

Ismo Palomäki

ESD-mittapaikka Metropolia Ammattikorkeakoulussa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Elektroniikka
Opinnäytetyö
23.5.2016

Tekijä Otsikko	Ismo Palomäki ESD-mittapaikka Metropolia Ammattikorkeakoulussa
Sivumäärä Aika	29 sivua 23.5.2016
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikka
Ohjaaja	yliopettaja Matti Fischer
<p>Opinnäytetyössä oli tavoitteena selvittää, kuinka tarkasti Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-laboratoriossa pystyy suorittamaan standardin mukaiset ESD-mittaukset. Lisäksi tavoitteena oli selvittää mittalaitteiden tämänhetkinen tilanne ja parantaa mittausympäristöä mahdollisuuksien mukaan.</p> <p>Opinnäytetyön aikana mittapaikkaa parannettiin asentamalla paikalle metallinen kytkeytymistaso ja muovinen eristelevy. Kytkeytymistason liittämistä suojamaahan varten lisättiin johtimiin vastukset. Mittapaikalla tehtiin ESD-generaattorilla testit yhdelle laitteelle.</p> <p>Työssä saatiin tehtyä mittapaikalle ESD-mittausta varten tarvittavat muutokset. ESD-generaattorilla saatiin tehtyä testit onnistuneesti. Mittapaikka ei ole vieläkaan aivan standardin mukainen, mutta suoritettavat testit ovat kuitenkin luotettavalla tasolla. Mittapaikkaa pystyy kyseisessäkin huoneessa edelleen parantelemaan lähemmäs standardin vaatimuksia. Parannuksista olisi hyötyä myös muita EMC-mittauksia tehtäessä.</p>	
Avainsanat	EMC, ESD

Author Title	Ismo Palomäki ESD Test Set-up at Metropolia University of Applied Sciences
Number of Pages Date	29 pages 23 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics
Instructor	Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The objective of this thesis was to find out how precisely EMC laboratory at Metropolia University of Applied Sciences is suited for ESD standard measurements. An additional objective was to find out the condition of measurement devices and to improve the test set-up, if possible.</p> <p>In this study, two planes were added to improve measurement set-up: Metallic coupling plane and plastic plane for insulation. Resistors were merged to cables so coupling plane could be connected to protective earth. ESD generator was used to run tests for one device.</p> <p>The required changes were made for ESD measurement set-up. ESD test for the device worked as intended. Although set up still isn't as stated in the standard, results are on reliable level. ESD set-up can be further improved to be closer to the standard. Other EMC measurements also would benefit from the changes.</p>	
Keywords	EMC, ESD

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sähkömagnetismi	2
2.1	Maxwellin yhtälöt	2
2.2	Lähi- ja kaukokenttä	3
3	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	6
3.1	Sähköiset häiriölähteet	6
3.1.1	Luonnolliset häiriölähteet	7
3.1.2	Keinotekoiset häiriölähteet	8
3.2	Häiriöiden kytkeytyminen	8
3.2.1	Galvaaninen kytkeytyminen	9
3.2.2	Kapasitiivinen kytkeytyminen	10
3.2.3	Induktiivinen kytkeytyminen	11
3.2.4	Sähkömagneettinen säteily	12
4	EMC-mittaukset	14
4.1	Emissiomittaukset	14
4.1.1	Avoin tila	14
4.1.2	Häiriösuojattu huone	16
4.1.3	GTEM-solu	17
4.1.4	Suurtaajuusvirtapihti	17
4.2	Immunitaettimittaukset	18
4.2.1	Säteilevien radiotaajuisten häiriöiden sieto	18
4.2.2	Johtuvien radiotaajuisten häiriöiden sieto	18
4.2.3	Nopeat transientit ja purske	18
4.2.4	Staattiset purkaukset	19
5	ESD-mittaukset	20
5.1	Purkausmallit	20
5.1.1	Human-body model	20
5.1.2	Machine model	21
5.1.3	Ilmapurkaus	21
5.2	ESD-generaattori	23

6	ESD-mittapaikka Metropoliassa	24
6.1	Standardin mukainen mittapaikka	24
6.2	Testipaikka	25
6.3	Tulokset mittapaikalla	26
7	Yhteenveto	28
	Lähteet	29

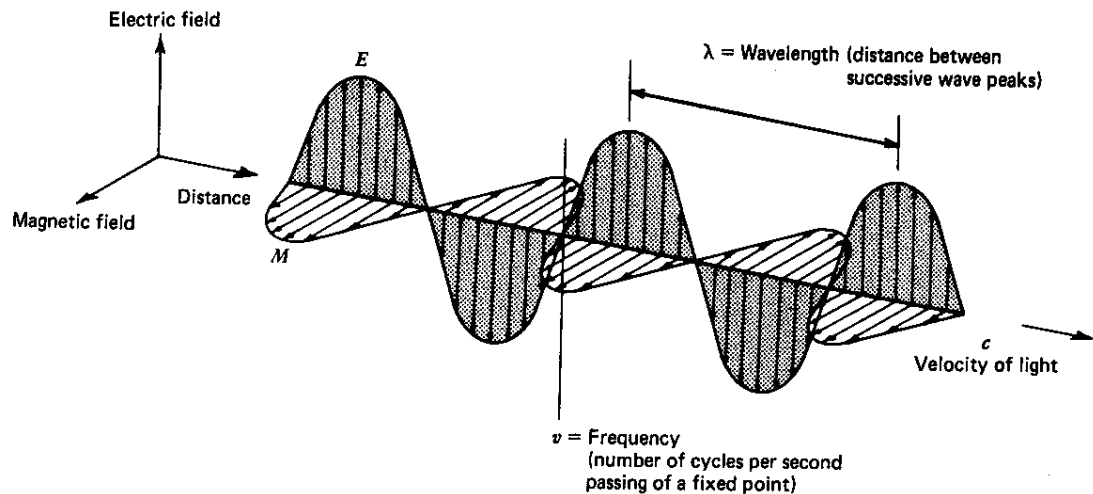
1 Johdanto

Elektronisia laitteita käytetään jatkuvasti joka puolella. Jotta laitteet toimisivat moitteettomasti, niiden täytyy sietää kohtuullinen määrä sähkömagneettista häiriötä. Samaan aikaan sähkölaitteet eivät saa tuottaa liikaa sähkömagneettista säteilyä, joka häiritsisi muita laitteita. IEC eli International Electrotechnical Commission on kansainvälinen standardointiorganisaatio sähköalalla. Standardit kertovat, miten laitteet on testattava riippuen niiden käyttötarkoituksesta ja käyttöpaikasta.

Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-huoneessa voi tehdä laitteille häiriöiden sieto- ja emissiomittauksia. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka tarkasti ESD-sietomittaukset voidaan tehdä EN 61000-4-2 -standardin mukaisesti. Työssä selvitetään testilaitteiston tämänhetkinen tilanne ja mittausympäristöä parannetaan mahdollisuuksien mukaan. Laboratorioita käytetään opetustarkoituksissa. Lisäksi suoritettavia mittauksia pystyisi myymään ulkopuolisille.

2 Sähkömagnetismi

Sähkömagneettiset aallot ovat sähkömagneettisen kentän aaltoliikettä (kuva 1). Sähkömagneettiset aallot muodostuvat nopeasti värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Sähkömagneettinen säteily kulkee valonnopeudella tyhjiössä.



Kuva 1. Sähkömagneettinen säteily

Sähkökenttä ja magneettikenttä ovat poikittain toisiinsa nähden.

Säteilyn taajuus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

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

jossa f taajuus, v on sähkömagneettisen säteilyn nopeus väliaineessa ja λ on aallonpituus.

2.1 Maxwellin yhtälöt

Maxwellin yhtälöt ovat neljästä kaavasta koostuva kokoelma, joka kuvaa sähkö- ja magneettikenttien käyttäytymistä ja vuorovaikutusta.

Maxwellin yhtälöt differentiaalimuodossa ovat

Gaussin laki sähkökentälle

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

Gaussin laki magneettikentälle

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

Faradayn induktiolaki

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4)$$

Ampère-Maxwellin laki

$$\nabla \times B = \mu_0 \left(J + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (5)$$

jossa $\nabla \cdot$ on divergenssi, $\nabla \times$ on roottori, E on sähkökentän voimakkuus, B on magneettivuon tiheys, t on aika, J on virrantiheys, ρ on varaustiheys, μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, ε_0 on tyhjiön permittiivisyys ja ∂ on osittaisderivaattaoperaattori. Gaussin laki (1) kuvaa, kuinka sähkövaraus tuottaa magneettikentän. Gaussin laki magneettikentälle (2) osoittaa, ettei magneettisia monopoleja ole olemassa. Pinnan sisään suljetut magneettisen navat kumoavat pareittain toisensa. Faradayn induktiolaki (3) kuvaa, kuinka muuttuva magneettikenttä luo sähkökentän. Ampèren laista Maxwellin lisäyksellä (4) huomataan, kuinka sähkövirta ja muuttuva sähkökenttä tuottavat magneettikentän.

2.2 Lähi- ja kaukokenttä

Käsitteet kauko- ja lähikenttä määritellään häiriölähteen etäisyyden perusteella. Kauko- ja lähikentän teoreettisena rajana pidetään suhteellista etäisyyttä pistemäisen lähteen tapauksessa.

