

# DIPLOMITYÖ

ANTTI KOPONEN

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Antti Koponen

Taajuusmuuttajien käytön ongelmakohdat kiinteistöautomaatiossa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 7.5.2007.

Työn valvoja            Prof. Jorma Kyyrä

Työn ohjaaja            DI Riikka Koskelainen

# TEKNILLINEN KORKEAKOULU DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Antti Koponen
Työn nimi:	Taajuusmuuttajien käytön ongelmakohdat kiinteistöautomaatiossa
Päivämäärä:	7.5.2007
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri:	S-81, Tehoelektroniikka ja sähkökäytöt
Työn valvoja:	TkT, professori Jorma Kyyrä, Teknillinen korkeakoulu
Työn ohjaaja:	DI Riikka Koskelainen, TAC Finland Oy
<p>Työssä on perehdytty pulssileveysmodulaatioon perustuvan jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan synnyttämien sähkömagneettisten häiriöiden synty- ja kytkeytymismekanismeihin, esitetty asennustapojen merkitys häiriöiden vaimentamisessa sekä tutkittu taajuusmuuttajien käytön ongelmakohtia kiinteistöautomaatiossa.</p> <p>Työssä esitetään kiinteistöautomaationjärjestelmän perusrakenne sekä perehdytään taajuusmuuttajan sähkömagneettisen yhteensopivuuden määrittelevään standardiin EN 61800-3. Häiriöiden galvaaniseen, kapasitiiviseen, induktiiviseen ja säteilemällä tapahtuvaan kytkeytymiseen tutustutaan, taajuusmuuttajan tärkeimmät häiriölähteet esitetään sekä selvitetään häiriöiden kytkeytymisreitit taajuusmuuttajien puhallinsovelluksissa. Kirjallisuuden pohjalta perehdytään, miten kaapelointi sekä suojat vaikuttavat sähkömagneettisten häiriöiden suuruuteen.</p> <p>Lopuksi esitetään taajuusmuuttajien käyttämisen tärkeimmät ongelmakohdat kiinteistöautomaation näkökulmasta. Asentamisen puutteisiin perehdytään ja taajuusmuuttajien käyttöönoton epäkohtia sekä ongelmia tutkitaan. Eriste- ja laakerivaurioiden esiintymisen mahdollisuutta pohditaan.</p>	
Avainsanat:	Taajuusmuuttaja, urakointi, EMC, johtuvat häiriöt, säteilevät häiriöt, vaimentaminen, asentaminen, parametrisointi

Author:	Antti Koponen
Name of the Thesis:	Variable Speed Drives Related Problems in Building Automation
Date:	7.5.2007
Department:	Electrical and Communications Engineering
Professorship:	S-81, Power electronics
Supervisor:	Dr. Tech., professor Jorma Kyyrä, Helsinki University of Technology
Instructor:	M. Sc. Riikka Koskelainen TAC Finland Oy
<p>The purpose of this thesis is to get acquainted with the origin and coupling mechanisms of the electromagnetic interference caused by a variable speed drive, to present effects of different installation procedures and to study variable speed drives related problems in building automation.</p> <p>A basic structure of building automation is presented and the electromagnetic compatibility standard EN 61800-3 covering the variable speed drive is studied. Galvanic, capacitive, inductive and radiated coupling is familiarized, the origin of the interference of the variable speed drive and the interference coupling from fan application of variable speed drive are explained. Based on the literature study the reader is familiarized with shielding and installation procedures affecting on suppression of the interference.</p> <p>Finally, variable speed drives related problems in fan applications are studied. Faulty electromagnetic compatibility installation and faults of configuration of variable speed drives are expounded. A possibility of voltage stresses for insulation and bearing currents is estimated.</p>	
Key words:	Variable speed drive, contractor, EMC, conducted emission, radiated emission, installing, configuration

## **ALKULAUSE**

Tämä diplomityö on tehty TAC Finland Oy:n yksikössä Vantaalla. Työn valvojana on toiminut professori Jorma Kyyrä, jolle esitän kiitokseni työtäni osoittamastaan mielenkiinnosta ja opastuksesta. Työn ohjaajaa DI Riikka Koskelaista sekä Johan Palmenia kiitän hyvistä neuvoista sekä rakentavista palautteista. Kiitos myös kaikille muille, jotka autoitte minua tämän työn tekemisessä.

Vantaalla 7.5.2007

Antti Koponen

# Sisällysluettelo

<b>SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO</b> .....	<b>8</b>
<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 KIINTEISTÖAUTOMAATION TOIMINTAYMPÄRISTÖ</b> .....	<b>13</b>
2.1 Kiinteistöautomaatio ja sen rakenne.....	13
2.1.1 LVIS-järjestelmät.....	13
2.1.2 Hierarkkinen automaatiojärjestelmä .....	14
2.1.3 Taajuusmuuttaja osana ilmanvaihtokojetta .....	16
2.2 Urakkarajat .....	18
2.2.1 Urakoitsijoiden toimitusrajat .....	18
2.2.2 Urakointi taajuusmuuttajaan liittyen .....	19
2.3 Taajuusmuuttajan EMC-standardi EN 61800–3 .....	21
2.3.1 Taajuusmuuttaja osana sähkökäyttöä .....	22
2.3.2 Standardissa EN 61800-3 määritellyt luokat C1-C4 .....	23
2.3.3 Häiriöiden luokittelu matala- sekä korkeataajuisiin häiriöihin.....	25
<b>3 HÄIRIÖMUODOT JA HÄIRIÖIDEN KYTKEYTYMISTAVAT</b> .....	<b>27</b>
3.1 Ero- ja yhteismuotoinen häiriö.....	27
3.2 Galvaaninen kytkeytyminen.....	28
3.3 Induktiivinen kytkeytyminen .....	29
3.3.1 Suoran johtimen säteily.....	29
3.3.2 Silmukan synnyttämä säteily .....	30
3.3.3 Magneettikentän indusoima häiriöjännite.....	31
3.3.4 Johdinrakenteiden induktansseja .....	32
3.4 Kapasitiivinen kytkeytyminen.....	33
3.4.1 Parijohtimien välinen hajakapasitanssi .....	34
3.4.2 Mittausjärjestelmään kapasitiivisesti kytkeytyvä häiriöjännite .....	36
3.5 Sähkömagneettinen kytkeytyminen .....	37
3.5.1 Antennirakenteiden yleisiä ominaisuuksia .....	37
3.5.2 Lyhyen dipolin säteily.....	39

3.5.3	<i>Ero- ja yhteismuotoinen säteily</i> .....	41
3.5.4	<i>Muita antennirakenteita</i> .....	43
<b>4</b>	<b>TAAJUUSMUUTTAJA HÄIRIÖLÄHTEENÄ</b> .....	<b>44</b>
4.1	Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaate .....	44
4.1.1	<i>Pääpiirin toimintaperiaate</i> .....	45
4.2	Tasasuuntaajat .....	46
4.2.1	<i>Syöttöverkkoon johtuvat yliaaltovirrat</i> .....	47
4.2.2	<i>Diodien ja tyristoreiden aiheuttamat häiriöt</i> .....	48
4.3	Vaihtosuuntaaja .....	50
4.3.1	<i>Moottorille näkyvät harmoniset yliaaltojännitteet</i> .....	51
4.3.2	<i>IGB-transistorin toiminnasta aiheutuvat häiriöt</i> .....	52
4.4	Säätö- ja ohjauspiirien aiheuttamat häiriöt .....	53
4.5	Taajuusmuuttajan kytkennän mahdollistamat häiriöreitit .....	54
4.5.1	<i>Moottorikaapeloinnissa kulkevat häiriöt</i> .....	55
4.5.2	<i>Ohjauskaapeloinnissa kulkevat häiriöt</i> .....	56
4.5.3	<i>Syöttöverkkokaapeloinnissa kulkevat häiriöt</i> .....	56
<b>5</b>	<b>KAPELOINNIN JA SUOJIENT MERKITYS HÄIRIÖIDEN</b>	
	<b>VAIMENTAMISESSA</b> .....	<b>58</b>
5.1	Sähkökentän kytkeytymisen vaimentaminen .....	58
5.2	Magneettikentän kytkeytymisen vaimentaminen .....	60
5.2.1	<i>Parikierteisyys</i> .....	60
5.2.2	<i>Suojan maadoittaminen</i> .....	61
5.3	Kaapeleiden vaimennuskyky .....	64
5.3.1	<i>Suojatut ohjauskaapelit</i> .....	64
5.3.2	<i>Yhteismuotokuristimet</i> .....	66
5.3.3	<i>Moottorikaapelointi</i> .....	66
5.4	Koteloinnin vaikutus häiriöiden vaimennukseen .....	68
5.4.1	<i>Sähkö- ja magneettikentän vaimentaminen kotelolla</i> .....	69
5.4.2	<i>Aukkojen vaikutus suojan vaimennuskykyyn</i> .....	71
5.4.3	<i>Moottorirajapintaan asennettävien kytkinten kotelointivaatimukset</i> .....	72
<b>6</b>	<b>TAAJUUSMUUTTAJIEN KÄYTTÄMISEN ONGELMAKOHDAT</b> .....	<b>74</b>

---

6.1	EMC-asennusvirheet .....	74
6.1.1	<i>Moottorikaapeloinnin EMC-asennusvirheet .....</i>	<i>75</i>
6.1.2	<i>Ohjauskaapeloinnin EMC-asennusvirheet.....</i>	<i>78</i>
6.2	Taajuusmuuttajien toimituksen puutteet ja käyttöönoton epäkohdat .....	79
6.2.1	<i>Toimituspuutteet .....</i>	<i>79</i>
6.2.2	<i>Parametrisoinnin ongelmat sekä epäkohdat .....</i>	<i>81</i>
6.3	Suunnitteluvirheet .....	84
6.4	Moottorivauriot .....	84
6.4.1	<i>Eristyksien jännitekestoisuuksien käyrät.....</i>	<i>85</i>
6.4.2	<i>Eristerasitusten huomioiminen käytännössä .....</i>	<i>86</i>
6.4.3	<i>Laakerivirtojen syyt.....</i>	<i>86</i>
6.4.4	<i>Laakerivirtojen merkitys käytännössä.....</i>	<i>88</i>
<b>7</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>89</b>
	<b>LÄHDELUETTELO.....</b>	<b>91</b>
	<b>LIITE A KYSELY TAC:N PROJEKTIHENKILÖSTÖLLE .....</b>	<b>94</b>
	<b>LIITE B KYSELY TAC:N HUOLTOHENKILÖSTÖLLE .....</b>	<b>102</b>



---

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### SYMBOLIT

$a$	silmukan säde
$A$	pinta-ala
$B$	magneettivuon tiheys
$C_{12}$	johtimien välinen hajakapasitanssi
$C_{1g}$	johtimen hajakapasitanssi maahan nähden
$C_{2g}$	johtimen hajakapasitanssi maahan nähden
$d$	johtimien välinen etäisyys
$d$	etäisyys tarkastelupisteestä
$dB/dt$	magneettivuon tiheyden muutosnopeus
$di/dt$	virran muutosnopeus
$du/dt$	jännitteen muutosnopeus
$E$	sähkökentän voimakkuus
$E_{ind}$	sähkömotorinen voima
$f$	taajuus
$H$	magneettikentän voimakkuus
$h$	korkeus
$h$	dipolin pituus
$h$	johtimien etäisyys maatasosta
$I$	virta
$I_0$	dipolin virta
$I_{cm}$	yhteismuotoinen virta
$I_{dm}$	eromuotoinen virta
$l$	johtimen pituus
$L_{12}$	johtimien välinen induktanssi
$L_{1g}$	johtimen induktanssi maatasoon nähden
$L_{2g}$	johtimen induktanssi maatasoon nähden

---

$M$	keskinäisinduktanssi
$M_{12}$	keskinäisinduktanssi
$Q$	varaus
$r$	etäisyys johtimesta
$s$	johtimien välinen etäisyys
$V_I$	häiriöjännitelähteen suuruus
$V_{cm}$	yhteismuotoinen jännite
$V_{dm}$	eromuotoinen jännite
$V_H$	häiriöjännitteen suuruus
$V_S$	signaalin jännite
$z$	kohtisuora etäisyys silmukan keskipisteestä
$Z$	impedanssi
$Z_0$	aaltoimpedanssi
$\epsilon_0$	tyhjän permittiivisyys
$\epsilon_r$	suhteellinen permittiivisyys
$\theta$	kulman suuruus
$\lambda$	aallonpituus
$\mu_0$	tyhjän permeabiliteetti
$\mu_r$	suhteellinen permeabiliteetti
$\pi$	pii
$\sigma$	johtavuus
$\varphi$	kulman suuruus
$\Phi_I$	silmukan synnyttämän magneettivuon voimakkuus
$\Phi_H$	silmukan läpäisevän magneettivuon voimakkuus
$\omega$	kulmataajuus
$n$	kokonaisluku
$K$	kokonaisluku
$p$	pulssiluku
$I_{21}$	ATV21-taajuusmuuttajan ottama vaihevirta
$I_{61}$	ATV61-taajuusmuuttajan ottama vaihevirta
$U_{LI}$	vaihejännite

---

$U_{L2}$	vaihejännite
$U_{L3}$	vaihejännite
$I_h$	järjestyslukua $h$ oleva yliaaltovirta
$U_d$	diodin jännite
$I_d$	diodin virta
$t$	aika
$t_r$	diodin sammumiseen kuluva aika
$R_B$	IGB-transistorin sisäinen vastus
$I_C$	IGB-transistorin kollektorivirta
$Z_t$	siirtoimpedanssi
$U_{CE}$	IGB-transistorin kollektori-emitteri-jännite
$U_{GE}$	IGB-transistorin hila-emitteri-jännite
$C_{Is}$	suojan ja johtimen välinen kapasitanssi
$C_{sg}$	suojan ja maan välinen kapasitanssi
$V_n$	häiriöjännitteen suuruus
$R_S$	suojan resistanssi
$L_S$	suojan induktanssi
$V_c$	häiriöjännitteen suuruus
$M_{IS}$	suojan ja johtimen välinen keskinäisinduktanssi

## LYHENTEET

ABB	Asea Brown Boveri
ATV21	Tuotannossa oleva taajuusmuuttajaperhe
ATV61	Tuotannossa oleva taajuusmuuttajaperhe
AU	Automaatiourakoitsija
CDM	Complete Drive Module – tehoduuli
CPU	Central Processing Unit – ei vakiintunutta suomen-kielistä termiä
EMC	Electromagnetic Compatibility – sähkömagneettinen yhteensopivuus

---

IU	Ilmastointiurakoitsija
IV	Ilmanvaihto
JAMAK	Kaapelityyppi
JFET	Junction Field Effect Transistor
KLMA	Kaapelityyppi
LVIS	Lämpö, vesi, ilma, sähkö
MCCMK	Kaapelityyppi
MCMK	Kaapelityyppi
MHS	Kaapelityyppi
MMJ	Kaapelityyppi
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NOMAK	Kaapelityyppi
NPN	Biopolaaritransistorin tyyppi
PDS	Power Drive System – sähkökäyttö
PNP	Biopolaaritransistorin tyyppi
PU	Putkiurakoitsija
PWM	Pulse Width Modulation – pulssin leveys modulaatio
SU	Sähköurakoitsija
TAC	Tour Andover Controls
YSE	Yleiset sopimusehdot
TE	True Earth - tekninen maa, häiriötön maa
PE	Protective Earth - suojamaa

# 1 JOHDANTO

Kiinteistöautomaatiossa käytetään nykyään varsin laajalti taajuusmuuttajia puhaltimien pyörimisnopeuden säätämiseen. Tämä mahdollistaa sisäilman laadun optimoinnin sekä energian säästämisen. Taajuusmuuttajien voimakkaasti kasvanut käyttö ei kuitenkaan ole onnistunut ongelmitta. Varjopuolena ovat olleet kiinteistöautomaatiojärjestelmän satunnaiset toimintahäiriöt sekä muiden elektroniikkalaitteiden virhetoiminnot. Taajuusmuuttajat synnyttävät laajakaistaista sähkömagneettista häiriötä, joka voi kytkeytyä johtumalla tai säteilemällä ympäristöönsä. Häiriöiden leviämisen huomioonottaminen taajuusmuuttajien asentamisessa on yksi tärkeimmistä tekijöistä, jotta taajuusmuuttajat sekä muut laitteet toimivat oikein tarkoituksenmukaisessa käyttöympäristössään. Tässä diplomityössä tutkitaan nykyaikaisten pulssileveysmodulaatioperiaatteella toteutettujen jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien tuottamien häiriöiden syntymekanismia, kaapeloinnin vaikutusta häiriöiden vaimentumiseen ja leviämiseen sekä taajuusmuuttajien käytön tärkeimpiä ongelmia ja epäkohtia kiinteistöautomaation näkökulmasta.

Luvussa 2 esitellään kiinteistöautomaatiojärjestelmien perusrakenne sekä selvitetään taajuusmuuttajien käyttämiseen ja asentamiseen liittyvät urakoitsijat ja heidän vastuualueensa. Urakointikäytäntö selittää osan taajuusmuuttajan käyttämiseen liittyvistä haasteista. Taajuusmuuttajan sähkömagneettisen yhteensopivuuden määrittävä standardi (engl. Electro Magnetic Compatibility, EMC) esitetään myös luvussa 2. Luvussa kolme tutkitaan häiriöiden kytkeytymistapoja. Seuraavassa luvussa esitetään taajuusmuuttajan merkittävimmät sähkömagneettisen häiriön lähteet sekä selvitetään häiriöiden kytkeytymisreittejä puhallinsovelluksessa.

Työn viidennessä luvussa on tavoitteena selvittää kaapeloinnin ja kytkentätapojen merkitys häiriöiden leviämiseen sekä vaimentumiseen. Luvussa pyritään perustelemaan taajuusmuuttajavalmistajien EMC-asennusvaatimusten tärkeys. Seuraavassa luvussa esitetään tutkimustuloksia taajuusmuuttajien käyttämisen ongelmakohdista, joista tärkeimmät ovat EMC-asentaminen sekä käyttöönotto.

## 2 KIINTEISTÖAUTOMAATION TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Tässä luvussa selitetään kiinteistöautomaation rakennetta sekä esitetään tärkeimmät taajuusmuuttajiin liittyvät urakoitsijat. Luvussa käsitellään myös sähkökäyttöjen sähkömagneettisen yhteensopivuuden määrittelevä standardi EN 61800–3.

### 2.1 Kiinteistöautomaatio ja sen rakenne

Kiinteistöautomaatio tarkoittaa LVIS-järjestelmien (Lämpö, Vesi, Ilma ja Sähkö) automatisointia, jolla toteutetaan kiinteistöjen energian kulutuksen hallintaa, sisäilman laadun optimointia, olosuhteiden hallintaa sekä jossain määrin kulunvalvontaa ja turvallisuuteen liittyviä ratkaisuja.

#### 2.1.1 LVIS-järjestelmät

Tärkeimmät lämmitysjärjestelmät ovat lämpimän käyttöveden piiri sekä patteriverkostot. Patteriverkostot ovat kaukolämmön alueella yleensä vesikiertoisia ilmanvaihtokojeiden (IV-kojeiden) tai kiinteistöjen lämmityspattereita. Varsinaiseksi vesijärjestelmäksi voidaan laskea vedenjäähdytyskojeen automatisointi, ellei sitä toimiteta valmiina pakettina.

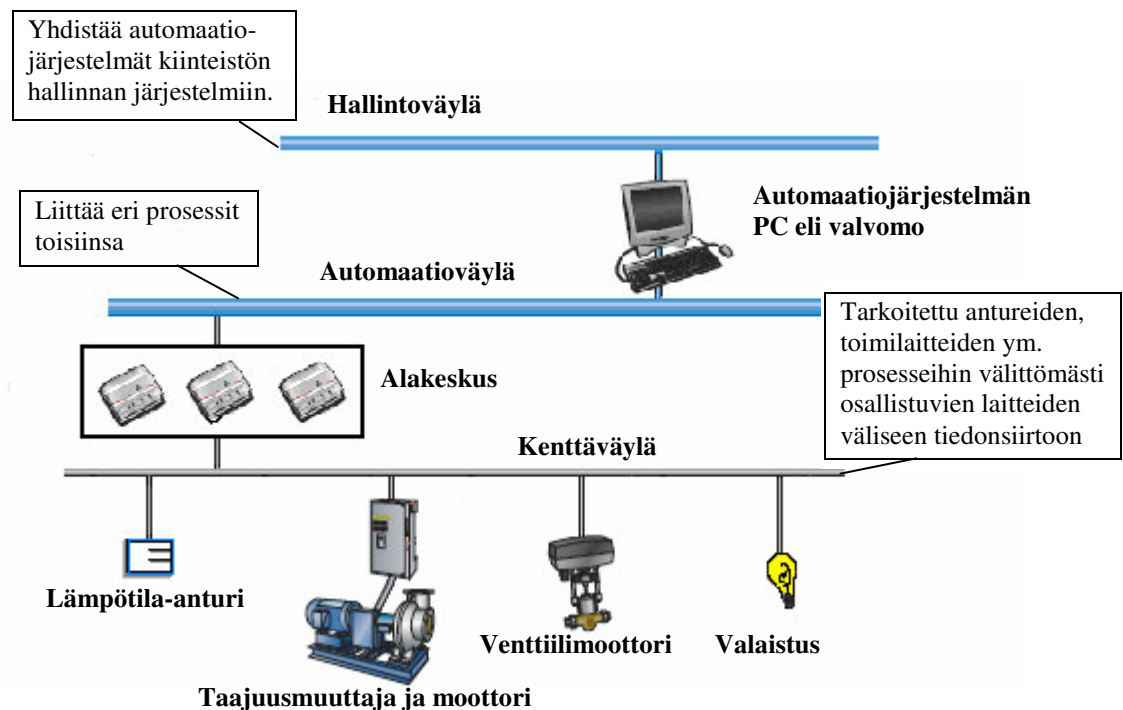
Sähköjärjestelmien laajuus riippuu pitkälti kohteesta. Sähköjärjestelmiin kuuluu muun muassa valaistuksien, sähkölukkojen ja saunojen kiukaiden ohjaukset sekä sähkötehon laskenta. Kiinteistöautomaatio toimittaja ei yleensä toimita sähköjärjestelmien toimilaitteita.

Ilmastointijärjestelmiin lukeutuu ilmanvaihtokojeet, erillispoistot, kiertoilmakojeet, ilmamääräsäätimet sekä huonesäätimillä toteutetut ratkaisut. IV-kojeiden tarkoitus on ilmanvaihto, lämmittää tai jäähdyttää sisään puhallettavaa ilmaa, säättää kosteutta sekä ottaa talteen energiaa poistettavasta ilmasta. IV-kojeiden puhaltimien moottoreiden tehonsyöttö on useimmiten toteutettu taajuusmuuttajalla. Erillispoistot ovat yleensä 2- tai 3-nopeus puhaltimia (seis, 1/2-nopeus ja 1/1-nopeus), joilla poistetaan ilmaa pieniltä, rajatuilta alueilta kuten esimerkiksi WC- tai pysäköintitiloista. Joissain tapauksissa erillispoistot toteutetaan taajuusmuuttajalla ohjatusti. Kiertoilmakojeet ovat erillispoistojen kaltaisia, mutta kierrät-

tävät sisäilmaa esimerkiksi jäähdytys- tai lämmitystarkoituksessa. Huonesäädinratkaisulla toteutetaan yksittäisen huonetilan ilmanlaadun optimointi.

### 2.1.2 Hierarkkinen automaatiojärjestelmä

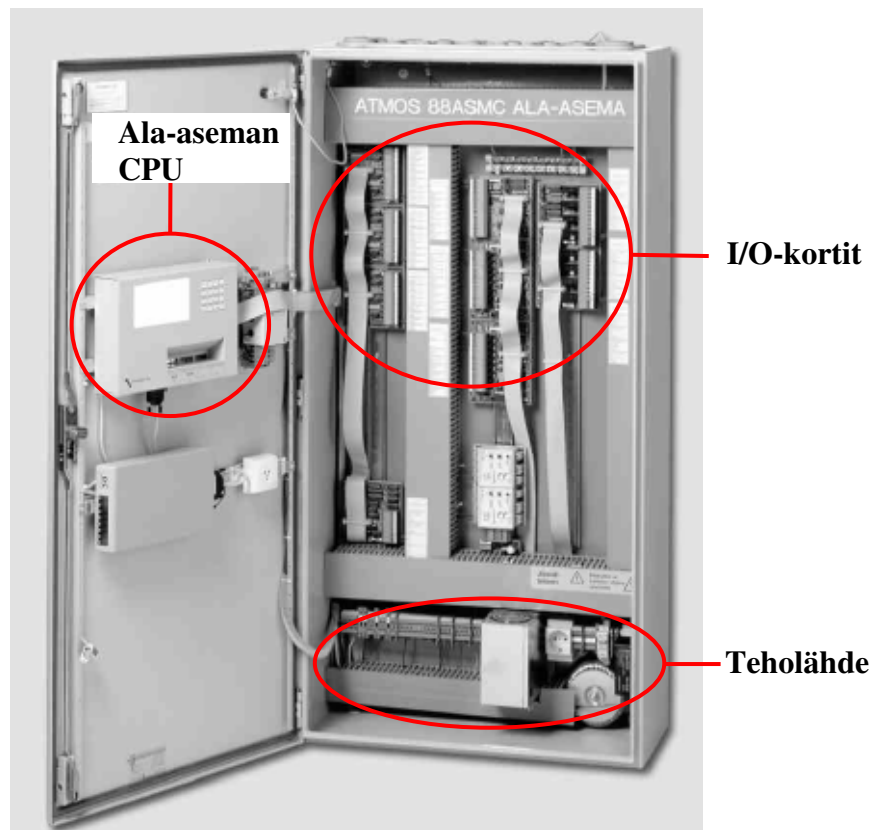
Kiinteistöautomaation hierarkkista perusrakennetta voidaan mallintaa kuvan 2.1 avulla, /Pakanen, 2005/. Hierarkkisessa mallissa automaatiojärjestelmä jaetaan kolmen eri väylän kokonaisuudeksi. Tämä soveltuu jokseenkin hyvin kuvaamaan nykyisiä laitteistoja.



Kuva 2.1. Kiinteistöautomaation perusrakennetta voidaan mallintaa hierarkkisella rakenteella.

Alakeskuksella toteutetussa automaatiojärjestelmässä eri prosessien tila- ja mittaustiedot välitetään kenttäväylän kautta suoraan alakeskukseen. Saadun tiedon sekä prosessin hallinnan ohjelmiston perusteella alakeskus ohjaa prosesseja kenttäväylän kautta eri toimilaitteiden ja ohjauksikäskyjen välityksellä. Alakeskuksen ja kenttäväylän laitteiden fyysinen rajapinta toteutetaan yleensä standardien mukaisilla I/O-pisteillä (Input/Output), mutta myös digitaalista tiedonsiirtoa voidaan käyttää. Automaatiojärjestelmään voidaan käytännössä liittää lähes mikä tahansa laite, anturi tai mittalähetin.

Alakeskuksen sisäisen rakenteen vaihtelee hieman automaatiotoimittajasta riippuen, mutta pääpiirteittäin alakeskukset ovat samankaltaisia. TAC Xenta-alakeskus toteutetaan itsenäisesti toimivista TAC Xenta-sarjan säätimistä. Säätimet sisältävät tyypistä riippuen vaihtelevan määrän erilaisia I/O-pisteitä sekä säätimen ohjaamien prosessien ohjelmistot. Tämä mahdollistaa hajautetun alakeskusrakenteen käyttämisen, jossa säätimet sijoitetaan ohjattavan prosessin viereen sen sijaan, että säätimet keskitettäisiin yksittäisiin, monia säätimiä sisältäviin alakeskuksiin. Vaihtoehtoisesti alakeskus voidaan toteuttaa erillisistä, yleensä yhden pistetyypin I/O-korteista sekä yhdestä CPU:sta (engl. Central Processing Unit), joka ohjaa I/O-korttien toimintaa, kuva 2.2.



Kuva 2.2. Atmos 88ASMC ala-asema koostuu yhdestä CPU:sta sekä vaihtelevasta määrästä I/O-kortteja.

Eri alakeskusten välinen tiedonsiirto tapahtuu automaatioväylän välityksellä. Automaatioväylä liittyy alakeskukset myös valvomoon. Kiinteistöautomaatiojärjestelmiä voidaan hallita käsin automaatiojärjestelmän valvomosta. Valvomo-ohjelmisto käsittää esimerkiksi graafisen käyttöliittymän eri prosessien ohjaamiseen ja seuraamiseen sekä energian



hallinnan aliohjelman. Valvomo ei kuitenkaan ole edellytys eri prosessien hallitsemiseksi, koska prosessien säätämisessä vaadittavien ohjelmistojen suorittaminen tapahtuu aina alakeskuksissa.

Hallintoväylä yhdistää kiinteistöautomaatiojärjestelmän kiinteistöjen hallinnan tietojärjestelmiin esimerkiksi kiinteistön huoltoyhtiön tietojärjestelmään. Nykyään on mahdollista hallita kiinteistöjä esimerkiksi internet-selaimen välityksellä. Yhteys muihin tietojärjestelmiin, esimerkiksi hälytyksien välittäminen, voidaan toteuttaa myös modeemin avulla suoraan alakeskuksesta.

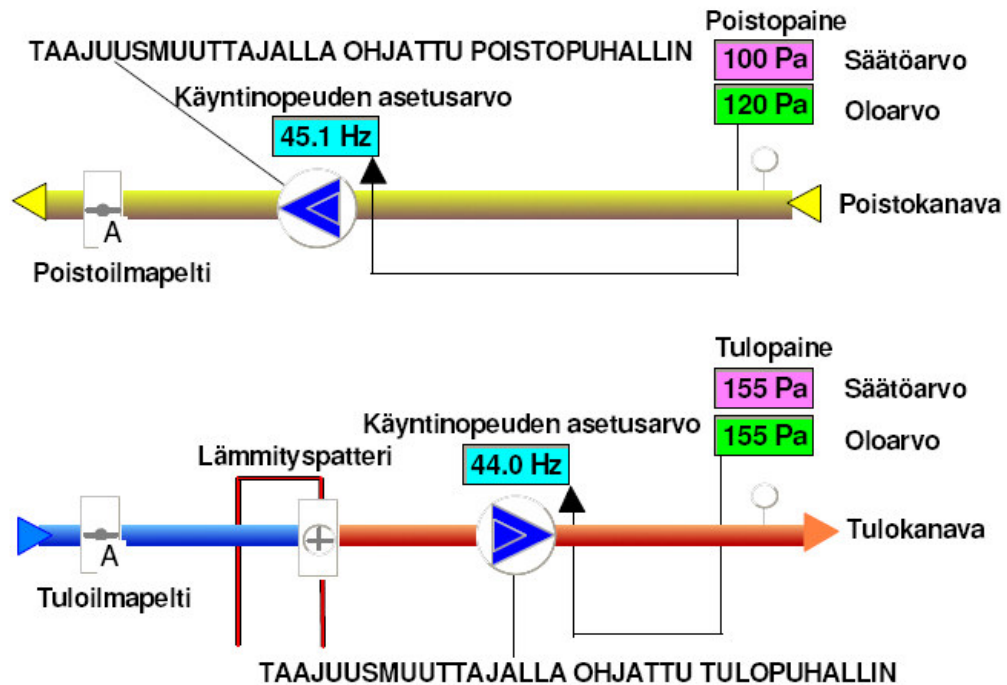
### **2.1.3 Taajuusmuuttaja osana ilmanvaihtokojetta**

Kiinteistöautomaatiotoimittajan kannalta tärkein taajuusmuuttajan sovellusalue on ilmanvaihtokojeden tulo- ja poistopuhaltimien moottoreiden tehon ja taajuuden säätäminen. IV-kojeden määrä vaihtelee kohteesta riippuen aina yksittäisistä kojeista muutamaan kymmeneen kojeeseen. Tällöin pelkästään puhaltimien moottoreiden pyörittämiseen tarvitaan lähes sata taajuusmuuttajaa.

Taajuusmuuttajan ohjaaminen ja valvonta voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla; fyysisillä I/O-pisteillä tai digitaalisella väylällä, jolloin I/O-pisteet ovat ohjelmallisia fyysisten pisteiden sijaan. Digitaalisen väylän etuja ovat kaapelointikustannuksien alentuminen, fyysisten pisteiden säästö sekä mahdollisuus saada enemmän tietoa taajuusmuuttajasta. Fyysisten I/O-pisteiden käyttö on kuitenkin huomattavasti yleisempää. Tyypillisesti taajuusmuuttajan ohjaamisessa käytetään neljää pistettä. Ohjauspiste antaa taajuusmuuttajalle käyntiluvan. Asetusarvopiste kertoo taajuusmuuttajalle vaadittavan lähtötaajuuden. Taajuusmuuttajan alakeskukseen välittämät tiedot ovat tyypillisesti käynti- sekä hälytystieto. Taajuusmuuttajan todellista lähtötaajuutta ei yleensä mitata.

Kuvassa 2.3 esitetään valvomo-ohjelmistolla toteutettu pelkistetty periaatekuva ilmanvaihtokojesta, jonka puhaltimia ohjataan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttajien lähtötaajuuden säätäminen voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mutta yleisin niistä lienee paineen oloarvoon perustuva portaaton säätö. Käyntinopeuden asetusarvoa säädetään paineen oloarvon ja säätöarvon erotuksen perusteella. Taajuusmuuttajan käyntinopeus

näytetään grafiikalla joko taajuutena tai prosenttilukuna. Taajuusmuuttajan käyntilupaa eli ohjauspistettä ei yleensä jätetä grafiikalle näkyviin, jottei taajuusmuuttajaa jätettäisi vahingossa käsikäytölle. Taajuusmuuttajan käynti- ja hälytystieto liitetään yleensä puhaltimen symboliin, jolloin symbolin väri kertoo puhaltimen tilan.



Kuva 2.3. Ilmanvaihtokojeen pelkistetyssä esimerkkikuvassa puhaltimen symboli kertoo, että sitä ohjataan taajuusmuuttajalla. Kuvassa esitetään vain taajuusmuuttajaan suoraan liittyvät pisteet ja laitteet.

