

Joakim Pirinen

GTEM-kammion kalibrointimittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikka

Insinöörityö

25.11.2013

Tekijä Otsikko	Joakim Pirinen GTEM-kammion kalibroitimittaukset
Sivumäärä Aika	37 sivua 25.11.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Ohjaaja	yliopettaja Matti Fischer
<p>Tässä insinöörityössä mitattiin Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratorion säteilevien häiriöiden immuniteettimittauksissa käytettävän GTEM-kammion sähköiset ominaisuudet.</p> <p>Työssä valmistettiin GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien mittausta varten IEC 62132-2 -standardin mukaiset monopoli-antenni ja silmukka-antenni. Antennien ominaisuudet mitattiin ja niiden mittaustuloksia tulkittiin standardin ohjeiden mukaisesti.</p> <p>Valmistetuilla antenneilla mitattiin GTEM-kammion sähkökenttä ja magneettikenttä taajuusalueella 1 MHz - 1 GHz. Apuna käytettiin signaaligeneraattoria ja spektrianalyysiaattoria. GTEM-kammion ominaisimpedanssi mitattiin piirianalyysaattorilla taajuusalueella 1 MHz - 3 GHz.</p> <p>Mittaustuloksena saatiin ominaisimpedanssikäyrä sekä kuvaajat sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudesta eri taajuuksilla. Tuloksista voitiin havaita, että kammion impedanssi pysytteli suhteellisen lähellä 50 Ω koko mitatulla taajuusalueella. Mitattu sähkökenttä oli voimakkaampi matalilla taajuuksilla kuin standardissa esitetty ideaalimalli. Mitattu magneettikenttä oli lähes standardin mallin mukainen.</p>	
Avainsanat	GTEM-solu, EMC, ominaisimpedanssi

Author Title	Joakim Pirinen Calibration Measurements of GTEM-Cell
Number of Pages Date	37 pages 25 November 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Instructor	Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The objective of this thesis was to measure electrical features of GTEM-cell. The measured GTEM-cell is owned by Metropolia University of Applied Sciences. The cell is used in electromagnetic compatibility testing for radiated immunity. The measured electrical features were characteristic impedance, amplitude of the electric field and amplitude of the magnetic field in the GTEM-cell.</p> <p>In this thesis a monopole antenna and a loop antenna were built according to the instructions given in IEC 62132-2 standard for the electric and magnetic field strength characterization in the GTEM-cell. The antennas were measured and the results were applicable for the measurements.</p> <p>Antennas were used in field strength characterization measurements of the GTEM-cell. Measurements were conducted from one megahertz up to one gigahertz. Characteristic impedance of the GTEM-cell was measured with network analyzer. The frequency range of the measurement was from one megahertz up to three gigahertz.</p> <p>The results of this thesis are diagrams for the characteristic impedance, the electric field strength and magnetic field strength. The characteristic impedance was near 50 Ω through the frequency span. The electric field differed from standard in lower frequencies. The magnetic field was adequate.</p>	
Keywords	GTEM-cell, EMC, Characteristic impedance

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	2
2.1	Sähköiset häiriölähteet	2
2.1.1	Luonnolliset häiriölähteet	3
2.1.2	Keinotekoiset häiriölähteet	4
2.2	Häiriöiden kytkeytyminen	6
2.2.1	Johtumalla kytkeytyminen	6
2.2.2	Kapasitiivinen kytkeytyminen	7
2.2.3	Induktiivinen kytkeytyminen	9
2.2.4	Säteilemällä kytkeytyminen	11
2.3	EMC-mittaukset	14
3	Kalibrointilaitteet	16
3.1	GTEM-kammio	16
3.2	Antennit	19
3.2.1	Monopoliantenni	20
3.2.2	Silmukka-antenni	22
3.3	Piirianalysaattori	24
3.4	Spektrianalysaattori ja signaaligeneraattori	24
4	GTEM-kammion impedanssin mittaust	26
5	GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien mittaust	28
5.1	Kalibrointiantennien testimittaukset	28
5.1.1	Monopoliantennin testimittaukset	28
5.1.2	Silmukka-antennin testimittaukset	29
5.2	GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien mittauksien mittausjärjestely	30
5.3	Sähkö- ja magneettikenttien mittaukset	32
6	Yhteenveto	35
	Lähteet	36

Lyhenteet

EMC	Electromagnetic Compatibility; sähkömagneettinen yhteensopivuus
ESD	Electrostatic Discharge; sähköstaattinenpurkaus
FFT	Fast Fourier Transform, tehokas algoritmi Fourier'n muunnoksen ja sen käänteismuunnoksen laskemiseksi
GTEM-cell	Gigahertz Transverse Electromagnetic Mode-cell; yksiporttinen TEM-kammio, jonka avulla voidaan tehdä mittauksia useiden gigahertzin taajuuksiin asti
IEC	International Electrotechnical Commission; sähköalankansainvälinen-standardisoinmisjärjestö
RF	Radio Frequency; radiotaajuus
TEM	Transverse Electromagnetic Mode; Sähkömagneettisen kentän etenemismuoto

1 Johdanto

Metropolia Ammattikorkea koulu on suurin ammattikorkeakoulu Suomessa. Oppilaitoksella on EMC-laboratorio, jossa voidaan suorittaa erilaisia säteilevien häiriöiden sieto- ja emissiomittauksia. EMC-laboratorio ei ole pätevän tahon akkreditoima mittauslaboratorio. Tämän vuoksi Metropolia Ammattikorkeakoulu ei voi tarjota asiakkaille virallisia EMC-mittauksia. Asiakkaat voivat tilata mittauksia, joilla saadaan alustavia tuloksia heidän laitteensa kyvystä sietää häiriöitä ja kuinka paljon laite säteilee ympäristöönsä häiriöitä.

Tässä työssä oli tavoitteena mitata Metropolia Ammattikorkea koulun EMC-laboratorion säteilevien häiriöiden immunitaettimittauksissa käytettävän GTEM-kammion sähköiset ominaisuudet. Tavoitteena oli mitata GTEM-kammion ominaisimpedanssi sekä sähkö- ja magneettikentän voimakkuus. Tavoitteena oli valmistaa standardin IEC 62132-2 -mukaiset mitta-antennit kenttien voimakkuuksien mittaamista varten.

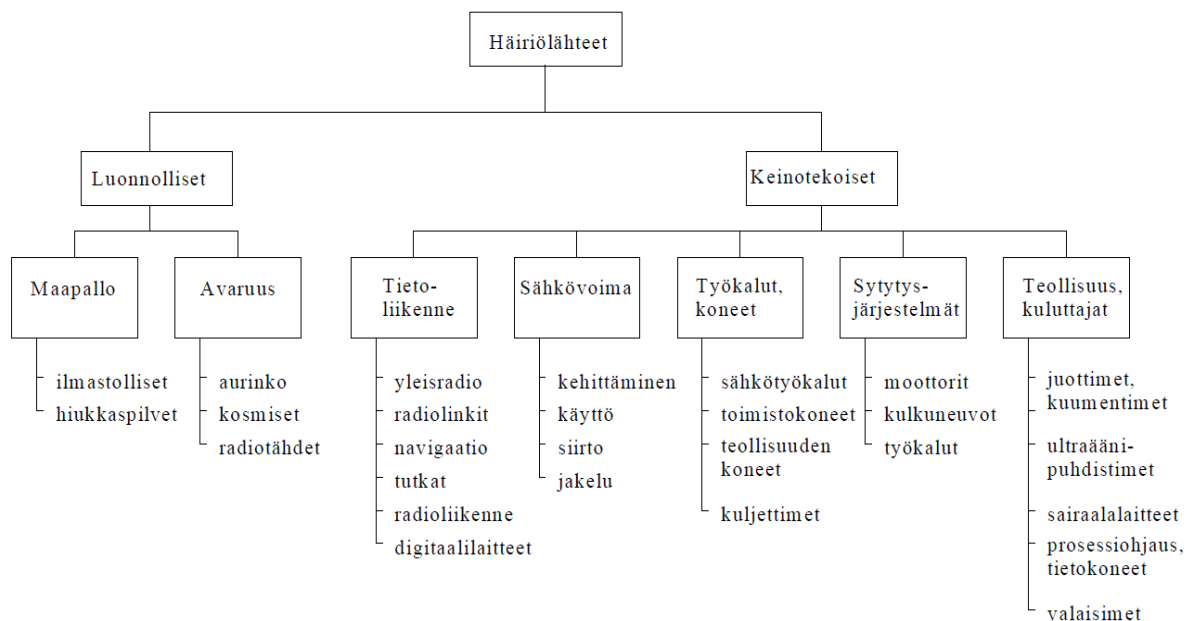
Työssä noudatetaan IEC 62132-2 -standardin ohjeita. IEC 62132-2 on standardi säteilevien häiriöiden immunitaettimittauksia varten TEM- ja GTEM -kammioilla.

2 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC muodostuu kahdesta osa-alueesta, laitteen aiheuttamien häiriöiden rajoittamisesta ja laitteen kyvystä sietää muiden laitteiden aiheuttamia häiriöitä. Laitteen aiheuttamina häiriöinä pidetään kaikkia niitä sähkömagneettisia ilmiöitä, jotka eivät ole laitteen hyötykäyttöön tarkoitettuja. Sähkölaitteiden ja -järjestelmien täytyy toimia moitteettomasti omassa käyttöympäristössään. Tämä saavutetaan sähkölaitteen hyvällä suunnittelulla. Hyvin suunniteltu sähkölaite ei aiheuta kohtuuttoman suurta haittaa ympärillä oleville sähkölaitteille, ja laite toimii tyydyttävästi muiden laitteiden aiheuttamassa häiriöympäristössä. [1, s. 4 - 5; 2, s. 15 - 16.]

2.1 Sähköiset häiriölähteet

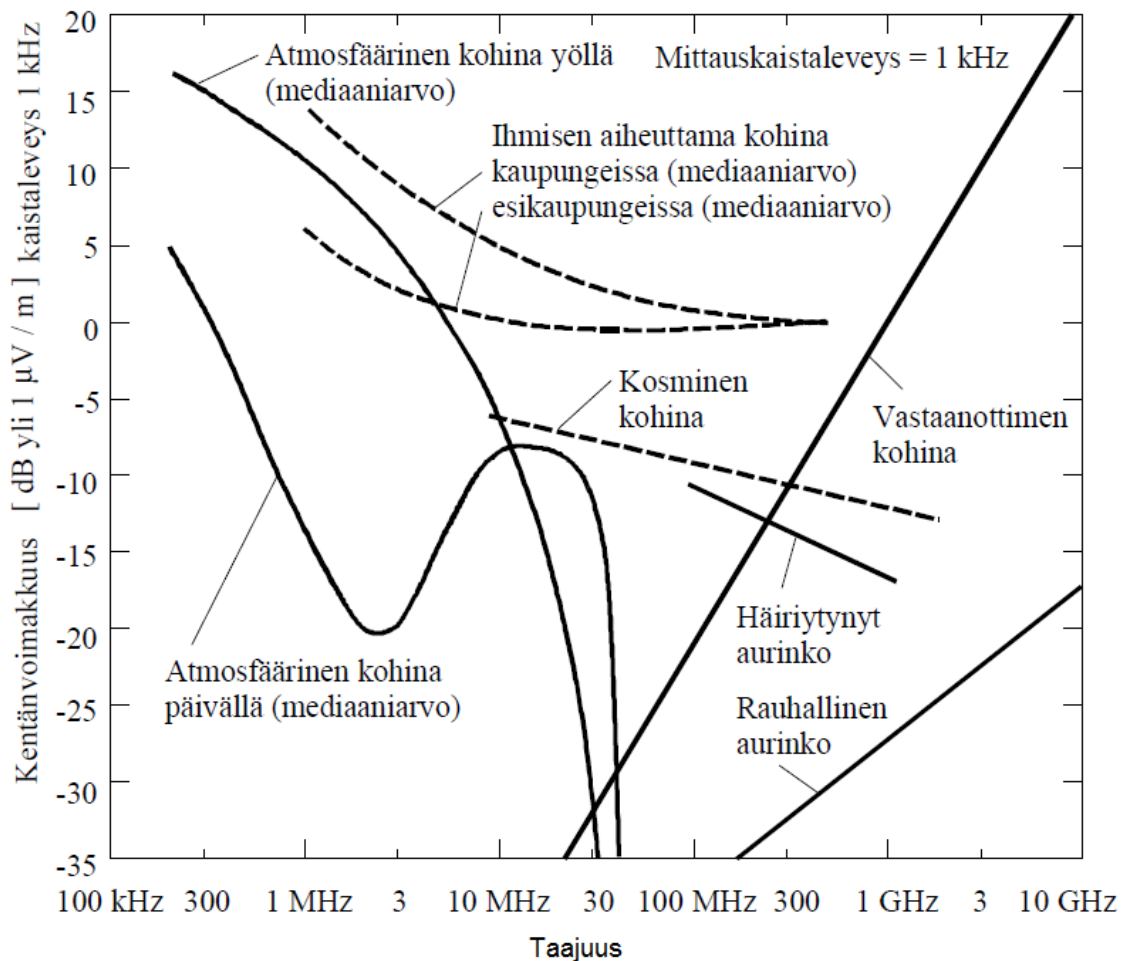
Sähköiset häiriöt voidaan jakaa ryhmiin usealla eri tavalla. Jako voidaan tehdä alkuperän, ominaisuuksien, etenemistavan tai kytkeytymisen perusteella. Yleinen jakoperuste on luonnolliset häiriöt ja keinotekoiset häiriöt. Luonnollisia häiriöitä aiheuttavat erilaiset luonnonilmiöt, kuten ukkonen ja aurinkotuuli. Luonnolliselle häiriölle on tyypillistä se, että se on hetkellinen ja lyhytkestoinen. Keinotekoiset häiriöt saavat alkunsa toisista sähkölaitteista ja sähköisistä järjestelmistä, kuten esimerkiksi tutkasta tai radiolinkistä. Kuvassa 1 esitetään eri tavoin vaikuttavia ja eteneviä sähköisten häiriöiden lähteitä. [2, s. 17 - 19; 3, s. 4 - 5.]