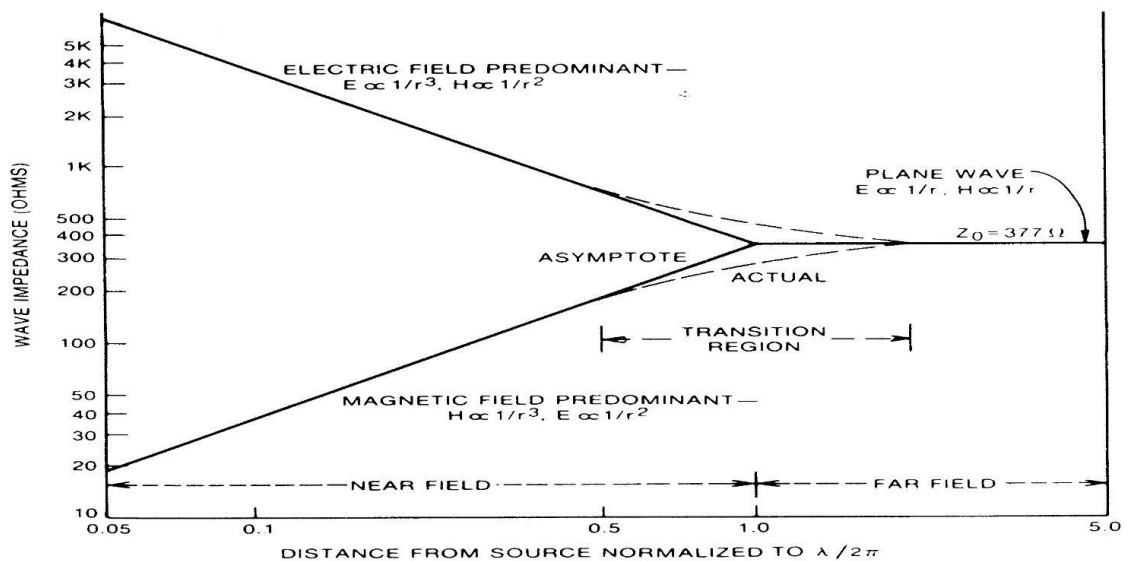
$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (6)$$

jossa r on etäisyys.

Jos etäisyys häiriölähteeseen on suurempi kuin $\frac{\lambda}{2\pi}$, ollaan kaukokentässä. Jos etäisyys häiriölähteeseen on pienempi kuin $\frac{\lambda}{2\pi}$, ollaan lähikentässä. Käytännössä kauko- ja lähikentän raja ei ole yksiselitteinen, vaan puhdas kaukokenttä saavutetaan vasta huomattavasti suuremmilla etäisyyksillä.

Aaltoimpedanssi Z_0 kuvaa sähkökentän E ja magneettikentän H suhdetta (kuva 2)

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad (7)$$



Kuva 2. Lähi- ja kaukokentän suhde [3, s. 20.]

Kaukokentässä sähkö- ja magneettikentän suhde on vakio, ja se on vapaassa tilassa suuruudeltaan likimain 377Ω . Tällaista kenttää sanotaan sähkömagneettiseksi kentäksi. Sen suuruus vaimenee suoraan etäisyyden kasvaessa. Kun kaukokentässä tiedetään joko sähkö- tai magneettikentän suuruus, voidaan puuttuva laskea.

Lähikentässä vaikuttavat sähkökenttä ja magneettikenttä erillisinä. Säteilylähteen ollessa suora johdin (monopoli- tai dipoliantenni) on säteilijän lähellä voimakas sähkökenttä ja olematon magneettikenttä. Edellä mainitussa tilanteessa aaltoimpedanssi on suurempi

kuin $377 \, \Omega$. Etäisyyden kasvaessa vaimenee sähkökenttä suhteessa $\frac{1}{r^3}$ ja magneettikenttä suhteessa $\frac{1}{r^2}$. Kun säteilylähde on johdinsilmukka (silmukka-antenni), vallitsee lähellä säteilijää voimakas magneettikenttä ja olematon sähkökenttä. Edellä mainitussa tilanteessa $Z_0 < 377 \, \Omega$. Etäisyyden kasvaessa vaimenee magneettikenttä suhteessa $\frac{1}{r^3}$ ja sähkökenttä suhteessa $\frac{1}{r^2}$. Lähikentässä sähkö- ja magneettikentän suhde on epämääräinen. Siten vain toisen ollessa tiedossa ei puuttuvaa voi laskea.

3 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

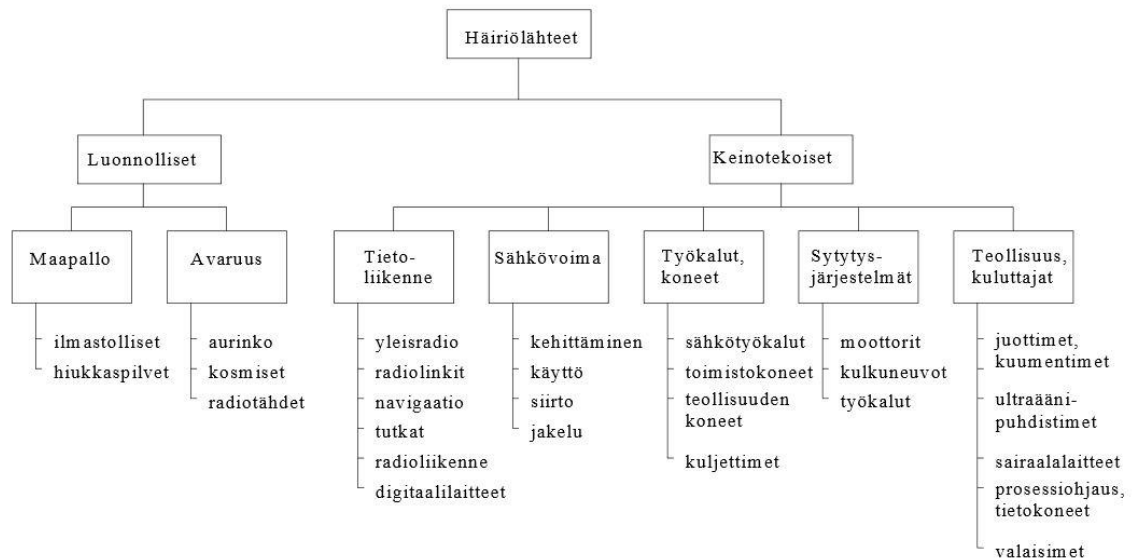
Sähkömagneettiset ilmiöt aiheutuvat sähkövarauksista. Varausten vuorovaikutus saattaa aiheuttaa ongelmia. Sähkölaitteelta ja -järjestelmältä vaaditaan moitteetonta toimintaa muiden laitteiden kanssa. Sähkömagneettinen yhteensopivuus eli EMC tarkoittaa laitteiden häiriötöntä toimintaa samassa käyttöympäristössä:

- Sähkölaitteiden pitää pystyä toimimaan häiritsemättä muita järjestelmiä.
- Sähkölaitteen pitää pystyä toimimaan tarkoituksen mukaisesti määritellyssä sähkömagneettisessa ympäristössä.

Ennen käyttöönottoa jokainen laite on testattava standardien mukaisilla mittauksilla. Mittaukset pitää olla suoritettuna aina alueen standardien mukaisesti. Esimerkiksi Euroopan unionissa ja Yhdysvalloissa on omat standardinsa. Testi suoritetaan laitteen käyttötaroituksen ja käyttöympäristön mukaan määritellyllä tavalla. Esimerkiksi sairaalaolosuhteissa on paljon tiukemmat vaatimukset laitteille. Vaikka ”sähkömagneettinen” viittaakin terminä suurtaajuuskenttään, käytännössä kaikki sähköhäiriöt eri taajuuksilla ja kytkeytymismenetelmillä käydään testeissä lävitse. [1, s. 4.]

3.1 Sähköiset häiriölähteet

Sähköisten häiriöiden syntymistä voidaan tarkastella eri näkökulmista. Yksi tapa on jakaa lähteet luonnollisiin ja keinotekoisiiin häiriölähteisiin. Luonnossa esiintyvistä häiriölähteitä ovat esimerkiksi ukkonen ja kosminen taustasäteily. Keinotekoisia lähteitä ovat kaikki ihmisen aikaansaamat häiriöt kuten sähköllä toimivat laitteet, sähkön jakelu ja radioliikenne. [2 s. 4–5.]



Kuva 3. Sähköisiä häiriölähteitä [2, s. 4.]

Kuvassa 3 näkyy esimerkki häiriölähteiden jakamisesta luonnollisiin ja keinotekoiisiin lähteisiin.

3.1.1 Luonnolliset häiriölähteet

Luonnon omista häiriölähteistä merkittävin on ukkonen. Ukkospilven läheisyydessä maan pinnalla on 1-10 kV/m suuruinen sähkökenttä. Salaman isku aiheuttaa nopeasti muuttuvan sähkökentän pilven varauksen äkillisestä purkautumisesta johtuen. Myös salamaniskun suuri sähkövirta saa aikaan voimakkaan sähkö- ja magneettikentän ympärilleen. Kentät saattavat vaurioittaa suojaamattomia sähkölaitteita. Salaman iskiessä pienen maadoitusimpedanssin omaavaan kohteeseen saattaa sähköverkkoon syntyä syöksyaalto, joka vaurioittaa laitteita.

Muita luonnon häiriölähteitä ovat kosmiset häiriölähteet. Sähkölaitteille haitallisimpia ovat avaruuden taustasäteily sekä auringonpilkut, jotka aiheuttavat häiriöitä erityisesti radiolaitteille. [3, s. 17–18.]

