



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

EMC-TESTAUS SLINE 700 TEM -KAMMIOSSA

TEKIJÄ: Mika Lovén

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Mika Lovén	
Työn nimi EMC-testaus SLine 700 TEM -kammiossa	
Päiväys 7.4.2016	Sivumäärä/Liitteet 44/13
Ohjaaja(t) Yliopettaja Väinö Maksimainen, testausinsinööri Marko Sorsa, laboratorioinsinööri Asmo Jakorinne	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio ja Espotel Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli ottaa käyttöön EMC-testausjärjestelmä Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriolle tuotekehitysvaiheessa olevien elektroniikkalaitteiden EMC-testaamiseen. Testausjärjestelmän oli tarkoitus täydentää EMC-laboratorion kaupallista testausvalikoimaa joustavana ja edullisena testausmuotona. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Espotel Oy:n kanssa, joka oli kiinnostunut testausjärjestelmän suunnittelusta, käyttöönotosta ja omien tuotekehitysvaiheessa olevien laitteidensa EMC-testaamisesta.</p> <p>Työ toteutettiin EMC-laboratorion muusta tuotantokäytöstä poistetuilla, mutta käyttökelpoisella testauslaitteistolla. Testausympäristönä toimi R & S:n SLine 700 TEM -kammio, jota käytettiin säteilevien häiriöpäästöjen ja säteilevän häiriösiedon mittaamiseen ja testaamiseen. Lisäksi testausjärjestelmään kuului PC, EMC-testivastaanotin, signaaligeneraattori ja RF-tehovahvistin. Testausten automatisointiin ja tulosten tallennukseen käytettiin R & S:n kaupallisia ES-K1 ja EMS-K1 -ohjelmistoja. Näiden lisäksi toteutettiin omat LabVIEW-pohjaiset sovellukset. Testausympäristön luotettavuuden varmistamiseksi se kalibroitiin ja mittaustulokset pyrittiin verifioimaan vertaamalla niitä virallisilla testausmenetelmillä saatuihin tuloksiin.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin toteutettua säteilevän emission ja immunitetin mittaus- ja testausmenetelmät SLine 700 TEM -kammiossa. Emissiomittaus saatiin verifioitua hyvin itse rakennetun referenssisäteilijän avulla ja testaamalla Espotelin JHumar2-alustaa. Immunitettitestauksia ei saatu täysin verifioitua, koska opinnäytetyön aikana ei saatu riittävästi käyttöön erilaisia testattavia laitteita.</p> <p>Itse toteutetut LabVIEW-sovellukset todettiin toimiviksi ja soveltuviksi hyvin elektroniikkalaitteiden tuotekehitysvaiheen EMC-testaamiseen. Opinnäytetyön aikataulun puitteissa LabVIEW-sovellusten koodin optimoinnille ei jäänyt riittävästi aikaa.</p>	
Avainsanat SLine 700 TEM -kammio, EMC-testaus, sähkömagneettinen yhteensopivuus, säteileväemissio,	
säteileväimmunitaetti, LabVIEW, säteilevät häiriöpäästöt, säteilevän häiriön sieto	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Mika Lovén			
Title of Thesis EMC testing in SLine 700 TEM Cell			
Date	7 December 2016	Pages/Appendices	44/13
Supervisor(s) Mr Väinö Maksimainen, Principal Lecturer, Mr Marko Sorsa, Testing Engineer, Mr Asmo Jakorinne, Laboratory Engineer			
Client Organisation /Partners EMC laboratory of Savonia University of Applied Sciences, Espotel Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was the implementation of an EMC testing system for the EMC laboratory of Savonia University of Applied Sciences for EMC testing electronic devices, which are in the product development phase. The test system was supposed to reinforce EMC laboratory's assortment of commercial testing as a flexible and an inexpensive testing choice. The thesis was made in collaboration with Espotel Oy, which was interested in the designing and commissioning of the test system as well as EMC testing their own products and devices in the development phase.</p> <p>The thesis was carried out with EMC laboratory's test devices, which were still usable but excluded from their commercial testing use. The test environment was the R & S SLine 700 TEM Cell, which was used for measuring and testing radiated emissions and immunity. The test system also included a PC, EMC test receiver, signal generator and RF power amplifier. The tests were automated and the test results were visualized and saved with R & S's commercial ES-K1 and EMS-K1 testing software. The author's own LabVIEW based applications were also designed and implemented. To verify the test system's reliability, it was calibrated and the test and measurement results were verified by comparing them to the results carried out with the official testing methods.</p> <p>As a result of this thesis, measurement and test methods for radiated emissions and immunity were implemented in the SLine 700 TEM Cell. It was possible to verify the emission measurements very well by using a self-built reference emitter and by measuring Espotel's Jhumar 2 platform. The immunity measurements were not completely verified because there were not enough different kind of devices available for testing during the execution of this thesis.</p> <p>The author's own implemented LabVIEW based applications were noticed to be functional and well suitable for the EMC testing of electronic devices in the product development phase. There was not enough time for optimizing the code of the LabVIEW applications during this thesis.</p>			
Keywords SLine 700 TEM Cell, EMC testing, electromagnetic compatibility, radiated emission, radiated immunity, LabVIEW, electromagnetic interference, electromagnetic susceptibility			

ESIPUHE

Opinnäytetyö tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriolle vuosien 2015 - 2016 aikana yhteistyössä Espotel Oy:n kanssa. Opinnäytetyö oli jatkoa EMC-laboratoriossa suorittamalleni harjoittelulle, joka sai kiinnostuksen heräämään EMC-testausta ja -ilmiöitä kohtaan. Kiinnostuin EMC-testauksesta, joka on tärkeä osa tuotekehitysvaiheen elektroniikkalaitteiden suunnittelua. Toivon oppimieni tietojen ja taitojen olevan hyödyllisiä myöhemmin työelämässä.

Haluan kiittää saamastani ohjauksesta opinnäytetyöni ohjaajia yliopettaja Väinö Maksimaista, testausinsinööri Marko Sorsaa sekä laboratorioinsinööri Asmo Jakorinnettä. Lisäksi haluan kiittää yhteistyökumppanin Espotel Oy:n projektipäällikköä Antti Seppästä saamastani tuesta. Erityiskiitos kuuluu myös vaimolleni Laura Lovénille, joka hoiti esikoistamme Tuomasta kotona ja mahdollisti opinnäytetyön tekemisen.

Kuopiossa 30.11.2016

Mika Lovén

LYHENTEET

AC	Alternating Current
AM	Amplitude Modulation
AR	Amplifier Research
DAQ	Data Acquisition
DC	Direct Current
ESD	Electrostatic Discharge
EMC	Electromagnetic Compatibility
EMI	Electromagnetic Interference
EMS	Electromagnetic Susceptibility
EUT	Equipment Under Test
GPB	General Purpose Interface Bus
IEEE	The Institute of Electrical and Electronic Engineers
IF	Intermediate Frequency
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
NI	National Instruments
OATS	Open Area Test Site
PM	Pulse Modulation
R & S	Rohde & Schwarz
RF	Radio Frequency
TE	Transverse Electric
TEM	Transverse Electromagnetic
TM	Transverse Magnetic
VI	Virtual Instrument
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	SÄHKÖMAGNETISMIN JA RADIOTEKNIIKAN TEORIAA	9
2.1	Maxwellin yhtälöt ja sähkömagneettisen aallon syntyminen.....	9
2.2	Sähkömagneettisen aaltoliikkeen ominaisuuksia.....	10
2.3	Hyödyllisiä radiotekniikan laskentakaavoja.....	12
3	SÄHKÖMAGNEETTISEN YHTEENSOPIVUUDEN TESTAAMINEN	13
3.1	Säteilevät häiriöpäästöt	13
3.2	Säteilevä immuniteetti	13
4	TESTAUSLAITTEISTO	15
4.1	SLine 700 TEM -kammio	15
4.2	R & S ESCS 30 -testivastaanotin	17
4.3	R & S SMT 03 -signaaligeneraattori.....	17
4.4	AR100W1000M1-tehovahvistin	18
4.5	AR FL7006 -kentänvoimakkuussensori ja AR FL7000 -käyttöliittymäyksikkö	18
5	TESTAUSOHJELMISTOT	19
5.1	EMC-testausohjelmistot: ES-K1, EMS-K1 ja EMC32	19
5.2	NI LabVIEW.....	19
5.3	Mittalaitteiden ohjaus GPIB-väylän (IEEE 488) kautta.....	21
6	TESTAUSJÄRJESTELMÄ	24
7	KALIBROINTIMENETELMÄT	26
7.1	Kaapeleiden kalibrointi.....	26
7.2	Kentän tasaisuuden testaus	26
7.3	Kentän voimakkuuden referenssikalibrointi ja VSWR-kalibrointi	28
7.4	Vahvistimen saturaatiotesti	28
7.5	Emissiomittauksen kalibrointi referenssisäteilijän avulla	29
8	TESTAAMINEN JA MITTAAMINEN	32
9	KALIBROINTI, TESTAUS- JA MITTAUSTULOKSET	34
9.1	Kaapelikalibroinnit.....	34
9.2	10 V/m kentän tasaisuuskalibrointi	34
9.3	10 V/m referenssikalibrointi	35
9.4	Vahvistimen saturaatiotesti	36

9.5	SLinen emissiomittauksen korjauskertoimien määrittäminen	36
9.6	Emissiomittausten verifiointi.....	38
9.7	Immuneettitesti Arduino ATMEGA 2560:lle	42
10	YHTEENVETO JA POHDINTA	43
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	44
	LIITE 1: SIGNAALIGENERAATTORIN JA TESTIVASTAANOTTIMEN VÄYLÄKOMENTOJA	45
	LIITE 2: ES-K1:N KAAPELIKALIBROINNIN SKANNAUSTAULUKKO.....	48
	LIITE 3: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETTITESTIN MÄÄRITTELY EMC32:EEN	49
	LIITE 4: REFERENSSISÄTEILIJÄN KYTKENTÄKAAVIO.....	50
	LIITE 5: SLINEN KORJAUSKERTOIMIEN MATLAB-LASKENTASKRIPTI	51
	LIITE 6: SÄTEILEVÄN EMISSIONMITTAUKSEN MÄÄRITTELY ES-K1:EEN.....	52
	LIITE 7: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETTITESTIN MÄÄRITTELY EMS-K1:EEN	56
	LIITE 8: SÄTEILEVÄN EMISSION MITTAAMINEN ES-K1:LLÄ	64
	LIITE 9: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETIN TESTAAMINEN EMS-K1:LLÄ.....	66
	LIITE 10: SÄTEILEVÄN EMISSION MITTAAMINEN LABVIEW-SOVELLUKSELLA	67
	LIITE 11: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETIN TESTAAMINEN LABVIEW-SOVELLUKSELLA	69
	LIITE 12: VERIFIOINTIMITTAUSTULOKSIA	71
	LIITE 13: ARDUINON KOODI IMMUNITEETTITESTISSÄ	74

1 JOHDANTO

Tämän työn tarkoituksena on ottaa käyttöön EMC-testausympäristö tuotekehitysvaiheessa olevien elektroniikkalaitteiden testaamiseen. Kaikkien EU-alueella myynnissä olevien elektroniikkalaitteiden tulee täyttää EMC-vaatimukset. Näiden täyttäminen on olennainen osa elektroniikkalaitteiden tuotekehitystyötä.

Tässä opinnäytetyössä kehitetään EMC-testausympäristö Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriolle. Testausympäristön on tarkoitus täydentää EMC-laboratorion kaupallista testausvalikoimaa joustavana ja edullisena tuotekehitysvaiheen testausmuotona. Opinnäytetyö tehdään yhteistyössä Espotel Oy:n kanssa, joka on kiinnostunut testausympäristön suunnittelusta, käyttöönotosta ja omien tuotekehitysvaiheessa olevien laitteidensa EMC-testauksesta.

Työ toteutetaan EMC-laboratorion muusta tuotantokäytöstä poistetuilla, mutta käyttökelpoisilla testauslaitteistoilla. Testausympäristönä toimii R & S:n SLine 700 TEM -kammio, jota voidaan käyttää säteilevien häiriöpäästöjen ja säteilevän häiriösiedon mittaamiseen ja testaamiseen. Lisäksi käytöön otettavaan testauslaitteistoon kuuluu EMC-testivastaanotin, signaaligeneraattori, RF-tehovahvistin ja PC. Testauksien automatisointiin ja tulosten tallennukseen käytetään R & S:n kaupallisia ES-K1 ja EMS-K1 -ohjelmistoja. Näiden sovellusten rinnalle kehitetään lisäksi omat National Instrumentsin LabVIEW-pohjaiset sovellukset.

Jotta testausympäristöstä saadaan luotettava, se täytyy kalibroida ja testaustulokset täytyy verifioida vertaamalla niitä virallisten testausmenetelmien tuloksiin. Testausten verifiointiin käytetään oikeita tuotekehitysvaiheessa olevia tuotteita. Testausympäristön käyttöönotossa ja tulosten verifiointissa käytetään hyväksi EMC-laboratorion radiokaiutonta huonetta ja EMC-testauslaitteistoa.

2 SÄHKÖMAGNETISMIN JA RADIOTEKNIIKAN TEORIAA

2.1 Maxwellin yhtälöt ja sähkömagneettisen aallon syntyminen

Maxwellin yhtälöt luovat pohjan sähkömagnetismin teorialle. Yhtälöt sitovat sähkö- ja magneettikentät niiden synnyttämiin lähteisiin (Young ja Freedman 2004, 1130). Maxwellin yhtälöt muodostuvat neljästä taulukossa 1 esitetystä kaavasta, jotka voidaan esittää integraali- ja differentiaalimuodoissa. Integraali- ja differentiaalimuodot ovat yhtäpitäviä matemaattisia esitystapoja samoille yhtälöille ja niistä soveltuvampaa voidaan käyttää tilanteen mukaan. Monimutkaisen näköisistä matemaattisista esityksistä huolimatta Maxwellin yhtälöitä voidaan tulkita kvalitatiivisesti.

TAULUKKO 1. Maxwellin yhtälöt (Guru ja Hiziroglu 2004, 309.)

Lain nimi	Integraalimuoto	Differentiaalimuoto
Gaussin laki sähkökentille	$\oint_s \vec{D} \cdot \vec{ds} = \int_v \rho_v dv$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$
Gaussin laki magneettikentille	$\oint_s \vec{B} \cdot \vec{ds} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Faradayn induktiolaki	$\oint_c \vec{E} \cdot \vec{dl} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{ds}$	$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Ampere-Maxwellin laki	$\oint_c \vec{H} \cdot \vec{dl} = \int_s \vec{J} \cdot \vec{ds} + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot \vec{ds}$	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

\vec{E} = sähkökentän voimakkuus [V/m]

\vec{D} = sähkövuon tiheys [C/m²]

\vec{H} = magneettikentän voimakkuus [A/m]

\vec{B} = magneettivuon tiheys [T]

ρ_v = tilavuusvaraustiheys [C/m³]

\vec{J} = sähkövirran tiheys [A/m²]

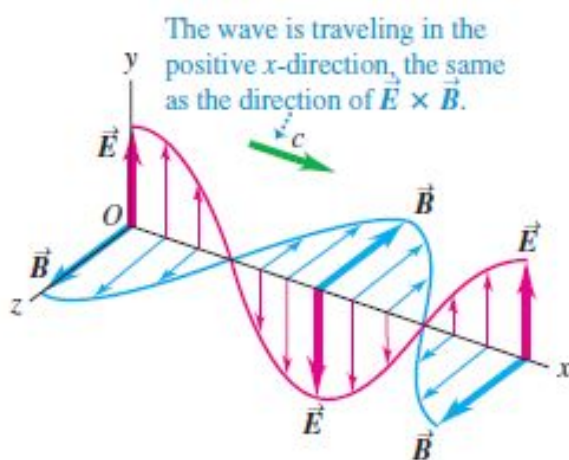
Soveltamalla Gaussin lakia sähkökenttiin saadaan selville, millaisia sähköstaattisia kenttiä sähkövaraukset synnyttävät (Young ja Freedman 2004, 836). Integraalimuotoinen Gaussin laki sähkökentille kertoo, että kokonaissähkövuoto Φ_E suljetulla pinnalla on yhtä suuri pinnan sisältämän kokonaisvarauksen Q_{encl} kanssa (Young ja Freedman 2004, 846). Toisaalta differentiaalimuotoinen laki kertoo, että pinnan varaustiheys ρ_v voidaan laskea sähkökentän divergenssinä kyseisessä pisteessä. Divergenssi lasketaan kentän pistetulona ∇ -operaattorin kanssa, mikä on karteesisessa koordinaatistossa esitettyä $\frac{\partial}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{k}$.

Vastaavasti Gaussin laki magneettikentille kertoo, että magneettivuoto Φ_B suljetulla pinnalla on nolla, mikä on yhtäpitävää sen kanssa, että magneettikentän divergenssi kyseisessä pisteessä on nolla. Tämä tulkitaan siten, että magneettisia monopoleja ei ole olemassa eli magneettikentillä ei ole nielu-

ja eikä lähteitä. Toisin sanoen magneettikentän kenttäviivat ovat aina suljettuja silmukoita. (Young ja Freedman 2004, 1027-1028.)

Faradayn induktiolain ja Ampere-Maxwellin lain mukaan sähkö- ja magneettikentät voivat luoda toinen toisensa. Faradayn induktiolain mukaan muuttuva magneettikenttä indusoi muuttuvan sähkökentän. Ampere-Maxwellin lain mukaan muuttuva sähkökenttä luo ympärilleen muuttuvan magneettikentän.

Maxwellin yhtälöiden tärkeä seuraus on se, että jatkuvasti toisensa luovat muuttuvat sähkö- ja magneettikentät mahdollistavat loputtomasti itsensä ylläpitävän sähkömagneettisen aaltoliikkeen synty-
misen ja etenemisen (Young ja Freedman 2004, 1214-1215). Sähkömagneettisia aaltoja syntyy esimerkiksi radioantenneissa, kun antennissa olevat vapaat varauksenkuljettajat pakotetaan värähtelemään (Young ja Freedman 2004, 1217). Varausten ollessa sinimuotoisessa värähtelyliikkeessä syntyy kuvion 1 mukainen sähkömagneettinen aalto, jossa sähkö- ja magneettikenttä värähtelevät sinimuotoisesti kohtisuorassa toisiinsa ja aallon etenemissuuntaan nähden (Young ja Freedman 2004, 1224). Sähkömagneettinen aalto etenee tyhjiössä valon nopeudella $c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s (Young ja Freedman 2004, 1220). Sähkömagneettinen aaltoliike on pohja nykyaikaiselle kommunikatiolle ja tiedonsiirrolle.



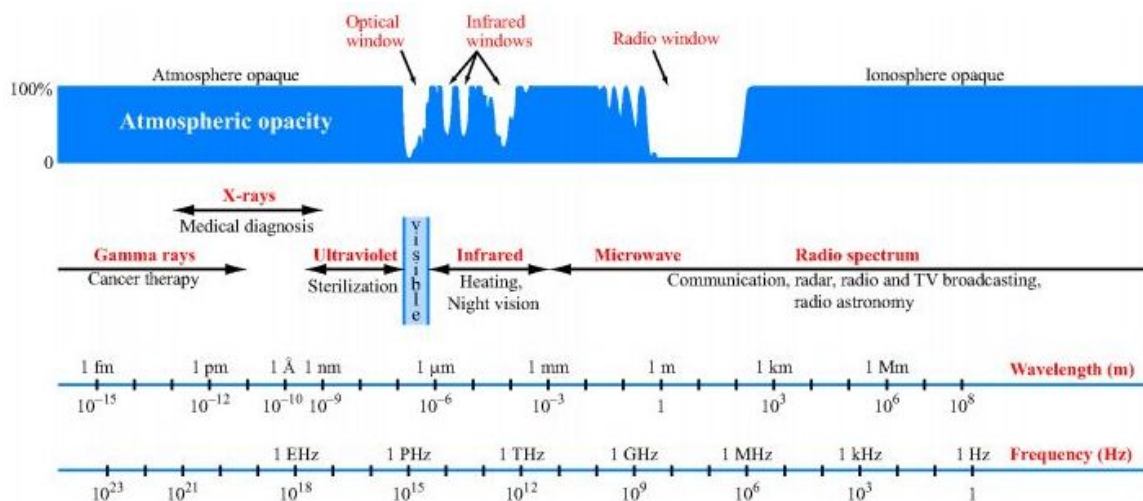
KUVIO 1. Suuntaan x etenevä sähkömagneettinen aalto (Young ja Freedman 2004, 1224.)

2.2 Sähkömagneettisen aaltoliikkeen ominaisuuksia

Kaikki sähkömagneettiset aallot koostuvat toisiinsa nähden kohtisuorassa ja samalla taajuudella f värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Sähkömagneettiset aallot etenevät tyhjiössä valon nopeudella, joka on universaali vakio. Aaltoliikkeen perusyhtälö $\lambda = c/f$ sitoo aallon taajuuden ja aallonpituuden toisiinsa valonnopeuden avulla ilmaistuna. (Ulaby, Michielssen ja Ravaioli 1999, 19.)

Kaikella sähkömagneettisella aaltoliikkeellä on samat perusominaisuudet, ja ne voidaan erottaa toisistaan vain aallonpituuden tai vastaavasti taajuuden perusteella. Radioaallot ovat osa sähkömagneettisen aallon spektriä. Sähkömagneettinen aaltoliike luokitellaan radioaallosi, kun sen taajuus on 3 Hz - 300 GHz tai vastaavasti aallonpituus on 1 mm - 100 miljoonaa metriä. Kuviossa 2 on esitetty

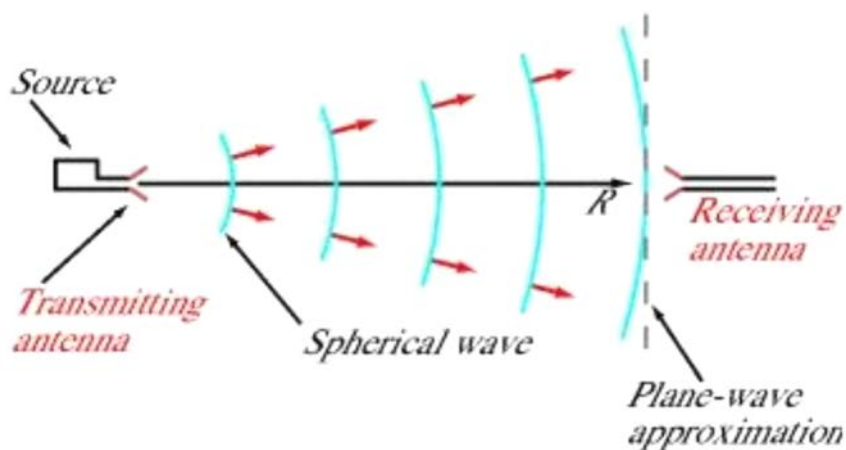
sähkömagneettinen spektri ja sen tärkeimmät käyttökohteet taajuuden mukaan. Langattoman tiedonsiirron kannalta oleellisimpia radiotaajuuksia ovat taajuudet 1 MHz - 3 GHz, koska ilmakehä ei vaimenna kyseisiä taajuuksia. (Ulaby ym. 1999, 20.)



KUVIO 2. Sähkömagneettisen säteilyn spektri (Ulaby ym. 1999, 27.)

Maxwellin yhtälöiden mukaan väliaineen ominaisuudet määrittelevät sen, millaisia sähkömagneettisia aaltoja kyseisessä väliaineessa voi edetä. Häviöttömässä väliaineessa, kuten esimerkiksi tyhjiössä, voi edetä vain aaltomuotoja, joiden sähkö- ja magneettikentillä ei ole lainkaan etenemissuuntaisia komponentteja. Tällaisia aaltomuotoja kutsutaan poikittaissähkömagneettisiksi aalloiksi eli TEM-aalloiksi (engl. Transverse Electromagnetic). Kuvion 1 aalto on esimerkki TEM-aallosta. Muun tyyppisissä aaltojohdoissa voi esiintyä aaltoja, joilla on etenemissuunnan suuntaisia komponentteja. Sähkökentän komponentin puuttuessa aallon etenemissuunnassa puhutaan TE-aallosta (engl. Transverse Electric) ja magneettikentän komponentin puuttuessa TM-aallosta (engl. Transverse Magnetic). (Räisänen ja Lehto 2011, 36-37.)

Tarkastelupisteen etäisyys lähettävästä antennista määrittelee, onko tarkastelupiste antennin lähi- vai kaukokentässä. Kaukokentässä lähettävästä antennista lähteen sähkömagneettiset palloaallot ovat likimain samansuuntaisia ja tällöin aaltoa voidaan käsitellä tasoaaltona. Tätä on havainnollistettu kuvassa 1. Maxwellin yhtälöistä johdettuna kaukokenttäapproksimaatiota voidaan käyttää, kun kohteen etäisyys d lähettävästä antennista on suurempi kuin $\lambda/(2\pi)$. Aaltoliikkeen perusyhtälön avulla laskettuna esimerkiksi taajuudella $f = 30$ MHz ollaan antennin kaukokentässä, kun kohteen etäisyys antennista on suurempi kuin 1,6 m ja taajuudella $f = 1$ GHz, kun etäisyys antennista on suurempi kuin 5 cm. (Williams ja Armstrong 2000, 85.; Ulaby ym. 1999, 345.)



KUVA 1. Kaukokenttäaproksimaatio (Ulaby ym. 1999, 404.)

2.3 Hyödyllisiä radiotekniikan laskenta-kaavoja

Taulukossa 2 on esitetty tämän työn kannalta tärkeitä radiotekniikan laskukaavoja. Radiotekniikassa käytetään hyvin usein desibelipohjaisia yksiköitä. Desibeliyksiköt ovat suhteellisia valittuun referenssiin nähden, ja niiden käyttäminen muuttaa suureiden eksponentiaaliset suhteet lineaarisiksi. Käytännössä tämä tarkoittaa jakolaskujen muuttumista helpommin käsiteltäviksi vähennyslaskuiksi ja kertolaskujen muuttumista yhteenlaskuiksi.

TAULUKKO 2. Radiotekniikan laskukaavoja.

