

Pekka Uusitalo

REFERENSSISÄTEILIJÄ EMC-LABORATORIOON

Insinöörityö

Kajaanin ammattikorkeakoulu

Tekniikan ja liikenteen ala

Tietotekniikan koulutusohjelma

Kevät 2004

Osasto Tekniikka	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Pekka Uusitalo	
Työn nimi Referenssisäteilijä EMC-laboratorioon	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Langaton tiedonsiirto	Ohjaaja(t) Jukka Heino
Aika 7.4.2004	Sivumäärä 40+9
Tiivistelmä <p>Työn tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa koulun EMC-laboratorion käyttöön referenssisäteilijä, jota voitaisiin käyttää jatkossa laboratorion referenssitason asettamiseen.</p> <p>Standardit mahdollistavat eri mittalaboratorioiden tekemien mittausten vertailun. Niiden avulla on määritetty yhteiset mittausten periaatteet ja raja-arvot. Työssä tutustuttiinkin myös EMC-mittauksien standardeihin ja yleisiin mittausmenetelmiin sekä mittausvirheiden korjausmenetelmiin. Lisäksi käsiteltiin mittausepävarmuuden määrittämistä ja mittaustulosten ilmoittamista.</p> <p>Työn tekninen osa toteutettiin kahdella erillisellä laitteella, joista toinen oli tarkoitettu johtuvien häiriöiden alueelle ja toinen säteilevien häiriöiden alueelle. Laitteiden toiminta testattiin EMC-laboratoriossa.</p>	
Luottamuksellinen Kyllä Ei X	
Hakusanat EMC-mittaukset, mittausepävarmuus, mittausvirheet	
Säilytyspaikka	

Faculty Faculty of Engineering	Degree programme Information Technology
Author(s) Pekka Uusitalo	
Title A Reference Emitter for the EMC Laboratory	
Optional professional studies Wireless Data Transfer	Instructor(s) / Supervisor(s) Jukka Heino
Date 7.4.2004	Total number of pages 40+9
<p>Abstract</p> <p>The goal of this final year project was to plan and produce a reference emitter for the EMC laboratory of Kajaani Polytechnic. The reference emitter was planned to be used in setting the reference level for future measurements.</p> <p>Standards make it possible to compare measurements made by several different measuring laboratories. General measuring methods and limits are publicly defined by standards. Partly because of this fact the project also included becoming familiar with EMC standards, general measurement methods and repairing methods of measurement errors. The project also included a specification of measurement uncertainty.</p> <p>The technical part of the project was completed with two separate devices. The first was for band of conducting disturbances and the other was for radiated disturbances. The devices were tested in the EMC laboratory.</p>	
<p>Confidential</p> <p>Yes</p> <p>No</p> <p>X</p>	
<p>Keywords</p> <p>EMC –measurements, measuring uncertainty, measuring errors</p>	
<p>Deposited at</p>	

Alkusanat

Tämä työ osoittautui minulle haasteeksi, jollaista en siitä aivan osannut odottaa. Tiesin, että opinnäytetyön tekeminen on työlästä, mutta sen vaatima huikea työmäärä yllätti.

Työn valmistuminen olisikin ollut mahdotonta ilman muutamien henkilöiden opastusta ja tukea. Haluankin kiittää Jukka Heinoa opastuksesta sekä kirjallisen että teknisen osan työstämisessä. Kiitokset myös Ari Pulkkiselle avusta laitteiden mittauksissa ja Eero Soiniselle ja Kaisu Korhoselle kielellisestä ohjauksesta. Erityiskiitokset myös perheelle ja ystäville joiden tuki auttoi suuresti työn valmistumisessa.

Kajaanissa 31.3.2004

Pekka Uusitalo

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	6
2 STANDARDIT	9
2.1 IEC 61000	9
2.1.1 Osa 2: Ympäristö	9
2.1.2 Osa 4: Mittaus- ja testaustekniikat	15
2.2 CISPR-Standardit	18
3 MITTAUKSET JA MITTAUSEPÄVARMUUS	20
3.1 Virheen käsittely	21
3.2 Mittaustapahtuman virhelähteet	23
3.3 Mittausliitännän aiheuttamat rajoitukset	27
3.4 Mittausvirheiden korjausmenetelmät.....	28
3.5 Kytkennät	29
3.5 Muut virheenpoistomenetelmät	31
3.6 Mittausepävarmuuden arvioiminen	32
4 REFERENSSISÄTEILIJÄ	36
4.1 Työn taustaa	36
4.2 Johtuvat häiriöt.....	37
4.3 Säteilevät häiriöt	37
5 YHTEENVETO.....	39
LÄHDELUETTELO	40
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Sähkömagneettinen säteily voidaan käsittää välitysaineen avulla etenevänä aaltorintamana. Perustilanteessa säteily etenee pistemäisestä säteilijästä pallomaisena, jolloin säteilykentän laskutoimitukset ovat varsin yksinkertaisia. Rf-tekniikassa käytetään kuitenkin yleensä antennoja, joilla voidaan suunnata lähetettävä signaali halutulle sektorille ja joilla voidaan myös vahvistaa signaalia. Antenneja käytettäessä laskutoimitukset muuttuvat huomattavasti monimutkaisemmiksi johtuen siitä, että antennin säteilykuvio ei ole yleensä pallomainen, vaan se riippuu huomattavasti antennin muodosta ja pituudesta. Antenniryhmiä käsiteltäessä on huomioitava kaikkien antennien yhteisvaikutus ja mahdollinen vaiheistus.

Sähkömagneettisen kentän eteneminen on varsin riippuvainen etenemisympäristön olosuhteista ja ominaisuuksista. Myös etenemistapa voi vaihdella signaalin taajuudesta ja polarisaatiosta riippuen. Etenemisen vaihtelevuuden voi helposti havaita esim. radio- ja tv-lähetyksiä seuraamalla: toisinaan jotkut asemat näkyvät ja kuuluvat erinomaisesti, toisinaan niitä ei taas saa kuulumaan millään. Tämä siitä riippumatta, että lähetykset pyritään pitämään lähetyksasemilla mahdollisimman vakiona.

Etenemisen ongelmana voivat olla myös aallonpituutta lähellä olevat esteet tai suuret heijastavat pinnat. Huomattava on myös se, että mitä suurempi on signaalin taajuus, sitä suuremmalla teholla se täytyy lähettää, jos halutaan samanlainen kuuluvuus.

Suurtaajuisten signaalien johtimina käytetään yleensä koaksiaalia ja on huomioitava, että siirtolinjojen rakenteelliset vaatimukset ovat hyvin tarkkoja. Esimerkiksi käännösten ja liitosten tekeminen on erittäin vaativaa. Virheellinen mitoitus siirtolinjassa voi aiheuttaa vakavia vaimentumisia ja heijastumia.

Myös antennin sovittamisella siirtolinjaan on erittäin tärkeä merkitys etenkin lähetinlaitteistojen tehobudjetissa. Antennin sovituksella pyritään siirtämään mahdollisimman suuri osa tehosta kuormaan. Huonon sovituksen aiheuttamia ongelmia voivat olla esim. huono hyötysuhde tehonsiirrossa, heijastumat antennin ja siirtolinjan rajapinnassa sekä edellä mainituista johtuva siirtolinjan kuumeneminen.

EMC-mittaukset

EMC-mittauksilla tarkoitetaan mittauksia, joissa tutkitaan kohteen emittoimaa sähkömagneettista säteilyä, kohteen sähkömagneettisten häiriöiden sietoa, kohteen absorbaatio-ominaisuuksia yms. Tällaisissa mittauksissa on tärkeää, että taustasäteily ja mahdolliset muut ulkopuoliset häiriötekijät eivät pääse vaikuttamaan mittaustuloksiin. Tämän vuoksi mittaukset suoritetaan tilassa, joka on eristetty ulkopuolisten häiriöiden varalta mahdollisimman hyvin. Tilassa on yleensä vain mittaussantenni, absorboivia materiaaleja ja mitta-alusta. Absorboivilla materiaaleilla on vuorattu tilan seinät siten, että heijastumat jäisivät mahdollisimman vähäisiksi. Nämä materiaalit "imevät" kohteesta tulevaa säteilyä itseensä ja muuttavat sen lämmöksi, jolloin mittauksista saadaan varsin tarkkaan selville, kuinka paljon mitattava kohde säteilee ympäristöönsä.

EMC-mittauksilla pyritään siis selvittämään, kuinka laitteet toimivat ympäristössä jossa on muitakin säteilylähteitä. Mittauksien tärkein tulos ei olekaan tavallaan laitteen säteilyarvot vaan laitteen "yhteensopivuus" sähkömagneettisessa ympäristössä. Tästä myös lyhenne EMC (Electromagnetic Compatibility).

Yleisesti ei ole järkevää lähteä ilmoittamaan ns. maksimiarvoja vaan tavallisesti mittaustuloksista annetaan tulokset, joiden periaatteena on, että 95 prosentissa tapauksissa häiriötasot ovat näiden rajojen sisällä. Yhteensopivuustason tarkoituksena on toimia omalta osaltaan eräänlaisena ongelmattoman toiminnan vertailutasona.

Myös laitteen immunitaattitaso tulisi olla vähintään vastaava kuin yhteensopivuustaso. Immunitaattitasot täytyy mitata tarkoitukseen sopivilla, standardien määräämillä tavoilla. Laitteiston altistumistasona pidetään tasoa, jolla häiriöt vaikuttavat laitteen toimintaan huomattavissa määrin.

EMC-mittaustulokset ovat varsin tärkeitä, kun ajatellaan kuinka paljon nykyäikana säteileviä kohteita löytyy lähestulkoon kaikkialta. Säteilevät kohteet voivat aiheuttaa häiriöitä toisiinsa tai olla jopa terveysriski. Viime aikoina onkin puhuttu paljon esimerkiksi matkapuhelimien säteilyarvoista ja niiden yhteyksistä lisääntyneeseen aivokasvaimien esiintymismäärään. Tämän vuoksi on ymmärrettävää, että EMC-mittauksia tehdään yhä enenevässä määrin.

Työn tavoitteet

Tämän insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa koulun EMC-laboratorion käyttöön referenssisäteilijä, jonka avulla voitaisiin todeta emissiomittauslaitteiston toimintakunto.

Laitteelle annettiin tavoitteelliset signaalitasot, jotka olivat johtuvien häiriöiden alueella 50 - 70 dB μ V ja säteilevien häiriöiden alueella 40 - 60 dB μ V. Tavoitteena oli rakentaa laite, josta saataisiin ulos vähintään viisi spektriippiikkiä molemmille alueille. Näiden piikkien tuli kattaa ennalta määrätyt taajuusalueet soveliaalla tavalla.

2 STANDARDIT

EMC-mittauksissa, kuten muissakin tarkoissa mittauksissa, on tarpeen sopia kansainväliset rajat mittauksille ja tavat, kuinka mittauksia suoritetaan. Tällöin kaikissa laboratorioissa tehdyt mittaukset ovat vertailukelpoisia keskenään. Näitä määrittelyjä valmistelemassa on useita eri instansseja, kuten esim. IEC (International Electrotechnical Commission), ISO (International Standard Organization) ja CISPR (International Special Committee on Radio Interference). Nämä järjestöt ovat laatineet yhteiset säädökset, joita kutsutaan standardeiksi.