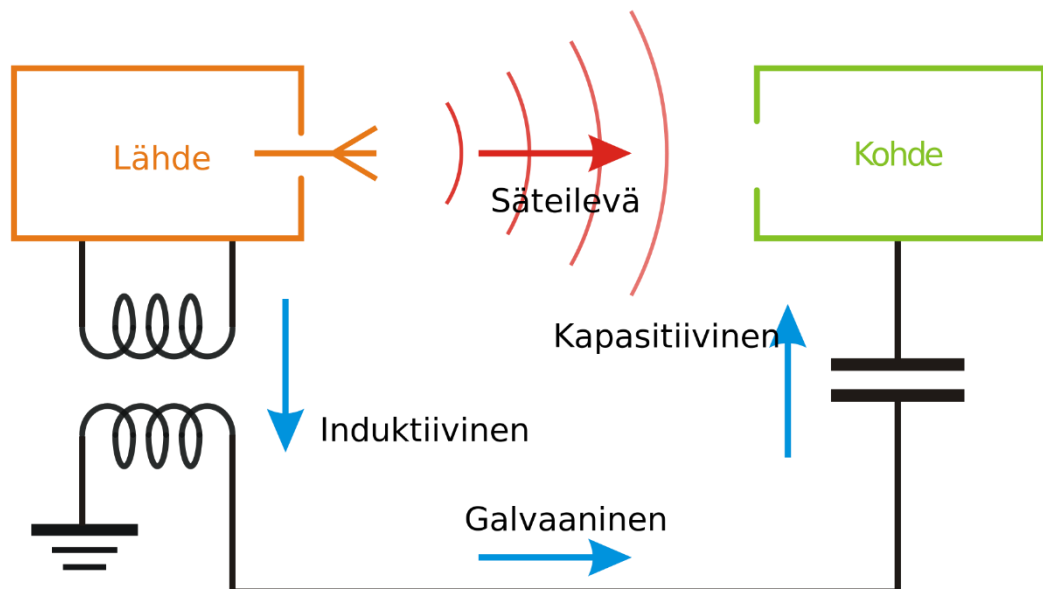
3.1.2 Keinotekoiset häiriölähteet

Sähkölaitteille haitallinen ihmisen aiheuttama häiriö on staattisen varauksen purkautuminen eli ESD (electrostatic discharge). Erityisesti kuivalla ilmalla ihmiseen voi varautua yli 10 kV:n suuruinen potentiaaliero suhteessa metallikuoriseen laitteeseen. Ihmisen koskettaessa laitteen suojakuorta hänessä oleva varaus purkautuu laitteeseen.

Tutka ja matkapuhelin ovat esimerkkejä tietoisesti synnytetystä lähteistä, joiden toimintaperiaatteensa mukaisesti kuuluu säteillä sähkömagneettista energiaa ympäristöönsä. Niiden tarkoituksena ei kuitenkaan ole tahallisesti häiritä muita laitteita, mutta niiden todellinen toiminta perustuu sähkömagneettisen energian säteilemiseen ympäristöön.

3.2 Häiriöiden kytkeytyminen

Sähkömagneettinen ympäristö koituu laitteelle ongelmaksi, kun häiriöt pääsevät kytkeytymään laitteeseen. Laitteen käyttöympäristö voi olla vaikea huomioida laitetta valmistettaessa. Häiriöasetelmat voivat olla hyvin mutkikkaita. Häiriöiden kytkeytymistavat ovat kuitenkin tunnettuja (kuva 4).



Kuva 4. Häiriöiden kytkeytymistavat

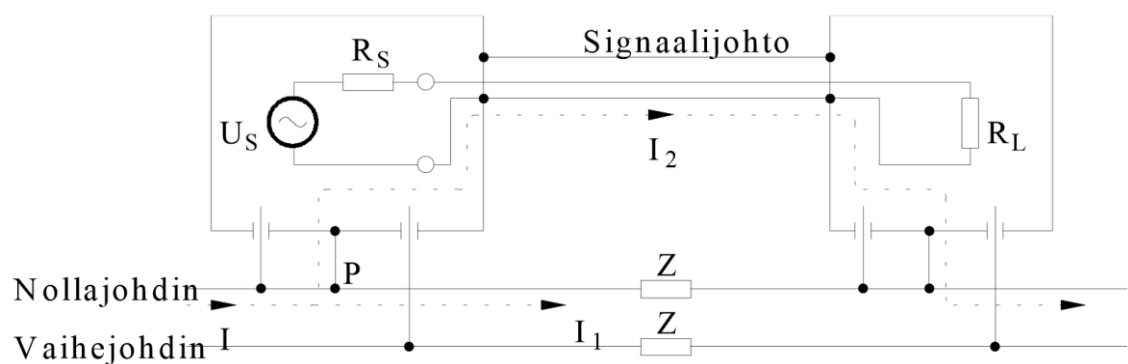
Tärkeimmät sähkömagneettisten häiriöiden kytkeytymistavat ovat:

- galvaaninen kytkeytyminen
- kapasitiivinen kytkeytyminen
- induktiivinen kytkeytyminen
- sähkömagneettinen säteily. [3, s. 21; 2, s. 7.]

3.2.1 Galvaaninen kytkeytyminen

Galvaaninen kytkeytyminen muodostuu piirin fyysisiä reittejä pitkin. Johtumalla kytkeytyessä signaalijohdin kuljettaa siihen kytkeytyneen häiriön eteenpäin laitteeseen. Erityisesti matalataajuiset sähkömagneettiset häiriöt kytkeytyvät herkästi johtumalla.

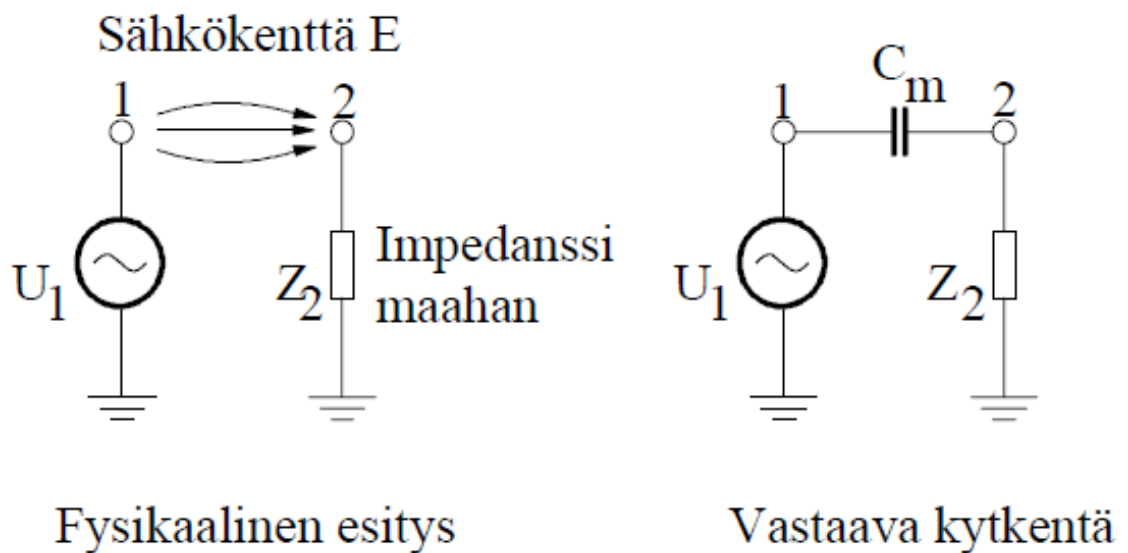
Yhteisen impedanssin kautta kulkeutuvat häiriöt esiintyvät, kun häiritsevällä ja häiriintyvällä virtapiirillä on yhteinen virran kulkutie. Yhteys voi löytyä esimerkiksi maadoituksesta tai tehonsyötöstä. Häiritsevässä virtapiirissä tapahtuvat muutokset aiheuttavat häiriövirran häiriintyvässä piirissä. Kuvassa 5 on esimerkkikytkeymä, jossa kahden eri laitteen maadoitus on toteutettu samalla johtimella. Piirit jakavat yhteisen impedanssin, ja virrat kulkeutuvat saman maadoitusimpedanssin kautta.



Kuva 5. Yhteisen impedanssin kautta tapahtuva kytkeytyminen

3.2.2 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Eri potentiaalien välillä on aina sähkökenttä. Kaksi eri potentiaalissa olevaa johdinta muodostavat sähkökentän. Johtimet toimivat tällaisissa tapauksissa kuten kondensaattori. Esimerkiksi signaalijohto voi saada häiriötä virtajohdosta. Kuvassa 6 esitetään esimerkki kahden johtimen väliin muodostuvasta kapasitanssista.



Kuva 6. Kapasitiivinen kytkeytyminen johtimien välillä [2, s. 7.]

