



MENETELMÄ EMI-SUODATTIMEN SUUNNITTELUN AUTOMATISOINTIIN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Jani Perttilä

Tarkastajat: Professori Pertti Silventoinen

DI Dai Trinh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jani Perttilä

Menetelmä EMI-suodattimen suunnittelun automatisointiin

Sähkötekniikan diplomityö

2022

76 sivua, 28 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Pertti Silventoinen

DI Dai Trinh

Avainsanat: EMC, EMI, EMI-suodatin, mitoitusmenetelmä

EMI tarkoittaa sähkömagneettista häiriötä, joka voi aiheuttaa sähkölaitteiden toimimattomuutta. Sille on asetettu rajoituksia erilaisissa standardeissa, jotka laitevalmistajien pitää täyttää. Laitteiden tuottamaa ja laitteeseen tulevaa EMI:ä voidaan suodattaa EMI-suodattimella, joka on elektroniikan komponenteista muodostuva kokonaisuus.

EMI-suodattimien mitoitus on monivaiheinen ja usein iteratiivinen prosessi. Suodatin voidaan jakaa CM- ja DM-osuuksiin ja ne mitoitetaan erikseen vaadittavan vaimennuksen ja asetettujen rajoitusten mukaan. Mitoituksessa on huomioitava EMI-suodattimen tilavuus, jotta se mahtuu sille osoitettuun paikkaan. EMI-suodattimen kokonaistilavuutta voidaan arvioida tarkastelemalla sen reaktiivisten komponenttien tilavuutta eri kertaluvuilla. Useamman kertaluvun suodattimissa on enemmän komponentteja verrattuna ensimmäisen kertaluvun suodattimeen, mutta komponentit ovat pienempiä sähköisiltä arvoiltaan ja tilavuudeltaan. Työn tavoitteena on muodostaa EMI-suodattimen suunnittelumenetelmä, jolla voidaan automatisoida suodattimen komponenttien mitoitus ja optimointia tilavuuden suhteen.

Työssä muodostetaan tavoitteen mukainen menetelmä, joka hyödyntää simulointia suodattimen mitoituksessa ja todentamisessa. Menetelmän perusteella kirjoitetaan Java-ohjelma, jolla voidaan todentaa menetelmän toiminta ja mitoittaa EMI-suodatin esimerkkikonvertterille. Menetelmää voidaan hyödyntää sellaisenaan tai siitä voidaan jatkokehittää edistyneempi mitoitusmenetelmä EMI-suodattimen suunnitteluun.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Degree Programme in Electrical Engineering

Jani Perttilä

Method for EMI filter design automation

Master's Thesis

2022

76 pages, 28 figures, 3 tables and 1 appendix

Examiner(s): Professor Pertti Silventoinen

M.Sc. Dai Trinh

Keywords: EMC, EMI, EMI filter, design method

EMI stands for electromagnetic interference that can cause a malfunction in electronic devices. Various standards limit the EMI for devices that manufacturers must meet. The EMI produced by the devices can be reduced with an EMI filter.

The design of the EMI filter is a multi-step and often iterative process. The filter can be divided into CM and DM sections, and they are designed separately. The volume of the filter must be taken into account so that it can fit in the place assigned to it. The total volume of the filter can be calculated by estimating the volume of reactive components. Multistage EMI filters have more components compared to first-order filters, but the components are smaller in terms of their electrical values and volume. The goal of this master's thesis is to create an EMI filter design method that can be used to automate design workflow and optimization.

In this thesis, a method is formed, which utilizes simulation for the design of the filter. Based on the method, a Java program is written that can be used to verify the operation of the method and it is also used to design an EMI filter for Buck converter. The method can be used as it is or it can be further developed into a more advanced design tool for EMI filters.

ALKUSANAT

Kiitän Kempower Oyj:ta tämän diplomityön rahoituksesta sekä professori Pertti Silventoista työn tarkastuksesta ja ohjauksesta. Erityisen suuren kiitoksen haluan antaa työn ohjaajalle Dai Trinhille, joka toimi mentorinani EMC:n ihmeelliseen ja syvään maailmaan. Ilman hänen laadukasta ohjausta ja ammattitaitoa, näin haastavan aiheen omaava diplomityö ei olisi valmistunut alle kuudessa kuukaudessa.

Lahdessa 9.11.2022

Jani Perttilä

SYMBOLIT JA LYHENTEET

Roomalaiset merkit

A	pinta-ala	[m ²]
A	vaimennus	
a	Fourier-kerroin	
B	magneettivuon tiheys	[T]
b	Fourier-kerroin	
C	kapasitanssi	[F]
c	Fourier-kerroin	
D	pulssisuhde	
d	etäisyys	[m]
f	taajuus	[Hz]
I	virta	[A]
IL	välilyöntävaimennus	
J	virrantiheys	[A/m ²]
K	vakio	
k	vakio	
M	kertaluku	
N	asteluku	
N	käämin kierrosluku	
P	teho	[W]
R	resistanssi	[Ω]
r	väre	[%]

T	jaksonaika	[s]
T	lämpötila	[K]
t	aika	[s]
U	jännite	[V]
V	tilavuus	[m ³]
Z	impedanssi	[Ω]

Kreikkalaiset merkit

γ	magneettivuon väre	
ε	permittiivisyys	[F/m]
η	hyötysuhde	
ω	kulmataajuus	[rad/s]

Vakiot

ε_0	Tyhjiön permittiivisyys	$10^{-9}/36\pi$
-----------------	-------------------------	-----------------

Dimensiottomat suureet

π	pii	
n	1,2,3...	

Alaindeksit

c	konvertteri
cap	kapasitiivinen komponentti
cho	induktiivinen komponentti

core	sydän
cu	kupari
damp	vaimennin
dB	muuttujan yksikkö on dB
dB μ V	muuttujan yksikkö on dB μ V
dc	tasavirta
f	suodatin
i	virta
in	tulo
lk	vuoto
limit	raja
load	kuorma
margin	marginaali
max	suurin arvo
min	pienin arvo
noise	häiriö
nom	nimellinen
out	lähtö
p	product
r	suhteellinen
rise	nousu
step	askel
sw	kytkentä
t	korjaus

u	täyttö
w	ikkuna
wi	kanssa
wo	ilman

Käytetyt lyhenteet

AP	area product
EMC	electromagnetic compatibility
EMI	electromagnetic interference
IL	insertion loss
LISN	line impedance stabilization network

Tiivistelmä

Alkusanat

Symbolit ja lyhenteet

1	Johdanto.....	11
1.1	Aikaisempi tutkimus	12
1.2	Tavoite ja tutkimuskysymykset.....	13
1.3	Työn rajaus.....	14
1.4	Menetelmät ja työn rakenne	14
2	EMC	16
2.1	Kytkentämekanismit (coupling mechanisms).....	16
2.1.1	Johtuva kytkentyminen	17
2.1.2	Säteilevä kytkentyminen.....	17
2.2	Kytkentätavat (coupling modes)	17
2.2.1	Eromuotoinen kytkentätapa (DM).....	18
2.2.2	Yhteismuotoinen kytkentätapa (CM).....	19
2.3	EMI-päästöt ja -mittaukset.....	19
2.3.1	LISN.....	19
2.3.2	Separattori	21
2.3.3	CM- ja DM-virran mittaaminen virtaprobella	22
3	EMI-suodattimet.....	23
3.1	Suodatintyytit	23
3.1.1	L- ja C-suodatin	24
3.1.2	LC- ja CL-suodatin	25
3.1.3	π - ja T-suodatin.....	25
3.1.4	Useamman kertaluvun suodattimet.....	26
3.2	CM-suodatus	26
3.3	DM-suodatus	27
3.4	Yhdistetty suodatus	27
3.5	Kaupalliset suodattimet.....	28

4	EMI-suodattimen suunnittelu	29
4.1	Vaadittavan vaimennuksen ja rajataajuuden määrittäminen	29
4.1.1	DM-häiriön arvioiminen	29
4.1.2	CM-häiriön arvioiminen	34
4.2	DM-suodattimen mitoitus, stabiilius ja todennus.....	37
4.2.1	Vaimennus (damping).....	40
4.2.2	DM-suodattimen todennus.....	43
4.3	CM-suodattimen mitoitus ja todennus	44
4.3.1	CM-suodattimen todennus	45
4.4	Yhdistetyn suodattimen todennus	46
5	EMI-suodattimen optimointi	48
5.1	EMI-suodattimen tilavuus.....	48
5.1.1	Induktiivisten komponenttien tilavuus.....	48
5.1.2	Kondensaattorien tilavuus.....	50
5.1.3	EMI-suodattimen kokonaistilavuus	51
5.2	EMI-suodattimen topologia	51
5.3	EMI-suodattimen lämpösuunnittelu.....	53
6	EMI-suodattimen suunnittelumetodi ja -ohjelma.....	56
6.1	Lähtötietojen määrittäminen.....	60
6.2	Vaadittavan vaimennuksen määrittäminen.....	61
6.3	EMI-suodattimen komponenttien määrittäminen.....	62
6.3.1	RC-vaimentimen laskenta.....	62
6.4	Suunnitellun EMI-suodattimen todennus.....	63
6.5	Suodattimen tilavuus lämpösuunnittelun parametrilla.....	64
7	Tulokset	65
8	Yhteenveto.....	69
	Lähteet	71

Liitteet

Liite 1. Fourier-analyysi muuttuvalle pulssisuhteelle

1 Johdanto

Kaikki ympärillämme olevat sähkölaitteet ovat alttiita toimintahäiriöihin, jotka johtuvat sähkömagneettisista häiriöistä (Williams, T. 2007, alkusanat). Häiriöillä tarkoitetaan kaikkea sähkömagneettista säteilyä, joka voi huonontaa laitteiden toimintaa taajuudesta ja kytkentätavasta (coupling) riippumatta (Williams, T. 2007, 27). EMC (Electromagnetic Compatibility) kuvaa laitteiden keskeistä yhteensopivuutta ja se saavutetaan, kun laitteet eivät häiritse muita laitteita, laitteet eivät häiriinny muista laitteista ja laitteet eivät häiritse itseään (Wyatt, K. & Jost, R. J. 2013, 4).

EMI (Electromagnetic interference) on ilmiö, jossa sähkölaitteiden sähkömagneettiset kentät (electromagnetic fields) häiriintyvät ja syntyy ei toivottuja signaaleja, jotka voivat aiheuttaa laitteiden toimintahäiriöitä (Musznicki, P. 2018). EMI on vakava ja lisääntyvä ympäristöä saastuttava muoto (V. K. Dhar, T. Y. Takpere, 1997). Se voi aiheuttaa pieniä ärsyttäviä ilmiöitä, kuten sähkömittarien virheellisiä lukemia (ten Have et al., 2019) tai hengenvaarallisia tilanteita, kuten hengityskatkos monitorin toimimattomuutta (Williams, T. 2007, 4). Tulevaisuudessa EMI ongelmat tulevat lisääntymään, koska sähköverkon kuormat ovat yhä enemmän epälineaarisia ja kasvavassa määrin sähkölaitteet ovat alttiimpia EMI-ongelmille (Das, 2015, 3). Siksi onkin tärkeää, että EMI päästöjä rajoitetaan.

Ensimmäinen EMC direktiivi astui voimaan vuonna 1996, josta tuorein kolmas versio on asetettu 2014 (Wainwright, N. 2015). Direktiivi rajoittaa laitteiden EMI-päästöjä ja asettaa vaatimuksia niiden häiriönkestolle (EU, 2014). Laittevalmistajien täytyy täyttää nämä direktiivin asettamat vaatimukset ennen kuin laite asetetaan markkinoille, joten EMC voi ratkaista pääseekö tuote markkinoille vai ei. Tästä johtuen EMC-suunnittelu on yksi kriittisimmistä vaiheista tuotekehityksessä.

EMI-suodatin on elektroniikan komponenteista koostuva kokonaisuus, jolla voidaan vähentää EMI-päästöjä ja näin parantaa EMC:tä (Tarateeraseth, 2011a). Se estää ei-haluttujen signaalien pääsyn häiriölähteestä muualle. Käytännössä mikään sähkölaite ei nykypäivänä täyty johtuville päästöille asetettuja vaatimuksia ilman jonkinlaista EMI-suodatinta (Paul, 2006, 385). Siksi EMI-suodatin on hyvin yleinen kokonaisuus sähkölaitteissa ja se pitää suunnitella oikein, jotta se toimii halutulla tavalla. Ei ole olemassa yhtä oikeaa matemaattista ratkaisua tai hyvin määriteltyä metodologiaa, jolla saataisiin

suunniteltua EMI-suodatin kaikkiin mahdollisiin tilanteisiin (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 28). Tästä johtuen EMI-suodatin täytyy usein suunnitella ja mitoittaa tapauskohtaisesti huomioiden systeemin ominaisuudet. EMI-suodatinta ei suunnitella samalla tavalla kuin muita elektroniikan suodattimia, vaikka niissä onkin yhtäläisyyksiä (Paul, 2006, 385). EMI-suodattimen suunnittelussa on otettava lukuisia asioita huomioon ja suunnitteluprosessi on usein iteratiivinen. Suunnittelutyötä helpottaakseen tässä työssä muodostetaan metodi, jolla suodattimen suunnittelua ja optimointia voidaan yksinkertaistaa.

1.1 Aikaisempi tutkimus

EMI-suodattimien suunnittelumetodeja kehitetty useita ja yksi ensimmäisistä (Shih et al., 1996) on julkaistu vuonna 1996. Kyseisessä julkaisussa esitetään metodi, jolla voidaan suunnitella EMI-suodatin mittaamalla ensin vaadittava vaimennus spektrianalyysaattorilla ja sen perusteella mitoittaa suodattimen komponentit. Tässä esitetyssä metodissa ei oteta huomioon häiriölähteen ja kuorman impedansseja, joilla on suuri merkitys EMI-suodattimen vaimennuskykyyn (Tarateeraseth, 2011). Julkaisussa: (Liu, Ye & Peng, 2020) osoitetaan kuinka kyseisellä metodilla mitoitettussa EMI-suodattimesta tulisi toimiva, mutta fyysiseltä kooltaan tarpeettoman iso.

Julkaisuissa kuten (Ye, Eberle & Liu, 2004), (Zhang et al., 2000) ja (Tarateeraseth, 2012) on esitetty erilaisia EMI-suodattimen suunnittelumetodeja, jotka toistavat pitkälti samaa kaavaa: Selvitetään häiriöiden lähtötaso ja suodattimelta vaadittava vaimennus, selvitetään tai arvioidaan häiriöimpedanssit, valitaan EMI-suodattimen topologia ja mitoitetaan komponentit. EMI-testausta on perinteisesti tehty EMI-vastaanottimilla, jotka toimivat taajuustasossa ja edellä mainituissa suunnittelumetodeissa suodattimelta vaadittavan vaimennuksen selvittäminen perustuu taajuustasossa mittaamiseen (Russer, 2011). Taajuustason mittalaitteilla saa hyvän mittausdatan EMI:stä, jonka perusteella voidaan määrittää vaadittava vaimennus EMI-suodattimelle. Taajuustasossa mittaamiseen liittyy kuitenkin ongelmia, kuten mittaukseen kuluva aika ja mittausjärjestelmän rakentaminen. Jotta tässä työssä muodostettava EMI-suodattimen suunnittelumetodi olisi käytännöllinen, metodissa hyödynnetään aikatasossa mitattuja tai simuloituja häiriösignaaleja. EMI-mittausten tekemistä aikatasossa on tutkittu julkaisussa (Lee, Liang & Cheng, 2005) ja

(Nemashkalo, Moonen & Leferink, 2020), joissa se todettiin olevan hyvä vaihtoehtoinen ratkaisu EMI-mittauksissa tuotekehitysvaiheessa.

Yllä mainitut ja useat muut EMI:n suodatukseen liittyvät julkaisut liittyvät usein mm. häiriöimpedansseihin, suodatintopologioihin ja häiriölähteen ominaisuuksien arvioimiseen (Raggl, Nussbaumer & Kolar, 2008). Usein EMI-suodattimen yksi tärkeimpiä suunnittelukriteerejä on sen fyysinen koko, jotta se mahtuu sille osoitettuun paikkaan. EMI-suodattimen suunnittelua siten, että sen tilavuus otetaan huomioon jo suunnittelun alkuvaiheessa, on tutkittu vähän (Raggl, Nussbaumer & Kolar, 2008). Julkaisuissa (Raggl, Nussbaumer & Kolar, 2008) ja (Heldwein, Kolar, 2009) on tutkittu mistä EMI-suodattimen tilavuus muodostuu ja miten komponenttien arvot sekä suodattimen kertaluku vaikuttaa siihen. Julkaisuissa ei kuitenkaan esitetä suodattimen suunnittelumetodia, jolla voitaisiin mitoittaa suodatinkomponenttien arvot ja optimoida topologiaavalintaa tilavuuden mukaan.

1.2 Tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on tehdä EMI-suodattimen suunnittelumetodi, jolla voidaan mitoittaa passiivisten EMI-suodattimien komponentit ja optimoida suodattimen kokonaistilavuutta. EMI-suodattimelta vaadittava vaimennus, pitää pystyä määrittämään mittaus- tai simulointidatasta. Metodin on pystyttävä mitoittamaan 1–3 kertaluvun suodattimen komponenttien sähköiset arvot, huomioiden systeemin stabiilius ja vuotovirtaa koskevat rajoitteet. Sen on myös määritettävä suodattimen fyysinen koko eli tilavuus, jonka perusteella voidaan vertailla eri kertaluvulla toteutettujen suodattimien tilavuuksia. Metodin pitää olla automatisoitavissa, jotta siitä voidaan myöhemmin kehittää työkalu passiivisten EMI-suodattimien mitoittamiseen. Tässä työssä vastataan tutkimuskysymyksiin:

- Miten passiivinen EMI-suodatin mitoitetaan?
- Miten EMI-suodattimen tilavuutta voidaan arvioida?
- Miten EMI-suodattimen mitoittamisprosessia voidaan automatisoida?

1.3 Työn rajaus

EMI-suodattimen toimintaa vaikuttaa lukuisat tekijät ja sen mitoittaminen on monivaiheinen prosessi, joka voidaan optimoida usean eri muuttujan suhteen. Tässä työssä optimointi tehdään suodattimen tilavuuden mukaan eikä suunnitteluprosessissa huomioida suodattimen hintaa. EMI-suodattimen lämpösuunnittelu on iso kokonaisuus, joka pitää huomioida suodattimen suunnittelussa, koska se vaikuttaa suodattimen vaimennukseen ja tilavuuteen. Tässä työssä lämpösuunnittelua tarkastellaan vain kriittisten komponenttien kannalta eikä perusteellista lämpötarkastelua tehdä suunniteltavalle suodattimelle.

Tässä työssä suodatinkomponenttien oletetaan olevan ideaalisia eli suodattimen vaimennuskykyyn ei vaikuta komponenttien epäideaalisuuksien aiheuttamat ilmiöt kuten resonanssi ja lämpenemä. Suunnittelumetodi toteutetaan kuitenkin siten, että sitä voidaan jatkokehittää huomioimalla komponenttien epäideaalisuudet.

EMI-suodattimen toimintaan vaikuttaa merkittävästi myös piirilevysuunnittelu, asennustapa ja mekaniikka suodattimen ympärillä, jotka rajataan pois tästä työstä. Suunnittelumetodia ei siis todenneta oikealla suodattimella tai mittauksilla vaan todennus tehdään simulointiohjelmalla, jotta ympäristön ja komponenttien aiheuttamia epäideaalisuuksia voidaan hallita.

1.4 Menetelmät ja työn rakenne

Tutkimuksen tavoitteisiin ja tutkimuskysymyksiin vastataan tekemällä kirjallisuuskatsaus EMC:hen ja EMI-suodattimiin. Pohjatietona oli EMC:n peruskurssi yliopistossa ja aikaisempi kesätyökokemus EMI-mittauksista. EMI-suodattimien toiminta ja mitoitus oli uusi kokonaisuus, johon tutustuttiin aiheeseen liittyvällä kirjallisuudella ja työn ohjaajan Dai Trinhin opastuksella. Työn lähteinä toimi aiheeseen liittyvät kirjat, joista merkittävimmät ovat (Williams, 2007) ja (Ozenbaugh, Pullen, 2000). Lisäksi työssä käytettiin lähteenä useita IEEE Xplore Digital Librarysta löytyviä tieteellisiä artikkeleita.

Ensimmäisessä asiakappaleessa käydään läpi EMC:n peruskäsitteitä, EMI-mittauksien perusteita ja EMI:ä aiheuttamien virtojen kulkureitit, jotka ovat merkittävässä roolissa EMI-suodattimen toiminnassa. Toisessa asiakappaleessa käsitellään EMI-suodattimien toiminta,

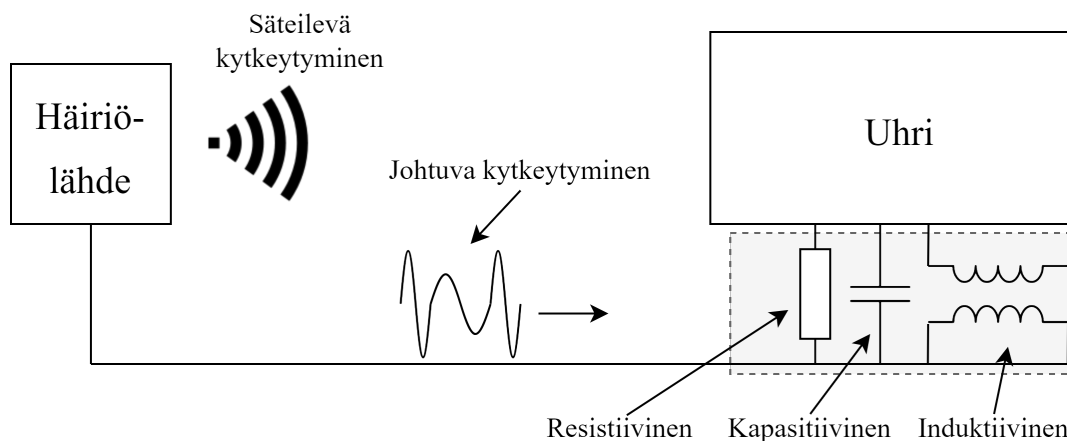
yleisimpiä suodatintopologioita ja käsitteitä. Nämä kappaleet antavat edellytykset ymmärtää kappaleen 4 EMI-suodattimen mitoituskappaleen, johon tässä työssä tehtävän metodin komponenttien mitoitus perustuu.