Kaava	Selite
$P_{dB} = 10 \cdot \log(P_1/P_2)$	Suhteellinen teho desibeleinä
$P_{ref} = 10 \cdot \log(P_x/P_{ref})$	Suhteellinen teho verrattuna referenssiin
$P_{dB} = 20 \cdot \log(V_1/V_2)$	Suhteellinen teho desibeleinä amplitudisuureista
$P_{dBm} = 30 + P_{dB}$	Desibelien muunnos milliwattidesibeleiksi
$V_{dB\mu V} = P_{dBm} + 107$	Jännitteen ja tehon yhteys desibeleinä (50 Ω systeemissä)
$r \geq \lambda/(2\pi)$	Kaukokentän määritelmä
$f \lambda = c$	Taajuuden ja aallonpituuden yhteys vapaassa tilassa
$AF = E/V$	Antennikerroin (Antenna factor)
$AF_{dB/m} = 20 \cdot \log(E/V)$	Antennikerroin (dB/m)
$G_{dB} = 20 \cdot \log(f_{MHz}) - AF_{dB/m} - 29.79$	Antennivahvistuksen laskeminen (50 Ω systeemissä)
$P_{dB} = 20 \log(E_{V/m}) + 20 \log(d_m) - 20 \log(f_{MHz}) + AF_{dB/m} + 15$	Halutun sähkökentän tuottamiseen vaadittava teho, missä d_m on etäisyys antennista
$P_{net,W} = VSWR = P_{forward,W} - P_{reflected,W}$	Seisovan aallon suhde (VSWR)
$ \rho = (VSWR-1)/(VSWR+1)$	Heijastuskerroin
$L = \lambda/4$	Monopoli antennin pituus
$L = \lambda/2$	Bipolaari antennin pituus

3 SÄHKÖMAGNEETTISEN YHTEENSOPIVUUDEN TESTAAMINEN

Sähkölaitteiden markkinoille saattamiseen EU-alueella tarvitaan kuvassa 2 esitetty CE-merkintä. Laittevalmistaja vakuuttaa CE-merkinnällä laitteen täyttävän kaikki merkinnän edellyttämät vaatimukset laitteen tyyppin mukaisesti. Osa näitä vaatimuksia on EMC-vaatimusten täyttäminen, millä varmistetaan, että laite toimii häiriöttä sähköisessä toimintaympäristössään eikä aiheuta liiallisia häiriöitä muille sähkölaitteille. (Tukes 2016.)



KUVA 2. CE-merkintä (Tukes 2016.)

3.1 Säteilevät häiriöpäästöt

Sähkölaitteet eivät saa aiheuttaa liiallisia häiriöpäästöjä, jotta ne eivät häiritsisi muiden laitteiden toimintaa. Laitteen säteilevien häiriöpäästöjen määrää mitataan esimerkiksi standardien EN 55022 ja CISPR 22 mukaisesti. Standardit koskevat tietotekniikkalaitteita, jotka toimivat kaupallisessa, teollisuus- tai kotitalousympäristössä. (EN 55022 2006.; CISPR 22 2008.)

EN 55022 ja CISPR 22 -standardit määrittelevät menetelmän, jolla testattavan laitteen emissioita voidaan toistettavasti ja luotettavasti mitata sekä emissioiden päästörajat. Standardissa CISPR 22 on asetettu kotitalousympäristössä toimiville laitteille säteilevien häiriöpäästöjen raja-arvoiksi taajuuksilla 30 - 230 MHz 30 dB μ V/m ja taajuuksilla 230 - 1 000 MHz 37 dB μ V/m. (EN 55022 2006.; CISPR 22 2008.)

Oleellista häiriöpäästöjen mittaamiselle on eristetty mittausympäristö, jotta muun ympäristön aiheuttamat emissiot eivät vääristä mittaustulosta. Standardit määrittelevät myös emissiomittauksissa käytettävän mittausetäisyyden, jotta emissiotasot eri mittausten kesken ovat vertailukelpoisia. (EN 55022 2006.; CISPR 22 2008.)

3.2 Säteilevä immuniteetti

Säteilevän immuniteetin testaaminen on säteilevien häiriöpäästöjen mittaamisen vastakohta. Immuniteettitestissä eli häiriön sietotestissä testataan testattavan laitteen kykyä sietää muiden laitteiden ja ympäristön säteilemää RF-taajuista häiriötä. Standardit EN 61000-4-3 ja IEC 61000-4-3 määrittelevät menetelmän, jolla testataan laitteen RF-säteilyn sietoa. Testattavaa laitetta häiritään voimakkaalla häiriösignaalilla, joka kytkeytyy laitteeseen säteilemällä antennista. Standardi määrittelee tes-

teissä käytettävän häiriösignaalin muodon laitteen tuoteperheen mukaisesti. Taajuuksilla 80 - 1 000 MHz yleiselektronikkatuotteen täytyy sietää 80 %:n amplitudimoduloitua sinimuotoista häiriösignaalia kentän voimakkuuden ollessa 10 V/m. Standardi määrittelee testin parametrit sekä asettaa ehdot testauspaikalle ja -etäisyydelle. (EN 61000-4-3:2006.; IEC 61000-4-3:2006.)

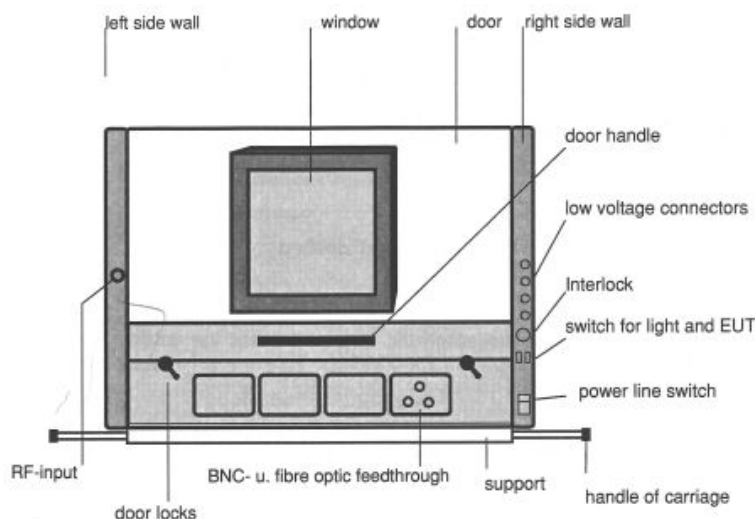
4 TESTAUSLAITTEISTO

Työssä otetaan käyttöön testauslaitteisto, jolla voidaan testata laitteen sähkömagneettista yhteensopivuutta häiriöiden kytkeytyessä laitteesta toiseen sähkömagneettisen RF-säteilyn kautta. Säteilevää immunitettia testataan standardin IEC 61000-4-3 mukaisesti käyttämällä signaaligeneraattoria ja tehovahvistinta. Säteileviä emissioita mitataan testivastaanottimella esimerkiksi standardin EN 55022 mukaisesti. Testaukset suoritetaan TEM-kammiossa ja menetelmien kalibroinneissa hyödynnetään Savonian EMC-laboratorion kentänvoimakkuussensoria käyttöliittymäyksikköineen.

4.1 SLine 700 TEM -kammio

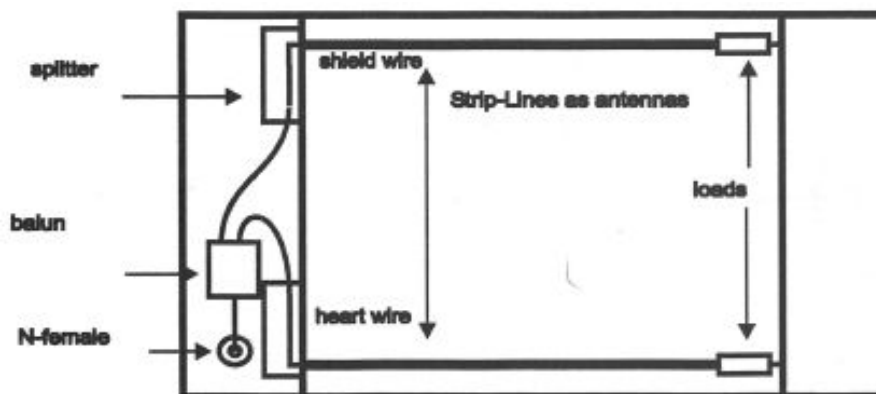
SLine 700 on kompakti TEM -kammio, jota voidaan käyttää tuotekehitysvaiheen sähkö- ja elektronikalaitteiden sähkömagneettisen yhteensopivuuden testaamiseen. Kammion fyysiset mitat on 1 062 mm * 790 mm * 815 mm (pituus * syvyys * korkeus) ja testausalueen suuruus on 350 mm * 350 mm * 350 mm. Näin ollen kammio soveltuu vain kohtuullisen pienien laitteiden testaamiseen. Kammio on huolellisesti maadoitettu mittausalueen eristämiseksi ympäristöstä ja testausalue on ympäröity vaimentimilla (engl. absorbers) heijastumisien ehkäisemiseksi. Kammion eristyksen tehokkuus on vähintään 75 dB alle 500 MHz:n taajuisilla ja vähintään 60 dB yli 500 MHz:n taajuuksilla. (Rohde & Schwarz 1998b, 3-4.)

Kammion etuosa on esitetty kuvassa 3. Kammiossa on aukeava ovi, jonka kautta testattava laite asetetaan mittausalueelle ennen mittauksia. Testausten aikana kammion ovi tulee pitää kiinni, koska korkeataajuiset sähkökentät aiheuttavat terveysriskin. Kammion ovesa on ikkuna, jonka kautta testattavaa laitetta voidaan tarkkailla testausten aikana. Kammio sisältää lisäksi valon, AC-liittimen ja neljä kappaletta BNC-liittimiä, joiden kautta testattavalle laitteelle voidaan johtaa esimerkiksi tasajännitettä käyttöjännitteeksi. Lisäksi opinnäytetyössä kammioon tehtiin EMC-läpivienti, joka mahdollistaa muiden testauksissa käytettävien kaapeleiden viemisen testattavalle laitteelle esimerkiksi laitteen monitorointia varten. (Rohde & Schwarz 1998b, 6.)



KUVA 3. SLine 700 TEM -kammio edestä kuvattuna (Rohde & Schwarz 1998b, 7.)

Kammiossa on 50Ω ominaisimpedanssin omaava RF-liitin, jonka kautta kammion sisäänrakennetuille antennille voidaan johtaa signaalia tai jonka kautta kammiossa olevan testattavan laitteen häiriöpäästöt voidaan mitata. Kammion antennirakenne on esitetty kuvassa 4 kammion etupuolelta kuvattuna. (Rohde & Schwarz 1998b, 3.)



KUVA 4. SLine 700 TEM -kammion antennirakenne (Rohde & Schwarz 1998b, 7.)

Immuneettitestauksissa sähkökenttä tuotetaan eristetyille mittausalueelle ajamalla ulkoinen signaali kammion sisäänrakennetuille antennille RF-liittimen kautta. Kammiossa on kaksi symmetrisesti asetettua antennaa katossa ja pohjassa. Kun kammion pohjassa olevalle kammiolle syötetään jännite, syntyy antennien välille sähkökenttä kondensaattorin tapaan. Syötettäessä antennille vaihtojännitettä myös sähkökenttä muuttuu ajallisesti. Ajallisesti muuttuva sähkökenttä aiheuttaa muuttuvan magneettikentän ja kammioon syntyy sähkömagneettinen etenevä aalto. Aalto etenee kammiossa poikittaissuuntaisesti etupuolelta katsottuna (Z-suunta, horisontaali vasemmalta oikealle). Sähkökenttä on kammiossa pystysuuntainen (X-suunta, vertikaali) ja magneettikenttä syvyysuuntainen (Y-suunta, horisontaali syvyysuunnassa). (Rohde & Schwarz 1998b, 6.)

Kammion suunnittelussa on pyritty siihen, että kenttä olisi mahdollisimman homogeeninen eli yhdensuuntainen ja voimakkuudeltaan tasainen koko mittausalueella. Kammion antennirakenteen vuoksi vain TEM-aaltomuodot etenevät kammion sisällä eli kammiossa etenevällä sähkömagneettisella aallolla ei ole sähkö- ja magneettikentän komponentteja etenemissuunnassa. (Rohde & Schwarz 1998f, 2.)

Valmistajan suositusten mukaisesti kammion sisääntuloon voidaan ajaa korkeintaan 100 W:n teho, joka tuottaa testausalueelle tyypillisesti 30 V/m suuruisen sähkökentän. Kammio soveltuu testauksiin taajuuksivälillä 150 kHz - 1,0 GHz. (Rohde & Schwarz 1998b, 3-4.)

Emissiomittauksissa eristetyllä mittausalueella olevan testattavan laitteen tuottamat häiriöpäästöt muodostavat jännitteen kammion antennien välille. Antennien välisen kentän voimakkuuden määrittämiseksi käytetään valmistajan ilmoittamaa kaavaa

$$L = 106 + 10 \lg S + 10 \lg C_1 + 20 \lg C_2 + 20 \lg f, \quad (1)$$

jossa L on kentän voimakkuus [$\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$], C_1 on kammion korjauskerroin [dB], f on taajuus [MHz] ja S on antennien välinen napajännite [V]. Kaavan 1 OATS-korjausermi C_2 muuttaa testaukset vastaamaan 10 m:n mittausetäisyydellä tehtyjä mittauksia standardien vaatimusten mukaisesti. (Rohde & Schwarz 1998f, 3.)

Napajännite S täytyy mitata kolmella eri polarisaatiotasolla U_x , U_y , U_z [$\text{dB}\mu\text{V}$] eli mittaamalla testattavaa laitetta kolmesta toistensa suhteen ortogonaalisesta eli kohtisuorassa olevista suunnista. Tämän jälkeen antennin napajännite voidaan laskea yhtälöstä

$$S = 10^{\frac{U_x - 120}{10}} + 10^{\frac{U_y - 120}{10}} + 10^{\frac{U_z - 120}{10}}, \quad (2)$$

jonka arvo voidaan sijoittaa kaavaan 1. (Rohde & Schwarz 1998f, 3.)

4.2 R & S ESCS 30 -testivastaanotin

Rohde & Schwarzin ESCS 30 on EMC-testivastaanotin, jota voidaan käyttää säteilevän emission mittaamiseen. Vastaanottimella voidaan mitata signaaleja voimakkuudeltaan -38 - 137 $\text{dB}\mu\text{V}$ taajuuksilla 9 kHz - 2 750 MHz . Testivastaanotin soveltuu esimerkiksi EN 55022 -standardin mukaisiin mittauksiin. Vastaanottimessa on standardi 50 Ω ominaisimpedanssin omaava RF-sisääntulo ja kolme erilaista sisäänrakennettua ilmaisinta: keskiarvo- (engl. average), piikki- (engl. peak) ja kvasipiikki-ilmaisimien (engl. quasi-peak). Skannausmittausta käyttäessä yksittäisten taajuuksien mittausaika on säädettävissä väliltä 1 ms ja 1 000 ms ja käytettävä IF-kaista määritellään standardin mukaisesti. Testivastaanotin sisältää lisäksi 10 dB ominaisvahvistuksen omaavan esivahvistimen ja 5 dB :n askelellilla säädettävän 0 - 60 dB RF-vaimentimen. (Rohde & Schwarz 1997.)

Testivastaanottimessa on kaksi digitaalinäyttöä, joista mittauksen tilaa voi seurata ja joissa mittauksen tärkeimmät parametrit ovat näkyvissä. Vastaanotin mahdollistaa mittauksen automatisoimisen halutulla taajuusvälillä. Mittaustulos on nähtävissä $6,5$ " LCD-näytöltä. Testivastaanotinta voidaan myös hallita etänä GPIB-väylän kautta. GPIB-väylää voidaan käyttää mittauslaitteiden ohjaamiseen ja tulosten siirtämiseen PC:lle jälkikäsitteilyä tai visualisointia varten. (Rohde & Schwarz 1997.)

4.3 R & S SMT 03 -signaaligeneraattori

Rohde & Schwarzin SMT 03 on signaaligeneraattori, jota voidaan käyttää tuottamaan häiriösignaalia säteilevän immunitetin testaamisessa, ja siinä on 50 Ω ominaisimpedanssin omaava RF-lähtö. Kyseisellä signaaligeneraattorilla voidaan tuottaa sinimuotoista kanta-aaltosignaalia voimakkuudeltaan -144 - $+13$ dB taajuuksilla 5 kHz - 3 GHz . Signaaligeneraattori mahdollistaa kanta-aallon amplitudi-, (engl. amplitude modulation) taajuus- (engl. frequency modulation), vaihe- (engl. phase modulation) ja pulssimoduloinnin (engl. pulse modulation). Amplitudimodulointia käytettäessä modulaatio- taajuus on säädettävissä DC:stä korkeintaan 100 kHz :iin ja modulointisyvyys (engl. modulation depth) on asetettavissa väliltä 0 ja 100 $\%$. Laitteessa on LCD-näyttö, jonka avulla mittalaitetta käytetään ja josta näkyy tärkeimpien parametrien arvot testauksien aikana. Testivastaanottimen tapaan

myös SMT 03 -signaaligeneraattoria voidaan hallita etänä GPIB-väylän kautta. (Rohde & Schwarz 1996.)

4.4 AR100W1000M1-tehovahvistin

Amplifier Researchin AR100W1000M1 on laajakaistainen RF-tehovahvistin, jota voidaan käyttää signaaligeneraattorilla tuotetun häiriösignaalin vahvistamiseen säteilevän immunitetin testaamisessa. AR100W1000M1 signaalin vahvistusteho on vähintään 100 W, ja sitä voi käyttää tulosignaalin taajuuksilla 80 - 1 000 MHz. Tehovahvistimen ulostulo on hyvin lineaarinen eli signaalin suhteellinen vahvistus on hyvin tasainen koko taajuusalueella. Vahvistimessa on 50 Ω ominaisimpedanssin omaavat RF-sisään- ja RF-ulostulot. Sisääntulevan signaalin suurin sallittu voimakkuus on 1 mW = 0 dBm. Vahvistimen etupaneelissa on RF-tehomittari, josta vahvistustehoa voidaan monitoroida testausten aikana. Vahvistin kykenee myös käsittelemään AM-, FM- ja PM-moduloituja tulosignaaleja. (Amplifier Research 1997a.)

4.5 AR FL7006 -kentänvoimakkuussensori ja AR FL7000 -käyttöliittymäyksikkö

AR FL7006 -kentänvoimakkuussensoria ja AR FL7000 -käyttöliittymäyksikköä käytetään EMC-testauksissa kentän monitorointiin testausten aikana sekä sähkökentän kalibroitimittaukseen ja sähkökentän tasaisuuden varmistamiseen.

FL7006-sensorilla voidaan mitata vallitsevan sähkökentän voimakkuutta. Sensori kykenee mittaamaan sähkökentän voimakkuuden kolmessa toisiinsa nähden ortogonaalisessa suunnassa eli se mittaa samanaikaisesti sähkökentän x-, y- ja z-komponenttien arvot. Sähkökentän kokonaisvoimakkuus saadaan yhdistämällä nämä arvot vektorin amplitudin laskukaavalla $|\vec{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$.

Sensori on kytketty valokuitukaapelilla FL7000-käyttöliittymäyksikköön. Sensorin tiedonsiirto käyttöliittymäyksikölle tapahtuu valokuitukaapelin kautta ja sensori saa sen kautta myös käyttövirtansa. Valokuitukaapelin maksimimitta on 100 m. Mitta-arvoja voidaan lukea etänä käyttöliittymäyksiköltä RS-232-, GPIB- tai USB-väylien kautta. (Amplifier Research 1997b.)

Mikroprosessoripohjaisessa sensorissa on lämpökohinakompensointi ja kohinan poisto. Sillä voidaan mitata kentän voimakkuuksia 0,5 - 800 V/m tarkkuudella $\pm 0,3$ V/m taajuuksilla 0,5 MHz - 6 GHz. Käytettäessä käyttöliittymäyksikössä USB- tai GPIB-väyliä sensorilta voidaan lukea korkeintaan 50 mitta-arvoa sekunnissa. (Amplifier Research 1997b.)

5 TESTAUSOHJELMISTOT

Testauslaitteita ohjataan testausohjelmistojen avulla, jotka mahdollistavat testausten automatisoinnin etänä esimerkiksi GPIB-väylän kautta. Työssä käytetään Rohde & Schwarzin kaupallisia EMC-testausohjelmistoja ja luodaan lisäksi omat National Instrumentsin LabVIEW-pohjaiset sovellukset.

5.1 EMC-testausohjelmistot: ES-K1, EMS-K1 ja EMC32

Rohde & Schwarzin ES-K1 ja EMS-K1 ovat vanhoja kaupallisia Windows™-ympäristössä toimivia EMC-ohjelmistoja. Niitä voidaan käyttää testausjärjestelmien kalibrointiin ja standardien mukaisten testausten automatisointiin. Lisäksi ne mahdollistavat testauslaitteiden hallinnan ja monitoroinnin sekä mittaustulosten visualisoinnin ja dokumentoinnin.

Testausten suorittamiseksi ohjelmiin täytyy määritellä käytettävät testauslaitteet. ES-K1 sisältää ajurit useimmille Rohde & Schwarzin emissiomittauksissa käytettäville testivastaanottimille ja spektri-analyysiaattoreille. Vastaavasti EMS-K1 sisältää ajurit useimmille Rohde & Schwarzin immuuteettitestauksissa käytettäville signaaligeneraattoreille, tehovahvistimille ja kentän voimakkuuden mittauksiin käytettäville testauslaitteille. Koska ohjelmistot ovat jo varsin vanhoja, ne eivät enää sisällä tukea uusimmille testauslaitteille.

Testauslaitteet kytketään ES-K1:tä tai EMS-K1:tä ajavaan tietokoneeseen yleisimmin GPIB-väylän kautta. Ohjelmat pystyvät tämän jälkeen suoraan ohjaamaan testauslaitteita ja lukemaan mittaustuloksia ajureiden tukemilla GPIB-väyläkomennoinnilla.

ES-K1:lla ja EMS-K1:llä voidaan tehdä skannauksia sekä pyyhkäisyjä, ja ne sisältävät valmiita testaus- ja mittaustuloksia. Näiden määrittelyt tehdään niitä vastaaviin taulukkoihin. Tämän lisäksi ohjelmistot sisältävät valmiita skriptejä eli testikokonaisuuksia useille standardien mukaisille EMC-testeille. Valmiiden ja automatisoitujen skriptien käyttäminen tekee EMC-testeistä tarkempia ja helpommin toistettavia.

EMC32 on Rohde & Schwarzin usin EMC-testauksiin käytettävä EMC-ohjelmisto. EMC32:een on saatavilla erilliset EMI- ja EMS-paketit eli sitä voidaan käyttää sekä immuuteettitestauksiin ja emissiomittauksiin. EMC32 sisältää tuen kaikille Rohde & Schwarzin uusimmille EMC-testilaitteille. EMC32:n ulkoasu on huomattavasti ES-K1 ja EMS-K1 -ohjelmistoja nykyaikaisempi ja käyttöliittymältään parannettu. Siitä löytyy lisäksi skriptit uusimpien standardien mukaisille testeille.

5.2 NI LabVIEW

National Instrumentsin LabVIEW on tehokas ja joustava graafinen ohjelmakehitysympäristö. Insinöörit ja tutkijat käyttävät LabVIEW:tä mittaustulosten tutkimuksessa, tuotannossa ja testaamisessa lähes kaikilla tekniikan aloilla. LabVIEW-ohjelmia kutsutaan virtuaali-instrumenteiksi (engl. VI, Virtual Instrument) ja ohjelmointi tapahtuu graafisten ikonien avulla. Ikonit vastaavat perinteisten oh-

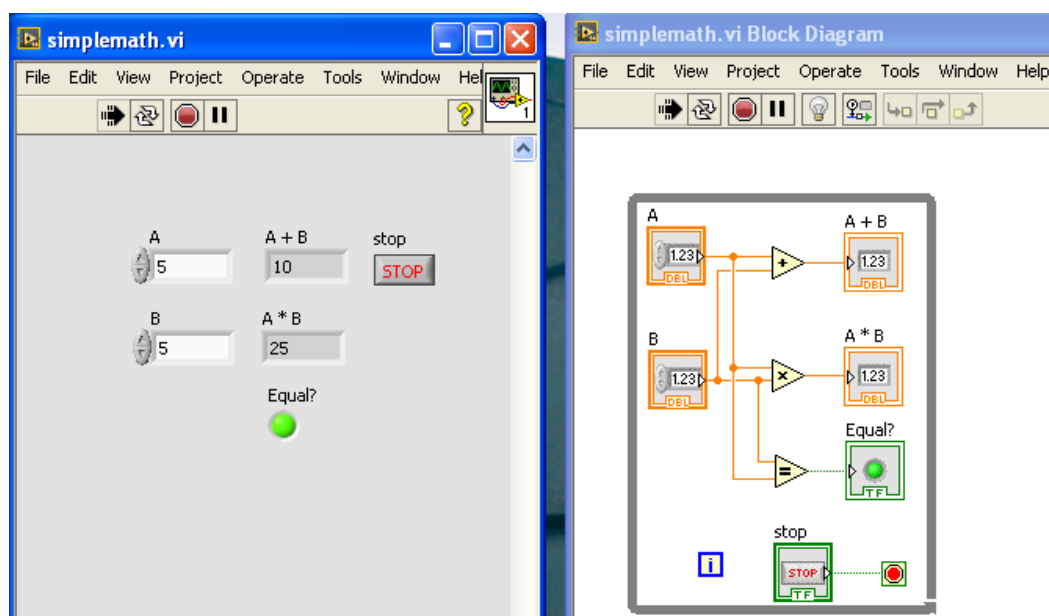
jelmointikielten tekstipohjaista koodia. Tämän vuoksi LabVIEW-ohjelmointi ja sen opettelu on yleensä tekstipohjaisia kieliä helpompaa myös hyvin vähäisellä ohjelmointikokemuksella. (Bishop 2010, 4.)

Yhtä virtuaali-instrumenttia vastaa aina ohjelman käyttöliittymänä toimiva etupaneeli ja sitä vastaava lohkokaavio, jonka avulla LabVIEW-ohjelmointi tehdään. Etupaneelissa esiintyvillä komponenteilla löytyy vastinpari lohkokaaavion puolelta. Ohjelman toiminnallinen logiikka tehdään lohkokaavioon ja ohjelmaa käytetään suorituksen aikana etupaneelin kautta.

LabVIEW sisältää laajan kokoelman erilaisia komponentteja, jotka voidaan lisätä paletista suoraan etupaneeliin tai lohkokaavioon. Etupaneeliin voidaan lisätä muun muassa numeerisia tai loogisia ohjaimia tai indikaattoreita kuten numero- tai tekstikenttiä, sekä vipuja tai ledejä. Indikaattoreiden toiminnallisuus ohjelmoidaan lohkokaavioon perinteisten ohjelmointikielten muuttujien tapaan.

Lohkokaavioon lisätään komponentteja laajasta funktiopaletista. Funktiopaletista löytyy mm. lähes kaikista ohjelmointikielistä löytyvät graafiset versiot ohjausrakenteista kuten for- ja while-silmukoista, switch-rakenteista sekä laskennallisia symboleja. Ohjelmassa suoritettavia elementtejä kutsutaan noodeiksi, joiden terminaalit kytketään piuhottamalla toisiinsa. Ohjelman suorituksen aikana tieto kulkee nooiden terminaalien välillä piuhoja pitkin.

Kuvassa 5 on havainnollistettu LabVIEW-ohjelmointia yksinkertaisen esimerkkisovelluksen avulla. Kuvassa 5 vasemmalla on sovelluksen etupaneeli ja oikealla sitä vastaava lohkokaavio. Käyttäjän syöttämät luvut A ja B ovat kontrolleja ja kentät $A + B$, $A * B$ ja *Equal?* ovat indikaattoreita. Kontrollit ja indikaattorit ovat piuhoitettu toisiinsa ja piuhossa kulkevalle datalle tehdään yhteen- ja kertolaskut sekä vertaillaan niiden yhtäsuuruutta. Sovellus pyörii while-silmukassa, kunnes käyttäjä pysäyttää sovelluksen painamalla *STOP*.



KUVA 5. Esimerkki LabVIEW-sovelluksesta.

