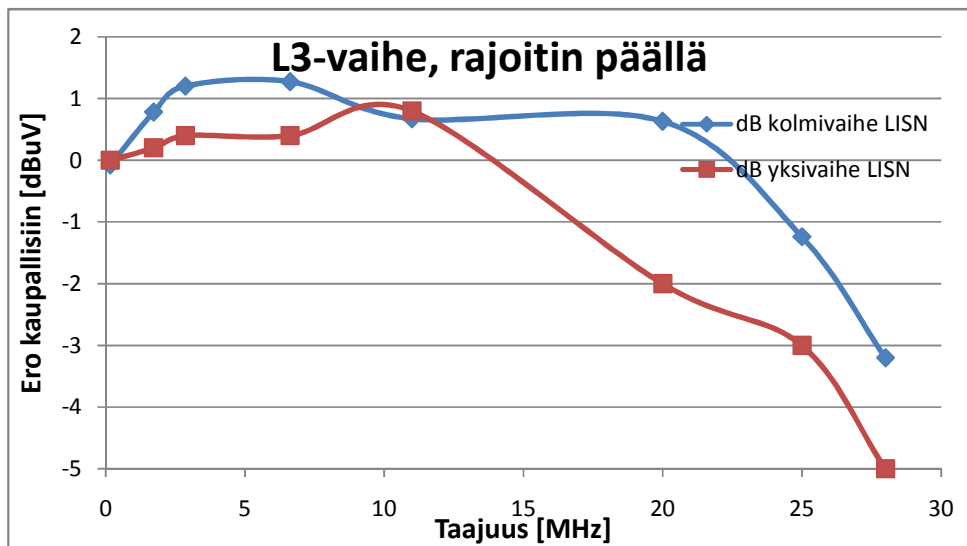
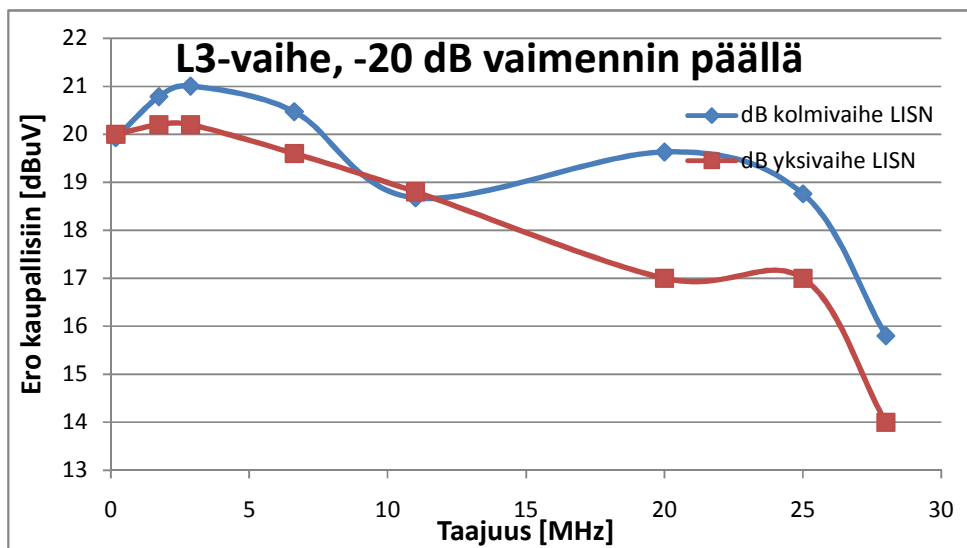
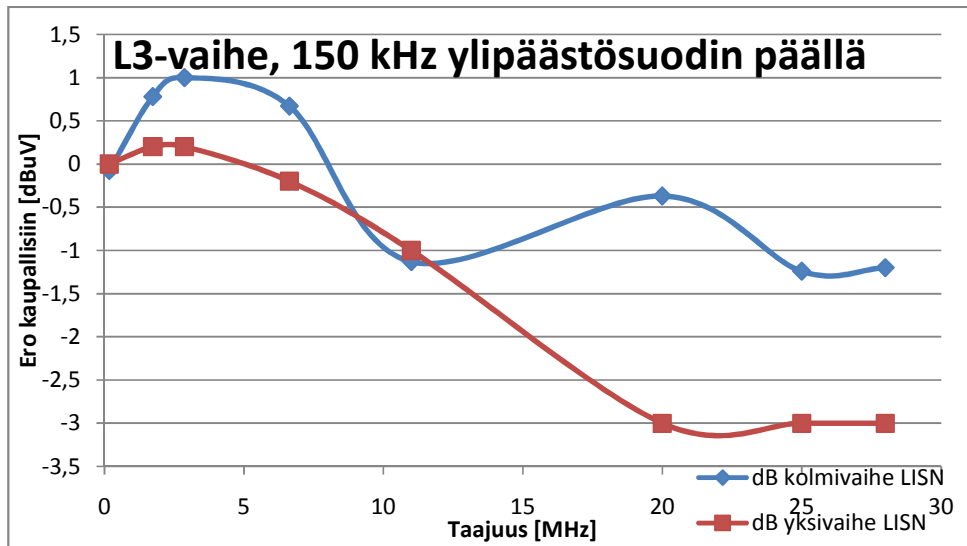
LIITE 15. Keinoverkon vaimennusvirhe