Kappaleessa 5 esitetään menetelmät, miten EMI-suodattimen tilavuutta ja kriittisten komponenttien lämpöparametreja voidaan arvioida. Kappaleessa 6 esitetään EMI-suodattimen suunnittelumetodi, joka perustuu edellä mainittuihin kappaleisiin. Kyseisessä kappaleessa esitetään myös ohjelma, joka perustuu kehitettyyn suunnittelumetodiin. Ohjelman avulla voidaan todentaa metodin toimivuus ja mitoittaa EMI-suodatin esimerkkikonvertterille. Ohjelman ja metodin toimivuutta tarkastellaan kappaleessa 7, jonka jälkeen työ vedetään yhteen yhteenvedossa.

2 EMC

EMC-ongelmissa on aina häiriölähde (source), josta häiriö on peräisin, ja uhri (victim), joka on altis häiriölle. Häiriö voi siirtyä lähteen ja uhrin välillä magneettikentän, sähkökentän tai molempien eli sähkömagneettisen kentän välityksellä. Se tarvitsee kytkentäreitin (coupling path), tai muuten häiriö ei välity uhriin. Kytkeämekanismi (coupling mechanism) kuvaa miten häiriö välittyy laitteeseen tai laitteesta, ja kytkentätapa (coupling mode) kuvaa miten häiriö näkyy laitteessa. (Williams, T. 2007, 222–234).

2.1 Kytkentämekanismit (coupling mechanisms)



Kuva 2.1. Kytkentämekanismit (mukaiillen Russer, 2011).

Häiriö voi siirtyä häiriölähteestä uhriin säteilemällä tai johtumalla, kuten kuvassa 2.1 on kuvattu. Käytännön laitteissa voi olla molempia kytkentämekanismia samaan aikaan ja ne voivat tapahtua useista eri pisteistä. (Williams, T. 2007, 222–228)

2.1.1 Johtuva kytkeytyminen

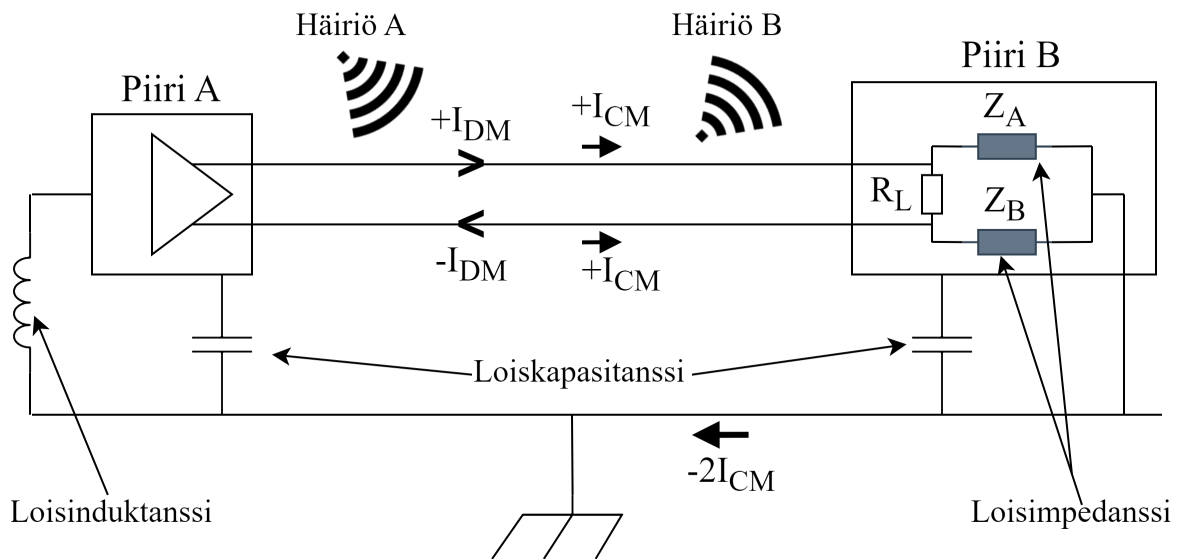
Johtuva kytkeytymisreitti häiriölle syntyy, kun häiriölähde fyysisesti yhdistetään uhriin johdoilla tai piirilevyn vedoilla. Tällöin häiriö pääsee välittymään laitteiden välillä samalla tavalla kuin hyötysignaalin. Johtuva kytkeytyminen voi muodostua tahattomasti induktiivisesti tai kapasitiivisesti. Laitteen metallinen kotelo, johdot, jäähdtyssiilet tai muut toimintaympäristön metalliset rakenteet voivat muodostaa loiskomponentteja, jotka toimivat suurtaajuuksisille häiriöille kytkeytymisreittinä. (Williams, T. 2007, 222–226).

2.1.2 Säteilevä kytkeytyminen

Säteilevällä kytkeytymisellä tarkoitetaan energian siirtymistä lähteestä uhriin pitkän matkan päästä eli ilman laitteiden välistä fyysistä kytkentäreittiä. Kun vaihtovirta (AC) kulkee systeemissä, se muodostaa sähkömagneettisia kenttiä. Johtimissa kulkevan virran muutokset muodostavat suurimman osan magneettikentästä ja solmupisteiden jännitteiden muutokset muodostavat suurimman osan sähkökentästä. Tämä muodostunut sähkömagneettinen kenttä voi aiheuttaa häiriöitä muissa laitteissa. (Williams, T. 2007, 229–230)

2.2 Kytkentätavat (coupling modes)

EMI voidaan jakaa kahteen kytkentätapaan: yhteismuotoiseen (common mode, CM) ja eromuotoiseen (differential mode, DM) kytkentään. Ne eroavat toisistaan häiriövirran kulkureittien osalta. Alla esitetyssä kuvassa 2.2 säteilevä häiriö A kytkeytyy systeemiin ja aiheuttaa DM- tai CM-virtoja systeemiin, riippuen siitä miten se kytkeytyy järjestelmään (Williams, T. 2007, 232–233).



Kuva 2.2. DM ja CM kytkentätapa (mukaillen Williams, T. 2007, 233–234).

Kuvan 2.2 piirit A ja B ovat yhdistetty kahdella johtimella. Ylemmässä johtimessa kulkee hyötysignaali ja alemmassa sen paluuvirta eli piirien välillä hyötysignaali kulkee differentiaalisesti kahden lähekkäin olevan johtimen avulla. Kuvaan 2.2 on merkitty syöttöjohdoista muodostunut loisinduktanssi ja mekaanisesta rakenteesta muodostuneet loiskapasitanssit. Z_A ja Z_B kuvaa loisimpedanssia johtimista maatasoon. Häiriö A on ulkoinen säteilevä häiriö ja häiriö B on systeemin lähettämä säteilevä häiriö.

2.2.1 Eromuotoinen kytkentätapa (DM)

Kun kuvan 2.2 ulkoinen häiriö A kytkeytyy systeemin johtimiin, se aiheuttaa molemmissa johtimissa DM-virtaa. I_{DM} kulkee samoissa johtimissa ja samaan suuntaan, kuin hyötysignaalikin eli se ei tarvitse maatasoa kulkeutumiseen (Williams, T. 2007, 232–233). I_{DM} häiriövirta voi syntyä myös laitteen sisällä, jos esimerkiksi laite on konverterti, joka kytkee suurella taajuudella kuormaa päälle ja pois (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 36).

Kuvan 2.2 häiriö B on johtimissa kulkevan virran aiheuttama häiriö, jota systeemi lähettää. DM-virrat eivät muodosta tätä häiriötä ideaalisessa tilanteessa, koska 180° vaihe-ero menojen ja paluuvirran välillä kumoaa toistensa kentät (Sevgi, 2017, 86–87). Käytännön piireissä

loisimpedanssit Z_A ja Z_B eivät kuitenkaan ole yhtä suuret ja syntyy CM-virtaa, joka aiheuttaa häiriön B. (Williams, T. 2007, 233–234)

2.2.2 Yhteismuotoinen kytkentätapa (CM)

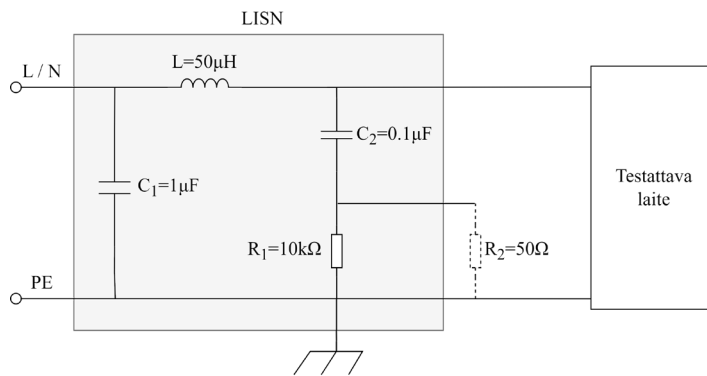
Yhteismuotoinen virta eli CM-virta I_{CM} kulkee molemmissa johtimissa samaan suuntaan ja sen paluureittinä on maataso. CM-virta ei yleensä ole hyötysignaali, joten sen muodostumista pyritään estämään. CM-virta voi muodostaa laitteen sisällä DM-muotoista virtaa ja aiheuttaa säteilevää sekä johtuvaa häiriötä. CM-häiriö voi muodostua, jos ulkoinen häiriö kytkeytyy laitteeseen ja sen johtoihin tai laitteen itsetuottama häiriö kulkeutuu loiskomponenttien kautta maatasoon. (Williams, T. 2007, 232–233)

2.3 EMI-päästöt ja -mittaukset

EMI-päästöt ovat jaettu taajuusalueittain kolmeen pääkategoriaan: 50Hz – 2kHz harmoniset, 150kHz – 30MHz johtuvat ja >30MHz säteilevät EMI-päästöt (Tarateeraseth, 2011). Tässä työssä keskitytään johtuviin päästöihin. Johtuvat päästöt voivat kuitenkin aiheuttaa säteileviä päästöjä, joten niiden vähentäminen usein myös vähentää säteileviä päästöjä (Paul, 2006).

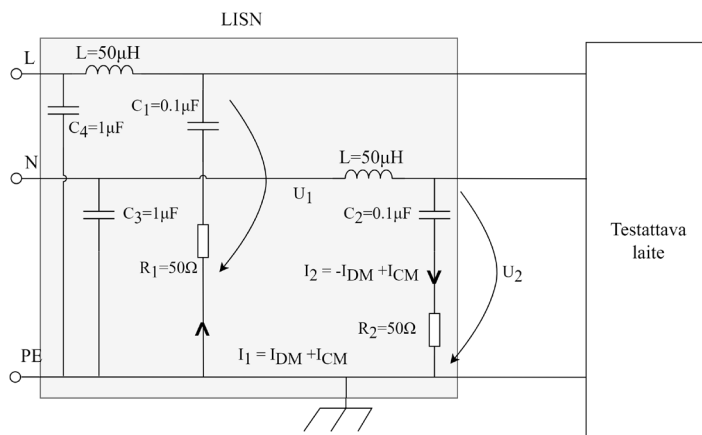
2.3.1 LISN

LISN (line impedance stabilization network) on systeemi, joka tulee mitattavan laitteen ja sähkösyötön väliin, kun suoritetaan EMI-mittauksia. LISN:in tehtävä on pitää tietyllä taajuusalueella tasainen impedanssi testattavalle laitteelle ja suodattaa sähkösyötöstä tulevat häiriöt, jotta ne eivät häiritse mittausta (Paul, 2006). Standardit määrittävät LISN:in ominaisuudet, jotta johtuvia päästöjä voidaan mitata luotettavasti ja toistettavasti (Kharanaq, Emadi & Bilgin, 2020). Alla on yleisesti käytetyn 50 μ H LISN:n yhden johtimen periaatekuva.



Kuva 2.3. Yleisesti käytetyn yhden vaiheen LISN:n periaatekuva. (Mukaiillen Kharanaq, Emadi & Bilgin, 2020)

Standardin mukaisia EMI-mittauksia tehdessä, LISN pitää lisätä jokaiseen vaiheeseen kuten kuvassa 2.4 on kuvattu. Kuvan 2.3 vastus R_2 on mittalaitteen eli tavallisesti EMI-vastaanottimen päässä oleva terminointivastus tai kuormavastus. Kuormavastus pitää huolen, että kuormitus on tasainen nollan ja vaiheen välillä (Paul, 2006 379–380). Kuvassa 2.3 ei ole huomioitu loiskikomponentteja, jotka vaikuttavat LISN:n ominaisuuksiin. Tässä työssä LISN:iä yksinkertaistetaan ja se oletetaan ideaaliseksi, jolloin laskenta helpottuu. Tämä oletus voidaan tehdä, koska se ei vaikuta merkittävästi metodin haluttuun tarkkuuteen. Komponenttien C_1 ja L tarkoitus on suodattaa sähköverkosta päin tulevia häiriöitä, C_2 estää DC-jännitteen kulkeutumisen mittalaitteelle ja R_1 vastuksen tarkoitus on purkaa C_2 , jos R_2 poistetaan (Paul, 2006).



Kuva 2.4. Yksinkertaistettu LISN-malli, jota käytetään tässä työssä

Kuvassa 2.4 on tässä työssä käytettävän yksinkertaistetun kahden vaiheen LISN:n periaatekuva.

2.3.2 Separaattori

Johtuvissa EMI-päästöissä on kyse virroista, jotka kulkevat kuvan 2.4 LISN:n R_1 ja R_2 vastusten läpi ja aiheuttavat jännitteen niiden yli. Nämä virrat koostuvat CM- ja DM-virroista ja ne pitää erotella toisistaan, jotta EMI:ä voidaan analysoida tarkemmin ja EMI-suodatin voidaan mitoittaa systeemille (Tarateeraseth, 2011). Kyseiset virrat aiheuttavat CM- ja DM-jännitteet vastusten yli, joten ne voidaan erottaa toisistaan vähentämällä tai lisäämällä U_1 ja U_2 riippuen siitä halutaanko mitata U_{CM} vai U_{DM} :

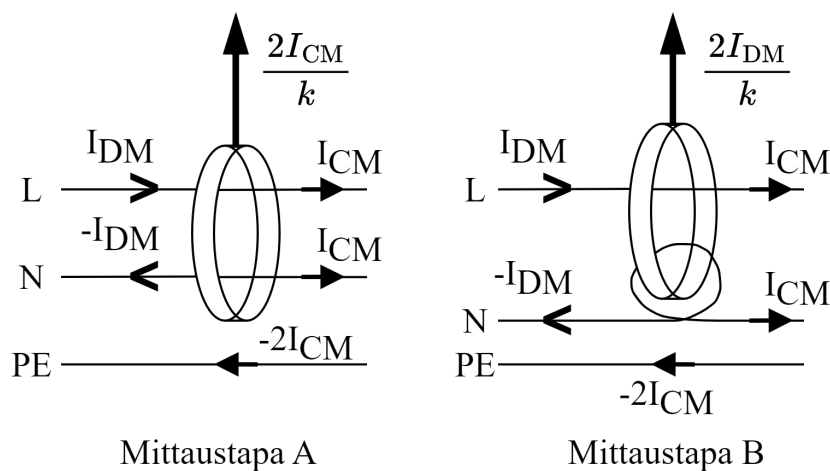
$$U_{DM} = \frac{U_1 - U_2}{2} \quad (1)$$

$$U_{CM} = \frac{U_1 + U_2}{2} \quad (2)$$

Tavallisesti EMI-mittauksissa käytetään taajuustasossa toimivaa EMI-vastaanotinta tai spektrianalysaattoria, joissa on vain yksi kanava. Tästä johtuen CM- ja DM-häiriö erotetaan toisistaan yleensä separaattorilla. Separaattori on fyysinen laite, joka jännitteiden polariteettia muuttamalla vähentää tai lisää niitä yhteen yhtälöiden 1 ja 2 mukaan. Separaattori tarvitsee toimiakseen LISN:n ja se tekee mittausjärjestelystä monimutkaisemman sekä kalliimman varsinkin suuritehoisia laitteita mitatessa. Tässä työssä esitetään vaihtoehtoinen tapa mitata EMI, jossa häiriövirtojen mittaamiseen ja erotteluun ei tarvita LISN:iä eikä separaattoria.

2.3.3 CM- ja DM-virran mittaaminen virtaprobella

CM- ja DM-virrat voidaan mitata virtaprobella, joka on yhdistetty oskilloskooppiin tai spektrianalysaattoriin. Mittausdata voidaan kerätä aikatasossa ja muuttaa myöhemmin taajuustasoon tai mitata suoraan taajuustasossa. Tällä tyylillä mitatessa ei tarvitse separaattoria, ja mittaus on yksinkertaisempi sekä kustannustehokkaampi verrattuna yllä mainittuun mittaustapaan (Ala et al., 2016). Virtaprobein mahdollinen saturoituminen ja mittausjärjestelyn mittaustarkkuus on huomioitava tuloksissa. EMI-suodattimen mitoituksen tapauksessa epätarkkuus on huomioitava siten, että suodattimelta vaadittava vaimennus on riittävä mittausepä-tarkkuudesta huolimatta. Kuvassa 2.5 on kuvattu häiriövirtojen mittaus virtaprobella.



Kuva 2.5. CM- ja DM-virtojen mittaus virtaprobella (Mukaiillen Li et al., 2019).

Mittaustavalla A saadaan mitattua CM-virta, koska vaihe- ja sen paluukaapeli kulkevat virtaprobein lävitse, jolloin ne kumoava toisensa ja jäljelle jää vain kaksinkertainen CM-virta. Mittaustavassa B virran paluureitin johdin viedään virtaprobein läpi vastakkaiselta puolelta, jolloin CM-virrat kumoavat toisensa ja jäljelle jää vain kaksinkertainen DM-virta. Jakaja k on virtaprobein vaimennuskerroin. (Li et al., 2019)

3 EMI-suodattimet

EMI-suodattimien peruseriaate on pitää laitteen sisällä muodostuneet johtuvat häiriöt laitteen sisällä ja estää ulkoisten johtuvien häiriöiden pääsy laitteeseen (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 24). EMI-suodatin sijoitetaan häiriölähteen kanssa sarjaan, ja niitä on aktiivisia, passiivisia ja näiden yhdistelmiä eli hybridejä. Tässä työssä keskitytään vain passiivisiin suodattimiin, koska ne ovat edelleen yleisin tapa toteuttaa EMI-suodatin. EMI-suodatin voi perustua häviöllisiin komponentteihin, kuten vastuksiin ja ferriitteihin, jolloin suodatin muuttaa häiriöenergian lämmöksi, tai häviöttömiin reaktiivisiin komponentteihin, kuten keloihin ja kondensaattoreihin, jolloin sen toiminta perustuu häiriön heijastamiseen takaisin lähteen suuntaan (Duff, 2011, 181–184).

3.1 Suodatintyypit

EMI-suodattimet ovat yleensä alipäästösuodattimia, jolloin ne vaimentavat suurtaajuuksiset häiriösignaalit. EMI-suodattimen vaimennuskykyä kuvataan välilyöntävaimennuksella eli IL:lla (insertion loss):

$$IL_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{load,wo}}{P_{load,wi}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{U_{load,wo}^2}{U_{load,wi}^2} \right) \quad (3)$$

jossa $P_{load,wo}$ on kuorman teho ilman EMI-suodatinta [W], $P_{load,wi}$ on kuorman teho suodattimen kanssa [W], $U_{load,wo}$ on kuorman jännite ilman EMI-suodatinta [V] ja $U_{load,wi}$ on kuorman jännite suodattimen kanssa [V]. (Paul, 2006)

EMI-suodattimet toteutetaan yleensä reaktiivisilla komponenteilla, koska häviölliset komponentit aiheuttavat paljon häviötehoa (Manushyn, 2019). Tällöin laitteen ja suodattimen välinen impedanssisovitus suunnitellaan huonoksi häiriötaajuuksilla eli impedansseilla on suuri ero. Hyötysignaalin taajuudella impedanssisovitus pitää olla hyvä eli impedanssien pitää olla yhtä suuret, jotta hyötysignaali ei vaimene (Ozenbaugh, Pullen,

2000, 22). Käytännön suunnittelussa tavoitteena on sovittaa impedanssit riittävän hyvin tai heijastaa häiriöt takaisin lähteeseen siten, että laite täyttää sille asetetut vaatimukset. EMI-suodattimen näkemät tulo- ja lähtöimpedanssit vaikuttavat EMI-suodatintyyppin valintaan, koska sen tehokkuus riippuu kuorman ja lähteen impedansseista eli häiriöimpedansseista (Duff, 2011, 185). Suodattimen topologia pitää valita siten, että se toimii tehokkaasti juuri kyseisen systeemin häiriöimpedanssiympäristössä (Manushyn, 2019).

3.1.1 L- ja C-suodatin

Yksinkertaisimmat suodatintyypit ovat shunttikondensaattori ja sarjassa oleva kela. Kondensaattori toimii jännitteen jakajana suuritaajuuksisille signaaleille, jos lähteen ja kuorman impedanssit ovat suurempia kuin kondensaattorin impedanssi. Kela muodostaa suuren impedanssin suuritaajuuksisille signaaleille, jos kuorman ja lähteen impedanssit ovat merkittävästi pienempiä kuin kelan impedanssi. (Joffe, Lock, 2011, 591–600)



Kuva 3.1. L- ja C-suodattimien vaimennus riippuu vahvasti häiriöimpedansseista. Katkoviiva kuvaa suodattimen osuutta (mukaillen Joffe, Lock, 2011, 591–600).

Suodattimissa, jossa on vain yksi reaktiivinen komponentti, teoreettinen maksimivaimennus on 20dB/dekadi. Vaimennus ei ole usein tarpeeksi varsinkin, kun häiriöimpedanssien muutos vaikuttaa merkittävästi vaimennuskykyyn ja loiskomponentit huonontavat merkittävästi teoreettista vaimennusta. Vaimennusta voidaan kasvattaa lisäämällä reaktiivisia komponentteja suodattimeen. Näin saadaan muodostettua LC- ja CL-suodatin. (Joffe, Lock, 2011, 591–600)

3.1.2 LC- ja CL-suodatin



Kuva 3.2. LC- ja CL-suodattimet, joiden teoreettinen maksimivaimennus on 40dB/dekadi (mukaillen Joffe, Lock, 2011, 591–600)

LC- ja CL-suodattimen suurin teoreettinen vaimennus on 40dB/dekadi riippumatta siitä kummin päin kela ja kondensaattori ovat, jos kuorma ja lähteen impedanssit ovat samat. Jos ne eivät ole, parhaan vaimennuksen saa laittamalla kondensaattorin suurempaan impedanssiin päin. Teoreettista vaimennusta voidaan edelleen kasvattaa lisäämällä reaktiivisia komponentteja, jolloin saadaan π -suodatin ja T-suodatin (Joffe, Lock, 2011, 591–600)

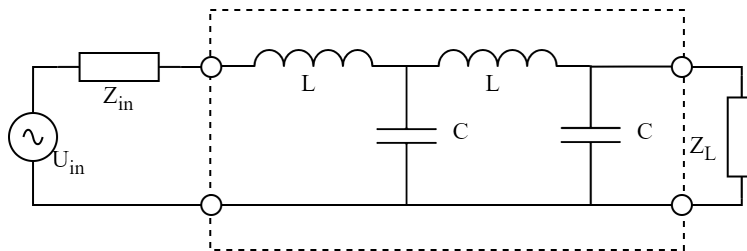
3.1.3 π - ja T-suodatin



Kuva 3.3. π -suodatin ja T-suodattimet, joiden teoreettinen maksimivaimennus on 60dB/dekadi (mukaillen Joffe, Lock, 2011, 591–600)

π - ja T-suodattimien teoreettinen vaimennus on 60dB/dekadi. Se kumpaa suodatintopologiaa kannattaa käyttää, riippuu kuorman ja lähteen impedansseista. π -suodatin toimii parhaiten suuri-impedanssisissa piireissä, kun taas T-suodatin toimii parhaiten pieni impedanssisissa piireissä. (Joffe, Lock, 2011, 591–600)

3.1.4 Useamman kertaluvun suodattimet



Kuva 3.4. Toisen kertaluvun LC-suodatin. Kertalukuja voi olla enemmänkin.