Virtuaali-instrumenttiin on mahdollista lisätä alivirtuaali-instrumentteja (engl. SubVI), mikä mahdollistaa laajojen ohjelmien tekemisen modulaarisesti. Alivirtuaali-instrumentit vastaavat perinteisten tekstipohjaisten ohjelmointikielten funktioita, joita voidaan kutsua päävirtuaali-instrumentissa.

Mittaukset tehdään LabVIEW:ssä yleensä tiedonkeruukortin (engl. DAQ) kautta. Digitaaliset tai analogiset signaalit kytketään esimerkiksi USB-väylän kautta PC:lle kytkettyyn NI:n DAQ-korttiin (Bishop 2010, 403). Käytettäessä LabVIEW-yhteensopivaa DAQ-korttia sisääntulevat signaalit ovat luettavissa suoraan LabVIEW-ohjelmistosta ja sillä voidaan ohjata DAQ-kortin lähtöjä. Tulevat signaalit ovat kytkettävissä suoraan virtuaali-instrumentin indikaattoreille ja mittatulosten arvot voidaan kytkeä näkymään suoraan esimerkiksi pylväsindikaattorissa. Lähteville signaaleille voidaan tehdä kontrollit etupaneelin, joista niiden arvoja voidaan suoraan muuttaa. LabVIEW sisältää laajan tuen myös muille protokollille ja sen avulla on helppo ohjelmoida esimerkiksi GPIB-väyläliikenne mittalaitteille.

5.3 Mittalaitteiden ohjaus GPIB-väylän (IEEE 488) kautta

NI LabVIEW voi kommunikoida ulkoisten mittalaitteiden kanssa eri väylien kautta. Yksi yleisimmistä tähän tarkoitukseen käytettävistä väylistä on IEEE:n standardisoima GPIB-väylä. GPIB on alun perin Hewlett Packardin suunnittelema standardiksi muodostunut väylä, jonka alkuperäinen tarkoitus oli mahdollistaa testauksen ja mittalaitteiston ohjaamisen tietokoneella. Myöhemmin National Instruments on tehnyt väylästä yleiskäyttöisen myös muilla kuin HP:n laitteilla. (Bishop 2010, 654.)

GPIB-väylä tarvitsee toimiakseen PC:stä GPIB-käyttöliittymäkortin (engl. interface), johon ulkoiset mittalaitteet kytketään GPIB-kaapelilla. Laitteet liitetään väylään tyypillisesti joko lineaarisesti ketjutamalla tai kytkemällä tähtiasetelmaan, jossa kaikki väylän laitteet ovat kytkettyinä toisiinsa yhden laitteen kautta. Eri laitteet on jaettu GPIB-väylässä kolmeen luokkaan: puhujiin (engl. talkers), kuuntelijoihin (engl. listeners) ja ohjaimiin (engl. controllers). Ohjaimena toimii yleensä tietokone, joka ohjaa tiedonkulkua GPIB-väylässä. Puhujat lähettävät tietoa sisältäviä kuuntelijoille ja ohjaimille. Alkuperäisen standardin mukaisesti GPIB-väylän suurin tiedonsiirtonopeus on yksi megatavu sekunnissa, joka riittää mittalaitteiden hallintaan ja mittaustiedon siirtämiseen. (Bishop 2010, 654-657.)

Windows™-ympäristössä käytetään NI:n Measurement & Automation Explorer (NI MAX) -ohjelmaa laitteiden tunnistamiseen sekä ajureiden asentamiseen ja hallinointiin. LabVIEW sisältää laajan kirjaston mittalaitteiden ajureita, jolloin käyttäjän ei tarvitse käyttää väyläkomentoja mittalaitteiden hallintaan. Vaihtoehtoisesti käyttäjä voi ohjelmoida väyläliikenteen esimerkiksi käyttämällä LabVIEW'n sisältämää avustustyökalua (Instrument I/O Assistant). (Bishop 2010, 662-665.)

Liitteen 1 taulukoihin 1 ja 2 on koottu tärkeimpiä signaaligeneraattorin ja testivastaanottimen IEEE 488.2 -standardin mukaisia komentoja, joilla laitteita voidaan ohjata GPIB-väylän kautta. Tähdellä alkavat komennot ovat laitteesta riippumattomia GPIB-väylän standardikomentoja ja loput komendoista ovat laitekohtaisia IEEE 488.2 -syntaksin mukaisia R & S -BASIC-kielisiä komentoja. Komentorivit päättyvät ASCII-merkistön rivinvaihtomerkkiin ja useita komentoja voidaan lähettää yhdellä merkkirivillä erottelemalla ne toisistaan puolipisteillä. Komennoilla voi lisäksi olla välilyöntimerkeillä

eroteltuja parametreja ja erilaisia yksiköitä. Kyselykomennot, joihin laitteelta odotetaan vastausta, päättyvät kysymysmerkkiin. (Rohde & Schwarz 1996.; Rohde & Schwarz 1997.)

ESCS-testivastaanottimen tilaa voidaan valvoa GPIB-väylän kautta taulukossa 3 esitetyn tilatavun (STB, Status Byte) avulla. Tilatavussa näkyviä tapahtumia voidaan rajata asettamalla peitteitä (engl. mask) eri rekistereille. Tapahtumarekisterille (ERS, Event Register) asetetaan peite ESE-tavulla (Event Enable), joka määrittelee tapahtumarekisterin bitit, joiden muutos näkyy tapahtumarekisterin summabitissä. SRE-peitteellä (Service Request Enable) asetetaan tilatavun STB-bitit, jotka näkyvät laitteen palvelupyynnönä (RQS, Request Service). Tilatapahtumarekisterien peitteet asetetaan kaksiosaisilla tavuilla ERDA, ERDB, ERDC ja ERDD. (Rohde & Schwarz 1997.)

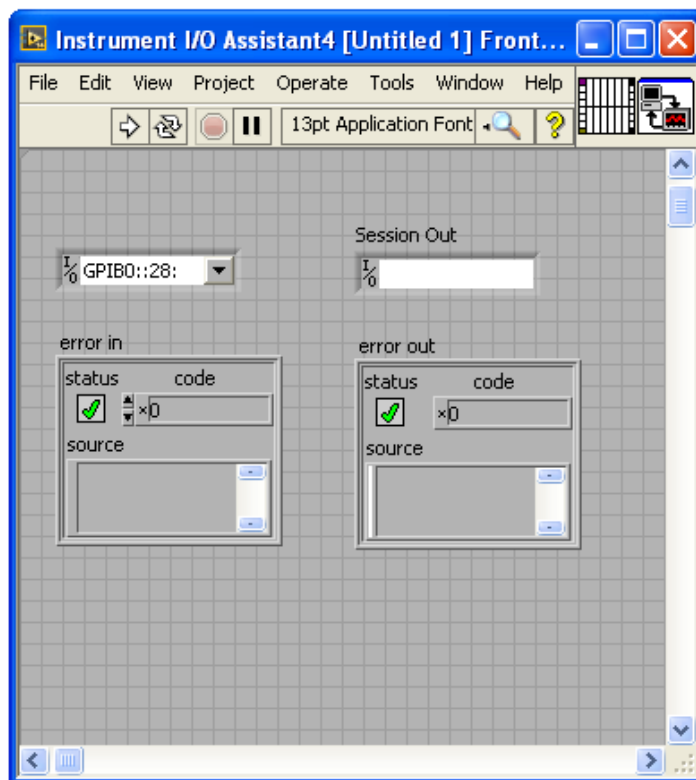
TAULUKKO 3. ESCS-testivastaanottimen tilatavun bittien merkitys (Rohde & Schwarz 1997.)

Bitti	Kohde	Tarkoitus
0	ERD	Tilatapahtumarekisterin D-osan summabitti
1	ERC	Tilatapahtumarekisterin C-osan summabitti
2	ERB	Tilatapahtumarekisterin B-osan summabitti
3	ERA	Tilatapahtumarekisterin A-osan summabitti
4	MAV	Onko viestipuskurissa viestejä
5	ESR	Tapahtumarekisterin summabitti
6	RQS	Palvelupyyntö (Request Service)

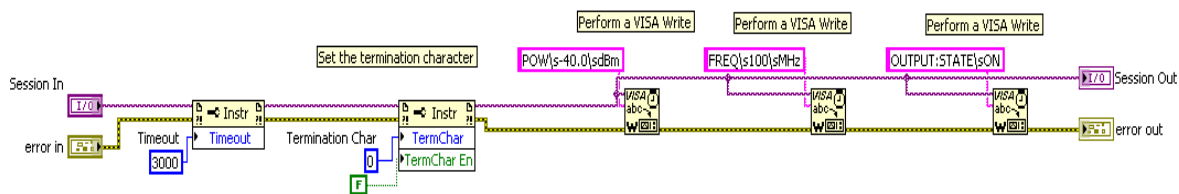
LabVIEW:ssä mittalaitteiden ohjaus GPIB-väylän kautta tehdään helpon Instrument I/O Assistant -työkalun avulla. Avustustyökaluun voidaan syöttää yksi kerrallaan suoritettavia GPIB-väyläkomentoja. Komentojen syötön jälkeen LabVIEW luo uuden ikonin niiden pohjalta. Näpdyttämällä ikonia hiiren oikealla painikkeella ja valitsemalla *Open Front Panel*, LabVIEW muuttaa ikonin uudeksi alivirtuaali-instrumentiksi ja luo sille automaattisesti etupaneelin sekä lohkokaaavion.

Esimerkkinä GPIB-väylän osoitteessa GPIB0::28 olevalle SMT 03 -signaaligeneraattorille syötetään seuraavat komennot LabVIEW'n avustustyökalulla: signaalin voimakkuus asetetaan komennolla *POW -40.0 dBm*, signaalin taajuus asetetaan komennolla *FREQ 100 MHz* ja signaaligeneraattorin ulostulo kytketään päälle komennolla *OUTPUT:STATE ON*. Kuvassa 6 on esitetty LabVIEW'n komennoista luoma ikoni ja etupaneeli. Tuplaklikkaamalla ikonia nähdään LabVIEW'n komennoista luoma kuvassa 7 esitetty lohkokaavio.

Edellä esitettyllä menettelyllä SMT 03 -signaaligeneraattorille ja ESCS 30 -testivastaanottimelle voidaan luoda LabVIEW-ajurit tekemällä kaikille tarvittaville GPIB-väyläkomennolle erilliset ikonit. Samassa ikonissa voidaan suorittaa useampi väyläkomento kerralla. Tätä kannattaa hyödyntää jakamalla väyläkomentoja loogisiksi kokonaisuuksiksi esimerkiksi suorittamalla kaikki signaalin alustukseen liittyvät komennot yhden ikonin sisällä ja tekemällä omat ikonit signaalin kytkemiseksi päälle ja pois päältä.



KUVA 6. LabVIEW'n Instrument I/O Assistant -työkalulla luotu etupaneeli ja ikoni signaaligeneraattorin ohjaamiseen.



KUVA 7. LabVIEW'n Instrument I/O Assistant -työkalulla luotu lohkoavaio signaaligeneraattorin ohjaamiseen.

6 TESTAUSJÄRJESTELMÄ

Testauslaitteista, SLine 700 TEM -kammioista ja PC:stä tehtiin kuvan 8 mukainen liikuteltava kokonaisuus. ESD-suojatulle pöydälle tehtiin alataso testauslaitteita ja PC:tä varten. Kammio, testauslaitteet ja PC kiinnitettiin tukevasti pöydän rakenteisiin. Pöytään vaihdettiin tukevarakenteiset kumipintaistiset renkaat kantokyvyn parantamiseksi ja tärinän vaimentamiseksi laitteistoa siirreltäessä. Testausjärjestelmä sisältää testauslaitteiston säteilevän emissioita ja immunitettien mittaamiseen ja testaamiseen.



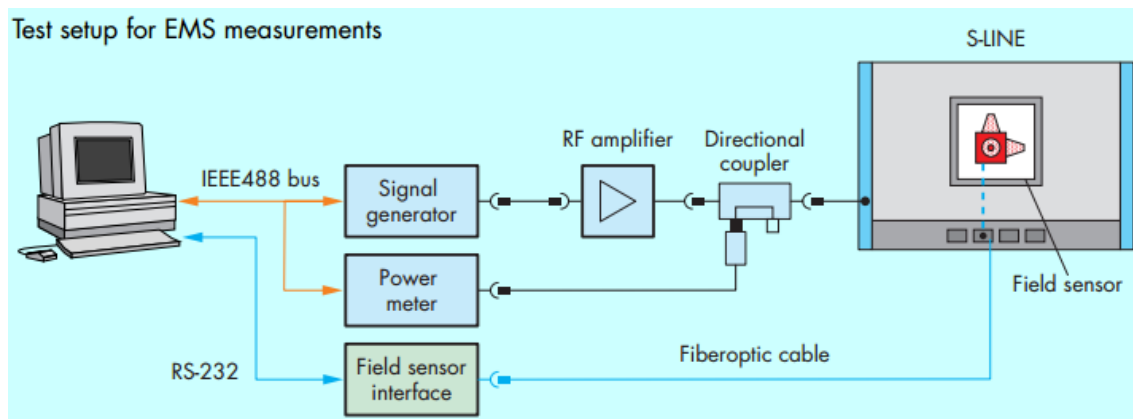
KUVA 8. Testauslaitteistosta, SLine 700 TEM -kammioista ja PC:stä koottu testausjärjestelmä.

Kuvissa 9 ja 10 on esitetty kaaviot säteilevän emissioita ja immunitettien testauskokoonpanoista. Immunitettitestauksissa PC ohjaa signaaligeneraattoria GPIB-väylän kautta. Signaaligeneraattorin signaali vahvistetaan RF-tehovahvistimella, josta häiriösignaali kytkeytyy kaapelin kautta TEM-kammion antenneihin ja tätä kautta säteilemällä testattavaan laitteeseen.

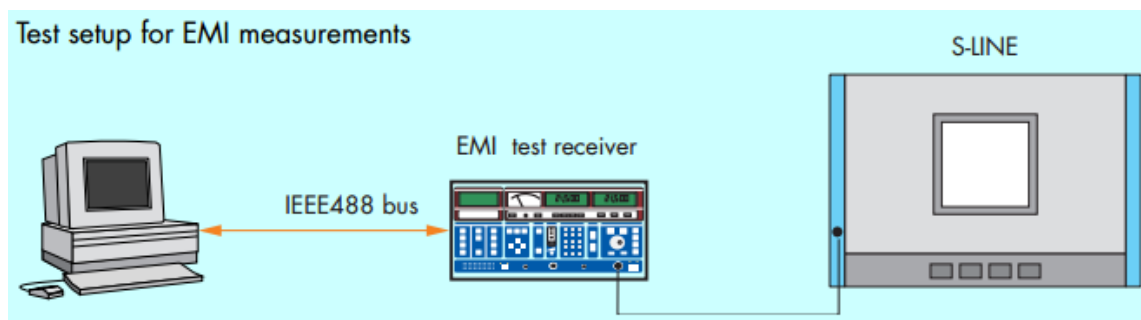
Emissiomittauksissa testattavan laitteen häiriöpäästöt kytkeytyvät TEM-kammion antenneihin, joista niiden voimakkuutta mitataan testivastaanottimella. Mittausten automatisointi, testivastaanottimen konfigurointi ja mittaustulosten siirto tapahtuu PC:lle GPIB-väylän kautta.

Kuvasta 9 poiketen toteutettu liikuteltava testausjärjestelmä ei sisällä immunitettimittauksissa käytettävää kentänvoimakkuussensoria eikä tehomittaria kytkentäyksikköineen. Kyseinen järjestely vähentää testauslaitteiden määrää ja tekee testauskokoonpanosta halvemman ja helpommin liikutelta-

van. Toisaalta tämä vähentää järjestelmän joustavuutta, koska kalibroitimittaukset täytyy suorittaa etukäteen järjestelmän ulkopuolisella laitteistolla. Tässä työssä tehtävillä kalibroitimittauksissa hyödynnetään Savonian EMC-laboratorion testauslaitteistoa.



KUVA 9. Säteilvän immunitetin testaamiseen käytettävä testauskoonpano (Rohde & Schwarz 1998e.)



KUVA 10. Säteilvän emission mittaamiseen käytettävä mittausjärjestelmä (Rohde & Schwarz 1998e.)

7 KALIBROINTIMENETELMÄT

Testausmenetelmät tulee kalibroida ennen varsinaisia testauksia. Immunitytestiä varten suoritetaan kentän tasaisuuskalibrointi, jolla varmistetaan, että TEM-kammioon syntyvä kenttä täyttää standardin EN 61000-4-3 mukaiset ehdot. Immunitytestien referenssikalibroinneilla määritellään signaaligeneraattorin lähtötasot, millä kammioon voidaan tuottaa halutun suuruinen kenttä. Referenssikalibroinnin yhteydessä voidaan suorittaa vahvistimen saturaatiotesti ja VSWR-kalibrointi, joilla varmistetaan vahvistimen toiminta lineaarisella alueella ja mitataan tehon heijastuminen testausjärjestelmässä. Lisäksi mitataan kaapelien vaimennukset, jotka otetaan huomioon kaikissa testauksissa.

Emissiomittaukselle ei löytynyt virallisia kalibrointimenetelmiä, joten sellainen kehitettiin tämän työn yhteydessä. Kehitetyssä kalibrointimenetelmässä hyödynnetään referenssisäteilijää, jonka emissiot mitataan tämän työn menetelmän lisäksi virallisella standardin EN 55022 mukaisella mittaustuloksella. Mittaustulosten eroista voidaan määrittää korjauskertoimet, joilla tämän työn menetelmän mittaustuloksia voidaan korjata vastaamaan paremmin virallisilla mittaustuloksilla saatuja tuloksia.

7.1 Kaapeleiden kalibrointi

Kaapeleiden vaimennus tulee ottaa huomioon kaikissa testauksissa. Kaapeleiden vaimennus voidaan mitata R & S ES-K1:n sisältämällä kaapelikalibrointiskriptillä. Kaapelikalibroinnille täytyy määrittellä oma skannaustaulukkonsa. Tässä työssä käytetty kaapelikalibrointitaulukko on esitetty liitteessä 2, millä tämän työn kaapelikalibroinnit on suoritettu.

Kaapelikalibrointi suoritetaan testivastaanottimen ja ylimääräisen referenssikaapelin avulla. Ensiksi testivastaanottimella mitataan referenssikaapelin vaimennus koko tarkasteltavalla taajuusalueella 30 - 1 000 MHz käyttämällä testivastaanottimen vakiovoimakkuista -17 dBm:n referenssisignaalia (liitteen 2 skannaustaulukossa: *Tracking Gen. -17 dBm*). Tämän jälkeen kaapeli, jonka vaimennus halutaan määrittää, lisätään signaaliketjuun ja mitataan vaimennus uudestaan. Tutkittavan kaapelin vaimennus saadaan määritettyä näiden kahden mittauksen vaimennuksien erotuksena.

7.2 Kentän tasaisuuden testaus

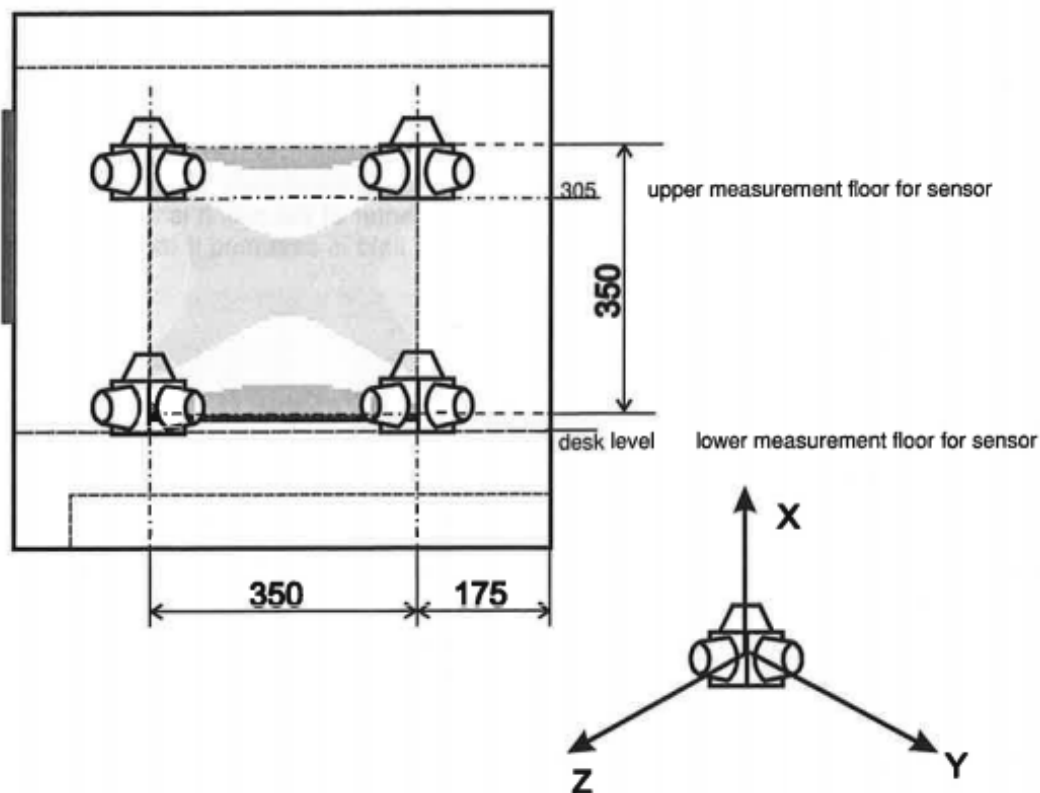
Kentän voimakkuuden kalibrointi vaatii kentänvoimakkuussensorin ja RF-tehomittarin kytkentäyksiköineen, jotka eivät sisälly tässä työssä koottuun testausjärjestelmään. Tämän vuoksi standardin mukaiset kentän voimakkuudet täytyy kalibroida etukäteen muilla menetelmillä ennen varsinaisia testauksia. Tässä työn vaiheessa hyödynnettiin Savonian EMC-laboratorion testauslaitteistoa ja -ohjelmistoa.

Kentän voimakkuudet voidaan kalibroida R & S:n EMC32-ohjelmistolla kentän tasaisuuskalibroinnin yhteydessä, jolla voidaan samalla varmistaa standardin EN 61000-4-3 vaatima kentän tasaisuus ja suorittaa vahvistimen saturaatiotesti. Testin ajamiseksi testausjärjestelmän laitteet täytyy määrittellä

EMC32-ohjelmistoon. Ainoa testissä käytettävä testilaitte on SMT 03 -signaaligeneraattori, joka kytketään GPIB-väylän kautta EMC32-ohjelmiston sisältävään tietokoneeseen. EMC32 sisältää signaaligeneraattorin ajurit ja ottaa ne käyttöön automaattisesti laitteen tunnistuksen yhteydessä.

EMC32-ohjelmistoon lisätään liitteen 3 kuvan 1 mukainen laitteistoprofiili, johon on määritelty immuniteettitestissä käytettävä laitteisto. Profiiliin on lisätty kootun testausjärjestelmän lisäksi AR FI7006 -kentänvoimakkuussensori, jonka avulla varsinainen kalibrointi tapahtuu. Ennen kentän voimakkuuden kalibrointia kokoonpanon kaapelit kalibroidaan ja niiden vaimennus otetaan huomioon kentän voimakkuutta kalibroitaessa. Vahvistinta ei ohjata kalibroinnin aikana, vaan se on kytketty manuaalisesti toimimaan jatkuvasti täydellä teholla. Myöskään SLine TEM -kammion antenneille ei ole määritetty antennivahvistusta. Kalibrointia varten EMC32-ohjelmistoon määritetään liitteen 3 kuvan 2 mukainen skannaustaulukko. Muita kentän voimakkuuksia kuin 10 V/m kalibroitaessa tehdään vastaavat skannaustaulukot muuttamalla ainoastaan testitasoa skannaustaulukosta.

SLine TEM -kammion standardin EN 61000-4-3 mukainen kentän tasaisuus varmistetaan mittaamalla kentän voimakkuus neljästä eri testipisteestä kuvan 11 mukaisesti. Mittauspisteet sijaitsevat TEM-kammion keskiahkaisuikunasta 400 mm:n etäisyydellä vasemmalla ja oikealla seinällä olevista vaimentimista. Pöytätasoinen mittauspisteet on merkitty punaisilla ympyrän muotoisilla tarroilla kammioon.



KUVA 11. Kentän tasaisuuskalibroinnin testipisteet (Rohde & Schwarz 1998b.)

Kentän tasaisuuskalibroinnissa huomioidaan 80 % amplitudimodulaation käyttö varsinaisissa testeissä. Esimerkiksi jos varsinaisissa testeissä käytettävä testitaso on 10 V/m, kentän tasaisuuskalibrointi ajetaan tasolla 18 V/m ($10 \text{ V/m} + 80 \% * 10 \text{ V/m}$).

Standardin EN 61000-4-3 mukainen kentän tasaisuuden ehto täyttyy, jos kentän tuottamiseen tarvittavien signaaligeneraattorin neljän mittapisteen maksimi- ja minimitasojen erotus on korkeintaan 6 dB 97 %:ssa taajuusalueen mittapisteissä. Lopuissa kolmessa prosentissa mittapisteistä erotus saa olla korkeintaan 10 dB. (Rohde & Schwarz 1998.; EN 55022 2006.)

7.3 Kentän voimakkuuden referenssikalibrointi ja VSWR-kalibrointi

Kentän tasaisuuskalibroinnin jälkeen ajetaan referenssikalibrointi, joka määrittää halutun kentän voimakkuuden tuottamiseen vaadittavat signaaligeneraattorin tasot koko taajuusalueella. Referenssikalibrointi suoritetaan samalla kentän voimakkuudella kuin varsinainen testaus eikä siinä käytetä amplitudimodulaatiota.

Referenssikalibrointitiedoilla voidaan myöhemmin tuottaa TEM-kammioon vastaava kenttä ilman kentänvoimakkuussensoria ja tehomittaria ajamalla signaaligeneraattoria referenssikalibrointia vastaavilla signaalitasoilla. EMC32:lla tehdyt referenssikalibrointitiedot voidaan muuttaa ES-K1:n tietokantamuotoon käyttämällä EMC32:n ES-K1 Data Converter -käännöstyökalua.

VSWR-kalibrointi eli järjestelmän epäsovituksen aiheuttama tehon heijastuminen voidaan mitata referenssikalibroinnin yhteydessä. VSWR-kalibroinnissa tehomittarilla mitataan antennin lähtötehon lisäksi antennista takaisin heijastuvan tehon osuus. VSWR-kalibrointia ei kuitenkaan suoritettu tämän työn yhteydessä, koska siihen tarvittava tehomittari ei ollut käytettävissä kalibrointimittausten aikana. VSWR-kalibroinnin suoritus kentän tasaisuuden testaamisen tapaan ei ole välttämätöntä menetelmän käyttöönoton kannalta, sillä ainoastaan varmistetaan standardin mukainen testausympäristön riittävä heijastumattomuus.

