



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

EMC SÄHKÖLAITTEISTON SUUNNITTELUSSA
EMC on designing of electrical equipment
Jami Palander

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Jami Palander
EMC sähkölaitteiston suunnittelussa

2018

Kandidaatintyö.

29 s.

Tarkastaja: Tero Kaipia

Tämä kandidaatintyö käsittelee sähkölaitteiston suunnittelua sähkömagneettisen yhteensopivuuden eli EMC:n (Electromagnetic compatibility) näkökulmasta. Työn tavoitteena on selvittää sähkömagneettisen yhteensopivuuden merkitystä laitteistojen suunnittelussa. Lisäksi tarkastellaan laitteistojen suunnitteluun liittyviä ohjeistuksia sähkömagneettisen yhteensopivuuden näkökulmasta. Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena. Tutkimuksessa käydään läpi aihetta koskevia standardeja sekä sähkömagneettisten häiriöiden perusteita ja niiden ilmenemistä laitteistoissa.

Kaikki sähkölaitteet aiheuttavat ympäristöönsä sähkömagneettisia häiriöitä. Niitä ei voi välttyä, mutta niitä on mahdollista hallita. Erilaisille laitteistoille ja ympäristöille on määritelty niiden ominaisuuksia vastaavia yhteensopivuustasoja. Sähkömagneettisten häiriöiden pysyessä yhteensopivuustason raja-arvoja pienempinä laitteistoon kuuluvat laitteet eivät todennäköisesti häiritse toistensa toimintaa, eivätkä aiheuta ympäristöönsä muiden laitteistojen toimintaa häiritseviä sähkömagneettisia häiriöitä. Erilaisissa laitteistoissa ja ympäristöissä käytettäville laitteille on määritelty päästö- ja sietotasot, joilla yhdessä laitteistosuunnittelun ohjeistuksien kanssa pyritään varmistamaan yhteensopivuustason vaatimusten täyttyminen.

Sähkömagneettiset häiriöt ovat keskeinen osa standardointia. Yksittäisille laitteille on laadittu tarkkoja standardeja, joista voidaan lukea raja-arvoja esimerkiksi häiriön päästö- ja sietotasolle. Näissä standardeissa ei kuitenkaan ole mahdollista käydä läpi kaikkia vaihtoehtoja muodostaa laitteista laitteisto, jolloin yhteenlaskettu häiriöpäästö saattaa ylittää koko järjestelmän raja-arvot. Useimmat laitteistoihin liittyvät EMC-standardit käsittelevät laitteistojen asentamista ja kaapelointia sähkömagneettisen yhteensopivuuden näkökulmasta.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	5
1.1	Työn tavoitteet.....	5
1.2	Tutkimuskysymykset.....	5
2.	Standardointi.....	5
2.1	Sähkö- ja elektroniikka-alan standardointi.....	6
2.2	EMC-standardointi yleisesti.....	6
2.2.1	Sähköverkon jänniteominaisuudet.....	8
2.3	Päästö-, sieto- ja yhteensopivuustasot.....	8
2.3.1	Päästötaso.....	8
2.3.2	Sietotaso.....	9
2.3.3	Yhteensopivuustaso.....	9
2.4	Laitteiden EMC-standardointi.....	10
2.4.1	Taajuusmuuttaja.....	10
2.4.2	Led valaistus.....	10
2.4.3	Elektroniset teholähteet.....	11
2.5	Laitteistojen EMC-standardointi.....	11
3.	Sähkömagneettisen häiriön aiheutuminen, välittyminen ja kytkeytyminen.....	12
3.1	Sähkömagneettisen häiriön aiheutuminen laitteessa.....	13
3.1.1	Yliaallot.....	13
3.1.2	Laakerivirrat.....	15
3.1.3	Maavuotovirrat.....	15
3.2	Johtuminen.....	16
3.2.1	Ero- ja yhteismuotoinen häiriö.....	16
3.3	Säteily.....	17
3.4	Induktiivinen kytkeytyminen.....	18
3.5	Kapasitiivinen kytkeytyminen.....	19
4.	Häiriöiden hallinta ja ehkäiseminen.....	20
4.1	Häiriöiden hallinta.....	20
4.1.1	Passiivinen suodatin.....	20
4.1.2	Aktiivinen suodatin.....	22
4.2	Häiriöiden ehkäiseminen laitteistosuunnittelussa.....	22
4.2.1	Kytkeytymisen ehkäiseminen.....	22
4.2.2	Välittymisen ehkäiseminen.....	23
4.2.3	Yliaaltojen syntymisen ehkäisy.....	23
5.	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	24
	Lähteet.....	26

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

EDM	Electrical Discharge Machining, kipinätyöstö
EMC	Electromagnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EMI	Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö
EMS	Electromagnetic Susceptibility, sähkömagneettinen herkkyys
C	kapasitanssi
<i>I</i>	virta
<i>P</i>	teho
<i>t</i>	aika
<i>U</i>	jännite
<i>S</i>	näennäisteho
Φ	magneettivuo
ε	häiriöjännite

Alaindeksit

rms	root-mean-square, tehollisarvon kuvaus
f	fault, vika, oikosulkua kuvaava
t	total, kokonais-, esim. häiriö
n	sarjan n:s alkio
cm	common mode, yhteismuotoinen
dm	differential mode, eromuotoinen
m	moottori
c	kaapeli
in	sisäänmeno
s	signaali

1. JOHDANTO

Kaikki sähkölaitteet aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä, EMI (Electromagnetic Interference), jotka välittyvät ympäristöön ja muihin laitteisiin. Häiriöt eivät kuitenkaan muodostu ongelmaksi, mikäli laitteiston suunnittelussa kiinnitetään huomiota sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen eli EMC:hen (Electromagnetic Compatibility). Edellä mainitulla tarkoitetaan laitteen kykyä toimia sille tarkoitettussa ympäristössä ilman, että se häiritsee ympäristöä, muita laitteita tai häiriintyy niiden aiheuttamista häiriöistä (EU 2014). Sähkömagneettiset häiriöt voidaan jakaa luonnollisiin ja teknisiin häiriöihin häiriön aiheuttajan mukaan. Tässä työssä käsitellään teknisiä häiriöitä.

Laitteen häiriönsietotaso kuvaa laitteen kykyä toimia tarkoituksenmukaisesti käyttöympäristönsä sähkömagneettisissa olosuhteissa. Häiriöiden ylittäessä laitteen häiriönsietotason laite ei enää välttämättä toimi suunnitellulla tavalla. Kaikkia häiriöitä ei tarvitse poistaa. Sen sijaan on löydettävä taso, jossa suurella todennäköisyydellä saavutetaan sähkömagneettinen yhteensopivuus. Laite ei myöskään saa häiritä muita laitteistoon kuuluvia ja samaan ympäristöön tarkoitettuja laitteita. Näin ollen kaikille laitteille on määritelty myös käyttöympäristöä vastaava päästötaso sähkömagneettisten häiriöiden osalta. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden huomioiminen laitteiston suunnittelussa on tärkeää laitteiden virheellisen toiminnan ja laiterikkojen välttämiseksi. Laitteistonsuunnittelussa ainoastaan laitteiden sieto- ja päästötasojen kartoittaminen ei riitä, vaan ne on huomioitava osana suurta kokonaisuutta. Valmiin laitteiston häiriönsuodatus aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia.

1.1 Työn tavoitteet

Kandidaatintyössäni on tavoitteena selvittää sähkömagneettisen yhteensopivuuden merkitystä laitteistojen suunnittelussa. Lisäksi analysoidaan ohjeistuksia, joilla laitteistonsuunnittelussa hallitaan sähkömagneettista yhteensopivuutta silloin, kun suunnitellaan laitteistoa, joka koostuu useasta itsessään EMC-standardit täyttävästä laitteesta. Tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuustutkimusta. Tutkimuksessa selvitetään sähkömagneettisen yhteensopivuuden hallintaa laitteiston suunnittelussa sekä sähkömagneettisten häiriöiden perusteita ja niiden ilmenemistä laitteistoissa. Tietoa haetaan pääosin tieteellisistä lähteistä, kuten artikkeleista ja opinnäytetöistä sekä standardeista. Lopuksi selvitetään, miten häiriöitä pystytään ehkäisemään jo laitteiston suunnitteluvaiheessa.

1.2 Tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on ratkaista seuraavat tutkimuskysymykset:

- Miten laitteiden sähkömagneettista yhteensopivuutta hallitaan laitteiston suunnittelussa?
- Miten häiriöt syntyvät, välittyvät ja kulkeutuvat laitteistossa?
- Miten ehkäistä häiriöiden syntymistä jo suunnitteluvaiheessa?

2. STANDARDOINTI

Luvun kaksi tavoitteena on selvittää standardien sisältöä ja vaikutusta sähkömagneettisen yhteensopivuuden hallitsemiseen laitteistonsuunnittelussa. Tarkasteltavat standardit käsittelevät pääosin liiketalouksia ja huoneistoja, kuten toimistoja.

2.1 Sähkö- ja elektroniikka-alan standardointi

Standardien tarkoituksena on nopeuttaa työntekoa, vähentää virheitä ja tuottaa parempi lopputulos (SFS 2012). Standardit asettavat reunaehdot ja raja-arvoja teknisille suureille sekä ohjeistavat laitteiden ja laitteistojen suunnittelussa, toteutuksessa ja testauksessa. Lisäksi standardeihin sisältyy suosituksia ja yhteisesti hyväksytyt käsitteet. Standardeja on paljon, joten ne ryhmitellään eri käyttökohteiden mukaan.

Suomessa sähkö- ja elektroniikka-alan standardit muodostuvat maailmanlaajuisista IEC-standardeista, eurooppalaisista EN-standardeista sekä suomalaisista SFS-standardeista. EN-standardeista 85 % perustuu IEC-standardeihin ja loput 15 % on Euroopassa kehitettyjä. SFS-standardit ovat 95%:sti identtisiä EN-standardien kanssa. Suomessa edellä mainittuja standardeja sovelletaan järjestyksessä SFS, EN ja vasta viimeisenä IEC. Paikalliset standardit on suunniteltu erityisesti alueen käytäntöjen mukaan. (SESKO 2017).

IEC (International Electrotechnical Commission) on maailman johtava sähkö- ja elektroniikkalaitteisiin erikoistunut järjestö, joka tuottaa kansainvälisiä IEC-standardeja sähkölaitteille. Näiden standardien avulla pyritään yhtenäistämään kansojen välisiä määräyksiä ja saavuttamaan yksimielinen käsitys käsiteltävästä aiheesta. (IEC, 2017)

IEC-standardeihin sisältyy erillinen standardisarja IEC 61000, joka käsittelee EMC-standardeja. EMC-standardien tarkoituksena on varmistaa sähkömagneettinen yhteensopivuus teknisen ja taloudellisen toteuttamisen kannalta. IEC-standardien valmistelevaan työhön voi osallistua mikä tahansa kansallinen komitea tai IEC:n kanssa yhteistoiminnassa oleva organisaatio, joka on kiinnostunut asiasta. Edellä mainittu seikka tuo standardien valmisteluun eri kantoja, jotka voivat vaikeuttaa yksimielisen lopputuloksen saavuttamista. Standardointi vie erimielisyyksien takia aikaa, joten se ei aina pysy tekniikan kehityksessä mukana. (IEC 61000-5-1)

2.2 EMC-standardointi yleisesti

Sähkömagneettista yhteensopivuutta käsittelevien standardien avulla pyritään vähentämään sähkömagneettisia häiriöitä laitteiden välillä. EMC-standardeja jaotellaan seuraavasti: 1

- tuotekohtaiset standardit
- tuotepherstandardit
- yleiset standardit
- perusstandardit.