Kuva 1. Luonnollisia ja keinotekoisia häiriölähteitä [3]

2.1.1 Luonnolliset häiriölähteet

Luonnossa esiintyvistä lähteistä ukkonen on merkittävin häiriölähde. Ukkospilven alla maan pinnalla voi olla voimakkuudeltaan jopa 10 kV/m:n sähkökenttä. Kun salama iskee, pilven varaus purkautuu nopeasti. Tyypillisen salaman kestoaika on alle kaksi sekuntia ja purkausvirtapulssin kesto 30 mikrosekuntia. Virtapulssin nousuaika on tyypillisesti 0,5 mikrosekuntia. Tämä aiheuttaa voimakkaita ja nopeasti muuttuvia sähkö- ja magneettikenttiä. Nämä kentät saattavat indusoida jännitteitä johdinsilmukoihin ja aiheuttaa jännite-eroja johtimien välille. Suora salamanisku sähköverkkoon tai sähkölaitteeseen aiheuttaa häiriötä, rikkoo laitteita ja luo suuria syöksyvirtoja sähköverkkoon. Kuvassa 2 esitetään erilaisia säteilemällä eteneviä sähköisiä häiriöitä. Kuvasta 2 käy ilmi häiriölähde ja häiriön voimakkuus eri taajuusalueilla. [2, s. 17 - 18; 3, s. 4 - 6, 7, s. 93 - 95.]

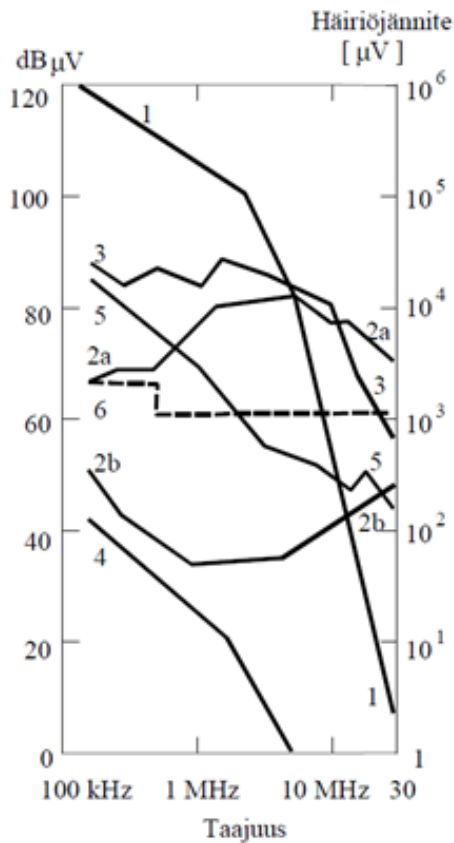


Kuva 2. Erilaisten säteilemällä etenevien sähköisten häiriöiden voimakkuuksia [3]

Kosminen säteily on ukkosen jälkeen merkittävin luonnollinen häiriölähde. Kosmista säteilyä saapuu auringosta sekä kosmisena taustasäteilynä. Auringon aiheuttama kosminen säteily on huomattavasti suurempi ongelma kuin kosminen taustasäteily. Auringon pilkut ja erilaiset purkaukset pintakerroksissa vaikuttavat auringosta peräisin olevan säteilyn ja aurinkotuulen voimakkuuteen. Aurinkotuuli kostuu sähköisesti varautuneista hiukkasista, ja siksi se häiritsee maan kiertoradalla olevia satelliitteja. Voimakkaat aurinkomyrskyt vaikuttavat myös maassa oleviin laitteisiin. Kosminen taustasäteily on mikroaaltosäteilyä, joka on jakautunut suhteellisen tasaisesti havaittavaan maailmankaikkeuteen. Kosmisen taustasäteilyn spektrin huippu on 282 GHz:n taajuudella, mutta aiheuttaa häiriöitä pääasiassa 10 - 1 000 MHz:n taajuudella. [2, s. 18; 4, 5, 6, s. 45.]

2.1.2 Keinotekoiset häiriölähteet

Keinotekoiset häiriöt ovat ihmisen aikaansaannosta. Keinotekoisia häiriöitä syntyy tietoisesti ja tahattomasti. Tietoisesti tuotetut häiriölähteet ovat laitteita, joiden on tarkoitus säteillä sähkömagneettista energiaa ympäristöönsä, esimerkiksi tutka, radiolähetin ja matkapuhelin. Tällaisten laitteiden ei ole tarkoitus häiritä tahallisesti muita laitteita. Laitteet, joiden ei ole tarkoituksena säteillä ympäristöönsä sähkömagneettista energiaa synnyttävät tahattomia häiriöitä. Tällaisia häiriölähteitä ovat esimerkiksi sähkömoottorit, loistevalaisimet ja erilaisten kuormien kytkeminen verkkoon. Kuvassa 3 (ks. seuraava sivu) esitetään erilaisia sähkölaitteiden verkkoon syöttämiä häiriöjännitteitä.



Kuva 3. Erilaisten laitteiden verkkoon syöttämiä häiriösignaaleja; 1) sähköinen pyörimisnopeuden tyristorisäätäjä; 2a) kommutaattorikone ilman suodatin-kondensaattoria; 2b) kommutaattorikone; suodatinkondensaattori kytketty; 3) pesukone (kytkin); 4) purkauslamppu; 5) silitysrauta (kytkin); 6) erään suosituksen mukainen suurin sallittu arvo [3]

Ihminen aiheuttaa toiminnallaan helposti staattisen sähköön purkauksia. Ihmiseen varautunut jännite riippuu ilman kosteudesta, materiaalipareista ja etäisyyksistä materiaalien välillä. Huonoissa olosuhteissa ihmiseen voi syntyä jopa 10 - 25 kV:n suuruinen sähköstaattinen jännite. Varaus pääsee purkautumaan, kun ihminen koskettaa sähkölaitteen metallisia osia tai käyttää metallista työkalua, joka osuu metallisiin osiin. Tällöin tapahtuu staattisen sähköön purkaus (ESD-purkaus).

Staattisen sähköön purkaukselle on tyypillistä purkauksen pulssimuotoisuus, satunnaisuus ja laajakaistaisuus. Ihmisen tuntoraja on 3 kV. Tätäkin pienemmät purkaukset voivat vaurioittaa komponentteja. Erittäin herkkiä komponentteja ovat erilaiset fetit, jo muutaman kymmenen voltin varausjännitteen purkautuminen saattaa aiheuttaa ongelmia. Näin pientä purkausta ihminen ei tunne, eikä siitä synny näkyvää kipinää tai ääntä. Tällaiset näkymättömät purkaukset voivat aiheuttaa elektronisiin laitteisiin piileviä vikoja ja käyttöiän lyhenemistä. Staattisen sähköön monimuotoisuus tekee sähkölaittei-

den suunnittelusta haasteellista. Lähteinä voivat toimia ihminen, kotieläin, laitteessa olevat liikkuvat osat, kuljetuslaitteet ja jäähdytysilma. Purkausvirran aiheuttama magneettikenttä voi häiritä laitteita, vaikka purkaus ei suoraan kohdistuisi laitteeseen. Suojakomponentteina käytetään varistoreja ja erilaisia diodikytkentöjä. [2, s. 18 - 19; 3, s. 4 - 5; 7, s. 68 - 70, 79, 85.]

2.2 Häiriöiden kytkeytyminen

Sähkömagneettisilla häiriöillä on useita erilaisia kytkeytymistapoja. Niistä tärkeimmät ovat

- johtumalla kytkeytyminen
- kapasitiivinen kytkeytyminen
- induktiivinen kytkeytyminen
- sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen säteilemällä.

Laitteelle ei aiheudu ongelmia sähkömagneettisessa ympäristössä, jos kuvassa 4 esiteltävä häiriöketju ei toteudu. Häiriöiden kytkeytymisketju voidaan katkaista esimerkiksi riittävällä koteloinnilla. [2, s. 21, 3, s. 7.]



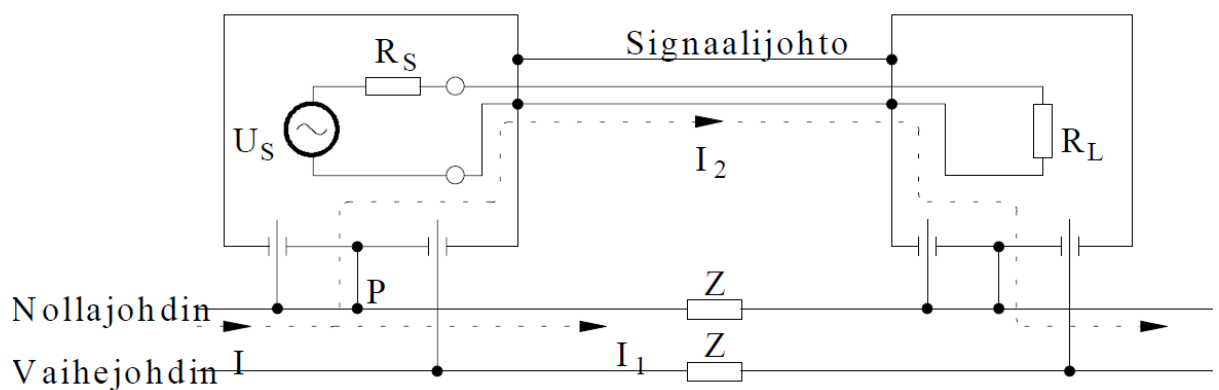
Kuva 4. Häiriöiden kytkeytymisketju [2]

2.2.1 Johtumalla kytkeytyminen

Häiriöisestä ympäristöstä voi kytkeytyä signaalijohtimeen häiriöitä usein eri tavoin. Signaalijohdin kuljettaa siihen kytkeytyneen häiriön eteenpäin laitteeseen. Erityisesti matalataajuiset sähkömagneettiset häiriöt kytkeytyvät herkästi johtumalla. Johtumalla

eteneviä häiriöitä voidaan estää signaalijohtojen matalalla maadoitusimpedanssilla ja oikeanlaisella suodatuksella.

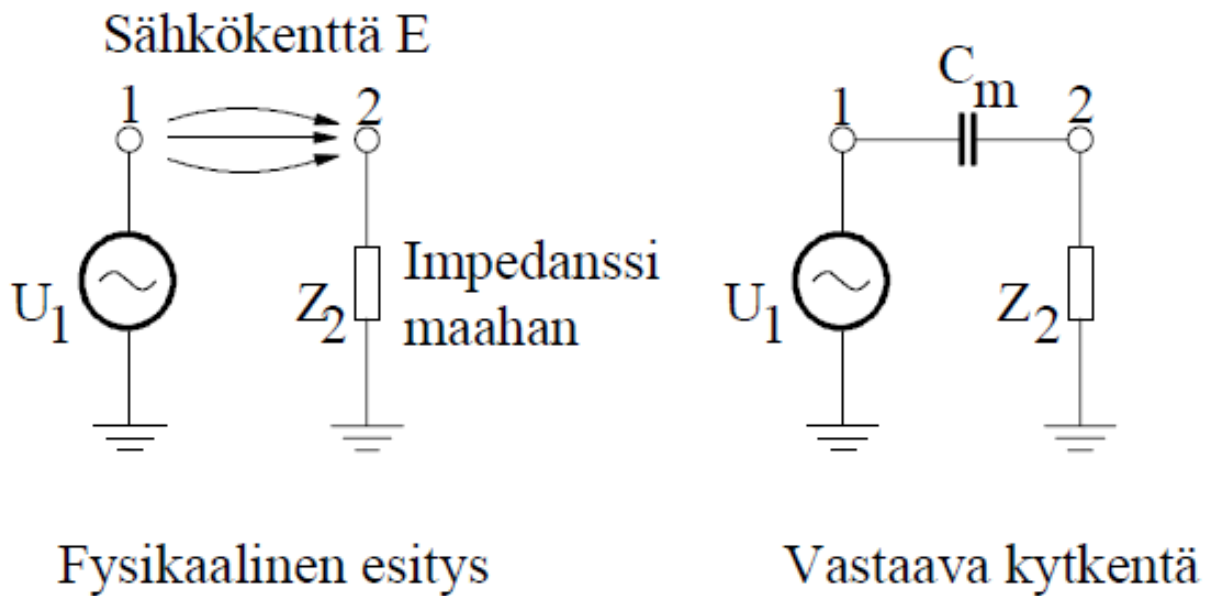
Yhteisimpedanssi on toinen tyypillinen tapa johtumalla kytkeytyville häiriöille. Kuvassa 5 esitetään kytkentä, jossa kahden eri laitteen maadoitus on toteutettu samalla johtimella. Nollajohtimessa virta I jakautuu pisteessä P siten, että osa virrasta kulkeutuu signaalijohtimen vaippaa pitkin ja osa varsinaista nollajohdinta pitkin. Näin häiriöt pääsevät kytkeytymään yhteisen maaimpedanssin kautta laitteesta toiseen. Tällainen tilanne voidaan välttää käyttämällä 3- tai 5-johdinjärjestelmää. Molemmissa järjestelmissä on erillinen suojajohdin, johon laitteiden kotelot ovat kytketty. Laitetekeloiden välille ei synny jännite-eroja, koska suojajohdin on virraton. [2, s. 21 - 27; 3, s. 10; 7, s. 24.]



