

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Jani Vitikka

**SÄHKÖMAGNEETTISTEN HÄIRIÖIDEN HUOMIOIMINEN SUOJARELEEN
TESTAUSJÄRJESTELMISSÄ**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 12.11.2008

Työn valvoja

Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

Terho Uusitalo

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty Vaasassa ABB Oy Sähkönjakeluautomaatioyksikössä testaussuunnitteluosastolla. Työn ohjaajana on toiminut Terho Uusitalo, jota kiitän mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Kiitokset myös kaikille testaussuunnitteluosaston henkilöille, jotka ovat auttaneet minua parhaansa mukaan työskennellessäni yksikössä sekä professori Kimmo Kauhaniemelle ohjeista ja opastuksesta työn eri vaiheissa.

Haluan kiittää lisäksi kaikkia, jotka ovat tukeneet minua opintojeni aikana ja auttaneet minua saavuttamaan tavoitteeni.

Vantaalla 12.11.2008

Jani Vitikka

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	6
TIIVISTELMÄ	8
ABSTRACT	9
1. JOHDANTO	10
1.1. Toimeksiantaja	10
1.2. Työn tavoitteet	11
2. RED 500 -SUOJARELEET JA NIIDEN TESTAUS	14
2.1. Käyttötarkoitus	15
2.2. Testausasemat	16
2.2.1. Funktionaalinen testausasema	16
2.2.2. Lopputestausasema	18
2.3. Testausasemien laitteet ja rakenne	19
2.3.1. GPIB-ohjattavat laitteet	19
2.3.2. VXI-kehikon laitteet	20
2.3.3. Muuntaja G2	22
2.4. RED 500 -suoja-releiden MIM- ja CPU-moduulin analogiamittausketju	23
2.4.1. Virtamuuntajan kalibrointiprosessi	23
2.4.2. CPU-moduulin kalibrointiprosessi	27
3. MITTAUSMENETELMÄT	29
3.1. Signaalin suodatus	30
3.2. Näytteistys	31
3.3. Mittausepävarmuus	32
3.3.1. Standardit ja referenssit	33
3.3.2. Määritelmä	33
3.3.3. Tyypin A standardiepävarmuus	35
3.3.4. Tyypin B standardiepävarmuus	35
3.3.5. Yhdistetty ja laajennettu mittausepävarmuus	36
4. SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖTYYPIT	37
4.1. Sähkömagneettiset häiriöt	37
4.2. Laajakaistainen ja kapeakaistainen häiriö	38
4.3. EMC-standardit	39
4.4. Häiriöiden kytketyminen	40
4.4.1. Sähkömagneettinen kytketyminen	41
4.4.2. Kapasitiivinen kytketyminen	42
4.4.3. Kytketyminen johtumalla	43
4.4.4. Induktiivinen kytketyminen	45
4.4.5. Yhteisen impedanssin kautta kytketyminen	47
4.4.6. Muita häiriöiden kytketyntapoja	48

4.5.	Sähköverkon sähkön laatu	49
4.5.1.	Taajuus	51
4.5.2.	Jännitetason vaihtelut	51
4.5.3.	Nopeat jännitteenmuutokset	51
4.5.4.	Jännitepiikit	52
4.5.5.	Yliaallot	52
4.5.6.	Epäsymmetria	53
4.5.7.	Signaalijännitteet	54
4.5.8.	Jännitekuopat	54
5.	HÄIRIÖIDEN TORJUNTAMENETELMIÄ	56
5.1.	Kaapelointi	57
5.1.1.	Suojauksen vaikutus kapasitiiviseen kytkeytymiseen	57
5.1.2.	Suojauksen vaikutus induktiiviseen kytkeytymiseen	59
5.1.3.	Suojausmenetelmät magneettista säteilyä vastaan	62
5.1.4.	Vastaanottopiirin suojaus magneettisia häiriöitä vastaan	65
5.2.	Kaapelityypit	66
5.2.1.	Parikaapelit	66
5.2.2.	Nauhakaapelit	67
5.2.3.	Koaksiaalikaapelit	68
5.3.	Maadoitukset	69
5.3.1.	Suojamaadoitukset	70
5.3.2.	Sarjamaadoitus	70
5.3.3.	Rinnakkaismaadoitus	71
5.3.4.	Monipistemaadoitus	72
5.3.5.	Hybridimaadoitus	73
5.3.6.	Yhdistelmämaadoitus	73
5.3.7.	Maadoituksen induktanssin aiheuttamat ongelmat	74
5.3.8.	Harhailevat maavirrat	76
5.4.	Kotelointi ja kotelon epäjatkuvuuskohdat	78
5.5.	Absorptiovaimennus	80
5.6.	Balansointi ja suodatus	81
5.7.	Suojauksen vaihtoehtoja	83
5.8.	Suojauksen tehokkuus	84
6.	HÄIRIÖKENTTIEN VOIMAKKUUKSIEN MITTAAMINEN	86
6.1.	Häiriöiden vaikutus mittaustarkkuuteen	86
6.2.	Sähkökentän voimakkuuden mittaaminen	87
6.3.	Magneettikentän voimakkuuden mittaaminen	88
6.4.	Johtuvien häiriöiden mittaaminen	90
6.5.	Mittauslaitteiden ilmaisimet ja kaistanleveys	92
7.	TESTAUSASEMIEN HÄIRIÖMITTAUSTULOKSET	94
7.1.	Käytetyt mittalaitteet	96
7.2.	Säteilevien häiriöiden mittaukset	98
7.2.1.	Lopputestausasemien säteilevät häiriöpäästöt	99
7.2.2.	Funktionaalisten moduulitestausasemien säteilevät häiriöpäästöt	101
7.3.	Johtuvien häiriöiden mittaukset	103

7.3.1. Lopputestausasemien johtuvia häiriöpäästöjä	104
7.3.2. Funktionaalisten moduulitestausasemien johtuvia häiriöpäästöjä	106
7.4. Sähkön laatu	109
7.4.1. Sähkön laatu lopputestauspaikalla	111
7.4.2. Sähköverkon laatu funktionaalisella moduulitestauspaikalla	112
7.5. Teho- ja vahvistinyksikön mittaukset	114
7.6. Tuotannon testauksen parannuskeinoja	115
8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	120
LÄHDELUETTELO	122
LIITTEET	126

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Käytetyt symbolit

ω	Kulmataajuus (rad/s)
C	Kapasitanssi (F)
f	Taaajuus (Hz)
Ω	Ohmi
E	Sähkökentän voimakkuus
H	Magneettikentän voimakkuus
Z	Impedanssi (Ω)
V_m, U_n	Häiriöjännite
I	Virta (A)
Φ	Magneettivuo
L	Induktanssi (H)
M	Keskinäisinduktanssi (L)
A	Pinta-ala (mm ²)
B	Magneettivuon tiheys (T)
t	Aika (s)
P_{it}	Pitkä-aikainen häiritsevyysindeksi
λ	Aallonpituus (l/m)
l	Pituus
$\text{dB}\mu\text{V/m}$	Säteilevien häiriöpäästöjen raja-arvo
$\text{dB}\mu\text{A/m}$	Säteilevien häiriöpäästöjen raja-arvo
$\text{dB}\mu\text{V}$	Johtuvien häiriöpäästöjen raja-arvo

Käytetyt lyhenteet

AM	Amplitude Modulation
CE	Valmistajan vaatimustenmukaisuusvakuutus
CPU	Central Processing Unit
dBm	Teho verrattuna 1 mW:iin
DUT	Device Under Test
EA	European co-operation for Accreditation
EMC	Electromagnetic compatibility, Sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference, Sähkömagneettinen häiriö tai häiritsevyys
ESD	Electrostatic Discharge, sähköstaattinen purkaus
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
EUT	Equipment Under Test
FFT	Fast Fourier Transform
FPY	First Pass Yield, ensisaanto
GPIB	<i>General Purpose Interface Bus</i> . Standardoitu usean valmistajan käyttämä mittalaiteväylä.
HF	High frequency
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc</i>
I/O	Input/Output
LISN	Line impedance stabilizing network eli keinoverkko
MF	Medium frequency
OATS	Open area test site
OEM	Original Equipment Manufacturer
RFI	Radio frequency interference
RMS	Root mean square
THD	Total harmonic distortion
UPS	Uninterruptible Power Supply
VXI	<i>VMEbus extension for instrumentation</i> . VME-väylän pohjainen väylä modulaarisiin järjestelmiin.

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Jani Vitikka
Diplomityön nimi:	Sähkömagneettisten häiriöiden huomioiminen suoja- releen testausjärjestelmissä
Valvojan nimi:	Professori Kimmo Kauhaniemi
Tarkastajan nimi:	Professori Timo Vekara
Ohjaajan nimi:	KTM Terho Uusitalo
Tutkinto:	Diplomi- insinööri
Oppiaine:	Sähkötekniikka
Opintojen aloitusvuosi:	2006
Diplomityön valmistumisvuosi:	2008

Sivumäärä: 147

TIIVISTELMÄ

Numeerisen suoja-releen testaus on tärkeä osa valmistusprosessia, koska tuotteen luotettavuus on erittäin tärkeää sen elinkaaren aikana. Mittausjärjestelmän vaatimukset ovat kasvaneet nykyaikaisen elektroniikan vaatimusten mukana. Sähköisten häiriökysymysten tuntemus on olennainen osa monimutkaisten testausjärjestelmien suunnittelua.

Tässä diplomityössä on tarkasteltu tuotannotestauslaitteistoja sähkömagneettisten häiriöiden kannalta. Työssä on keskitytty häiriöiden tutkimiseen funktionaalisista testausasemissa ja lopputestausasemissa. Tavoitteena on ollut nykyisen testauslaitteiston häiriöiden tutkimisen avulla mahdollistaa seuraavan sukupolven laitteiston kehitykselle hyvä perusta sähkömagneettisten häiriöiden eliminoimisen kannalta.

Työssä on esitelty suoja-releen testauslaitteisto, testausprosessi ja mittausmenetelmät. Suoja-releen moduulien kalibrointi on esitetty muuntajamoduulin ja prosessorimoduulin osalta. Teoriaosuudessa on käyty läpi sähkömagneettisten häiriötyyppien käsittely sekä niiden torjunta. Häiriökenttien voimakkuuden mittausmenetelmiin perehtymisen avulla on suunniteltu kattavat häiriömittaukset tuotannossa oleville mittauslaitteistoille. Mittauksissa on keskitytty pääasiassa sähkön laatuun ja säteileviin sekä johtuviin häiriöpäästöihin. Mittauksia on tehty useaan eri kohteeseen testauslaitteistossa. Mittaustuloksia on analysoitu teoriaan perustuen merkittävimpien häiriöiden löytämiseksi.

Työn lopuksi on pohdittu miten järjestelmää voitaisiin parantaa sähkömagneettisten häiriöiden kannalta rakenteellisesti ja ohjelmallisesti. Mittausten tuloksena on löydetty puutteita testauslaitteistosta ja testausaseman sähkön laadusta. Mitatut häiriöpäästöjen voimakkuudet ovat olleet verrokkina käytettyjen hyväksymisrajojen sisällä melko hyvin, mutta muutamia poikkeuksia on löydetty. Mittaustuloksia on verrattu keskenään useamman tuotannossa olevan testausaseman välillä. Havaituista puutteista ja ongelma-kohteista on esitetty parantavia toimenpiteitä testaustuloksen kannalta ratkaisevimpiin kohteisiin, jotta seuraavan sukupolven testauslaitteissa välttyttäisiin näiltä ongelmilta.

AVAINSANAT: Testausjärjestelmä, sähkömagneettiset häiriöt, suoja-rele

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Jani Vitikka
Topic of the Thesis:	Taking into account electromagnetical interference in the numerical protection relay test system
Supervisor:	Professor Kimmo Kauhaniemi
Evaluator:	Professor Timo Vekara
Instructor:	MSc Terho Uusitalo
Degree:	Master of Science in Technology
Major of Subject:	Electrical Engineering
Year of Entering the University:	2006
Year of Completing the Thesis:	2008

Pages: 147

ABSTRACT

Testing is a major part of the numerical protection relay manufacturing process because of the end product lifetime reliability requirements. Measurement system requirements have increased together with the development of electrical systems. Knowing electrical interference issues is an essential part of designing complex testing systems.

In the interference analysis part of this thesis, the functional test station and the final test station have been under review. The main focus of this thesis has been to minimize electromagnetic interference in the present system and in the upcoming production test systems.

In this thesis testing system, testing process and measurements methods of the numerical protection relay were presented. Calibration of the transformer module and the central processing unit module is also introduced. In the theoretical part of this thesis electromagnetic interference was discussed in many ways in order to understand possible interference issues which can appear in the measurement system. The measurements concentrated mainly on the quality of electricity and on the radiated and conducted emissions. The measurements were carried out in multiple sections of the testing system. Results have been compared to the theory.

Finally, it is considered how the present system could be improved structurally and programmatically to tolerate better electromagnetic interference. As a result, some weaknesses in the testing equipment and in the quality of electricity of the testing stations have been found. The measured results have been compared between similar test stations. Results have been analyzed carefully and ideas have been given to minimize electromagnetic interference problems in the present system.

KEYWORDS: Electromagnetic interference (EMI), testing system, numerical protection relay

1. JOHDANTO

Sähköiset häiriöt ja niiden vaikutus mittausjärjestelmiin ovat tärkeimpiä ja keskeisimpiä asioita testausjärjestelmän mittauksia suunnittelussa. Nykyaikaisessa mittauselektroonikkasuunnittelussa vaaditaan sähköisten häiriökysymysten tuntemusta ja elektronisten laitteiden sähkömagneettisen yhteensopivuusvaatimusten (Electromagnetic Compatibility, EMC) hallintaa.

Tässä diplomityössä tutkitaan numeerisen suojareleen lopputestauksessa testausasemissa ilmeneviä häiriöitä, ja etsitään menetelmiä niiden pienentämiseksi. ABB Oy Sähkönjakeluautomaatioyksikössä ilmeni tarvetta tutkia näitä häiriöitä, jotta saataisiin parannettua testauksesta ensimmäisellä kerralla läpimenneiden suojareleiden osuutta (käytetään termiä ensisaanto eli FPY). Työssä keskitytään RED 500 -sarjan suojareleiden lopputestaukseen sekä moduulitasolla että valmiin relepaketin tasolla.

Työssä mitataan testausasemien johtuvien ja säteileviä häiriöitä sekä tutkitaan testausympäristön sähkön laatua. Mittaustulosten perusteella arvioidaan testauslaiteympäristön soveltuvuutta erittäin tarkkaa mittaustulosta vaativiin mittauksiin. Mittaustulosten pohjalta voidaan antaa suosituksia tulevia mittauslaitteistoja varten, jotta uusille tuoteperheille tarkoitettua tulevasta järjestelmästä saataisiin mahdollisimman luotettava mittaustulosten suhteen.

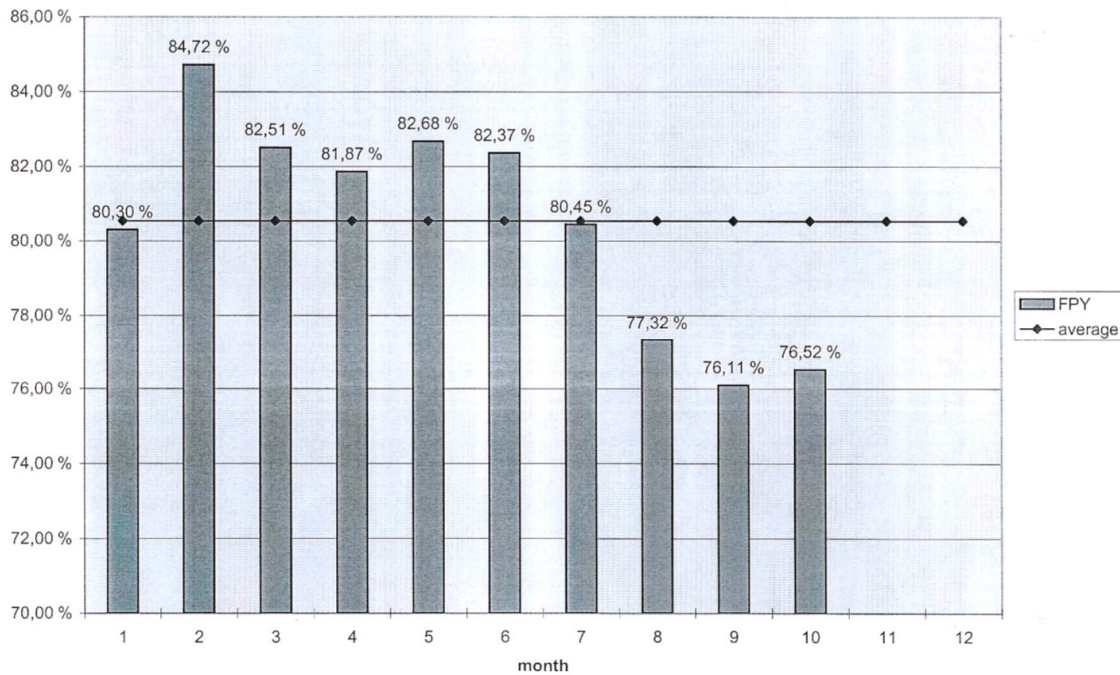
1.1. Toimeksiantaja

Tämän diplomityön toimeksiantaja oli ABB Oy:n Sähkönjakeluautomaatioyksikkö, Vaasan toimipiste. ABB Oy on maailmanlaajuinen yhtiö, jonka erityisosaamista ovat sähköntuotanto ja -siirto, sähkönjakelu sekä teollisuus- ja rakennusjärjestelmät. Yhtiö perustettiin vuonna 1988, kun Ruotsalainen Asea Ab ja Sveitsiläinen BBC Brown Boveri Ag fuusioituivat. Yhtiö koostuu yli 100 maassa olevista noin 1000 yhtiöstä, joissa työskentelee kaikkiaan 115 000 henkilöä. Emoyhtiö ABB Asea Brown Boveri sijaitsee Sveitsissä.

ABB Oy Sähkönjakeluautomaatioyksiköllä on ABB yhtymässä maailmanlaajuinen vastuu elektronisten suojusten, valvontajärjestelmien ja kaukokäyttöjärjestelmien kehittämisestä, valmistamisesta ja markkinoinnista. Yhtiön tuotteita valmistetaan Suomen lisäksi kuudessa muussa maassa. Suomessa sähkönjakeluautomaatioyksikössä työskentelee yhteensä 270 henkilöä Vaasassa, Helsingissä ja Tampereella. Vaasan sähkönjakeluautomaatioyksikössä on hallinto, markkinointi, tuotekehitys, markkinointi ja testaus sekä suojusten Suomen tuotanto. Tärkeimmät asiakkaat kotimaassa ovat OEM-asiakkaat sekä sähkö- ja energialaitokset. Ulkomailla asiakkaita palvelevat paikalliset ABB-yhtiöt.

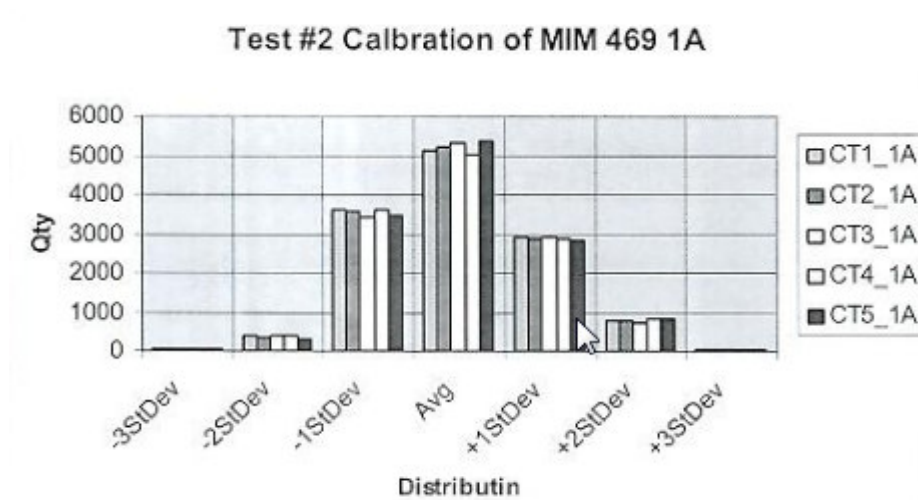
1.2. Työn tavoitteet

Työn pääasialliseksi tavoitteeksi asetettiin häiriöiden etsiminen testausjärjestelmästä, ja mahdollisten häiriöitä pienentävien toimenpiteiden suunnittelemineen olemassa oleviin testausasemiin. Pääongelmana oli suojusten muuntajamoduulikortin (kirjoitetaan jatkossa MIM-moduuli) ja prosessorimoduulin (kirjoitetaan jatkossa CPU-moduuli) kalibrointi. Ongelma ilmenee lopputestauksessa, jossa moduulit on koottu suojusteiksi eli suojustepaketiksi. Tällöin kahdessa eri vaiheessa (moduuli- ja lopputestausvaiheessa) kalibroidut ja testatut MIM- ja CPU -moduulit ovat menneet funktionaalisessa moduulitestauksessa läpi, mutta lopputestauksessa yhtenä koottuna ja kalibroittuna suojustepaketina testaus onnistuu epäsäännöllisesti. Suojusten ensisaanto (First Pass Yield, FPY) eri kuukausina nähdään kuvassa 1. Kuvassa on myös piirretty keskiarvo kaikkien testattujen suojusten osalta. Kuvasta voidaan huomata vaihtelun olevan suurta kuukaudesta riippuen.



Kuva 1. Testauksesta läpimenneiden ensisaanto-osuudet ja keskiarvo (Seitamaa 2008b).

Kuvassa 2 nähdään MIM-moduulin virtamuuntajien läpimenneiden osuuden jakautuminen testauksessa jakautuman ja lukumäärän suhteessa. Kuvassa y-akselilla on testattujen virtamuuntajien lukumäärä ja x-akselilla keskihajonta testauksen ensisaannosta. Tavoitteena on tutkia häiriöiden kytkeytymistä tähän testausjärjestelmään mahdollisimman monelta kannalta. Tuloksia tulnaisiin hyödyntämään myös tulevaisuudessa toteutettavissa testausjärjestelmissä sekä niiden testejä suunniteltaessa. Työn teoriaosuuteen on kehrätty sähkömagneettisiin häiriöihin liittyvää keskeistä materiaalia kuten häiriötyyppejä ja häiriöidentorjuntamenetelmiä. Teoriaosuutta voidaan hyödyntää monipuolisena lähteenä sähkömagneettisten häiriöiden huomioimisessa elektronisessa järjestelmässä.



Kuva 2. Virtamuuntajien tuotannon testauksesta ensimmäisellä testauskerralla läpimenneiden osuuden jakautuminen (Seitamaa 2008b).

Työn toisessa luvussa esitellään RED 500 -sarjan suojareleitä ja niiden testauslaitteistoa. Teoriaosuuden luvuissa kolme ja neljä luvussa käsitellään erilaisia sähkömagneettisia häiriötyyppejä ja niiden luokittelua sekä käydään läpi mittausmenetelmiä. Kappaleessa viisi esitetään häiriöiden torjuntamenetelmiä, jotka soveltuvat työssä esitetyn laitteiston häiriöiden torjuntaan. Häiriölähteille annetaan parannusehdotuksia ja häiriökenttien voimakkuuksien mittauksia sekä niiden vaikutusta arvioidaan testiasemien häiriöntorjunnassa kappaleessa kuusi. Teorian pohjalta suunnitellaan tulevat mittaukset, ja rajataan mittaukset koskemaan testauslaitteiston kannalta keskeisimpiä häiriölähteitä.

Seitsemännessä luvussa esitetään testausasemiin ja sähköverkkoon tehdyt mittaustulokset sekä arvioidaan niitä teoriaan perustuen. Mittaustuloksia verrataan standardeissa esitettyihin raja-arvoihin, ja tutkitaan onko löydetty häiriölähteet mahdollisesti potentiaalisia häiriötekijöitä. Mittaustulosten perusteella etsitään suurimmat häiriölähteet, ja esitetään menetelmiä niiden torjumiseksi teoriaan perustuen. Työn yhteenveto on kappaleessa kahdeksan.

2. RED 500 -SUOJARELEET JA NIIDEN TESTAUS

Tässä kappaleessa esitellään suojareleet ja niiden testausmenetelmä. Niiden toiminnan tunteminen on olennaista häiriömittauksia suunniteltaessa. Ensin kerrotaan lyhyesti suojareleiden historiasta.

Sähkön kaupallisen tuotannon ja jakelun aloittamisesta 1880-luvulta alkaen on henkilöiden, laitteiden ja johtimien turvana käytetty suojareleitä. Ensimmäiset elektroniset suojareleet ilmestyivät markkinoille 1960-luvun loppupuolella. Alkuvaiheessa ne olivat puhtaasti analogiatekniikkaan perustuvia, mutta digitalisoituivat melko nopeasti. Näillä releillä saavutettiin sähkömekaanisiin releisiin verrattuna seuraavat edut (Siivonen 2007: 13.):

- Lyhyet toiminta-ajat (kykenevät seuraamaan ja reagoimaan sähkösuureiden hetkellisarvoihin)
- Pieni tehonkulutus, jopa alle 1 VA, mikä pienentää virtamuuntaja kustannuksia
- Pieni koko
- Hyvä värinänkestävyys (tärkeää etenkin laivoissa ja esimerkiksi vesivoimalaitoksilla)
- Monipuolinen informaation käsittely.

Ongelmia tuottavat muun muassa elektronisten releiden suurempi herkkyys ylijännitteille ja sähkömagneettisille häiriöille, jatkuva apusähkön tarve sekä toiminnan epähavainnollisuus.

Uusinta relesukupolvea edustavat 1980-luvun loppupuolella käyttöön tulleet mikroprosessoripohjaiset releet. Nämä tarjoavat perinteellisiin elektronisiin releisiin verrattuna seuraavat uudet ominaisuudet (Siivonen 2007: 14–15.):

- Releissä on jatkuva itsediagnostiikka, joka antaa hälytyksen releen sisäisistä vioista.
- Releissä on muisti, johon automaattisesti tallentuvat vianaikaiset tapahtumat, kuten ylivirtojen suuruudet ja esiintymisajankohdat. Vikatiedot voidaan näin jälki-

kätehen lukea releeltä, mikä helpottaa vikojen syiden selvittämistä. Myös oikosulun paikallistaminen on mahdollista, kun oikosulkuvirran arvosta lähtien voidaan laskea vikapaikan etäisyys sähköasemasta.

- Releet voidaan liittää ulkomaailmaan optisen sarjaväylän avulla. Väylän välityksellä releet voivat kommunikoida keskenään tai esimerkiksi keskusvalvomon kanssa. Sarjaväylän avulla releen mittaustietoja tai tallentuneita vikatietoja voidaan kaukolukea tai releasetteluja voidaan lukea ja muuttaa kauko-ohjatusti.

Suojarele toimii siten että, se tarkkailee sähköverkon sähköisiä suureita ja havahtuu, kun mitattava suure sivuuttaa releen toiminta-arvon. Ohjelmoitujen funktioiden mukaan suojarele tekee sovitun toiminnon kuten katkaisijan aukaisun tai hälytyksen.

Häiriöiden aiheuttamien vahinkojen minimoimiseksi relesuojauksella pyritään havaitsemaan viat mahdollisimman nopeasti. Suojareleen on suojattava koko järjestelmä, ja toimittava niin, että mahdollisimman pieni osa verkosta joutuu pois käytöstä. Toiminnan on siis oltava selektiivistä. Lisäksi suojareleen on oltava kohtuullisen yksinkertainen ja käyttövarma, ja se on kyettävä testaamaan käytön aikana säännöllisesti. Relesuojauksen rakenteen määrää suojattava kohde, sen tärkeys sekä verkon maadoitustapa ja rakenne.

2.1. Käyttötarkoitus

ABB Oy Sähköjakeluautomaatio toi markkinoille 1990-luvun loppupuolella RED 500 -suojareleet. RED 500 -suojareleitä käytetään sähköjakeluverkon suojaukseen, ohjaukseen ja valvontaan. Niiden toimintaa ohjataan ja valvotaan kaukokäyttöjärjestelmällä valvomoista. Suojareleet suorittavat itsevalvontaa muun sähköverkon valvonnan ja ohjauksen rinnalla. Ne on tarkoitettu keskijänniteasemakäyttöön, ja ne ovat yhdistettyjä suojaus-, ohjaus- ja mittausyksiköitä.

RED 500 -sarjan suojareleet sisältävät joustavia mittaus-, suojaus-, hälytys- ja laukaisu-toimintoja. Toiminta-arvot näihin toimintoihin ovat käyttäjän aseteltavissa. RED 500 -suojareleperheeseen kuuluvat seuraavat releet REX, REM, REC, REJ, REU ja REF.

Kuvassa 3 on REF 541 kennotermiäli. Suojareleet koostuvat useista piirikorteista, joista osa voi olla samoja useassa lopputuotteessa. Nämä piirikortit yhdessä saavat aikaan releen toiminnallisuuden.



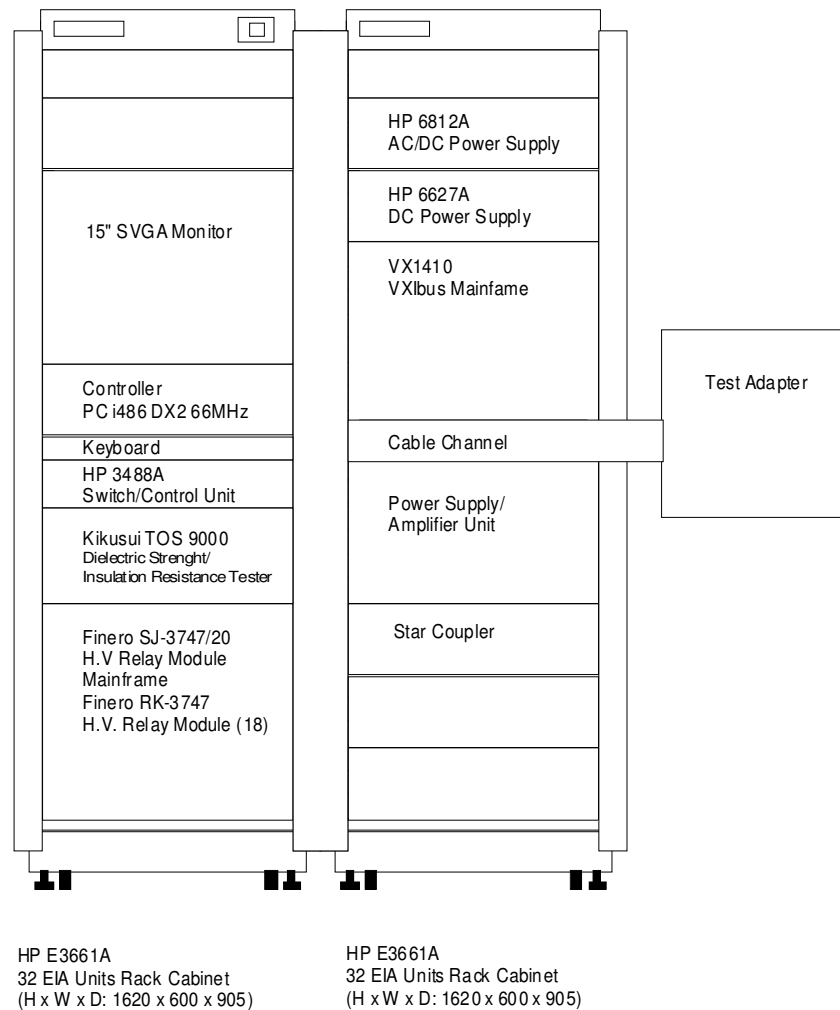
Kuva 3. REF 541 -suojarele (ABB 2005: 1).

Suojareleessä on aina prosessori- ja tehölähdekortti. Niiden lisäksi voi olla yksi tai useampi I/O- tai RTD-moduulikortti. Joissakin suojareleversioissa on eroavaisuuksia myös muun muassa I/O-moduulikorttien lukumäärässä. Ohjelmistossa on useita vaihtoehtoja, ja se ladataan suojareleen muistiin asiakkaan tarpeiden mukaan testausvaiheessa.

2.2. Testausasemat

2.2.1. Funktionaalinen testausasema

RED 500 -testausasema on VMEbus extension for instrumentation (VXI) -mittauslaiteväylää käyttävä funktionaalinen eli toiminnallinen testausasema (käytetään myös nimitystä systeemitestaus). Testausaseman tarkoitus on RED 500 -sarjan moduulikorttien toiminnallisuuden testaus. Testilaitekaapin (kuva 4) lisäksi testiasemaan kuuluu adapteri, johon testattava kortti kiinnitetään testin ajaksi. Yhdellä testausasemalla voidaan testata kaikki RED 500 -tuoteperheen piirikortit.



Kuva 4. RED 500 -sarjan funktionaalisen moduulitestausaseman ja jännitelujuustestausaseman testilaitekaappi (Talonen 2005: 25).

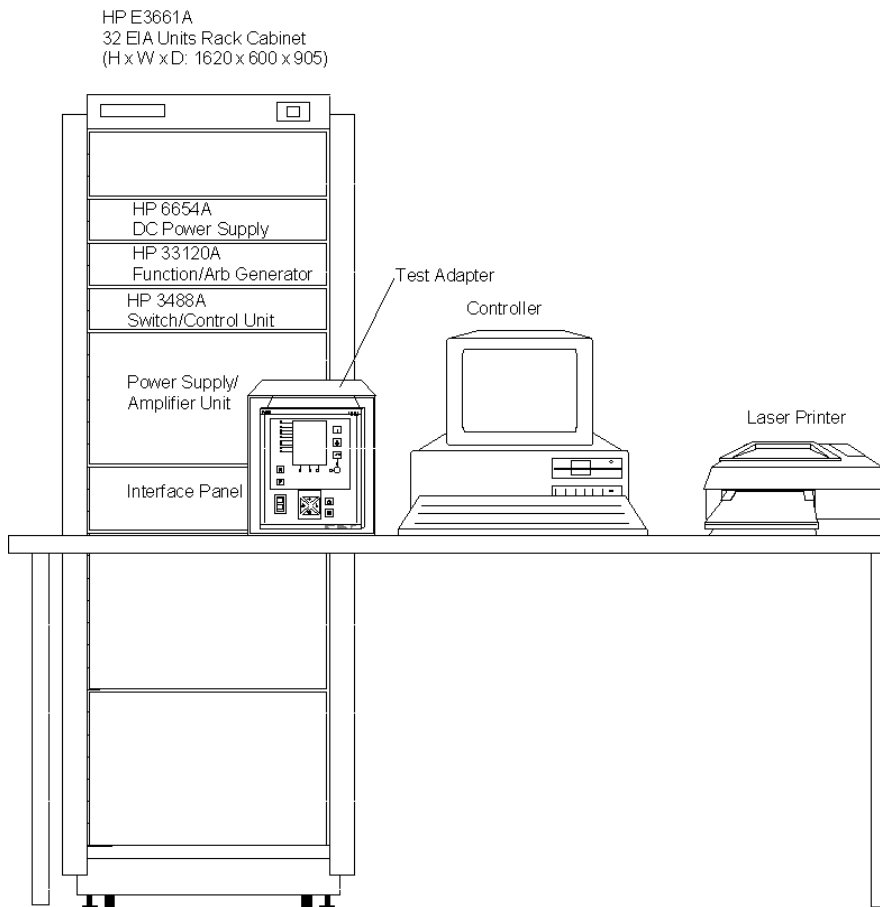
Kuvassa vasemman puolella oleva erillinen jännitelujuusasema ei ole tämän työn kannalta oleellinen ja siksi sitä ei käsitellä tämän työn yhteydessä lainkaan. Funktionaalissa moduulitestausasemassa (oikeanpuoleinen asema kuvassa 4) on kaikki laitteet, joita tarvitaan testausaseman toimintaan. Keskeisimmät tarvittavat mittalaitteet ja vahvistimet ovat; HP 6627A, HP 6812A, VXI-kehikko sekä jännitelähde ja vahvistinyksikkö. Moduuliadapteri kiinnitetään testiaseman keskellä olevaan korttikehikkoon omilla liittimillään.

Testausaseman tärkein komponentti on tietokone, joka ohjaa aseman laitteita testaussovelluksen avulla. Tietokone on kytkettyä testilaitteisiin GPIB-väylällä (General Purpo-

se Interface Bus). Piirikortin testaaminen tapahtuu suorittamalla tietokoneella tietyt LabVIEW-ohjelmat. Verkkolevyllä tietokannassa on jokaiselle piirikortille omat testiohjelmansa, jotka tietokone suorittaa viivakoodinlukijan luettua tunnuksen testattavasta kortista.

2.2.2. Lopputestausasema

Lopputestausasema (kuva 5) on rakenteeltaan yksinkertaisempi kuin funktionaalinen moduulitestausasema. Suurin eroavaisuus on, että se ei sisällä lainkaan VXI-mittalaitekehikkoa. Lopputestausasema sisältää lisäksi signaaligeneraattorin, jolla generoidaan tarvittava ohjaussignaali vahvistimille. Suojarele kiinnitetään johdoilla testausasemaan, joten erillisiä adaptoreita ei tarvitse käyttää. Tietokone ohjaa testausaseman toimintaa samalla tavoin kuin funktionaalisessa testausasemassakin.



Kuva 5. RED 500 -sarjan lopputestausaseman testilaitekaappi (Talonen 2005: 27).

2.3. Testausasemien laitteet ja rakenne

Tässä luvussa selvitetään testausaseman laitteistoa ja kytkentöjä. Luvussa käsitellään vain laitteita, jotka kuuluvat testausaseman testausjärjestelmään ja ovat joko testauksessa mukana tai apulaitteina testauksen aikana. VXI-laitteet sijaitsevat ainoastaan funktionaalisessa testausasemassa, sillä lopputestausasema on rakenteeltaan yksinkertaisempi.

2.3.1. GPIB-ohjattavat laitteet

Tietokone ohjaa seuraavien laitteiden toimintaa GPIB-väylän avulla. Väylärakenteen avulla järjestelmästä on saatu selkeä kokonaisuus, jossa laitteita voidaan ohjata monipuolisesti tarpeen mukaan testauksen edetessä.

Teholähde HP 6627A

Teholähde HP 6627A pystyy syöttämään vain tasavirtaa neljästä ulostulostaan. Teholähteessä on ulostuloliittimien lisäksi neljä sense-liitintä ja neljä ohjauslähtöä. Ohjauslähtö on ohjelmallisesti ohjattava kytkin RLY- ja GND-liitimen välillä. Sense-liitintä on puolestaan takaisinkytkentä, joka mittaa syötettävää jännitettä. Teholähde säätelee ulostuloa, kunnes mitattu jännite on sama kuin ohjelmoitu jännite. GPIB-väylä mahdollistaa kaikkien neljän ulostulon ja ohjauslähdön ohjaamisen itsenäisesti tietokoneella. Teholähteen ulostulot ovat galvaanisesti eristettyjä (isoloituja). (Hewlett-Packard 1997: 2.)

Testausasemassa teholähteen HP 6627A ulostulo- ja sense-liitimet ovat kytketty releiden kautta testausaseman etupaneelin liittimille. Lisäksi teholähteen ensimmäinen ulostulo ja sense-liitintä ovat kytkettynä suoraan relematriisiin VX4380 liittimiin. Kun teholähteen ensimmäisen ohjauslähdön releen koskettimet suljetaan, sulkeutuu myös ulostulojen ja sense-liitimien releiden koskettimet. (Hewlett-Packard 1997: 3–4.)

Teholähde HP 6627A antaa teholähdekortteja lukuun ottamatta kaikille piirikorteille käyttäjännitteet. Teholähteessä on readout-toiminto, jonka ansiosta GPIB-väylän kautta voidaan lukea lähtövirta. (Hewlett-Packard 1997: 5.)

Teholähde HP 6812A

Teholähteessä HP 6812A on yksi sense-liittimillä varustettu ulostulo, jolla voidaan syötää sekä tasa- että vaihtovirtaa. Ulostulo on kytketty releiden kautta testausaseman etupaneelin liittimiin. Releet mahdollistavat kahden erillisen ulostulokanavan yhdestä ulostulosta. Lisäksi teholähteen ulostulo on kytketty suoraan relematriisin liittimille. (Hewlett-Packard 1998: 2.)

Testin aikana teholähdekorttien käyttöjännitteeksi syötetään vaihtovirtaa teholähteellä. Lisäksi laitteella syötetään tasavirtaa BIO-korttien ulostuloreleiden testaamiseksi. Laskurin VX4224 käynnistämiseen käytetään teholähteen trig out -toimintoa. Laskuria käytetään taajuuden tarkkaan mittaamiseen.