Kytcentöjen osalta on syytä huomioida ohituskäyttötilanne sekä lämmityspatterin jäätymisvaara. Ohituskäyttötilanteessa, jolloin moottori kytketään suoraan syöttöverkkoon ohi taajuusmuuttajan, tulee huomioida kanavien sulkupeltien avaaminen. Vesikiertoisia lämmityspattereita käytettäessä tulee huomioida jäätymisvaaratilanteet, jolloin lämmityspatterin teho ohjataan maksimille jäätyksen estämiseksi. Tällöin automaatio ohjaa taajuusmuuttajan pois päältä, mutta siten ei yleensä voida estää taajuusmuuttajan käsikäynnistystä tai ohittamista. Siksi on suotavaa, että taajuusmuuttajalta sekä sen ohjaaman tulopuhaltimen moottorilta katkaistaan syöttöjännite erillisellä lukituskytkennällä jäätymisvaaratilanteissa.

## **2.2 Urakkarajat**

Tässä luvussa on tarkoitus selventää urakoinnin pääpiirteitä niiltä osin kuin ne oleellisesti liittyvät kiinteistöautomaatioon. Urakkarajat ja urakointisuhteet poikkeavat hieman eri projekteissa.

### **2.2.1 Urakoitsijoiden toimitusrajat**

Kiinteistöautomaatiotoimittajan eli automaatiourakoitsijan (AU) kannalta tärkeimmät urakoitsijat ovat sähköurakoitsija (SU), ilmastointiurakoitsija (IU) sekä putkiurakoitsija (PU). Kiinteistöautomaatiotoimittajan työtä sekä suunnitelmien toteutumista valvoo automaatiovalvoja. Varsinaiset kiinteistöautomaatiosuunnitelmat tekee automaatiosuunnittelija.

#### **Automaatiourakoitsija**

Kiinteistöautomaatiourakoitsijan urakkaan kuuluvat urakkalaskentasuunnitelmissa määriteltyjen automaatioon suoraan liittyvien laitteiden toimittaminen, asentaminen ja käyttöönotto sekä prosessien ohjelmointi. Automaatiourakoitsijan toimittamia laitteita ovat esimerkiksi valvomo-ohjelmisto ja -tietokone, alakeskus kokonaisuudessaan sekä prosessien säätämisessä ja valvonnassa tarvittavat toimilaitteet, anturit ja mittalähettimet. Automaatiourakoitsija kytkee toimittamiensa laitteiden heikkovirtakaapelit, mutta ei vedä kaapeleita, kytke tai suunnittele vahvavirtakaapelointia. Suunnitelmista automaatiourakoitsija laatii esimerkiksi toimittamiensa laitteiden kytkentäsuunnitelmat, laiteluettelot ja pisteluettelot. Kytkentäkuvissa esitetään tyypillisesti johtojen koko, tyyppi sekä kytkentäpaikka ja niitä tarvitsee sähköurakoitsija.

#### **Putkiurakoitsija**

Putkiurakoitsija tekee kaikki putkistoihin liittyvät työt kuten esimerkiksi lämmönjaon putkistot. Putkiurakoitsija asentaa myös putkistoihin tulevat laitteet tai niiden rungot. Siten esimerkiksi automaatiourakoitsijan toimittamien venttiilien, painemittalähettimien runkojen sekä nesteen lämpötilaa mittaavien antureiden suojataskujen asentaminen kuuluvat putkiurakoitsijalle.

### **Ilmastointiurakoitsija**

IV-kojeiden, erillispuhaltimien sekä muiden vastaavien kojeiden toimittamisen ja asentamisen hoitaa ilmastointiurakoitsija. Myös puhaltimien moottoreiden toimittaminen ja asentaminen kuuluvat yleensä ilmastointiurakoitsijalle. IV-kojeiden vesikiertoisten laitteiden kuten lämmityspattereiden putkiston asentaminen kuuluu puolestaan putkiurakoitsijalle.

### **Sähköurakoitsija**

Kiinteistöautomaatiourakoitsija tekee suhteellisen paljon yhteistyötä sähköurakoitsijan kanssa, sillä sähköurakoitsijan urakkaan kuuluvat kaikkien kaapeleiden vetäminen sekä vahvavirtakaapeloinnin toteuttaminen. Sähköurakan toteutumista valvoo sähkövalvoja.

### **Automaatiosuunnittelija**

Kaikkien automaatiolaitteiden ohjaamien prosessien suunnitelmat eli säätökaaviot tekee automaatiourakoitsijasta riippumaton automaatiosuunnittelija. Esimerkiksi IV-kojeen säätökaavioissa esitetään kojeen rakenne, antureiden, mittalähettimien ja toimilaitteiden sijainnit, suodattimet, fyysiset sekä ohjelmalliset pisteet, mahdolliset jäähdytys- tai lämmityspatterit sekä muut vastaavat laitteistot ja IV-kojeen toimintaselostus.

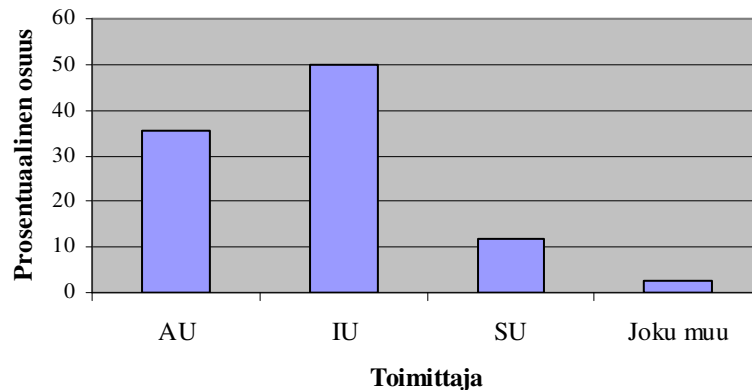
### **Automaatiovalvoja**

Automaatiovalvojan tehtäviin kuuluu valvoa, että automaatiourakoitsija noudattaa automaatiosuunnittelijan tekemiä suunnitelmia ja asennukset tehdään hyvän asennustavan mukaisesti. Automaatiovalvoja voi olla sama henkilö kuin automaatiosuunnittelija.

## **2.2.2 Urakointi taajuusmuuttajaan liittyen**

Taajuusmuuttajien urakointiin liittyvät pääsääntöisesti niiden toimittaja, automaatiourakoitsija sekä sähköurakoitsija, joiden tekemien töiden valvomisesta vastaavat automaatio- ja sähkövalvojat. Puhallinkäyttöön tarkoitettuja taajuusmuuttajien toimittajien suhteelliset osuudet esitetään kuvassa 2.4. Tulos perustuu projektihenkilöstölle tehtyyn kyselyyn, liite A.

### Taajuusmuuttajien toimittajien osuudet



Kuva 2.4. Ilmastointiurakoitsija (IU) on projektihenkilöiden arvioiden mukaan suurin taajuusmuuttajien toimittaja, automaatiourakoitsija (AU) toiseksi suurin ja sähköurakoitsija (SU) kolmanneksi suurin. Kohdan ”joku muu” prosentuaalinen osuus tarkoittaa putkiurakoitsijan ja asiakkaan itsensä hankkimien taajuusmuuttajien osuutta.

Taajuusmuuttajaan liittyvät työt jakautuvat urakoitsijoiden kesken yleisten sopimusehtojen mukaisesti (YSE), ellei urakkasopimuksessa ole toisin sovittu, /YSE-opas, 2006/. Mikäli urakkasopimuksessa on nimenomaisesti sovittu urakoitsijoiden vastuunjaosta, ja sopimuksissa on myös viittaus YSE-ehtojen mukaiseen urakoitsijoiden vastuujakoon, on katsottava, että urakkasopimuksen ehdot syrjäyttävät YSE-ehdot ristiriitatilanteessa.

YSE-1998 momentin 1 mukaan urakoitsijalla on velvollisuus toteuttaa sovittua maksuperustetta vastaan sopimusasiakirjoissa edellytetyt työt, toimenpiteet ja hankinnat aikaansaadakseen asiakirjoissa määritellyn tuloksen. Momentissa 2 lisätään velvollisuuksiin muun muassa käyttö- ja huolto-ohjeiden toimittaminen. Ristiriitaisessa tilanteessa sopimusasiakirjojen keskinäinen pätevyys määräytyy momentin 13 perusteella, ellei urakkasopimuksessa ole toisin mainittu. Sopimusasiakirjojen katsotaan täydentävän toisiaan momentin 12 mukaan. Urakoitsijan vastuu määräytyy momentin 26 perusteella momenttien 24 sekä 25 laajuudessa. Momentissa 24 todetaan urakoitsijan yleiseksi vastuuksi muun muassa vastuu tekemistään töistä, hankkimistaan rakennustavaroista sekä rakennusosista ja vastuu noudattaa lakia, asetuksia sekä niihin rinnastettavia julkisoikeudellisia määräyksiä. /YSE-opas, 2006/

Taajuusmuuttajaan liittyvät toimenpiteet voidaan katsoa koostuvan seuraavista töistä:

- Työ 1) Tarpeellisten suotimien ja ohjauskorttien hankkiminen
- Työ 2) Taajuusmuuttajan asentaminen määrättyyn paikkaan
- Työ 3) Kaapeleiden vetäminen
- Työ 4) Vahvavirtakaapeloinnin suunnittelu
- Työ 5) Vahvavirtakaapeleiden kytkeminen
- Työ 6) Ohjauskaapeloinnin suunnittelu
- Työ 7) Ohjauskaapeleiden kytkeminen A) taajuusmuuttajasta B) alakeskuksesta
- Työ 8) Taajuusmuuttajan parametrisointi
- Työ 9) Taajuusmuuttajan toiminnan testaaminen
- Työ 10) Huolto- ja käyttöohjekirjojen toimittaminen

YSE-1998 ehtojen sekä sopimusasiakirjojen perusteella taajuusmuuttajaan liittyvät työt ovat yleensä yksiselitteisesti jaettavissa seuraavasti. Urakkarajoissa määritellään yleensä työt 2 – 5 kuuluviksi sähköurakoitsijalle ja työ 7B automaatiourakitsijoille. Muut työt voidaan katsoa kuuluviksi momenttien 2 ja 26 perusteella taajuusmuuttajan toimittajalle, ellei sopimusasiakirjoissa nimenomaan toisin mainita. Mahdolliset suunnitelmat, työt 4 ja 6, pohjautuvat sähkö- ja automaatio suunnittelijan tekemiin suunnitelmiin. Momentista 26 ja elinkeinoharjoittajiin sovellettavasta tuotevastuulaista on syytä huomata, että taajuusmuuttajan toimittajalla on väistämättä vastuu kyseisestä laitteesta. Siksi taajuusmuuttajan parametrisoinnin ja käyttöönoton siirtäminen erillisellä sopimusehdolla urakoitsijalle, joka ei toimita taajuusmuuttajaa, on hieman kyseenalainen. Lisäksi se aiheuttaa useita käytännön ongelmia, koska taajuusmuuttajat ovat hyvinkin erilaisia käyttäjä ja parametrisoida.

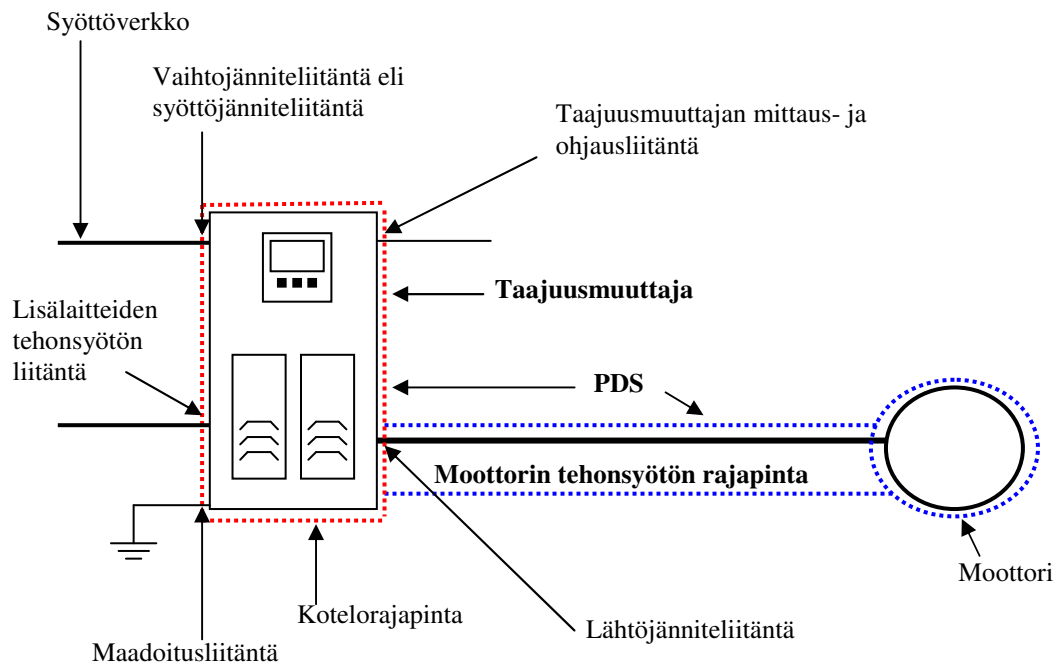
### **2.3 Taajuusmuuttajan EMC-standardi EN 61800–3**

Taajuusmuuttajien ensisijainen EMC-standardi on EN 61800–3. Jotkut taajuusmuuttajia valmistavat yritykset viittaavat yhä jossain määrin vanhempaan teollisuuslaitteiden yleiseen häiriöpäästöstandardiin EN 55011, mutta ristiriitatilanteessa EN 61800–3 on pätevämpi. Standardien käsitteleminen rajataan koskemaan ainoastaan häiriöpäästöjä sekä niiden suodattamista, koska tämä aihealue nousee selvemmin esille kiinteistöautomaatiossa. Taajuusmuuttajien immuniteetin kanssa ei ole havaittu olleen ongelmia.

### 2.3.1 Taajuusmuuttaja osana sähkökäyttöä

EN 61800–3 määrittelee sähkömagneettisen yhteensopivuuden sähkökäyttöille (engl. Power Drive Systems, PDS). EMC voidaan määrittellä seuraavasti. Sähkömagneettisesti yhteensopiva laite, joka täyttää standardin mukaiset vaatimukset, ei omalla toiminnallaan häiritse muita EMC-standardit täyttäviä laitteita tarkoituksenmukaisessa käyttöympäristössään. Vastaavasti EMC-standardit täyttävä laite ei häiriinny tarkoituksenmukaisen käyttöympäristön normaalista sähkömagneettisesta aktiviteetistä eikä omasta toiminnastaan.

Kuvassa 2.5 esitetään yksinkertaistettu periaatekaavio sähkökäytön eri rajapinnoista sekä osista nimenomaan kiinteistöautomaation näkökulmasta. Sähkökäyttö koostuu taajuusmuuttajasta, moottorista sekä kaapeloinneista. Moottorin ohjaama puhallin ei sisälly sähkökäytön määritelmään. Tarkasti ottaen standardissa EN 61800–3 ei puhuta taajuusmuuttajasta vaan kahteen osaan jaetusta tehomodulista (engl. Complete Drive Module, CDM).



Kuva 2.5. Sähkökäytön rajapinnat sekä liitännät. Punainen katkoviivoitettu alue tarkoittaa taajuusmuuttajaa ja sininen moottorirajapintaa.

Kotelorajapinta tarkoittaa taajuusmuuttajan fyysistä rajapintaa, josta sähkömagneettiset kentät voivat päästä ulos tai sisään. Liitäntä tarkoittaa laitteen rajapintaa ulkoiseen sähkömagneettiseen ympäristöön. Vaihtojänniteliitäntä liittää taajuusmuuttajan sitä syöttävään verkkoon, joka on yleensä yleinen pienjänniteverkko. Taajuusmuuttaja kytketään lähtöjänniteliitännän kautta moottorikaapelilla edelleen moottoriin. Tästä voidaan käyttää termiä moottorin tehonsyötön rajapinta. Taajuusmuuttajan lisälaitteiden tehonsyötön liitäntä ei ole kiinteistöautomaatiossa pääsääntöisesti käytössä siten, että sen kautta häiriöt pääsisivät leviämään taajuusmuuttajan ulkopuolelle. Taajuusmuuttaja kommunikoi kiinteistöautomaation ala-aseman kanssa prosessin mittaus- ja ohjausliitännän kautta.

Standardissa EN 61800-3 määritellään, että valmistajan tulee selvästi dokumentoida ne keinot, joita mahdollisesti tarvitaan taajuusmuuttajan EMC-vaatimusten täyttämiseksi kussakin käyttöympäristössä. Standardissa korostetaan käyttäjien sekä asentajien vastuuta noudattaa valmistajan EMC-ohjeita, joihin kuuluu yleensä seuraavia kohtia:

- suojattujen tai erikoiskaapeleiden käyttäminen
- kaapeleiden suojauksien kytkentä ja 360-asteinen maadoitus
- suurin sallittu moottorikaapelin pituus
- kaapeleiden keskinäinen sijainti ja moottorikaapelin erottaminen muista kaapeleista
- suodattimien käyttö ja maadoitusvaatimukset
- EMC-suojattujen, metallisten kytkinkoteloiden käyttäminen moottorirajapinnassa

Näistä moottorikaapelin pituus vaikuttaa suoraan taajuusmuuttajan luokitukseen ja se on otettava huomioon suodattimia valittaessa. /ATV61, 2006/

### **2.3.2 Standardissa EN 61800-3 määritellyt luokat C1-C4**

Standardissa EN 61800-3 määritellään sähkökäytön käyttökelpoisuus sekä korkeiden taajuuksien häiriöpäästöjen raja-arvot luokkien C1 – C4 mukaan. Luokissa C1 – C4 viitataan ensimmäiseen ja toiseen käyttöympäristöön sekä ammattilaisuuteen. Rajoitettua tai rajoittamatonta jakelua ei (enää) määritellä.



### **1. ja 2. käyttöympäristö**

Ensimmäisen käyttöympäristön määritelmä voidaan suomentaa seuraavasti: 1. käyttöympäristö (engl. first environment) sisältää kotitaloukset (engl. domestic premises) sekä muut tilat, jotka kytketään suoraan ilman välimuuntajia yleiseen pienjänniteverkkoon, joka syöttää kotitaloustarkoitukseen (engl. domestic purposes) käytettäviä rakennuksia. Esimerkiksi asumukset, kotitilat sekä kauppa- ja toimistotilat asuinrakennuksessa ovat esimerkkejä ensimmäiseen käyttöympäristöön kuuluvista tiloista.

Toisen käyttöympäristön määritelmä voidaan suomentaa seuraavasti: 2. käyttöympäristö (engl. second environment) sisältää kaikki muut tilat ja alueet kuin ne, jotka kytketään suoraan yleiseen pienjänniteverkkoon, joka syöttää kotitaloustarkoitukseen käytettäviä rakennuksia. Teollisuusalueet sekä mitkä tahansa rakennuksen tekniset alueet, joita syötetään omasta muuntajasta, ovat esimerkkejä toisen käyttöympäristöön kuuluvista tiloista.

Jokainen tila tai alue kuuluu jompaankumpaan käyttöympäristöön. Jos jokin tila ei kuulu 1. käyttöympäristöön, kuulu se silloin 2. käyttöympäristöön. 1. käyttöympäristön tiloina voidaan yleisesti ottaen pitää yleisestä pienjänniteverkosta syötettyjä tiloja ja 2. käyttöympäristön tiloina teollisuusverkoista syötettyjä tiloja.

#### **Luokka C1**

Sähkökäyttö kuuluu luokkaan C1, kun taajuusmuuttajan nimellisjännite on alle 1000 V ja taajuusmuuttaja on tarkoitettu asennettavaksi 1. käyttöympäristössä määriteltyihin tiloihin. Käyttäjän tai asentajan ammattitaitoon ei C1-luokassa oteta kantaa. Siksi voidaan tulkita riittävän, että taajuusmuuttajan asentaja omaa sähköasennukseen tarvittavat luvat sekä riittävän työturvallisuusosaaminen. Varsinaista EMC-osaamista ei vaadita, mutta asentamisessa tulee noudattaa taajuusmuuttajan valmistajan antamia EMC-ohjeita.

#### **Luokka C2**

Sähkökäytön luokka C2 edellyttää, että taajuusmuuttajan nimellisjännite on alle 1000 V ja sähkökäyttö ei ole liikuteltava tai ”plug in”-tyyppinen laite. Luokan C2 määritelmässä vaaditaan edelleen, että 1. käyttöympäristössä käytettävän sähkökäytön asentajien ja

käyttäjien tulee olla ammattilaisia myös EMC:n kannalta. Luokka C2 on aikaisemmin tarkoittanut rajoitettua jakelua, mutta viimeisimmästä painoksesta viittaukset on poistettu.

Standardissa EN 61800-3 huomautetaan, että C2-luokan sähkökäyttö voi aiheuttaa häiriöitä kotitalousympäristössä. Tällöin voidaan tarvita lisäsuodatusta tai muita häiriöitä vähentäviä keinoja. Huomautus mahdollisista häiriöistä ja ammattilaisuusvaatimus siirtävät vastuun 1. käyttöympäristöön asennettavan taajuusmuuttajan EMC-yhteensopivuudesta valmistajalta tilaajalle ja asentajille.

#### **Luokat C3 ja C4**

Sähkökäyttö kuuluu luokkaan C3, kun nimellisjännite on alle 1000 V ja taajuusmuuttaja on tarkoitettu käytettäväksi ainoastaan toisessa käyttöympäristössä. Luokkaa C4 sovelletaan jännitteen ollessa vähintään 1000 V, virran ollessa vähintään 400 A tai kun sähkökäyttö on osa monimutkaista systeemiä 2. käyttöympäristössä. Kiinteistöautomaatiossa ei pääsääntöisesti voi käyttää luokan C3 tai C4 taajuusmuuttajia.

Luokassa C1 korkeiden taajuuksien häiriöpäästön raja-arvot ovat kaikkein tiukimmat ja siitä eteenpäin raja-arvot kasvavat. Toisin sanoen C1-luokan päästöraja-arvot täyttävää laitetta voi käyttää kaikissa luokissa, elleivät immuniteettivaatimukset toisin estä.

### **2.3.3 Häiriöiden luokittelu matala- sekä korkeataajuisiin häiriöihin**

Standardissa EN 61800-3 häiriöt jaotellaan johtuviin matalataajuisiin häiriöihin, johtuviin korkeataajuisiin häiriöihin sekä säteileviin korkeataajuisiin häiriöihin. Johtuville korkeataajuisille ja matalataajuisille häiriöille tarvitaan eri suotimet.

Matalataajuisten häiriöiden päästörajat ovat määritelty erikseen IEC 61000-3-sarjan standardeissa. Kiinteistöautomaation kannalta oleellimmat matalataajuiset häiriöt ovat verkkoharmoniset yliaaltovirrat. Sovelletavan standardin valintaan vaikuttaa syöttöverkon tyyppi, taajuusmuuttajan syöttöjännite sekä vaihevirran suuruus. Matalataajuisia häiriöitä ei siis jaotella erikseen luokkien C1 – C3 mukaan tai tilaajan osaamisen perusteella.

Korkeataajuisten häiriöiden tärkeimpinä lähteinä pidetään nopeita jännitevaihteluita  $du/dt$  ja virtavaihteluita  $di/dt$ . Johtuvien korkeataajuisten häiriöjännitteiden päästöraja-arvot

---

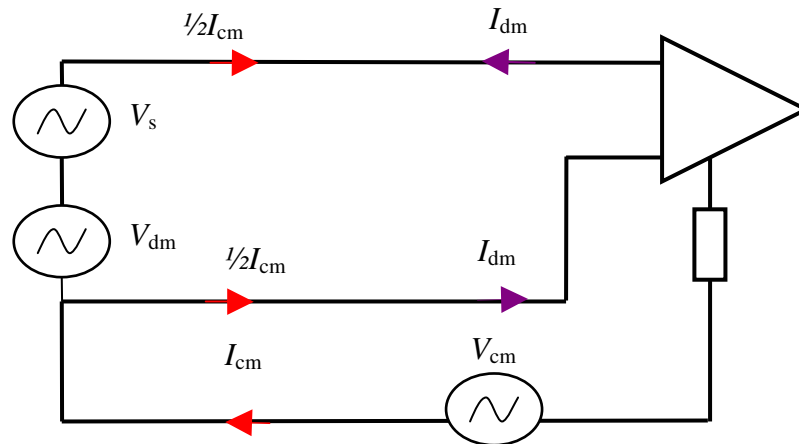
määritellään taajuusalueella 0,15 – 30 MHz. Säteilevät korkeataajuiset häiriöt mitataan kaukokentän alueella 10 metrin etäisyydellä taajuusmuuttajasta taajuuskaistalla 30 – 1000 MHz. Kaukokentän perusteella ei voi ennustaa luotettavasti lähikentän alueen häiriöitä. Johtuvien ja säteilevien häiriöiden taajuusalueet on laadittu pääasiallisen kytkeytymistavan mukaan.

### 3 HÄIRIÖMUODOT JA HÄIRIÖIDEN KYTKEYTYMISTAVAT

Tässä luvussa tarkastellaan kytkentätietä, jonka välityksellä häiriöt kytkeytyvät lähteestä vastaanottajaan eli kohteeseen. Häiriöt kytkeytyvät joko galvaanisesti, kapasitiivisesti, induktiivisesti tai säteilemällä ja voivat olla ero- tai yhteismuotoisia. Usein häiriöt kytkeytyvät monella eri tavalla, joista yhtä voidaan pitää kaikkein merkittävimpänä. Matalataajuiset häiriöt kytkeytyvät tavallisesti johtumalla ja suurtaajuiset häiriöt sähkömagneettisten kenttien välityksellä. /Sepponen, 2005/

#### 3.1 Ero- ja yhteismuotoinen häiriö

Häiriöt jaetaan niiden etenemismuodon perusteella ero- ja yhteismuotoiseen häiriöön, kuva 3.1. Eromuotoinen häiriöjännite  $V_{dm}$  kytkeytyy signaalijohtimiin kuten signaalijännite  $V_s$  aiheuttaen eromuotoisen virran  $I_{dm}$ . Sekä meno- että paluujohtimissa kulkee yhtä suuri virta  $I_{dm}$  mutta vastakkaismerkkisenä.



Kuva 3.1. Ero- ja yhteismuotoisten häiriöiden eteneminen.

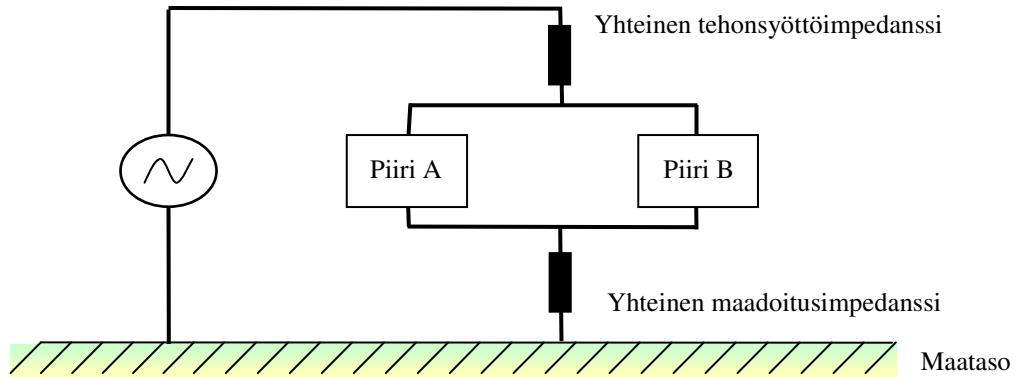
Häiriön yhteismuotoisessa etenemismuodossa molemmat johtimet ovat samassa potentiaalissa  $V_{cm}$  maahan nähden. Tällöin signaalijohtimissa kulkee yhteenlaskettuna yhtä suuri virta  $I_{cm}$  kuin maatasossa. Yhteismuotoista häiriötä esiintyy esimerkiksi silloin, kun magneettikenttä indusoi vierekkäisiin johtimiin yhtä suuren häiriövirran.

Ero- ja yhteismuotoisen häiriön tunnistaminen tapauskohtaisesti on tärkeää, jotta niiden kytkeytyminen voidaan estää tai vähentää. Yhteismuotoisen häiriön vaimentamisen menetelmät eivät pääsääntöisesti käy eromuotoisen häiriön vaimentamiseen ja päinvastoin. Erityisen haitallisia ovat tilanteet, joissa yhteismuotoinen häiriö pääsee muuttumaan eromuotoiseksi häiriöksi. Näin voi käydä esimerkiksi silloin, kun signaalijohtimia kuormitetaan epäsymmetrisesti. /Sepponen, 2005/

### **3.2 Galvaaninen kytkeytyminen**

Häiriön kytkeytyminen galvaanisesti voidaan selittää Kirchoffin ensimmäisen ja toisen lain perusteella. Kirchoffin ensimmäinen lain mukaan pisteeseen tulevien ja pisteestä lähtevien virtojen summa on nolla. Tämä tarkoittaa sitä, että signaali- tai teholähteestä lähtevää virtaa vastaa aina siihen palaava samansuuruinen virta. Kirchoffin toisen lain mukaan suljetun piirin jännitehäviöiden ja piirin sähkömotoristen voimien summa on nolla. Sen perusteella signaali- tai teholähteen tuottama jännite vastaa piirin impedansseissa häviävää jännitettä. Tämä on otettava huomioon erityisesti silloin, kun piirin impedansseihin pääsee kytkeytymään jokin muu häviötä aiheuttava virta. /Sepponen, 2005/

Yhteisen impedanssin välityksellä tapahtuva kytkeytyminen esitetään kuvassa 3.2. Kytkeytyminen edellyttää häiritsevän piirin A ja häiriintyvän piirin B välistä yhteistä virran kulkutietä. Yhteinen impedanssi sijaitsee yleensä yhteisessä tehonsyötössä tai yhteisessä maadoituksessa. Häiritsevän piirin virran muutokset aiheuttavat yhteisissä impedansseissa jännitehäviön muutoksen, joka näkyy häiriintyvän piirin kannalta häiriöjännitteenä ja edelleen häiriövirtana. Yhteisen impedanssin välityksellä kytkeytyviä häiriöitä voidaan vähentää pienentämällä yhteisiä impedansseja esimerkiksi käyttämällä riittävän paksua maadoituskaapelia. Erillinen johdotus poistaa yhteisen impedanssin. Erityisesti matalataajuiset sähkömagneettiset häiriöt kytkeytyvät galvaanisesti häiriön kohteena olevaan piiriin. /Sepponen, 2005/



Kuva 3.2. Yhteisen impedanssin kautta tapahtuva kytkeytyminen.

### 3.3 Induktiivinen kytkeytyminen

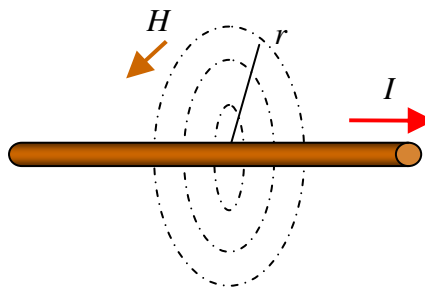
Magneettikentän välityksellä tapahtuvaa kytkeytymistä kutsutaan induktiiviseksi kytkeytymiseksi. Sähkövirran kuljettama energia ei siirry pelkästään johdon sisällä, vaan myös sen ulkopuolella sähkömagneettisena kenttänä. Johdon ulkopuolella kenttä on huomattavasti voimakkaampi ja se voi kytkeytyä läheisiin johtimiin. /Sepponen 2005/

#### 3.3.1 Suoran johtimen säteily

Suorassa johtimessa kulkeva virta  $I$  synnyttää ympärilleen kuvan 3.3 mukaisen magneettikentän  $H$  Amperen lain mukaan. Magneettikentän voimakkuus

$$H(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.1)$$

on suoraan verrannollinen virran suuruuteen ja kääntäen verrannollinen etäisyyteen  $r$  johdosta. /Sepponen, 2005/



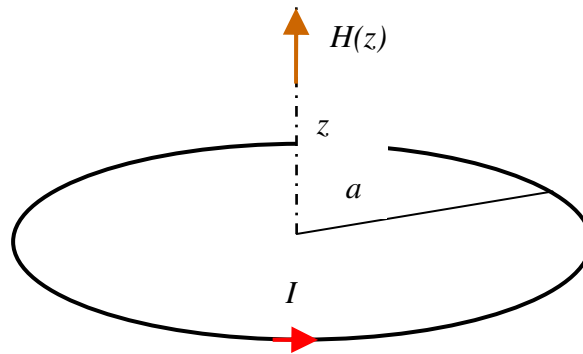
Kuva 3.3. Suorassa johtimessa kulkevan virran  $I$  synnyttämä magneettikenttä  $H$ .

### 3.3.2 Silmukan synnyttämä säteily

Kirchoffin ensimmäisen lain perusteella voidaan todeta virtaa kuljettavien piirien muodostavan silmukoita, kuva 3.4. Silmukassa kulkeva virta  $I$  synnyttää magneettikentän

$$H(z) = \frac{Ia^2}{2(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3.2)$$

jonka voimakkuus riippuu silmukan säteestä  $a$  ja etäisyydestä  $z$  silmukan keskipisteestä. /Sepponen, 2005/



Kuva 3.4. Silmukan virta  $I$  synnyttää ympärilleen magneettikentän  $H$ .

Magneettikenttien voimakkuuksia voidaan laskea käytännön kannalta riittävän tarkasti yksinkertaisten perusgeometrioiden avulla. Yhteneväisesti voidaan osoittaa virtasilmukan pinta-alan pienentämisen pienentävän myös magneettikentän voimakkuutta ja siten myös vähentävän silmukan synnyttämän säteilyn kytkeytymistä ympäristöön.