7.4 Vahvistimen saturaatiotesti

Standardi EN 61000-4-3 vaatii kentän tasaisuuskalibroinnin lisäksi vahvistimen saturaatiotestin suorittamisen. Vahvistimen saturaatiotesti varmistaa vahvistimen toimivan lineaarisella toiminta-alueella, kun standardin mukainen 80 %:n 1 kHz:n amplitudimodulointi on käytössä varsinaisissa testeissä.

EMC32-ohjelmistolla vahvistimen saturaatiotesti voidaan suorittaa kentän tasaisuuskalibroinnin yhteydessä. Saturaatiotesti aktivoidaan skannaustaulukossa järjestelmän monitorointiasetuksista. EMC32-ohjelmisto mittaa ensin asetetun kentän voimakkuuden tuottamiseen tarvittavat antennin lähtötehot ja signaaligeneraattorin tasot. Tämän jälkeen ohjelmisto tiputtaa signaaligeneraattorin lähtötasoa 5,1 dB ja mittaa antennin lähtötehon uudelleen. Vahvistin täyttää standardin EN61000-4-3 mukaiset saturaatumattomuuden ehdot, jos antennin lähtötehojen erotus näillä kahdella tavalla mitattuna on 3,1 - 5,1 dB koko tarkasteltavalla taajuusalueella.

Tässä työssä jouduttiin käyttämään epästandardia tapaa vahvistimen saturoimattomuuden varmistamiseen, koska testauslaitteistot olivat viallisia testaushetkellä. Ensiksi määritettiin voimakkuudeltaan 10 V/m kentän tuottamiseen käytettävät signaaligeneraattorin tasot. Tähän voitiin käyttää aiemmin suoritettujen referenssikalibrointien mittaustuloksia. Sen jälkeen suoritettiin kentän voimakkuuskalibrointi tasolla 14,3 V/m, joka on 10 V/m lisättynä standardin vaatima vähintään 3,1 dB:n vahvistus saturaatiotestissä.

80 % amplitudimodulaation käyttäminen vaatii vahvistimelta 5,1 dB tehon lisäyksen alkuperäiseen tehotasoon verrattuna. Mikäli näiden kahden mittauksen välinen signaaligeneraattorin lähtötehojen erotus on alle 5,1 dB, vahvistin toimii lineaarisella alueella eli kykenee tuottamaan vähintään standardin vaatiman 10 V/m + 3,1 dB kentän voimakkuuden.

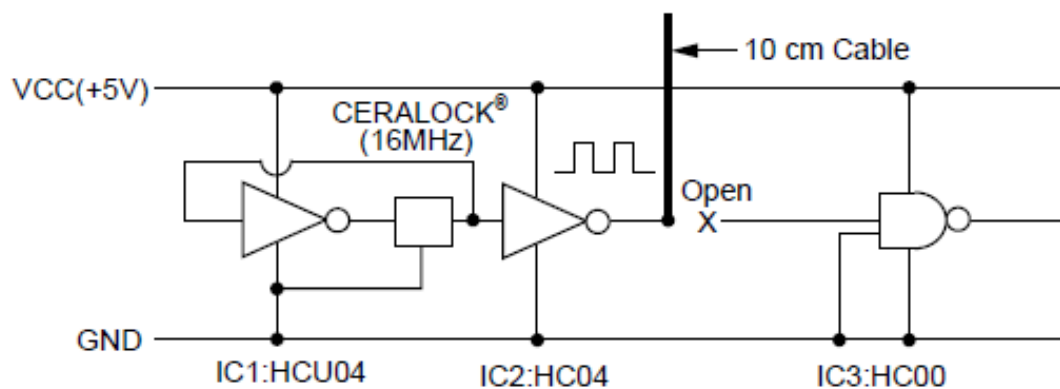
7.5 Emissiomittauksen kalibrointi referenssisäteilijän avulla

SLine TEM -kammion emissiomittaukselle ei ole olemassa standardin mukaisia kalibrointimenetelmiä. Valmistaja on ilmoittanut testikammion kiinteät korjauskertoimet, jotka ovat teoreettisesti johdettu testikammion antennirakenteesta ja kammion fyysisistä mitoista. Mittaustuloksien parantamiseksi emissiomittauksille päädyttiin kehittämään itse kalibrointimenetelmä, jolla mittaustuloksia saataisiin vastaamaan paremmin virallisilla menetelmillä suoritettuja mittauksia. Referenssimittauksina käytetään Savonian EMC-laboratorion radiokaiuttomassa kammiossa suoritettavia standardien mukaisia emissiomittauksia.

Jotta kahden eri mittausmenetelmän tuloksia voidaan verrata keskenään, tarvitaan referenssisäteilylähde. Referenssisäteilijän emissiot pysyvät vakioina mittaustavasta riippumatta, joten emissiomittauksen tuloksien tulisi olla yhteneviä eri menetelmillä mitattuina. Optimaalinen referenssisäteilijä olisi antenni, jolle syötettäisiin vakiovoimakkuista signaalia koko taajuuskaistalla, ja jonka antennivahvistus olisi tiedossa. Tällaista ei kuitenkaan ollut käytössä, koska tähän tarkoitukseen olisi tarvittu pienikokoinen asianmukaisesti kalibroitu lähikenttäantenni.

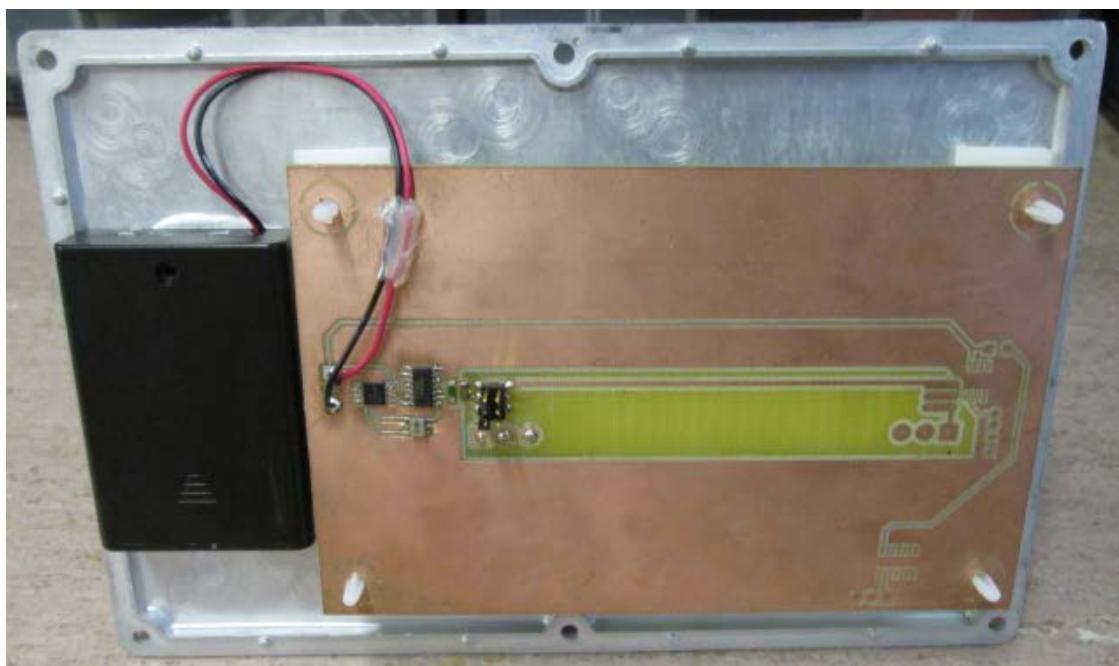
Näin ollen referenssisäteilijänä päädyttiin käyttämään säteilylähdetä, joka säteilee voimakkaita häiriöpiikkejä. Savonian EMC-laboratoriossa on aiemmin toteutettu referenssisäteilylähteitä ja tähän työhön koottiin uusi säteilijä vanhojen piiri- ja lohkokaavioiden pohjalta. Referenssisäteilijä toteutettiin kuvion 3 lohkokaaviota ja liitteessä 4 esitettyä kytkentäkaaviota hyödyntämällä. Referenssisäteilijän alkuperäinen suunnittelija on tuntematon.

Referenssisäteilijä sisältää 16 MHz kiteen, jonka tahdittamana se säteilee antennina toimivan kaapelin kautta emissiopiikkejä. Kuviossa 3 esitetystä lohkokaaviosta poiketen antennin oikean puoleinen avoin osa piiriä jätettiin toteuttamatta, koska näin piirin toteutusta saatiin yksinkertaistettua.



KUVIO 3. Referenssisäteilijän lohkokaavio (SAVONIA 1998.)

Liitteessä 4 esitetyn kytkentäkaavion pohjalta toteutettiin kuvassa 12 esitetty piirilevy piirilevyjyrsimellä, johon on juotettu kaikki tarvittavat komponentit. Referenssisäteilijä koteloitiin piirilevyliittimillä alumiinikoteloon kuvan 13 mukaisesti. Referenssisäteilijän antennina toimii paksu kuparisäikeisen muovilla päällystetty kaapeli. Antennille lisättiin vedonpoisto ja antennin pituudeksi valittiin 10 cm, jolloin antenni on optimoitu 750 MHz:n taajuudelle monopoliantennin kaavan $\lambda/4$ mukaisesti (Ulaby ym. 1999, 358). Lohkokaaviosta poiketen referenssisäteilijän virtalähteenä toimii kolme sarjaan kytkettyä 1,5 V:n AA-paristoa. Tällöin referenssisäteilijää ei tarvitse kytkeä verkkovirtaan, joka aiheuttaisi ylimääräisiä häiriöpäästöjä.



KUVA 12. Referenssisäteilijän piirilevy.



KUVA 13. Referenssisatelliitä alumiinikoteloituna.

Varsinainen kalibrointi suoritetaan mittaamalla referenssisatelliitin emissiot EMC-laboratorion virallisilla mittausmenetelmillä ja tämän opinnäytetyön mittauskokoontamalla. Mittaustuloksille tehdään ensimmäisen asteen polynomisovituksen logaritmisella taajuusasteikolla. SLinen korjauskertoimet saadaan näiden sovituksen erotuksena ja niitä voidaan käyttää lisäämällä luvun 4.1 kaavaan 1 uusi korjauskerroin C_3 .

Liitteessä 5 on esitetty MATLAB-skripti, jolla mittausdatasta voidaan laskea SLinen korjauskertoimet automaattisesti. Skriptiä voi muokata millä tahansa tekstieditorilla ja siihen on määriteltävä tiedostot, jotka sisältävät mittaustulokset kahdella menetelmällä mitattuina. Ennen skriptin käyttämistä EMC32:sta tuotavia mittaustulostiedostoja täytyy muokata. Tiedostoista poistetaan muut kuin taajuus- ja emissiotasot sisältävät sarakkeet. Otsikkorivit on poistettava, desimaalierottimena on käytettävä pistettä ja sarakkeet on erotettava toisistaan sarkaimilla.

Skripti voidaan tämän jälkeen suorittaa MATLABin konsolissa skriptin tiedostonimellä. Skripti luo korjauskertoimet sisältävän tiedoston käyttäjän skriptissä määrittelemällä nimellä. Tiedosto vietään ES-K1:een ja määritellään käytettäväksi skannaustaulukossa systeimin korjauskertoimena (engl. system transducer).

8 TESTAAMINEN JA MITTAAMINEN

Säteileviä emissioita ja immuniteettiä mitataan ja testataan esimerkiksi R & S:n ES-K1- ja EMS-K1 -sovelluksilla tai tässä työssä toteutetuilla LabVIEW-pohjaisilla sovelluksilla. Säteilävän emissioon ja immuniteetin mittaus- ja testausmenetelmät ovat standardien EN 55022 ja EN 61000-4-3 mukaisia, eivätkä ole riippuvaisia käytettävästä testaussovelluksesta.

Testausten ja mittauksien suorittamiseksi ne täytyy määrittellä ES-K1 ja EMS-K1 -sovelluksiin. Liitteissä 6 ja 7 on esitetty säteilävän emissiomittauksen määrittely ES-K1:een ja säteilävän immuniteettitestin määrittely EMS-K1:een.

Säteileviä emissioita mitataan ESCS 30 -testivastaanottimella ja testattava laite asetetaan SLine TEM -kammioon. Emissiomittaus koostuu kahdesta osasta: esi- ja finaalityestistä. Esityestissä testattavan laitteen emissiot mitataan piikki-ilmaisimella (engl. Peak Detector) koko määritellyllä taajuusvälillä. Esityestin skannaus suoritetaan kolmeen kertaan kääntämällä testattavaa laitetta skannausten välissä eri polarisaatiotasojen mittaamiseksi.

Esityestin perusteella testaussovellukset valitsevat mittaustuloksista automaattisesti kriittiset pisteet finaalityestiin. Finaalityestissä kriittiset pisteet mitataan kvasipiikki-ilmaisimella (engl. Quasi Peak Detector) kolmesta eri polarisaatiotasosta esityestin tapaan. Finaalityestissä mitattuja emissioita verrataan standardin asettamiin rajoihin, jos emissiot jäävät niiden alle, testattava laite on läpäissyt emissiomittauksen hyväksytysti.

Vaihtoehtoisesti emissiomittaukset voidaan suorittaa vain yhdellä polarisaatiotasolla. Näin saadaan nopeasti suuntaa-antavia mittaustuloksia, joilla voidaan kartoittaa testattavan laitteen ongelmakohtia. Tämä yksinkertaistettu menetelmä soveltuu erityisesti tuotekehitysvaiheen mittauksiin.

Säteilevää immuniteettiä testataan SMT 03 -signaaligeneraattorilla ja AR100W1000M1- tehovahvistimella. Testattava laite asetetaan SLine TEM -kammioon, jonne luodaan halutun suuruinen häiriökenttä. Testattavan laitteen häiriönsietoa testataan standardin määrittelemien parametrein koko valitulla taajuusvälillä. Mikäli laite ei häiriinny testin aikana, on testattava laite läpäissyt immuniteettitestin hyväksytysti.

Tämän työn menetelmillä saadut emissiomittauksen ja immuniteettitestin tulokset eivät välttämättä vastaa täysin virallisia standardien mukaisilla testausmenetelmillä saatuja tuloksia. Tässä työssä esitellyillä menetelmillä voidaan kuitenkin simuloida virallisia testausmenetelmiä ja tulokset ovat standardeja mukaillen suuntaa-antavia.

Liitteissä 8 ja 9 on esitetty testausohjeet ES-K1 ja EMS-K1 -sovelluksilla. Lisäksi liitteissä 10 ja 11 on esitetty, kuinka vastaavat testit suoritetaan tässä työssä toteutetuilla LabVIEW-pohjaisilla sovelluksil-

la. Testausohjeista on tehty myös yksityiskohtaisemmat ohjeet tästä työstä erillisinä dokumentteina, mitkä toimivat testausohjeina vähemmän EMC-testauskokemusta omaaville käyttäjille.

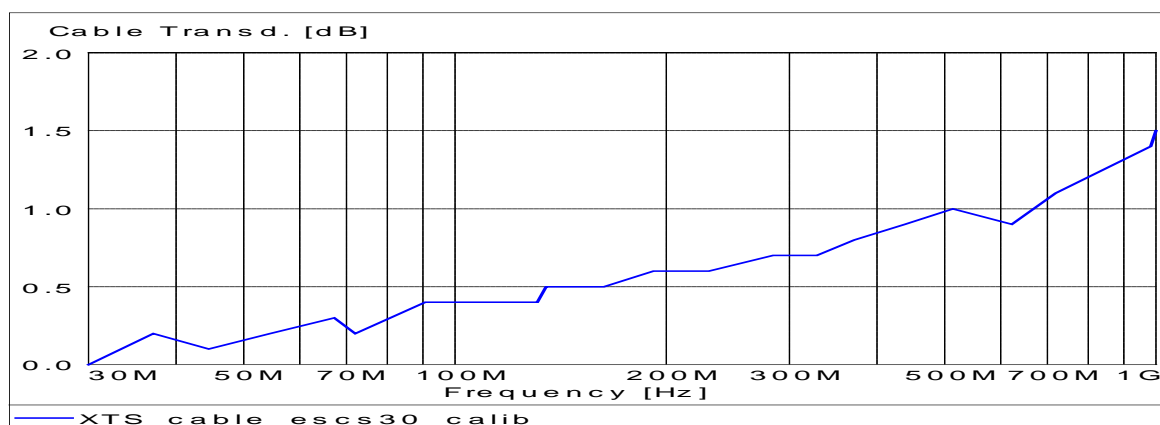
9 KALIBROINTI, TESTAUS- JA MITTAUSTULOKSET

Testausjärjestelmän toiminnan varmistamiseksi sillä suoritettiin kalibrointi- ja verifiointimittauksia. Testausjärjestelmän kaapelit kalibroitiin ja niiden vaimennukset otettiin huomioon kaikissa testauksissa. Immunitytestausta varten suoritettiin kentän tasaisuuskalibrointi ja vahvistimen saturaatio-testi kentän voimakkuudella 10 V/m.

Emissionmittauksia varten testausjärjestelmän korjauskertoimet määritettiin referenssisäteilijän avulla ja menetelmää verifioitiin Espotel Oy:n JHumar2-alustaa hyödyntämällä. Tämän työn testausmenetelmillä saatuja mittaustuloksia verrattiin Savonian EMC-laboratorion virallisilla testausmenetelmillä saatuihin tuloksiin.

9.1 Kaapelikalibroinnit

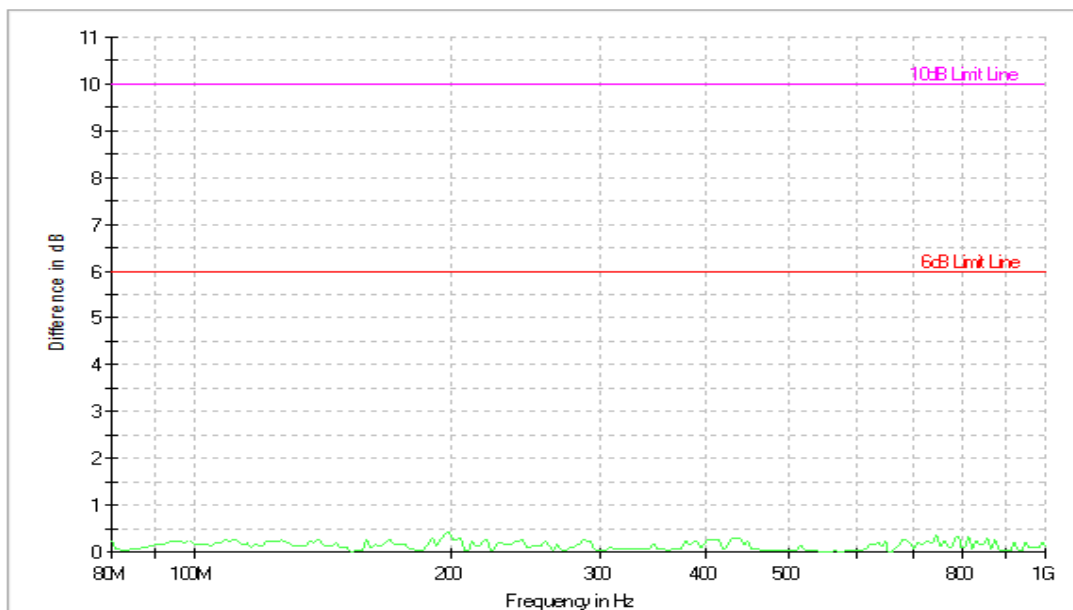
Kuviossa 4 on esitetty luvussa 7.1 kuvatulla tavalla suoritettu kaapelin CBL2145 kalibrointitulokset.



KUVIO 4. Esimerkki kaapelin vaimennuksesta.

9.2 10 V/m kentän tasaisuuskalibrointi

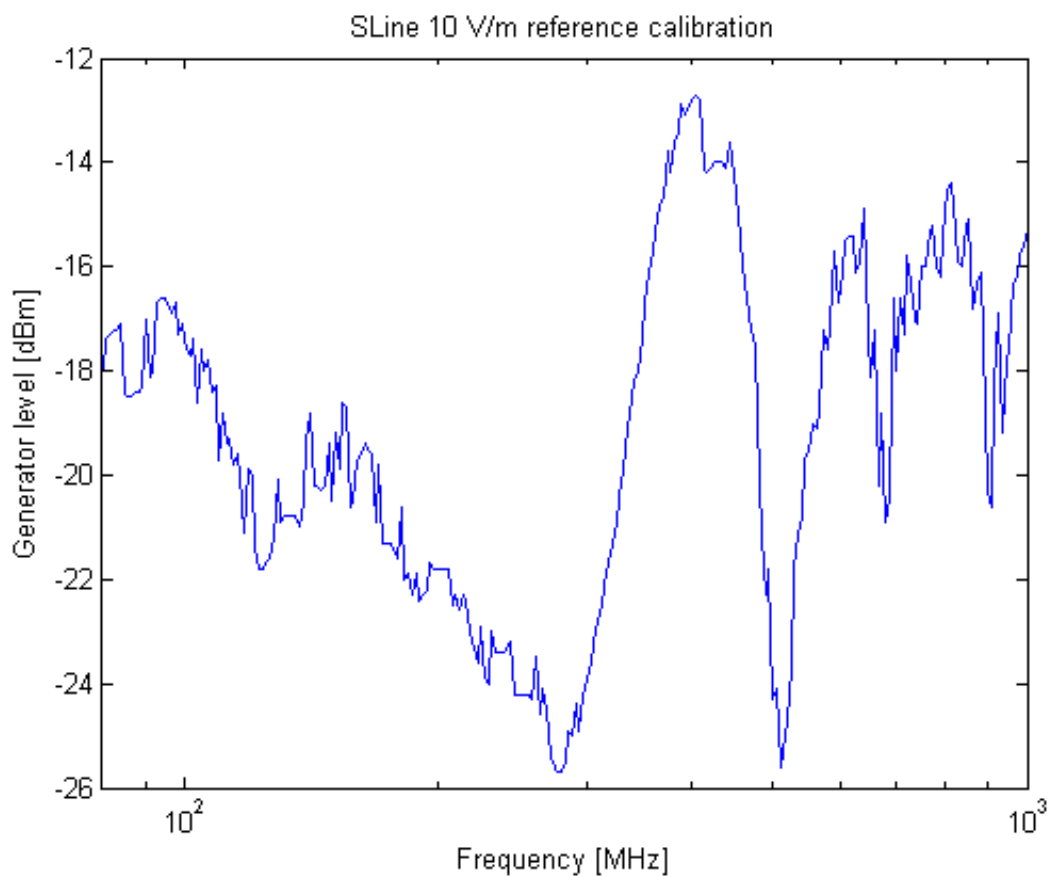
Kuviossa 5 on esitetty 10 V/m kentän tasaisuuskalibroinnin tulos SLine TEM -kammiossa. Koska tehoerot ovat koko taajuusvälillä selvästi alle 6 dB raja-arvon, standardin mukainen kentän tasaisuusvaatimus täyttyy. Testi olisi kuitenkin tullut ajaa kentän voimakkuudella 18 V/m testin 80 %:n amplitudimodulointi huomioiden, joten kalibrointi ei takaa standardin mukaista kentän voimakkuutta testitasolla 10 V/m. Mittausta ei voitu uusia työn aikataulun puitteissa, koska kalibrointiin käytettävän EMC32-testausohjelmiston demo-lisenssiäika umpeutui työn aikana.



KUVIO 5. Kentän tasaisuuskalibroinnin tulos kentän voimakkuudella 10 V/m.

9.3 10 V/m referenssikalibrointi

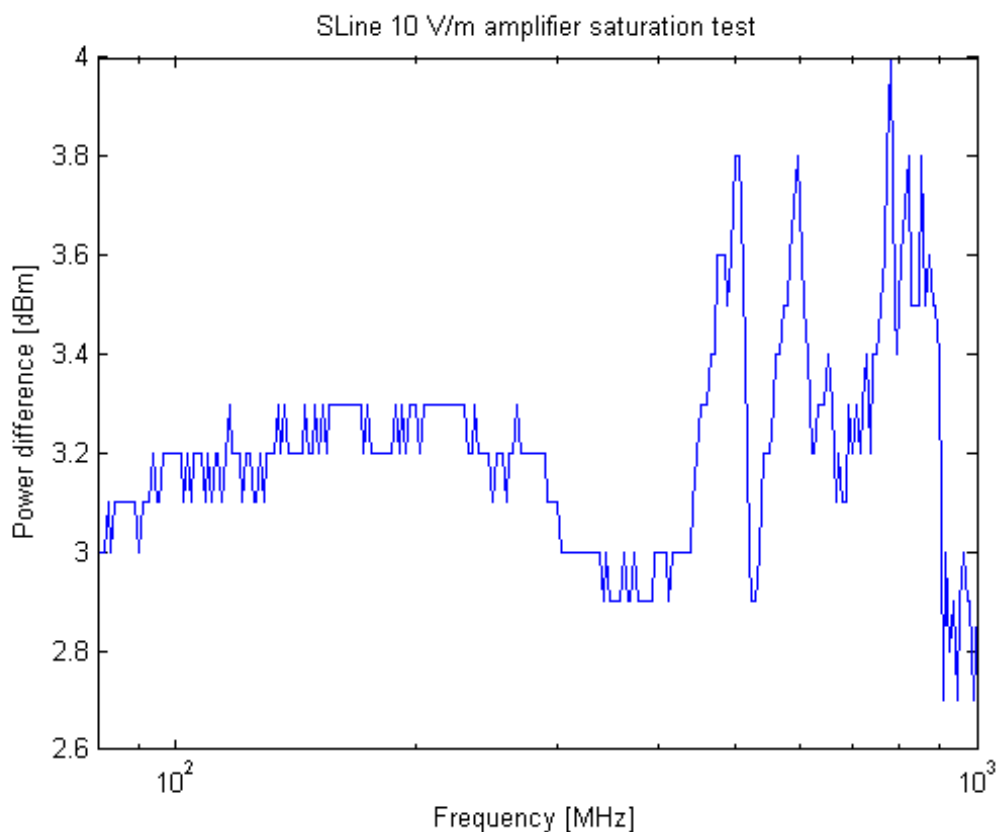
Kentän tasaisuuskalibroinnin yhteydessä suoritettiin 10 V/m referenssikalibrointi, jonka tulos on esitetty kuviossa 6.



KUVIO 6. Slinen 10 V/m referenssikalibrointi.