Oikosulkukytkimet ja vastus R1

Releitä R11, R16, R21, R26 ja R30 käytetään oikosulkukytkiminä. Oikosulkukestoisuutta testataan näiden kytkimien avulla siten, että aiheutetaan oikosulku teholähdekortin ulostuloihin. Kytkimiä ohjataan VXI-kehikon relemoduulin VX4350 releillä 55, 58, 59, 60 ja 62. Kytkimet on kytketty suoraan testiaseman etupaneelin liittimille. Releen R29 koskettimilla kytketään +12 V -jännite etupaneelin liittimistä vastukselle R1. Tarkoituksena on kuormittaa vastuksella testattavan kortin 12 V:n ulostuloa. Relettä R29 ohjataan relemoduulin VX4350 kanavalla CH61. (Eskelinen 1994: 15.)

2.3.2. VXI-kehikon laitteet

Tässä luvussa esitellyt laitteet on kytketty VXI-mittauslaitekehikkoon. VXI-kehikko on puolestaan kytketty tietokoneeseen GPIB-väylän välityksellä. VXI-kehikko on käytössä funktionaalisessa testausasemassa.

Digitaalinen yleismittari VX4237

Digitaalista yleismittaria VX4237 voidaan käyttää hyödyksi useissa eri mittauksissa, koska se on kytketty multiplekseriin. Mittarilla voidaan mitata tasa- ja vaihtojännitettä, tasa- ja vaihtovirtaa sekä resistanssia. Moduulikorttitestauksessa yleismittarilla mitataan

vain jännitettä. Virtamittaukset on muutettu jännitemittauksiksi apuvastuksien eli shunttivastuksien avulla. Tällä tavoin mittaamalla mittaustuloksesta saadaan tarkempi, koska mittari ottaa jännitemittauksessa virtaa vain joitakin mikroampeereja. Jännitealueella 20 Vdc mittarin suurin mahdollinen resoluutio on 6,5 digittiä ja ilmoitettu virhe on $\pm(0,003\%$ lukemasta + 4 digittiä). (Tektronix 1995a: 6.)

Multiplekseri VX4330

Multiplekseri VX4330 koostuu kuudesta osasta. Osia voidaan yhdistää ohjelmallisesti toisiinsa. Kussakin osassa on 40 relettä, joilla on mahdollista kytkeä haluamansa kanavat yhteen. Multiplekseriä voidaan käyttää useampijohtimisena: 1-, 2-, tai 4-johtimisena. Multiplekseriä käytetään mittauslaitteiden kytkemiseen mitattavalle kohteelle. Lisäksi multiplekseri VX4330 hoitaa liikennöinnin VXI-kehikon ja matriisin sekä relemoduulin VX4350 välillä. (Tektronix 1995b: 3–4.)

Relematriisi VX4380

Relematriisi on monikanavainen multiplekseri, jolla voidaan kytkeä vapaammin useampia erillisiä kanavia samanaikaisesti. Matriisi VX4380 koostuu 256 releestä, jotka on tarkoitettu johdinpareille eli kukin rele ohjaa kahta kytkintä. Relematriisi koostuu neljästä 4x16-osasta eli koko matriisin koko on 4x64. Jokaiseen sarakkeeseen on mahdollista kytkeä sisääntulo- ja ulostulojohdinpari. Testausasemassa relematriisin 36 ensimmäistä saraketta on kytketty etupaneelin liittimiin. Sarakkeiden toiset päät on kytketty relemoduulin VX4350 kytkimien kautta optoerotinkortille, joka on puolestaan kytketty teholahteen HP 6812A ja teholahteen HP 6627A ensimmäiseen ulostuloon. (Eskelinen 1994: 17.)

Matriisia ja siihen kytkettyä teholähdettä HP 6812A käytetään binääristen I/O-moduulien testaamiseen. Tähän liittyen tehdään kaksi testiä. Ensimmäisessä testissä kortin reagointia tutkitaan matriisin avulla syöttämällä virtaa teholahteelta I/O-moduulin sisääntuloon. Toisessa testissä teholahteen ja matriisin avulla syötetään virtaa testattavan kortin ulostuloreleille. Ulostuloreleen paluuvirta ohjataan matriisilla relemoduulille VX4350, joka kytkee sen optoerottimelle. (Eskelinen 1994: 17.)

Relemoduuli VX4350

Relemoduuli VX4350 sisältää 64 relettä, joita voidaan ohjata täysin toisistaan riippumatta. Jokaisessa releessä on kolme nastaa, jotka ovat kanta (COM), normaalisti auki (NO) ja normaalisti kiinni (NC). Testausasemassa näitä releitä käytetään vain sulkeutuvina siten, että NC-nastoja ei ole kytketty. Relemoduulin kanavilla CH1–CH37 irroteetaan ja kytketään I/O-moduulin optoerottimia matriisista. Kanava CH52 kytkee muuntajan G2 ulostulon etupaneelin liittimille. Kanavilla CH53–CH64 ohjataan oikosulku- ja kuormanvalvontareleitä. (Eskelinen 1994: 18.)

Digitaalinen I/O-moduuli VX4801

I/O-moduulissa VX4801 on 48 TTL-yhteensopivaa digitaalista I/O-nastaa, joita voidaan ohjelmoida joko bitin tai tavun osissa tai ryhmänä. Laitteen kaikki tavut on varustettu tri-state-tilalla, joka irrottaa digitaalisenannon kaikista ulkopuolisista kytkennöistä. Lisäksi sisäänmenot on varustettu ylösvetovastuksilla, joten kytkemätön sisäänmeno on aina 5 V:n jännitteessä. I/O-moduulin logiikka on myös valittavissa käänteiseksi, jolloin 5 V vastaa loogista nollaa ja 0 V loogista ykköstä. (Tektronix 1994.)

Digitaalisen I/O-moduulin VX4801 bitit DIO00–DIO43 ovat kytketty optoerotinkortin, relemoduulin VX4350 ja matriisin VX4380 avulla etupaneelin liittimiin. Nämä 36 bittiä voivat toimia jännitteenalennuskortin yksisuuntaisuudesta johtuen pelkästään sisääntuloina. Optoerotinkortti sisältää kullekin bitille oman optoerotinpiirin, joka yhdistää bitit maahan, kun optoerotinimen sisääntuloon asetetaan +24 V:n jännite. Digitaalisen I/O-moduulin bitit DIO–DIO57 on kytketty suoraan testausaseman etupaneelin liittimiin, ja niitä on mahdollista käyttää sekä sisääntuloina että ulosmenoina. (Tektronix 1994.)

2.3.3. Muuntaja G2

Muuntaja G2 ei ole varsinaisesti testilaitte, vaan apulaitte, joka syöttää 24 V:n tasajännitettä ja sen ulostulo on suojattu 100 mA:n sulakkeella. Muuntajan ulostuloa käytetään releiden avulla oikosulku- ja kuormanvalvontareleiden ohjaamiseen. Lisäksi muuntajan ulostulo on kytketty testausaseman etupaneelin liittimille relemoduulin VX4350 kanavan CH52 kautta. (Eskelinen 1994: 18)

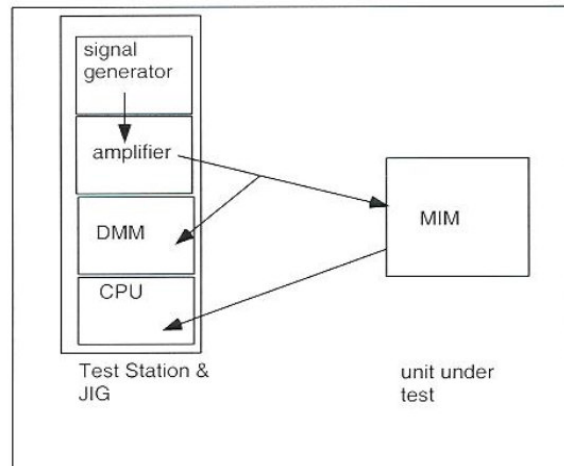
2.4. RED 500 -suojareiden MIM- ja CPU-moduulin analogiamittausketju

Lopputestauksessa erillisissä funktionaalisissa moduulitesteissä testatut MIM- ja CPU-moduulit yhdistetään yhdeksi suojarelepaketiksi. Testauksen tarkoitus on muun muassa koko suojareleen mittaustarkkuuden tarkistaminen. Kaksivaiheisesta testauksesta johtuen tuotannossa on ilmennyt tilanteita, joissa funktionaalisessa testauksessa läpi menneet moduulit eivät enää mene hyväksytysti läpi lopputestauksesta. Kuitenkin erillisissä moduulikalibroinneissa on riittävästi marginaalia tarkkuusvaatimuksissa, joten ei ole olemassa MIM- ja CPU-moduuliyhdistelmiä, joissa voisi olla eroavaisuutta keskenään.

2.4.1. Virtamuuntajan kalibrointiprosessi

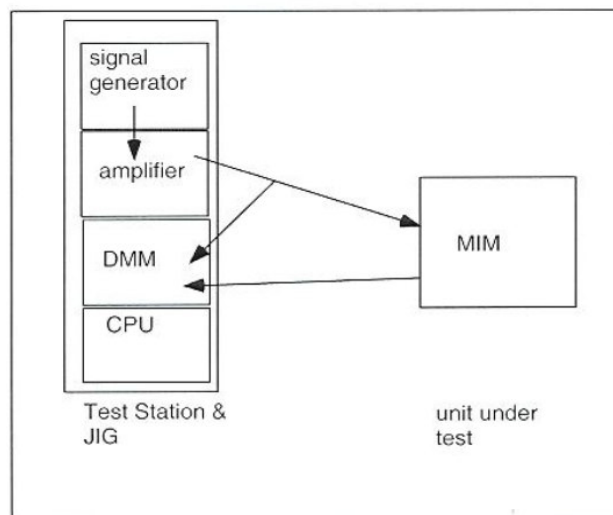
Seuraavaksi kerrotaan MIM-muuntajamoduulin virtamuuntajan kalibrointiprosessista. Jännitemuuntajan kalibrointiprosessia ei käsitellä tämän työn yhteydessä lainkaan, koska sen mittausprosessissa ei ole merkittäviä ongelmia tuotannon ensisaannossa. MIM-muuntajamoduulin epälineaarista käytöksestä johtuen kalibrointi suoritetaan kahdessa eri pisteessä, jotka ovat 10 mA:n (1 % nimellisvirrasta) ja 1 A:n (100 % nimellisvirrasta) pisteet. MIM-moduuli sisältää kuusi virranmittauskanavaa, joista kuitenkin ainoastaan 1 A:n sisääntulo kalibroidaan. MIM-moduulissa olevat viisi muuta analogiamittauskanavaa (0,2 A ja neljä 5 A) jätetään kalibroimatta. Kalibrointimenetelmä korjauskäyrineen on esitetty perusteellisesti tämän diplomityön rinnalla tehdyssä erikoistyössä. Seuraavissa kuvissa nähdään mittauksen eri vaiheet. Kuvat havainnollistavat myös, kuinka signaali mitataan eri laitteilla mittauskohteesta riippuen.

Virranmittaus pienimmällä virran arvolla nähdään kuvassa 6. Mittauksen tarkkuuden säilyttämiseksi tuloksen lukemiseen käytetään testausasemassa olevaa CPU-moduulikorttia. Teho- ja vahvistinyksiköllä vahvistetaan signaaligeneraattorilla generoitu sini-signaali (amplifier). Mittaus digitaalisella yleismittarilla tehdään myös MIM-moduulille syötetystä signaalista.



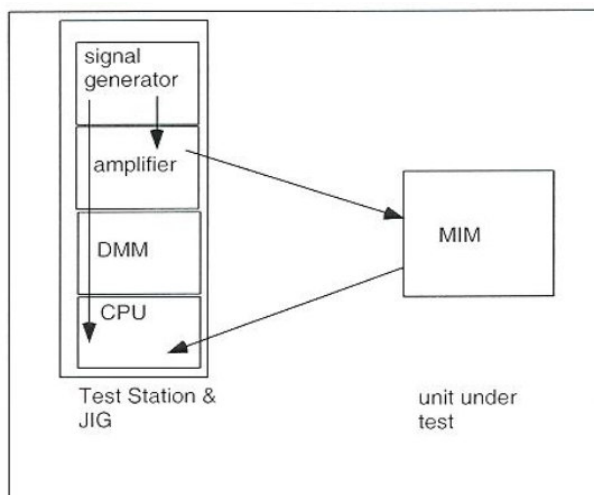
Kuva 6. Virranmittaus 10 mA AC 50 Hz virralla.

Virranmittaus suurimmalla virran arvolla nähdään kuvassa 7. Virran suuruudesta johtuen mittaus suoritetaan digitaalisella yleismittarilla sekä ennen MIM-moduulia että MIM-moduulin jälkeen. Teho- ja vahvistinyksiköllä vahvistetaan signaaligeneraattorilla generoitu sini-signaali (amplifier).



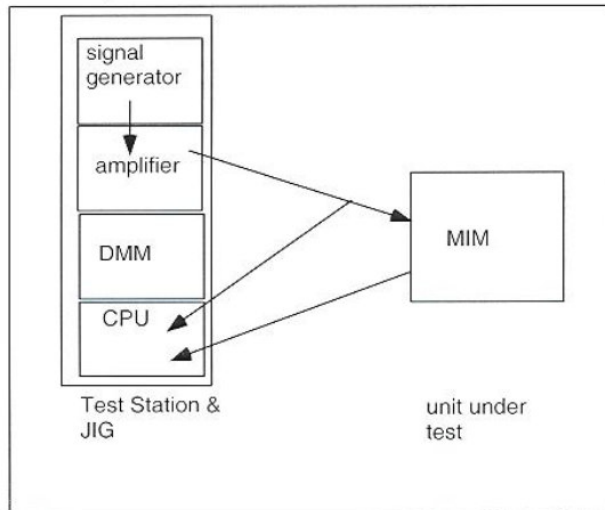
Kuva 7. Virranmittaus 1 A AC 50 Hz virralla.

Vaihekulma 10 mA:n virralla mitataan syöttämällä signaaligeneraattorilla signaali teho- ja vahvistinyksikön kautta MIM-moduulille, ja mittaamalla moduulin antama signaali CPU-moduulikortilla (kuva 8). Generoidun signaalin arvo syötetään suoraan CPU-moduulille signaaligeneraattorista.



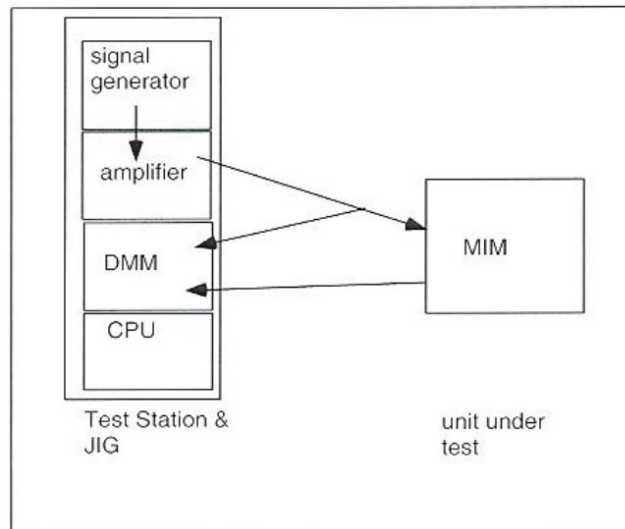
Kuva 8. Vaihekulman mittaus 10 mA:n virralla.

Vaihekulma 1 A:n virralla mitataan syöttämällä signaaligeneraattorilla signaali teho- ja vahvistinyksikön kautta MIM-moduulille, ja mittaamalla MIM-moduulin antama signaali ja signaaligeneraattorin signaali CPU-moduulikortilla (kuva 9).



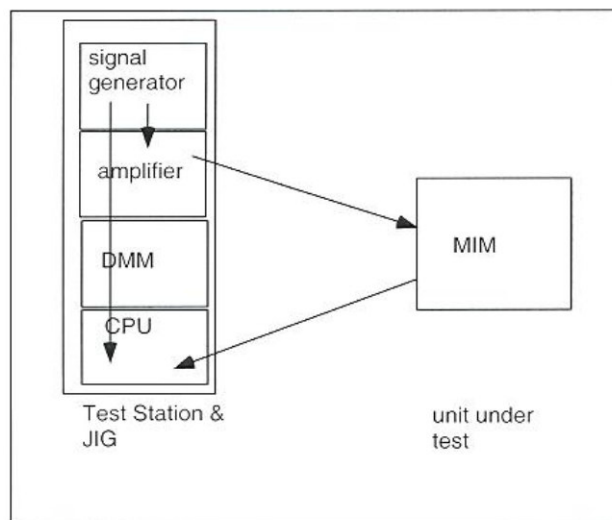
Kuva 9. Vaihekulma 1 A.

Mittaus 100 V:n jännitteellä mitataan syöttämällä signaaligeneraattorilla signaali teho- ja vahvistinyksikön kautta MIM-moduulille, ja mittaamalla moduulin antama signaali ennen ja jälkeen MIM-moduulia digitaalisella yleismittarilla (kuva 10).



Kuva 10. Jännitteen 100 V 50 Hz mittaus.

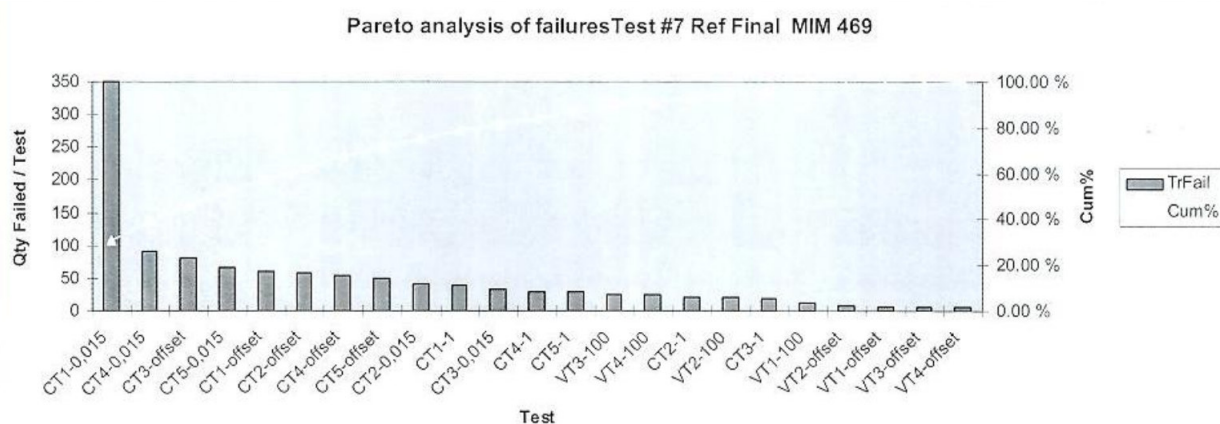
Vaihekulma 100 V:n jännitteellä mitataan syöttämällä signaaligeneraattorilla signaali teho- ja vahvistinyksikön kautta MIM-moduulille, ja mittaamalla moduulin antama signaali CPU-moduulikortilla (kuva 11). Generoidun signaalin arvo syötetään suoraan CPU-moduulille signaaligeneraattorista.



Kuva 11. Vaihekulma 100 V.

Mittaustuloksia tarkasteltaessa on tutkittava testausjärjestelmästä saatavia testaustuloksia. Tuloksista voidaan tehdä Pareto-analyysi, minkä avulla nähdään mitkä virheet esiin-

tyvät prosessissa useimmin. Kuvassa 12 on lopputestauksen MIM-muuntajamoduulien Pareto-analyysi, josta nähdään, että virtamuuntajakanavat pienillä virroilla (0,015 A) ovat suurimmat hylkäyksen testissä aiheuttavat kohteet.

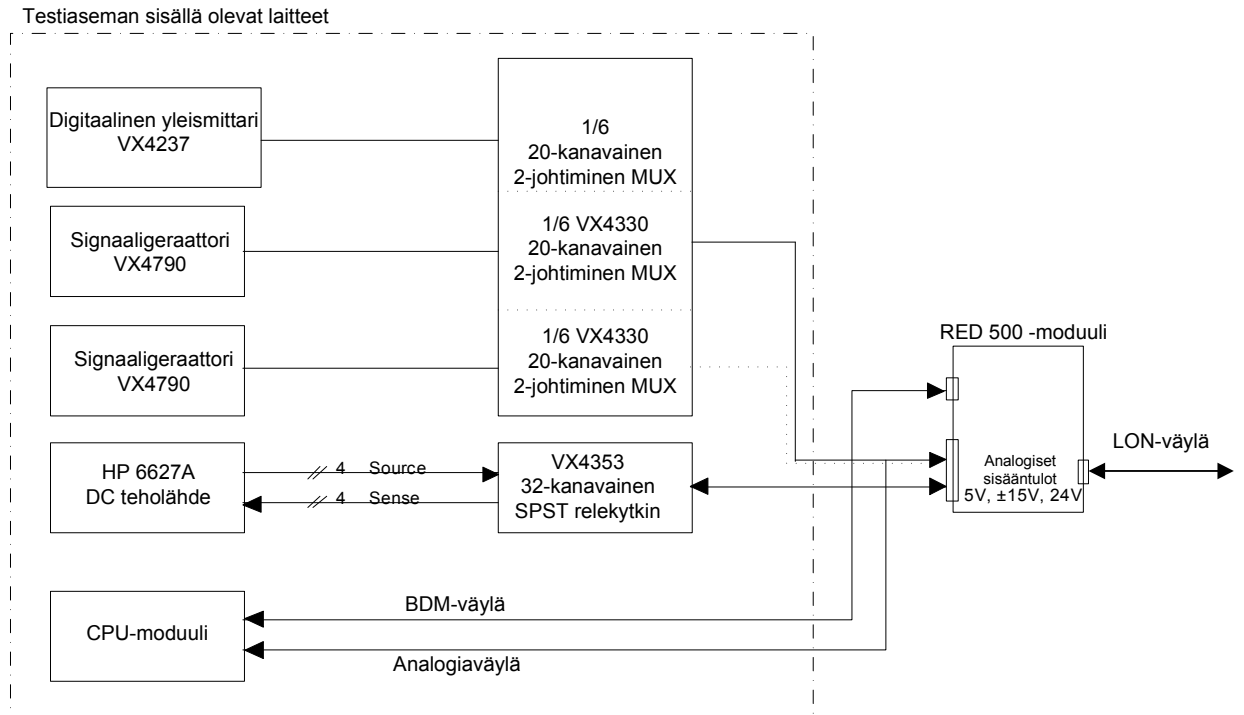


Kuva 12. Pareto-analyysi MIM-moduulin lopputestauksesta (Seitamaa 2008).

2.4.2. CPU-moduulin kalibrointiprosessi

Testaussignaali CPU-moduulin analogiakanaville generoidaan VX4790 ARB/Waveform -signaaligeneraattorilla. Syötetyn signaalin amplitudi mitataan digitaalisella yleismittarilla, koska signaaligeneraattorin amplituditarkkuus ei ole riittävä viritykselle. Testiasemassa olevan CPU-moduulin avulla arvo luetaan LON-väylän kautta. Testaussignaalin reititys analogiakanaville tehdään multiplekserilla VX4330 ja relematriisilla VX4380. Generaattorin signaalin reititys digitaaliselle yleismittarille tehdään multiplekserillä.

Taajuusvasteen tarkastus suoritetaan samoin kuin amplitudien testaus, lukuun ottamatta ylärajataajuudella olevaa generoimalla tuotettua signaalia. Kuvassa 13 on esitetty RED 500 -moduulin mittausjärjestelmä ja eri mittareiden ja funktiogeneraattoreiden yhteydet toisiinsa. Signaaleja, joilla on tietty kulkusuunta, on kuvattu nuolilla osoittamaan joko yhden- tai kahdensuuntaisuus. (Eskelinen 1994: 21.)



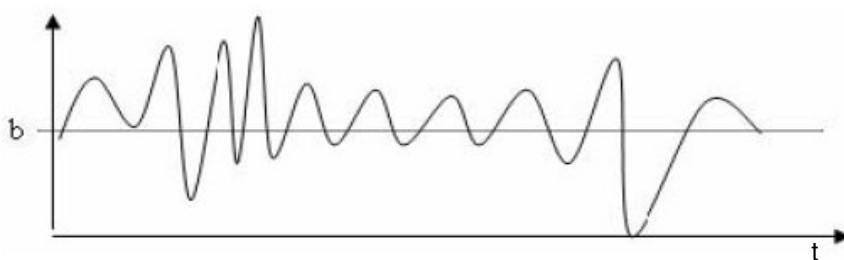
Kuva 13. RED 500-moduulissa olevan CPU-moduulin analogiakanavien testauksen- ja virityksen mittaussuuntien sekä käytettävien laitteiden esitys.

3. MITTAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi mittausmenetelmiin liittyviä tekniikoita, joita mittausketjussa joudutaan toteuttamaan. Nämä tekniikat ovat käytössä moduulitestauksessa, ja niiden tehokkuus perustuu järkevään signaalin käsittelyyn jo mittausprosessin varhaisessa vaiheessa. Mittausmenetelmät ja niiden huono toteuttaminen aiheuttavat poikkeavuutta mittaustuloksiin sekä voivat johtaa tarkankin mittaustuloksen harhaan.

Mittaussignaaleissa esiintyviä virheitä voidaan poistaa tai vähentää tietokoneen avulla myös mittauksen jälkeen. Jälkeenpäin signaalin muokkaaminen on kuitenkin paljon vaikeampaa kuin virhelähteiden karsinta jo mittausvaiheessa. Mittauksen jälkeen signaalia muokkaamalla voidaan poistaa karkea virhe, systemaattinen virhe ja sinimuotoiset komponentit sekä keskiarvoistaa signaali. (Niemelä 2002: 7.)

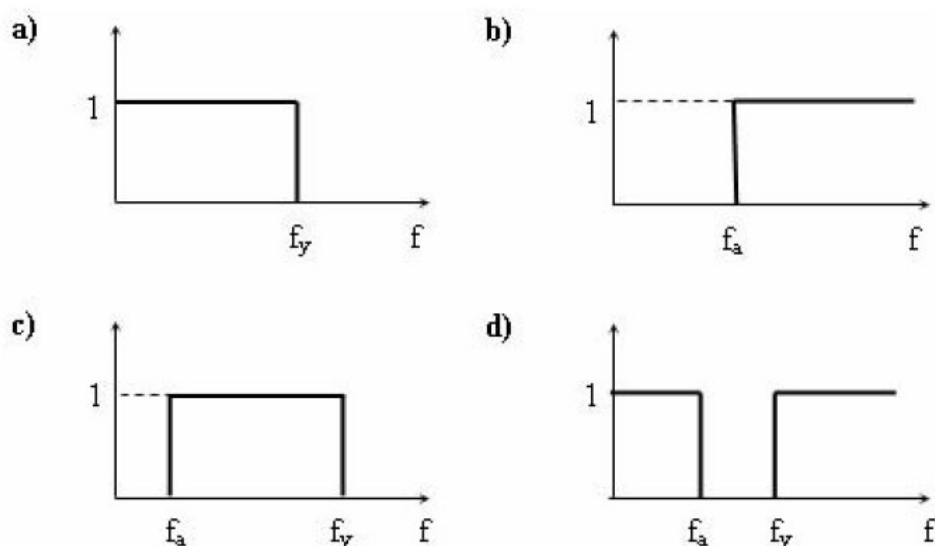
Karkean virheen poistamisessa mittaustuloksista poimitaan jatkokäsittelyyn vain halutut tulokset, jos havaitaan joidenkin saatujen tulosten olevan selvästi virheellisiä. Systemaattisen virheen poistaminen tapahtuu siten, että poistetaan jatkuvasti mitattaessa toistuva tietynlainen virhe ja sen vaikutus. Esimerkkinä voidaan mainita offset virheen poistaminen laskemalla signaalin keskiarvo ja vähentämällä se jokaisesta mittapisteestä (kuva 14). Kuvassa b on signaalin keskiarvo, joka vähennetään signaalin mittapisteistä, jolloin signaali saadaan pudotettua nollassa. Sinimuotoisten komponenttien poistaminen voidaan toteuttaa käyttämällä kaistanpäästösuodatinta, jolla voidaan poistaa esimerkiksi 50 Hz verkkohäiriötä. Keskiarvoistamalla voidaan vähentää satunnaisluontoisten häiriöiden vaikutusta mittaussignaaliin siten, että toistetaan mittaus useampaan kertaan ja keskiarvoistetaan tuloksia. (Niemelä 2002: 8.)



Kuva 14. Offset-virheen poistaminen keskiarvoistamalla (Niemelä 2002: 8).

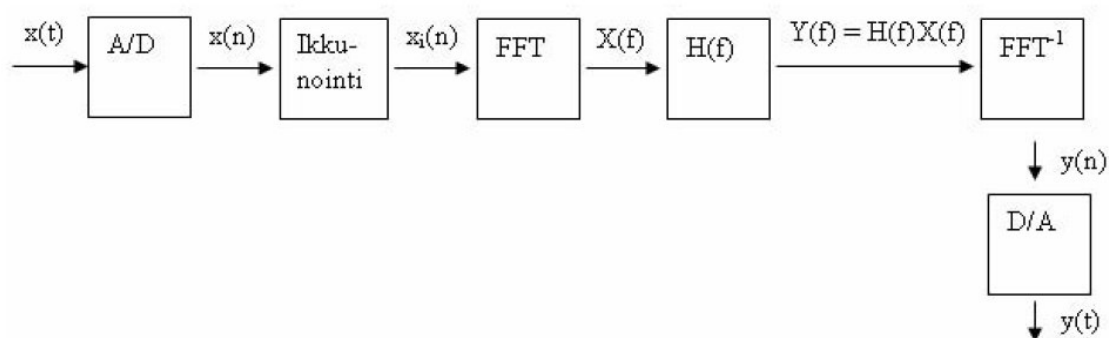
3.1. Signaalin suodatus

Signaalia on tarkoitus käsitellä taajuusalueessa suodatuksen avulla. Suodatuksella voidaan rajoittaa signaalin kaistaa halutunlaiseksi tai poistaa signaalista ei-toivottuja taajuuksia. Alla olevassa kuvassa 15 on esitetty ideaaliset perussuodatintyypit. Signaalien suodatuksessa signaalin spektriä kerrotaan taajuusalueen funktiolla $H(f)$, jonka arvo yleensä rajoittuu välille $[0,1]$. Erilaisiin tarkoituksiin käytetään erilaisia suodatustapoja, esimerkiksi alipäästösuodattimella voidaan rajoittaa signaalin taajuuskaistaa jättämällä pois tarpeettomia korkeita taajuuksia, ja kaistanestosuodattimella voidaan poistaa verkkohäiriöistä aiheutuva 50 Hz piikki taajuusspektrissä. (Niemelä 2002: 14.)



Kuva 15. Ideaalisten perussuodatinten funktiot taajuustasossa: a) alipäästösuodatin, b) ylipäästösuodatin, c) kaistanpäästösuodatin ja d) kaistanestosuodatin; f_a on alarajataajuus ja f_y on ylärajataajuus (Niemelä 2002: 14).

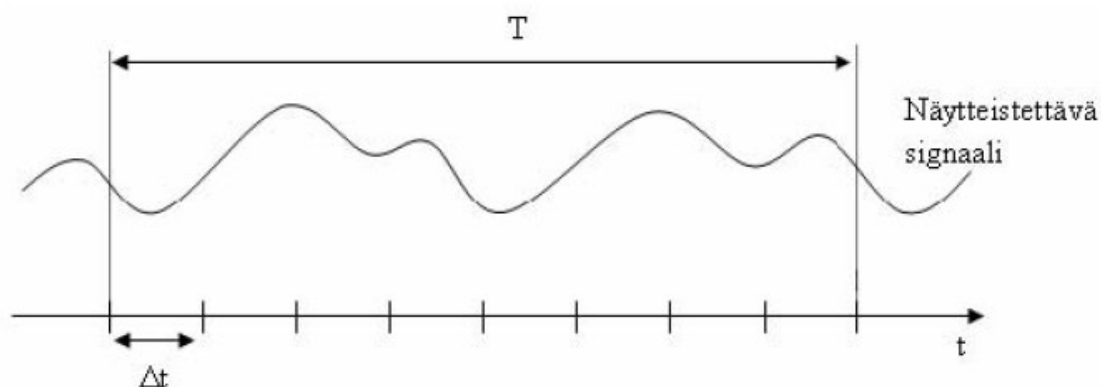
Digitaalinen signaalin suodatus voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 16 mukaisesti. Menetelmässä signaalia $x(t)$ näytteistetään aluksi tietyn aikaa, jonka jälkeen lasketaan sen spektri FFT-muunnoksella. Muunnoksen jälkeen signaali kerrotaan taajuusalueessa suodatusfunktiolla $H(f)$, ja palautetaan suodatettu signaali $y(t)$ takaisin aika-alueeseen Fourier-käänteismuunnoksella. (Niemelä 2002: 14.)



Kuva 16. Digitaalisen suodattimen periaate (Niemelä 2002: 14).

3.2. Näytteistys

Näytteistyksessä käytetyllä näytteenottotaajuudella f_s on merkittävä vaikutus digitoidun signaalin laatuun. Näytteenottotaajuus kertoo kuinka monta näytettä signaalista otetaan (kuva 17). Mitä suurempaa näytteenottotaajuutta käytetään, sitä parempi ja tarkempi kuva näytteistetystä signaalista saadaan. Liian suuri näytteenottotaajuus lisää tarpeettomasti talletettavan datan määrää tuomatta kuitenkaan uutta informaatiota tutkittavasta kohteesta. Käytännössä näytteenottotaajuus määrätään aina tutkittavan signaalin perusteella. Hitaasti muuttuville signaaleille riittää pieni f_s , kun taas nopeille signaaleille on käytettävä suurempaa näytteenottotaajuutta. (Niemelä 2002: 6.)

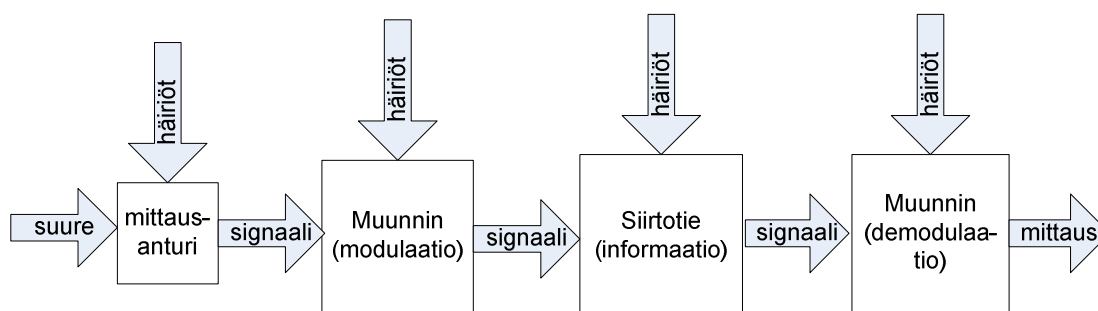


Kuva 17. Signaalin näytteistykseen käsitteitä: T on koko näytteenottojakson pituus, Δt näytteenottoväli (Niemelä 2002: 6).

Jos näytteenottoväli on liian suuri (f_s liian pieni), signaalille tapahtuu ns. laskostumisilmiö. Näytteenottovälin käänteisarvo $1/\Delta t$ on näytteenottotaajuus f_s . Laskostumisen esittämiseksi on aina käytettävä riittävän suurta näytteenottotaajuutta. Nyquistin ehdon mukaan näytteistystaajuuden on oltava vähintään kaksi kertaa signaalin suurin taajuus. (Niemelä 2006: 7.)

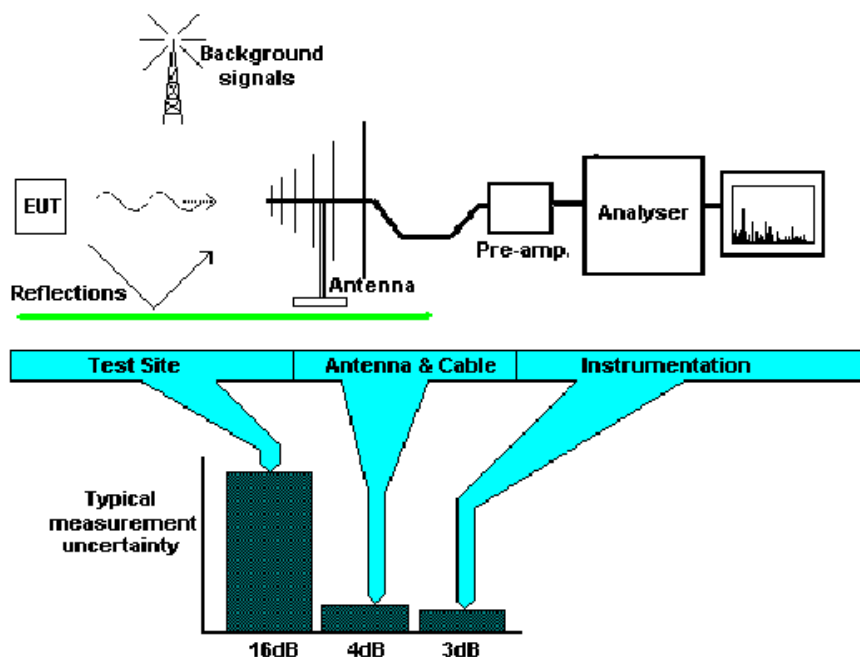
3.3. Mittausepävarmuus

Luotettavien mittaustulosten perusta on, että mittauksia toistetaan useita kertoja. Tällöin mittaustulos on mittaustulokemien keskiarvo. Mikäli tiedetään, että mittaustulokseen vaikuttaa jokin systemaattinen virhe, on mittaustulokseen tehtävä sitä vastaava korjaus. Edellytyksenä on, että systemaattinen virhe saadaan selvitettyä. Kuvassa 18 on kuvattu mittausketju, jossa näkyvät signaalin käsittelyvaiheet sekä mahdolliset häiriöiden kytkeytymiskohteet.



Kuva 18. Mittausketju ja häiriöiden mahdolliset kytkeytymiskohteet mittausketjussa.

Kuvassa 19 esitetyt mittausepävarmuustekijät ovat kolme suurinta tekijää mittausketjussa, kun mittaustaikana on avoin testausympäristö (Open Area Test Site, OATS). Nämä epävarmuustekijät ja niiden suuruudet ovat keskiarvo yli 150 testauspaikasta. Epävarmuustekijät osoittavat, että suurin tekijä epävarmuuden aiheuttajana mittaustuloksissa on testausympäristö ja laitteisto. Testausympäristöt kärsivät kahdesta ongelmasta, jotka ovat ympäristön taustahäiriöt ja testauspaikan vääristymät. (Mawdsley 2000.)



Kuva 19. Merkittävimmät epävarmuustekijät mittausetjussa (Mawdsley 2000.)

3.3.1. Standardit ja referenssit

EA (European co-operation for Accreditation) on ei-kaupallinen, Euroopan kattava, kansallisesti tunnustettujen akkreditointielinten verkosto. Sen toimialaan sisältyy mm. laboratorioden testaukseen ja kalibrointiin liittyvät ohjeistukset ja akkreditoinnit sekä laboratorioita koskevien standardien tulkinnan yhdenmukaisuuden varmistaminen. Hyvän ohjeistuksen referenssin ja mittausepävarmuusarvojen ilmoittamiseksi ja määrittämiseksi löytää EA:n julkaisusta EA-4/02 – Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Julkaisu on yhtenevä muidenkin kansainvälisten tahojen, kuten IEC:n ja ISO:n julkaisemien standardien ja ohjeiden kanssa. (Uitto 2007: 18.)

3.3.2. Määritelmä

Mittaustulos on täydellinen ainoastaan silloin, kun siitä käy ilmi varsinaisen mittaustuloksen arvo ja tämän lisäksi mittaamiseen liittyvä mittausepävarmuus. Mittausepävarmuus sisältää kaikki virheet, jotka poikkeuttavat mitattua arvoa todellisesta arvosta. Satunnaisvirheet ja systemaattiset virheet luetaan näihin tekijöihin (kuva 20). Systemaattisen virheen vaikutus lopputulokseen on jokaisella mittauskerralla sama. Virhettä voidaan kompensoida eri menetelmillä, koska se tunnetaan mittausprosessista hyvin. Mikä-

li systemaattiset virheet saadaan eliminoitua, jäljelle jäävät satunnaisvirheet, joiden vaikutukset mittaustulokseen eivät pysy samanlaisina jokaisella mittaukerralla. Mittauspävarmuus kuvaa näiden satunnaisvirheiden tilastollista arvoa. (Uitto 2007: 20.)



Kuva 20. Satunnaisvirhe ja systemaattinen virhe (Uitto 2007: 21).