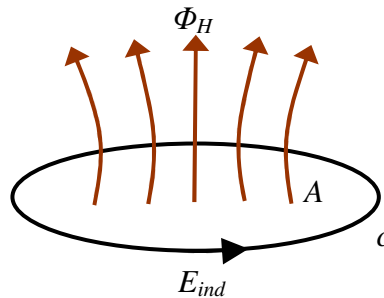
Sekä suoran johdon että virtasilmukan magneettikentän voimakkuudesta voidaan edelleen laskea magneettivuon tiheys /Sihvola & Lindell, 2002/

$$B(r) = \mu_r \mu_0 H(r), \quad (3.3)$$

jossa  $\mu_r$  on väliaineen suhteellinen permeabiliteetti  
 $\mu_0$  on tyhjän permeabiliteetti

### 3.3.3 Magneettikentän indusoima häiriöjännite

Tässä luvussa esitettävät asiat perustuvat lähteeseen /Sihvola & Lindell, 2002/. Staattisen magneettikentän olemassaolo ei yleensä aiheuta sähkölaitteissa virhetoimintoja. Erityisen ongelmallisia ovat muuttuvat magneettikentät, joiden aiheuttamia häiriövirtoja voidaan selittää Faradayn induktiolain perusteella. Faradayn induktiolain mukaan johdinsilmukan läpi kulkeva muuttuva magneettivuo  $\Phi_H$  indusoi silmukkaan sähkökentän  $E$ , joka synnyttää magneettivuon muutosta vastustavan virran. Magneettivuo  $\Phi_H$  voidaan laskea magneettivuontiheyden  $B$  pintaintegraalina. Tilannetta esittää kuva 3.5.



Kuva 3.5. Muuttuva magneettivuo  $\Phi_H$  indusoi johdinsilmukkaan sähkömotorisen voiman  $E_{ind}$ .

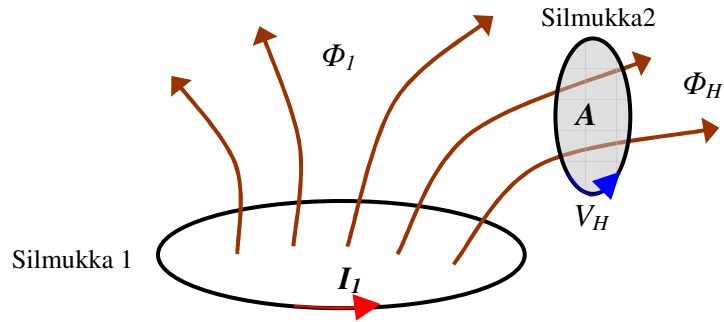
Laskemalla polkuintegraali johdinsilmukan ympäri saadaan määritettyä sähkökentän synnyttämä sähkömotorinen voima

$$E_{ind} = \oint_c E \cdot dl = - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS = - \frac{d}{dt} \Phi_H, \quad (3.4)$$

jossa  $c$  tarkoittaa polkua  $A$ -pintaisen johdinsilmukan ympäri. Silmukassa kulkeva virta riippuu silmukan impedanssista kyseisellä taajuudella. Yhtälössä oleva miinus-merkki kertoo sen, että sähkömotorinen voima osoittaa oikean käden kiertosuuntaan pinnan  $A$  normaalisuuntaan nähden. Tällöin sähkömotorinen voima synnyttää virtaa, joka kulkee oikean käden kiertosuuntaan magneettivuon osoittaessa kohtisuoraan virtaa vasten.

Kuvan 3.5 esittämää tilannetta voidaan laajentaa lisäämällä kuvaan 3.6 toinen silmukka (silmukka 1), jossa kulkeva virta  $I_1$  aiheuttaa magneettivuon  $\Phi_1$ .





Kuva 3.6. Silmukassa 1 kulkevan häiriövirran  $I_1$  aiheuttamasta magneettivuosta osa läpäisee toisen silmukan aiheuttaen siinä häiriöjännitteen  $V_H$ .

Magneettivuosta  $\Phi_1$  osa kytkeytyy toisen silmukan pinnan  $A$  läpi. Tällöin pätee

$$\Phi_H = L_{12}I_1, \quad (3.5)$$

jossa  $L_{12}$  tarkoittaa kahden silmukan välistä keskinäisinduktanssia.

Siten yhtälön (3.4) tulos voidaan esittää muodossa

$$V_H = -L_{12} \frac{dI_1}{dt} = j\omega BA \cos(q), \quad (3.6)$$

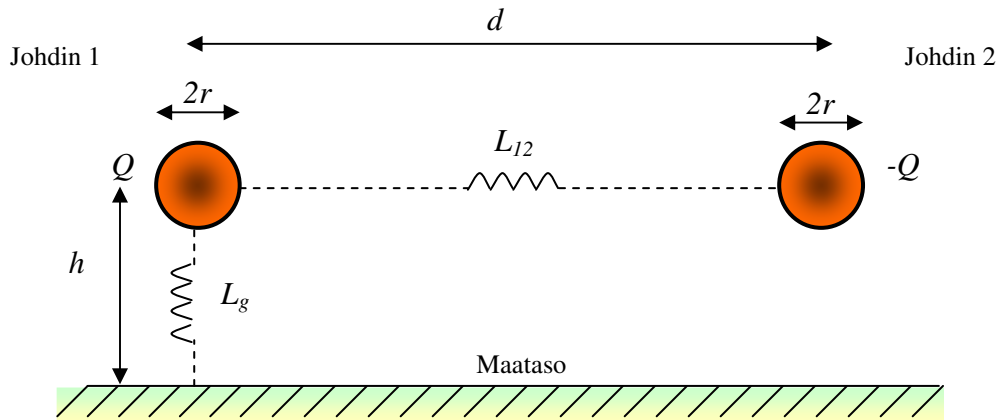
jossa  $A \cos(q)$  tarkoittaa magneettikenttää vastaan kohtisuoraa olevaa pinta-alaa

Yhtälön (3.6) viimeinen muoto on johdettavissa olettaen sinimuotoinen riippuvuus. Yhtälöstä (3.6) voidaan päätellä keskinäisinduktanssin pienentämisen pienentävän myös indusoituvaa jännitettä. Keskinäisinduktanssia voidaan pienentää pienentämällä silmukan 2 pinta-alaa tai kasvattamalla silmukoiden välistä etäisyyttä. Tarkemmin ilmaistuna silmukoiden välisen etäisyyden kasvaessa pienenee magneettivuon tiheys  $B$ . Myös häiritsevän piirin virran taajuuden rajoittaminen heikentää kytkeytymistä.

### 3.3.4 Johdinrakenteiden induktansseja

Kuvassa 3.7 mallinnetaan johtimien välinen kytkeytyminen keskinäisinduktanssin avulla tapauksissa, joissa johtimessa 2 kulkee johtimen 1 paluuvirta.  $L_g$  tarkoittaa pitkän ja

pyöreän johtimen sekä maatasen välistä induktanssia ja  $L_{12}$  johtimien välistä induktanssia. Johtimien toisiinsa aiheuttamat häiriöjännitteet määräytyvät yhtälöstä (3.6)



Kuva 3.7. Johtimet muodostavat keskenään sekä maatasen kanssa hajainduktanssit.

Johtimien välinen hajainduktanssi pituusyksikköä kohden lasketaan johtimien välisen etäisyyden  $d$ , johtimien säteen  $r$  ja permeabiliteetin  $\mu$  avulla yhtälöllä

$$L_{12} = \frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{d-r}{r}\right). \quad (3.7)$$

Johtimen ja maatasen hajainduktanssin pituusyksikkö kohden saadaan

$$L_g = 0,02 \ln\left(\frac{2h}{r}\right), \quad (3.8)$$

jossa  $h$  tarkoittaa johtimen etäisyyttä maatasosta. Yhtälöistä (3.7) ja (3.8) voidaan päätellä, että hajainduktanssien pienentämiseksi johtimet 1 ja 2 kannattaa sijoittaa mahdollisimman lähelle toisiaan sekä maatasoa. Tällöin johdinten välinen magneettinen kytkeytyminen pienenee. /Sepponen, 2005/

### 3.4 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Häiritsevän piirin kytkeytymistä häiriintyvään piirin sähkökentän välityksellä kutsutaan kapasitiiviseksi kytkeytymiseksi. Se edellyttää potentiaalieroa häiriintyvän ja häiritsevän piirin välillä. Sähkökentän välityksellä tapahtuvaa kytkeytymistä voidaan mallintaa hajakapasitanssien avulla. Yksinkertaisille rakenteille voidaan johtaa kapasitansseja

Gaussin lain perusteella, mutta monimutkaisten rakenteiden välisten kapasitanssien laskeminen edellyttää usein tietokoneavusteista laskentaa.

Kapasitanssien läpi kulkeva virta lasketaan yhtälöllä

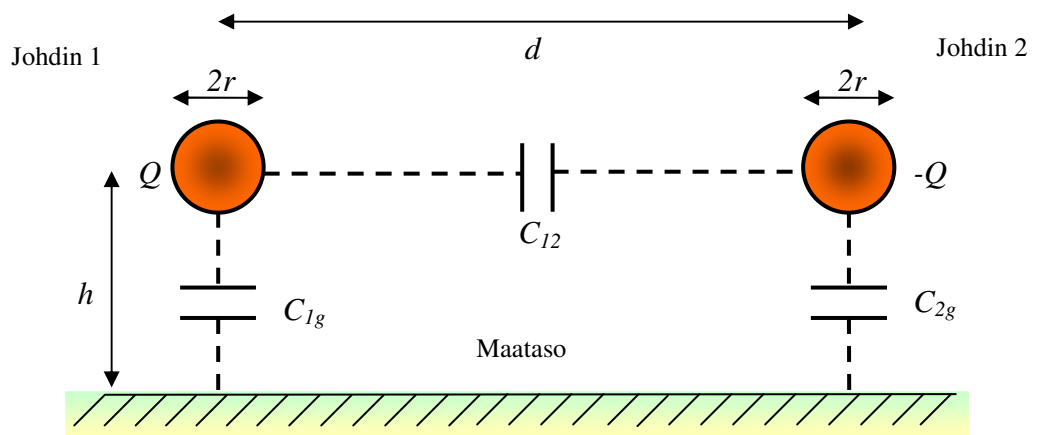
$$I = C \frac{du}{dt}, \quad (3.9)$$

jossa  $C$  on rakenteen kapasitanssi  
 $du/dt$  jännitteen muutosnopeus [V/s]

Yhtälöstä (3.9) voidaan päätellä taajuuden kasvamisen eli jännitteen muutosnopeuden suurenemisen tai kapasitanssin suurenemisen kasvattavan kapasitanssin läpi kulkevaa virtaa. Siksi matalilla taajuuksilla eristeenä näkyvät rakenteet saattavat olla korkeilla taajuuksilla potentiaalinen kulkureitti virralle. Kapasitiivisen kytkeytymisen aiheuttamat häiriöjännitteet voidaan laskea piiriteorian avulla muodostamalla kytkeytymisen vastinpiiri. /Sepponen, 2005/

### 3.4.1 Parijohtimien välinen hajakapasitanssi

Kuvassa 3.8 esitetään kahden johtimen sekä johtimien ja maatason välille muodostuvat hajakapasitanssit. Johtimien oletetaan olevan pitkiä, pyöreitä ja yhdensuuntaisia sekä niiden etäisyyden maatasosta ja halkaisijan olevan yhtä suuria.



Kuva 3.8. Kaksi maatason yläpuolella olevaa johdinta muodostavat hajakapasitanssit toisiinsa sekä maahan nähden.

Parijohtimien välinen hajakapasitanssi  $C_{12}$  lasketaan

$$C_{12} = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \left[ \frac{d}{2r} + \left( \frac{d^2}{4r^2} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right]}, \quad (3.10)$$

jossa  $C_{12}$  tarkoittaa kapasitanssia pituusyksikköä kohden [F/m]  
 $\epsilon_0$  on tyhjän permittiivisyys  
 $\epsilon_r$  on väliaineen suhteellinen permittiivisyys  
 $d$  on johtimien välinen etäisyys  
 $r$  on pyöreän johtimen säde

Johtimet muodostavat hajakapasitanssit  $C_{1g}$  ja  $C_{2g}$  maatasen kanssa. Ne määräytyvät yhtälöstä

$$C_{1g} = C_{2g} = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln \left( \frac{2h}{r} \right)}, \quad (3.11)$$

jossa  $C_{1g}$  ja  $C_{2g}$  ovat kapasitansseja pituusyksikköä kohden [F/m]  
 $h$  on johdon ja maatasen välinen etäisyys

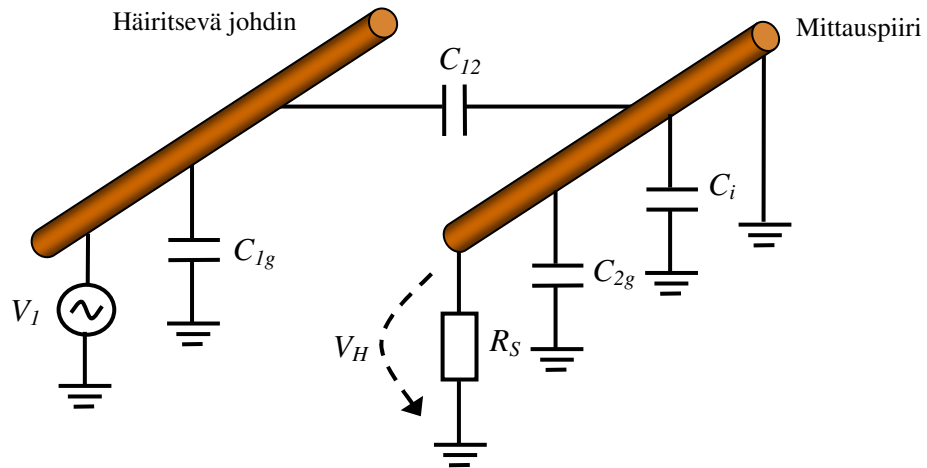
Muut muuttujat ovat samat kuin yhtälössä (3.10). Kapasitanssin suuruutta kuvaavista yhtälöistä (3.10) ja (3.11) voidaan päätellä johtimien välisen tai johtimien ja maatasoon välisen etäisyyden kasvattamisen pienentävän hajakapasitanssien suuruutta. Merkittävin kapasitanssien aleneminen tapahtuu kuitenkin suhteellisen lyhyellä matkalla. Kapasitanssien arvoa kasvattavat johteiden tai kappaleiden välissä käytettävät eristemateriaalit, koska niiden suhteellinen permittiivisyys on aina ilmaa suurempi. Siten esimerkiksi muovikotelot tai johtojen eristekerrokset kasvattavat johtavien kappaleiden välistä hajakapasitanssia. /Sepponen, 2005/

Parikaapelin johtimien välisellä hajakapasitanssilla ei ole käytännössä mitään merkitystä, jos signaalin taajuus on matala. Hyvin korkeilla taajuuksilla johdinten välinen kapasitiivinen kytkeytyminen voimistuu, mutta senkään takia ei voida erottaa signaali- ja

paluujohtinta toisistaan. Tämä kasvattaisi merkittävästi magneettikentän kytkeytymistä signaalipiiriin muodostamaan suuren silmukkaan. Korkeita siirtotaajuuksia käytettäessä on huomioitava parikaapeleiden vaimennuksen kasvu sekä impedanssien epäsovituksien aiheuttamat heijastumiset. /ABB:n TTT-käsikirja, 2000/

### 3.4.2 Mittausjärjestelmään kapasitiivisesti kytkeytyvä häiriöjännite

Kuvassa 3.9 esitetään häiritsevän johtimen kapasitiivinen kytkeytyminen mittauspiiriin. Kapasitiivisesti kytkeytyvän häiriöjännitteen  $V_H$  suuruus voidaan laskea, kun häiriöjännitelähteen suuruuden  $V_I$  ja kulmataajuuden  $\omega$  lisäksi tunnetaan häiritsevän verkkojohtimen ja häiriintyvän mittauspiirin välinen hajakapasitanssi  $C_{12}$ , häiriintyvän johtimen hajakapasitanssi  $C_{2g}$  maahan nähden sekä mittauspiirin impedanssitaso. Mittauspiirin impedanssit voidaan jakaa mittauspiirin resistanssin  $R_S$  ja kapasitanssiin  $C_i$ . Käytännössä mittauspiirin jännitelähteiden jännitteet voidaan jättää huomioimatta niiden pienuuden vuoksi, eikä niitä siksi ole esitetty kuvassa 3.9. / Ott, 1976/



Kuva 3.9. Mittausketjuun kytkeytyy häiriöjännite  $V_H$  häiritsevän johtimen ja mittausjohdon välisen hajakapasitanssin  $C_{12}$  kautta.

Kuvan 3.9 tilanteessa mittauspiiriin kytkeytyvän häiriöjännitteen  $V_H$  suuruus lasketaan yhtälöllä /Ott, 1976/.

$$V_H = \frac{j\omega C_{12}}{j\omega(C_{12} + C_{2g} + C_i) + \frac{1}{R_S}} V_I \approx j\omega C_{12} R_S V_I. \quad (3.12)$$

Yhtälön (3.12) yksinkertaistettu muoto pätee käytännössä hyvin, koska  $R_S$  on yleensä huomattavasti pienempi impedanssi hajakapasitanssien  $C_{12}$ ,  $C_{2g}$  ja  $C_i$  muodostamaan impedanssiin verrattuna. Yhtälöstä (3.12) voidaan päätellä hajakapasitanssin  $C_{12}$  pienentämisen pienentävän häiriöjännitteen suuruutta. Toisin sanoen häiritsevä piiri kannatta sijoittaa mahdollisimman kauaksi häiriön kohteena olevaan piiriin nähden. Hajakapasitanssin  $C_{12}$  suuruutta kuvaavasta yhtälöstä (3.10) on syytä huomata, että johtimien välisen hajakapasitanssin oleellisin pienentyminen tapahtuu ensimmäisten senttien aikana. Toinen tärkeä häiriöjännitteen suuruuteen vaikuttava tekijä on häiriöjännitelähteen taajuus. Rajoittamalla häiritsevän piiriin taajuusaluetta, vaimentuu kapasitiivinen kytkeytyminen. Mittauspiirin signaalijohdin voidaan suojata kapasitiivisen kytkeytymisen varalta. Tätä käsitellään luvussa 5.

### 3.5 Sähkömagneettinen kytkeytyminen

Säteilevällä tapahtuva kytkeytyminen tarkoittaa häiriöiden kytkeytymistä sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä, jota induktiivinen ja kapasitiivinen kytkeytyminen itse asiassa ovat. Edellä kytkeytymistä mallinnettiin piiriteorian avulla. Tässä luvussa tarkastellaan lähemmin sähkömagneettisten kenttien ominaisuuksia sekä antennirakenteita.

Sähkömagneettista säteilyä voi syntyä esimerkiksi liityntäjohtojen muodostamista dipoleista, lyhyistä johdon pätkistä laitteiden sisällä tai silmukkarakenteista. Kentän ominaisuudet riippuvat säteilylähteen rakenteesta, väliaineen dielektrisistä ja magneettisista ominaisuuksista sekä tarkastelupisteen etäisyydestä säteilylähteeseen. /Clayton, 1992/

#### 3.5.1 Antennirakenteiden yleisiä ominaisuuksia

Eri antenneilla ja antennin kaltaisilla rakenteilla on monia yhteneväisiä ominaisuuksia, jotka pätevät antennin rakenteesta riippumatta. Antennit ovat resiprookkisia eli antennien ominaisuudet ovat samat lähetettäessä sekä vastaanotettaessa sähkömagneettista säteilyä. Esimerkiksi jos antenni säteilee tehokkaasti ainoastaan yhteen suuntaan, ottaa se myös säteilyä vastaan tehokkaasti vain kyseisestä suunnasta. Resiprookkisuus ei päde sellaisilla antenneilla, joissa on epäresiprookkisia ferriittikomponentteja tai antennien välissä on plasmaa. /Räisänen ja Lehto, 2001/

Antennirakenteiden fyysisiä mittoja verrataan lähetettävän tai vastaanotettavan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuteen  $\lambda$ . Antennien säteilytehokkuutta voidaan pitää heikkona, kun antennirakenteiden fyysiset mitat ovat alle  $\lambda/10$ . EMC:n kannalta kriittiset silmukat kannattaa kuitenkin suunnitella siten, että niiden halkaisijat ovat alle  $\lambda/20$ . Erityisen tehokkaita säteilijöitä ovat sellaiset rakenteet, joissa esiintyy aallonpituuden neljänneksen monikertoja  $n\lambda/4$ ,  $n = 1, 2, \dots, \infty$ . /Sepponen, 2005/

Säteilylähteen ympäristö voidaan jakaa säteilykentän ominaisuuksien perusteella reaktiiviseen lähikenttään, säteilevään lähikenttään ja kaukokenttään. Tarkat rajat eri kenttäalueiden välillä ovat keinotekoisia, koska kentän muutokset tapahtuvat vähitellen. Jako kolmeen alueeseen ei päde matalilla taajuuksilla toimiviin pieniin antenneihin. Lähinnä antennia sijaitsee reaktiivinen lähikentän alue, jossa säteilemätön reaktiivinen osa on säteilevää osaa suurempi. Reaktiivinen osa pienenee voimakkaasti etäisyyden neliöön tai kuutioon verrannollisena, kunnes säteilevän lähikentän alueelta alkaen reaktiivinen osa on merkityksetön. /Räisänen ja Lehto, 2001/

Sähkö- ja magneettikentän voimakkuuksien suhdetta kutsutaan aaltoimpedanssiksi, joka saadaan yhtälöstä /Räisänen ja Lehto, 2001/

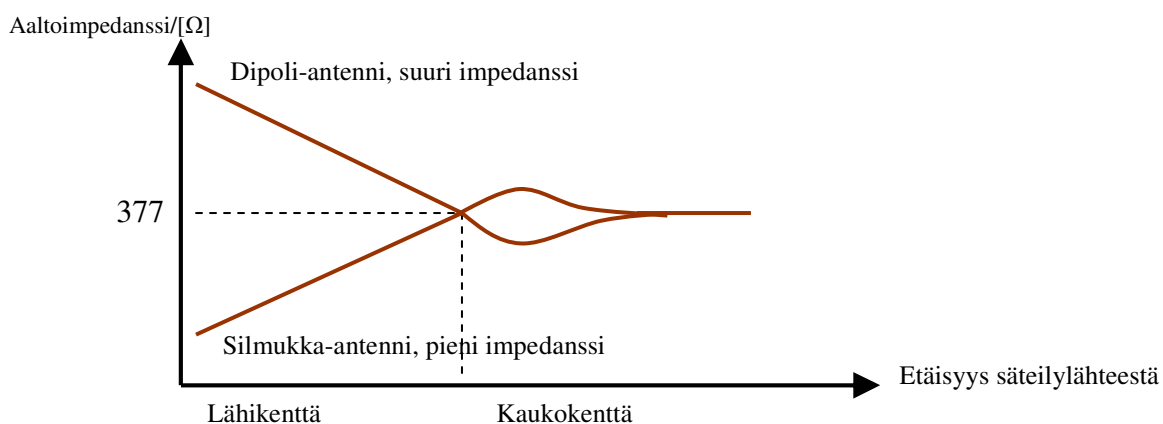
$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}, \quad (3.13)$$

jossa  $Z_0$  on aaltoimpedanssi [ $\Omega$ ]  
 $\mu$  tarkoittaa väliaineen permeabiliteettia  
 $\varepsilon$  tarkoittaa väliaineen permittiivisyyttä

Ilmassa tai tyhjiössä etenevän sähkömagneettisen aallon aaltoimpedanssi on kaukokentän alueella likimain vakio 377  $\Omega$ . Säteilevän lähikentän alueella aaltoimpedanssi määräytyy kuitenkin lähteen ominaisuuksien perusteella. Siten joko induktiivinen tai kapasitiivinen kytkeytyminen on hallitseva.

Kuvassa 3.10 esitetään dipoli- ja silmukka-antennin aaltoimpedanssin tyypillinen käyttäytyminen lähi- ja kaukokentässä. Matalaimpedanssisen antennin kuten esimerkiksi

silmukka-antennin säteilevässä lähikentässä hallitsee magneettikenttä, koska virta on suuri ja jännite pieni. Ilmassa etenevän aallon aaltoimpedanssi on tällöin pienempi kuin  $377 \Omega$ . Suuri-impedanssisen antennin kuten esimerkiksi dipoli-antennin virta on pieni ja jännite suuri, jolloin säteilevässä lähikentässä sähkökenttä on hallitseva ja aaltoimpedanssi suurempi kuin  $377 \Omega$ . /Räisänen ja Lehto, 2001/



Kuva 3.10. Aaltoimpedanssin muuttuminen lähi- ja kaukokentässä..

Pienikokoisen säteilijän kaukokentän rajan voidaan katsoa alkavan etäisyydestä  $\lambda/2\pi$ . Alle 1 MHz taajuuksilla liikutaan yleensä lähikentän alueella, koska tällöin lähikenttä ulottuu lähes 50 metriin saakka. Kaukokentän alueella sähkömagneettisen kentän ominaisuudet eivät juuri riipu etäisyyteen lähteestä vaan väliaineen ominaisuuksista. Kaukokentässä sähkö- ja magneettikenttä ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa sekä etenemissuuntaan nähden. Kenttien voimakkuus heikkenee kääntäen verrannollisena etäisyyteen lähteestä.

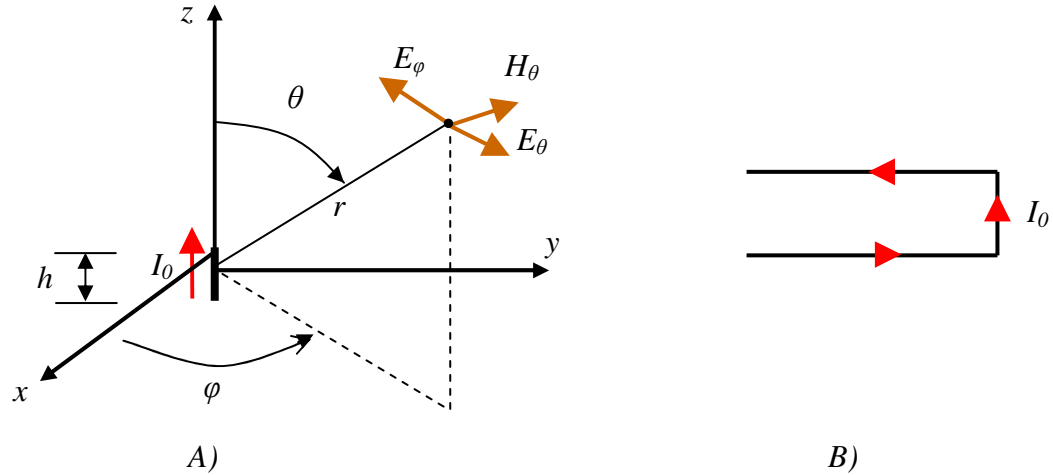
### 3.5.2 Lyhyen dipolin säteily

Yksinkertainen, yleensä tahattomasti laitteistoissa syntyvän antennirakenteen voidaan ajatella muodostuvan kahdesta yhdensuuntaisesta johtimesta, joiden päät oikosuljetaan. Antenniteknisesti rakennetta nimitetään lyhyeksi dipoliksi eli Hertzin dipoliksi. Parijohtimien puolikkaissa kulkee virtaa molempiin suuntiin, joten virtojen synnyttämät kentät kumoavat toisensa kaukana johdosta. Lyhyen oikosulun läpi kulkeva vaihtovirta aiheuttaa sen sijaan magneettikentän pyörteen ja se taas aiheuttaa sähkökentän pyörteen,



joka aiheuttaa edelleen magneettikentän pyörteen ja näin syntyy etenevä sähkömagneettinen aalto. Lyhyen dipolin pituus on selvästi sen säteilemän sähkömagneettisen aallon pituutta lyhyempi. /Clayton, 1992/

Kuvan 3.11 oikosulun läpi kulkeva virta  $I_0$  synnyttää z-akselin suuntaisen säteilyn.



Kuva 3.11. A) Hertzin dipolin säteilykuvio. B) Dipolin muodostava oikosuljettu pariyohto. /Clayton, 1992/

Hertzin dipolin aiheuttaman säteilyn sähkö- ja magneettikenttien voimakkuudet voidaan laskea yhtälöillä

$$E_{\theta} = \frac{I_0 h}{4\pi} e^{-j\omega\sqrt{\mu\epsilon}r} \left( \frac{j\omega\mu}{r} + \frac{\sqrt{\mu/\epsilon}}{r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon r^3} \right) \sin\theta \quad (3.14)$$

$$E_r = \frac{I_0 h}{4\pi} e^{-j\omega\sqrt{\mu\epsilon}r} \left( \frac{2\sqrt{\mu/\epsilon}}{r^2} + \frac{2}{j\omega\epsilon r^3} \right) \cos\theta \quad (3.15)$$

$$H_{\phi} = \frac{I_0 h}{4\pi} e^{-j\omega\sqrt{\mu\epsilon}r} \left( \frac{j\omega\sqrt{\mu\epsilon}}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta \quad (3.16)$$

joissa  $E_{\theta}$  ja  $E_r$  ovat sähkökentän voimakkuuksia [V/m]

$H_{\phi}$  on magneettikentän voimakkuus [A/m]

$I_0$  on oikosulun läpi kulkeva virta

---

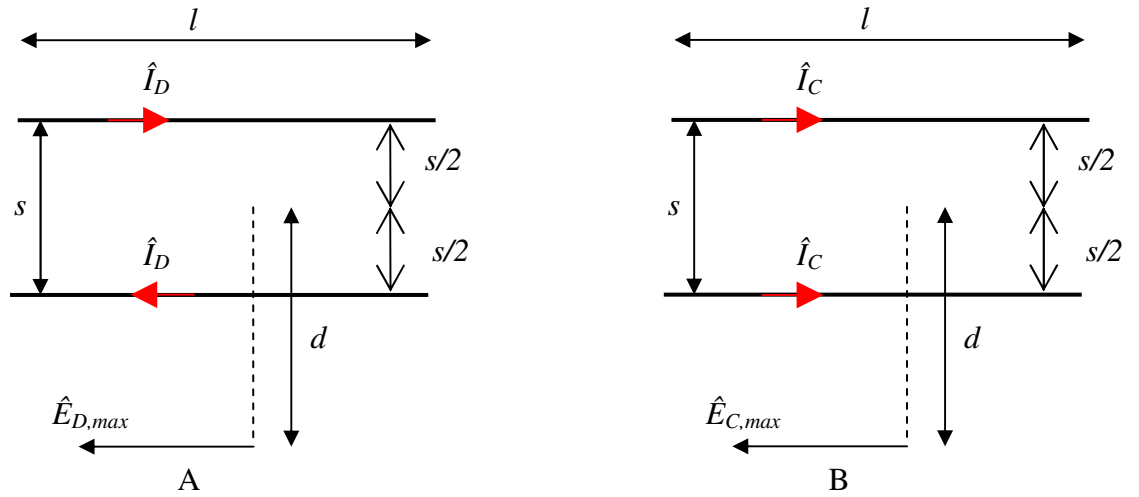
$h$	on lyhyen dipolin pituus
$\omega$	on virran kulmataajuus (rad/s)
$\mu$	tarkoittaa väliaineen permeabiliteettia
$\varepsilon$	tarkoittaa väliaineen permittiivisyyttä
$r$	on etäisyys virta-alkiosta

Kun etäisyys  $r$  on suuri aallonpituuteen nähden, ollaan kaukokentässä. Tällöin termien  $1/r^2$  ja  $1/r^3$  vaikutus on merkityksetön. Käytännössä on lähes mahdotonta laskea eri rakenteiden dipolien synnyttämiä kenttiä, mutta yhtälöiden (3.14) – (3.16) perusteella voidaan päätellä dipolin kenttien suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Dipolin säteilemien kenttien voimakkuudet ovat suoraan verrannollisia virran suuruuteen, virran taajuuteen sekä dipolin pituuteen. Sähkö- ja magneettikenttiä voidaan siten pienentää rajoittamalla virtaa ja sen taajuutta sekä lyhentämällä dipolin muodostavien johtimien pituutta.

### 3.5.3 Ero- ja yhteismuotoinen säteily

Eromuotoinen häiriövirta syntyy esimerkiksi silloin, kun lähekkäin olevien meno- ja paluujohtimien muodostamaan silmukkaan kytkeytyy säteilykenttä. Säteilykenttä saa aikaan signaalin tavoin kulkevan eromuotoisen virran. Meno- ja paluujohtimissa kulkeva yhteismuotoinen virta voi syntyä silloin, kun ulkopuolinen kenttä kytkeytyy johtimien ja maatason muodostamaan silmukkaan. Silmukka voi syntyä tahattomasti esimerkiksi johdinten ja maatason välisten hajakapasitanssien kautta. Epäsymmetrisissä impedanssirakenteissa yhteismuotoinen virta synnyttää eromuotoista virtaa. /Williams, 1996/

Johtimissa kulkevien ero- ja yhteismuotoisten virtojen säteilyn mallintamista voidaan yksinkertaistaa mallintamalla jokainen johdin Hertzin dipolina, kuva 3.12. Tämä edellyttää, että johdin on riittävän lyhyt ja tarkasteluetäisyys riittävän pitkä. Lisäksi virran oletetaan olevan tasaisesti jakautunut koko johtimen pituudella, ja johtimien oletetaan olevan lähekkäin toisiaan.



Kuva 3.12. A) Eromuotoisen virran synnyttämä säteily. B) Yhteismuotoisen virran synnyttämä säteily. /Clayton, 1992/

Lähteessä /Clayton, 1992/ on johdettu yksinkertaistetut yhtälöt eromuotoisen säteilyn  $\hat{E}_{D,max}$  ja yhteismuotoisen säteilyn  $\hat{E}_{C,max}$  maksimivoimakkuuksille

$$|\hat{E}_{D,max}| = 1,316 \cdot 10^{-14} \frac{|\hat{I}_D| f^2 l s}{d} \quad (3.17)$$

$$|\hat{E}_{C,max}| = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{|\hat{I}_C| f^2 l}{d}, \quad (3.18)$$

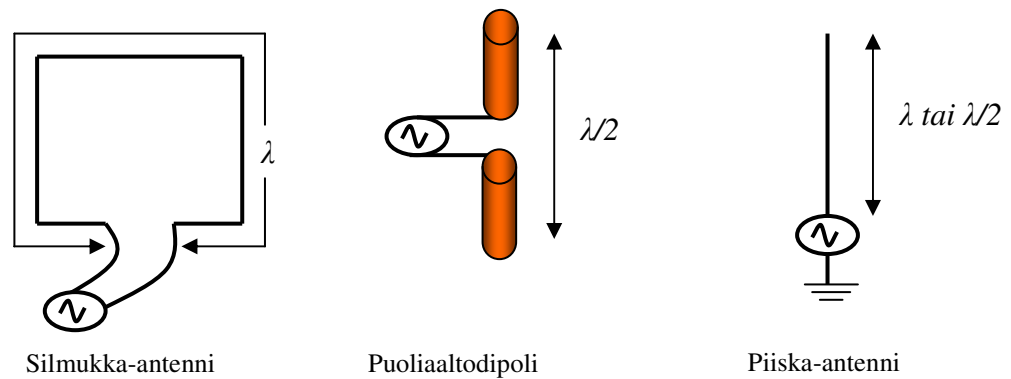
- joissa  $\hat{I}_D$  on eromuotoisen virran huippuarvo  
 $\hat{I}_C$  on yhteismuotoisen virran huippuarvo  
 $f$  on ero- tai yhteismuotoisen virran taajuus  
 $l$  on johdinten pituus  
 $s$  on johdinten välinen etäisyys  
 $d$  on tarkastelupisteen etäisyys

Yhtälön (3.17) perusteella eromuotoisen virran aiheuttaman säteilyyn voimakkuutta voidaan pienentää pienentämällä meno- ja paluujohtimen muodostamaa pinta-alaa  $ls$ . Tämä onnistuu esimerkiksi kiertämällä meno- ja paluujohtimet toistensa ympärille ja lyhentämällä johdinten pituutta. Resiprookkisuuden perusteella pinta-alan  $ls$  pienentäminen heikentää eromuotoista virtaa aiheuttavan säteilyn kytkeytymistä.