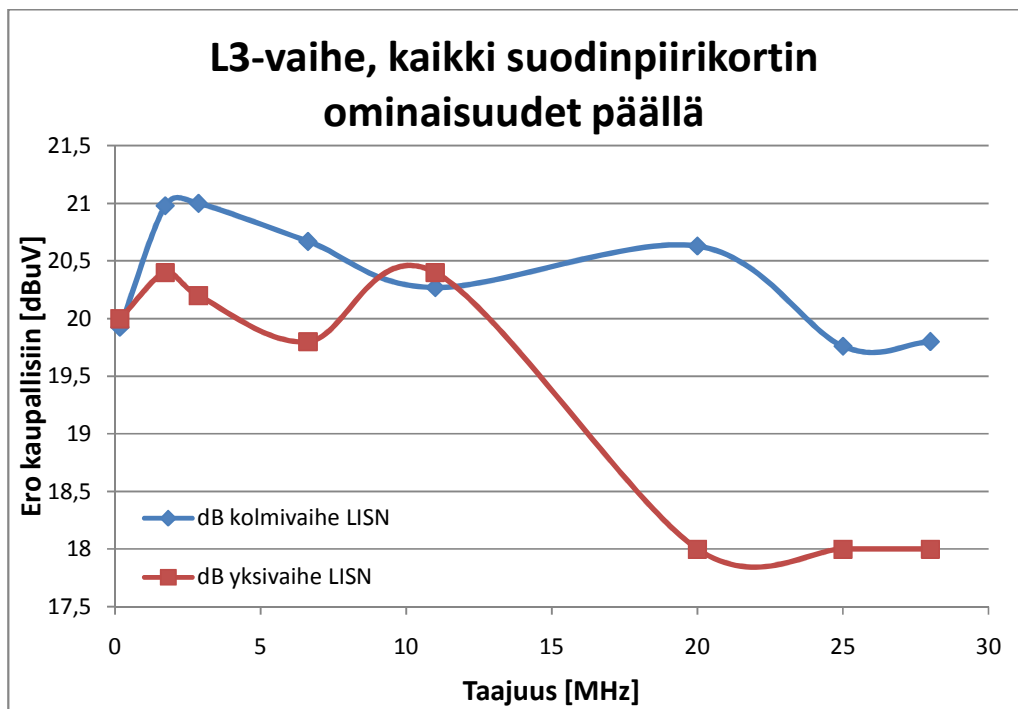
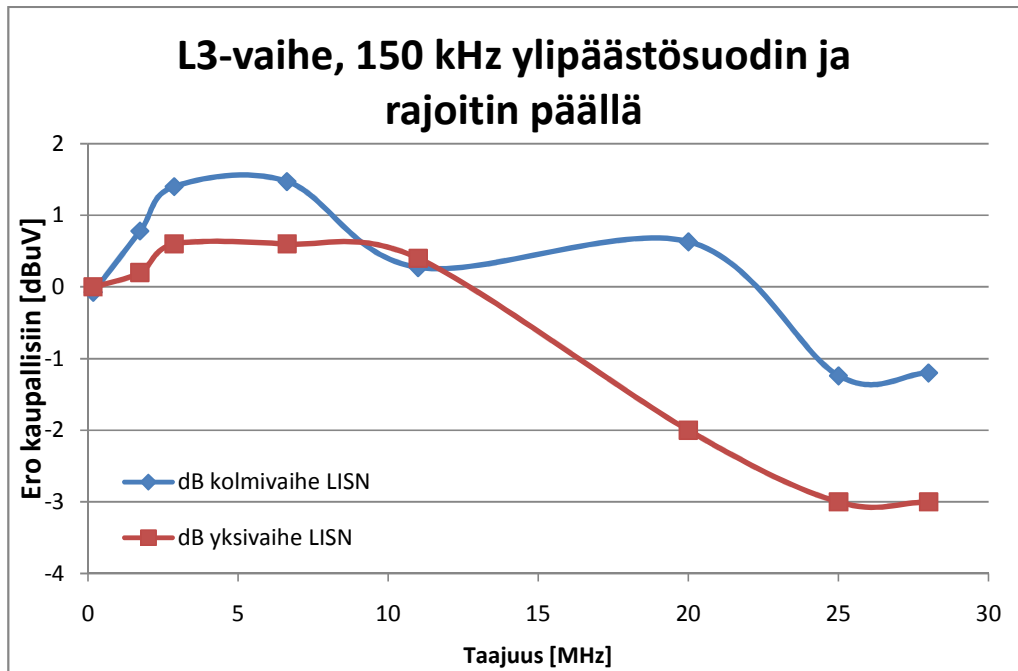
LIITE 16. Endeleon keinoverkon ero kaupallisiin keinoverkkoihin