Mittauspävarmuus-parametri liittyy mittauksen tulokseen. Sen suuruus kuvaa mitatun suureen arvoon aiheutuvaa hajontaa kohtuullisen tarkasti. Mittauksella pyritään löytämään mitattu arvo eli suureen aito arvo. Mittausarvo on mittauksen tuloksena saatava arvo, joka on samalla estimaatti mitattavasta arvosta. Mittaustulos Y on useiden mitattavaan arvoon liittyvien osatekijöiden funktio X_i (Uitto 2007: 22.):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) . \quad (1)$$

Kaikki tulokseen oleellisesti vaikuttavat tekijät riippuvat parametreista X_i , ja funktio f kuvaa sitä, millä tavalla mittaustulos riippuu niistä. Funktio voi pitää sisällään fysiikan lakien lisäksi myös muut prosessiin vaikuttavat parametrit kuten esimerkiksi laitteiden ominaisuudet, korjaustermit ja muut mittausympäristön vaikutukset. Käyttämällä parametrien X_i paikalla kunkin parametrin vastaavia estimaatteja x_i , saadaan kaavasta 1 mitattavan arvon Y estimaatti y , joka on ns. ulostuloestimaatti (Uitto 2007: 22.):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) . \quad (2)$$

Satunnaismuuttujan varianssia tai sen neliöjuurta eli keskihajontaa käytetään satunnaismuuttujan hajontaa kuvaavana parametrina. Standardiepävarmuus $u(y)$ on mittaus-

arvojen keskihajonta, joka liittyy mitattavan arvon estimaattiin y . Mittausarvojen Y standardiepävarmuus määritetään edellä olevan perusteella osatekijöiden X_i estimaattien x_i standardiepävarmuuksista $u(x_i)$. (Uitto 2007: 22.)

3.3.3. Tyypin A standardiepävarmuus

Kun useita riippumattomia havaintoja tehdään samoissa olosuhteissa, voidaan soveltaa tyypin A menetelmää. Havainnot noudattavat yleensä normaalijakaumaa. Mittaustulos saadaan laskemalla keskiarvo \bar{q} toistuvasti mitatuista arvoista q_i :

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (3)$$

missä n on mittausarvojen lukumäärä. Laskemalla keskiarvon keskihajonta saadaan standardiepävarmuus (Leskinen 2004: 15.):

$$u(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}}. \quad (4)$$

3.3.4. Tyypin B standardiepävarmuus

Märitettäessä tyypin B standardiepävarmuutta käytetään muuta kuin tilastollista menetelmää, esimerkiksi kokemusta käytetyistä materiaaleista ja laitteista, spesifikaatioita, kalibroinneissa syntynyttä dataa ja käsikirjoissa olevia samantyyppisiin mittauksiin määriteltyjä epävarmuuksia. Arvojen oletetaan useimmiten noudattavan normaalijakaumaa käytettäessä tyypin B menetelmää. Mittauksesta tiedetään useasti vain ylä- ja alaraja, joiden välissä mitattavan suureen tiedetään olevan, käytettäessä B tyypin menetelmää. Tämän perusteella voidaan olettaa todennäköisyyden olevan tasajakautunutta. Mitattavan suureen odotusarvo:

$$x_i = \frac{a_- + a_+}{2}, \quad (5)$$

missä a on alaraja ja a_+ yläraja. Keskihajonnasta saadaan standardiepävarmuudeksi (Leskinen 2004: 15.):

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}}. \quad (6)$$

3.3.5. Yhdistetty ja laajennettu mittausepävarmuus

Mittaustuloksen y standardiepävarmuus saadaan yhdistämällä standardiepävarmuudet, jolloin saadaan

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2} = \sqrt{(c_1 u(x_1))^2 + \dots + (c_N u(x_N))^2}, \quad (7)$$

missä c on herkkyyskerroin. Herkkyyskerroin kertoo kuinka paljon kyseinen epävarmuus muuttuu odotusarvon muuttuessa. Kahden useamman muuttujan riippuvuus toisistaan eli korrelointi aiheuttaa sen, että näiden kovarianssi täytyy laskea ja lisätä standardiepävarmuuteen. Laajennettu mittausepävarmuus voidaan määrittellä, jos halutaan määrittää tietty todennäköisyys, jolla mitattava arvo on mittausepävarmuuden kattavalla alueella. Kun mittauksen standardiepävarmuus kerrotaan kattavuuskertoimella k , niin saadaan laajennettu mittausepävarmuus (Leskinen 2004: 16.):

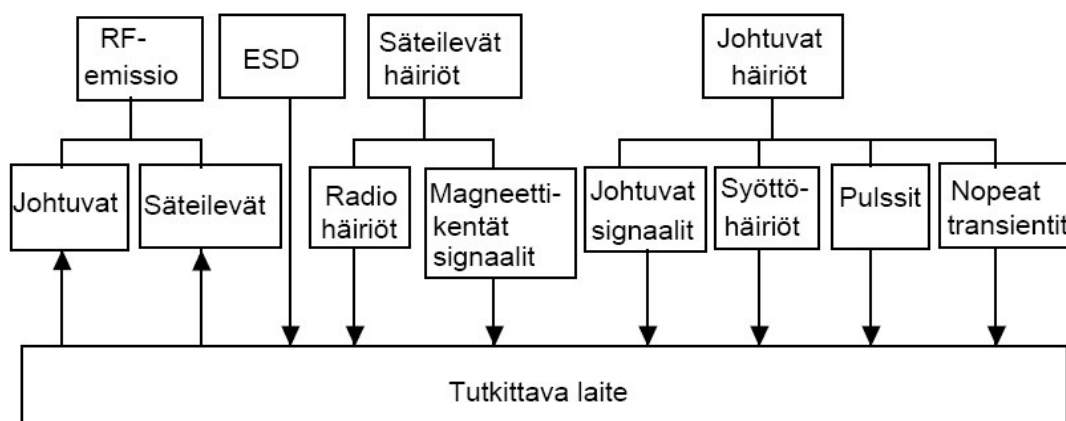
$$U = ku(y). \quad (8)$$

4. SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖTYYPIT

Sähkömagneettisten häiriötyyppien tarkastelua tarvitaan myöhemmissä testausjärjestelmän mittauksissa. Oikeiden mittausten avulla kyetään löytämään mahdolliset ongelma-kohteet tehokkaasti. Tässä kappaleessa esitellään sähkömagneettiset häiriöt sekä käydään läpi kaikki yleisimmät häiriöiden kytkeytymis- ja säteilemistavat.

4.1. Sähkömagneettiset häiriöt

Sähköiset häiriöt (Electromagnetic Interference, EMI) voidaan jakaa monella tavalla alkuperän, ominaisuuksien, etenemistavan ja kytkeytymistavan perusteella. Sähkömagneettinen yhteensopivuus tarkoittaa järjestelmän tai laitteen kykyä toimia käyttöympäristössään huolimatta siinä esiintyvistä sähkömagneettisista häiriöistä ja häiritsemättä muita järjestelmiä tai laitteita. Kuvassa 21 on esitetty häiriöiden ryhmittelyperusteita. Tutkittavasta laitteesta voidaan mitata johtuvia ja säteileviä häiriöitä, jotka ovat korkeataajuisia RF-emissiota. Tutkittavaan laitteeseen taas kohdistuu säteilemällä radiohäiriöitä sekä magneettikenttiä vaikutuksesta erilaisia signaaleja. Johtuvia häiriöitä tulee sähkönsyötön johtimien lisäksi signaalikaapeloinnin välityksellä järjestelmässä olevista muista laitteista. Johtuvia häiriöitä ovat nopeat jännitemuutokset, pulssit, sähkönsyötön häiriöt ja muut johtuvat signaalit kuten esimerkiksi järjestelmän signalointi. (ABB 2000: 148.)



Kuva 21. Häiriöiden ryhmittelyperusteet (ABB 2000: 148).

Häiriö on ei-toivottua vuorovaikutusta laitteen ja sen ympäristön välillä tai laitteen omien osien kesken. Sähköisten häiriökysymysten tuntemus, ja elektronisten laitteiden sähkömagneettisen yhteensopivuusvaatimusten hallinta (EMC) ovat välttämättömiä taitoja nykyaikaisessa elektroniikkasuunnittelussa. Mittausjärjestelmiä suunniteltaessa sähköiset häiriöt ja niiden vaikutus mittausjärjestelmiin ovat keskeisiä tekijöitä. Laitteiston toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että EMC-yhteensopivuus on otettu huomioon jokaiselta mahdolliselta tarkastelusuunnalta.

4.2. Laajakaistainen ja kapeakaistainen häiriö

Häiriösignaalien luonne taajuusalueessa on eräs tapa luokitella sähkömagneettisia häiriöitä. Sähkömagneettiset häiriöt voidaan jakaa laajakaistaisiin ja kapeakaistaisiin häiriöihin. Laajakaistaisia häiriöitä on kolme eri alalajia:

- impulssiluontoiset, satunnaisesti toistuvat häiriöt (kytkimet),
- kohinaluonteiset häiriöt (keinotekoinen kohina) ja
- kohinapulssit (tyristorisäädin) tai jaksolliset impulssit (Fallström, Haapalinna, Häkkinen & Kärhä 1997: 5).

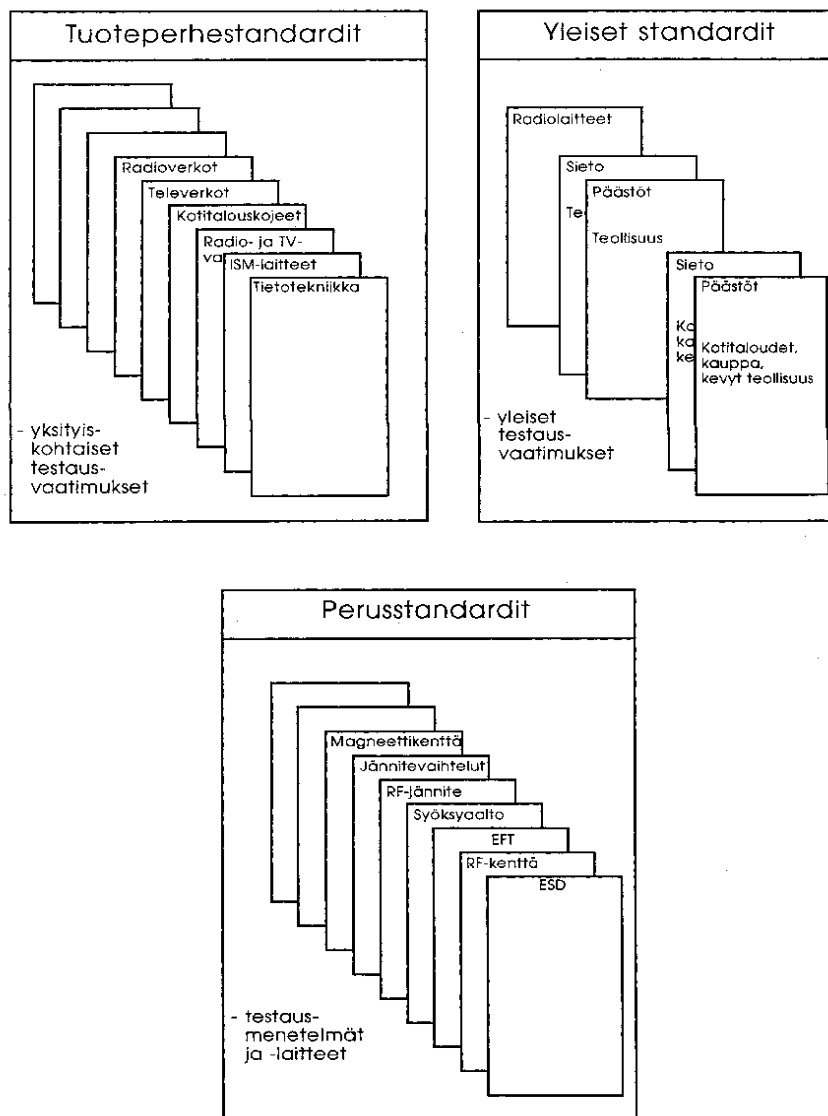
Laajakaistaisten häiriöiden tapauksessa häiriöspektri on tyypillisesti laskeva. Pienillä taajuuksilla häiriöamplitudi on verrannollinen $1/f$:ään tai $1/f^2$:een, lasku on jyrkempi suuremmilla taajuuksilla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että suurin osa häiriön energiasta on 1 MHz:n taajuuden alapuolella. (Fallström ym. 1997: 5.)

Kapeakaistaisessa häiriössä pääosa energiasta on siirtynyt verrattain kapealle alueelle suhteessa tutkittavaan taajuusalueeseen. Esimerkiksi radiolähettimet ja suurtaajuuskuumentimet kuuluvat tähän ryhmään, sillä ne säteilevät tiettyä taajuutta eli kantoaaltoa. Kentänvoimakkuudeltaan yhtä suurista kapeakaistaisista häiriöistä yleensä suurempitaajuiset kentät häiritsevät vähemmän käytännön instrumentointia. (Fallström ym. 1997: 5.)

4.3. EMC-standardit

Kansainvälinen sähköalan standardoimisjärjestö (International Electrotechnical Commission, IEC) on valtuutettu tuottamaan standardeja teollisuudelle, jotta ne voisivat sertifioida tuotteensa EMC direktiivin mukaiseksi. Kuvassa 22 on EMC-standardien luokittelu. Häiriösiedon osalta tavallisin yleisstandardi on EN 50082, joka viittaa säteilevän radiotaajuisen kentänsiedon osalta EN 61000-4-3 -perusstandardiin. EN 61000-sarjan standardit määrittävät mittausmenetelmät, mutta sovellettavat raja-arvot kerrotaan joko tuoteperehstandardeissa tai niiden puuttuessa esimerkiksi edellä mainitussa yleisstandardissa. Lisäksi laitteilta vaaditaan muun muassa johtuvan radiotaajuisen häiriön, ESD-purkausten (Electrostatic Discharge) ja jännitelähteen häiriöiden siedon vaatimuksia. EN 61000-4 -sarjan standardit ovat hyvä lähtökohta mille tahansa kuluttajien käyttämien laitteiden testaukselle. Esimerkiksi ETSI:n (European Telecommunications Standards Institute) tietoliikennelaitteiden standardit, mukaan lukien GSM- ja UMTS-standardit, viittaavat juuri näihin standardeihin. (Sähkötieto ry 1997: 21–24.)

EMC-standardien luokittelu



Kuva 22. EMC-standardien luokittelu (Lehtio 2007: 78).

4.4. Häiriöiden kytkeytyminen

Häiriöt syntyvät elektronisen laitteen tai jonkin järjestelmän ympäristössä. Laitteen valmistajalla ei ole aina mahdollisuutta ottaa huomioon laitteen tulevia ympäristöoloja. Häiriöasetelma voi olla hyvin mutkikas geometrialtaan, sillä laitteiden etäisyydet voivat muuttua eivätkä johtimissa kulkevat tehot ole vakiota. (Fallström ym. 1997: 7.)

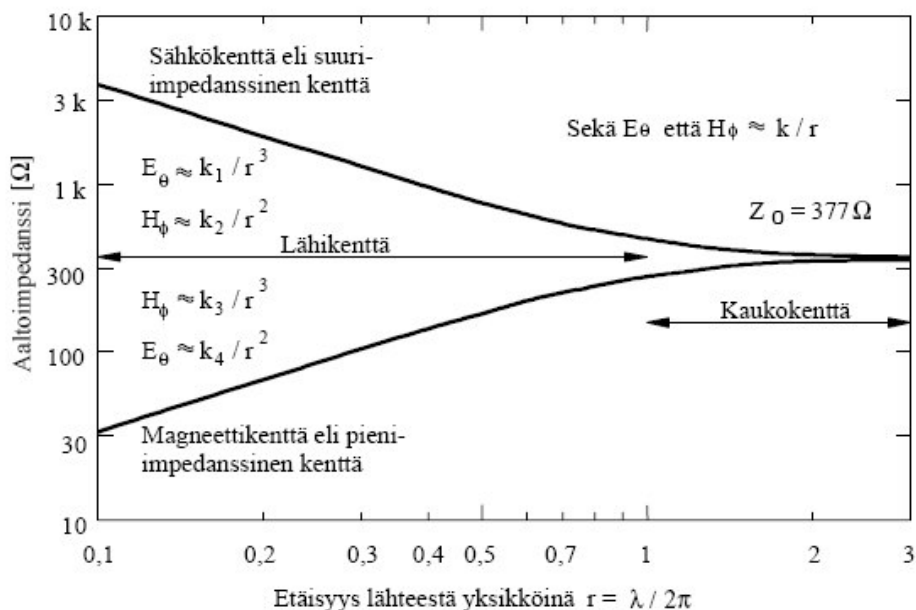
Häiriöiden kytkeytyminen tapahtuu pääasiassa sähköisesti kolmella eri tavalla:

- Sähköstaattisesti eli kapasitiivisesti, jolloin kytkeytyminen tapahtuu sähkökentän välityksellä pääasiassa suuri-impedanssisiin piireihin.
- Induktiivisesti eli magneettikentän välityksellä johdinsilmukoihin.
- Johtumalla galvaanisesti eli suoran sähköisen kontaktin kautta maajohtimissa ja piirien yhteisissä impedansseissa. (Fallström ym. 1997: 7.)

4.4.1. Sähkömagneettinen kytkeytyminen

ABB Oy:n TTT-käsikirjassa (2000) sivuilla 151–152 on kerrottu, että sähkömagneettinen kytkeytyminen on häiriöiden siirtymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä. Maxwellin yhtälöiden avulla voidaan ratkaista sähkömagneettisten aaltojen eteneminen piireihin ja kytkeytyminen johtoihin. Yhtälöt ovat ajan ja paikan funktioita ja yksinkertaisimmallekin ongelmalle ratkaisu on monesti hyvin monimutkainen. Häiriöanalyysissä käytetään menetelmiä, joissa kytkentöjen välisen keskinäiskapasitanssin ja keskinäisinduktanssin avulla selvitetään häiriöiden siirtyminen piiristä toiseen. Häiriölähteen ympäristö voidaan jakaa lähi- ja kaukokenttään. Lähikentässä sähkö- ja magneettikenttien suhde eli aaltoimpedanssi määräytyy lähteen ominaisuuksista. Pieni-impedanssisen silmukka-antennin virta on suuri. Antennin lähellä magneettikenttä on hallitseva ja aaltoimpedanssi on pieni $< 377 \Omega$. Suuri-impedanssisen dipoli-antennin lähellä sähkökenttä on hallitseva ja aaltoimpedanssi on suuri $> 377 \Omega$, koska virta on pieni. (ABB 2000: 151–152.)

Kuvassa 23 on hahmoteltuna etäisyydestä riippuvan aaltoimpedanssin muutoksia lähi- ja kaukokentässä. Kuvasta nähdään että kaukokentässä E/H on likimain 377Ω kummallekin lähteelle. Lähikentässä havaitaan että suuri-impedanssinen sauva-antenni synnyttää antennin lähelle kentän, jonka aaltoimpedanssi on myös hyvin suuri ($E/H > 377 \Omega$). Pieni-impedanssisen dipoli-antennin tapauksessa tilanne on täysin päinvastainen ($E/H < 377 \Omega$). (Fallström ym. 1997: 13.)



Kuva 23. Aaltoimpedanssin $Z=E/H$ riippuvuus lähteestä ja sen etäisyydestä kohteeseen (Fallström ym. 1997: 14).

4.4.2. Kapasitiivinen kytketyminen

Kapasitiivista kytketymistä tapahtuu piirien tai johdinten välillä, joilla on hajakapasitanssia. Tilanne on sama kuin kondensaattorilevyjen välissä. Kapasitiivista kytketymistä on käytännössä vaikea mallintaa, koska kytketyksen voimakkuus riippuu permittiivisyydestä, joka taas puolestaan riippuu taajuudesta. (Ott 1988: 30.)

Kuvassa 24 on esitetty kapasitiivinen kytketyminen kahden johtimen välillä. Johtimien välillä on kapasitanssia, jonka avulla häiriö siirtyy johtimesta toiseen. Piirissä ei kulje juurikaan virtaa, mutta siinä on sähkökenttä, jossa suurin osa energiasta sijaitsee varastoituneena. C_{12} on johtimien välinen hajakapasitanssi ja C_{1g} ja C_{2g} ovat hajakapasitanssit maatasoon. Johtimessa 2 esiintyvä häiriöjännite V_n on verrannollinen häiriösignaalin taajuuteen, häiritsevän johtimen jännitetasoon (V_1), häiriintyvän johtimen impedanssiin (R) ja johtimien väliseen hajakapasitanssiin. Häiriöjännite V_n johtimen 2 ja maan välillä on tällöin

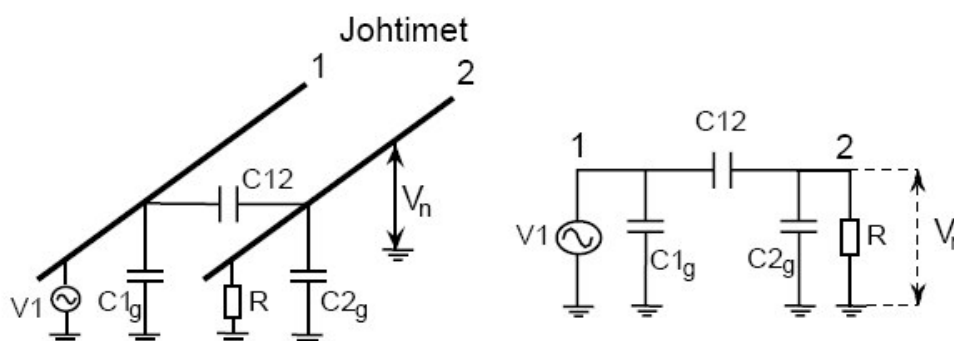
$$V_N = \frac{j\omega(C_{12} / (C_{12} + C_{2g}))}{j\omega + 1/R(C_{12} + C_{2g})} \cdot V_1. \quad (9)$$

Yhtälöstä ei kuitenkaan vielä ilmene kuinka kytkeytynyt jännite riippuu eri parametreista. Kun R on matalampi impedanssi kuin hajakapasitanssi C_{12} ja C_{2g} eli

$$R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2g})}, \quad (10)$$

ja yhtälö 9 voidaan yksinkertaistaa seuraavanlaiseksi (Ott 1988: 30.):

$$V_N = j\omega RC_{12} V_1. \quad (11)$$

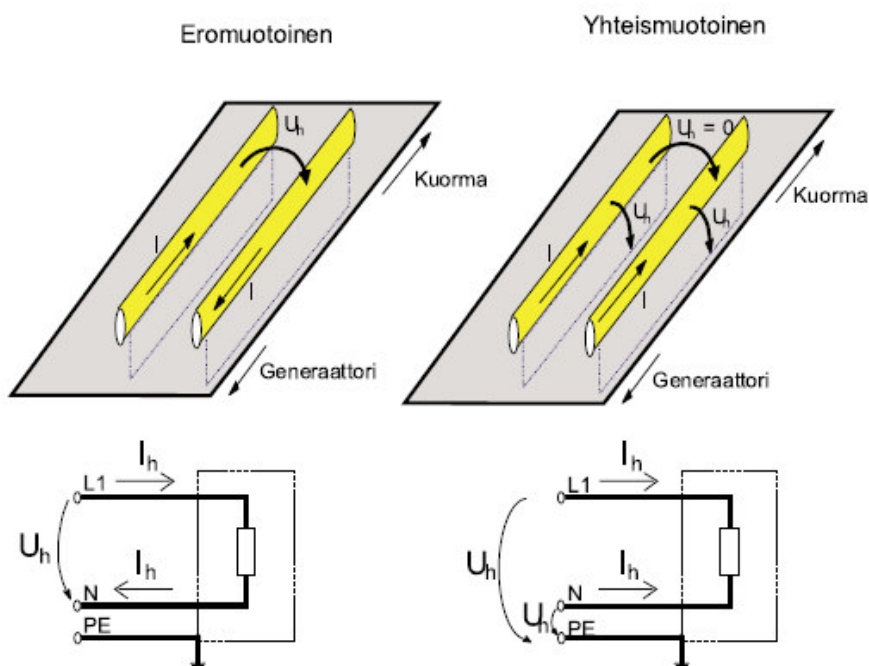


Kuva 24. Kapasitiivinen kytkeytyminen kahden johtimen välillä (ABB 2000: 150).

4.4.3. Kytkeytyminen johtumalla

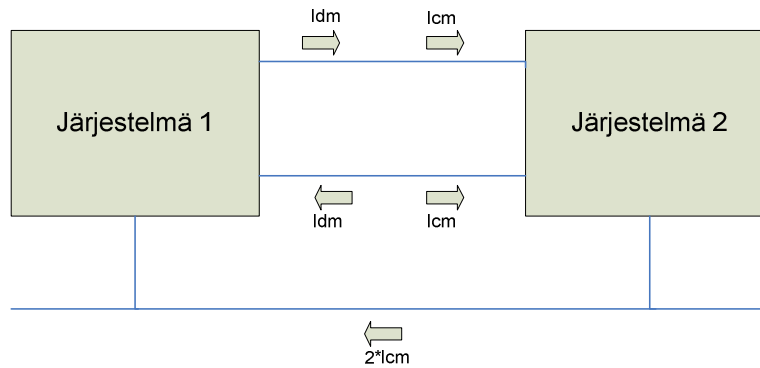
Kaapelit ovat suurin tarkoituksettomien häiriöiden kuljettaja sekä johtuvien että säteilevien häiriöiden tapauksessa. Yhteismuotoinen häiriövirta tarkoittaa häiriövirran kulkeamista samaan suuntaan kaikissa kaapelijohtimissa. Eromuotoinen häiriövirta syntyy, kun häiriövirrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin johtimissa kuten nähdään kuvasta 25. On huomattava, että osa yhteismuotoisesta häiriövirrasta palaa takaisin eri reittiä kuin tarkoitettua paluutietä. Paluuteinä voivat toimia toinen viereinen kaapeli, maataso tai jokin muu ennalta arvaamaton paluutie. Yhteismuotoista häiriövirtaa kutsutaan myös pitkittäiseksi häiriövirraksi. Eromuotoisen häiriövirran kulkiessa johtimessa vastakkaisuuriset, mutta voimakkuudeltaan yhtä suuret virrat kumoavat toistensa aiheuttamat

sähkömagneettiset kentät. Eromuotoinen virran kulkeminen on normaali toimintaperiaate teho- ja signaalijohtimissa. (Montrose & Nakauchi 2004: 159.)



Kuva 25. Eromuotoinen ja yhteismuotoinen etenemismuoto (ABB 2000: 149).

Kuvassa 26 havainnollistetaan yhteismuotoisen ja eromuotoisen eli pitkittäisen ja poikittaisen häiriövirran eroa keskenään. Molemmat voivat esiintyä johtimissa yhtä aikaa riippumatta siitä ovatko virrat teho- tai signaalimuotoista. Yhteismuotoisen ja eromuotoisen virran luonteen erilaisuuksien avulla päästään selville, millaisia häiriötorjuntakeinoja on käytettävissä. Eromuotoinen virta edellyttää, että johtimet on kytketty samaan lähteeseen, kun taas yhteismuotoinen virta on kytkeytynyt johtimeen esimerkiksi säteilyn, ylikuulumisen, yhteisen maaimpedanssin tai epätasapainon kautta. Kytkeytymismuodot voidaan määrittää kokeilemalla virta-anturin avulla, josta kerrotaan jäljempänä lisää. (Montrose ym. 2004: 160.)



Kuva 26. Yhteismuotoinen ja eromuotoinen häiriövirta järjestelmässä.

4.4.4. Induktiivinen kytkeytyminen

Kun virta I kulkee piirissä se muodostaa magneettivuon Φ , joka on verrannollinen virtaan. Verrannollisuusvakiota kutsutaan induktanssiksi L , joten voidaan kirjoittaa

$$\Phi = LI . \quad (12)$$

Induktanssin arvo riippuu piirin geometriasta ja kentän väliaineen magneettisista ominaisuuksista. Kahden johtimen välille virran kulkemisen johdosta kytkeytyvää induktanssia kutsutaan keskinäisinduktanssiksi M_{12} , joka kuvataan kahden johtimen välillä seuraavasti

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_1} \quad (13)$$

missä symboli Φ_{12} on johtimen 1 virran I_1 aiheuttaman magneettivuon suuruus johtimessa 2. Indusoitunut jännite V_n johtimen sisäisellä alueella saadaan laskettua Faradayn lain avulla, ja se on

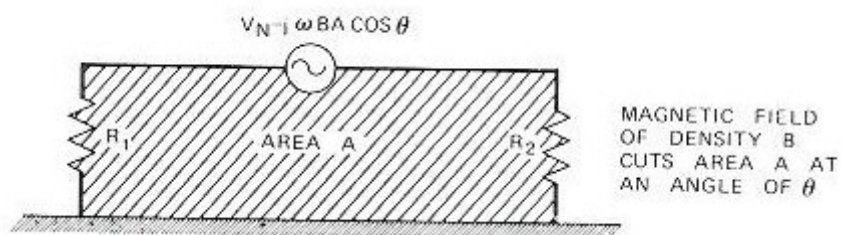
$$V_N = -\frac{\partial}{\partial t} \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}, \quad (14)$$

jossa \bar{B} ja \bar{A} ovat vektoreita. Jos suljettu silmukka on pysyvässä tilassa, ja vuon tiheys vaihtelee ajan mukaan, yhtälö 14 muuttuu muotoon

$$V_N = j\omega B A \cos\theta, \quad (15)$$

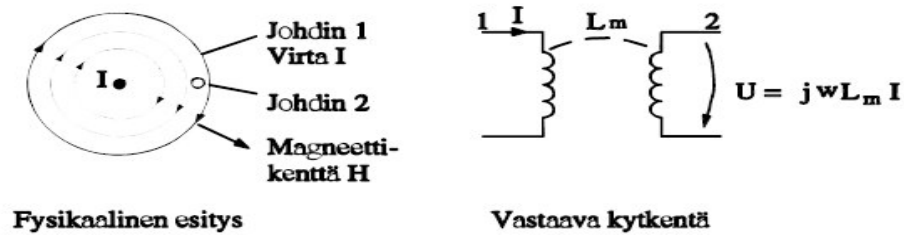
missä A on suljetun alueen pinta-ala, B on tehollisarvo sinimuotoisesti värähtelevän magneettivuon tiheydestä taajuudella ω rad/s ja V_N on indusoituneen jännitteen tehollisarvo. Keskinäisinduktanssi saadaan yhdistämällä yhtälöt 13 ja 14, kun $B A \cos\theta$ on kokonaismagneettivuo Φ_{12} vastaanottopiirissä. Tällöin saadaan seuraava yhtälö (Ott 1988: 38.):

$$V_N = j\omega M I_1 = M \frac{\partial i_1}{\partial t}. \quad (16)$$



Kuva 27. Indusoitunut häiriö riippuu pinta-alasta (Ott 1988: 38).

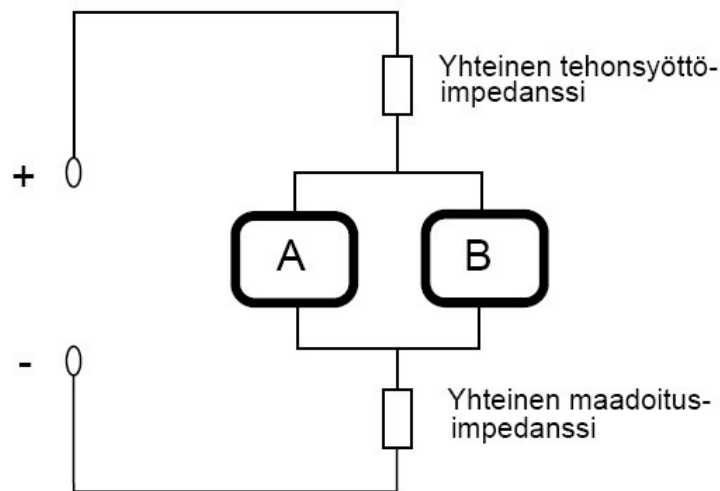
Yhtälöt 15 ja 16 ovat perusyhtälöt kuvattaessa kahden piirin välille muodostuvaa induktiivista kytkeytymistä. Kuvasta 28 nähdään kyseinen induktiivinen kytkeytyminen, joka saatiin kaavan 16 avulla. I on häiritsevän johtimen virta ja L_m kuvaa kahden johtimen välillä olevan materiaalin geometrisia ja magneettisia ominaisuuksia. Kytkeytyminen on verrannollinen taajuuteen, koska yhtälöissä on mukana kulmataajuus ω . (Ott 1988: 37–38.)



Kuva 28. Häiriön välittyminen magneettikentän avulla johtimesta toiseen (Tuomisto 2007: 9).

4.4.5. Yhteisen impedanssin kautta kytketyminen

Kun häiritsevällä ja häiriintyvällä virtapiirillä on yhteinen virran kulkutie, on kyseessä kytketyminen yhteisen impedanssin välityksellä (common impedance coupling). Kuvassa 29 nähdään miten yhteinen impedanssi löytyy useasti joko yhteisestä maadoituksesta tai tehonsyötöstä. Häiritsevässä virtapiirissä tapahtuvat muutokset aiheuttavat häiriövirran häiriintyvässä piirissä. (ABB 2000: 151.)



Kuva 29. Häiritsevän ja häiriintyvän virtapiirin yhteiset impedanssit (ABB 2000: 151).

4.4.6. Muita häiriöiden kytkeytymistapoja

Galvaanista kytkeytymistä tapahtuu kahden erilaista materiaalia olevan metallin välillä, kun niitä käytetään matalatasoisissa signaalivirtapiireissä. Kahden metallin väliin muodostuu vesikkeno kosteuden tai vesihöyryn vaikutuksesta. Mitä kauempana metallit ovat tasolla toisistaan, sitä suurempi jännite indusoituu niiden välille. Potentiaaliero ei kuitenkaan muodostu kahdesta samasta materiaalista olevien metallien välille. (Ott 1988: 23–24.)

Erilaisia materiaaleja käytettäessä esille tulee myös korroosio-ongelma, jossa galvaaninen korroosio aiheuttaa positiivisten ionien siirtymistä metallista toiseen. Tämä aiheuttaa vähitellen anodimateriaalin tuhoutumisen. Korroosion voimakkuus riippuu ympäristön kosteudesta ja materiaalien galvaanisesta etäisyydestä. (Ott 1988: 24.)

Elektrolyyttinen kytkeytyminen on myös eräänlainen korroosiosta johtuva häiriöiden kytkeytymistapa. Sen aiheuttaa tasavirran kulkeminen kahden metallin välillä, joita yhdistää jokin elektrolyytti. Tämän tyyppinen korroosio ei riipu käytetyistä metalleista vaan virran voimakkuudesta ja elektrolyytin johtavuudesta. (Ott 1988: 25.)

Triboelektrinen vaikutus syntyy, kun dielektrinen materiaali eristeaineessa ei pysty olemaan yhteydessä kaapelin johtimiin, jolloin varaus pääsee syntymään näiden välille. Se syntyy tavallisesti kaapelin mekaanisen taivutuksen yhteydessä. Varaus toimii kaapelissa kuten häiriölähde. Vähentämällä teräviä taivutuksia ja kaapelin liikettä pystytään pienentämään triboelektristä vaikutusta piiriin. (Ott 1988: 25.)

Teholähteiden ja muiden suuria virtoja sisältävien johtojen läheisyydessä esiintyy yleensä aina hajamagneettivuota melkeinpä missä tahansa ympäristössä. Johtimen liikkuessa magneettikentän läpi johdon päihin indusoituu jännite. Jos matalatasoinen signaali kulkee tällaisen kentän läpi, siihen indusoituu häiriöjännite. Ongelma on erityisen suuri ympäristöissä, joissa on kentänvoimakkuudeltaan suuria signaaleja tärisevän johtimen läheisyydessä. (Ott 1988: 26.)

4.5. Sähköverkon sähkön laatu

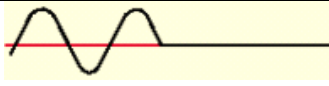
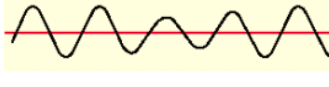
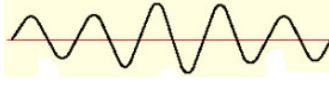
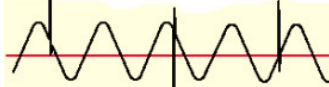
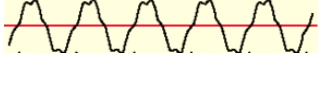
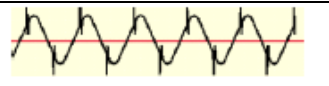
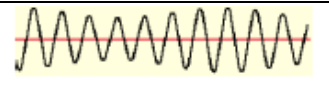
Jännitteen laatu koostuu seuraavista tekijöistä:

- taajuus
- jännitetason vaihtelut
- nopeat jännitteenmuutokset
- harmoniset ylijännitteet
- epäharmoniset yliaaltojännitteet
- epäsymmetria
- signaalijännitteet
- jännitekuopat
- käyttötaajuiset ylijännitteet
- transienttiylijännitteet (Sähkötieto ry 1997: 97).

Mittausteknisesti ja laskennallisesti parhaiten hoidetut suureet ovat taajuus ja jännitetason vaihtelut. Tilastollisia arvoja, joiden rajoissa pyritään toimimaan, ovat harmoniset yliaallot, epäsymmetria ja nopeat jännitteenmuutokset. Näitä arvoja ja niiden sisällä pysymistä ei kuitenkaan voida kovin helposti taata, sillä ilmiöt aiheutuvat pääasiassa sähkökäyttäjien häiriöpäästöistä. (Sähkötieto ry 1997: 97.)

SFS-EN (2008a) -standardi 50160 määrittelee ja kuvaa jakelujännitteen ominaisuuksia ja laatuvaatimuksia. Standardi määrittelee aihepiiriin liittyvät käsitteet ja asettaa vaatimuksia sekä tavoitearvoja jakelujännitteen ominaisuuksille pien- ja keskijänniteverkoissa. Taulukossa 1 on koottu sähkönjakelun laatuun ja luotettavuuteen liittyvät keskeisimmät ongelmat ja niiden syyt.

Taulukko 1. Sähkönjakelun laadun ja luotettavuuden keskeisimmät ongelmat ja niiden syyt (Alanen & Hätönen 2006: 11–12).

Häiriötyyppi	Kuvaus	Mahdolliset syyt
Sähkön jakelun katkos (< 1 min)		Huoltotoimet, linjaviat, onnettomuudet, sää, tuuli, salamet ja jää
Pitkäaikainen ylijännite		Pieni kuormitus, huono säätö
Hetkelliset katkokset		Katkaisijoiden laukeaminen, vian selvitystilanne, syötön vaihto
Pitkäaikainen alijännite		Raskas kuorma, voimakkaat kuormitushuiput, ei loistehon säätöä, huono tehokerroin
Jännitekuopat		Suurien kuormien kytkentä, hetkelliset viat, katkaisijoiden toiminta, induktiiviset kuormat
Hetkelliset ylijännitteet		Piirin kapasitanssi, suurten kuormien poiskytkentä, vaihevika
Transienttijännitteet		Valaistus, kapasitiivinen kytkentä, virtasuojan laukeaminen, epälineaariset kuormat, häiriöt
Harmoniset virran yliaallot		Epälineaariset komponentit, korkeataajuiset kytkennät, TV, tietokoneet, valaistus, huono tehokerroin, laitteiden aiheuttama signaalihäiriö
Jaksolliset häiriöt (t < 0,5 sykliä)		Tehoelektroniikkalaitteet
Välkyntä		Eritaajuiden jännitteen vaihtelu, valaistus, loistehon vaihtelu
Jännite-epätasapaino		Epätasainen kuormitus, kompensointikondesaattorit, moottorit

4.5.1. Taajuus

Jännitteen taajuuden hetkellisarvon sinimuotoisen vaihtelun tulisi olla nimellistaajuuden sisällä. Nimellistaajuus on pohjoismaisessa yhteiskäyttöverkossa 50 Hz. Suomessa taajuus vaihtelee käytännössä alle $\pm 0,1$ Hz, mikä ei vielä aiheuta sähkökäytölle haittaa. Mahdollisia suurempia häiriöitä aiheuttaa esimerkiksi jonkun suuren tuotantolaitoksen tai merkittävän siirtoyhteyden vikatilanteet. (Sähkötieto ry 1997: 97.)

4.5.2. Jännitetason vaihtelut

Sähkönjakelun luonteesta johtuen jännite ei voi olla kaikilla sähkökäyttäjillä sama. Asiakkaan jännite määritellään sähköaseman jännitteen ja verkossa tapahtuvan jännitteenaleneman erotuksena. Jännitteenalenema riippuu monesta eri suureesta kuten esimerkiksi siirtotien mitoituksesta, kuormituksen suuruudesta ja johtojen pituudesta. Asiakkaalle pyritään syöttämään nimellisjännitteen suuruista jännitettä sähköaseman jännitettä säätämällä. (Sähkötieto ry 1997: 98.)

Sähkökäyttäjillä jännitetason vaihtelu näkyy siten, että mitattaessa jännitteen arvoa, sillä ei ole yhtä ainoaa arvoa vaan se on jatkuvasti vaihteleva suure. Tarkastelupisteen jännitteenjakautuma lähenee normaalijakaumaa, kun samanlaisia ja satunnaisia asiakkaita on paljon, eikä jännitettä säädetä. Jännitetason vaihteluilla tarkoitetaan jännitteen tehollisarvon muutoksia, joita ei voida havaita esimerkiksi valaistuksessa. (Sähkötieto ry 1997: 98.)