Yhtälön (3.18) perusteella voidaan todeta, ettei yhteismuotoisen säteilyn voimakkuuteen vaikuta meno- ja paluujohtimien keskinäinen etäisyys  $s$ . Siksi esimerkiksi kierretty parijohdinrakenne ei vähennä yhteismuotoisen virran aiheuttamaa säteilyä, eikä siten myöskään anna suojaa yhteismuotoista virtaa synnyttävää säteilyä vastaan.

### 3.5.4 Muita antennirakenteita

Kuvassa 3.13 esitetään erilaisia antennirakenteita. Silmukka-antenni on tehokas säteilijä, kun sen pituus on lähellä aallonpituutta  $\lambda$ . Puoliaaltodipoli säteilee tehokkaasti kahden johtimen muodostamasta raosta, jos rakojen väliin kytkeytyy vaihtojännite ja rakenteen pituus on noin  $\lambda/2$ . Piiska-antennin säteilee hyvin pituudella  $\lambda/2$  ja  $\lambda$ . Kaapelin toisessa päässä täytyy kuitenkin olla maataso. Kaapeleiden suojat voivat käyttäytyä piiska-antenneina.



Kuva 3.13. Erilaiset antennirakenteet ovat tehokkaita säteilijöitä, jos niiden pituudet ovat lähellä aallonpituutta  $\lambda/2$  tai  $\lambda$ .

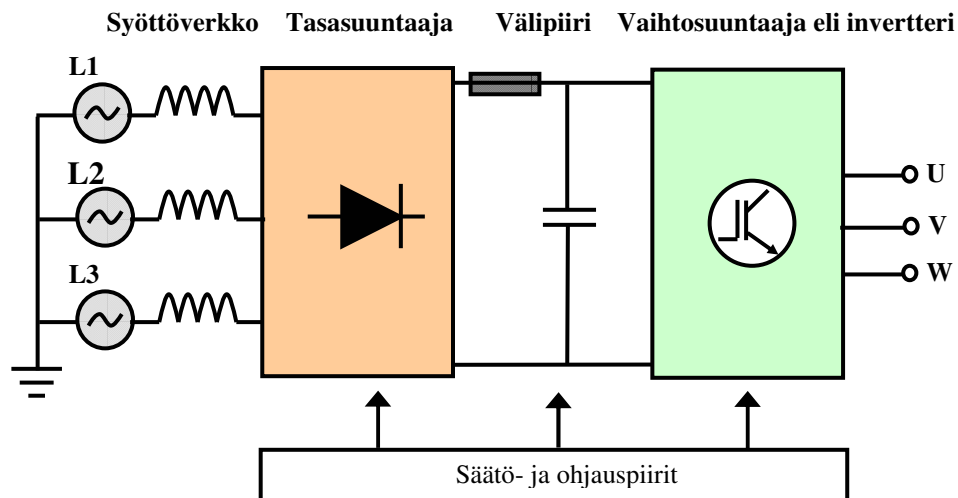
## 4 TAAJUUSMUUTTAJA HÄIRIÖLÄHTEENÄ

Tässä luvussa esitetään taajuusmuuttajan toimintaperiaate sekä sen aiheuttamat häiriöt.

Luvun lopussa tutkitaan häiriöiden leviämistä ympäristöön.

### 4.1 Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Oikosulkumoottorin ohjaukseen käytetään yleisesti pulssinleveysmodulaatioon perustuvia (engl. Pulse Width Modulation, PWM) jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia. Taajuusmuuttaja voidaan jakaa toiminnan ja häiriöiden kannalta kahteen osaan; pääpiiriin sekä ohjaus- ja säätöpiiriin kuvan 4.1 mukaisesti. Pääpiiri jakautuu kolmeen oleelliseen kokonaisuuteen; tasasuuntaajaan, välipiiriin ja vaihtosuuntaajaan eli invertteriin.



Kuva 4.1. Taajuusmuuttajan pääpiiri koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta.

Taajuusmuuttajan tasasuuntaaja muuttaa syöttöverkon yksi- tai kolmivaiheisen vaihtojännitteen tasajännitteeksi, josta vaihtosuuntaaja muokkaa pulssileveysmoduloinnilla perusaalloiltaan sinimuotoisen kolmivaihejännitteen. Tässä työssä erityisesti tarkasteltavat Schneider Electricin ATV21- ja ATV61-taajuusmuuttajat ovat vektorivuosaadöllä ohjattuja jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia. Kolmivaiheisten ATV21-taajuusmuuttajien tehoalue ulottuu 0,75 kW – 75 kW /ATV21, 2006/ ja ATV61-taajuusmuuttajien alueelle 0,75 kW – 630 kW, /ATV61, 2006/. Kiinteistöautomaatiossa tarvitaan vain harvoin yli 30 kW taajuusmuuttajia. Valtaosa toimitetuista taajuusmuuttajista on alle 10 kW taajuusmuuttajia.

### 4.1.1 Pääpiirin toimintaperiaate

Tasasuuntaussilta muuttaa kolmivaiheisen syöttöjännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi, jonka suuruus on vakio ohjaamattomalla tasasuuntaajalla ja säädettävä puoliohjatulla tasasuuntaajalla. Tasasuuntaajat toimivat periaatteessa yhdelläkin vaiheella, mutta tällöin välipiirin jännite on matalampi ja jännitteen vaihtelu suurempi. Esimerkiksi osaa ATV21- ja ATV61-sarjan taajuusmuuttajia voidaan syöttää yksivaiheisesta verkosta, mikäli moottorin teho mitoitetaan taajuusmuuttajan mallista riippuen noin 1/3-3/5:aan sallitusta maksimista. Tasasuuntaaja aiheuttaa syöttöverkkoon harmonisia yliaaltovirtoja sekä johtuvia korkeataajuisia häiriöitä.

Tasasuuntaussillan jälkeen pääpiirissä seuraa jännitevälipiiri, jossa käytetään suuria elektrolyyttikondensattoreita. Sen tarkoitus on tasoittaa jännitteen ja virran vaihteluita sekä toimia moottorin ja verkon välisenä energiavarastona. Välipiiri ei aktiivisesti tuota häiriötä, mutta sen rakenne vaikuttaa harmonisten yliaaltovirtojen suuruuteen. Esimerkiksi yleisessä pienjänniteverkoissa käytettävien ATV61-taajuusmuuttajien välipiiriin kytketään aina erillinen DC-kuristin (engl. DC-choke) alentamaan harmonisia yliaaltovirtoja. Harmonisia virtoja pienentävä kuristin voi sijaita myös syöttöjännitelinjassa ennen tasasuuntaajaa. Tällöin siitä käytetään nimeä linjakuristin (engl. line choke). Kuristimen lisäksi voidaan käyttää erillisiä yliaaltosuotimia. /ATV61, 2006/

Jännitevälipiiri voidaan toteuttaa vähennetyn kapasitanssin tekniikalla (engl. Reduced Capacitor Technology), jolloin välipiirin tuottamat verkkoharmoniset virrat ovat merkittävästi pienempiä. Tällä tekniikalla toteutetuissa ATV21-sarjan taajuusmuuttajissa ei tarvita suotimia tai kuristimia lainkaan, sillä verkkoharmonisten taso on jo alun perin noin 30 % alle standardin IEC 61000-3-12 määrittelemän tason. /ATV21, 2006/

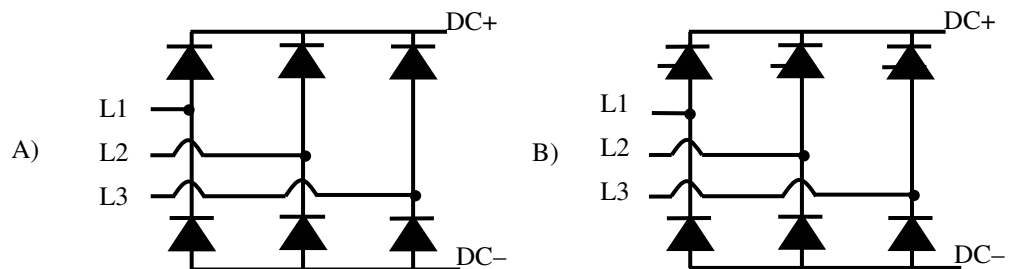
Pääpiirissä viimeisenä sijaitseva vaihtosuuntaaja siirtää tehon välipiiristä moottorille IGBT-tehopuolijohteiden (engl. Insulated Gate Bipolar Transistor) välityksellä. IGBT:t kytkevät moottorin vaiheet vuorollaan välipiirin plus- ja miinuspotentiaaliin tuottaen kolmivaiheisen pulssin leveydeltään moduloidun jännitteen. Moottorin suuren induktanssin takia vaihevirta on kuitenkin sinimuotoinen. Vaihtosuuntaaja aiheuttaa harmonisia jännitteitä, jotka

muuttuvat piirin impedansseissa harmonisiksi virroiksi sekä aiheuttavat ääni- ja värinäilmiöitä moottorissa. Tehopuolijohteiden kytkentätapahtuma aiheuttaa laajakaistaisia johtuvia sähkömagneettisia häiriöitä.

Ohjaus- ja säätöpiiri ohjaa pääpiirin eri osien toimintaa sensoreiden mittaustuloksien, ohjelmiston ja ulkoisten käskyjen mukaan. Ohjaus- ja säätöpiirin hakkuriteholähteet sekä kellopulssit näkyvät taajuusmuuttajan ulkopuolelle lähinnä säteilevinä häiriölähteinä sekä mahdollisina johtuvia häiriöitä taajuusmuuttajan ohjaus- ja mittaussuunnassa. /Venäläinen, 2001/

## 4.2 Tasasuuntaajat

Tasasuuntaussilloja käytetään pääasiallisesti kahta eri tyyppiä: kuudella diodilla toteutettua ohjaamatonta tasasuuntaajaa sekä puoliohjattua tasasuuntaajaa, kuva 4.2. Puoliohjatussa tasasuuntaajassa ylähaaran diodit korvataan tyristoreilla, jolloin välipiirin tasajännitettä voidaan säätää ohjauskulmaa muuttamalla. Molemmat suuntaajat ovat verkkokommutoivia kuusipulssisuuntaajia. Ohjaamattoman kuusipulssisuuntaajan tasajännitteen keskiarvo on noin 1,35-kertainen syöttöverkon pääjännitteeseen nähden. /Kyyrä, 2006/

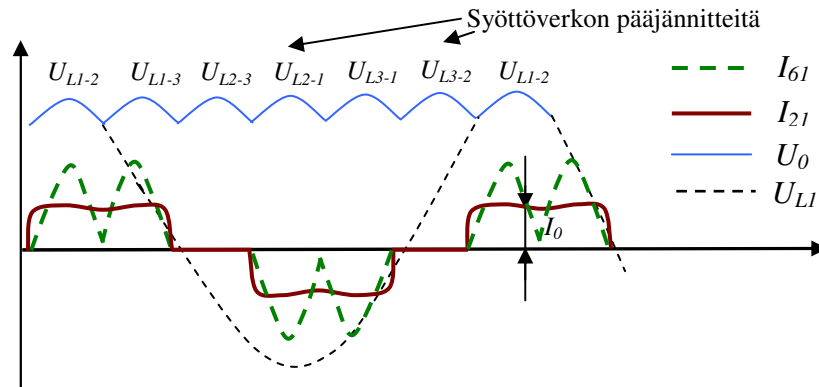


Kuva 4.2. A) Ohjaamaton tasasuuntaussilta toteutetaan diodeilla B) puoliohjatussa tasasuuntaussillassa yläpuolen diodit korvataan tyristoreilla.

Tasasuuntaajien aiheuttamat häiriöt voidaan jakaa tasasuuntaajan toiminnasta aiheutuviin verkkoharmonisiin yliaaltovirtoihin sekä diodien ja tyristoreiden sammumisen ja syttymisen aiheuttamiin korkeataajuisiin ja laajakaistaisiin häiriöihin.

### 4.2.1 Syöttöverkkoon johtuvat yliaaltovirrat

Ohjaamattoman tasasuuntaajan syöttöverkosta ottaman virran muoto riippuu välipiirin kondensaattorin sekä kuristimien koosta kuormituksen pysyessä vakiona. Kuristimen koon kasvaessa tai välipiirin kapasitanssin pienentyessä tasoittuu yhden haaran ottama virta. Vähennetyn kapasitanssin tekniikan merkitystä virran käyrämuotoon voidaan tutkia kuvan 4.3 perusteella, jossa esitetään ATV21- sekä ATV61-taajuusmuuttajien syöttöverkosta ottamien virtojen  $I_{21}$  ja  $I_{61}$  periaatteelliset käyrämuodot. Kuvasta 4.3 huomataan selvästi pienemmän välipiirin kapasitanssin omaavan ATV21:n virran olevan melko tasaista kuristimella varustetun ATV61:n ottamaan virtaan verrattuna. Kunkin kolmen haaran virrat ovat  $120^\circ$  vaihesiirrossa toisiinsa nähden.  $U_{L1}$  esittää yhden syöttöverkon vaihejännitteen muotoa ja  $U_0$  kuvaa tasasuuntaussillan tuottamaa jännitettä.



Kuva 4.3. Kuusipulssitasasuuntaajan lähtöjännitteen  $U_0$  ja yhden haaran virran  $I_{21}$  ja  $I_{61}$  käyrämuodot sekä ATV61- että ATV21-taajuusmuuttajalle.

Vaihevirran muoto poikkeaa huomattavasti sini-muodosta. Fourier-analyysin avulla voidaan johtaa, että vaihevirrat  $I_{21}$  ja  $I_{61}$  sisältävät 50 Hz verkkotaajuisen perusaallonkomponentin  $I_1$  lisäksi järjestyslukua  $h = kp \pm 1$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$  ja  $p = 6$  eli pulssiluku) vastaavat yliaaltovirrat. Yhtenevästi voidaan osoittaa vaihevirran amplitudin huippuarvon pienentymisen eli virran tasoittumisen pienentävän yliaaltovirtojen tehollisarvoja. Täysin tasoittuneen virran yliaaltovirtojen tehollisarvot  $I_h$  heikkenevät tekijällä  $I_1/h$  ( $h=5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$ ). /Kyyrä, 2006/

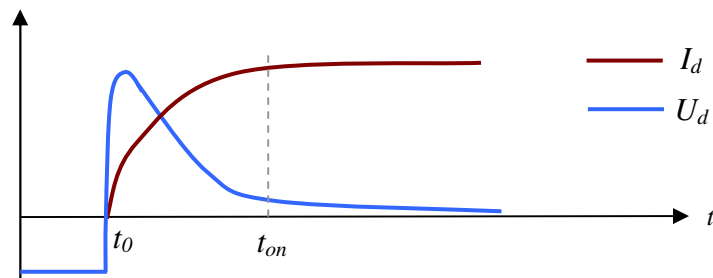


Yliaaltovirrat ovat energiaa, jota ei voida käyttää syöttöverkossa hyväksi. Yliaallot aiheuttavat esimerkiksi ylimääräisiä häviöitä sekä muuntajassa että johdotuksissa, valojen vilkuntaa, sekä syöttöverkon virran ja jännitteen säröytymistä. Säröytyminen voi edelleen vaarantaa syöttöverkkoon kytkettyjen muiden herkkien elektroniikkalaitteiden kuten tietokoneiden toiminnan. /ABB:n TTT-käsikirja, 2000/

#### 4.2.2 Diodien ja tyristoreiden aiheuttamat häiriöt

Tämä luku perustuu kokonaan lähteeseen /Tihanyi, 1995/. Ohjaamattoman tasasuuntaajan korkeataajuiset häiriöt aiheutuvat suurimmalta osin diodin sammumisen aikana esiintyvän takavirran katkeamisesta ja osittain myös diodin syttymisestä. Puoli ohjatun tasasuuntaajan merkittävimmät häiriöt syntyvät tyristoreiden sytyttämisestä, mikäli ohjauskulman arvo eroaa nolasta eli tyristori sytytetään myötäestotilassa. Häiriöt johtuvat merkittävässä määrin lähinnä syöttöverkkoon.

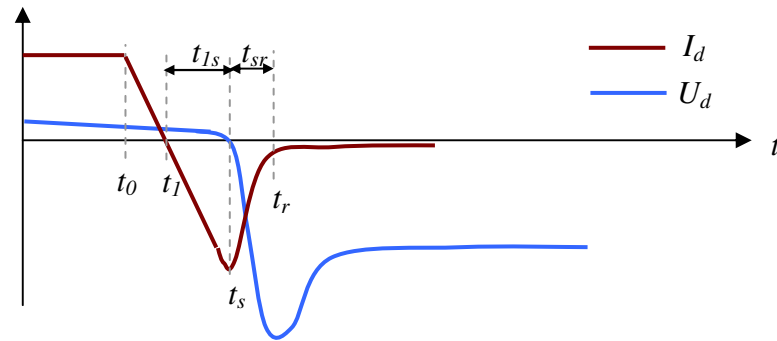
Tasasuuntaajan yhden diodin jännitteen  $U_d$  ja virran  $I_d$  käyrämuodot käyttäytyvät sytytyksessä kuvan 4.4 mukaisesti.



Kuva 4.4. Diodin jännite ja virta sytytyksessä.

Diodi alkaa johtaa hetkellä  $t_0$ , kun diodin yli oleva jännite muuttuu positiiviseksi. Aluksi resistiivisyys on suuri, koska jännitekestoisuutta lisäävä heikosti saostettu alue ei ole ehtinyt täyttyä varauksenkuljettajista. Suuren resistiivisyyden takia diodin yli muodostuu suhteellisen suuri jännitepiikki. Jännite laskee lyhyessä ajassa diodin kynnyksjännitteen suuruiseksi samalla, kun virta kasvaa nopeasti. Täydellinen johtavuustila saavutetaan ajassa  $t_{on}$ , yleensä alle 250 ns kuluttua, /Niiranen, 2001/. Syttymisen ensi hetkellä ilmentynyt jännitepiikki aiheuttaa laajakaistaisen sähkömagneettisen häiriön.

Diodin syttymistä huomattavasti suurempi häiriö ilmenee diodin sammutuksessa, jolloin diodin virran  $I_d$  ja jännitteen  $U_d$  käyrämuodot ovat kuvan 4.5 kaltaiset.



Kuva 4.5. Diodin virta ja jännite sammutuksessa.

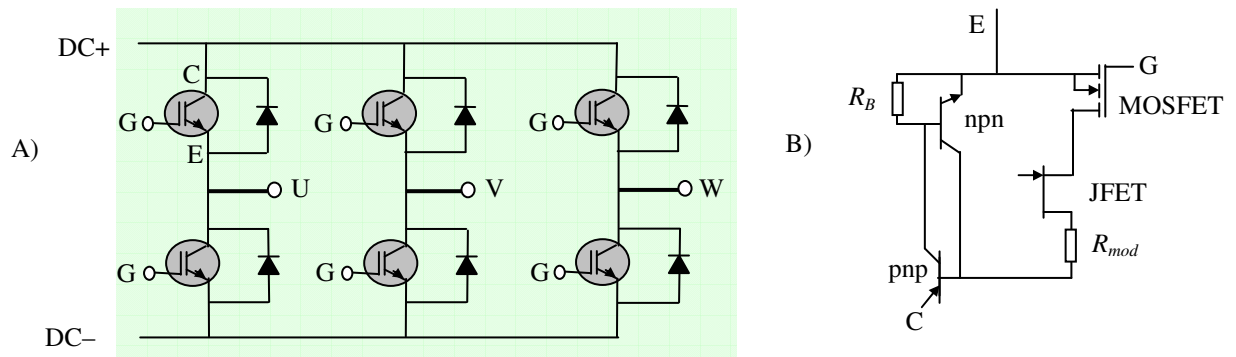
Hetkellä  $t_0$  diodi alkaa sammua ja diodin virta kääntyy laskuun. Aikaan  $t_1$  mennessä diodin virta on laskenut nollaan ja kääntyy sen jälkeen negatiiviseksi takavirraksi heikosti saostetulle alueelle jääneiden varauksenkuljettajien takia. Takavirta kääntyy vasta, kun varauksenkuljettajien määrä on laskenut riittävästi eli hetkellä  $t_s$ . Hetken  $t_s$  jälkeen takavirta lähenee nollaa huomattavasti paljon nopeammin kuin mitä se oli kasvanut ennen kääntymistä eli  $t_{1s} \gg t_{sr}$ . Lopulta takavirta katkeaa hetkellä  $t_r$ , kun diodin tyhjennysalue alkaa muodostua. Tarkemmin ilmaistuna takavirta ei katkea täysin vaan jää diodin vuotovirran suuruiseksi. Takavirran suuruus ja muoto riippuu muun muassa diodin rakenteesta, ominaisuuksista, jännitekestoisuudesta ja tasasuuntauspiirin induktansseista. Takavirran amplitudi voi olla hyvin suuri ja katkeamiseen menevä aika  $t_{sr}$  erittäin lyhyt, siten virran muutosnopeus  $di/dt$  on suuri. Tämä aiheuttaa amplitudiltaan suuren ja spektriltään laajan transienttijännitteen tasasuuntaajan liityntäjohtimien ja piirien induktansseissa. Transienttijännite johtuu syöttöverkkoon taajuusmuuttajan syöttöjänniteliitännän kautta.

Tyristorin aiheuttamat häiriöt ovat suurimmillaan tyristoria sytytettäessä, kun tyristorin yli on jo valmiiksi positiivinen jännite. Sytytyspulssin jälkeen tyristorin jännite laskee lyhyessä ajassa lähes nollaan, joka tarkoittaa suurta  $du/dt$  arvoa eli laajakaistaista ja korkeataajuisia häiriöjännitettä. Tyristorin sammuminen muistuttaa hyvin paljon diodin sammumista ja siten sammumisen aiheuttamat häiriöt ovat samanlaisia kuin diodienkin tapauksessa.

Yleensä diodien ja tyristoreiden aiheuttamat häiriöt eivät ole enimmilläänkään muutaman megahertsin taajuutta korkeampia.

### 4.3 Vaihtosuuntaaja

Taajuusmuuttajien vaihtosuuntaajat toteutetaan yleisesti IGBT-tehopuolijohteilla, kuva 4.6. IGBT:n rakenteen takia niiden rinnalle tarvitaan ulkoinen vastadiodi johtamaan induktiivista virtaa. IGBT:t kytkevät moottorivaiheet U, V ja W vuoronperään välipiirin tasajännitekiskoihin DC+ ja DC-. Ohjaamattoman sillan tapauksessa moottorijännitteen yhden pulssin amplitudi on vakio, joten moottorijännitteen sinimuotoisen perusaallon amplitudin madaltaminen tapahtuu pulssin tehollista aikaa lyhentämällä.

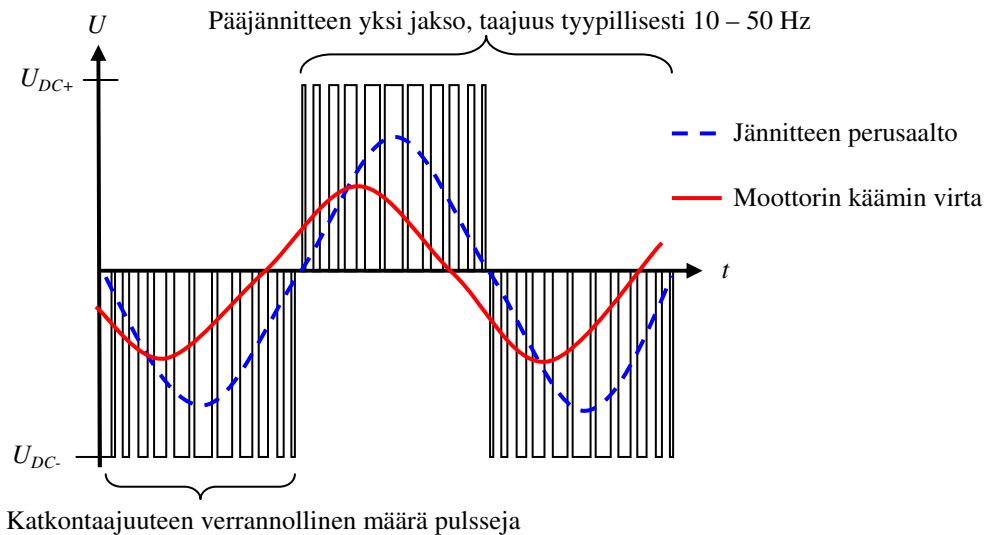


Kuva 4.6.A) IGBT-tehopuolijohteilla toteutetun vaihtosuuntaajan kaavio ja B) yhden IGBT-alkion sijaiskytkentä. /Niiranen, 2001/

IGBT-transistoria ohjataan syöttämällä sen MOSFET-osan (engl. Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) hilalle G jännite. MOSFET ohjaa edelleen npn-transistorin kantavirtaa, joka määrää IGBT:n kollektorin C ja emitterin E välisen virran. Pieniresistanssisen vastuksen  $R_B$  tarkoitus on pitää npn-transistori virrattomana, jotta IGBT voidaan sammuttaa MOSFET:n hilajännitettä muuttamalla. JFET-osa (engl. Junction Field Effect Transistor) vaikuttaa lähinnä päälle kytkennän ja sammutuksen aikaan jännitteen muutosta rajoittavana tekijänä. /Niiranen, 2001/

### 4.3.1 Moottorille näkyvät harmoniset yliaaltojännitteet

Vaihtosuuntaaja moottorille syöttämä pääjännite esitetään kuvassa 4.7. Pääjännite käsittää katkontaajuuteen verrannollisen määrän pulsseja sekunnissa pulssien amplitudin ollessa välipiirin tasajännitteen suuruinen. Moottorin käämitykset muodostavat suuren induktanssin, joten moottorin käämeissä kulkeva virta on lähes sinimuotoista. Vaihtosuuntaaja tuottaa moottorille syötettävän sinimuotoisen perusaallon lisäksi sen moninkertaisia yliaaltojännitteitä, jotka määräävät moottorin yliaaltovirrat lähes kokonaan kohtaamiensa käämien hajainduktanssien perusteella. Yliaaltovirrat aiheuttavat moottorissa ylimääräisiä lämpöhäviöitä verrattuna tilanteeseen, jossa moottorille syötettäisiin täysin sinimuotoista jännitettä. Yliaaltovirrat saavat myös aikaan erilaisia momenteja ja voimia, jotka synnyttävät havaittavia ääni- ja värinäilmiöitä. /Kyyrä, 2006/

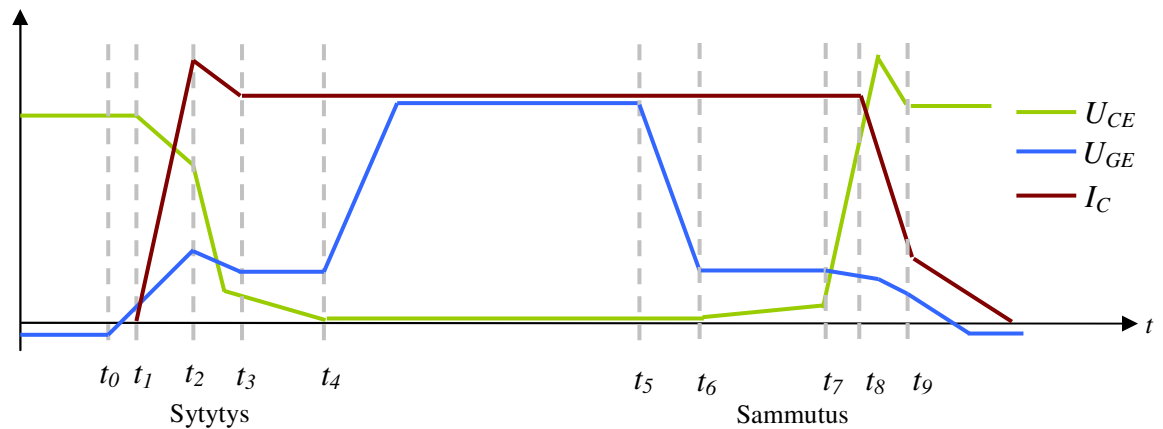


Kuva 4.7. Taajuusmuuttajan moottorille syöttämä pääjännite, jännitteen perusaalto ja vaihevirta.

Yliaaltojännitteitä ja siten yliaaltovirtoja voidaan pienentää sopivalla modulointimenetelmällä tai katkontaajuutta muuttamalla. Pulssien lukumäärän kasvattaminen eli katkontataajuuden nostaminen vähentää yliaaltovirtojen tehollisarvoa pienentäen siten akustista melua aiheuttavia voimia ja moottorin lämpöhäviöitä. Tosin kasvanut kytkentätaajuus lisää merkittävästi taajuusmuuttajan omia häviöitä sekä jossain määrin häiriöitä. Vaihtosuuntaajan aiheuttamat yliaaltovirrat eivät näy merkittävässä määrin syöttöverkkoon päin. /Kyyrä, 2006/

### 4.3.2 IGB-transistorin toiminnasta aiheutuvat häiriöt

IGBT:n aiheuttamia korkeataajuisia häiriöitä voidaan tarkastella kuvassa 4.8 esitettävän päällekytkennän ja sammutuksen aikaisten jännitteiden ja virran käyrämuotojen avulla, kun IGBT:n oletetaan olevan kytkentäsuojapiirittömässä vaihtosuuntaajassa. Päällekytkennässä oletetaan aluksi virran kulkevan induktiivisesta kuormasta välipiirin kondensaattoriin IGBT:n ylempään haaran vastadiodin kautta.



Kuva 4.8. IGB-transistorin teoreettiset käyrämuodot sytytyksen ja sammutuksen aikana. /Niiranen, 2001/

Hetkellä  $t_0$  alapuolisen vasemman haaran IGBT:n hilalle G eli MOSFET-osan hilalle kytketään jännite, jolloin hila-emitteri-jännite  $U_{GE}$  alkaa nousta hilapiirin aikavakiolla. Kun hilajännite ylittää MOSFET-osan kynnysjännitteen hetkellä  $t_1$ , alkaa IGBT:n kollektorivirta  $I_C$  kasvaa nopeasti. Vastaavasti diodin virta pienenee, kunnes sen suunta vaihtuu. Hetkellä  $t_2$  diodin takavirta alkaa katketa aiheuttaen kollektorivirrassa nähtävän ylityksen. Tänä aikana IGBT:n kollektorin C ja emitterin E välinen jännite  $U_{CE}$  laskee nopeasti, tosin lopulta hidastuen, aina hetkeen  $t_4$  saakka, josta eteenpäin IGBT:n yli jää luokkaa 2...3 V oleva jännitehäviö nimellisvirralla. Miller-kapasitanssin takia hilajännite on vakio välillä  $t_3 - t_4$ , kunnes hila-emitteri-jännite lopulta latautuu hilaa syöttävään jännitteeseen.

IGBT:n sammuttaminen menee pitkälti päinvastaisessa järjestyksessä. Hetkellä  $t_5$  hilalle G kytketään estotilan jännite, jolloin hila-emitteri-jännite alkaa laskea. Kun kollektorivirta alkaa rajoittua hetkellä  $t_6$ , rupeaa IGBT sulkeutumaan ja kollektorin ja emitterin välinen jännite  $U_{CE}$  siten kasvamaan. Miller-efektin takia hila-emitteri-jännitteen lasku keskeytyy.

Hetkellä  $t_7$  MOSFET-osa alkaa rajoittaa virtaa sulkeutumisensa takia, joten kollektorin jännite nousee voimakkaasti. Pnp-osa ei kuitenkaan ala rajoittamaan virtaa heti vaan vasta hetken  $t_8$  tienoilla. Tällöin ylempi vastadiodi alkaa myös johtaa. MOSFET-osan virta katkeaa lopullisesti hetkellä  $t_9$ , mutta pnp:n jälkivirta johtuu vielä hetken aikaa varauksenkuljettajien loppumiseen asti. /Niiranen, 2001/

Yhden moottorivaiheen jännitepulssin muoto on periaatteessa käänteinen verrattuna jännitteeseen  $U_{CE}$  ja yhden pulssin amplitudi on aina välipiirin jännitteen suuruinen. Pulssin nousunopeus  $du/dt$  voi hieman vaihdella kytkentätapahtumasta johtuen. ATV61-taajuusmuuttajissa pulssien nousunopeus on noin 2 – 10 kV/ $\mu$ s. Jännitepulssin nousuaika välipiirin jännitteeseen on siten noin 0,054 – 0,27  $\mu$ s. Taajuusmuuttajalle tyypillisen 0,1  $\mu$ s nousuajan voidaan osoittaa näkyvän jännitespektrissä aina yli 15 MHz taajuuksille asti, /Kaufhold *et al*, 1996/.