Kuva 5. Yhteisen impedanssin kautta tapahtuva kytkeytyminen [3]

2.2.2 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Jännitteet muodostavat eri potentiaalien välille sähkökentän. Kahden eri potentiaalissa olevan johdon välille syntyy kondensaattorin tapainen kytkentä. Tämän sähkökentän yli voi kytkeytyä häiriöjännitteitä johdosta toiseen. Kuva 6 esittää kapasitiivista kytkeytymistä kahden eri johtimen välillä.



Kuva 6. Kapasitiivinen kytkeytyminen kahden johtimen välillä [3]

Kaava 1 kuvaa kapasitiivisesti kytkettyä häiriöjännitettä.

$$U_h = \frac{Z_2}{\frac{1}{j\omega C_m} + Z_2} U_1 \quad (1)$$

U_h = kapasitiivisesti kytketty jännite [V]
 C_m = johtojen välinen keskinäiskapasitanssi [F]
 U_1 = häiritsevän johdon jännite [V]
 ω = kulmataajuus; $2\pi f$
 Z_2 = signaalijohdon vastus

Jos keskinäiskapasitanssin C_m aiheuttama reaktanssi häiriön taajuudella on suurempi kuin signaalijohdon impedanssi Z_2 , kaava yksinkertaistuu seuraavaan muotoon:

$$|U_h| = 2\pi f Z_2 C_m U_1 \quad (2)$$

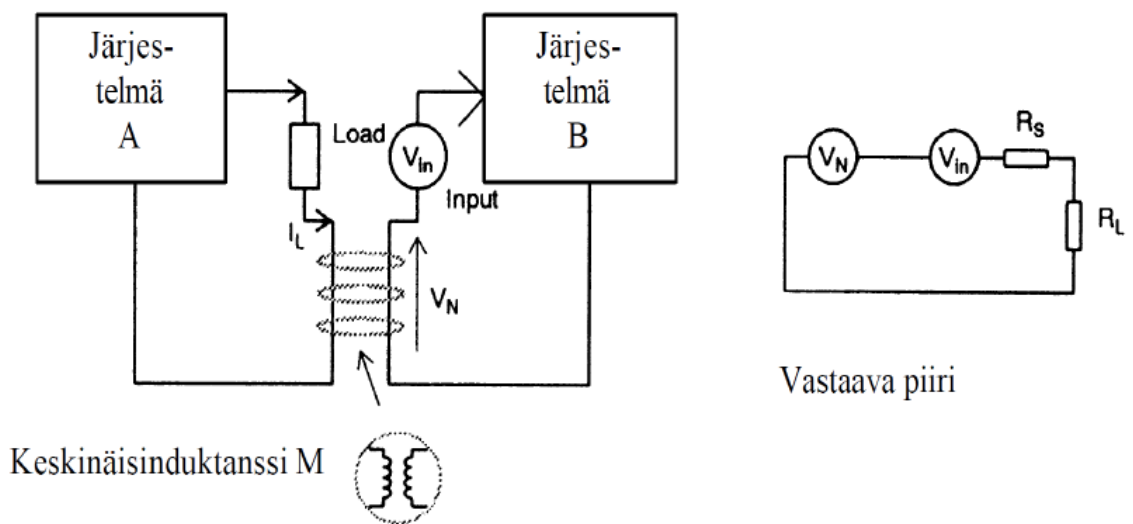
Kaavasta 2 ilmenee selvästi, että kytketty häiriöjännite on riippuvainen useasta tekijästä: taajuudesta f , signaalijohdon resistanssista Z_2 , johtojen välisestä keskinäiskapasitanssista C_m ja häiritsevän johdon jännitteestä U_1 .

Kapasitiivisilta häiriöiltä ei pystytä täydellisesti suojautumaan. Tilannetta pystytään parantamaan muun muassa välttämällä muovikoteloita, ylimääräisiä eristekerroksia,

välttämällä yhdensuuntaista johdotusta ja kasvattamalla johtimien välistä etäisyyttä. Muovikotelot ja eristeet eivät tarjoa suojaa sähkö- ja magneettikenttien kytkeytymiselle, vaan päinvastoin lisäävät piirin välistä kapasitanssia. [1, s. 222 - 226; 2, s. 21 - 25; 3, s. 7 - 21; 7, s. 35.]

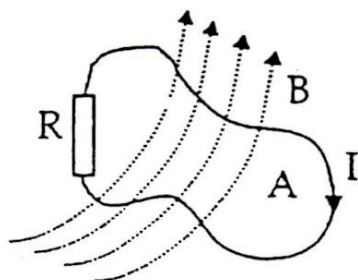
2.2.3 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivinen kytkeytyminen liittyy magneettikentän vaikutukseen. Kahden piirin välisen keskinäisinduktanssin kautta tapahtuva kytkeytyminen esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Induktiivinen kytkeytyminen [2]

Sähkö- ja magneettikenttien olemassa olo ei sinänsä aiheuta häiriötä sähkölaitteissa. Kentissä tapahtuvat muutokset aiheuttavat häiriötä.



Kuva 8. Faradayn laki [7]

Kuva 8 (ks. edellinen sivu) havainnollistaa Faradayn induktiolakia. Johdin silmukkaan indusoituva sähkömotorisen voiman suuruus on silmukan läpi kulkevan magneettivuon muutosnopeus vastakkaismerkkisenä. Magneettivuo muuttuu, kun johtimet liikkuvat. Faradayn induktiolaki esitetään kaavassa 3:

$$u = - \frac{d\Phi_M}{dt} \quad (3)$$

u = indusoitunut jännite
 dt = ajan muutosnopeus
 $d\Phi_M$ = magneettivuon muutosnopeus

Ampéren lain mukaan johdossa kulkeva virta synnyttää ympärilleen magneettikentän, joka vaimenee kääntäen verrannollisesti etäisyyteen. Johtimen ulkopuolinen magneettikenttä on huomattavasti voimakkaampi kuin johtimen sisällä oleva. Magneettikentän vaikutuksen alaisuuteen joutuviin johdin silmukoihin indusoituu häiriöjännitteitä.

Johtimen ympärilleen aiheuttaman magneettikentän voimakkuus saadaan laskettua kaavalla 4:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (4)$$

H = magneettikentän voimakkuus [A/m]
 I = häiritsevässä johtimessa kulkeva virta [A]
 r = häiriölähteen ja vastaanottavan piirin etäisyys toisistaan [m]

Piiriin tai johtimeen indusoitunut häiriöjännite saadaan kaavasta 5:

$$u = - \frac{d}{dt} \int_A \vec{B} \cdot \vec{dA} \quad (5)$$

u = indusoituneen jännitteen suuruus [V]
 A = johdin silmukan pinta-ala [m²]
 B = magneettivuon tiheys [T/m²]

Kaava 5 yksinkertaistuu kaavan 6 muotoon, jos magneettivuon tiheys pysyy vakiona koko johdinsilmukan alueella.

$$u = -\mu A \frac{dH}{dT} = -\frac{\mu A}{2\pi r} \frac{dI}{dt} \quad (6)$$

μ = tyhjiön permeabiliteetti [Vs/Am]
 H = magneettikentän voimakkuus [A/m]
 dI = virran muutosnopeus
 dt = ajan muutosnopeus

Indusoitunut jännite voidaan esittää myös keskinäisinduktanssin L_m kautta kaavan 6 mukaisesti:

$$u = L_m \cdot \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

L_m = keskinäisinduktanssi [H]
 ω = kulmataajuus; $2\pi f$
 I = virta [A].

Kaava 7 yksinkertaistuu kaavaksi 8, jos jännite on sinimuotoinen ja sisältää vain yhden taajuuskomponentin.

$$u = \omega L_m \cdot I \quad (8)$$

Induktiivisesta kytkeytymistä johtuvia häiriöitä voidaan ehkäistä välttämällä johdin silmukoita ja yhdensuuntaista johdotusta. Jos paluuvirtaa kuljettava johdin on lähellä me-nojohtoa, kumoutuu ulkopuolinen magneettikenttä lähes kokonaan. Kiertämällä johdot toistensa ympäri saadaan aikaan johdinpari, jolla on pieni hajakenttä ja ulkoiset magneettikentät kytkeytyvät huonosti. Laitteen sisäisten johtimien liike voi aiheuttaa magneettivuon muutoksia. Tämän vuoksi sisäiset johdot tulee kiinnittää. [1, s. 222 - 241; 2, s. 21 - 25; 3, s. 7 - 12; 7, s. 28.]

2.2.4 Säteilemällä kytkeytyminen

Sähkömagneettiset säteilevät häiriöt voivat edetä hyvin pitkiä matkoja. Lyhyet aallot voivat saapua jopa maapallon toiselta puolelta ionosfääristä heijastumalla. Korkea taajuiset häiriöt etenevät lähes suoraviivaisesti ja näin eivät kykene häiritsemään kovin kaukana olevia laitteita. Sähkömagneettinen häiriökenttä voi kytkeytyä suoraan sähkölaitteen sisäisen johdotuksen muodostamiin silmukoihin. Myös sähkölaitteen ulkoisiin liityntäjohtoihin voi kytkeytyä säteilevä häiriö. Kaapelin resonanssitaajuudella kytkeyty-

mismekanismi on voimakkain. Resonanssitaajuuden määrää kaapelin pituus ja siihen kytketyn kuorman reaktanssi. [2, s. 25; 3, s. 11 - 12.]

Kauko- ja lähikentälle on kaksi määritelmää: Maxwellin kriteeri ja Rayleighin kriteeri. Maxwellin kriteeri määrittää kauko- ja lähikentät etäisyyden perusteella, kun taas Rayleighin kriteeri perustuu antennin kokoon.

Maxwellin kriteerin mukaan, kun etäisyys häiriölähteeseen on noin $1/6 \lambda$, niin ollaan kaukokentässä

$$d > \frac{\lambda}{2\pi} \quad (9)$$

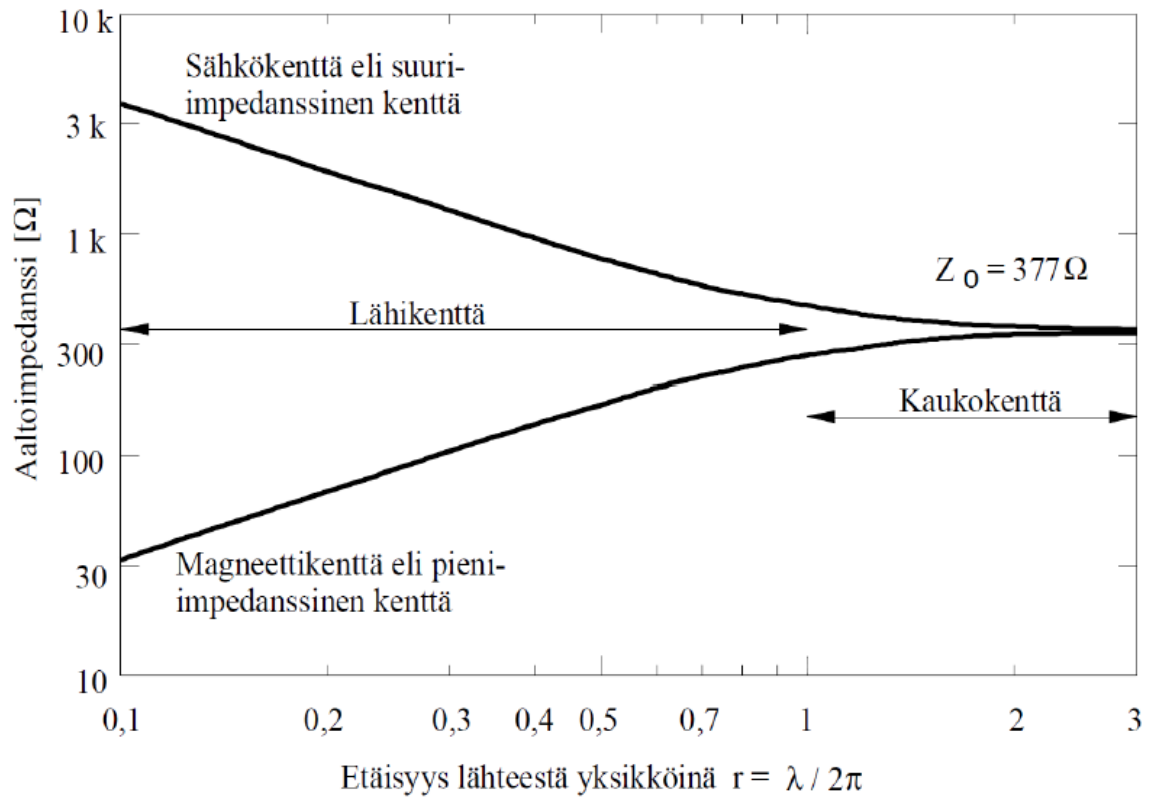
d = häiriölähteen etäisyys [m]
 λ = aallonpituus [m]
 $\pi \approx 3,1415$

ja Rayleighin kriteerin mukaisesti

$$d > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (10)$$

d = häiriölähteen etäisyys [m]
D = antennin suurin koko [m]
 λ = aallonpituus [m].