SFS-EN (2008a) -standardin 50160 mukaan jännitetason vaihteluita mitataan (liittämiskohdassa 10 minuutin jaksoissa tehollisarvojen keskiarvoja) viikon mittausjaksolla, jolloin 95 % arvoista tulee olla välillä $U_n \pm 10 \% U_n$.

4.5.3. Nopeat jännitteenmuutokset

Nopeita jännitteenmuutoksia aiheuttavat yksittäisten kuormien kytkennät, kuormitusvirran nopeat muutokset, moottorien käynnistykset ja verkon kytkennät. Ne voivat esiintyä joko jaksollisesti, kuten esimerkiksi koneen tai työprosessin määräämällä taajuudella, tai sitten jaksottomasti eli satunnaisesti esiintyvänä. Sähköverkossa tapahtuvan muutok-

sen suuruuden määrää verkon ja kuormituksen impedanssien suuruus sekä vaihekulma. Muutokset ovat kestoltaan yhden jakson (20 ms) pituudesta aina muutamaan sekuntiin. Nopeat jännitteenmuutokset voivat aiheuttaa sähkölaitteille toimintahäiriöitä. Pitkäaikaisen häiritsevyyssindeksin P_{It} tulee olla standardin SFS-EN 50160 mukaan alle yhden 95 % ajasta, kun mittausaika on yksi viikko. (Sähkötieto ry 1997: 99.)

4.5.4. Jännitepiikit

Transienttiylijännitteet syntyvät kytkentätapahtumista ja ilmastollisista sähköpurkauksista ja ovat kestoltaan huomattavasti jaksonpituutta (20 ms) lyhyempiä. Tämän tyyppiset häiriöt aiheutuvat pienjänniteverkossa tavallisesti erilaisten sähkölaitteiden kytkin-toiminnoista, kontaktoreiden avautumisista ja sulakkeiden palamisista. Transientit on mitattava lähellä kulutus pistettä, sillä ne vaimenevat nopeasti edetessään verkossa. Transienttiylijännitteiden ratkaisevana tekijänä ovat ylijännitteen amplitudi ja nousu-aika. (Sähkötieto ry 1997: 100.)

Käyttötaajuiset ylijännitteet esiintyvät asiakkaan tai jakeluverkon asennuksissa olevan vian aikana tai kytkentätoimenpiteen seurauksena. Kolmivaihejärjestelmän nollapisteen siirtymän vuoksi ylijännite voi nousta jopa vaiheiden välisen jännitteen suuruiseksi. (Sähkötieto ry 1997: 100.)

4.5.5. Yliaallot

Yliaalloja syntyy laitteissa, jotka eivät käytä koko perustaajuista virta-aaltoa. Kuormien synnyttämät virran yliaallot aiheuttavat verkon jännitteeseen yliaalloja, ja leviävät verkkoja myöten muille laitteille ja sähkönkäyttäjille (Sähkötieto ry 1997: 100). Yliaalloja on olemassa sekä harmonisia että epäharmonisia. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kerrannaisia, ja ne summautuvat verkkotaajuuden päälle aiheuttaen ylimääräisiä häviöitä laitteissa. Yliaalloja aiheuttavia laitteita ovat esimerkiksi tasasuuntaajat, taajuusmuuttajat, tyristoriohjatut kuormat, syklokonvertterit, UPS-laitteet, valokaariuunit, muuntajat, sähkösuodattimet, purkaus- ja loistelamput sekä ATK-laitteet. Yliaallot ovat kasvava ongelma tehoelektronikan komponenttien kasvun myötä. (Alanen & Hätönen 2006: 16.)

Yliaaltovirrat varaavat verkon kapasiteettia, aiheuttavat ylimääräistä lämpenemistä verkossa ja laitteissa sekä mahdollisesti ylikuormittamista ja toimintahäiriöitä. Perustana määritettäessä laitteiden häiriönsieto- ja häiriönpäästömittauksia käytetään jakeluverkolle määriteltyjen yliaaltojen yhteensopivuustasoja (taulukko 2). Virran yliaaltojen suuruuteen voidaan vaikuttaa laitteiden rakenteen valinnalla. (Sähkötieto ry 1997: 101.)

Taulukko 2. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittymiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina nimellisjännitteestä (Alanen ym. 2006: 17).

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset		järjestysluku n	suhteellinen jännite
järjestysluku n	suhteellinen jännite	järjestysluku n	suhteellinen jännite		
5	6 %	3	5 %	2	2 %
7	5 %	9	1,5 %	4	1 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6–24	0,5 %
13	3 %	21	0,5 %		
17	2 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

4.5.6. Epäsymmetria

Kuormien epätasainen jakautuminen vaiheiden kesken aiheuttaa epäsymmetriaa eri vaiheiden välillä (Sähkötieto ry 1997: 101). Standardin SFS-EN 50160 mukaan 95 % jake-lujännitteen vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvosta tulee olla alle 2 % myötä-komponentista. Jännitteen epäsymmetria määritellään seuraavasti (Alanen ym. 2006: 19.):

$$u_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (17)$$

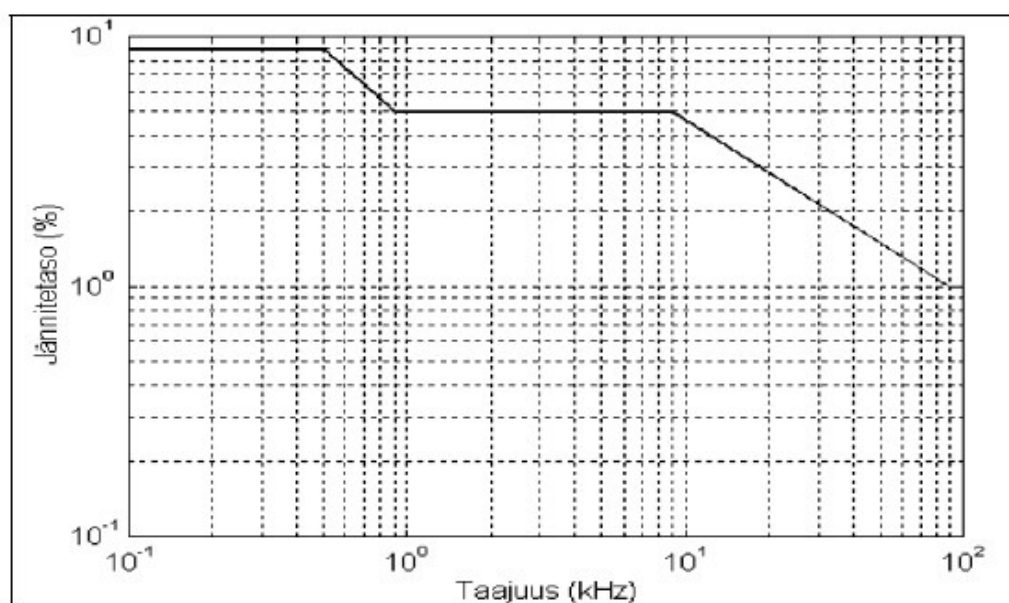
missä

$$\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2},$$

u_{nsh} on näytteistä laskettu 10 minuutin arvo, u_n on epäsymmetria, β on jännitekerroin, U_{12} = jännite vaiheiden L1 ja L2 välillä, U_{23} on jännite vaiheiden L2 ja L3 välillä ja U_{31} on jännite vaiheiden L3 ja L1 välillä.

4.5.7. Signaalijännitteet

Pienjänniteverkossa siirretään signaaleja mm. erilaisten verkon komponenttien ohjaukseen sekä kytkentätilanteiden ja tariffien ohjaukseen. Standardi SFS-EN 50160 määrittelee signaalijännitteiden kolmen sekunnin raja-arvot. Kuvassa 30 on signaalijännitteiden sallitut maksimiarvot prosentteina nimellisjännitteestä. Signaalijännitteiden taajuus on yleensä alle 1 kHz ja jännite nimellisjännitteeseen nähden pieni. Signaalijännitteiden sallittu jännitetaso on standardin mukaan kuvan 22 käyrän mukainen. (Alanen ym. 2006: 15.)



Kuva 30. Signaalijännitteiden sallitut maksimiarvot prosentteina nimellisjännitteestä (SFS-EN 2008a).

4.5.8. Jännitekuopat

Oikosulut ja eristysviat voivat aiheuttaa jännitekuoppia kaikilla jännitetasoilla. Ympäristön verkon jännite alenee hetkellisesti ennen kuin viallisen johdon suojaus erottaa

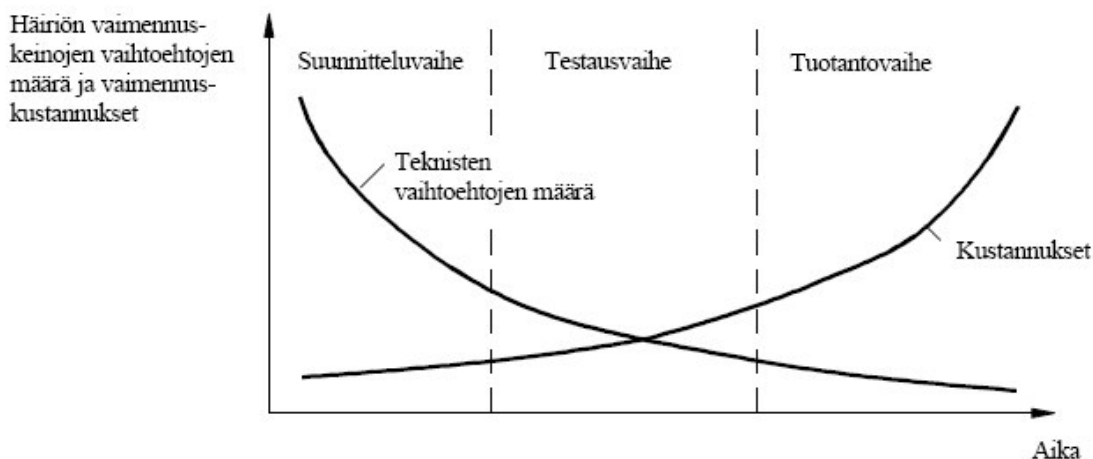
vikapaikan verkosta. Muuntajien kytkeminen voi aiheuttaa useita kymmeniä millisekun- teja kestävästä kuopasta, jonka suuruus voi olla jopa 40 %. Kondensaattorien kytkeminen verkkoon voi aiheuttaa 95 %:n suuruisen jännitekuopasta. Riittävän suurina ja pitkäaikai- sina jännitekuopasta aiheuttavat toimintahäiriöitä laitteissa, jotka vaativat jatkuvan jännit- teen. (Sähkötieto ry 1997: 102.)

Standardissa SFS-EN 50160 ei anneta jännitekuoppien määrälle tarkkoja raja-arvoja vaan ainoastaan indikatiivisia arvoja. Tämän mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa jännitekuoppien odotettavissa oleva määrä vuoden aikana voi olla muutamista kymme- nistä tuhanteen. Valtaosa jännitekuopasta on kestoaltaan alle 1 sekuntia, ja niiden suuruus on alle 60 %. Suurempia ja pidempiä jännitekuoppia voi kuitenkin silloin tällöin esiin- tyä. Joillakin alueilla jännitekuoppia, jotka ovat suuruudeltaan 10–15 % nimellisjännit- teestä voi asiakkaan asennuksissa tapahtuvien kytkentöjen johdosta esiintyä hyvinkin usein. (Sähkötieto ry 1997: 102.)

5. HÄIRIÖIDEN TORJUNTAMENETELMIÄ

Edellisen kappaleen perusteella tiedetään häiriöiden kytkeytymis- ja säteilemistävät sekä niiden aiheuttajat. Tässä kappaleessa käydään läpi häiriöiden tarkastelun perusteella niiden torjuntamenetelmiä. Kappaleen menetelmät ovat ensisijaisesti valittu testausjärjestelmän rakennetta ajatellen, jolloin suurimmat vaatimukset kohdistuvat johdotuksiin, koteloiteihin ja maadoitukseen.

Häiriöiden torjunta on tärkeä osa tuotteen elinkaarta, ja se olisikin aloitettava mahdollisimman varhaisessa vaiheessa. Toisinaan kuitenkin joudutaan syventymään häiriölähteisiin ja niiden vaikutuksiin kyseessä olevassa järjestelmässä. Alla olevassa kuvassa 31 on esitetty kustannusten kasvaminen tuotteen kehityksen edetessä ja häiriöntorjuntakeinojen vähentyessä. (Fallström ym. 1997: 20.)



Kuva 31. Tuotteen kehityksen edistyminen ja häiriövaimennusten lukumäärän vaikutus kustannuksiin ja niiden nousuun (Fallström ym. 1997: 20).

Tässä luvussa käsitellään merkittävimpiä testauslaitteiston häiriöiden torjuntaan liittyviä menetelmiä. Sähkömagneettisten häiriöiden täydelliseen torjuntaan kuuluu myös useita muita menetelmiä. Luvussa käydään läpi pääasiassa kaapelointia, maadoittamista, kotelointia ja passiivisia komponentteja sähkömagneettisten häiriöiden torjunnassa.

5.1. Kaapelointi

Kaapelointi on olennainen osa järjestelmää, sillä kaapelit ovat järjestelmän pisimmät osat ja toimivat kuten antennit poimien haitallisia häiriösignaaleja. Kun kaapelit ovat lyhyitä verrattuna aallonpituuteen, kytkeytyminen kahden piirin johteiden välillä voidaan esittää kapasitanssin ja induktanssin avulla. On olemassa kolme erilaista kytkeytymistapaa. Ensimmäinen on kapasitiivinen tai elektroninen kytkeytyminen, joka johtuu kahden piirin välisestä vuorovaikutuksesta sähkökentän välityksellä. Toinen tapa on induktiivinen eli magneettinen kytkeytyminen, joka johtuu kahden piirin välisen magneettikentän vuorovaikutuksesta. Kolmas tapa on näiden kahden tavan yhdistelmä, jota kutsutaan usein sähkömagneettiseksi kytkeytymiseksi tai säteilyksi. Lähikentässä sähkö- ja magneettikenttiä käsitellään erikseen, kun taas sähkömagneettista kytkeytymistä käsitellään kaukokentissä. (Ott 1988: 29; Mardiguian 1999: 225–226.)

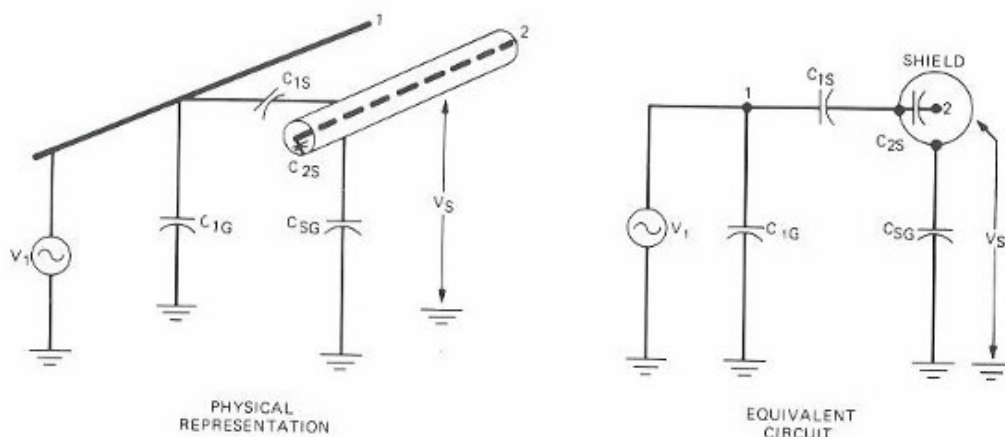
5.1.1. Suojauksen vaikutus kapasitiiviseen kytkeytymiseen

Ensimmäisenä käsitellään tapaus, jossa vastaanottavalla johtimella (johdin 2) on ääretön resistanssi maata vasten. Suojauksen asettaminen johtimen kaksi ympärille kuvan 32 mukaisesti aiheuttaa suojaukseen seuraavan jännitteen

$$V_S = \left(\frac{C_{1S}}{C_{1S} + C_{SG}} \right) \cdot V_1. \quad (18)$$

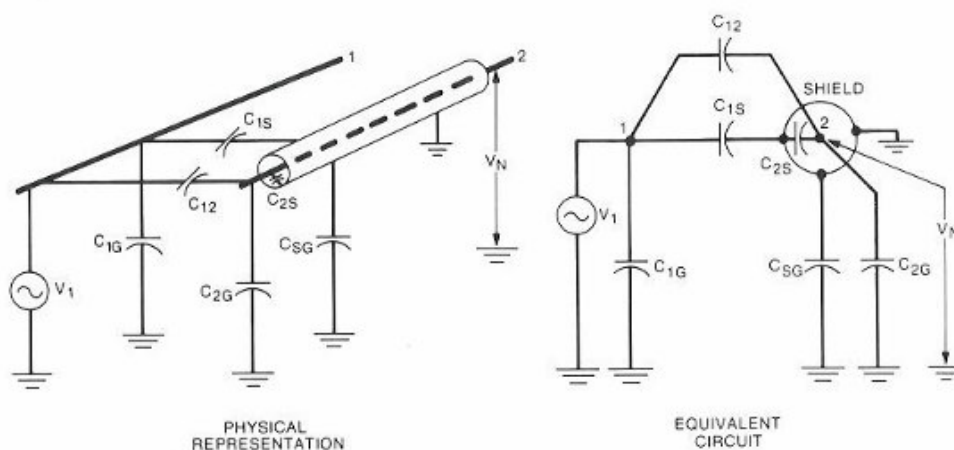
Kun C_{2S} :n välillä ei ole virrankulkua, niin jännite joka kytkeytyy johtimeen kaksi on (Ott 1988: 34–35.)

$$V_N = V_S. \quad (19)$$



Kuva 32. Kapasitiivinen kytkeytyminen suojavaipalla suojattuun johtimeen (Ott 1988: 34).

Jos suojavaippa maadoitetaan, niin jännite $V_S = 0$ ja häiriöjännite johtimessa kaksi on myös pudonnut nolnaan. Tilanne on kuitenkin ideaalinen, koska virtajohdin ei ylitä suojavaippaa lainkaan. Käytännössä virtajohdin kuitenkin ylittää suojavaipan ja tilanteesta tulee kuvan 33 mukainen.



Kuva 33. Kapasitiivinen kytkeytyminen, kun johtimen pituus ylittää toisesta päästä maadoitetun suojavaipan pituuden (Ott 1988: 36).

Kuvassa 33 C_{12} on kapasitanssi johtimen 1 ja suojatun johdon 2 välillä ja C_{2G} on kapasitanssi johtimen 2 ja maatasen välillä. Molemmat näistä kapasitansseista ilmenevät,

koska johtimen 2 päät ylittävät suojavaipan reunan. Vaikka suojavaippa on maadoitettu, kytkeytyy johtimeen 2 häiriöjännite, jonka suuruus on

$$V_N = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G} + C_{2S}} \cdot V_1. \quad (\text{Ott 1988: 35}). \quad (20)$$

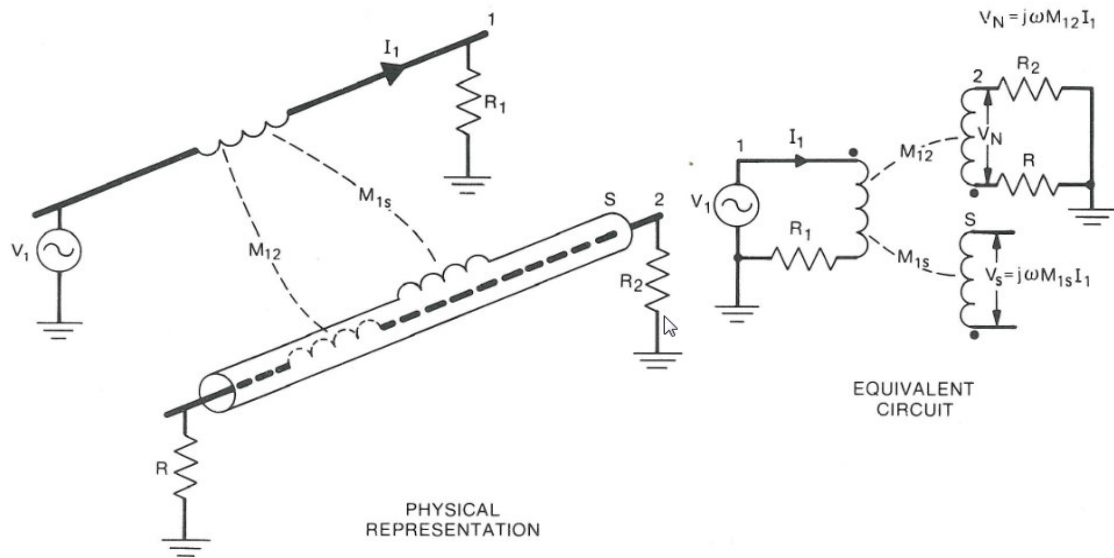
Hyvin onnistuneen sähkökentän suojauksen toteuttamiseksi on välttämätöntä, ettei virtajohtimen ylitä suojavaipan reunoja liian paljon, ja että suojavaippa maadoitetaan kunnolla. Yksi maadoituspiste riittää, kun kaapelin pituus ei ole yli 1/20 aallonpituudesta. Pidemmillä kaapeleilla tarvitaan useampia maadoituspisteitä. (Ott 1988: 35.)

5.1.2. Suojauksen vaikutus induktiiviseen kytkeytymiseen

Jos asetetaan maadoittamaton ja ei-magneettinen suoja johtimen 2 ympärille, niin piiristä tulee kuvan 40 mukainen. M_{1S} on johtimen 1 ja maan välinen keskinäisinduktanssi. Kun suojavaipalla ei ole vaikutusta väliaineen geometriaan tai magneettisiin ominaisuuksiin johtimien 1 ja 2 välillä, niin sillä ei ole vaikutusta johtimeen 2 indusoituneeseen jännitteeseen. Virran kulkemisesta johtimessa 2 johtuen suojavaippaan indusoituu jännite

$$V_S = j\omega M_{1S} I_1. \quad (21)$$

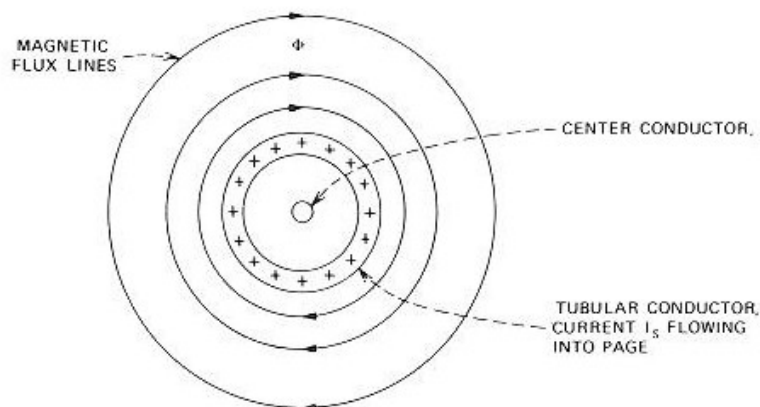
Maadoitusta ei vaikuta tehdä pelkästään toisesta päästä, koska sillä ei ole vaikutusta magneettisesti kytkeytyvän jännitteen pienentämiseen. Keskinäisinduktanssista M_{1S} johtuen suojavaippaan indusoituu jännite, joka aiheuttaa virran kulun suojavaipassa (kuva 34). Ennen kuin päästään laskemaan kyseinen jännite, täytyy määritellä kytkeytyminen johtimen keskustan ja suojavaipan välillä. Tästä syystä on laskettava magneettinen kytkeytyminen tyhjän johtavan suojavaipan ympärillä ja sen sisälle laitetun johtimen välillä. (Ott 1988: 42.)



Kuva 34. Magneettinen kytkeytyminen, kun suoja on häiriösäteilyä vastaanottavan johtimen ympärillä (Ott 1988: 43).

Kun virtaa kuljettava johdin laitetaan koaksiaalikaapelin muotoisen johtimen sisään, mikä näkyy kuvassa 35, johtimeen kohdistuva magneettivuo Φ virrasta I_s johtuen ympäröi sen sisältä kokonaan. Tällöin suojavaipan induktanssi on

$$L_s = \frac{\Phi}{I_s}. \quad (22)$$



Kuva 35. Kuvassa on esitetty virran kulkeminen suojatussa koaksiaalikaapelissa (Ott 1988: 44).

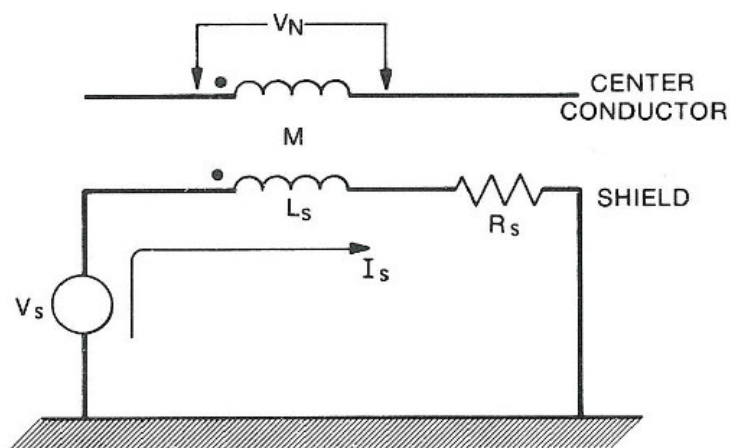
Keskinäisinduktanssi suojavaipan ja sisemmän johtimen välillä on

$$M = \frac{\Phi}{I_s}, \quad (23)$$

josta havaitaan, että yhtälöt 23 ja 24 ovat samoja. Tällöin keskinäisinduktanssi suojavaipan ja johtimen keskustan välillä on yhtä suuri kuin suojavaipan oma induktanssi. (Ott 1988: 45.)

$$M = L_s. \quad (24)$$

Johtimen sisälle indusoitunut jännite V_N , joka johtuu virrasta I_s , voidaan nyt laskea. Oletetaan, että suojavaippaan indusoitunut jännite on kytkeytynyt jostain muusta piiristä. Kuvasta 36 nähdään piirin rakenne, jossa L_s ja R_s ovat suojavaipan resistanssi ja induktanssi. (Ott 1988: 45.)



Kuva 36. Suojatun johtimen ekvivalenttipiiri (Ott 1988: 45).

Jännite V_N on

$$V_N = j\omega M I_s. \quad (25)$$

Virra I_s saadaan laskettua

$$I_s = \frac{V_s}{L_s} \left(\frac{1}{j\omega + \frac{R_s}{L_s}} \right). \quad (26)$$

joten

$$V_N = \left(\frac{j\omega M V_s}{L_s} \right) \left(\frac{1}{j\omega + \frac{R_s}{L_s}} \right). \quad (27)$$

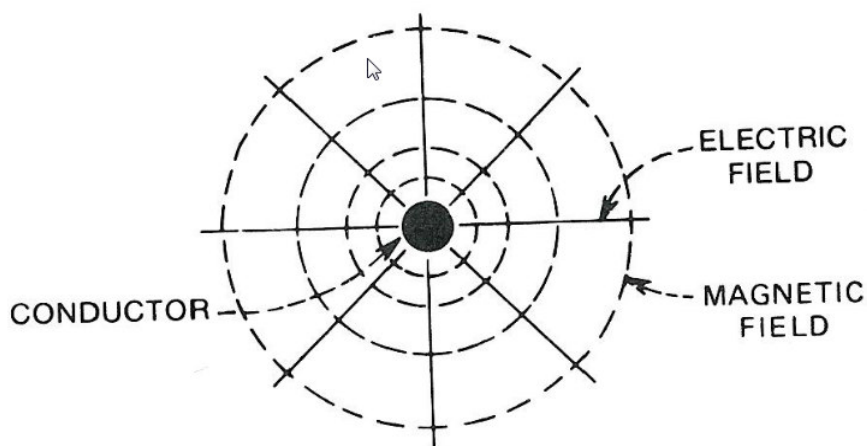
Kun $L_s = M$ saadaan (Ott 1988: 46.):

$$V_N = \left(\frac{j\omega}{j\omega + \frac{R_s}{L_s}} \right) \cdot V_s. \quad (28)$$

Näin on saatu laskettua johtimen sisälle indusoitunut jännite. Jännitteen suuruus riippuu siitä miten hyvin kytketyminen tapahtuu keskinäisinduktanssin vaikutuksella.

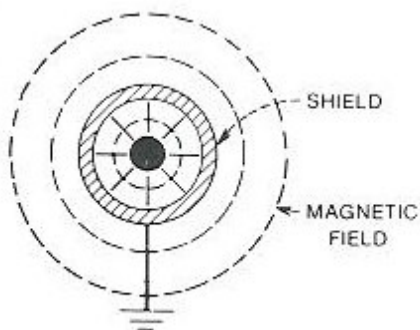
5.1.3. Suojausmenetelmät magneettista säteilyä vastaan

Sähkömagneettisen häiriösäteilyn ehkäisemiseksi on lähde suojattava siihen kohdistuvilta häiriöpäästöiltä. Kuvassa 37 näkyy sähkö- ja magneettikenttä virtajohtimen ympärillä vapaassa tilassa.



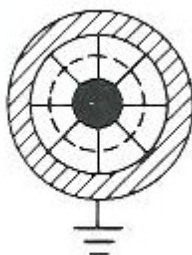
Kuva 37. Kentät virtaa kuljettavan johtimen ympärillä (Ott 1988: 50).

Jos suojavaippa maadoitetaan yhdestä pisteestä ja sijoitetaan johtimen ympärille, niin sähkökentän säteily pystytään estämään, mutta tällä on vain pieni merkitys magneettikentän voimakkuuteen (kuva 38).



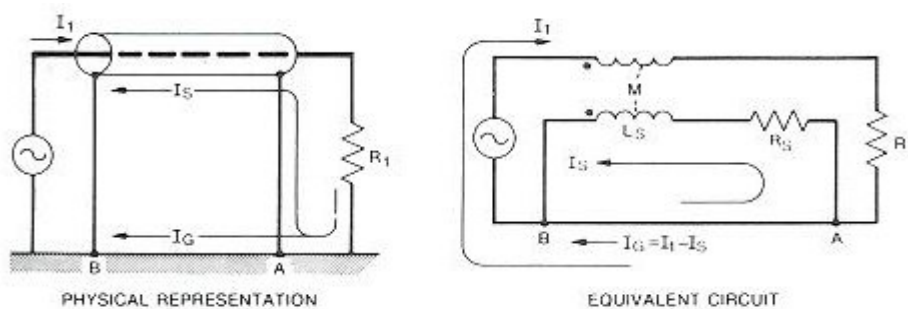
Kuva 38. Yhdestä pisteestä maadoitetun suojavaipan kentät johtimen ympärillä esitettynä (Ott 1988: 51).

Jos suojavaipan virta on samansuuruinen mutta vastakkaismerkkinen verrattuna johtimessa kulkevaan virtaan, niin tällöin suojavaippa muodostaa samansuuruisen mutta vastakkaismerkkisen magneettikentän (kuva 39). (Ott 1988: 50.)



Kuva 39. Maadoitettu suojavaippa, jossa kulkee samansuuruinen mutta vastakkaismerkkinen virta kuin johtimessa (Ott 1988: 51).

Kuvassa 40 nähdään piiri, joka on maadoitettu molemmista päistä ja kuljettaa virran I_1 . Magneettikentän säteilyn estämiseksi johdotuksesta suojavaippa täytyy maadoittaa molemmista päistään, ja paluuvirran I_S suunta on oltava A:sta B:hen suojavaipassa maatason I_G sijasta. (Ott 1988: 50.)



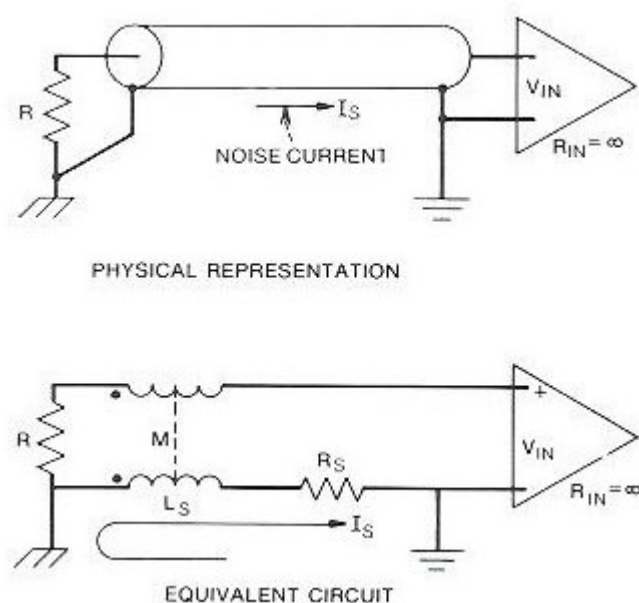
Kuva 40. Virran jakautuminen suojavaipan ja maatasen välillä (Ott 1988: 51).

Kun halutaan estää häiriösäteily magneettikentän välityksellä johtimesta, on johdin suojattava suojavaipalla ja maadoitettava molemmista päistä. Tällöin saadaan hyvä magneettinen suojaus suojavaipan rajataajuuden yläpuolisille taajuuksille. Tämä suojaus perustuukin enemmän suojavaippaan indusoituvaan magneettikenttään, joka on vastakkaisuuntainen johtimessa kulkevan virran kanssa kuin suojavaipan magneettisiin ominaisuuksiin. (Ott 1988: 52.)

5.1.4. Vastaanottopiirin suojaus magneettisia häiriöitä vastaan

Paras keino suojaukselle magneettikenttiä vastaan on silmukan pinta-alan pienentäminen. Vastaanottopiirissä kulkevan virran muodostama kokonaispinta-ala on kiinnostava magneettisia häiriöitä vastaan suojautuessa. Merkittävä tutkimuksen kohde on virran paluureitti tehollähteeseen. Usein virta palaa eri reittiä takaisin kuin suunnittelija on alun perin halunnut, tällöin tullaan tilanteeseen missä pinta-ala muuttuu. Sijoittamalla ei-magneettinen suoja virtajohtimeen saadaan virralle paluureitti ja pinta-ala pienemmäksi, jolloin magneettikentän suojaus saadaan toteutettua vaikuttamatta varsinaisen suojavaipan magneettisiin ominaisuuksiin. (Ott 1988: 54.)

Vaikka piiri olisi maadoitettu molemmista päistä, ainoastaan rajoitettu magneettinen suojaus on mahdollista, koska maasilmuksaan indusoituu suuri häiriövirta. Kuvassa 41 nähdään kuinka virran kulkeminen signaalijohtimessa aiheuttaa häiriöjännitteen suojavaippaan.



Kuva 41. Häiriövirran vaikutus koaksiaalikaapelin suojavaipassa (Ott 1988: 54).

5.2. Kaapelityypit

5.2.1. Parikaapelit

Symmetrisessä kaapelissa signaalipiirin molemmat johtimet ovat samassa asemassa ympäristöön nähden. Teoriassa päästään sähköisesti häiriöttömään tilanteeseen, jos myös kaapeliin liitettävät laitteet täyttävät tämän saman symmetrisyysehdon. Koskaan ei kuitenkaan saavuteta täydellistä symmetriaa sekä kaapeleissa että laitteissa. (Lehtio 2007: 92.)

Kierrettyä parikaapelia käytettäessä taajuusalue rajoittuu normaalisti alle 100 kHz:iin. Parikaapeli tarjoaa erinomaisen suojauksen pienillä taajuuksilla induktiivista kytkeytymistä vastaan. Johdinsilmukoiden muodostamat pinta-alat ovat pienet ja niihin induoituneet häiriöjännitteet kumoutuvat vastakkaisvaiheisina viereisen silmukan kanssa. Suojaus ei kuitenkaan toimi kapasitiivista kytkeytymistä vastaan. Lisäämällä yhdestä pisteestä maadoitettu johtava vaippa parikaapelin ympärille saadaan muodostettua suojaus kapasitiivista kytkeytymistä vastaan. (ABB 2000: 181.)

Symmetrisiä kaapeleita käytetään instrumentoinnissa, äänentoistojärjestelmissä ja datasiirrossa. Käytetyt nopeudet datasiirrossa ovat muutamia Mbit/s. Kaapelit on suojattava parisuojilla tai ainakin yhteisellä suojalla ja niiden on oltava symmetrisiä, kun halutaan toimia suuremmilla taajuuksilla. Häiriö voi kytkeytyä joko kaapelin ulkopuolelta tai saman kaapelin toisesta parista symmetrisissä kaapeleissa. Suojaus kapasitiivisia häiriöitä vastaan on helpompaa kuin suojaus induktiivisia häiriöitä vastaan. Taulukkoon 3 on koottu erilaisten häiriötyyppien torjuntamenetelmiä. (Lehtio 2007: 92.)

Taulukko 3. Erilaiset häiriötyypit kaapeleissa (Lehtio 2007: 92.)

	Kapasitiivinen häiriö	Induktiivinen häiriö
Sisäinen häiriö (ylikuuluminen)	hyvä säännöllinen parikierto, suojattu pari	hyvä parikierto, lyhyt nousu
Ulkoisen häiriö	hyvä parikierto, suojattu pari, suojattu ydin	hyvä parikierto, ferromagneettinen suoja

Armeeraus kuuluu myös olennaisena osana vaipparakenteeseen. Menetelmällä parannetaan tarvittaessa suojausta induktiivisesti tai kapasitiivisesti kytkeytyvää häiriötä vastaan. Armeeraus toteutetaan sovelluksista ja kaapelityypeistä riippuen teräsnauhoilla, teräslangoilla tai teräslankapalmikolla. Yleensä armeerauksen päällä sijaitsee vielä toinen muovivaippa. Induktiivista häiriötä vastaan saadaan teräsnauha-armeerauksella noin 120 dB:n lisäsuojaus. Lisäksi hyvällä parikierrolla saadaan noin 40 dB:n suojaus induktiivisia häiriötä vastaan. Taulukkoon 4 on koottu erilaisten kaapelirakenteiden vaikutuksia ylikuulumisvaimennukseen. (Lehtio 2007: 93.)

Taulukko 4. Kaapelirakenne ja vaimennusominaisuudet.

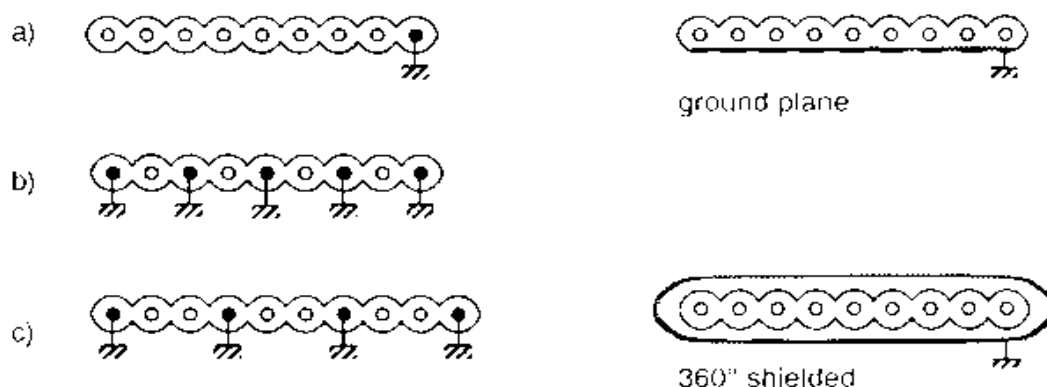
Kaapelirakenne	Ylikuulumisvaimennus
Suojaamaton rakenne (MMS)	>60 dB
Sähköisellä suojalla varustettu	>85dB
Rakenne (MHS) Ferromagneettisella suojalla varustettu rakenne	>139dB

5.2.2. Nauhakaapelit

Nauhakaapelin herkkyys häiriöille riippuu signaalivirran paluun toteutuksesta. Minimijohdinratkaisu on, että kaapeli sisältää yhden paluujohdinten (signaalimaa) ja useita signaalijohtimia. Kaikille signaaleille yhteinen maadoitusimpedanssi voi aiheuttaa ongelmia kaapelin käytössä. Tämä taas aiheuttaa häiriökytkeytymistä eri signaalipiirien välillä. Häiriöjännite kytkeytyy induktiivisesti, mikä on helppoa isojen johdinsilmukoiden ansioista, kun käytetään vain yhtä maata. Kapasitiivisesti kytkeytyvät häiriöt lisääntyvät myös eri johdinten välillä, kun käytetään vain yhtä signaalimaata. (Lehtio 2007: 96.)