Standardit voidaan jakaa usealla eri tavalla, mutta yksi paljon käytetty tapa on jakaa standardit niiden käyttötarkoituksen perusteella perus-, yleis- ja tuotestandardeihin. Perusstandardit määrittelevät yleensä yksityiskohtaisesti yhden EMC-mittauksen, siihen tarvittavan tilan, laitteiston ja suoritustavan. Yleisstandardit taas määrittelevät käyttöympäristön mukaisesti laitteelle vaaditut EMC-testit ja testien tasot. Tuotestandardi määrittelee tietylle tuotteelle tai tuoteperheelle tarvittavat EMC-testit ja vaatimukset. Kaikissa tapauksissa itse mittaukset tehdään perusstandardien määrittämällä tavalla. [1.]

2.1 IEC 61000

IEC 61000 -standardiperhe määrittelee mittausympäristön ominaisuuksia ja sallittuja häiriötasoja.

2.1.1 Osa 2: Ympäristö

Osassa on annettu yleinen kuvaus ympäristöstä ja lähinnä kuvaus säteilevistä häiriöistä sekä johtuvien häiriöiden ja hyötysignaalien sähkömagneettisesta käyttäytymisestä julkisessa sähköverkossa. Ympäristön vaikutuksessa on otettava huomioon, että erityyppisillä ympäristöillä on omat karakteristiset ominaisuutensa. Esimerkiksi asuin-, teollisuus- ja kaupallisilla alueilla voi ympäristön aiheuttaman taustamelun luonne olla hyvin erilainen (Liite C). Siksi standardissa

onkin keskitytty esittämään tilanteita tietyntyyppisissä tapauksissa sen sijaan, että olisi pyritty yleispätevään esitystapaan. Varsinaiset mittaukset tulisi suhteuttaa aina kyseisen ympäristön olosuhteisiin ja paikalliseen referenssitason. [2, Osa 2.]

Osassa 2 on annettu myös raja-arvoja ympäristössä esiintyville ilmiöille. Osassa käsitellyjä ilmiöitä ovat harmoniset, virhevärähtelyt, jännitteen vaihtelu, jännitteen notkahdus ja lyhyet katkot, jännitteen epätasaisuus, signalointi pääsähköverkossa, sähköverkon taajuuden vaihtelu, tasajännitekomponentit, säteilevät häiriöt ja sähköverkosta riippumattomat johtuvat häiriöt. Osa 2 sisältää myös mittaus- ja testaustekniikoiden määrittelyn.

Osan pääasiallisena tarkoituksena on antaa informaatiota yleisessä sähköverkossa mahdollisesti ilmenevistä häiriöistä ja antaa vertailukohtia yhteensopivuustasojen määrittelyvaiheessa, sekä ohjeistaa mittaus- ja testaustekniikoiden periaatteita. [2, Osa 2.]

Harmoniset

Harmoniset ovat sinimuotoisia jännite- tai virtasignaaleja, joiden taajuudet ovat jakeluverkon taajuuden monikertoja. Yleisimpiä harmonisten lähteitä ovat verkkoon liitetyt verkon kannalta epäsovituksessa olevat laitteet, joiden aiheuttamien harmonisten signaalien vaikutuksena voivat olla esimerkiksi jännitepiikit, joita voi esiintyä jopa varsin kaukana varsinaisesta ongelman aiheuttajasta. Pahimpia ongelmia harmoniset voivat aiheuttaa teleliikenteessä ja tehohäviöiden muodossa. [2, Osa 2.]

Harmonisten EMC-rajoja määritettäessä on otettu huomioon sekä yksittäisten harmonisten esiintyminen että useiden harmonisten yhteisvaikutus. Yksittäisten harmonisten EMC-rajat on esitetty taulukkomuodossa. Harmonisten EMC-rajojen taulukko löytyy liitteestä A. Kun useita harmonisia vaikuttaa yhtä aikaa, on otettava huomioon myös niiden summautuminen. Harmonisten yhteisvaikutusta voidaan määrittää monella eri tavalla. Eri tapoja ovat muun muassa suora poikkeama teoreettisesta siniaallosta, kokonaishäiriötekijä ja

painotettu kokonaishäiriötekijä. Näistä ensimmäistä käytetään harvoin, koska sitä on varsin vaikea mitata. Kokonaishäiriötekijälle on määritetty laskutapoja ja tarkka raja-arvo, jossa on hyödynnetty yksittäisten harmonisten raja-arvoja ja sitä oletusta, etteivät kaikki harmoniset saavuta maksimiarvoaan samanaikaisesti. Kokonaishäiriötekijän laskeminen tapahtuu kaavalla

$$D = \sqrt{\sum_{n=2}^N \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2},$$

missä D = kokonaishäiriötekijä
 n = harmonisen järjestysluku
 U_n = n:nnen harmonisen jännitteen amplitudi
 U₁ = perustaajuuden jännitteen amplitudi.

N:n arvona voidaan käytännössä pitää 40. Kokonaishäiriötekijälle D on annettu raja-arvoksi 0,08. [2, Osa 2.]

Painotetussa laskentatavassa kutakin yksittäistä harmonista on painotettu tilanteeseen sopivalla tavalla.

Virhevärähtelyt

Virhevärähtelyt ovat jännite- tai virtasignaaleja, joita esiintyy perustaajuuden ja harmonisten taajuuksien välissä. Nämä signaalit voivat esiintyä joko yksittäisinä taajuuksina tai laajakaistaisena spektrinä. Virhevärähtelyt poikkeavat harmonisista sikäli, että niiden summautuminen on varsin epätodennäköistä, eikä niitä sen vuoksi pidetä kovin haitallisina. Harmittomuutensa vuoksi niitä ei ole myöskään tutkittu kovin tarkoin, eikä tarkkoja raja-arvoja ole annettu. Yleisimpiä virhevärähtelyjen lähteitä ovat moottorit ja hitsauslaitteet, jotka tuottavat varsin laajakaistaista kohinaa. [2, Osa 2.]

Jännitteenvaihtelu

Jännitteenvaihtelu voi olla luonteeltaan syklistä tai satunnaisten vaihtelujen ryp-päitä. Ilmiönä jännitteenvaihtelu on varsin nopea ja poikkeaa siten jännitteen huojunnasta. Ilmiön aiheuttajat löytyvät yleensä teollisuuden piiristä: aiheuttajina voivat olla esimerkiksi suuret moottorit ja hitsauslaitteet. Yleensä jännitteenvaihtelu jää ± 10 % jännitteen keskiarvosta, mistä johtuen sen aiheuttamat on-gelmat eivät ole kovin suuria. [2, Osa 2.]

Jännitteen notkahdus ja lyhyet katkot

Jännitteen notkahdus esiintyy lyhyenä puolen jakson ajan tai korkeintaan muutaman sekunnin mittaisena jännitteen alenemisena verkossa (vähintään 90 % keskimääräisestä), jonka jälkeen jännite taas palautuu ennalleen. Lyhyenä katkona voidaan taas pitää korkeintaan minuutin mittaista katkosta sähkönjake-lussa. Nämä ilmiöt aiheuttavat yleensä laitteiden toiminnan väliaikaisen häiriintymisen. Tosin toiminnan pitempiaikaiset häiriötkin ovat mahdollisia. [2, Osa 2.]

Jännitteen epätasaisuus

Jännitteen epätasaisuus tarkoittaa ilmiötä, jossa kolme vaihetta eivät ole nor-maalissa 120 asteen vaihesiirrossa toisiinsa nähden. Ilmiölle on asetettu EMC-
raja-arvoksi 2 %, mutta suurempiakin poikkeamia voi ilmetä etenkin vikojen yh-teydessä. Tämän ilmiön aiheuttajina ovat yleensä yksivaihevirtaa käyttävät lait-teet. Ilmiön aiheuttama suurin haitta on yleensä laitteiden johtojen lämpenemi-nen, joten ilmiön esiintyminen hetkittäin ei ole kovin haitallista. [2, Osa 2.]

Signalointi pääsähköverkossa

Sähköverkko on tarkoitettu pääasiallisesti sähkönsiirtoon, mutta siellä voidaan myös lähettää ohjaussignaaleja, ja on puhuttu myös paljon datan siirrosta säh-köverkossa. Sähköverkossa lähetettävien signaalien taajuus vaihtelee yleensä 110 kilohertsistä 500 kilohertsiin. Matalammilla taajuuksilla (110 Hz - 20 kHz)

signaalivoimakkuudet on rajoitettu 2 - 5 prosenttiin pääsignaalin voimakkuudesta. Radiotaajuuksilla (20 kHz - 150 kHz) voimakkuus on rajoitettu 0,3 prosenttiin. Signaalien on todettu voivan häiritä verkossa olevia laitteita mutta ilmiö on erittäin harvinainen. [2, Osa 2.]

Sähköverkon taajuuden muutokset

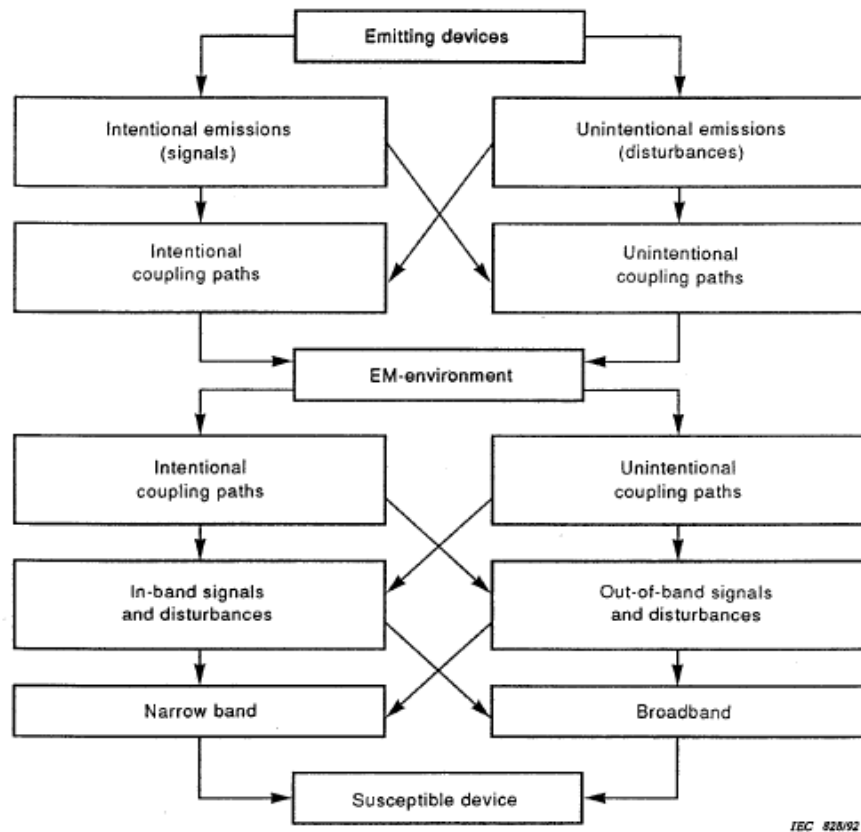
Sähköverkon taajuus on normaalisti 50 tai 60 Hz maanosasta riippuen. Taajuus voi kuitenkin vaihdella hieman. Alle 10 %:n vaihtelut eivät kuitenkaan aiheuta yleensä ongelmia laitteiden toiminnassa ja pääsähköverkon vaihtelut ovatkin yleensä korkeintaan 1 Hz:n luokkaa. Ainoastaan laitteet jotka käyttävät sähköverkon taajuutta kellonajan ylläpitoon, menettävät synkronointinsa tarkkaan aikaan. Ilmiö voi aiheuttaa myös sähkömoottoreiden tehon vaihtelua. [2, Osa 2.]