Sähkö- ja magneettikenttien suhde eli aaltoimpedanssi on avaintekijä säteilevän häiriön kytkeytymisessä johtavaan rakenteeseen. Aaltoimpedanssi on erilainen kauko- ja lähikentissä, kuvan 9 esittämällä tavalla.



Kuva 9. Aaltoimpedanssi lähi- ja kaukokentässä [3]

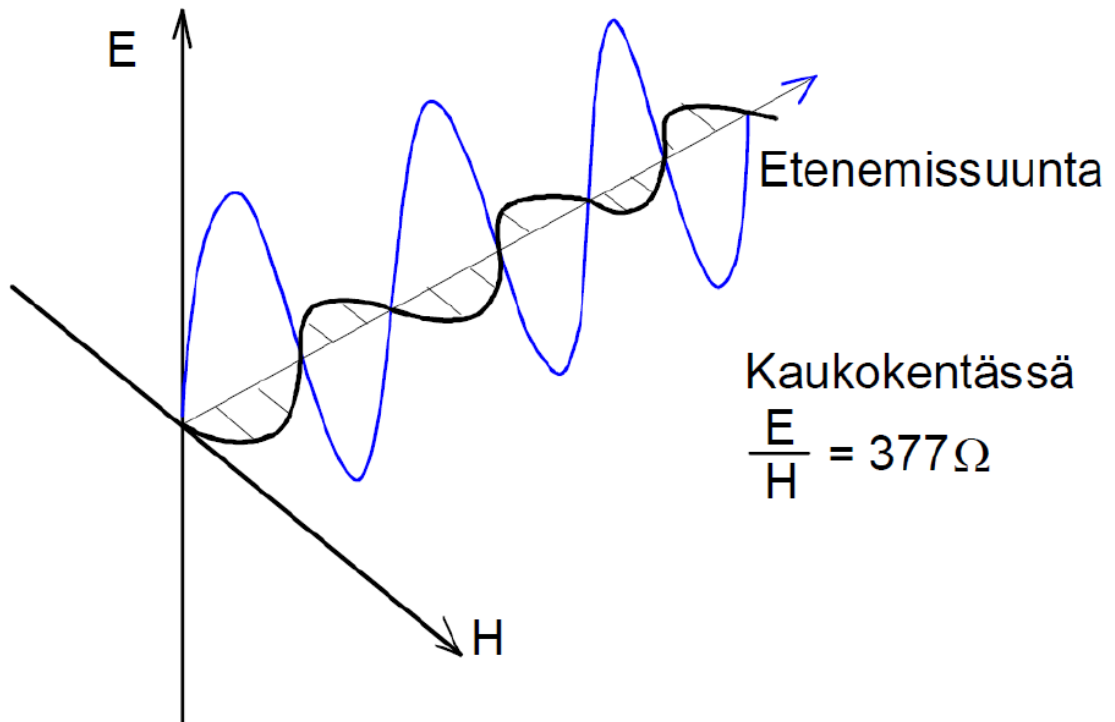
Sähkö- ja magneettikentät vaimenevat yhtä nopeasti etäisyyden kasvaessa. Kuvasta 9 voidaan havaita, että kaukokentässä aaltoimpedanssi on vakio. Kaukokentän aaltoimpedanssi on yhtä suuri kuin vapaan tilan aaltoimpedanssi Z_0 .

$$Z_0 = \frac{E}{H} = 377 \Omega \quad (11)$$

Z_0 = aaltoimpedanssi [Ω]

E = sähkökentänvoimakkuus [V/m]

H = magneettikentän voimakkuus [A/m].



Kuva 10. Tasoaalto [8]

Säteily etenee kaukokentässä aina tasoaaltona. Myös lähikentässä voi syntyä tasoaalto, jos aaltoimpedanssi on 377Ω . Kuvassa 10 on esitetty tasoaalto, sähkö- ja magneettikentät etenevät kohtisuoraan toisiaan vasten. Häiriölähteen ominaisuudet määräävät aaltoimpedanssin lähikentässä. Tämän vuoksi lähikenttää tarkasteltaessa sähkö- ja magneettikentät tulee käsitellä erikseen. Esimerkiksi korkeaimpedanssinen sähkökenttä syntyy korkeajännitteisestä ja matalavirtaisesta säteilijästä, kuten dipoliantenni. Pieni-impedanssinen magneettikenttä syntyy taas korkeavirtaisesta ja matalajännitteisestä säteilijästä, kuten silmukka-antenni.[1, s. 228 - 233.]

2.3 EMC-mittaukset

EMC-direktiivi asettaa laitteille sekä emission että immuuteetin raja-arvot. Emissiotes-teissä mitataan laitteen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt. Testeissä mitataan säteilyn voimakkuus ja johtamalla sähköverkkoon lähtevät häiriöt. Immuneettivaatimukset sisältävät testit laitteen toiminnalle, kun laite altistetaan häiriökentille sekä ukkosen ja staattisen sähkön ja sähköverkon häiriöiden vaikutukselle.

Säteilevien häiriöiden mittauspaiikkana toimii avoin mittapaikka tai häiriösuojattu mittausuone. Mitattava taajuusalue on tyypillisesti 30 MHz - 1 000 MHz. Sekä emissio-, että immunitteettimittaukset voidaan suorittaa samassa tilassa lähes samanlaisilla mittalaitteilla. Avoimen mittapaikan ja häiriösuojatun huoneen täytyy olla tarpeeksi suuria, koska mittaukset tehdään yleensä kaukokentässä. Kaukokentän olosuhteet täytyy täyttää koko taajuusalueella.

Kaukokentän ominaisuudet saavutetaan pienessä tilassa käyttämällä GTEM-solua. Solu soveltuu säteilevien häiriöiden emissio- että immunitteettimittauksille. GTEM-solu on edullinen ja vähän tilaa vievä vaihtoehto EMC-mittauksille. Pienen kokonsa vuoksi siinä ei voida suorittaa EMC-mittauksia kovin suurille laitteille.

Emissiomittauksissa käytettävä laitteisto koostuu vastaanotinantennista ja spektrianalysaattorista. Avoimelle mittapaikalle tai häiriösuojattuun huoneeseen sijoitetun sähkölaitteen lähettämät signaalit otetaan vastaan antennilla. Spektrianalysaattori tulkitsee antenniin indusoituneet jännitteet.

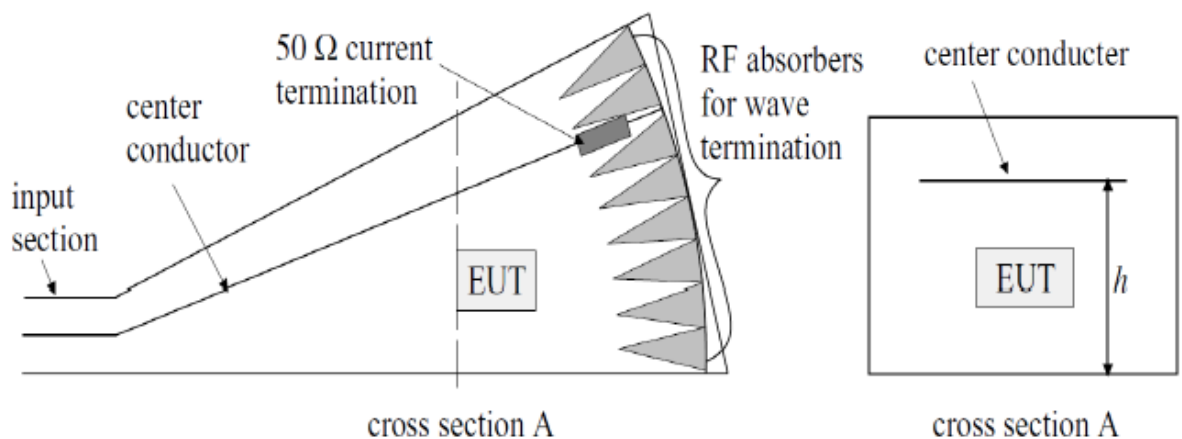
Immunitteettimittauksissa käytetty laitteisto koostuu lähetinantennista, signaaligeneraattorista, laajakaistaisesta tehonvahvistimesta ja mittausmonitorista. Signaaligeneraattori luo häiriösignaalin, joka vahvistetaan ja lähetetään antennin kautta testattavaa laitetta kohti. Häiriösignaaleja lähetetään eri voimakkuuksilla koko taajuusalueella. Mittausmonitorista tarkkaillaan laitteen toimintoja ja suorituskykyä häirinnän vaikutuksen alla. [1, s. 140 - 150, s. 164 - 176; 2, s. 28 - 32; 7, s. 113.]

3 Kalibrointilaitteet

3.1 GTEM-kammio

Yksinkertaisesti selitettynä GTEM-kammio on laajennettu siirtolinja, joka muodostaa sisälleen TEM-aaltomuodossa kulkevan aallon. Ulkonäöltään GTEM-kammio on terävästä kärjestä venytetyn pyramidin muotoinen. Kärjessä on kaapelin kytkemistä varten 50Ω :n liitin.

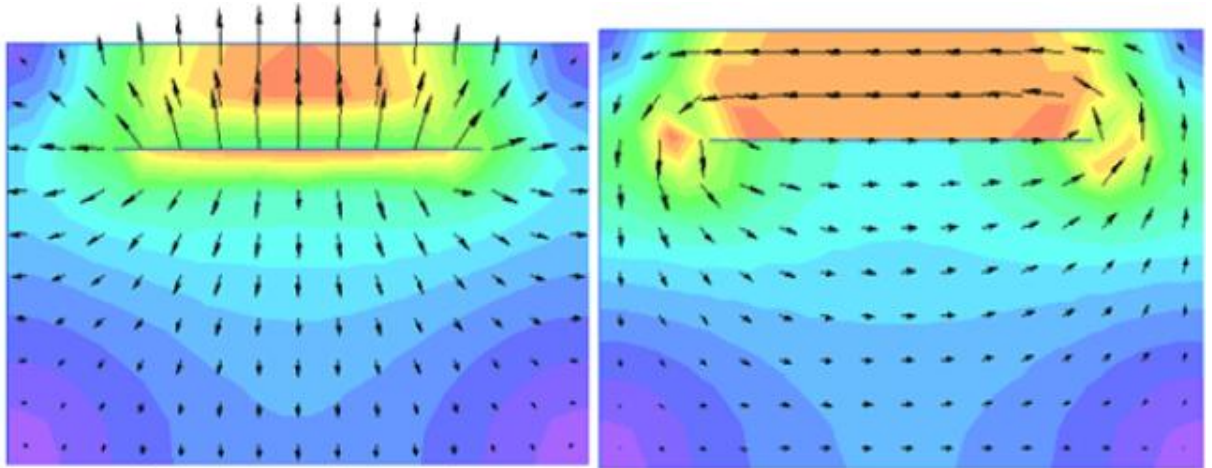
GTEM-kammion läpi kulkee keskijohdin eli septumi. Septumi on sovitettu 50Ω :iin. Heijastumien vähentämiseksi keskijohdin on päätetty 50Ω :iin. Kammion pohjalle on sijoitettu ferriittilevyjä ja RF-vaimentimia. Näiden tarkoitus on estää epäedullisten heijastumien ja seisovien aaltojen syntyminen eri taajuuksilla. Kuvassa 11 esitetään GTEM-kammion poikkileikkaus kaaviokuva.



Kuva 11. GTEM-kammion rakenne- ja kaaviokuva [8]

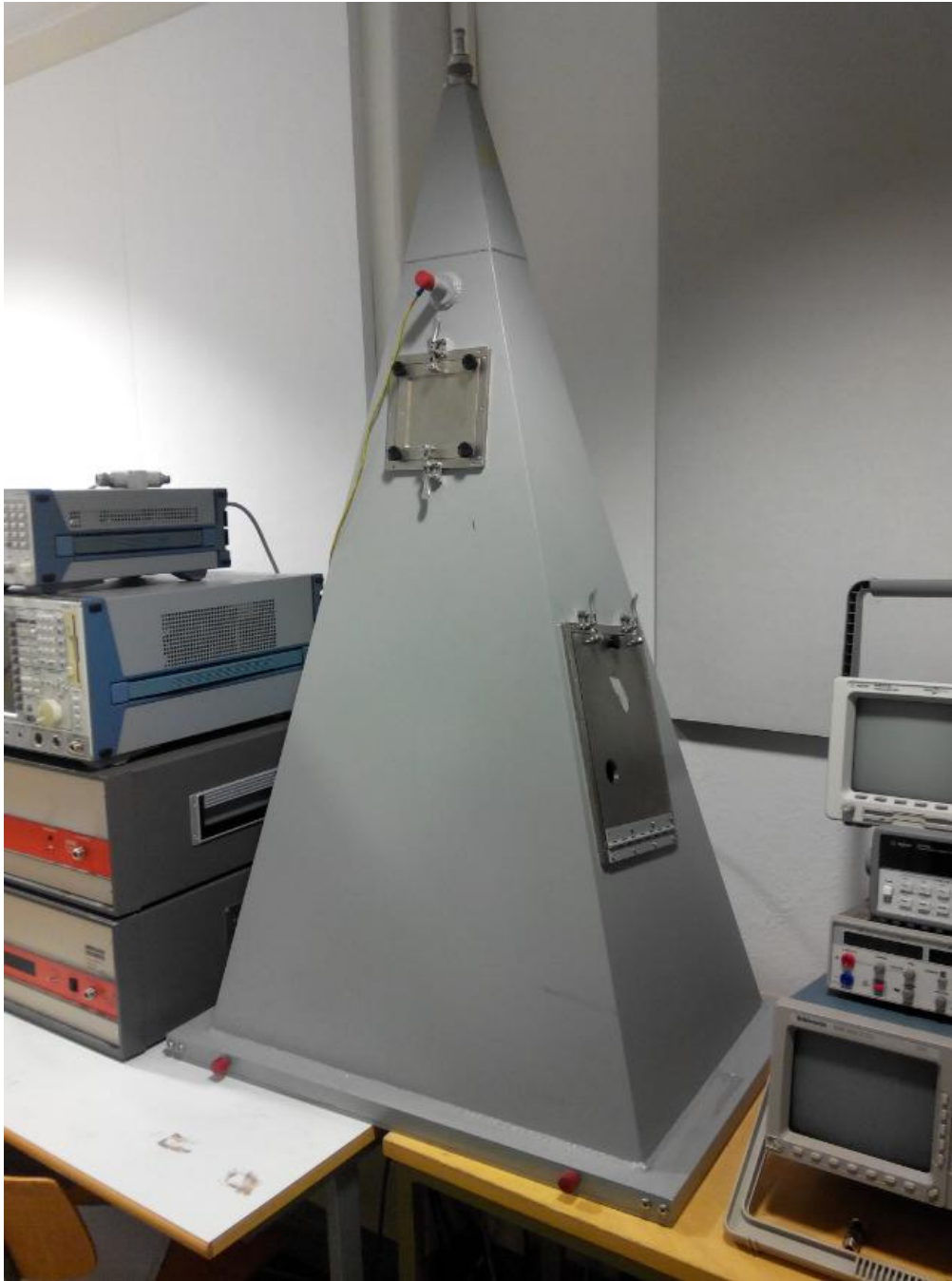
GTEM-kammiota voidaan hyödyntää EMC-standardien mukaisissa häiriöiden sieto- ja emissiotesteissä. GTEM-kammiolla pystytään tekemään mittauksia hyvin laajalla taajuusalueella. Häiriöiden sietomittauksia voidaan tehdä taajuusalueella DC - 18 GHz. Emissiomittauksia voidaan tehdä taajuusalueella 30 MHz - 1 GHz.

