

Jesse Turtiainen

EMC:n huomioiminen sähkölaitteiden suunnittelussa

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Jesse Turtiainen
Työn nimi	EMC:n huomioiminen sähkölaitteiden suunnittelussa
Toimeksiantaja	Gebwell Oy
Vuosi	2022
Sivut	38 sivua
Työn ohjaaja(t)	Juha Korpijärvi

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen, siihen liittyviin ilmiöihin, suunnittelukäytäntöihin ja vaatimuksiin. Opinnäytetyö toteutettiin pääosin kirjallisuustutkimuksena, minkä lisäksi suoritettiin asiantuntijahaastatteluja, joiden tarkoituksena oli kerätä tietoa kriittisimmistä EMC-suunnittelussa huomioitavista asioista. Valmista työtä on tarkoitus käyttää toimeksiantoyrityksen sähkösuunnittelun tukena ja yleisenä tietolähteenä aiheesta kiinnostuineille.

Työ jakautui kolmeen pääosiin. Ensimmäisessä osiossa käydään läpi sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvää taustaa ja teoriaa, kuten mahdollisia sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä ja häiriöiden kytketymsmekanismeja. Työn toisessa osiossa tutustutaan sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviin vaatimuksiin, jotka määrittävät Euroopan unionin EMC-direktiivissä sekä kansainvälisissä, eurooppalaisissa ja kotimaisissa standardeissa. Työn kolmannessa pääosiossa käydään läpi alan kirjallisuuden ja asiantuntijahaastatteluiden perusteella valikoituja hyväksi todettuja suunnittelukäytäntöjä, joita noudattamalla sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavuttaminen onnistuu todennäköisemmin.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tiivis tietopaketti oleellisimmista sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvistä suunnittelunäkökohdista ja vaatimuksista. Sähkömagneettinen yhteensopivuus on aihealueena erittäin laaja, joten työhön pyrittiin rajaamaan niin, että siinä tulisi esille perusteet, joihin paneutumalla vältyttäisiin yleisimmiltä sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviltä ongelmilta. Uskon, että työ toimii hyvänä perustietolähteenä suunnittelijoille ja muille alan toimijoille, jotka ovat mahdollisesti vasta hiljattain alkaneet ottaa sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviä näkökohtia huomioon työssään.

Asiasanat: sähkömagneettinen yhteensopivuus, sähkömagneettinen häiriö, häiriön kytketyminen

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Jesse Turtiainen
Thesis title	Consideration of EMC in the design of electrical apparatus
Commissioned by	Gebwell Oy
Time	2022
Pages	38 pages
Supervisor	Juha Korpijärvi

ABSTRACT

The objective of this thesis was to explore and discuss electromagnetic compatibility, phenomena surrounding electromagnetic compatibility, correct planning practices and EMC requirements. The thesis was carried out mostly by means of a literature study and in addition a few EMC expert interviews were conducted. The purpose of the interviews was to gather information about most critical aspects of EMC planning. This thesis is meant to act as a source of information for the client company's electric planning department and for others interested in the subject.

The thesis was divided into three main parts. Background and theory considering electromagnetic compatibility, such as interference sources and interference coupling mechanisms, are discussed in the first part. The second main part of the thesis discusses EMC requirements, which are defined in international, European, and domestic standards and in the European Union's EMC-directive. The third part of the thesis explains the correct ways of implementing planning practices that will increase the likelihood of achieving an electromagnetically compatible product and environment. The correct practices explained in this part are based on the expert interviews and literature of the field.

The result of the thesis is a concise information source about most relevant EMC planning aspects and requirements. Electromagnetic compatibility as a topic is very extensive which is why the thesis was limited so that it would discuss the principles that one should familiarize themselves with during electrical planning to avoid the most common problems considering electromagnetic compatibility. I believe that the thesis will act as a good basic information source for planners and other professionals in the field, who have perhaps only recently begun to take aspects of electromagnetic compatibility into account in their work.

Keywords: electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, interference coupling

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS.....	6
2.1	Sähkömagneettinen häiriö.....	7
2.1.1	Häiriölähteet.....	8
2.2	Häiriöiden kytkeytyminen.....	9
2.2.1	Galvaaninen kytkeytyminen.....	9
2.2.2	Kapasitiivinen kytkeytyminen.....	10
2.2.3	Induktiivinen kytkeytyminen.....	11
2.2.4	Säteilevä kytkeytyminen.....	12
3	EMC-SUUNNITTELU.....	14
3.1	Maadoitus.....	14
3.1.1	Maadoitustavat.....	16
3.1.2	Maasilmukat.....	17
3.2	Kaapelointi.....	18
3.2.1	Reittivalinnat.....	19
3.3	Häiriöiden suodatus.....	21
3.3.1	Passiivinen ja aktiivinen suodatin.....	22
3.3.2	Ferriitti.....	23
3.4	Kotelointi.....	23
3.4.1	Aukot ja läpiviennit.....	24
4	VAATIMUKSET.....	26
4.1	EMC-direktiivi.....	26
4.2	Standardit.....	28
4.2.1	Perusstandardit.....	29
4.2.2	Yleiset standardit.....	31
4.2.3	Tuote- ja tuoteryhmästandardit.....	32
4.3	Soveltuvien standardien valinta.....	33

5	HAASTATTELUT.....	34
5.1	Häiriöiden lähteet ja kytkeytymistavat.....	34
5.2	Suunnittelu.....	35
6	POHDINTA.....	37
	LÄHTEET.....	39

1 JOHDANTO

Sähkömagneettisella yhteensopivuudella tarkoitetaan elektronisen laitteen kykyä toimia käyttöympäristössään ilman, että se häiritsee muita käyttöympäristönsä laitteita tai häiriintyy muista käyttöympäristönsä laitteista. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden käsitettä voidaan tulkita monilla eri tavoilla, mutta yleisesti ottaen voidaan sanoa, että sähköistä laitetta tai järjestelmää voidaan pitää sähkömagneettisesti yhteensopivana, kun se ei aiheuta häiriöitä muissa laitteissa, ole altis muiden laitteiden häiriösignaaleille ja kun se ei aiheuta häiriöitä omassa toiminnassaan.

Opinnäytetyössä perehdytään sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviin ilmiöihin, alan hyväksi todettuihin suunnittelukäytäntöihin sekä alan standardeihin ja määräyksiin. Lisäksi työtä varten toteutettiin asiantuntijahaastatteluita, joiden perusteella pyrittiin saamaan lisätietoa erityisesti silmällä pidettävistä sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvistä asioista sähkösuunnittelijan näkökulmasta. Valmista työtä on tarkoitus käyttää toimeksiantoyrityksen sähkösuunnittelun tukena ja yleisenä tietolähteenä. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden huomioiminen oli tilaajalle aihealueena verrattain uusi, minkä vuoksi työssä pyrittiin tuomaan ilmi mahdollisimman selvästi konkreettisia suunnittelukäytäntöjä, joita noudattamalla sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavuttaminen mahdollisesti helpottuu tulevaisuudessa.

Työn tilaajana toimi leppävirtalainen lämpölaitevalmistaja Gebwell Oy. Gebwellin valmistamia tuotteita ovat mm. maalämpöpumput, energiavaraajat ja kaukolämmönjakokeskukset. Yritys työllisti 269 henkilöä vuonna 2021.

2 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS

Sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (electromagnetic compatibility, EMC) liittyy olennaisesti sähkömagneettisen energian generoituminen, siirtyminen ja vastaanottaminen. Sähkömagneettisen häiriön aikaan saava sähkömagneettinen energia generoituu häiriölähteessä, josta se siirtyy vastaanottavaan laitteeseen erilaisia kytkeytymisreittejä pitkin. Kytkeytymisreittejä ja -tapoja avataan lisää luvussa 2.2. Kun sähkömagneettinen energia vaikuttaa vastaanottavassa laitteessa ei-toivotulla tavalla, puhutaan sähkömagneettisesta häiriöstä.



Kuva 1. Sähkömagneettisen häiriön kytkeytymisen perusrakenne

2.1 Sähkömagneettinen häiriö

Sähkömagneettisellä häiriöllä (EMI, electromagnetic interference) tarkoitetaan ei-toivottua ulkopuolisen lähteen aikaansaamaa häiriötä tai signaalia, joka vaikuttaa sähkölaitteiden normaaliin toimintaan. Kolme olennaista sähkömagneettisiin häiriöihin liittyvää ilmiötä ovat staattinen sähkökenttä, magneettikenttä ja sähkömagneettinen säteily. Staattinen sähkökenttä syntyy paikallaan olevista varauksista, magneettikenttä liikkuvista varauksista ja sähkömagneettinen säteily kiihtyvässä liikkeessä olevista varauksista (Koivisto ym. 2018, 33).

Sähkömagneettisen energian siirtymistä sähköisten laitteiden välillä tapahtuu jatkuvasti ei-suunniteltujen kytkentäreittien välityksellä, mutta tahattomasti siirtyvä sähkömagneettinen energia muodostuu ongelmaksi vain, kun se suuruusluokkansa vuoksi vaikuttaa haitallisesti vastaanottavan laitteen toimintaan. Sähkömagneettisesta häiriöstä puhuttaessa tarkoitetaan sitä, että joissain teknisissä ympäristöissä yllä mainitut ilmiöt vaikuttavat toisiinsa toisin, kuin laitteen tai järjestelmän suunnittelija on tarkoittanut.

Häiriöt voidaan jakaa eromuotoiseen häiriöön (DM, differential-mode) ja yhteismuotoiseen häiriöön (CM, common-mode). Eromuotoisella häiriöllä tarkoitetaan häiriötä, joka pystytään mittaamaan virtana tai jännitteenä johtimien välillä. Eromuotoinen häiriö kytkeytyy häirittyyn piiriin, kuten varsinainen hyötysignaali. Yhteismuotoinen häiriö etenee johtimissa samanvaiheisena, eikä se aiheuta suoraan signaalijohtimiin jännite-eroa. Yhteismuotoinen häiriö pystytään mittaamaan samanvaiheisena jännitteenä tai virtana signaalijohtimen ja maadoituksen välillä.

2.1.1 Häiriölähteet

Sähkömagneettiset häiriöt voivat syntyä luonnollisista tai teknisistä lähteistä. Yleisimpiä luonnollisia sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä ovat salamet ja auringonpurkaukset. Myös kosmisen säteilyn on havaittu aiheuttavan häiriöitä elektronisissa ja tietoteknisissä laitteissa. Muutamia esimerkkejä teknisistä häiriölähteistä ovat sähköstaattinen purkaus, digitaaliset laitteet ja järjestelmät, sähköverkon muutokset ja langaton viestintä. (Koivisto ym. 2018, 34.)

Staattisen sähkön purkauksen (electrostatic discharge, ESD) voi aiheuttaa liik-
keessä olevan esineen kontakti toiseen kappaleeseen tai väliaineeseen. Kon-
takti voi johtaa elektronien vaihtoon, kappaleiden varautumiseen ja lopuksi va-
rauksen purkautumiseen. Varauksesta syntyvä jännite voi olla suuruusluokal-
taan kymmeniä kilovoltteja, vaikka sähkökenttään varautunut energia olisi vain
tuhannesosia joulesta (Koivisto ym. 2018, 34).



