

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte

Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Gundars AŠMANIS

Doktora studiju programma „Elektrotehnoloģiju datorvadība”

**EMI FILTRU AUGSTFREKVENČES
PARAZĪTISKO PARAMETRU MĒRĪŠANA
UN MODELĒŠANA**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:

Dr.habil.sc.ing. profesors

L.RIBICKIS

RTU Izdevniecība

Rīga 2014

UDK 004.896(043.2)

Me 220 e

Ašmanis G. EMI filtru augstfrekvences parazitisko
parametru mērīšana un modelēšana.

Promocijas darba kopsavilkums: RTU, 2014, 35 lpp.



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā
„Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2014

ISBN 978-9934-10-501-2

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gada 30. Decembrī, pulksten 11.00. Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes iela 12-212.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Oskars Krievs
Rīgas Tehniskā universitāte, EEF,IEEI

Dr. Johannes Wolf
Eiropas kosmosa aģentūra

Dr. habil. sc. ing. Andris Šnīders
LLU TF Lauksaimniecības enerģētikas institūts

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Gundars Ašmanis (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs uzrakstīts angļu valodā, tas sastāv no anotācijas, satura, ievada, satura izklāsta sešās pamatnodaļās, secinājumiem un izmantotās literatūras saraksta. Darba apjoms ir 162 lappuses, tajā iekļauts 161 attēls, 7 tabulas, 113 formulas. Promocijas darba izstrādei izmantoti 53 informācijas avoti.

Anotācija

Promocijas darbs ir veltīts elektromagnētiskās savietojamības (EMS) jomai, precīzāk, elektromagnētiskās interferences (EMI) barošanas filtru modelēšanai, mērījumiem un filtra parazitisko parametru analīzei.

Pirmajā nodaļā tiek vispārīgi apskatīta literatūra un problēmas, kas saistītas ar elektromagnētiskās interferences barošanas filtru modelēšanu, mērījumiem un filtra parazitisko parametru analīzi.

Otrā nodaļa veltīta matemātisko sakarību izklāstam un skaidrojumam- S-parametru pielietojums filtru analīzē, S-parametru sakarības, induktīvo filtra komponentu analīze, izmantojot S-parametrus, kapacitatīvo filtra komponentu analīze, izmantojot S-parametrus un kļūdas, kas saistītas ar S-parametru pielietošanu.

Trešā nodaļa apskata trīsfāžu Π tipa filtru parazitiskos parametrus un to iespaidu uz filtra sniegumu. Izmantojot S-parametru mērījumus, tiek aprēķināti un analizēti trīs fāžu filtru parazitiskie parametri.

Ceturtnā nodaļa apskata trīsfāžu T tipa filtru parazitiskos parametrus un to iespaidu uz filtra sniegumu. Izmantojot S-parametru mērījumus, tiek aprēķināti un analizēti trīs fāžu T tipa filtru parazitiskie parametri.

Piektā nodaļa ietver inovatīvu elektromagnētiskās interferences barošanas filtru kondensatoru modelēšanu, pielietojot CST MSW 3D elektromagnētisko lauku modelēšanas programmatūru. Izstrādāti trīs

kondensatoru modeļi, kas samazina laiku un skaitļošanas resursus, kuri nepieciešami kondensatoru modelēšanai.

Sestā nodaļa veltīta elektromagnētiskās interferences barošanas filtru induktīvo komponentu modelēšanai, pielietojot CST MSW 3D elektromagnētisko lauku modelēšanas programmatūru.