Lisättäessä signaalimajohtimien määrää johdinsilmukat pienenevät ja samoin hajakapasitanssit johdinten välillä pienenevät. Samassa kaapelissa olevien eri signaalien määrä kuitenkin pienenee tällöin. Yhteisen impedanssin kautta kytkeytyvät häiriöt saadaan kumottua kokonaan käyttämällä jokaisella signaalilla omaa paluujohdinta. Paras nauha-

kaapeliratkaisu sisältää yhtenäisen maatason, joka toimii samalla signaalien paluutienä. Ratkaisun impedanssi on pieni, ja vaihtoehtoisena ratkaisuna voidaan käyttää yhtenäistä 360° suojavaippaa, joka toimii myös signaalin paluujohtimena. Kaiken kaikkiaan nauhakaapeleilla saatava suojausvaimennus on luokkaa 10–25 dB. Nauhakaapeliratkaisut ovat teknistaloudellisesti ajateltuna edullisia, joten monimutkaisemmat rakenteet ja johdinmäärän lisääminen lisäävät melkoisesti pelkästään kustannuksia verrattuna saatavaan vaimennukseen. Kuvassa 42 on erilaisia nauhakaapeliratkaisuja tiedonsiirtoon. (Lehtio 2007: 96; Williams 1998: 214.)



Kuva 42. Erilaisia nauhakaapeliratkaisuja (Williams 1998: 214).

5.2.3. Koaksiaalikaapelit

Koaksiaalikaapeleita käytetään eniten suuryhteisantenni- ja kaapeliteleviioverkoissa. Tietotekniikassa niitä käytetään nopean datan siirtoon, suurtaajuuskaapelointiin, instrumentointiin ja mittalaitteisiin. Koaksiaalikaapelin avulla piirin signaloinnissa voidaan käyttää korkeampia taajuuksia, kuten 1 GHz:stä jopa 3 GHz:iin. (Lehtio 2007: 95.)

Signaalipiiri muodostuu koaksiaalikaapeleissa sisäjohtimesta ja lieriömäisestä ulkojohtimesta, joka sijaitsee sisäjohtimen ympärillä. Rakenne on sähköisesti epäsymmetrinen, ja johtimen välissä on eriste. Taulukossa 5 on erilaisia koaksiaalikaapeliratkaisuja ja niiden ominaisuuksia. Käyttötilanteessa ulkojohdin kytketään yleensä maan potentiaaliin. Koaksiaalikaapelin rakenteen suurimpina etuina on, että se on tietyillä rakenteilla ja suurilla taajuuksilla käytännössä immuuni ulkopuolisille häiriöille. Koaksiaalikaapeleita

käytettäessä on huomioitavaa, että myös kaikki järjestelmän liitännät ovat koaksiaalisia (360° liitos, BNC-, F- tai N-liitin). Häiriösuojaus huononee varsinkin suurilla taajuuksilla (yli 10 MHz), jos koaksiaalisuus rikotaan jossain välissä. (Lehtio 2007: 95.)

Taulukko 5. Koaksiaalikaapeleiden rakenteet ja ominaisuudet.

Rakenne	Kytkeäimpedanssi mΩ/m	Suojausvaimennus dB
Yksi palmikko	80	50
Kaksoispalmikko	5	80
Palmikon ja folion yhdistelmä	0,5	100
Magneettisuoja	9,3	>100

Monikerrosrakenteen käyttäminen kaapelissa parantaa suojausta. Tällöin ulompi vaippa maadoitetaan vain toisesta päästä ja sisempi molemmista päistä. Tällä tavoin ulompaan vaippaan mahdollisesti kytkeytyvä häiriöjännite ei ole osa virtapiiriä, ja signaalin paluutie on häiriövapaa. Punoksen tiivyyteen on tärkeä kiinnittää huomiota, jos koaksiaalisuus kaapelissa toteutetaan pelkällä metallipunoksella, koska suuremmilla taajuuksilla punos vuotaa. Umpinaiseen vaippaan verrattuna punospäällysteiset kaapelit antavat induktiivisen vaimennuksen suhteen 20–30 dB huonomman suojausvaimennuksen.

5.3. Maadoitukset

Maadoitukset ovat yksi tärkeimmistä häiriöntorjuntakeinoista. Oikeanlainen maadoitus- ja kaapelointien käyttäminen yhdessä on ratkaisu moneen häiriöongelmaan. Maadoitukset jaetaan kahteen kategoriaan, jotka ovat suojamaadoitus ja signaalimaadoitus. Jos maadoitus kytketään maatasoon pienen impedanssin kautta, kutsutaan sitä maatasoon maadoitetuksi järjestelmäksi. Suojamaadoitukset ovat yleensä maapotentiaalissa. Signaalimaadoitukset puolestaan voivat olla joko maapotentiaalissa tai jossain muussa potentiaalissa kuten esimerkiksi signaalijännitteen referenssimaassa. Monissa tapauksissa

häiriöongelma saadaan torjuttua, kun kytketään suojamaadoitus pisteeseen, joka ei sovellu signaalimaaksi. (Ott 1988: 73.)

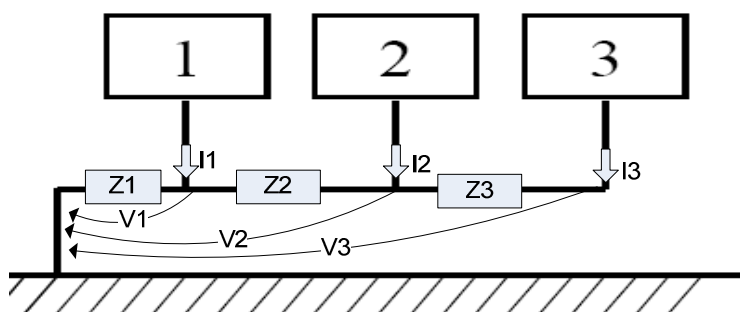
5.3.1. Suojamaadoitukset

Vaihtojännitelinjan kytkeytyessä laitteen koteloon, muodostuu hengenvaarallinen tilanne laitteen käyttäjälle. Suojamaadoituksen tarkoitus on suojata henkilöitä tai omaisuutta sekä;

- rajoittaa vikatapauksessa esiintyvää kosketusjännitettä,
- estää vaarallisen jännitteen siirtyminen toiseen järjestelmään (esim. kaapeloinnin välityksellä),
- estää vaarallisten vuotovirtojen, kipinöiden ja valokaaren syntyä ja
- luoda edellytykset maasulku- ja kosketusjännitesuojauksen toiminnalle.

5.3.2. Sarjamaadoitus

Kuvassa 43 on esitetty sarjamaadoituksen periaate, jossa erilaiset piirit on maadoitettu yhteiseen sarjamaadoitusjohtoon.



Kuva 43. Sarjamaadoitus.

Kuvan 43 mukaisesti häiriöjännitteet voidaan laskea seuraavasti:

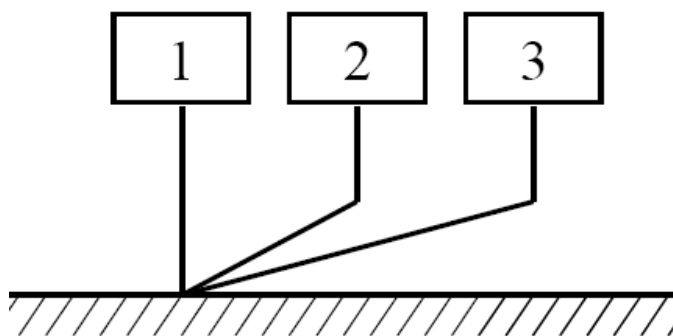
$$\begin{aligned} V_1 &= Z_1 * (I_1 + I_2 + I_3) \\ V_2 &= Z_1 * (I_1 + I_2 + I_3) + Z_2 * (I_2 + I_3) \end{aligned} \quad (29)$$

Sarjamaadoituksen impedanssit Z_1 , Z_2 ja Z_3 kuvaavat maadoitusjohtimien impedansseja. Johtimessa kulkeva virta aiheuttaa jännitehäviöitä. Häiriöjännite vaikuttaa kaikkien piirien toimintaan kuten yhteisen impedanssin kautta kytkeytyvät häiriötkin. Yhteismuotoisia häiriöitä synnyttävät yhteisten sarjaimpedanssien kautta kulkevat virrat. (Lehtio 2007: 58.)

Käytännössä yksipistemaadoitus on käyttökelpoinen alle 1 MHz taajuuksilla. Suurilla taajuuksilla hajakapasitanssi johtimen ja laitteen rungon tai maadoitusjohtimen välillä muodostaa yhteyden myös maahan. Maajohtimen pituus on myös huomioitava ja pidettävä lyhyenä käytettäessä yksipistemaadoitusta. Yksipistemaadoituksen käyttökelpoisuutta pienentää mahdollinen maadoitusjohtimen katkeaminen. Tällöin mahdollisesti useat virtapiirit menettävät galvaanisen yhteyden maahan ja niiden toiminta lakkaa. (Lehtio 2007: 58.)

5.3.3. Rinnakkaismaadoitus

Kuvassa 44 on esitetty rinnakkaismaadoituksen periaate, jossa erilaiset piirit on maadoitettu osastoimalla jokainen omaan rinnakkaismaadoitusjohtoon. Järjestelmän osastointi pystytään toteuttamaan rinnakkaismaadoituksella häiritsevien virtojen hallitsemiseksi. Tämä tarkoittaa eri järjestelmien maadoittamista omilla maadoituksillaan. Laitteen maadoituksia ajateltaessa siinä tulisi olla signaalimaa, häiriöllisten komponenttien maa ja laitteen rakenteen maa. Rinnakkaismaadoitusta käytettäessä on pyrittävä käyttämään mahdollisimman lyhyitä maadoitusjohtimia. (Lehtio 2007: 58.)



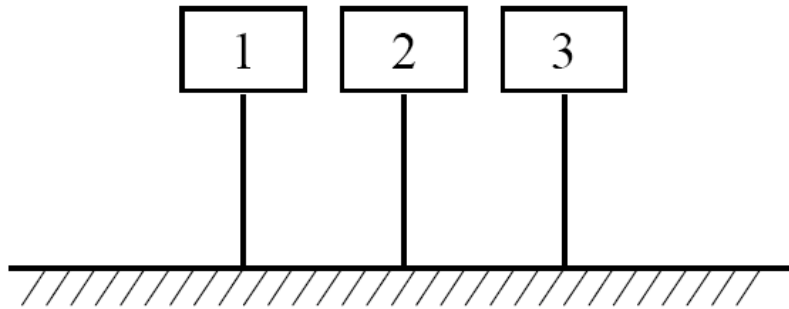
Kuva 44. Rinnakkaismaadoituksen toteuttaminen.

Signaalimaalla maadoitetaan häiriöille herkät virtapiirit, kuten esimerkiksi erilaiset digitaaliset virtapiirit. Runsaasti häiriöitä tuottavat komponentit kuten moottorit ja releet maadoitetaan häiriöllisten komponenttien maalla. Laitteen rakenteelle on luotava oma maajärjestelmänsä, joka on tehtävä siten, että rakenteesta ei luoda sähköstaattiselle purkaukselle kulkutietä sähkökomponentteihin. (Lehtio 2007: 58.)

Johdotukset vievät yleensä enemmän tilaa käytettäessä rinnakkaismaadoitusta kuin käytettäessä sarjamaadoitusta. Suuremmilla taajuuksilla esiintyy helposti rinnakkaisten johdinvetojen välillä kapasitiivista tai induktiivista häiriökytketymistä, jolloin saattaa esiintyä myös ongelmia. Lisäksi ongelmaksi saattaa muodostua se, että kun maajohtimen pituus lähestyy aallonpituuden neljäsosaa alkaa johto toimia antennina ja esiintyy häiriösäteilyä. Antennivaikutus heikkenee merkittävästi, kun johtimen pituus on alle $1/8$ signaalin aallonpituudesta. Turvallinen johtimen pituus on alle $1/20$ mahdollisen häiriösignaalin aallonpituudesta. On huomattava, että esimerkiksi 450 MHz:n taajuudella johdon pituuden raja-arvo on vain 3,33 cm. (Lehtio 2007:59.)

5.3.4. Monipistemaadoitus

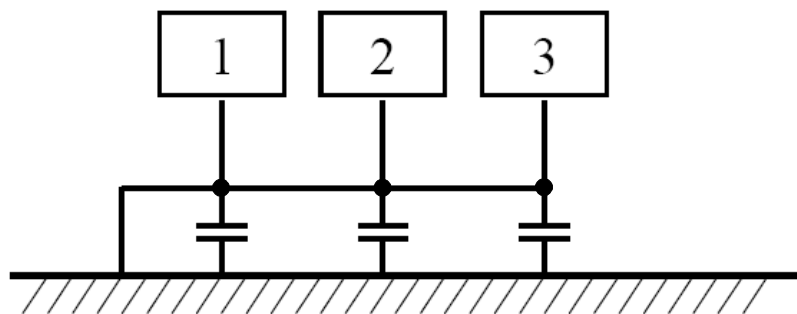
Perusehtona voidaan pitää, että yli 1 MHz taajuuksilla voidaan käyttää ja yli 10 MHz taajuuksilla on käytettävä monipistemaadoitusta. Menetelmän avulla voidaan välttää monia ongelmia, joita esiintyy yksipistemaadoituksen tapauksessa. Maadoitus määritetään yhdessä potentiaalissa olevana pisteenä tai tasona, joka on samalla referenssipiste virtapiirille. Yleisempi ja kuvaavampi määrittäminen signaalimaalle on pieni-impedanssinen virran paluutie virtalähteeseen. Virrasta johtuen monipistemaadoituksen eri maadoituspisteet eivät ole useissa tapauksissa samassa potentiaalissa. Kuvassa 45 on esitetty monipistemaadoituksen toteuttaminen eri maadoituspisteillä. (Lehtio 2007: 59.)



Kuva 45. Monipistemaadoituksen toteuttaminen.

5.3.5. Hybridimaadoitus

Yksipistemaadoitusta käytetään pääsääntöisesti taajuusalueella 1–10 MHz. Kun taajuus vaihtelee, on hybridimaadoituksen käyttäminen kuitenkin edullisempaa. KytKentä toimii pienellä taajuudella sarjakytkennän tavoin, mutta taajuuden kasvaessa kondensaattorien muodostama reaktanssi pienenee, minkä vuoksi kytkentä toimii tämän jälkeen monipistemaadoituksen tavoin (kuva 46). (Lehtio 2007: 59.)



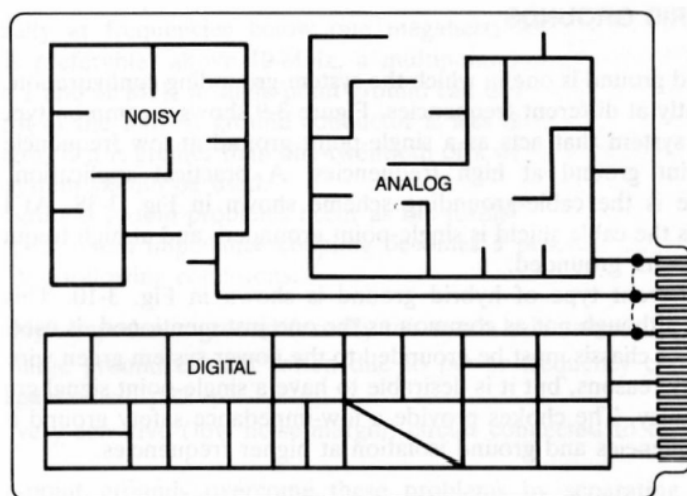
Kuva 46. Hybridimaadoitus.

5.3.6. Yhdistelmämaadoitus

Usein laite sisältää erityyppisiä toimilaitteita, jotka kannattaa maadoittaa tilanteeseen sopivalla parhaalla mahdollisella tavalla. Laitteen erilliset maa-alueet yhdistetään yhden pisteen kautta todelliseen maahan, joka on koteloon liitetty suojamaajohdin PE. Piirile-

vyn alueella, joka on häiriöllinen ja sisältää muun muassa vahvistimia ja releitä, voidaan käyttää yksinkertaista sarja/rinnakkaismaadoitusta. Pienillä taajuuksilla analogiatekniikka sisältävä piirilevyn osa ei ole myös kovin herkkä häiriintymään, joten siellä voidaan käyttää sarja- tai rinnakkaismaadoitustekniikkaa. Digitaalipiirit maadoitetaan tiheäsilmaisella maadoitusverkolla tai yhtenäisen maatasen avulla. Tällä tavoin maaverkoon indusoituvat häiriöjännitteet ja verkon induktanssi jäävät mahdollisimman pieniksi. Kukin erillinen maa-alue yhdistetään yhteiseen maapisteeseen, josta kotelorungon kautta on yhteys verkon todelliseen maahan. (Lehtio 2007: 60.)

Kuvassa 47 on esimerkki yhdistelmämaadoituksesta piirilevyllä. Siitä näkyy myös miten digitaalipiirien maadoitus ja tehonsyöttö on toteutettu. Nopeiden digitaalipiirien maadoituksessa tulisi välttää pitkiä maajohtimia. Kuvan noisy-alueen maadoitus on hyvä esimerkki tästä.

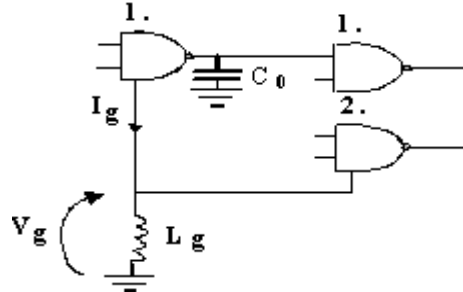


Kuva 47. Yhdistelmämaadoitus piirilevyllä (Lehtio 2007: 60).

5.3.7. Maadoituksen induktanssin aiheuttamat ongelmat

Digitaalipiireissä maadoitusten hyvyys riippuu suurimmaksi osaksi induktanssista. Muiden piirien toimintaan vaikuttava häiriöjännite syntyy helposti pulssien suuresta muutosnopeudesta johtuen maadoitusjohtimen induktanssissa. Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, jossa piirin tila muuttuu nopeasti nolnaan. Tällöin hajakapasitansseihin kerty-

nyt sähkövaraus purkautuu nopeana virtapulsseina maahan ja aiheuttaa induktanssissa jännitehäviön. Alla oleva kytkentä toimii esimerkkinä (kuva 48). (Lehtio 2007: 61.)



Kuva 48. Ongelmallinen piiri (Lehtio 2007: 61).

Hetkellä t_0 ulostulo vaihtuu nolaksi. Hajakapasitanssien C_0 varaus purkautuu maahan virtana I_q .

$$I_g = C_0 \frac{\partial V_1}{\partial t} \quad (30)$$

Pulssimainen virta synnyttää induktanssissa L_q jännitehäviön V_q , joka lasketaan seuraavalla tavalla

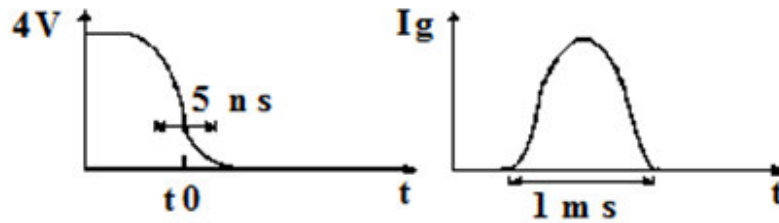
$$V_g = L_g \frac{\partial I_g}{\partial t}. \quad (31)$$

Muiden piirien toiminnassa saattaa seurata virhe, koska maatasen potentiaali muuttuu V_q :n verran. Alla on laskettu kuvan 49 kaltaisesti syntyvä häiriöjännite esimerkkiarvoilla. (Lehtio 2007: 61.) Kun hajakapasitanssi $C_0 = 10$ pF, maadoitusjohtimen induktanssi $L_q = 100$ mH ja pulssin muutosnopeus 5 ns saadaan virraksi

$$I_g = 10 \text{ pF} \times \frac{4V}{5 \text{ ns}} = 8 \text{ mA} \quad (32)$$

ja jännitteeksi

$$V_g = 100 \text{ mH} \times \frac{8 \text{ mA}}{1 \text{ ms}} = 800 \text{ mV}. \quad (33)$$

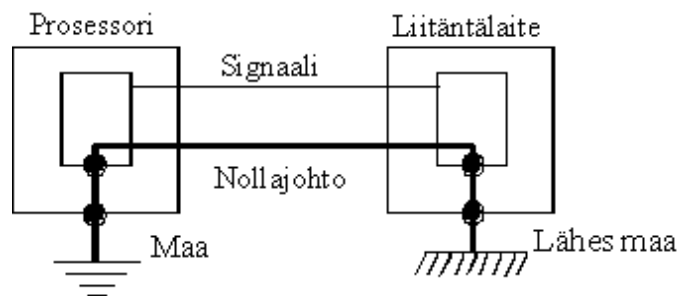


Kuva 49. Kuvaaja laskuesimerkkistä häiriöjännitteen laskemiseksi (Lehtio 2007: 61).

Yleensä induktanssia johtimissa voidaan pienentää, kun johdinpituutta pienennetään. Jos johdin veto saadaan sijoitettua hyvin lähelle maatasoa, niin induktanssi pienenee.

5.3.8. Harhailevat maavirrat

Yksi monipistemaadoitukseen liittyvistä ongelmista on se, että eri maadoituspisteiden käyttö synnyttää maapisteiden välille jännite-eron, joka generoi johtimiin häiriövirtoja. Esimerkiksi prosessorin ja sen liitäntälaitteen väliseen signaalimaajohtimeen syntyvä häiriövirta voi ylikuulua signaalijohtimeen, ja lisäksi se kulkee piirikorttien lävitse (kuva 50). Digitaalielektroniikan ympärille yhtenäisen suojaavan ja johtavan pinnan aikaansaamiseksi, on digitaalikortin maa usein yhdistetty laiterunkoon. (Lehtio 2007: 62.)



Kuva 50. Häiriövirtojen kytkeytyminen eri maapotentiaaleihin järjestelmässä (Lehtio 2007: 62).

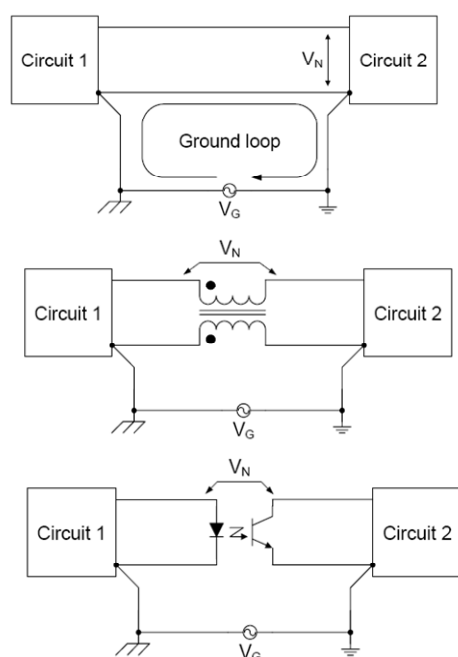
Ongelma voidaan poistaa:

- pienentämällä maadoitusimpedanssia,
- pienentämällä maavirtoja,
- käyttämällä yksipistemaadoitusta tai

- erottamalla eli isoimalla.

Muuntajalla voidaan toteuttaa esimerkiksi maavirtasilmukan katkaiseminen eli syötön ja kuorman erottaminen. Erotusmuuntajaa voidaan käyttää, mutta se ei ole aina paras vaihtoehto. Muuntaja on usein painava ja sen käämien välinen hajakapasitanssi määrää suojauksen onnistumisen. Asettamalla suojalevy muuntajan ensiö- ja toisiokäämien väliin voidaan hajakapasitanssia kuitenkin pienentää. Rajoitettu matalahko taajuusalue rajoittaa muuntajan toimimista hyvin. Useita muuntajia tarvitaan, jos järjestelmässä on useita signaalijohtimia. (Lehtio 2007: 62.)

Eräs hyvin toimiva isolointitapa on käyttää optoerotusta (kuva 51). Tällä tekniikalla saadaan katkaistua häiriöiden galvaaninen kulkutie. Optoerotus on erittäin käyttökelpoinen tapa häiriöiden torjunnassa häiriöherkissä piireissä. (Lehtio 2007: 62.)



Kuva 51. Erilaisia isolointimenetelmiä, joista ylimpänä erottamaton toteutus, keskellä muuntajan kautta erottaminen sekä alimpana optinen erotin (Lehtio 2007: 63).

Jos isolointia ei käytetä, on myös mahdollista poistaa toinen maadoitus. Tämä johtaa siihen, että esimerkiksi prosessorin ja liitännälaitteen maadoitusimpedanssit ovat sarjas-

sa. Häiriöitä piirien välille aiheuttaa myös yhteinen maadoitus. Jos häiriövirta kulkee samansuuntaisena signaalijohtimessa ja signaalimaajohtimessa (yhteismuotoinen häiriö), voidaan johdinpari kiertää ferriittirenkaan ympärille ja rakentaa näin suodatin, joka estää häiriövirtojen kulun johtimissa. Kuristin ei vaikuta signaalin kulkuun mitenkään, koska signaalin paluuvirta kulkee maajohtimessa vastakkaiseen suuntaan ferriittirenkaan läpi, ja virrat aiheuttavat toisensa kumoavat vuot. Jos häiriövirta kulkee vain toisessa johtimessa (esimerkiksi signaalimaa), kyseessä on eromuotoinen häiriö. Erillisiä ferriittihelmiä johtimissa on tällöin pakko käyttää. Näin rakennettu suodatin estää suurtaajuisten häiriövirtojen etenemisen tehokkaasti. Huomattavasti matalataajuisempaan signaaliin suodatin ei kuitenkaan vaikuta. Häiriövirtoja voidaan ohjata pois digitaalikoritin maapuolelta esimerkiksi käyttämällä laitteiden välillä ylimääräistä maatasausjohdinta. (Lehtio 2007: 63.)

5.4. Kotelointi ja kotelon epäjatkuvuuskohdat

Hyvä kotelointi liittyy aina laitteen viimeistelyyn. Ulkoisten häiriöiden kytkeytymistä sähkölaitteen häiriöherkkiin piiriosiin ja moduuleihin voidaan rajoittaa koteloinnilla. Koteloinnin hyvä toteutus rajoittaa samoin myös sähkömagneettisten häiriöiden siirtymistä laitteen ulkopuolelle. Sähkölaite voi kuitenkin häiritä itseään eri laiteosien kesken kotelon sisällä. Täysin umpinainen kotelotarkaisu on kuitenkin mahdottomuus, koska sähkölaitteen kotelointiin liittyy aina läpivientejä kuten esimerkiksi kaapeloinnit, näyttöruudut, käyttökytkimet ja tuulettimet. (Lehtio 2007: 41.)

Sähkömagneettinen säteily pyritään aina vaimentamaan, varjostamaan ja heijastamaan. Magneettivuota kuljettava kotelointi toimii puhtaita magneettikenttiä vastaan magneettisena oikosulkuna. Kotelointi on ensisijaisesti tasapotentialipinta sähkökenttiä ja sähkömagneettista säteilyä vastaan. Kotelointi muodostaa laitetta ympäröivän tasapotentialipinnan sekä kuljettaa sähkömagneettista säteilyä kumoavia virtoja. Onnistuneen koteloinnin toimivuuden edellytyksenä on esteetön virran kulku sen pinnassa. (Gustafsson & Reitmaa 1996: 64.)

Kotelon suojausvaimennus kertoo paljonko jää pääsemättä läpi kotelosta suhteessa alkuperäiseen kenttään. Se on summa heijastusvaimennuksesta, absorptiovaimennuksesta ja tekijästä, joka riippuu siitä miten säteily käyttäytyy suojakuoren aineessa heijastellessaan edestakaisin. Suhde ilmoitetaan yleensä suhteellisenä arvona (desibeleinä). Suojausvaimennus voidaan laskea seuraavasti:

$$S_E = 20 \log\left(\frac{E_{EI-SUOJATTU}}{E_{SUOJATTU}}\right) \quad (34)$$

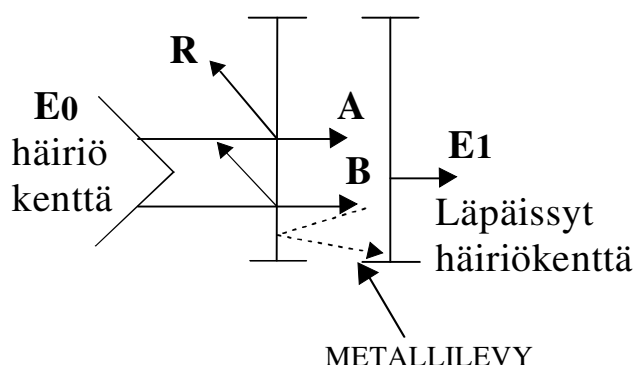
$$H_E = 20 \log\left(\frac{H_{EI-SUOJATTU}}{H_{SUOJATTU}}\right), \quad (35)$$

missä S_E = sähkökenttä ja H_E = magneettikenttä. (Lehtio 2007: 41; Gustafsson ym. 1996: 64–65.)

Kokonaissuojausvaimennus muodostuu kolmesta eri tekijästä, jotka esiintyvät kuvassa 52. Absorptiovaimennus A tarkoittaa, että osa suojakoteloiseinämän läpi kulkevasta sähkömagneettisen aallon energiasta muuttuu lämmöksi. Heijastusvaimennus R tarkoittaa, että osa sähkömagneettisesta kentästä (aallost) heijastuu takaisin suojakotelon seinämästä. Lisäksi edestakaisista sähkömagneettisen aallon monikertaisista heijastuksista johtuva tekijä B vaikuttaa kokonaissuojausvaimennukseen. Näiden tekijöiden avulla saadaan laskettua kokonaisvaimennus.

$$S(dB) = A(dB) + R(dB) + B(dB), \quad (36)$$

missä S on kokonaissuojausvaimennus, A on absorptiovaimennus, R on heijastusvaimennus ja B on korjauskerroin, kun väliaineessa moninkertaisia heijastumisia eli kyseessä on matalataajuinen magneettikenttä. (Lehtio 2007: 42.)



Kuva 52. Kokonaissuojausvaimennuksen osatekijät (Lehtio 2007: 42).

5.5. Absorptiovaimennus

Koteloseinän sisäpuolelle edennyt sähkö- tai magneettikenttä (E_1/ H_1) voidaan laskea kaavoilla 38 ja 39, kun tunnetaan suojaavan levyn ominaisuudet. Tuleva kentänvoimakkuus, jonka suojaseinä kohtaa, ilmenee kaavassa suureina E_0 tai H_0 . Koteloon sisään mennyt kentänvoimakkuus ilmenee suureina

$$E_1 = E_0 \cdot e^{\frac{-t}{\delta}} \quad (37)$$

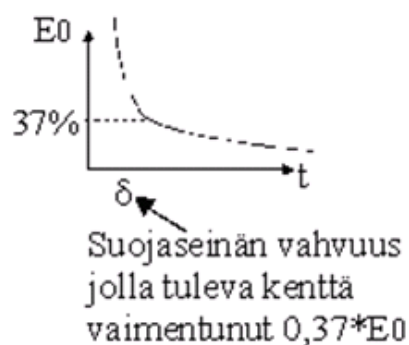
tai

$$H_1 = H_0 \cdot e^{\frac{-t}{\delta}} \quad (38)$$

Kaavoissa t on suojalevyn paksuus ja δ on materiaalivakio, joka kertoo kuinka vahva suojaseinä kyseessä olevaa materiaalia vaimentaa kotelon sisällä olevan kentänvoimakkuuden 37 %:iin tulevasta kentästä. Kuvassa 53 on esitetty materiaalivakion vaimennus kotelon sisälle tulevalle kentälle. Materiaalivakion δ arvo riippuu materiaalin permeabiliteetista ja johtuvuudesta sekä sähkömagneettisen kentän taajuudesta. Materiaalivakion arvo on laskettu kaavalla

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu * \gamma}} [m], \quad (39)$$

missä μ on permeabiliteetti ja γ konduktiivisuus. (Lehtio 2007: 42–43.)



Kuva 53. Materiaalivakion vaimennus sisälle tulevalle kentälle (Lehtio 2007: 43.)

Taulukkoon 6 on koottu kuparin, alumiinin ja teräksen materiaalivakioita eri taajuuksilla. Levyvahvuudet, joilla tuleva kenttä vaimenee 37 %:iin edetessään levyn läpi, on esitetty tuumina tässä taulukossa.

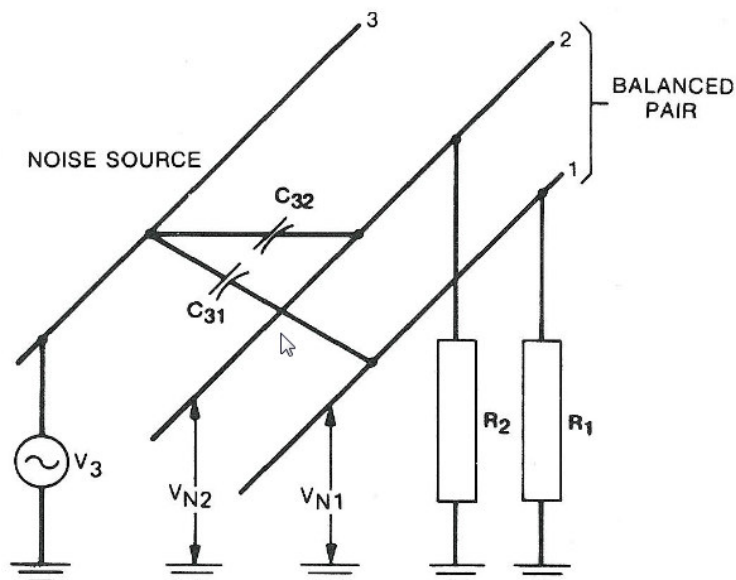
Taulukko 6. Materiaalivakioita eri taajuuksilla (Lehtio 2007: 43.)

Frequency	Copper (in.)	Aluminum (in.)	Steel (in.)	Mumetal (in.)
60 Hz	0.335	0.429	0.034	0.014
100 Hz	0.260	0.333	0.026	0.011
1 kHz	0.082	0.105	0.008	0.003
10 kHz	0.026	0.033	0.003	—
100 kHz	0.008	0.011	0.0008	—
1 MHz	0.003	0.003	0.0003	—
10 MHz	0.0008	0.001	0.0001	—
100 MHz	0.00026	0.0003	0.00008	—
1000 MHz	0.00008	0.0001	0.00004	—

5.6. Balansointi ja suodatus

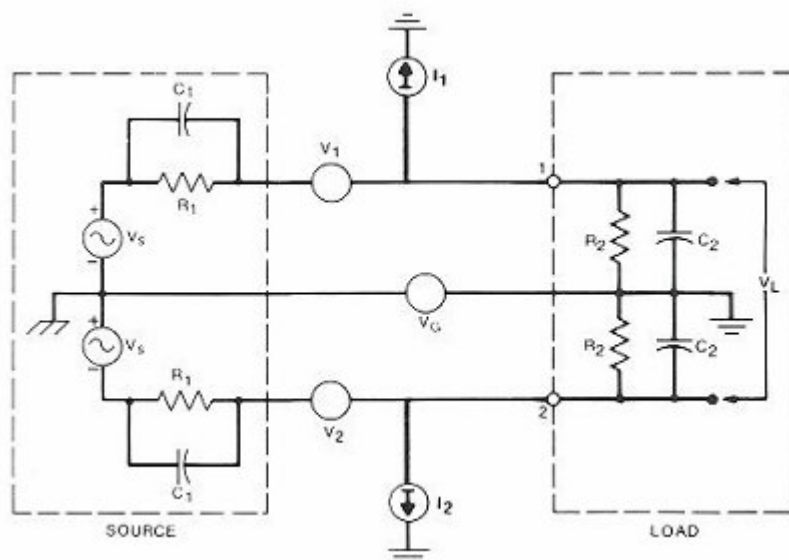
Balansoitu piiri on kahden johtimen piiri, jossa molemmat johtimet ja kaikki piirit ovat kytketty yhteen kaikille samaan impedanssi- ja maatasoon. Balansoinnin tarkoitus on, että häiriöt kytkeytyvät molempiin johtimiin, jolloin ne voidaan kumota kuormassa pois

varsinaisesta signaalista (kuva 54). Yhdessä suojauksen kanssa menetelmä tarjoaa varsin hyvän suojauksen häiriöitä vastaan. (Ott 1988: 116.)



Kuva 54. Kapasitiivinen kytkeytminen balansoitujen johtimien välillä (Ott 1988: 118).

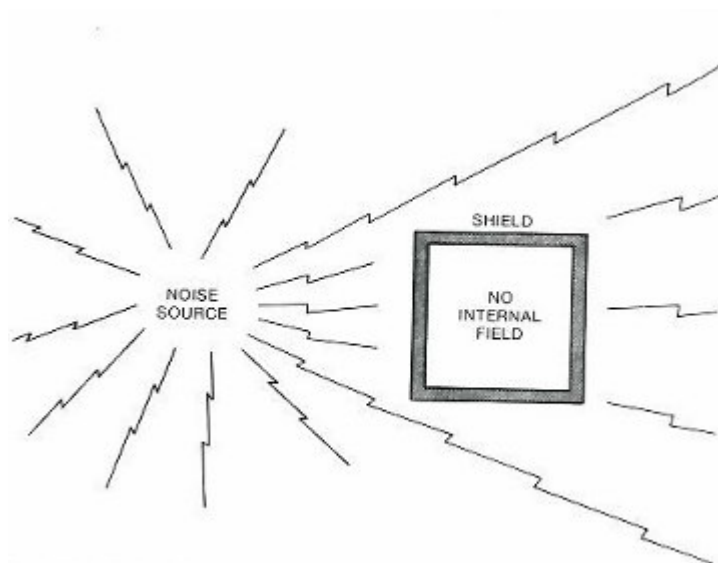
Balansoidussa piirissä kuva 55, V_1 ja V_2 ovat induktiivisesti kytkettyneitä jännitteitä ja virtalähteitä. I_1 ja I_2 ovat häiriövirtoja, jotka ovat kytkettyneet kapasitiivisesti piiriin kapasitanssien C_{31} ja C_{32} välityksellä. (Ott 1988: 117.)



Kuva 55. Balansoidun piirin induktiiviset ja kapasitiiviset häiriöjännitteet ja maapotentiaalin erilaisuus lähteen ja kuorman välillä (Ott 1988: 117).

5.7. Suojauksen vaihtoehtoja

Suojaus toteutetaan esimerkiksi kahden alueen väliin sijoitettavalla metallisen väliseinän avulla. Väliseinän avulla voidaan vaikuttaa sähkö- ja magneettikentän vaimennukseen näiden alueiden välissä. Suojan sisällä voi olla myös sähkömagneettisia kenttiä, jos suoja ympäröi häiriölähteen estäen häiriöiden pääsyn ulkopuolisiin laitteisiin. Suojausta voidaan käyttää myös häiriösäteilyn pääsyn estämiseen suojan sisälle (kuva 56). Pääasiassa häiriölähteen suojaaminen on tehokkaampaa kuin häiriöitä vastaanottavan kohteen suojaaminen. (Ott 1988: 159.)



Kuva 56. Suojauksen toteutus vastaanottopiirin ympärille ympäristön häiriöitä vastaan (Ott 1988: 160).

Kaapelointien suojaus on olennainen osa häiriösuojausta, koska sähkömagneettisen energian siirtyminen laitteen koteloon sisään on estettävä niiden avulla. Kaapelointien suojaus on kytkettävä laitteen koteloon, jotta häiriösignaalit eivät kytkeydy laitteen sisään ulkopuolelta. (Ott 1988: 159.)

5.8. Suojauksen tehokkuus

Suojauksen tehokkuus voidaan analysoida kahdella eri tavalla joko piiriteorian tai kentäteorian avulla. Suojaus voidaan määrittellä sen kykyä pienentää magneetti- ja/tai sähkökentän voimakkuutta. On suotuisaa käyttää suojauksen tehokkuuden ilmaisemiseen desibelejä (dB). Desibelien käyttäminen mahdollistaa erilaisten suojauksen tehokkuuteen vaikuttavien tekijöiden summaamisen yhteen kokonaistarkastelua varten. Suojauksen tehokkuus sähkökentille ja magneettikentille on määritelty yhtälöillä

$$S = 20 \cdot \log\left(\frac{E_0}{E_1}\right) \text{ dB} \quad (40)$$

ja

$$S = 20 \cdot \log\left(\frac{H_0}{H_1}\right) \text{ dB. (Ott 1988: 165),} \quad (41)$$

joissa E_0 (H_0) on tuleva kentänvoimakkuus ja E_1 (H_1) on suojasta lähtevän kentänvoimakkuuden suuruus. Kotelon suunnittelussa on kaksi tärkeää mietinnän aihetta. Ne ovat materiaalin suojauksen tehokkuus sekä suojauksen tehokkuus, kun suojassa on epäyhtenäisyyksiä ja reikiä. Aluksi suojauksen tehokkuus selvitetään kiinteän suojauksen ominaisuuksia tutkien, minkä jälkeen tutkitaan reikien ja epäjatkuvuuskohtien vaikutukset suojauksen ominaisuuksiin. Suojauksen tehokkuuteen vaikuttavia asioita ovat taajuus, suojan geometriset ominaisuudet, suunta mistä kentänvoimakkuuksia mitataan ja vaihtuneen kentän tyyppi. (Ott 1988: 165.)