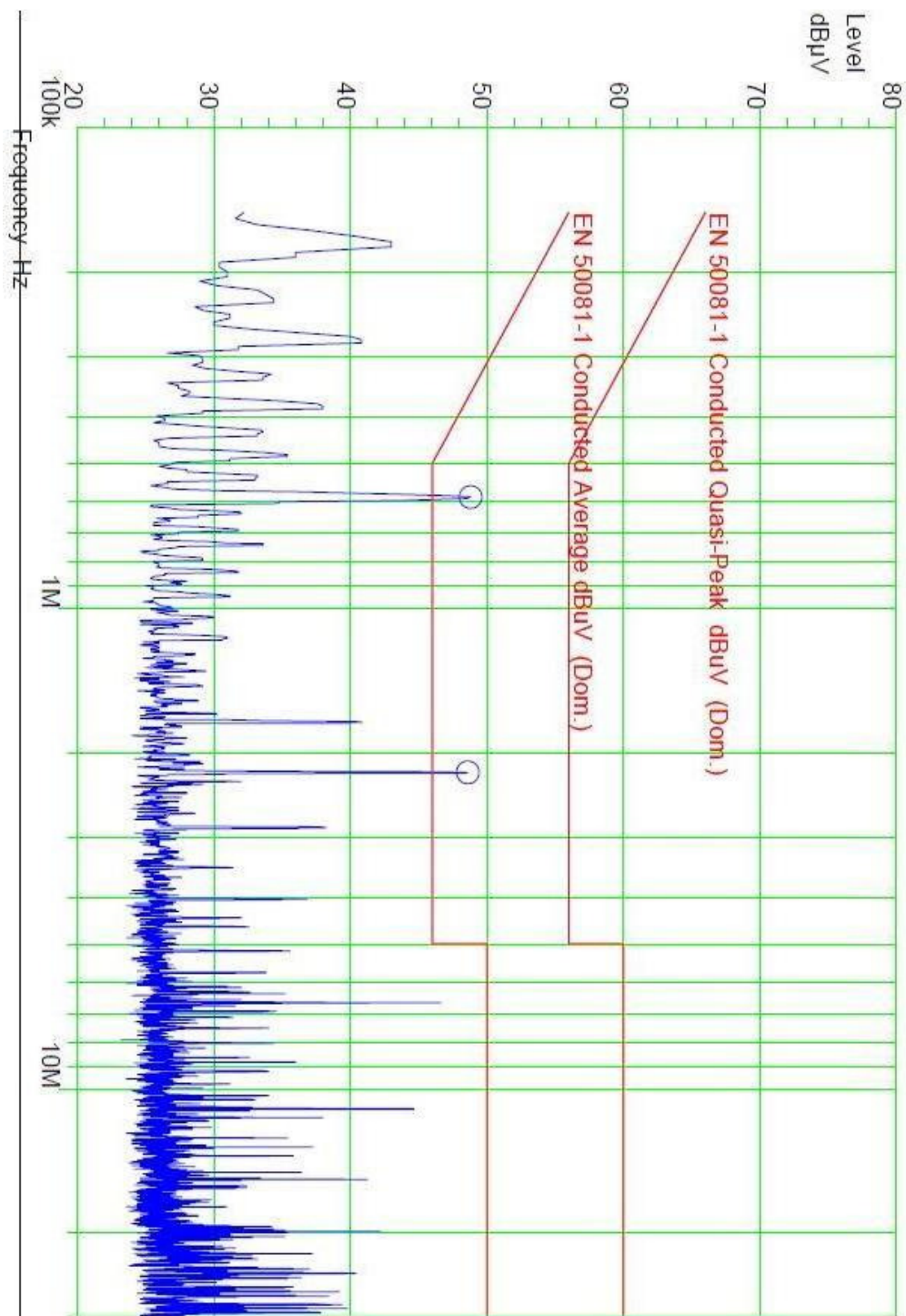
LIITE 17. Suodinpiirikortin toiminnot



LIITE 18. L3-vaiheella suodinpiirikortin ominaisuuksia samanaikaisesti päällä



LIITE 19. L3-vaiheen ylikuuluminen L2-vaiheeseen



LIITE 20. Laitteiden tarkat tiedot

Endeleo Oy:n keinoverkko

Standardi, jota mukailee	CISPR 16-1
Taajuus	DC / 50 – 60 Hz
Jatkuva virrankesto	4 x 25 A
Hetkellinen virrankesto	4 x 32 A
DC-jännite, max	700 V
AC-jännite, max	3 X 500 V
Taajuusalue	150 kHz – 30 MHz
Vaimennin	20 dB
Suodin	150 kHz ylipäästö + rajoitin
Vaiheiden impedanssi	50 Ω / vaihe
Rf-liitäntätyyppi	BNC-naaras
Sähkösyöttöliitin	32 A pistoke, banaani
Testattavan laitteen liitin	32 A pistoke, schuko, banaani
Koko	X mm x X mm x X mm

Rohde & Schwarz ESH-Z5 kolmivaihekeinoverkko

Jatkuva virrankesto, max	4 x 25 A
Hetkellinen virrankesto, max	4 x 50 A
AC-jännite, max	250 V
Taajuusalue	9 kHz – 30 MHz
Vaiheiden impedanssi	50 Ω / vaihe
Rf-liitäntätyyppi	BNC-naaras
Sähkösyöttöliitin	32 A pistoke
Testattavan laitteen liitin	32 A pistoke, schuko
Koko	492 mm x 294 mm x 603 mm
Paino	26 kg

LIITE 21. Laitteiden tarkat tiedot

Yksivaihe keinoverkko

Merkki	Chase
Malli	Mn2050B
Taajuusalue	9 kHz – 30 MHz

Spektrianalysaattori:

Merkki	Advantest
Malli	R3361C
Mittausalue	9 kHz – 2.6 GHz