GTEM-kammion suurin hyöty tulee esiin sietomittauksissa. Jos sietomittaus toteutetaan avoimella mittapaikalla, tarvitaan valtavan tehokkaat vahvistimet, jotta sähkökentästä saadaan oikean vahvuinen ja tarpeeksi tasainen.



Kuva 12. GTEM-kammion sähkökenttä (vas.) ja magneettikenttä (oik.) [9]

GTEM-kammion käyttöä rajoittaa mitattavan laitteen koko. Mitattavan laitteen korkeus saa olla korkeintaan kolmasosan septumin ja kammion seinämän välisestä korkeudesta. Jos laite on liian korkea, saattaa se altistua liian voimakkaalle kentälle, joka ei ole tarpeeksi homogeeninen. Tämä saattaa aiheuttaa mittaustuloksiin vääristymiä. Kuvassa 12 on esitetty GTEM-kammion sähkö- ja magneettikentät. Kuvassa punaisempi osa tarkoittaa voimakkaampaa kenttää ja sinisempi alue tarkoittaa heikompaa kenttää. [1, s. 94, s. 140, s. 170 - 172; 10, s. 3 - 5; 9; 12, s. 21.]



Kuva 13. GTEM-kammio EMC-laboratoriossa.

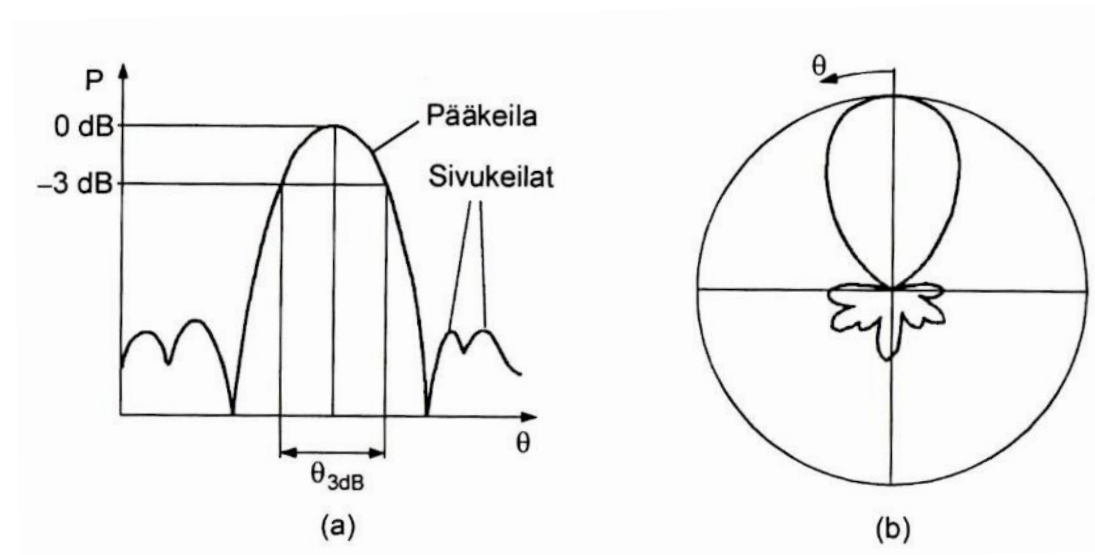
Tässä insinööriyössä käytetään kuvassa 13 esitettyä GTEM-kammiota Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriossa. GTEM-kammio on The Electro-Mechanics Companyn valmistama Model 5300 Series -sarjan kammio.

3.2 Antennit

Antennit ovat radioaaltojen lähettämistä ja vastaanottamista varten kehitettyjä laitteita. Antennin tarkoitus on siirtää lähetysteho mahdollisimman tehokkaasti aaltojohdosta vapaaseen tilaan tai päinvastoin, vapaasta tilasta aaltojohdon kautta vastaanottimelle.

Antenneja on useaa eri tyyppiä. Erilaisten antennien ominaisuudet vaihtelevat muun muassa käyttötarkoituksen mukaan. Antenneja voidaan ryhmitellä esimerkiksi virtaelementti-, apertuuri-, ja kulkuaaltoantenneiksi. [11, s. 159.]

Antenneihin liittyy useita peruskäsitteitä, jotka pätevät kaikille antenneille riippumatta niiden rakenteesta. Antennin lähetys- ja vastaanotto-ominaisuudet ovat samanlaiset, eli antenni on resiprookkinen. Usein antennin suorituskykyä kuvataan sen säteilyominaisuuksilla, kuten säteilykuviolla ja vahvistuksella. Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat muun muassa fyysiset mitat, hyötysuhde ja kaistanleveys. Ominaisuuksien tärkeysjärjestys riippuu sovelluksesta, mihin antenna käytetään. [11, s. 159 - 160.]



Kuva 14. Suuntakuvion esitysmuotoja: (a) suorakulmainen, (b) polaarinen [11]

Antenni ei ole isotrooppinen eli säteile samalla tavalla kaikkiin suuntiin. Sama pätee vastaanotossa, resiprookkisuuuden takia. Usein antenni on suunniteltu säteilemään johonkin tiettyyn suuntaan. Kuvasta 14 voitiin nähdä erään antennin suuntakuviota, joka koostuu pääkeilasta ja heikommista maksimeista eli sivukeiloista. Antennin suunnittelussa suuntakuviota on usein tärkein ominaisuus. [11, s.160]

Muita antennin ominaisuuksia ovat polarisaatio, vahvistus ja impedanssi. Polarisaatio kuvastaa antennin säteilemän sähkökentän vektorin suunnan käyttäytymistä. Antennilla on jokin tietty polarisaatio, jolla sen on tarkoitus toimia. Tätä kutsutaan pääpolarisaatioksi. Jos saapuvan aallon polarisaatio on sama kuin antennin polarisaatio, aalto sovituu antenniin. Jos saapuvan aallon polarisaatio poikkeaa antennin polarisaatiosta, tapahtuu epäsovitusta ja, kaikkea tehoa ei pystytä hyödyntämään.

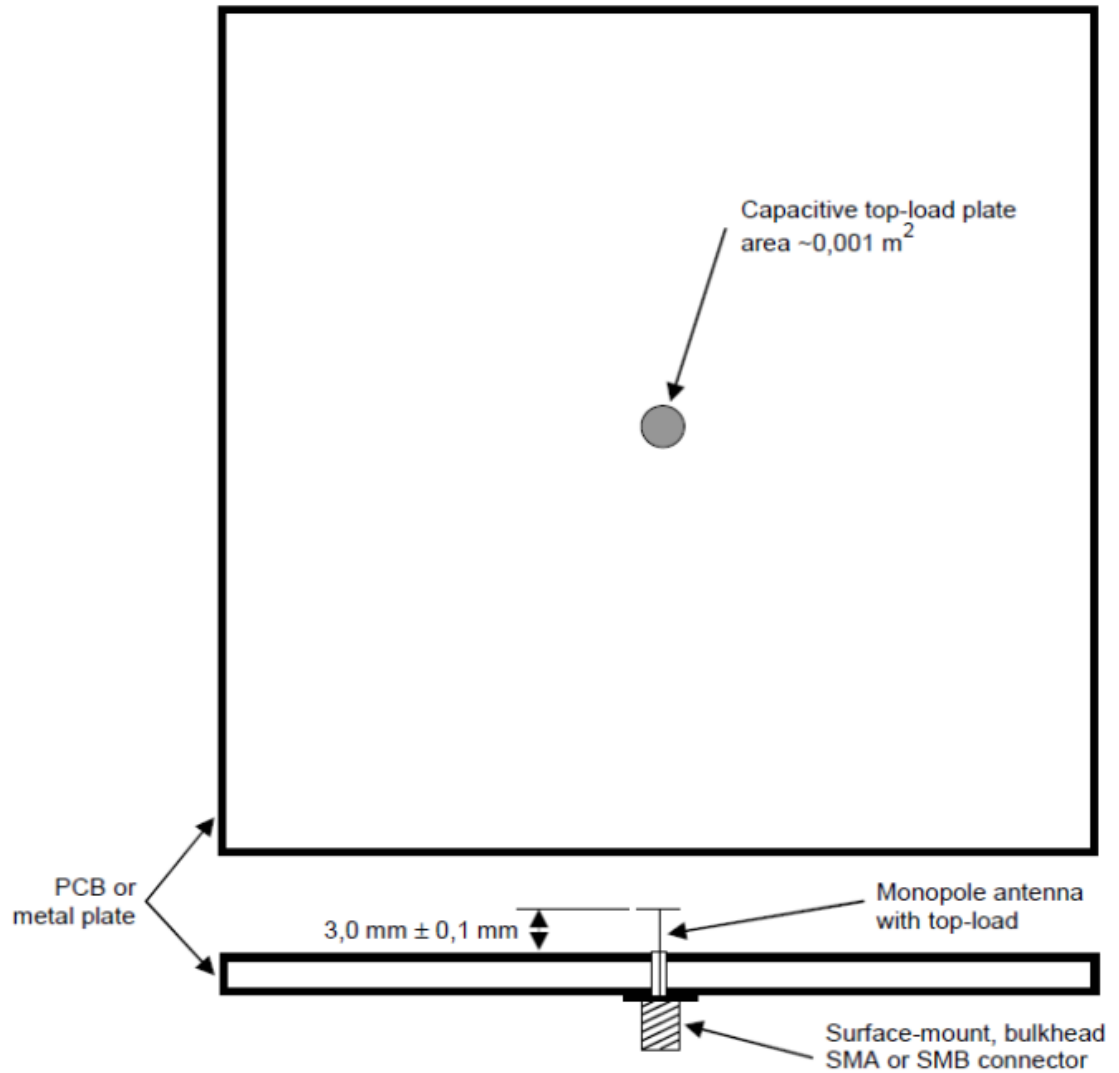
Antennin vahvistus määritellään siten, että vahvistus on pääkeilan suuntaan säteilemän tehotiheyden suhde siihen tehotiheyteen, jonka häviötön isotrooppinen antenni säteilee. Todellisuudessa osa tehosta kuluu metallipintojen ja dielektristen aineiden häviöihin.

Antennin ja aaltojohton välissä on aina hiukan epäsovitusta eli antennin ja aaltojohton impedanssit poikkeavat toisistaan. Tällöin osa tehosta heijastuu takaisin. Impedanssi koostuu kahdesta osasta, resistiivisestä ja reaktiivisesta komponentista. Resisttiivisen osan muodostavat häviöiden aiheuttamasta resistanssista ja säteilyresistanssista. Reaktiivinen komponentti syntyy, kun antennin lähikenttään varastoituu energiaa. [11, s. 162 - 164.]