6. HÄIRIÖKENTTIEN VOIMAKKUUKSIEN MITTAAMINEN

Kappaleessa käydään läpi menetelmät, joilla havaitaan aikaisemmassa kappaleessa todetut sähkömagneettiset häiriöpäästöt. Häiriöpäästöjen mittauksia esitetään niiden ilmenemistavan ja -taajuuden avulla. Kappaleessa esitellään myös yleisesti mittauslaitteistolle asetettavia vaatimuksia ja ominaisuuksia. Esitettyjä mittausmenetelmiä sovelletaan työn varsinaisissa käytännön mittauksissa, joiden tulokset esitetään kappaleessa seitsemän.

Häiriöpäästö- eli emissiomittaukset jaetaan pääsääntöisesti johtuvien ja säteilevien häiriöiden mittauksiin. Kaapeloinnin kautta laitteista johtumalla tulevista häiriöistä mitataan radiotaajuista häiriöjännitettä yleensä taajuusalueella 150 kHz–30 MHz. Epäjatkuvia suurtaajuushäiriöitä eli naksauksia, joita aiheuttavat muun muassa termostaatit ja ohjelmakytkimet, mitataan myös kotitalous-, kauppa- ja kevyen teollisuuden ympäristöissä. Verkkojännitteen harmonisten yliaaltojen häiriöpäästöjä ja äkillisten kuormitusmuutosten aiheuttamia jännitevaihteluja eli välkyntää mitataan yleensä pientaajuisista johtuvista häiriöistä. Taajuusalueella 30 MHz–1 GHz mitataan laitteista säteilemällä tulevien häiriöiden säteilyn kentänvoimakkuutta. (Sähkötieto ry 1997: 178.)

Vuonna 1996 tuli voimaan EU direktiivi, joka määrää, että kaikkien laitteiden on täytettävä sähkömagneettinen yhteensopivuus. Kun laite täyttää tietyt vaatimukset, sillä on oikeus saada CE-merkki. Tämä kuitenkin edellyttää myös muiden direktiivien, esimerkiksi konedirektiivin ja pienjännitedirektiivin, asettamien vaatimusten täyttämistä. (Lehtio 2007: 19.)

6.1. Häiriöiden vaikutus mittaustarkkuuteen

Häiriön vaikutus mittalaitteen tarkkuuteen voidaan selvittää melko helposti, jos häiriösignaalin taajuus on häiriintyvän laitteen taajuuskaistalla eli käyttötaajuusalueella. Esimerkiksi 1 V:n jännitettä tehollisarvomittarilla mitattaessa 0,1 V:n häiriötaajuinen jännite aiheuttaa 1 % epätarkkuuden mittaukseen. Tehollisarvomittarissa toisistaan riippumattomat jännitteet summautuvat neliöllisesti. (Fallström ym. 1997: 33.)

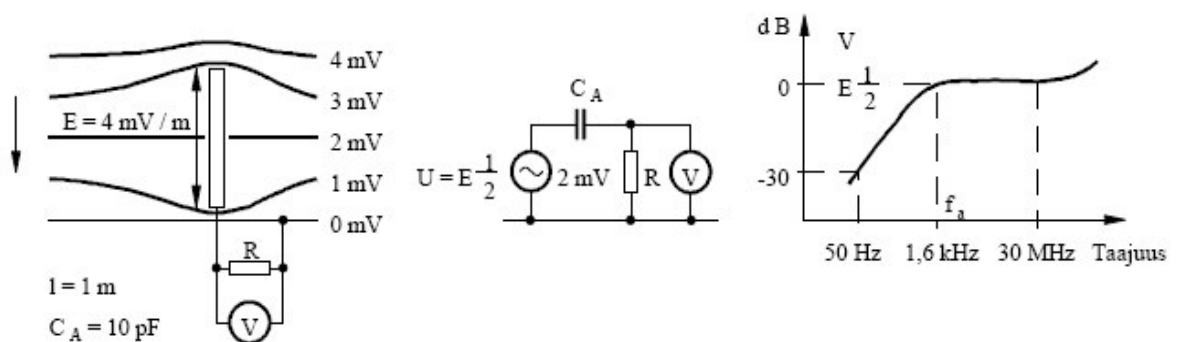
Epälineaaristen vaikutusten takia häiriintyminen on mahdollista, vaikka häiriösignaalin taajuus olisi huomattavastikin suurempi kuin häiriintyneen laitteen ylärajataajuus. Mahdollisista suodattimista huolimatta osa häiriötaajuisesta signaalista pääsee laitteen ottopiireihin, joissa on aina epälinearisuutta. Puolijohteet ovat laitteistojen epälinearisimpia komponentteja. Takaisinkytkemättömässä tapauksessa 10 mV:n häiriöjännitteen aiheuttama muutos transistoriasteessa voi olla jopa 4 %. (Fallström ym. 1997: 33.)

6.2. Sähkökentän voimakkuuden mittaus

Sähkökentän voimakkuuden mittaus suoritetaan sähköisesti lyhyen ($l < \lambda/8$) sauva-antennin sekä selektiivisen jännitemittarin, jonka kaistanleveys on B , avulla. Laitteesta tuleva sähkökenttä indusoi antenniin jännitteen. Sauva-antenni täytyy sovittaa jännitemittarin ottoon, koska sen impedanssi on suuri. Mittauskytkentä on kuvan 57 mukainen. Kun 1 m pituinen tasapaksuinen sauva sijaitsee 4 mV/m sähkökentässä, niin sauvan keskipisteessä vallitsee potentiaali 2 mV. Tyhjäkäyntijännite sauvassa on

$$U = E \cdot \frac{l}{2}, \quad (42)$$

missä E = sähkökentän voimakkuus ja $l/2$ = antennin tehollinen korkeus. (Fallström ym. 1997: 13–14.)

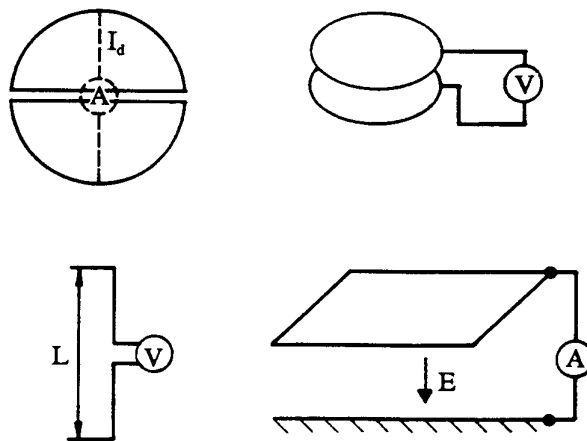


Kuva 57. Sähkökentän voimakkuuden mittaus (Fallström ym. 1997: 15).

Sauvan impedanssi määräytyy kapasitanssin perusteella, jos sen pituus on paljon aallonpituutta lyhyempi. MIL-standardin mukainen sauva-antennin pituus on 1 m, jolloin

sen kapasitanssi on noin 10 pF. Tämän johdosta suuren kuormitusvastuksen käyttö ei aiheuta kovin merkittävää kohinaa taajuuden yläpäässä, koska kohinavirta oikosulkeutuu antennin yläpäässä kapasitanssin kautta. Sovituksen resistanssi voi olla noin 10 M Ω , jolloin 50 Hz taajuudella vaimennus on noin 30 dB. Vaimennus on otettava huomioon jännitemittarin lukemassa. Käytännön mittauksia tehtäessä antennin maataso ei ole välttämättä yksiselitteinen. Mittarin käteen ottaminen vaikuttaa mittauksen lukemaan. MIL-standardissa käytetään 14 kHz–25 MHz maatasona neliön muotoista (60x60 cm) peltilevyä antennin alapuolella. Tällöin mittauksista saadaan paremmin vertailukelpoisia. (Fallström ym. 1997: 14–15.)

Sähkökentän voimakkuus on suoraan verrannollinen virtaan levyn ja maan välillä ja kääntäen verrannollinen levyn pinta-alaan ja taajuuteen. Alla olevassa kuvassa 58 on esitetty erilaisia kentänvoimakkuuden mittaustapoja.



Kuva 58. Kuvassa on esitetty dipoli-antennimittausperiaate, levyelektrodimittausperiaate, sauvamittausperiaate ja kentänvoimakkuuden mittaaminen levyn ja maan väliltä (Lehtio 2007: 98).

6.3. Magneettikentän voimakkuuden mittaus

Mittaus tehdään selektiivisen jännitemittarin (kaistanleveys B) ja pienen kehäantennin avulla (kuva 59). Muuttuva magneettikenttä indusoi käämiin jännitteen. Kuvassa 59 nähdään suojatun kehäantennin toimintaperiaate. Jos kenttää voidaan pitää homogeeni-

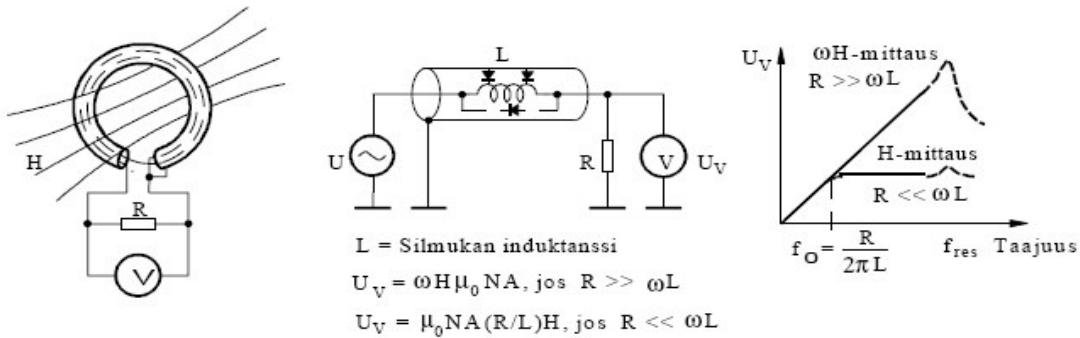
sena antennin alueella, niin induktiolain perusteella saadaan kehäantennin tyhjäkäyntijännitteeksi

$$u = \omega \mu_0 NA \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (43)$$

kun kentän suunta on kohtisuorassa kehäantennin tasoa vastaan. Tyhjäkäyntijännite, kun magneettikentän voimakkuuden aikariippuvuus on sinimuotoinen saadaan lausekkeesta

$$u = \omega \mu_0 HNA, \quad (44)$$

missä N on kehäantennin kierrosluku. (Fallström ym. 1997: 15.)



Kuva 59. Suojatun kehäantennin toimintaperiaate, rakenne ja taajuusavaste (Fallström ym. 1997: 15).

Jotta käämiä ei tarvitsisi käännellä maksimivuontiheyden löytämiseksi, mittari sisältää usein kolme toisiinsa nähden kohtisuorassa olevaa käämiä. Laskemalla eri käämien tehollisarvot neliöllisesti yhteen saadaan vuontiheyden kokonaistehollisarvo:

$$B_{KOK} = \sqrt{B_X^2 + B_Y^2 + B_Z^2}. \quad (45)$$

Mittauksissa on otettava huomioon, että erilaiset mittarit voivat käyttää erilaista kaistanleveyttä. Jos mittari toimii kapealla taajuusalueella, niin se saattaa mitata vain verkko-taajuuden (50 Hz tai 60 Hz) virran synnyttämää vuontiheyden tehollisarvoa. Yleensä mittalaitteet toimivat taajuusalueella 10–1000 Hz, eli toimivat riittävän laajakaistaisella alueella ja mittaavat myös harmonisten yliaaltojen synnyttämän vuontiheyden arvon.

Suosittelavaa on, että mittalaitteen ilmaisin on todellisen tehollisarvon ilmaisin. (Fallström ym. 1997: 15–16.)

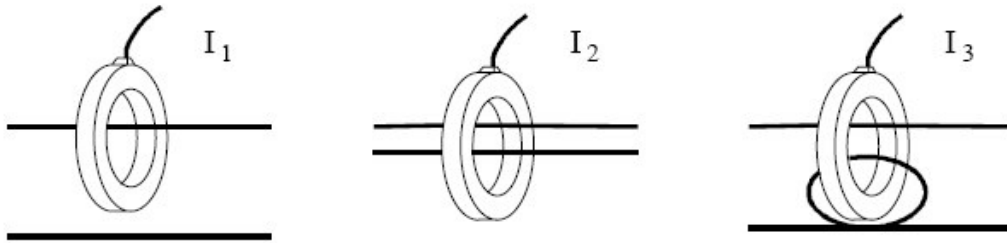
Häiriökentän yksityiskohtia voidaan mitata pienen kehän avulla, jonka halkaisijaksi on määritelty MIL-standardissa 13,3 cm. Suuremmalla kehällä tarkkuutta ja herkkyyttä kyettäisiin saamaan lisää, mutta sen käyttäminen olisi hankalaa. Sähkökentän aiheuttamien häiriöiden vaimentamiseksi kehän ympärille tarvitaan staattinen suoja kuten esimerkiksi metalliputki. Antenninjännite on kerrottava hyvyysluvulla, jos kehä on viritetty ulkoisella kondensaattorilla resonanssiin. Hyvyysluvun suuruuteen vaikuttavat antennipiirin häviöt resonanssitaajuudella. Hyvyysluku on sitä suurempi mitä pienemmät ovat antennipiirin häviöt resonanssitaajuudella. Silmukan ja staattisen suojan välinen sisäinen kapasitanssi rajoittaa kehäantennin laajakaistaisuutta, koska silmukan induktanssi muodostaa näiden kanssa resonanssiin. MIL-standardi määrittelee antennin kierrosluvuksi 36 ja pinta-alaksi 139 cm². Määritelty taajuusalue on 30Hz–30 kHz ja sisäinen resonanssitaajuus noin 0,7 MHz. Haluttaessa säilyttää laajakaistaisuus suurempia taajuuksia mitattaessa on käytettävä pienempiä kierroslukuja. (Fallström ym. 1997: 15–16.)

Kehän ($R \gg \omega L$) antama jännite on verrannollinen taajuuteen, kun magneettikenttä on vakio (kuva 59). Mittauspiiriin indusoituva jännite on myös verrannollinen taajuuteen, joten tietyn kokoiseen piiriin syntyvä jännite voidaan selvittää mittaamalla ωH :n arvo. Yleisesti tunnetuille herkille mittauksille arvoa $\omega H = 100$ A/ms pidetään häiriörajana. Antennia voidaan kuormittaa vastuksella ($R \ll \omega L$), jos halutaan mitata suoraan magneettikentän voimakkuutta (kuva 25). Herkkyys heikkenee tällöin, mutta päästään eroon antennijännitteen taajuusriippuvuudesta. (Fallström ym. 1997: 15–16.)

6.4. Johtuvien häiriöiden mittaus

Pitkittäisiä ja poikittaisia eli yhteis- ja eromuotoisia häiriövirtoja voidaan mitata virtamuuntajalla (kuva 60). Poikittaisvirta saadaan mittaamalla $I_3 = 2 \times$ poikittainen virta, vaikka kytketyminen olisikin pitkittäistä. Oskilloskooppiin tai spektrianalysointoriin liitetyn häiriötä mittaavaan jännitemittarin avulla saadaan selvitettyä häiriön luonne ja sen syy. Häiriöiden luokittelua ja mittaamista helpottaa myös erilaisten ilmaisimien

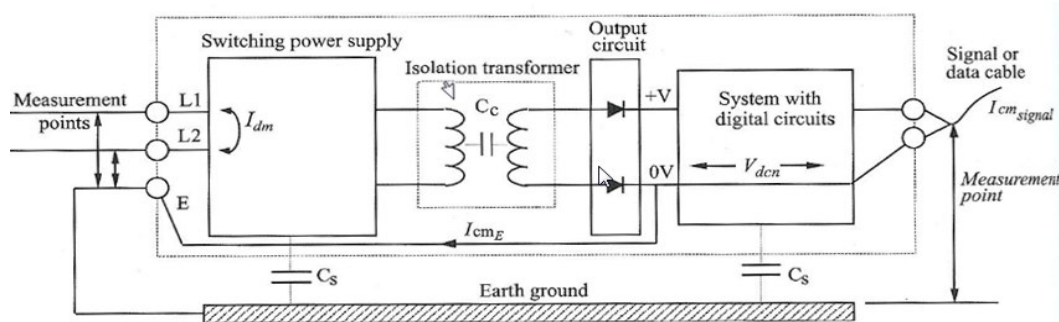
käyttö. Jos $I_3 = 2 \times I_1$, niin häiriövirta on poikittainen ja jos taas $I_2 = 2 \times I_1$, niin häiriövirta on pitkittäinen. (Fallström ym. 1997: 18.)



Kuva 60. Häiriön kytkeytymistavan päättelemisen virtamuuntajamittauksella (Fallström ym. 1997: 18).

Yhteismuotoiset virrat ovat pääasiainen syy häiriöpäästöille ja häiriöiden immuniteetille korkeilla taajuuksilla. Eromuotoiset virrat voivat myös aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä. Jokaiselle signaalilinjalle on järjestettävä paluutie. Jos epätasapainoa esiintyy kahden signaalitien välillä, esiintyy yhteismuotoista häiriötä. Kun ollaan tekemisissä johtuvien häiriöiden kanssa, esiintyy useita kytkeytymistapoja. (Montrose ym. 2004: 161–162.)

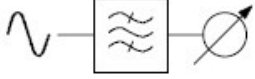
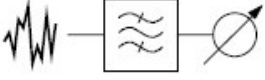
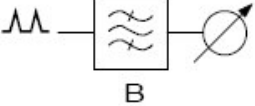
Kuvasta 61 nähdään erilaisia kytkeytymistapoja. Differentiaalimuotoinen virta I_{dm} , joka syntyy sisäisesti tavallisesti hakkuriteholähdetyyppisessä teholähteessä, mitataan häiriöjännitteenä kuormitusimpedanssin yli jokaisesta vaiheesta maatasoon nähden. Digitaaliset kytkentähäiriöt V_{dcn} voidaan havaita energiana syöttöjohdossa, jos ne kytkeytyvät muuntajan C_c läpi. Energia tullaan havaitsemaan vaihejohtimien L1, L2 ja laitekotelon E välillä syöttöjohdossa. Parasiittista kapasitanssia C_s muodostuu järjestelmän ja teholähteen välillä maatasoon nähden. (Montrose ym. 2004: 162.)



Kuva 61. Erilaisia häiriöiden kytkeytymistapoja (Montrose ym. 2004: 162).

6.5. Mittauslaitteiden ilmaisimet ja kaistanleveys

Kuvassa 62 on esitetty jännitettä mittaavia mittauslaitteita, joita voidaan käyttää häiriökenttien voimakkuuksien, häiriöjännitteiden ja -virtojen mittauksissa. Jos lähteen taajuus ja kaistanpäästösuodattimen keskitaajuus ovat samat, niin kaistanleveysriippuvuutta ei ole, koska jatkuvan aallon taajuusspektrissä on vain yhtä taajuutta. Transienttihäiriö ja valkoinen kohina (Gaussin jakautuma) ovat luonteeltaan laajakaistaisia. Edellisessä tapauksessa amplitudisisältö (esim. V/Hz) ja jälkimmäisessä tapauksessa taajuusspektrin tehoisisältö (W/Hz) ovat taajuudesta riippumattomia vakioita. Ilmaisimelle saadaan kätevästi kaistanleveyteen verrannollinen teho valkoista kohinaa mitattaessa ja jännitepulssi, jonka korkeus on verrannollinen kaistanleveyteen ideaalisia impulsseja mitattaessa. (Fallström ym. 1997: 18–19.)

<p>Jatkuva aalto</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - $1,11 \times \text{keskiarvo} = \text{tehollisarvo}$ - ei B-riippuvuutta - dimensio V/m tai V
<p>Valkoinen kohina</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - \sqrt{B} - riippuvuus - tarvitaan tehollisarvoilmaisim - dimensio $\frac{V/m}{\sqrt{\text{Hz}}}$ tai $\frac{V}{\sqrt{\text{Hz}}}$
<p>Transientti-häiriö</p> <p>$t_r = \text{nousuaika}$</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - B-riippuvuus $t_r < \frac{1}{B}$ - tarvitaan huippuarvoilmaisim - dimensio $\frac{V/m}{\text{Hz}}$ tai $\frac{V}{\text{Hz}}$
<p>(Näennäishuippuarvoilmaisimen näyttämässä on lisäksi riippuvuus häiriön toistotaajuudesta; nousuaikavakio/laskuaikavakio on esim. 1 ms/160 ms)</p>	

Kuva 62. Erilaisten mittauslaitteiden perusominaisuudet ja käyttöalueet (Fallström ym. 1997: 19).

7. TESTAUSASEMIEN HÄIRIÖMITTAUSTULOKSET

Kappaleessa esitetään mittaustulokset, jotka tehtiin tutkittavaan laitteistoon. Mittauksia alettiin suunnitella käytyjen teorioiden ja laitteistoon perehtymisen jälkeen. Teorioihin ja häiriömittausmenetelmiin perustuen pystyttiin hahmottamaan järjestelmän ns. ongelmallisimmat kohteet, jotka ainakin tulisi mitata mittauksiin suunniteltuna ajanjaksona. Mittauksia varten hankittiin tarvittava laitteisto ja suunniteltiin testausympäristö, joka muodostettiin lopulta siirrettävien rullavaunujen päälle. Liitteissä 3–8 ovat kaikki mittaustulokset, joista tässä kappaleessa esitettäviin tuloksiin on kerätty merkittävimpiä häiriöitä.

Ympäristö, jossa laite sijaitsee, esittää merkittävää roolia tutkimuskohteena, kun tutkitaan järjestelmää sähkömagneettisten häiriöiden kannalta. Ensimmäiseksi on selvitettävä, ovatko sähkömagneettiset häiriökentät peräisin johtumalla vai säteilemällä kytketyisistä. Ympäristöllä voi olla suuri vaikutus laitteen häiriöttömälle toiminnalle. Testiasemat koostuvat useista eri laitteista, ja ne on sijoitettu tuotannon tiloihin. Suurempia häiriölähteitä ei tässä ympäristössä pitäisi olla, sillä testausasemille on olemassa oma sähkönsyöttökisko. Lisäksi tehtaassa ei ole suuria taajuusmuuttajia eikä isoja sähkömoottoreita tai vastaavia sähkölaitteita.

Tuotannossa on käytössä kolme lopputestausasemaa ja kaksi funktionaalista moduulitestiasemaa. Mittaukset suoritettiin kahdesta lopputestaus- ja moduulitestausasemasta. Mittaustulokset antoivat hyvän vertailupohjan, koska lopputestausasemien rakenne sekä funktionaalisten moduulitestiasemien rakenne ovat keskenään yhteneviä. Kun mittaukset tehdään käytännön tuotantotiloissa, niin paljastetaan laitteiston puutteet, joita voi ilmetä kun sähkömagneettisten häiriöiden suojaus on riittämätön.

Mittauksissa käytetty mittalaitteisto on lueteltu seuraavassa listassa:

- lähikenttämittapää HP 11940A magneettikentän mittauksiin taajuudella 30 MHz–1GHz
- esivahvistin HP 8447F Option H64 – vahvistus +26 dB taajuudella 100 kHz - 1.3 GHz (band 2)

- PMM Instruments Div. L2-25 Artificial mains network 10A LISN (V-network) – 9 kHz – 30 MHz
- HP 11947A Transient limiter – vaimennus 10 dB taajuudella 9 kHz – 200 MHz
- spektrianalysointilaitteisto HP 8591E + EMC options – taajuudet 9 kHz - 22 GHz
- Fluke 1735 Power logger sähköverkon laadun analysointilaitteisto
- Dranetz PP1-8000 -verkkoanalysointilaitteisto sähköverkon laadun mittaamiseen
- Keithley 2015 THD Multimeter
- HP 34401A DMM digitaalinen yleismittari
- Muuntosähkö Oy KLM 230 V 350 VA suojaerotusmuuntaja
- teholaähde- ja vahvistinkehikko Efore (1 kpl PA-100 ja 2 kpl IPS-280).

Laitteiston tarkempi esittely on seuraavissa kappaleissa. Mittalaitteiston osalta spektrianalysointilaitteisto ei täytä standardien asettamia vaatimuksia. Standardit ilmoittavat päästöjen raja-arvot ns. kvasi-peakin tasolla. Kvasi-peakin tasolla eli näennäishuippuarvoilmaisella näyttää suurempaa arvoa usein toistuvilla signaaleilla verrattuna satunnaisesti esiintyvien signaalien huippuarvoon, vaikka signaalien huippuarvo olisi sama. Spektrianalysointilaitteistossa käytetään max-hold -toimintoa, jolla mitataan signaalin huippuarvoa. Huippuarvo on aina suurempi tai yhtä suuri kuin kvasi-peakin tasolla näytetty. Toinen ongelma on spektrianalysointilaitteiston sisäänmenossa olevan mikserin eli sekoittimen mahdollinen ylikuormittuminen. Mikäli tehoa vastaanotetaan laajalla kaistalla tutkittavan alueen ulkopuolella, saattaa mikseri ylikuormittua ja seurauksena saadaan virheellinen mittaustulos. Tästä huolimatta spektrianalysointilaitteistoa käyttäen voidaan tehdä hyvin tarkkoja tuotekehitysmittauksia.

Testauksessa testattavan laitteen kytkemiseen käytetyt kaapelit olivat suojaamattomat vaihtojännitekaapelit sekä erillisillä johtimilla toteutetut suojatut signaalikaapelit. EUT (Equipment under test) tai DUT (Device Under Test) tarkoittaa testattavaa laitetta tai laitteistoa. Saadut mittaustulokset löytyvät kokonaisuudessaan liitteistä 1 ja 3–8, joista tähän kappaleeseen on poimittu mielenkiintoisimmat ja merkittävimmät tulokset. Mittaustuloksia on saatu kahdesta lopputestausasemasta, kahdesta moduulitestausasemasta ja niille sähköä syöttävästä verkosta.

7.1. Käytetyt mittalaitteet

Fluke 1735 -sähkön laadun analysaattori ja Dranetz PP1-8000 -verkkoanalysaattori

Fluke 1735 on kolmivaiheinen analysaattori verkkojännitteen laadun mittaamiseen sekä sähköjakelujärjestelmän vikojen ja häiriöiden selvittämiseen ja paikantamiseen (kuva 63). Analysaattorilla voidaan mitata samanaikaisesti jännitettä ja virtaa kaikista kolmesta vaiheesta ja nollajohtimesta sekä laskea mittaustuloksista käytännöllisesti katsoen kaikki sähköjakelujärjestelmän parametrit: jännitteet, virrat, tehot, tehokertoimet, taa-juus, energiankulutus, särö, harmoniset ja epäharmoniset yliaallot, epäsymmetria ja välkyntä. Laite tallentaa myös häiriötapauksia, kuten jännitekuopat ja -kohoumat, transientit, katkokset ja nopeat jännitemuutokset.

Mittalaitteessa on reaaliaikainen oskilloskooppi- ja vektorinäyttötoiminto sekä auto- maattinen perussuureiden trendinäyttö ja niiden tallennus. PowerLog-ohjelmistolla mit- taustulokset voidaan siirtää tietokoneelle analysointia ja raportointia varten. Dranetz PP1-8000 verkkoanalysaattori sisältää samat perusominaisuudet kuin Fluke 1735 sekä lisäksi siinä on sisäänrakennettu oskilloskooppi ja varmennettu UPS-sähkönsyöttö. (Fluke Corporation 2008.)



Kuva 63. Fluke 1735 Power Logger (Fluke Corporation 2008).

HP 8591E Spektrianalysaattori

Spektrianalysaattori on laite, joka ilmaisee tutkittavan signaalin spektrin eli kaikki amplitudikomponentit taajuuden funktiona. Pyyhkäisevä spektrianalysaattori voi mitata komponentit suoraan taajuustasossa, kun taas FFT spektrianalysaattori voi myös mitata signaalin aikatasossa ja laskea sen spektrin taajuustasossa. HP 8591E on laajakaistainen herkän vastaanottimen sisältävä analysaattori (kuva 64). Laite toimii superheterodyneperiaatteella eli se muuntaa korkeat useita gigahertsejä sisältävä taajuudet matalammille helpommin mitattavissa oleville taajuuksille. Vastaanotettu taajuusspektri pyyhkäistään hitaasti määrättyillä taajuuksilla, minkä jälkeen signaali muutetaan mitattaviksi logaritmisiksi DC-jännitetasoiksi. Tulokset näytetään analysaattorinäytöllä siten, että y-akselilla ovat signaalinvoimakkuustasot ja x-akselilla taajuus. (Agilent Technologies 2008.)



Kuva 64. HP 8591E Spektrianalysaattori (Agilent Technologies 2008).

Oskilloskooppi Tektronix THS730A

Oskilloskoopilla mitataan shunttivastuksen yli olevaa jännitettä, jotta saadaan laskettua todellinen virran arvo syötössä. Samalla voidaan tarkastella signaalin muotoa ajan suhteen sekä määrittää huippu- ja minimi-arvot sekä taajuus ja särö.

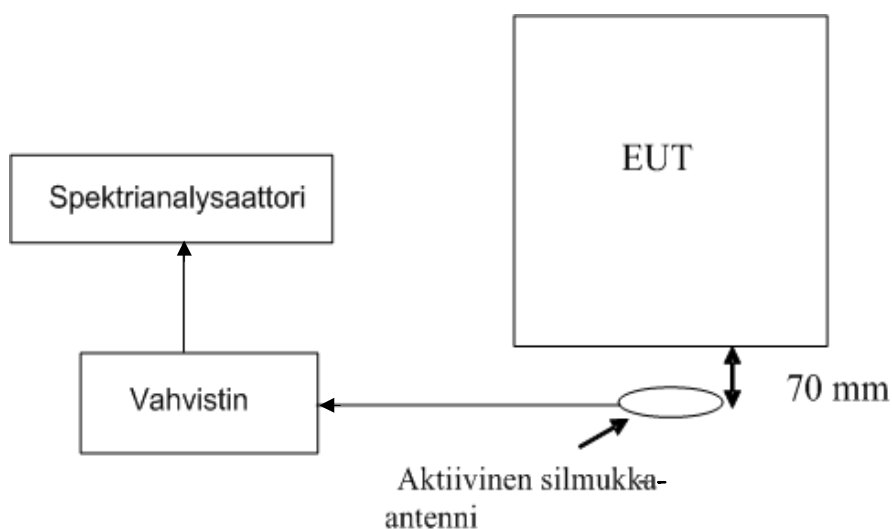
Keithley 2015, HP 34401A ja REF543 suojarahle

Digitaalisella yleismittarilla HP 34401A ja THD-analysoittorilla Keithley 2015 mitataan tehollähdemoduulin todellinen ulostulovirta, jotta saadaan verrannollisia mittaustuloksia suojarahleen mittaamiin arvoihin verrattuna. Mittaukset suoritettiin eri virran arvoilla, joista tarkemmin mittaustuloksia käsittelevässä kappaleessa. THD-analysoittorilla saatiin myös virran ja jännitteen 50 Hz:n perusaallon särökerroin eli THD. REF543-suojarahleestä katsottiin sen MIM-moduulilla näkemä virran arvo.

Seuraavissa kappaleissa käsitellään mittaustuloksia sekä säteilevien että johtuvien häiriöiden kannalta. Mittauksia tehtiin myös erilliselle tehollähdemoduulille eri sähkönsyötötavoilla, jotta tehollähdemoduulin häiriökestoisuus saataisiin selvitettyä. Sähkön laatua mitattaessa mitattiin lisäksi jakokeskuksen sähkön laatua, jotta saatiin vertailupohjaa testausasemien sähkönsyötön sähkön laatuun.

7.2. Säteilevien häiriöiden mittaukset

Mittauksia voidaan suorittaa joko antennilla tai käyttämällä absorboivaa virtasensoria. Mittausantenni voi olla lähikenttämittapää tai kaukomittauksiin tarkoitettu antenni. Mittauksissa taajuusalue oli 30 MHz–1GHz. Työssä suoritetuissa mittauksissa on käytetty lähikenttämittapää, joka antaa järjestelmän eri laitteiden häiriöpäästöt laitteesta sekä johdotuksesta koko järjestelmään. Kuvassa 65 on esitetty säteilevien häiriöpäästöjen mittaamenetelmä lähikentässä.



Kuva 65. Säteilevien häiriöiden lähikenttämittauksen periaatekuva.

Sähkömagneettisia häiriökenttiä mitattaessa käytettävä antenni on kalibroitava. IEC:n teknisessä julkaisussa CISPR 16-1 esitetään useita mahdollisia antennivaihtoehtoja (IEC 2005: 20). Antennitekijä (antenna factor) on otettava huomioon, jotta mitatusta jännitteestä saadaan laskettua sähkökenttä. Testausasemien mittauksissa on käytetty Hewlett-Packardin EMC-mittauksiin tarkoitettua kokonaisuutta, joka ottaa antennitekijän huomioon mittaustuloksissa, ja sisältää tarvittavan vahvistimen signaalille. Tulos saadaan suoraan spektrianalysaattorin näytölle tarkasteltavaksi. Taulukkoon 7 on koottu standardin EN55022 määrittelemät tyypilliset raja-arvot säteileville häiriöille.

Taulukko 7. Säteilevien häiriöiden tyypilliset raja-arvot (SFS-EN 2008b).

Taajuus [MHz]	Kvasihuippuarvo		Keskiarvo	
	Häiriöteho [dB(pW)]	Häiriökenttä [dB(uV/m)]	Häiriöteho [dB(pW)]	Häiriökenttä [dB(uV/m)]
30–230	45–55	30	35–45	
230–300	45–55	37	35–45	
300–1000	55	37	45	

7.2.1. Lopputestausasemien säteilevät häiriöpäästöt

Lopputestausasemista häiriöitä etsittiin mittaamalla jokaisesta laitteesta säteilemällä ympäristöön aiheutuvia häiriöpäästöjä. Mittauslaitteisto asetettiin mitattavan testausaseman viereen varsinaiselle testauspaikalle. Mittaukset on tehty lähikenttämittauksella, ja niiden tarkoitus on haarukoida suurimpia häiriöitä aiheuttavia järjestelmän

laitteita ja johdotuksia. Mittaustulokset ovat yksilöllisiä ja mittauspaikkaan sidottuja, koska laitteistoa oli tarkoitus testata omassa toimintaympäristössään.

Seuraavaksi käydään analysoiden läpi mittaustuloksia ja tutkitaan laitteiston ongelma-kohtia. Mittaustulosten taulukoihin on koottu merkittävimpiä häiriölähteitä mitatuissa testauslaitteistoissa. Spektrianalysaattori on poiminut lähikenttämittapäällä löydettyjä häiriöitä eri taajuuksilla ja voimakkuuksilla. Seuraavat taulukot 8–11 sisältävät mittaustuloksia lopputestausasemista.

Taulukko 8. Teho- ja vahvistinyksikön säteileviä häiriöpäästöjä lähikentässä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
36,144	55,7	49	107,2	100,5
86,325	47,2	41,4	98,7	92,9
56,838	50,5	44,4	102	95,9
869,114	34,2	28,4	85,7	79,9
899,138	34,3	28,1	85,8	79,6

Taulukko 9. Testausaseman releiden häiriöpäästöjä lähikentässä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,209	56	50,4	107,5	101,9
81,05	48,3	42	99,8	93,5

Taulukko 10. MIM-muuntajamoduulin testausadapterin häiriöpäästöjä lähikentässä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,381	56,4	50,3	107,9	101,8
73,507	49,3	43,1	100,8	94,6
91,963	46,3	40,4	97,8	91,9
92,204	46,9	40,3	98,4	91,8
129,764	44	37,9	95,5	89,4
149,725	43	37,4	94,5	88,9
160,893	43,1	36,5	94,6	88
171,147	42,8	36,2	94,3	87,7
178,386	41,8	35,8	93,3	87,3
280,196	37,8	31,5	89,3	83
374,167	34,5	28,6	86	80,1
421,794	35,2	29	86,7	80,5
431,148	35,5	29,2	87	80,7
566,668	35,6	29,6	87,1	81,1
919,629	33,3	26,9	84,8	78,4

Taulukko 11. RER 111-kommunikaationmoduulin häiriöpäästöjä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,754	56,8	50,2	108,3	101,7
425,479	35,4	29	86,9	80,5
430,736	35,6	29,1	87,1	80,6
434,991	36,3	29,2	87,8	80,7
465,584	36,5	29,9	88	81,4

Mittaustuloksista huomataan, että suurin määrä eri taajuuksilla olevia häiriöitä tulee testausadapterista, johon valmis relepaketti kiinnitetään. Teho- ja vahvistinyksiköstä mitatut häiriöpäästöt olivat pienemmällä taajuuksilla (3–100 MHz) melko suuret. Mittaustulokset on muutettu liitteessä 2 annetuilla kaavoilla dBuV/m:ksi.

7.2.2. Funktionaalisten moduulitestausasemien säteilevät häiriöpäästöt

Funktionaalista moduulitestausasemista häiriöitä etsittiin mittaamalla jokaisesta laitteesta säteilemällä ympäristöön aiheutuvia häiriöpäästöjä samalla periaatteella kuin lopputestausasemistakin. Laitteisto asetettiin mitattavan testausaseman viereen varsinaiselle testauspaikalle. Mittaukset on tehty lähikenttämittapöydällä, ja niiden tarkoitus on haa-

rukoida suurimpia häiriöitä aiheuttavia järjestelmän laitteita ja johdotuksia. Mittaustulokset ovat yksilöllisiä ja mittausta paikkaan sidottuja, koska laitteistoa oli tarkoitus testata omassa toimintaympäristössään. Seuraavat taulukot 12, 13 ja 14 sisältävät mittaustuloksia lopputestausasemista.

Taulukko 12. 24 V:n apujännitetehtolähteen säteileviä häiriöpäästöjä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,298	92,2	85,6	143,7	137,1
52,867	82,8	79,4	134,3	130,9
107,402	60,4	46,2	111,9	97,7
132,491	55,7	40,8	107,2	92,3

Taulukko 13. HP 6812A -vaihtojännitelähteen säteileviä häiriöpäästöjä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
52,512	57,1	51	108,6	102,5
93,894	55,7	54,1	107,2	105,6
30,736	57,1	51,5	108,6	103
431,976	43,4	40,8	94,9	92,3
431,994	43,9	40,6	95,4	92,1

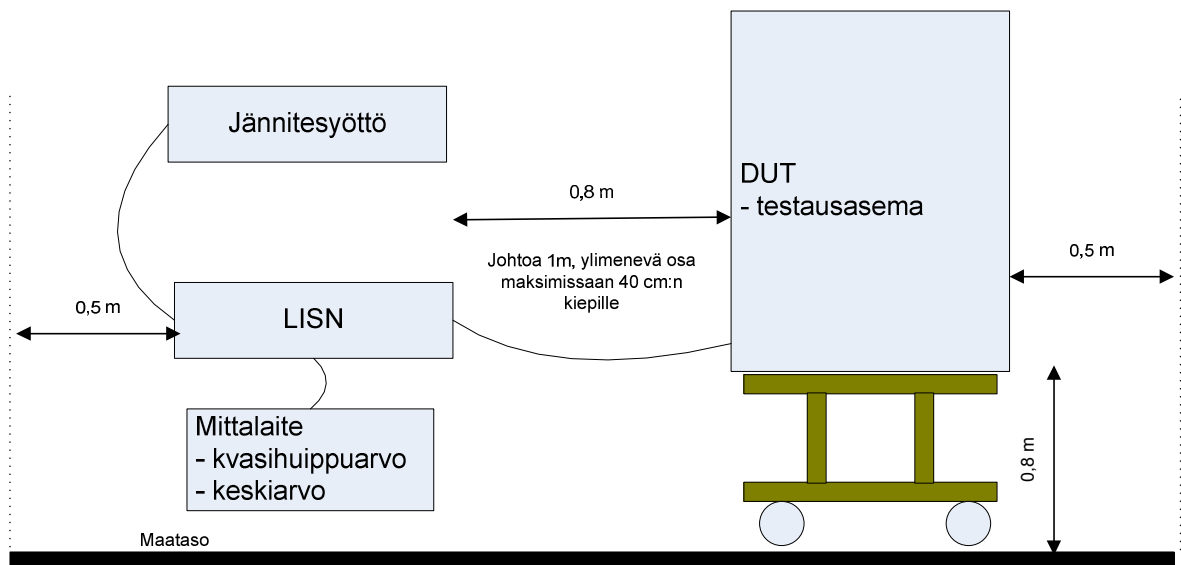
Taulukko 14. MIM-muuntajamo­duuliadapterin säteileviä häiriöpäästöjä mittauksen ollessa käynnissä.

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
35,997	63,8	54	115,3	105,5
300,001	49,7	51,4	101,2	102,9
300,603	50	49,4	101,5	100,9
350,008	44,6	42,4	96,1	93,9

Funktionaalista moduulitestausasemasta mitatut päästöt olivat suurempia monella eri taajuudella verrattuna lopputestausasemiin. Suurimmaksi häiriölähteeksi nousi DIN-kiskostossa kiinni oleva 24 V:n apujännitelähde. Se aiheutti melkein 140 dB μ V:n lähikenttähäiriöpäästöt ympäristöön noin 30 MHz:n taajuudella.