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden standardeja laativat komiteat TC 77 ja CISPR. TC 77 sisältää alle 9 kHz:n taajuudella toimiville laitteille luotuja EMC-standardeja. Esimerkki tästä on standardisarja IEC 61000, joka on jaettu osiin seuraavasti:

- 1. osa: Termit ja määritelmät
- 2. osa: EMC-ympäristöt. Tässä osassa määritellään sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen vaikuttavia ympäristöjä ja jaotellaan niitä erilaisten häiriöominaisuuksien mukaan.
- 3. osa: Raja-arvot. Tässä osassa tarkastellaan raja-arvoja, harmonisia yliaaltoja, välkyntää ja jännitteen vaihtelua.
- 4. osa: Testaus- ja mittausmenetelmät. Tässä osassa määritellään mittaus- ja testausmenetelmiä.
- 5. osa: Asennus- ja suojausohjeet. Tämä osa sisältää valtaosin teknisiä raportteja, jotka liittyvät asennukseen ja suojaukseen.
- 6. osa: Yleiset standardit. Tässä osassa kuvataan yleisiä vaatimuksia, joita sovelletaan, mikäli laitteelle ei ole luotu tuotekohtaista EMC- standardia. (Sesko 2018)

CISPR on luonut standardisarjan yli 9 kHz:n taajuusalueella toimiville laitteille. Sarja sisältää tällä hetkellä 16 julkaisua, joissa määritellään laitteet ja menetelmät häiriöiden sekä sierotasojen mittaamiseksi yli 9 kHz:n taajuuksilla. (IEC CISPR 2018)

Standardeissa lähdetään liikkeelle tarkastelemalla yleisiä standardeja, kuten esimerkiksi ympäristöstandardeja. Ympäristöstandardit jaetaan asennusympäristöjen mukaan pienempiin osiin. Ympäristöstandardisarjat IEC 61000-6-1-sarja ja IEC 61000-6-3-sarja on luotu määrittelemään häiriönsieto- ja päästötaaso asuinrakennuksille, liiketiloille sekä kevyelle teollisuusympäristölle. Lisäksi standardisarjassa käsitellään ympäristöjä myös teollisuuden sekä voimalaitosten ja sähköasemien kannalta. Yleiset ympäristöstandardit otetaan käyttöön, jos laitteelle ei ole kehitetty omaa tuote- tai tuoteperhestandardia. (IEC 2017)

Standardien kehittämisessä haasteena on sellaisten testausmenetelmien löytäminen, joilla voidaan todentaa sähkölaitteiston standardien vaatimusten täyttyminen. Etenkin sähkölaitteiston asennuksen vaatimustenmukaisuutta on vaikeaa valvoa. Ylipäätään kokonaisen sähkölaitteiston testaaminen on vaikeaa tai jopa mahdotonta silloin, kun kyseessä on EMC-ominaisuuksiltaan herkkä järjestelmä. Näin ollen jo laitteiston suunnittelussa on otettava huomioon sähkömagneettiset yhteensopivuudet. Suunnitteluvaiheessa täytyy määrittellä tai laskea hyväksyttävissä oleva sähkömagneettinen yhteensopivuustaso eli häiriötaso, jolla todennäköisesti saavutetaan sähkömagneettinen yhteensopivuus. (SFS 2012)

EMC-standardit eivät liity sähköturvallisuuteen tai sähkölaitteistojen energiatehokkuuteen, mutta ne pyritään huomioimaan suosituksia tehdessä. Mikäli EMC-suojavaatimukset ovat ristiriidassa sähköturvallisuusvaatimusten kanssa, menevät turvallisuusvaatimukset aina EMC:n edelle. Tällöin pyritään löytämään vaihtoehtoinen tapa EMC-vaatimusten toteuttamiseksi. (SFS 2012).

2.2.1 Sähköverkon jänniteominaisuudet

Laitteistossa käytettävä sähkö syötetään tyypillisesti julkisesta sähköjakeluverkosta, joten on tärkeää tietää sähkömagneettisen häiriön syntymisen laitteissa mahdollistavat sähköverkon ominaisuudet. Standardi SFS-EN 50160 käsittelee jännitteiden pääominaisuuksia verkon käyttäjän liittymiskohdissa. Standardi määrittelee rajoja, joiden sisällä kuluttaja voi olettaa jännitteen ominaisuuksien olevan (SFS-EN 50160). Standardi ei ole tarkoitettu laitesuunnittelussa ilmaisemaan sieto- ja päästötasoja, vaan kertomaan syöttävän sähköverkon ominaisuuksia. Harmonisille yliaalloille, joita käsitellään tämän työn kappaleessa 3.2.2, on määriteltä sallitut arvot liittymän asennuksen liittymispisteessä taulukon 2.1 mukaisesti.

Taulukko 2.1 Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot prosentteina perustaajuisesta jännitteestä. (SFS-EN 50160)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

Taulukossa 2.1 on lueteltu raja-arvot, jotka jokaisen yksittäisen yliaaltojännitteen täytyy saavuttaa kymmenen minuutin keskimääräisenä tehollisarvona. Viikon kestävän mittausjakson aikana 95 % tehollisarvoista täytyy olla pienempiä tai yhtä suuria kuin taulukon arvot. Epäharmonisille yliaalloille, joita säätölaitteet, kuten taajuusmuuttajat aiheuttavat, ei ole olemassa samanlaisia sallittuja arvoja (SFS-EN 50160). Tämän seurauksena epäharmoniset yliaallot ovat usein haitallisen korkeita.

2.3 Päästö-, sieto- ja yhteensopivuustasot

Laitteen oikeanlainen toiminta vaatii, että se on yhteensopiva sekä muiden laitteiden että ympäristön kanssa. Yhteensopivuustason löytämiseksi on ymmärrettävä päästö- ja sietotason merkitys. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi edellä mainittuja käsitteitä ja niihin vaikuttavia standardeja.

2.3.1 Päästötaso

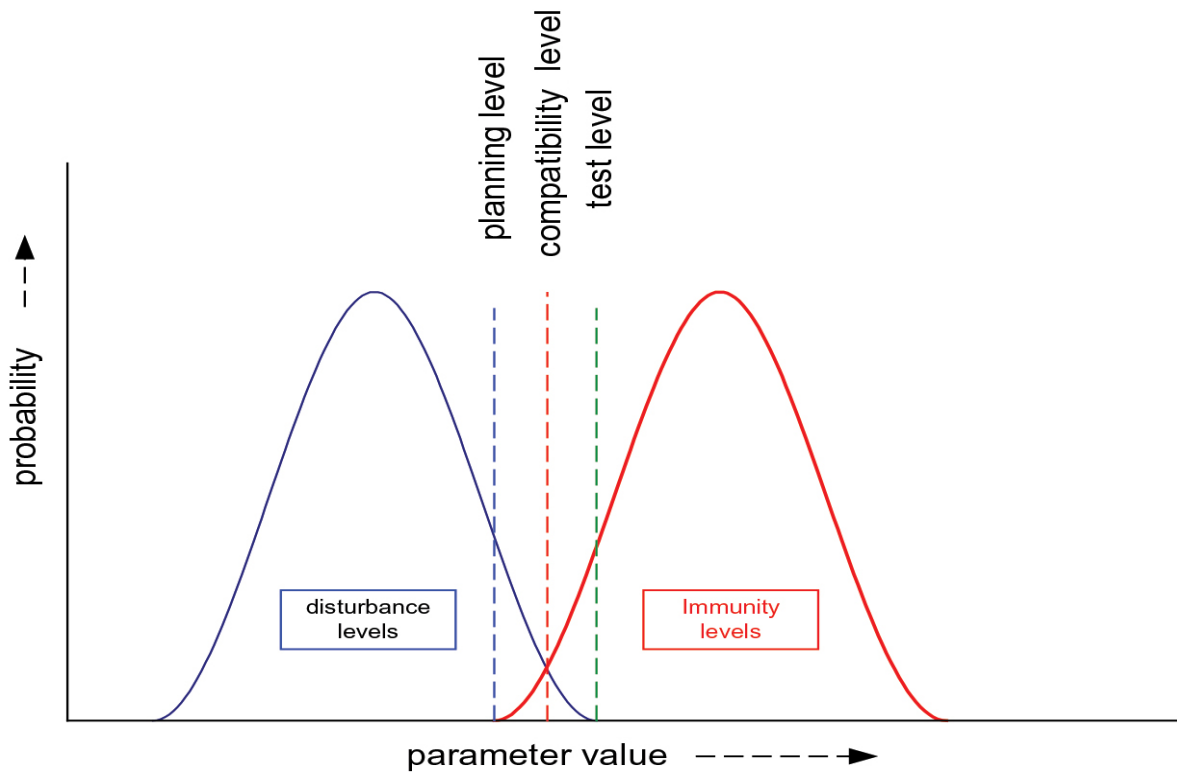
Päästö- eli emissiotasolla tarkoitetaan sähkömagneettisten häiriöpäästöjen määrää. Laite ei saa aiheuttaa niin suuria häiriöpäästöjä, että ne häiritsevät muita laitteita. Häiriöpäästöille on määriteltä yleisiä raja-arvoja standardisarjassa IEC 61000-3 ja yleisstandardisarjassa IEC 61000-6 (SESKO 2009). Laskettaessa laitteiston kokonaishäiriötasoa pahimman mahdollisen tapauksen mukaisesti saadaan todella suuria lukuarvoja, joita ei todennäköisesti voida saavuttaa. Tämän takia laitteistossa esiintyvän häiriötason laskennallisessa määrittelyssä tulisi käyttää häiriöiden todennäköisyyksiä. (IEC 61000-5-1)

2.3.2 Sietotaso

Standardoinnissa määritellään häiriönsieto- eli immuniteettitasot, jotka laitteiden täytyy kestää testiolosuhteissa niiden toimintakyvyn heikkenemättä. Mitä suurempi laitteen häiriönsietotaso on verrattuna päästötasoon, sitä todennäköisemmin laite toimii halutulla tavalla. Jokaisella laitteella on luontainen häiriönsietotaso, jonka yhteensopivuus ympäristön kanssa täytyy selvittää. Usein laitteen mukana ei tule riittävän selkeää tietoa laitteen sähkömagneettisesta häiriönsietokyvystä, vaan sen joutuu selvittämään tapauskohtaisesti. Testauksessa laite testataan sitä vastaavassa tuotestandardissa dokumentoitujen vaatimusten mukaisesti. Tarvittaessa käytetään IEC 61000-sarjan osan 4 standardeissa esitettyjä testi- ja mittaumenetelmiä. (IEC 61000-5-1)

2.3.3 Yhteensopivuustaso

Yhteensopivuustaso on raja-arvo, jonka toteutuessa häiriöt eivät suurella todennäköisyydellä haittaa laitteiston normaalia toimintaa.



Kuva 2.1 Yhteensopivuustaso häiriöpäästöjen ja sietokyvyn avulla esitettynä. Muokattuna: (Rycroft 2014)

Kuvan 2.1 punaisella katkoviivalla kuvataan yhteensopivuustasoa (compatibility level), jota ympäröivät sinisellä viivalla oleva häiriö- (disturbance level) sekä punaisella viivalla oleva sietotaso (immunity level). Vaaka-akselilla on parametrien arvot ja pystyakselilla todennäköisyys. Yhteensopivuuden suunnittelussa on tavoitteena sovittaa yhteensopivuustaso niin, että maksimissaan 5% häiriöpäästöistä ylittää sen. Tämä tarkoittaa kuvaajassa yhteensopivuustason sekä häiriöpäästötason leikkaaman tason alle jäävää pinta-alaa. Suunnittelutaso (planning level) valitaan usein pienemmäksi kuin yhteensopivuustaso, koska kaikkia mah-

dollisia häiriöitä laitteistossa ei tiedetä (Rycroft 2014). Näin ollen laite sietää enemmän häiriöitä ja mahdollistaa laitteiden jälkiasentamisen. Ideaalitapauksessa tasot eivät leikkaa toisiaan. Standardisarjassa IEC 61000-2 on määritelty yhteensopivuustasoja (SESKO 2009).