Säteilevät laitteet

Säteileviä laitteita käsiteltäessä on huomioitava niiden vaikutus sähkömagneettiselle säteilylle alttiisiin laitteisiin. Vaikutustavat voivat olla sekä haluttuja, kuten esimerkiksi radiolähetykset, että ei-haluttuja, kuten moottoreiden aiheuttamat häiriöt. Laitteiden keskinäinen interferenssi voi aiheuttaa vakavia toimintahäiriöitä tai jopa täyden toimimattomuuden, ellei niitä ole suojattu riittävällä tavalla. Näiden laitteiden keskinäistä vaikutusyhteyttä kuvaa lohkokaavio kuvassa 1.

Häiriölähteestä tuleva säteily voi edetä usealla eri tavalla, esimerkiksi johtamalla, indusoitumalla ja puhtaasti säteilevänä. Yleensä etenemistapana on usean eri tavan yhdistymisiä.

Matalataajuisia johtuvia häiriöitä mitataan yleensä käyttämällä keinoverkkoa, jonka ominaisuudet ovat tarkalleen tiedossa. Keinoverkon kuorma pyritään yleensä muodostamaan sellaiseksi, että se muistuttaa pääsähköverkon kuormaimpedanssia. Mittauksissa on kuitenkin huomattava, että saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia. Kun häiriölähde asetetaan piiriin, jonka impedanssi poikkeaa mittaustilanteen impedanssista, muuttuvat myös sen emissio-ominaisuudet.



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn vaikutusyhteys [2]

Säteilevät lähteet muodostavat kentän, joka koostuu kahdesta komponentista, sähkö- ja magneettikentästä. Sähkö- ja magneettikenttä ovat tasossa kohtisuoraan toisiinsa nähden. Näiden kenttäkomponenttien käyttäytyminen muistuttaa toisiaan, joten laskennallisesti niitä voidaan käsitellä yhtenä kokonaisuutena.

Tavallisimpia säteileviä lähteitä ovat radiolähettimet, joista saatava signaali suunnataan antennin avulla. Antennin säteilyteho P_{ERP} voidaan laskea

$$P_{ERP} = G_r P_t \quad ,$$

missä G_r on antennin vahvistus ja P_t lähetysteho [2, Osa 2]. Tämän perusteella voidaan laskea kaukokentän kentänvoimakkuus etäisyydellä r lähetyspisteestä (voimassa $\lambda/2$ -dipolille):

$$E = \sqrt{\frac{ZG_h \cdot P_{ERP}}{4\pi r}} \approx 7 \sqrt{\frac{P_{ERP}}{r}},$$

missä Z on tyhjiön impedanssi (377 Ω) ja G_h on vakio 1,64 [2, Osa 2].

Kuten aiemmin mainittiin, sähkömagneettisen tehon johtuminen on hyvin monimutkainen tapahtuma, eikä sen eksaktia laskemista yleensä pystytä suorittamaan. On kuitenkin kehitetty mallinnuksia, joiden avulla laskutoimitukset ovat yksinkertaisempia. Nämä mallit on jaettu kolmeen eri ryhmään: yhteisimpedanssijohtuminen, induktiivinen johtuminen (lähikentässä) ja säteilevä johtuminen (kaukokentässä). Näitä johtumistapoja ja niiden matemaattisia mallinnustapoja on käsitelty varsin yksityiskohtaisesti IEC 6100 -standardin toisessa osassa.

Kentänvoimakkuuksien tasot on tarkkaan määritelty edellämainitun standardin nojalla, ja esimerkiksi Suomessa kentänvoimakkuuksia tarkkaillaan viranomaisen toimesta. Sallitut kentänvoimakkuustasot on sovittu kansainvälisesti yhteneviksi, ja ne on esitetty taulukoituna muun muassa IEC 6100 -standardin yhteydessä (Liite B). Mainittakoon, että standardissa on myös kuvaus luonnonilmiöiden, kuten esim. salamoinnin vaikutuksesta sähköverkkoon.

Standardin osassa 3 on annettu tarkat raja-arvot osassa 2 esitellyille ilmiöille.

2.1.2 Osa 4: Mittaus- ja testaustekniikat

Standardin IEC 6100 osan 4 tarkoituksena on antaa yleiset ohjeet EMC -ympäristössä tapahtuville mittauksille ja tarjota yleiset suositukset sille, kuinka mittauksia suoritetaan (Liitteet D,E).

Tuotteen testauksella voi olla monta eri lähtökohtaa. Erilaisia lähtökohtia testeille antavat testien tuloksien käyttötarkoitukset. Testien tarkoituksena voi olla esim. tuotekehitys, tyyppitestit, hyväksyntätestit ja tuotannolliset testit. Testaus on erittäin tärkeää luotettavuuden ja laaduntarkkailun kannalta, mutta yleensä taloudelliset tekijät rajoittavat tehdyn testaamisen laajuutta.

Taloudellisten syiden vuoksi testaus pyritään yleensä minimoimaan vain tärkeimpien tuotteen ominaisuuksien testaamiseen. Tällöin on ennen testaamista tarpeen analysoida, mitä halutaan testata. Testaamismääriin ja -tekniikoihin vaikuttavatkin useat tuotteesta riippuvat tekijät. Tällaisia tekijöitä voivat olla esim.

- tuotteeseen vaikuttavien häiriöiden tyyppi
- käyttöympäristön olosuhteet
- vaadittu luotettavuustaso ja käytös
- taloudelliset rajoitukset
- tuotteen ominaisuudet

Eri mittaus- ja testauskäytännöt ja mittaustekniikat on esitelty standardin osassa 4. Seuraavassa eräs tämän työn kannalta tärkeä esimerkki. [2, Osa 4.]

Säteilevän radiotaajuisen kentän sietotestaus

Useimmat elektroniset laitteet ovat ainakin jossakin määrin alttiita sähkömagneettisille säteilykentille. Viime vuosina radioteknisten laitteiden kuten matkapuhelimien käyttö on kasvanut rajusti, minkä vuoksi elektroniikkatuotteiden häiriönsietokyvyn testaamisen merkitys on kasvanut.

Yleiskäyttöisten laitteiden testaamisessa käytetyt tasot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Testaustasojen kentänvoimakkuudet [2].

Taso	Testikentän kentänvoimakkuus [V/m]
1	1
2	3
3	10
x	Avoin
Huom. x on avoin testaustaso. Kentänvoimakkuuden taso voi olla annettu tuotteen spesifikaatioissa.	

Taulukon 1 testaustasot on tarkoitettu taajuusalueelle 80 MHz – 1000 MHz [2, Osa 4].

Matkapuhelimien aiheuttamien häiriöiden siedolle on annettu omat testaustasonsa, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Matkapuhelimien aiheuttamien häiriöiden testaustasot [2].

Taso	Testikentän kentänvoimakkuus [V/m]
1	1
2	3
3	10
4	30
x	Avoim
Huom. x on avoin testaustaso. Kentänvoimakkuuden taso voi olla annettu tuotestandardissa.	

Taulukon 2 testaustasot on tarkoitettu taajuusalueille 800 – 960 MHz ja 1,4 – 2 GHz [2, osa 4].

Kyseisessä testissä on suositeltu käytettäväksi ainakin seuraavia standardin [2] määrittelemiä välineitä:

- Radiokaiuton huone, joka on kooltaan sopiva ylläpitämään riittävää kenttää kyseiseen mittaukseen. Huoneeseen voidaan sijoittaa absorboivia materiaaleja heijastuksien poistamiseksi.
- Sähkömagneettisten häiriöiden suodattimia, jotka on varmistettava toiminnaltaan sellaisiksi, että ne eivät aiheuta itsessään resonanssivaikutuksia yhdysteihin.

- RF-signaaligeneraattori, joka kykenee toimimaan koko vaaditulla taajuusalueella ja josta voidaan ajaa 1 kHz:n sinisignaalia 80 %:in modulaatiolla. Pyyhkäisyyn tulisi olla vähintään 0,00015 dekadia/s tai nopeampi.
- Tehovahvistimia signaalin vahvistamiseen. Vahvistimien tuottamien harmonisten ja kohinan tulisi olla korkeintaan -15 dBc.
- Kentän generoimiseen käytettäviä antenneja, esimerkiksi logaritmiaperiodinen tai muu vastaava lineaarisesti polarisoitu antennityyppi, joka on mitoitettu toimimaan halutulla taajuusalueella.
- Horisontaali- tai vertikaalipolarisoitu tai isotrooppinen antenni, jolla seurataan kentänvoimakkuuksia. Antennin tulee olla herkkyydeltään ja muilta ominaisuuksiltaan kyseiseen mittaukseen sopiva ja liitettynä ulos radiokaiuttomasta huoneesta esim. valokaapelilinkin avulla.
- Tehotasojen tarkkailuun soveltuva laitteisto, jolla voidaan myös kontrolloida testaushuoneeseen muodostettavan kentän voimakkuutta.

Standardi antaa erittäin tarkat määrittelyt kentänvoimakkuuksien kalibroinnille ja mittausjärjestelyistä lähtien mittausalustoista ja kaapeloinnista aina testien suoritusjärjestykseen, tulosten analysointiin ja raportointiin saakka.

2.2 CISPR-Standardit

CISPR on komitea, joka on keskittynyt radiosähköisten ilmiöiden käsittelemiseen ja standardoimiseen. CISPR-standardit määrittelevät yleisesti tietotekniikan laitteiden radiohäiriöiden raja-arvot ja mittausmenetelmät. Esimerkiksi CISPR 22 antaa tarkan kuvauksen mittauspaikasta, ohjeistaa mittausjärjestelyjä, antaa häiriöraja-arvot sekä määrittää tarvittavat antennit. Itse mittauslaitteista ja menetelmistä kertoo tarkemmin CISPR 16 –standardi. [1,3.]

CISPR 16 -standardissa on mm. annettu taulukon 3 osoittamat quasipeak-raja-arvot. Luokan A raja-arvot ovat 10 dB:ä lievemmat [1,3].

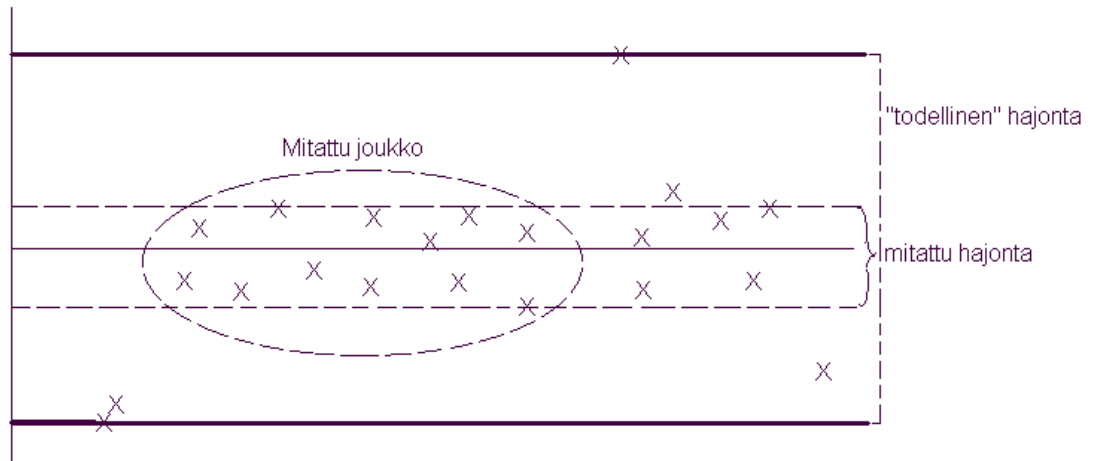
Taulukko 3. Quasi-peak- raja-arvot [1].