Kaava kapasitiivisesti kytkeytyneelle jännitteelle:

$$U_H = \frac{Z_2}{\frac{1}{j2\pi f C_M} + Z_2} U_V \quad (8)$$

jossa U_H on kapasitiivisesti kytkeytynyt jännite, U_V on häiritsevän johdon jännite, C_M on johtojen välinen keskinäiskapasitanssi, R on signaalijohdon vastus ja f on kytkeytyneen häiriön taajuus

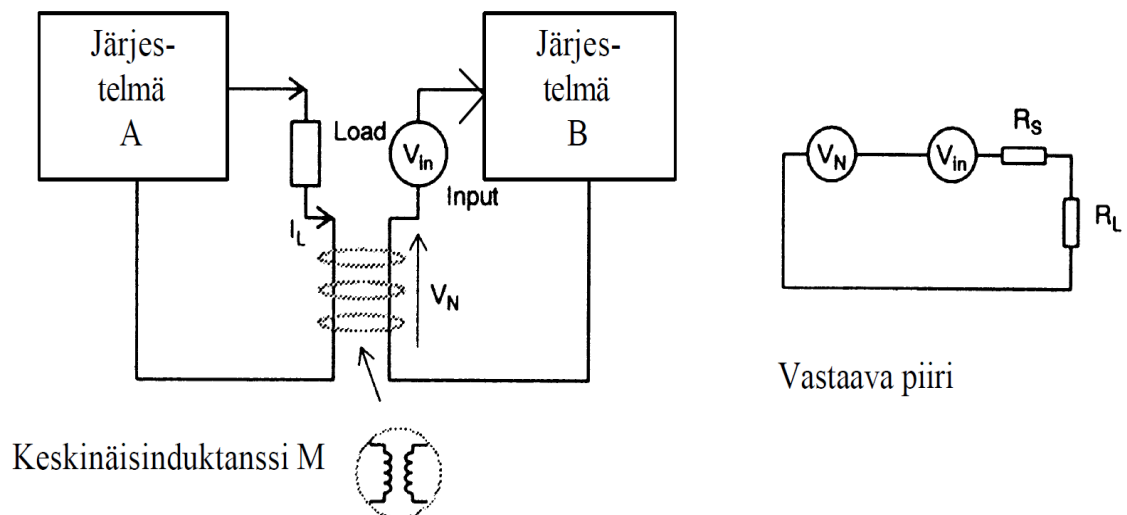
Kun keskinäiskapasitanssin C_M reaktanssi on häiriön taajuudella huomattavasti suurempi kuin R , yksinkertaistuu kaava seuraavaan muotoon:

$$U = fRCU_{HMY}2\pi \quad (9)$$

Kaavasta 9 nähdään, että kytkeytyneen häiriön suuruus on suoraan verrannollinen taajuuteen, signaalijohdon vastukseen, johtojen keskinäiskapasitanssiin ja häiritsevän johdon jännitteeseen. Järjestelmän eri osien ja jopa erillisten järjestelmien välistä kapasitiivista kytkeytystä ei voida luonnollisestikaan kokonaan välttää, mutta johtimien ja muiden osien asemoinnilla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka voimakkaasti ilmiö vaikuttaa järjestelmän toimintaan. Esimerkiksi johtimien etäisyyksiä ja suuntaa voidaan muuttaa, johtimet voidaan sijoittaa lähelle maatasoa tai järjestämällä metallikotelointi. [1, s. 222–226; 2, s. 7–8; 3, s. 22–23.]

3.2.3 Induktiivinen kytkeytyminen

Häiriöiden kytkeytyminen induktiivisesti tapahtuu magneettikentän vaikutuksesta. Induktiivisessa kytkeytymisessä häiriöt kytkeytyvät johdinsilmukoihin. Kuvassa 7 esitetään kahden piirin välillä syntyvä induktiivinen kytkeytyminen keskinäisinduktanssin kautta. Johtimessa kulkeva sähkövirta synnyttää ympärilleen magneettikentän. Magneettikenttä on huomattavasti voimakkaampi johdon ulkopuolella kuin sen sisäpuolella. Johtimen muodostama magneettikenttä lävistää johdinsilmukan. Faradayn lain (ks. kaava 4) mukaan virtasilmukkaan indusoituu jännite, kun silmukan läpi kulkeva magneettivuo muuttuu. Mitä suurempi on kokonaisuuden muodostama johdinsilmukka, sitä paremmin häiriöt kytkeytyvät.



Kuva 7. Induktiivinen kytkeytyminen kahden piirin välillä [3, s.23.]

Virralliseen johtimeen syntyvä magneettikenttä lasketaan kaavasta:

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{B}{\mu} \quad (10)$$

$$B = \mu H \quad (11)$$

H = syntyneen magneettikentän voimakkuus $[\frac{A}{m}]$

I = häiritsevässä johdossa kulkeva summavirta $[A]$

r = etäisyys $[m]$

B = magneettivuontiheys $[\frac{T}{m^2}]$

μ = permeabiliteetti $[\frac{Vs}{Am}]$

Induktiolain mukaan silmukkaan, joka on magneettikentässä, syntyy jännite:

$$u = - \int_A \frac{dB}{dt} dA \quad (12)$$

u = indusoituneen jännitteen suuruus $[V]$

A = johdinsilmukan pinta-ala $[m^2]$

Induktiivisin kytkeytymisen aiheuttamia häiriöitä pystyy vaimentamaan eri keinoilla. Parikierrekaapelia käyttämällä paluu- ja signaalijohdin ovat tiukasti rinnakkain ja johdinsilmukan pinta-ala on pieni. Yhdensuuntaisia johdotuksia on hyvä välttää. Lisäksi häiritsevän ja häiriintyvän johdon välimatkaa voi kasvattaa tai ne voidaan eristää toisistaan esimerkiksi metallisuojuksella. [1, s. 222–241; 2, s. 7–10; 3, s. 23–24.]

3.2.4 Sähkömagneettinen säteily

Ulkoinen sähkömagneettinen kenttä voi kytkeytyä suoraan sähkölaitteen sisäisiin johdinsilmukoihin tai ulkoisiin liityntäjohtoihin. Liityntäjohtojen säteilevän sähkömagneettisen kentän kytkeytyminen on todennäköisintä häiriötaajuuden ollessa alle 200 MHz. Taajuuden kasvaessa suuremmaksi kenttä kytkeytyy todennäköisemmin laitteen sisäiseen johdotukseen ja piirilevyssä oleviin silmukoihin. Säteily siis kytkeytyy sekä kapasitiivisesti että induktiivisesti. Raot ja saumat säteilevät ja vastaanottavat sähkömagneettisia häiriöitä samalla tavoin, joten kotelointia tehtäessä täytyy olla tarkkana.

Sähkömagneettisen säteilyn aiheuttamat ongelmat ovat yksi keskeisimmistä asioista sähkömagneettisen yhteensopivuuden parissa. Säteilyn vaikutusta pystyy kuitenkin vaimentamaan. $\frac{\lambda}{4}$ pituisia johtoja tulisi välttää, koska niihin sähkömagneettinen häiriö kytkeytyy helpoiten. Myös $\frac{\lambda}{2}$ pituisia johtoja tulisi välttää, koska silloin johto on resonanssissa ja kytkeytymismekanismi on voimakkaammillaan, jolloin se säteilee voimakkaasti ympäristöön. Laitteilla on myös hyvä olla tiivis metalloitu kotelo, joka on maadoitettu. [3, s.25]

4 EMC-mittaukset

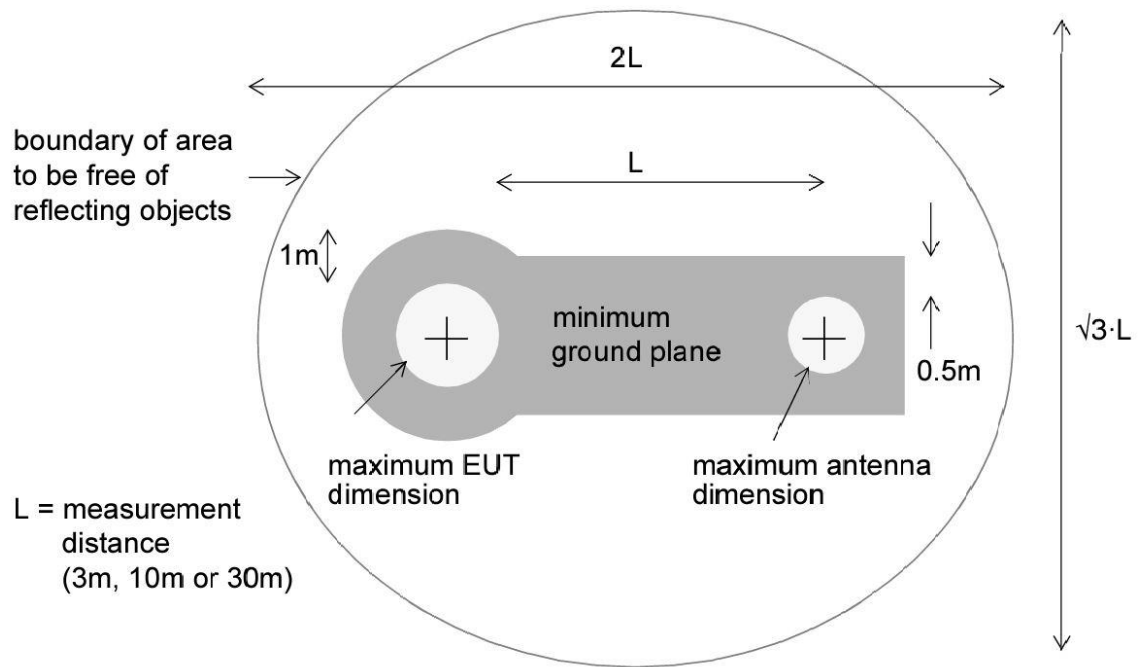
EMC-mittauksiin kuuluvat emissio- ja immunitaettimittaukset. EMC-direktiiveissä on määritetty vaadittavat raja-arvot. Emissiotesteissä mitataan laitteen aiheuttamat sähkömagneettiset häiriöt. Laitteesta mitataan sekä lähtevän säteilyn voimakkuus että johtumalla lähtevät häiriöt. Alle 30 MHz:n taajuuksilla mitataan yleensä häiriöjännitteitä ja yli 30 MHz:n taajuuksilla häiriönsäteilyn sähkökentän voimakkuutta kaukokenttäoloissa. Immunitaettimittauksissa tarkastellaan laitteen toimintaa sen alistuessa häiriökentille, staattiselle sähkölle ja sähköverkon välittämille häiriöille.