7.3. Johtuvien häiriöiden mittaukset

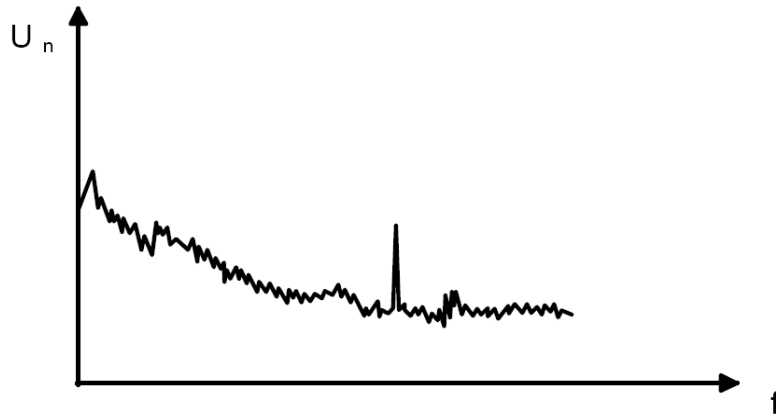
Häiriöjännite on laitteen omiin johtimiinsa aiheuttama häiriö. Mittauksissa häiriöjännitteen suuruus on määräävä tekijä, muotoon ei kiinnitetä huomiota. Mittauskohteena olivat laitteiden tehonsyöttöjohtimet. Kuvassa 66 on esitetty periaatekuva johtuvien häiriöiden mittaamisesta. Mittauksessa laitteiden johtuvia häiriöpäästöjä mitataan testausasemien laitteiden verkkojohtimista. Jännitesyöttö laitteille kytketään LISN (Line Impedance Stabilizing Network) eli keinoverkon kautta, joka stabiloi jakeluverkon impedanssin 50Ω :iin sekä suodattaa jännitteenjakeluverkon ulkopuolelta tulevia häiriöitä ja poistaa verkkotaajuuden komponentin. Spektrianalysaattori kiinnitetään keinoverkon koaksiaaliliittimiin suojatuilla johdoilla. Laitteiston etäisyydet pystysuorasta tasosta on oltava $0,5 \text{ m}$, minkä lisäksi mitattavan kohteen etäisyys mittalaitteisiin ja keinoverkkoon tulee olla $0,8 \text{ m}$.



Kuva 66. Johtuvien häiriöiden mittaaminen.

Testausjärjestelmästä etsittiin kuvan 67 mukaisia tyypillisiä johtuvia häiriöjännitteiden aiheuttamia piikkejä, jotka ilmenevät piikkinä jollakin tietyllä taajuudella. Vaakasuuntaisella x -akselilla on taajuus f ja pystysuuntaisella y -akselilla on häiriöjännite U_n . Kvasihuippuarvomittauksella varustetulla spektrianalysaattorilla saadaan ilmaistua häiriöjännitteen taajuus useimmin esiintyvien taajuuksien mukaan painotettuna. Mikäli häiriö-

signaalin toistotaajuus on yli 10 kHz, niin kvasihuippuarvo vastaa huippuarvoa. Alle 1 kHz:n toistotaajuuksilla kvasihuippuarvoilmaisimen vaste laskee jyrkästi.



Kuva 67. Tyypillinen johtuva häiriöjännitteen aiheuttama piikki jollakin tietyllä taajuudella.

Mittauksissa käytössä oleva yksikkö on dBuV ja taulukossa 15 on tyypilliset raja-arvot käytetyissä mittauksissa, jotka ovat huomattavan pieniä verrattuna laitteiston sietotesteissä käytettäviin tasoihin.

Taulukko 15. Tyypilliset raja-arvot häiriöjännitteelle (SFS-EN 2008b).

Taajuus [MHz]	Kvasihuippuarvo (QUASI PEAK) [dBuV]	Keskiarvo (AVERAGE) [dBuV]
0,003–0,009	ei määritelty	ei määritelty
0,009–0,15	89–66 (lin. taajuus log. arvo)	
0,15–0,50	66–56 (lin. taajuus log. Arvo)	59–46 (lin. Taajuus log. Arvo)
0,50–5	56	46
5–30	60	50

7.3.1. Lopputestausasemien johtuvia häiriöpäästöjä

Mittaukset tehtiin aikaisemmin kuvatulla laitteistolla, joka oli kalibroitu ja säädetty mitattamaan johtuvia häiriöpäästöjä. Laitteisto asetettiin mitattavan testausaseman viereen varsinaiselle testauspaikalle. Jokainen mitattava laite kiinnitettiin vuoronperään keino-

verkkoon (LISN). Johtuvien häiriöiden mittaustuloksia lopputestausasemista on esitetty taulukoissa 16, 17 ja 18.

Taulukko 16. ABB SPA-ZC -kommunikaatiomuuntimen johtuvia häiriöpäästöjä vaihejohtimessa.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
154	69,6	3,6	68,5	2,5
192	65,1	-0,9	64,1	-1,9
231	64,1	-1,9	61,8	-4,2
268	63,8	-2,2	60,2	-5,8
269	63,9	-2,1	60,4	-5,6
538	60,6	0,6	57,5	-2,5

Taulukko 17. HP 33120A -funktiogeneraattorin johtuvia häiriöpäästöjä vaihejohtimessa.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
151	42,2	-23,8	34,9	-31,1
152	42,5	-23,5	35	-31
163	41,8	-24,2	34,9	-31,1
174	42,5	-23,5	33,9	-32,2
181	41,6	-24,4	33,3	-32,7
664	38,7	-21,3	34,9	-25,1

Taulukko 18. Teho- ja vahvistinyksiköstä mitattuja johtuvia häiriöpäästöjä lähikentässä.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
180	62	-4	57,7	-8,3
209	61,7	-4,3	53,8	-12,2
229	61,9	-4,1	54,4	-11,6
236	62,7	-3,3	53,6	-12,4
355	56,5	-9,4	53,1	-12,9
358	57,5	-8,5	53,7	-12,3
371	51,9	-14,2	42,9	-23,1
419	57,4	-8,6	50,4	-15,6
460	57,6	-8,5	50,4	-14,4
476	58,9	-7,1	53,7	-12,4
520	58,2	-1,8	53,2	-6,8
520	57	-3	53,3	-6,8
535	53,8	-6,2	51,4	-8,6
537	53	-7	50,1	-9,9
576	54,1	-5,9	52,3	-7,7
577	54,7	-5,3	52,1	-7,9
595	55,4	-4,6	48,6	-11,4
634	54,9	-5,1	51,6	-8,4
654	50,8	-9,2	47,2	-12,8
692	51,3	-8,7	50	-10

Johtuvien häiriöiden mittaustuloksia lopputestausasemista tutkittaessa huomattiin, että suurimmat häiriöpäästöt testausasemaa syöttävään sähköverkkoon aiheuttivat teho- ja vahvistinyksikkö ja ABB SPA-ZC -kommunikaatiomuunnin. Kommunikaatiomuuntimen tapauksessa mittalaitteeseen asetettu häiriöpäästöraja ylittyi taajuudella 154 kHz. Muiden mitattujen laitteiden tapauksessa jäätin alle häiriöpäästörajojen.

7.3.2. Funktionaalisten moduulitestausasemien johtuvia häiriöpäästöjä

Mittaukset tehtiin aikaisemmin kuvatulla laitteistolla, joka oli kalibroitu ja säädetty mitattavaan johtuvia häiriöpäästöjä. Laitteisto asetettiin mitattavan testausaseman viereen varsinaiselle testauspaikalle. Jokainen mitattava laite kiinnitettiin vuoronperään keinoverkkoon (LISN). Johtuvien häiriöiden mittaustuloksia funktionaalisista moduulitestausasemista on esitetty taulukoissa 19–23.

Taulukko 19. Teholähteen HP 6627A johtuvia häiriöpäästöjä.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
527	44,8	-15,3	42,9	-17,1
636	42,4	-17,6	37,5	-22,5
663	42,5	-17,5	38,6	-21,4

Taulukko 20. Teho- ja vahvistinyksikön IL power johtuvia häiriöpäästöjä.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
185	59,7	-6,3	58,1	-7,9
247	56,5	-9,5	55,3	-10,7
307	54,8	-11,2	53,7	-12,3
308	55,2	-10,8	54,1	-11,9
370	57,2	-8,8	54,6	-11,4
371	55,7	-10,3	55,1	-10,9
432	53	-13	54	-12
433	53,6	-12,4	52,5	-13,5
470	49,7	-16,3	46,2	-19,8
494	55,5	-10,5	54,8	-11,9
528	49,7	-10,3	52,3	-7,7
556	53,8	-6,2	53,4	-6,6
589	53,3	-6,7	45,5	-14,5
618	52	-8	51,1	-8,9
645	49,2	-10,8	48,5	-11,6
680	51,1	-8,9	52,7	-7,3
704	47,8	-12,2	46,5	-13,5

Taulukko 21. ABB RER 111C kommunikaatiomoduli johtuvia häiriöpäästöjä.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
235	61,9	-4,1	60,5	-5,5
287	69,5	3,5	59,6	-6,4
297	68,7	2,7	65,2	-0,8
467	58,8	-7,2	56,7	-9,3
525	64,5	4,5	62,3	2,3
531	66,8	6,8	63,7	3,7
584	57,2	-2,8	52,7	-7,3
621	66,2	6,3	60,3	0,3
656	59,4	-0,6	54,5	-5,5
681	59,1	-0,9	55,9	-4,1

Taulukko 22. 24 V apujännitelähteen johtuvia häiriöpäästöjä.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
324	59,1	-6,9	57,7	-8,3
531	59,8	-0,2	57,2	-2,8
545	57,5	-2,5	53,6	-6,4
645	64	4	62,7	2,7
646	63,9	3,9	62,8	2,8

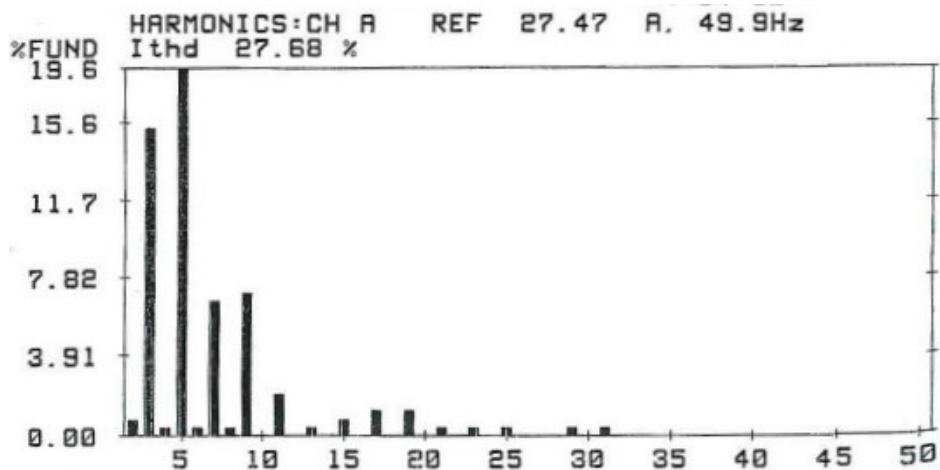
Taulukko 23. 24 V jännitelähteen johtuvia häiriöpäästöjä.

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
567	58,6	-1,4	54,8	-5,2
664	66,7	6,7	64,5	4,5
670	65,8	5,8	62,6	2,6

Johtuvien häiriöiden mittaustuloksia funktionaalisista moduulitestausasemista tutkittaessa huomattiin, että suurimmat häiriöpäästöt testausasemaa syöttävään sähköverkkoon aiheuttivat 24 V:n apujännitelähde, 24 V:n jännitelähde ja ABB RER 111 -LON-kommunikaatiomoduli. Apujännitelähteen mittauksissa mittalaitteeseen asetettu häiriöpäästöraja ylittyi taajuuksilla 664 ja 670 kHz. Kommunikaatiomodulin tapauksessa päästörajat ylitettiin taajuuksilla 525, 531 ja 621 kHz. 24 V apujännitelähteen mittauksissa ylitykset tapahtuivat taajuuksilla 664 ja 670 kHz. Muiden laitteiden tapauksessa jäätin alle häiriöpäästörajojen.

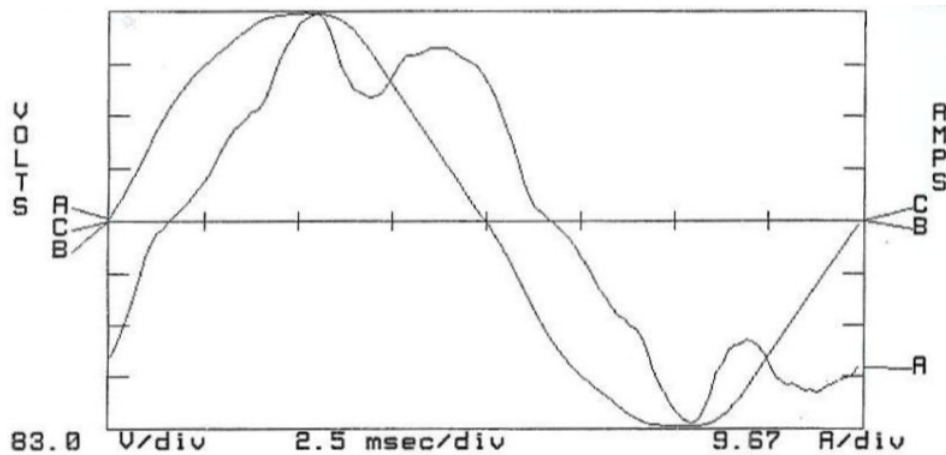
7.4. Sähkön laatu

Sähkönjakeluverkon mittauksia suoritettiin yhdestä jakokeskuksesta, joka syöttää tuotantotestaukseen sähköä, sekä testausasemien sähkönsyötöstä. Jännitesärö jakokeskuksessa oli kohtuullinen, maksimissaan 3,2 %, kun hyvän raja on < 3 %. Kuvassa 68 ovat virran yliaallot jakokeskuksessa (Dranetz PP1-8000 analysaattorilla mitatut), mistä nähdään että 3., 5., 7. ja 9. yliaalto ovat vallitsevia. Yliaalloista 5., jonka suuruus on 19,6 %, tulee verkosta ja muut kuormista. Vaiheessa L1 esiintyy virtapiikkejä, jotka ovat suuruudeltaan >1 kA. Suurimmat näistä esiintyvät aina virran nollakohdan lähellä. Vaiheessa L2 esiintyy jännitepiikkejä, jotka ovat suuruudeltaan 350 V. Nollajohdosta mitattiin melkein 40 A:n virta, josta n. 30 A tulee 3. yliaallosta.



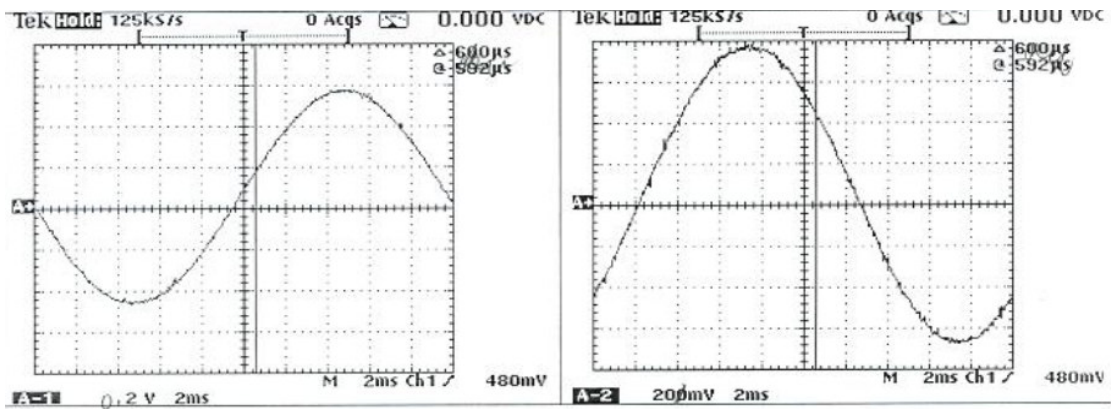
Kuva 68. Virran harmoniset yliaaltokomponentit jakokeskuksessa.

Jakokeskuksen virran ja jännitteen kuvaajat ovat kuvassa 69 (Dranetz PP1-8000 analysaattorilla mitatut). Kuvasta nähdään jännitteen olevan melko sinimuotoista, mutta virran säröytyneempää ja sisältävän enemmän yliaaltokomponentteja kuten edellä todettiin.

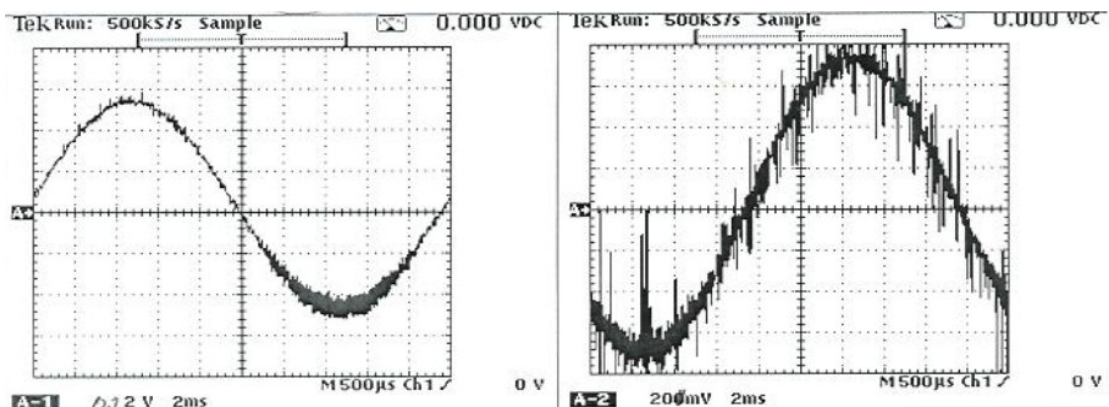


Kuva 69. Jakokeskuksen virran ja jännitteen mittaus vaiheesta L1 (Seitamaa 2008).

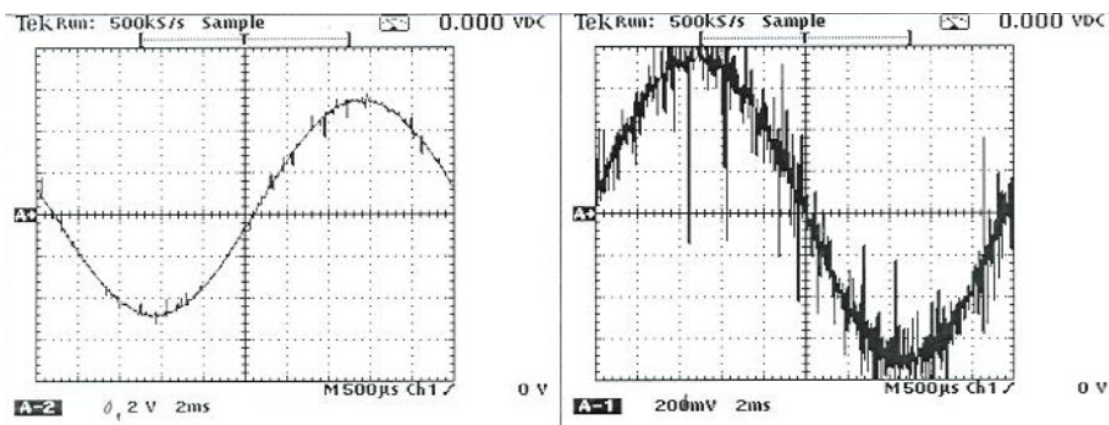
Sähkön laadun tutkimista varten mittauksia oskilloskoopilla tehtiin lisäksi myös toisessa tuotantotilassa, laboratoriossa ja varsinaisella testauspaikalla. Seuraavat kuvat 70, 71 ja 72 havainnollistavat sähkön laadun vaihtelua eri mittauspaikoilla. Vasemmalla puolella on oskilloskoopikuva teholähdemoduulin (Efore PA-100) mittauslähdestä ja oikealla puolella puolestaan 5 Ω :n mittausvastuksen yli oleva jännite.



Kuva 70. ABB Oy Motorsissa mitattu sähkön laatu (Seitamaa 2008).



Kuva 71. Testaussunnitteluosaston laboratoriossa mitattu sähkön laatu (Seitamaa 2008).



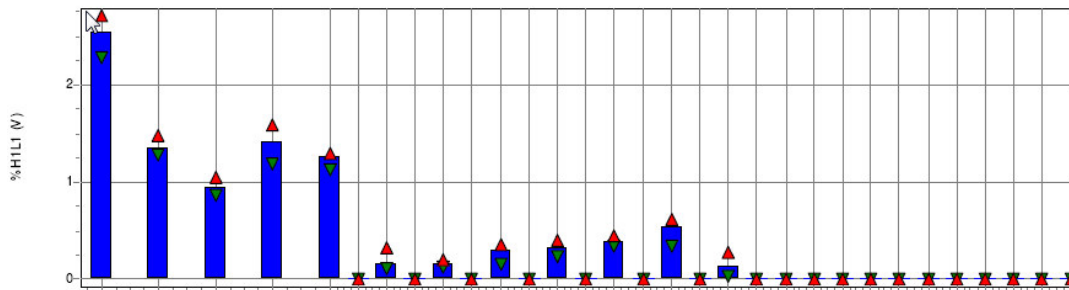
Kuva 72. Suojareleen testauspaikalla mitattu sähkön laatu (Seitamaa 2008).

Kuvista havaitaan, että sähkön laatu poikkeaa paikasta riippuen toisistaan. Käyrän säröisyydestä voidaan päätellä kuinka häiriöistä sähkö on, eli miten paljon jännitteeseen on kytkeytynyt häiriöitä ulkoisesti ja johtimien kautta sisäisesti. Mittausten perusteella sähkönlaadultaan huonoimmaksi osoittautui testauspaikka tuotannontestauksessa. Paras tulos saatiin ABB Oy Motorsin tiloissa, missä sähkön laatu osoittautui selvästi parhaimmaksi.

7.4.1. Sähkön laatu lopputestauspaikalla

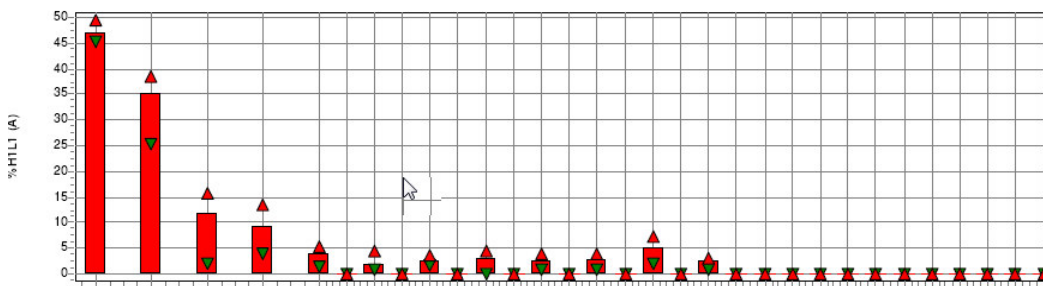
Kuvassa 73 nähdään lopputestausaseman jännitteen yliaaltopitoisuus. Perusaalloon (50 Hz) särö on 3,5 % (Fluke 1735 -analysointilaitteella mitattuna). Seuraavaksi voimakkaimpi-

na erottuvat 3., 5., 7. ja 9. harmoninen yliaalto. Niiden arvot vaihtelevat keskimäärin 1–1,5 %.



Kuva 73. Lopputestausaseman jännitteen THD.

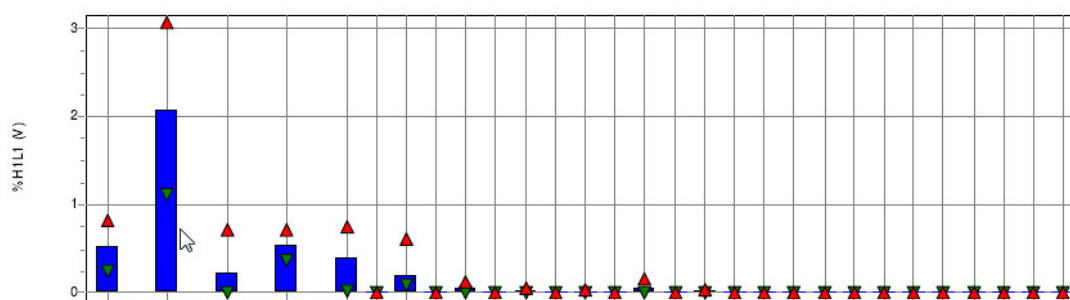
Virran yliaaltopitoisuus lopputestausasemassa nähdään kuvassa 74 (Fluke 1735 -analysointilaitteella mitattu). Tärkeimpänä komponenttina erottuu perusaalto (50 Hz) 46 % osuudella. Seuraavaksi suurin harmoninen on 3. yliaalto, jonka suuruus on noin 35 %. Viidennestä yliaallosta eteenpäin yliaaltojen osuus on noin 3–12 %.



Kuva 74. Lopputestausaseman virran THD.

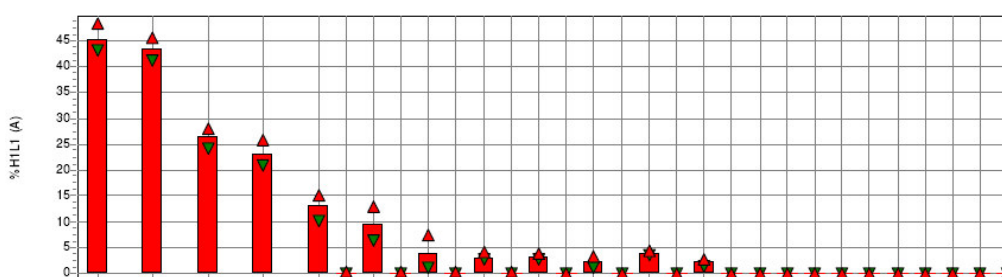
7.4.2. Sähköverkon laatu funktionaalisella moduulitestauspaikalla

Kuvassa 75 nähdään funktionaalisen moduulitestausaseman jännitteen harmoninen särö (Fluke 1735 -analysointilaitteella mitattuna). Kuvasta voidaan huomata, että 3. yliaalto (150 Hz) on vallitseva komponentti muiden jäädessä alle 0,6 %:n.



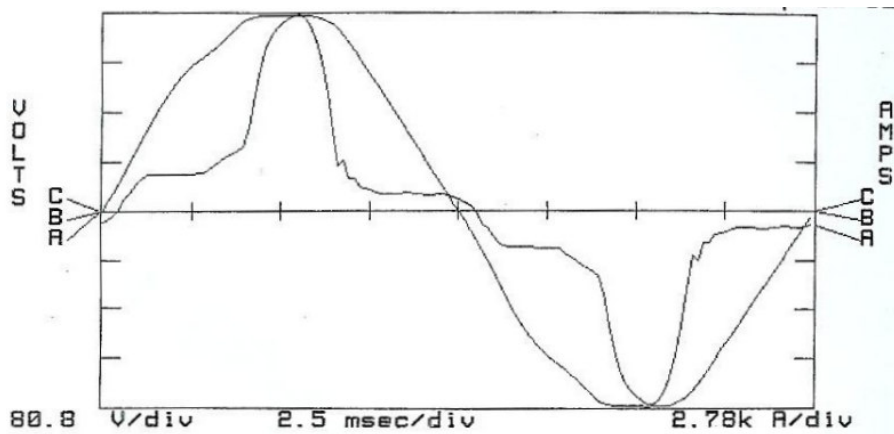
Kuva 75. Funktionaalisen moduulitestausaseman jännitteen THD.

Funktionaalisen testausaseman virran harmonista säröä tutkittaessa (kuva 76, Fluke 1735 -analysointilaitteella mitattuna) huomataan, että 3. yliaalto on melkein perusaallon suuruinen (n. 44%). Seuraavat yliaallot 5.:stä eteenpäin vaimenevat tasaisesti 26 prosentista alle viiteen prosenttiin.



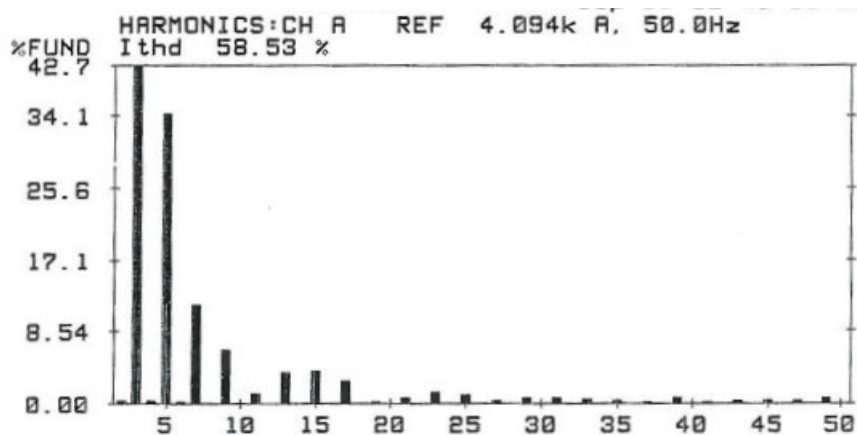
Kuva 76. Funktionaalisen moduulitestausaseman virran THD.

Moduulikorttien testausaseman sähkönsyötön virran ja jännitteen kuvaajat ovat kuvassa 77 (Dranetz PP1-8000 analysointilaitteella mitattuna). Kuvasta nähdään jännitteen olevan melko sinimuotoista, mutta virran huomattavasti säröytyneempää ja sisältävän enemmän yliaaltokomponentteja kuin jakokeskuksen sähkönsyötössä.



Kuva 77. Moduulikorttien testausaseman sähkönsyöttö.

Moduulikorttien testausaseman virran harmoniset komponentit nähdään kuvasta 78 (Dranetz PP1-8000 analysaattorilla mitattuna), mitä voidaan verrata Fkuke 1735- analysaattorilla mitattuihin harmoonisiin komponentteihin. Hallitsevat komponentit ovat 3., 5. ja 7. yliaalto. Kolmas yliaalto on suuruudeltaan 42,7 %.



Kuva 78. Virran harmoniset komponentit testausaseman sähkönsyötössä.

7.5. Teho- ja vahvistinyksikön mittaukset

Teho- ja vahvistinyksikön mittaamisen tarkoituksena oli havaita mahdollisia häiriöitä tai mittauksen epätarkkuuksia. Teho- ja vahvistinyksikkö oli mittauskohteena erityisen tärkeä sen merkittävän roolin vuoksi. Mittaukset suunniteltiin niin, että niiden avulla kyet-

täisiin toteamaan virranmittauksen tarkkuus ja mahdolliset indusoituneet häiriöt. Liitteessä 1 nähdään Pertti Seitamaan (2008a) mittauksia teho- ja vahvistinyksiköstä aikaisemmista tutkimuksista. Tuloksissa havaittiin selviä poikkeamia pienillä virroilla (0,015 A). Mittaustarkkuus kärsii, koska mittaus suoritetaan laajalla virta-alueella useassa eri pisteessä 0,015 A:sta 1 A:iin.

Mittalaitteilta vaadittavat parametrit on esitetty taulukoissa 24, 25 ja 26. Mittauslaitteiden vaatimukset ovat melko tiukat ja vaativat erityisjärjestelyjä testausasemaan. Vaatimukset on määritellyt tuotekehitysosasto.

Taulukko 24. Offset-parametrin mittauksen tarkkuusvaatimukset mittalaitteelta.

Sisääntulon tyyppi	Kalibrointipiste	Kalibrointimittalaitteen tarkkuus
CT (1 A)	0	0,027%*I _n
VT (100 V)	0	0,027%*U _n

Taulukko 25. Amplitudin mittauksen tarkkuusvaatimukset mittalaitteelta.

Sisääntulon tyyppi	Kalibrointipiste	Kalibrointimittalaitteen tarkkuus
CT (1 A)	1 %	0.18%
CT (1 A)	100 %	0.045 %
VT (100 V)	100 %	0.045 %

Taulukko 26. Vaiheen mittauksen tarkkuusvaatimukset mittalaitteelta.

Sisääntulon tyyppi	Kalibrointipiste	Kalibrointimittalaitteen tarkkuus
CT (1 A)	100 %	0.05 deg
VT (100 V)	100 %	0.05 deg

7.6. Tuotannon testauksen parannuskeinoja

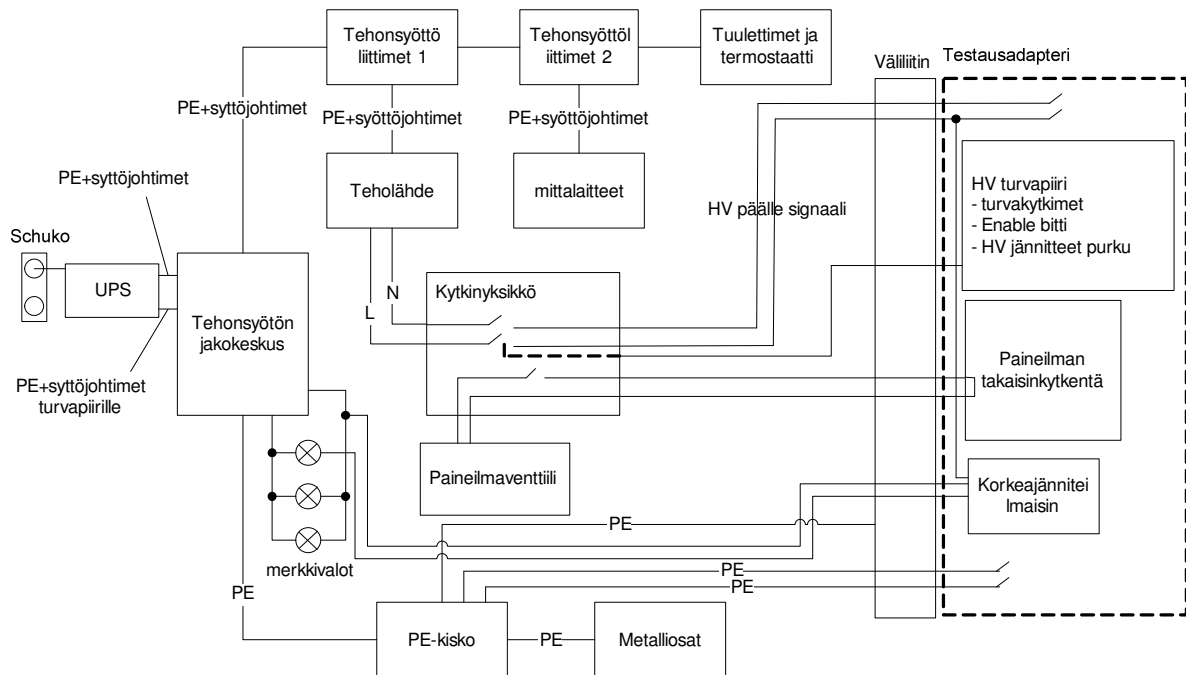
Mittaustuloksia tulkittaessa ja laitteiston tarkkuusvaatimukset huomioon ottaen huomattiin epätarkkuutta ilmenevän aina tietyillä kanavilla. Testauksesta läpimenneiden osuutta voitaisiin parantaa pienentämällä testausaseman virtakanavien mittaustarkkuusvaati-

muksia n. 0,3 %. Tällöin testauksen saantoa kyettäisiin parantamaan tarkkuuden kärsimättä juuri ollenkaan. Tällöin on kuitenkin varmistettava, että standardien mukaiset vaatimukset suoja-alueiden testauksessa täyttyvät.

Mittausprosessi tulisi muuttua sellaiseksi, että varsinainen mittaus tapahtuu samalla hetkellä sekä mittalaitteella että CPU-moduulilla. Tämä olisi toteutettava siten, että CPU-moduuli ja mittalaitteet lukisivat tarkalleen samalla ajanhetkellä tapahtunutta mittauskanavan vaiheen mittauksia, ja antaisivat täsmällisen tuloksen tästä. Tällöin voitaisiin välttää mittaussignaalin mahdollinen muuttuminen kahden eri mittauksen välillä, mikä voisi aiheuttaa esimerkiksi häiriöt ja signaalin vääristyminen tai ryömiminen. Mittausketjussa olevat turhat analogiset komponentit tulisi poistaa, jotta ne eivät aiheuta signaaliin turhaa vääristymistä.

Maadoitukset ja tehonsyöttö

Tehonsyötön ja maadoitusten eräs toteuttamistapa on esitetty kuvassa 79. Tehonsyöttö testausasemalle muodostetaan UPS-laitteen kautta, joka mahdollistaa tilapäisen sähkönsyötön sähkökatkoksen aikana. Se mahdollistaa myös galvaanisen erotuksen sähkönsyöttöverkosta siten, että häiriöiden vaikutus on mahdollisimman pieni. Sähkönsyöttö jaetaan tämän jälkeen erikseen mittalaitteille ja tehonsyöttölaitteille sekä merkkivaloille ja muille tarvittaville oheislaitteille. Suojamaadoitus toteutetaan maadoittamalla kaikkien laitteiden rungot yhteiseen kiskoon ja kytkemällä tämä testausaseman PE-kiskoon (suojamaadoitus).



Kuva 79. Suojamaadoitusten ja tehonsyötön toteuttaminen mittausjärjestelmässä.

Maadoitukset tulisi kytkeä päämaadoituskiskosta tuotuun häiriöttömään TE-maadoitukseen. Lisäksi testausaseman kaapeleiden maadoitusten tulee olla tähtimäisiä. Kaikki johtavat osat tulee maadoittaa. Kaapeliläpiviennit kiinnitetään ruuveilla, ja käytetään vain metallisia laippoja. Oivissa on käytettävä johtavia EMC-tiivisteitä. Ohjauksyköt koteloidaan metallikoteloon ja kiinnitetään huolellisesti asennusalustaan, jotta häiriösuojaus toteutuu koteloinnin osalta riittävästi. Testausaseman syötön suojamaadoitus ja muut maadoitukset (TE) pitäisi sijoittaa erilleen toisistaan sähkömagneettisesti kytkeytyvien häiriöiden minimoimiseksi.

Verhoiluosien maadoitus runkorakenteisiin tehdään maalaamattoman metalli-metalli kosketuspinnan kautta, ja tarvittaessa käytetään EMC-tiivistettä. Kaapelin läpivienneissä käytetään suojavaipan 360° maadoittavaa tiivistettä tai johtavaa sukkaa. Kaikille tasajännitereleiden keloille asennetaan varistori tai diodi. (Mardiguian 1999: 238–244.)

Reititys tehdään lähellä asennuslevyä välttämällä ilmassa roikkuvia johtimia. Saman virtapiirin meno- ja paluujohtimien reitit on sijoitettava lähelle toisiaan. Kierrettyjä johdinpareja käytetään aina kun mahdollista. Maadoitusjohtimien tulee olla mahdollisimman

lyhyitä. Irrallisia kytkemättömiä johtimia ei saa jäädä laitteistoon. Kaapelissa oleva ylimääräinen kytkemättä jäävä johdin tulisi kytkeä kaapin runkorakenteisiin. Ohjausvirtapiirien (24 V) reitit tulee suunnitella niin että ne kulkevat mahdollisimman kaukana samansuuntaisista tehonsyöttöjohtimista (kuten 230 VAC). (Mardiguian 1999: 225, 257.)

Ohjaus- tai näyttöpaneelin kaapelointi tehdään suojatulla kaapelilla. Signaali tai ohjauskaapeleille suunnitellaan reitit, jotka eivät kulje suurjännitteisten johtimien lähellä. Ulkoisen ohjauskaapelin yhteinen suojavaippa jatketaan katkeamattomana ohjauspiiriin kytkentäpisteen läheisyyteen, jossa vaippa maadoitetaan asennuslevyyn. Maadoitus tehdään kuitenkin myös läpivientikohdassa.

Kalibrointi

Tuotekehityksen laboratoriotiloissa manuaalisesti suoritettut kalibroinnit poikkeavat tuotannossa syntyneistä kalibrointiparametrien arvoista. Eroja löytyy erityisesti PGA ja CPU offset-mittauksissa. Tuotannossa käytetyn digitaalisen yleismittarin vaihtojännitteen mittaustarkkuus kalibrointijännitteessä 300 mV_{RMS} on 0,117 %. Marginaalia mittauksessa pitäisi olla enemmän, koska kalibroinnin ryömimisen lämpötilan muuttuessa sekä korttien vanhenemisen vuoksi syntyy epätarkkuutta mittauksiin. Sovitusmuuntaja on suurin epätarkkuuden lähde kokonaisen suojareleen näkökulmasta. Tästä syystä CPU-moduulikortin mittaustarkkuus saisi olla reilusti alle sen, mitä kokonaiselle suojareleelle luvataan. Laitteen on täytettävä luvattu mittaustarkkuus usean vuoden kuluttua. Luvattu mittaustarkkuus voi olla esimerkiksi 1 % nimellisestä arvosta tai mitta-arvosta.