Säteilevät häiriöt, luokka B (30 MHz - 1000 MHz)	
Taajuusalue	Quasi-peak-raja (10 m)
30...230 MHz	30 dB(V/m)
230...1000 MHz	37 dB(V/m)

Johtuvat häiriöt, luokka B (150 kHz - 30 MHz)	
Taajuusalue	Quasi-peak-raja
150...500 kHz	66...56 dB(V)
0,5...5 MHz	56 dB(V)
5...30 MHz	60 dB(V)

3 MITTAUKSET JA MITTAUSEPÄVARMUUS

Kun tehdään tietty joukko mittauksia, ei saada eksaktia ja ehdottomasti paikkaansa pitävää tulosta. Saatu mittaustulos poikkeaa todellisesta tilanteesta riippuen mittausvälineistä ja -prosesseista. Mittauksen ja todellisuuden välinen esimerkkitalanne kuvassa 2.



Kuva 2. Tulosjoukon valinnan vaikutus mittaustuloksiin

Mittauksia tehdessä pyritään saamaan ero todellisen ja mitatun tilanteen kesken mahdollisimman pieneksi. Käytännössä mittausten tulokset joudutaan esittämään siten, että mittaustulosten yhteydessä esitetään myös arvio mahdollisesta mittausvirheestä. Tästä syystä on mittauksia tehdessä tarpeen tarkastella myös mahdollisia mittausvirheiden tai mittausepävarmuuden lähteitä.

Mittausepävarmuuden ja mittausvirheen erona voidaan yksinkertaistettuna pitää sitä, että mittausepävarmuuden tuloksista on pyritty poistamaan systemaattisten virheiden vaikutus. Jos systemaattisia virheitä ei poisteta, on kyseessä mittaus-epätarkkuus [4].

Eräs tapa lajitella mittausvirhetyyppejä on jakaa virheet systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. Systemaattiset virheet ovat mittaajan kannalta sikäli miellyttävämpiä, että jos systemaattisen virheen laatu ja suuruus saadaan

tarkkaan määritettyä, se voidaan poistaa laskennallisesti lopullisista tuloksista. Satunnaisten virheiden poistaminen matemaattisesti on mahdotonta. Satunnaisten virheiden poistaminen matemaattisesti onnistuu kuitenkin tietyllä virhetarkkuudella.

3.1 Virheen käsittely

Mittausvirhe voidaan määritellä saadun mittaustuloksen ja absoluuttisen tarkan arvon erotuksena:

$$e = x - a ,$$

missä e = absoluuttinen virhe

x = saatu mittaustulos

a = absoluuttinen tarkka arvo.

Suhteelliseksi virheeksi kutsutaan osamäärää:

$$\varepsilon = e / a .$$

Absoluuttinen tarkka arvo voidaan saada, jos kyseessä on esimerkiksi mittayksikön määritelmän perusteella saatu suure. Jos kyseessä on referenssilaitteistolla mitattu arvo, voidaan puhua oikeaksi sovitusta arvosta. Yleensä joudutaan kuitenkin tyytymään useiden mittauksien perusteella saatuun keskiarvoon, jolloin saatua suhdetta kutsutaan poikkeamaksi. Tällaista tulosta analysoimalla ei voida arvioida systemaattista virhettä [4].

Usein tuloksia annettaessa joudutaan arvioimaan suurinta mahdollista virhettä mittauksissa ja annetaan tulokset muodossa, johon on lisätty virherajat, joiden yli ei todellisen tilanteen pitäisi mennä. Tällä tavalla annetaan usein liiankin pessimistinen kuva mittauksien tarkkuudesta ja tästä syystä onkin järkevää käyttää tilastollisia menetelmiä virheen arvioimiseksi.

Mittausvirheiden tilastollisia ominaisuuksia kuvataan mittausvirheen jakaumalla. Jakaumaa kuvataan yleensä kertymäfunktion tai tiheysfunktion avulla. Tyypillisenä tiheysfunktiona voidaan pitää nk. normaalijakaumaa, joka tunnetaan myös Gaussin käyränä. Kertymäfunktiota voidaan pitää toiminnaltaan eräänlaisena matemaattisena laskurina, sillä kertymäfunktion arvo kasvaa sitä mukaa kuin joukkoon kuuluvia alkioita tulee mukaan. Tiheysfunktio ja kertymäfunktio ovat varsin vahvasti matemaattisesti sidoksissa toisiinsa. Kertymäfunktio voidaan määrittellä todennäköisyytenä, jolla saadaan kertymäfunktion argumenttia x pienempi arvo:

$$P(x) = P_x(\text{arvo} < x).$$

Tiheysfunktio $p(x)$ saadaan taas derivoimalla $P(x)$ [4].

Jakaumalla on kaksi tärkeää matemaattista ominaisuutta, jotka ovat keskihajonta ja varianssi. Tilastomatematiikan eräänlaisena perusfunktiona voidaan pitää keskiarvoa, joka on tilastollinen odotusarvo ja määritellään:

$$\mu_x = E\{x\} = \int_{-\infty}^{\infty} \xi P(\xi) d\xi.$$

Keskiarvon kokeellista odotusarvoa eli estimaattia merkitään tunnuksella m ja se voidaan laskea kaavalla

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

missä tuloksia x_i on N kappaletta. Keskiarvo on hyvin mittaustulosten ilmoittamisen kannalta käyttökelpoinen, koska sen keskihajonta on huomattavasti pienempi kuin yksittäisen mittaustuloksen. Keskiarvon keskihajonta määritetään:

$$s_m^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2,$$

sekä painotetun keskiarvon keskihajonta, jossa kullakin mittauksella x_i on painokerroin p_i :

$$s_{mp}^2 = \frac{1}{\left(\sum_i p_i\right)^2} \sum_i p_i^2 \sigma_i^2.$$

Toinen tärkeä suure tilastomatematiikassa on varianssi, joka määritellään:

$$\sigma_x^2 = E\{(x - \mu_x)^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} (\xi - \mu_x)^2 p(\xi) d\xi,$$

ja voidaan estimoida kaavalla

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2.$$

Tuloksia ilmoitettaessa varianssin sijasta esitetään usein sen neliöjuuri, joka merkitään tunnuksella σ . Tätä suuretta kutsutaan keskihajonnaksi [4,5].

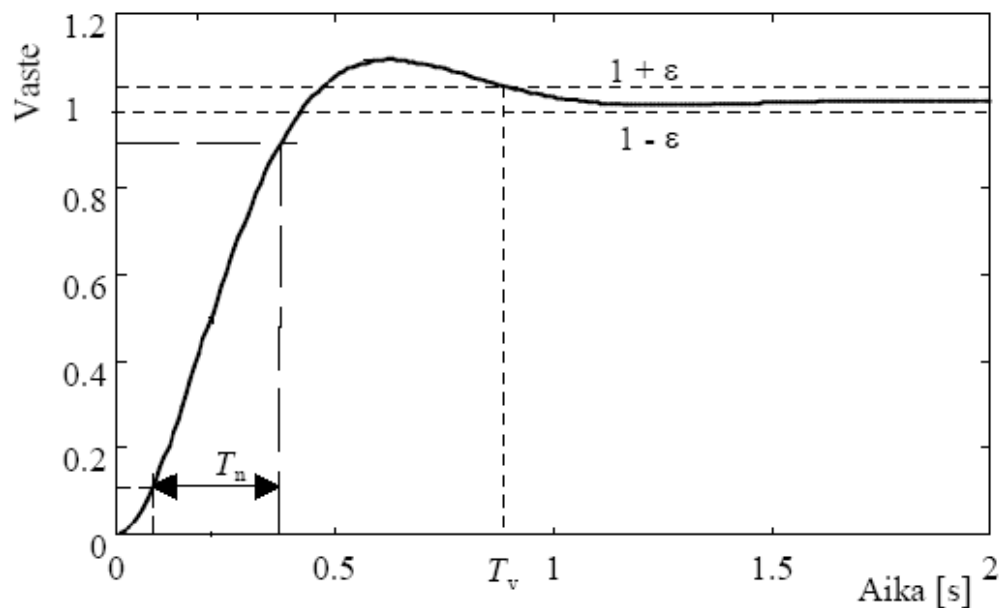
3.2 Mittaustapahtuman virhelähteet

Mittaustapahtumassa voi olla useita huomattavia virhelähteitä, jotka vaikuttavat mittaussignaaliin ja ovat täten olennainen, huomioitava osa mittaustuloksia analysoitaessa. Mittauslaitteistot pyritään kokoamaan siten, että niiden vaikutus lopputulokseen olisi mahdollisimman pieni. Ideaalitalanteessa mittalaitteiden vaikutus mitattavaan suureeseen on äärettömän pieni, mutta todellisuudessa mittalaitteiden vaikutus voi olla huomattava. Tästä johtuen mittaustapahtuman vaikutus mittaukseen on selvitettävä, jos halutaan saada tarkkoja tuloksia.

Staattisen mittauksen dynaaminen virhe

Riippumatta mittauksen laadusta tai kompleksisuudesta mittauksissa käytetään aina tietynlaista mittaustapahtumaa. Puhuttaessa sähköisistä mittauksista on huomattava, että mittaustapahtumalle on ominaista tietty viive ja nousuaika. Laitteis-

toille on myös tunnusomaista se, että niillä on tietty tasaantumisaika, jonka jälkeen ne asettuvat varsinaiseen mittausravoon. Laitteiston käyttäytymistä mittaustilanteessa voidaan kuvata käyrällä, jota kutsutaan askelvasteeksi. Tämä käyrä kuvaa sitä, mitä tapahtuu, kun mittaus suoritetaan ja mittaussignaali saapuu mittauslaitteistoon. Askelvasteen muoto riippuu mittauslaitteiston luonteesta ja siihen saattaa liittyä myös viiveitä. Mittaaja ei yleensä tiedä vasteen ominaisuuksia yksityiskohtaisesti, vaan joudutaan tyytymään nousuajan ja vasteajan arvoon. Vasteaika kuvaa aikaa, joka kuluu siihen, kun vaste asettuu tiettyjen virherajojen sisään todellisesta mittaustilanteesta. Vasteajan merkitys tulee esille hyvin esim. erilaisissa punnitustilanteissa, joissa arvo asettuu paikalleen vasta tietyn ajan kuluttua. Vasteaika onkin suure, joka on luonteeltaan mittauksen nopeuden kannalta dominoiva. Askelvaste-ilmiötä on kuvattu kuvassa 3 [4,5].



Kuva 3. Tyypillinen mittalaitteiston askelvaste [3]

Kuvassa ε on vasteajan määrittämiseen käytetty virheraja, T_v on vasteaika ja T_n nousuaika.

Dynaamisen mittauksen virhe

Jos mitattava suure on luonteeltaan muuttuva, tapahtuu mittauksessa mittauksilanteessa mittauksilaitteiston ominaisuuksista riippuva dynaaminen virhe. Dynaamiseksi virheeksi luetaan myös tapahtuma, kun mittauksilaitteisto kytketaan mitattavaan kohteeseen. Mittauksilaitteiston kytkennässä tapahtuva virhe on luonteeltaan edellä esitellyn askelvaste-ilmiön kaltainen. Tätä ilmiötä kutsutaan myös kytkentävasteeksi. [4,5.]