Useamman kertaluvun suodattimet muodostuvat, kun yhden kertaluvun suodattimia laitetaan sarjaan. Tällöin saadaan muodostettua esimerkiksi kuvan 3.4 toisen kertaluvun LC-suodatin. Useamman kertaluvun suodattimilla saadaan enemmän vaimennusta per dekadi verrattuna yhden kertaluvun suodattimiin. Niillä on myös useita muita etuja verrattuna ensimmäisen kertaluvun suodattimiin. Useamman kertaluvun suodattimia käytettäessä häiriöimpedanssien merkitys pienenee, koska häiriöimpedanssit ja suodattimien eri vaiheiden impedanssit ovat rinnakkain. Vaikka useamman kertaluvun suodattimissa on enemmän komponentteja, ovat komponentit fyysiseltä kooltaan pienempiä eli joissain tilanteissa voidaan saavuttaa suodattimelle pienempi fyysinen koko. Useamman kertaluvun suodattimet ovat kuitenkin kalliimpia ja monimutkaisempia verrattuna ensimmäisen kertaluvun suodattimiin, jonka takia ne eivät ole niin yleisiä tehoelektronikan sovelluksissa. (Manushyn, 2019).

3.2 CM-suodatus

EMI-suodattimissa olevat kondensaattorit jaetaan X- ja Y-kondensaattoreihin riippuen siitä, miten ne ovat kytketty piirissä. Kun suodattimella suodatetaan CM-häiriöitä, kondensaattorit ovat vaiheen (tai nollan) ja PE:n välillä, jolloin puhutaan Y-kondensaattoreista. CM-häiriöt voidaan suodattaa joko Y-kondensaattorilla tai kelalla kuten yllä olevissa suodatin topologioissa todettiin. Y-kondensaattori aiheuttaa vuotovirtaa, joka voi olla hengenvaarallista, joten sille on asetettu tiukkoja rajoituksia standardeissa. Myöskään yhden vaiheen isoa kelaa ei voi käyttää, koska kelan sydän saturoituu suurilla

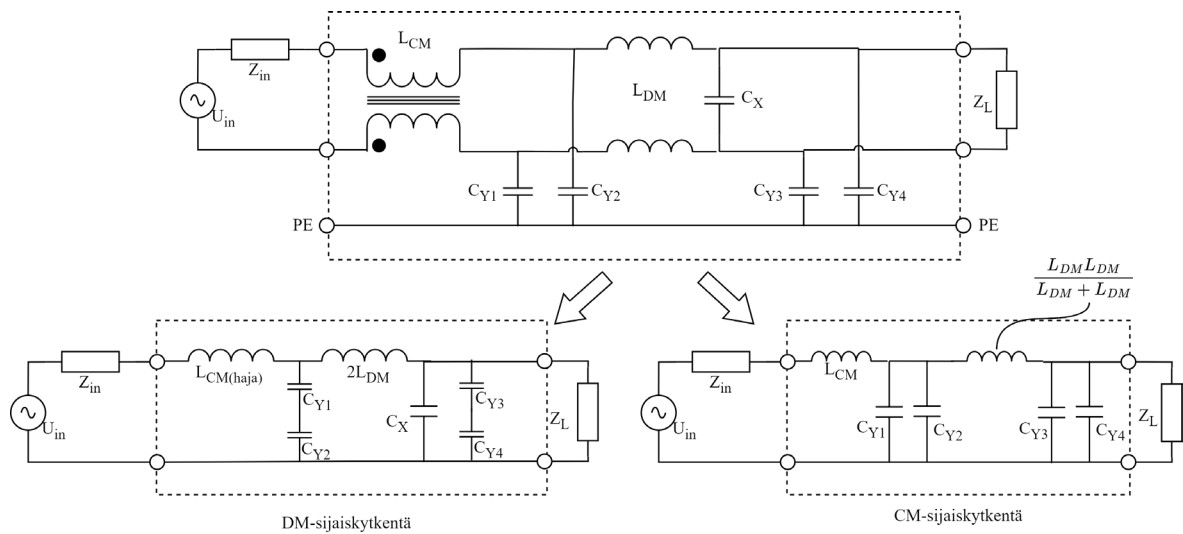
virroilla tai voi aiheuttaa jännitehäviöitä hyötysignaalille. CM-suodatukseen tarvittava kela voidaan korvata CM-kuristimella (CM-choke), joka on muuntaja, jossa on yhtä monta kierrosta molemmilla puolilla ja niiden polariteetit ovat samat. Kuristimen rakenteesta johtuen DM-virta kulkee sen läpi ideaalisessa tilanteessa muuttumattomana, koska DM-virrat kulkevat eri suuntiin kuristimessa ja niiden muodostamat magneettivuot (magnetic flux) kumoavat toisensa. CM-virrat kulkevat samaan suuntaan kuristimessa, joten se näyttää suurelta impedanssilta CM-virrälle eli se vaimentaa CM-häiriöitä. (Joffe, Lock, 2011, 598–599)

3.3 DM-suodatus

DM-häiriöt voidaan suodattaa joko X-kondensaattorilla eli kondensaattorit ovat vaiheen ja sen paluureitin välillä tai kelalla. CM-suodatuksessa käytettävä CM-kuristin ei ole ideaalinen komponentti, jonka takia sillä on hajainduktanssia (leakage inductance), joka näkyy DM-induktanssina. Tätä voidaan hyödyntää DM-häiriön suodatukseen X-kondensaattorien lisäksi. DM-kuristimen hajainduktanssi ei kuitenkaan välttämättä ole tarpeeksi, jos sen arvo on liian pieni tai tarvitaan useampi asteinen suodatin DM-häiriölle, jolloin on lisättävä induktanssia. Varsinkin isovirtaisissa sovelluksissa voi olla vaikeaa suunnitella kela, joka täyttää sille asetetut vaatimukset lämpenemälle, hinnalle ja muille kriteereille. Tällaisessa tilanteessa kelan induktanssi voidaan puolittaa virran meno- ja paluusuunnan välille. Käytännössä tämä toteutetaan usein DM-kuristimella (Tarateeraseth, 2012). (Joffe, Lock, 2011, Ozenbaugh, Pullen, 2000)

3.4 Yhdistetty suodatus

Kaikkia yllä mainittuja EMI-suodatin topologioita voidaan käyttää DM- sekä CM-häiriöiden suodatukseen. Käytännössä EMI-suodattimen täytyy suodattaa molemmat häiriöt, joten siinä on omat osuutensa eri häiriötyypeille, jotka pitää mitoittaa erikseen. Alla on esimerkki eräästä yhdistetystä suodattimesta ja sen CM ja DM osuuksista.



Kuva 3.5. Eräs EMI-suodatin topologia CM- ja DM-häiriön suodattukseen (mukailien Tihanyi, 1995, 186).

Kuvassa 3.5 on hyödynnetty CM-suodattimen hajainduktanssia DM-suodattukseen. Yhdistetyssä suodattimessa on mietittävä tapauskohtaisesti mihin järjestykseen CM- ja DM-osuudet tulevat ja millä topologialla suodatus kannattaa toteuttaa, jotta suunniteltu vaimennus saavutetaan.

3.5 Kaupalliset suodattimet

Useat eri yritykset tarjoavat valmiita tai custom-ratkaisuja EMI-suodattukseen. Tarjolla on useilla eri topologioilla toteutettuja suodattimia, joista yleisin on π -suodatin (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 80–85). Kaupallisia EMI-suodattimia ei voi valita suoraan valmistajan ilmoittaman vaimennuksen perusteella omaan sovelluskohteeseen, koska valmistajien ilmoittamat IL:t ovat tyypillisesti ilmoitettu 50Ω lähde- ja kuormaimpedansseille eli vaimennus ei vastaa oikean sovelluskohteen vaimennusta. Kaupallisten suodattimien valinnassa on otettava lukuisia asioita huomioon samaan tapaan kuin suodattimen mitoituksessakin. Näitä asioita ovat esimerkiksi: rajataajuus, tehonkesto, stabiilius, vaadittava vaimennus, mekaniikka, jäähdytys ja häiriöimpedanssit. (Duff, 2011, 184).

4 EMI-suodattimen suunnittelu

EMI-suodattimen suunnitteluun ei ole yhtä oikeaa tapaa, joka toimisi kaikissa tilanteissa ja samaan lopputulokseen voi päätyä usealla eri tavalla. Tässä työssä EMI-suodattimen mitoituksessa huomioidaan suodattimen rajoitteet vuotovirran ja impedanssin suhteen, joiden perusteella suodattimen komponentit mitoitetaan. Tässä kappaleessa kuvataan mitoitusprosessi esimerkin avulla.

4.1 Vaadittavan vaimennuksen ja rajataajuuden määrittäminen

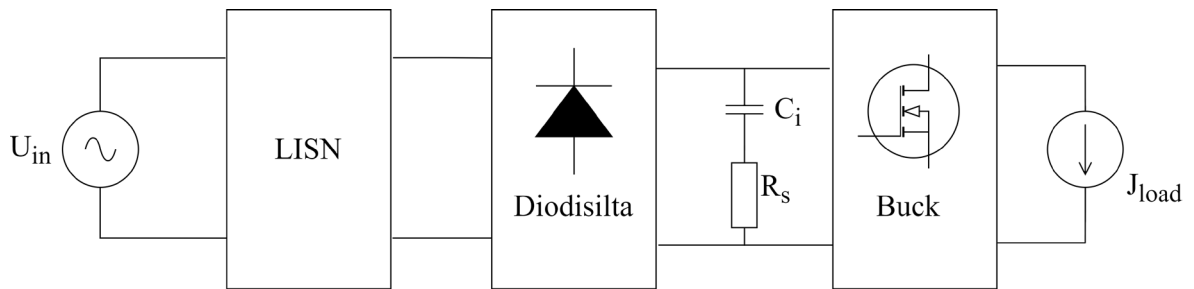
EMI-suodattimen suunnittelu alkaa EMI-suodattimelta vaadittava vaimennuksen määrittämisellä. Tässä kappaleessa johtuvia EMI-päästöjä verrataan CISPR22 standardin A-rajaaan. Vaadittava vaimennus saadaan, kun häiriölähteen aiheuttama häiriötä A_{noise} [dB μ V] verrataan standardin rajoihin A_{limit} [dB μ V] ja otetaan huomioon 3dB marginaali A_{margin} [dB μ V].

$$A_{dB\mu V} = (A_{noise} - A_{limit}) + A_{margin} \quad (4)$$

Häiriö A_{noise} saadaan mittaamalla tai simuloimalla. Jos mittausdataa ei ole mahdollista saada eikä häiriölähteestä ole kunnollista simulointimallia, voidaan häiriötä myös arvioida.

4.1.1 DM-häiriön arvioiminen

Tarkastellaan kuvan 4.1 Buck-konvertterin, jolle mitoitetaan EMI-suodatin. Suurin standardin mittausalueella oleva DM-häiriö esiintyy konvertterin kytkentätaajuudella tai jollain sen harmonisella taajuudella eli niitä tarkastelemalla voidaan arvioida vaadittavaa vaimennusta ja suunnitella EMI-suodatin.



Kuva 4.1. Tämän kappaleen esimerkissä käytettävä konvertteri.

Kuvan 4.1 konvertterin tiedot, joita tarvitaan EMI:n arvioimiseen ja suodattimen mitoitukseen on listattu taulukkoon 4.1:

Taulukko 4.1. Kuvan 4.1 esimerkkipöytäkonvertterin tiedot.

Tulojännite U_{in} [V]	115V
Tulojännitteen taajuus f_{in}	50Hz
Nimellisteho P_{in} [W]	1.6kW
Kytkeätaajuus f_{sw} [Hz]	20kHz
Kytkeänopeus t_{rise} [s]	10ns
Tasasuunnattu jännite U_{dc} [V]	$\sqrt{2} \cdot U_{in} \approx 163V$

Kuvan 4.1 konvertterissa suurin DM-muotoinen häiriö muodostuu jännitehäviöstä tulokondensaattorin yli (Schaffner, 2013). Tämä sama jännite näkyy myös LISN:n kautta EMI-mittauksissa eli loisresistanssin koko vaikuttaa suoraan häiriön suuruuteen. Mitä suurempi loisresistanssi, sitä suurempi häiriöjännite näkyy EMI-mittauksessa. Konvertterin DM-häiriötä voidaan arvioida, kun oletetaan muualta, kuten diodisillasta, tulevan DM-häiriön olevan merkityksetöntä. Konvertterin kuormaa kuvaa virtalähde, joka kuormittaa konvertteria nimellisteholla 1.6kW. Tällä teholla konvertterin nieluvirraksi (drain current) saadaan Ohmin lailla $I = P/U = 9.8A$. EMI:n kannalta pahin tilanne on 50% pulssisuhteella jolloin virta on kaksinkertainen eli noin 20A. Virran aaltomuoto on Buck-konvertterissa puolisuunnikkaan muotoista, mutta se voidaan arvioida olevan kantiaaltoa eli arvioidaan pahinta mahdollista tilannetta jolloin virralle voidaan muodostaa yhtälö:

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T/2 \\ 0, & T/2 \leq t < T \end{cases} \quad (5)$$

Häiriövirran huippuarvo on funktion $f(t)$ mukaan 1, koska tarkastelu tehdään normalisoituun signaaliin. Funktiolle muodostetaan Fourier-sarja, jotta saadaan selville tarkasteltavan virran harmoniset komponentit:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + b_n \cdot \sin(n\omega_0 t)] \\ &= c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n e^{jn\omega_0 t} - c_n e^{-jn\omega_0 t}] \end{aligned} \quad (6)$$

Jossa $n \in \mathbb{N}$, $\omega_0 = 2\pi/T$, a_0 , a_n , b_n ja c_n ovat Fourier-kertoimia:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T (f(t)) dt \quad (7)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T (f(t) \cdot \cos(n\omega_0 t)) dt \quad (8)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T (f(t) \cdot \sin(n\omega_0 t)) dt \quad (9)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (10)$$

Funktiolle $f(t)$ voidaan ratkaista kertoimet:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} (1) dt + \frac{2}{T} \int_{T/2}^T (0) dt = \frac{2}{T} \left(1t \Big|_0^{T/2} \right) = \frac{2}{T} \left(\frac{T}{2} - 0 \right) = \frac{T}{2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T (f(t) \cdot \cos(n\omega_0 t)) dt = \frac{2}{T} \left(\int_0^{T/2} (1 \cdot \cos(n\omega_0 t)) dt + \int_{T/2}^T (0 \cdot \cos(n\omega_0 t)) dt \right) \\
&= \frac{2}{T} \left(\frac{1}{\left(\frac{n2\pi}{T}\right)} \cdot 1 \cdot \sin\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) \Big|_0^{T/2} \right) = \frac{T}{n\pi} (\sin(n\pi)) = 0
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T (f(t) \cdot \sin(n\omega_0 t)) dt = \frac{2}{T} \left(\int_0^{T/2} (1 \cdot \sin(n\omega_0 t)) dt + \int_{T/2}^T (0 \cdot \sin(n\omega_0 t)) dt \right) \\
&= \frac{2}{T} \left(\frac{1}{\left(\frac{n2\pi}{T}\right)} \cdot 1 \cdot -\cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) \Big|_0^{T/2} \right) = \frac{1}{n\pi} (-\cos(n\pi) + 1) \\
&= \frac{1}{n\pi} (-(-1)^n + 1)
\end{aligned} \tag{13}$$

Jotta saadaan selville häiriölähteen aiheuttaman häiriön amplitudi, ratkaistaan kerroin c_n :

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \sqrt{b_n^2} = b_n = \frac{1}{n\pi} (-(-1)^n + 1) \tag{14}$$

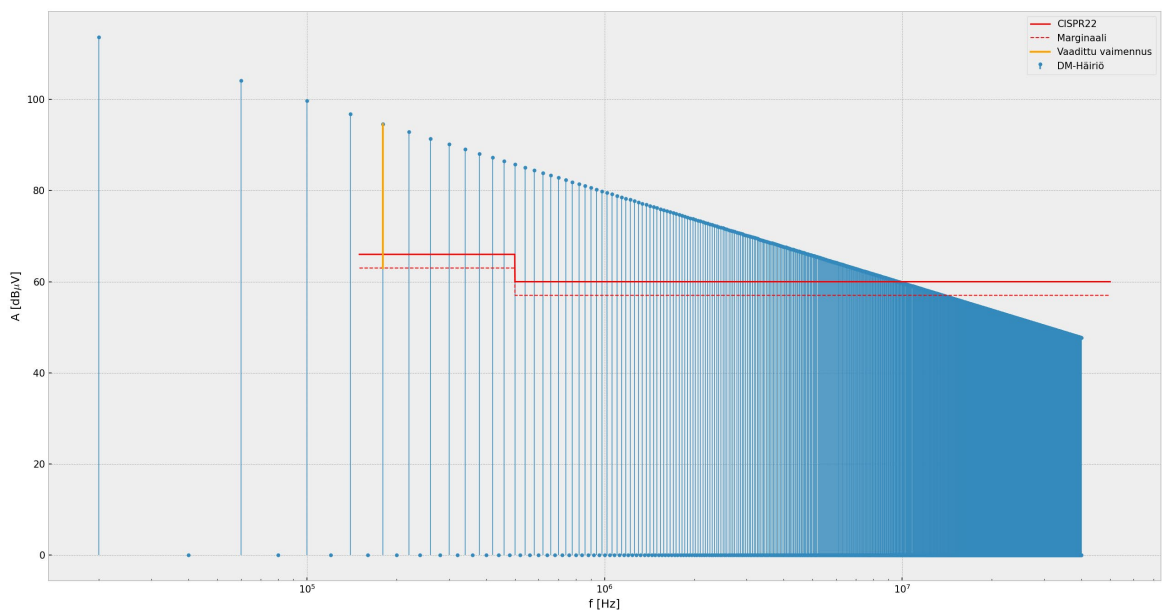
Koska Fourier-sarja muodostettiin normalisoidulle funktiolle, täytyy c_n , kertoa kondensaattorin loisresistanssin yli olevan jännitteen huippuarvolla.

$$c_n = \hat{U} \left(\frac{1}{n\pi} (-(-1)^n + 1) \right) \tag{15}$$

Lisäksi amplitudi halutaan muuttaa dB μ V, koska mittaukset ja EMI rajat on tyypillisesti ilmoitettu kyseisessä muodossa.

$$c_{n_dB} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\hat{U} \left(\frac{1}{n\pi} (-(-1)^{n+1}) \right)}{1\mu V} \right) \quad (16)$$

Jännite \hat{U} saadaan Ohmin lailla ratkaistua 0.76V, kun määritetään kuvan 4.1 systeemin loisisresistanssin R_s arvoksi 38m Ω ja häiriövirran I tiedetään olevan 20A. Yhtälöllä 16 saadaan muodostettua alla oleva jännitteen spektrijakauma:

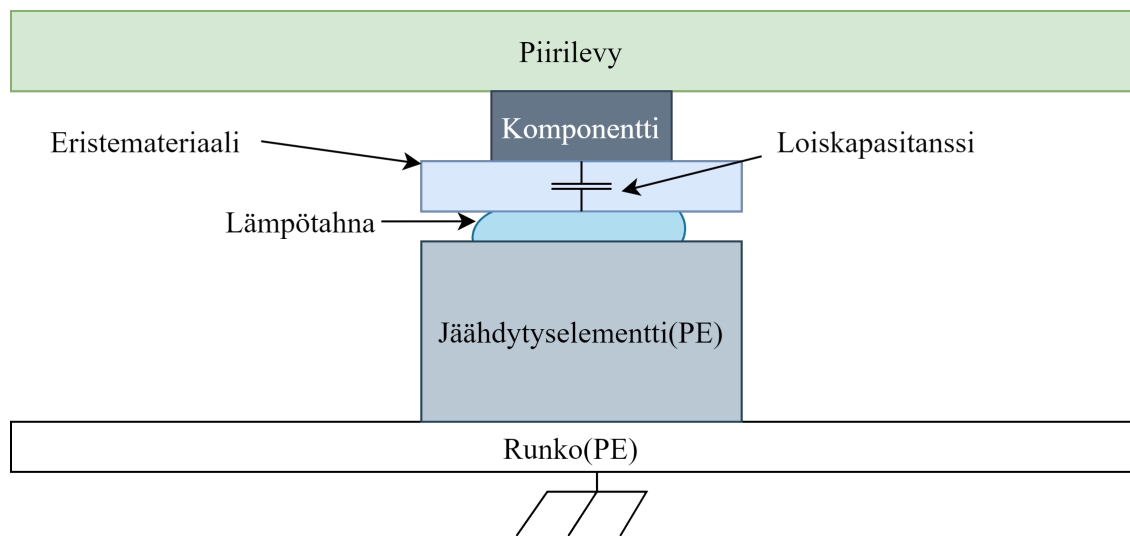


Kuva 4.2. DM-häiriö pienenee luonnolisesti 20dB μ V/dekadi.