Suojaerotusmuuntajan kytkeminen mittausketjuun voi olla merkittävä parannus, koska signaaligeneraattori ja digitaalinen yleismittari tulisi erottaa suojareleen käyttöjännitteestä. Sähköverkon maahäiriöt voivat kiertää silmukassa CPU-korttien differentiaaliin mittaustuloon. Eräs ongelma on myös digitaalisella yleismittarilla mitattaessa laajalla taajuuskaistalla mitatut RMS-arvot, koska tällöin tulisi tuottaa mahdollisimman kohinattomat analogiasignaalit.

Sähkön laatu

Sähkön laadun ongelmiin ei ole yhtä yleispätevää ratkaisua. Muuttujia ovat paikallisen syöttötehon laatu, asennettujen kuormien tyyppi ja laitteiden herkkyys. Sähköverkon sähkönsyöttöpisteillä on merkitystä mitä alueita kustakin sähkökaapista on syötetty. Esimerkiksi toimistossa olevat PC:t ja putkivalaistukset voivat aiheuttaa yliaalloja verkkoon. Yliaallot voivat summautua maapiiriin ja voivat kytkeytyä sitä kautta tuotannon laitteisiin. Yleensä sähkötekniikan yrityksillä on jonkinlainen käsitys sähkön laadusta, ja monet ovat jo ottaneet käyttöön jonkin ratkaisun.

Sähköammattilaiset (urakoitsijat ja suunnittelijat) voivat kuitenkin vaikuttaa asiaan ratkaisevasti, jos heillä on aiheesta yksityiskohtaista ja kattavaa tietoa. Mittaustulosten perusteella sähkönsyöttöön tulisi tehdä muutoksia tai uudistaa se kokonaan. Sähköammattilaiset voivat myös ehdottaa optimaalista ratkaisujen yhdistelmää, joka on räätälöity paikallisiin olosuhteisiin, jonka avulla saadaan toteutukseltaan edullinen ja tehokas häiriötön ratkaisu.

8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityössä toteutettiin RED 500 -sarjan suojarleen testauksen häiriömittaukset, joiden tuloksena saatiin tietoa testauksen laitteiston sähkömagneettisista häiriöistä. Mittaustulosten perusteella voidaan kehittää entistä häiriösietoisempia ja vähemmän sähkömagneettisia häiriöitä tuottavia mittaussjärjestelmiä seuraavien sukupolvien laitteille.

Mittauksia tehtiin ABB Oy:n sähköjakeluautomaatioyksikön tuotantotiloissa, missä tuotannotestauslaitteisto sijaitsee. Mittaukset tehtiin pääasiassa normaaliolosuhteissa tuotannon testauksen toimiessa normaalisti, ja ne suoritettiin koko testauslaitteistolle sekä erillisille laitteille, joissa häiriöiden vaikutus mittaustulokseen sekä varsinaiseen testaustulokseen katsottiin olevan merkittävä. Mittaukset on tehty voimassaolevien standardien mukaisesti, mutta siten että ne eivät täytä vaatimuksia testausympäristön suhteen.

Mittaustulosten perusteella laitteista mitatut säteilevien ja johtuvien häiriöiden päästörajat olivat sen verran vähäiset useimmissa tapauksissa, että niiden vaikutus vierekkäisiin laitteisiin ja moduuleihin ei ole merkittävää. Teholähteitä mitattaessa havaittiin kuitenkin epätarkkuutta ja vaihtelua tuloksissa. Tärkeimmäksi mittaustuloksiin vaikuttavaksi tekijäksi todettiin mittaussmenetelmä ja sen tiukat hyväksymis- ja hylkäämisrajat. Mittausketju olisi myös toteutettava siten, että mittaushetki olisi yhtenevä sekä CPU- että MIM-moduulin osalta.

Uusien testausjärjestelmien nopeammat prosessorinopeudet voivat vaikuttaa häiriöpäästöihin tulevaisuudessa. Tällöin kotelointiratkaisut ovat merkittävät, ja vaikuttavat kokonaisjärjestelmään. Maadoittaminen on erittäin tärkeää helposti häiriintyviä signaaleja sisältävissä järjestelmissä. Moduulien ja suojarleen testaaminen mahdollisimman luotettavasti asettaa haasteita. Parhaat tulokset saavutetaan, kun vähennetään testaamisen monimutkaisuutta, mittaamiseen käytettävää aikaa ja kustannuksia. Paras mahdollinen toteutustapa laitteistolle on sellainen, jossa erillisiä testejä ei tarvita ja testaus voitaisiin hoitaa yhdellä kertaa. Tällöin säästettäisiin myös tuotannon resursseja muihin tuotantoliiketoimintaan tehtäviin.

Uusien tuotesukupolvien testausjärjestelmien suunnittelussa on otettava huomioon laitteiden häiriöalttius sekä ympäristön asettamat vaatimukset. Tulevaisuuden testauslaitteistoja suunniteltaessa on paneuduttava häiriöpäästöihin jo varhaisessa suunnitteluvaiheessa, ja pyrittävä minimoimaan niiden häiriövaikutus kokonaisjärjestelmään. On myös arvioitava tulisiko suunnitelluille testausasemille suorittaa häiriötestejä jo varhain suunnitteluvaiheessa.

LÄHDELUETTELO

ABB TTT-käsikirja (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 9. painos. 626 s.

ABB Ostajan opas (2005). *Kennoterminaali REF 541,543 ja 545*. 72 s.

Agilent Technologies (2008). *8591E Portable Spectrum Analyzer*. [online] [siteerattu 10.4.2008] Saatavilla World Wide Webistä:
<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=US&lc=eng&ckey=1000002147:epsg:pro&nid=-536902970.536881806.00&id=1000002147:epsg:pro>

Alanen R. & Hätönen H. (2006). *Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State-of-art selvitys*. VTT tutkimusprojekti. 84 s. ISBN 951-38-6604-1

Eskelinen A. (1994). *VXI-pohjaisen funktionaalisen testiaseman suunnittelu*. Insinööri-työ. Vaasan teknillinen oppilaitos. Sähköosasto Vaasa 1994. 54 s.

Fallström K., Haapalinna A., Häkkinen E. & Kärhä P. (1997), *Häiriökysymykset; häiriöt mittauksissa*. Saatavilla World Wide webistä: <http://metrology.hut.fi/courses/S-108.3020/haimit.pdf>

Fluke Corporation (2008). *Fluke 1735 Three-Phase Power Logger*. [online] [Siteerattu 10.4.2008] Saatavilla World Wide Webistä:
<http://us.fluke.com/usen/products/Fluke+1735.htm?trck=codewatch>

Gustafsson, J. & Reitmaa, I. (1996), *EMC-, vianehkäisy- ja häiriöntorjuntatekniikka*. 2. painos. Helsinki: Hakapaino. 176 s. ISBN 951-672-228-8

Hewlett-Packard (1997). *Operating manual – System DC Power Supplies HP Models 6621A, 6622A, 6623A, 6624A And 6627A*. Moniste. U.S.A.:Hewlett Packard.

Hewlett-Packard (1998). *User's Guide – AC Power Solutions HP Models 6811B,*

6812B and 6813B. Moniste. Santa Clara. U.S.A:Hewlett Packard.

IEC (2005). *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - CISPR 16-4-1*. Tekninen julkaisu. 82 s.

Lehtio A. (2007). *EMC sähkömagneettinen yhteensopivuus*. Satakunnan ammattikorkeakoulu. [online] [siteerattu 13.3.2008] Saatavilla World Wide webistä: <http://www.tp.spt.fi/~salabra/>.

Leskinen, P. (2004). *Laitteisto termoelementtien epähomogenisuuden mittaukseen*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 71 s.

Mardiguian, M. (1999), *EMI troubleshooting techniques*. 1. painos. New York etc.: McGraw-Hill Companies Inc. 301 s.

Mawdsley D. (2000). *Innovations in EMC Radiated Emissions Measurements*. EE-Evaluation Engineering. [verkkojulkaisu] [siteerattu 15.4.2008] Osoitteessa: <http://archive.evaluationengineering.com/archive/articles/0900emc.htm>.

Montrose I. M. & Nakauchi E. M. (2004). *Testing for EMC Compliance*. 1. painos. John Wiley & Sons Inc. 460 s.

Mörsky J. (1992). *Relesuojaustekniikka*. 2. painos Hämeenlinna: Otatieto 1993

Niemelä P. (2002). *Työ 4: Tietokoneavusteinen mittaaminen ja signaalinkäsittely*. Oulun yliopisto. 22 s.

Ott, H. W. (1988). *Noise reduction techniques in electronic systems*, 2. painos. New York etc.: John Wiley & Sons. 426 s.

SFS-EN (2008a). *SFS-EN 50160: Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet*. Standardi. 35 s.

- SFS-EN (2008b). *SFS-EN 55022: Information technology equipment –Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurements*. Standardi.
- Seitamaa, P. (2008a). Insinööri; Testaussuunnittelija. Haastattelut 12.3.2008 ja 16.4.2008. Haastattelijana Jani Vitikka. Muistiinpanot haastattelijalla.
- Seitamaa, P. (2008b). Insinööri; Testaussuunnittelija. *Tuotannon testauksen ensisääntö tulosten arviointi*. Materiaali Jani Vitikalla.
- Siivonen K. (2007). *Sähköaseman apusähköjärjestelmät*. Insinööriyö, Tampereen ammattikorkeakoulu. 39 s.
- Sähkötieto ry (1997), *EMC ja rakennusten sähkötekniikka*. 1.painos. Tampere: Tammer-Paino Oy. 198 s.
- Talonen M. (2005). *RED 500 –testausaseman toimintakuntauisuuden testaaminen*. Insinööriyö. Stadia, Helsingin ammattikorkeakoulu. 67 s.
- Tektronix (1994) *VX4801 Programmable Digital I/O Module*. Second edition (1991). Moniste. Wilsonville. U.S.A: Tektronix.
- Tektronix (1995a). *VX4237 Digital Multimeter Module*. Moniste. Wilsonville. U.S.A: Tektronix.
- Tektronix (1995b). *VX4330 120-Channel Relay Multiplexer Module*. Moniste. Wilsonville. U.S.A: Tektronix.
- Toprudder EMC (2008). *EMC Related Formulae*. [online] [Siteerattu 10.4.2008] Saatavilla World Wide Webistä: <http://emc.toprudder.com/formulas2.pdf>.
- Tuomisto, F. (2007). *Luento 9*. [online] [Siteerattu 16.3.2008] Saatavilla World Wide Webistä: www.fyslab.hut.fi/kurssit/Tfy-3.441/luennot/Luento9.pdf.

Uitto, O. (2007). *Erikoistyö: Mittausepävarmuus ABB Oy pienjännitekojeiden koestuslaboratorion koepaikalla 1*. Vaasan yliopisto. 51 s. Julkaisematon.

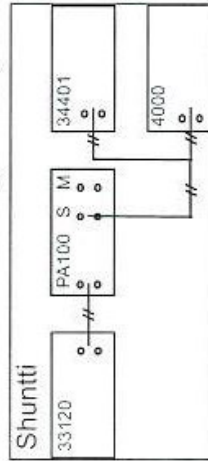
Williams, T. (1998). *EMC for product designers*. 2.painos. Newnes Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 299 s.

LIIITTEET

LIIITE 1. Teho- ja vahvistinyksikön mittaukset (Seitamaa 2008).

5	250	176.7767	176.4	176.5	0.86	100	5	4.989345	4.992174	-0.0566657
10	500	353.5534	352.7	352.7	0.82	100	10	9.975862	9.975862	0
15	750	530.3301	529.1	529.4	0.8	100	15	14.96521	14.97369	-0.0566668
50	2500	1767.767	1763	1764	1	100	50	49.86517	49.89345	-0.0566689
100	5000	3535.534	3528	3528	0.84	100	100	99.78691	99.78691	0

3 PA100 lähtövirtashuntin yli mitattu jännite



PA100:n Meas Shur	Nom I _o /m ² A lfg	FunGen	HPDmm U _{o rms} mV	HPDmm U _{rms} mV	Norma U _{rms} mV	U _{lthd} %	U _{fc} %	I _{rms} mV	I _{rms} mV	Diff %
1	1	50	35.35534	4.93	4.98	-	-	0.986	0.996	-1.004016
5	5	250	176.7767	24.73	24.83	-	-	4.946	4.966	-0.402739
10	10	500	353.5534	49.46	49.61	0.89	100	9.892	9.922	-0.302358
15	15	750	530.3301	74.24	74.35	0.87	100	14.848	14.87	-0.147949
50	50	2500	1767.767	247.3	247.5	0.82	100	49.46	49.5	-0.080808
100	100	5000	3535.534	494.9	495.3	0.82	100	98.98	99.06	-0.080759

LIITE 2. Sähkömagneettisiin häiriöihin liittyviä laskentakaavoja (Toprudder EMC 2008).

EMC Related Formulae

Log↔Linear Voltage		Term Conversion	
dBμV to Volts	$V = 10^{((dB\mu V - 120)/20)}$	dBm to dBuV	$dB\mu V = 90 + 10\log(Z) + dBm$
Volts to dBμV	$dB\mu V = 20\log(V) + 120$	dBuV to dBm	$dBm = dB\mu V - 90 - 10\log(Z)$
dBV to Volts	$V = 10^{(dBV/20)}$	dBuA to dBm	$dBm = dB\mu A + 10\log(Z) - 90$
Volts to dBV	$dBV = 20\log(V)$	dBm to dBuA	$dB\mu A = dBm - 10\log(Z) + 90$
dBV to dBμV	$dB\mu V = dBV + 120$	dBuA to dBuV	$dB\mu V = dB\mu A + 20\log(Z)$
dBμV to dBV	$dBV = dB\mu V - 120$	dBuV to dBuA	$dB\mu A = dB\mu V - 20\log(Z)$
Log↔Linear Power		Volts to Amps & Watts	$A = \frac{V}{Z} \quad W = \frac{V^2}{Z}$
dBm to Watts	$W = 10^{((dBm - 30)/10)}$	Amps to Volts & Watts	$V = A * Z \quad W = A^2 * Z$
Watts to dBm	$dBm = 10\log(W) + 30$	Watts to Volts & Amps	$V = \sqrt{W * Z} \quad A = \sqrt{\frac{W}{Z}}$
dBW to Watts	$W = 10^{(dBW/10)}$	RF related, Field Strength & Power Density	
Watts to dBW	$dBW = 10\log(W)$	dBuV/m to V/m	$V/m = 10^{((dB\mu V/m) - 120)/20}$
dBW to dBm	$dBm = dBW + 30$	V/m to dBuV/m	$dB\mu V/m = 20\log(V/m) + 120$
dBm to dBW	$dBW = dBm - 30$	dBuV/m to dBmW/m ²	$dBm/m^2 = dB\mu V/m - 115.8$
Log↔Linear Current		dBmW/m ² to dBuV/m	$dB\mu V/m = dBm/m^2 + 115.8$
dBuA to uA	$\mu A = 10^{(dB\mu A/20)}$	dBuV/m to dBuA/m	$dB\mu A/m = dB\mu V/m - 51.5$
uA to dBuA	$dB\mu A = 20\log(\mu A)$	dBuA/m to dBuV/m	$dB\mu V/m = dB\mu A/m + 51.5$
dBa to A	$A = 10^{(dBa/20)}$	dBuA/m to dBpT	$dBpT = dB\mu A/m + 2$
A to dBa	$dBa = 20\log(A)$	dBpT to dBuA/m	$dB\mu A/m = dBpT - 2$
dBuA to dBa	$dBa = dB\mu A - 120$	W/m ² to V/m	$V/m = \sqrt{(W/m^2) * 377}$
dBa to dBuA	$dB\mu A = dBa + 120$	V/m to W/m ²	$W/m^2 = \frac{(V/m)^2}{377}$
Log↔Linear Impedance		wound coil Flux Density	$\mu T = \frac{4\pi(\text{turns})(\text{amps})}{20(\text{radius}, m)}$
dB(ohms) to ohms	$Z = 10^{(dB(\text{ohms})/20)}$	uT to A/m	$A/m = \frac{\mu T}{1.25}$
ohms to dB(ohms)	$dB(\text{ohms}) = 20\log(Z)$	A/m to uT	$\mu T = 1.25 * (A/m)$

Antenna (Far Field)

Gain, dBi to numeric

$$Gain_{numeric} = 10^{(dBi/10)}$$

Gain, numeric to dBi

$$dBi = 10 \log(Gain_{numeric})$$

Gain, dBi to Antenna Factor

$$AF = 20 \log(MHz) - dBi - 29.79$$

Antenna Factor to gain in dBi

$$dBi = 20 \log(MHz) - AF - 29.79$$

Field Strength given Watts, Numeric Gain, Distance in meters

$$V/m = \frac{\sqrt{30 * watts * Gain_{numeric}}}{Meters}$$

Field Strength given Watts, dBi gain, Distance in meters

$$V/m = \frac{\sqrt{30 * watts * 10^{(dBi/10)}}}{Meters}$$

Transmit Power needed, given desired V/m, Antenna numeric gain, Distance in meters.

$$watts = \frac{(V/m * meters)^2}{30 * Gain_{numeric}}$$

Transmit Power needed, given V/m, Antenna dBi gain, Distance in meters

$$watts = \frac{(V/m * meters)^2}{30 * 10^{(dBi/10)}}$$

Amplitude Modulation

Peak power, given CW power and modulation %.(sine wave AM)

$$W_{peak} = W_{CW} (1 + (Mod\% * 0.01))^2$$

Average power, given CW power level and modulation % (sine wave AM)

$$W_{avg} = \frac{W_{CW} * (2 + (Mod\% * 0.01)^2)}{2}$$

Average power, given peak power and modulation %

$$W_{avg} = \frac{W_{peak} * (2 + (Mod\% * 0.01)^2)}{2 * (1 + (Mod\% * 0.01))^2}$$

Current Probe

dB(ohm) to Zt (transfer impedance)

$$Z_t = 10^{(dB(ohm)/20)}$$

Zt to dB(ohm)

$$dB(ohm) = 20 \log(Z_t)$$

Conductance (Gt) in dB(s) to transfer impedance, (Zt) in dB(ohms)

$$Z_t = -G_t$$

Transfer Impedance in Zt (dB(ohms)), to Conductance in Gt (dB(s))

$$G_t = -Z_t$$

Power needed for BCI Probe (50Ω), given voltage level into 50Ω load (V) and Probe Insertion Loss I_L .

$$watts = 10^{((I_L + 10 \log(V^2/50))/10)}$$

Watts needed for 150 Ohm EM Clamp

$$watts = 10^{((I_L + 10 \log(V^2/150))/10)}$$

Conducted current level using current measuring probe given probe factor in dB(ohm) and probe terminal voltage in dBuV

$$dB\mu A = dB\mu V - dB(ohm)$$

Conducted current level, given probe factor in Zt (ohms) and terminal voltage in dBuV

$$dB\mu A = dB\mu V - 20 \log(Z_t)$$

dB calculationsCompute db delta (volts) $dB = 20 \log\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$ Compute dB delta (amps) $dB = 20 \log\left(\frac{A_1}{A_2}\right)$ Compute dB delta (watts) $dB = 10 \log\left(\frac{W_1}{W_2}\right)$

compute new voltage w/ db delta

$$V_{new} = 10^{\left(\frac{(dB\Delta + 20 \log(V_{given}))}{20}\right)}$$

compute new wattage w/ db delta

$$W_{new} = 10^{\left(\frac{(dB\Delta + 10 \log(W_{given}))}{10}\right)}$$

LIITE 3. Mittauspöytäkirja laboratoriomittauksista ja lopputestauspaikoista (teho- ja vahvistinyksikkö).

Mittaukset labrassa		Vastus 9,9320ohm									
Alue (mA)	Shunttivastuksen jännite HP DMM	Keithley	REF (mA)	Virta		HP DMM	Shunttivastus		APSU:n mittaussignaali mV	THD (%)	THD (%)
				Keithley	HP DMM		THD A (%)	THD V (%)			
5	48,96	48,98		5,7	4,75		98	0,44	174,4	0,42	
10	98,5	98,6	9,8/9,9	10,2	9,8		60	0,2	351	0,21	
15	148,18	148,15	14,7/14,8	15,2	15,1		47	0,16	527,6	0,15	
100	989,6	990,2	98,9/99,0	99,6	99,5		7	0,13	3521	0,06	
5 Ohmin shuntti PA-100											
Alue (mA)	mV	THD (%)	Laskettu virta	Skaalatut virrat							
5	24,5	0,5	4,9	HP	5	Upp=HP DMM ja Keithley (50 Hz komponentti) PA-100 skaalaus $I=(Upp/10)^*0,2$	Keithley	ero (%)			
10	49,3	0,25	9,86	HP	10		Mittausignaalista laskettu virta mA				
15	74	0,18	14,8	HP	15						
100	494,1	0,05	98,82	HP	100						99,589

Mittauspöytäkirja laboratoriomittauksista ja lopputestauspaikoista (teho- ja vahvistinyksikkö).

Mittaukset labrassa suojaerotettu		Vastus 9,9320hm		Shunttivastuksen jännite		Virta		Shunttivastus		APSU:n mittausignaali	
Alue (mA)	HP DMM	Keithley	REF (mA)	Keithley	HP DMM	Keithley	HP DMM	THD A (%)	THD V (%)	mV	THD (%)
5	48,9	49		5,8	4,8			58,3	0,47	174,4	0,443
10	98,6	98,6	9,8/9,9	10,11	10,22			59,4	0,226	350,61	0,22
15	148,2	148,15	14,8/14,7	15,3	15,1			58,5	0,16	527,7	0,16
100	990	990,87	98,9/99,0	99,6	99,7			54,4	0,16	3522,1	0,07
5 Ohmin shuntti PA-100		5									
Alue (mA)	mV	THD (%)	Laskettu virta	Mittausignaalista laskettu virta mA							
5	24,5	0,5	4,9	4,933							
10	49,3	0,25	9,86	9,917							
15	74	0,18	14,8	14,926							
100	494,1	0,05	98,82	99,62							

Mittauspöytäkirja laboratoriomittauksista ja lopputestauspaikoista (teho- ja vahvistinyksikkö).

Mittaukset lopputestipaikalla		Vastus 9,9320hm		Virta		Shunttivastus		APSU:n mittausignaali	
Alue (mA)	Shunttivastuksen jännite HP DMM Keithley	REF (mA)	Keithley	HP DMM	THD A (%)	THD V (%)	mV	THD (%)	
5	48,87	48,94	5,7	4,7	70	0,45	174	0,4	
10	98,49	98,54	10,3	9,8	60	0,22	350,7	0,21	
15	148,2	148,1	15,3	15,1	50	0,16	527,3	0,15	
100	988,9	989,6	99,5	99,5	9	0,15	3520	0,07	
5 Ohmin shuntti PA-100		5							
Alue (mA)	mV	THD (%)	Laskettu virta						
5	24,48	0,43							
10	49,23	0,22							
15	73,9	0,15							
100	494,1	0,05							

Mittauspöytäkirja laboratoriomittauksista ja lopputestauspaikoista (teho- ja vahvistinyksikkö).

Mittaukset funktionaalaisella lopputestipaikalla		Vastus 9,932 Ohm		Virta		Shunttivasustus		APSU:n mittaussignaali	
Alue (mA)	HP DMM	Shunttivasutuksen jännite Keithley	REF (mA)	Keithley	HP DMM	THD A (%)	THD V (%)	mV	THD (%)
5	48,9	48,9	9,8/9,9	5,9	4,6	>100	0,46	174,2	0,4
10	98,5	98,5	14,7/14,8	10,2	10	80	0,24	350,7	0,2
15	148	148,7	98,8/98,9	15,5	15,1	33	0,16	527,11	0,15
100	988,8	987,7		99,6	99,6	7,4	0,14	3518,9	0,06
5 Ohmin shuntti PA-100		5							
Alue (mA)	mV	THD (%)	Laskettu virta mA	Mittaussignaalista laskettu virta mA					
5	24,5	0,5	4,9	4,927					
10	49,3	0,25	9,86	9,919					
15	74	0,18	14,8	14,909					
100	494,1	0,05	98,82	99,53					

LIITE 4. Mitatut säteilevät häiriöt lopputestausasemasta.

Final test station RTE003

Radiated emissions

APSU Module

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
36,144	55,7	49	107,2	100,5
86,325	47,2	41,4	98,7	92,9
56,838	50,5	44,4	102	95,9
869,114	34,2	28,4	85,7	79,9
899,138	34,3	28,1	85,8	79,6

HP DMM 34401A

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
71,2	49,7	43,4	101,2	94,9
31,042	56,2	50,3	107,7	101,8

HP 3499A

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
31,477	56	50,2	107,5	101,7
40,137	53,8	47,9	105,3	99,4
50,469	51,7	45,1	103,2	96,6

HP 6645A

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
36,095	54,8	49,1	106,3	100,6
434,678	35,5	29,4	87	80,9

HP 3488A

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,505	56,5	50,5	108	102
142,175	44,1	37,4	95,6	88,9

Relays (Orange)

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,209	56	50,4	107,5	101,9
81,05	48,3	42	99,8	93,5

Cabling

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
33,202	55,8	49,6	107,3	101,1
82,025	47,9	41,9	99,4	93,4

Test jig (MIM)

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,381	56,4	50,3	107,9	101,8
73,507	49,3	43,1	100,8	94,6
91,963	46,3	40,4	97,8	91,9
92,204	46,9	40,3	98,4	91,8
129,764	44	37,9	95,5	89,4
149,725	43	37,4	94,5	88,9
160,893	43,1	36,5	94,6	88
171,147	42,8	36,2	94,3	87,7
178,386	41,8	35,8	93,3	87,3
280,196	37,8	31,5	89,3	83
374,167	34,5	28,6	86	80,1
421,794	35,2	29	86,7	80,5
431,148	35,5	29,2	87	80,7
566,668	35,6	29,6	87,1	81,1
919,629	33,3	26,9	84,8	78,4

RER 111C

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,754	56,8	50,2	108,3	101,7
425,479	35,4	29	86,9	80,5
430,736	35,6	29,1	87,1	80,6
434,991	36,3	29,2	87,8	80,7
465,584	36,5	29,9	88	81,4

LIITE 5. Mitatut säteilevät häiriöt lopputestausasemasta.

Final test station RTE018				
Radiated emissions				
HP 34401A				
Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,679	56,9	50,3	108,4	101,8
37,312	54,4	48,7	105,9	100,2
43,729	53,4	46,9	104,9	98,4
71,312	59	42,1	110,5	93,6
83,174	47,9	41,9	99,4	93,4
122,785	44	38,4	95,5	89,9
168,853	42,4	36,5	93,9	88
177,955	42,4	35,9	93,9	87,4
187,672	41,6	35,3	93,1	86,8
202,44	41,4	34,7	92,9	86,2
208,306	39,9	34,6	91,4	86,1
274,495	38,8	32	90,3	83,5
279,799	37,8	31,7	89,3	83,2
534,753	35,3	29,8	86,8	81,3
HP 6645A				
Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
31,825	56,2	50,2	107,7	101,7
71,325	49,9	43,9	101,4	95,4
214,493	40,3	34,4	91,8	85,9
225,688	40,1	34,1	91,6	85,6
420,954	36,7	29	88,2	80,5
HP 33120A				
Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
32,763	55,4	49,8	106,9	101,3
349,567	35,5	28,8	87	80,3
418,918	36	28,9	87,5	80,4
579,598	34,9	29,2	86,4	80,7
658,152	32,7	26,7	84,2	78,2
762,939	33,5	27,4	85	78,9
788,131	34,9	28,1	86,4	79,6
817,929	35	28,6	86,5	80,1
857,921	34,6	28,6	86,1	80,1

HP 3499A

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
31,257	56,2	50,2	107,7	101,7
33,491	55,9	49,6	107,4	101,1
43,784	52,9	46,8	104,4	98,3
74,974	49,8	42,8	101,3	94,3
82,261	47,7	41,9	99,2	93,4
439,862	36,1	29,5	87,6	81
544,286	35,4	29,6	86,9	81,1
658,838	32,3	26,3	83,8	77,8

APSU (ei mittausta)

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
32,793	55,9	49,8	107,4	101,3
38,765	55	48,3	106,5	99,8
304,392	36,5	30,5	88	82
347,338	34,9	29	86,4	80,5
358,456	35,6	28,7	87,1	80,2

RER 111C

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
31,747	56,2	50,1	107,7	101,6
77,663	49,1	42,4	100,6	93,9
80,656	47,9	42	99,4	93,5
167,912	42,2	36,5	93,7	88
179,06	41,6	35,9	93,1	87,4
210,902	41	34,3	92,5	85,8
218,173	40	34,2	91,5	85,7
229,625	39,7	33,7	91,2	85,2
245,167	38,9	33,1	90,4	84,6
267,005	38,3	32,3	89,8	83,8
315,379	36,9	30	88,4	81,5
442,113	36,6	29,6	88,1	81,1
534,878	35,9	29,6	87,4	81,1

Relay cabling, measuring

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,464	56,7	46,3	108,2	97,8
74,272	49,5	43	101	94,5
105,647	45	39	96,5	90,5
429,3	35,5	29,2	87	80,7
631,535	33,5	27,3	85	78,8
780,618	33,9	28,1	85,4	79,6

LIITE 6. Mitatut funktionaalisen moduulitestausaseman säteilevät häiriöt.

MITRTR07 Functional module test station

Radiated emissions

24V PS

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,298	92,2	85,6	143,7	137,1
52,867	82,8	79,4	134,3	130,9
107,402	60,4	46,2	111,9	97,7
132,491	55,7	40,8	107,2	92,3

APSU

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
45,936	80,1	73	131,6	124,5
			51,5	51,5

HP 6812A

			51,5	51,5
			51,5	51,5
			51,5	51,5
Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
52,512	57,1	51	108,6	102,5
93,894	55,7	54,1	107,2	105,6
30,736	57,1	51,5	108,6	103
431,976	43,4	40,8	94,9	92,3
431,994	43,9	40,6	95,4	92,1

HP 6627A

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
30,007	58,9	55,4	110,4	106,9
63,174	51,1	46,1	102,6	97,6
83,99	52,4	47,9	103,9	99,4
150,013	48,1	44,6	99,6	96,1

MIM Functional jig

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
35,997	63,8	54	115,3	105,5
300,001	49,7	51,4	101,2	102,9
300,603	50	49,4	101,5	100,9
350,008	44,6	42,4	96,1	93,9

MIM func 2 without measurement

Frequency (MHz)	Peak (dBuA/m)	QP (dBuA/m)	Peak (dBuV/m)	QP (dBuV/m)
953,281	59,8	60,4	111,3	111,9
33,031	56,6	49,9	108,1	101,4
32,34	56,4	50	107,9	101,5
92,843	48,7	40,5	100,2	92

LIITE 7. Mitatut funktionaalisten moduulitestausasemien johtuvat häiriöt.

MITRTR07 Functional module test station
Conducted emissions

all values are in dBuV

HP 6627A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
527	44,8	-15,3	42,9	-17,1
636	42,4	-17,6	37,5	-22,5
663	42,5	-17,5	38,6	-21,4

APSU

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
185	59,7	-6,3	58,1	-7,9
247	56,5	-9,5	55,3	-10,7
307	54,8	-11,2	53,7	-12,3
308	55,2	-10,8	54,1	-11,9
370	57,2	-8,8	54,6	-11,4
371	55,7	-10,3	55,1	-10,9
432	53	-13	54	-12
433	53,6	-12,4	52,5	-13,5
470	49,7	-16,3	46,2	-19,8
494	55,5	-10,5	54,8	-11,9
528	49,7	-10,3	52,3	-7,7
556	53,8	-6,2	53,4	-6,6
589	53,3	-6,7	45,5	-14,5
618	52	-8	51,1	-8,9
645	49,2	-10,8	48,5	-11,6
680	51,1	-8,9	52,7	-7,3
704	47,8	-12,2	46,5	-13,5

RER111C

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
235	61,9	-4,1	60,5	-5,5
287	69,5	3,5	59,6	-6,4
297	68,7	2,7	65,2	-0,8
467	58,8	-7,2	56,7	-9,3
525	64,5	4,5	62,3	2,3
531	66,8	6,8	63,7	3,7
584	57,2	-2,8	52,7	-7,3
621	66,2	6,3	60,3	0,3
656	59,4	-0,6	54,5	-5,5
681	59,1	-0,9	55,9	-4,1

24V Power

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
324	59,1	-6,9	57,7	-8,3
531	59,8	-0,2	57,2	-2,8
545	57,5	-2,5	53,6	-6,4
645	64	4	62,7	2,7
646	63,9	3,9	62,8	2,8

Relay power

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
142	65,7	-4,2	57,2	-12,8
190	61,3	-4,7	53,3	-12,7
194	64	-2	53,9	-12,1
199	63,2	-2,8	55,1	-10,9
202	63,2	-2,8	54,5	-11,5
203	63,5	-2,5	54,1	-11,9
208	63,3	-2,7	53,9	-12,1
219	61,3	-4,8	51,9	-14,1
230	60,1	-5,9	50	-16
239	58,9	-7,1	50,1	-15,9
322	62,8	-3,2	61,1	-4,9
527	58,4	-1,6	56,1	-3,9
615	57,1	-2,9	51,1	-8,9
643	58	-2	56,2	-3,8

PXI Rack

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
144	58,8	-11,1	58,1	-11,8
221	58,4	-7,7	54,3	-11,7
222	57,8	-8,2	53,5	-12,5
224	57,4	-8,6	52,9	-13,1
254	54	-12	48,5	-17,5
257	54,2	-11,8	48	-18
277	52,8	-13,2	46	-20
298	53	-13	47	-19
299	53,3	-12,7	47,4	-18,6
301	53,3	-12,7	47,6	-18,4
331	52,7	-13,3	47,8	-18,2
335	52,3	-13,7	48	-18
350	51,7	-14,4	48,5	-17,5
355	51,3	-14,7	47,8	-18,2
384	51,2	-14,8	46,2	-19,8
386	51,3	-14,7	46,3	-19,7
440	51,1	-14,9	48,9	-17,1
519	44	-16	34,2	-25,8
663	42,6	-17,4	37,6	-22,4

MITRTR10 Functional module test station
Conducted emissions

APSU

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
186	65,6	-0,4	65,1	-0,9
496	58,1	-7,9	57,2	-8,8

HP 6812A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
330	48,4	-17,6	46,3	-19,7
510	39,4	-20,6	36,8	-23,2
556	43,8	-16,2	42,2	-17,8
606	41,7	-18,3	37,4	-22,6
662	48,7	-11,3	45,1	-14,9

Orange relays

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
146	67,6	-2,1	60,7	-9,1
183	65,5	-0,5	58	-8
186	66,3	0,3	58,2	-7,8
191	65,4	-0,6	57,9	-8,1
211	64,7	-1,3	57,3	-8,7
212	64,8	-1,2	57,3	-8,7
213	64,7	-1,3	57,3	-8,7
214	64,7	-1,3	57,3	-8,7
215	64,5	-1,5	57,3	-8,7
220	64	-2	56,7	-9,3
240	62,6	-3,4	53,8	-12,2
331	63,1	-2,9	60,1	-5,9
555	56,5	-3,5	54,2	-5,8
662	60,5	0,5	58,1	-1,9

Power lila

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
567	58,6	-1,4	54,8	-5,2
664	66,7	6,7	64,5	4,5
670	65,8	5,8	62,6	2,6

SPA ZC-22

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
159	67,5	1,5	66,7	0,7
199	63	-3,1	62,1	-3,9
557	59,3	-0,8	57,9	-2,1

PXI Rack

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
194	55,5	-10,5	53,3	-12,7
206	53,7	-12,3	49,2	-16,8
211	54,5	-11,5	48,2	-17,8
278	51,8	-14,2	46,1	-19,9
694	46,5	-13,5	43,5	-16,6

LIITE 8. Mitatut lopputestausasemien johtuvat häiriöt.

RTE018 Final test station

Conducted emissions

limit margin 20 dB below limit line

limit margin filters very low signals from results

SPA-ZC 22

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
154	69,6	3,6	68,5	2,5
192	65,1	-0,9	64,1	-1,9
231	64,1	-1,9	61,8	-4,2
268	63,8	-2,2	60,2	-5,8
269	63,9	-2,1	60,4	-5,6
538	60,6	0,6	57,5	-2,5

RER 111C

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
164	61,3	-4,7	54,1	-11,9
166	61	-5	52,5	-13,6
176	58,1	-7,9	48,5	-17,6
181	56,1	-9,9	47,6	-18,4
211	58,4	-7,6	50,4	-15,6
215	60,6	-5,4	55,7	-10,3
217	62,5	-3,5	57,7	-8,3
217	62,2	-3,8	57,4	-8,6
218	62	-4	57,5	-8,5
219	62,9	-3,1	57,4	-8,6
545	41,6	-18,4	40	-20
600	42,1	-17,9	39,8	-20,2

APSU

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
497	58,6	-7,4	57,5	-8,5
552	56,8	-3,2	55,2	-4,8
608	55,7	-4,3	54,7	-5,3
664	54,2	-5,8	52,3	-7,7

HP 34401A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
664	44,7	-15,3	41,9	-18,1

HP 33120A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
151	42,2	-23,8	34,9	-31,1
152	42,5	-23,5	35	-31
163	41,8	-24,2	34,9	-31,1
174	42,5	-23,5	33,9	-32,2
181	41,6	-24,4	33,3	-32,7
664	38,7	-21,3	34,9	-25,1

HP 33120A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
665	37,1	-22,9	33,8	-26,2
154	42,1	-23,9	34,9	-31,1
176	41,9	-24,1	33,9	-32,2

APSU

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
498	59,9	-6,2	57,5	-8,5
555	57,9	-2,1	54,3	-5,7
608	55,9	-4,1	55	-5
166	63,5	-2,5	57,2	-8,8
664	55,9	-4,2	53,5	-6,5
173	60,6	-5,4	52,8	-13,2

HP 6645A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
604	48,4	-11,6	45,7	-14,3
695	41,4	-18,9	34,8	-25,2

RTE003 Final test station
Conducted emissions

HP 34401A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
664	41,8	-18,2	38,5	-21,5

HP 33120A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
664	40	-20	36,8	-23,8

HP 3499A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
146	53,2	-16,5	45,2	-24,2
162	50,3	-15,7	41	-25
166	48	-18	39,6	-26,4
585	38,7	-21,3	37,5	-22,5
638	40,5	-19,5	38,2	-21,8
664	46,4	-13,6	43,5	-16,5
693	42,4	-17,6	38,3	-21,7

APSU

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
519	57,5	-2,5	53,8	-6,2
231	61,2	-4,8	54,4	-11,7
230	61,6	-4,4	54,6	-11,6
176	61,7	-4,3	58,3	-7,7
537	56	-4	51,1	-8,9
234	62,1	-3,9	53,4	-12,6
245	60,5	-5,5	53,6	-12,4
577	54,6	-5,4	52,1	-7,9
237	63,5	-2,5	54,7	-11,3
518	57	-3	54,4	-5,6
134	63,5	-2,5	53,6	-12,4

HP 3488A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
424	45,8	-20,2	42,7	-23,3
543	47,1	-12,9	44,8	-15,2
604	49,8	-10,2	46,5	-13,5
643	46,9	-13,1	40,6	-19,4
655	50,7	-9,3	45,3	-14,7
664	60,4	0,6	57,8	-2,2
665	60,5	0,5	57,6	-2,4
691	52,2	-7,8	45,7	-14,3

SPA ZC-22

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
163	69,4	3,4	68,4	2,4
204	64,8	-1,2	63,8	-2,3
245	62,7	-3,3	61,5	-4,6
284	62,1	-3,9	59,2	-6,8
448	59,6	-6,4	56,6	-9,4
529	58,8	-1,2	56,6	-3,4
570	57,4	-2,6	54	-6
611	54,6	-5,4	52,4	-7,7
651	56,2	-3,8	52,7	-7,3
692	56	-4	52,6	-7,4

APSU

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
180	62	-4	57,7	-8,3
209	61,7	-4,3	53,8	-12,2
229	61,9	-4,1	54,4	-11,6
236	62,7	-3,3	53,6	-12,4
355	56,5	-9,4	53,1	-12,9
358	57,5	-8,5	53,7	-12,3
371	51,9	-14,2	42,9	-23,1
419	57,4	-8,6	50,4	-15,6
460	57,6	-8,5	50,4	-14,4
476	58,9	-7,1	53,7	-12,4
520	58,2	-1,8	53,2	-6,8
520	57	-3	53,3	-6,8
535	53,8	-6,2	51,4	-8,6
537	53	-7	50,1	-9,9
576	54,1	-5,9	52,3	-7,7
577	54,7	-5,3	52,1	-7,9
595	55,4	-4,6	48,6	-11,4
634	54,9	-5,1	51,6	-8,4
654	50,8	-9,2	47,2	-12,8
692	51,3	-8,7	50	-10

HP 6645A

Frequency (kHz)	Peak (dBuV)	dB (from the limit line)	QP (dBuV)	dB (from the limit line)
665	48,4	-11,6	45,5	-14,5