Kuva 1. ESD-suojatun laitteen tunnus

Nykyaikaiset digitaaliset laitteet ja järjestelmät sisältävät prosessoreita ja oskil-
laattoreita, jotka värähtelevät huomattavan suurella taajuudella. Esimerkkilait-
teita ovat radiolähettimet, releet, hakkuriteholähteet ja taajuusmuuttajat. Digi-
taalisten pulssien lyhyet nousu- ja laskuajat aiheuttavat nopeita muutoksia
sähkö- ja magneettikenttään, minkä vuoksi ne myös lähettävät häiriöitä aiheut-
tavia sähkömagneettisia aaltoja ympäristöönsä. (Koivisto ym. 2018, 34.)

Sähköverkon muutokset, kuten kuormien kytkentä, aiheuttavat verkossa jän-
nitteen muutoksia. Sähköverkon ollessa ns. normaalitilassa noin 10 % suurui-
set jatkuvat jännitemuutokset ovat tavallisia, mutta hetkellisesti jännitepiikit

voivat olla huomattavankin suuria, jopa kilovoltin luokkaa. Tällaiset häiriöt ovat kuitenkin harvinaisia. (Koivisto ym. 2018, 34.)

Langattomasta viestinnästä johtuen sähkömagneettinen spektri on jatkuvasti ruuhkautunut koko leveydeltään, minkä vuoksi taustakohina sisältää kaikkia mahdollisia taajuuksia. Sähkömagneettisen häiriön todennäköisyys on kuitenkin suuri lähinnä lähettimien lähiympäristössä, jossa amplitudit ovat suurimmillaan. (Koivisto ym. 2018, 34.)

2.2 Häiriöiden kytkeytyminen

Sähköiset laitteet ja järjestelmät ovat jatkuvasti vuorovaikutuksessa ympäristönsä sähkömagneettisten kenttien ja aaltojen kanssa. Esimerkiksi taustasäteily vaikuttaa aina kaikkiin sähkölaitteisiin, mutta se ei tarkoita sitä, että tämä vuorovaikutus aiheuttaisi häiriöitä laitteiden toimintaan, vaan häiriön syntymiseen tarvitaan tarpeeksi suuritehoisen signaalin kytkeytyminen johonkin laitteen tai järjestelmän osaan ei-suunnitellulla tavalla. (Koivisto ym. 2018, 35.)

Kaikissa tilanteissa, joissa kysymys sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta nousee esille, on oltava olemassa häiriön lähde ja häiriölle altistuva kohde. Jos lähde tai kohde puuttuvat laitteen käyttöympäristöstä tai niiden välillä ei ole kytkeytymisreittiä ei ole myöskään ongelmaa sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. (Williams 2007, 222.)

2.2.1 Galvaaninen kytkeytyminen

Häiriöiden galvaaninen, eli johtuva kytkeytyminen tapahtuu useimmiten maadoituksen tai tehonsyöttöjohtimien välityksellä. Myös kytkentävirheet voivat aiheuttaa häiriöitä laitteissa, mutta usein kytkentävirheen tapauksessa laitteen vikaantumisen todennäköisyys on niin suuri, että se havaitaan nopeasti. Tästä johtuen galvaanisesti kytkeytyvä häiriö on tavanomaisimmin peräisin maadoituksesta.

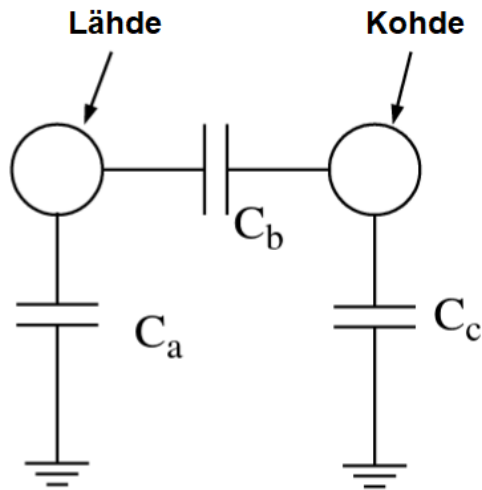
Maadoituksesta puhuttaessa tarkoitetaan usein järjestelmän jonkin osan kytkemistä samaan potentiaaliin maan kanssa. Tämä on kuitenkin hypoteettinen ilmaus, joka on mielekäs vain tasavirtapiirien tapauksessa, sillä sähkökentällä ei ole potentiaalia magneettikentän muutoksen vaikuttaessa sähkökenttään.

Tästä syystä parempi vaihtoehto maadoituksen tulkitsemiseen on tarkastella virtapiirien sulkeutumista. Toisin sanoen maadoituksella tavoitellaan hallittua virtapiirien sulkeutumista. Mitä suuremmaksi järjestelmässä käytetyt taajuudet kasvavat, sitä vaikeammaksi maadoituksen, eli virtapiirien sulkeutumisen hallinta muuttuu. Matalilla taajuuksilla häiriölähteen ja häiriökohteen välinen impedanssi koostuu suurimmilta osin resistanssista. Taajuuden kasvaessa resistanssia, induktanssia ja kapasitanssia ei enää pystytä erittelemään tietyille komponenteille, vaan suurilla taajuuksilla kaikilla piirin komponenteilla ja myös niiden välisillä johtimilla voidaan tunnistaa resistiivisiä, induktiivisia ja kapasitiivisia ominaisuuksia. (Koivisto ym. 2018, 35.)

Suurilla taajuuksilla impedanssi kasvaa induktanssin kasvaessa, jolloin häiriöt kytkeytyvät helpommin häiriölähteen ja kohteen välillä. Usein järjestelmän käytännön toteutus saadaan vastaamaan parhaiten suunniteltua, kun järjestelmä onnistutaan rakentamaan mahdollisimman pieneksi (Koivisto ym. 2018, 35).

2.2.2 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Häiriön kapasitiivisessa kytkeytymisessä johonkin järjestelmän osaan muodostuu tahattomasti kytkentä, joka muistuttaa kondensaattoria, jolloin virtasil-
mukoiden sulkeutumisreitit muuttuvat suunnitellusta. Piirissä muodostuu sähkökenttä piirissä kulkevan vaihtojännitteen vaikutuksesta, joka voi kytkeytyä kentän lähellä kulkevien johtimien kanssa. Häiriövirta kytkeytyy häiriölähteen ja kohteen välille niiden välisen kapasitanssin kautta, jolloin kohteeseen muodostuu häiriöjännite. (Baker 2015.)

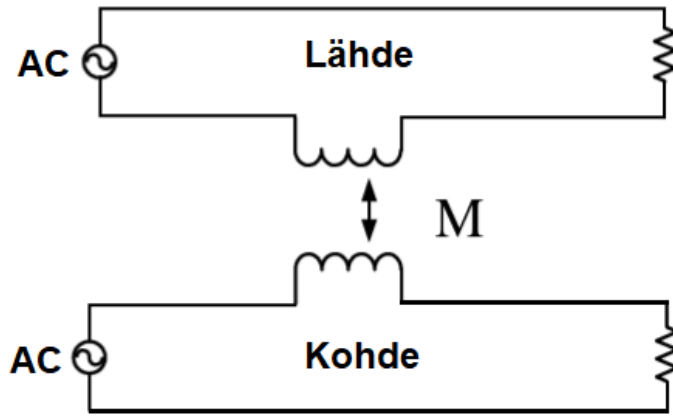


Kuva 2. Kapasitiivinen kytkeytyminen (Baker 2015, 62)

Kuvassa 2 havainnollistetaan häiriön kapasitiivista kytkeytymistä kahden vierekkäisen kondensaattorin muodostavan johtimen välityksellä, joita merkitään tunnuksella C_b . Kaksi muuta kytkennässä esiintyvää kondensaattoria, C_a ja C_c , ovat kapasitanssit maahan nähden.

2.2.3 Induktiivinen kytkeytyminen

Häiriön induktiivisen kytkeytymisen aiheuttaa magneettivuon muutoksen aikaansaama sähkömotorinen voima, joka puolestaan aiheuttaa johtavissa silmukoissa sähkövirran. Käytännössä katsoen kaikki sähköiset laitteet ja kytkennät muodostavat silmukoita, joissa kulkee sähkövirta. Sähkövirtojen muuttuessa silmukat vaikuttavat toisiinsa magneettikentän välityksellä. Silmukkojen välistä vuorovaikutusta voidaan pienentää silmukoiden kokoa rajoittamalla. (Koivisto ym. 2018, 36.)



Kuva 3. Induktiivinen kytkeytyminen (Baker 2015, 62)

Häiriön induktiivinen kytkeytyminen on havainnollistettuna kuvassa 3. Kuvassa tunnuksella M merkitään johtimien välistä yhteistä induktanssia. Induktanssi merkitään kuvan tapauksessa induktanssina kaapelin pituutta kohden (H/m). Induktiivinen kytkeytyminen johtuu lähdejohtimessa muodostuneesta magneettivuosta, joka aiheuttaa kohdejohtimessa häiriön. (Baker 2015.)

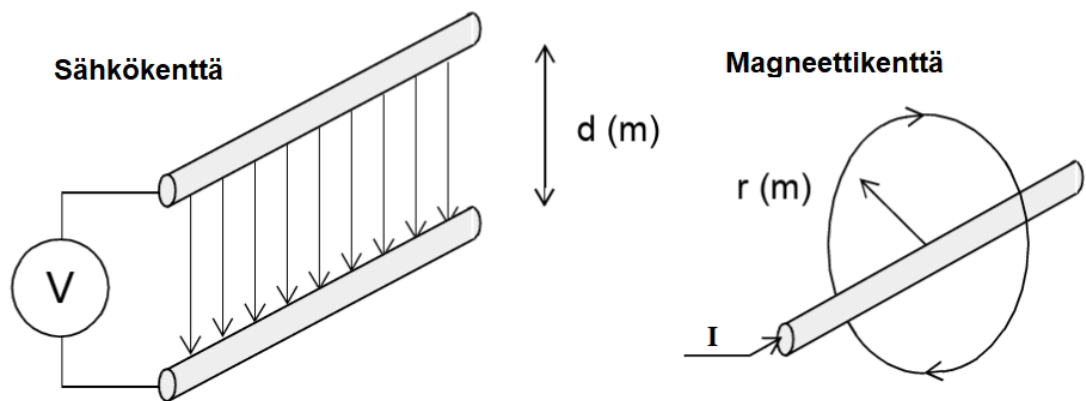
2.2.4 Säteilevä kytkeytyminen

Säteilevä, tai sähkömagneettinen kytkeytyminen tapahtuu, kun lähde ja kohde sijaitsevat pitkän välimatkan päässä toisistaan. Säteilevän kytkeytymisen tapauksessa häiriö kytkeytyy väliaineen, yleensä ilman, ilman välityksellä. Häiriön taso riippuu säteilevän lähteen tehosta ja häiriötä lähettävän ja vastaanottavan antennin tehokkuudesta. Sähkömagneettinen kenttä koostuu sekä sähkö- että magneettikentästä ja kentät ovat toistensa kanssa yhteydessä. Säteilevä kytkeytyminen voi tapahtua kentästä kaapeliin tai kentästä silmukkaan. Kun kaapeli altistuu muuttuvalle sähkökentälle, kaapeliin generoituu virta. Kun muuttuva magneettikenttä virtaa silmukan läpi, syntyy sähkömotorinen voima, joka aikaansaa jännitteen silmukan molemmissa päissä. (Williams 2007.)