3.2.1 Monopoliantenni

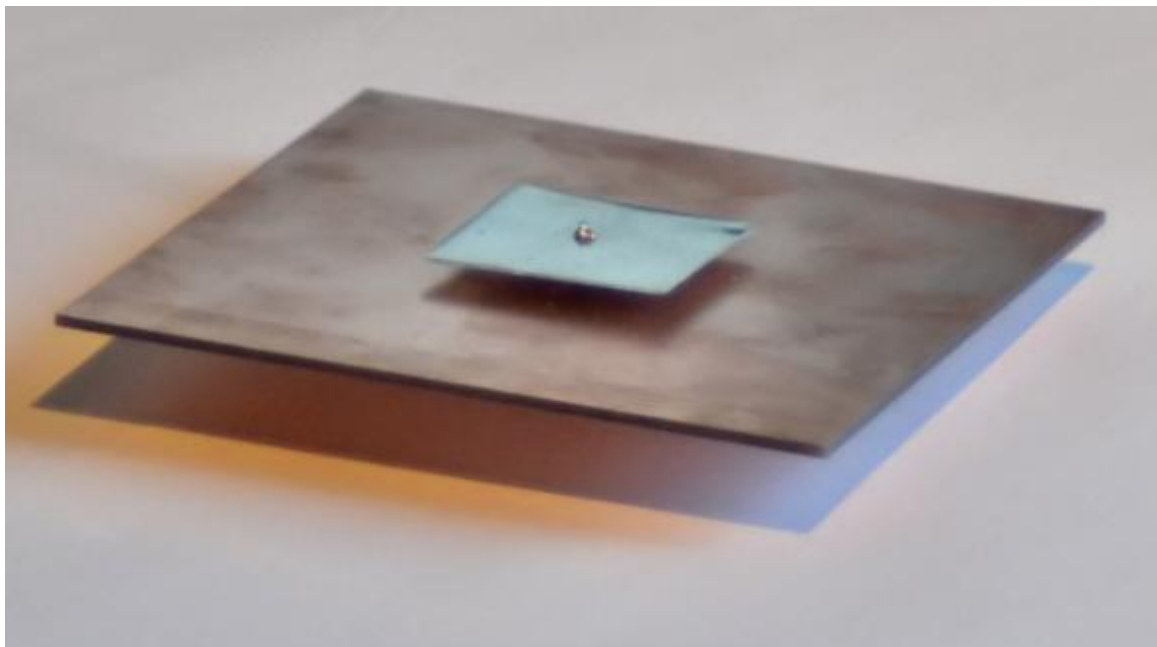
Monopoliantenni on johtavan tason yläpuolelle sijoitettu suora lanka. Monopoliantenni on ympärisäteilevä ja suuntaavuus heikko.

Standardi IEC 62132-2 antaa ohjeet monopoliantennin rakentamista varten. Antenni valmistetaan piirilevyille tai metallilevyille, jonka koko on 100 mm x 100 mm. Keskelle levyä $\pm 0,1$ mm:n tarkkuudella sijoitetaan varsinainen antenni. Standardi määrittelee monopoliantennin korkeudeksi 3 mm $\pm 0,1$ mm levyn maatasen pinnasta. Antennin huipulle asennetaan pinta-alaltaan noin 10 cm² oleva pyöreä tai neliönmuotoinen metallilevy. Levyn tarkoitus on lisätä antennin kapasitiivisuutta. Antennin liittimenä toimii pintaliitos tai *bulkhead*-mallinen SMA- tai SMB-liitin. Monopoliantenni nousee piirilevyn yläpuolelle liittimen keskijohtimesta. Kuvassa 15 esitetään standardin malli antennille. [11, s. 169 - 170; 12, s. 13 - 20.]



Kuva 15. Monopoli antennin kaaviokuva [12]

Antenni piirrettiin PADS layout -ohjelmalla ja jysrittiin kaksipuoliselle piirilevyille. Liittimenä käytettiin pintaliitos tyyppistä SMA-liitintä. Liitin juotettiin kiinni piirilevyyn, siten että liittimen keskijohto nousi 3 mm levyn maatasen yläpuolelle. Keskijohdon päähän asennettiin neliön muotoinen kapasitanssilevy. Neliön muotoiseen levyyn päädyttiin, koska se oli helpompi toteuttaa kuin pyöreä kapasitanssilevy. Kuvassa 16 (ks. seuraava sivu) esitetään tässä työssä toteutettu monopoli antenni.

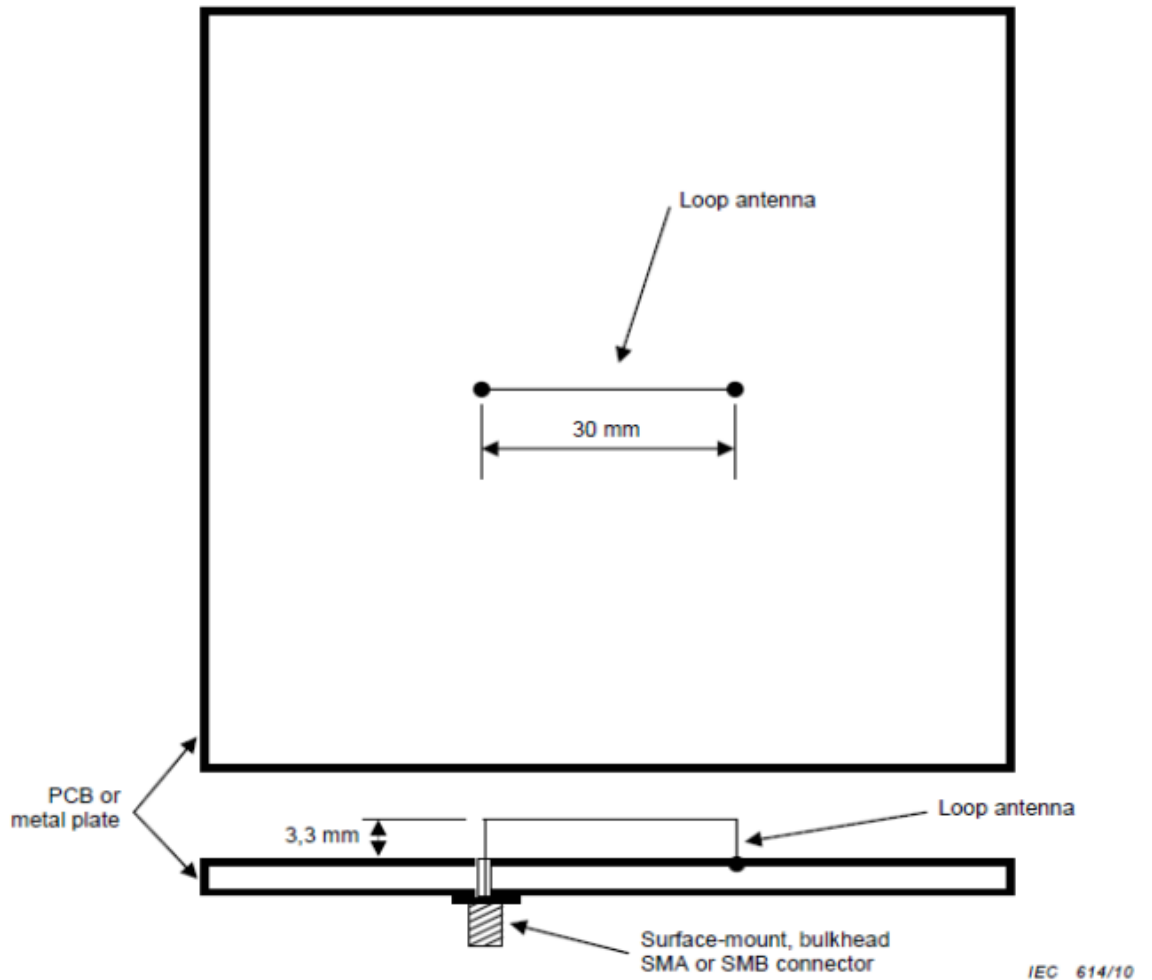


Kuva 16. Monopoliantenni

3.2.2 Silmukka-antenni

Silmukka-antenni on yleensä ympyrän tai neliön muotoinen johdin. Yhdessä antennissa voi olla useita silmukoita. Silmukoista voidaan myös muodosta ryhmä. Silmukka-antennin suuntakuvio riippuu silmukan halkaisijasta.

Standardi IEC 62132-2 antaa ohjeet silmukka-antennin rakentamista varten. Silmukka-antenni rakennetaan 100 mm x 100 mm piirilevyille tai metallilevyille. Levyn keskiosasta 15 mm \pm 1 mm:n etäisyydelle porataan sopivan kokoinen reikä pintaliitos tai *bulkhead* SMA- tai SMB-liittemelle. Antennin korkeus tulee olla 3,3 mm \pm 1 mm levyn pinnasta. Antennin pituus tulee olla 30 mm \pm 1 mm. Antennin langan tulee olla 1 mm \pm 0,1 mm halkaisijaltaan paksua johdinlankaa. Silmukka-antennin silmukan pinta-ala tulee olla noin 99 mm². Kuvassa 17 esitetään standardissa esitetty silmukka-antennin kaaviokuva. [11, s 171 - 172; 12, s. 13 - 20.]



Kuva 17. Silmukka-antennin kaaviokuva [12]

Antenni piirrettiin PADS layout -ohjelmalla ja jysyttiin kaksipuoliselle piirilevyille. Liittimenä käytettiin pintaliitos tyyppistä SMA-liitintä. Liitin juotettiin kiinni piirilevyyn, siten että liittimen keskijohto nousi 3 mm levyn maatasan yläpuolelle. Levyn pinnalle toteutettiin standardin määrittämä lanka-antenni. Kuvassa 18 esitetään tässä työssä toteutettu silmukka-antenni (ks. seuraava sivu).



Kuva 18. Silmukka-antenni

3.3 Piirianalysaattori

Piirianalysaattori on mittalaite, jota yleisesti käytetään elektroniikassa ja radiotekniikassa. Piirianalysaattorilla mitataan suurtaajuuspiirien vahvistusta ja vaihekäyttäytymistä eli sirontaparametreja. Sirontaparametrit eli S-parametrit määritellään portteihin menevien jänniteaaltojen V_i^+ ja niistä lähtevien jänniteaaltojen V_i^- avulla. [11, s. 82; 13.]

Tätä työtä varten valmistettujen antennien ominaisuudet mitattiin piirianalysaattorilla. Antenneista mitattiin sirontaparametri S_{11} , joka on samalla antennin sisäänmenon heijastuskerroin. Myös GTEM-kammion impedanssi mitattiin piirianalysaattorilla.

3.4 Spektrianalysaattori ja signaaligeneraattori

Spektrianalysaattori on elektroniikan mittalaite, jota käytetään signaalin taajuusjakauman eli spektrin mittaamiseen. Spektrianalysaattori voi toiminnaltaan olla joko analoginen pyyhkäisevä spektrianalysaattori, digitaalinen FFT-spektrianalysaattori tai näiden kahden yhdistelmä. Mittauksen tulos näytetään laitteen näytöllä. Yleensä näytön vaaka-akselilla on taajuus ja pystyakselilla on taajuutta vastaava amplitudi. [14.]

Signaaligeneraattori on elektroniikan laite, jolla tuotetaan sähkösignaalia. Yleensä signaaligeneraattorista voidaan tuottaa sini-, kantti-, tai kolmioaaltoa. Tuotetusta signaalista voidaan säätää taajuutta ja amplitudia. Signaalia voidaan myös moduloida. [15.]

Tässä työssä käytettiin spektrianalysointia ja signaaligeneraattoria GTEM-kammion sähköisten ominaisuuksien mittaamiseen. Signaaligeneraattorin tuottama signaali mitattiin spektrianalysointilaitteella.

4 GTEM-kammion impedanssin mittaus

Tässä insinööriyössä mitattu GTEM-kammio on ominaisimpedanssiltaan 50Ω . Teoriassa kammion impedanssi on laskettu 50Ω :iin, mutta käytännössä impedanssitaso vaihtelee 50Ω :n molemmin puolin taajuuden vaihdella. Impedanssin vaihtelu johtuu kammion erilaisista epäideaalisuuksista. Rakenteiden muodot ja materiaalit saattavat aiheuttaa erilaisia heijastumia.

Kammion impedanssimittauksella saadaan tietoa siitä, kuinka suuri teho kammiolle on syötettävä tietyllä taajuudella, jotta saadaan halutun suuruinen sähkö- tai magneettikenttä. Kun tietyn taajuuden impedanssitaso tunnetaan, siitä voidaan laskea tarvittava syöttöteho. IEC 62132-2 -standardi sallii 6 dB:n poikkeaman kentänvoimakkuudessa. Käytännössä tämä tarkoittaa jännitteen kaksinkertaistumista. [1, s. 168 - 172; 12, s 6 - 10.]