Dynaamisessa mittauksessa kytkentävasteen asetuttua mittauksilaitteiston lähtösignaaliin vaikuttavat enää mitattavan suureen muutokset. Jos järjestelmä on lineaarinen, voidaan tilannetta tarkastella helposti siirtofunktion avulla. Oletetaan, että kohdesuureen L-muunnos on $X(s)$ ja järjestelmän siirtofunktio $G(s)$. Tästä seuraa :

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s).$$

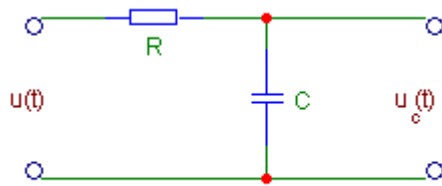
Tämän perusteella voidaan kirjoittaa dynaamisen virheen L-muunnos. Oletetaan, että ideaalisen vertailujärjestelmän siirtofunktion arvo on 1. Tällöin on voimassa:

$$E(s) = Y(s) - X(s) = [G(s) - 1]X(s).$$

Taajuusvasteen $G(f)$ avulla voidaan kutakin mitattavaa taajuutta varten määrittää amplitudivaste $|G(f)|$, jonka perusteella voidaan laskea järjestelmän amplitudivirhe $|G(f)| - 1$. Vaihevaste $\nu(f)$ on vaihevasteen suuruinen. [4,5.]

Kun käsitellään lineaarisia aikainvariantteja systeemejä puhtaasti signaaliteorian pohjalta, voidaan puhua edellämainitussa yhteydessä impulssivasteesta. Impulssivasteella on signaaliteoriassa keskeinen merkitys, sillä kun impulssivaste tunnetaan voidaan sen avulla määrittää muut vasteet. Impulssivasteella on lisäksi tärkeä merkitys, kun tutkitaan systeemin stabiilisuutta.

Impulssivasteen yhteys yleiselektroniikkaan on helppo osoittaa kuvan 4 esimerkkitaipauksen avulla. [6.]



Kuva 4. Alipäästösuodin.

Tiedetään, että vaste (jännite $u_c(t)$) on riippuvainen itse systeemistä ja herätteestä (jännite $u(t)$). Oletetaan, että kondensaattorin läpi kulkeva virta on $i = i(t)$ ja varaus $q = q(t)$. Tästä voidaan johtaa:

$$u - u_c = Ri = R \frac{dq}{dt} = R \frac{d(Cu_c)}{dt} = RC \frac{du_c}{dt},$$

josta johdettuna saadaan systeemin differentiaaliyhtälöksi:

$$\frac{du_c}{dt} + \frac{1}{RC}u_c = \frac{1}{RC}u.$$

Koska siirtofunktio on riippuvainen vain systeemin rakenteesta, voidaan tehdä oletus: $u_c(0)=0$. Ottamalla yhtälöstä puolittain L-muunnos saadaan:

$$sU_c(s) + \frac{1}{RC}U_c(s) = \frac{1}{RC}U(s).$$

Siirtofunktioksi saadaan täten:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{1 + RCs},$$

josta saadaan helposti impulssivaste ottamalla L-käänteismuunnos:

$$g(t) = \frac{1}{RC} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

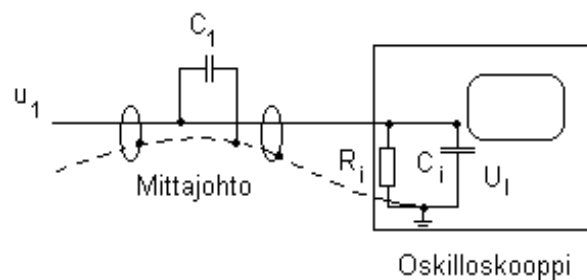
Tästä lopputuloksesta voidaan tarvittaessa johtaa systeemin muut vasteet. [6.]

Dynaamisessa mittauksessa lopputulokseen saattavat vaikuttaa myös sähkömagneettiset häiriöt. Yleensä näitä häiriöitä voidaan pitää luonteeltaan satunnaisina. Sähkömagneettiset häiriöt voivat kuitenkin vaikuttaa huomattavasti mittaussignaaliin ja siten lopputuloksiin. Mittaussignaalin sähkömagneettisten häiriöiden esiintyminen ja voimakkuus on voimakkaasti riippuvainen järjestelmän dynamiikasta ja häiriöiden kytkeytymiskohdista järjestelmään. [5.]

3.3 Mittausliitännän aiheuttamat rajoitukset

Anturi on mittalaitteiston tuntoelin. Anturi on laite, joka ottaa vastaan fysikaalista tai kemiallista informaatiota, ja muuttaa sen mittauslaitteiston ymmärtämään muotoon. [7.]

Mittaustilanteessa ei anturia kuitenkaan voida aina liittää suoraan mitattavaan kohteeseen. Tällöin joudutaan käyttämään erinäisiä liitälaitteita. Liitälaitteiden varjopuolena on se, että ne lisäävät laitteiston vasteaikaa. Suuritaajuisia ilmiöitä mitattaessa on huomioitava myös, että esimerkiksi liitälähdöt vaikuttavat laitteiston dynamiikkaan. Esimerkkinä voidaan pitää kuvan 5 oskilloskooppi ja mittajohto [4].



Kuva 5. Oskilloskooppi ja mittajohto.

Esimerkkitapauksessa mittapää on jätetty huomioimatta. Tällöin voidaan hyödyntää siirtojohtoteoriaa, olettaen että ilman mittapäätä olevan mittajohdon katsotaan olevan päätetyn äärettömän suurella impedanssilla. Siirtojohtoteoriaa johtamalla saadaan muodostettua yhtälöpari:

$$U_1 = U_i \cos \frac{2\pi l}{\lambda}$$

$$I_1 = \frac{U_0}{Z_0} j \sin \frac{2\pi l}{\lambda},$$

missä Z_0 on aaltoimpedanssi
 Z_i eli oskilloskoopin tuloimpedanssi on oletettu suureksi
 l on johdon pituus
 $\lambda = kc/f$ on aallonpituus
 k on johdon nopeuskerroin
 c on valon nopeus tyhjiössä.

Yhtälöparin avulla voidaan laskea johdon aiheuttama amplitudivirhe, vaihevirhe sekä kohdetta kuormittava impedanssi. Mittajohdon suositellaan olevan varsinkin suurtaajuusmittauksissa pituudeltaan alle $\lambda/100$. Mittajohdon vaikutuksia voidaan vähentää käyttämällä mittajohtoa, jonka aaltoimpedanssi on sovitettu. Tämä kuitenkin häiritsee mitattavaa kohdetta. Muita keinoja on käyttää vaimentavaa mittapäätä tai tasasuuntaavaa mittapäätä. Tasasuuntaavalla mittapäällä voidaan seurata vain mitattavan signaalin amplitudia, ei sen aaltomuotoa. [4.]

3.4 Mittausvirheiden korjausmenetelmät

Tunnettuja mittausvirheitä pystytään korjaamaan erilaisilla keinoilla, riippuen virheen lähteestä. On kuitenkin tärkeää muistaa, että virheen korjaus on vain yksi osa mittaustarkkuuden parantamista. Esimerkiksi ennaltaehkäisevillä kei-

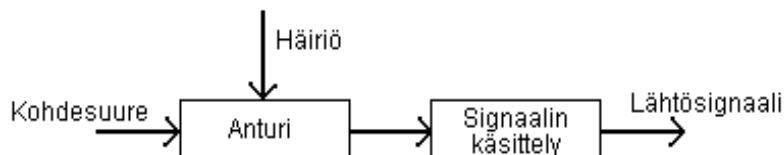
noilla voidaan parantaa mittaustuloksien tarkkuutta huomattavasti. Tällaisia ennaltaehkäiseviä keinoja ovat esimerkiksi stabiilien komponenttien, laitteiden ja menetelmien käyttäminen, häiriösuojaus ja riittävän nopeiden mittauslaitteistojen käyttäminen. [5.]

Mittausvirheiden korjaaminen tarkoittaa yleensä mittaussignaalin informaation muokkaamista. Tarpeeton tai virheellinen tieto poistetaan, tai mahdollisesti lisätään jokin korjaava komponentti. Mittaussignaalin käsittelyssä on kuitenkin käytettävä harkintaa, sillä harkitsematon mittaussignaalin käsittely voi jopa huonontaa mittaustarkkuutta tai hävittää tärkeitä informaatiota. [5.]

Mittaussignaalin korjaamista voidaan tehdä usealla eri tavalla. Kaksi pääryhmää ovat systeemin kytkennällinen käsittely ja mittausinformaation käsittely matemaattisesti. Menetelmiä käytetään mittausvirheen laadusta riippuen joskus jopa useampaa menetelmää kerrallaan.

3.5 Kytkenät

Sarjaankytketty signaalinkorjaus perustuu anturista tulevan signaalin käsittelyyn itse mittauksen jälkeen. Anturilta tulevaa informaatiota voidaan korjata sen spektriä suodattamalla tai korjaamalla yksittäisiä mittauservoja. Sarjakytkennästä puhutaan usein suodatusmenetelmänä sen luonteesta johtuen. Sarjaankytketyn korjauksen periaate kuvassa 6 [5].

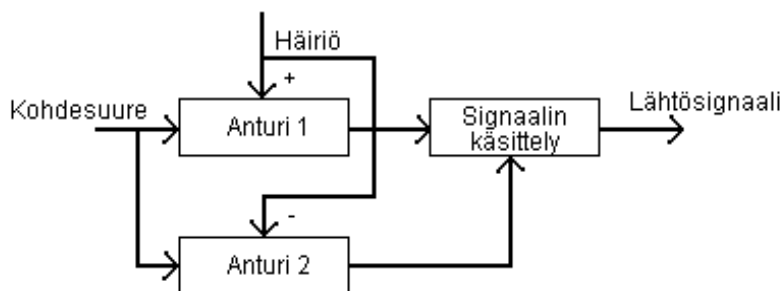


Kuva 6. Sarjaankytkennän periaate

Sarjaankytkennän vaatimukset järjestelmälle ovat vähäiset ja sen erityisenä etuna onkin soveltamisen helppous. Sarjankytkennän avulla voidaan poistaa häiriöitä, korjata dynamiikkaa ja oikaista ominaiskäyrää. [5.]

Rinnankytkentä

Rinnankytkentää käytetään, jos yhdeltä anturilta ei saada riittävää informaatiota mittausrvirheen korjaamiseksi. Tällöin on suositeltavaa käyttää niin kutsuttua differentiaalirakennetta, jossa yksittäisen anturin viereen asennetaan toinen tuntoelin, johon mitattava suure ja häiriötekijä vaikuttavat, mutta eri tavoin. Näiden kahden tuntoelimen mittaustiedon sopivasti yhdistämällä voidaan mittausvirhe kompensoida. Rinnankytkennän periaate on esitetty kuvassa 7. [5.]