Sähkökenttä muodostuu kahden eri potentiaalissa olevan johtimen väliin. Sähkökentän voimakkuutta E mitataan voltteina metriä kohden. Sähkökentän voimakkuus määräytyy johtimessa kulkevan jännitteen suuruudesta jaettuna johtimien välisellä etäisyydellä. Magneettikenttä H muodostuu sähkövirtaa kuljettavan johtimen ympärille. Magneettikentän voimakkuutta mitataan ampeereina

metriä kohden. Magneettikentän voimakkuus määräytyy johtimessa kulkevasta virrasta jaettuna johtimien välisellä etäisyydellä. (Williams 2007, 229.)

Kun vaihtojännite generoi vaihtovirran sähkölaitteen piirin johdinverkostossa, muodostuu piirissä sähkömagneettisia aaltoja, jotka etenevät sähkökentän E ja magneettikentän H yhteisvaikutuksesta. Säteilylähteen läheisyydessä kenttien voimakkuus ja geometria riippuvat säteilylähteen ominaisuuksista. Johdin, jossa kulkevan sähkövirran muutosnopeus (di/dt) on merkittävä, muodostaa suurimmaksi osin magneettikentän, kun taas piirin silmukka, jossa kulkevan jännitteen muutosnopeus on merkittävä, muodostaa suurimmaksi osin sähkökentän. (Williams 2007, 230.)



Kuva 4. Sähkökentän ja magneettikentän muodostuminen johtimissa (Williams 2007)

Sähkömagneettisista säteilystä johtuvien häiriöiden hallinta on eräs vaikeimmista sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvistä ongelmista ja vaatii syvällistä perehtymistä sähkömagnetismin teoriaan. Sähkö- ja magneettikenttien ominaisuudet vaihtelevat monin eri tavoin riippuen siitä, mistä näkökulmasta sähkölaitetta tarkastellaan, ja on hankalaa tehdä pitäviä johtopäätöksiä niiden esiintymisestä ja hallitsemisesta. Muodostuvien kenttien rakenne ja ominaisuudet riippuvat mm. lähteenä toimivien johtimien fyysisistä ominaisuuksista ja sijoittelusta, muista piirin johtimista ja laitteessa käytettävien eristeiden sähkömagneettisista ominaisuuksista. (Williams 2007, 230.)

3 EMC-SUUNNITTELU

Häiriöiden syntyminen estämiseen on olemassa kolme tapaa, jotka ovat:

1. Häiriösignaalin ehkäiseminen häiriölähteessä
2. Häiriön kytketymsreittien tekeminen mahdollisimman heikoksi
3. Häiriökohteen suojaaminen häiriösignaalilta.

EMC:n käyttäytyminen laitteissa ja järjestelmissä on erittäin monimutkaista. Esimerkiksi korkeiden taajuuksien käyttäytymisen ennakointi on miltei mahdotonta katsomalla matalien taajuuksien käyttäytymistä ja päinvastoin. Siksi kaikki taajuudet täytyy mitata tai testata erikseen. Sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviin ongelmiin ei ole olemassa yleistä ratkaisua tai lähestymistapaa. Joskus yhden ongelman ratkaiseminen voi johtaa muihin ongelmiin vaikkapa eri taajuusalueilla. Häiriöiden syntyminen estäminen on usein järkevämpää kuin lukuisten järjestelmien suojaaminen.

3.1 Maadoitus

Maadoituksen pääasiallinen tarkoitus on (Koivisto ym. 2018, 50):

1. estää vaarallisen kosketusjännitteen syntyminen vikatapauksissa
2. estää häiriöiden syntyminen tietoliikenne- ja elektroniikkajärjestelmissä
3. estää ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamia vaurioita ja vaaratilanteita ja
4. järjestää vikavirralle kontrolloitu reitti, joka varmistaa suojalaitteiden nopean ja luotettavan toiminnan.

Maadoitus on yksi tärkeimmistä keinoista turvallisen ja häiriövapaan järjestelmän kehittämisessä. Häiriötön järjestelmä ei ole kuitenkaan välttämättä turvallinen, ja turvallinen järjestelmä ei ole välttämättä häiriötön. Sekä turvallisen että häiriövapaan järjestelmän toteuttaminen on suunnittelijan vastuulla, ja hyvän maadoitusjärjestelmän toteuttaminen vaatii aina huolellisen suunnittelun. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden kannalta laitteisto tulee ottaa huomioon kokonaisuutena yksittäisten laitteiden tai piirien sijasta. Puutteellinen maadoitus yhdessäkin yksikössä saattaa pilata järjestelmän toiminnan kokonaisuudessaan.

Hyvin suunniteltu maadoitusjärjestelmä ehkäisee sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviä ongelmia usein lisäämättä merkittävästi lopputuotteen yksikkökohtaista hintaa, sillä ainoa hinta on suunnitteluun käytetty aika. Huonosti suunniteltu maadoitusjärjestelmä voi joissain tapauksissa olla sähkömagneettisten häiriöiden pääasiallinen aiheuttaja, jolloin vianetsintään ja ongelman poistamiseen voidaan joutua kuluttamaan huomattavia määriä työtunteja. Tästä syystä maadoitusjärjestelmän huolellinen suunnittelu on myös taloudellisesti kannattavaa. (Ott 2009, 106.)

Maadoitusjärjestelmällä on useita eri käyttötarkoituksia. Määritelmä, jonka mukaan maa on nollapotentiaalinen omaava pinta tai taso, on mielekäs vain tasavirtapiirien tapauksissa tai matalilla taajuuksilla. Korkeilla taajuuksilla johteissa on aina merkittävää impedanssia, mistä johtuen korkeataajuisien virtojen kulkiessa näiden impedanssien läpi maahan syntyy kohtia, joissa esiintyy erilaisia korkeataajuisia potentiaaleja. (Paul 2006, 771.)

Maadoitus jaetaan kahteen kategoriaan, jotka ovat suojamaa ja signaalimaa. Suojamaadoitus vaaditaan normaalisti sähköiskuilta suojautumisen varmistamiseksi. Sähköiskuilta suojaamisen lisäksi suojamaadoituksella on tärkeä rooli ESD:n aiheuttamien virtojen ohjaamisessa pois niille herkiltä elektronisilta laitteilta. Suojamaa kytketään aina maapotentiaaliin. Signaalimaa on erityisesti elektronisissa laitteissa käytettävä maadoitustyyppi, jota pitkin signaalivirrat kulkevat takaisin lähtöpisteeseensä (digitaalinen logiikkaportti, sensori, lähetin, jne.).

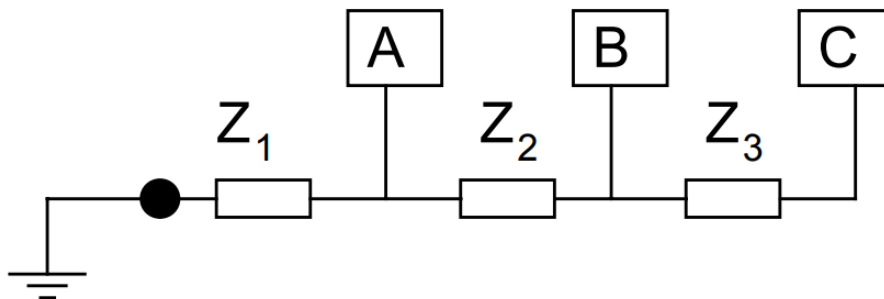
Maadoituksessa, kuten muissakin EMC:n huomioivassa suunnittelussa kannattaa noudattaa alusta asti hyväksi todettuja suunnittelusääntöjä. Häiriöille herkät ja voimakkaasti häiritsevät komponentit välille kannattaa jättää mahdollisimman paljon välimatkaa. Suositellaan omia maatasoja ja tehonsyöttöjä. Häiriölliset ja häiriölle herkät maatasot yhdistetään yhdestä pisteestä. Eri yksiköiden, kuten tehonsyötön ja maadoituksen, yhteisiä impedansseja pyritään välttämään. Jos eri yksiköiden välillä käytetään yhteisiä johtimia, niiden impedanssit tulee minimoida. Vältetään pitkiä maajohtimien vetoja. Signaali- ja paluvirtatiet tulee sijoittaa mahdollisimman lähekkäin ja käyttää suojattuja kaapeleita. Yksipistemaadoitusta (sarja, rinnan) käyttämällä suojaudutaan sähkö-

kentältä. Sekä magneetti- että sähkökentältä suojaudutaan käyttämällä monipistemaadoitusta. (ABB 2000.)

3.1.1 Maadoitustavat

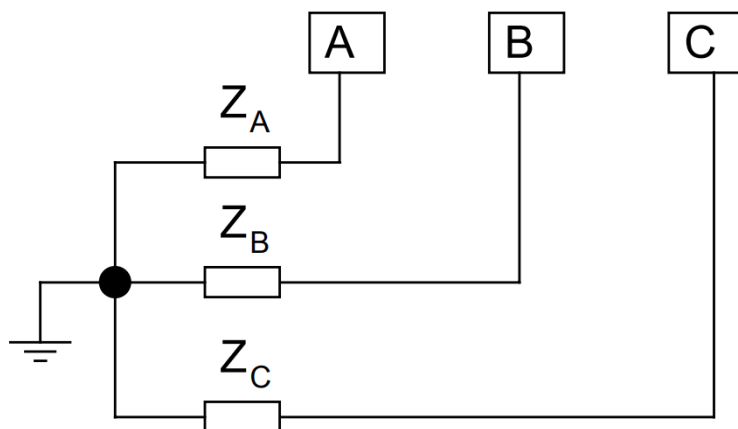
Maadoituksen yhtenä tehtävänä on luoda tasapotentiaalinen (pieni-impedanssinen) referenssipiste kaikille piirielementeille. Suunnittelussa erilaisia maadoittamistapoja sovellettaessa on selvittettävä maavirtojen kulkureitit. Paluuvirran kulkureitti määrittelee johdinsilmukan muodostaman pinta-alan. Piirieleментit voidaan kytkeä referenssipisteeseen kolmella eri tavalla: sarjaan, rinnan ja monipistekytkenä. (ABB 2000.)

Maadoituksen kytkeminen sarjaan on yleensä häiriön syntymisen ja häiriönsiedon näkökulmasta huonoin kolmesta eri maadoitusvaihtoehdosta. Maasilmukoita ei esiinny matalilla taajuuksilla, mutta yhteisten sarjaimpedanssien kautta kulkeva virta aiheuttaa yhteismuotoisia häiriöitä. Sarjaankytketyssä maadoituksessa yhteiset impedanssit tulisikin minimoida.



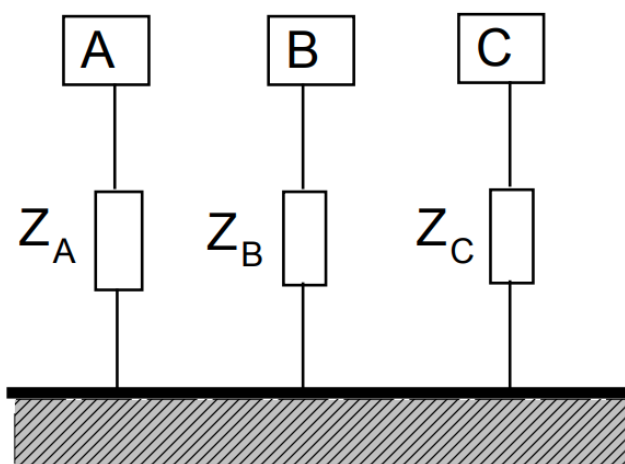
Kuva 5. Maadoituksen sarjakytkentä (ABB 2000)

Kun maadoitukset kytketään rinnan, vältetään häiriöongelmat, jotka kytkeytyvät maaimpedanssien kautta. Ongelmaksi saattaa muodostua useiden maakytkentöjen toteuttaminen ja suurilla taajuuksilla induktanssin kasvaessa tapahtuva induktiivinen kytkeytyminen johtimien välillä. Myös kapasitiivista kytkeytymistä voi tapahtua. Maajohtimen pituuden lähestyessä neljännestä aallonpituudesta, johdin alkaa toimia antennina, jolloin esiintyy häiriösaiteilyä. Maajohtimen turvallinen pituus on alle $1/20$ mahdollisen häiriösignaalin aallonpituudesta. Esimerkiksi 300 MHz:n taajuudella maajohtimen turvallinen pituus on vain noin 5 cm.