9.4 Vahvistimen saturaatiotesti

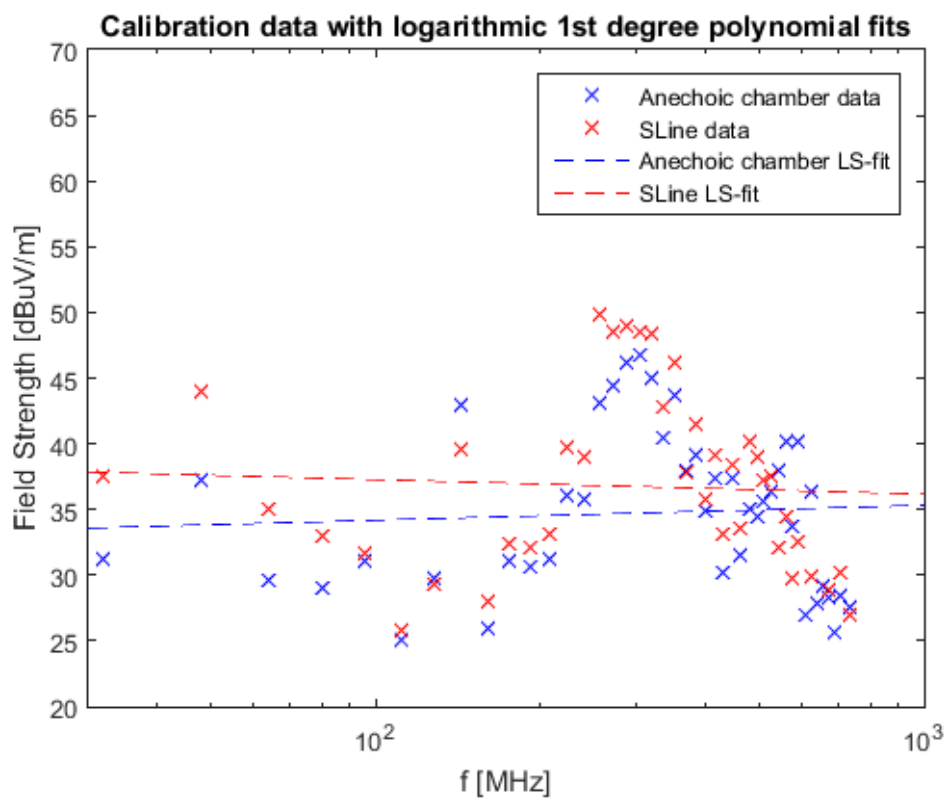
Kuviossa 7 on esitetty epästandardin vahvistimen saturaatiotestin tulos. Epästandardin mittauksen perusteella ei voida määrittää vahvistimen absoluuttista saturaation arvoa desibeleinä mitattuna, mutta sillä voidaan varmistaa vahvistimen riittävä saturaationattomuus, koska 14,3 V/m kentän tuottamiseen tarvittava teho on alle 5,1 dB koko taajuusvälillä. Saturaatiotestissä alle 3,0 dB tehon liisäykset ovat teoreettisesti mahdottomia, mutta kyseiset mittaustulokset selittyvät mittaustulosten satunnaisvaihtelulla ja mittalaitteiden mittavirheillä.



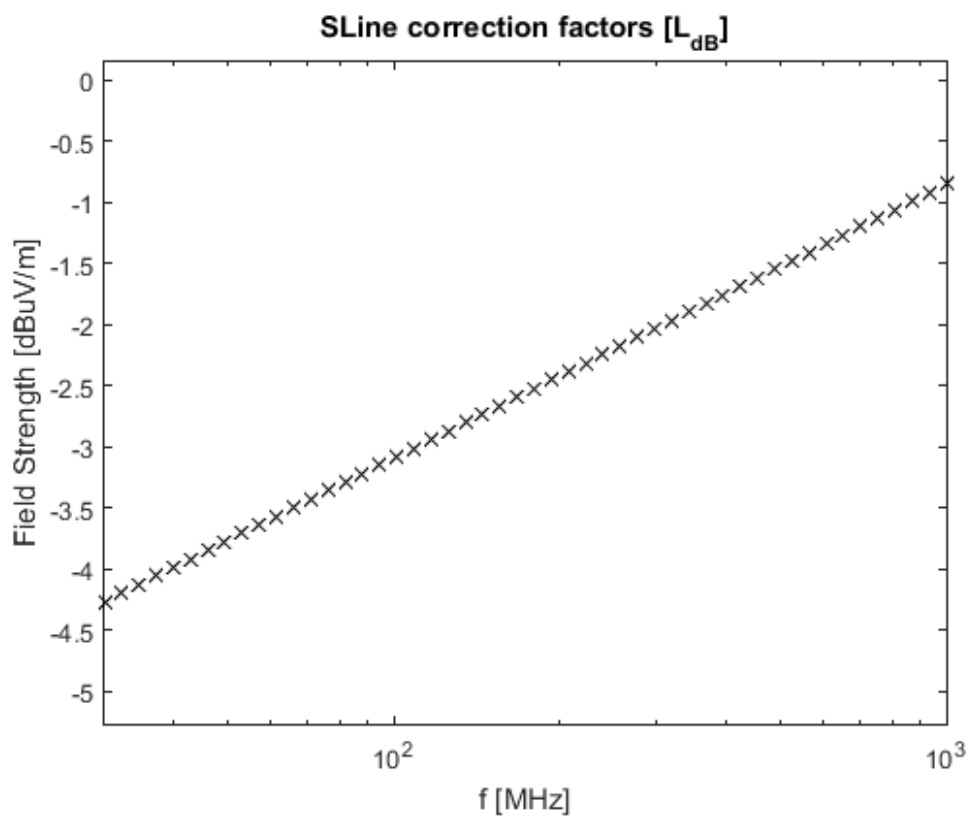
KUVIO 7. Epästandardin vahvistimen saturaatiotestin tulos kentän voimakkuudella 10 V/m.

9.5 SLinien emissiomittauksen korjauskertoimien määrittäminen

Luvussa 7.5 esitellylle referenssisäteilijälle tehtiin standardien mukainen säteilevän emission mittaus EMC-laboratoriossa (Liite 12: Kuva 1.), minkä mittaustulos on esitetty liitteen 12 kuviossa 1. Mittaus toistettiin opinnäytetyön menetelmin (Liite 12: Kuva 2.) ja saatiin liitteen 12 kuviossa 2 esitetty mittaustulos. Näiden kahden mittauksen pohjalta laskettiin SLinelle korjauskertoimet luvun 7.5 mukaisesti hyödyntäen liitteessä 5 esitettyä MATLAB-skriptiä. Kuviossa 8 on esitetty mittaustulokset, joista on laskettu kuviossa 9 esitetyt SLinien korjauskertoimet.



KUVIO 8. Referenssisäteilijän vertailumittauksen tulokset.



KUVIO 9. Referenssisäteilijän avulla määritellyt SLinein korjauskertoimet.

9.6 Emissiomittausten verifiointi

Jhumar2:lle suoritettiin täysi emissiomittaus EMC-laboratoriossa opinnäytetyön menetelmin mittaus- tulosten verifiointiseksi (Kuvat 14. ja 15.). Täydellä testillä pyrittiin arvioimaan opinnäytetyön mene- telmän tarkkuutta. Kuvioissa 10 ja 11 on esitetty mittausten tulokset. Emissiot vastaavat toisiaan pääpiirteissään molemmilla menetelmillä mitattuina ja mittaustuloksista on löydettävissä samoja yk- sityiskohtia. Emissiot ovat systemaattisesti hieman pienempiä SLinellä mitattuna.

Testin tekeminen on SLinellä huomattavasti nopeampaa: täyteen testiin kuluu aikaa noin tunti ver- rattuna EMC-laboratoriossa tehtävään noin neljä tuntia kestäväan mittaukseen. Opinnäytetyön me- netelmä on lisäksi kustannustehokas vaihtoehto oikein hinnoiteltuna, millä saadaan vertailukelpoisia tuloksia virallisiin menetelmiin verrattuna. Menetelmä soveltuu nopeaan testattavan laitteen ongel- makohtien ja niiden vakavuuden kartoittamiseen. Kartoituksen jälkeen EMC-laboratorion asiakkaat voivat tehdä halutessaan tarkempia mittauksia EMC-laboratoriossa.

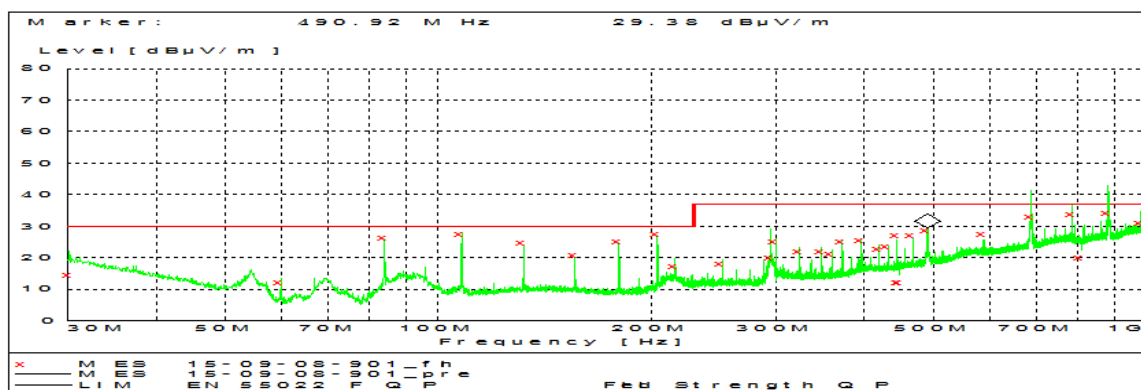


KUVA 14. Jhumar2:n emissiomittaukset Savonian EMC-laboratoriossa.



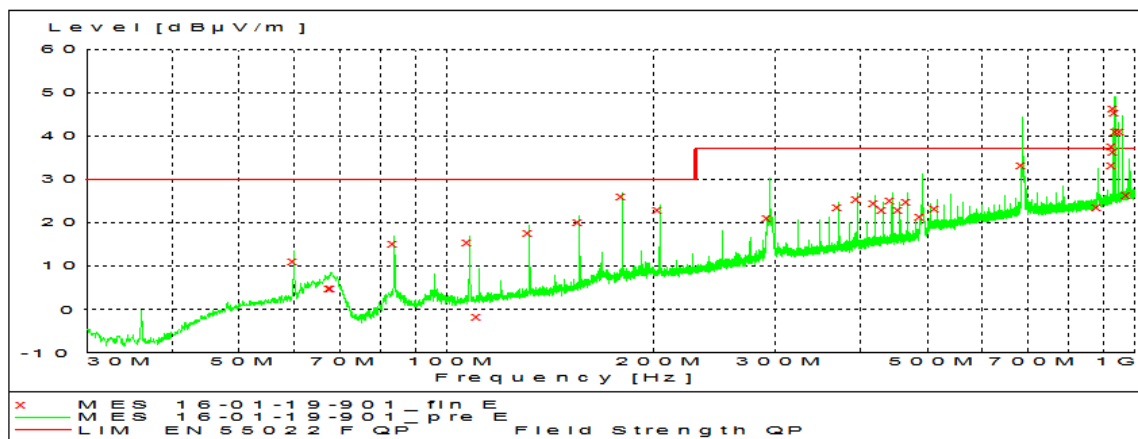
KUVA 15. Jhumar2:n emissiomittaukset SLinessä.

Customer:	Espotel Oy/Savonia-AMK
EUT:	Jhumar2
Date of testing:	8.9.2015
Test ID:	15-09-08-901
Test method / Antenna polarization / Antenna height / Turn table position	CISPR 22 (30 – 1000 MHz) Radiated Emissions CLASS B Pre: VER - HOR / 1,0 m ja 3,0 m / 0 – 315 deg, 45 deg step Fin: VER - HOR / 1,0 m - 4,0 m / 0 – 360 deg
Measurement equipment:	Test receiver: ESU 40, Measurement antenna: CBL 6141
Ambient condition (Temp / RH):	? C / ? % RH
EUT configuration:	EUT:ssa pyöri EMC –testisofita, joka piirtää näytölle raitakuviota. EUT:lla verkkovirta heikon akkukeston vuoksi.
Operator:	Mika Lovén



KUVIO 10. Täyden emissiomittauksen tulos Jhumar2:lla Savonian EMC-laboratoriossa.

EUT:	Jhumar2
Date of testing:	19.1.2016
Test ID:	16-01-19-901
Test method	S-Line 700 (30 - 1000 MHz) Radiated Emissions
Measurement equipment:	Test receiver: ESCS 40, Measurement antenna: S-Line Built-In
EUT configuration:	Käytössä EMC-testisofta, joka piirtää näytölle viivakuvio. EUT:lla verkkovirta.
Notes:	Käytössä SLine:n kalibrointikorjaukset (SLine_Calib_151223). Tulossta verrataan aikaisempaan mittaukseen, joissa niitä ei ollut käytössä. 900-1000 MHz taajuuksilla SLine-kammio vuotaa ja emissiopiikit ovat kännykkätukiasemien (?), EI EUT:n emissioita.
Operator:	Mika Lovén



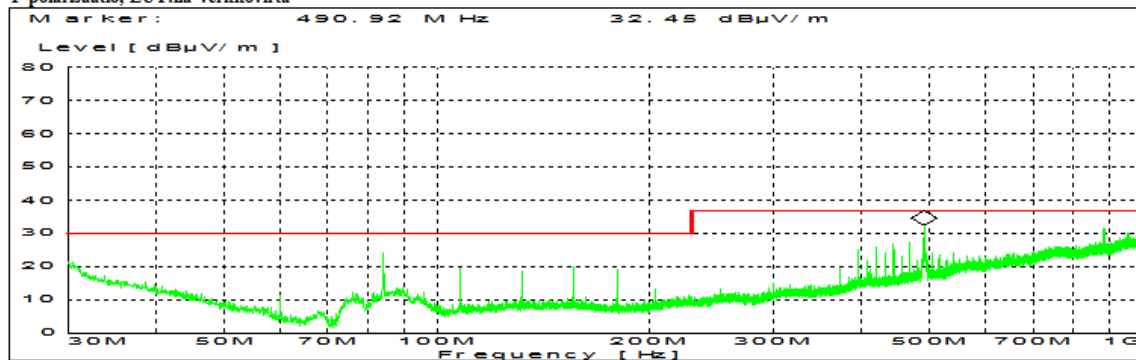
KUVIO 11. Täyden emissiomittauksen tulos Jhumar2:lla SLinessä.

Jhumar2:ta mitattiin akun ja verkkovirran varassa erikseen molemmilla menetelmillä. Tarkoituksena oli tarkastella kuinka testattavan laitteen muokkaaminen vaikuttaa mittaustuloksiin. EMC-laboratorion mittaukset suoritettiin yhdellä polarisaatiotasolla ajamalla pelkkä skannausmittaus tyyppillisen tuotekehitysmittauksen tapaan.

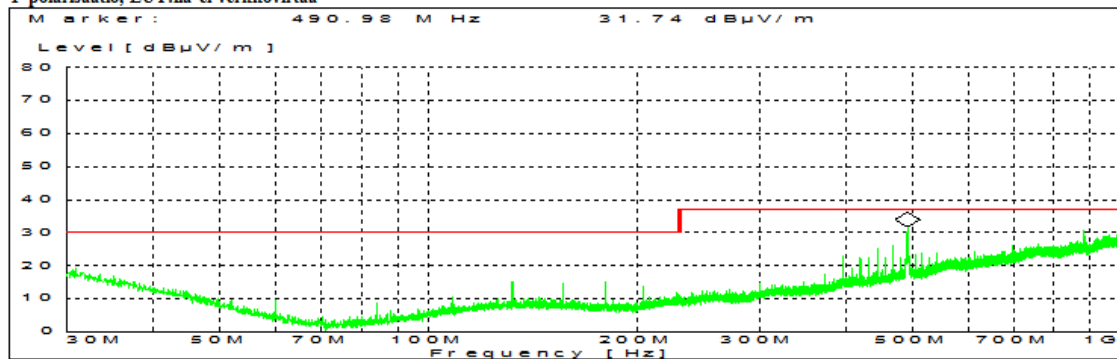
Kuvioissa 12 ja 13 on esitetty mittaustulokset, joista verkkovirran vaikutus on nähtävissä. Verkkovirran vaikutus on selvemmin nähtävissä EMC-laboratoriossa tehdyistä tuloksista. Molemmilla menetelmillä mitattuina emissiopiikkien voimakkuus kasvaa taajuuksilla 90 - 200 MHz. Lisäksi EMC-laboratorion tuloksista on nähtävissä käyrän muodon muuttuminen taajuuksilla 70 - 100 MHz, mitä ei näy SLinellä mitattuina. Taajuuksilla 400 - 500 MHz kummallakaan menetelmällä mitattuna emissiot eivät vahvistu merkittävästi.

Tässä tapauksessa verkkovirran vaikutus aiheuttaa hyvin vähäisen emissioiden muuttumisen. Tässä vaiheessa SLinelle ei vielä ollut määritelty kalibrointikorjaukset, minkä takia mittaustulokset olivat yläkanttiin koko taajuusvälillä. Tämä vahvistaa myöhemmin suoritettujen kalibrointimittausten oikeellisuutta. Liitteen 12 kuviossa 3 on esitetty referenssisäteilijän emissiot kalibrointikorjauksen jälkeen, jotka vastaavat aikaisempaa paremmin virallisilla menetelmillä saatuja tuloksia.

Y-polarisaatio, EUT:lla verkkovirta

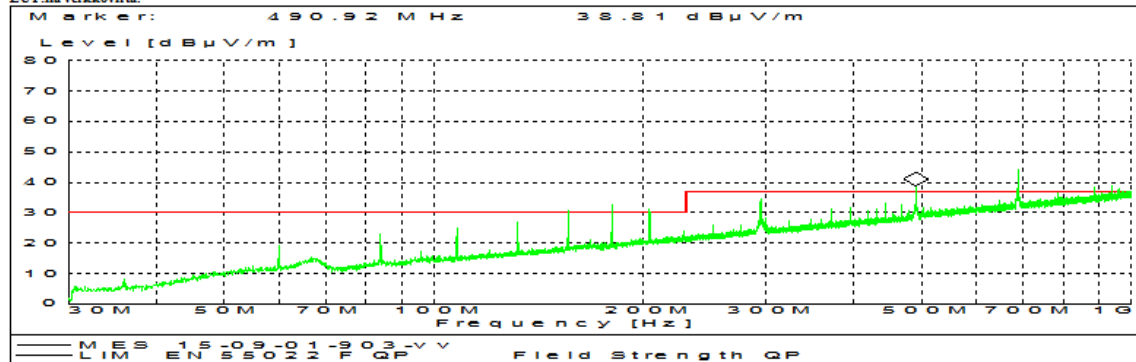


Y-polarisaatio, EUT:lla ei verkkovirtaa

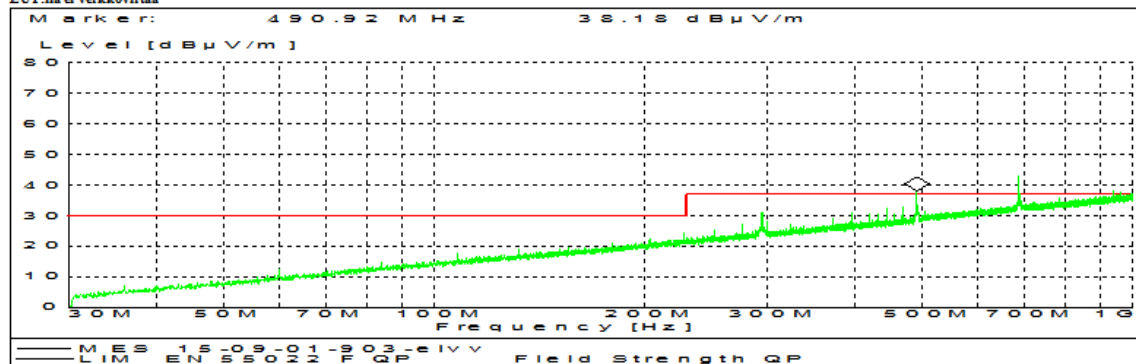


KUVIO 12. Jhumar2:n emissiot EMC-laboratoriossa mitattuna verkkovirralla ja ilman virtaa.

EUT:lla verkkovirta.



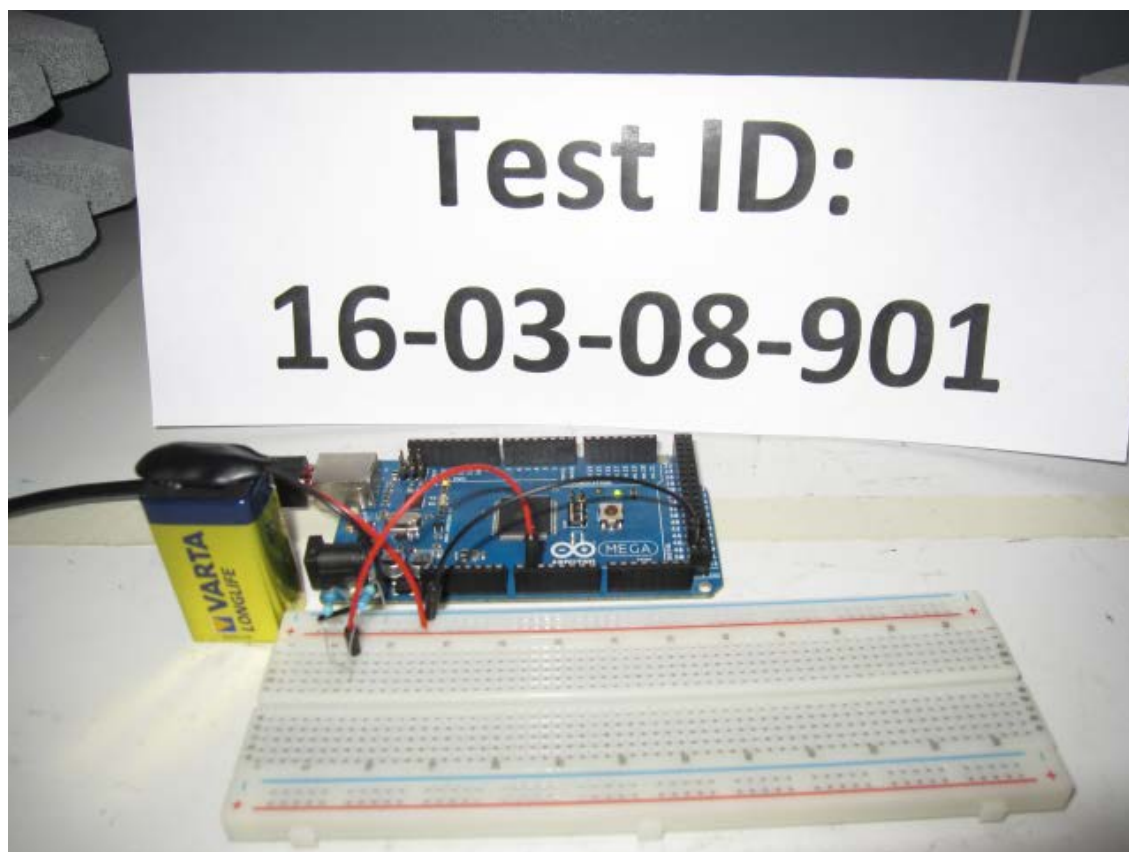
EUT:lla ei verkkovirtaa



KUVIO 13. Jhumar2:n emissiot SLinessa mitattuna verkkovirralla ja ilman virtaa.

9.7 Immuniteettitesti Arduino ATMEGA 2560:lle

Arduino ATMEGA 2560 -mikrokontrollerille tehtiin immuniteettitesti kuvan 16 mukaisesti. Arduinolle laadittiin liitteessä 13 esitetty ohjelma, joka mittaa pariston napajännitettä sekunnin välein. Testatavan laitteen mittauskytkentä jätettiin tarkoituksella suojaamattomaksi, jotta säteilevä häiriösignaali kytkettyisi sen mittausjohtimiin. Arduinon toimintatilaa tarkkailtiin testin aikana sarjaväylän tulosteiden kautta.



KUVA 16. Immuniteettitesti Arduino ATMEGA 2560:lle.

Arduino ei häiriintynyt testeissä kentän voimakkuudella 10 V/m, mutta käytettäessä kentän voimakkuutena 15 V/m Arduinon mittaustuloksissa alkoi ilmetä voimakasta heittoa häiriösignaalin taajuudella 220 MHz. Käytettäessä vielä suurempaa kentän voimakkuutta 20 V/m Arduino kaatui heti testin alkaessa häiriösignaalin taajuudella 80 MHz. Testitulosta ei ehditty verifioimaan virallisilla testausmenetelmillä työn aikataulun puitteissa Savonian EMC-laboratorion kiireellisen testausaikataulun vuoksi.

10 YHTEENVETO JA POHDINTA

Työn aiheena oli EMC-testausjärjestelmän käyttöönotto säteilevän emission ja immunitetin EMC-testaamiseen. Testausjärjestelmä toteutettiin Savonia-ammattikorkeakoulun EMC-laboratorion muusta testauskäytöstä poistetulta mittauslaitteistolla. Työn tavoitteena oli testauslaitteiden ja EMC-testiohjelmien käyttöönotto sekä testaus- ja kalibroitimenetelmien selvittäminen ja suorittaminen. Lisäksi tavoitteena oli suorittaa verifiointimittauksia testausmenetelmien toimivuuden varmistamiseksi. Työn aikataulun salliessa oli myös tarkoitus toteuttaa omat LabVIEW-pohjaiset sovellukset säteilevän emission ja immunitetin mittaamiseen ja testaamiseen.

Työssä saatiin käyttöönotettua testausjärjestelmä säteilevän emission ja immunitetin mittaamiseen ja testaamiseen. Mittalaitteiden lisäksi otettiin käyttöön kaupalliset R & S:n ES-K1 ja EMS-K1 testausohjelmistot. Testausohjelmista toteutettiin lisäksi omat LabVIEW-pohjaiset sovellukset, jotka todettiin selkeiksi ja toimiviksi.

Testien kalibroitimenetelmät saatiin selvitettyä, mutta kaikkia kalibrointeja ei saatu suoritettua onnistuneesti, koska niihin käytettävän EMC32-testausohjelman demo-lisenssiaika loppui työn aikana. Kalibroinnit voidaan kuitenkin suorittaa myös jälkeinpäin tässä työssä esitetyillä menetelmillä, kun ohjelman lisenssi saadaan uusittua.

Emissiomittaukseen kehitettiin referenssisäteilijää hyödyntämällä uusi kalibroitimenetelmä, jolla mittaustulokset saadaan paremmin vastaamaan virallisilla menetelmillä suoritettuja mittauksia. Referenssisäteilijän lisäksi säteilevän emissiomittauksen toimivuutta verifioitiin Espotel Oy:n Jhumar2 -alustaa testaamalla. Menetelmän todettiin antavan kohtuullisen hyviä ja luotettavia mittaustuloksia sekä soveltuvan erityisesti tuotekehitysvaiheessa olevien laitteiden EMC-testaamiseen.

Säteilevää immunitettitestiä ei ehditty verifioimaan riittävästi työn aikataulun puitteissa. Testausmenetelmä on tehtyjen kalibroitimittausten mukaan toimiva, koska kammiossa saadaan tuotettua määritellyn suuruinen häiriökenttä. Häirion kytkeytymisestä testattavaan laitteeseen virallisten testausmenetelmien tavoin ei kuitenkaan ole verifioitua tietoa.