Kuvassa 4.2 näkyy myös CISPR22 standardin määrittämä rajoitus EMI:lle. Ensimmäinen DM-häiriö, joka ylittää CIRPR22 rajan on yhdeksäs harmonien eli taajuudella 180kHz. Häiriösignaalin amplitudi on tuolloin noin 95 dB μ V, joten yhtälön 4 mukaan vaadittavaksi vaimennukseksi saadaan 32 dB μ V 180kHz taajuudella. (Schaffner, 2013, Beerends et al., 2003, Ozenbaugh, Pullen, 2000)

4.1.2 CM-häiriön arvioiminen

Systeemin CM-häiriöön vaikuttavat lukuisat tekijät, joten sen todenmukainen arviointi on erittäin hankalaa. CM-häiriö saadaan parhaiten määriteltyä mittaamalla se oikeasta datasta tai simuloimalla. Jos mittausdataa tai riittävän tarkkaa simulointimallia ei ole saatavilla, voidaan CM-häiriötä arvioida loiskapasitanssien avulla. Tarkastellaan esimerkkiä, jossa Buck-konvertterin nitkuvan solmupisteen ja PE:hen maadoitettuun jäähdytyselementin välille muodostuu loiskapasitanssia:



Kuva 4.3. Kondensaattori kuvaa loiskapasitanssia, joka aiheuttaa CM-häiriötä.

Loiskapasitanssi muodostuu eristeeseen nitkuvassa solmupisteessä olevan komponentin ja PE:hen kytketyn jäähdytyselementin välille. Eristemateriaalina toimii yleensä jokin kaupallinen eriste (tässä esimerkissä HI-FLOW™ 625) ja sen aiheuttamaa loiskapasitanssia voidaan arvioida tarkastelemalla litteän kondensaattorin kapasiteetin yhtälöä:

$$C_{CM} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} = \frac{\left(\frac{10^{-9}}{36\pi} \cdot 3.5\right) \frac{F}{m} \cdot 1 \text{cm}^2}{0.13 \text{mm}} \approx 25 \text{pF} \quad (17)$$

Jossa ϵ_0 tyhjiön permittiivisyys $10^{-9}/36\pi$ [F/m], ϵ_r on levyjen välissä olevan eristeen suhteellinen permittiivisyys, joka on tässä tapauksessa 3.5, A on levyn pinta-ala [m²], joka on tässä tapauksessa komponentin pinta-ala 1cm² ja d on levyjen välinen etäisyys [m], joka on tässä tapauksessa eristemateriaalin paksuus 0.13mm.

Tässä esimerkissä tarkastellaan tilannetta, jossa jäähtyssiili on maadoitettu PE:hen eli konvertterin jännitteen nousu- ja laskureunat nitkuvassa solmupisteessä lataavat tarkasteltavan loiskapazitanssin. Kun tiedetään CM-kapazitanssin suuruus, voidaan ratkaista virta, joka lataa kondensaattorin:

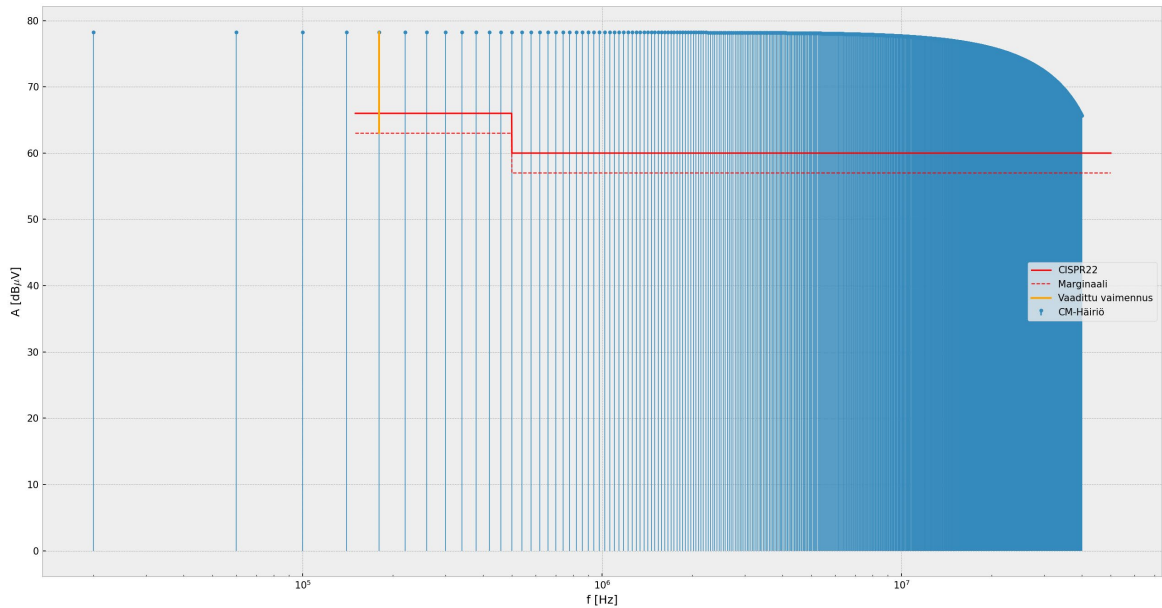
$$i_{\text{cap}} = C_{\text{CM}} \cdot \frac{U_{\text{dc}}}{t_{\text{rise}}} = 25\text{pF} \cdot \frac{163\text{V}}{10\text{ns}} \approx 407\text{mA} \quad (18)$$

Jossa U_{dc} on konvertterille tuleva jännite [V] ja t_{rise} on sen nousuaika. Tämä virta varaa tarkasteltavan loiskapazitanssin ja aiheuttaa jännitteen nitkuvasta solmupisteestä PE:hen. Jännitteen suuruus saadaan Ohmin lailla $U_{\text{CM}} = RI = 25\Omega \cdot 407\text{mA} \approx 10.2\text{V}$.

Loiskapazitanssi latautuu konvertterin kytkennän lasku- ja nousureunoilla. Jos loiskapazitanssi on alle 100pF, voidaan CM-virran aaltomuoto arvioida kanttiaalloksi, jonka pulssisuhde on:

$$D_{\text{CM}} = \frac{2 \cdot t_{\text{rise}}}{T} = \frac{2 \cdot 10\text{ns}}{25\mu\text{s}} = 4 \cdot 10^{-4} \quad (19)$$

CM-häiriön spektriksi liitteen 1 Fourier-muunnoksen mukaan saadaan:

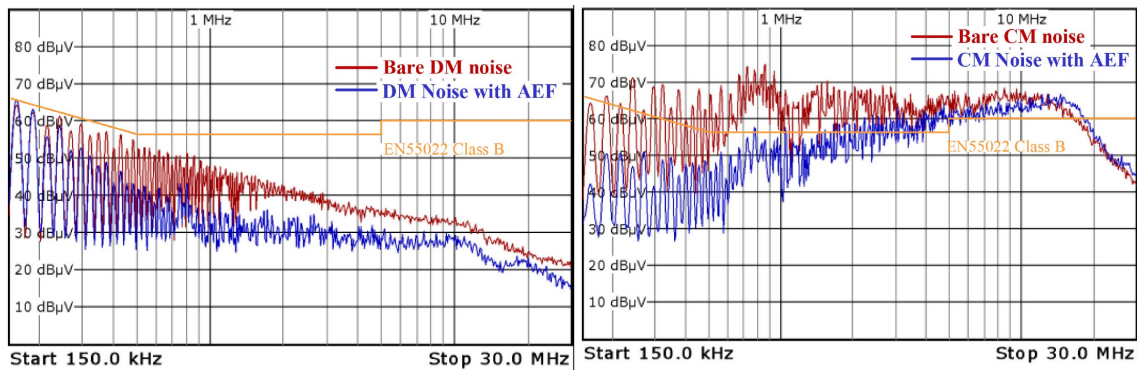


Kuva 4.4. CM-häiriön spektri. Häiriö ylittää punaisella merkityn standardin rajan.

Tämän jännitteen amplitudi yhdeksännellä harmonisella eli ensimmäisellä, joka osuu standardin mittausalueelle, on:

$$C_9 = \frac{2}{n} \cdot \frac{U_{CM}}{\pi} \cdot \sin(n\pi D) = \frac{2}{9} \cdot \frac{10.2V}{\pi} \cdot \sin(9\pi \cdot 10^{-4}) \approx 8.2mV \approx 78.3dB\mu V \quad (20)$$

Eli vaadittavaksi vaimennukseksi yhtälön 4 mukaan saadaan noin $9.3dB\mu V$. Alla on kuva oikeasta mittausdatasta, jossa on mitattu pienempitehoisen Buck-konvertterin DM- ja CM-häiriöt.



Kuva 4.5. Buck-konvertterista mitattu DM-häiriö (vas.) ja CM-häiriö (oik.) (punaiset signaalit). (Zhou et al., 2022)

Kun vertaa kuvan 4.5 oikeaa mittausdataa ja tässä kappaleessa arvoituja häiriöitä, voidaan todeta, että arviointimenetelmä noudattaa samaa trendiä kuin oikean mittauksen data. DM-häiriö laskee tasaisesti 20dB/dekadi, kun taas CM-häiriö pysyy tasaisempuna ja lähtee laskemaan vasta standardin mittausalueen loppupään taajuuksilla. Hajakapasitanssien lataavan virran aaltomuoto vaikuttaa merkittävästi CM-häiriöön ja lataavan virran aaltomuoto puolestaan riippuu hajakapasitanssien ominaisuuksista, ja siitä miten ne kytkeytyvät systeemissä. Esimerkiksi jäähdytyselementin maadoittamisella on iso merkitys CM-häiriön tuottamaan EMI-spektriin ja siksi CM-häiriö ei aina noudata kuvan 4.5 trendiä.

4.2 DM-suodattimen mitoitus, stabiilius ja todennus

DM-suodatin voi tehdä systeemistä epästabiilin, joten sen vaikutus konvertteriin on huomioitava. Systeemin stabiiliutta voi tarkastella esimerkiksi Nyquistin, Boden, Routh-Hurwitzin tai Middlebrookin stabiiliuskriteereillä, joista yleisin konvertterien tapauksessa on Middlebrook, joten sitä käytetään tässä työssä. (Boonruang, Tarateeraseth, 2018)

Middlebrookin stabiiliuskriteerin mukaan EMI-suodattimen lähtöimpedanssi pitää olla paljon pienempi kuin konvertterin avoimen piirin tuloimpedanssi ja konvertterin ideaalisen toimintapisteen tuloimpedanssi (Boonruang, Tarateeraseth, 2018). Tässä työssä stabiiliuskriteeriä yksinkertaistetaan siten, että EMI-suodattimen ominaisimpedanssi Z_f pitää

olla pienempi kuin konvertterin ominaisimpedanssi Z_c , jonka perusteella voidaan muodostaa yhtälö:

$$|Z_f| \ll |Z_c| \Leftrightarrow \left| \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \right| \ll \left| \frac{U_{\text{in}(\text{min})}^2 \cdot \eta}{P_{\text{out}}} \right| \Leftrightarrow \left| \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \right| \ll \left| \frac{U_{\text{in}(\text{min})}^2}{P_{\text{in}}} \right| \quad (21)$$

Jossa L_f on suodattimen induktanssi [H], C_f on suodattimen kapasitanssi [F], $U_{\text{in}(\text{min})}$ on konvertterin tulojännite [V] huonoimmassa mahdollisessa tilanteessa eli siten, että konvertterin ominaisimpedanssista tulee mahdollisimman pieni. Tässä esimerkissä kuvan 4.1 jännitelähteen ja diodisillan oletetaan olevan ideaalisia, eli konvertterin tulojännite on 163V, η on konvertterin hyötysuhde, P_{in} on konvertterin tuloteho [W] ja P_{out} on konvertterin lähtöteho [W]. Tämä yksinkertaistettu Middlebrookin stabiiliuskriteeri takaa systeemin stabiiliuden, mutta se ei takaa, että konvertterin toiminta pysyy muuttumattomana. Tämän kappaleen esimerkkikonvertterin ominaisimpedanssi saadaan laskettaua:

$$Z_c = \left| \frac{U_{\text{dc}}^2 \cdot \eta}{P_{\text{out}}} \right| = \left| \frac{U_{\text{dc}}^2}{P_{\text{in}}} \right| = \left| \frac{(163\text{V})^2}{1.6\text{kW}} \right| \approx 16.6\Omega \quad (22)$$

Suodatin täytyy mitoittaa siten, että yllä mainittu yksinkertaistettu Middlebrookin stabiiliuskriteeri täyttyy. Suodatin topologiaksi valitaan tämän kappaleen esimerkkiin LC-/CL-suodatin eli sen asteluku N on kaksi. Topologiaavalintaa käsitellään enemmän kappaleessa 5.2. Kun tiedetään suodattimen asteluku ja vaadittava vaimennus, voidaan laskea DM-suodattimen rajataajuus f_f vaimennuksen yhtälöstä (Ozenbaugh, Pullen, 2000):

$$A_{\text{dB}\mu\text{V}} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{f_n}{f_f} \right)^N \Leftrightarrow f_f = \frac{f_n}{10^{\frac{A_{\text{dB}\mu\text{V}(\text{DM})}{N \cdot 20}}} = f_n \cdot 10^{\frac{-A_{\text{dB}\mu\text{V}}}{N \cdot 20}} \quad (23)$$

$$\Leftrightarrow f_{f(\text{DM})} = 180\text{kHz} \cdot 10^{\frac{-32\text{dB}\mu\text{V}}{2 \cdot 20}} \approx 28.5\text{kHz} \quad (24)$$

Jossa $A_{dB\mu V}$ on vaadittava vaimennus [dB μ V], N on suodattimen asteluku ja f_n on ensimmäisen harmonisen taajuus, joka ylittää standardin mittausrajan [Hz]. Tämä taajuus selvitetiin kappaleessa 4.1.1. Rajataajuuksien ja stabiiliuskriteerin avulla saadaan ratkaistua DM-suodattimen induktanssi ja kapasitanssi, kun määritetään komponenttien impedanssiksi konvertterin impedanssi:

$$\begin{aligned} Z_{\text{cap}} &= \frac{1}{2\pi f_f C_f} \leftrightarrow C_f = \frac{1}{2\pi f_f Z_{\text{cap}}} = \frac{1}{2\pi f_f Z_c} \\ \leftrightarrow C_{f(\text{DM})} &= \frac{1}{2\pi f_{f(\text{DM})} Z_c} = \frac{1}{2\pi \cdot 41.2\text{kHz} \cdot 16.6\Omega} \approx 0.34\mu\text{F} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Z_{\text{cho}} &= 2\pi f_f L_f \leftrightarrow L_f = \frac{Z_{\text{cho}}}{2\pi f_f} = \frac{Z_c}{2\pi f_f} \\ \leftrightarrow L_{f(\text{DM})} &= \frac{Z_c}{2\pi f_{f(\text{DM})}} = \frac{16.6\Omega}{2\pi \cdot 41.2\text{kHz}} \approx 92.6\mu\text{H} \end{aligned} \quad (26)$$

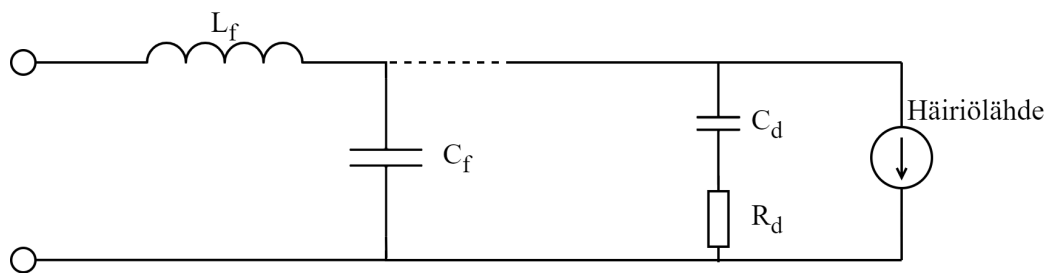
Stabiiliuskriteerin täyttymisen voi tarkistaa yhtälöllä:

$$\left| \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \right| \ll \left| \frac{U_{\text{in}(\text{min})}^2}{P_{\text{in}}} \right| \leftrightarrow \left| \sqrt{\frac{92.6\mu\text{H}}{0.34\mu\text{F}}} \right| \ll \left| \frac{(163\text{V})^2}{1.6\text{kW}} \right| \leftrightarrow 16.5\Omega \ll 16.6\Omega \quad (27)$$

Stabiiliuskriteerin mukaan suodattimen ominaisimpedanssi pitää olla paljon pienempi kuin konvertterin tuloimpedanssi. Mitä lähempänä impedanssit ovat keskenään, sitä käytännöllisempi suunniteltavasta suodattimesta tulee fyysisen koon ja komponenttien ominaisuuksien näkökulmasta. Suodattimen ominaisimpedanssi ei ole kuitenkaan vakio vaan muuttuu taajuuden mukaan, koska suodatin toteutetaan reaktiivisilla komponenteilla. Reaktiivisilla komponenteilla voi olla yksi tai useampi resonanssitaajuus, jolloin suodattimen impedanssi nousee korkeammaksi kuin konvertterin ominaisimpedanssi eli stabiiliuskriteeri ei toteudu. EMI-suodattimeen voidaan kuitenkin lisätä vaimenninpiiri, joka takaa, että stabiiliuskriteeri täyttyy kaikilla taajuuksilla.

4.2.1 Vaimennus (damping)

Tässä työssä keskitytään vaimentamaan EMI-suodattimen lähtöimpedanssi siten, että se täyttää yksinkertaistetun Middlebrookin stabiiluskriteerin. Vaimennuspiiri on tyypillisesti rinnakkainen RC-vaimennin, rinnakkainen RL-vaimennin tai sarja RL-vaimennin (Boonruang, Tarateeraseth, 2018). Tässä työssä käytetään rinnakkaista RC-vaimenninta, koska sillä voidaan vaimentaa EMI-suodattimen impedanssin huippuarvoa tehokkaasti ja käytännön sovelluksissa on mahdollista hyödyntää muita systeemin osia kuten coupling-kondensaattoreita vaimentimena.

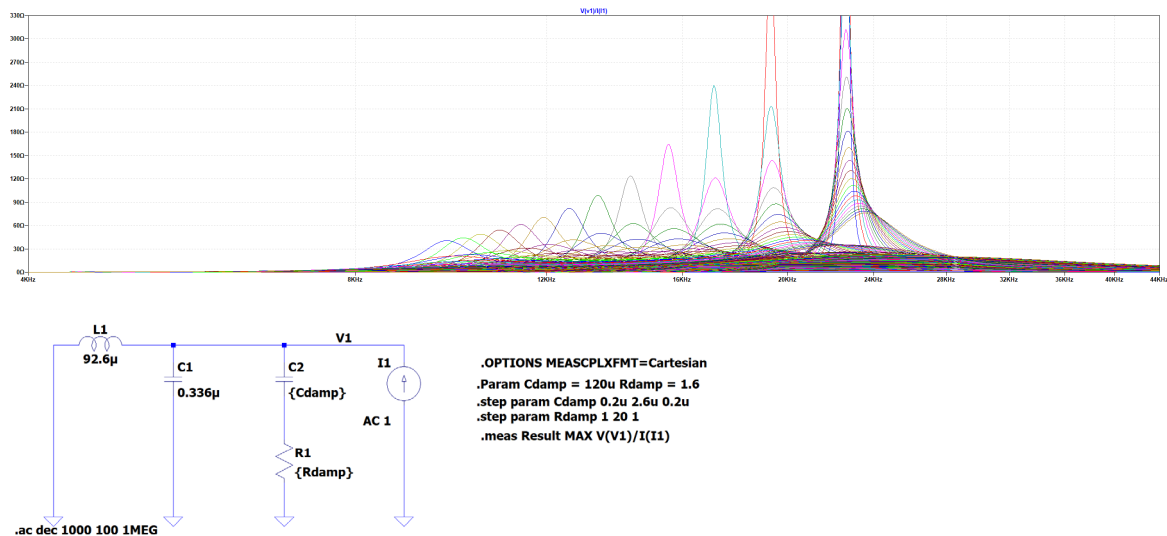


Kuva 4.6. Katkoviiva kuvaa, kuinka suodattimessa voi olla useampi aste.

RC-vaimennin sijoitetaan viimeiseen suodattimen asteeseen eli siihen mikä kytkeytyy konvertteriin riippumatta suodatintopologiasta. Useampiasteisissa suodattimissa RC-vaimentimen voi laittaa jokaiseen vaiheeseen, mutta käytännössä tämä ei ole hyvä ratkaisu, koska EMI-suodattimen komponenttien lukumäärä kasvaa eli myös sen tilavuus kasvaa. Useampivaiheisessa suodattimessa riittää yksi RC-vaimennin viimeisen vaiheen jälkeen, kun oletetaan, että suodattimen viimeisen vaiheen impedanssi on määräävin. (Xing, Sun, 2011).

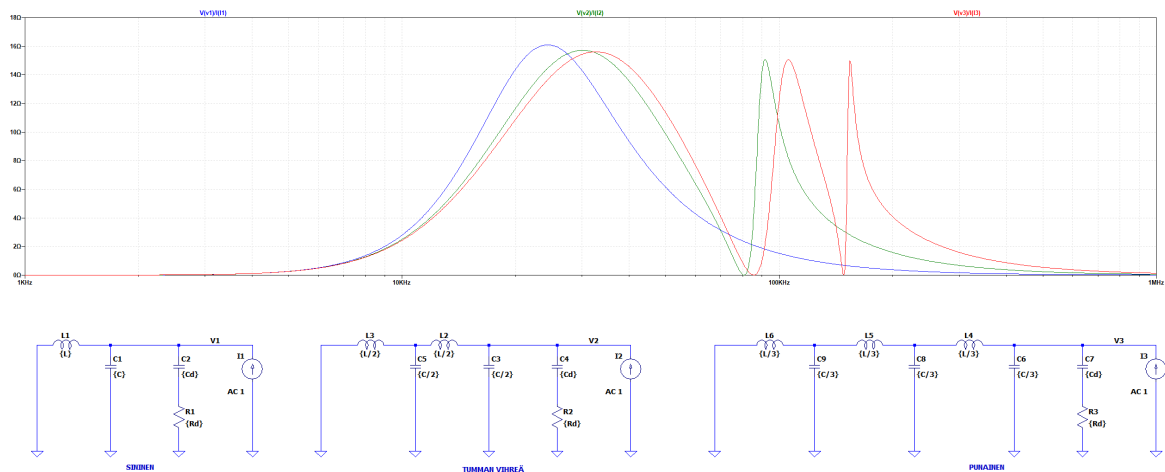
RC-vaimentimen arvot ovat yleisesti määritelty siten, että C_d on 3–5 kertaa suurempi kuin suodattimen kondensaattori C_f , ja R_d on yhtä suuri kuin ominaisimpedanssi Z_f (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 222). Tässä työssä pyritään kuitenkin optimoimaan EMI-suodattimen kokoa ja edellä mainittu nyrkkisääntö voi johtaa tarpeettoman isoon kondensaattoriin, joka vaikuttaa merkittävästi EMI-suodattimen fyysiseen kokoon. Optimalisemmat

komponenttien arvot RC-vaimentimelle saadaan simuloimalla suodattimen impedanssi eri RC-arvoilla:



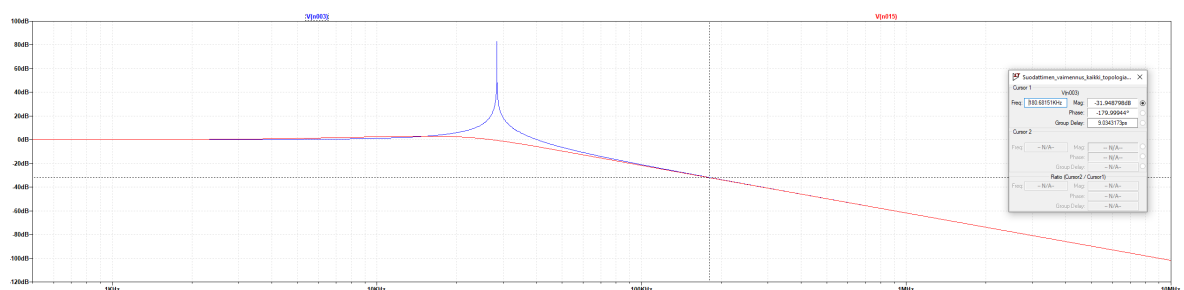
Kuva 4.7. Simuloidut EMI-suodattimen impedanssit eri RC-vaimentimen.