Kuva 6. Maadoituksen rinnankytkentä (ABB 2000)

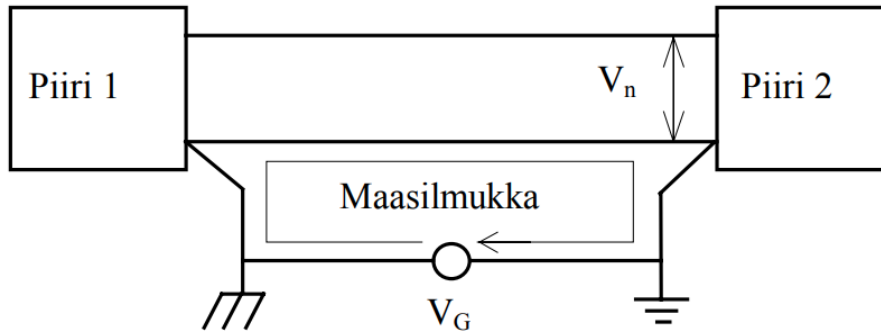
Suurilla, yli 10 MHz:n taajuuksilla kumpikaan aiemmin mainituista maadoitustavoista ei toimi tyydyttävällä tavalla, vaan on käytettävä monipistemaadoitusta. Monipistemaadoituksessa maataso toimii referenssitasona tienä paluuvirroille kaikille virtasilmuille. Piirit kytketään yhtenäiseen maatasoon mahdollisimman lyhyttä johdinta käyttämällä, jotta induktanssit ja virtasilmuikoiden pinta-alat jäisivät mahdollisimman pieniksi.



Kuva 7. Maadoituksen monipistekytentä (ABB 2000)

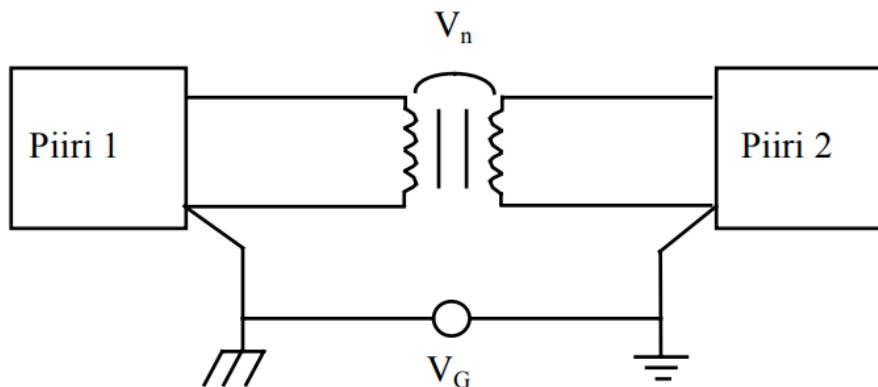
3.1.2 Maasilmukat

Maasilmukka muodostuu, kun kaksi piirielementtiä maadoitetaan eri potentiaalissa oleviin pisteisiin. Pisteiden välinen potentiaaliero (kuvassa $9 V_G$) aiheuttaa maasilmukkaan häiriövirran, joka kiertää maasilmukassa ja aiheuttaa laitteiden välillä häiriöjännitteen. Häiriön induktiivisessa kytketyksessä häiriön suuruusluokka on suoraan verrannollinen silmukan kohtisuoraan pinta-alaan magneettivuohon nähden.



Kuva 8. Maasilmukan muodostuminen kahden piirin välille (ABB 2000)

Maasilmukan kytkeytymisen vaimentamiseen on olemassa eri tapoja. Kytkeytymistä voidaan vaimentaa pienentämällä maadoitusimpedanssia, pienentämällä maavirtoja sekä käyttämällä yksipistemaadoitusta. Muodostunut maasilmukka voidaan myös katkaista asentamalla piirien välille esimerkiksi erotusmuuntaja tai kuristin.



Kuva 9. Maasilmukan katkaiseminen muuntajaa käyttämällä (ABB 2000)

Muuntajaa käyttämällä saadaan aikaan hyvä häiriövaimennus erityisesti matalilla taajuuksilla. Suurilla taajuuksilla muuntajan käämien välillä alkaa esiintyä hajakapasitanssia, joka oikosulkee maasilmukan. Korkeammilla taajuuksilla voidaan käyttää käämien välisellä staattisella suojalla varustettua muuntajaa. (ABB 2000.)

3.2 Kaapelointi

Laitteeseen liitetyt kaapelit toimivat aina häiriösäteilijänä, myös maadoitusjohdin. Säteilyn syynä ei yleensä ole suojattujen kaapeleiden vuotaminen, vaan

se johtuu usein kaapelivaippojen puutteellisesta maadoituksesta. Kaapeloinnin huomiominen EMC:n näkökulmasta on tärkeää, koska kaapelit ovat usein järjestelmän pisimpiä osia, minkä vuoksi ne käyttäytyvät tehokkaina antennina, jotka keräävät ja/tai lähettävät häiriösignaaleja. (ABB 2000.)

Kaapeleiden ja johtimien välillä tapahtuu sekä kapasitiivista että induktiivista kytkeytymistä. Kapasitiivista kytkeytymistä voidaan vaimentaa minimoimalla suojaamattoman signaalijohtimen pituus liitoksessa, maadoittamalla johdinvaippa häiriöttömään maatasoon ja käyttämällä suojattuja liittimiä. (ABB 2000.)

Laitetta tai järjestelmää suunniteltaessa kannattaa myös kaapeloinnin osalta noudattaa hyväksi todettuja EMC-suunnittelukäytäntöjä. Parhaiten EMC-ongelmilta kaapeloinnin osalta vältetään ryhmittelemällä kaapelit ja kulkureitit kaapeleiden kuljettamien signaalitasojen mukaan sekä käyttämällä häiriösuojattuja kaapeleita. Johtimien ja kaapelien pituudet kannattaa pitää mahdollisimman lyhyenä. Häiritsevät ja herkät kaapelit tulee ryhmitellä erikseen läpivientejä ja laitteen sisäisiä johdotuksia suunniteltaessa. Erityisen häiritsevät johtimet kannattaa sijoitella kulkemaan mahdollisimman lähellä kotelon metallirunkoa. Risteäviä kaapeleita pyritään välttämään, mutta tarvittaessa risteävät kaapelit sijoitetaan suoraan kulmaan toisiinsa nähden. Matalilla siirtotaajuuksilla (< 1 MHz) suojattu kaapeli maadoitetaan ainoastaan toisesta päästä. Yli 10 MHz:n taajuuksilla kaapeli maadoitetaan molemmista päistä. (ABB 2000.)

3.2.1 Reittivalinnat

Kaapeleiden asianmukainen reititys on hyödyllinen työkalu sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavuttamiseksi. Kaapeleiden ryhmittelyllä tavoitellaan piirin herkkien osien erottamista mahdollisimman etäälle piirin osista, jotka voivat toimia häiriöiden lähteenä. Piirin herkimpiä osia ovat usein mittauslaitteet, tietokoneet, ohjelmoitavat logiikat ja ylipäättään kaikki analogiseen ja digitaaliseen signaalin käsittelyyn käytetyt pienenisjännitteellä toimivat piirin osat. Häiriöitä lähettäviä laitteita ovat muun muassa virtalähteet, invertterit, lähettimet, releet, kontaktorit ja moottorit. (Armstrong 2009, 9.)

Kaapeleiden erottelun ymmärtämisen helpottamiseksi kaapelit on hyödyllistä jakaa luokkiin niiden kuljettaman signaalin tyyppin mukaan. (Kathalay 2017.)

Luokka 1: kaapelit, jotka kuljettavat erittäin herkkiä signaaleja

- pienoisjännitteiset (luokkaa mV) analogiset signaalit
- korkeataajuiset digitaaliset signaalit

Luokka 2: kaapelit, jotka kuljettavat melko herkkiä signaaleja

- alle 1 MHz analogiset signaalit
- 1–10 V, 4–20 mA

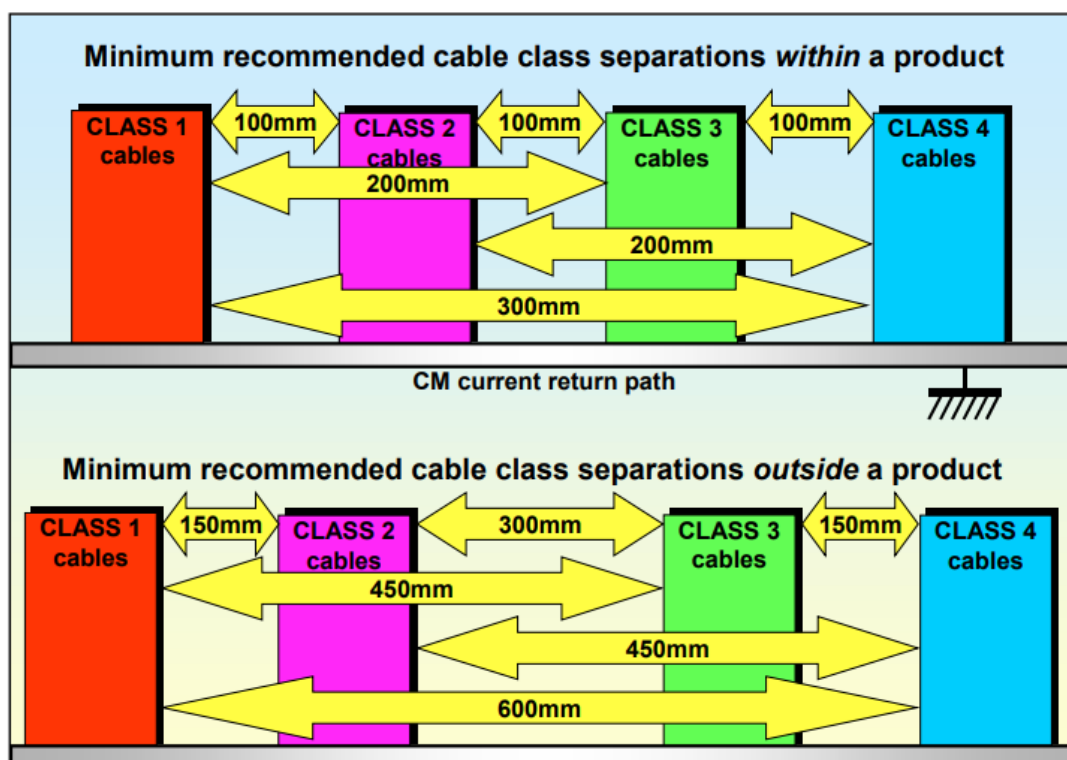
Luokka 3: kaapelit, jotka kuljettavat melko häiritseviä signaaleja

- pienjännitteen jakelu (<1000 VAC, <1500 VDC)

Luokka 4: kaapelit, jotka kuljettavat erittäin häiritseviä signaaleja

- taajuusmuuttajien lähdöt, moottorikäyttöjen tulot ja lähdöt, hakkuriteholähteiden tulot ja lähdöt

Kun kaapelit on jaoteltu luokkiinsa, kaapeleille suunnitellaan reitit luokkien mukaan. Reittien tulisi kulkea mahdollisimman lähellä yhteismuotoisen virran paluureittiä, esimerkiksi laitteen maadoitettua runkoa tai kotelointia. Eri luokkien kaapeleiden välille tulisi jättää niin paljon etäisyyttä kuin mahdollista. Kaapeleiden välinen minimietäisyys on hankala määritellä tarkasti, mutta suuntaa antava ohjeistus (design techniques, sivu 10) on, että >500 mm pituisille rinnakkaisille kaapeleille tulisi jättää vähintään 100 mm asennusväli luokan 1–2, 2–3 ja 3–4 kaapeleiden välillä. Tämä tarkoittaa vähintään 200 mm asennusväliä luokan 1–3 ja 2–4 kaapeleille ja vähintään 300 mm asennusväliä luokan 1 ja 4 kaapeleille. Kyseinen ohjeistus koskee kaapeleita, jotka kulkevat laitteen sisällä.