Työn aiheen laajuus asetti haasteita työn aikana. Erityisesti verifiointimittauksille ei jäänyt riittävästi aikaa työn loppuvaiheilla. Työn tavoitteet kuitenkin täyttyivät pääpiirteissään ja testausmenetelmät saatiin otettua käyttöön suunnitellun mukaisesti. Tehtyä työtä voitaisiin edelleen jatkaa ja syventää kaikilla osa-alueilla.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- AMPLIFIER RESEARCH 1997?a. Operating and Service Manual 100W1000M1. Souderton, PA
- AMPLIFIER RESEARCH 1997?b. Operating and Service Manual FL 7006 Kit. Souderton, PA
- BISHOP, R. 2010. LabVIEW 2009 Student Edition. Austin: Prentice Hall, Pearson.
- CISPR 22 Edition 6.0 2008. Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC).
- EN 55022:2006(E) 2006. Information technology equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement. Brussels: CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization.
- EN 61000-4-3:2006 2006. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test (IEC 61000-4-3:2006). Brussels: CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization.
- GURU, B. ja HIZIROGLU, H. 2004. Electromagnetic Field Theory Fundamentals Second edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- IEC 61000-4-3:2006 2006. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC).
- ROHDE & SCHWARZ 1996. R & S SMT Signal Generator Operating Manual. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1997. Operating manual EMI TEST RECEIVER 9 kHz to 2750 MHz ESCS 30. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1998?a. EMS-K1 Manual. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1998b. Manual EMC Test Cell S-LINE 700. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1998?c. Manual EMI Test Software for R & S EMI Receivers and Accessory ES-K1 Version 1.71. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1998d. S-LINE Calibration Documents. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1998?e. Shielded TEM Cell S-LINE. The compact alternative to open-area test site and anechoic chambers. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 1998f. Technical Information S-LINE. Munchen: Rohde & Schwarz.
- ROHDE & SCHWARZ 2012. R & S EMC32 V9.0 EMC Measurement Software Getting Started Tutorial. Munchen: rohde & Schwarz.
- RÄISÄNEN, A. ja LEHTO, A. 1995. Radiotekniikka. Helsinki: Otatiето.
- SAVONIA (Savonia-ammattikorkeakoulu EMC-laboratorio) 1998. Radiated Noise from Cable. [verkkoaineisto] Alkuperäistekijä tuntematon.
- TUKES (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto), 2016. Kuluttajaturvallisuus: CE-merkintä [verkkajulkaisu]. [viitattu 27.9.2016] Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/Sahkolaitteet1/>
- ULABY, F., MICHIELSEN E. ja RAVAIOLI U. 1999. Fundamentals of Applied Electromagnetics (6th Edition). Michigan: Prentice-Hall.
- WILLIAMS, T. ja ARMSTRONG, K. 2000. EMC For System and Installations. Oxford: Newnes.
- YOUNG, H. ja FREEDMAN, R. 2004. University Physics 11th Edition. San Francisco: Pearson Education, Addison Wesley.

LIITE 1: SIGNAALIGENERAATTORIN JA TESTIVASTAANOTTIMEN VÄYLÄKOMENTOJA

TAULUKKO 1. SMT 03 -signaaligeneraattorin väyläkomentoja.

Komento	Toiminto	Esimerkkejä
*RST	Nollaa instrumentin	*RST
*CLS	Nollaa statusrekisterin	*RST; *CLS
*IDN?	Kysyy instrumentin tunnisteen	*IDN? Vastaus: Rohde&Schwarz,SMT03,825784/003,3.62
FREQ	Asettaa signaalin taajuuden	FREQ 5 kHz FREQ 100 MHz FREQ 1.5 GHz
POW	Asettaa signaalin voimakkuuden	POW -140 dBm POW -25.5 dBm POW 16 dBm
AM:SOUR	Asettaa amplitudimodulaation lähteen	AM:SOUR:INT 1 AM:SOUR INT2 AM:SOUR EXT
AM:INT1 2	Asettaa amplitudimodulaation taajuuden	AM:INT1:FREQ 3kHz AM:INT2:FREQ 1kHz
AM:DEPT	Asettaa amplitudimodulaation syvyyden	AM:DEPT 70 AM 80 PCT
AM:STAT	Kytkee amplitudimodulaation päälle tai pois	AM:STAT ON AM:STAT OFF
OUTPUT:STATE	Kytkee RF-ulostulon päälle tai pois	OUTPUT:STATE ON OUTPUT:STATE OFF

TAULUKKO 2. ESCS 30 -testivastaanottimen väyläkomentoja.

Komento	Parametrit	Esimerkki
*RST; *CLS	Nollaa statusrekisterin ja instrumentin	*RST; *CLS
*OPC	Ilmoittaa statusrekisterissä, kun kaikki edeltävät komennot on suoritettu.	*RST; *CLS; *OPC
*IDN?	Kysyy instrumentin tunnisteen	*IDN? Vastaus: ROHDE&SCHWARZ,ESCS,0,2.30 02.01 02.36
GRID	Asettaa testilaitteen LCD-näytön kuvaajan asteikon	GRID:FREQAXIS LOG GRID:MINLEVEL 0 dB GRID:MAXLEVEL 80 dB
SCAN:RANGES	Asettaa skannausten lukumäärän	SCAN:RANGES 1 SCAN:RANGES 5
SCAN:FREQUENCY	Asettaa skannauksen taajuusparametrit	SCAN:FREQUENCY:STEPMODE LIN SCAN:FREQUENCY:STEPMODE LOG SCAN:FREQUENCY:START 30 M SCAN:FREQUENCY:STOP 1000 G SCAN:FREQUENCY:STEPSIZE 60 KHZ
SCAN	Valitsee käytettävän skannauksen	SCAN 1 SCAN 5
SCAN:SAVE	Tarkistaa skannauksen taajuusparametrien oikeellisuuden ja tallentaa ne	SCAN:SAVE;*OPC
SCAN:RECEIVER	Asettaa vastaanottimen parametrit	SCAN:RECEIVER:DETECTOR PEAK DETECTOR QUASIPEAK BANDWIDTH:IF 120 K SCAN:RECEIVER:MEASUREMENT:TIME 10 Ms MEASUREMENT:TIME 1 S PREAMP ON ATTENUATION:AUTO ON ATTENUATION:MODE LOWNOISE SCAN:RECEIVER:RANGE 60 DB DEMODULATION OFF
SCAN:BLOCK	Asettaa instrumentilta tulevien mitausdatalohkojen parametrit	SCAN:BLOCK:FORMAT ASCII SCAN:BLOCK:ELEMENT COMBINED SCAN:BLOCK:COUNT 10

SCAN:BLOCK?	Hakee mittausdatalohkon instrumentin puskurista	SCAN:BLOCK? Vastaus: SCAN:BLOCK 0010,35,40000000,16.54,32,40062500,14.10,32,40125000,14.44,32,40187500,15.20,32,40250000,16.10,32,40312500,14.54,32,40375000,13.74,32,40437500,13.32,32,40500000,14.02,32,40562500,15.14,32
SCAN:RESULTS:CLEAR	Tyhjentää mittausarvot muistista	SCAN:RESULTS:CLEAR
SCAN:RUN	Käynnistää skannauksen	SCAN:RUN;*OPC
SCAN:STOP	Keskeyttää skannauksen	SCAN:STOP
*ESE (Event Status Enable)	Asettaa maskin kontrollerin tarkkaillemalle tapahtumastatusrekisterille (ESR, Event Status Register)	*ESE 1
*SRE (Service Request Enable)	Asettaa maskin palvelutapahtumalle (SRQ Service Request)	*SRE 33
ERDE	Asettaa tapahtumarekisterin d-osan rekisterin bitit	ERDE 65535
ERDE?	Hakee tapahtumarekisterin d-osan arvon	ERDE? Vastaus: ERD 128
FREQUENCY	Asettaa yksittäisen mittapisteen taajuuden	FREQUENCY 1000000 HZ
*TRG	Käynnistää yksittäisen mittapisteen mittauksen	*TRG
*WAI	Odottaa mittauksen valmistumisen	*TRG; *WAI
LEVEL:LASTVALUE?	Hakee viimeisimmän mittauksen arvon	LEVEL:LASTVALUE? Vastaus: LEVEL:LASTVALUE 13.82

LIITE 2: ES-K1:N KAAPELIKALIBROINNIN SKANNAUSTAULUKKO

Scan Editor - CAL.mika

File

Unit	Detector	Mode	Subranges
dB μ V	Curve 1 Average	ClearWrite	10.0 kHz 100.0 kHz 200 Hz ESCS 30
	Curve 2 NONE	ClearWrite	100.0 kHz 2.0 MHz 9 kHz ESCS 30
	Curve 3 NONE	ClearWrite	2.0 MHz 30.0 MHz 9 kHz ESCS 30
	Curve 4 NONE	ClearWrite	30.0 MHz 1.0 GHz 120 kHz ESCS 30
			1.0 GHz 2.7 GHz 120 kHz ESCS 30
			<End of table>

Subrange

Receiver: ESCS 30 Transducer: NONE Start Frequency: 30.000000 MHz

Signal Path: NONE System Transd.: Stop Frequency: 1000.000000 MHz

Scan Mode: Lin Add. Transd. 1: NONE Step Size: 60.000 kHz

Add. Transd. 2: NONE IF Bandwidth: 120 kHz

Add. Transd. 3: NONE Measure Time: 0.010000 s

Tracking Gen.: -17 dBm

Attenuation/Gain

Preamplifier: Off

RF Att.: 30 dB

Min. RF Att.: 10 dB

IF Att.: LowNoise

Control

Curve 1 Curve 3

Curve 2 Curve 4

Repetition: Single

Stop Mark

Stop Message

Range 4

Demodulation

Demodulation: Off

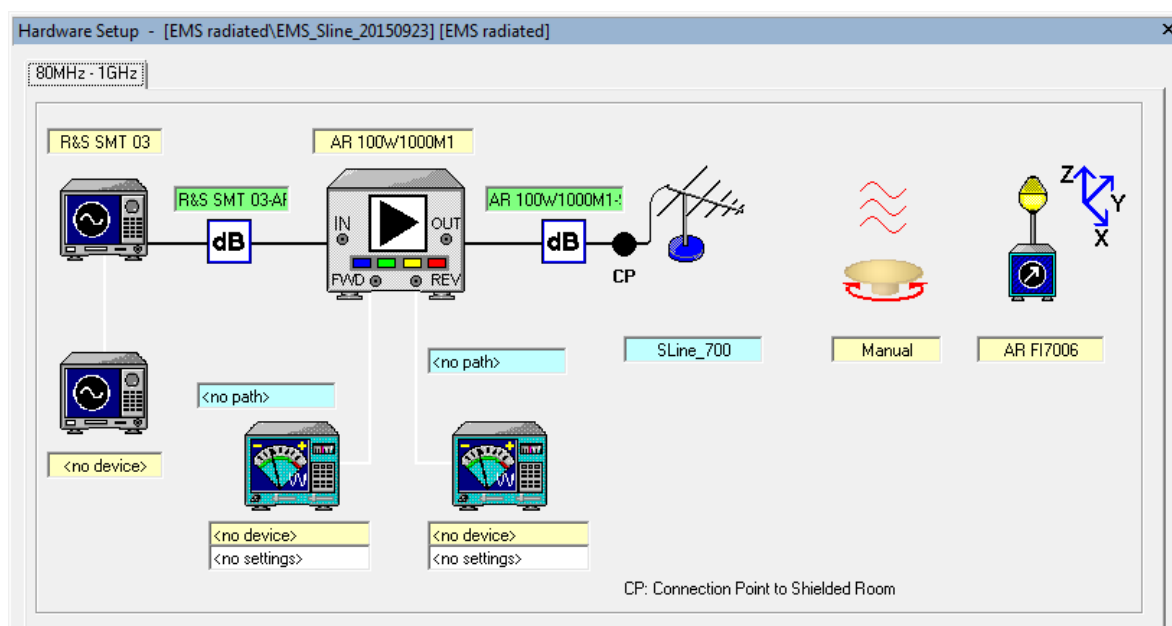
Option: None

Subrange Check Cancel

OK Cancel Check

KUVA 1. Kaapelikalibroinnin skannaustaulukko.

LIITE 3: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETTITESTIN MÄÄRITTELY EMC32:EEEN

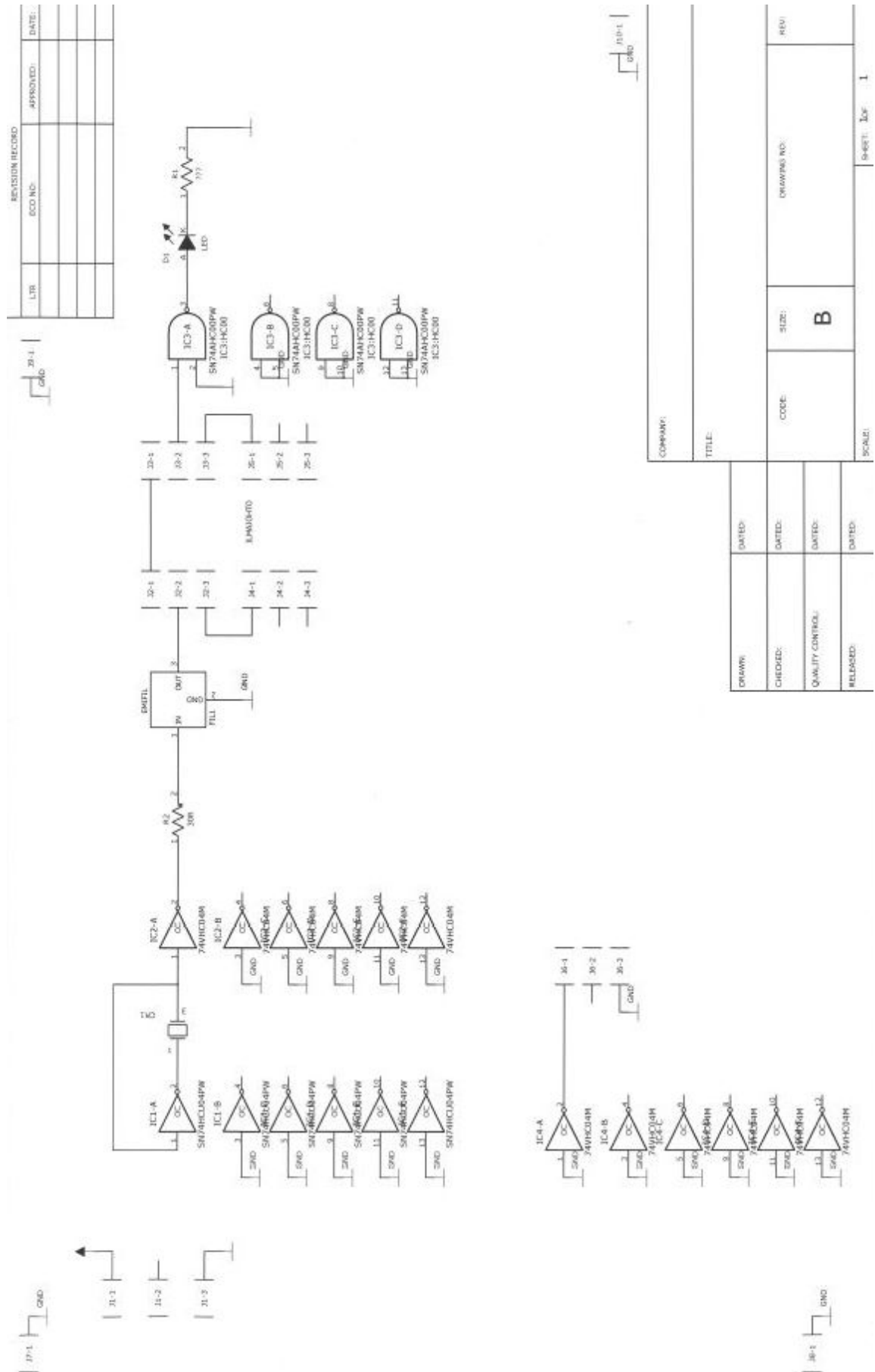


KUVA 1. Laitteistoprofiilin määrittely EMC32-ohjelmistoon.

No	Subrange	Step	Level	Modulation	Dwell Time	Level Sweep
1	80MHz - 1GHz	1% LOG	10V/m	Modulation Off	1s	OFF: 6 dB

KUVA 2. EMC32:n skannaustaulukko säteilevän immuuteetin kalibrointiin.

LIITE 4: REFERENSSISÄTEILIJÄN KYTKENTÄKAAVIO



KUVIO 1. Referenssisäteilijän kytkentäkaavio (SAVONIA, 1998.)

LIITE 5: SLINEN KORJAUSKERTOIMIEN MATLAB-LASKENTASKRIPTI

```

% Mika Lovén, 22.2.2016
clear all; close all;
format short g;

% imports measurement results
Lab_data = importdata( 'E:\Savonia\oppari\SLine_calib\15-12-21-901_QP_LAB.txt', '\t');
SLine_data = importdata( 'E:\Savonia\oppari\SLine_calib\15-12-23-901_QP_SLine.txt', '\t');

% plots data
figure(1)
semilogx(Lab_data(:,1), Lab_data(:,2), 'bx')
hold on
semilogx(SLine_data(:,1), SLine_data(:,2), 'rx')

title('Calibration data with logarithmic 1st degree polynomial fits')
xlabel('f [MHz]')
ylabel('Field Strength [dBuV/m]')
axis([30 1000 20 70])

% measurement observation model:
% logarithmic 1st order polynomial
H = zeros(length(Lab_data),2);
H(:,1) = log10(Lab_data(:,1));
H(:,2) = ones(length(Lab_data(:,1)),1);

% fits observations to model by LS-method
Lab_ls_coef = inv(H'*H)*H'*Lab_data(:,2)

% same thing for SLine
H = zeros(length(SLine_data),2);
H(:,1) = log10(SLine_data(:,1));
H(:,2) = ones(length(SLine_data(:,1)),1);
SLine_ls_coef = inv(H'*H)*H'*SLine_data(:,2)

% plots fits
ff = (30:0.1:1000)';
hold on
semilogx( ff, Lab_ls_coef(1).*log10(ff)+Lab_ls_coef(2), 'b--')
semilogx( ff, (SLine_ls_coef(1)).*log10(ff)+SLine_ls_coef(2), 'r--')
legend('Anechoic chamber data', 'SLine data', 'Anechoic chamber LS-fit', 'SLine LS-fit')

% creates logspace between frequencies 30-1000 MHz
ff_corr = exp( linspace( log(30), log(1000), 50) );
SLineCorrections = zeros(length(ff_corr),2);
SLineCorrections(:,1) = ff_corr;

% calculates correction factors (damping factors)
SLineCorrections(:,2) = ( Lab_ls_coef(1).*log10(ff_corr)+Lab_ls_coef(2) ) - (
SLine_ls_coef(1).*log10(ff_corr)+SLine_ls_coef(2) )

% plots correction factors
figure(2)
semilogx( ff_corr, SLineCorrections(:,2), 'kx' )
hold on
title('SLine correction factors [L_{dB}]','interpreter','tex')
xlabel('f [MHz]')
ylabel('Field Strength [dBuV/m]')
axis([ 30 1000 min(SLineCorrections(:,2))-1 max(SLineCorrections(:,2))+1 ]);

% exports correction factors into file
fid = fopen('SLine_calib_160222.txt','wt');
fprintf(fid,'Frequency\tCorrection\nMHz\tdB\n');
for i=1:length(SLineCorrections)
    fprintf(fid,'%g\t',SLineCorrections(i,1) );
    fprintf(fid,'%g\n',SLineCorrections(i,2) );
end
fclose(fid);

```

LIITE 6: SÄTEILEVÄN EMISSIONMITTAUKSEN MÄÄRITTELY ES-K1: EEN

Säteileviä emissioita voidaan mitata R & S:n ES-K1-ohjelmistolla. Käytettäväksi suositellaan viimeisintä ohjelmistoversiota 1.71 Service pack 2 -laajenuksella.

Säteilevän emission mittaamiseen tarvitaan käytettäväksi laitteeksi määritellä ainoastaan ESCS 30 -testivastaanotin kuvan 1 mukaisesti. Testivastaanotin on määritelty ES-K1:een GPIB-väylän osoitteeseen 18. ES-K1 tunnistaa testivastaanottimen ominaisuudet automaattisesti.

The screenshot shows a 'Device Configuration' dialog box with a table of devices and an input field for configuring a specific device.

Name	Device	Description	Interface	Addr	Mode	Active	Busy
TURNTABLE	HD DT 3XX		GPIB0	7	virtual	No	No
MAST	HD MA 2XX		GPIB0	7	virtual	No	No
ESU	ESU		GPIB0	28	physical	No	No
ESCS 30	ESCS	EMI test receiver	GPIB0	18	physical	Yes	No
<End of table>							

Below the table, the 'Input Field: Device' section is shown with the following configuration:

- Name:** ESCS 30
- Device:** ESCS
- Interface:** GPIB0
- Mode:** physical, virtual
- Description:** EMI test receiver
- Address:** 18
- Active:** Active
- Buttons:** Load, Empty, Insert, Edit, Modify, Delete, Properties...
- Bottom Buttons:** OK, Cancel

KUVA 1. ESCS 30 -testivastaanottimen määrittely ES-K1:een.

Tämän jälkeen on määritelty esi- ja finaalitesteissä käytettävät skannaustaulukot, joita käytetään ES-K1:n sisältämissä mittauskripteissä. Esitestissä käytettävä standardin EN 55022 mukainen skannaustaulukko on esitetty kuvassa 2.

Scan Editor - EN 55022 S-LINE pre

File

Unit	Detector	Mode	Subranges
<input type="text" value="dBµV"/>	Curve 1: MaxPeak	ClearWrite	30.0 MHz 1.0 GHz 120 kHz ESCS 30
	Curve 2: NONE	ClearWrite	<End of table>
	Curve 3: NONE	ClearWrite	
	Curve 4: NONE	ClearWrite	

Subrange

Receiver: ESCS 30 Transducer: NONE Start Frequency: 30.000000 MHz

Signal Path: NONE System Transd.: Stop Frequency: 1000.000000 MHz

Scan Mode: Lin Add. Transd. 1: cable_CBL2145_150 Step Size: 60.000 kHz

Add. Transd. 2: SLine_calib_151223 IF Bandwidth: 120 kHz

Add. Transd. 3: NONE Measure Time: 0.010000 s

Tracking Gen.: Off

Attenuation/Gain

Preamplifier: Autorange 10 dB

RF Att.: 20 dB

Min. RF Att.: 10 dB

IF Att.: LowNoise

Control

Curve 1 Curve 3

Curve 2 Curve 4

Repetition: Single

Stop Mark

Stop Message

Demodulation

Demodulation: Off

Option: None

Buttons: Subrange Check, Cancel, OK, Cancel, Check

KUVA 2. Säteilvän emission esitestin ES-K1-skannaustaulukko.

Finaalitestille on tehty vastaava standardin EN 55022 mukainen skannaustaulukko, joka on esitetty kuvassa 3. Finaalitestin skannaustaulukko eroaa esitestin skannaustaulukosta käytettävän ilmaisimen ja mittausajan osalta.

Scan Editor - EN 55022 S-LINE fin

File

Unit	Detector	Mode	Subranges
<input type="text" value="dBµV"/>	Curve 1: QuasiPeak	ClearWrite	30.0 MHz 1.0 GHz 120 kHz ESCS 30
	Curve 2: NONE	ClearWrite	<End of table>
	Curve 3: NONE	ClearWrite	
	Curve 4: NONE	ClearWrite	

Subrange

Receiver: ESCS 30 Transducer: NONE Start Frequency: 30.000000 MHz

Signal Path: NONE System Transd.: Stop Frequency: 1000.000000 MHz

Scan Mode: Lin Add. Transd. 1: cable_CBL2145_150 Step Size: 60.000 kHz

Add. Transd. 2: SLine_calib_151223 IF Bandwidth: 120 kHz

Add. Transd. 3: NONE Measure Time: 1.000000 s

Tracking Gen.: Off

Attenuation/Gain

Preamplifier: Autorange 10 dB

RF Att.: 20 dB

Min. RF Att.: 10 dB

IF Att.: LowNoise

Control

Curve 1 Curve 3

Curve 2 Curve 4

Repetition: Single

Stop Mark

Stop Message

Demodulation

Demodulation: Off

Option: None

Buttons: Subrange Check, Cancel, OK, Cancel, Check

KUVA 3. Säteilvän emission finaalistin ES-K1-skannaustaulukko.

Skannaustaulukkoihin on lisätty muuntimiksi (engl. transducer) kaapelivaimennuksen ja TEM-kammion korjauskertoimet. Molemmissa skannauksissa käytetään testivastaanottimen 10 dB:n esi- vahvistinta, joka parantaa mittaustulosta vähentämällä kohinan vaikutusta. Lisäksi käytetään vähintään 10 dB:n RF-vaimennusta, joka vähentää liittimien epäsovitus aiheuttamaa virhettä ja suojelee vastaanotinta liian suurilta häiriöpäästöpiikeiltä. Lisäksi käytetään testivastaanottimen LowNoise IF -vaimennusmoodia, joka pyrkii optimoimaan mittauksen kohinan vaikutuksen osalta.

Tämän jälkeen on määritelty ES-K1:n S-LINE-skriptin parametrit kuvan 4 mukaisessa skriptieditorinäkymässä. Skriptissä on määritelty käytettäväksi edellä esitettyjä esi- ja finaalistien skannaustaulukkoja Preview- ja Final-asetuksista kuvien 5 ja 6 mukaisesti.

The screenshot shows the 'Script Parameter' dialog box for the parameter set 'EN 55022 S-LINE mika'. The 'Test' section contains the following settings:

- 01: ID (max. 12 chars) to be included in filenames: 16-08-17-901
- 02: global start frequency [MHz] for the test: 30
- 03: global stop frequency [MHz] for the test: 1000
- 04: suppress queries as far as possible:
- 05: confirmation for final test after data reduction:
- 06: split frequency range into test ranges:
- 07: if splitting of frequency range: do with log. scale:
- 08: min. no. of test ranges for splitting of frequ. range: 1
- 09: test configuration, <none>: ID: <none>

The 'Additional Topics' section contains buttons for: Preview..., DataReduction..., Final..., Graphic..., Report..., ReportHeader..., and SLINE... On the right side, there are buttons for OK, Save, Save As..., Print, Stop, and Cancel.

KUVA 4. ES-K1:n skriptieditori.

The screenshot shows the 'Preview' dialog box. It contains the following settings:

- 01: S-LINE X preview result, <none>: ID + '_pre X': <none>
- 02: S-LINE Y preview result, <none>: ID + '_pre Y': <none>
- 03: S-LINE Z preview result, <none>: ID + '_pre Z': <none>
- 04: OATS E preview result, <none>: ID + '_pre E': <none>
- 05: scan table for preview: EN 55022 S-LINE pre
- 06: sweep table for preview: <none>
- 07: insert results into existing result file:

On the right side, there are buttons for OK and Cancel.

KUVA 5. Säteilevän emissiomittauksen esitestin asetukset.

The 'Final' dialog box contains the following settings:

01: S-LINE X final result, <none>: ID + '_fin X'	<none>
02: S-LINE Y final result, <none>: ID + '_fin Y'	<none>
03: S-LINE Z final result, <none>: ID + '_fin Z'	<none>
04: OATS E final result, <none>: ID + '_fin E'	<none>
05: perform partial scans	<input type="checkbox"/>
06: max. no. of results kept from partial scans	1
07: partial scan width: no. of IF-BW's (0=use ratio)	0
08: partial scan width: ref. frequ. ratio	0.01
09: scan table for partial scans	<none>
10: scan table for final meas.	EN 55022 S-LINE fin
11: opt. scan table for final meas. >1GHz	<none>
12: insert results into existing result file	<input type="checkbox"/>
13: optional input: frequency list	<none>

KUVA 6. Säteilävän emissiomittauksen finaalitestin asetukset.