Kokeiltavat kapasitanssien ja resistanssien arvot ovat määritetty siten, että edellä mainittu nyrkkisäännön perusteella olevat arvot ovat kokeiltavien parametrien joukossa. Kuten kuvasta 4.7 huomaa, jos vaimentimen arvot ovat pieessä, nousee EMI-suodattimen impedanssi liian suureksi verrattuna konvertterin impedanssiin ja stabiiliuskriteeri ei täyty. Simuloinnin perusteella sopivia RC-vaimentimen arvoja on useita ja niistä valitaan arvot, joissa kapasitanssi on mahdollisimman pieni ja suodattimen impedanssi ei tarpeettomasti laske liian alas. Lisäksi C_d :n impedanssi suodattimen rajataajuudella pitää olla pienempi kuin R_d , jotta vaimenninvastuksen ei synny tarpeettoman suurta tehohäviötä. Tämän perustella valitaan vaimentimen vastuksen arvoksi 15Ω ja kondensaattorin arvoksi $1.6\mu\text{F}$, jolloin EMI-suodattimen ominaisimpedanssiksi saadaan:



Kuva 4.8. Suodattimien suurimmat impedanssien arvot ovat alle 16.6Ω eli stabiiliuskriteeri täyttyy. Kuvassa näkyy myös useamman kertaluvun LC-suodattimien impedanssit.

Tavallisesti konvertterien ominaisimpedanssi ei ole vakio vaan muuttuu taajuuden mukaan. Sen määrittäminen voi olla haastavaa ja sen mittaamiseen on esitetty useita tapoja (Tarateeraseth, 2012). Mitä tarkemmin konvertterin impedanssi tiedetään, sitä optimaalisempi suodatin voidaan suunnitella. Joissain tilanteissa stabiiliuskriteerin täytyminen ei ole mahdollista toteuttaa, jolloin pitää analysoida pysyykö systeemi stabiilina ja toimiiko se oikein ongelmataajuuksilla (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 204). Tavallisesti epästabiilius johtuu konvertterin säädöstä ja epästabiilius voidaan joissain tilanteissa estää säätötekniikalla. Suunnitellun suodattimen vaimennus taajuuden funktiona saadaan simuloitua:

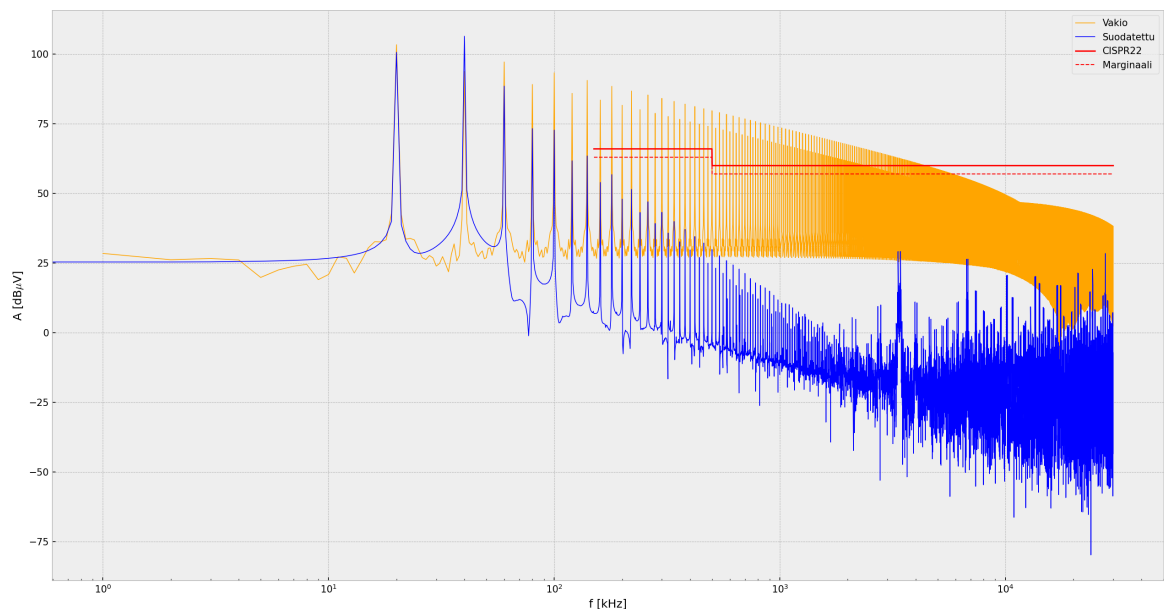


Kuva 4.9 Taajuudella 180kHz vaimennusta on vaatimuksen mukainen 32dB.

Sininen kuvaaja on suunniteltu suodatin ilman RC-vaimenninta ja punainen kuvaaja on RC-suodattimen kanssa. RC-vaimennin vaimentaa 28kHz taajuudella olevan piikin jolloin suodatin vahvistaa EMI:ä.

4.2.2 DM-suodattimen todennus

DM-suodattimen toiminta voidaan vielä todentaa simuloimalla esimerkin mukainen Buck-konvertterin EMI-spektri DM-suodattimen kanssa sekä ilman:



Kuva 4.10. Simulointidatasta muodostettu EMI-spektri DM-häiriölle.

Sininen käyrä eli suodatettu signaali läpäisee CISPR22 standardissa asetetun päästörajan. Suodatin mitoitettiin siten, että suodatetun signaalin häiriötaso olisi marginaalin verran 180kHz taajuudella eli yhdeksännellä harmonisella, mutta häiriötaso on alempana. Tämä johtuu kappaleen 4.1.1 arvioinnin tarkkuudesta. Simuloidussa Buck-konvertterissa on 7dB vähemmän DM-häiriötä kuin kappaleen 4.1.1 pahimman mahdollisen tilanteen arviossa. Suunniteltu suodattimen vaimennus on kuitenkin sama kuin suodattimelta vaadittu 32dB eli mitoitus on toimiva.

4.3 CM-suodattimen mitoitus ja todennus

CM-suodattimen rajataajuus voidaan laskea samaan tapaan kuin DM. Kappaleen 4.1.2 arvion mukaan CM-vaimennusta tarvitaan $9.3\text{dB}\mu\text{V}$, jonka perusteella saadaan suodattimen rajataajuudeksi:

$$f_{f(\text{CM})} = \frac{f_n}{10^{\frac{A_{\text{dB}\mu\text{V}(\text{CM})}}{N \cdot 20}}} = f_n \cdot 10^{\frac{-A_{\text{dB}\mu\text{V}(\text{CM})}}{N \cdot 20}} = 180\text{kHz} \cdot 10^{\frac{-9.3\text{dB}\mu\text{V}}{2 \cdot 20}} \approx 105\text{kHz} \quad (28)$$

Sähkölaitteissa on tavallisesti määrätty suurin mahdollinen vuotovirta laitteen runkoon eli PE:hen. Sovelluskohteesta riippuen suurin sallittu vuotovirta on tyypillisesti mA luokkaa ja tämä rajoitus vaikuttaa Y-kondensaattorien suurimpaan sallittuun kokoon (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 119). Jos määritetään, suurimmaksi mahdolliseksi vuotovirraksi 3.5mA ja oletetaan, että vuotovirtaa syntyy vain Y-kondensaattoreista, saadaan suurin mahdollinen kokonaiskapasitanssin arvo yhtälöllä:

$$I_{\text{lk}} = 2\pi f_{\text{in}} U_{\text{in}} C_{f(\text{CM})} \\ \Leftrightarrow C_{f(\text{CM})} = \frac{I_{\text{lk}}}{2\pi f_{\text{in}} (\hat{U}_{\text{in}} + r_{\text{in}})} = \frac{3.5\text{mA}}{2\pi \cdot 50\text{Hz} (115\text{V} \cdot \sqrt{2} + 10\%)} \approx 62.3\text{nF} \quad (29)$$

Jossa f_{in} on tulojännitteen taajuus [Hz], \hat{U}_{in} on tulojännitteen huippuarvo [V], r_{in} on marginaali, jotta varmistutaan siitä, ettei vuotovirta ylitä sille asetettua vaatimusta ja I_{lk} on vuotovirta [A] (Schaffner, 2013).

Yhtälön 29 perusteella määritetty Y-kondensaattorien kokonaiskapasitanssi pitää jakaa tasan systeemin vaiheiden välille eli tässä esimerkissä yhden vaiheen Y-kondensaattorin kapasitanssiksi saadaan $62.3\text{nF}/2 = 31.1\text{nF}$. Yhden vaiheen kapasitanssin ja suodattimen rajataajuuden perusteella voidaan laskea yhden vaiheen CM-kuristimen induktanssi:

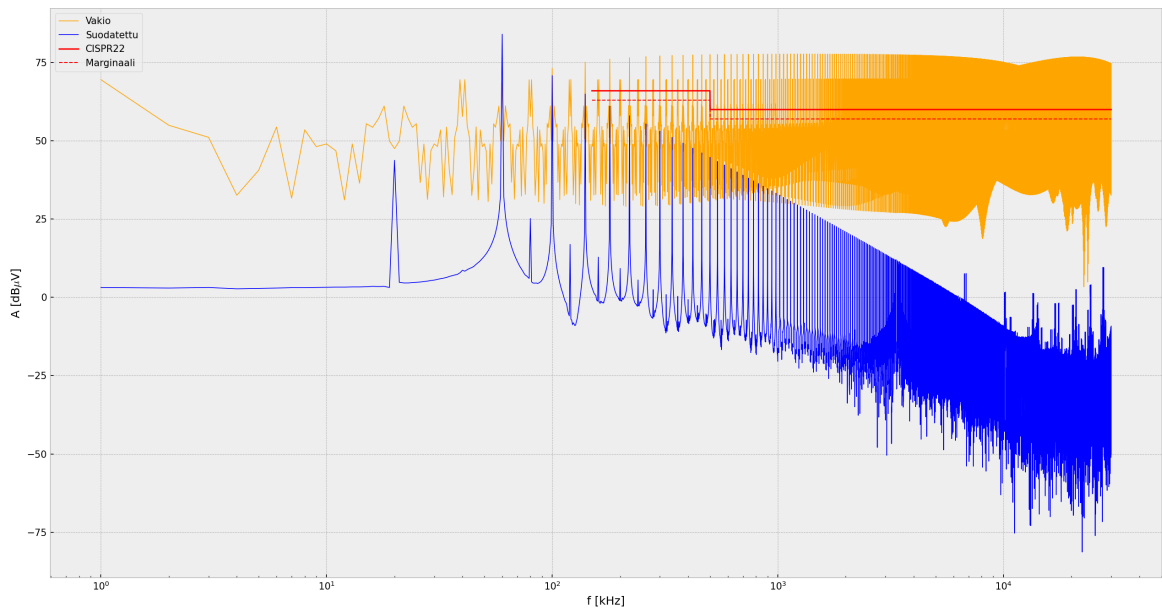
$$f_{f(CM)} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{f(DM)} C_{f(DM)}}}$$

$$\Leftrightarrow L_{f(CM)} = \frac{1}{4 \cdot C_{f(CM)} \cdot f_{f(CM)}^2 \cdot \pi^2} \approx \frac{1}{4 \cdot 31.1nF \cdot (105kHz)^2 \cdot \pi^2} \approx 0.073mH \quad (30)$$

CM-suodatin koostuu reaktiivisista komponenteista eli sillä on myös resonanssipiste, kuten DM-suodattimellakin. CM-suodattimen impedanssin ei kuitenkaan tarvitse olla kappaleen 4.2.1 stabiiliuskriteerin mukaan pienempi kuin konvertterin impedanssi, koska CM-suodatin ei vaikuta suoraan hyötyvirtaan. Vaimenninpiirin käyttöä pyritään välttämään CM-suodattimessa, koska sen toteuttaminen on haastavaa vuotovirtarajoitteen ja mahdollisesti suuren hyötyvirran takia, joka kulkisi rinnan olevan vaimenninpiirin lävitse. Näiden syiden takia on tavallista, että CM-suodattimelle ei tehdä erillistä vaimenninpiiriä.

4.3.1 CM-suodattimen todennus

CM-suodattimen toiminta voidaan todentaa simuloimalla Buck-konvertterin EMI-spektri ja erottamalla siitä CM-häiriö yhtälöiden 1 ja 2 mukaan:

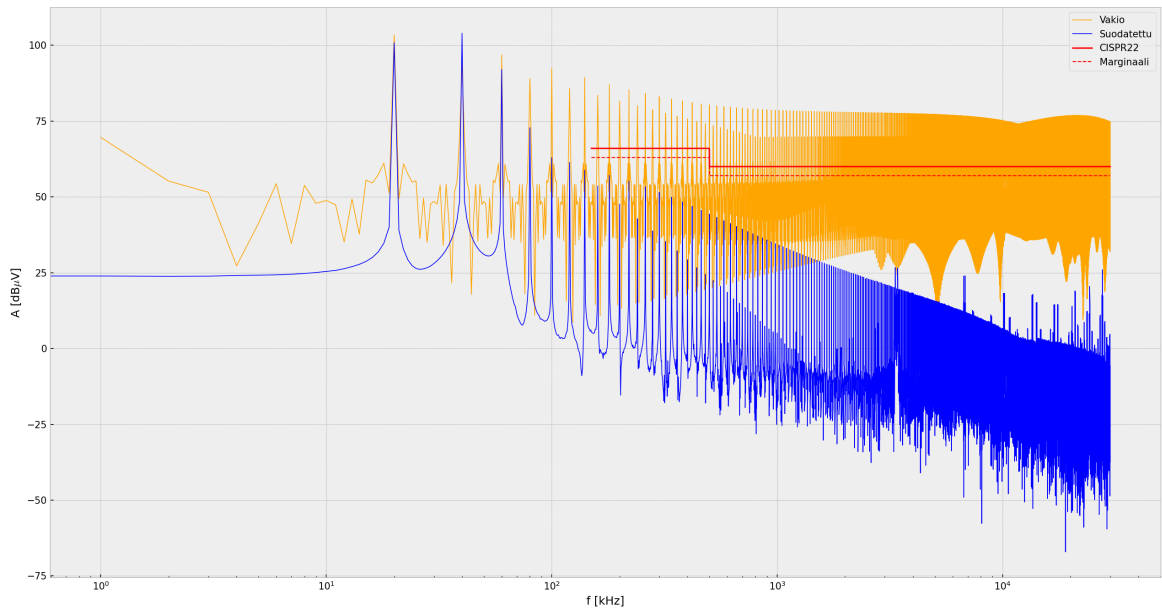
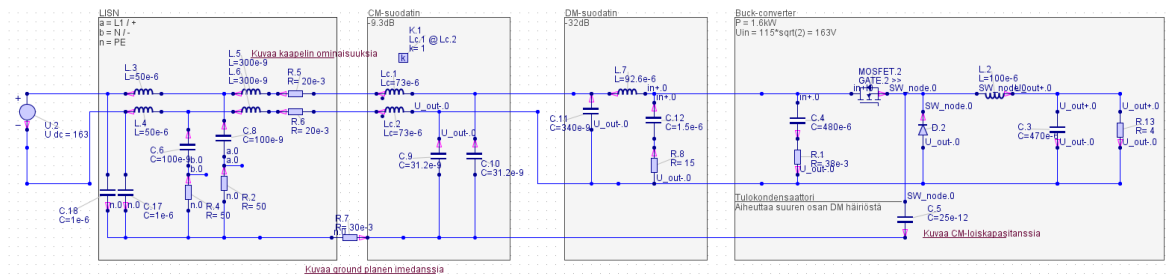


Kuva 4.11. Simulointidatasta muodostettu EMI-spektri CM-häiriölle. Sininen käyrä eli suodatettu systeemi läpäisee CISPR22 standardissa asetetun rajan.

Kappaleessa 4.1.2 arvioitu häiriön suuruus taajuudella 180kHz eroaa noin 2dB simuloidusta, joka johtuu arviointimenetelmän epätarkkuudesta. Suodatin vaimentaa 180kHz taajuudella 15dB eli noin 6dB enemmän mitä suunnitellussa käytetty haluttu vaimennus on. Ero syntyy simuloinnissa oleva LISN:n, häiriöimpedanssien ja häviöllisten komponenttien vaikutuksesta suodattimen vaimennukseen.

4.4 Yhdistetyn suodattimen todennus

Standardin mukaisissa EMI-mittauksissa CM- ja DM-häiriötä ei erotella, joten suodattimien vaimennus on hyvä todentaa myös yhdistetyssä suodattimessa ja mitata kokonaishäiriö. CM-suodatin on asetettu LISN jälkeen, jonka kanssa sarjassa on DM-suodatin.



Kuva 4.12. Simuloinnissa käytetty kytkentä ja kokonaishäiriön EMI-spektri, jossa sininen on suodatettu signaali ja oranssi ilman suodatinta simuloitu signaali.

Sininen käyrä eli suodatettu systeemi läpäisee CISPR22 standardissa asetetun rajan. EMI-suodatin suodattaa häiriösignaalia enemmän kuin halutun 3dB marginaalin verran. Tämä johtuu kappaleessa 4.2.2 ja 4.3.1 todetuissa tekijöistä.

5 EMI-suodattimen optimointi

EMI-suodatinta voidaan optimoida monen eri muuttujan suhteen, kuten esimerkiksi tilavuuden tai hinnan. Tässä diplomityössä muodostetussa EMI-suodattimen suunnittelumetodissa optimoidaan suodattimen kokonaistilavuutta. Metodissa valitaan useamman kertaluvun suodatinten mitoitus siten, että suodattimien kokonaistilavuudeksi tulee mahdollisimman pieni. Useampiasteisissa suodattimissa voidaan käyttää pienempiä komponentteja, koska suodattimen rajataajuus kasvaa asteluvun kasvaessa (Giglia et al., 2018). Eli vaikka komponenttien lukumäärä kasvaa useamman kertaluvun suodattimissa, voivat ne olla tilavuudeltaan pienempiä kuin saman IL:n omaava pienempiasteinen suodatin. Laskemalla eri kertalukujen suodattimien kokonaistilavuudet, voidaan sen perusteella valita pienimmän tilavuuden omaava suodatintopologia. EMI-suodattimen lämpösuunnittelu vaikuttaa suodattimen vaimennukseen ja tilavuuteen, joten myös se on huomioitava mitoituksessa ja optimoinnissa.

5.1 EMI-suodattimen tilavuus

EMI-suodattimen tilavuus muodostuu enimmäkseen siinä olevien reaktiivisten komponenttien tilavuudesta. Kyseisten komponenttien tilavuutta arvioimalla voidaan arvioida koko EMI-suodattimen fyysistä kokoa. Alla on kuvattu menetelmät, miten tässä työssä arvioidaan EMI-suodattimen tilavuutta.

5.1.1 Induktiivisten komponenttien tilavuus

AP (Area Product) on kelan energiatiheyttä kuvaava ominaisuus, joka muodostuu kelan sydämen poikkipinta-alan A_c (core area) ja käämitykseen vaadittava pinta-alan A_w (window area) tulosta ja sen yksikkö on m^4 . Sydämen poikkipinta-alan A_c voi ratkaista kelan perusyhtälöstä ja A_w on suoraan verrannollinen kierrosten lukumäärään ja virran teholliseen arvoon sekä käänteisesti verrannollinen täyttökertoimen ja virrantiheyden kanssa, jolloin AP:ksi saadaan:

$$A_{p(DM)} = A_c A_w = \frac{L_{DM} \hat{I}_{DM}}{N \cdot B_{max}} \cdot \frac{N \cdot I_{DM}}{k_{u(DM)} J_{cu}} = \frac{L \cdot I_{DM} \cdot \hat{I}_{DM}}{k_{u(DM)} J_{cu} \cdot B_{max}} \quad (31)$$

N on käämikierrosten lukumäärä, $k_{u(DM)}$ on täyttökerroin, J_{cu} on virrantiheys [A/m^2], B_{max} on magneettivuon tiheyden suurin arvo [T] ja I_{DM} on kelan läpi kulkevan DM-virran tehollis- ja \hat{I}_{DM} huippuarvo [A] (Hayes, Goodarzi, 2018, 487). Täyttökerroin k_u voi vaihdella välillä 0.2–0.8 riippuen sydänmateriaalin muodosta ja käämintätavasta. Virrantiheys on käämissä kulkevan virran ja käämijohdon poikkipinta-alan suhde. (Hurley, Wölfle, 2013, 55–62).