Kuva 10. Kaapeleiden minimiasennusetäisyydet luokittain (Armstrong 2009, 9)

Laitteen ulkopuolella kulkevat kaapelit tulisi aina erottaa toisistaan fyysisesti eri luokkien mukaan. Myös pitkiä rinnakkaisia kaapelireittejä tulisi välttää. Jos tämä ei ole mahdollista, laitteen ulkopuolella kulkevien kaapeleiden välille suositellaan jätettävän vähintään 150 mm luokkien 1–2 ja 3–4 välille sekä 300 mm luokkien 2 ja 3 välille. Eri luokan kaapeleiden kulkemista toistensa yli tulee välttää, mutta jos tämä ei ole mahdollista, risteävät kaapelit sijoitetaan suoraan kulmaan toisiinsa nähden.

3.3 Häiriöiden suodatus

Suodattimia käytetään signaalien ominaisuuksien muuttamiseen tai joskus signaalien eliminoimiseen kokonaan. EMC-suunnittelussa suodattamisella tarkoitetaan melkein aina alipäästösuodattamista. Tarkoituksena on normaalisti suodattaa taajuuden korkeita komponentteja, joiden oletetaan toimivan häiriösignaalina, ja päästää läpi matalia taajuuden komponentteja, joiden oletetaan olevan toivottuja signaaleja. Häiriöiden eliminoiminen kokonaan ei usein ole mahdollista, vaan suodattamisella tavoitellaan häiriösignaalin vaimennusta sellaiselle tasolle, että lähtevien häiriöiden laatutasot täyttyvät ja/tai vastaanotavassa laitteessa ei esiinny toimintahäiriöitä. (Williams 2007, 357.)

Suodatin suositellaan asennettavaksi kaikkiin kotelon rajapinnat ylittäviin johtimiin. Suodattimen asennuksessa tulee varmistua siitä, että häiriöt eivät kytkeydy uudelleen jo suodatettuun johtimeen esimerkiksi toisesta johtimesta. Suodatin vaatii aina häiriöttömän maadoituksen toimiakseen riittävällä tasolla. Korkeilla taajuuksilla passivisten suodattimien komponentit (kelat, vastukset, kondensaattorit) voivat alkaa käyttäytyä ns. epäideaalisella tavalla. Tästä syystä suodatinkomponenttien ominaisuudet tulee aina selvittää halutulla taajuusalueella.

3.3.1 Passiivinen ja aktiivinen suodatin

Sähkömagneettisten häiriöiden suodattamiseen voidaan käyttää passiivisia ja aktiivisia suodattimia. Passiivisen suodattimen toiminta perustuu häiriöiden suodattamiseen kapasitiivista tai induktiivista kuormaa, tai usein näiden yhdistelmää (RC/RL). Aktiiviset suodattimet perustuvat tehoelektronisiin laitteisiin ja niiden toiminta perustuu verkkoon syötettävään vastakkaismerkkiseen häiriöön, joka kumoaa verkossa esiintyvän häiriön. (Asp 2020.)

Passiivinen suodatin koostuu vastuksista, keloista ja kondensaattoreista. Vastukset ja kelat toimivat resistiivisenä kuormana, jonka tarkoituksena on rajoittaa tehopiikkien syntymistä. Kondensaattori toimii kapasitiivisena kuormana, jonka tarkoituksena on hillitä virranvaihtelua sekä rajoittaa taajuusaluetta. Näiden komponenttien yhteistoimintaa hyödyntämällä voidaan toteuttaa esimerkiksi yliaaltoja tehokkaasti suodattavia päästö- ja kaistanestosuodattimia.

Aktiivisen suodattimen toiminta perustuu korjaavien signaalien syöttämiseen sähköverkkoon. Korjaava signaali vähentää häiriösignaalin suhdetta hyötysignaaliin. Aktiivisella suodattimella generoitavan signaalin taajuus ja amplitudi optimoidaan sähköverkosta mitattavan jännite- tai virtadatan perusteella. Aktiivisen suodattimen etuna voidaan pitää sen pientä kokoa verrattuna saman vaimennuskyvyn omaaviin passiivisiin suodattimiin. Lisäksi aktiivisilla suodattimilla pystytään suodattamaan tehokkaasti sekä ero- että yhteismuotoisia häiriöitä tehokkaasti. Ongelmana on aktiivisten suodattimien toiminta vain rajallisella taajuus- ja tehoalueella, mistä johtuen ne täytyy suunnitella yksilöllisesti eri käyttökohteiden mukaan.

3.3.2 Ferriitti

Yksi yleisimmistä tekniikoista radiotaajuisten häiriöiden vähentämisessä on ferriittirenkaiden asennus kaapeleiden ympärille. Ferriitti on yleistermi ei-johtaville keraamisille aineille, jotka koostuvat mm. raudan oksideista, koboltista, nikkelistä, sinkistä, magnesiumista. Ferriittiä voidaan pitää korkeataajuisena vaihtovirtavastuksena, joilla on lähes olematon resistanssi matalilla taajuuksilla tai tasavirralla. Ferriittirenkaat toimivat parhaiten ei-toivottujen signaalien vaimentamisessa yli 10 MHz:n taajuusalueilla, vaikka joissain sovelluksissa ne voivat olla tehokkaita jopa 1 MHz:n alueella. Oikein käytettynä ferriittirengas voi vaimentaa korkeataajuisia värähtelyjä, suodattaa yhteis- ja eromuotoisia signaaleja ja vähentää kaapeleista lähtöisin olevia johtuvia ja säteileviä häiriöitä. (Ott 2009, 226–227.)



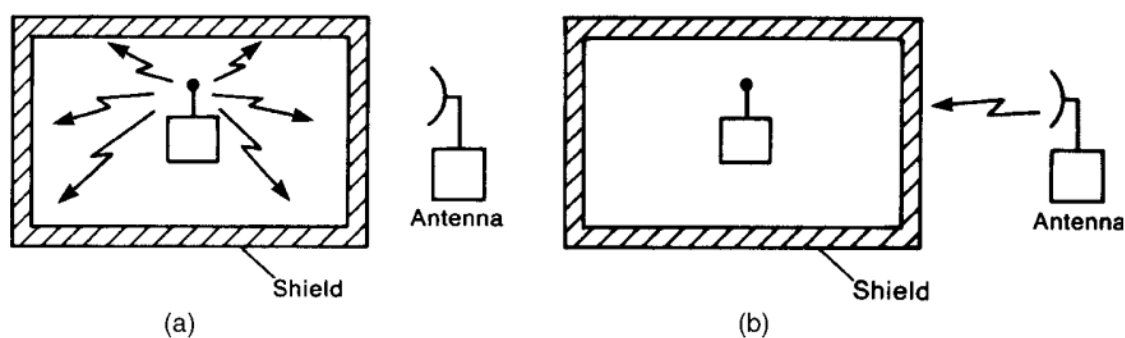
Kuva 11. Kaapelin ympärille asennettava ferriittirengas

Ferriittirengasta valitessa kannattaa suosia pitkää rengasta paksun sijasta, sillä ferriittirenkaan impedanssi on suoraan verrannollinen sen pituuteen. Ferriittirengas tulee asentaa mahdollisimman tiiviisti kaapelin ympärille. Yhden kaapelin ympärille voidaan asentaa myös useampia ferriittirenkaita, jolloin impedanssi kasvaa kasvaa renkaiden määrän mukaan. Induktanssia voidaan lisätä myös kiertämällä kaapeli ferriittirenkaan sydämen ympärille useamman kerran.

3.4 Kotelointi

Koteloinnilla voidaan pienentää laitteen häiriöherkkyttä sähkömagneettista säteilyä vastaan. Maadoitetulla metallikotelolla saadaan yleensä hyvä suoja magneettisia ja staattisia häiriöitä vastaan. Koteloinnilla tarkoitetaan yleensä metallista koteloita, jonka sisälle sähkölaite tai sen osa sijoitetaan kokonaisuudessaan. (Paul 2006, 713.)

Koteloinnilla on kaksi tehtävää, jotka on esitetty kuvassa 13. Koteloinnin ensimmäinen tehtävä on estää sähkölaitteen tai sen osan aiheuttamien säteilypäästöjen kulkeutumista sähkölaitteen rajojen ulkopuolelle ja tällä tavoin joko estää laitteen sallittujen säteilypäästöarvojen ylittäminen tai estää laitetta aiheuttamasta häiriötä muihin ympäristön sähkölaitteisiin (kuva 13a). Koteloinnin toisena tehtävänä on estää laitteen ulkopuolisesta sähköisestä järjestelmästä säteilevien häiriöiden kytkeytyminen laitteeseen itseensä (kuva 13b).



Kuva 12. Koteloinnin käyttötarkoitukset (Paul 2006)

Kotelo toimii käytännössä esteenä sähkömagneettisten aaltojen kulkemiselle laitteeseen tai laitteesta. Häiriölähteen suojaaminen koteloinnilla on yleensä tehokkaampaa kuin vastaanottavan laitteen suojaaminen.

Kaikilla yhtenäisillä johtavilla metallikoteloilla saavutetaan yleensä hyvä sähkökentän vaimennus. Hyvin johtavat metallikotelot tarjoavat hyvän suojan korkeataajuiselta magneettikentältä (>100 kHz), kun taas matalataajuiselta magneettikentältä (10—100 kHz) suojaudutaan parhaiten käyttämällä magneettisia materiaaleja. Koteloinnin eri osien välille tulee varmistaa hyvä sähköinen kontakti. Liitoksien ja saumakohtien suojausvaimennusta voidaan parantaa käyttämällä esimerkiksi johtavilla tiivisteillä ja voiteluaineilla. (ABB 2000.)

3.4.1 Aukot ja läpiviennit

Hyvinkään suunnitellusta koteloinnista ei ole paljoakaan hyötyä, jos sähkömagneettinen energia päästetään kulkemaan kotelon sisälle tai sieltä ulos vaihtoehtoisia reittejä pitkin, kuten kaapeleiden läpivientien kautta. Kaapelit voivat vetää häiriötä puoleensa kotelon toisella puolella ja johtaa häiriösätei-

lyä kotelon toiselle puolelle. Koteloinnin eheyden säilyttämiseksi häiriöjännitteet tulisi suodattaa kaikista koteloinnin läpäisevistä kaapeleista. Koteloinnin läpäisevät kaapeleiden suojavaipat tulisi yhdistää koteloon maadoittamalla. (Ott 2009, 238.)