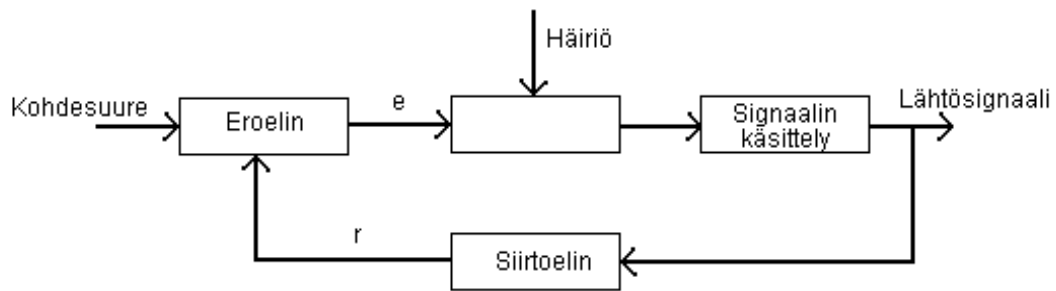


Kuva 7. Rinnankytkennän periaate

Rinnankytkennässä ongelmana on, että häiriön laatu on tunnettava varsin hyvin, jotta se voidaan korjata tällä menetelmällä. Differentiaalirakenteensa vuoksi se olisi kuitenkin varsin tehokas menetelmä, koska se tarjoaa tehokkaita tapoja vaikuttavien häiriöiden poistoon. [5.]

Takaisinkytkentä

Takaisinkytkennän periaatteena on silmukkarakenne, jonka avulla voidaan vähentää signaalia muokkaavien elinten muutosten ja niihin vaikuttavien häiriöiden vaikutusta. Jotta takaisinkytkentää voidaan käyttää, on anturin oltava muutettavissa eroelementiksi ja vain anturin jälkeen syntyvää virhettä halutaan korjata. On myös muistettava, että takaisinkytkentämuuntimen on oltava riittävän laadukas mittaustarkkuuden säilyttämiseksi. Takaisinkytkennän periaate on kuvassa 8. [5.]



Kuva 8. Takaisinkytkennän periaate

Kuvassa r merkitsee takaisinkytkentäsignaalia ja e erotussignaalia. Takaisinkytkennän etuna ovat sen häiriönsieto-ominaisuudet, mutta valitettavasti se asettaa rajoituksia antureille ja mittauslaitteistolle. [5.]

3.5 Muut virheenpoistomenetelmät

Virheen vähentämistä voidaan mittaussysteemin muutosten ohella tehdä myös matemaattisesti ja erilaisilla vertailumenetelmillä. Tärkeitä menetelmiä ovat mm. ominaiskäyrän oikaisu, suodatus, vertailumittaukset, näytteenoton tahdistus sekä erilaiset kompensatiomuodot. Tämän työn kannalta ei ole kuitenkaan järkevää syventyä sen tarkemmin kyseisiin menetelmiin, varsinkin kun otetaan huomioon, että ne kulkevat varsin tiukasti käsi kädessä edellä esitettyjen systeemin kytkennällisten korjausten kanssa ja ovat suurelta osin luonteeltaan edellä esitettyjen ratkaisujen matemaattisia mallinnuksia.

Esimerkkinä voidaan kuitenkin tarkastella virtaavan nesteen lämpötilan mittausta, jossa halutaan tehdä korjaus nopeiden lämpötilanmuutosten aiheuttaman dynaamisen mittausvirheiden pienentämiseksi. Oletetaan, että virtausnopeus ei ole vakio, vaan se aiheuttaa vaihtelua anturin aikavakioon. Tällöin anturin siirtofunktio on approksimoituna

$$H_1 = \frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} \approx \frac{1}{1 + s\tau_1} = \frac{1}{1 + s\frac{mc}{\alpha A}},$$

missä m on anturikuoren massa
 A on nesteen huuhteleva pinta-ala
 c on anturikuoren ominaislämpökapasiteetti
 $\alpha = \alpha(v)$ on lämmönsiirtokerroin.

Anturin dynamiikka voidaan korjata suotimella, jonka siirtofunktioksi valitaan

$$H_2(s) = k \frac{1 + \tau_2 s}{(1 + \tau_k s)^2}.$$

Korjatun järjestelmän siirtofunktioksi muodostuu täten

$$H(s) = k_{tot} \frac{1 + \tau_2 s}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_k s)^2}.$$

Aikavakio τ_2 valitaan yleensä tyypillisen virtausnopeuden mukaan. Jos virtausnopeus kuitenkin poikkeaa tästä arvosta, ei korjaus ole täydellinen. [4.]

3.6 Mittausepävarmuuden arvioiminen

Mittausepävarmuuden arviointina voidaan pitää eräänä tärkeimpänä yksittäisenä komponenttina mittaustuloksia ilmoitettaessa. Itse asiassa sitä on pidetty niin tärkeänä, että siitä on laadittu kansainvälinen suositus (ISO92). Kuten Olli Aumala kirjassaan [4] esittää, suositusta laadittaessa tavoitteena oli :

- Arviointimenetelmän tulisi olla yleispätevä. Menetelmää tulisi voida soveltaa kaikenlaisissa mittauksissa ja kaikenlaisissa ympäristöissä.
- Suure, jota käytetään epävarmuuden ilmaisemiseen, olisi konsistiivinen: se tulisi johtaa suoraan komponenteista, jotka vaikuttavat epävarmuuteen ja sen tulisi olla riippumaton komponenttien ryhmittelystä tai jakamisesta alakomponentteihin.

- Epävarmuus olisi siirrettävissä: sitä tulisi voida käyttää suoraan komponenttina arvioitaessa sellaisen mittauksen epävarmuutta, jonka tulokseen alkuperäisen mittauksen tulosta käytetään.

Kansainvälisessä suosituksessa ei jaeta epävarmuuden arviota etukäteis- ja mittauksen jälkeiseen arvioimiseen. Mittausta valmistellessa olisi kuitenkin syytä paneutua myös mittausepävarmuuden määrittämiseen, koska siten voidaan määritellä etukäteen mittauksen käyttökelpoisuus verrattuna tavoiteltuihin tuloksiin.

Yksinkertaisin tapa arvioida epävarmuutta on graafinen epävarmuuden arviointi. Graafinen arviointi on käyttökelpoinen yksinkertaisissa mittauksissa, kun tuloksen muodostamiseen käytetty funktio on riittävän yksinkertainen. Tällaisia tilanteita voivat olla esimerkiksi laadunvalvonnalliset mittaukset, joissa varsinaisen mittausvirheen sijasta tutkitaan mahdollista valmistusvirhettä. [4.]

Laskennallinen arviointi on käyttökelpoisempi, kun arvioidaan varsinaisia mittausvirheitä. Laskennallisessa virheenarvioinnissa ensimmäinen askel on systemaattisten virheiden poistaminen. Erikoistapauksissa, joissa systemaattisella virheellä ei ole lopputuloksen kannalta merkitystä, voidaan niiden eliminointi jättää tekemättä. Kun systemaattiset virheet on poistettu, oletetaan että loput virheet ovat luonteeltaan satunnaisia. Lopullisena tavoitteena on arvioida kokonaisepävarmuus, joka on muodoltaan joko yhdistetty epävarmuus tai laajennettu epävarmuus. Satunnaiset virheet voidaan jaotella kahteen osaan: sisäisen epävarmuuden komponentteihin ja ulkoisen epävarmuuden komponentteihin.

Sisäisen epävarmuuden komponentteihin sovelletaan tilastollisia menetelmiä analysoimalla saatuja mittaustuloksia. Kullekin komponentille lasketaan keskijointa $s_1(x_i)$ ja varianssi $s_1^2(x_i)$.

Ulkoisen epävarmuuden komponentteihin käytetään eri tietoja kuin sisäisen epävarmuuden arvioimisessa. Arvioinnissa käytetään mittaukseen vaikuttavien ei-haluttujen suureiden vaikutuksia, laitevirheistä johtuvien tekijöiden ja systemaattisten virheiden korjauksista jäävien epätäsmällisyystekijöiden arvoja ym.

Kaikkien näiden komponenttien arvoista lasketaan keskihajonta $s_2(x_i)$ ja varianssi $s_2^2(x_i)$. Ongelmana on, että näiden epävarmuus komponenttien tarkkaa jakaumaa ei yleensä voida tietää, vaan joudutaan arvioimaan väli, jolla komponentti on ”erittäin suurella varmuudella”. Tällöin epävarmuuden komponenttien hajonta oletetaan yleensä tasaiseksi ja keskihajonnaksi arvioidaan $u = \frac{a}{\sqrt{3}}$. [4.]

Saatujen keskihajontojen ja varianssien avulla voidaan laskea yhdistetty epävarmuus:

$$u_c(y) = \sqrt{s_x^2 + \sum_i u^2(x_i)} .$$

Lopuksi voidaan laskea laajennettu epävarmuus U. Se saadaan laskettua kertomalla yhdistetty epävarmuus kattavuuskertoimella k, jonka arvo riippuu halutusta varmuustasosta. Useimmiten käytetään arvoa $k = 2$, joka vastaa 95 %:n varmuutta. 99,7 %:n varmuutta vastaa arvo $k = 3$. [4.]

Mittaustuloksen ja epävarmuuden ilmoittamisessa on sovittu tietyt kansainväliset suositukset. Epävarmuuden arviosta on tehtävä kattava raportti, jossa on esitetty epävarmuuden arviointiin käytetyt menetelmät, arvioidut epävarmuuskomponentit, epävarmuuden laskutoimitukset ja käytettyjen kertoimien ja vakioiden lähteet. Jos lukuarvoja pyöristetään, on pyöristyksen tapahduttava standardien mukaisesti. Kansainvälinen suositus mittaustulosten esittämiselle perustapauksessa on seuraavanlainen:

- Systemaattinen virhe korjataan.
- Sisäisen epävarmuuden komponentit arvioidaan tai lasketaan.
- Ulkoisen epävarmuuden komponentit arvioidaan ja ilmaistaan varianssien avulla.
- Varianssit yhdistetään yhdistetyksi epävarmuudeksi.
- Ilmaistaan laajennettu epävarmuus, ilmoitetaan kattavuuskerroin ja mitausten lukumäärä.

Jos kyseessä on tuotteen testaamiseen tarkoitetut mittaukset, laboratoriot ilmoittavat yleensä myös, onko mittauksien kohde läpäissyt testissä asetetut vaatimukset. [4,8.]

4 REFERENSSISÄTEILIJÄ

4.1 Työn taustaa

Kajaanin ammattikorkeakoululla on EMC-laboratorio, jota käytetään omissa koulutustarkoituksissa, mutta myös yritykset teettävät siellä säteilymittauksia laitteilleen. EMC-laboratoriossa voidaan mitata siis esim. televisiovastaanottimen tai matkapuhelimen sähkömagneettisen säteilyn suuruutta. Jotta saadut tulokset olisivat riittävän tarkkoja, täytyy mittalaitteiston ja mittaustilojen ominaisuudet olla erittäin hyvin tiedossa.

Mittaukset suoritetaan häiriöiltä eristetyssä huoneessa, joka on pyritty rakentamaan siten, että se on mahdollisimman hyvin eristetty ulkopuolisilta häiriötekijöiltä. Todellisuudessa ulkopuolisia häiriöitä voi esiintyä ja myös huoneen ominaisuuksilla on vaikutusta mittaustuloksiin. Joillakin taajuuksilla voi tapahtua vaimenemista tai ilmetä häiriöitä, ja näiden ilmiöiden selvittämiseksi tarvitaan laite, jolla mittalaitteiden toimivuus voidaan todeta. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkitaan, miten eritaajuiset signaalit etenevät huoneessa ja mittalaitteissa. Tähän tarkoitukseen on käytetty aiemmin vuokrattua laitetta, mutta nyt on katsottu tarpeelliseksi saada koululle oma referenssi- eli vertailusäteilijä.