#### 4.4 Sääto- ja ohjauspiirien aiheuttamat häiriöt

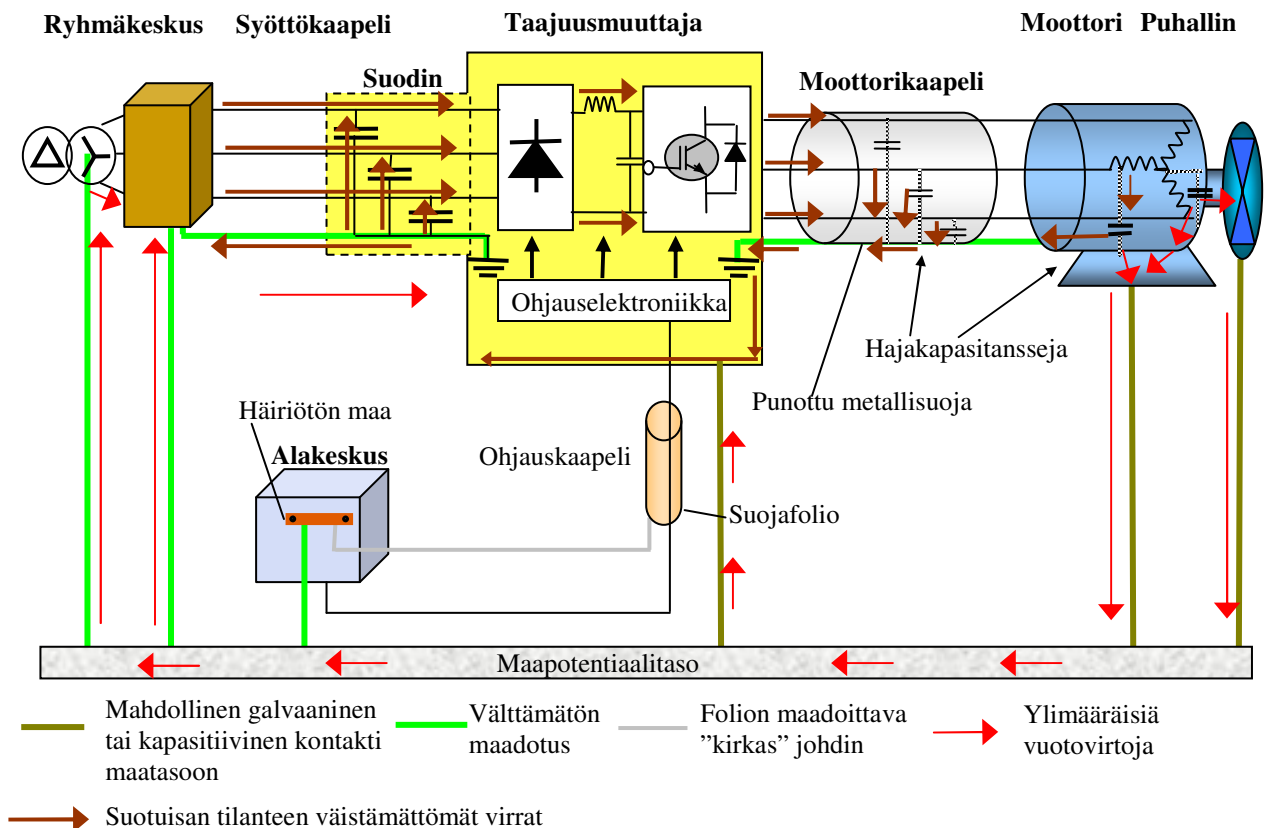
Sääto- ja ohjauspiirien aiheuttamat häiriöt näkyvät taajuusmuuttajan ulkopuolelle lähinnä kahdella eri tavalla: sähkömagneettisena säteilynä sekä johtuvina häiriöinä signaalikaapeleissa. Häiriöt voivat myös kytkeytyä pääpiiriin ja edelleen syöttö- ja moottorikaapeliin, mutta ko. kaapeloinneissa pääpiirin toiminnasta aiheutuvat häiriöt ovat vallitsevia. Sääto- ja ohjauspiireissä häiriöitä aiheuttavat lähinnä piirin osien käyttöjännitteet tuottavat hakkuriteholähteet ja oskillaattoriipiirit. Esimerkiksi piirilevyillä muodostuu tahattomasti luvussa 3.5 esitettyjä säteilylähteitä, /Sepponen, 2005/.

Hakkuriteholähteissä käytetään erittäin nopeita MOSFET-tehopuolijohdekomponentteja. Ne tuottavat häiriöitä varsinkin kytkentätaajuudella ja sen monikerroilla. Kytkentätaajuudet ovat luokkaa kymmenistä kilohertseistä aina satoihin kilohertseihin, jolloin monikerrat säteilevät jopa kymmenien megahertsien taajuuksilla. Esimerkiksi flyback-tyyppisen hakkuriteholähteen ensiöpuolella sijaitseva MOSFET-osa synnyttää eromuotoisia jännitepiikkejä, jotka johtuvat suoraan taajuusmuuttajan jännitevälipiiriin. Hakkuriteholähteen ensiö- ja toisiopuolen käämitykset ovat puolestaan virtasilmukoita, jotka aiheuttavat säteileviä sähkömagneettisia häiriöitä ympäristöönsä. /Venäläinen, 2001/

Oskillaattoreita tarvitaan esimerkiksi taajuusmuuttajan laskentaa, ohjelmistoja ja kommunikaatiota suorittavia prosessoreita ja kontrollereita varten. Oskillaattorit tuottavat kymmenien megahertsien taajuisia signaaleja, jotka voivat säteillä esimerkiksi piirikorttien rakenteista. Myös muistien ja prosessoreiden välillä siirretään digitaalista dataa korkeilla taajuuksilla, jotka aiheuttavat laajakaistaista häiriötä. /Venäläinen, 2001/

#### 4.5 Taajuusmuuttajan kytkennän mahdollistamat häiriöreitit

Kuvassa 4.9 esitetään taajuusmuuttajan tyypillisen kytkennän sekä maadoituksen rakenteen mahdollistamat johtuvien häiriöiden kytkeytymisreitit. Kytkentä koostuu syöttöverkosta, ryhmäkeskuksesta, taajuusmuuttajasta, alakeskuksesta, moottorista ja näiden välisistä kaapeloinneista sekä galvaanisista tai kapasitiivisista kontakteista maatasoon.



Kuva 4.9. Taajuusmuuttajan tyypillinen kytkentä mahdollistaa useita maadoituksesta aiheutuvia häiriöreitit. Ruskealla nuolella kuvataan parhaimmalla tapauksella kulkevien häiriöiden reitit, joita ei voida välttää. Punaisella nuolella kuvataan moottorin hajakapasitanssien läpi kulkevien virtojen reitit, jotka voivat palata taajuusmuuttajalle muutakin reittiä kuin moottorikaapelia pitkin.

Kuvassa 4.9 ei ole esitetty turva- tai vaihtokytkintä, joka tulee taajuusmuuttajan ja moottorin väliin. Kytkimen koteloinnin tulee olla EMC-suojattu metallikotelo, jotta moottorikaapelin suoja olisi jatkuva ja kotelo vaimentaisi tehokkaasti sähkömagneettista säteilyä, /ATV61, 2006/.

#### **4.5.1 Moottorikaapeloinnissa kulkevat häiriöt**

Moottorikaapelin vaihejohtimessa kulkevat jännitepulssit ovat itsessään korkeataajuisia häiriöjännitteitä, jotka voivat kytkeytyä ympäristöön lähinnä moottorikaapelin huonon suojauksen tai maadoittamisen takia. Jyrkkäreunaiset jännitepulssit aiheuttavat myös moottorin sekä moottorikaapelin hajakapasitanssien läpi kulkevaa yhteismuotoista vuotovirtaa. Vuotovirrassa on tyypillisesti amplitudiltaan kymmenistä milliampeerista useisiin ampeereihin olevia alle mikrosekunnin kestoisia virtapiikkejä moottorin koosta riippuen, /CAMBICA/REMA, 2002/ ja /Rockwell, 2002/. Koska korkeilla taajuuksilla maareitit näkyvät lähinnä induktiivisina, tulee se huomioida moottorikaapeleita valittaessa sekä kytkettäessä. Moottorikaapelointiin palataan tarkemmin luvussa 5.3.3.

Taajuusmuuttajan ja moottorin tavoiteltavin maadoitusreitti kulkee moottorista suoraan taajuusmuuttajalle ja edelleen syöttöverkkoon, jolloin vuotovirrat palaavat suoraan moottorikaapelin suojaan pitkin takaisin taajuusmuuttajalle. Nämä vuotovirrat esitetään kuvassa 4.9 ruskeilla nuolilla. Vuotovirrat voivat palata taajuusmuuttajaan myös kuvan 4.9 esittämien punaisten nuolien reittejä pitkin, mikäli tavoiteltavimman maadoitusreitien impedanssi suhteessa muiden reittien impedansseihin ei ole riittävän pieni. Moottorin laakereita ajatellen reitti moottorin rungosta maatasoon ja sitä kautta takaisin taajuusmuuttajalle ei ole haitallinen, mutta maatasossa kulkevat virrat voivat häiritä muiden laitteiden toimintaa, (kuvan 4.9 punaiset nuolet). Huonoimmassa tilanteessa maavuotovirtojen reitti kulkee puhaltimen kautta maatasoon, jolloin virta voi kulkea joko moottorin tai puhaltimen laakereiden läpi. Laakerivirtoihin palataan tarkemmin luvussa 6.4, jossa käsitellään myös eristerasitukset.



### 4.5.2 Ohjauskaapeloinnissa kulkevat häiriöt

Ohjauskaapeleissa kulkevien signaalien ympäristöön aiheuttamat häiriöt riippuvat signaalin taajuudesta, tasosta, kaapelin suojauksesta sekä suojauksen kytkennästä. Vastaavasti ympäristöstä ohjauskaapelin kytkeytyvät häiriöt riippuvat samoista tekijöistä. Erityistä huomiota ja huolellisuutta tulee kiinnittää taajuusmuuttajan sisällä kulkevien ohjauskaapelin johtimien kytkentään, sillä esimerkiksi liian pitkä suojan kuoriminen tai kiepille jätetty kaapeli on johtanut joissain tapauksissa alakeskuksen toiminnan häiriintymiseen. Kuvassa 4.9 ohjauskaapelin suoja on maadoitettu vain toisesta päästä, koska käytännössä sen on havaittu aiheuttavan vähemmän häiriöitä. Toisesta päästä maadoitetussa suojassa ei lähde kiertämään alakeskuksen ja taajuusmuuttajan mahdollisen maapotentiaali-erojen aiheuttamia ylimääräisiä häiriövirtoja kuten molemmista päistä maadoitetussa suojassa tapahtuu.

Analogisessa I/O-ohjauksessa käytetään 0 – 10 V tasajännitesignaalia, jonka muutosnopeus on pieni. Luvun kolme perusteella matalia taajuuksia ei voida pitää merkittävinä häiriölähteinä, mutta ne ovat luonteensa takia erittäin helposti häiriintyviä. EMC-asennusohjeissa vaaditaan yleisesti parikierrettyjen sekä kaksoissuojattujen I/O-ohjauskaapeleiden käyttämistä.

Digitaalista signaalia välittävissä kaapeleissa kulkee jyrkkäreunaisia, korkeataajuisia jännitteitä, jotka aiheuttavat huomattavasti suurempia häiriöitä ympäristöönsä kuin analogiset signaalit. Digitaaliset signaalit sietävät suurempia häiriötasoja kuin analogiset signaalit, mutta voivat silti häiriintyä. EMC-asennusohjeissa suositellaan yleensä yksöissuojattujen kaapeleiden käyttämistä.

### 4.5.3 Syöttöverkkokaapeloinnissa kulkevat häiriöt

Taajuusmuuttajien asennusohjeissa ei yleensä vaadita suojattujen syöttökaapeleiden käyttämistä. Tämä on hyväksyttävää, koska syöttöverkkoon johtuvat häiriöt (kuvan 4.9 ruskeat nuolet) ovat tasoltaan pieniä käytettyjen EMC-suotimien takia. Suojaamattomat syöttökaapelit eivät tarjoa mitään suojaa sähkökentän tai magneettikentän kytkeytymistä

---

vastään. Tämä seikka on huomioitava syöttöverkkokaapeleiden sijoittamisessa sekä kytkemisessä taajuusmuuttajan koteloinnin sisällä.

## 5 KAAPELOINNIN JA SUOJIEN MERKITYS HÄIRIÖIDEN VAIMENTAMISESSA

Luvussa keskitytään ohjauskaapelointiin ja moottorikaapelointiin, niiden suojiin kytkeäkseen sekä säteilyä vaimentaviin suojiin.

### 5.1 Sähkökentän kytketymisen vaimentaminen

Sähkökentän kytketyminen signaalijohtimiin estetään tyypillisesti ympäröimällä suojattava signaalikaapeli johtavalla vaipalla, joka kytketään maapotentiaaliin. Kiinteistöautomaatiojärjestelmissä tämä tarkoittaa suojan kytkemistä alakeskuksen TE-kiskoon (engl. True Earth, TE), joka kytketään riittävän suurella johtimella päämaadoituskiskoon.

Suojan toimintaperiaatetta voidaan tutkia kuvan 5.1 avulla, kun johtimen 2 vaillinaisesti ympäröivä suoja on kytketty maahan. Kuvassa 5.1 B ei ole esitetty kapasitanssia  $C_{sg}$ , koska sillä ei ole häiriön kytketymisen kannalta mitään merkitystä. Signaalipiirin resistanssi oletetaan äärettömän suureksi, eikä sitä siksi huomioida. Jännite  $V_1$  kuvaa johtimen 1 jännitettä, joka kytketty johtimeen 2 suojaamattoman osan välisen hajakapasitanssin  $C_{12}$  välityksellä. Tällöin johtimen 2 häiriöjännitteen suuruus on /Ott, 1976/

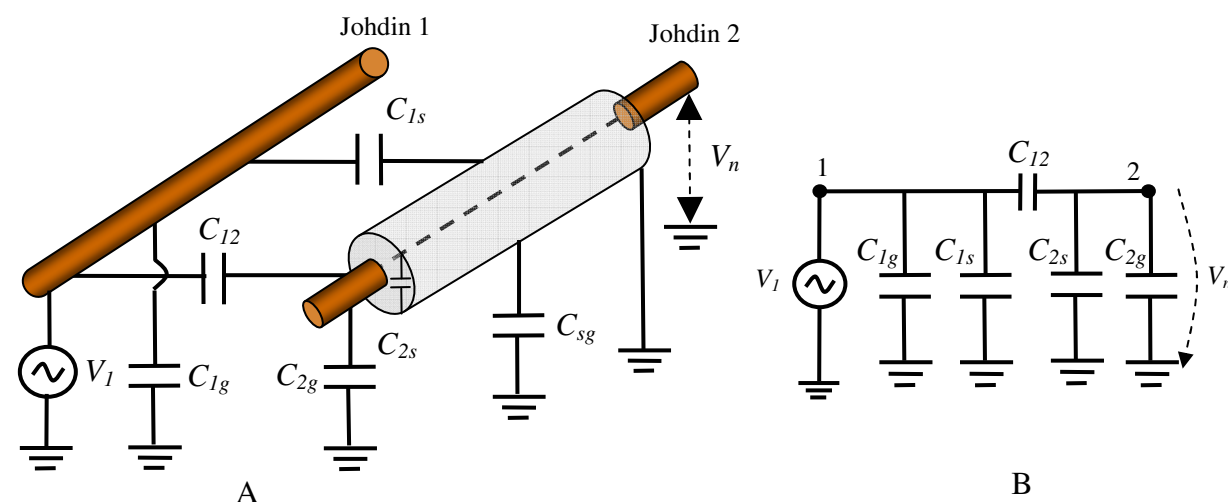
$$V_n = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2s} + C_{2g}} V_1, \quad (5.1)$$

jossa  $C_{2s}$  on johtimen 2 suojatun osan ja suojan välinen kapasitanssi

$C_{2g}$  on johtimen 2 suojaamattoman osan ja maan välinen kapasitanssi

Yhtälöstä (5.1) huomataan heti suojaamattoman osan merkitys. Mikäli johdin 2 on täysin vaipan peitossa, on kapasitanssin  $C_{12}$  suuruus nolla, eikä johtimeen 2 kytketä häiriöjännitettä lainkaan. Tämä edellyttää suojan maadoittamista riittävän hyvään nollapotentiaaliin, jotta suojan jännitetaso ei nouse jännitteen  $V_1$  kytketäessä suojaan kapasitanssin  $C_{1s}$  kautta. Huonosti maadoitetun tai kokonaan maadoittamattoman suojan jännitetaso nousisi, jolloin suojaan kytketynyt jännite kytketäisi edelleen johtimeen 2 kapasitanssin  $C_{2s}$

välityksellä. Jos signaalipiirin resistanssi oletetaan äärelliseksi, on vaillinaisesti suojattuun johtimeen 2 kytkeytynyt häiriöjännite yhtälön (3.12) lopputuloksen mukainen. Tosin kapasitanssi  $C_{12}$  on huomattavasti pienempi, joten häiriöjännitteen tasokin on huomattavasti pienempi.



Kuva 5.1. A) kapasitiivinen kytkeytyminen maadoitetulla vaipalla suojattuun johtimeen 2, B) kytkeytymisen vastinpiiri.

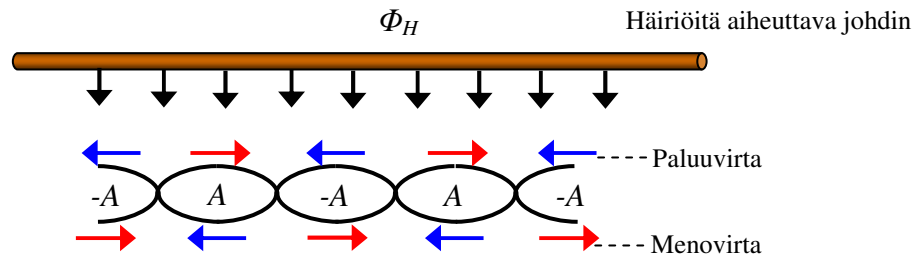
Suojan kytkemisessä maahan on vielä huomioitava suojan mahdollinen käyttäytyminen piiska-antennina, kuten esitettiin luvussa 3.5. Jotta suoja ei toimisi tehokkaana antennina, tulee suoja maadoittaa korkeimman häiriötaajuuden aallonpituuden kymmenesosan välein, /Sepponen, 2005/. Tällaisen maadoittamisen toteuttaminen kiinteistöautomaation mittakaavassa olisi kuitenkin jokseenkin epäkäytännöllistä ja kallista, eikä sitä liene käytettäneen. Tärkeämpi keino on suunnitella ohjaukskaapeleiden reitit kulkevaksi mahdollisimman kaukana korkeilla taajuuksilla toimivista laitteista ja niiden johdotuksista kuten esimerkiksi taajuusmuuttajista tai tietokoneista. Suojien käyttö tulisi ymmärtää toissijaisena keinona, jonka tarkoitus ei ole korjata virheellisen kaapeloinnin seurauksia.

## 5.2 Magneettikentän kytkeytymisen vaimentaminen

Toisesta päästä maadoitettuun suojaan ei voi indusoida magneettikentän muutosta vastustavaa virtaa. Siksi näin suojattuun johtimeen indusoiduu yhtä suuri häiriöjännite kuin suojaamattomaankin johtimeen yhtälön (3.6) mukaisesti. Magneettikentän kytkeytymistä voidaan vaimentaa parikierteisyydellä tai joissain tapauksissa kytkemällä suoja molemmista päistä maahan. Kelluvissa järjestelmissä suojan kytkemisen molemmista päistä on kuitenkin havaittu aiheuttavan useammin häiriöitä laitteiden toiminnassa kuin suojan kytkemisen vain toisesta päästä. Tämä johtuu suojan muodostavasta suuresta maalenkistä sekä suojan maadoituspisteiden potentiaalierojen aiheuttamasta ylimääräisestä häiriövirrasta. /Ott, 1976/

### 5.2.1 Parikierteisyys

Parikierteisyyden toimintaperiaate esitetään kuvassa 5.2, jossa häiriötä aiheuttavan johtimen magneettivuo  $\Phi_H$  kytkeytyy meno- ja paluujohtimen muodostamiin  $A$ -pintaalaisiin silmukoihin. Toistensa ympäri kierretyt johtimet muodostavat silmukoita, jotka ovat vastakkaisuuntaisia. Tämä voidaan ymmärtää esimerkiksi virran kulkusuuntien avulla ja yhtälön (3.4) perustella. Kuvasta 5.2 nähdään, että vierekkäisissä silmukoissa virrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Tällöin ulkopuolinen magneettikenttä synnyttää viereisiin silmukoihin vastakkaismerkkiset häiriöjännitteet, jotka kumoavat toisensa. Vastaavasti parikierteetyt johtimet säteilevät heikosti ympäristöön. /Lindell & Sihvola, 2001/



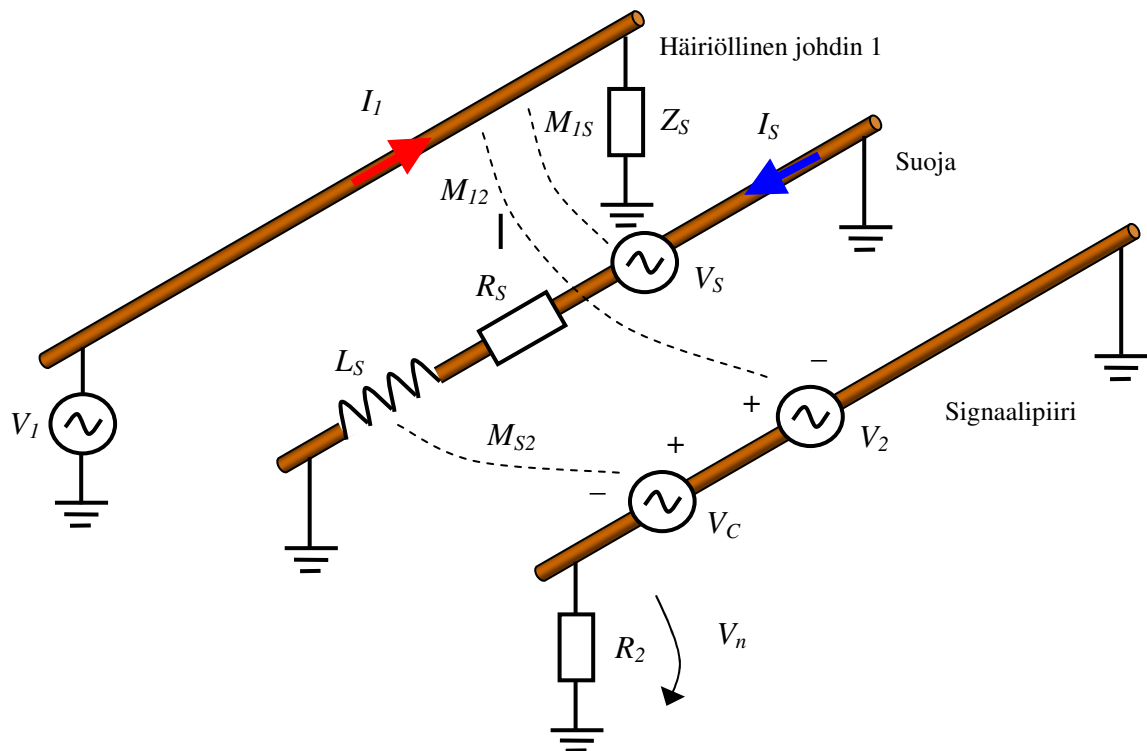
Kuva 5.2. Parikierteettyjen johtimien muodostamat vierekkäiset silmukat ovat vastakkaismerkkiset. Tällöin vierekkäisiin silmukoihin indusoidut häiriöjännitteet kumoavat vastakkaismerkkisinä.

Parikierretyt johtimet eivät kuitenkaan suojaa yhteismuotoista virtaa aiheuttavia säteilykenttiä vastaan, jolloin häiriöitä keräävä silmukka muodostuu johtimien sekä maatason välille. Käytännössä parikierretyn parin vierekkäiset silmukat eivät ole pinta-alaltaan yhtä suuria tai symmetrisiä. Tämä heikentää vaimennuskykyä. Myös kierteiden määrä pituusyksikköä kohden vaikuttaa merkittävästi parikierretyn kaapelin kykyyn vaimentaa induktiivista kytkeytymistä. /Tihanyi, 1995/

## 5.2.2 Suojan maadoittaminen

### Molemmista päistä maadoitettu signaaliipiiri

Tässä tehty tarkastelu koskee tilanteita, joissa signaaliipiiri joudutaan maadoittamaan molemmista päistä. Oletetaan ensin, että signaalijohtimen muodostaman silmukan lävistää sama magneettikenttä kuin suojavaipankin muodostaman lenkin, kuva 5.3.



Kuva 5.3. Molemmista päistä kytketyn suojan vastinpiiri, kun signaaliipiiri oletetaan maadoitetuksi molemmista päistä. /ABB:n TTT-käsikirja, 2000/

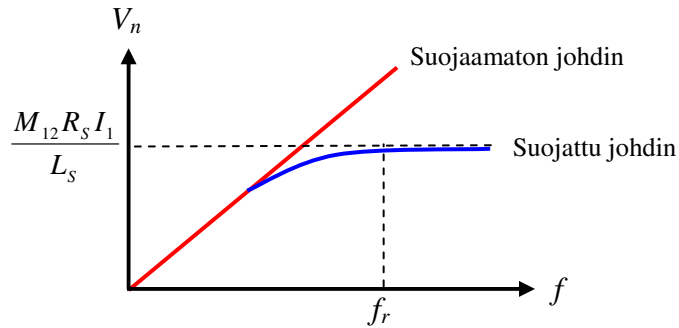
Häiriöllisen johtimen 1 ja suojavaipan sekä häiriöllisen johtimen 1 ja signaalihohtimen väliset keskinäisinduktanssit  $M_{12}$  ja  $M_{1S}$  ovat yhtä suuret ( $M_{1S}=M_{12}=M$ ), koska niiden muodostamien silmukoiden pinta-alat ovat yhtä suuret. Yhtälön (3.6) perusteella johtimessa 1 kulkeva virta  $I_1$  synnyttää sekä vaippaan että signaalihohtimeen samansuuruiset ja -vaiheiset häiriöjännitteet  $V_S$  ja  $V_2$ . Häiriöjännite  $V_S$  synnyttää suojoassa virran  $I_S$  suhteessa suojoan induktanssiin  $L_S$  ja resistanssiin  $R_S$ . Virran  $I_S$  synnyttämä magneettikenttä kytkeytyy signaalihohtimeen vaipan ja signaalihohtimen keskinäisinduktanssin  $M_{2S}$  välityksellä aiheuttaen signaalihohtimeen häiriöjännitteen  $V_C$ . Koska virta  $I_S$  ja  $I_1$  ovat vastakkaisuuntaiset, ovat jännitteet  $V_C$  ja  $V_2$  vastakkaisvaiheisia. Siten signaalihohtimeen syntyy häiriöjännite

$$V_n = V_2 - V_C, \quad (5.2)$$

jossa miinus-merkki tarkoittaa jännitteiden vastakkaisvaiheisuus. Häiriöjännitteen  $V_n$  suuruuden laskemiseksi mallinnetaan häiriövirta  $I_1$  aikaharmonisena eli sini-riippuvaisena. Suojoan itseisinduktanssi  $L_S$  ja suojoan sekä signaalihohtimen keskinäisinduktanssi  $M_{S2}$  voidaan olettaa yhtä suuriksi, kun suojoassa kulkeva virta kumooa suojoan sisäisen magneettikentän, /Ott, 1976/. Yhtälön (3.6) ja kuvan 5.3 perusteella voidaan lopulta johtaa häiriöjännitteen suuruudeksi

$$V_n = \frac{j\omega M_{12} L_S I_1 - j\omega M_{1S} M_{S2} I_1 + M_{12} R_S I_1}{-\left(L_S + \frac{R_S}{j\omega}\right)} = \frac{M_{12} R_S I_1}{-\left(L_S + \frac{R_S}{j\omega}\right)} \approx -\frac{M_{12} R_S I_1}{L_S} \quad (5.3)$$

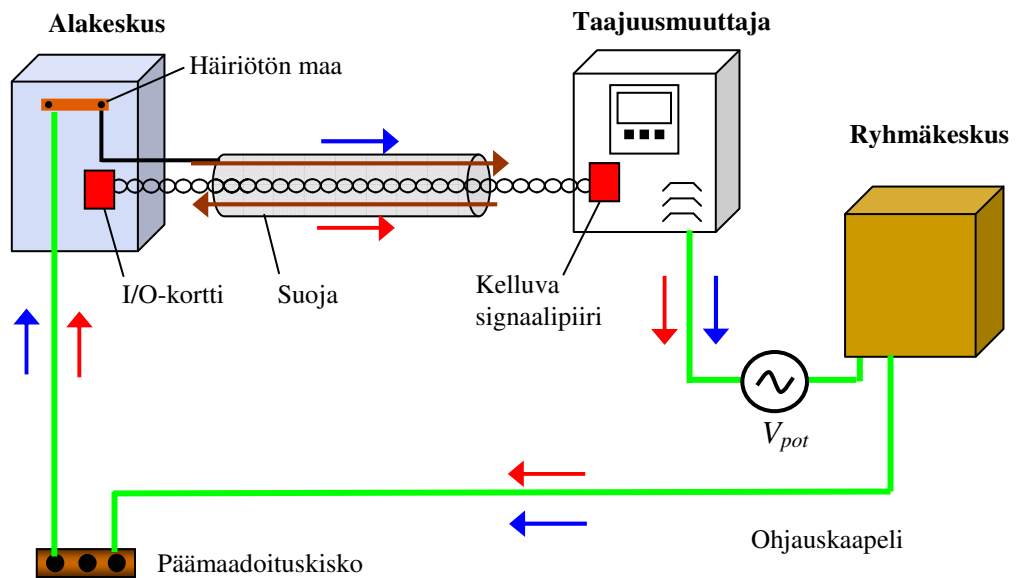
Rajataajuuden  $f_r$  jälkeen suojoattuun johtimeen on indusoitunut 98 % yhtälön (5.3) lopputuloksen arvosta. Rajataajuus on luokkaa muutamasta kHz:stä kymmeneen kHz:iin koaksiaalikaapelille sekä kierretylle parikaapelille, /ABB:n TTT-käsikirja/ ja /Ott, 1976/. Kuvassa 5.4 on esitetty suojoattuun ja suojoamattomaan johtimeen induktiivisesti kytkeytyneen häiriöjännitteen suuruus.



Kuva 5.4. Suojaamattomaan johtimeen indusoitunut häiriöjännite kasvaa lineaarisesti, kun molemmista päistä kytketyn suojan sisällä olevaan signaalijohtimeen kytkeytynyt häiriöjännite jää tiettyyn raja-arvoon.

### Kelluva signaalipiiri induktiivisen kytkeytymisen pienentämiseksi

Kelluvan signaalipiirin merkitystä tutkitaan kuvassa 5.5, jossa esitetään taajuusmuuttajan ja alakeskuksen välinen kytkentä sekä niiden maadoituksen rakenne. Sekä alakeskuksen I/O-kortti että taajuusmuuttajan I/O-pisteet ovat kelluvia. Ruskealla nuolella kuvataan kelluvan signaalipiirin virtaa, punaisella molemmista päistä maadoitetussa suojassa tai signaalipiirissä kulkevaa virtaa ja sinisellä molemmista päistä maadoitetussa suojassa kulkevaa maapotentiaalierosta  $V_{pot}$  aiheutuvaa ylimääräistä häiriövirtaa.



Kuva 5.5. Alakeskuksen ja taajuusmuuttajan välinen kytkentä, jonka avulla voidaan mallintaa eri kytkentätapojen muodostamien pinta-alojen eroavaisuutta sekä ylimääräisen häiriövirran syntyä.



Oletetaan ensin, että suoja kytketään vain toisesta päästä. Vertaamalla ruskeiden ja punaisten nuolien muodostamien silmukoiden pinta-alojen suuruseroa, on helppo ymmärtää kelluvan järjestelmän etu. Kelluttamalla signaalipiirin toista tai molempia päitä, pienenee signaalipiirin pinta-ala ja siten keskinäisinduktanssi  $M_{12}$  erittäin merkittävästi verrattuna molemmista päistä maadoitettuun signaalipiiriin. Tällöin häiriöjännite  $V_n$  on huomattavasti pienempi, kuten yhtälöstä (3.6) voidaan päätellä.

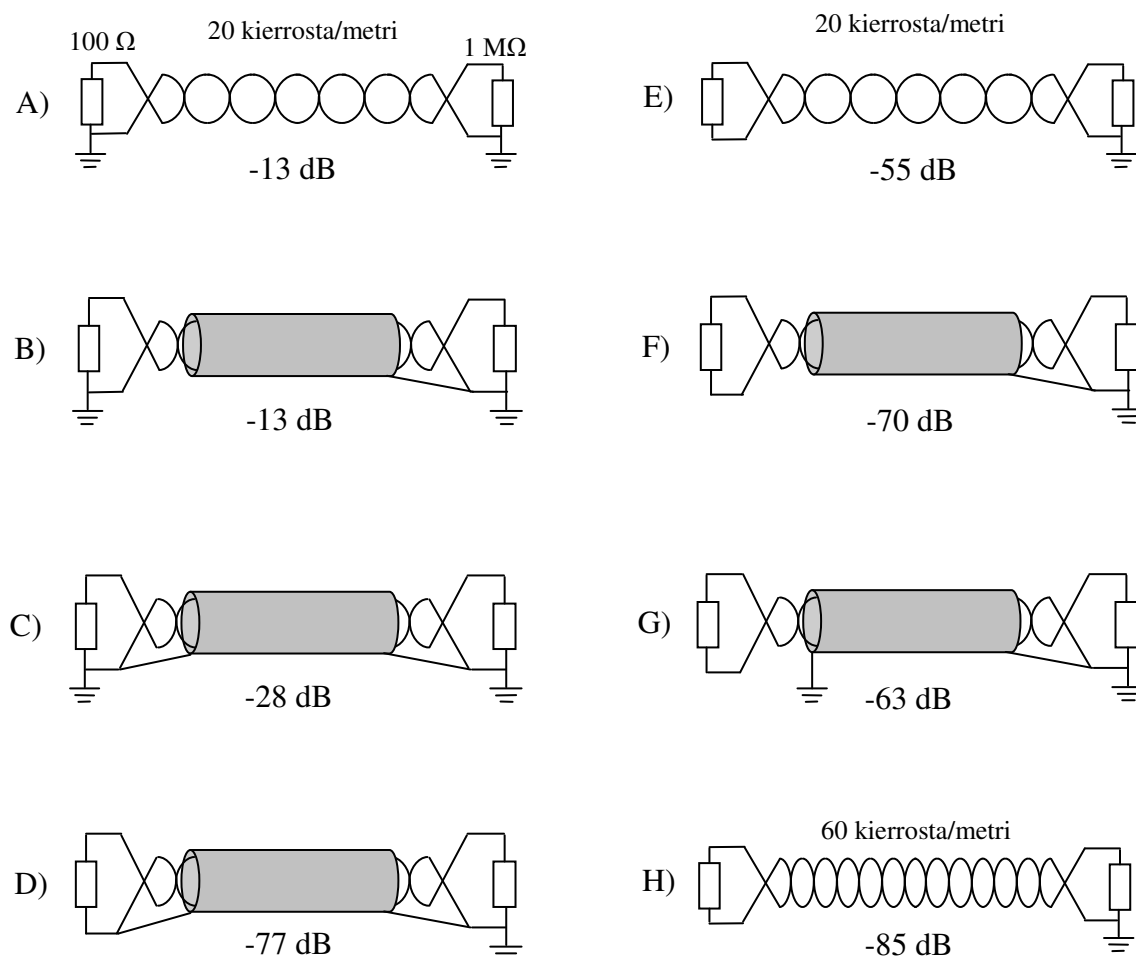
Myös kuvan 5.5 tapauksessa suoja voitaisiin maadoittaa molemmista päistä. Tämä ei kuitenkaan käytännössä ole osoittautunut toimivaksi. Punaisten nuolien reitin muodostama silmukka kerää huomattavan suurelta alueelta magneettikenttiä. Toinen syy molemmista päistä kytketyn suojan toimimattomuuteen on alakeskuksen ja taajuusmuuttajan maadoitusten vaihteleva laatu, jolloin maapotentiaalierot ovat mahdollisia. Pienikin jännite-ero  $V_{pot}$  synnyttää suhteellisen suuren häiriövirran maalenkkien pienien resistanssien takia. Ylimääräinen häiriövirta kytkeytyy kuvan 5.3 esittämän keskinäisinduktanssin  $M_{S2}$  kautta suojattuun signaalijohtimeen kasvattaen häiriöjännitettä.