CM-kuristimen AP:ta ei voi määrittää samalla tavalla kuin DM-kelan, koska DM-virta vaikuttaa myös CM-kuristimen AP:hen. CM-kuristimen AP saadaan määrittämällä se virrantiheyden avulla ja huomioimalla siinä myös DM-virta:

$$A_{p(DM)} = \left(\frac{\sqrt{(1+\gamma)} \cdot k_{i(DM)} \cdot L_{CM} \cdot \hat{I}_{CM}^2 \cdot \hat{I}_{DM}}{B_{max} \cdot K_t \cdot \sqrt{k_{u(CM)} \cdot \Delta T} \cdot \hat{I}_{CM}} \cdot \frac{N_{DM}}{N_{CM}} \right)^{\frac{8}{7}} \quad (32)$$

Jossa N_{DM}/N_{CM} eli DM ja CM kierroslukujen suhde on aina 2, γ on magneettivuon väre(ripple), $k_{i(DM)}$ on virran tehollisen arvon ja huippuarvon välinen suhdeluku, joka on siniaallon tapauksessa $1/\sqrt{2} \approx 0.707$, K_t on laajojen empiiristen tutkimusten perusteella määritetty vakio, jonka arvo on 48200 ja ΔT on kuristimen lämpenemä [K]. Kun induktiivisten komponenttien AP:t ovat tiedossa, voidaan niiden tilavuutta arvioida kuristimen sydämen tilavuuden yhtälöllä:

$$V_{cho} \approx V_{core} = k_{core} A_p^{\frac{3}{4}} \quad (33)$$

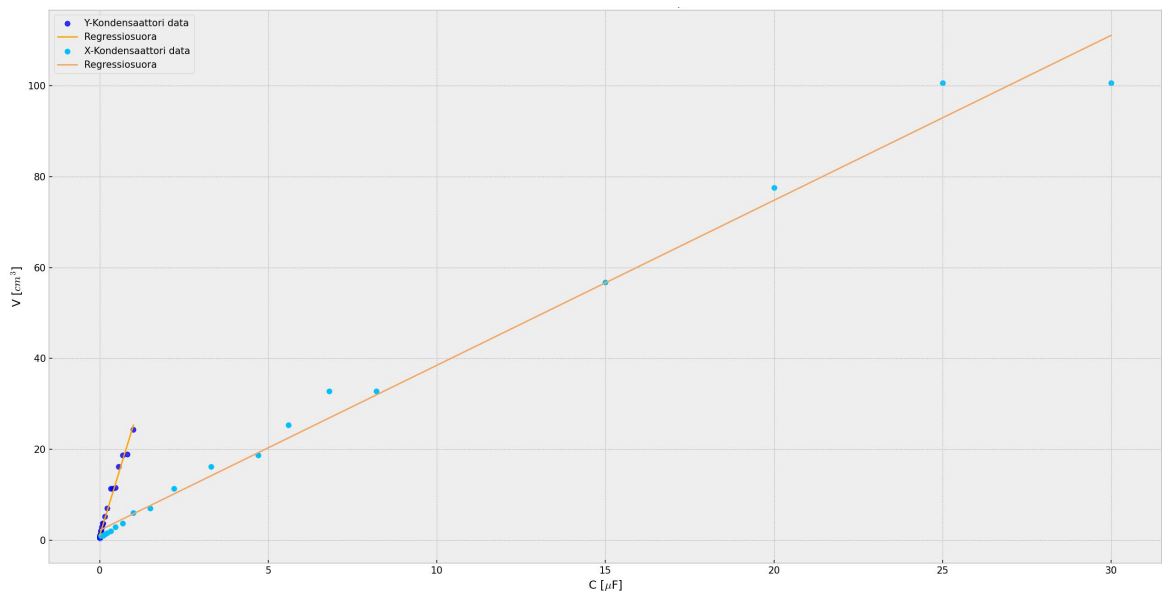
jossa k_{core} on vakio, joka riippuu sydämen ominaisuuksista, jonka arvoksi voidaan olettaa 5.6. (Hurley, Wölfle, 2013, 55–62)

5.1.2 Kondensaattorien tilavuus

EMI-suodatin sovelluksissa käytetään yleisesti PPF (Polypropylene Film) kondensaattoreita niiden hyvän virrankeston ja eliniän takia. Tietyn jännitetason PPF-kondensaattorien kokoa voidaan arvioida tarkastelemalla niihin varastoituneen energian ja tilavuuskertoimen k_{cap1} tuloa ja offsetvakion $k_{cap2(cap)}$ summaa.

$$V_{cap} = k_{cap1(X/Y)} \cdot C \cdot U_{nom}^2 + k_{cap2(X/Y)} \quad (33)$$

jossa C on kondensaattorin kapasitanssi [F], U_{nom} on kondensaattorin nimellisjännite [V]. $k_{cap(X/Y)}$ kertoimet perustuvat kondensaattorivalmistajien datalehtien tietoon (Kolar et al., 2007). Kuvassa 5.1 on valmistajan Epcos 305V X-kondensaattoreista ja 300V Y-kondensaattoreista kootun datan perusteella muodostettu tilavuus kapasitanssin funktiona.



Kuvan 5.1. Epcossin valmistamien X- ja Y-kondensaattoreista data tilavuudelle kapasitanssin funktiona.

Kondensaattorien tilavuusdataan voidaan tehdä suoran sovitus ja määrittää yhtälön 33 kertoimet $k_{\text{cap}(X/Y)}$: Y-kondensaattorille saadaan $k_{\text{cap1}(Y)} = 269.6003 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{F} \cdot \text{V}^2$ ja $k_{\text{cap2}(Y)} = 1.0259284 \text{ cm}^3$ ja X-kondensaattorille $k_{\text{cap1}(X)} = 39.04921 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{F} \cdot \text{V}^2$ ja $k_{\text{cap2}(X)} = 2.154083 \text{ cm}^3$. Kertoimet ovat määritetty siten, että yhtälö 33 tilavuuden yksikkö on cm^3 .

5.1.3 EMI-suodattimen kokonaistilavuus

EMI-suodattimen tilavuuteen vaikuttaa mm. suodatinkomponentit, vaimenninpiirien komponentit, piirilevy ja komponenttien asettelu. Tässä työssä tarkastellaan vain induktiivisten ja kapasitiivisten komponenttien tilavuutta, koska ne ovat merkittävimmät tekijät tilavuuden kannalta. EMI-suodattimen kokonaistilavuus muodostuu siis DM- ja CM suodatinten tilavuuden summasta:

$$\begin{aligned}
 V_{f(\text{tot})} &= V_{f(\text{DM})} + V_{f(\text{CM})} \\
 &= \left(\frac{N}{2} \cdot V_{\text{cap}(\text{DM})} + \frac{N}{2} \cdot V_{\text{cho}(\text{DM})} + V_{\text{capDamp}(\text{DM})} \right) + \\
 &\quad \left(\frac{N}{2} \cdot V_{\text{cap}(\text{CM})} + \frac{N}{2} \cdot V_{\text{cho}(\text{CM})} \right) \tag{34}
 \end{aligned}$$

Jossa N on suodattimen asteluku, jonka perusteella saadaan kondensaattorin tai kuristimen lukumäärä EMI-suodattimessa, $V_{\text{capDamp}(\text{DM})}$ on vaimenninpiirin kondensaattorin tilavuus, joka voidaan laskea yhtälöllä 33 käyttämällä X-kondensaattorin kertoimia.

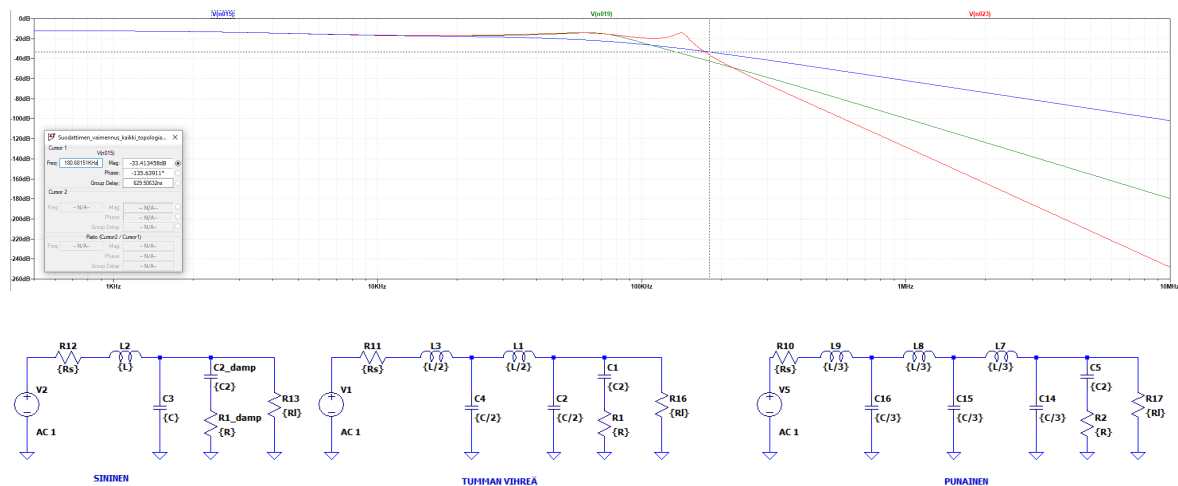
5.2 EMI-suodattimen topologia

EMI-suodattimen topologioita on useita erilaisia ja ei ole yhtä topologiaa, joka toimisi parhaiten kaikissa sovelluskohteissa. Häiriöimpedanssit vaikuttavat merkittävästi EMI-suodattimen vaimennuskykyyn ja sitä kautta topologian valintaan. Lisäksi topologiaa valittaessa on huomioitava häiriövirtojen kulkureitit, jotta suodatin toimisi tehokkaasti. CM-suodattimen topologiaksi valitaan LC-suodatin ja sen monikerrat kolmeen asti, koska EMI-

testauksessa käytettävän LISN:n kanssa CM-suodatus toimii parhaiten, kun CM-kuristin on LISN:iin päin ja Y-kondensaattori konvertteriin päin.

DM-suodatuksen topologiaksi valitaan CL-suodatin, koska LC-suodatin tekisi CM-virtojen kulkureitit epäsymmetrisiksi, joka nostaisi DM-häiriön tasoa. Tavallisesti LC-suodatin ja sen monikerrat ovat yleisesti käytetty topologia konvertterien yhteydessä, koska kondensaattori tarjoaa pieni-impedanssisen reitin konvertterin kytkentävirrälle (Hiltunen, Väisänen & Silventoinen, 2014). Tässä työssä oletetaan, että konvertterilla on oma bypass-kondensaattori, joten myös CL-suodatinta ja sen monikertoja voidaan käyttää konvertterin suodatuksen.

Useamman kertaluvun EMI-suodattimesta tulee tilavuudeltaan pienin, kun kaikissa suodattimen vaiheissa kelojen induktanssit, ja kondensaattorien kapasitanssit ovat yhtä suuria (Heldwein, Kolar, 2007). Tämän työn metodissa reaktiiviset komponentit mitoitetaan kappaleen 4 mukaisesti ensimmäisen kertaluvun suodattimelle, jonka perusteella useampivaiheisissa suodattimissa komponenttien arvot jaetaan tasaisesti suodattimen eri vaiheille kuvan 5.2 mukaan:



Kuva 5.2. Kappaleen 4 esimerkin mukaan mitoitetun DM-suodattimen 1–3 kertaluvun LC-suodattimien taajuusvasteet. Taajuudella 180kHz vaimennus pitää olla vähintään 32 dB μ V, joka toteutuu kaikilla topologioilla.

Useamman kertaluvun CM-suodattimen mitoituksessa pitää huomioida Y-kondensaattorien aiheuttama vuotovirta. Yhden kertaluvun suodattimelle mitoitettujen Y-kondensaattorien kokonaiskapasitanssi pitää jakaa Y-kondensaattorien lukumäärällä, jotta vuotovirtaraja ei ylity.

Ensimmäisen kertaluvun LC-suodattimessa teoreettinen maksimivaimennus on 40dB/dekadi, jolloin sen rajataajuus pitää olla matalampi kuin useamman kertaluvun suodattimilla, joissa vaimennus voi olla 80dB/dekadi tai 120dB/dekadi riippuen topologiasta. Mitä matalampi rajataajuus on, sitä suurempia sähköisiltä arvoiltaan komponenttien pitää olla eli myös niiden fyysinen koko kasvaa. Useamman kertaluvun suodattimissa on enemmän komponentteja verrattuna ensimmäisen kertaluvun suodattimeen, mutta komponentit ovat pienempiä sähköisiltä arvoiltaan ja tilavuudeltaan. Metodissa lasketaan eri topologioilla toteutetuille EMI-suodattimille tilavuus, joita vertailemalla voidaan valita pienimmän tilavuuden omaava suodatin. (Manushyn, 2019)

5.3 EMI-suodattimen lämpösuunnittelu

EMI-suodattimen lämpötilan tarkastelu on tärkeä osa suodattimen suunnittelua kasvavassa määrin, koska nopeiden piikarbidi puolijohteiden yleistyminen kasvattaa EMI-häiriötä ja siten EMI-suodattimelta vaadittavaa vaimennusta. Vaadittavan vaimennuksen kasvaessa on käytettävä järeämpiä EMI-suodattimia, jotka tavallisesti lämpenevät enemmän. EMI-suodattimen todellisen lämpötilan arviointi toimintaympäristössään on laaja kokonaisuus, joka vaatii oman tarkastelunsa. Tässä työssä EMI-suodattimen lämpösuunnittelu huomioidaan tarkastelemalla komponenttien parametreja, joiden avulla voidaan arvioida suodattimen jäähtymisen tarvetta. Kondensaattorit eivät merkittävästi lämpene EMI-sovelluksissa, joten tarkastelu rajataan induktiivisten komponenttien ja vaimenninvastuksen tarkasteluun.

DM-kelan lämpenemää voidaan arvioida määrittämällä se virrantiheyden yhtälöstä. Lämpenemä kuvaa DM-kelan lämpötilan muutosta, joka on riippuvainen muun muassa AP:sta ja määritetystä virrantiheydestä:

$$\Delta T_{\text{cho(DM)}} = \left(\frac{J_{\text{cu}}}{K_t} \cdot \sqrt[8]{A_{\text{p(DM)}}} \right)^2 \cdot k_{\text{u(DM)}} (1 + \gamma) \quad (35)$$

CM-kuristimen tapauksessa lämpenemää ei voi määrittää samalla tavalla kuin DM-kelan lämpenemään kappaleessa 5.1.1 mainittujen syiden takia. Siksi CM-kuristimelle lasketaan suurin sallittu lämpöteho. Lämpötehon laskentaa varten tarvittava lämpöresistanssi R_{th} [K/W], saadaan kuristimen sydänmateriaalin tiedoista tai se voidaan arvioida yhtälöllä:

$$R_{\text{th(CM)}} = \frac{0.06}{\sqrt{V_{\text{cho(CM)}}}} \quad (36)$$

Suurin sallittu lämpöteho CM-kuristimelle saadaan siten määritettyä:

$$P_{\text{cho(CM)}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{th(CM)}}} \quad (37)$$

Lämpenemä ΔT , joka tarvitaan CM-kuristimen lämpötehon määrittämiseen, voidaan määrittää sovelluksen mukaan tai asettaa se samaksi kuin yhtälössä 35 laskettu DM-kelan lämpenemä eli määritetään molempien induktiivisten komponenttien lämpenemät yhtä suuriksi. (Hurley, Wölfle, 2013, 55–62)

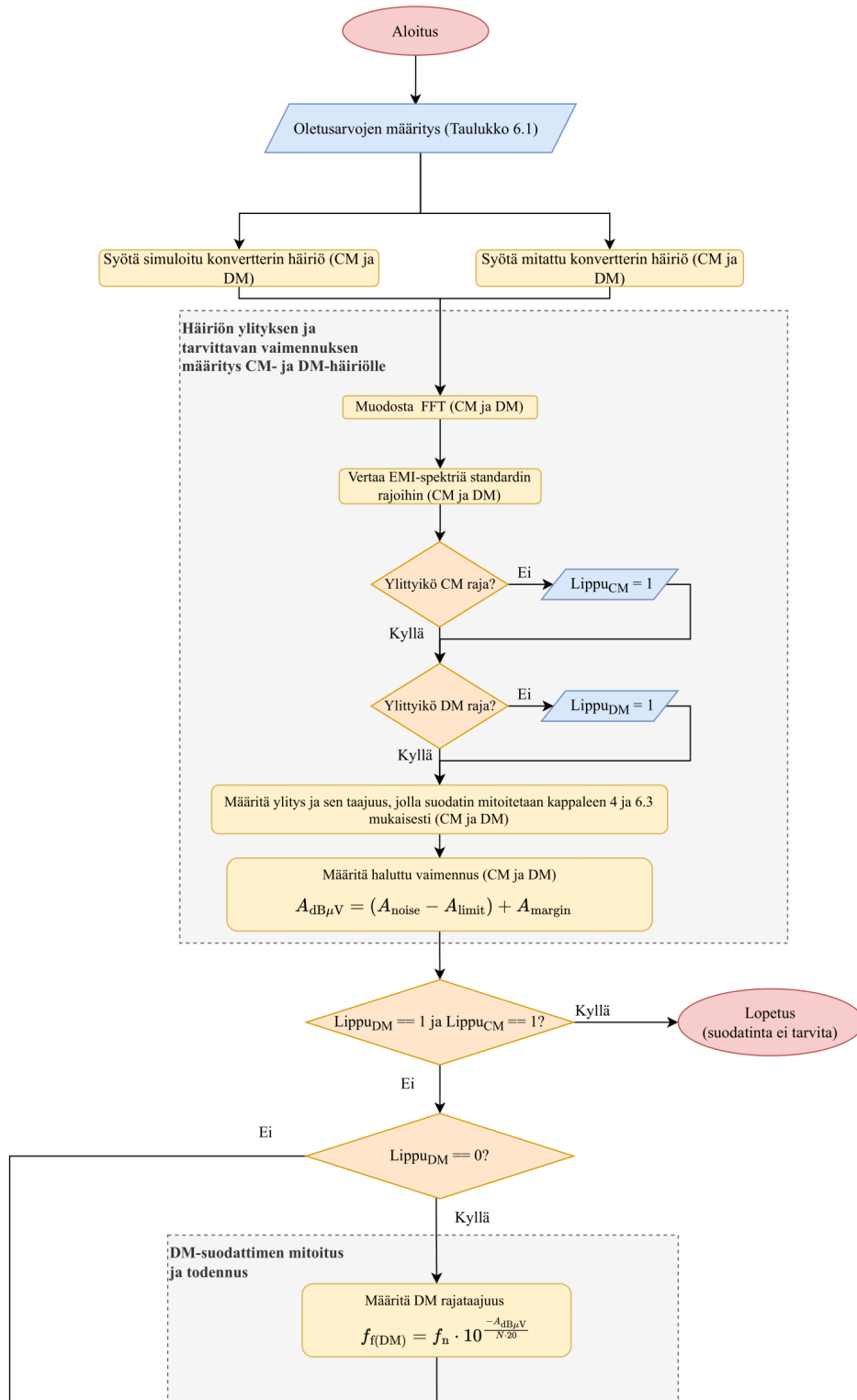
RC-vaimentimen vastukselle ei voi määrittää vakio lämpöresistanssia, koska se vaihtelee paljon eri vastustyyppien välillä. Tässä työssä vaimenninvastuksen lämpösuunnittelu huomioidaan laskemalla sen suurin sallittu lämpöresistanssi, joka saadaan määritettyä asetetun maksimilämpenemän ja vaimenninvastuksen lämpötehon P_{damp} [W] perusteella:

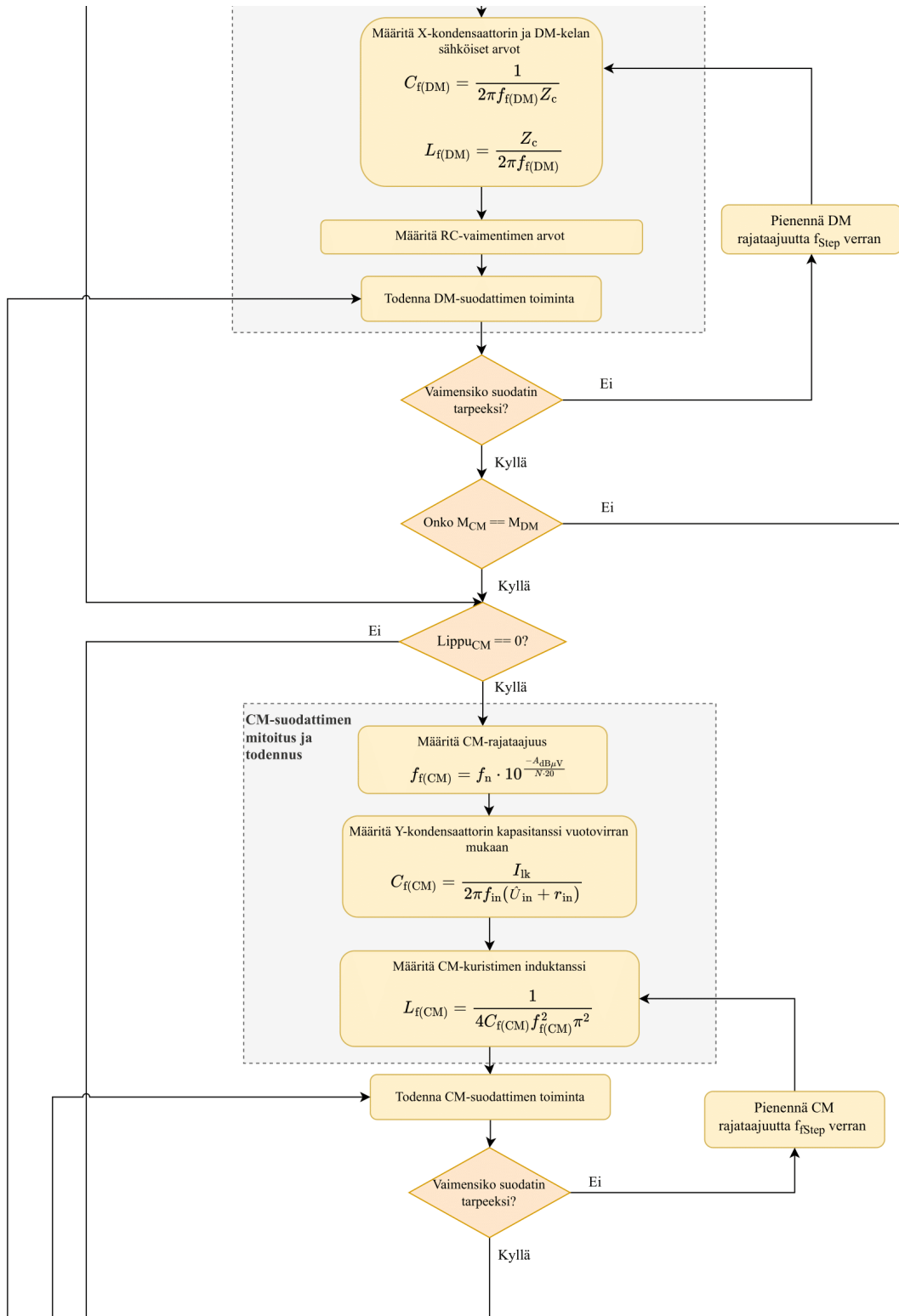
$$R_{\text{th(damp)MAX}} = \frac{\Delta T_{\text{dampMAX}}}{P_{\text{damp}}} \quad (38)$$