Käytännössä mitkään kotelot eivät ole täysin umpinaisia vaan ne sisältävät mm. kansiä, ovia, kaapeleiden reikiä, ilmastointiaukkoja, kytkimiä ja niin edelleen. Kaikki koteloinnin aukot heikentävät kotelon tehokkuutta. Aukot vaikuttavat enemmän magneettikentän vuotamiseen kuin sähkökentän vuotamiseen, joten magneettikentän vuotamisen estämiseksi tehtyjä toimenpiteitä painotetaan enemmän. Samat toimenpiteet vaikuttavat tosin usein positiivisesti myös sähkökentän vuotamiseen. Sähkökentän vaimennus on yleensä riittävällä tasolla kaikilla yhtenäisillä metallista valmistetuilla johtavilla koteloilla. Pinnoitetuilla ja seostetuilla johtavilla muovikoteloilla ei yleensä saavuteta riittävää vaimennusta matalilla taajuuksilla.

Koteloinnin aukoista vuotavan säteilyn määrä riippuu pääosin kolmesta eri asiasta, jotka ovat:

1. aukon suurin mahdollinen lineaarimitta (ei pinta-ala)
2. sähkömagneettisen kentän aaltoimpedanssi
3. kentän taajuus.

Koteloinnin tehokkuus pienenee, kun aukkojen määrää lisätään. Tehokkuuden pieneneminen riippuu aukkojen lukumäärän lisäksi aukkojen esiintymistiheydestä ja aukkojen välisestä etäisyydestä. Aukkojen ja saumojen määrä sekä niiden dimensiot kannattaa pitää niin pienenä kuin mahdollista. Yhden suuren aukon sijasta kannattaa suosia useamman pienen aukon verkkomaista rakennetta. (ABB 2000.)

Sauma on pitkä ja kapea rako, joka saattaa olla sähköisessä kosketuksessa pituutensa eri kohdissa. Pitkää ja kapeaa saumaa voisi verrata pitkään ja kapeaan johtimeen, joka toimii antennina. Jos sauman pituus sattuu olemaan kokoluokaltaan puolet aallonpituudesta, se toimii tehokkaana antennina. Siksi on tarpeen varmistaa sähköisten kontaktipisteiden olemassaolo säännöllisin

välimatekoin saumassa, jotta syntyvän antennin pituus lyhenisi. Jatkuva sähköinen kontakti pitkin sauman pituutta ei yleensä ole välttämätöntä, mutta sillä saavutetaan hyviä tuloksia varsinkin, kun vaaditaan mittavaa määrää kotelointia tai korkeita taajuuksia käytettäessä. (Ott 2009, 273.)

4 VAATIMUKSET

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden vaatimustenmukaisuudella tarkoitetaan sähköisen tai sähkömekaanisen tuotteen lakien, direktiivien ja säännöksiä noudattamista siinä maassa, missä laitetta myydään. Markkinoilla myytävien laitteiden tulisi olla turvallisia, eivätkä ne saa aiheuttaa uhkaa terveydelle. Laitteiden tulee myös täyttää niille asetetut laatuvaatimukset, eivätkä ne saa saastuttaa ympäristöä. Erityisesti sähkömagneettista yhteensopivuutta koskeva vaatimus on, että laitteiden tulee toimia käyttöympäristössään niille tarkoitettulla tavalla.

4.1 EMC-direktiivi

Euroopan unionin alueella julkaistiin maaliskuussa 2014 EMC-direktiivi 2014/30/EU, jota sovelletaan vuodesta 2016 lähtien. Uusi direktiivi korvasi aiemman, vuonna 2007 voimaan tulleen EMC-direktiivin. Suomessa EMC-direktiivin säännökset on saatettu osaksi sähköturvallisuuslakia (1135/2016) ja valtioneuvoston asetusta sähkölaitteiden ja -laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta (1436/2016).

EMC-direktiivi koskee laajaa valikoimaa sähköisiä ja elektronisia laitteita, järjestelmiä ja asennuksia, jotka voivat aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä ympäristössään tai joiden toimintaan sähkömagneettiset häiriöt voivat vaikuttaa. Direktiivin soveltamisalaan eivät kuulu radiolaitteistot, ilmailualan tuotteet, radioamatöörien radiolaitteet, joita ei ole saatavilla kaupallisesti ja tutkimuskäyttöön tai vastaavaan ammattikäyttöön tarkoitetut arviointivälineistöt. Myöskään sähkömagneettisilta ominaisuuksiltaan vähäiset laitteet eivät kuulu EMC-direktiivin piiriin. (Tukes 2022.)

Direktiivin päätavoitteena on taata laitteistojen vapaa liikkuvuus ja luoda hyväksyttävä sähkömagneettinen ympäristö varmistamalla, että laitteistot toimivat käyttöympäristössään, niin kuin ne on tarkoitettu. Olennaisten vaatimusten

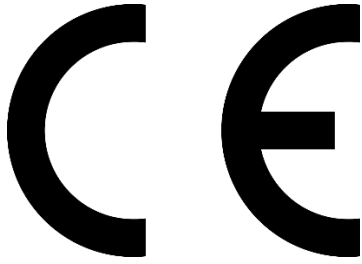
tarkoituksena ei ole varmistaa laitteiden absoluuttista suojausta (nollatason päästöt tai täysi immuniteetti päästöjä vastaan). Direktiivissä ei myöskään määritellä laitteiden EMC-ominaisuuksia yksityiskohtaisesti, vaan vaatimustenmukaisuus pystytään osoittamaan harmonisoituja eurooppalaisia standardeja käyttämällä. (European Commission 2017, 7.)

EMC-direktiivin liitteessä 1 annetaan laitteiden olennaiset suojausvaatimukset. Laitteen on oltava rakenteeltaan sellainen (Koivisto ym. 2018, 12–13), että

- laitteiston aiheuttama sähkömagneettinen häiriö ei ylitä tasoa, jonka ylittyessä radio- ja telelaitteet tai muut laitteistot eivät voi toimia tarkoitetulla tavalla
- laitteiston sille tarkoitettussa käytössä odotettavissa olevan sähkömagneettisen häiriön siedon taso on sellainen, että laitteisto toimii tarkoitetun käytön heikentymättä kohtuuttomasti.

Kiinteät asennukset tai laitteistot, eli erityyppisten laitteiden tai kojeiden kokonaisuudet, jotka on asennettu, koottu ja tarkoitettu pysyvän käytössä ennalta määritellyssä paikassa, eivät tarvitse CE-merkintää tai vaatimustenmukaisuusvakuutusta. Niiden asentamisessa tulee kuitenkin noudattaa hyviä teknisiä käytäntöjä ja varmistua siitä, että EMC-direktiivin liitteessä 1 määritellyt olennaiset vaatimukset toteutuvat. Kiinteän asennuksen haltijan on myös kyettävä selvittämään sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvien suojausvaatimusten toteuttaminen asiaankuuluvien dokumenttien avulla. (Koivisto ym. 2018, 12.)

Sähkölaite, joka otetaan käyttöön tai saatetaan markkinoille EU-alueella, täytyy varustaa CE-merkinnällä (ransk. Conformité Européenne, kuva 14). CE-merkintä todistaa, että laite täyttää EMC-direktiivissä määritellyt suojausvaatimukset ja että laitteen valmistaja on arvioinut vaatimusten täyttymisen sekä laatinut vaatimusten täyttymisestä vaatimustenmukaisuusvakuutuksen direktiivissä määritellyllä menettelytavalla. CE-merkinnällä varustettujen laitteiden markkinoille saattamista ei voida estää EU:n jäsenmaissa viranomaisten toimesta. (Koivisto ym. 2018, 12.)



Kuva 13. Sähkölaitteen vaatimusten mukaisuuden täyttymisestä kertova CE-merkintä

Sähkölaitteeseen kiinnitetty CE-merkintä osoittaa, että valmistaja on todennut, että laite täyttää sille soveltuvat standardeissa määritellyt häiriönpäästö- ja häiriönsietovaatimukset tai muuten arvioinut, että laite täyttää direktiivin liitteen 1 vaatimukset. CE-merkinnän kiinnittämisestä vastaa yleensä laitteen valmistaja. Mikäli havaitaan, että CE-merkintä on lisätty laitteeseen väärin perustein, voidaan laite poistaa EU:n markkinoilta tai rajoittaa sen vapaata liikkumista. (Koivisto ym. 2018.)

4.2 Standardit

EMC-standardit ja normit määrittelevät ehdot, säännöt ja testausmenetelmät sähkömagneettiselle yhteensopivuuteen liittyen. Lisäksi ne määrittelevät rajat ja vähimmäiset testausastot sähköisille ja sähkömagneettisille päästöille. EMC-standardeissa määritellään testausolosuhteet, testauslaitteisto ja testausympäristö, minkä ansiosta mittausten keskinäinen vertailu ja testausten toistettavuus helpottuvat. (Academy of EMC 2022.)

EMC-standardien määrittelystä ja laatimisesta vastaavat kansainväliset, kansalliset tai alueelliset organisaatiot ja toimijat. IEC-standardit ovat maailmanlaajuisia, ja ne toimivat eurooppalaisten ja kansallisten standardien pohjana. IEC:n alaisuudessa toimii mm. erityisesti radiotaajuisia häiriöitä käsitteleviä standardeja julkaiseva tekninen komitea CISPR. EU-alueella EMC-standardien määrittelystä vastaa CENELEC (ransk. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique). CENELECin julkaisemat standardit tunnustetaan etuliitteestä EN (European Norm), ja ne ovat identtisiä kaikissa CENELECin jäsenmaissa. SFS-standardit ovat suomalaisia SESKOn laatimia standardeja, jotka julkaistaan Suomen Standardisoimisliiton (SFS) kautta. SFS-standardeista 95 % on sisällöltään EN-standardien kanssa identtisiä (SFS-EN -standardit).

Näistä alle 10 % on käännetty suomeksi ja loput ovat saatavilla englanninkielisenä. (Sesko 2022.)

Laitteiden ja laitteistojen vaatimustenmukaisuuden osoittaminen onnistuu vattomimmin käyttämällä laitteiden EMC-testauksessa niille soveltuvia SFS-EN ja IEC-standardeja (SFS 2022). EMC-standardeiksi käsitetään yleensä standardit, jotka koskevat laitteiden häiriönpäästöjä ja häiriönsietoa. EMC-standardit jakautuvat perusstandardeihin, yleisiin standardeihin ja tuote- tai tuoteryhmästandardeihin.

4.2.1 Perusstandardit

Standardit, joissa määritellään ja standardoidaan tärkeimmät häiriöparametrit sekä niitä koskevat testaus- ja mittausmenetelmät ja olosuhteet, kutsutaan EMC-perusstandardeiksi. Perusstandardit löytyvät CISPR:n julkaisemasta 16-sarjan osista 1–4 sekä IEC:n julkaiseman 16000-sarjan osista 1–5. Perusstandardit ovat standardeja, joihin muissa EMC-standardeissa (yleiset standardit, tuotestandardit jne.) viitataan. Perusstandardit voidaan karkeasti jakaa kolmeen kategoriaan, jotka ovat käyttöympäristö, häiriönsieto, häiriönpäästö sekä asennukset ja häiriöiden vaimentaminen.