Esitestin jälkeen mittaustuloksia karsitaan finaalitestiä varten kuvan 7 mukaisten datan redusointiasetusten mukaisesti. ES-K1 tekee karsinnan automaattisesti vertaamalla esitestin mittaustuloksia standardin EN 55022 määrittelemiін emissiorajoihin käyttämällä päätöksentekorajana 10 dB:n eroa sallittuihin päästörajoihin. Lisäksi interaktiivinen taajuuksien valinta on valittuna.

The 'DataReduction' dialog box contains the following settings:

01: also perform interactive frequency selection	<input checked="" type="checkbox"/>
02: limit line (field strength)	EN 55022 F QP
03: max. no. of results kept per test range	50
04: decision threshold [dB] for peak reduction	10

KUVA 7. Mittausdatan redusointiasetukset.

Viimeiseksi skriptiin on määritelty SLine TEM -kammion korjauskerroin C_1 ja 10 metrin OATS-mittapaikkakorjaus SLINE-asetuksista kuvan 8 mukaisesti.

The 'SLINE' dialog box contains the following settings:

01: S-LINE type is 700	<input checked="" type="checkbox"/>
02: S-LINE type is 1000	<input type="checkbox"/>
03: S-LINE type is 1500	<input type="checkbox"/>
04: S-LINE correction factor (C1)	S-LINE 700
05: OATS correction factor (C2)	S-LINE OATS 10 m

KUVA 8. SLinen tyypin ja korjauskerrointen määrittäminen.

LIITE 7: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETTITESTIN MÄÄRITTELY EMS-K1: EEN

Säteilevää immuniteettia voidaan testata R & S:n EMS-K1-ohjelmistolla. Ohjelmasta suositellaan käytettäväksi versiota 1.20 (päivitetään ensiksi asennetusta perusversiosta 1.10).

Säteilevän immuniteettitestin suorittamiseksi EMS-K1:een lisätään kuvan 1 mukaiset laitteet. Fyysisistä laitteista EMS-K1 määritetään ohjaamaan ainoastaan GPIB-väylän osoitteessa 28 olevaa SMT 03 -signaaligeneraattoria. EMS-K1 tunnistaa signaaligeneraattorin tukemat signaalin voimakkuudet ja taajuusvälin automaattisesti ja siinä käytetään sisäistä (*INT*) referenssitaajuutta kuvan 2 mukaisesti.

Name	Device	Description	Interface	Addr	Mode	Active	Busy
PA2	AMPL	AR100w1000M1	NONE	--	physical	Yes	No
PA1	AMPL	AR150A220	NONE	--	physical	Yes	No
SMT	SMT	SMT 03	GPIB0	28	physical	Yes	No
SUPER-GEN	SUPER-GEN		NONE	--	physical	Yes	No
SUPER-AMP	SUPER-AMP		NONE	--	physical	Yes	No

Name	Device	Description	Interface	Addr	Mode	Active	Busy
INTLK	INTLK	Interlock Safety Loop	NONE	--	physical	Yes	No
SUPER-RSU	SUPER-RSU	Signal Paths	NONE	--	physical	Yes	No
RF-LOAD	TX-ANT	SLine internal	NONE	--	physical	Yes	No
PA2	AMPL	AR100w1000M1	NONE	--	physical	Yes	No
PA1	AMPL	AR150A220	NONE	--	physical	Yes	No

KUVA 1. Laitteiston määrittely EMS-K1:een.

Properties: SMT

Type

SMT
 SMP
 SME

Modulation

Pulse Modulation enabled
 Internal Modulation Synthesizer

Limits

	Min.	Max.	
Frequency	5000.0	15000000000.0	Hz
Level	-144.0	16.0	dBm

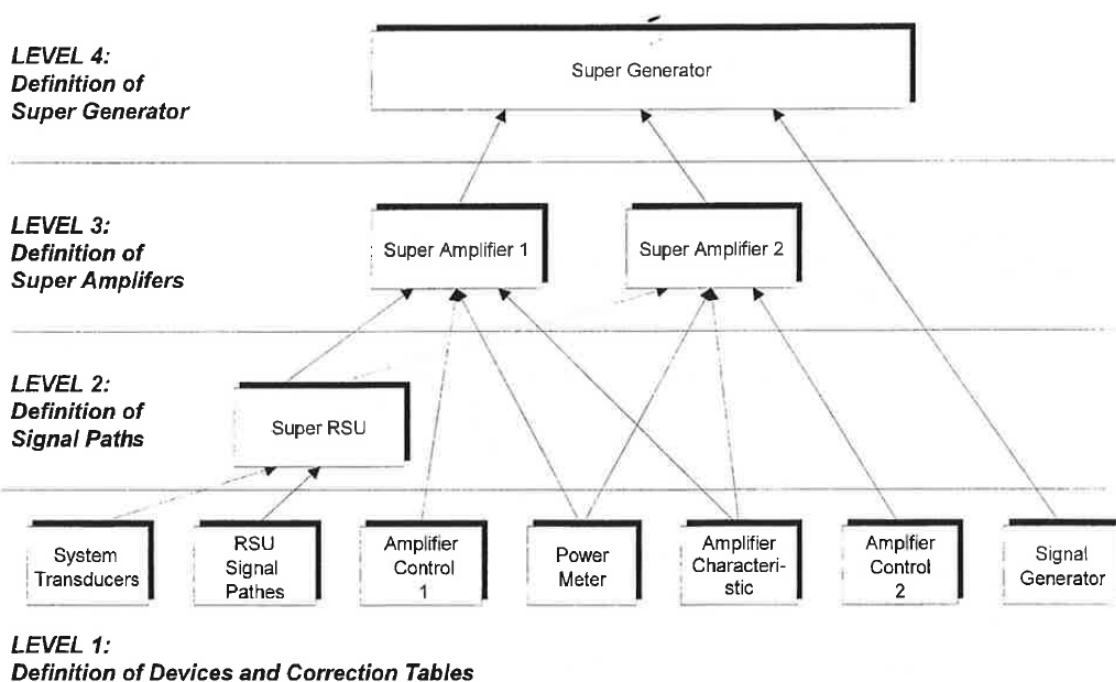
Reference Frequency

OK Cancel INT

KUVA 2. SMT 03 -signaaligeneraattorin määrittely EMS-K1:een.

Kuvassa 1 esitetyt laitteet SUPER-RSU, SUPER-AMP ja SUPER-GEN ovat EMS-K1:n loogisia kokonaisuuksia määritellyistä fyysisistä signaaligeneraattoreista (GEN), tehovahvistimista (AMP) ja kytkentäyksiköistä (RSU). EMS-K1 ohjaa loogiseen mittalaitteeseen määritettyä fyysistä signaalitietä ja laitteita riippuen signaalin taajuudesta. Tämä mahdollistaa eri laitekoonpanojen käytön ja signaalitien vaimennusten määrittelyn signaalin taajuuden mukaan. Tätä on havainnollistettu kuviossa 1. (R & S EMS-K1-manual, 25.)

Définition Level Model of Super Generator



KUVIO 1. Laitteiston määrittely EMS-K1:een (R & S, EMS-K1-manual, 25.)

Laitteet PA1 (Power Amplifier1) ja PA2 (Power Amplifier2) ovat määriteltyjä tehovahvistimia. Lopullisessa testausjärjestelmässä on vain yksi vahvistin, mutta molempien vahvistimien määrittelyt on kuitenkin jätetty EMS-K1:n laitekoonpanoon, mikä mahdollistaa toisen tehovahvistimen helpon käyttöönoton myöhemmin tarvittaessa. Kuvassa 3 on esitetty PA1- ja PA2-tehovahvistimien määrittelyt EMS-K1:een. Vahvistimilla ei ole testien aikana automaattista ohjausta, vaan ohjelma pyytää käyttäjää kytkemään oikean vahvistimen toiminta- tai valmiustilaan riippuen käytettävästä taajuudesta. Koska käytössä ei ole kytkentäyksikköä, käyttäjän tulee myös asettaa signaalitien kaapelit käsin vaihdettaessa tehovahvistinta.

Aiemmin mittausjärjestelmään oli tarkoitus ottaa käyttöön AR100W1000M1-tehovahvistimen lisäksi toinen AR:n AR150A220-tehovahvistin matalille taajuuksille, mutta laitteelle löytyi muuta käyttöä Savonian EMC-laboratoriosta, eikä se kuulu lopulliseen laitekoonpanoon. Tämä yksinkertaistaa laitteistokoonpanoa, eikä käyttäjän tarvitse vaihtaa kaapeleita vahvistimesta toiseen taajuuden vaihtuessa. Lisäksi tämä yksinkertaistaa testausten tekemistä, mutta kaventaa testausten suurinta mahdollista taajuusväliä. Laitteisto on kuitenkin riittävä simuloimaan standardin mukaisia testauksia taajuusvälillä 80 - 1 000 MHz.

Amplifier	Set State	Get State	Hold Time	Delay Time
Power Off	I1	R1	fixed	2
Power On	I1	S1	fixed	2
StandBy	S2	R2	1	0.5
Operate	S3	R3	1	1
Reset	R4	R4	2	2

Amplifier	Set State	Get State	Hold Time	Delay Time
Power Off	I1	R1	fixed	2
Power On	I1	S1	fixed	2
StandBy	S2	R2	1	0.5
Operate	S3	R3	1	1
Reset	R4	R4	2	2

KUVA 3. Tehovahvistimien määrittelyt EMS-K1:een.

Kuvassa 4 on esitetty loogisen kytkentäyksikön (SUPER-RSU) määrittely EMS-K1:een. Koska käytössä ei ole fyysistä kytkentäyksikköä, kaikkien signaaliteiden vaimennuksiksi on määritelty nollavaimennus (0dB_attenuator). Kaapeleille on määritelty nollavaimennus (0dB_attenuator), koska niiden vaimennus huomioidaan referenssikalibrointien yhteydessä. Referenssikalibroinneissa käytetään samoja kaapeleita kuin varsinaisissa testauksissa, joten niiden vaimennus on jo huomioitu määrittäessä eri kentän voimakkuuksia vastaavia signaaligeneraattorin lähtötasojen arvoja. Optimaalisen tuloksen aikaansaamiseksi referenssikalibroinnit tulisi uusia aina käytettäessä eri kaapeleita. Koska käytettävät kaapelit ovat tyypillisesti hyvin lyhyitä, niiden vaimennus on hyvin vähäinen ja vaimennuksen vaikutus kentän voimakkuuden määrittelyyn on hyvin pieni.

Signal Path Name	Correction Table
CHPA1	0dB_attenuator
CPPA1	0dB_attenuator
CRPA1	0dB_attenuator
CAPA1	0dB_attenuator
CTPA1	0dB_attenuator
CHPA2	0dB_attenuator
CPPA2	0dB_attenuator
CRPA2	0dB_attenuator

Edit Field: Signal Path

Signal Path Name: CHPA1 Correction Table: 0dB_attenuator

RSU: Path:

Selection Field

RSU: Path:

KUVA 4. Loogisen kytkentäyksikön määrittely EMS-K1:een.

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty tehovahvistimien määrittelyt EMS-K1:een. Tehovahvistinta PA1 (AR150A220) on määritelty käytettäväksi taajuuksilla 10 kHz - 80 MHz ja tehovahvistinta PA2 (AR100W1000M1) taajuuksilla 80 MHz - 1 GHz. AR150A220-tehovahvistinta voitaisiin käyttää korkeammilla signaalien taajuuksilla 220 MHz asti, mutta maksimitaajuus määriteltiin 80 MHz sekaantumisien välttämiseksi. Signaaliketjuissa on käytetty aiemmin määriteltyjä kytkentäyksikön nollavaimen-

nuksia. EMS-K1 on asettanut muiden parametrien arvot automaattisesti vahvistimien tyyppien mukaan.

Properties: SUPER-AMP

Super Amplifier	Control Device	Start/Stop Frequency	Fwd Power	Rev Power
PA2	PA2	80.0 MHz-1.0 GHz	<none>	<none>
PA1	PA1	10.0 kHz-80.0 MHz	<none>	<none>
<End Of Table>				

Insert Edit Modify Delete

Super Amplifier

Ampl. Name PA1

Control Device PA1

Signal Paths

Path PSU

Amp. Input CHPA1

Coupl. Forward CHPA1

Coupl. Reverse CHPA1

Coupler Amplifier CHPA1

Amp. Output CHPA1

Characteristic <none>

Start Frequency 0.010000 MHz

Stop Frequency 80.000000 MHz

Max. Input Power 0.00 dBm

Max. Output Power 54.00 dBm

Ampl. Noise 13.00 dBm

Max. Adjust Steps 10.00 dB

Settling Time 0.10 s

Calculate Start Level automatically

Start Level for Levelling -60.00 dBm

Max. VSWR 10.00

Forward Power Measurement Device <none> Settings... Store...

Reverse Power Measurement Device <none> Settings... Store...

KUVA 5. AR150A220-tehovahvistimen määrittely EMS-K1:een.

Properties: SUPER-AMP

Super Amplifier	Control Device	Start/Stop Frequency	Fwd Power	Rev Power
PA2	PA2	80.0 MHz-1.0 GHz	<none>	<none>
PA1	PA1	10.0 kHz-80.0 MHz	<none>	<none>
<End Of Table>				

Insert Edit Modify Delete

Super Amplifier

Ampl. Name PA2

Control Device PA2

Signal Paths

Path PSU

Amp. Input CHPA2

Coupl. Forward CHPA2

Coupl. Reverse CHPA2

Coupler Amplifier CHPA2

Amp. Output CHPA2

Characteristic <none>

Start Frequency 80.000000 MHz

Stop Frequency 1000.000000 MHz

Max. Input Power 0.00 dBm

Max. Output Power 54.00 dBm

Ampl. Noise 13.00 dBm

Max. Adjust Steps 10.00 dB

Settling Time 0.10 s

Calculate Start Level automatically

Start Level for Levelling -60.00 dBm

Max. VSWR 10.00

Forward Power Measurement Device <none> Settings... Store...

Reverse Power Measurement Device <none> Settings... Store...

KUVA 6. AR100W1000M1-tehovahvistimen määrittely EMS-K1:een.

Kuvassa 7 on esitetty loogisen signaaligeneraattorin määrittely EMS-K1:een. Looginen signaaligeneraattori ohjaa testausjärjestelmän ainoaa fyysistä signaaligeneraattoria SMT 03. Signaaligeneraattorille ei käytetä erillisiä korjauskertoimia ja sille on määritetty nolllavaimennus (0dB-attenuator). Taajuuksilla 10 kHz - 80 MHz on määritetty käytettäväksi lopullisesta laitekokoontanosta poistettua AR150A220-tehovahvistinta ja taajuuksilla 80 MHz - 1 GHz käytetään AR100W1000M1-tehovahvistinta.

Properties: SUPER-GEN

Super Generator	Signal Generator	Mod. Generator	Correction Table	Frequency Range
SMT 03	SMT		0dB_attenuator	10.0 kHz-1.0 GHz
<End Of Table>				

Buttons: Insert, Edit, Modify, Delete

Super Generator

Name	Signal Generator	Mod. Generator	Correction Table	Frequency Range
SMT 03	SMT		0dB_attenuat	10.0 kHz-1.0 GHz

Subranges

Start Frequency	Stop Frequency	Super Amplifier	Generator Path	Description
10.0 kHz	80.0 MHz	PA1	<none>	
80.0 MHz	1.0 GHz	PA2	<none>	
<End Of Table>				
80.000000	1000.000000	MHz	PA2	<none>
80.00	1000.00	MHz	Super Amplifier	

KUVA 7. Loogisen signaaligeneraattorin määrittely EMS-K1:een.

Lisäksi laitteistokokoontaan määriteltiin kuorma ja interlock-katkaisin kuvien 8 ja 9 mukaisesti. Kuorma on määritetty hyvin yleispäteväksi ja kuormana voidaan käyttää mitä tahansa laitetta. Määrittelyt rajaavat lähinnä käytettävän signaalin taajuutta. Interlock-katkaisin on virtuaalinen turvakatkaisin, jonka asentoa EMS-K1 muuttaa automaattisesti. Katkaisin olisi mahdollista määrittellä manuaalisesti toimivaksi, jolloin käyttäjän tulisi huolehtia itse kytkimen asennosta, eikä testauksia voisi kytkeä päälle vahingossa. Kytkimen manuaalista käyttöä ei ole koettu tarpeelliseksi testausjärjestelmän yksinkertaisuuden vuoksi.

Properties: RF-LOAD

Physical Parameters

Minimum Frequency	10.000	kHz
Maximum Frequency	1000.000000	MHz
Max. Input Power	1000.0	W
Maximum VSWR	1000.0	
Antenna Cable	<None>	
Transducer Name	<None>	

Device Type: Antenna Others (CDN,CC,RF-LOAD)

Position

Height	0.00	m
Elevation	0	degree
Polarization Device	<None>	
Message on Polarization Change	<input type="checkbox"/>	

Associated Turntable

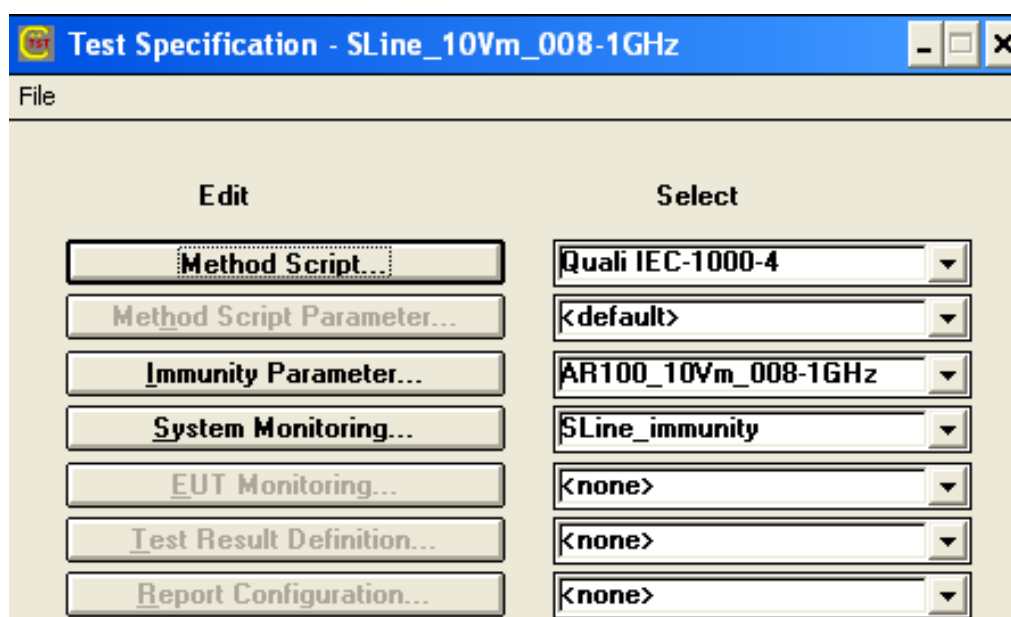
Device	<None>	
Azimuth	0	degree

KUVA 8. Kuorman määrittely EMS-K1:een.



KUVA 9. Interlock-katkaisimen määrittely EMS-K1:een.

Laitteiston määrittelyn jälkeen on määritelty varsinainen testi nimellä *SLine_10Vm_008-1GHz* ja testin immuuteettiparametrit on määritelty *AR100_10Vm_008-1GHz*-profiiliin kuvien 10 ja 11 mukaisesti.



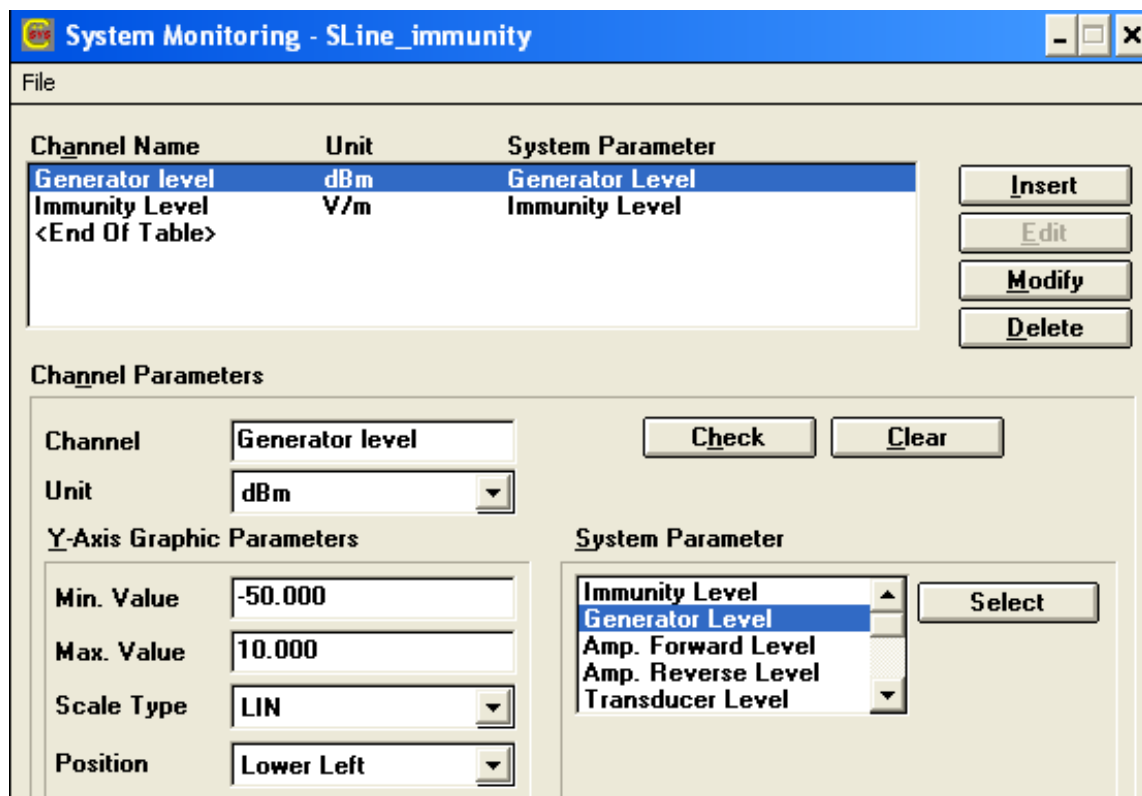
KUVA 10. Testin määrittely EMS-K1:een.



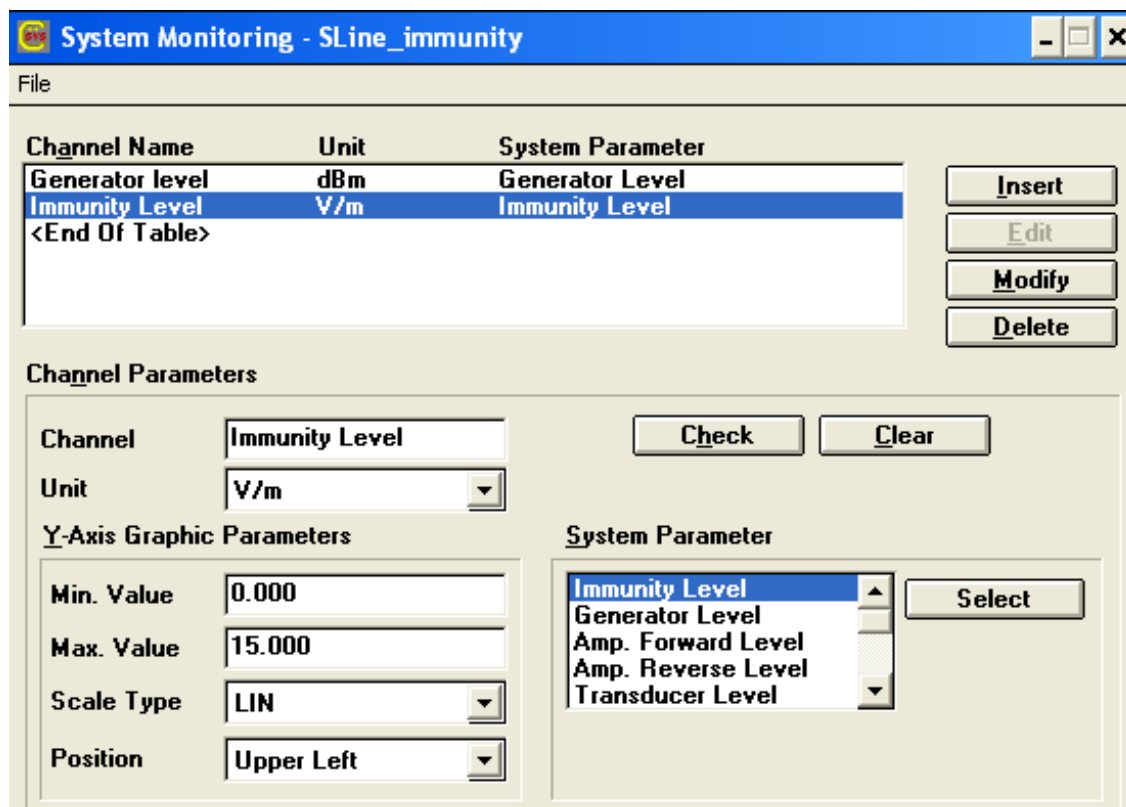
KUVA 11. Immuneettiparametrien määrittely EMS-K1:een.

Immuneettiprofiiliin on määritelty testin parametrit signaalin taajuuden mukaisesti. Käytössä on vain yksi taajuusväli, jolle kaikki määrittelyt on tehty. Haluttu kentän voimakkuus luodaan kammioon signaaligeneraattorille etukäteen tehtyjen referenssikaliibrointitietojen pohjalta ohjaamalla signaaligeneraattorin lähtötasoa. Muut testiparametrit on asetettu standardien EN/IEC 61000-4-3 mukaisesti.

Lisäksi testin monitorointi on määritelty profiiliin *SLine_immunity*, jonka parametrit on esitetty kuvissa 12 ja 13. Testin aikana monitoroidaan generaattorin lähtötasoa ja testin immuneettitasoa. Generaattorin lähtötaso vaihtelee testin aikana taajuuden mukaan, mutta koska testeissä käytetään vain yhtä immuneettitasoa koko taajuusvälillä, sen arvo on vakio testien aikana. Monitoroitu immuneettitaso on määritetyn immuneettitason mukaisesti vakio, koska testausjärjestelmässä ei ole kentänvoimakkuussensoria, jolla todellinen kammiossa vallitseva kentän voimakkuus voitaisiin mitata.



KUVA 12. Generaattorin lähtötason monitoroinnin määrittely EMS-K1:een.



KUVA 13. Immuniteettitason monitoroinnin määrittely EMS-K1:een.

LIITE 8: SÄTEILEVÄN EMISSION MITTAAMINEN ES-K1:LLÄ

Ennen mittauksia tehdään seuraavat valmistelut: testivastaanottimelle kytketään virta ja suoritetaan sisäinen kalibrointi painamalla *CAL*-painiketta, mikäli vastaanotin on ollut kytkettynä pois sähköverkosta. Vastaanottimen näyttöön ilmestyy punaisella kirjoitettu teksti "CAL COMPLETE", kun kalibrointi on valmis. Testivastaanottimen tulisi antaa lämmitä virrat päällä vähintään 30 minuuttia ennen kalibrointia. Testivastaanotin kytketään GPIB-väylän kautta PC:lle ja testivastaanottimen RF-sisääntulo tulee kytkeä kalibroidulla 50 Ω RF-kaapelilla TEM-kammion RF-liittimeen.