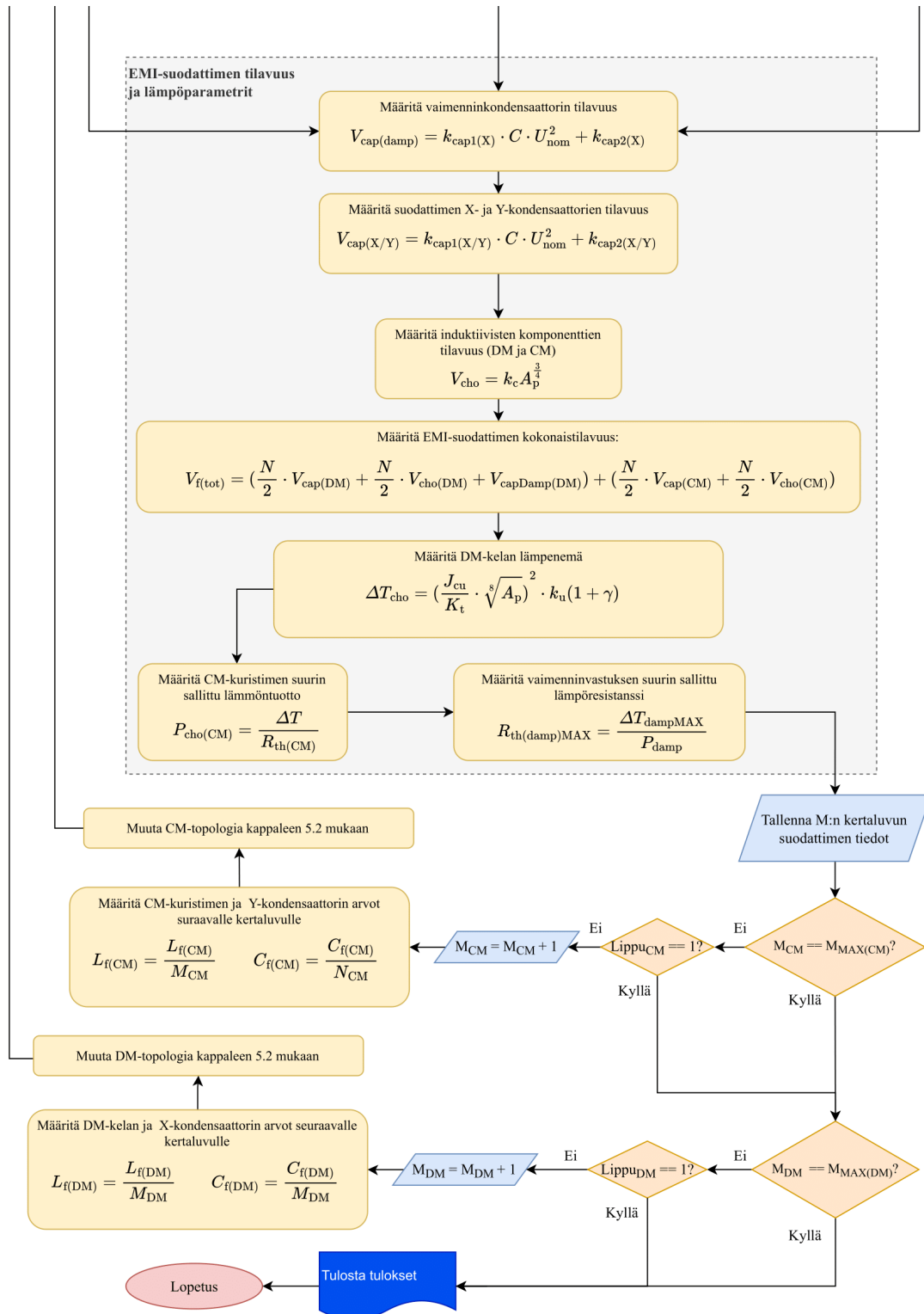
Tämän perusteella suunnittelija voi valita oikeanlaisen vaimenninvastuksen ja tarvittaessa suunnitella sille jäähdytys.

6 EMI-suodattimen suunnittelumetodi ja -ohjelma

Tässä työssä muodostettu suunnittelumetodi perustuu kappaleen 4 komponenttien mitoitukseen ja kappaleen 5 suodattimen optimointiin. Metodi on muodostettu siten, että sen perusteella voidaan toteuttaa mitoitustyökalu, joka automatisoi EMI-suodattimen suunnittelu- ja optimointiprosessia. Metodi koostuu neljästä päävaiheesta: vaadittavan vaimennuksen määrittämisestä, CM-suodattimen mitoituksesta ja todennuksesta, DM-suodattimen mitoituksesta ja todennuksesta sekä EMI-suodattimen tilavuuden ja lämpöparametrien määrittämisestä. Metodin logiikka ja kulku on esitetty kuvan 6.1 vuokaaviossa.







Kuva 6.1. EMI-suodattimen suunnittelumetodin vuokaavio.

Metodin perusteella tehtiin suunnitteluohjelma, jolla voidaan osoittaa metodin toiminta. Ohjelma on toteutettu hyödyntämällä GeckoCIRCUITS:ia, joka on piirisimulointiohjelma.

GeckoCIRCUITS-ohjelmaa voi ohjata GeckoSCRIPT-käyttöliittymällä, joka mahdollistaa simulointiohjelman käyttämisen Java-ohjelmointikielellä. Kuvan 6.1 vuokaavion ja ohjelman eri vaiheiden toiminta on kuvattu tarkemmin alla olevissa kappaleissa.

6.1 Lähtötietojen määrittäminen

Tämän työn metodi vaatii käyttäjältä lähtötietoja liittyen systeemiin, mittausstandardiin ja komponentteihin, jotka ovat listattu alla olevaan taulukkoon.

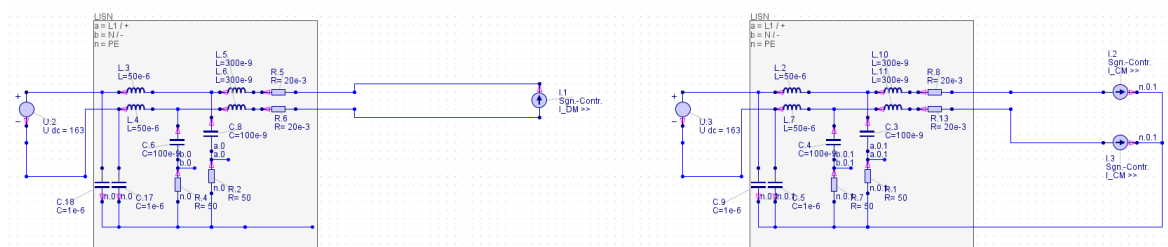
Taulukko 6.1. Taulukkoon on täytetty kappaleen 4 esimerkin mukaiset lähtötiedot ja oletusparametrit.

Induktiivisten komponenttien laskennassa käytettävät arvot	$B_{\max} = 0.3\text{T}$ $k_{u(\text{DM})} = 0.4$ $k_{u(\text{DM})} = 0.2$ $k_{\text{core}} = 5.6$ $J_{\text{cu}} = 6\text{A}/\text{mm}^2$ $K_t = 48200$ $\gamma_{\text{CM}} = 0.6$ $\gamma_{\text{DM}} = 0.4$ $k_{i(\text{DM})} = 1/\sqrt{2}$
Kondensaattorien ominaisuudet (X-kondensaattori: Epcos 305V ja Y-kondensaattori: Epcos 300V)	$k_{1\text{cap}(Y)} = 269.6003 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{F} \cdot \text{V}^2$ $k_{2\text{cap}(Y)} = 1.0259284 \text{ cm}^3$ $k_{1\text{cap}(X)} = 39.04921 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{F} \cdot \text{V}^2$ $k_{2\text{cap}(X)} = 2.154083 \text{ cm}^3$
Mittausstandardin määrittäminen	EMI-päästöjen rajat: CISPR22 (A-rajat) 0.15–0.5MHz 66dB μ V 0.5–5MHz 60dB μ V 5–50MHz 60dB μ V $A_{\text{margin}} = 3\text{dB}$ LISN:n ominaisuudet
Konvertterin ominaisuudet	$Z_{c(\text{min})} = 16.6\Omega$
Vuotovirta	$I_{\text{IkMAX}} = 3.5\text{mA}$ $f_{\text{in}} = 50\text{Hz}$ $U_{\text{in}} = 115\text{V}$ $r_{\text{in}} = 10\%$
RC-vaimennin	$\Delta T_{\text{dampMAX}} = 30\text{K}$
Iterointi	$f_{\text{fStep}} = 5\text{kHz}$

Metodissa voidaan määrittää myös suurin haluttu suodattimen kertaluku ja muita lähtötietoja, mutta metodin pohjalta tehty ohjelma tarvitsee vähintään taulukossa 6.1 listatut lähtötiedot. Induktiivisten komponenttien lähtöarvot tulevat kappaleen 5.1.1 ja 5.3 mukaisesti sydämen ominaisuuksista. Työhön on valittu toroidin muotoinen sydän, jonka materiaali on mangaani sinkki ferriitti. Muut lähtöarvot tulevat kappaleen 4 ja 5 mukaisesti.

6.2 Vaadittavan vaimennuksen määrittys

Käyttäjät syöttää metodiin aikatasossa olevan CM- ja DM-häiriödatan systeemistä, johon EMI-suodatin halutaan mitoittaa. Data voidaan hankkia simuloimalla tai mittaamalla se oikeasta systeemistä kappaleen 2 mukaisesti. Ohjelmassa häiriödatat syötetään kuvan 6.2 CM- ja DM-sijaiskytkentöjen virtalähteisiin.



Kuva 6.2. DM-sijaiskytkentä (vasemmalla) ja CM-sijaiskytkentä (oikealla).

Tulojännitteen ja LISN:n ominaisuudet asetetaan oletusarvojen mukaisesti. Virtalähteet kuvaavat LISN:n näkemää konvertteria CM ja DM tilanteissa, joiden avulla voidaan simuloida niiden häiriötasot. Häiriötasoja verrataan mittausstandardin rajoihin ja määritetään suodattimille (CM ja DM) vaadittavat vaimennukset selvittämällä ensimmäiset mittausrajan ylittävät häiriöt ja niiden taajuudet.

6.3 EMI-suodattimen komponenttien määrittäminen

CM- ja DM-suodattimen induktiivisten komponenttien ja kondensaattorien sähköiset arvot mitoitetaan kappaleen 4 mukaisesti, jonka jälkeen metodi tarkistaa suodattimen vaimennuksen kappaleen 6.4 mukaisesti. Suurin häiriöpiikki, jonka mukaan suodatin pitää mitoitaa, suodattimen vaimennusominaisuudet huomioon ottaen, ei välttämättä ole ensimmäinen rajan ylittävä häiriö. Tämä voi johtaa tilanteeseen, jossa suodatin ei vaimenna tarpeeksi, jolloin metodissa pienennetään rajataajuutta f_{Step} verran. Tämän jälkeen suodattimen komponenttien arvot lasketaan uudestaan ja todennetaan, että suodatin vaimentaa tarpeeksi. Tällaista iterointia jatketaan, kunnes suodatin vaimentaa tarpeeksi. Useamman kertaluvun suodattimissa komponenttien arvot määritetään kappaleen 5.2 mukaisesti ja myös useampiasteisten suodattimien toiminta todennetaan ja mahdollisesti iteroidaan, jos vaimennusta ei ole tarpeeksi.

6.3.1 RC-vaimentimen laskenta

RC-vaimentimen komponenttien laskenta optimoidaan kappaleen 4.2.1 mukaan ja kokeiltavien komponenttien arvojoukko määritetään taulukon 6.2 mukaisesti.

Taulukko 6.2. RC-vaimentimen komponenttilaskennan arvojoukko. Kokeiltavien arvojen kokonaismäärä saadaan R_{dampStep} ja C_{dampStep} tulolla.

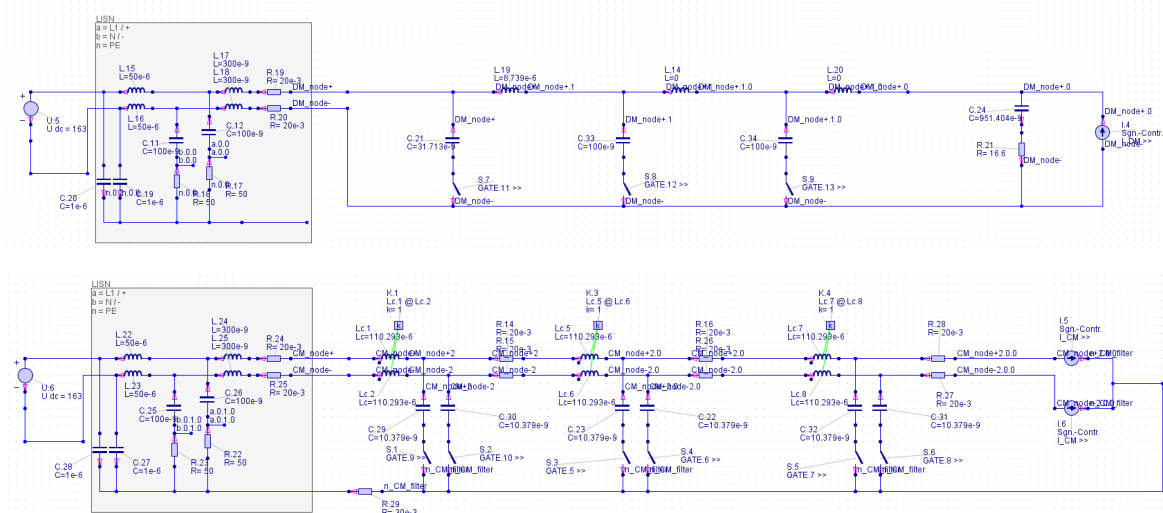
Vaimenninvastuksen arvojoukko	Pienin arvo = $0.5 \cdot Z_f$ Suurin arvo = $1.5 \cdot Z_f$ askelkoko = $R_{\text{dampStep}} = 20$
Vaimenninkondensaattorin arvojoukko	Pienin arvo = C_f Suurin arvo = $5 \cdot C_f$ askelkoko = $C_{\text{dampStep}} = 20$

Sopivia vaihtoehtoja vaimenninkomponenteille voi olla useita, jolloin ne valitaan EMI-suodattimen ominaisimpedanssin ja vaimenninvastuksen lämpöresistanssin avulla. Optimaalisin RC-vaimennin, EMI-suodattimen tilavuuden kannalta, saadaan kun suodattimen kokonaisimpedanssi mitoitetaan mahdollisimman lähelle konvertterin

impedanssia huomioiden marginaali. Lisäksi vaimenninarvoja valittaessa on huomioitava vaimenninvastuksen lämpenemä, joten metodi ilmoittaa käyttäjälle pienimmän vaadittavan lämpöresistanssin määritetyn maksimi lämpenemän perusteella. Tässä diplomityössä tehty ohjelma ei tee RC-vaimentimen optimointia automaattisesti, koska sen implementointi ei aikataulusyistä ollut mahdollista, joten RC-vaimentimen arvot määritetään kappaleen 4.2.1 nyrkkisäännön perusteella.

6.4 Suunnitellun EMI-suodattimen todennus

Metodin mitoitama EMI-suodatin todennetaan simulointiohjelmaa hyödyntäen. Häiriödatat (CM ja DM) syötetään kuvan 6.3 kytkentään, jossa suunniteltu suodatin on mukana. Ohjelma asettaa komponenttien arvot, asettaa suodattimien kertaluvun ja simuloi kytkennän automaattisesti.



Kuva 6.3. DM-todennuskytkentä (ylempi) ja CM-todennuskytkentä (alempi). Kuvassa olevat kytkimet ovat suodattimen asteiden ohjaamista varten.

Simuloinnin jälkeen ohjelma mittaa EMI:n suuruuden (CM ja DM), jonka perusteella voidaan todentaa, että suodatin vaimentaa tarpeeksi vertaamalla sitä standardin häiriörajaan. Jos CM- tai DM-suodatin ei vaimenna tarpeeksi, jatketaan iterointia kappaleen 6.3

mukaisesti. Suodattimen läpäistyä todennus, lasketaan EMI-suodattimen kokonaistilavuus ja lämpösuunnittelun parametrit.

6.5 Suodattimen tilavuus lämpösuunnittelun parametrit

Metodi määrittää tilavuuden eri kertalukujen suodattimille kappaleen 5.1 mukaisesti ja tallentaa ne. Kun kaikki halutut suodatintopologiat ovat mitoitettu, voidaan eri suodatin topologioilla toteutettujen suodattimien tilaavuuksia verrata toisiinsa ja valita pienimmän tilavuuden omaava ratkaisu. Metodi määrittää myös eri kertaluvun suodattimille lämpöparametreja kappaleen 5.3 mukaisesti, joka auttaa suunnittelijaa valitsemaan oikeanlaiset komponentit sekä arvioida tarvittavaa jäähdytystä. Tässä työssä tehty ohjelma tallentaa kaikki tilavuuteen ja lämpötilaan liittyvät arvot, joista voidaan myöhemmin datan käsittelyllä valita mieluisin ratkaisu sovelluskohteeseen.

7 Tulokset

Tässä diplomityössä kehitetyn EMI-suodattimen suunnittelumetodin toimivuus osoitetaan tarkastelemalla sen pohjalta tehdyn ohjelman toimintaa. Ohjelman tarkoitus ei ole olla valmis mitoitustyökalu, joten sille ei ole erikseen tehty käyttöliittymää, dokumentaatiota tai muita osuuksia, joita valmis mitoitustyökalu vaatisi. Ohjelma tulostaa tekstiä suunnittelun eri vaiheista, joista voi seurata mitoituksen etenemistä. Alla on kappaleen 4 esimerkkikonvertterin EMI-suodattimen mitoituksen kulku:

```
EMI-suodattimen mitoitushjelma alkaa
Simulointi alkaa
Simulointi valmis

Ensimmäinen rajan ylittava CM hairio (dBuV)=68.47096612214382
Tarvittava vaimennus CM:lle on 5.470966122143821dBuV Taajuudella 157.0kHz

Ensimmäinen rajan ylittava DM hairio (dBuV)=83.07212117551168
Tarvittava vaimennus DM:lle on 20.072121175511683dBuV Taajuudella 160.0kHz

Aloitetaan 1:n kertaluvun suodattimien komponenttien mitoitus
Mitoitetaan 1 :n kertaluvun DM suodattimen komponentit
X-kondensaattorin kapasitanssi on: 0.19028085330916855 uF
DM-kelan induktanssi on: 52.43379193787449 uH
DM-suodattimen rajataajuus on: 50.38682036301646 kHz
Vaimenninkondensaattorin kapasitanssi on: 0.9514042665458428 uF
Vaimenninvastuksen resistanssi on: 16.6 ohm
Asetetaan 1:n kertaluvun DM-suodattimen komponenttien arvot

Simulointi alkaa
Simulointi valmis

Tarvittava lisavaimennus DM-suodattimelle: 0.0dBuV taajuudella: 0.0kHz
DM-suodatin vaimentaa tarpeeksi

Mitoitetaan 1 :n kertaluvun CM-suodattimen komponentit
Y-kondensaattorin kapasitanssi on: 31.137422001480935 nF
CM-kuristimen induktanssi on: 0.061959315601301 mH
CM-suodattimen rajataajuus on: 114.5844011527147 kHz
Asetetaan 1:n kertaluvun CM suodattimen arvot

Simulointi alkaa
Simulointi valmis
Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 0.0dBuV taajuudella: 0.0kHz
CM-suodatin vaimentaa tarpeeksi

Lopulliset EMI-suodattimen komponenttien arvot 1 -kertaluvun suodattimelle ovat:
Y-kondensaattorin kapasitanssi: 31.137422001480935 nF
CM-kuristimen induktanssi: 0.061959315601301 mH
X-kondensaattorin kapasitanssi on: 0.19028085330916855 uF
DM-kelan induktanssi on: 52.43379193787449 uH
Vaimenninkondensaattorin kapasitanssi on: 0.9514042665458428 uF
Vaimenninvastuksen resistanssi on: 16.6 ohm
Lasketaan EMI-suodattimen tilavuus ja lampoparametrit
Vaimenninkondensaattorin tilavuus on:5.6101091945547275 cm^3
Yhden X-kondensaattorin tilavuus on:2.8452882389109453 cm^3
Yhden Y-kondensaattorin tilavuus on:1.7814476481543275 cm^3
Yhden DM-kelan tilavuus on:4.460506094977924 cm^3
DM-kelan lampenema on:80.4381032618783 K
Yhden CM-choken tilavuus on:0.003046326520392935 cm^3
1:n kertaluvun suodattimen kokonaistilavuus on:10.239895868646489 cm^3
CM-kuristimen suurin sallittu lammontuotto on:0.07399439040154764 W, jolloin sen lampotilan muutos on: 80.4381032618783 K
Vaimenninvastuksen lamporesistanssi on oltava vähintään:1576.135782326337K/W
Tallennetaan datat.
```

Lopetetaan 1:n kertaluvun suodattimen mitoitus
 Aloitetaan 2:n kertaluvun suodattimien komponenttien mitoitus
 Mitoitetaan 2 :n kertaluvun DM suodattimen komponentit
 X-kondensaattorin kapasitanssi on: 0.09514042665458428 uF
 DM-kelan induktanssi on: 26.216895968937244 uH
 DM-suodattimen rajataajuus on: 100.77364072603292 kHz
 Asetetaan 2:n kertaluvun DM-suodattimen komponenttien arvot

Simulointi alkaa
 Simulointi valmis

Tarvittava lisavaimennus DM-suodattimelle: 0.0dBuV taajuudella: 0.0kHz
 DM-suodatin vaimentaa tarpeeksi

Mitoitetaan 2 :n kertaluvun CM-suodattimen komponentit
 Y-kondensaattorin kapasitanssi on: 15.568711000740468 nF
 CM-kuristimen induktanssi on: 0.0309796578006505 mH
 CM-suodattimen rajataajuus on: 229.1688023054294 kHz
 Asetetaan 2:n kertaluvun CM suodattimen arvot

Simulointi alkaa
 Simulointi valmis

Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 9.398128517327748dBuV taajuudella: 180.0kHz
 CM-suodatin ei vaimenna tarpeeksi! Aloitetaan iterointi
 Piennennetaan rajataajuutta: 5.0kHz verran.
 Kokeillaan komponentteja:
 Y-konsaattorin kapasitanssi: 15.568711000740468 nF
 CM-kuristimen induktanssi: 0.03387116524463802 mH
 CM-suodattimen rajataajuus: 219.1688023054294 kHz
 Asetetaan 2:n kertaluvun CM suodattimen arvot

Simulointi alkaa
 Simulointi valmis

Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 9.508527181290816dBuV taajuudella: 180.0kHz
 CM-suodatin ei vaimenna tarpeeksi, jatketaan iterointia.
 Piennennetaan rajataajuutta: 10.0kHz verran.
 Kokeillaan komponentteja:
 Y-konsaattorin kapasitanssi: 15.568711000740468 nF
 CM-kuristimen induktanssi: 0.03718722632872761 mH
 CM-suodattimen rajataajuus: 209.1688023054294 kHz
 Asetetaan 2:n kertaluvun CM suodattimen arvot

//////////////////////////////////ITEROINTIA//////////////////////////////////

Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 0.0dBuV taajuudella: 0.0kHz
 CM-suodatin vaimentaa tarpeeksi, lopetetaan iterointi.
 Lopulliset komponenttien arvot CM-suodattimelle ovat:
 Y-kondensaattorin kapasitanssi: 15.568711000740468 nF
 CM-kuristimen induktanssi: 0.0975152056414301 mH
 CM-suodattimen rajataajuus: 129.1688023054294 kHz

Lopulliset EMI-suodattimen komponenttien arvot 2 -kertaluvun suodattimelle ovat:

Y-kondensaattorin kapasitanssi: 15.568711000740468 nF
 CM-kuristimen induktanssi: 0.0975152056414301 mH
 X-kondensaattorin kapasitanssi on: 0.09514042665458428 uF
 DM-kelan induktanssi on: 26.216895968937244 uH
 Vaimenninkondensaattorin kapasitanssi on: 0.9514042665458428 uF
 Vaimenninvastuksen resistanssi on: 16.6 ohm
 Lasketaan EMI-suodattimen tilavuus ja lampoparametrit
 Vaimenninkondensaattorin tilavuus on:5.6101091945547275 cm³
 Yhden X-kondensaattorin tilavuus on:2.4996856194554726 cm³
 Yhden Y-kondensaattorin tilavuus on:1.4036880240771636 cm³
 Yhden DM-kelan tilavuus on:2.6521359333277057 cm³
 DM-kelan lampenema on:67.63928927164076 K
 Yhden CM-choken tilavuus on:0.0050207585971365045 cm³
 2:n kertaluvun suodattimen kokonaistilavuus on:13.42690330308614 cm³
 CM-kuristimen suurin sallittu lammontuotto on:0.07987896985882909 W, jolloin sen lampotilan muutos on: 67.63928927164076 K

Vaimenninvastuksen lamporesistanssi on oltava vahintaan:1826.8574491015822K/W
 Tallennetaan datat.