## 5.3 Kaapeleiden vaimennuskyky

### 5.3.1 Suojatut ohjauskaapelit

Kuvassa 5.6 esitetään induktiivinen kytkeytyminen kaksipistemaadoitettuun (A – C) kaapeliin ja (D – H) yksipistemaadoitettuun (kelluvaan) kaapeliin, /Ott, 1976/. Testimittaukset on tehty käyttäen kaapeleiden rajataajuuden noin viisinkertaisesti ylittävää häiriötaajuutta (50 kHz). Resfrensitasona on käytetty kytkentää, joka ei vaimenna lainkaan induktiivista kytkeytymistä.

Kuvan 5.6 kohdassa A kierretyn parikaapeli vaimennus on vain 13 dB. Tämä johtuu maalenkistä, joka kerää tehokkaasti häiriöitä. Kohdassa B parikaapeli on suojattu toisesta päästä maadoitetulla suojalla. Se ei paranna suojausvaikutusta, koska induktiivinen kytkeytyminen on ylivoimaisesti hallitseva. Kohdassa C suoja on maadoitettu molemmista päistä. Se parantaa selvästi kaapelin vaimennuskykyä kuten edellä on matemaattisesti osoitettu (yhtälö 5.3).



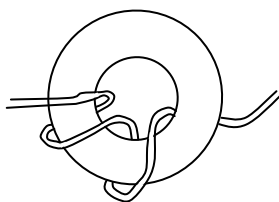
Kuva 5.6. Induktiivinen kytketyminen kaksipistemaadoitettuun kaapeliin (A – C) ja yksipistemaadoitettuun kaapeliin (D – H). Kohdat A – G ovat lähteestä /Ott, 1976/ ja kohta H lähteestä /ABB:n TTT-käsikirja/.

Merkittävä parannus saadaan aikaiseksi kelluttamalla kytkennän toista päätä. Tällöin kohdan E suojaamattoman parikaapeli tarjoaa kuitenkin vain 55 dB:n vaimennuksen, koska kapasitiivinen kytketyminen alkaa olla merkittävää. Kohdassa F parikaapelin ympärille lisätään toisesta päästä maadoitettu suoja estämään kapasitiivista kytketyistä. Se parantaa vaimennuksen 70 dB:iin. Kohdassa G suoja maadoitetaan molemmista päistä. Se heikentää kaapelin suojauskykyä, koska syntyvä maalenkki kerää tehokkaasti häiriöitä. Kohdassa D vaimennuskyky on kasvanut, koska tilanne vastaa yhtälön 5.3 tarkoittamaa tilannetta. Tätä kytkentää ei kuitenkaan tule käyttää, koska suojaan kytketyneet ylimääräiset häiriöt kytketyvät galvaanisesti toiseen signaalijohtimeen. Kohdassa H parikaapelin kierteiden määrää on kasvatettu kolminkertaiseksi. Se parantaa kaapelin vaimennusta yllättävän paljon.

Kuvassa 5.6 esitetyistä kytkennöistä kohta F on kaikkein suositeltavin. Lisäksi kriittisiin kohteisiin on syytä valita mahdollisimman tiheästi kierretty parikaapeli.

### 5.3.2 Yhteismuotokuristimet

Yhteismuotoisia virtoja, jotka käyttävät paluutienä maatasoa, voidaan vaimentaa yhteismuotokuristimilla eli ferriittirenkailla, kuva 5.7. Kierrättäessä ohjauskaapeli ferriittirenkaan ympäri muutaman kerran kasvaa korkeataajuisten yhteismuotoisten virtojen näkemä impedanssi, jolloin korkeataajuinen yhteismuotoinen häiriövirta pienenee. Ferriittirenkaiden toimivuus on syytä todentaa mittaamalla. /ABB:n TTT-käsikirja, 2000/

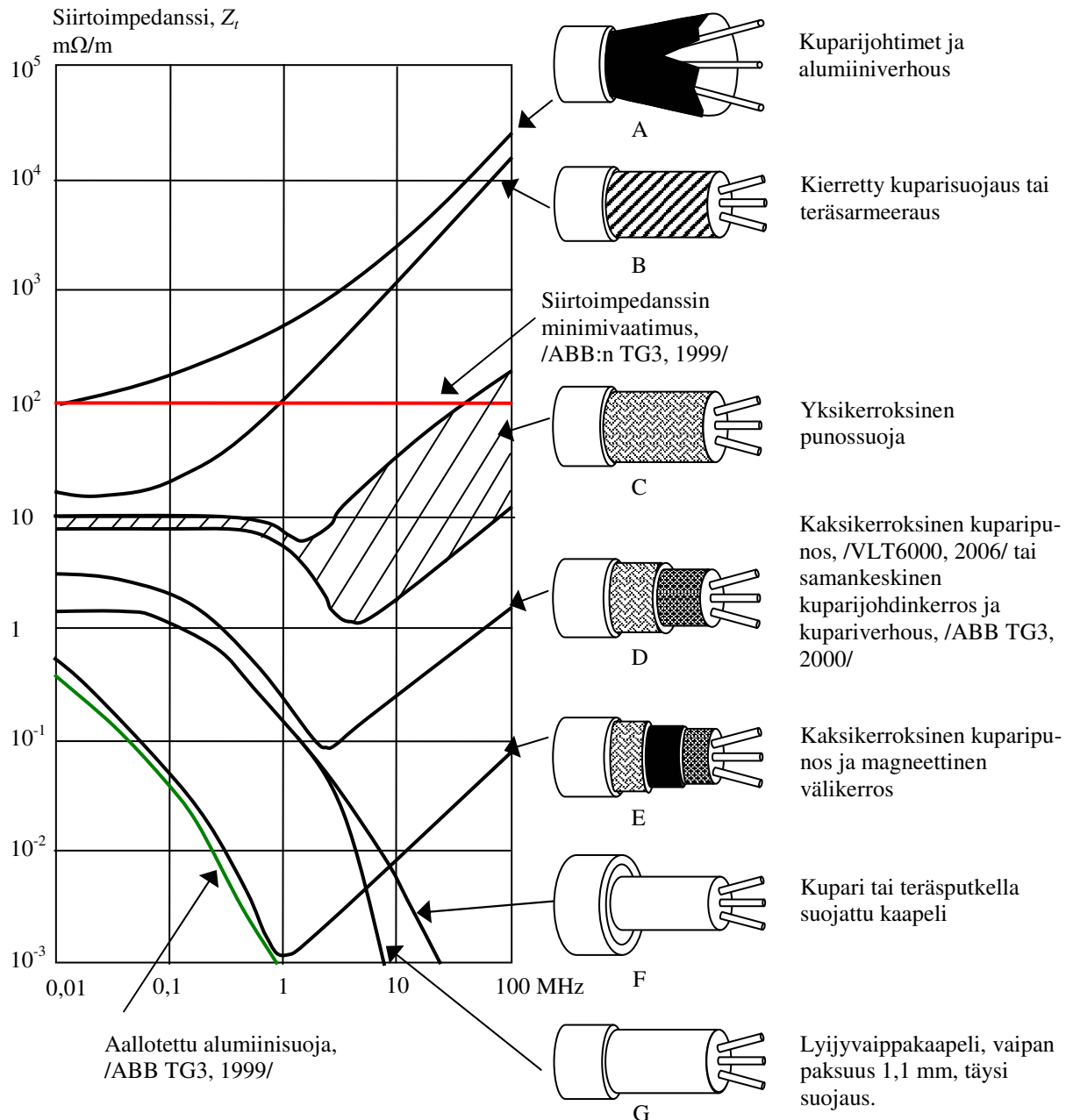


Kuva 5.7. Yhteismuotokuristin vaimentaa korkeataajuista yhteismuotoista häiriövirtaa, mutta ei signaalin tavoin kulkevaa eromuotoista häiriövirtaa..

### 5.3.3 Moottorikaapelointi

Kaapelin soveltuvuutta taajuusmuuttajan ja moottorin väliseen kaapelointiin voidaan arvioida siirtoimpedanssi  $Z_t$  avulla. Siirtoimpedanssi kuvaa häiriintyvän piirin jännitteen suhdetta häiritsevässä piirissä kulkevaan virtaan eli siirtoimpedanssin pienentyminen pienentää häiriösäteilyä. Lisäksi pienimmän siirtoimpedanssin omaavien kaapeleiden suojaassa kulkeva moottorin vuotovirta aiheuttaa pienimmän jännitteen nousun moottorin rungon ja taajuusmuuttajan välillä. Siirtoimpedanssin suuruuteen vaikuttaa merkittävästi kaapelin suojan liitântätapa. ABB esittää siirtoimpedanssin maksimiarvoksi 100 m $\Omega$ /m, jotta säteilevien häiriöiden rajat alittuisivat 100 MHz-taajuudelle saakka, /ABB:n TG3, 1999/. Pidemmille kaapelivedoille tarvitaan pienemmän siirtoimpedanssin omaava kaapeli. Jos kaapelivalmistaja ei ole ilmoittanut kaapelin siirtoimpedanssia, voidaan se arvioida kaapelin fyysisen rakenteen avulla, kuva 5.8, /VLT6000, 2006/. Kuva 5.8 on suuntaa

antava, ja sitä voidaan käyttää hyväksi myös ohjauskaapeleiden suojien paremmuutta arvioitaessa.



Kuva 5.8. Erilaisen rakenteen omaavien suojattujen kaapeleiden siirtoimpedansseja. Kuva on muokattu lähteeseen /VLT6000, 2006/ verrattuna.

Kaapelirakenne A vastaa NOMAK-kaapelin rakennetta, /Draka, 2007/. MMJ- tai vastaavat kaapelityypit ovat suojaustasoltaan sitäkin huonompia, / Draka, 2007/. Kaapelirakenne B

vastaa MCMK:n rakennetta, jossa vaihejohtimien ympärillä kiertää samankeskinen kuparijohdinkerros, / Draka, 2007/. Se ei kelpaa moottorikaapeliksi. Öfflex-tuotenimen alta löytyy joukko erilaisia rakenteen C ja D kuparipunossuojattuja kaapeleita, joita voidaan käyttää moottorikaapeloinnissa, /SKS Group Oy, 2007/. MCMK:n rakenne vastaa kutakuinkin kaapelirakennetta D, jonka siirtoimpedanssi alittaa selvästi ABB:n suositteleman 100 mΩ:n rajan. Työn aikana ei ole tullut vastaan yhtään kohdetta, jossa olisi käytetty rakenteen E – G kaltaisia kaapeleita saati aallotetulla alumiinilla suojattuja kaapeleita. Kuvasta 5.8 voidaan yhtenevästi päätellä, että tiheämpi suoja tarkoittaa pienempää siirtoimpedanssia. Erityisen hyviä moottorikaapeleita ovat sellaiset suojatut kaapelit, joissa menee jokaisen vaihejohtimen rinnalla vielä erilliset PE-johtimet (engl. Protective Earth, PE).

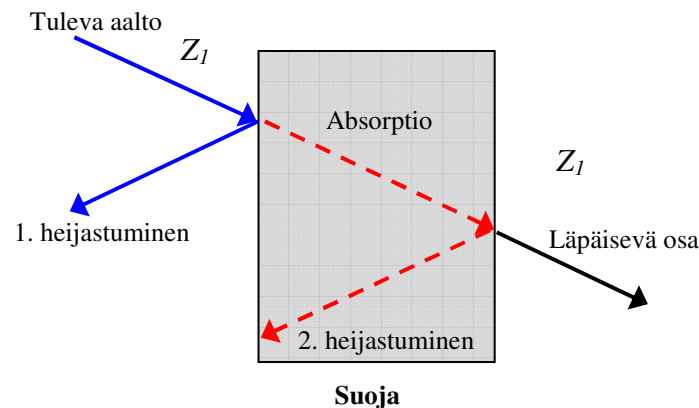
Kaapelin tyyppin ohella kaapelin suojan liitännätavalla on suuri merkitys häiriösäteilyyn etenkin korkeilla taajuuksilla. Paras tapa päättää suoja on käyttää 360 asteista maadoitusta kuten EMC-holkkia. Jos suoja joudutaan kiertämään maadoitusjohtimeksi (engl. pig-tail), tulee sen pituus pitää mahdollisimman lyhyenä. Lähteessä /Williams, 1996/ on esitetty eripituisten suojusta kierrettyjen johtimien siirtoimpedanssin arvoja desibeleinä verrattuna yhden ohmin arvoon. 10 MHz taajuudella yhden 50 mm pitkän johtimen siirtoimpedanssi on -7 dB, yhden 15 mm pitkän johtimen -17 dB ja 360-asteisen päätöksen -48 dB. Korkeilla taajuuksilla pitkä maadoitusjohdin vastaa lähes samaa kuin jos suoja jätettäisiin maadoittamatta. Käytettäessä turvakytкимиä, tulee taajuusmuuttajan sekä moottorin väliin neljä liitosta, jotka jokainen kasvattavat siirtoimpedanssia. Etenkin suurilla tehoilla, jolloin yhteismuotoiset virratkin ovat suuria, korostuu 360-asteisten liitoksien tekeminen. ATV61:n manuaalissa vaaditaan käyttämään 360-asteisia liitoksia jokaisessa läpivedossa taajuusmuuttajan tehosta riippumatta, /ATV61, 2006/.

#### **5.4 Koteloinnin vaikutus häiriöiden vaimennukseen**

Seuraavassa tarkastellaan suojan eli koteloinnin vaikutusta sähkömagneettisten kenttien vaimennukseen.

### 5.4.1 Sähkö- ja magneettikentän vaimentaminen kotelolla

Kun sähkömagneettinen aalto saapuu väliaineen ja suojan muodostamaan rajapintaa, tapahtuu heijastuminen impedanssien suhteessa, kuva 5.9. Osa saapuvasta aallosta etenee suojaan, jolloin se vaimenee eli absorboituu. Aallon saapuessa uudelleen toiseen rajapintaan, tapahtuu toinen heijastuminen osan aallosta mennessä läpi. Tällä ei kuitenkaan ole käytännön kannalta suurta merkitystä. /Ott, 1976/



Kuva 5.9. Sähkömagneettisen aallon käyttäytyminen sen kohdatessa suoja.

Sähkömagneettisen kentän aaltoimpedanssi on vakio kaukokentässä ( $377 \Omega$ ), mutta lähikentässä sen arvo riippuu säteilylähteen ominaisuuksista sekä tarkasteluetaisyudesta (luku 3.5.1). Suoijan impedanssi määritellään /Ott, 1976/

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (5.4)$$

jossa  $\omega$  on suojaan tulevan aallon kulmataajuutta  
 $\mu$  on suojan permeabiliteetti  
 $\sigma$  on suojan johtavuus  
 $\epsilon$  on suojan dielektriivisyys.

Yhtälön (5.4) perusteella voidaan osoittaa johtavien materiaalien impedanssien olevan erittäin pieniä suurillekin taajuuksille asti ( $Z_{johde} \ll 1 \Omega$ ) tosin taajuuden kasvaessa kasvaa

impedanssi. Eristeiden impedanssi on likimain tyhjän aaltoimpedanssi ( $Z_{eriste} \approx 337 \Omega$ ), mutta vaihtelee jonkin verran.

Sähkö- että magneettikentän heijastusvaimennukseksi voidaan johtaa /Ott, 1976/

$$R = 20 \log \frac{|Z_w|}{4|Z_s|}, \quad (5.5)$$

jossa  $Z_w$  tarkoittaa sähkömagneettisen aallon impedanssia. Yhtälön (5.5) perusteella voidaan todeta, ettei eristeillä saada aikaan heijastusvaimennusta. Johtaville materiaaleille tilanne on toinen. Kaukokentässä heijastusvaimennus on erittäin hyvä sekä sähkö- että magneettikentälle ( $Z_w \approx 337 \Omega$ ). Kaukokentän alueella johtavasta materiaalista valmistettujen suojiin heijastusvaimennuksen arvo on noin 100 dB vielä 10 MHz taajuudella, jos suoja valmistetaan alumiinista tai kuparista. Teräskotelon heijastusvaimennus on lähes puolet pienempi 10 MHz taajuudella.

Lähikentän alueella sähkökentän aaltoimpedanssi kasvaa, joten myös heijastusvaimennus paranee. Magneettikentän heijastusvaimennus puolestaan laskee lähikentän alueella, koska magneettikentän aaltoimpedanssi pienenee lähestyttäessä säteilylähdettä. Esimerkiksi metrin etäisyydellä suojasta magneettikentän vaimennus on luokkaa 40 dB – 80 dB taajuusalueella 0,1 kHz – 10 MHz. /Ott, 1976/

Suojan absorptiovaimennuksen suuruudeksi voidaan johtaa /Ott, 1976/

$$A = 131t \sqrt{f\mu_r\sigma_r} \quad (5.6)$$

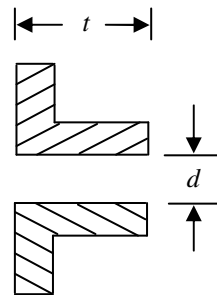
jossa	$A$	tarkoittaa absorptiovaimennusta [dB]
	$t$	tarkoittaa suojan paksuus [mm]
	$f$	on aallon taajuus [MHz]
	$\mu_r$	on suojan suhteellinen permeabiliteetti
	$\sigma_r$	on suojan suhteellinen johtavuus.

Yhtälöstä (5.6) huomataan absorptiovaimennuksen olevan riippumaton aaltoimpedanssista, joten absorptiovaimennus on sama sekä lähi- että kaukokentän alueella sähkö- ja

magneettikentälle. Yhtälöstä (5.6) voidaan päätellä absorptiovaimennuksen olevan hyvä johtavilla materiaaleilla, olematon eristeillä ja erityisen hyvä magneettisilla materiaaleilla ( $\mu_r \gg 1$ ), mutta vain korkeilla taajuuksilla. Suojan paksuus vaikuttaa suoraan absorptiovaimennuksen suuruuteen, joten hyvin ohut kerros johtavaa materiaalia tarjoaa heikon absorptiovaimennuksen. Koska sähkökentän heijastusvaimennus on erittäin suuri verrattuna magneettikentän heijastusvaimennukseen, on absorptiovaimennus magneettikentän pääasiallinen vaimennuskeino. /Ott, 1976/

#### 5.4.2 Aukkojen vaikutus suojan vaimennuskykyyn

Edellä oletettiin suojan peittävän kohteen täydellisesti, jolloin suojassa ei ole epäjatkuvuuksia. Suojan todellista vaimennuskykyä arvioitaessa on huomioitava suojassa olevien aukkojen tai reikien vaikutus, joista sähkömagneettiset kentät voivat vuotaa ulos. Reiät tai epäjatkuvuudet, jotka muodostavat aaltoputken, vaimentavat vuotoa tietyn rajataajuuden alapuolella, kuva 5.10. Suojan epäjatkuvuudella on yleensä suurempi merkitys magneettikentän vuotamiseen, joten seuraavassa kiinnitetään huomiota vain magneettikenttien vaimentamiseen. /Ott, 1976/



Kuva 5.10. Poikkileikkaus aaltoputken muodostavasta aukosta, jonka pituus on  $t$  ja halkaisija  $d$ .

Rajataajuus laskee aukon suurimman dimension funktiona, mutta on vielä lävistäjältään 100 mm pyöreällä tai suorakulmaisella aukolla yli gigahertsin taajuudella, /Ott, 1976/. Rajataajuuden alapuolella pyöreän aukon magneettikentän vaimennus desibeleissä lasketaan



$$S = 32 \left( \frac{t}{d} \right), \quad (5.7)$$

jossa  $t$  tarkoittaa aukon pituutta.  
 $d$  aukon halkaisijaa.

Suorakulmaisen aukon vaimennuskyky on vain hieman huonompi, /Ott, 1976/. Yhtälöstä (5.7) nähdään, ettei aukon vaimennuskyky riipu häiriön taajuudesta rajataajuuden alapuolella. Lähes 100 desibelin vaimennus saavutetaan, kun aukon pituus on kolme kertaa aukon halkaisijan suuruuden verran. Jos aukon pituus on hyvin paljon lyhyempi kuin aukon halkaisija, ei se vaimenna lainkaan säteilykenttiä.

### 5.4.3 Moottorirajapintaan asennettavien kytkinten kotelointivaatimukset

Jos taajuusmuuttajan ja moottorin väliin asennetaan kytkimiä, tulee ne koteloida moottori-johtimissa kulkevien suurien virtojen ja jännitteiden aiheuttamien häiriösäteilyjen estämisen takia. Koska koteloiden mitat ovat pieniä, ei aaltoimpedanssien arvioiminen ja siten vaimennuksien arvioiminen ole yksiselitteistä. Pelkkä muovinen kotelo ei vaimenna lainkaan sähkö- tai magneettikenttiä, joten niitä ei tule käyttää.

Sähkökentän vaimennus on hyvä millä tahansa yhtenäisellä metallikotelolla hyvän heijastusvaimennuksen takia. Sähkökentän vaimennus heikkenee jonkin verran johtavalla kerroksella päällystetyllä muovikotelolla kerroksen metalleja huonomman johtavuuden takia. Magneettikentän heijastusvaimennus ei ole kovin hyvä millään kotelomateriaalilla. Muutaman millin paksuisen metallikotelon absorptiovaimennus on hyvä korkeilla taajuuksilla, mutta ohuella johtavalla kerroksella päällystetyn muovikotelon absorptiovaimennus on huono. Päällystetyn muovikotelon absorptiovaimennus paranee, mikäli siinä käytetään johtavia täyteaineita. Jos matalilla taajuuksilla tarvitaan hyvää magneettikentän vaimennusta, voidaan vaimennusta parantaa käyttämällä magneettisia materiaaleja.

Varminta on käyttää vain metallisia koteloita. Se on myös ATV61:n manuaalissa esitetty vaatimus, /ATV61, 2006/. EMC-suojattuja muovikoteloita tulee käyttää harkiten, koska tällöin menetetään jokseenkin merkittävästi magneettikentän vaimennusta. Jotta turva- ja ohituskytkimien koteloihin tehtävät reiät eivät vuotaisi tehokkaasti, tulee käyttää koteloon

hyvässä galvaanisessa kontaktissa olevia metallisia kytkinrakenteita sekä metallisia holkkeja. Ryhmäkeskukset eivät pääsääntöisesti sovellu koteloksi, koska niissä on suuria aukkoja sekä rakoja kansien ja reunojen välillä.

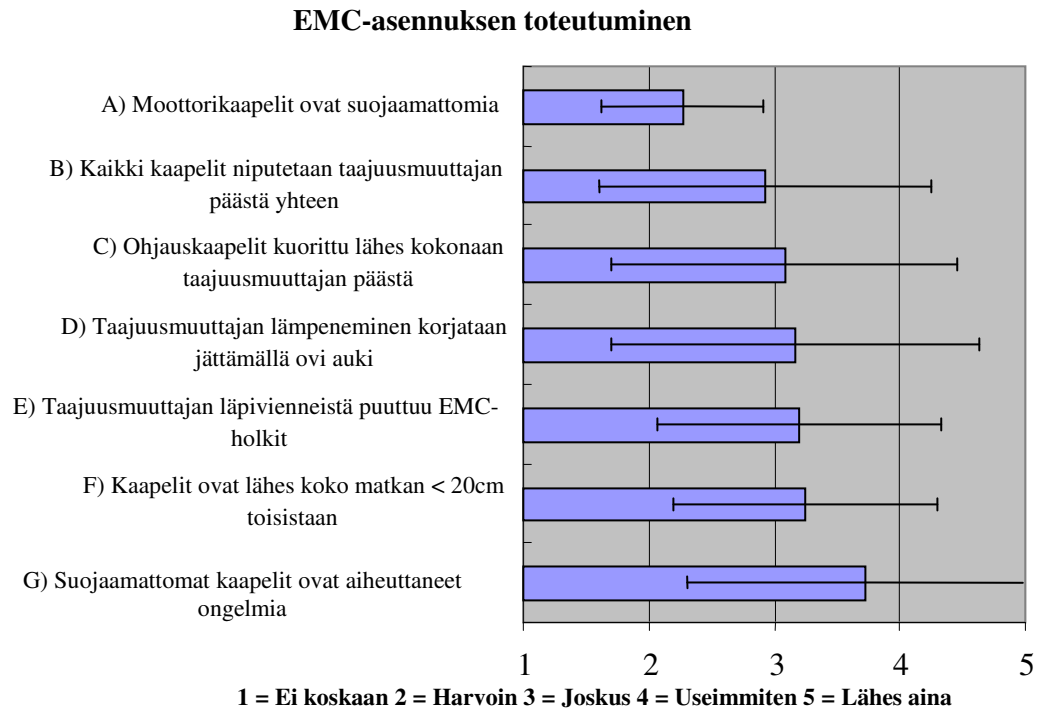
## **6 TAAJUUSMUUTTAJIEN KÄYTTÄMISEN ONGELMAKOHDAT**

Työssä on tutkittu taajuusmuuttajan käyttämiseen liittyviä haasteita sekä ongelmia kahdella erillisellä kyselyllä, yhdeksällä haastattelulla sekä yhdeksällä kohdekäynnillä. Huoltohenkilöstölle tehtyyn kyselyyn vastasi 16 ja projektihenkilöstön kyselyyn 35 TAC:n työntekijää eri puolelta Suomea. Tässä luvussa esitetään työn kannalta oleelliset tulokset.

### **6.1 EMC-asennusvirheet**

Varsinaisia ongelmia, kuten alakeskuksien väylävikoja aiheuttavat EMC-asennusvirheet kulminoituvat moottorikaapeloinnin virheisiin sekä jossain määrin ohjauskaapeloinnin virheisiin. EMC-asennukseen liittyvät ohjeet esitetään pääsääntöisesti erittäin hyvin taajuusmuuttajavalmistajien ohjekirjoissa, mutta haastateltavien tekemien havaintojen mukaan ohjeet ovat jokseenkin usein hävinneet, niitä ei lueta tai niiden sisältöä ei ymmärretä kovin hyvin. Huonoimmissa tapauksissa ohjeisiin kiinnitetään huomiota vasta siinä vaiheessa, kun jotain häiriöihin liittyviä ongelmia ilmenee. EMC-asentamisen pääkohdat on esitetty luvussa 2.3.1, ja hyvän kuvan oikeasta EMC-asentamisesta saa lukemalla lähteitä /ACS550, 2004/, /VLT6000, 2006/ ja /ATV61, 2006/.

Haastatteluista tuli selvästi esille, että viime vuosina on alettu kiinnittää huomiota EMC-asentamiseen liittyviin tekijöihin. Esimerkiksi uudiskohteissa todettiin esiintyvän saneerauskohteita huomattavasti harvemmin taajuusmuuttajaan liittyviä ongelmia. Haastatteluissa oli kuitenkin merkille pantavaa, että esitettäessä EMC-asennuksiin liittyviä väitteitä, lähes jokainen projektihenkilö tunnisti yhden tai useamman EMC-asennusohjeiden vastaisen virheen esiintyvän tavallisesti uudiskohteissakin. Haastatteluista ja kohdekäynneistä saatujen tuloksien tukemiseksi EMC-asennukseen liittyviä väittämiä päädyttiin esittämään pääasiassa huoltohenkilöstölle ja joiltain osin myös projektihenkilöstölle. Huoltohenkilöstön vastauksien tulokset esitetään tärkeimmiltä osin kuvassa 6.1.



Kuva 6.1. Huoltohenkilöstön vastauksien jakautuminen EMC-asennuksiin liittyviin väittämiin. Siniset palkit kuvaavat vastauksien keskiarvoa ja mustat viivat vastauksien keskihajontaa.

### 6.1.1 Moottorikaapeloinnin EMC-asennusvirheet

Moottorikaapeloinnin EMC-asennusvirheet voidaan jakaa väärin moottorikaapeleiden käyttämiseen, moottorikaapelin suojan katkeamiseen, moottorikaapelin väärin reitteihin sekä väärin kytkentätapoihin. Työn aikana tutustuttiin tarkemmin yhdeksään kohteeseen, joissa oli taajuusmuuttajiin liittyviä ongelmia. Kolmessa kohteessa ongelma liittyi parametrisointiin, neljässä kohteessa taajuusmuuttajalla ohjatun puhaltimen käynnistäminen kaatoi alakeskuksen väylän ja lopuissa kohteista oli jokin muu vika (eivät häiriöperäisiä). Yhteistä kaikille kohteille oli moottorikaapeloinnin EMC-asennuspuutteet sekä virheet, sillä vain yhdessä kohteessa moottorikaapelointi oli täysin oikein. Tosin kyseisessä kohteessa ohjauskaapelin virheellinen kytkentä hajotti koko alakeskuksen I/O-kortteineen.

### Suojaamattomien tai huonosti suojattujen moottorikaapeleiden käyttäminen

Osa huoltohenkilöstön kyselyyn vastanneista sekä haastatelluista projektihenkilöistä totesivat suojaamattomien moottorikaapeleiden aiheuttavan lähes aina joitain kiinteistö-

automaatiojärjestelmän toimintaa haittaavia ongelmia, kuva 6.1 kohta G. Nykyään moottorikaapelit ovat kuitenkin enää harvoin täysin suojaamattomia, kuten kohdasta A voidaan päätellä. Suojaamattomia kaapeleita yleisempää on käyttää huonosti suojattuja MCMK-kaapeleita. Käydyissä kohteissa yhdessä käytettiin suojaamattomia moottorikaapeleita taajuusmuuttajalta moottorille asti, kuudessa käytettiin edes osittain moottorikaapelina MCMK-kaapelia ja kolmessa kohteessa suojaukseltaan vähintään MCMK-tasoinen moottorikaapeli vaihtui suojaamattomaksi kaapeliksi muovisen turvakytkimen jälkeen.

### **Suojan katkeaminen ja moottorikaapelin väärät reititykset**

Eryteisesti taajuusmuuttajan asennuksia tehnyt sekä niiden oikeaa toteuttamista tutkinut haastateltava totesi moottorikaapelin suojan jatkuvuuden katkeavan usein, jos turva- tai vaihtokytkin rakennetaan ryhmäkeskukseen. Ryhmäkeskuksen rakenne ei hänen mukaansa yleensä huomioi lainkaan luvussa 5.4 esitettyjä EMC-kotelointiin liittyviä tekijöitä. Sama asia todettiin kohdekäyntien aikana. Haastatteluissa mainittiin, että EMC-suojaamattomia muovikoteloituja turvakytkimiä käytetään jokseenkin usein.

Haastatteluissa moottorikaapelointiin useimmiten liittyväksi virheeksi tunnistettiin moottorikaapelin sijoittaminen samalla kaapelihyllylle ohjaus- ja syöttökaapelin kanssa sekä moottorikaapelin niputtaminen yhteen muiden kaapeleiden kanssa hyllyltä alas vedettäessä. Kuvan 6.1 kohdista B ja F voidaan kuitenkin päätellä moottorikaapelin virheellisen sijoittamisen olevan hyvin vaihtelevaa. Yli puolessa käydyissä kohteissa moottorikaapeli oli joko niputettu yhteen muiden kaapeleiden kanssa tai vedetty kokonaan samalla kaapelihyllyllä muiden kaapeleiden kanssa. Kaikissa kohteissa ainut keino pitää moottorikaapeli erossa muista kaapeleista, olisi ollut sijoittaa taajuusmuuttaja moottorin viereen, koska kaapelihyllyjä ei ollut kuin yksi. Haastatteluissa ja kyselyssä todettiin moottorikaapelin erottamisen muista kaapelista olevan käytännössä mahdotonta, jos taajuusmuuttaja asennetaan ryhmäkeskukseen tai alakeskukseen viereen.