4.1 Emissiomittaukset

Säteilevien häiriöiden mittauspaikkana toimii avoin mittapaikka tai häiriösuojattu mittaushuone. Mitattava taajuusalue on tyypillisesti 30 MHz - 1 000 MHz. Avoimen mittapaikan ja häiriösuojatun huoneen täytyy olla tarpeeksi suuria, koska mittaukset tehdään yleensä kaukokentässä. Kaukokentän olosuhteet täytyy täyttää koko taajuusalueella. Emissiomittauksissa laitteen lähettämät signaalit vastaanotetaan antennilla. Säteilystä kehittyy mittausantenniin potentiaaliero, joka antennikaapelin välityksellä johtuu mittavastanottiin. Indusoituneet jännitteet tulkitaan spektrianalysaattorin avulla. Jos tila ei ole suunniteltu säteilevien sähkömagneettisten häiriöiden mittauksiin, lattian, seinien ja mittaukseen kuulumattomien esineiden kautta tapahtuva säteilyjen heijastuma aiheuttaa mittausvirheitä.

4.1.1 Avoin tila

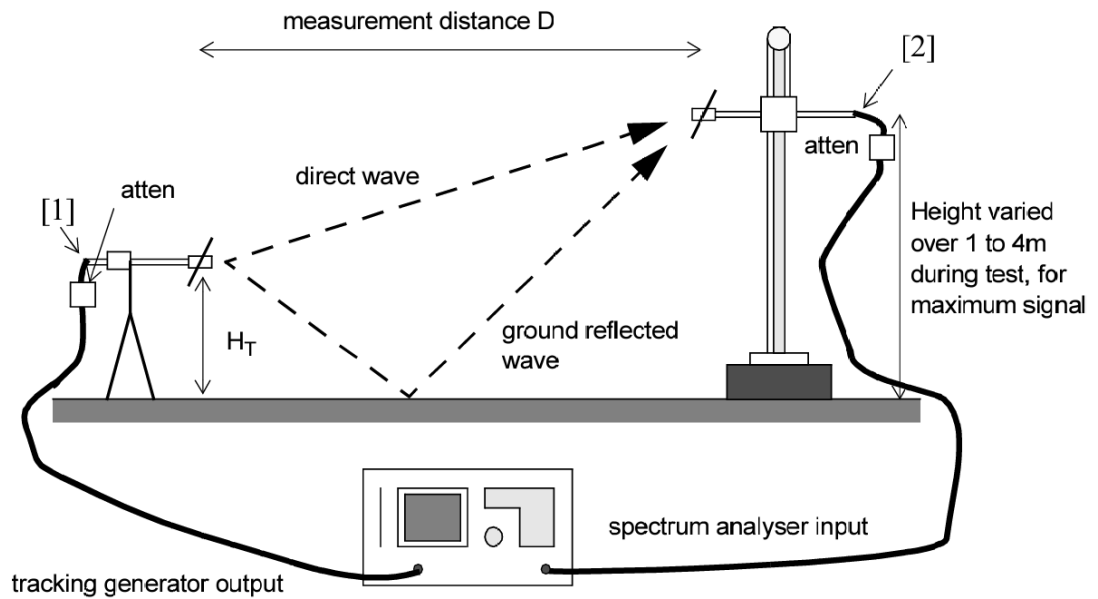
Avoimen tilan mittapaikka on laaja avoin tila, jossa ei ole maatasoa lukuun ottamatta ollenkaan radioaaltoja heijastavia esineitä. Mittapaikan pohjapiirustus on esitetty kuvassa 8. Standardien mukainen mittausantennin ja mitattavan laitteen mittausetäisyys on 3, 10 ja 30 metriä. Heijastamaton alue on ellipsin muotoinen, ja sen pääakselit ovat $2 \cdot l$ ja $\sqrt{3} \cdot l$, jossa l on mittausetäisyys. Kuvasta nähdään metallisen maatasen minimiala.



Kuva 8. Avoin mittapaikka ylhäältä päin [5, s. 141.]

Kolmen metrin mittapaikalla testejä tehtäessä mitattavan 30 – 1000 MHz taajuusalueen alapäässä tulee ongelmaksi lähikenttä. Raja-arvot on yleensä määritelty 10 metrin etäisyydelle. Tästä johtuen joudutaan käyttämään skaalauskerroimia, joista saattaa aiheutua tuloksiin huomattavia virheitä.

Mittapaikan järjestelyjä on havainnollistettu kuvassa 9. Mittausantennin polarisaatiota vaihdetaan pysty- ja vaaka-asentoon. Lisäksi sen korkeutta muutetaan yhden ja neljän metrin. Metallinen maataso heijastaa hyvin radioaaltoja, jolloin mittausten tarkkuus ja toistettavuus paranevat. Mitattava laite laitetaan pyörityspöydällä, jolloin sitä voidaan pyörittää pahimman häiriönsäteilysuunnan löytämiseksi.



Record received signal with points [1] and [2] directly connected, and via antennas

Kuva 9. Avoimen mittapaikan esitys sivulta päin [5, s. 144.]

Avoimen tilan mittapaikkaa ei ole häiriösuojattu, joten mittausantenni vastaanottaa paikalla vallitsevia ympäristön sähkömagneettisia häiriöitä. Niiden tulisi olla 6 dB alle häiriösäteilyn vaatimusrajan. Avoimella mittapaikalla ei tehdä lainkaan sietomittauksia, koska siihen tarkoitettu häiriökenttä pääsisi vapaasti vaikuttamaan myös mittaustilan ulkopuolelle. [3, s. 29–30; 5, s. 141–144.]

4.1.2 Häiriösuojattu huone

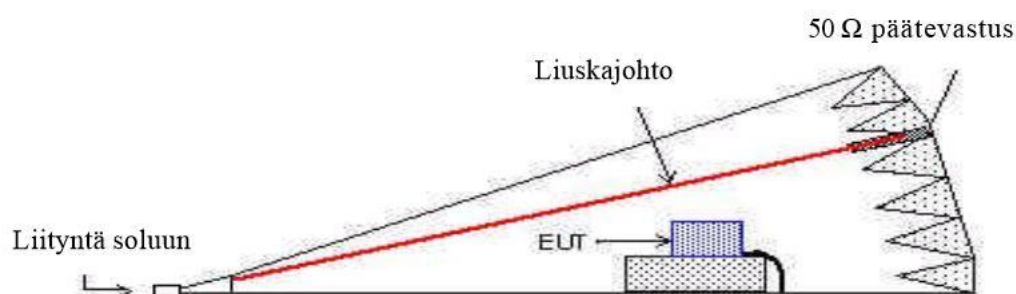
Häiriösuojattu huone muistuttaa hyvin paljon avointa mittapaikkaa. Häiriösuojattu mittapaikka on täydellisesti eristetty ympäristön häiriöistä. Huoneeseen saadaan normaalisti yli 100 dB:n suojausvaimennus. Häiriön vaimennuksen kannalta huoneen lattia, seinät ja katto ovat saumaton yhdistelmä.

Häiriösuojatussa huoneessa mittaukset suoritetaan samoin kuin avoimessa tilassa. Mittausantennin ja mitattavan laitteen välinen etäisyys mittauksissa on tavallisesti 3 tai 10 metriä. Antennin polarisaatiota ja korkeutta muutetaan, ja mitattava laite on tavallisesti pyörityspöydällä. Jos huone ei ole vaimennettu, sen pinnat heijastavat sähkömagneettista häiriötä, jotka aiheuttavat mittausvirheitä. Vaimennusmateriaalien käytöllä saadaan

vaimennus kattamaan laaja taajuusalue, jolloin tila on radiokaiuton. Vaimennusmateriaaleina käytetään yleensä absorbtiokiloja ja ferriittilevyjä. Kun mittausetäisyys on 10 metriä ja tila radiokaiuton, mittaustulokset ovat luotettavia myös taajuusalueen alapäässä. [3, s. 30–31; 5, s. 144–146.]

4.1.3 GTEM-solu

GTEM-solulla (gigahertz transverse electromagnetic cell) saadaan luotua kaukokentän ominaisuudet pienessä tilassa. GTEM-solu koostuu kapeasta pyramidin muotoisesta metallisesta kuoresta. Sen sisällä kulkee impedanssisovitettu liuskajohto solun terävästä päästä vastakkaiseen vaimennettuun päähän. Solulla tehtävät emissiomittaukset muistuttavat häiriösuojatun mittapaikan mittauksia. Mitattavan laitteen on oltava niin etäällä liuskajohdosta, että mittaukset tapahtuvat kaukokentässä. Kammiolla voi tehdä mittauksia vain pienille laitteille, mutta se on kuitenkin paljon edullisempi tapa kuin huoneessa mittaaminen. Kuvassa 10 on havainnollistettu GTEM-solun rakenne. [3, s. 31; 5, s. 140–141.]



Kuva 10. GTEM-kammio [3, s. 31.]

4.1.4 Suurtaajuusvirtapihti

Suurtaajuusvirtapihdillä (absorbing clamp) mitataan laitteeseen kaapelien yhteismuotoinen häiriövirta 30 - 1000 MHz:n taajuuksilla. Mitattavan kaapelin ympärille laitetaan fer-

riittiputki, joka absorboi suurtaajuusvirtaa jännitteeksi. Kaapelin säteilyteho saadaan laskettua ferriittiputkesta saatavasta jännitteestä korjauskertoimen avulla. [3, s. 31; 6, s. 134–136.]

4.2 Immuneettimittaukset

Immuneettimittauksissa tarkastellaan laitteen kykyä toimia sähkömagneettisessa ympäristössä häiriintymättä ja moitteettomasti. Häiriö laitteeseen voi syntyä sekä säteilystä että suorasta kontaktista.