2.4 Laitteiden EMC-standardointi

Laitteille ja niiden asentamiselle on laadittu sähkömagneettista yhteensopivuutta tarkentavia standardeja. Lähes kaikkiin yksittäisiin laitteisiin vaikuttavat useat eri EMC-standardit, jotka tulee ottaa huomioon laitteistoa suunniteltaessa. Tarkimmin laitteen sähkömagneettisen yhteensopivuuden tasoja rajaavat tuotestandardit. Mikäli laitteella ei ole yksityiskohtaista tuotestandardia, siirrytään käyttämään tuotepuhestandardia. Jos laitteella ei ole myöskään tuotepuhestandardia, sovelletaan laitteeseen yleisiä standardeja. (IEC 61000-5-1)

EMC-standardeista on tehty lainsäädännöllä velvoittavia, joten niiden noudattamista täytyy myös valvoa. Suomessa valvonnan hoitaa EMC-standardien osalta Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes. Tuotteen valmistaja ja maahantuoja ovat vastuussa siitä, että markkinoille tuotava laite täyttää tarvittavat vaatimukset. Tukes tekee markkinoilla oleville tuotteille testejä, joiden avulla se selvittää vaatimusten täyttymistä. Vuonna 2015 eurooppalaiset markkinavalvontaviranomaiset tutkivat markkinoilla olevien led-valonheittimien EMC-vaatimustenmukaisuutta. Suomen osalta mukana oli Tukes. Tutkituista 85:stä led-valonheittäimestä 54% ei täyttänyt vaadittuja EMC-vaatimuksia häiriöpäästöjen osalta. (Tukes 2017)

Seuraavaksi käydään läpi esimerkkilaitteita koskevia EMC-standardeja. Valitut laitteet ovat yleisiä häiriön aiheuttajia laitteistoissa.

2.4.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajien standardointia käsitellään useissa standardeissa, joista esimerkkeinä ovat tuotestandardi IEC 61800-3 sekä harmonisia virtoja käsittelevä IEC 61000-3-12. Yleisistä standardeista taajuusmuuttajaan vaikuttaa muun muassa ympäristöä käsittelevät standardit IEC 61000-6-1 ja -6-3 sekä IEC 61000-6-2 ja -6-4, jotka käsittelevät sähkömagneettisia häiriöpäästöjä ja häiriöiden sietokykyä erilaisissa ympäristöissä.

Ensisijaisesti noudatetaan tuotestandardia IEC 61800-3, joka pitää sisällään suuntaajalaitteiston huomioimatta kuitenkin sitä osana suurempaa kokonaisuutta. Edellä mainitun tuotestandardin asettamien päästöraja-arvojen noudattaminen ei kuitenkaan takaa yhteensopivuutta, sillä ne saattavat ylittää ympäristöä koskevien standardien raja-arvot jopa yli 20dB. Tuotestandardissa IEC 61800-3 ei myöskään huomioida laitteistoja, jotka sisältävät useita suuntaajalaitteistoja. Tällaisten laitteistojen yhteenlasketut häiriöpäästöt voivat ylittää koko järjestelmän tai asennuksen raja-arvot. (REO 2018)

2.4.2 Led valaistus

Tällä hetkellä maailmalla yleistyvät led-valaisimet, joiden virrankulutus on pienempää kuin muissa valaisintyypeissä. Haittapuolena led-valaisimissa on niiden aiheuttama sähkömagneettinen säteily, joka voi saada aikaan häiriöitä. Standardit SFS-EN 61000-3-2, SFS-EN 61000-3-3 ja SFS-EN 55015 käsittelevät häiriöpäästöjä. Standardin SFS-EN 61000-3-2 raja-arvoja on esitelty taulukossa 2.2. Häiriönsietokykyä käsittelee standardi SFS-EN 61547. (SESKO 2017)

Taulukko 2.2 Yliaaltovirtojen raja-arvot alle 25 W valaistuslaitteille.

Harmoninen kertaluku n	Yliaaltovirran raja-arvot suhteessa tehoon mA/W
3	3,4
5	1,9
7	1
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$	$3,85/n$

2.4.3 Elektroniset teholähteet

Elektronisia teholähteitä on muun muassa tietokoneista. Standardi SFS-EN 55032 käsittelee tietoteknisten laitteiden tuottamien häiriösignaalien mittaamista radiotaajuuksilla 9 kHz – 400 GHz. Alle 75 W nimellisteholtaan ja enintään 16 A vaihetta kohti syöttävien teholähteiden aiheuttamien harmonisien virtojen raja-arvoja käsitellään standardissa EN61000-3-2. Harmonisien virtojen raja-arvoja on kuvattu taulukossa 2.3. Jännitteen muutoksien ja välkymisen raja-arvoja määritellään standardissa SFS-EN 61000-3-3, kun syöttövirta on alle 16 A / vaihe. Teholähteen sähkömagneettisia yhteensopivuustasoja ja häiriöpäästöjä käsitellään standardissa IEC 62041. (IEC 2017)

Taulukko 2.3 Standardissa SFS-EN 61000-3-2 asetetut raja-arvot harmonisille virroille.

Harmoninen kertaluku n	Sallittu tehollisarvo mA
3	37,9
5	21,2
7	11,1
9	5,58
11	3,9

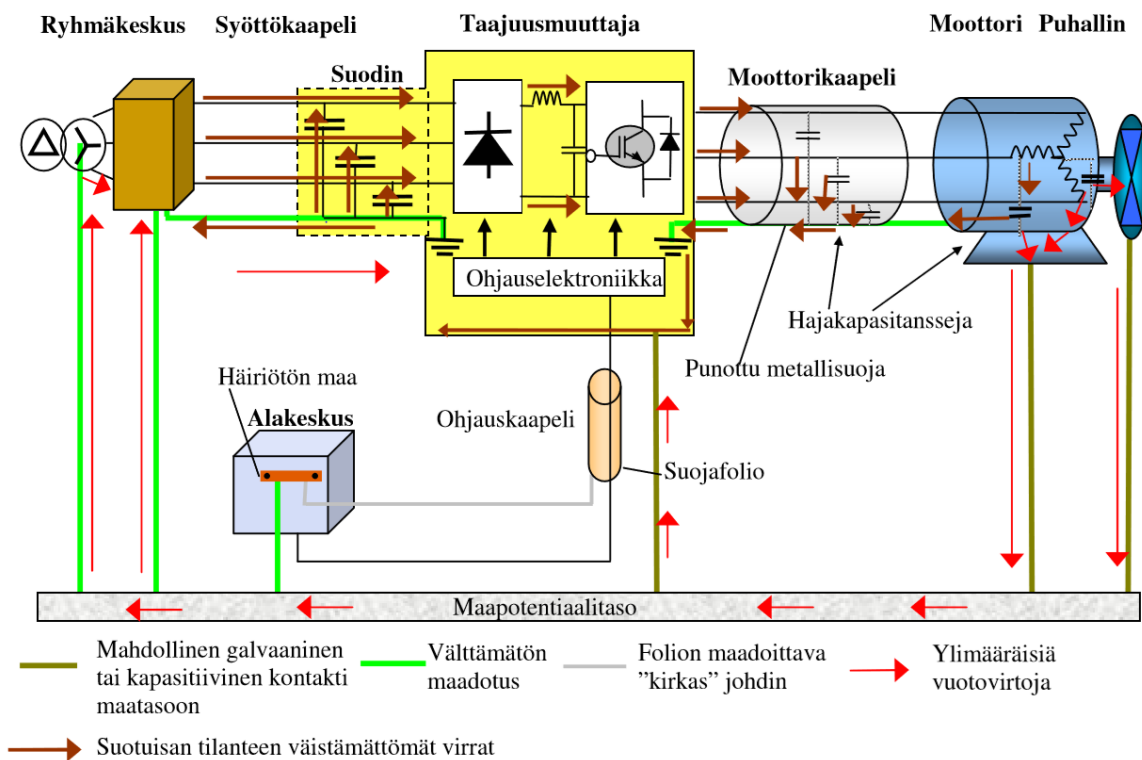
2.5 Laitteistojen EMC-standardointi

Laitteistoille ei ole kehitetty samanlaisia EMC-standardeja kuin yksittäisille laitteille. Laitteisto koostuu useista eri laitteista ja niiden välisistä kaapeloinneista, joten laitteiden omat standardit asettavat asennuksille tiettyjä rajoituksia. Laitteiden välisten kaapeleiden valinta ja asennustapa ovat suuressa roolissa laitteistojen EMC-standardeissa. Standardi IEC/TR 61000-5-1 käsittelee sähkömagneettisten häiriöiden minimoimista laitteistojen asennuksissa (IEC 61000-5-1). Standardissa SFS 6000-4-44 käsitellään sähkömagneettista yhteensopivuutta sekä käydään läpi keinoja häiriöiden ehkäisemiseksi (esimerkiksi kaapelointi ja maadoitus). Standardissa taajuusmuuttajan sekä moottorin välisen kaapelin valinta opastetaan tekemään taajuusmuuttajan valmistajan ohjeiden mukaisesti (SFS 6000-4-44).

3. SÄHKÖMAGNEETTISEN HÄIRIÖN AIHEUTUMINEN, VÄLITTYMINEN JA KYTKEYTYMINEN

Sähkömagneettisilla häiriöillä tarkoitetaan sähkömagneettisia ilmiöitä, jotka ovat haitaksi laitteen tai laitteiston toiminnalle. Häiriöt voivat muodostua laitteessa itsessään tai monen laitteen yhteisvaikutuksesta. Yksittäinen laite voi täyttää vaadittavat päästö- ja sietotasot, mutta häiriötä saattaa ilmaantua, kun se liitetään toiseen laitteeseen. Häiriöt huomataan yleensä silloin, kun jokin laite ei toimi halutulla tavalla tai laite kuluu käytössä normaalia nopeammin. Häiriöt voidaan jakaa luonnollisiin ja teknisiin häiriöihin häiriölähteen mukaan. Luonnollisiin häiriöihin lukeutuvat luonnon aiheuttamat häiriöt, esimerkiksi salaman isku tai auringon aiheuttama sähkömagneettinen säteily. Teknisiä häiriöitä ovat erilaisten laitteiden ja ihmisten aiheuttamat häiriöt (Sähköala 2008). Tässä työssä käsitellään teknisiä häiriöitä.

Häiriöreittejä esiintyy runsaasti kuvan 3.1 mukaisessa usein käytetyssä laitteistossa, joka sisältää ryhmäkeskuksen, taajuusmuuttajan, moottorin, alakeskuksen ja niiden kaapeloinnit (Koponen 2007).



Kuva 3.1 Häiriöiden kytkeytymisreitit laitteistossa (Koponen 2007).

Taajuusmuuttajan tyypillinen kytkentä mahdollistaa häiriöiden kytkeytymisen maadoitukseen, kuten kuvassa 3.1 on esitetty.

Häiriön välittyminen laitteiston eri laitteiden välillä on mahdollista kahdella eri tavalla:

- Johtumalla
- Säteilemällä.

Myös kytkeytyminen on mahdollista kahdella tavalla:

- Induktiivisesti
- Kapasitiivisesti.