### **Väärät kytkentätavat**

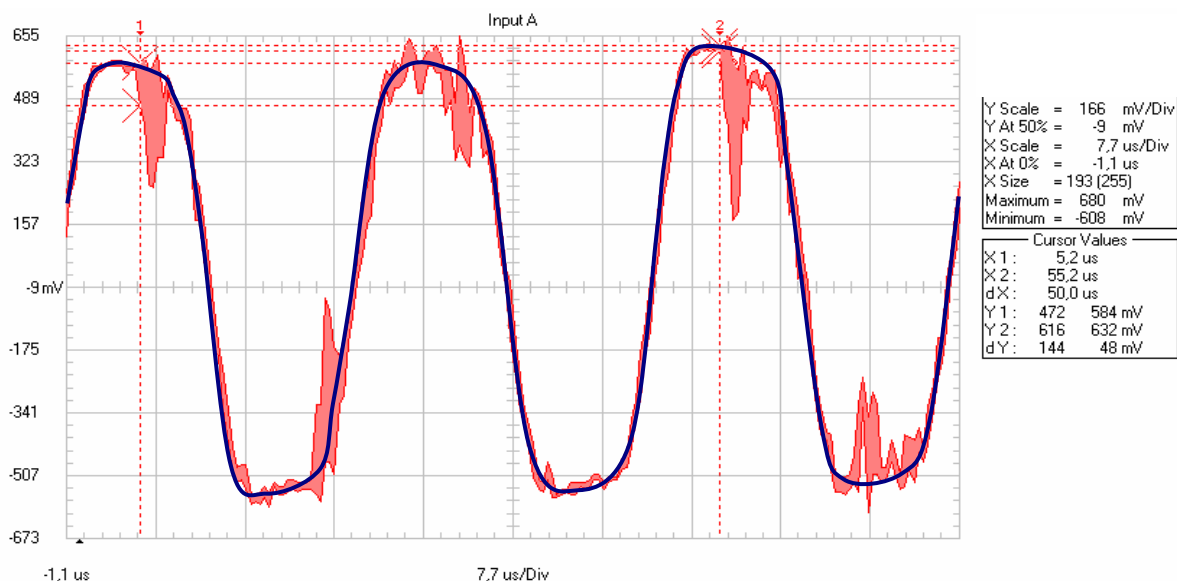
Moottorikaapelin vaihejohtimien ja suojan kytkemistapaa selvitettiin pääasiassa haastatteluilla ja kohdekäynneillä. Asiaan tarkemmin perehtyneet haastateltavat mainitsivat havainneensa vaihtelevasti seuraavia puutteita; 360-asteisen maadoitus on tekemättä, suoja

kierretään pitkäksi johtimeksi ja moottorikaapelin vaihejohtimet jätetään pitkille lenkeille. Kuvan 6.1 kohdan E tulos EMC-holkkien käyttämisen yleisyydestä ei aivan tue haastattelujen tuloksia, joissa todettiin 360-asteisen maadoittamisen korvattavan jokseenkin usein suojasta kierretyllä johtimella. EMC-holkit voidaan korvata 360-astetta maadoitavilla pannoilla.

Käydyissä kohteissa kahdessa maadoitus toteutettiin 360-asteisesti. Muissa kohteissa suojat maadoitettiin ainoastaan kiertämällä ne maadoitusjohtimiksi. Tyypillisesti johtimen pituus vaihteli välillä 10 – 35 cm, vaikka parin senttimetrin johdintakin olisi helposti voitu käyttää. Huomautettakoon, että jokaisen taajuusmuuttajan ja moottorin välissä oli turvakytkin. Tällöin suojasta kierretyjä johtimia oli enimmillään 4 kappaletta taajuusmuuttajan ja moottorin välillä. EMC:n kannalta suojasta kierretyjen maadoitusjohtimien käyttöä 360-asteisen maadoituksen korvikkeena tulisi ehdottomasti välttää.

### Virheellisen moottorikaapeloinnin aiheuttamat ongelmat

Moottorikaapeloinnin virheellisyydet näkyvät usein väylävikoina, kuva 6.2, mittauspisteiden huojumisena tai jopa laitteiden kuten peltimoottoreiden palamisena.



Kuva 6.2. Punaisella esitetään oskilloskoopilla mitattu häiriöllinen väyläsignaali taajuusmuuttajan ollessa päällä. Sinisellä kuvataan väyläsignaalin muotoa, kun taajuusmuuttaja sammutettiin.

Lähes kaikki väyläviat aiheutuvat taajuusmuuttajan moottorikaapelin huonosta maadoittamisesta, suojan katkeamisesta turvakytkimessä tai ryhmäkeskuksessa sekä suojaamattomista moottorikaapeleista. Joissain tapauksissa väylävian on havaittu aiheutuvan ohjaus- tai väyläkaapelin maadoittamisesta molemmista päistä sekä väyläkaapelin väärästä reitistä. Vaikeimmin taajuusmuuttajan aiheuttamiksi vioiksi on paikallistaa muiden järjestelmien virhetoiminnat, kuten murtohälytyksien laukeaminen epämääräisinä ajankohtina.

### 6.1.2 Ohjauskaapeloinnin EMC-asennusvirheet

Ohjauskaapeloinnin virheellinen toteuttaminen ja kytkentä aiheuttavat moottorikaapelointia selvästi vähemmän vikatoimintoja automaatiojärjestelmän toiminnassa, mutta kaapeleiden kytkentään ja tyyppiin tulisi silti tehtyjen havaintojen perusteella kiinnittää huomiota. Yleisin ohjauskaapelin kytkemiseen liittyvä virhe lienee johtojen suojiin kuoriminen kokonaan taajuusmuuttajan kotelon sisällä, joka on huoltohenkilöstön havaintojen mukaan aiheuttanut välillä väylän kaatumisen tai mittauspisteiden huojuntaa, kuva 6.1 kohta C. Myös ohjauskaapelin parien huolimattoman sijoittelun sekä ylimääräisten parien jättäminen lenkille taajuusmuuttajan kotelon sisälle todettiin aiheuttaneen toimintahäiriöitä alakeskuksissa.

Haastatteluissa todettiin vaihtelevasti, etteivät sähköurakoitsijat aina ”usko” mitä kaapelia automaatiourakoitsija tarvitsee. Pyydetyn kaksoissuojatun kaapelin tilalle on välillä vedetty huonosti EMC-suojattu MHS- tai KLMA-kaapeli. Käydyissä kohteissa ohjauskaapelina käytettiin pääsääntöisesti kaksoissuojattua JAMAK-kaapelia, mutta muutamassa kohteessa oli käytetty yksöissuojattuja NOMAK- ja MHS-kaapeleita.

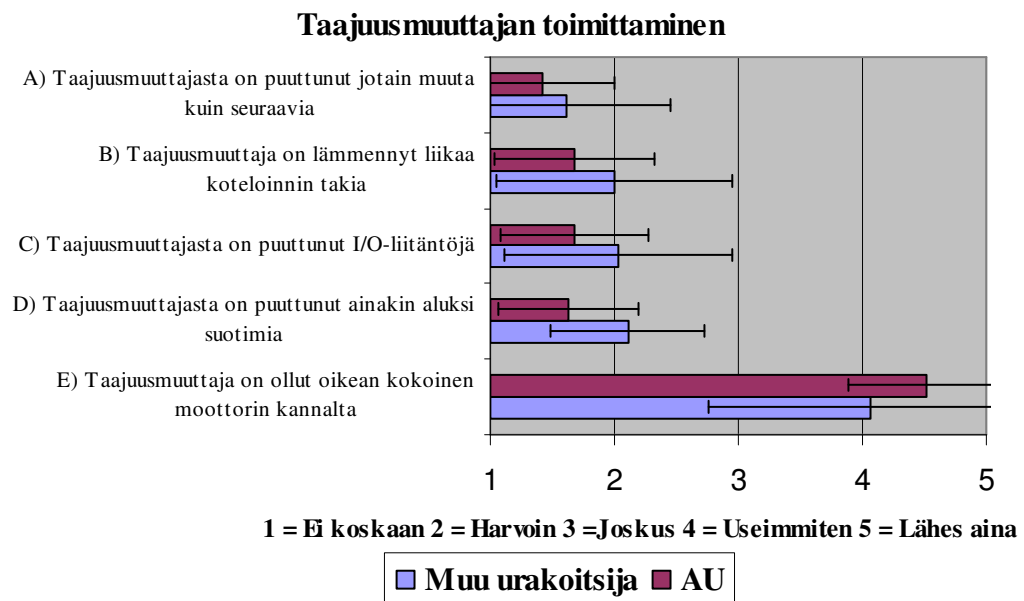
Ohjauskaapelointiin liittyen yleinen ongelma on alakeskuksen häiriösuojiin TE-kytkentäkiskon maadoittamisessa. Projektihenkilöstön kyselyn mukaan TE-kisko maadoitetaan yli 10 mm<sup>2</sup> johtimella keskimäärin harvoin tai joskus. Haastatteluissa todettiin TE-kiskon maadoittamiseen käytettävän jokseenkin usein alakeskuksen syöttökaapelin 1,5 mm<sup>2</sup> johdinta. Ohjeena on käyttää vähintään 16 mm<sup>2</sup> johdinta, joka maadoitetaan suoraan päämaadoituskiskoon.

## 6.2 Taajuusmuuttajien toimituksen puutteet ja käyttöönoton epäkohdat

Eri urakoitsijoiden taajuusmuuttajien toimituksiin liittyvät ongelmat voidaan jakaa toimituspuutteisiin sekä parametrisoinnin virheisiin.

### 6.2.1 Toimituspuutteet

Taajuusmuuttajien toimituksen tärkeimpiä puutteita tutkittiin projektihoitajille suunnatussa kyselyssä, jonka tulokset esitetään kuvassa 6.3. Haastatteluissa puutteiden todettiin vähentyneen viime vuosien aikana, ja kyselyn perusteella puutteita ei juuri enää ole.



Kuva 6.3. Projektihenkilöstön vastauksien jakautuminen taajuusmuuttajien toimittamiseen liittyviin väittämiin. Siniset ja violetit palkit kuvaavat vastauksien keskiarvoa ja mustat viivat vastauksien keskihajontaa.

### Muiden urakoitsijoiden toimittamien taajuusmuuttajien puutteet

Kuvan 6.3 kohdan C muiden urakoitsijoiden toimittamien taajuusmuuttajien I/O-liityntäpisteiden puutteet selittynevät lähinnä tietämättömyydellä automaatio-ohjauksesta sekä suunnitelmilla, joissa ei näy taajuusmuuttajakäytössä tarvittavia I/O-pisteitä. Kohdan D taajuusmuuttajien suotimien puutteet johtunevat siitä, että taajuusmuuttajia saa niin sanottuina karsittuina malleina. Tällaiset mallit eivät sisällä C1- tai C2-luokan EMC-



suotimia, vaan ne on tilattava erikseen. Kohdassa D ei huomioitu, käyttävätkö muut urakoitsijat yleisesti C1 vai C2 luokan suotimia.

Kuvan 6.3 kohdan B taajuusmuuttajien yllämpiäminen johtunee pääsääntöisesti siitä, ettei taajuusmuuttajaa ole tilattu yleensä vaadittavalla IP54-koteloinnilla. Kun IP-luokitus nostetaan jälkikäteen toteutettavalla koteloinnilla, jää jäähdytys helposti huomioimatta. Haastatellut henkilöt mainitsivat yllämpiämisen korjattavan yleensä jättämällä taajuusmuuttajan kotelo auki, jolloin IP-luokitus menetetään.

Kuvan 6.3 kohdan A muiksi puutteiksi mainittiin suomenkielisten käyttöohjeiden puuttuminen, väyläkorttien puuttuminen sekä väärä IP-luokitus. Englanninkielisten käyttöohjeiden käyttämisen ongelmaksi mainittiin käytetty termistö, jonka ymmärtäminen vaatii erittäin hyvää vieraan kielen hallitsemista. Kohdassa E tiedusteltiin, miten usein taajuusmuuttajat ovat oikean kokoisia moottoriin nähden. Tuloksen selityksenä lienee, etteivät jotkut muista urakoitsijasta joko osaa valita taajuusmuuttajaa oikein moottori-arvojen perusteella tai sitten suunnitelmamuutokset jäävät huomioimatta.

### **Automaatiourakoitsijan toimituspuutteet**

TAC:n käyttämät taajuusmuuttajat ovat kaikki tehtaan IP54-kotelioimia, integroidulla C1-luokan suotimella varustettuja laitteita, joihin kuuluu vakiona riittävä määrä I/O-pisteitä mitä tahansa käyttöä ajatellen. Automaatiourakoitsijan toimittamien taajuusmuuttajien I/O-pisteiden ja suotimien puutteet liittyvätkin lähinnä tilauksiin, joissa asiakas määrittää itse taajuusmuuttajan merkin. Tällöin on mahdollista, ettei tuntemattomaan merkkiin ymmärretä tilata tarvittavia optioita. Yllämpiämisen yleisin syy lienee suurimman sallitun ympäristölämpötilan ylittyminen.

### **Muita toimittamiseen liittyviä ongelmia**

Haastatteluissa sekä projektihoitajien kyselyssä mainittiin muiden toimittamien taajuusmuuttajien ohjauskaapeleiden kytkennän tuottavat välillä epäselvyyksiä, koska urakkarajoissa ei aina määritellä selkeästi ohjauskaapelin kytkijää tai kytkentäohjeiden tekijää. Taajuusmuuttajat vaativat usein 1 – 3 oikosulkulenkkiä toimiakseen oikein automaatio-ohjauksessa. Tämän tiedon etsiminen tuntemattoman taajuusmuuttajan kohdalla

vie usein paljon aikaa. Lisäksi haastetta aiheuttava vieraskieliset ohjeet, joiden perusteella on joissain tapauksissa vaikea päätellä oikea I/O-liitin.

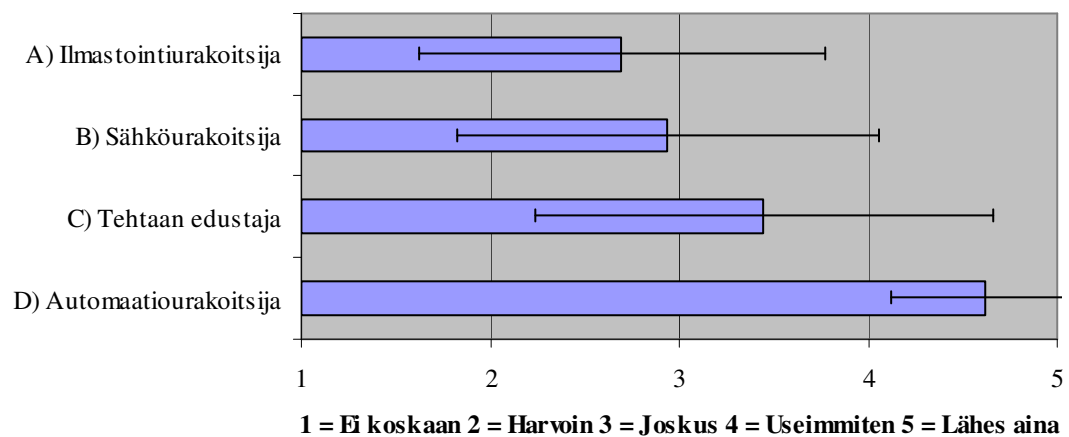
## 6.2.2 Parametrisoinnin ongelmat sekä epäkohdat

Taajuusmuuttajien käyttöönoton aikaiset ongelmat liittyvät lähinnä muiden urakoitsijoiden toimittamien taajuusmuuttajien parametrisointivirheisiin. Merkittävänä epäkohta voidaan pitää, että kiinteistöautomaatiourakoitsija joutuu muuttamaan muiden urakoitsijoiden toimittamien taajuusmuuttajien parametrisointia tai tekemään sen kokonaan.

### Parametrisoinnin onnistuminen eri urakoitsijoilta

Projektihoitajien kyselyssä tutkittiin, miten hyvin eri urakoitsijoiden tekemän parametrisoinnin koettiin onnistuneen, kuva 6.4. Automaatiourakoitsijan oma osaaminen todettiin hyväksi, kuten kohdasta D voidaan päätellä. Ilmastointi- ja sähköurakoitsijan tekemän parametrisoinnin onnistumisen keskihajonnasta (kohdat A ja B) on syytä huomata, että osa ilmastointi- ja sähköurakoitsijoista onnistuu parametrisoinnissa aivan yhtä hyvin kuin automaatiourakoitsijakin. Vastaavasti osa urakoitsijoista ei onnistu siinä lainkaan, jolloin projektihenkilöt mainitsivat yleensä itse tekevänsä parametrisoinnin. Kohdan C tulos vaikuttaa hieman yllättävältä, mutta se selittyy tiedon puutteella automaatiojärjestelmän I/O-pisteiden toiminnasta.

### Parametrisoinnin onnistuminen eri urakoitsijoilta



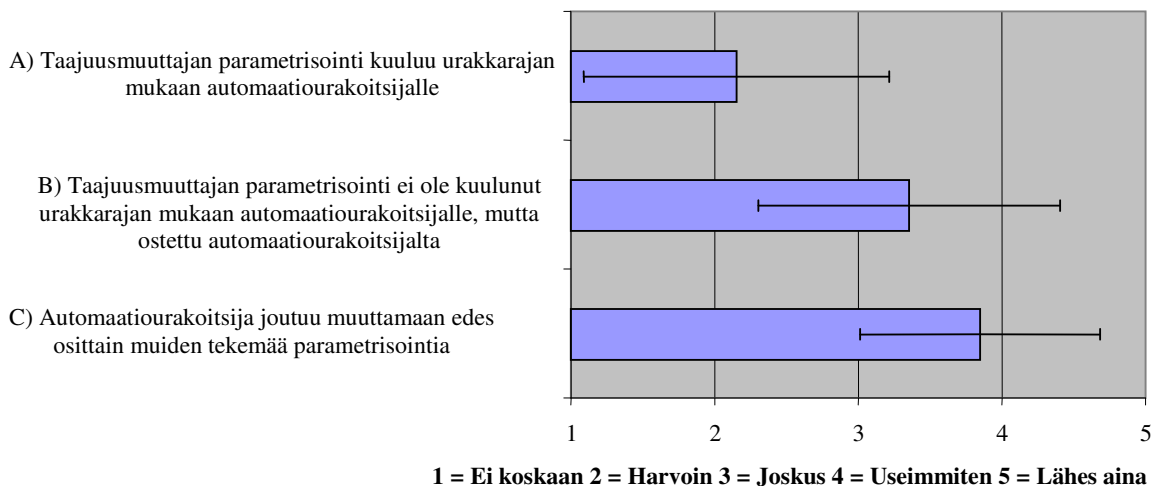
Kuva 6.4. Eri urakoitsijoiden onnistuminen taajuusmuuttajan parametrisoinnissa. Siniset palkit kuvaavat vastauksien keskiarvoa ja mustat viivat vastauksien keskihajontaa.

Ilmastointi- ja sähköurakoitsijan parametrisoimiin taajuusmuuttajiin todettiin jäävän yleensä automaatiojärjestelmän sekä IV-kojeen toimintaan liittyviä parametrisointivirheitä, mutta joissain tapauksissa myös moottorin toiminnan vaarantavia virheitä kuten vääriä moottorin nimellisvirta-arvoja. Tärkeimpinä syinä virheelliseen parametrisointiin pidettiin osaamisen sekä ymmärtämisen puutetta niin taajuusmuuttajista kuin automaatiojärjestelmästäkin. Toiseksi syyksi mainittiin välinpitämättömyys parametrisointia kohtaan, koska taajuusmuuttajan viimeinen käyttäjä on aina automaatiourakoitsija. Kolmanneksi syyksi mainittiin selkeiden ohjeiden puute tai niiden katoaminen työmaalta, jolloin taajuusmuuttajan käyttöönotto ei välttämättä onnistu lainkaan. Etenkin vieraskieliset ja pitkät ohjeet koettiin hankaliksi käyttää.

### Muiden hankkimien taajuusmuuttajien parametrisoinnin toteutuminen käytännössä

Eri taajuusmuuttajat poikkeavat toisistaan suuresti sekä tehdasparametrisoinniltaan, parametrirakenteiltaan, käyttöliittymiltään että jossain määrin termistöltään. Tällöin entuudestaan huonosti tunnettujen taajuusmuuttajien parametrit täytyy käytännössä käydä kokonaisuudessaan läpi. Tätä taustaa vasten taajuusmuuttajan parametrisoinnin epäkohtia voidaan tutkia kuvassa 6.5 esitettyjen tuloksien perusteella.

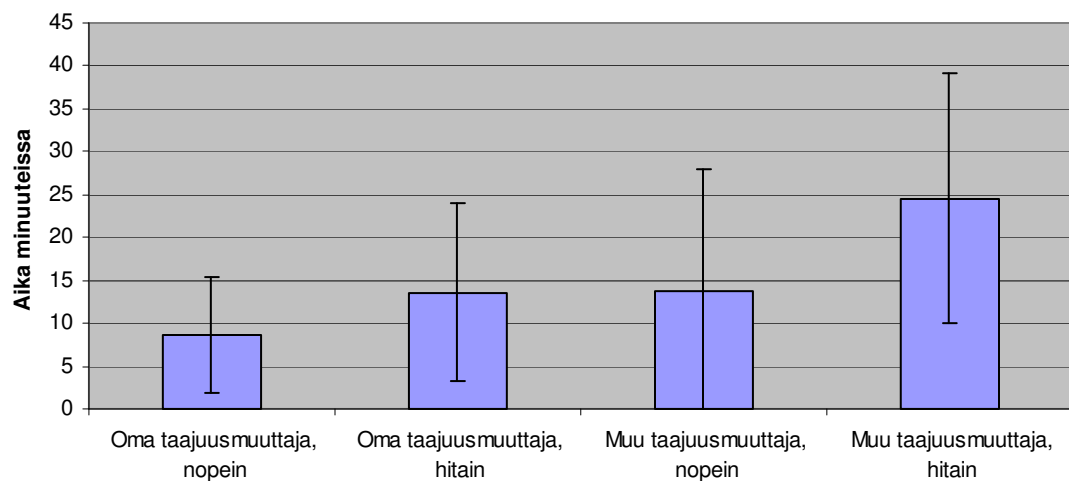
#### Muiden hankkimien taajuusmuuttajien parametrisointi



Kuva 6.5. Muiden urakoitsijoiden kuin AU:n hankkimien taajuusmuuttajien parametrisoinnin toteutuminen. Siniset palkit kuvaavat vastauksien keskiarvoa ja mustat viivat vastauksien keskihajontaa.

Kuvan 6.6 kohdan B vastauksien keskihajonta osoittaa, että jotkin urakoitsijat ostavat hyvin usein toimittamiensa taajuusmuuttajien parametrisoinnin automaatiourakoitsijalta. Keskimäärin tämä ei kuitenkaan ole kovin yleistä. Kohdasta C huomataan muiden urakoitsijoiden tekemässä parametrisoinnissa olevan vaihtelevasti korjattavaa. Usea projektihenkilö totesi käyvänsä poikkeuksetta läpi muiden tekemät parametrisoinnit. Siinä esiintyvät virheet he totesivat korjaavansa itse, koska koekäyttövaiheessa, jolloin virheet yleensä paikallistetaan, ei ole aikaa etsiä oikeaa urakoitsijaa tai se olisi urakoitsijan taidottomuuden takia turhaa.

**Taajuusmuuttajien parametrisointiin kuluva keskimääräinen aika**



*Kuva 6.6. Muiden toimittamien taajuusmuuttajien parametrisointiin menee selvästi kauemmin aikaa kuin automaatiourakoitsijan omien taajuusmuuttajien parametrisointiin.*

### **Muiden toimittamien taajuusmuuttajien huoltamiseen liittyvät haasteet**

Huoltohenkilöstön kanssa käydyissä haastatteluissa tulivat esille muiden urakoitsijoiden toimittamien taajuusmuuttajien huoltamiseen liittyvät haasteet. Koska taajuusmuuttajan virhetoiminto tulee automaatiojärjestelmän hälytyksen kautta esille, kutsutaan erityistä apua tarvittaessa paikalla useimmiten automaatiourakoitsijan huoltohenkilö. Ongelmana ovat tällöin samat tekijät kuin projektihenkilöillä urakoiden aikana, jolloin vähänkään tuntemattomamman taajuusmuuttajan toimintakunnon palauttaminen kestää väistämättä kauemmin kuin automaatiourakoitsijan omien taajuusmuuttajien vastaavat työt. Asiakkaalle tämä tarkoittaa kalliimpia laskuja.

### 6.3 Suunnitteluvirheet

Työssä ei pyritty tutkimaan suunnitelmiin liittyviä puutteita, mutta niihin otettiin aktiivisesti kantaa sekä haastatteluissa että kyselyn avoimissa kysymyksissä. ”*En ole nähnyt kahta samanlaista sähkösuunnitelmaa siitä, kuinka jäätymissuoja/LP-pumpun lukitukset tehdään taajuusmuuttaja-ryhmäkeskus-alakeskus välillä.*” Jäätymissuojan suunnitelmissa todettiin olevan suhteellisesti eniten virheitä. Tyypillisesti jäätymisvaaran lukituksesta puuttuu esimerkiksi moottorin tai taajuusmuuttajan pakkolukitus. Tällöin moottori saadaan käsin päälle jäätymisvaaratilanteissakin. Vaihtokytkimen suunnittelussa jää joskus ottamatta huomioon ilmanvaihtokanavien sulkupeltien aukaisemiseen kuluva aika, joka on tyypillisesti minuutin luokkaa. Kytkettäessä moottori suoraan syöttöverkkoon saavuttaa moottori täyden nopeuden käytännössä saman tien, jolloin joko sulkupellit tai kanavat voivat hajota.

Projektihenkilöstön kyselyssä mainittiin, että moottoreiden tiedoista tulisi olla selkeä lista, jonka perusteella parametrisoinnin voi tehdä. Tällaisia listoja tehdään, mutta niihin ei pääsääntöisesti voi luottaa tai automaatiourakoitsija ei niitä saa. Esimerkiksi eräässä kohteessa, jossa on toista sataa taajuusmuuttajalla ohjattua puhallinta, laadittiin lista moottoreiden tiedoista suunnitelma-arvojen perusteella. Tätä listaa ei kuitenkaan päivitetty vastaamaan toteutuneita moottoriarvoja, joten koko lista oli täysin käyttökelvoton parametrisoinnin yhteydessä.

LVI-suunnitelmien tekeminen ei kuulu automaatiourakoitsijalle, mutta silti heillä voisi olla esimerkkisuunnitelmat taajuusmuuttajakäytön eri tilanteista perusteluineen. Tämä helpottaisi projektihenkilöstöä havainnoimaan mahdollisia virheitä sekä esittämään järkevämpiä keinoja käyttää taajuusmuuttajia.

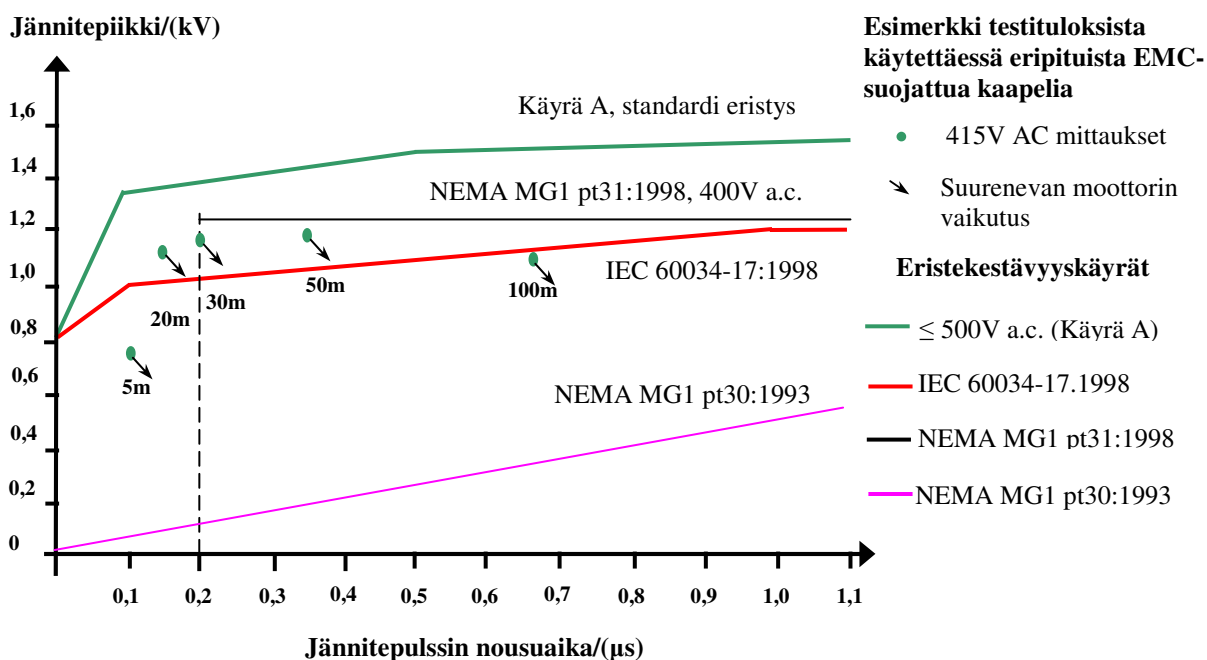
### 6.4 Moottorivauriot

PWM-taajuusmuuttajilla ohjatuille moottoreille voi koitua kahdenlaisia sähköisiä vaurioita pulssinleveysmodulaation toimintaperiaatteesta ja toteutustavasta johtuen; eristerasituksia sekä laakerivirtoja. Käytännön esiintymistiheyden tutkiminen oli kuitenkin hankalaa, koska kiinteistöautomaatioyritykset eivät saa tietoonsa moottoreiden hajoamissyitä. Moottorin

hajoamista ei välttämättä edes ilmoiteta automaatioyrittäjälle. Työn aikana on tullut esille joitain hajonneita moottoreita, mutta varmistusta hajoamissyystä ei saatu. TAC:n Ruotsin osasto on kuitenkin raportoinut jotain varmoja tapauksia, joissa moottorin eristykset tai laakerit ovat hajonneet taajuusmuuttajakäytön takia.

#### 6.4.1 Eristyksien jännitekestoisuuksien käyrät

Moottoreiden eristysten kestävyttä voidaan arvioida moottoriliittimissä esiintyvien jännitepiikkien kautta. Jännitteen maksimiarvo riippuu pääasiassa jännitepulssin nousunopeudesta sekä moottorikaapelin pituudesta ja on enimmillään noin kaksinkertainen DC-välipiiriin jännitteeseen verrattuna, /Finlayson, 1997/. Kuvassa 6.7 esitetään vihreillä pisteillä GAMBICA:n ja REMA:n tekemiä mittauksia jännitepiikkien suuruuksista käytettäessä eripituisia EMC-suojattuja kaapeleita sekä eri standardeissa määriteltyjä eristekestävyyskäyriä.



Kuva 6.7. Moottoriliittimissä esiintyvien jännitepiikkien vaadittavat kestokäyrät a.c. moottoreille, kun taajuusmuuttajan käyttöjännite on alle 500 V. Vihreällä on esitetty REMA-valmistajien moottoreiden eristysten tavanomainen kestokäyrä. Purppura viiva on saatu lähteestä /Finlayson, 1998/. Se nousee lineaarisesti 2 µs:iin asti 1 kV suuruuteen ja on yleiskäyttöisten moottoreiden eristekestävyyden vaatimus.

Kuvan 6.7 mittaustulokset ovat yleistettävissä pienin varauksin kaikille nykyaikaisille IGB-transistoreilla toteutetuille PWM-taajuusmuuttajille, kun moottorilähtö on suodattamaton.

Tuloksista voidaan päätellä, ettei NEMA MG1 pt. 30 tai IEC 60034-17:1998-käyrän määrittelemät eristekestävyydet riitä nykyaikaisille taajuusmuuttajakäyttöille. Sen sijaan REMA- ja GAMBICA-valmistajien moottorit tai NEMA MG1 pt. 31 eristekestävyyden ylittävät moottorit soveltuvat käytettäväksi 400 V AC taajuusmuuttajakäytöissä.

#### **6.4.2 Eristerasitusten huomioiminen käytännössä**

Eristerasitukset eivät pääsääntöisesti ole ongelma nykyaikaisia moottoreita käytettäessä. Sähkökäyttöä modernisoitaessa eristeaurion mahdollisuus on kuitenkin ilmeinen, sillä vanhat moottorit ovat pääsääntöisesti suunniteltu kestämään vain verkkokäyttöä. Esimerkiksi Ruotsin TAC on raportoinut eristeaurioista saneerauskohteissa, joissa vanha verkkokäyttöinen moottori on uudistettu ohjattavaksi taajuusmuuttajalla. Moottorin hajoaminen on tapahtunut joko välittömästi tai muutaman viikon kuluessa. Jopa taajuusmuuttajia on hajonnut moottoreiden hajoamisen yhteydessä.

Eristerasituksia vastaan voidaan suojautua käyttämällä moottorikuristinta, sinisuodatinta tai sovitettua moottoripäätettä. Sovitetun moottoripäätteen tarkastelu ei kuulu tämän työn alueeseen. Moottorikuristimet alentavat jännitepulssien reunan nousuaikaa pienentäen jännitepiikin amplitudia. Niiden käytön soveltuvuutta voidaan arvioida kuvan 6.7 avulla, mutta pääsääntöisesti moottorikuristimet eivät ole riittäviä hyvin vanhoille moottoreille. Sinisuodattimet tekevät moottorijännitteestä lähes täysin sinimuotoista, jolloin moottorin eristykseen kohdistuvat rasitukset ovat syöttöverkkokäytön tasolla. Sinisuodattimet maksavat enemmän kuin itse moottori 250 kW tehoille asti, joten kiinteistöautomaation sovelluskohteissa tulee taloudellisemmaksi vaihtaa moottori, /GAMBICA/REMA, 2001/. Moottorien eristekestävyys tulee aina tarkastaa valmistajalta, jos vanha moottorikäyttö modernisoidaan taajuusmuuttajakäyttöiseksi.