4.2.1 Säteilevien radiotaajuuksien häiriöiden sieto

Säteilevien häiriöiden sietomittaukset tehdään samantapaisissa olosuhteissa kuin emissiomittauksetkin. Mittauksia tehtäessä signaaligeneraattoria käytetään häiriösignaalin luomiseen. Signaali vahvistetaan käyttämällä laajakaistaista tehonvahvistinta ja lähetetään antennin kautta. Häiriösignaaleja luodaan koko taajuusalueella eri voimakkuuksilla. Lisäksi mittaukset tehdään sekä pysty- että vaakapolarisaatiolla. Yleensä laitteen suorituskkyä häirinnän alaisena tarkastellaan mittausmonitorin avulla. Tarvittava kenttävoimakkuus on 10 V/m ja taajuusalue 80 MHz – 1,0 GHz. Yleensä mittaukset tehdään häiriösuojatussa huoneessa, mutta pienillä laitteilla voidaan käyttää myös GTEM-solua. [5, s. 164–176]

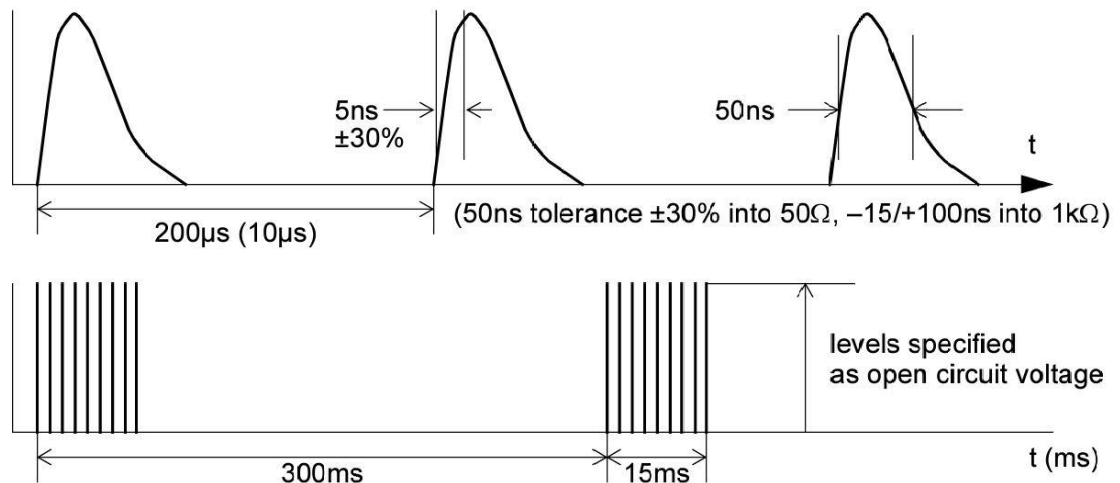
4.2.2 Johtuvien radiotaajuuksien häiriöiden sieto

Johtuvien häiriöiden sieto viittaa mekanismiin, miten elektromagneettinen energia syntyy elektronisessa laitteessa ja siirtyy sieltä virtajohtoon. Sähköinen toiminta radiotaajuuksilla aiheuttaa laitteessa säteileviä magneettikenttiä. Sähkökentille alttiit johdot ja kaapelit ovat johtimia radiotaajuuksille virroille ja jännitteille. Kaikenlaiset sähköiset laitteet vuotavat kyseisiä sähkökenttiä, joko tahattomasti tai sitten ollessaan radiolähtimiä. Mittauksissa kenttävoimakkuus oli 10 Vrms, ja taajuusalue oli 150 kHz–80 MHz.

4.2.3 Nopeat transientit ja purske

Tyypillisiä transienttilähteitä ovat erilaiset kytkimet ja releet. Nämä tuottavat lyhyen purskeen korkeataajuisia impulsseja laitteen virtalähteeseen. Johtuvia transientteja mitatta-

essa, itse transientit, verkko ja portit pitää olla tarkasti määritetty. Standardissa on määritetty ylijännite- tai ylivirtatestit laitteille. Nopeiden transienttien yhden pulssin nousuajaksi on määritetty 5 ns ja kestoksi 50 ns. Lähdeimpedanssi on 50 Ω . Transientit tulevat 15 ms kestoisina purskeina 5 kHz:n taajuudella. Uusi purske luodaan aina 300 ms:n välein. Yhden pulssin jännite vaihtelee 250 V ja 4 kV välillä (kuva 11). [5, s. 187–189.]



Kuva 11. Nopeat transientit [5, s. 188.]

Pursketesti simuloi jännitepiikkejä sähköverkossa, ja ne saattavat muodostua esimerkiksi salamaniskun vaikutuksesta lähellä olevaan sähkölinjaan. Testiä varten määritetään laitteen herkin toimintatila. Testinä yleensä luodaan purskeita minuutin ajan molempina polariteetteina linjasta linjaan sekä linjasta maahan. Standardissa on määritetty jännite- tasot, jotka riippuvat testattavasta laitteesta ja käytettävästä linjasta.

4.2.4 Staattiset purkaukset

Staattisissa purkauksissa eli ESD:ssä ihmisiin ja laitteisiin voi kuivissa olosuhteissa varautua 10...20 kV:n jännite. Tämän varauksen purkautuessa elektroniikkalaitteeseen sen toiminnassa saattaa esiintyä häiriöitä. Ihmisestä tapahtuu ympäristöön jatkuvasti purkauksia, mutta usein niitä ei pysty huomaamaan. Seuraavassa luvussa käsitellään tarkemmin ESD:tä. [2, s. 5.]

5 ESD-mittaukset

5.1 Purkaussmallit

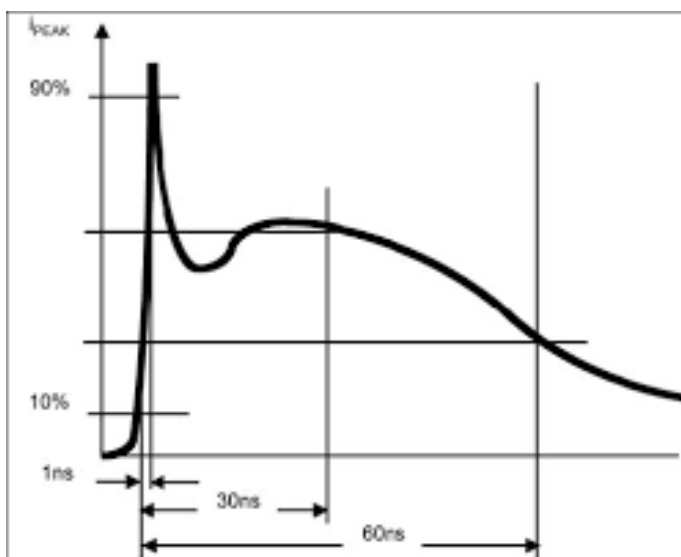
Staattisia purkautumismalleja on useita. Usein purkauksia tarkastellaan niitten kytkentätavan ja esiintymispaikan mukaan. ESD-purkauksessa virran voimakkuus kasvaa räjähdysmäisesti. Tehopiikit saattavat kasvaa erittäin suuriksi. Taulukossa 1 on havainnollistettua ihmisen kyky havaita ESD-purkaus.

Taulukko 1. Ihmisen kyky havaita ESD-purkaus

Tuntoaisti	Kuuloaisti	Näköaisti
> 3000 V	> 4000 V	> 5000 V

5.1.1 Human-body model

Yksi yleinen käytössä oleva malli on HBM (Human-body model). Varautuneen ihmisen koskettaessa johteeseen, joka on maadoitettu, purkautuu hänessä oleva varaus erittäin nopeasti. Näitä ESD-purkauksia tapahtuu koko ajan, mutta usein niitä on mahdotonta havaita. Taulukossa 1 havaittiin, että ihminen havaitsee purkauksen vasta, kun jännitteet kasvavat. Vaikka purkauksen jännite saattaa olla hyvin suuri, se ei kuitenkaan ole terveille ihmiselle vaarallinen, koska sen energiamäärä jää matalaksi ($< 200 \text{ mJ}$). Laitteiden komponenteille vaarallisen ESD-purkauksen kesto vaihtelee muutamista nanosekunneista satoihin nanosekunteihin. Purkauksen energiaan vaikuttavat mm. varaus, kapasitanssi ja sarjaresistanssit. Ihmisen kehon kapasitanssiin sekä ihon resistanssiin vaikuttavat ympärillä vallitsevat olosuhteet. ESD-purkauksen mallinnuksessa käytetään 80–250 pF kondensaattoria ja 100–2500 ohmin sarjavastusta jännitteen ollessa 500–20 000 volttia. Kuvassa 12 on havainnollistettu, minkälainen pulssimuoto syntyy HBM-mallinnuksessa. [4, s. 26.]