Häiriöitä voidaan katsoa tapahtuvan kahdella eri tavalla riippuen taajuusalueesta. Häiriöalueita ovat säteilevien häiriöiden alue (30 MHz -) ja johtuvien häiriöiden alue (150 kHz – 25 MHz). Johtuvien alueella vaimenemista tapahtuu keinoverkossa, johon mittalaitteet on kytketty. Säteilevien alueella vaimeneminen johtuu mittaushuoneen ominaisuuksista. Säteilevien alueella häiriöitä on pyritty poistamaan erityisillä ferriittikartioilla ja keraamisilla paneeleilla.

Lähtökohtana olikin rakentaa kaksi laitetta: toinen, jolla syötetään signaalia suoraan keinoverkkoon, ja toinen, joka toimii radiolähtetimen tavoin, tosin ilman modulaatiota. Molemmissa tapauksissa kyseeseen käy mainiosti kampa-generaattori, jolla tuotetaan hyvin laajalle kaistalle tasaisin välein spektriipukkejä.

Näiden signaalien etenemistä tutkimalla voidaan todeta laitteiston toiminta ja havaita mahdolliset tiettyjen taajuuksien epänormaalit vaimentumiset..

4.2 Johtuvat häiriöt

Vaadittu signaalitaso oli 50 dB μ V ...70 dB μ V

Lähtökohtana oli 4 MHz:n kide, josta tehtiin kanttiaalto-oskillaattori invertterikytkennän avulla. Tämän jälkeen 4 MHz:in kanttiaallon taajuutta jaettiin käyttämällä 74HC390-dekadilaskuria. Jakajan avulla muutettiin kanttiaallon taajuus 200 kHz:iin. Piirin ominaisuuksista johtuen saatiin sen viidelläjakajasta ulos suoraan 200 μ s:n pulssia, joten pulssisuhteen muutos saatiin hoidettua samalla piirillä. Lyhyen pulssin etuna ovat hyvin voimakkaat harmonisten spektriipiikit. Ulostulosignaali ajettiin tavalliseen SUKO-pistokkeeseen. Laitteen kytkentäkaavio löytyy liitteestä F.

Laite testattiin kytkemällä se EMC-laboratorion keinoverkkoon ja mittaamalla keinoverkon läpi tuleva signaali. Mittauksissa havaittiin, että laite toimi annettujen spesifikaatioitten mukaisesti (Liite G).

4.3 Säteilevät häiriöt

Vaadittu signaalitaso oli 40 dB μ V ...60 dB μ V

Säteilevien häiriöiden laitteessa lähtökohdat olivat lähes samat kuin johtuvien häiriöiden laitteessa. Oskillaattorissa käytettiin tällä kertaa kiteenä 12 MHz:n kidettä. Oskillaattorin jälkeen sijoitettiin bufferi, jolla varmistettiin se, että ulkoinen kuormitus ei pääse vaikuttamaan oskillaattorin toimintaan. Spektriä lähdettiin levittämään hyödyntämällä 74HC390-dekadilaskurin ominaisuutta.

Laskurin ulostulosta lähtevä signaali on spektriltään varsin laajakaistainen. Samalla perussignaalin taajuus jaettiin kahdella, jolloin spektriipiikkien väliksi muodostui 6 MHz. Laitteen kytkentäkaavio liitteessä H.

Tässä vaiheessa ilmeni, että ongelmaksi muodostuu piirien hitaus, joka aiheuttaa korkeataajuisien signaalien voimakasta vaimentumista. Spektriä tarkasteltaessa havaittiin kuitenkin, että spektriipikkejä löytyi vielä gigahertsin taajuuksilla.

Laite mitattiin EMC-laboratoriossa ja havaittiin, että signaalitasot eivät olleet aivan vaatimusten mukaiset (Liite I). Suurtaajuiset, yli 700 MHz:n signaalit eivät olleet aivan annettujen spesifikaatioiden rajoissa. On tosin otettava huomioon, että laite mitattiin ilman antennia.

5 YHTEENVETO

Työn kuluessa kävi varsin selkeästi ilmi, että suuritaajuisien signaalien kanssa toimiminen ei ole ongelmaton. Jo pelkästään mikropiirien hitaus aiheutti ongelmia yli 600 MHz:n signaalien kanssa. Tätä suurempitaajuiset signaalit vaimentuivat voimakkaasti piirin läpi kulkiessaan.

Työ opetti kuitenkin osaltaan ymmärtämään nykyaikaisen tiedonsiirron ongelmakohtia. Nykyaikana pyritään siirtymään suuremman siirtokapasiteetin toivossa yhä suurempiin ja suurempiin signaalitaajuuksiin. Sähköinen tiedonsiirto aiheuttaa kuitenkin komponenttien kehittelijöille jatkuvasti uusia haasteita yhä lisääntyvän tiedonsiirron kapasiteettitarpeen muodossa. Nykyään onkin hyvin vahvasti pyritty suunnittelemaan tehokkaita valon perusteella toimivia siirtoteitä ja on kehitetty myös tietokoneita, jossa koneen lähes kaikki tietoliikenne tapahtuu valon avulla.

Teknisen osan osalta voitaneen sanoa, että johtuvien häiriöiden alueella toimiva laite toimi, kuten oli tehtävänmäärittäksessä toivottu. Säteilevien häiriöiden alueelle tehty laite ei kuitenkaan toimi aivan spesifikaatioiden mukaisesti, sillä siitä saatavien yli 700 MHz:n signaalien signaalitasot eivät ole aivan riittävän suuret. Tähän syynä voidaan pitää käytettävänä olleiden piirien ominaisuuksia, joista johtuen suurtaajuiset signaalit vaimenevat hyvin voimakkaasti. Piirien nopeus ei siis aivan riitä kyseiseen tehtävään.

Laitetta voisi parantaa ottamalla lähtökohdaksi step-recovery-diodin, joita käytetään yleisesti kampageneraattoreissa harmonisten muodostamiseen. Lisäksi sopivalla antennilla saataisiin laitteesta tulevia heikkotasoisia signaaleja tuotua paremmin esille mittaustilanteessa.

LÄHDELUETTELO

- 1 EMC-opas, Internet-dokumentti,
<http://www.megabaud.fi/~jsarapel/emc-opas/emc-opas.htm>, Luettu
16.3.2004
- 2 International Electrotechnical Commission: IEC 6100 Electromagnetic
Compatibility (EMC), Standardi, 1998
- 3 International Special Committee on Radio Interference: CISPR 16 -
Specification for radio disturbance and immunity measuring
apparatus and methods, Standardi, 1999
- 4 Aumala, Olli: Mittaustekniikan Perusteet, Espoo 1997, Otatieto,
6. muuttumaton painos, ISBN 951-672-221-0
- 5 Aumala, Ihalainen, Jokinen & Kortelainen: Mittaussignaalien käsit-
tely, Tampere 1998, Pressus Oy, 3. uudistettu painos, ISBN 952-
9835-32-9
- 6 Niemi, Antti: Fourier-analyysi ja Laplace-muunnos, Helsinki 1999,
Opetushallitus, 5. painos, ISBN 952-13-0040-X
- 7 Aumala, Olli: Teollisuusprosessien mittaukset, Tampere 1998,
Pressus Oy, 4. uudistettu painos, ISBN 952-9835-31-0
- 8 Schaffner EMC systems Ltd. : EMC Measurement Uncertainty –
lehtinen, 2002

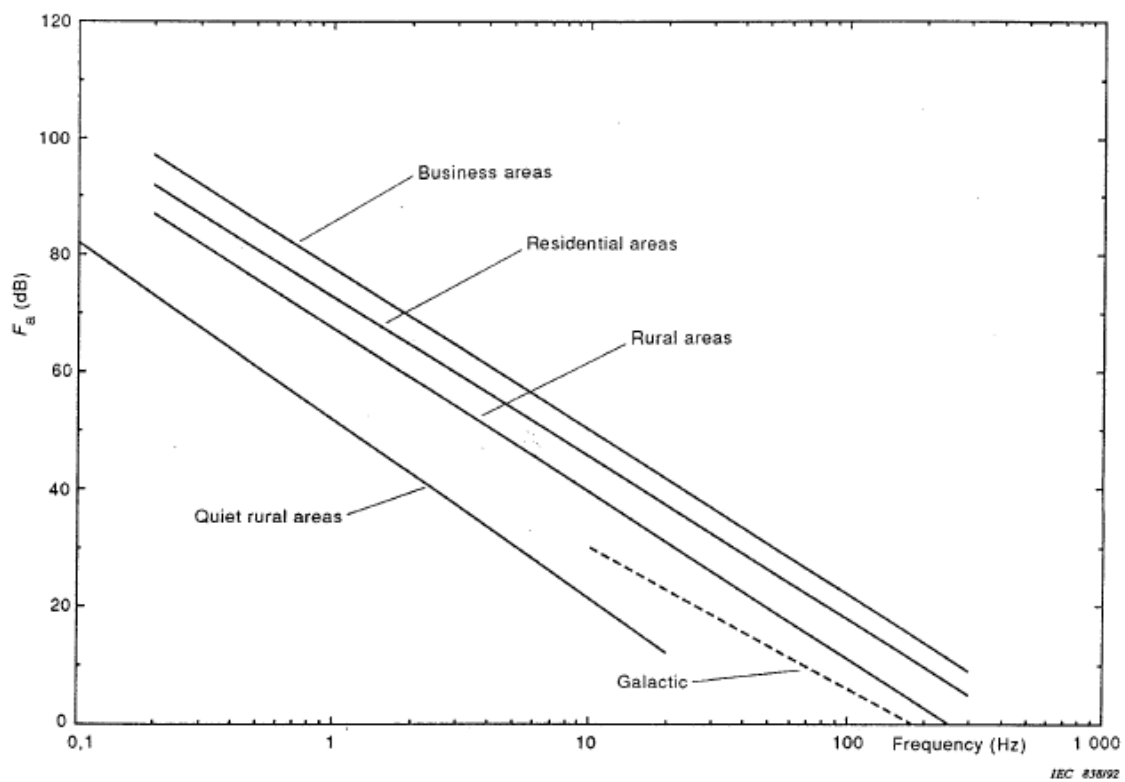
Yksittäisten harmonisten EMC-rajat [2].