Käyttöympäristöön liittyvissä perusstandardeissa luokitellaan ja kuvataan erilaisia sähkömagneettisiä ympäristöjä ja yhteensopivuustasoja. Tällaisia standardeja ovat esimerkiksi:

IEC TR 61000-2-5

- sähkömagneettisten ympäristöjen kuvaus ja luokittelu

IEC TR 61000-2-3

- säteilyyn ja muuhun kuin sähköverkkoon liittyvien taajuuksien johtuvat ilmiöt

Häiriönpäästöön liittyvissä perustandardeissa määritellään testausjärjestelyt, testaustekniikat, testauslaitteistot, testausympäristöt sekä muita sähkömagneettisten päästöjen testauksessa ja mittauksessa huomioon otettavia asioita. Tällaisia standardeja ovat esimerkiksi:

IEC 61000-4-7

- opastavat tiedot (ei testausmenetelmiä) harmonisten ja väliharmonisten yliaaltojen mittausten menetelmistä ja laitteista

IEC 61000-4-14

- testit verkkojännitteen hitaille vaihteluille

Häiriönsietoon liittyvissä perustandardeissa määritellään testausjärjestelyt, testaustekniikat, testauslaitteistot, testausympäristöt sekä muita sähkölaitteiden häiriönsiedon testauksessa ja mittauksessa huomioon otettavia asioita.

Tällaisia standardeja ovat esimerkiksi:

IEC 61000-4-1

- katsaus kaikista häiriönsietotesteistä

IEC 61000-4-2

- staattisen sähkön purkaus

IEC 61000-4-3

- sähkömagneettinen kenttä

Asennuksiin ja häiriöiden vaimentamiseen liittyvät perusstandardit antavat suuntaviivat koskien maadoittamista, kaapelointia sekä ulkoisten sähkömagneettisten vaikutusten lieventämistä. Tällaisia standardeja ovat esimerkiksi:

IEC TR 61000-5-1

- yleisiä asennuksissa ja häiriöiden vaimentamisessa huomioitavia asioita

IEC TR 61000-5-2

- maadoitus ja kaapeloinnit

4.2.2 Yleiset standardit

Yleiset standardit nimensä mukaisesti yleisluonteisia ja jossain määrin yksinkertaistettuja tuotestandardeja, joissa viitataan EMC-perusstandardien yksityiskohtaisiin mittaus- ja testaustapoihin. Yleisissä standardeissa esitetään ainoastaan raja-arvot, testaustasot ja suuntaa antavat toimintakriteerit ilman yksityiskohtaisia vaatimuksia toiminta- tai suorituskyvylle, sillä yleisten standardien koskema laitevalikoima on niin suuri. Yleiset standardit koskevat kotitalouden, kaupan alan ja kevyen teollisuuden laitteiden häiriönpäästöjä ja häiriönsietoa sekä teollisuuden laitteiden häiriöpäästöjä ja häiriönsietoa. Yleisiä standardeja voidaan noudattaa, jos tuoteryhmä- tai tuotestandardia ei ole vielä olemassa, jolloin ne ovat riittäviä tuotteen sertifiointiin. (IEC 2022.)

Yleiset EMC-standardit löytyvät IEC:n julkaiseman standardikokoelman 61000 kuudennesta osasta. (IEC 2022.)

Esimerkkejä yleisistä EMC-standardeista kotitalouden, kaupan ja kevyen teollisuuden alalle ovat:

IEC 61000-6-3

- häiriönpäästöihin liittyvät vaatimukset

IEC 61000-6-1

- häiriönsietoon liittyvät vaatimukset

Yleisiä standardeja teollisuuden puolelle ovat esimerkiksi:

IEC 61000-6-4

- häiriönpäästöihin liittyvät vaatimukset

IEC 61000-6-2

- häiriönsietoon liittyvät vaatimukset

4.2.3 Tuote- ja tuoteryhmästandardit

Yksityiskohtaisemmat laitekohtaiset testausvaatimukset, laitteen toiminta testin aikana sekä hyväksymiskriteerit määritellään tuote- ja tuoteryhmästandardeissa. Tuotestandardit koskevat tiettyjä laitteita ja tuotteita, kuten vaikkapa sähköajoneuvoja tai kaapeleita ja periaatteessa kaikille laitteille tulisikin laatia omat tuotestandardinsa. Tuotestandardeissa viitataan relevantteihin perustandardeihin laitekohtaisesti, ja niissä määritellään vähimmäiset raja-arvot laitteiden häiriönsiedolle ja häiriönpäästölle. Tuoteryhmästandardit koskevat laajemmin sellaisten laitteiden tai tuotteiden joukkoa, jotka ovat ominaisuuksiltaan hyvin samankaltaisia tai jotka toimivat samassa käyttöympäristössä ja joilla on samankaltaiset soveltamisalat.

Esimerkkejä tuotestandardeista ovat:

IEC 62104

- radiovastaanottimet

IEC 61851-21

- sähköautojen latausjärjestelmät

IEC 62599-2

- hälytys- ja varoitusjärjestelmät

Tuoteryhmästandardeja ovat mm.

CISPR 15

- sähkövalaistus ja vastaavat laitteet

IEC 60601-1-2

- lääkinnälliset laitteet

Tuotestandardit on lajiteltu kategoriattain IEC:n toimesta, jotka ovat komponentit, laitteet, järjestelmät ja (kiinteät) asennukset.

Komponentit ovat IEC:n määritelmän mukaan yksikköjä tai osia, jotka eivät toimi yksinään, vaan ovat osa jotain laitetta. Ne voivat olla passiivisia, kuten vastukset tai kondensaattorit, tai aktiivisia, kuten virtalähteet ja moottorit. Laitteet ovat valmiita tuotteita, joilla on tietty toimintatarkoitus ja jotka on tarkoitettu lopulliseen käyttöön esimerkiksi kotitalouden laitteina, lääkinnällisinä laitteina tai työkaluina. Järjestelmillä tarkoitetaan EMC:n näkökulmasta laitteiden ja/tai komponenttien yhdistelmää, joista koostuu yksi toiminnallinen yksikkö, jonka on tarkoitus suorittaa jotain tiettyä tehtävää. Esimerkki tällaisesta järjestelmästä voisi olla vaikkapa keskusyksiköstä, monitorista, näppäimistöä, hiirestä ja tulostimesta koostuva tietokonejärjestelmä. Asennuksilla tarkoitetaan EMC-standardien näkökulmasta komponenttien, laitteiden ja järjestelmien kokonaisuutta, jotka asennetaan tai pystytetään tietylle alueelle, kuten teollisuuslaitokset, muuntoasemat tai kauko-ohjausjärjestelmät. Asennukset voivat olla levittäytyneinä laajallekin alueelle, jolloin niiden EMC-mittaukset ja testaukset suoritetaan usein paikan päällä kenttämittauksina. (IEC 2022.)

4.3 Soveltuvien standardien valinta

Soveltuvien standardien valinta suoritetaan seuraavassa järjestyksessä:

Tuotekohtaiset standardit → Tuoteryhmien standardit → Yleiset standardit

Halutulle laitteelle tai järjestelmälle sovellettavien standardien valinta aloitetaan selvittämällä, onko laitteelle olemassa tuotestandardia. Olemassa olevat tuotestandardit löytyvät esimerkiksi IEC:n verkkosivujen kautta. Jos laitteelle löytyy tuotestandardi, kyseessä olevasta tuotestandardista selvitetään, määritelläänkö laitteelle tuotestandardissa raja-arvot tuotteen häiriönsiedolle ja/tai häiriönpäästöille, jonka jälkeen kyseisiä standardien raja-arvoja sovelletaan tuotteen testauksessa. Mikäli tuotestandardia ei ole olemassa, pyritään soveltamaan tuoteryhmästandardin määrittelemiä häiriönpäästöjen ja häiriönsiedon raja-arvoja.

Mikäli tuote- tai tuoteryhmästandardia ei ole olemassa, sovelletaan yleisiä EMC-standardeja. Kuten aiemmin mainittiin, yleiset EMC-standardit jaetaan käyttöympäristön mukaan kotitalouden, kaupan ja kevyen teollisuuden standardeihin sekä teollisuuden standardeihin. Soveltuva yleinen standardi valitaan kyseessä olevan tuotteen käyttöympäristön mukaan.

Omalle laitteelle tai järjestelmälle soveltuvia standardeja valitessa voi olla hyödyllistä myös selvittää, mitä standardeja kilpailevat laitevalmistajat ovat soveltaneet. Myös EMC-testauspalveluja tarjoavilta yritykset antavat neuvoja soveltuvien standardien valitsemiseen. Testauspalveluita tarjoavat Suomessa alan yritysten lisäksi myös useat ammattikorkeakoulut ja yliopistot.

5 HAASTATTELUT

Opinnäytetyötä varten suoritettiin muutamia asiantuntijahaastatteluja, joiden tarkoituksena oli saada vastauksia sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviin yleisimpiin ongelmakohtiin ja vastausten perusteella selvittää, mihin EMC-suunnittelussa kannattaisi asiantuntijoiden mukaan kiinnittää erityisesti huomiota, jotta valmiin tuotteen sähkömagneettinen yhteensopivuus toteutuisi todennäköisimmin. Lisäksi haastatteluissa tiedusteltiin mielipiteitä EMC-standardien vaatimusten riittävydestä, joiden todettiin melko yksimielisesti olevan sopivalla tasolla, vaikkakin sähkölaitteen valmistajan kannalta testattavaa on joskus liikaakin ja dokumentoinnin saaminen asianmukaiseen kuntoon voi osoittautua työlääksi.

Haastateltavat olivat testauspalveluita tarjoavien yritysten edustajia ja sähkösuunnittelijoita. Haastattelut toteutettiin sähköpostin välityksellä.

5.1 Häiriöiden lähteet ja kytkeytymistavat

Haastatteluissa kartoitettiin mm. yleisimpiä sähkömagneettisten häiriöiden lähteitä ja kytkeytymistapoja. Erään haastateltavan kokemuksen mukaan sähkömagneettisia häiriöitä aiheuttavat yleisimmin varsinkin elektroniikkapuolella ja piirikorttitasolla vakiotaaajuudella toimivat hakkuripiirit, suuritaajuiset kello-oskillaattorit, prosessorit ja muistit. Haastateltava mainitsi myös, että kyseiset sovellukset aiheuttavat usein ongelmia erityisesti, kun niihin liittyvät väylät kasvavat pituudeltaan tai jos ne on terminoitu väärin. Oskillaattorien ja kellopiirien tapauksessa laitteet tuottavat jo lähtökohtaisesti taajuuksia, joita ei saa päästää laitteiden ulkopuolelle, vaikka niiden käyttö olisikin suunniteltu oikein.

Tehoelektroniikan ja tehoelektronisten laitteiden ohjauksen puolella yleisimmiksi häiriöiden lähteiksi mainittiin moottorien ohjaimet, invertterit ja taajuusmuuttajat. Koneet ja laitteet, joissa kytetään suuria tehoja aiheuttavat usein

instrumentointikaapeleiden välityksellä kytkeytyviä häiriöitä, etenkin jos kaapeloinnit sijaitsevat häiriölähteen läheisyydessä. Ohjaimet ja invertterit muodostuvat ongelmaksi, koska tehelektronikan ohjauksessa pyritään mahdollisimman korkeaan hyötysuhteeseen, mikä tarkoittaa lyhyitä kytkentäaikoja eli nopeita tason muutoksia, joista syntyy taajuustasoa tarkasteltaessa korkealle nousevia spektrikomponentteja.