Usein häiriö kytkeytyy ja välittyy monella eri tavalla, joista yksi tapa on kuitenkin vaikuttavimmassa roolissa. Tämä vaikeuttaa häiriölähteen löytämistä (Koponen 2007).

Häiriöt voidaan luokitella taajuusalueensa mukaisesti laajakaistaisiin tai kapeakaistaisiin häiriöihin. Kapeakaistainen häiriö on yleensä voimakas johtuen siitä, että kaikki sähköenergia siirtyy kapealla taajuusalueella. Kapeakaistainen aaltomuoto on yleensä alle 1% siitä keskitaajuudesta, jolla se säteilee tietyllä aikavälillä. Laajakaistainen häiriö siirtää energiaa monilla taajuuksilla samanaikaisesti, mutta sen energiamäärät ovat pienempiä kuin kapeakaistaisella häiriöllä. Kapeakaistainen häiriö on haavoittuvalle taajuudelle osuessaan laitteistolle vaarallisempi, mutta laajakaistaisella häiriöllä on suurempi todennäköisyys löytää haavoittuva taajuus. (Radasky 2004)

3.1 Sähkömagneettisen häiriön aiheutuminen laitteessa

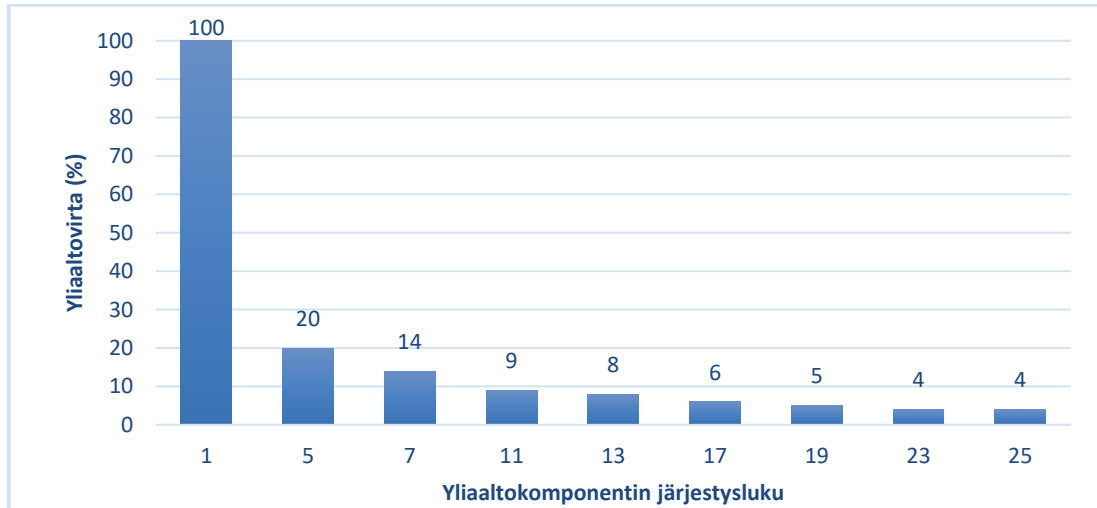
Sähkömagneettisen häiriön ilmeneminen laitteessa edellyttää kolmea elementtiä: energialähdettä, vastaanotinta ja näiden välistä yhteyttä (Montrose 2000). Energialähteen tuottaman energiamäärän täytyy olla tarpeeksi suuri aiheuttaakseen vastaanottimessa normaalista poikkeavaa toimintaa. Laitteen sisältäessä jonkin nopeasti vaihtelevan suureen, esimerkiksi virran tai jännitteen, riski sähkömagneettiseen häiriöön kasvaa. Nopea jännitteenvaihtelu johtuu yleensä verkossa tapahtuvien laitteiden kuormitusmuutoksista, kytkennöistä tai vioista. Sähkömagnetismin perusyhtälöistä eli Maxwellin yhtälöistä on mahdollista laskea virran ja jännitteen vaihtelun aiheuttamia kenttiä. Muuttuva virta muodostaa muuttuvan magneettikentän, joka pystyy indusoimaan sitä vastaan kohtisuorassa olevaan kappaleeseen muuttuvan sähkökentän. Laitteessa antennina voi toimia esimerkiksi riittävän pitkä johdin tai komponentin jalka (LUT 2016).

Jokaisen häiriön taustalla vaikuttaa jokin ilmiö. Johtuvat häiriöt aiheutuvat vaihtelevasta virta- tai jännitelähteestä. Ne voivat ilmentyä yliaaltoina tai jännitevaihteluna riippuen niiden ilmenemisnopeudesta verkkojaksoon nähden. Häiriövirran taajuuden kasvaessa häiriön kytkeytymistapa muuttuu säteilyksi, jossa antennina voivat toimia esimerkiksi johtimet. Yliaallot voivat aiheuttaa esimerkiksi valojen välkyntää (Koponen 2007). Seuraavissa kappaleissa käsitellään yleisiä häiriön ilmenemistapoja.

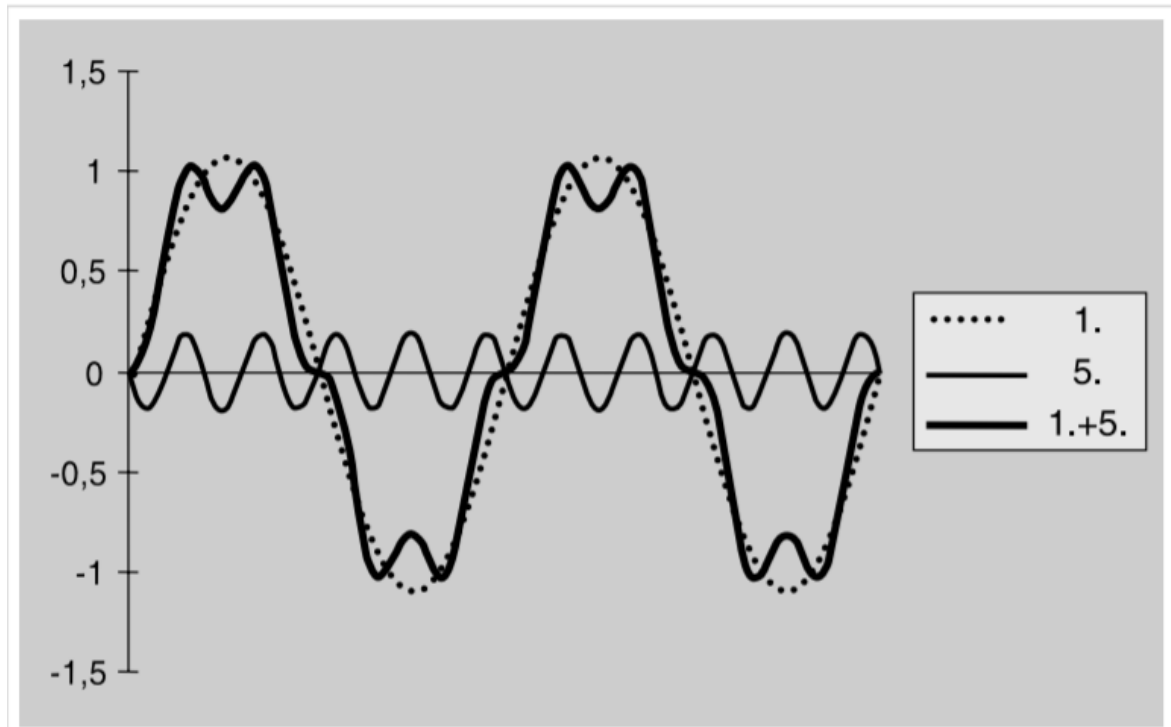
3.1.1 Yliaallot

Yliaallot ovat epälineaarisen kuorman aiheuttama häiriön ilmenemistapa laitteistossa. Yliaallot voivat olla joko jännite- tai virta-aaltoja, jotka aiheuttavat siniaallosta poikkeavaa haitallista aaltoa eli säröä. Säröytynyt aalto voi ilmetä häiriönä laitteistossa. Jänniteyliaallot muodostuvat virtayliaallosta syöttöimpedanssin avulla, ja ne voidaan laskea Ohmin lain mukaisesti kertomalla virtayliaallot syöttöimpedanssilla. Puolijohdetekniikan seurauksena epälineaaristen komponenttien käyttö on lisääntynyt ja sen vaikutuksesta yliaaltojen määrä on kasvanut. Suuria virtayliaaltojen lähteitä ovat vaihtovirtakäytössä olevat tasasuuntaajat, joita käytetään taajuusmuuttajissa. (ABB 2001)

Yliaallot on mahdollista jakaa kahteen kategoriaan: harmonisiin- ja epäharmonisiin yliaaltoihin (SFS-EN 501060). Harmoniset yliaallot aiheuttavat kerrannaistaajuuksille heikompia yliaaltoja, jotka usein esitetään kuvan 3.2 taajuusspektrin mukaisesti. Kuvassa olevat arvot ovat laskettuja. Vaaka-akseli määrittää virtayliaaltokomponentin järjestysluvun ja pystyakseli kuvaa virran amplitudia prosentteina perusaallon taajuuteen verrattuna. Epäharmoniset yliaallot voivat aiheuttaa välkyntää ja häiriöitä jo alhaisella tasolla (SFS-EN 501060).



Kuva 3.2 Virtayliaaltokomponentin taajuusspektri laskettuna 6-pulssisen tasasuuntaajan symmetrisessä virrassa. (ABB, 2001)



Kuva 3.3 Perustaajuuden virran ja 5. yliaallon summan muodostama kokonaisvirta. (ABB, 2001)

Laitteiston sisältäessä useita yliaaltoja, niiden summaa on vaikea arvioida. Yksi yliaalto lisättyä perustaajuuden virtaan voi aiheuttaa siniaallosta poikkeavan käyrämuodon. Kuvassa 3.3 perustaajuuden virran sinimuotoinen komponentti on kuvattu pisteviivalla, jonka amplitudi on yksi. Kapealla mustalla viivalla on kuvattu viides yliaalto, jonka amplitudi on noin neljänneksen ja taajuus viisinkertainen verrattuna perustaajuuteen. Näiden aaltojen summautuu kuvassa paksulla mustalla kuvattu säröytynyt siniaalto. (ABB 2001)

3.1.2 Laakerivirrat

Laakerivirta syntyy laakerin yli indusoituvasta suuritaajuisesta jännitteestä. Laakerivirrat ovat virtapulsseja, jotka kulkeutuvat moottorin laakereiden läpi. Virtapulssin sisältäessä suuren määrän energiaa se voi kuluttaa kuulalaakeria sekä sen vierintäpintaa siirtämällä metallia voiteluaineeseen. Tällaista ilmiötä kutsutaan nimellä kipinätyöstö (EDM, Electrical Discharge Machining). Laakerivirroista aiheutuvat häiriöt ovat siis peräisin kipinätyöstön aiheuttamista transienteista. Yksittäinen pulssi ei vaikuta kulumiseen merkittävästi, mutta taajuuden ollessa korkea suuren pulssimäärän aiheuttama kuluminen on huomattavaa (Smolenski 2012). Suuntaajien siirtyessä käyttämään IGB-transistoreja on niiden kytkentänopeus kasvanut ja aiheuttaa näin ollen enemmän indusoituneita jännitteitä. Todella lyhyt kytkentäaika tarkoittaa, että jännitteen nousu- ja laskureunat ovat jyrkkiä (Kanninen 2011).