Lopetetaan 2:n kertaluvun suodattimen mitoitus

Aloitetaan 3:n kertaluvun suodattimien komponenttien mitoitus
 Mitoitetaan 3 :n kertaluvun DM suodattimen komponentit
 X-kondensaattorin kapasitanssi on: 0.03171347555152809 uF
 DM-kelan induktanssi on: 8.738965322979082 uH
 DM-suodattimen rajataajuus on: 302.32092217809884 kHz
 Asetetaan 3:n kertaluvun DM-suodattimen komponenttien arvot

```

Simulointi alkaa
Simulointi valmis

Tarvittava lisavaimennus DM-suodattimelle: 0.0dBuV taajuudella: 0.0kHz
DM-suodatin vaimentaa tarpeeksi

Mitoitetaan 3 :n kertaluvun CM-suodattimen komponentit
Y-kondensaattorin kapasitanssi on: 5.189570333580156 nF
CM-kuristimen induktanssi on: 0.03250506854714336 mH
CM-suodattimen rajataajuus on: 387.50640691628826 kHz
Asetetaan 3:n kertaluvun CM suodattimen arvot

Simulointi alkaa
Simulointi valmis
Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 13.425969902091282dBuV taajuudella: 180.0kHz
Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 13.425969902091282dBuV taajuudella: 180.0kHz
CM-suodatin ei vaimenna tarpeeksi! Aloitetaan iterointi
Piennennetaan rajataajuutta: 5.0kHz verran.
Kokeillaan komponentteja:
Y-konsaattorin kapasitanssi: 10.379140667160312 nF
CM-kuristimen induktanssi: 0.022580776829758682 mH
CM-suodattimen rajataajuus: 328.7532034581441 kHz
Asetetaan 3:n kertaluvun CM suodattimen arvot

//////////////////////////////////ITEROINTIA//////////////////////////////////

Simulointi alkaa
Simulointi valmis
Tarvittava lisavaimennus CM-suodattimelle on: 0.0dBuV taajuudella: 0.0kHz
CM-suodatin vaimentaa tarpeeksi, lopetetaan iterointi.
Lopulliset komponenttien arvot CM-suodattimelle ovat:
Y-kondensaattorin kapasitanssi: 10.379140667160312 nF
CM-kuristimen induktanssi: 0.1730566121970195 mH
CM-suodattimen rajataajuus: 118.75320345814411 kHz

Lopulliset EMI-suodattimen komponenttien arvot 3 -kertaluvun suodattimelle ovat:
Y-kondensaattorin kapasitanssi: 10.379140667160312 nF
CM-kuristimen induktanssi: 0.1730566121970195 mH
X-kondensaattorin kapasitanssi on: 0.03171347555152809 uF
DM-kelan induktanssi on: 8.738965322979082 uH
Vaimenninkondensaattorin kapasitanssi on: 0.9514042665458428 uF
Vaimenninvastuksen resistanssi on: 16.6 ohm
Lasketaan EMI-suodattimen tilavuus ja lampoparametrit
Vaimenninkondensaattorin tilavuus on:5.6101091945547275 cm^3
Yhden X-kondensaattorin tilavuus on:2.2692838731518243 cm^3
Yhden Y-kondensaattorin tilavuus on:1.2777681493847757 cm^3
Yhden DM-kelan tilavuus on:1.163425735116945 cm^3
DM-kelan lampenema on:51.394107789211674 K
Yhden CM-choken tilavuus on:0.011331171037145652 cm^3
3:n kertaluvun suodattimen kokonaistilavuus on:16.28526226555317 cm^3
CM-kuristimen suurin sallittu lammontuotto on:0.09117997696567033 W, jolloin sen lampotilan muutos on: 51.394107789211674 K
Vaimenninvastuksen lamporesistanssi on oltava vahintaan:1575.7917475271709K/W
Tallennetaan datat.
Lopetetaan 3:n kertaluvun suodattimen mitoitus

Ohjelma paattyy

```

Kuva 7.1. Mitoitusohjelman loki kappaleen 4 esimerkikikonvertterille suunnitellun EMI-suodattimen mitoituksesta. Lokia on lyhennetty ”ITEROINTIA” kohdista.

Ohjelma määrittää vaadittavan vaimennuksen CM- ja DM-häiriödatan perusteella, jonka jälkeen se mitoittaa ensimmäisen kertaluvun suodattimille komponenttien arvot (CM ja DM). Komponenttien arvojen perusteella ohjelma laskee tilavuudet ja lämpöparametrit EMI-suodattimelle. Tämän jälkeen suodattimien kertalukua kasvatetaan ja toistetaan edellä kuvattu prosessi. Ohjelma tulostaa suodattimien yhden vaiheen komponenttien arvot ja rajataajuudet, joista huomaa kuinka komponenttien sähköiset arvot pienentyvät ja suodattimen rajataajuus kasvaa kertaluvun kasvaessa. Mitä suurempi suodattimen kertaluku

on, sitä suurempi on myös sen rajataajuus, jolloin voidaan käyttää pienempiä suodatinkomponentteja.

Kuten kuvan 7.1 lokista huomaa, DM-suodattimen komponenttien sähköiset arvot pienentyvät selkeästi suodattimen kertaluvun kasvaessa. Useamman kertaluvun CM-suodattimien mitoituksessa tapahtuu ilmiö, jossa useamman kertaluvun suodattimelle tarvitaan enemmän vaimennusta kuin alkuperäinen vaadittava vaimennus. Tämä johtuu CM-suodattimen resonansseista, jotka voimistavat joissain tapauksissa EMI:ä. CM-suodattimen resonansseja ei vaimenneta vaimenninpiirillä, samalla tavalla kuin DM-suodattimessa, kappaleessa 4.3 mainittujen syiden takia. Useamman kertaluvun CM-suodattimet mitoitettiin tekemällä suodattimen jokaisesta vaiheesta samanlaiset, kappaleen 5.2 mukaisesti, koska silloin saavutetaan pienin mahdollinen suodattimen tilavuus. Tämä mitoitustapa aiheuttaa resonanssia suodattimen asteiden välillä ja metodissa joudutaan iteroimaan useita kierroksia ennekuin suunniteltu CM-suodatin vaimentaa tarpeeksi eli suodattimen rajataajuutta siirretään, kunnes resonanssien aiheuttamat piikit häiriösignaalissa eivät ole mittausalueella. CM-suodattimen vaiheiden välistä resonanssia voisi vähentää asettamalla suodattimen vaiheiden rajataajuudet riittävän kauas toisistaan käyttämällä mitoituksessa vaihe-erotuskerrointa (Ozenbaugh, Pullen, 2000, 233). Tätä mitoitustapaa ei tutkittu tässä työssä.

CM-suodattimen mitoituksessa painotetaan Y-kondensaattoreita eli suodattimessa käytetään niin suurta kapasitanssia kuin vuotovirtarajoitteen takia on mahdollista. Tämä voi johtaa pieniin CM-kuristimen induktanssin arvoihin, jos vaadittava CM-suodatus on vähäistä. Tämä voi johtaa tilanteisiin, jossa metodi tarjoaa CM-kuristimelle hyvin pientä tilavuuden arvoa, joka olisi periaatteessa mahdollinen toteuttaa, mutta käytännössä vaikea valmistaa. Ohjelma tallentaa jokaisen CM- ja DM-suodattimien komponenttien sähköiset arvot, tilavuudet ja lämpöparametrit, joiden perusteella voidaan valita optimaalisin suodatintopologia.

8 Yhteenveto

EMI tarkoittaa sähkömagneettista häiriötä, joka voi aiheuttaa sähkölaitteiden toimimattomuutta. EMI-päästöille on asetettu rajoituksia erilaisissa standardeissa, jotka laitevalmistajien pitää täyttää. Laitteiden tuottamaa ja laitteeseen tulevaa EMI:ä voidaan suodattaa EMI-suodattimella, joka on elektroniikan komponenteista muodostuva kokonaisuus. EMI-suodattimien mitoitus on monivaiheinen ja yleensä iteratiivinen prosessi, jonka voi tehdä usealla eri tavalla. Suunnittelussa on otettava huomioon useita tekijöitä, joista yksi tärkeimmistä on suodattimen kokonaistilavuus, jotta suunniteltu suodatin mahtuu sille osoitettuun paikkaan. Työn tavoitteena oli muodostaa metodi, jolla EMI-suodattimen suunnittelua, ja optimointia tilavuuden suhteen, voidaan automatisoida.

EMI-suodatin koostuu CM- ja DM-osuuksista, jotka pitää mitoittaa erikseen vaadittavan vaimennuksen ja suodattimelle asetettujen rajoitusten mukaan. DM-suodattimen mitoitus perustuu vaadittavan vaimennukseen ja sovelluskohteen (yleensä konverterrin) impedanssiin. Lisäksi DM-suodattimelle mitoitetaan RC-vaimennin, jotta varmistetaan systeemin stabiiliudesta. CM-suodattimen mitoituksessa on huomioitava standardin asettama rajoitus vuotovirralla, joka rajoittaa Y-kondensaattorien kapasitanssia. Suurimman mahdollisen Y-kondensaattorin kapasitanssin perusteella, voidaan laskea CM-kuristimen induktanssi. Useamman kertaluvun suodattimissa kapasitanssien ja induktanssien arvot jaetaan tasan suodattimien vaiheiden välille, jotta EMI-suodattimen kokonaistilavuudesta saadaan mahdollisimman pieni. Useamman kertaluvun suodattimissa on enemmän komponentteja kuin ensimmäisen kertaluvun suodattimessa, mutta komponentit ovat pienempiä sähköisiltä arvoiltaan ja tilavuudeltaan. EMI-suodattimen kokonaistilavuutta voidaan arvioida tarkastelemalla sen reaktiivisten komponenttien tilavuutta. Tässä työssä muodostettiin EMI-suodattimen suunnittelumetodi, joka mitoittaa yhden ja useamman kertaluvun EMI-suodattimet ja arvioi niiden tilavuutta ja lämpöparametreja. Tilavuuksia ja lämpöparametreja vertailemalla voidaan valita optimaalisin suodatintopologia. Metodin perusteella kirjoitettiin ohjelma, jolla voidaan suunnitella EMI-suodatin edellä kuvatun metodin mukaisesti ja tallentaa arvot, joiden perusteella optimointi tehdään. Ohjelman avulla voidaan mitoittaa ja optimoida EMI-suodattimia ja todentaa metodin toiminta eli diplomityön tavoite saavutettiin.

Metodin toimintaa tarkasteltaessa huomattiin CM-suodattimen resonanssi-ilmiö, joka kasvattaa häiriötä tietyillä taajuuksilla. Metodin toimintaan resonanssi ei haittaa, mutta jatkotutkimuksena olisi hyvä selvittää saisiko CM-resonanssin huomioiva mitoitus tilavuudeltaan pienemmän suodattimen aikaan. EMI-suodattimen komponenttien mitoituksessa ja metodin todennuksessa ei huomioitu kaikkien komponenttien epäideaalisuuksia. Epäideaalisuudet vaikuttavat suodattimen vaimennukseen ja resonansseihin. Epäideaalisuutta voidaan myös hyödyntää käyttämällä suodattimen induktiivisten komponenttien loiskomponentteja suodatukseen, jolla voitaisiin mahdollisesti pienentää EMI-suodattimen kokonaistilavuutta. Komponenttien epäideaalisuuksia olisi hyvä tutkia jatkotutkimuksissa, jotta metodista saataisiin tarkempi ja tilavuuden optimoinnista tehokkaampi. Metodin toimivuutta ei todennettu oikeilla EMI-suodattimilla, joten jatkotutkimuksena metodi tulisi verifioida oikean elämän testauksella. Metodi toimii hyvänä pohjana edistyneemmän mitoitusalgoritmin kehittämiseen, jonka perusteella voitaisiin muodostaa mitoitustyökalu, jota voitaisiin hyödyntää EMI-suodattimen suunnittelu- ja optimointityössä.

Lähteet

Ala G, Giaconia GC, Giglia G, Di Piazza MC ja Vitale G (2016) Design and performance evaluation of a high power-density EMI filter for PWM inverter-fed induction-motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications* 52(3): 2397-2404.

Beerends RJ, ter Morsche HG, Van den Berg JC ja Van de Vrie EM, (2003) *Fourier and Laplace Transforms*.

Boonruang S ja Tarateeraseth V, Optimal Damping Circuits of Pi-Filters for EMI Filter Designs. (2018) 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).: IEEE 756-759.

Das JC (2015) *Power System Harmonics and Passive Filter Designs*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press/Wiley.

Dhar VK ja Takpore TY, *The European EMC Directive in the Light of CE Marketing*. (1997) : IEEE 109-114.

Duff WG (2011) *Designing Electronic Systems for EMC*. Raleigh: The Institution of Engineering and Technology.

EU D (2014) *Electromagnetic Compatibility (EMC) Directive*. Viitattu [June 12,] Available at: https://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive_en.

Giglia G, Ala G, Di Piazza MC, Giaconia GC, Luna M, Vitale G ja Zanchetta P (2018) Automatic EMI filter design for power electronic converters oriented to high power density. *Electronics* 7(1): 9.

Hayes JG ja Goodarzi GA (2018) Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles.

Heldwein ML ja Kolar JW, Design of Minimum Volume EMC Input Filters for an Ultra Compact Three-Phase PWM Rectifier. (2007) Proc. 9th COBEP. 454-461.

Heldwein ML ja Kolar JW (2009) Impact of EMC filters on the power density of modern three-phase PWM converters. IEEE Transactions on Power Electronics 24(6): 1577-1588.

Hiltunen J, Väisänen V ja Silventoinen P, Input Filter Damping without External Passive Components. (2014) 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications.: IEEE 1-7.

Hurley WG and Wölfle WH, (2013) Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications. : John Wiley & Sons.

Jiemin Z ja Yongmei L, The Study of the Standards Architecture and the Standards Attributes Based on EMC Standards and TEMPEST Standards in Computer System. (2013) : IEEE 224-227.

Joffe EB and Lock K, (2011) Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook. : John Wiley & Sons.

Keller M (2013) Comparison of time domain scans and stepped frequency scans in EMI test receivers. Rohde & Schwarz White Paper 12.

Kharanaq FA, Emadi A ja Bilgin B (2020) Modeling of conducted emissions for EMI analysis of power converters: State-of-the-art review. IEEE Access 8: 189313-189325.

Kolar JW, Drofenik U, Biela J, Heldwein ML, Ertl H, Friedli T, et al., PWM Converter Power Density Barriers. (2007) 2007 Power Conversion Conference-Nagoya.: IEEE P-29.

- Lee Y, Liang Y ja Cheng M, Time Domain Measurement System for Conducted EMI and CM/DM Noise Signal Separation. (2005) 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems.: IEEE 1640-1645.
- Li J, Ma S, Yin X ja Qin X, Measurement of Common-Mode and Differential-Mode Noise Source Impedances using a Current Probe and Single Path Lisns. (2019) 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC).: IEEE 641-644.
- Liu Y, Ye X ja Peng J (2020) EMI filter design for single-phase grid-connected inverter with noise source impedance consideration. IET Power Electronics 13(17): 3963-3974.
- Manushyn I (2019) Design and Optimization of EMI Filters for Power Electronics Systems.
- Musznicki P (2018) The Conducted EMI in DC-DC Converters. Warsaw ;: Sciendo.
- Nemashkalo D, Moonen N ja Leferink F, Multi-Channel Time-Domain EMI Evaluation of Dominant Mode Interference for Optimized Filter Design in Three-Phase Systems. (2020) 2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI).: IEEE 205-208.
- Ozenbaugh RL and Pullen TM, (2000) EMI Filter Design. : CRC press.
- Paul CR (2006) Introduction to Electromagnetic Compatibility. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Raggl K, Nussbaumer T ja Kolar JW, Model Based Optimization of EMC Input Filters. (2008) 2008 11th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics.: IEEE 1-6.

Rodewald A (2017) The inductive component in common impedance coupling and ground bounce. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 6(3): 55-60.

Russer P EMC Measurements in the Time-Domain. (2011) 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium.: IEEE 1-35.

Schaffner, E. (2013) *EMC/EMI Filter Design with RB Common-Mode Chokes*.

Sevgi L (2017) *A Practical Guide to EMC Engineering*. Norwood: Artech House.

Shih F, Chen DY, Wu Y ja Chen Y (1996) A procedure for designing EMI filters for AC line applications. *IEEE Transactions on Power Electronics* 11(1): 170-181.

Tarateeraseth V EMI Filter Design Part I: Conducted EMI Generation Mechanism. (2011) *IEEE Electromagn. Conf.* 44-50.

Tarateeraseth V (2012) EMI filter design: Part II: Measurement of noise source impedances. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 1(1): 42-49.

Tarateeraseth V (2012) EMI filter design: Part III: Selection of filter topology for optimal performance. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 1(2): 60-73.

ten Have B, Hartman T, Moonen N ja Leferink F, Misreadings of Static Energy Meters due to Conducted EMI Caused by Fast Changing Current. (2019) 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC).: IEEE 445-448.

Tihanyi L (1995) *EMC in Power Electronics*. : Newnes.

Vedde A, Neuburger M ja Reuss H, An Optimized High-Frequency EMI Filter Design for an Automotive DC/DC-Converter. (2021) 2021 National Power Electronics Conference (NPEC).: IEEE 1.

Wainwright N Can the New EMC Directive, 2014/30/EU, Stem the Tide of Non-Compliant Products? (2015) : IEEE 1457-1462.

West R (1995) Common mode inductors for EMI filters require careful attention to core material selection. Powerconversion and Intelligent Motion-English Edition 21(7): 52-59.

Williams T (2007) EMC for Product Designers. Oxford: Newnes.

Wyatt K and Jost RJ, (2013) EMC Pocket Guide: Key EMC Facts, Equations and Data: Key EMC Facts, Equations and Data. Edison: The Institution of Engineering and Technology.

Xing L ja Sun J (2011) Optimal damping of multistage EMI filters. IEEE Transactions on Power Electronics 27(3): 1220-1227.

Ye S, Eberle W ja Liu Y (2004) A novel EMI filter design method for switching power supplies. IEEE Transactions on Power Electronics 19(6): 1668-1678.

Zhang D, Chen DY, Nave MJ ja Sable D (2000) Measurement of noise source impedance of off-line converters. IEEE Transactions on Power Electronics 15(5): 820-825.

Zhou Y, Chen W, Yang X, Yu Z, Meng X, Ren P, Chen Y ja Huang X (2022) A Novel Neutral Point-Based Active EMI Filter for Common Mode Noise Attenuation. IEEE Transactions on Power Electronics 37(9): 10081-10085.

Liite 1. Fourier-analyysi muuttuvalle pulssisuhteelle

$$f(t) = \begin{cases} 0, & -1 < t < -D \\ U, & -D < t < D \\ 0, & D < t < 1 \end{cases} \quad (\text{A1})$$

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + b_n \cdot \sin(n\omega_0 t)] \\ &= c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n e^{jn\omega_0 t} - c_n e^{-jn\omega_0 t}] \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

Jossa $n \in \mathbb{N}$, $\omega_0 = 2\pi/T$, a_0 , a_n , b_n ja c_n ovat Fourier-kertoimia:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T (f(t)) dt = \int_{-1}^1 f(t) dt = \int_{-D}^D U dt = 2 \cdot U \cdot D \quad (\text{A3})$$

$$\begin{aligned} a_n &= \int_{-1}^1 (f(t) \cdot \cos(n\pi t)) dt = \int_{-D}^D (U \cdot \cos(n\pi t)) dt \\ &= \frac{U}{n\pi} (\sin(n\pi D) - \sin(-n\pi D)) = \frac{2}{n} \cdot \frac{U}{\pi} \cdot \sin(n\pi D) \end{aligned} \quad (\text{A4})$$

$$\begin{aligned} b_n &= \int_{-1}^1 (f(t) \cdot \sin(n\pi t)) dt = \int_{-D}^D (U \cdot \sin(n\pi t)) dt \\ &= -\frac{U}{n\pi} (\cos(n\pi D) - \cos(-n\pi D)) = 0 \end{aligned} \quad (\text{A5})$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{n} \cdot \frac{U}{\pi} \cdot \sin(n\pi D)\right)^2 + 0} = \frac{2}{n} \cdot \frac{U}{\pi} \cdot \sin(n\pi D) = a_n \quad (\text{A6})$$