Testattavan laitteen säteilevät emissiot mitataan ES-K1-ohjelmistolla. ES-K1:n sisältämä valmis *SLi*-ne-skripti ajetaan yläpalkin kautta valitsemalla *Test/Run Script* ja valitsemalla avautuvasta listasta *S-LINE*. Standardin mukaiset parametrit on esiasetettu parametriprofiiliin *EN 55022 S-LINE mika*, joka voidaan valita ikkunan ylälaidasta kohdasta *Parameter Set*. Jokaiselle testille on hyvä antaa yksilöllinen tunniste. Hyvä tapa on käyttää systemaattista päivämäärään ja juoksevaan indeksiin perustuvaa tunnistetta. Mittauksen taajuusväli voidaan myös halutessa vaihtaa samasta ikkunasta. Kun halutut parametrit on asetettu, mittauskripti käynnistetään valitsemalla *OK*.

ES-K1 varmistaa erikseen, halutaanko suorittaa esi- ja finaalitestit. Täyteen mittaukseen valitaan molemmat. Tässä vaiheessa testattavalle laitteelle tehdään mahdolliset esivalmistelut ja kaikki tulevat testit tulee tehdä samalla testattavan laitteen konfiguraatiolla. Testattavan laitteen emissiot mitataan ensin X-tason polarisaatiossa. TEM-kammion ovi tulee sulkea tiivistä ja lukita kahvoista mittauksen ajaksi. Mittaukset toistetaan Y- ja Z-polarisaatiosta, eli kääntämällä testattavaa laitetta mitausten välissä. Alla olevassa kuvassa on esitetty, kuinka testattava laite asemoidaan mitattaessa eri polarisaatiotasoja.



KUVA 1. Testattavan laitteen asemointi eri polarisaatiotasoja mitattaessa. Vasemmalla: vertikaali (X-suunta). Keskellä: horisontaali syvyys suunnassa (Y-suunta). Oikealla: horisontaali sivuttaissuunnassa (Z-suunta).

Kolmen mittauksen jälkeen esitesti on valmis. ES-K1 analysoi mittaustulokset ja tekee mittaustuloksille automaattisesti OATS-muunnokset TEM-kammion korjauskertoimet huomioiden. ES-K1 esivalitsee kriittiset mittauspisteet finaalitestiin. Käyttäjä voi muokata valintoja ja lisätä kriittisiä mittauspisteitä. Mittauspisteiksi kannattaa valita emissiopiikkejä ja emissioiden lokaaleja maksimikohtia. Kun mittauspisteiden valinta on tehty, painetaan *Done* ja ES-K1 varmistaa mittauspisteiden valinnan kysymällä "Go back to marker selection". Valitsemalla *No* finaalitestin suoritus alkaa.

Finaalitestit suoritetaan kolmella eri polarisaatiotasolla samoin kuin esitesti. Testattava laite tulee asetella eri polarisaatiotasojen mitatessa samoin kuin esitestin aikana. Kaikkien eri polarisaatiotasojen mittaamisen jälkeen saadaan lopullinen mittaustulos, jolle on tehty samat OATS ja TEM-kammion korjaukset kuin esitestissä. Standardin EN 61000-4-3 mukaan kaikkien QP-ilmaisimella mitattujen emissiotasojen täytyy pysyä QP-raja-arvojen alapuolella, jotta emissiot ovat standardin mukaisesti hyväksytyllä tasolla. Mittaustulos on standardeja mukaillen suuntaa antava.

LIITE 9: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETIN TESTAAMINEN EMS-K1:LLÄ

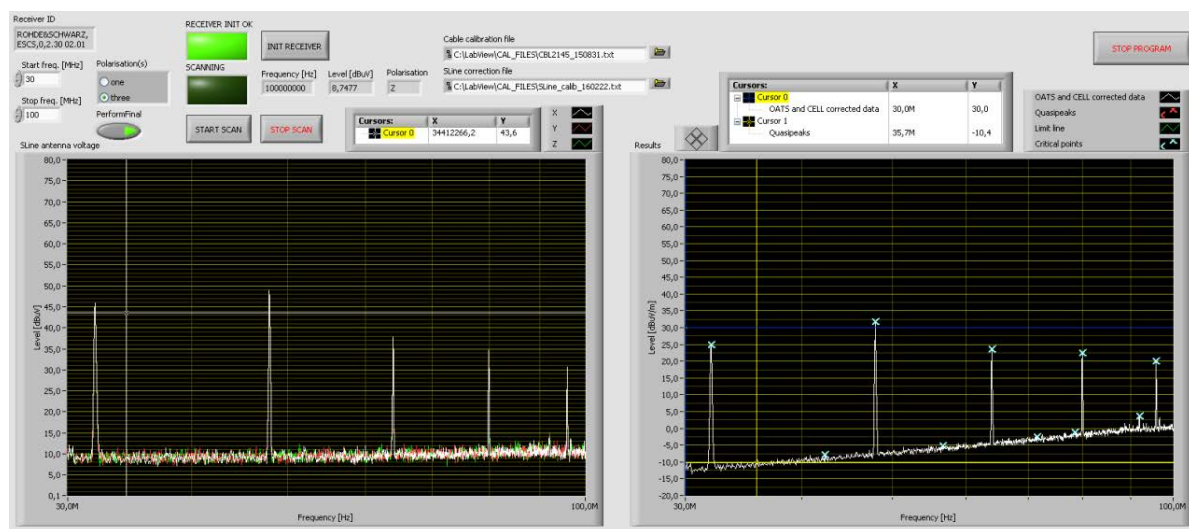
Ennen säteilevän immuniteetin testaamista tehdään seuraavat valmistelut: Varmistetaan, että signaaligeneraattori on kytketty GPIB-väylän kautta PC:lle. Tehovahvistimen vahvistus (*GAIN*) tulee olla maksimiasennossa koko testauksen ajan kalibroitimittausten tavoin. Signaaligeneraattorin lähtö yhdistetään tehovahvistimen tuloon kalibroidulla CT6-kaapelilla. Tehovahvistimen lähtö yhdistetään TEM-kammion RF-liittimeen kalibroidulla CBL2145-kaapeleilla. Lopuksi testauslaitteisto käynnistetään.

Testausskripti ladataan EMS-K1:ssä yläpalkin kautta valitsemalla *Test/Load Test* ja valitsemalla esikonfiguroitu *SLine_imm_160223*-testausprofiili. Ennen testauksen aloittamista myös testattava laite valmistellaan testausta varten. Testattava laite asetetaan kammioon ja sille kytketään käyttövirta tarvittaessa AC- tai DC-liittimien kautta. TEM-kammion EMC-läpivientiä voidaan käyttää tarvittaessa esimerkiksi testattavan laitteen tilan tarkkailemiseen. Lopuksi TEM-kammion ovi suljetaan tiiviisti ja lukitaan kahvoista.

Testaus aloitetaan yläpalkin valinnalla *Test/Start Test*. EMS-K1-ohjelmisto varmistaa, että käyttäjä kytkee tehovahvistimen toimintatilaan vahvistimen *OPERATE*-painikkeesta. Valitsemalla *OK* testaus alkaa. Testin aikana kammiossa on voimakas sähkökenttä, eikä kammion ovea tule avata testin ollessa käynnissä. Testin voi tarvittaessa keskeyttää *STOP*-painikkeesta ja testiä voidaan jatkaa valitsemalla *continue*. *Restart*-painikkeesta koko testi alkaa alusta. Testin päättyessä ohjelma varmistaa, että käyttäjä kytkee tehovahvistimen valmiustilaan vahvistimen *STANDBY*-painikkeesta. Testattaessa eri polarisaatiotasoja testattavaa laitetta tulee kääntää eri asentoihin ja ajaa testi uudelleen. Mikäli laite ei häiriinny testien aikana, testituloksena on epävirallisesti standardia mukaillen hyväksytyt.

LIITE 10: SÄTEILEVÄN EMISSION MITTAAMINEN LABVIEW-SOVELLUKSELLA

Tässä opinnäytetyössä toteutettiin lisäksi omat LabVIEW-pohjaiset mittaussovellukset. Ennen mitaamista tehdään samat esivalmistelut kuin mitattaessa säteileviä emissioita ES-K1:llä. Alla olevassa kuvassa on esitetty säteilevän emission mittaamiseen käytettävän LabVIEW-sovelluksen etupaneeli. Ennen varsinaisten mittausten suorittamista testivastaanotin alustetaan *INIT RECEIVER* -painikkeesta, jolla testataan löytyykö ESCS 30 -testivastaanotin GPIB-väylästä. Jos alustus onnistuu, *RECEIVER INIT OK* valo palaa vihreänä, ja vastaanottimen tunniste tulee näkyviin tekstikenttään *Receiver ID*.



KUVA 1. Säteilevän emission LabVIEW-mittaussovellus.

Ohjelmassa on oletusasetuksina täyden standardin mukaisen mittauksen parametrit, mutta käyttäjä voi muuttaa niitä halutessaan. Mittauksen taajuusväli annetaan numerokenttiin *Start freq.* ja *Stop freq.* Mikäli käyttäjä haluaa suorittaa vain esitestin, tulee valinta *PerformFinal* poistaa. Käyttäjän voi suorittaa mittaukset myös pelkästään yhdessä polarisaatiotasossa valitsemalla *Polarisation(s)*-kentästä *one*. Menetelmä sopii tuotekehitysvaiheen mittaamiseen, jolloin halutaan nopeasti suuntaa antavia mittaustuloksia. *Cable calibration file* ja *SLine correction* -kenttiin valitaan kaapelin ja Slinen korjauskertoimet sisältävät tiedostot.

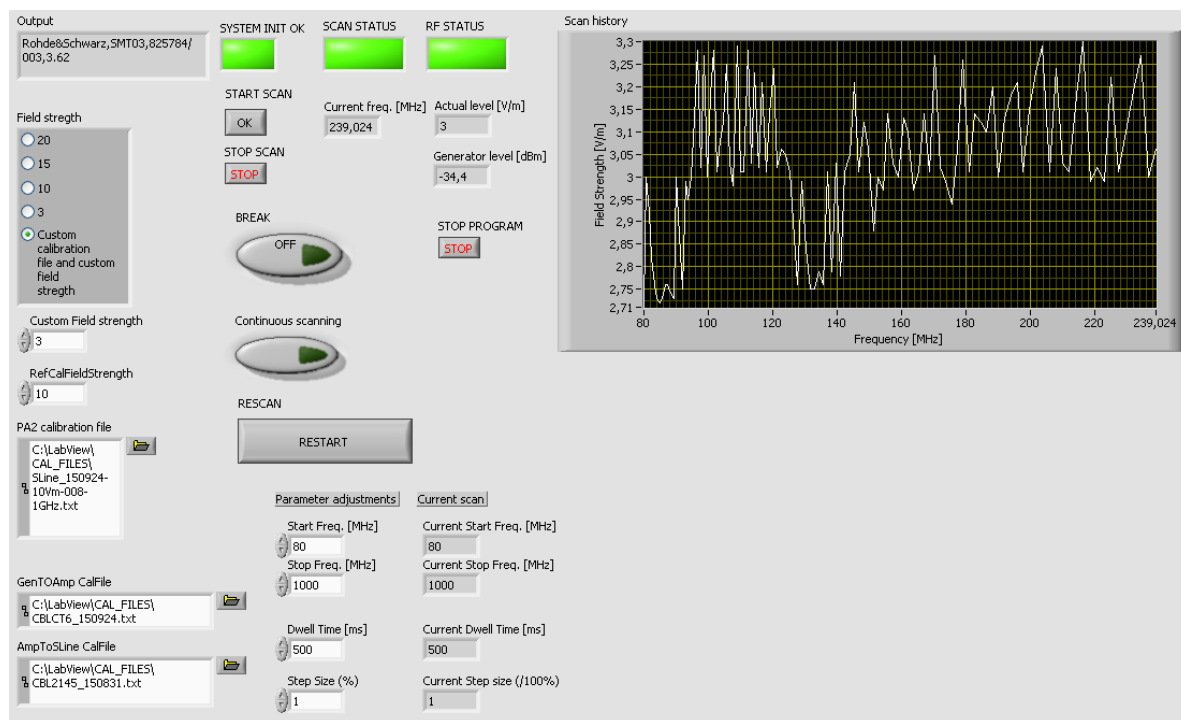
Parametrien asettamisen jälkeen testi käynnistetään *START*-painikkeesta. Mikäli mittaukset suoritetaan vain yhdessä polarisaatiotasossa, mittaus alkaa välittömästi. Jos käytössä on kolmen polarisaatiotason mittaus, ohjelma pyytää käyttäjää asettamaan testattava laite x-polarisaatiotasoon. Mittaus käynnistetään painamalla *Done* ja se voidaan tarvittaessa keskeyttää painamalla *STOP SCAN*. Täydessä testissä mittaukset suoritetaan ES-K1:n tavoin myös y- ja z-polarisaatiotasossa kääntämällä testattavaa laitetta mittausten välissä. Etupaneelin vasemman puoleisessa kuvaajassa näkyy Slinen antennien napajännite eri värein eri polarisaatiosta mitattuna. Napajännitekuvaajassa ei ole huomioitu tarvittavia korjauskertoimia.

Esitestin jälkeen eri polarisaatioiden mittaustulokset yhdistetään ja niille tehdään automaattisesti kaapeli- ja SLine-korjaukset. Korjattu esitestin tulos näkyy oikean puoleisessa kuvaajassa valkoisena viivana. LabVIEW-ohjelma analysoi tulokset ja valitsee kriittiset pisteet finaalistettä varten automaattisesti. Finaalistessä testattavat taajuudet näkyvät oikean puoleisessa kuvaajassa vaaleansinisinä rasteina.

Mikäli käyttäjä on valinnut suoritettavaksi finaalistin, ohjelma varmistaa jatketaanko finaalistiin. Finaalisti käynnistetään painamalla *Continue*. Mikäli käytössä on kolmen polarisaatiotason mittausten menetelmä, ne mitataan samoin kuin esitestissä. Lopullinen mittaustulos näkyy oikea puoleisessa kuvaajassa punaisina rasteina. Mikäli kaikkien finaalistin mittausten arvot ovat alle standardin mukaisen hyväksyntärajan, laitteen emissiotasot täyttävät suuntaa antavasti standardin mukaiset vaatimukset. Ohjelman suoritus tulee lopettaa hallitusti ohjelman oikeassa yläkulmassa sijaitsevasta *STOP PROGRAM* -painikkeesta.

LIITE 11: SÄTEILEVÄN IMMUNITEETIN TESTAAMINEN LABVIEW-SOVELLUKSELLA

Säteilevän emissiosovelluksen lisäksi toteutettiin vastaava LabVIEW-pohjainen testaussovellus säteilevän immunitetin testaamiseen. Immunitettisovelluksen etupaneeli on esitetty alla olevassa kuvassa 1.



KUVA 1. Säteilevän immunitetin LabVIEW-testaussovellus.

Ennen testauksen aloittamista laitteistolle tehdään samat esivalmistelut kuin testattaessa säteilevää immunitettä EMS-K1:llä. Tämän jälkeen käynnistetään LabVIEW-sovellus. Ohjelmassa on esivalittuna standardin EN 55022 mukaiset testiparametrit.

Testissä käytettävä kentän voimakkuus voidaan valita *Field strength* -kentästä. Ohjelma sisältää testitasoja 3, 10, 15 ja 20 V/m vastaavat kalibrointitiedostot. Jos käyttäjä haluaa itse määrittellä testitason ja käytettävän kalibrointitiedon, tehdään valinta *Custom calibration file and custom field strength*. Tämän jälkeen sovellus käyttää *PA2 calibration file* -kentässä määritellyä kalibrointitiedostoa. Kalibrointitiedosto ei sisällä metatietoa kalibroinnista, joten käyttäjän tulee lisäksi määrittellä kalibrointitiedoston kalibrointitaso *RefCalFieldStrength*-kentässä. Varsinainen testitaso määritetään kenttään *Custom Field strength*. Tällä tavoin millä tahansa kalibrointitiedostolla voidaan ajaa käyttäjän valitsemaa kentän voimakkuutta. Testeissä on kuitenkin suositeltavaa käyttää kalibrointitiedostoa vastaavaa kentän voimakkuutta, koska muun tasoisten kenttien tuottamiseen käytettävät signaaligeneraattorin tasot ovat laskennallisia, eivät todellisia kammion kentän voimakkuuteen perustuvia tasoja.

Kaapeli- ja SLine-korjaukset sisältävät tiedostot syötetään kenttiin *GenToAmp CalFile* ja *AmpToSLine CalFile*. Testin taajuusväli määritetään *Start freq.* ja *Stop freq.* -kentillä. Taajuusvälin askelpituus

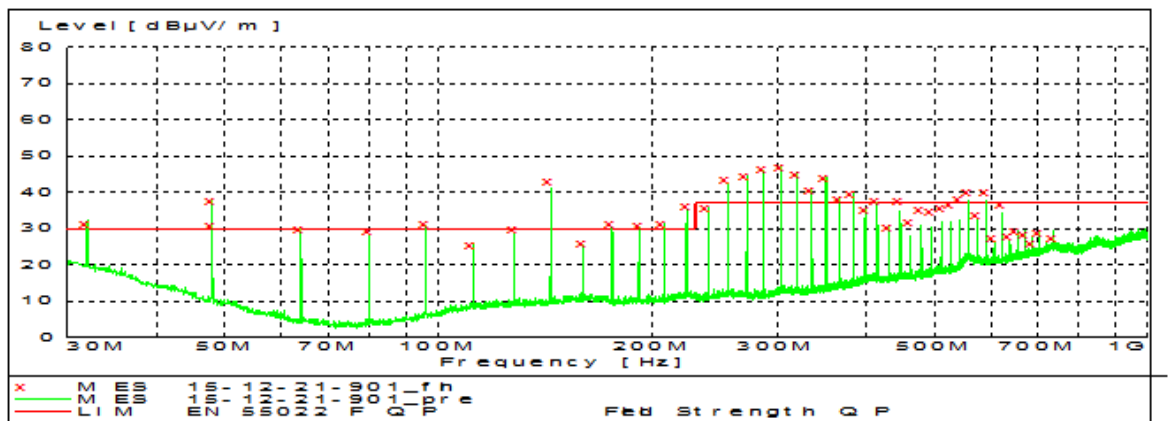
määritetään *Step size* -kenttään ja yhtä taajuutta ajetaan *Dwell time* -kentässä määritellyn ajan verran.

Testattava laite tulee valmistella ennen testauksen aloittamista samoin kuin testattaessa säteilevää immunitettä EMS-K1:llä. Testaus aloitetaan *START SCAN* -painikkeesta, minkä jälkeen ohjelma pyytää käyttäjää kytkemään tehovahvistimen toimintatilaan *OPERATE*-painikkeesta. Testaus käynnistyy, kun käyttäjä valitsee *OK*. *SYSTEM INIT OK* -valo kertoo onko testausohjelmisto on löytänyt signaaligeneraattorin. Skannauksen ollessa käynnissä *SCAN STATUS* -valo palaa. Lisäksi kun kammioon ajetaan kenttää, *RF STATUS* -valo palaa, eikä kammion ovea tule tällöin avata.

Testi voidaan tarvittaessa pysäyttää *BREAK*-painikkeesta; painamalla sitä uudelleen testi jatkuu samasta kohtaa. Valitsemalla *Continuous scanning* uusi testi alkaa aina automaattisesti edellisen päätyttyä. Painamalla *RESTART* testi alkaa alusta ja skannaus pysähtyy *STOP SCAN* -painikkeesta. Jos skannaus halutaan peruuttaa kesken testin, se tulee aina sulkea hallitusti *STOP SCAN* -painikkeesta, jottei RF-kenttä jää kammioon päälle. Myös ohjelman suoritus tulee lopettaa hallitusti *STOP PROGRAM* -painikkeesta.

LIITE 12: VERIFIOINTIMITTAUSTULOKSIA

Customer:	Savonia-AMK, Espotel Oy
EUT:	Referenssisäteilijä
Date of testing:	21.12.2015
Test ID:	15-12-21-901
Test method / Antenna polarization / Antenna height / Turn table position	CISPR 22 (30 – 1000 MHz) Radiated Emissions CLASS B Pre: VER - HOR / 1,0 m ja 3,0 m / 0 – 315 deg, 45 deg step Fin: VER - HOR / 1,0 m - 4,0 m / 0 – 360 deg
Measurement equipment:	Test receiver: ESU 40, Measurement antenna: CBL 6141
Ambient condition (Temp / RH):	? C / ? %RH
EUT configuration:	Referenssisäteilijälle lisätty metallikotelo ja virtalähteenä 3 AA paristoa (4,5 V).
Operator:	Mika Lovén

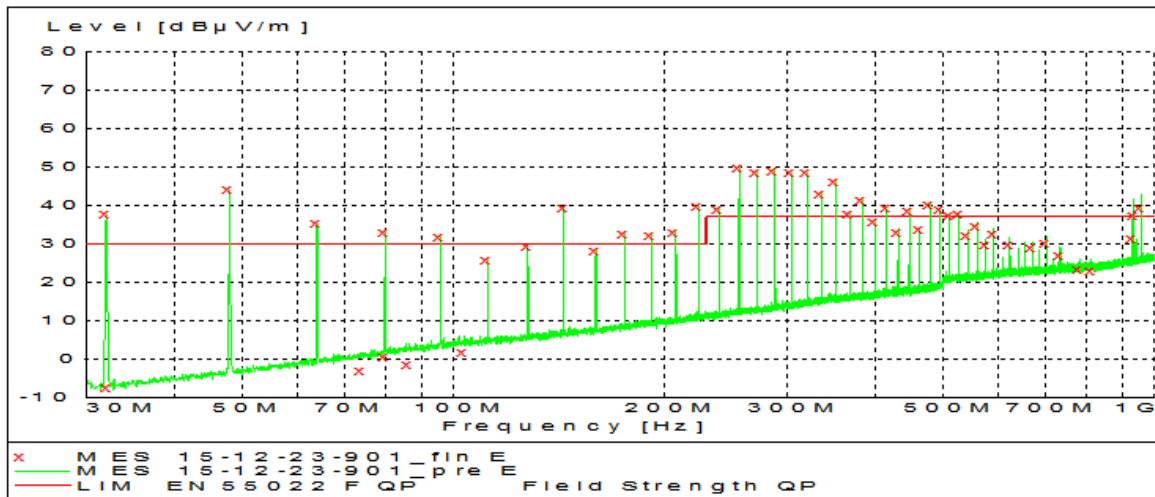


KUVIO 1. Referenssisäteilijän emissiot Savonian EMC-laboratoriossa mitattuina.



KUVA 1. Referenssisäteilijän mittaus Savonian EMC-laboratoriossa.

EUT:	Referenssisäteilijä
Date of testing:	23.12.2015
Test ID:	15-12-23-901
Test method	S-Line 700 (30 – 1000 MHz) Radiated Emissions
Measurement equipment:	Test receiver: ESCS 40, Measurement antenna: S-Line Built-In
EUT configuration/notes:	Referenssisäteilijä metallikoteloitu ja toimii kolmella AA-paristolla (4,5 V). Mittauksia verrataan mittaukseen 15-12-21-901 ja SLine:lle määritellään korjauskertoimet mittauserojen perusteella.
Operator:	Mika Lovén

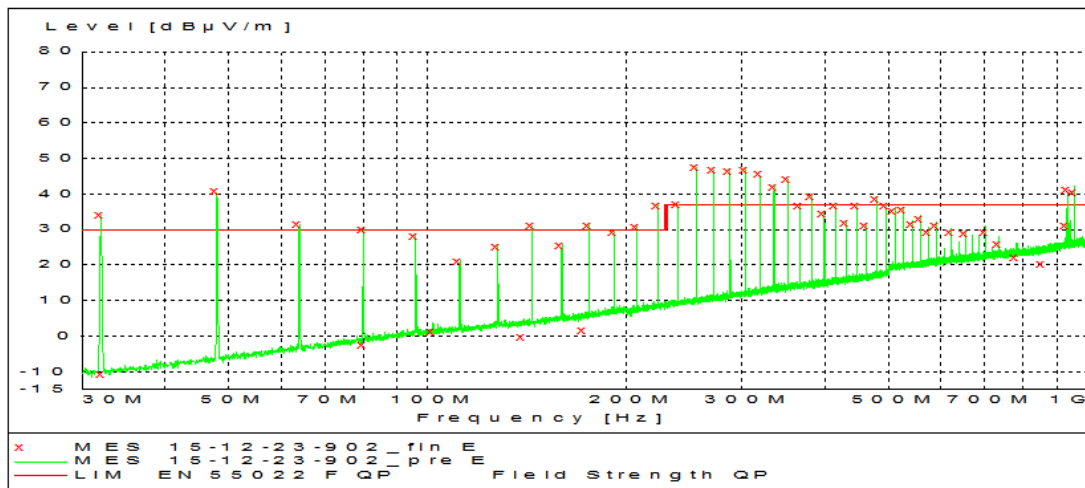


KUVIO 2. Referenssisäteilijän emissiot SLinessä mitattuina.



KUVA 2. Referenssisäteilijän mittaus SLinessä.

EUT:	Referenssisäteilijä
Date of testing:	23.12.2015
Test ID:	15-12-23-902
Test method	S-Line 700 (30 – 1000 MHz) Radiated Emissions
Measurement equipment:	Test receiver: ESCS 40, Measurement antenna: S-Line Built-In
EUT configuration:	Käytössä on tuloksista 15-12-21-901 ja 15-12-23-901 lasketut kalibrointikertoimet SLine_calib_151223.
Operator:	Mika Lovén



KUVIO 3. SLine:ssä mitatut referenssisäteilijän emissiot SLine-kalibroinnin jälkeen.

LIITE 13: ARDUINON KOODI IMMUNITEETTITESTISSÄ

```

// Mika Lovén, 26.8.2016
// Radiated immunity Arduino emc-test software:

// Arduino measures analog voltages and sends results to serial.
// Serial monitor can be used in PC to check if Arduino stays alive
// while stressed by strong RF-radiation.

int analogPin = 1;          // measurement pin
long unsigned tick = 0;

void setup() {
  pinMode( analogPin, INPUT);
  digitalWrite( analogPin, HIGH);
  analogReference ( DEFAULT ); // aref = 5 V
  // optionally external AREF pin 0-5 V can be applied
  // analogReference ( EXTERNAL );

  Serial.begin(9600);
  Serial.println( "Serial monitor opened" );
}

void loop() {
  // analog read
  int ADRead = analogRead( analogPin );
  Serial.print( String(tick) + " ADC = " + String(ADRead) + " ");

  // calculates measured voltage from ADRead
  // ADRead / ADReadMax (1032) * ADMaxVoltage (5 V) * 2
  // (measurement point is between two same sized resistors)
  float voltage = ( (float)ADRead / (float)1023.0 ) * (float)10.0;
  Serial.println( " " + String(voltage) + " V");

  // waits for a second before next loop
  delay(1000);
  tick++;
}

```