Erään haastateltavan mukaan häiriöitä aiheuttaa usein häiriöjännitteen tarttuminen hajakapasitanssin kautta korkeaimpedanssiseen piiriin ja vaihtovirran kytkeytyminen kaapeleiden ja johtimien välillä. Kyseisten tapausten ollessa kyseessä puhutaan kapasitiivisesta ja induktiivisesta kytkeytymisestä. Erään haastateltavan kokemuksen perusteella eniten ongelmia aiheuttavat sähkökenttämuotoiset säteilevät häiriöt, kun taas magneettikenttä aiheuttaa ongelmia erittäin harvoin. Usean haastateltavan mukaan säteilevät häiriöt ovat häiriöiden kytkeytymistavoista yleisimpiä. Hyvä suoja säteileviltä häiriöiltä saadaan kiinnittämällä huomiota asianmukaiseen häiriöiden suodattamiseen ja kotelointiin. Myös staattisen sähköön purkauksien mainittiin aiheuttavan jonkin verran vikoja. Joskus staattisen sähköön purkauksen aiheuttamat häiriöt ovat piileviä, ja ne tulevat ilmi vasta ajan kanssa.

5.2 Suunnittelu

Erään haastateltavan mukaan EMC-suunnittelun suurimpana haasteena on kokonaisuuden hahmottaminen, esimerkiksi maadoitusta suunniteltaessa; joskus käy niin, että piiri, jonka suunnittelija on tarkoittanut maaksi, toimiikin antennina. Haastateltavan mainitsemassa esimerkkitapauksessa kellotaajuudeltaan 1 GHz:n prosessorin aallonpituus on 300 mm. Taajuutta siirretään piirilevyllä aallonpituuden neljäsosan verran, eli 75 mm ja nopeuskerroin huomioiden 40 mm. Jos tämä siirtolinja on väärin päätetty, esimerkiksi avoin, muodostuu siitä täydellinen antenni.

Eräs haastateltava mainitsi piirin impedanssitason ja sitä kautta häiriöherkkyyden sekä komponenttien epäideaalisuuden ymmärtämisen olevan oleellinen osa hyvää EMC-suunnittelua. Komponenttien epäideaalisuudella tarkoitetaan taajuuksien kasvaessa (>1 MHz) tapahtuvaa komponenttien käyttäytymisen muutosta, joka ei noudata enää komponentin käyttäytymisen ns. ideaalimallia.

Epäideaalisuutta voi esiintyä esimerkiksi passiivisten suodattimien kanssa. Haastatteluissa ilmi tulleita muita suunnitelun ongelmakohtia olivat vaatimusten yhteensovittaminen, normien mukaisten päästöjen saavuttaminen ja laitteistojen erilisiä toimintoja sisältävien koteloiden väliset johdotukset.

Haastattelujen perusteella suunnittelussa erityisesti silmällä pidettäviä seikkoja, jotka parantavat sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavuttamisen todennäköisyyttä ovat piirirakenteiden suunnitteleminen fyysisesti mahdollisimman pienikokoiseksi, piirien suunnittelu selviin lohkoihin sekä näiden lohkojen tulevien ja lähtevien signaalien suojaus ja suodatus. Laitteen syöttöön asennettava suodatin tulee sijoittaa esimerkiksi kaapin kylkeen sen sijaan, että kaapin sisälle tuodaan häiriötä levittävä kaapeli. Erityisen häiritsevät lohkot tulisi sijoittaa metallikoteloon, ja mikäli kotelossa on ovia, ne kannattaa maadoittaa ja tarvittaessa tiivistää. Mikäli laitteessa on näyttöjä, niihin kannattaa lisätä metallikalvot.

Ulkoisten johdotusten suojaus ja kaapelivetojen suunnittelu on tehtävä niin, että vältetään silmukoiden muodostumiselta. Pitkiä kaapelivetoja tulisi välttää, mikäli mahdollista. Maadoituksen suunnittelemiseen kannattaa panostaa, jotta vältetään esimerkiksi maasilmutumisen muodostumiselta. Myös laitteen asennusvaiheessa tulee varmistaa, että PE-kytkennät ovat asianmukaisella tasolla. Suuritehoiset ja järjestelmän herkimmät osat tai linjat tulee erottaa rakenteissa, esimerkkinä eri signaalitasoja kuljettavat kaapelit.

Ongelmatilanteilta vältetään parhaiten, kun hyödynnetään hyväksi havaittuja suunnittelukäytäntöjä ja noudatetaan komponenttivalmistajien sovellusohjeita. Myös EMC-simulointiohjelmat kehittyvät jatkuvasti ja niiden käyttö voi mahdollisesti helpottaa suunnittelijan työtä joillakin osa-alueilla. Parhaaseen lopputulokseen päästään usein, kun EMC-testaus otetaan mukaan tuotekehitykseen jo melko varhaisessa vaiheessa, sillä tuotekehitysvaiheessa olevalle prototyyppille on helpompaa tehdä muutoksia kuin valmiille laitteelle.

6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli tuottaa toimeksiantoyritykselle EMC-suunnittelun yleisohje ja yleishyödyllinen tietopaketti sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta ja siihen liittyvistä ilmiöistä. Tutkimusaineston perusteella selvitettiin, millä tavalla EMC tulee huomioida sähkösuunnittelussa ja koottiin yhteenveto EMC-suunnittelusta ja siihen liittyvistä keskeisistä vaatimuksista.

EMC on aihealueena erittäin laaja, ja työn suurimpia haasteita oli valikoida laajasta lähdeaineistosta oleellimmat ja parhaiten toimeksiantoyritystä palvelevat asiat erityisesti sähkösuunnittelun näkökulmasta. Opinnäytetyön suunnitteluvaiheessa määritellyt tutkimuksen tavoitteet saavutettiin mielestäni hyvin, vaikkakin aiheen laajuuden vuoksi kaikkia asioita ei ollut järkevää käsitellä niin yksityiskohtaisesti kuin olisi ollut mahdollista.

Työssä keskityttiin erityisesti konkreettisimpiin sähkömagneettista yhteensopivuutta parantaviin suunnittelukäytäntöihin sähkölaitteiden näkökulmasta. Esimerkiksi kiinteistöjen sähkö- ja viestintäverkkojen sähkömagneettinen yhteensopivuus tai piirikorttien ja yksittäisten komponenttien EMC-suunnittelu olisivat vaatineet omat tutkimuksensa. Työssä esiteltiin yleisimpiä standardeja, niiden hierarkiaa ja soveltamisprosessia, mutta standardien sisällön, erityisesti testaustapojen läpikäyminen voisi vaatia oman työnsä tulevaisuudessa. Opinnäytetyön perusteella toimeksiantoyrityksen on mahdollista tulevaisuudessa keskittää huomiota johonkin tiettyyn työssä käsiteltyyn EMC-suunnittelun aihealueeseen, mikäli se koetaan tarpeelliseksi. Sähkömagneettinen yhteensopivuus oli itselleni aihealueena ennen työn aloittamista lähes kokonaan vieras, sillä aihetta ei ollut omien opintojeni aikana kuin korkeintaan sivuttu. On ymmärrettävää, että sähkömagneettinen yhteensopivuus aiheuttaa paljon päänvaivaa sähkösuunnittelijoille, ja olisi varmasti hyödyllistä, jos kaikissa sähköalan koulutuksissa tutustuttaisiin sähkömagneettisen yhteensopivuuden perusteisiin edes peruskurssin verran.

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden huomioiminen ja häiriöiden syntymisen ennaltaehkäisy jo suunnitteluvaiheessa on tärkeää, mutta haastava tehtävä. Häiriöitä aiheuttavat ilmiöt ovat fysikaalisia ilmiöitä, jotka tunnetaan hyvin ja

jotka käyttäytyvät periaatteessa aina samalla tavalla. Häiriöt muodostuvat sähkölaitteissa kuitenkin usein ennalta-arvaamattomilla tavoilla ja laitteiden monimutkaistuessa häiriön lähteen tarkka selvittäminen on usein vähintäänkin haastava tehtävä. Joskus käy myös niin, että kun yhden ongelman saa ratkaistua, ilmenee jossain päin laitetta uusi ongelma ja niin edelleen.

Usein sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvien ongelmien ratkaiseminen tapahtuu yrityksen ja erehdyksen kautta suunnitteluvaiheen jälkeen laitteen ollessa jo periaatteessa käyttövalmis. EMC-testaus kannattaisi aina ottaa suunnitteluprosessiin mukaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, sillä valmiille laitteelle on usein hankalampaa tehdä muutoksia, kuin vielä kehitysvaiheessa olevalle laitteelle. Ongelmien eliminoiminen kokonaan hyvälläkään alkuvaiheen suunnittelulla ei välttämättä aina toteudu, mutta hyväksi todettuihin EMC-suunnittelukäytäntöihin panostamalla on mahdollista pienentää häiriöiden ilmaantumisen todennäköisyyttä, jolloin ei tarvitse käyttää niin paljoa arvokkaita työtunteja valmiin tuotteen vianetsintään.

LÄHTEET

ABB. 2000. Ylijännite- ja häiriösuojaus. TTT-käsikirja.

Academy of EMC. 2022. EMC standards. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.academyofemc.com/emc-standards> [viitattu 23.4.2022].

Armstrong, K. 2009. EMC techniques in electronic design Part 2 – Cables and Connectors. Stafford: Cherry Clough Consultants.

Asp, T. 2020. Sähkömagneettinen yhteensopivuus voimalaitoksilla. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202010256029> [viitattu 18.4.2022].

Baker, Donald G. 2015. Electromagnetic Compatibility: Analysis and Case Studies in Transportation. E-kirja. New Jersey: John Wiley & Sons. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 29.4.2022].

European Commission. 2018. Guide for the EMCD (Directive 2014/30/EU). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/33601> [viitattu 30.4.2022].

IEC. 2022. EMC product standards. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.iec.ch/emc-product-standards> [viitattu 28.4.2022].

IEC. 2022. Generic EMC standards. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.iec.ch/generic-emc-standards> [viitattu 28.4.2022].

Kathalay, C. 2017. Electromagnetic Compatibility: Cable Selection And Routing. Artikkel. Saatavissa: <https://www.electronicsforu.com/electronics-projects/electromagnetic-compatibility-cable-selection-routing-part-5> [viitattu 6.4.2022].

Koivisto, P., Ylinen, T., Björkman, M., Honkala, A., Marttila, H., Kettunen, L., Konttinen, A. & Taimisto, S. 2018. EMC ja rakennusten sähkötekniikka. Espoo: Sähkötieto ry.

Ott, H. W. 2009. Electromagnetic compatibility engineering. New Jersey. John Wiley & Sons.

Paul, C. R. 2006. Introduction to electromagnetic compatibility. New Jersey. John Wiley & Sons.

Sesko. 2022. SFS-/IEC-/EN-standardit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://sesko.fi/standardit/sfs-iec-en-standardit/> [viitattu 17.4.2022].

SFS ry. 2020. EMC-vaatimukset sähkö- ja elektroniikkalaitteiden CE-merkintää varten: usein tarvittavia standardeja. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuoteuutiset/emc-vaatimuksetce-merkintaavarten-sahko-jaelektroniikkalaitteilleuseintarvittaviastandardeja.html.stx> [viitattu 18.4.2022].

Tukes. s.a. Sähkömagneettinen yhteensopivuus – EMC. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkomagneettinen-yhteensopivuus-emc> [viitattu 3.4.2022].

Williams, T. 2007. EMC for product designers. E-kirja. Oxford: Elsevier Ltd. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 6.5.2022].