Kolmella jaottomat parittomat harmoniset		Kolmella jaolliset parittomat harmoniset		Parilliset harmoniset	
Järjestysluku n	Jännite %	Järjestysluku n	Jännite %	Järjestysluku n	Jännite %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2/0,5 \times 25/n$				

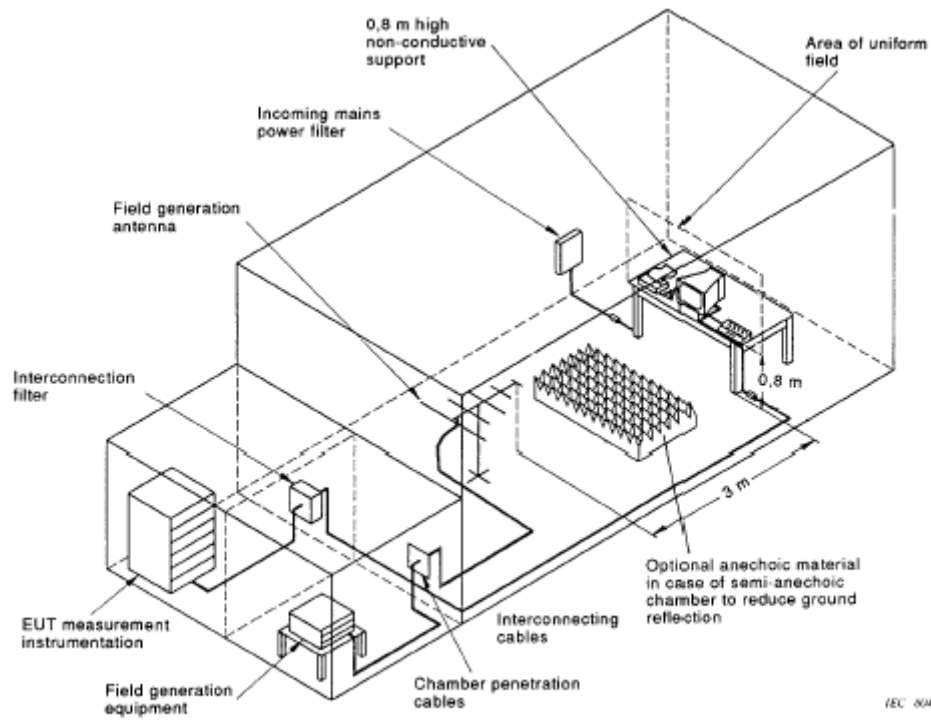
Kentänvoimakkuuksien rajat [2].

Palvelu	Taajuusalue [MHz]	ERP	Tyypillinen erotusvälimatka	Laskennallinen kentänvoimakkuus [V/m]*
LF yleisradio ja meriradio	0,014 – 0,5	2500 kW	2 - 20 km	5,5 – 0,55
AM yleisradio	0,5 – 1,5	50 – 800 kW	0,5 – 2 km	12,5 – 0,78
HF amatööri	1,8 - 30	1 kW	10 – 100 m	22,1 – 2,21
HF verkot, SW yleisradio	1,6 - 30	10 kW	1 – 20 km	0,7 – 0,04
Citizens Band	27 - 28	12 kW	10 – 100 m	2,4 – 0,24
VHF/UHF amatööri	50 – 52 144 – 146 432 – 438 1290 - 1300	1 – 8 kW 1 – 8 kW 1 – 8 kW 1 – 8 kW	10 – 500 m	63 – 0,44 **
Erikois- ja mobiiliverkot	29 – 40 68 – 87 146 – 174 422 – 432 438 – 470 860 – 990	50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W 50 – 130 W	2 – 200 m	40 – 0,25
Matkapuhelimet, langattomat	1880 - 1990	5 W 1 W (DECT)	1 – 100 m 0,5 – 10 m	15,6 – 1,56 14 – 0,7
VHF TV	48 – 68 178 – 238	100 – 320 kW 100 – 320 kW	0,5 – 2 km	8 – 1,11 **
FM yleisradio	88 – 108	100 kW	0,25 – 1 km	8,9 – 2,2 **
UHF TV	470 – 853	500 kW	0,5 – 3 km	10 – 1,5 **
Tutkat	1000 - 30000	1 kW – 10 GW	2 – 20 km	350 – 1,6 (huippuarvo)
* Laskettu kaavalla $7\sqrt{\frac{ERP}{r}}$, olettaen että lähetysantenni käyttäytyy kuten puolen aallon dipoli-antenni vapaassa tilassa ja kaukokentässä.				
** kentänvoimakkuus lähetysantennin keilan alueella.				

Ihmisen aiheuttama taustakohina [2].

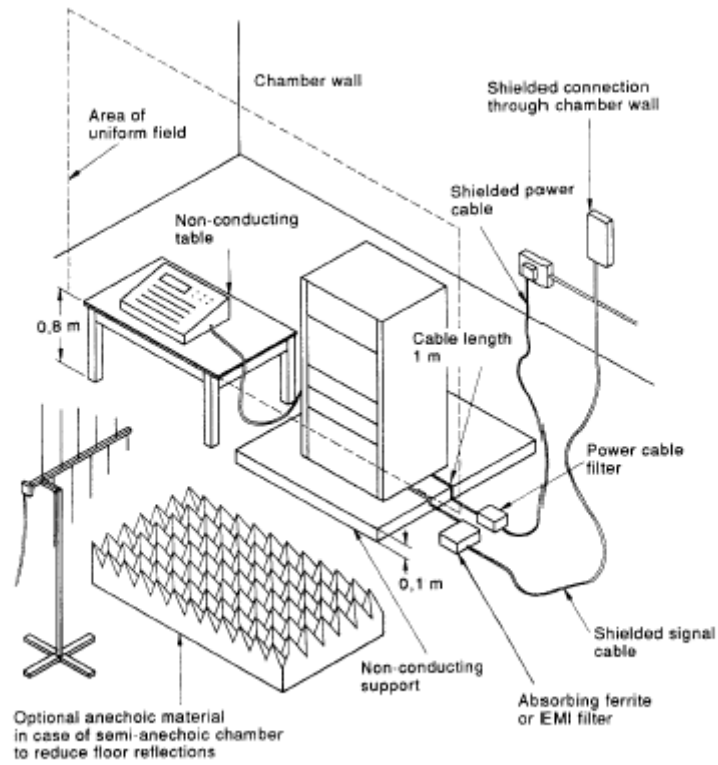


Mittauksiin sopivan mittaustilan rakenne [2].



NOTE: Anechoic lining material on walls and ceiling has been omitted for clarity.

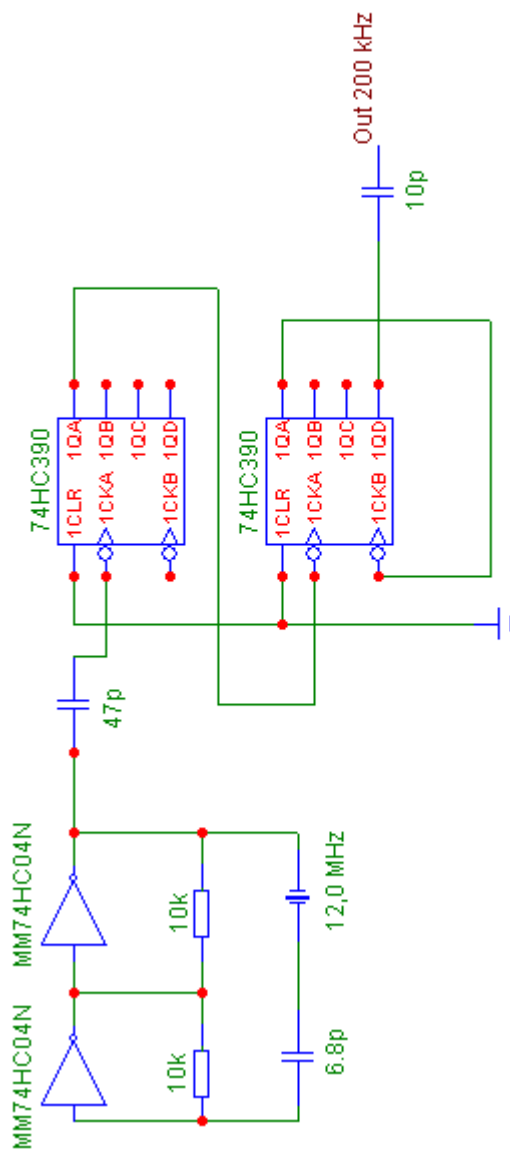
Mittausjärjestely [2].



IEC 80194

NOTE Anechoic lining material has been omitted from walls for clarity.

Johtuvien häiriöiden referenssilaitte



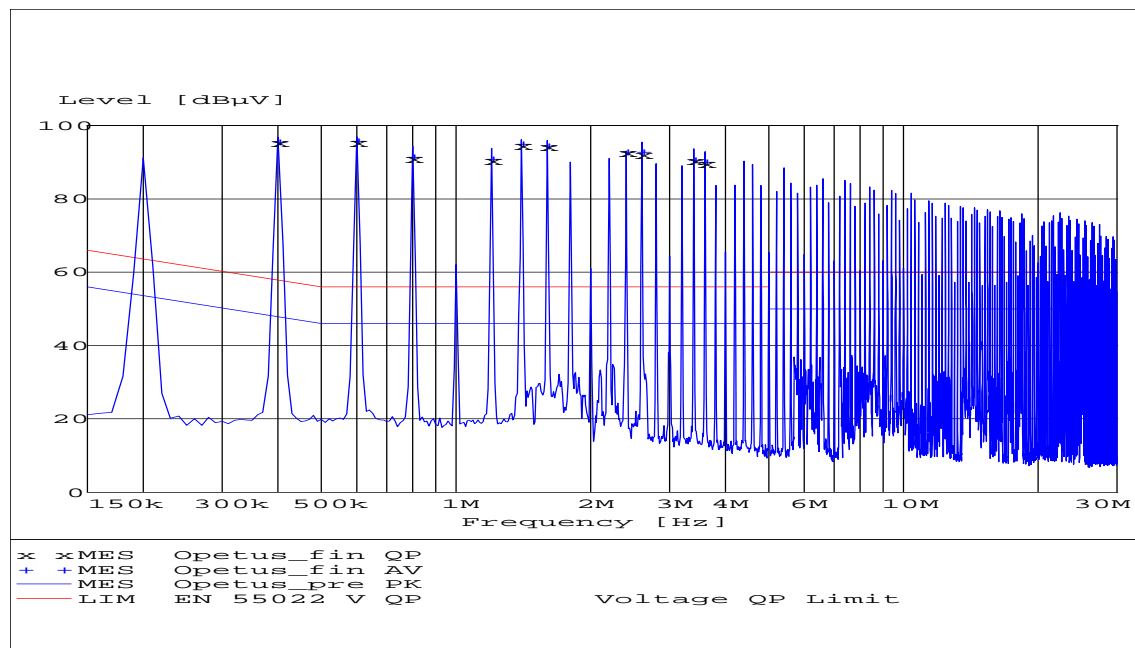
Kajaanin amk

Johtuvien emissio

EUT: Referenssilähetin
 Manufacturer: Pekka Uusitalo
 Operating Condition: 19C, 25%, 1001 hPa
 Test Site: Kajaanin amk, EMC-laboratorio
 Operator: AP
 Test Specification: EN 55022
 Comment: Syöttö akulta 12V, Pitkä ulostulokaapeli
 Start of Test: 2/10/04 / 10:10:15AM

SCAN TABLE: "EN 55022 V_fin Opetu"

Short Description: EN 55022 Voltage fin Opetus
 Start Stop Step Detector Meas. IF Transducer
 150.0 kHz 30.0 MHz 10.0 kHz QuasiPeak 5.0 s 9 kHz ESH3-Z5



Kajaanin amk, EMC-laboratorio

Säteilevien häiriöiden emissio

EUT: Referenssisäteilijä demo
 Manufacturer: PU
 Operating Condition:
 Test Site: Shielded room
 Operator: AP
 Test Specification: EN 55022, Vertical
 Comment: DC in 5,3V, Ilman antennia
 Start of Test: 4/5/04 / 10:42:29AM

SCAN TABLE: "EN 55022 F fin Opetu"

Short Description: EN 55022 Field fin Opetus
 Start Stop Step Detector Meas. IF Transducer
 30.0 MHz 1.0 GHz 60.0 kHz QuasiPeak 20.0 s 120 kHz HL 562 UltraLog