Kuva 12. HBM-purkaus

5.1.2 Machine model

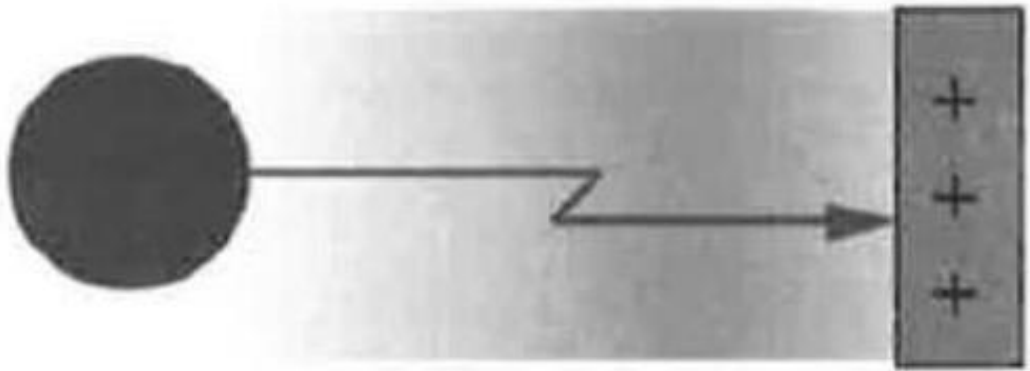
Machine modelissa (MM) esiintyy huomattavasti suurempia ja vaarallisempia ESD-purkauksia kuin HBM-mallissa. MM-mallissa puuttuu sarjavastus, joka rajoittaa virran kulua. Tällaisia purkauksia esiintyy esimerkiksi komponenttien valmistuksessa ja testausvaiheessa. Johtava kappale on yleensä varautunut indusoitumalla ja joutuu suoraan kosketukseen komponentin kanssa. MM-testaus voidaan suorittaa mahdollisesti HBM-laitteistolla. Vastuksen täytyy olla korvattavissa oikosululla ja kapasitanssin muutettavissa.

5.1.3 Ilmapurkaus

Laitteiden suojaustasoa ja sietokykyä voidaan testata suoran kontaktin lisäksi myös ilmapurkauksilla. Ilmapurkauksissa testijännitteet ovat suurempia kuin suorassa kontaktissa. Ilmapurkauksia tehtäessä on erityisen tärkeää, että testipaikka on hyvin eristetty. Täten ei-toivotut virhetoiminnot pystytään välttämään.

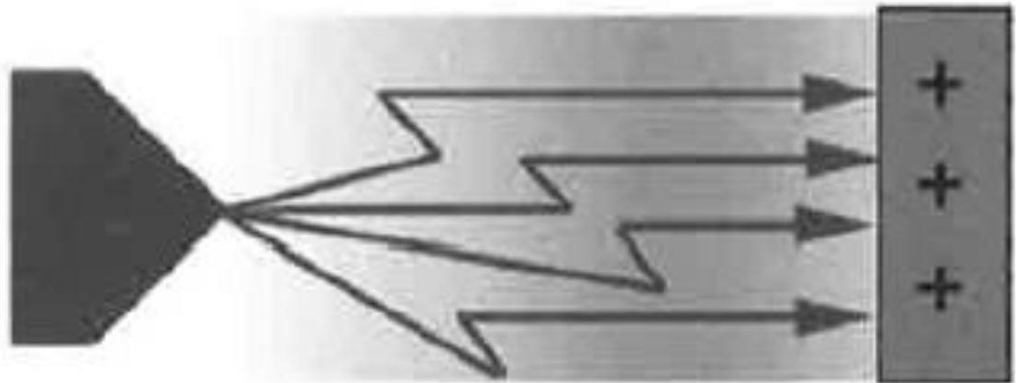
Standardi-ilmanpaineessa (1013,25 hPa) ilman läpilyöntivoimakkuus $E = 3 \cdot 10^6 \frac{V}{m}$ ja dielektrisyyssvakio $\epsilon_r = 1,000536$.

Ihmisen ja metallin välillä tapahtuu usein kipinäpurkauksia. Kipinäpurkauksessa (kuva 13) varaus purkautuu yhtä reittiä suurella virran voimakkuudella. Purkauskanavassa lämpötila saattaa nousta hyvin suureksi, jopa kymmeniin tuhansiin asteisiin.



Kuva 13. Kipinäpurkaus [4, s. 31.]

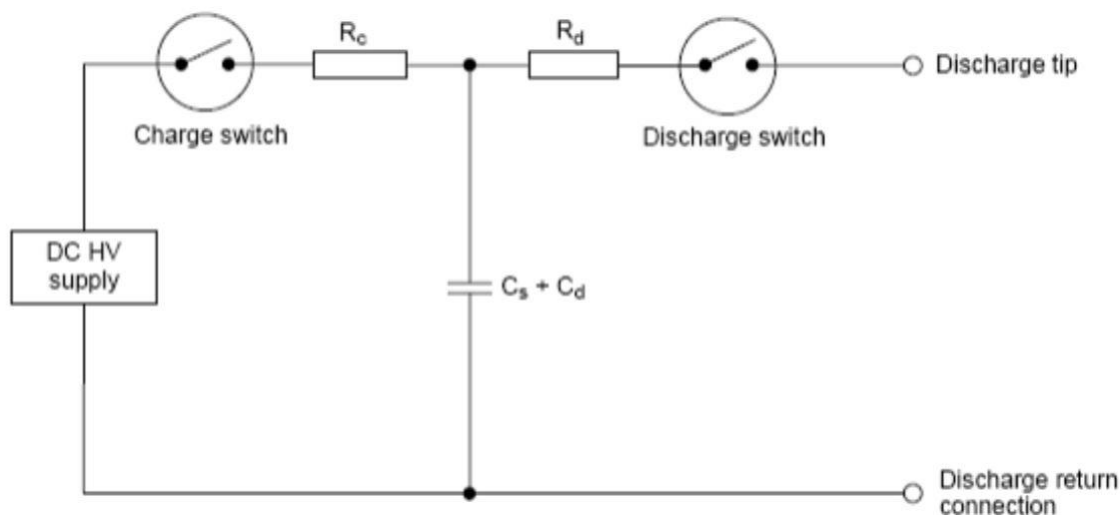
Koronapurkauksia esiintyy kentissä, jotka eivät ole homogeenisia. Purkaus syntyy hyvin suuresta paikallisesta sähkökentän voimakkuudesta johtuen, jolloin se ylittää ilman läpilyöntivoimakkuuden. Koronapurkaus pyrkii muodostamaan eristeeseen useita purkauskanavia. Yleensä koronapurkaus tapahtuu esineen terävissä kulmissa. Ilmiötä voi nimittää myös hidas- tai osittaispurkaukseksi, koska siinä ei esiinny voimakkaita energiatheyksiä. Kuvassa 14 on havainnollistettu koronapurkausta. [4, s. 31–32.]



Kuva 14. Koronapurkaus [4, s. 31.]

5.2 ESD-generaattori

ESD-generaattorilla luodaan keinotekoisesti sähkömagneettinen purkaus. Tällä pystyy testaamaan laitteiden immuuteettia tämän tyyppisiä purkauksia vastaan. Generaattori on määritelty standardissa EN 61000-4-2. ESD-generaattorin piiri on esitelty kuvassa 15.



Kuva 15. ESD-generaattori [6, s. 174.]

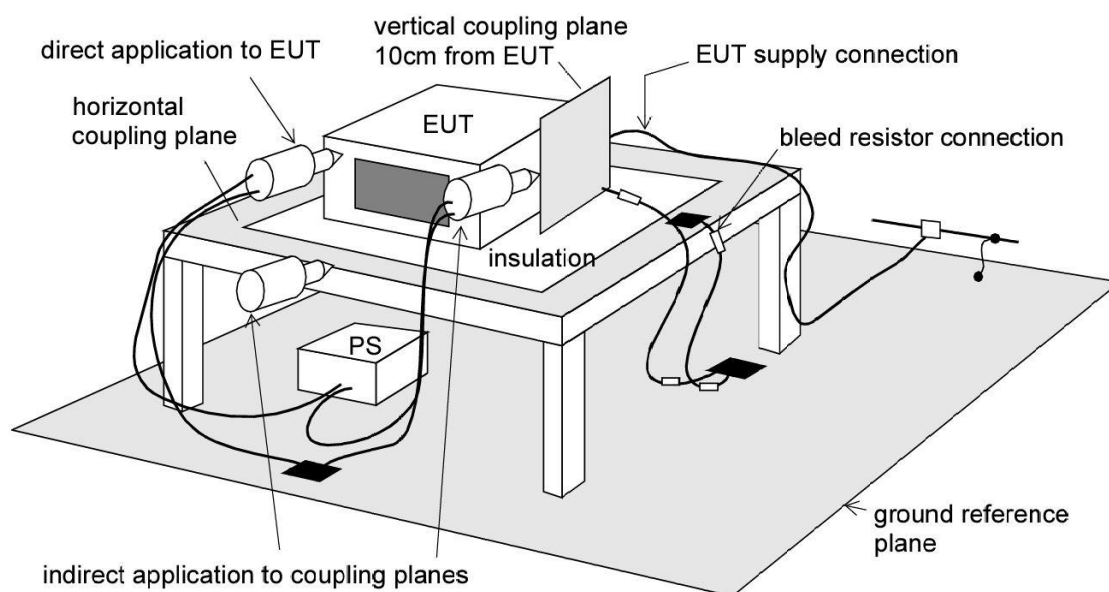
Kondensaattoriin C_s varataan jännite painamalla ensimmäistä kytkintä. Varaus saadaan purkautumaan testattavaan laitteeseen sulkemalla toinen relekytkin. Purkautuvan jännitteen suuruus suoralla kontaktilla tulee olla 8 kV ja ilmateitse kytkeytyessä 15 kV. Jotkin standardoidut testit saattavat tarvita pienempiä jännitteitä. Generaattorin pitää pystyä luomaan tarkoin määritelty aaltomuoto 0,7...1,0 s:n ajanjaksossa. Laitteeseen on kaksi erilaista purkauspäätä vaihtoehtona, terävä suoraa kontaktia varten ja pyöreä ilmateitse kytkeytyvää häiriötä varten. Testin aika vaihdetaan myös jännitteen polariteetti. Laitteen paluujohto on 2 metriä pitkä ja suojattu, ettei se vaikuta ollenkaan luotuun jännitteeseen. [1, s. 103–104; 6, s. 173–180.]