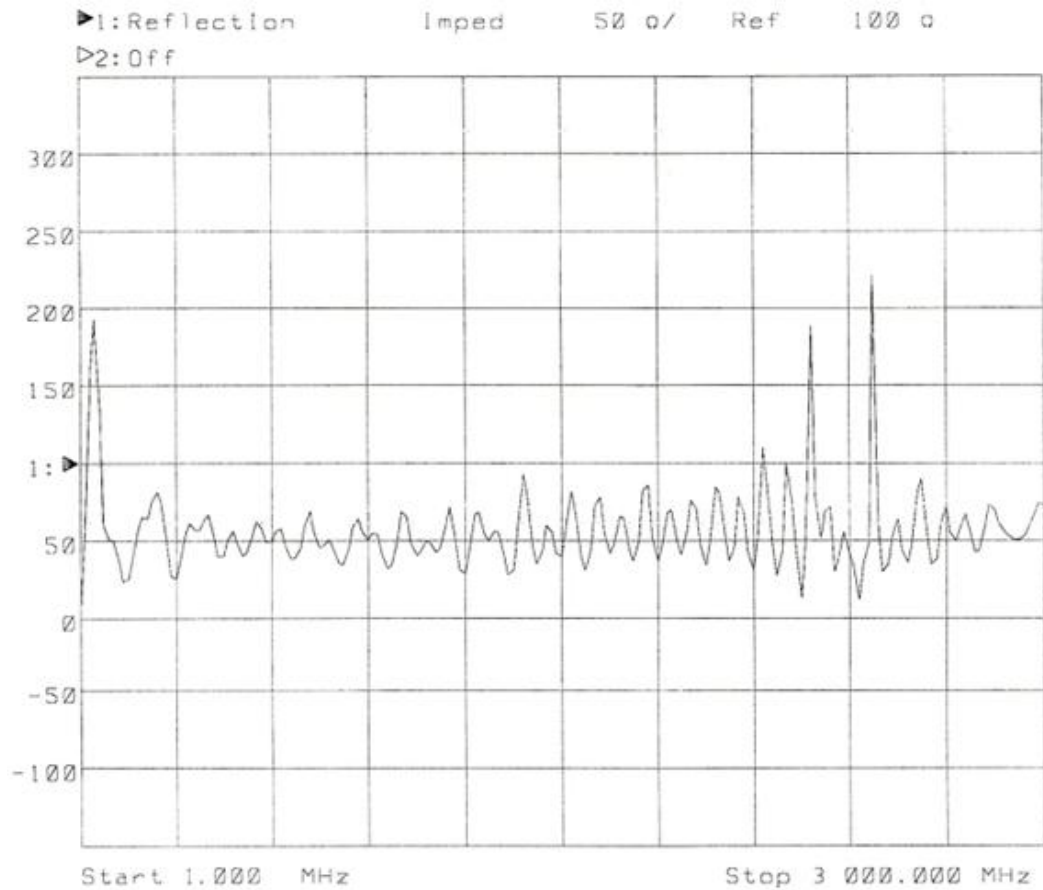


Kuva 19. GTEM-kammion impedanssimittauksen mittausjärjestely

GTEM-kammion impedanssin mittaamiseen käytettiin HP 8714ET -piirianalysointia. Piirianalysointilaite oli liitetty tulostin, jolla tulokset voitiin suoraan ottaa paperille. Standardi määrää alimmaksi mittaustaajuudeksi 150 kHz. Mittauksissa käytetyn piirianalysointilaitteen käytettävä taajuusalue oli 300 kHz - 3 GHz, joten alimpien taajuuksien mittauksia ei voitu suorittaa. Mittaukset päätettiin suorittaa 1 MHz - 3 000 MHz:n taajuuskaistalla.

Ennen mittauksen tekemistä, kammion ja piirianalysointilaitteen välillä käytettävä kaapeli kytkettiin kiinni piirianalysointilaiteeseen ja analysointilaite kalibroitiin HP 85033D -kalibrointisetillä. Näin kaapelien epäideaalisuudet eivät vaikuttaneet mittaukseen.

Kuvassa 19 (ks. edellinen sivu) on esitetty GTEM-kammion mittausjärjestely. GTEM-kammio kytkettiin kalibroidulla kaapelilla piirianalysaattorin *reflection test porttiin*. Piirianalysaattori laskee S_{11} -heijastuskertoimen perusteella kammion impedanssin ja esittää sen taajuuden funktiona. Mitattu impedanssikäyrä tulostettiin piirianalysaattoriin liitetyllä tulostimella.



Kuva 20. GTEM-kammion impedanssi. Vaaka-akselilla on taajuus 1 MHz - 3 GHz. Pystyakselilla on kammion impedanssin itseisarvo

Kuvasta 20 voidaan havaita, että impedanssi pysyttelee hyvin lähellä 50 Ω suurimmalla osalla taajuuskaistaa. Tietyillä taajuusalueilla esiintyy suurempaa vaihtelua impedanssissa. Tämä johtuu muun muassa kammion epäideaalisuuksista ja tuntemattomaksi jääneistä tekijöistä.

5 GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien mittaus

GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien mittaukset tehdään standardin IEC 62132-2 ohjeiden mukaisesti. Standardissa on ohjeet kahden mitta-antennin valmistukseen. Standardi määrää, että sähkö- ja magneettikenttien mittaukset tulee tehdä näillä kahdella antennilla.

Standardissa on määritelty testiasetelma säteilevien häiriöiden mittaamista varten. GTEM-kammion kalibroitimittauksen testiasetelma on lähes samanlainen. Ainoa merkittävä ero häiriöiden sietomittauksiin on, että testattavan laitteen paikalla käytetään kenttien kalibroitimittauksia varten valmistettuja antenneja. Standardin mukaan mittauksia voidaan monitoroida käyttämällä volttimittaria, spektrianalysaattoria tai piirianalysaattoria. Piirianalysaattorin käyttö on sallittua vain, jos sitä käytetään RF-lähteenä mittauksissa. [12, s. 13 - 20.]

5.1 Kalibroitiantennien testimittaukset

Standardi määrää, että valmistetut antennit on mitattava valmistuksen jälkeen, jotta saadaan varmuus niiden sähköisistä ominaisuuksista ja soveltuvuudesta kalibroitimittauksiin. Samalla mittauksella määritetään antennien impedanssi.

Antennit mitattiin käyttämällä HP 8714ET -piirianalysaattoria. Piirianalysaattorin kalibroiintiin käytettiin HP 85033D -kalibroitisetiä. Mittaukset tehtiin *reflection*-mittauksena, missä antenni on liitetty piirianalysaattorin *reflection* porttiin. Näin saadaan mitattua antennin heijastuskerroin S_{11} ja antennin impedanssi. Kummallekin antennille on annettu standardissa omat kaavat eri arvojen laskemista varten. [12, s. 13 - 20.]

5.1.1 Monopoliantennin testimittaus

Standardissa on määritelty, että monopoliantennin kapasitanssi on 3 pF, kun mittaus tehdään 10 MHz:n tai 100 MHz:n taajuudella. Mittauksessa käytettiin HP 8714ET -piirianalysaattoria, joka oli kalibroitu HP 85033D -kalibroitisetillä. Mittaustulokseksi saatiin 6 pF, jonka todettiin olevan tarpeeksi lähellä vaadittua 3 pF:a. Antennin kapasitanssin perusteella laskettiin antennin impedanssi käyttämällä kaavaa 12.

$$Z_{ant} = \frac{1}{\omega C_{ant}} \quad (12)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

f = taajuus

C_{ant} = antennin kapasitanssi

Antennin impedanssiksi 100 MHz:n taajuudella laskettiin kaavan 12 perusteella 265 Ω. Standardin mukaan antennin impedanssi 100 MHz:n taajuudella tulisi olla 530 Ω. Vaikka antenni erosi standardin vaatimuksista, päätettiin sähkökentän mittaukset tehdä sillä. Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratorio ei ole akkreditoitu testauslaboratorio, ja tällä perusteella päätettiin, että mittauksissa saadaan riittävän hyvä kuva GTEM-kammion ominaisuuksista. Antennin impedanssi taajuusalueella 1 MHz - 1 GHz oli lähes lineaarinen suora.

5.1.2 Silmukka-antennin testimittaus

Standardi ei määrittele silmukka-antennille tarkkaa induktanssiarvoa, kuten monopoli-antennille oli määritelty tarkka kapasitanssi. Standardin silmukka-antennia koskevissa esimerkkilaskuissa on käytetty 100 MHz:n taajuudella 73 nH:n induktanssia. Silmukka-antennin induktanssi mitattiin vastaavalla mittausjärjestelyllä, kuin monopoli-antennin kapasitanssi.

Silmukka-antennin induktanssiksi 100 MHz:n taajuudella mitattiin 28 nH. Antennin kontaktia piirilevyn maatasoon parannettiin lisäämällä tinaa juotoksiin ja parantamalla juotoksia. Juotoksiin saattaa jäädä rakoja, jotka aiheuttavat ylimääräistä kapasitanssia. Induktanssia olisi voinut parantaa käyttämällä silmukassa ohuempaa lankaa, mutta antennin mekaaninen kestävyys olisi kärsinyt liikaa. Parannusten jälkeen silmukka-antennin induktanssiksi mitattiin 34 nH. Standardi ei määrittele tiettyä arvoa silmukka-antennin induktanssille, niin antennin impedanssi laskettiin 34 nH:n induktanssin perusteella käyttämällä kaavaa 13.

$$Z_{ant} = \omega L_{ant} \quad (13)$$

$$\omega = 2\pi f$$

f = taajuus

L_{ant} = antennin kapasitanssi

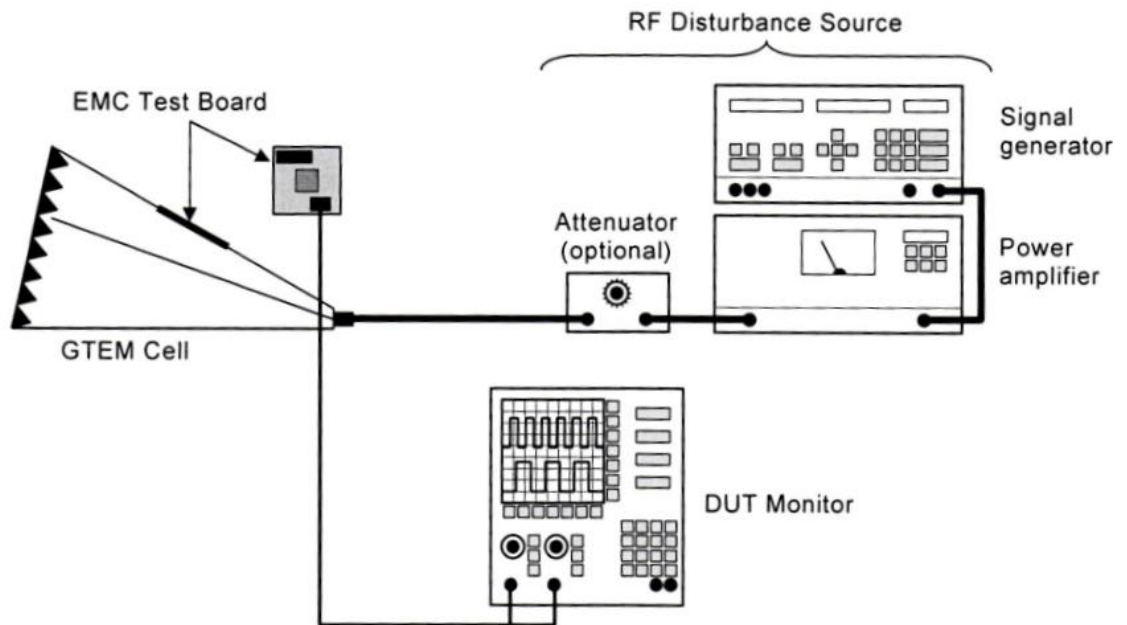
Antennin impedanssiksi 100 MHz:n taajuudella laskettiin kaavan 13 perusteella 21,4 Ω . Standardin esimerkkikaavoissa silmukka-antennin impedanssi on 45,87 Ω . Kun tarkkaa induktanssivaatimusta ei ollut, päätettiin magneettikenttämittaukset tehdä tällä antennilla. Antennin impedanssi taajuusalueella 1 MHz - 1 GHz oli lähes lineaarinen suora.

5.2 GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien mittausten mittausjärjestely

GTEM-kammion kalibroitimittaukset suoritettiin kahdella tavalla: piirianalysointilaiteella ja käyttämällä signaaligeneraattoria yhdessä spektrianalysointilaiteen kanssa. Standardissa esitetään ideaaliset kuvaajat sähkö- ja magneettikentille taajuusalueella 1 - 1 000 MHz, joten mittaukset päätettiin toteuttaa samalla taajuusalueella.

Standardi sallii piirianalysointilaiteen käytön kalibroitimittauksissa vain, jos sitä käytetään RF-signaalin luomiseen ja samalla antennille induoituvan jännitteen mittaamiseen. Tässä mittauksessa tämä mittaustapa ei tuottanut tarpeeksi laadukkaita tuloksia.

Mittaukset suoritettiin myös signaaligeneraattorin ja spektrianalysointilaiteen avulla. Mittausjärjestely esitetään kuvassa 21 (ks. seuraava sivu). Signaaligeneraattori kytkettiin GTEM-kammion sisään-tuloon ja kammion sisään sijoitettu antenni liitettiin spektrianalysointilaiteeseen.



Kuva 21. Mittausjärjestely, kun käytetään GTEM-kammiota [12]

Mittauksessa käytettiin Rohde & Schwartz SMT6 -signaaligeneraattoria. Signaaligeneraattorin asetuksista valittiin *Sweep* -moodi. Lähtötaajuudeksi asetettiin 1 MHz ja taajuuden ylärajaksi 1 GHz. Syötettäväksi tehoksi asetettiin 10 dBm, joka on jännitteenä 0,707 V_{RMS}. Antennille indusoituvaa jännitettä mitattiin HP 8591E -spektrianalysaattoria. Spektrianalysaattorin mittaускаistaksi asetettiin sama 1 MHz - 1 GHz.

Ennen varsinaisia mittauksia, monopoli antennin asentoa vaihdeltiin kammion sisällä, jotta nähdään, onko antennin asennolla vaikutusta mittaustuloksiin. Antennin asennolla ei ollut merkittävää vaikutusta mitattuun sähkökentän voimakkuuteen, joten mittaus päätettiin suorittaa vain yhdessä asennossa.

Silmukka-antennille tehtiin samanlaiset testimittaukset. Silmukka-antennilla on vain kaksi mahdollista asentoa, joissa mittaus voidaan tehdä, koska antennin silmukan täytyy olla kohtisuorassa kammion sisälle muodostuvaan magneettikenttään nähden. Jos antenni ei ole kohtisuorassa suhteessa magneettikenttään, magneettikenttä ei lävistä silmukkaa, eikä siihen indusoidu jännitettä. Testimittauksien perusteella kahden käyttökelpoisen asennon välillä ei ollut merkittävää eroa.