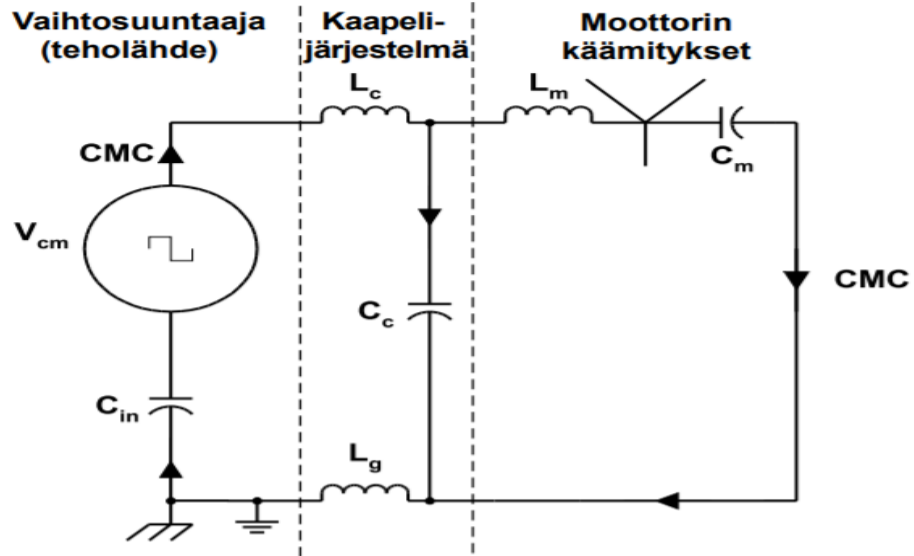
Suuritaajuinen jännite voi syntyä kolmella eri tavalla riippuen moottorin koosta sekä moottorin rungon ja akselin maadoitustavasta. Ensimmäisessä jännitteen syntytavassa on olennaisessa osassa pieni moottori, jonka akselia ei ole maadoitettu käytettävän laitteen kautta. Se voi yhteismuotoisen jännitteen sisäisen jännitteenjakauman sekä moottorin sisäisen hajakapasitanssin kohdatessa synnyttää suuria akselijännitteitä. Akselijännitteen seurauksena akselin päiden välille indusoituu jännite, joka kasvaessaan tarpeeksi suureksi kumoaa laakerin öljykalvon impedanssin. Edellä mainittu aiheuttaa sen, että virta alkaa kulkemaan laakerin läpi suurella taajuudella. Moottorin rungon maadoitus ei vaikuta akselin maadoitukseen tässä tapauksessa. (ABB 2000)

Toisessa tapauksessa suurien moottoreiden staattoria kiertävä suuritaajuinen vuo indusoi jännitteen moottorin akselin päiden välille. Vuo aiheutuu käämityksestä staattorin runkoon kulkevien kapasitiivisten vuotovirtojen epäsymmetriasta. Edellisen kohdan tapaan tarpeeksi suuri indusoitunut jännite mahdollistaa staattorin vuota kompensoivan virran kulkeutumisen akselin, laakereiden ja staattorin rungon muodostamaan virtapiiriin. (ABB 2000)

Kolmas tapa saa alkunsa, kun staattorin runkoon vuotava virta pyrkii takaisin vaihtosuuntaajaan, joka on virran lähde. Paluureittien sisältämien impedanssien takia moottorin rungon jännite nousee lähdepuolelle verrattuna. Moottorin rungon jännitteen nousu näkyy laakereissa, mikäli sen akseli on maadoitettu käytettävän laitteen kautta. (ABB 2000)

3.1.3 Maavuotovirrat

Aktiivisten verkkosiltauksien yleistyessä myös maatasoon vuotavan häiriövirran määrä on lisääntynyt (Vuorio 2014). Kaikissa toisistaan erotetuissa johtavissa komponenteissa on kapasitanssia. Kapasitanssia, jota on esimerkiksi kaapeleiden vaihejohtimen ja PE-johtimen välillä sekä moottorin käämityksen ja rungon välillä, kutsutaan hajakapasitanssiksi. Kapasitanssit ovat pieniä, mikä tarkoittaa suurta impedanssia pienillä taajuuksilla. Nykyisin vaihtosuuntaajat toimivat suurilla taajuuksilla, minkä takia pienikin kapasitanssi luo virrallalle pieni-impedanssisen reitin (ABB 2000).



Kuva 3.4 Yksinkertaistettu yhteismuotoinen virtapiiri, joka muodostuu pulssileveysmoduloidusta vaihtosuuntaajasta ja oikosulkumoottorista. (ABB 2000)

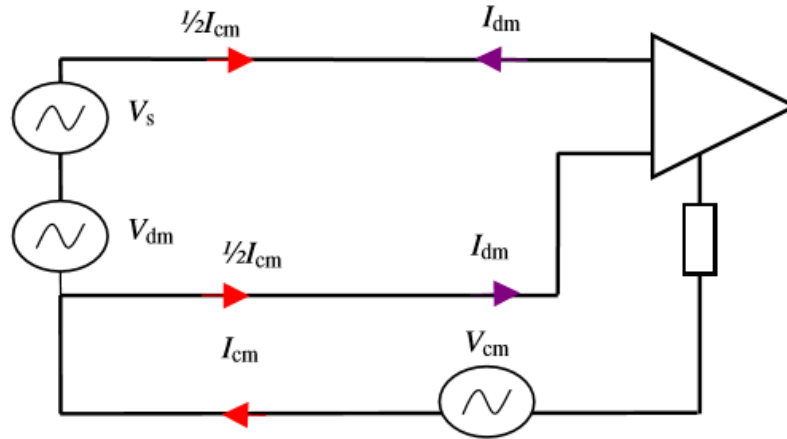
Kuvassa 3.4 vaihtosuuntaajaa kuvataan virtapiiriin yhteismuotoisen jännitteen lähteenä (V_{cm}). Yhteismuotoinen jännite luo yhteismuotoista virtaa, CMC . Virta kulkee kaapeleita pitkin moottoriin, josta se hajakapasitanssin C_m välityksellä siirtyy moottorin kuoreen, joka on osa maadoituspiiriä. Myös kaapeleiden välillä olevan hajakapasitanssin C_c avulla virta kulkeutuu maadoituspiiriin. Maadoituspiirissä kulkeva virta kytkeytyy vaihtosuuntaajaan sen hajakapasitanssin C_{in} avulla. Yhdessä nämä muodostavat virtapiirin. Kaikki reittivaihtoehdot sisältävät myös induktanssia, joka tuottaa jännitettä yhteismuotoisen virran avulla. Tämän seurauksena moottorin rungon potentiaali voi nousta vaihtosuuntaajan runkoa eli lähdemaatasoa korkeammalle tasolle. Kuvassa 3.4 on eroteltu katkoviivalla eri laitteiston osiin kuuluvat komponentit. Vasemmassa reunassa sijaitsee vaihtosuuntaaja, keskellä kuvataan kaapeleita ja oikeassa reunassa moottoria. (ABB 2000)

3.2 Johtuminen

Johtuminen eli galvaaninen kytkeytyminen tapahtuu, kun häiriölähteellä ja vastaanottimella on jokin johtava yhteys, kuten maajohdin (Hurskainen 2017). Johtumalla etenevät häiriöt jaotellaan etenemismuotonsa perusteella ero- ja yhteismuotoisiin häiriöihin.

3.2.1 Ero- ja yhteismuotoinen häiriö

Eromuotoisessa häiriössä signaalijohtimiin muodostuu signaalijännitteen kaltainen häiriöjännite, joka aiheuttaa eromuotoisen virran. Johtimissa kulkevat eromuotoiset virrat ovat yhtä suuret, mutta vastakkaismerkkiset. Kuvassa 3.2 kuvataan yksinkertaisesti ero- ja yhteismuotoisten häiriöiden etenemistä. Yhteismuotoisessa häiriössä molemmat johtimet ovat samassa potentiaalissa maatasoon verrattuna. Tämä tarkoittaa sitä, että johtimien yhteenlaskettu virta on yhtä suuri kuin maatasossa. Yleisesti laitteella on erillinen tulosignaalijohto, mutta paluupuolella se voi olla yhteinen johdin, esimerkiksi maajohdin. (Koponen 2007) Yhteismuotoinen häiriövirta aiheuttaa pienemmällä virralla saman häiriötason kuin eromuotoinen virta (ABB 2000).



Kuva 3.2 Häiriön eteneminen ero- ja yhteismuotoisesti. (Koponen 2007)

Kuvassa 3.2 alaindeksi *dm* (differential-mode) kuvaa eromuotoista häiriötä, kun taas *cm* (common-mode) kuvaa yhteismuotoista häiriötä. V_{dm} sekä V_{cm} , kuvaavat häiriöjännitteenlähteitä ja V_s hyötysignaali-jännitteen lähdettä. (Koponen 2007)

3.3 Säteily

Sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä kytkeytyvää häiriötä kutsutaan säteilyksi (Koponen 2007). Sähkömagneettinen säteily sisältää sekä magneetti- että sähkökentän (Montrose 1999). Tällainen säteily sisältää siis induktiivista ja kapasitiivista kytkeytymistä (Koponen 2007). Säteillemällä välittyvien aaltojen osalta on tärkeää huomioida korkeat taajuudet: esimerkiksi jo 100 MHz taajuudet läpäisevät erilaisia huonosti suojattuja rakennuksia (Radasky 2004). Korkealla taajuudella säteilevä antenni on kooltaan pieni, joten vastaanottavaksi antenniksi riittää pieni johtava kappale (LUT 2016).

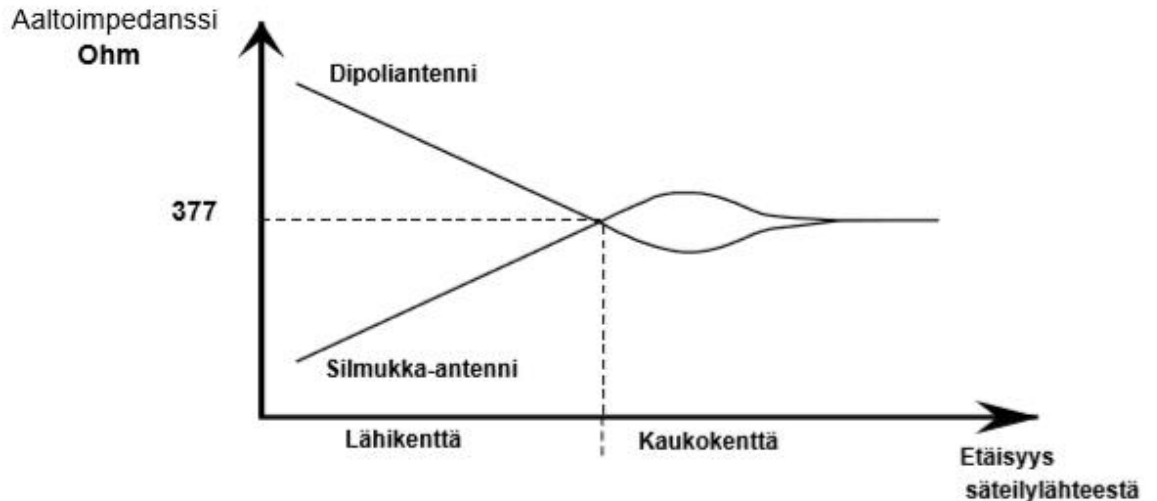
Säteily jaotellaan yleisesti lähi- ja kaukokenttään riippuen kentän käyttäytymisestä (Hurskainen 2017). Lähikenttä sijaitsee antennin lähellä ja sen aaltoimpedanssi η , eli sähkö- ja magneettikentän suhde, riippuu säteilylähteen ominaisuuksista (LUT 2016). Aaltoimpedanssin yhtälö on esitetty yhtälössä 3.1.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad (3.1)$$

missä

μ kuvaa väliaineen permeabiliteettia
 ϵ väliaineen permittiivisyyttä (Koponen 2007).