6 ESD-mittapaikka Metropoliassa

ESD-testit voidaan suorittaa sekä isoille että pienille laitteille. Opinnäytetyössä valmistettiin mittapaikka pöydän päälle mahtuville laitteille. Lattian päällä säilytettäville laitteille mittapaikan pystyisi helposti järjestämään, mutta se ei ollut tämän työn tavoitteena.

6.1 Standardin mukainen mittapaikka

Korkeataajuisista ilmiöistä johtuen testipaikalla pitää olla alustana vertailumaataso. Tason päälle laitetaan 80 cm korkea puupöytä. Pöydän päälle laitetaan 1,6 m x 0,8 m kokoinen metallinen kytkeytymistaso. Laite täytyy olla eristettynä tasosta. Pystysuuntainen yhdistymistaso laitetaan 10 cm päähän laitteesta. Pystysuuntaista tasoa käytetään hyödyksi tutkittaessa ilmateitse tapahtuvaa purkausta. Sekä pysty- että vaakataso yhdistetään johtimella vertailumaatasoon. Johdon kummassakin päässä on 470 k Ω :n vastus. Kuvassa 16 on esitetty esimerkki mittapaikasta.



Kuva 16. Standardin mukainen mittapaikka [5, s. 186.]

Kuvassa 16 nähdään vertailumaataso pöydän alla. Testattavan laitteen alla on vaakasuunnassa kytkeytymistaso ja vieressä 10 cm:n päässä pystysuuntainen kytkeytymistaso. Testattava laite on eristetty vaakasuuntaisesti kytkeytymisleivystä.

Testin aikana ESD-generaattorilla yritetään saada luotua häiriö laitteeseen. Suora kontakti pyritään laittamaan mahdollisimman herkkiin paikkoihin, joihin laitteen käyttäjä pääsee normaalistikin koskemaan. Tällaisia ovat esimerkiksi metalliset liittimet ja liitoskohdat. Molempia kytkeytymistasoja käytetään ilmateitse purkautuvaa varausta simuloituessa. Nopeasti varautuva taso aiheuttaa muuttuvan sähkö- ja magneettikentän, joka saattaa purkautua testattavaan laitteeseen. [5, s. 185–187; 6, s. 178–180.]

6.2 Testipaikka

ESD-testit suoritetaan Metropoliassa häiriösuojatussa huoneessa. Pöytä, joka otettiin mittauksia varten käyttöön, on hieman vaakatasoa pienempi, ja sen metalliset jalat ovat alle 80 cm korkeat. Paikalla ei ole ollenkaan vertailutasoa, vaan tasot on suoraan yhdistetty suojamaahan johtimella. Johtimina käytetään normaaleja mittajohtoja, koska baananiliittimet on helppo tarvittaessa irrottaa, jos pöydän haluaa siirtää toiseen paikkaan väliaikaisesti. Johtimiin lisättiin 470 k Ω :n vastukset, jotka lisäksi koteloitiin mahdollisten häiriökontaktien välttämiseksi. Kuvassa 17 näkyy, kuinka suojamaahan yhdistetyn johtimien vastukset on koteloitu.



Kuva 17. Suojamaa, jonka vastukset on erotettu mahdollisista kontakteista

Pöydän päälle laitettiin standardin mukainen metallitaso. Eristelevyksi valittiin muovinen levy.

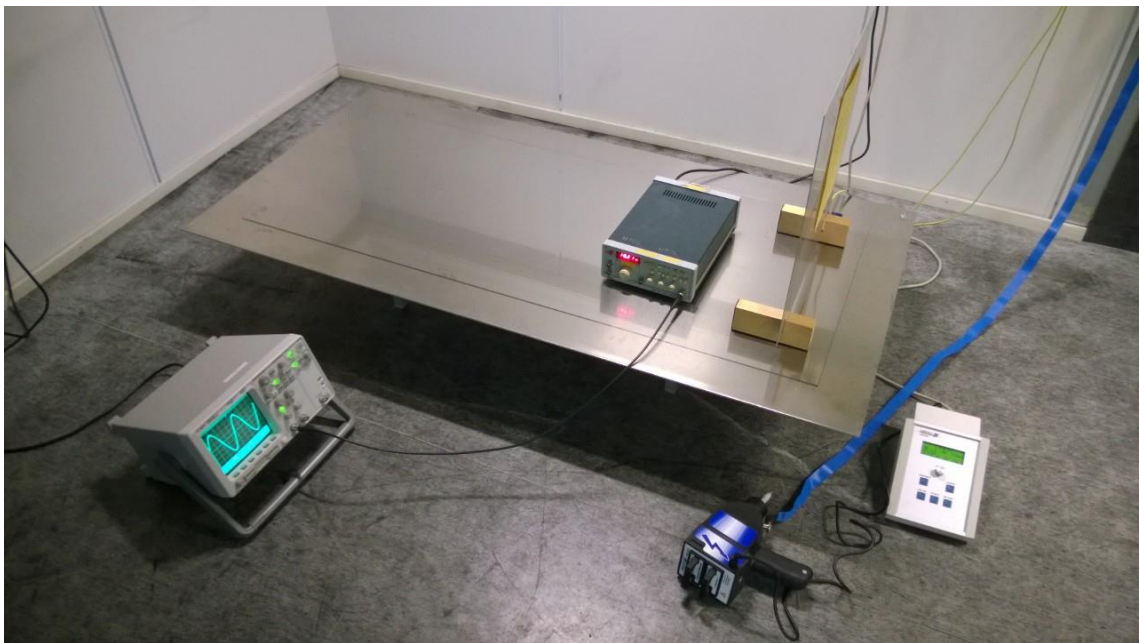
6.3 Tulokset mittapaikalla

Koululla on käytössä ESD-generaattori PESD 3010. Mittapaikalla päätettiin tehdä ESD-mittaukset yhdelle laitteelle. Testattavaksi laitteeksi valittiin signaaligeneraattori. Tuotettavaa signaalia tarkkailtiin oskilloskoopilla. Laitteelle saadaan oikea testiluokka testit suorittamalla.

Testattavat laitteet voidaan jakaa neljään eri luokkaan riippuen, kuinka toimintakyky säilyi testin alaisena:

- a) Laite toimi täysin normaalisti.
- b) Laitteeseen tuli häiriö testin alaisena, mutta se palautui itsestään toimintakuntoiseksi testin päätyttyä.
- c) Laitteeseen tuli häiriö testin alaisena, mutta se ei palaudu toimintakuntoon ilman käyttäjän apua.
- d) Laitteeseen tuli häiriö testin alaisena, eikä se enää palaudu toimintakuntoon.

Testattava signaaligeneraattori suoriutui testeistä hyvin. Testiasetus näkyy kuvassa 18.



Kuva 18. Signaaligeneraattorin toimintakyvyn testaus

Ilmateitse luoduissa purkauksissa ei esiintynyt lainkaan häiriöitä, joten laite toimi testissä a-luokan mukaisesti. Kuitenkin suoralla kontaktilla saatiin aikaan pieni häiriö näkymään oskilloskoopissa, mutta signaali palautui automaattisesti normaaliksi. Täten kyseissä testissä laite toimi b-luokan mukaisesti. [6, s. 190.]

7 Yhteenveto

Opinnäytetyössä oli tavoitteena tutkia kyky tehdä standardin EN 61000-4-2 mukaiset ESD-mittaukset Metropolia Ammattikorkeakoulun EMC-huoneessa. Tavoitteena oli tarkastaa ESD-generaattorin tämän hetkinen tilanne. Lisäksi tavoitteena oli parantaa mitausympäristöä mahdollisuuksien mukaan.

Koulun ESD-generaattori toimi testeissä moitteettomasti. Pöydän päälle hankittiin standardin mukainen yhdistymismaatase ja eristelevy. Koulun laboratoriosta puuttuu edelleen vertailumaatase. Tässä mittauksessa sen puuttumisella ei ole juuri merkitystä, koska yhdistymismaataseen saa helposti yhdistettyä suojamaahan. Vertailumaatase kannattaisi silti kuitenkin hankkia, koska sitten testipaikalla pystyisi helposti suorittamaan ESD-testit myös isommille, pöydän päälle mahtumattomille laitteilla. Lisäksi pystyisi käyttämään parantamaan myös muita EMC-mittauksia kyseisessä laboratoriossa. Tämän hetkinen testeissä käytettävä pöytä ei ole standardin mukainen, mutta se ei vaikuta mittaustuloksiin.

Lähteet

- 1 Williams, Tim. 1996. EMC for Product Designers second edition. Great Britain: Newnes.
- 2 Häkkinen, Esa, Fallström, Kim, Haapalinna, Atte & Kärhä, Petri. 1999. Häiriöt mittauksissa. Verkkodokumentti < <http://metrology.hut.fi/courses/s108-180/haimit.pdf> >. Luettu 14.3.2016.
- 3 Rajamäki, Jyri. 6/2000. EMC- direktiivin ensimmäiset kymmenen vuotta. Verkkodokumentti.< <http://www.tukes.fi/Tiedostot/julkaisut/6-2000.pdf> >. Luettu 14.3.2016.
- 4 Viheriäkoski, Toni. 2001. ESD Staattinen sähkö elektronikassa. Helsinki: Edita.
- 5 Williams, Tim. 1996. EMC for Product Designers fourth edition. Great Britain: Newnes.
- 6 IEC EN 61000-4-2: Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test.