5.3 Sähkö- ja magneettikenttien mittaukset

Sähkö- ja magneettikenttien mittaukset tehtiin antenneille määrätyissä asennoissa GTEM-kammiossa. Antennin sijainti kammion sisällä oli myös standardin mukainen. Mittauksissa käytetty HP 8591E -spektrianalysointilaite oli ominaisuuksiltaan sen verran suppea, että sitä ei voitu käyttää mittaustulosten tallentamiseen. Taajuusalue käytiin läpi 10 MHz:n paloina ja antenneille indusoitunut jännite kirjattiin ylös.

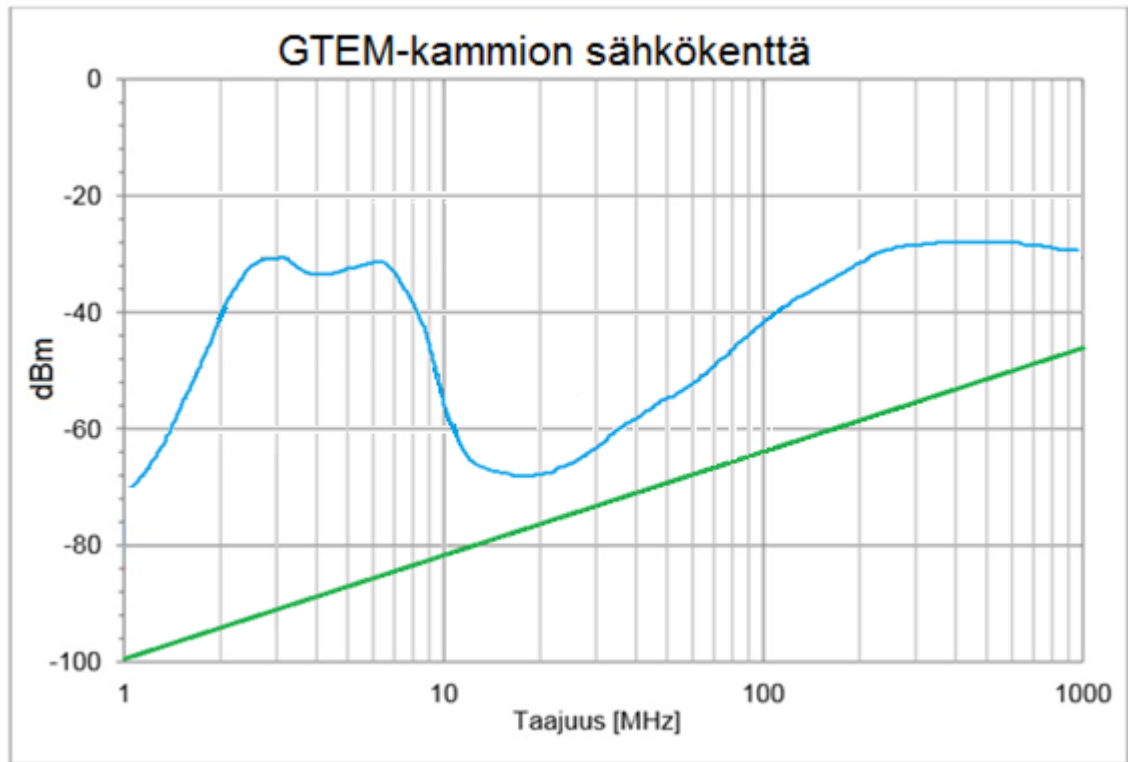
Mittauksen jälkeen saaduista tuloksista laskettiin S_{21} -parametrit monopoli- ja silmukka-antenneille. Monopoli- ja silmukka-antennien S_{21} -parametri saadaan kaavasta 14. Heijastuskerroin S_{21} tarkoittaa GTEM-kammion syötetyn jännitteen ja antennilta mitatun jännitteen suhdetta. Saadut tulokset muutettiin desibeleiksi ja niistä piirrettiin kuvaajat.

$$S_{21} = \frac{V_{ant}}{V_{in}} \quad (14)$$

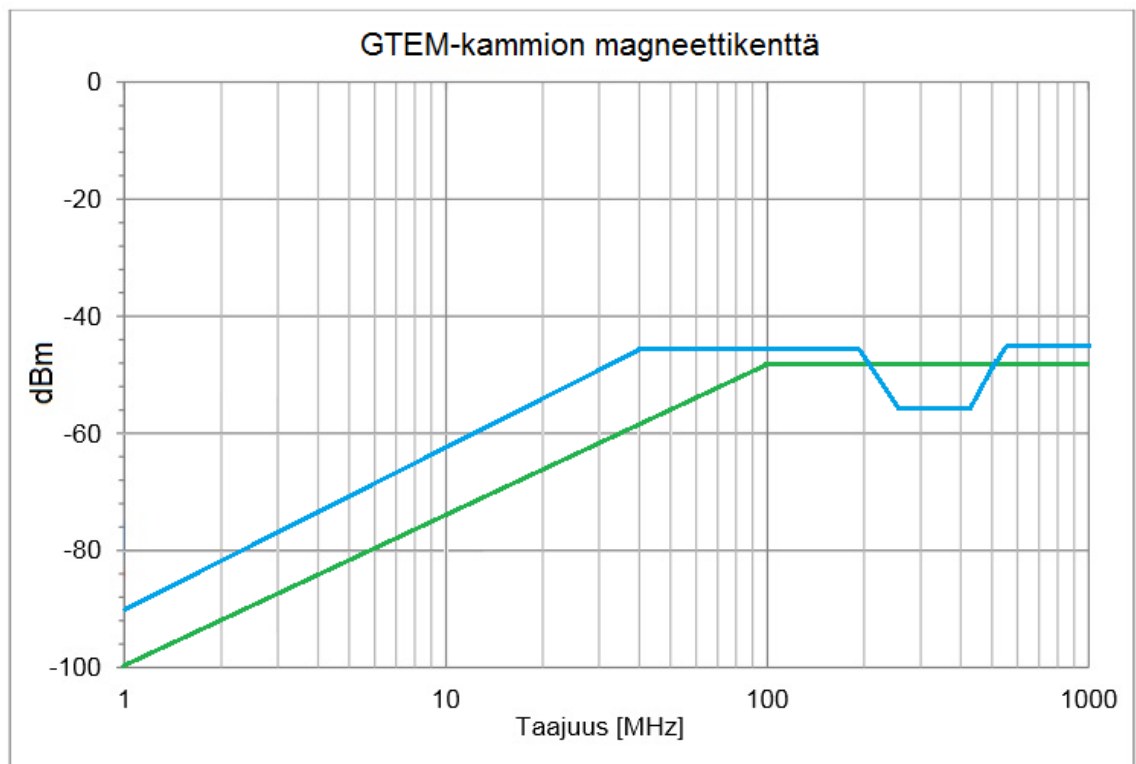
V_{ant} = antennilta mitattu jännite [V]

V_{in} = GTEM-kammion syötetty jännite [V]

Kuvassa 22 (ks. seuraava sivu) esitetään GTEM-kammion sähkökentän mittauksien tulos ja kuvassa 23 (ks. seuraava sivu) esitetään GTEM-kammion magneettikentän mittauksien tulos. Mittaustulokset esitetään 1 MHz - 1 GHz taajuusalueella desibeleinä. Kuvissa sininen käyrä esittää mitattua tulosta ja vihreä käyrä esittää teoreettista lasketua tulosta.



Kuva 22. GTEM-kammion sähkökentän voimakkuus



Kuva 23. GTEM-kammion magneettikentän voimakkuus

Kuvasta 22 voidaan havaita, että matalilla taajuuksilla tapahtuu paljon jännitteen vaihtelua. Tämä voi johtua antennin mittojen ja muotojen epäideaalisuuksista. Monopolian antennin epäideaalisuuksia ovat muun muassa kapasitanssilevyn epätasainen asento ja juotosliitoksien epätasaisuus. Antennin pieni koko on myös osasy syy matalien taajuuksien mittausten heilahteluihin. Antennin kapasitanssi ja impedanssi erosivat standardit arvoista, mikä vaikuttaa myös mittaustulokseen. Matalilla taajuuksilla tapahtunut suuri jännitteen vaihtelu tarvitsisi lisätutkimusta.

Kuvasta 23 voidaan havaita, että magneettikentän voimakkuus taajuusalueen läpi oli lähes samaa tasoa kuin standardissa esitetty ideaalimalli. Taajuusalueen yläpäässä tapahtuva notkahdus voi johtua useista tekijöistä. Antennissa esiintyy epäideaalisuutta, silmukan langan etäisyys maatasoon nähden ei ole sama koko silmukan alalta, juotetuissa liitoksissa voi esiintyä heijastumia sekä antennin induktanssi ja impedanssi erosivat standardin arvoista.

Mittauspisteiden määrän vähyden vuoksi kuvaajista tuli hyvin tasaisia. 10 MHz mittaussvälin takia lähekkäisten taajuuksien väliset amplitudivaihtelut ovat jääneet pois tuloksista.

6 Yhteenveto

Insinööriyössä oli tavoitteena tutkia Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratorion GTEM-kammion ominaisimpedanssia sekä sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuksia. Tavoitteena oli mitata GTEM-kammion ominaisimpedanssikäyrä soveltuvan taajuusalueen yli ja standardin IEC 62132-2 -mukaiset sähkö- ja magneettikenttien mittaukset.

Sähkö- ja magneettikenttien mittausta varten, valmistettiin IEC 62132-2 -standardin mukaiset mitta-antennit. Valmistettujen mitta-antennien impedanssi mitattiin. Standardin ohjeiden mukaisilla mitta-antenneilla toteutettiin GTEM-kammion sähkö- ja magneettikenttien voimakkuuden mittaukset. Mittaustuloksia verrattiin standardin antamiin laskettuihin teoreettisiin arvoihin.

Työtä tehtäessä ilmeni, että standardissa IEC 62132-2 on epäkohtia ja tulkinnanvaraisuuksia. Osittain standardin ohjeet olivat ristiriitaisia ja summittaisia. Esimerkkinä mainittakoon standardin ohjeet antennien valmistamiselle ja antennien sähköisille ominaisuuksille. Antennien valmistusohjeet antaa mahdollisuuden valmistaa antenni yksi- tai kaksipuolisesta piirilevystä. Standardin ohjeissa lukee, että yhdeltä puolelta kuparoitu levy riittää, mutta kuvatekstissä piirilevyn kuparoinnin kaksipuolisuus on vaatimus. Silmukka-antennia sähköiset ominaisuudet ovat myös hyvin tulkinnanvaraisia. Standardin esimerkeissä silmukka-antennin induktanssi on 73 nH, mutta standardin ohjeissa ei esitetä induktanssille mitään vaatimusta. Edellisien mainintojen lisäksi standardissa oli huomautustekstejä, joissa mainittiin joidenkin antennien mittojen toleranssien olevan vielä kehityksessä. Nämä epäselvyyden aiheutti pientä epävarmuutta. Standardin ohjeiden keskeneräisyys herätti epäilyksiä menetelmän luotattavuudesta.

Lähteet

1. Williams, Tim. 2007. EMC for product Designers fourth edition. Great Britain: Newnes.
2. Rajamäki, Jyri. 6/2000. EMC- direktiivin ensimmäiset kymmenen vuotta. Verkkodokumentti.< <http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/6-2000.pdf> >. Luettu 1.7.2013
3. Häkkinen, Esa, Fallström, Kim, Haapalinna, Atte & Kärhä, Petri. 1999. Häiriöt mittauksissa. Verkkodokumentti. < <http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/haimit.pdf> >. Luettu 1.7.2013
4. Cosmic microwave background radiation. Verkkodokumentti. <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background_radiation>. Luettu 1.7.2013
5. Solar wind. Verkkodokumentti. < http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_wind >. Luettu 1.7.2013
6. Tähdet ja Avaruus, 7/2010. S. 45; Aurinkomyrsky voi muuttaa suuntaa.
7. Sepponen, Raimo. 1997. EMC periaatteet ja käytäntö.
8. Häiriöt kaukokentässä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Verkkodokumentti.< <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0200/luennot/l3kaukokentta.pdf>>. Luettu 8.7.2013
9. Kresimir, Malerie. 2001. Electromagnetic-compatibility analysis using TEM cells. Verkkodokumentti.< <http://eetimes.com/electronics-news/4196997/Electromagnetic-Compatibility-Analysis-Using-TEM-Cells>>. Luettu 28.8.2013
10. Clemens, Icheln. 1995. The construction and application of a GTEM cell. Diplomityö. Verkkodokumentti.< http://users.tkk.fi/icheln/dip_icheln.pdf>. Luettu 28.8.2013
11. Lehto, Arto, Räisänen, Antti. 2003. Radiotekniikan perusteet. Helsinki: Otatieto
12. IEC 62132-2: Integrated circuits – Measurements of electromagnetic immunity – Part 2: Measurements of radiated immunity – TEM cell and wideband TEM cell method. 2010. Switzerland: International Electrotechnical Commission.
13. Network analyzer. Verkkodokumentti. < [http://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_\(electrical\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Network_analyzer_(electrical))>. Luettu 9.11.2013

14. Spectrum analyzer. Verkkodokumentti. < [http://en.wikipedia.org/wiki/ Spectrum_analyzer](http://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer)>. Luettu 15.11.2013
15. Signal generator. Verkkodokumentti. < [http://en.wikipedia.org/wiki/ Signal_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Signal_generator)>. Luettu 15.11.2013