Antennin impedanssi vaikuttaa siinä kulkevaan virtaan, joka muodostaa suuruudesta riippuen joko hallitsevan magneetti- tai sähkökentän. Virran ollessa suuri (silmukka-antenni), aaltoimpedanssi on pieni ($< 377 \Omega$) ja lähelle muodostuu hallitseva magneettikenttä. Antennin ollessa suuri-impedanssinen (dipoliantenni), siinä kulkeva virta on pieni ja aaltoimpedanssi suuri ($> 377 \Omega$). Tämän seurauksena sähkökenttä on hallitsevana (ABB 2000).



Kuva 3.5 Aaltoimpedanssin käyttäytyminen suhteessa etäisyyteen säteilylähteestä. (ABB 2000)

Kuvassa 3.5 aaltoimpedanssi saavuttaa arvon 377Ω sähkö- ja magneettikentän ollessa koh-tisuorassa sekä toisiinsa että aallon etenemissuuntaan nähden. Tämä tapahtuu, kun siirrytään pois lähikentästä kaukokentän puolelle (ABB 2000). Tällainen aalto on nimeltään tasoalto. Siinä aaltoimpedanssi pysyy vakiona etäisyyden kasvaessa ja sähkö- ja magneettikentän vai-mentuessa samassa suhteessa (Hurskainen 2017).

3.4 Induktiivinen kytkeytyminen

Induktiivisessa kytkeytymisessä laitteet kytkeytyvät toisiinsa muuttuvan magneettikentän avulla. Induktiivisessa kytkeytymisessä on aina mukana jokin silmukka, joka muodostuu esimerkiksi johtimesta tai virtapiiristä (LUT 2016). Häiriölähteessä kulkeva vaihtovirta aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, joka indusoi häiriintyvään piiriin häiriöjännitteen. Häiriöjännitteen suuruus voidaan laskea Faradayn induktiolain mukaan yhtälöstä 3.2

$$\mathbf{E} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.2)$$

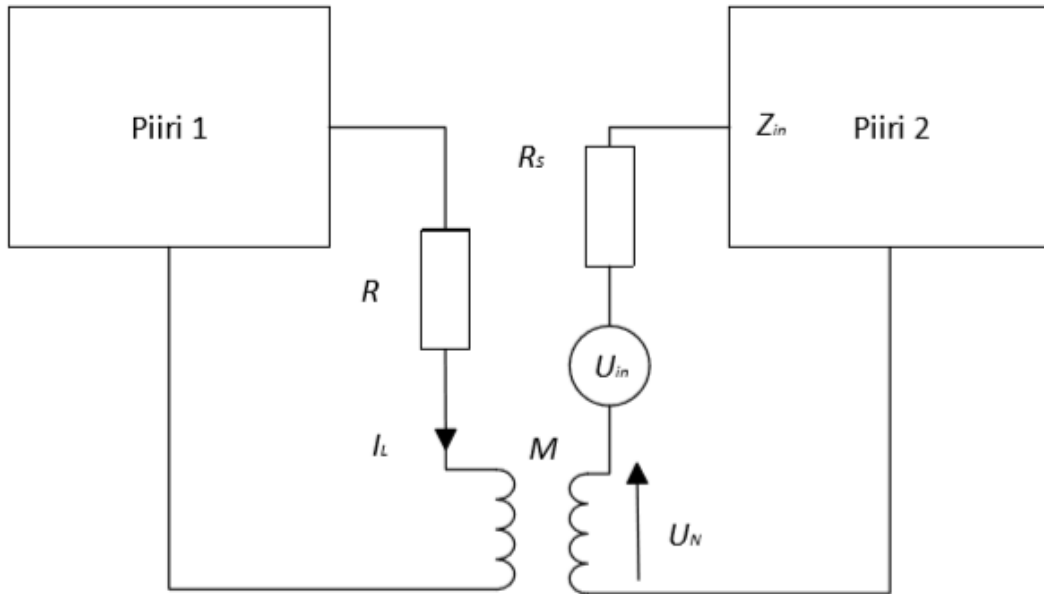
missä

E = muutosnopeudesta riippuva indusoitunut häiriöjännite

Φ = magneettivuo

t = aika (Koponen 2007).

Kuvassa 3.6 on esitetty yksinkertainen induktiivinen kytkeytyminen kahden piirin välillä.

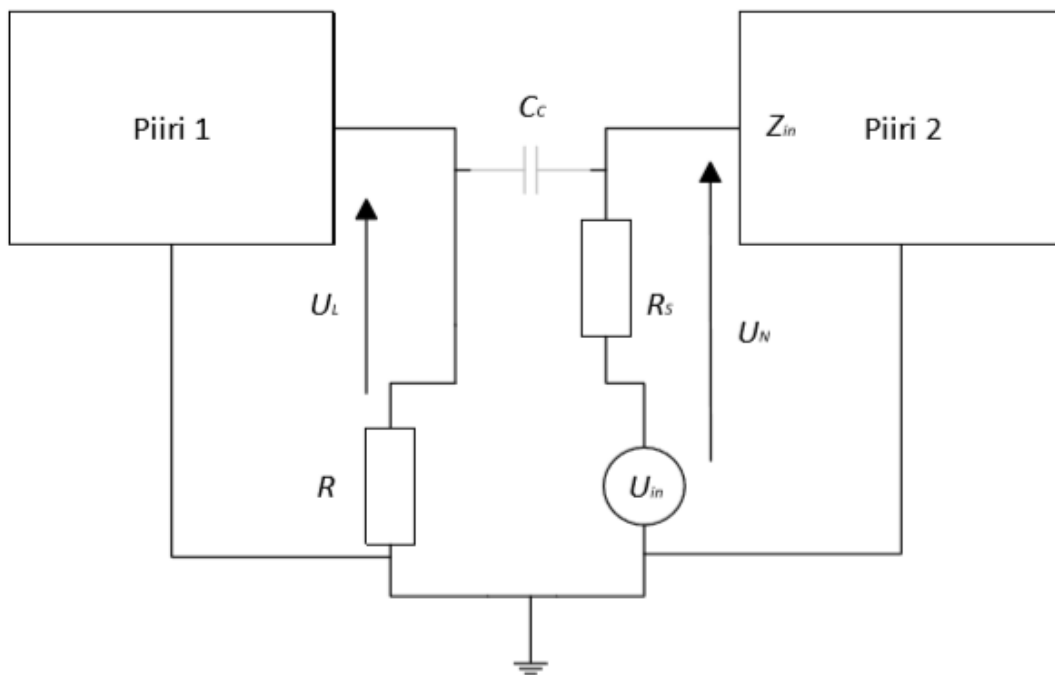


Kuva 3.6 Häiriön induktiivinen kytkeytyminen. (Hurskainen 2017)

Piirissä 1 sijaitseva vaihtovirta I_L aiheuttaa muuttuvan magneettikentän, joka indusoituu keskinäisinduktanssin M kautta piiriin 2 aiheuttaen häiriöjännitteen U_N (Hurskainen 2017).

3.5 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivisessa kytkeytymisessä häiriölähteen vaihtojännite synnyttää sähkökentän. Piirien välisen kapasitanssin ja potentiaalieron seurauksena häiriövirta kytkeytyy lähellä olevaan toiseen piiriin. Häiriövirta puolestaan luo häiriöjännitteen, jonka suuruus riippuu piirin impedanssista Ohmin lain mukaisesti. (Hurskainen 2017)



Kuva 3.7 Häiriön kapasitiivinen kytkeytyminen. (Hurskainen 2017)

Kuvassa 3.7 häiriönlähteenä toimii *Piiri 1* ja häiriön vastaanottajana *Piiri 2*. U_L kuvaa vaihtelevaa jännitettä, jonka seurauksena piirin välisen kapasitanssin C_c kautta pääsee siirtymään häiriövirtaa. U_n kuvaa häiriövirran aiheuttamaa häiriöjännitettä, joka on riippuvainen piirin impedanssista Z_{in} . (Hurskainen 2017)

4. HÄIRIÖIDEN HALLINTA JA EHKÄISEMINEN

EMC häiriöt ovat yleistyneet ja tästä luonnollisena seurauksena tieto siitä, miten häiriöt aiheutuvat, on lisääntynyt. Häiriöiden hallinta ja ennaltaehkäisy helpottuu, kun tiedetään, mistä häiriöt mahdollisesti johtuvat. Yleensä häiriöt olisivat ennaltaehkäistävissä, mutta toisinaan suunnittelussa ei huomioida kaikkea tarpeellista. Tällöin häiriönsuodatus täytyy lisätä jälkikäteen, mikä voi olla haastavaa ja epätaloudellista. (Kärhä 1999)

Häiriönsuodatuksen kannalta tärkeintä on tietää etukäteen, millaisia laitteita laitteistoon asennetaan, ja millaiset häiriön lähteet mahdollisesti uhkaavat laitteita. Jokaiselle laitteelle täytyy määrittää häiriönsietotaso ja selvittää laitteiden häiriöpäästöt. Häiriönsietotason ja häiriöpäästöjen avulla voidaan määrittää yhteensopivuustaso. Tässä vaiheessa on tärkeää huomioida, asennetaanko laitteita vielä jälkikäteen lisää. Mahdollisten jälkikäteen asennettävien laitteiden huomiotta jättäminen voi myöhemmässä vaiheessa aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia tai jopa laitteiston toimimattomuutta. Standardeja noudattamalla häiriöiden määrä pystytään minimoimaan, mutta kaikkia häiriöitä ei kuitenkaan kyetä poistamaan. Häiriöitä pyritään vähentämään monilla eri tavoilla:

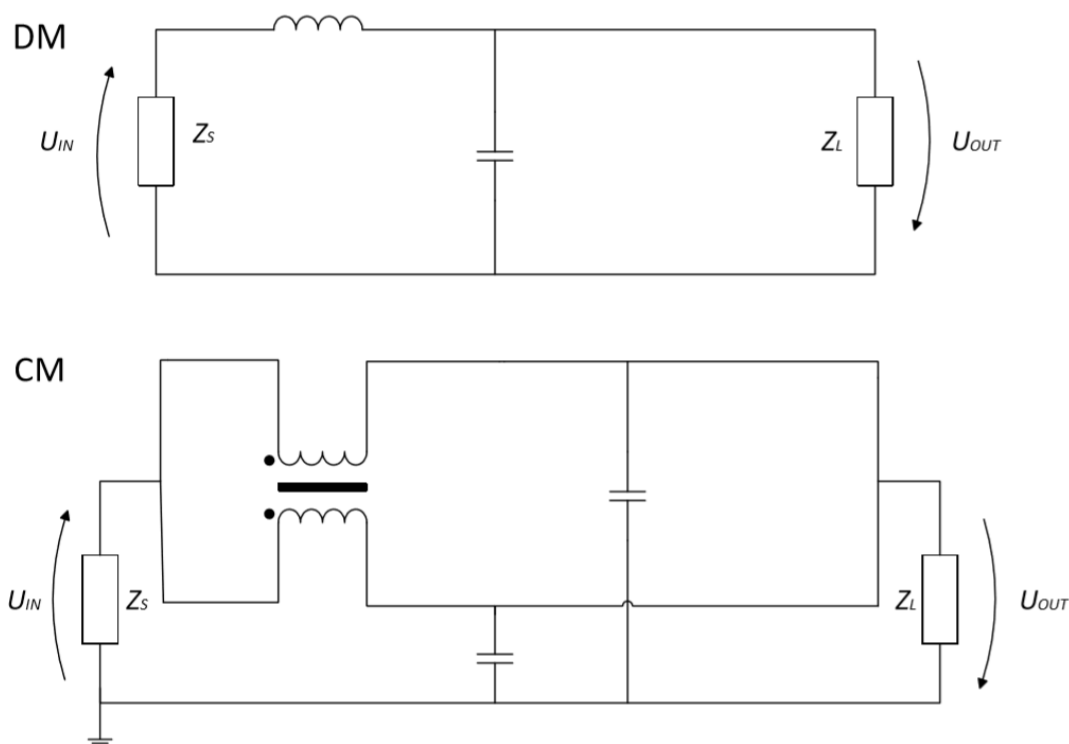
- Estämällä kytkeytyminen
- Estämällä välittyminen
- Suodattamalla
- Minimoimalla syntymekanismit (laitteistosuunnittelu)