#### **6.4.3 Laakerivirtojen syyt**

PWM-taajuusmuuttajan aiheuttamat laakerivirrat perustuvat sen tuottamaan korkeataajuiseen yhteismuotoiseen jännitteeseen. Korkeilla taajuuksilla eristeet eivät enää toimi täysin eristävinä rakenteina, vaan niiden suhteellisen pienetkin hajakapasitanssit

näkyvät koreataajuisille laakerivirroille mahdollisina kulkuteinä. PWM-taajuusmuuttaja voi aiheuttaa kaikkia kolmea tyyppiä edustavia laakerivirtoja; akselin maadoitusvirtaa, kiertäviä laakerivirtoja sekä kapasitiivista purkautumisvirtaa. Tärkeimpänä näistä virroista voidaan pitää akselin maadoitusvirtaa, mutta sekään ei ole todennäköinen puhallinkäyttöjen pääsääntöisellä tehoalueella. Ruotsissa TAC on kuitenkin todennut joitain tapauksia, joissa laakerit ovat hajonneet laakerivirtojen takia. /GAMBICA/REMA, 2002/

### **Kiertävät laakerivirrat**

Kiertävät laakerivirrat johtuvat staattorikäimityksestä moottorin runkoon vuotavan virran induktiivisesta kytkeytymisestä laakereiden, akselin sekä rungon muodostamaan silmukkaan. PWM-taajuusmuuttajan aiheuttama kiertävä laakerivirta ei ole käytännössä ongelma, jos moottorin runkokoko on alle IEC 280 eli tehona noin alle 90 kW. /GAMBICA/REMA, 2002/

### **Kapasitiivinen purkautumisvirta**

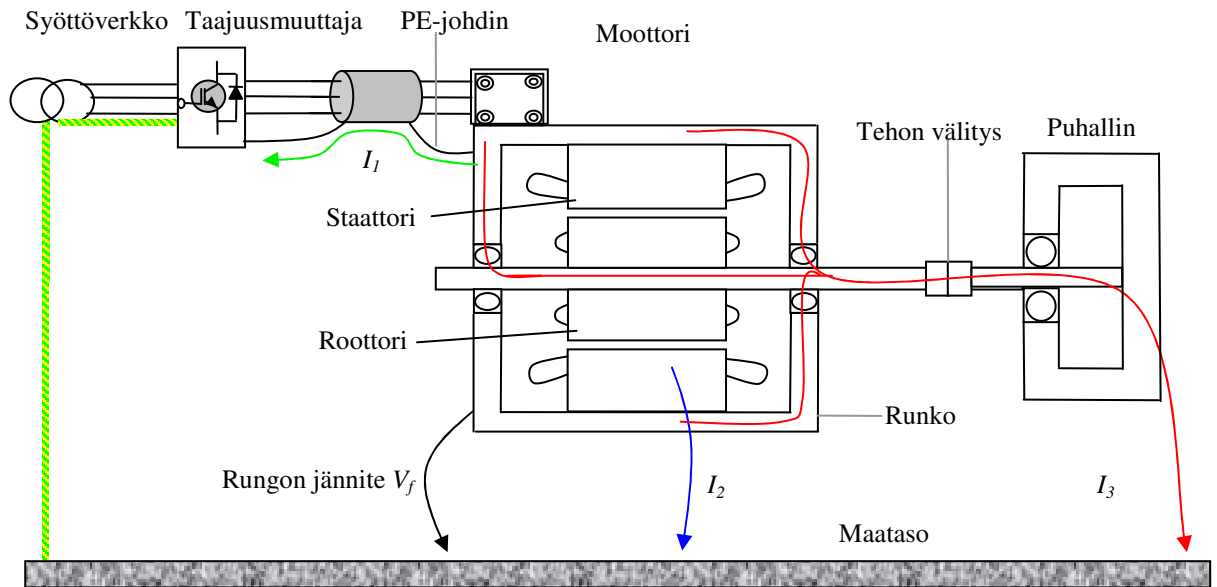
Yhteismuotoinen jännite jakaantuu moottorin sisällä sen kapasitanssien suhteessa, jolloin voi esiintyä laakereiden läpi kulkevia virtoja. Lähteessä /GAMBICA/REMA, 2002/ mainitaan akselin maadoitusvirran olevan huomattavasti tärkeämpi syy laakerivirtoihin kuin kapasitiivisen purkautumisvirran. Lähteessä /Rockwell, 2002/ esitetään, että akselin maadoitusvirran suhteellinen osuus laakerivirroista on tyypillisesti noin 30 kertaa suurempi kuin kapasitiivisen purkautumisvirran.

### **Akselin maadoitusvirta**

Akselin maadoitusvirta tarkoittaa sitä, että yhteismuotoinen vuotovirta kulkee moottorin laakerin läpi vievää reittiä pitkin takaisin taajuusmuuttajalle, kuva 6.8. Virta  $I_1$  kulkee PE-johdinta pitkin takaisin taajuusmuuttajalle menemättä lainkaan läpi laakereista. Reitti on myös toivottava EMC:n kannalta, koska tällöin virta ei mene syöttöverkkoon kulkematta suotimien läpi. Virta  $I_2$  kulkee moottorin rungon kautta maahan, läpäisemättä kuitenkaan laakereita. Siksi  $I_2$  ei ole haitallinen laakereille, mutta se voi aiheuttaa EMC-ongelmia muissa laitteistoissa. Kolmas virran reitti on kaikkein haitallisin, koska tällöin virta  $I_3$



kulkee laakereiden läpi. Lisäksi se voi aiheuttaa EMC-ongelmia. /GAMBICA/REMA, 2002/



Kuva 6.8. Yhteismuotoinen virta palaa takaisin taajuusmuuttajalle virtojen  $I_1 - I_3$  osoittamia reittejä pitkin. Virran  $I_3$  reitti kulkee moottorin laakereiden läpi ja on siksi kaikkein haitallisin.

Virran  $I_3$  kulkeminen edellyttää, että virtojen  $I_1$  ja  $I_2$  reittien induktanssi on riittävän suuri. Tällöin moottorin rungon jännite nousee ylittäen laakereiden eristyskestävyyden. Akselin maadoitusvirrat ovat estettävissä tarjoamalla virralle  $I_1$  mahdollisimman pieni-impedanssin eli induktanssin reitin takaisin taajuusmuuttajalle tai käyttämällä eristettyä tehonvälitystä. Sen lisäksi, että erityiset punotut moottorikaapelit tarjoavat hyvän EMC-suojan, on niiden induktanssi erittäin pieni. Hyvän kaapelin ohella on tärkeää päättää kaapeli 360-asteisella maadoituksella.

#### 6.4.4 Laakerivirtojen merkitys käytännössä

Kiinteistöautomaation tehoalueella laakerivirrat eivät vaadi erityisiä suojaustoimenpiteitä, jos taajuusmuuttajavalmistajan EMC-asennusohjeita noudatetaan tinkimättä. Huono EMC-maadoittaminen ja väärät kaapelit vaarantavat laakerit moottorikoon kasvaessa suurempien vuotovirtojen takia, jolloin myös akselin jännite nousee.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tutkia taajuusmuuttajien käyttämisen ongelmakohtia kiinteistöautomaatioissa, selvittää taajuusmuuttajan moottorille aiheuttamia rasituksia sekä laatia tarvittava ohjeistus ATV21- ja ATV61-taajuusmuuttajien lanseerausta varten. Työtä jatketaan järjestämällä koulutus TAC:n henkilöstölle sekä toteuttamalla pilottiprojektit. Taajuusmuuttajia käytetään kiinteistöissä varsin laajalti optimoimaan oikosulkumoottoreilla pyöritettävien puhallinten nopeus sekä energiataloudellisuuden että sisäilman laadun suhteen. Taajuusmuuttajien käyttämisen on kuitenkin huomattu johtaneen toistuvasti kiinteistöihin asennettujen muiden elektroniikkalaitteistojen toimintavirheisiin. Erityisesti ongelmia on esiintynyt kiinteistöautomaatiojärjestelmissä, joilla taajuusmuuttajia ohjataan. Valtaosassa tapauksista ongelman syynä ei ole itse taajuusmuuttaja, vaan EMC-asennusohjeiden vastaisesti toteutettu kytkentä.

PWM-taajuusmuuttajat syöttävät moottorille jännitepulsseja, joiden nousuaika mitataan kymmenissä tai enimmillään sadoissa nanosekunneissa. Nopeat jännitteen vaihtelut näkyvät korkeina häiriötaajuuksina aina megahertsien taajuuksille asti. Koska sekä kapasitiivinen että induktiivinen kytkeytyminen voimistuvat suoraan verrannollisena taajuuteen, tulee taajuusmuuttajan moottorikaapelointi toteuttaa erityisellä huolella verrattuna syöttöverkkokaapelointiin. Siinä missä EMC-asennusohjeiden mukaisesti toteutettu kytkentä on erittäin tärkeää, tulee myös taajuusmuuttajan parametrisointiin kiinnittää huomiota. Nykyiset taajuusmuuttajat käsittävät vähintään toista sataa parametria, jotka määrittävä taajuusmuuttajan toiminnan. Jotta parametrisointi olisi optimaalinen, täytyy sen tekijän tuntea sekä automaatiojärjestelmä, IV-kojeen toimintaperiaate sekä itse taajuusmuuttajan toiminta häiriötilanteissa. Parhaiten nämä hallitsee kiinteistöautomaatio-urakoitsija. Siksi vastuu muiden toimittajien taajuusmuuttajien parametrisoinnistakin pyritään jokseenkin usein siirtämään automaatio-urakoitsijalle.

Tällä työllä on merkitys ATV21- ja ATV61-taajuusmuuttajien käyttöönottamisen onnistumisessa Suomessa. Työssä tehdyt havainnot sekä tulokset tullaan esittämään myös muissa maissa. Laadittuja ohjeita kehitetään jatkossa edelleen sekä ne käännetään eri

---

kielille käytettäväksi TAC:n muissa yksiköissä ympäri Eurooppaa. TAC AB:n aloitteesta työssä laadittiin kattavat selitykset laakerivirroista sekä eristerasituksista, jotta näihin ilmiöihin osattaisiin varautua paremmin ennalta. Standardista EN 61800-3 tehdyllä selvityksellä on niin ikään huomattu olevan käyttöä sekä Suomessa että muualla TAC:n organisaatiota.

---

## LÄHDELUETTELO

- ABB, ”Technical Guide No.3 - EMC Compliant Installation & Configuration for a PDS”,  
ABB Automation Group Ltd 40 s., Viitattu /ABB:n TG3, 1999/
- ABB, ”Teknisiä tietoja ja taulukoita käsikirja”, ABB Automation Group Ltd 9. painos,  
2000, Viitattu /ABB:n TTT-käsikirja, 2000/
- ABB, ACS550 käyttäjänopas 2004, ABB Automation Group Ltd 255 s., Viitattu /ACS550,  
2004/
- D. Busse, J. Erdman, R.J. Kerkman, D. Schlegel ja G. Skibinski, ”Bearing Currents and  
Their Relationship to PWM Drives” IEEE Transaction on Power Electronics, VOL. 12,  
NO. 2, s. 243 – 252, MARCH 1997
- R.P. Clayton, “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, USA: John Wiley & Sons,  
Inc. 765s. 1. painos, 1992
- Danfoss, VLT6000 käyttöopas 2006, Oy Danfoss Ab 172 s., Viitattu /VLT6000, 2006/
- Draka Oy 2007, Internetsivut: <http://www.draka.fi/>
- T.P. Finlayson, ”Output Filters for PWM Drives with Induction Motors”, Annual Pulp and  
Paper Industry Technical Conference, Cincinnati 1997, Julkaistu uudestaan IEEE Industry  
Applications Magazine 1998
- A GAMBICA/REMA technical report, ”Motor Insulation Voltage Stresses Under PWM  
Inverter Operation”, 21 s. 2. painos, 2001, Viitattu /GAMBICA/REMA, 2001/
- A GAMBICA/REMA technical report No 2, ”Motor Shaft Voltages and Bearing Currents  
under PWM Inverter Operation”, 27 s. 1. painos, 2002, Viitattu /GAMBICA/REMA, 2002/
- A. von Jouanne and P. Enjeti, “Design Considerations for an Inverter Output Filter to  
Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications”, Power Electronics

---

Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Oregon State University, USA 1996

M. Kaufhold, G. Borner, M. Eberhardt ja J. Speck, "Failure Mechanisms of the Interturn Insulation of Low Voltage Machines Fed by Pulse Controlled Inverters" IEEE Electrical Insulation Magazine Vol 12, No. 5, s. 9 – 16, 1996

J. Kyyrä, Teknillisen korkeakoulun Tehoelektroniikan laboratorion kurssin "S-81.3110 Suuntaajatekniikka" opetusmonisteet, 2006

J. Niiranen, "Tehoelektroniikan komponentit", Otatiето 234 s. 3. painos, 2001

H.W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems", John Wiley & Sons 294 s. 1. painos, 1976

J. Pakanen, Teknillisen korkeakoulun Valaistuslaboratorion kurssin "S-118.280 Taloteknisten järjestelmien suunnittelu" opetusmonisteet, 2005

Rockwell Automation, Industrial White Paper "Inverter-Driven Induction Motors Shaft and Bearing Current Solutions", 45 s. 2002, Viitattu /Rockwell, 2002/

A. Räisänen ja A. Lehto, "Radiotekniikan perusteet", Otatiето 272 s. 10. painos, 2001

R. Sepponen, Teknillisen korkeakoulun Sovelletun elektroniikan laboratorion kurssin "S-66.204 Elektroniikka tuotteen suunnittelu II" opetusmonisteet, 2005

SKS Group Oy 2007, Internetsivut: <http://www.sks.fi/>

Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, "Urakoitsijan Yse-opas", Tammer-paino Oy, 5. painos, 2006, Viitattu /Yse-opas, 2006/

Telemecanique, ATV21 User Guide 2006, 244 s., Schneider Electric Oy,

Telemecanique, ATV61 User Guide 2006, 211 s., Schneider Electric Oy,

---

L. Tihanyi, "Electromagnetic Compatibility in Power Electronics", J. K. Eckert & Company, Inc. 3614 Webber St. Sarasota, Florida USA 402 s. 1995

Vacon, NXL käyttöopas 2006, 93 s., Vacon oy, Viitattu /NXL, 2006/

M. Venäläinen, Diplomityö "Taajuusmuuttajan aiheuttamien sähkömagneettisten häiriöiden syntymekanismit ja suodatus", 2001

J.C.G. Wheeler, "Effects of Converter Pulses on the Electrical Insulation in Low and Medium Voltage Motors", IEEE Electrical Insulation Magazine, March/April 2005 — Vol. 21, No. 2, s. 22 – 29

T. Williams, "EMC for Product Designers", Reed Educational and Professional Publishing Ltd 299 s. 2. painos, 1996

### **Standardit**

EN 61800-3, Adjustable speed electrical power drive systems part 3: EMC requirements and specific test methods, 2004

### **Haastattelut ja kyselyt**

Työssä haastateltiin kahdeksaa TAC:n työntekijää sekä yhtä aliurakoitsijaa.

Kysely TAC:n projektihenkilöstölle, 35 vastausta, liite A

Huoltohenkilöstön kysely, 16 vastausta, liite B

## **LIITE A KYSELY TAC:N PROJEKTIHENKILÖSTÖLLE**

Kysely toteutettiin sähköisenä kyselynä. Vastauksia saatiin 35 eri puolilta Suomea.

### **KYSELY**

Teen TAC:lle diplomityönä tutkimusta taajuusmuuttajista. Työn tarkoituksena on selvittää taajuus-muuttajien käyttämisen ongelmakohtia, tehdä käyttöönoton sekä parametrisoinnin ohjeistukset ja tutkia taajuusmuuttajan EMC-mukaista käyttöä.

Tämän kyselyn tarkoitus on selventää taajuusmuuttajan asentamiseen, käyttämiseen ja parametrisointiin liittyviä asioita. Kysely on tarkoitettu projekteista kokemusta omaaville henkilöille. HUOM. kysymykset koskevat vain puhaltimia ohjaavia taajuusmuuttajia. Tämä kysely poikkeaa huoltohenkilöstölle suunnatusta kyselystä.

Kyselyssä vastataan 10 kysymykseen - monivalintakysymyksiä ja avoimia kysymyksiä. Kysely on pyritty tekemään mahdollisimman nopeasti vastattavaksi. Ajatelkaa vastatessanne ainoastaan niitä projekteja, joissa itse olette olleet parin viime vuoden aikana osallisena. Jos ette halua tai osaa ottaa kantaa johonkin kysymykseen, niin vastatkaa **0**=en osaa arvioida. Antamanne tiedot käsittelen luottamuksellisesti.

Toivon kysymyksiin vastausta mahdollisimman pian. Jokaisen vastaus on äärimmäisen tärkeä, jotta voin tehdä kyselyn vastauksista päteviä johtopäätöksiä.

Minuun saa ehdottomasti ottaa yhteyttä, jos teillä on jotain taajuusmuuttajiin liittyvää asiaa mielen päällä.

Ystävällisin terveisin Antti Koponen

**KYSYMYKSET 1-3 OVAT TAUSTAKYSYMYKSIÄ****1. Mihin toimipaikkaan kuulutte?**

Etelä-Suomi      Itä-Suomi      Länsi-Suomi      Keski-Suomi      Pohjois-Suomi

_____	_____	_____	_____	_____
-------	-------	-------	-------	-------

**2. Mitä seuraavia työtehtäviä hoidatte?**

Huolto      Projektinhoito      Käynnistys      Ohjelmointi      Asennus

_____	_____	_____	_____	_____
-------	-------	-------	-------	-------

Muu,  
mikä?\_\_\_\_\_**3. Miten usein olette tekemisissä taajuusmuuttajiin liittyen, kun ajatellaan hoitamianne projekteja?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina

A) Uudiskohteet:	0	1	2	3	4	5
------------------	---	---	---	---	---	---

B) Saneerauskohteet:	0	1	2	3	4	5
----------------------	---	---	---	---	---	---

**KYSYMYKSET 4-5 KOSKEVAT TAAJUUSMUUTTAJAN HANKKIMISTA****4. Kuinka usein seuraavat urakoitsijat hankkivat taajuusmuuttajat?** Arvioikaa prosentuaalista jakaumaa, esim. 60%, 30%, 10%, 0% (yhteensä 100%) tai jättäkää kentät tyhjäksi.

Automaatiourakoitsija      Ilmastointiurakoitsija      Sähköurakoitsija      Joku muu

_____ %	_____ %	_____ %	_____ %
---------	---------	---------	---------

Jos joku muu, niin mikä?\_\_\_\_\_

**5. Miten hyvin seuraavat taajuusmuuttajien hankkimiseen liittyvät väittämät pitävät havaintojenne mukaan paikkaansa?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina.**Jos taajuusmuuttajan on hankkinut AU niin,**

A) taajuusmuuttaja on ollut oikean kokoinen moottorin kannalta.	0	1	2	3	4	5
---	---	---	---	---	---	---



B) taajuusmuuttajasta on puuttunut ainakin aluksi suotimia.

0 1 2 3 4 5

C) taajuusmuuttajasta on puuttunut ainakin aluksi I/O ohjauksessa tarvittavia liitäntöjä yksi tai enemmän.

0 1 2 3 4 5

D) taajuusmuuttaja on lämmennyt liikaa koteloinnin takia

0 1 2 3 4 5

E) kotelon läpivienteihin on jätetty muita kuin EMC-holkkeja.

0 1 2 3 4 5

F) taajuusmuuttajasta on puuttunut jotain muuta

0 1 2 3 4 5

mitä? \_\_\_\_\_

**Jos taajuusmuuttajan on hankkinut joku muu kuin AU niin,**

A) taajuusmuuttaja on ollut oikean kokoinen moottorin kannalta.

0 1 2 3 4 5

B) taajuusmuuttajasta on puuttunut ainakin aluksi suotimia.

0 1 2 3 4 5

C) taajuusmuuttajasta on puuttunut ainakin aluksi I/O ohjauksessa tarvittavia liitäntöjä yksi tai enemmän.

0 1 2 3 4 5

D) taajuusmuuttaja on lämmennyt liikaa koteloinnin takia

0 1 2 3 4 5

E) kotelon läpivienteihin on jätetty muita kuin EMC-holkkeja.

0 1 2 3 4 5

F) taajuusmuuttajasta on puuttunut jotain muuta

0 1 2 3 4 5

mitä? \_\_\_\_\_

- G) Taajuusmuuttajan asentamiseen, käyttämiseen, parametrisointiin ja käyttöönottoon on kulunut enintään saman verran aikaa kuin AU:n hankkimien taajuusmuuttajien samoihin töihin
- |  |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|---|

- H) Taajuusmuuttaja on tilattu tehtaalta parametrisoituna
- |  |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|---|---|---|---|---|---|

Kenen urakkaan EMC-holkkien toimittaminen kuuluu? \_\_\_\_\_

Kommentteja tai täsmennyksiä väittämistä?

## KYSYMYS 6 KOSKEE TAAJUUSMUUTTAJAN PARAMETRISOINTIA

**6. Miten hyvin seuraavat taajuusmuuttajien parametrisointiin liittyvät väittämät pitävät havaintojenne mukaan paikkaansa?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina

**Parametrisointi on onnistunut hyvin,**

- |  |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
| A) jos sen on tehnyt tehtaan edustaja. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| B) jos sen on tehnyt IU.               | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C) jos sen on tehnyt SU.               | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| D) jos sen on tehnyt AU.               | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| E) joku muu, kuka _____                | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

**Kuinka kauan yhden taajuusmuuttajan parametrisointi sinulta kesimäärin kestää? Voit antaa myös aikahaitarin. Kommentoi sitä.**

A) oma taajuusmuuttaja: \_\_\_\_\_

B) muun toimittama taajuusmuuttaja: \_\_\_\_\_

**Arvioikaa myös seuraavia parametrisointiin liittyviä väittämiä, kun taajuusmuuttajan on hankkinut joku muu kuin AU**

- |  |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
| A) Taajuusmuuttajan parametrisointi on kuulunut urakkarajan mukaan AU:lle  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| B) Taajuusmuuttajan parametrisointi ei ole kuulunut urakkarajan mukaan AU:lle, mutta se on sopimuksella ostettu myöhemmin AU:lta                     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C) Muiden hankkimien taajuusmuuttajien parametrisoinneissa on esiintynyt enemmän virheitä kuin AU:n hankkimien taajuusmuuttajien parametrisoinneissa | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| D) Joudun itse tekemään/muuttamaan edes osittain parametrisointia, vaikkei se sopimuksien mukaan olisi AU:lle kuulunutkaan.                          | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| E) Laskutan edellisessä tilanteessa käyttämäni tunnit.   | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Jos ette laskuta kaikkia tunteja, niin miksi? Kommentteja väittämistä?

---



---



---

**KYSYMYS 7 KOSKEE TAAJUUSMUUTTAJAN SIJOITTAMISTA JA KAAPELOINTIA**

**7. Miten usein seuraavat taajuusmuuttajan sijoittamiseen ja kaapelointiin liittyvät väittämät pitävät havaintojenne mukaan paikkaansa?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina

- |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A) Taajuusmuuttaja on asennettu moottorin välittömään läheisyyteen.                                     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| B) Käytettävyyden kannalta taajuusmuuttaja on asennettu hankalasti. (kommentoi lopussa, jos ei 0 tai 1) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C) Pitkät moottorikaapelit ovat aiheuttaneet ongelmia.  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

D) C-kohdan tilanteen takia taajuusmuuttajan paikka on vaihdettu.	0	1	2	3	4	5
E) Jos moottorikaapeli on ollut pitkä, taajuusmuuttajaan on asennettu lisäsuotimia.	0	1	2	3	4	5
F) Alakeskuksen häiriösuojien kytkentäkisko on maadoitettu vähintään 10 mm <sup>2</sup> kaapelilla	0	1	2	3	4	5
G) Taajuusmuuttajan ja ryhmäkeskuksen välinen PE-johdin on suuruudeltaan vähintään 10 mm <sup>2</sup>	0	1	2	3	4	5
H) Alakeskuksen häiriösuojien kytkentäkiskoa ei ole maadoitettu	0	1	2	3	4	5
I) Olen havainnut ohjauskaapelin häiriösuojan kytkemisen molemmista päistä aiheuttavan häiriötä joidenkin laitteiden toimintaan	0	1	2	3	4	5
J) Olen havainnut häiriösuojan kytkemisen vain toisesta päästä aiheuttavan häiriötä joidenkin laitteiden toimintaan	0	1	2	3	4	5

Kommentteja  
väittämistä? \_\_\_\_\_

### KYSYMYKSET 8-9 KOSKEVAT TAAJUUSMUUTTAJAN LON-VÄYLÄÄ

**8. Miten usein käytetään seuraavia ratkaisuja taajuusmuuttajien ohjaamiseen ja tilojen (esim. käyntitieto, hälytys) valvontaan?** Arvioikaa prosentuaalista jakaamaa (esim. 10%, 30%, 60% =100%)

Väylä (LON)	Väylä (LON) + I/O-kortti	I/O-kortti
_____%	_____%	_____%

**9. Miten hyvin seuraavat taajuusmuuttajan väyläratkaisuihin (LON) liittyvät väittämät pitävät paikkaansa?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina

Jos taajuusmuuttajaan on asennettu/myyty väyläratkaisu, se johtuu siitä, että

A) asiakas on näin alun perin tai urakan kuluessa vaatinut

	0	1	2	3	4	5
B) AU on esittänyt asiakkaalle väylän käyttämistä ja asiakas siksi on sen ostanut.	0	1	2	3	4	5

Jos asiakas on AU:n suosituksesta väylän ostanut, miksi asiakas sen osti, miten perusteltiin?

---

**Jos omaatte omakohtaista kokemusta LON-väylän käyttämisestä ja LON-väylä on taajuusmuuttajaan asennettu, niin arvioikaa myös seuraavia väittämiä ajatellen vain AU:n omia taajuusmuuttajia.**

A) Väylä pysyy toiminnassa yhtä varmasti kuin I/O-ohjaus/valvonta.	0	1	2	3	4	5
B) Väylän kautta taajuusmuuttajan parametrisointi onnistuu vähintään yhtä hyvin kuin taajuusmuuttajan oman paneelin kautta.	0	1	2	3	4	5
C) Ohjelmoin taajuusmuuttajaan parametreja väylän kautta, jos väylä on asennettu.	0	1	2	3	4	5
D) Taajuusmuuttajan operointi väylän välityksellä on ohjeistettu hyvin.	0	1	2	3	4	5
E) Väylän käyttämisestä on selvää käytännön hyötyä I/O-ohjaukseen verrattuna.	0	1	2	3	4	5
F) Väylän etuja osataan hyödyntää riittävästi.	0	1	2	3	4	5

Jos ette ohjelmoi kaikkia parametreja väylän kautta, niin miksi?

---

**10. Mitä muita ongelmia tai puutteita olette havainneet taajuusmuuttajiin liittyen? Miten ongelmat on mahdollisesti ratkaistu?** Saa ja tulee kertoa vapaasti mitä tahansa, pieniä tai suuria asioita esim. suunnitelmista, ohjeistuksista, ammattitaidosta, kaapeleista, lämpenemisistä, kommentoida kyselyä, täydentää vastauksia jne.

---

---

---

---

---

---

Jos olette huomanneet moottoreita, joiden laakerit tai eristykset ovat hajonneet selvästi alle käyttöiän, pyydän ottamaan suoraan yhteyttä minuun (Antti Koponen). Myös kaikessa muussa taajuusmuuttajiin liittyvissä asioissa minuun saa ehdottomasti olla yhteydessä.

---

## LIITE B KYSELY TAC:N HUOLTOHENKILÖSTÖLLE

Kysely toteutettiin sähköisenä ja siihen vastasi 16 henkilöä.

### KYSELY

Teen tac:lle diplomityönä tutkimusta taajuusmuuttajista. Työn tarkoituksena on selvittää taajuus–muuttajien käyttämisen ongelmakohtia, tehdä käyttöönoton sekä parametrisoinnin ohjeistukset ja tutkia taajuusmuuttajan EMC-mukaista käyttöä.

Tämän kyselyn tarkoitus on selventää taajuusmuuttajan asentamiseen, käyttämiseen ja parametri–sointiin liittyviä asioita. Kysely on tarkoitettu huoltohenkilöstölle. HUOM. kysymykset koskevat vain puhaltimia ohjaavia taajuusmuuttajia. Kysely poikkeaa projektihenkilöstölle suunnatusta kyselystä.

Kyselyssä vastataan 9 kysymykseen, monivalintakysymyksiä ja avoimia kysymyksiä. Kysely on pyritty tekemään mahdollisimman nopeasti vastattavaksi. Ajatelkaa vastatessanne ainoastaan niitä huoltokeikkoja, joissa itse olette olleet parin viime vuoden aikana osallisena. Jos ette halua tai osaa ottaa kantaa johonkin kysymykseen, niin vastatkaa 0=en osaa arvioida. Antamanne tiedot käsittelen luottamuksellisesti.

Toivon kysymyksiin vastausta mahdollisimman pian. Jokaisen vastaus on äärimmäisen tärkeä, jotta voin tehdä kyselyn vastauksista päteviä johtopäätöksiä.

Minuun saa ehdottomasti ottaa yhteyttä, jos teillä on jotain taajuusmuuttajiin liittyvää asiaa mielen päällä.

Ystävällisin terveisin Antti Koponen

**1. Mihin toimipaikkaan kuulutte?**

Etelä-Suomi      Itä-Suomi      Länsi-Suomi      Keski-Suomi      Pohjois-Suomi

\_\_\_\_\_

**2. Oletteko erikoistuneet johonkin työtehtävään, mihin?****3. Miten usein olette tekemisissä taajuusmuuttajiin liittyen, kun ajatellaan hoitamianne huoltokeikkoja?**

A) \_\_\_\_\_% kaikista keikoista liittyy jollain tavalla taajuusmuuttajan aiheuttamaan vikaan tai ongelmaan.

**Jos taajuusmuuttaja on liittynyt jollain tavalla huoltokeikkaanne, niin**

Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina.

B) minä itse tai tac on pystynyt korjaamaan taajuusmuuttajaan liittyneen vian/ongelman

0      1      2      3      4      5

C) tac:n ulkopuolinen taho on korjannut taajuusmuuttajaan liittyneen vian/ongelman.

0      1      2      3      4      5

**4. Miten usein olette huomanneet seuraavia asioita taajuusmuuttajiin liittyen?**

Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina.

A) Moottorin nimellisvirta-arvon parametri on ollut väärin.

0      1      2      3      4      5

B) Jokin muu parametri on ollut väärin.

0      1      2      3      4      5

C) Taajuusmuuttaja on ollut käsikäytöllä eikä alakeskuksen säädössä.

0      1      2      3      4      5

D) Taajuusmuuttajasta on puuttunut suotimia.

0      1      2      3      4      5



- 
- E) Taajuusmuuttaja on lämmennyt liikaa
- 0    1    2    3    4    5
- F) Kun edellä mainittu ongelma (E) on esiintynyt, niin se on ratkaistu jättämällä kotelon ovi auki/raolleen.
- 0    1    2    3    4    5
- G) Taajuusmuuttajan koteloinnin läpivienneistä on puuttunut EMC-holkkeja yksi tai enemmän
- 0    1    2    3    4    5
- H) Taajuusmuuttajan tai sen ohjaaman moottorin huono maadoitus on aiheuttanut selviä häiriöitä taajuusmuuttajan tai muiden laitteiden toiminnassa.
- 0    1    2    3    4    5
- I) Ohjauskaapeli on niputettu syöttö- tai moottorikaapelin kanssa yhteen taajuusmuuttajan päästä.
- 0    1    2    3    4    5
- J) Syöttö- ohjaus- tai moottorikaapelit ovat suurimman osan pituudestaan lähempänä kuin 20 cm päässä toisistaan
- 0    1    2    3    4    5
- K) Kotelon sisällä olevat ohjauskaapelin johdot on kuorittu lähes koko matkalta
- 0    1    2    3    4    5
- L) Taajuusmuuttajalta lähtevät moottorikaapelit ovat olleet suojaamattomia, esim. MMJ
- 0    1    2    3    4    5
- M) L-kohdan tilanteessa on havaittu selviä häiriöitä taajuusmuuttajan tai muiden laitteiden toiminnassa
- 0    1    2    3    4    5
- N) Pitkät moottorikaapelit ovat aiheuttaneet selviä häiriöitä taajuusmuuttajan tai muiden laitteiden toimintaan
- 0    1    2    3    4    5

Miten L (→M) ja N-kohdan ongelmat on ratkaistu? Kommentteja väittämistä?

---

**5. Mitä muita taajuusmuuttajiin liittyviä vikoja tai ongelmia olette olleet korjaamassa?** Selittäkää myös miten ongelma tai vika on ratkaistu, ellei ongelmasta tai viasta itsestään käy selville sen ratkaisu. Jos teillä on enemmän asiaa, ota yhteyttä!

---



---

**6. Miten hyvin seuraavat taajuusmuuttajan väyläratkaisuihin (LON) liittyvät väittämät pitävät paikkaansa?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina

Arvioikaa vain, jos omaatte omakohtaista kokemusta taajuusmuuttajan LON-väylästä.

A) Väylä pysyy toiminnassa yhtä varmasti kuin I/O-ohjaus/valvonta.

0 1 2 3 4 5

B) Ohjelmoin taajuusmuuttajaan parametreja väylän kautta, jos väylä on asennettu.

0 1 2 3 4 5

C) Väylän kautta taajuusmuuttajan parametrisointi onnistuu vähintään yhtä hyvin kuin suoraan taajuusmuuttajan oman paneelin kautta.

0 1 2 3 4 5

D) Taajuusmuuttajan operointi väylän välityksellä on ohjeistettu hyvin.

0 1 2 3 4 5

E) Väylän käyttämisestä on selvää käytännön hyötyä I/O-ohjaukseen verrattuna.

0 1 2 3 4 5

F) Väylän etuja osataan hyödyntää riittävästi.

0 1 2 3 4 5

Jos ette ohjelmoi kaikkia parametreja väylän kautta, niin miksi? Kommentteja väittämistä?

---

**7. Mitä esteitä koette taajuusmuuttajan väylän käyttämisessä olevan?**

---

---

**8. Mitkä ovat mielestänne suurimmat edut, joita väylän käyttämisellä voidaan saavuttaa?**

---

**9. Miten mieltä olette seuraavista taajuusmuuttajan käyttämiseen liittyvistä väittämistä?** Arvioikaa seuraavan numeroasteikon mukaan: 0=en osaa arvioida, 1=ei/en koskaan, 2=harvoin, 3=joskus, 4=useimmiten, 5=(lähes) aina.

- |  |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
| A) Parametrien syöttö onnistuu minulta hyvin, jos näyttö on tyyliä: "n003" –enter– "1" eli vain muutama merkki näytetään kerrallaan, esim. Yaskawa | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| B) Edellä mainitulla näytöllä (kohta A) varustetun taajuusmuuttajan muu käyttäminen (pois lukien parametrien syöttö) onnistuu minulta hyvin        | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| C) Parametrien syöttö onnistuu minulta hyvin, jos näyttö on monirivinen (parametrin nimi näkyy), esim. Danfoss                                     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| D) Edellä mainitulla näytöllä (kohta C) varustetun taajuusmuuttajan muu käyttäminen (pois lukien parametrien syöttö) onnistuu minulta hyvin        | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

**Kommentoitavaa?**

---

Jos olette huomanneet moottoreita, joiden laakerit tai eristykset ovat hajonneet selvästi alle käyttöiän, pyydän ottamaan suoraan yhteyttä minuun (Antti Koponen). Myös kaikessa muussa taajuusmuuttajiin liittyvissä asioissa minuun saa ehdottomasti olla yhteydessä.