4.1 Häiriöiden hallinta

Hallinnalla tarkoitetaan olemassa olevien häiriöiden minimoimista. Olennainen osa häiriöiden hallintaa on suodatus, jonka tarkoituksena on vaimentaa johtuvien häiriöiden kulkeutuminen häiriölähteestä muihin laitteisiin tai verkkoon. Johtuvia sähkömagneettisia häiriöitä varten on kehitetty sekä aktiivisia että passiivisia suodattimia. Suodattimia kuitenkin käytetään sekä häiriöiden ennaltaehkäisemiseen että jo ilmenneiden häiriöiden hallitsemiseen. (Hurskainen 2017)

4.1.1 Passiivinen suodatin

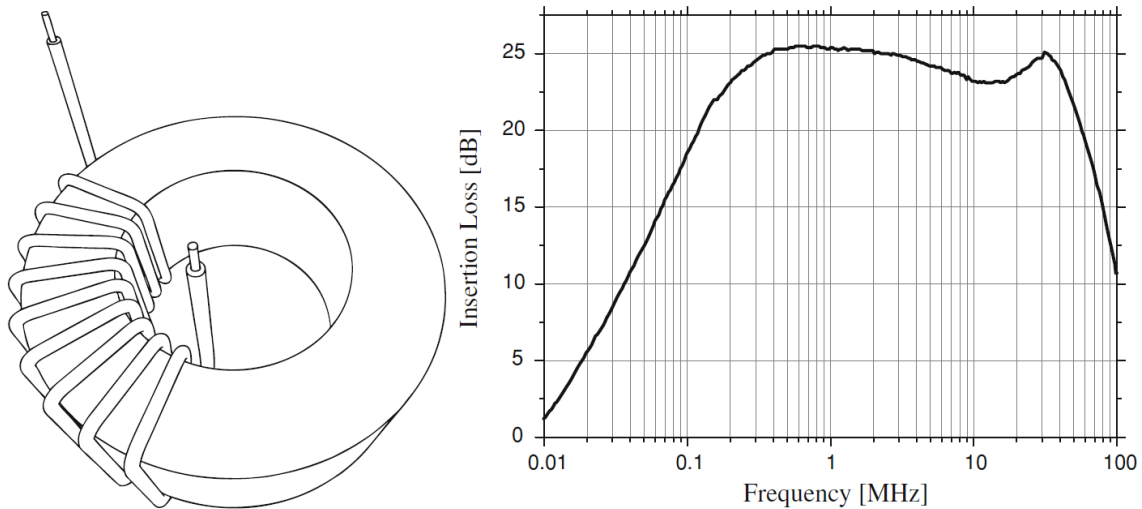
Passiivinen suodatin on komponenttiansa takia yleensä aktiivisuodinta isompikokoinen, mutta yleisemmin käytetty. Käytännössä se on yleensä ylipäästösuodin. Kuvassa 5.1 on esitetty yksinkertaisen passiivisuodattimen rakenne sekä ero- että yhteismuotoiselle häiriölle.



Kuva 5.1 Yksinkertaiset passiiviset ylipäästösuodattimet, joista ylempi on eromuotoiselle häiriölle ja alempi yhteismuotoiselle. (Hurskainen 2017)

Kuvan 5.1 passiivisten suodattimien toiminta perustuu komponenttien taajuuskäyttäytymiseen. Suodatustehokkuuteen puolestaan vaikuttaa kuorman impedanssi Z_L sekä häiriölähteen impedanssi Z_s . Suodattimien suunnittelu on hankalaa, mikäli impedanssien arvot eivät ole tiedossa tai helposti määriteltävissä (Hurskainen 2017).

Standardissa SFS 6000-4-44 suositellaan ylijännitesuojien sekä suodattimien asentamista herkkien laitteiden suojaamiseksi johtuvilta sähkömagneettisilta häiriöiltä (SFS 6000-4-44). Johtuvien häiriöiden ehkäisemisessä käytetään passiivisia suodattimia. Yhteismuotoinen virta hakee aina pieni-impedanssisimman reitin, joten paluuvirralla on yleensä useita rinnakkaisia johtimia (ABB 2000). Yhteismuotoisen virran vähentäminen on mahdollista kuristimella, joka on yksinkertainen ferriittirengas, kuten kuvasta 5.3 voi havaita. Ferriittirengas saa impedanssin näyttämään suuremmalta ja siten syntyvä häiriövirta on pienempi. Ferriittirengasta käytetään vain korkeataajuisiin yhteismuotoisiin häiriöihin. (Smolenski 2012)



Kuva 5.3 Yksinkertainen yhteismuotoisen virran kuristin sekä sen vaimennuskäyrä. (Smolenski 2012)

4.1.2 Aktiivinen suodatin

Aktiivinen suodatin pyrkii mittaamaan ja kompensoimaan häiriöitä reaaliajassa. Tämä tapahtuu mittaamalla joko virtaa tai jännittä ja kompensoimalla niitä. Näin ollen muodostuu neljä erilaista tapaa suorittaa suodatus:

- Virran mittaus ja virran kompensointi
- Virran mittaus ja jännitteen kompensointi
- Jännitteen mittaus ja jännitteen kompensointi
- Jännitteen mittaus ja virran kompensointi.

Aktiivinen suodatin ei ole vielä yleistynyt, vaikka niitä on tutkittu jo vuosia. (Hurskainen 2017)

4.2 Häiriöiden ehkäiseminen laitteistosuunnittelussa

Häiriöiden ehkäisemisellä minimoidaan riskit häiriöiden syntymiseen ennakkotietojen perusteella. Tämä kappale käsittelee toimenpiteitä, jotka toteutetaan ennen häiriöiden ilmenemistä laitteistossa.

4.2.1 Kytkeytymisen ehkäiseminen

Kytkeytyminen on mahdollista induktiivisesti ja kapasitiivisesti.

Induktiivinen kytkeytyminen:

Induktiiviset häiriöt kytkeytyvät magneettikentän avulla. Magneettikentän ja sen muutosta vastustavan virran syntymiseen voi vaikuttaa suurimmaksi osaksi kaapeleiden valinnalla ja sijoittamisella. Sijoittamisessa on tärkeää välttää yhdensuuntaisia johdotuksia ja keloja sekä sijoittaa häiriintyvä ja häiritsevä johdin mahdollisimman kauas toisistaan. Signaalijohtimeen liittyen on tärkeää huomioida, että se sijaitsee mahdollisimman lähellä maadoitusjohdinta. Kierrettäessä signaalijohdin ja maadoitusjohdin toistensa ympärille niiden indusoituneet jännitteet kumoavat toisensa (ABB TTT 2000). Induktiivisia silmukoita vältetään käyttämällä

voima- ja tietoliikennekaapeleille samoja reittejä, mutta pitämällä ne kuitenkin erillään toisistaan. (SFS 6000-4-44)

Kapasitiivinen kytketyminen:

Kapasitiivisten häiriöiden vähentäminen on mahdollista suojattua kaapelia käyttämällä. Kaapelin johtava metallivaippa täytyy maadoittaa, jotta sen potentiaali ei pääse nousemaan (SFS 6000-4-44). Maadoittamattomana suojan jännitetaso nousee ja se pääsee kytketympään suojan sisällä kulkevaan johtimeen hajakapasitanssin avulla. Suojan maadoituksessa on tärkeää huomioida, ettei se muodosta itsessään antennia. Edellä mainitun ehkäisemiseksi on suunniteltava kaapelien reitit kulkemaan mahdollisimman kaukana suurella taajuudella toimivista laitteista. (Koponen 2007)

4.2.2 Välittymisen ehkäiseminen

Riippumatta häiriön muodostumistavasta, se välittyy jossain vaiheessa johtumalla. Johtumisen estämiseen on kehitetty aiemmin mainittuja suodattimia tai galvaanisia erottimia, mutta ne eivät suojaa laitetta kaikilta häiriöiltä. Suojauksessa pyritään välttämään laitteiden välisiä galvaanisia yhteyksiä ja etenkin yhteisiä maaimpedansseja (Hurskainen 2017). Järjestelmän maadoitus on tärkeää tehdä standardien ohjeistuksen mukaisesti, jotta saavutetaan todennäköisesti toimiva lopputulos. Yhteismuotoisen häiriön vaimentamisessa kaikki piirilevyille tulevat johtimet on kytkettävä mahdollisimman häiriöttömään yhteiseen maatasoon (ABB 2000). Maadoitusta on käsitelty lisää muun muassa standardissa SFS 6000-4-44 (SFS 6000-4-44). Eromuotoisen häiriön ehkäisemiseksi signaali- ja tehonsyöttöjohtimien muodostamat silmukoiden pinta-alat täytyy minimoida ja pitkien johtimien signaalivirtoja pienentää (ABB 2000).

Oikeanlaisella koteloinnilla pystytään vähentämään sähkömagneettisen säteilyn pääsyä herkkien komponenttien luokse sekä pienentämään ympäristöön välittyvien häiriöiden määrää. Kaapeleiden johtotiet täytyy suunnitella olosuhteiden mukaisesti. Oikeanlaisilla johteilla pystytään vähentämään säteilystä aiheutuvia häiriöitä. (SFS 6000-4-44)

4.2.3 Yliaaltojen syntymisen ehkäisy

Yliaaltojen ehkäiseminen on mahdollista laitteistovalinnalla tai ulkoisen suodattimen avulla. Taulukossa 5.1 luetellaan esimerkkejä, miten erilaiset valinnat laitteistossa vaikuttavat yliaaltoihin. (ABB 2001)

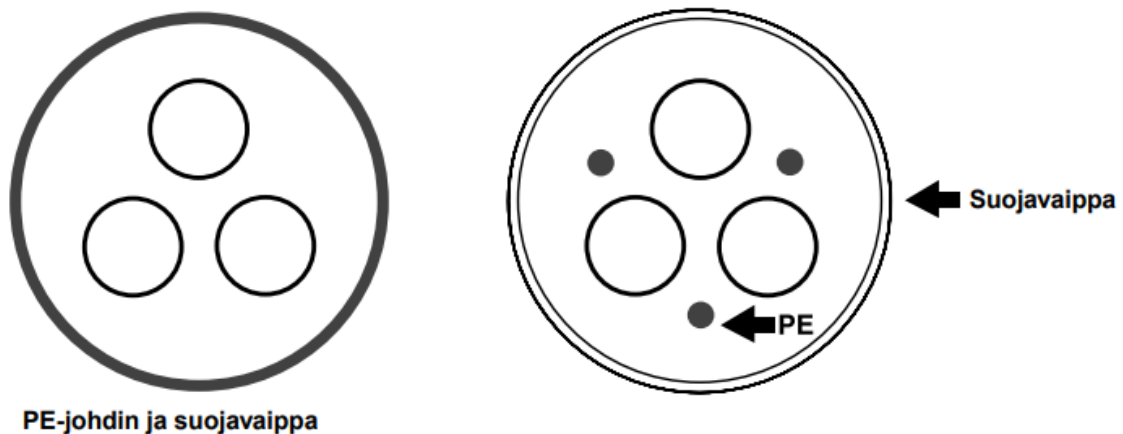
Taulukko 5.1 laitteisto valintojen vaikutus yliaaltoihin. (ABB 2001)

Syy	Vaikutus
Mitä suurempi moottori...	sitä suuremmat virtayliaallot
Mitä suurempi moottorin kuorma...	sitä suuremmat virtayliaallot
Mitä suurempi induktanssi (AC tai DC) ...	sitä pienemmät virtayliaallot
Mitä suurempi tasasuuntaajan pulssien määrä...	sitä pienemmät virtayliaallot
Mitä suurempi muuntaja...	sitä pienemmät jänniteylyliaallot
Mitä pienempi muuntajan impedanssi...	sitä pienemmät jänniteylyliaallot
Mitä suurempi syötön oikosulkukestoisuus...	sitä pienemmät jänniteylyliaallot

Taloudellisuutta ajatellen tasasuuntaajat on usein toteutettu 6-pulssisella diodisillalla. Edellä mainittu ei kuitenkaan ole yliaaltojen kannalta paras toteutustapa. Saatavilla on myös muun muassa 12- ja 24-pulssisia suuntaajia, joiden yliaallot ovat paljon pienempiä (ABB 2001). Dioditasasuuntaussillan tilalle on kuitenkin kehitteillä aktiivinen verkkosilta. Sen avulla saavutetaan parempi tehokerroin, mahdollistetaan tehon siirto verkkoon päin, saadaan korkeampi välipiirin jännite sekä pienennetään verkkovirran särökerrointa. Huono puoli aktiivisillan käyttämisessä on sen aiheuttamat yhteismuotoiset häiriöt, jotka ovat suurempia kuin diodisillalla toteutettuina. (Vuorio 2014)

Esimerkki: Laakerivirtojen ehkäiseminen

Laakerivirtojen syntymiseen vaikuttaa muun muassa kaapelin rakenne ja laitteen maadoitus. Käyttötaajuisten laakerivirtojen indusoitumisen välttämiseksi moottorikaapelin maadoitusjohdinjärjestelmän täytyy olla symmetrinen. Kuvassa 5.2 on esimerkkejä symmetrisistä kaapeleista. Laakerivirtojen ehkäisemiseksi sekä akseli että sähkökoneen runko täytyy maadoittaa hyvin. Maadoituksen avulla luodaan matalaimpedanssinen reitti, joka ei kulje laakereiden läpi. Moottorin rungon maadoitus onnistuu lyhyellä suojatulla moottorikaapelilla, jolla saadaan toteutettua pieni-impedanssinen virran paluureitti vaihtosuuntaajaan ja näin ollen moottorin rungon jännite pysyy matalana lähdemajaan verrattuna. Kotelon läpiviennissä on käytettävä 360° liitoksia (ABB 2001).



Kuva 5.2 Suositeltu moottorikaapelin rakenne laakerivirtojen minimoimiseksi. (ABB 2001)

Laakerivirtoja voidaan myös vähentää erilaisilla laakereille suoritettavilla toimenpiteillä. Keraamiset laakerit eli hybridilaakerit muodostuvat keraamisista vierintäelimistä. Vierintäelimien eristävyvyyden ansiosta laakerin sisä- ja ulkokehän välinen kapasitanssi jää pieneksi. Vaihtoehtoinen tapa on eristää laakerit pinnoittamalla tai laminoimalla. (Kanninen 2011)

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkölaitteiden yleistyessä ja monimutkaistuessa myös niissä esiintyvät sähkömagneettiset häiriöt yleistyvät. Ne syntyvät jonkin nopeasti muuttuvan suureen, kuten jännitteen tai virran seurauksena, joten niitä on mahdollista vähentää, mutta niistä ei koskaan pääse täysin eroon. Laitteistossa voi ilmetä myös yksittäisiä epäsäännöllisiä häiriöitä, joiden yhdistäminen sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen on vaikeaa etenkin ilman kokemusta. Häiriön ilmetessä esimerkiksi tietokoneessa ei sitä aina osata yhdistää sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen,

vaan sitä luullaan ohjelmistovirheeksi. Tiedon ja kokemuksen lisääntyessä myös yleiset suunnittelu- ja asennusvirheet vähenevät. Laitteistojen sähkömagneettisen yhteensopivuuden suunnittelussa hyödynnetään häiriöiden ilmenemisen todennäköisyyksiä, joten laitteiston toimintaa ei voida koskaan täydellisesti ennustaa.

Standardeista on apua yksittäisiä laitteita valittaessa ja yhteensopivuustasoja määritettäessä. Ne eivät kuitenkaan käsittele laitteistoja samalla tavalla kuin yksittäisiä laitteita. Laitteistoja käsittelevät standardit keskittyvät laitteiden välisiin kaapelointeihin sekä asennuksiin, mutta laitteiden aiheuttama yhteenlaskettu häiriötaso saattaa jäädä huomioimatta. Tämän seurauksena koko laitteistolle määritelty häiriönsietotaso voi ylittyä. Myös yksittäisten laitteiden standardien noudattamista täytyisi valvoa tarkemmin, jotta laiminlyöntejä ei tapahtuisi.

LÄHTEET

- ABB, 2001. ABB, 2001. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. [Viitattu 26.11.2017] Saatavissa: https://library.e.abb.com/pub-lic/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf
- ABB, 2000. ABB, 2000. Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä. [Viitattu 10.12.2017] Saatavissa: <https://library.e.abb.com/pub-lic/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopasnro5.pdf>
- ABB, 2000. ABB, 2000. TTT Luku 6: Ylijännite- ja häiriönsuojaus.
- ABB, 2003. Verkkodokumentti, 2003. Pienjännitemootorit [Viitattu 4.4.2018] Saatavissa: https://www.auser.fi/wp-content/uploads/Taajuusmuuttajakayton_vaatimukset.pdf
- Koponen, 2007. Antti Koponen, 2007. Diplomityö. Taajuusmuuttajien käytön ongelmakohdat kiinteistöautomaatiossa
- EU, 2014. EU direktiivi, 2014. DIREKTIIVI 2014/30/EU. [Viitattu 6.5.2018] Saatavissa: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_096_R_0079_01&from=EN
- IEC, 2018. IEC CISPR 16, 2018. [Viitattu 6.5.2018] Saatavissa: http://www.iec.ch/emc/basic_emc/basic_cispr16.htm
- IEC, 2017 EMC Standardeja, 2017. [Viitattu 8.10.2017] Saatavissa: http://www.iec.ch/emc/iec_emc/
- IEC 61000-5-1, 2012. IEC 61000-5-1, 2012. Standardi
- Hurskainen, 2017. Juho-Pekka Hurskainen, 2017. Diplomityö, Aktiivisten EMI-suodattimien topologivertailu
- Kanninen, 2011. Jarno Kanninen, 2011. Diplomityö, Laakerivirrat kestopagneettitahtikoneissa.

- LUT, 2016. LUT, 2016. Opintojakson BL50A0200 EMC Oppimateriaalit. Saatavissa: <https://moodle.lut.fi/course/view.php?id=3688>
- Montrose, 1999. Mark I. Montrose, 1999. EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple. First Edition. New York: IEEE Press c1999.
- Montrose, 2000. Mark I. Montrose, 2000. Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: A Handbook for Designers. Second Edition. New York: IEEE Electromagnetic Compatibility Society.
- Rycroft, 2014. Mike Rycroft, 2014. Industrial power quality standards. EE Publisher.
- Kärhä, 1999. Petri Kärhä, 1999. Häiriökysymykset Häiriöt mittauksissa. Teknillinen korkeakoulu. Mit-taustekniikan laboratorio. Neljäs painos.
- REO, 2018. REO UK LTD, 2018. Complying with IEC/EN 61800-3 Good EMC Engineering Practices in the Installation of Power Drive Systems. [Viitattu 7.3.2018] Saatavissa: https://www.emcstandards.co.uk/files/61800-3_emc_for_power_drive_systems.pdf
- Smolenski, 2012. Robert Smolenski, 2012. Conducted Electro-magnetic Interference (EMI) in Smart Grids. Lontoo: Springer-Verlag.
- SESKO, 2017. SESKO, 2017. SFS-/IEC-/EN-standardit. Verkkodokumentti. [Viitattu 4.11.2017] Saatavissa: http://www.sesko.fi/standardit/sfs_iec_en-standardit
- SESKO, 2017. SESKO, 2017. Ledivalojen standardointi. Verkkodokumentti. [Viitattu 7.1.2018] Saatavissa: http://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/ledit

- SESKO, 2018. SESKO, 2018. SK 77 Sähkömagneettinen yhteensopivuus [Viitattu 18.2.2018] Saatavissa: [http://www.sesko.fi/osallistuminen/komiteaesittelyt/sk_77_sahkomagneettinen_yhteensopivuus_\(emc\)](http://www.sesko.fi/osallistuminen/komiteaesittelyt/sk_77_sahkomagneettinen_yhteensopivuus_(emc))
- SESKO, 2009. SESKO, 2009. Standardointijärjestelmä - EMC-standardointi. Verkkodokumentti. Saatavissa: https://www.sesko.fi/files/82/emc_web_tik.pdf
- SFS-EN 501060, 2010. SFS-EN 501060, 2010. Standardi
- SFS,2012. Suomen Standardointiliitto SFS, 2012. Tekninen raportti, IEC/TR 61000-5-1:fi [Viitattu 25.11.2017] Saatavissa: <https://online-sfs-fi.ezproxy.cc.lut.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/IEC/ID5/6/187945.html.stx>
- SFS, 2017. Suomen Standardointiliitto SFS, 2017. Verkkodokumentti. [Viitattu 4.11.2017] Saatavissa: https://www.sfs.fi/standardien_laadinta
- Sähköala, 2008. Sähköala, 2008. Rakennusten sähköasennusten EMC-vaatimukset. [Viitattu 4.11.2017] Saatavissa: http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/artikkelit/saadokset_ja_maaraykset/fi/FI/emc-vaatimukset/
- Vuorio, 2014. Teppo Vuorio, 2014. Diplomityö. Aktiivisen verkkosillan tuottaman yhteismuotoisen jännitteen vaimentaminen kaksitasoisessa, jännitevälipiirillisessä, taajuusmuuttajatopologiassa. Saatavissa: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/94610/Vuorio_DT_10_2_2014_Final.pdf;jsessionid=028AAD58143D336C9CE7E7140740D3DD?sequence=2
- Tukes, 2017. Tukes, 2017. Lehdistötiedote. Led-valonheittimistä löytyi paljon puutteita yhteiseurooppalaisessa valvontaprojektissa. [Viitattu 20.1.2017] Saatavissa: [http://www.tukes.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/Sahkolaitteet/Led-valonheittimista-loytyi-paljon-puutteita-yhteiseurooppalaisessa-valvontaprojektissa-/](http://www.tukes.fi/fi/Ajankohtaista/Tiedotteet/Sahkolaitteet/Led-valonheittimista-loytyi-paljon-puutteita-yhteiseurooppalaisessa-valvontaprojektissa/)

Radasky, 2004.

W.A. Radasky; C.E. Baum; M.W. Wik. 2004. Introduction to the special issue on high-power electromagnetics (HPEM) and intentional electromagnetic interference (IEMI). IEEE. [Viitattu 26.11.2017] Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/document/1325784/>