Saturs

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne	7
Darba mērķis.....	8
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	8
Praktiskais nozīmīgums	9
Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli.....	10
Darba struktūra un apjoms	10
Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs	12
Promocijas darba aprobācija.....	12
1. Elektromagnētiskās savietojamības problēmu analīze	14
2. Filtru analizēšana pielietojot S-parametrus	16
3. Parazītisko komponentu iespaids uz trīsfāžu II tipa EMI filtru .	18
4. Parazītisko komponentu iespaids uz trīsfāžu T tipa EMI filtru..	20
5. Kondensatoru mijinduktivitātes modelēšana	22
6. Induktivitātes spoļu mijinduktivitātes modelēšana	26
10. Secinājumi.....	29
11. Darba turpinājums.....	32
12. Izmantotās literatūras saturs.....	33

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Mūsdienās elektronika tiek integrēta plašā produktu klāstā, kas ir brīvi pieejama tirgū. Elektronikas darbības ātrums joprojām palielinās, kas noved pie īsa impulsa augšanas un krišanas laika-paplašinās impulsa spektrs. Elektronisko komponentu izmēri un masa samazinās, līdz ar to tās tiek izvietotas daudz blīvāk, radot vieglas un kompakta ierīces. Kompakta komponentu novietošana noved pie komponentu mijiedarbības. Elektromagnētiskās interferences (EMI) filtri tiek plaši pielietoti, lai samazinātu vadāmības un ēterā izstaroto traucējumu izplatību. Arī EMI filtru izmēri un svars tiek samazināts, lai sekotu elektronikas evolūcijai. Induktīvas un kapacitatīvas komponentes uz spiestās plates tiek kompakti novietotas, kas rada risku pastiprinātai komponentu mijiedarbībai. Līdz ar to komponentu mijiedarbība un komponentu novietojums uz spiestās plates kļūst par ļoti svarīgu aspektu filtru projektēšanas gaitā.

Promocijas darbs ietver sekojošus EMI filtru izstrādes aspektus- trīs fāžu barošanas EMI filtru starpkomponentu parazitisko parametru netieša mērīšana, EMI filtra starpkomponentu mijiedarbības analīze, izmantojot 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanu, EMI filtra induktīvo un kapacitatīvo komponentu parametru mērīšana un mērījumu kļūdu analīze. Ir izstrādāti vairāki 3D modeļi EMI filtru kondensatoriem, kas samazina skaitļošanas resursus un laiku, kas nepieciešami, lai veiktu EMI filtra starpkomponentu parazitisko komponentu analīzi, izmantojot

elektromagnētiskā lauka modelēšanu. Balstoties uz 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanu, ir veikta EMI filtru starpkomponenšu parazītisko parametru samazināšanas iespēju izpēte. Augstāk minētie pētījuma aspekti ir kritiski, lai veiktu augstas veiktspējas EMI filtra izstrādi.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt metodoloģiju trīsfāžu barošanas EMI filtru starpkomponenšu parazītisko komponentu netiešajai mērīšanai.

Promocijas sekundārais mērķis ir pielietot CST MSW 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūru EMI filtru starpkomponenšu parazītisko parametru modelēšanā un EMI filtru komponentu izstrādē.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

- Izstrādāta metode trīsfāžu EMI filtru starpkomponentu parazītisko parametru netiešai mērīšanai un aprēķinam;
- Izstrādāta metode EMI filtru komponentu parazītisko parametru mērīšanas kļūdu aprēķinam, veicot mērījumus ar vektoru ķēžu analizatoru;

- Izstrādāti trīs 3D kondensatoru modeļi, lai modelētu mijinduktivitāti starp kondensatoriem EMI filtros;
- Veikta sekmīga EMI filtra starpkomponenšu parazitisko parametru modelēšana: kondensators-kondensators un induktivitātes spole- induktivitātes spole;
- Promocijas darbā izstrādāts induktivitātes spoles 3D modelis, kas ar augstu precizitāti dod iespēju modelēt mijinduktivitāti starp induktivitātes spolēm.

CST MSW programmatūra ir sekmīgi pielietojama induktivitātes spoļu parazitisko parametru modelēšanā, induktivitātes spoļu savstarpējās mijiedarbības modelēšanā, kondensatoru parazitisko parametru modelēšanā un mijinduktivitātes modelēšanā starp kondensatoriem.

Praktiskais nozīmīgums

Veicot virkni S-parametru mērījumu ar vektoru ķēžu analizatoru, balstoties uz izstrādātas metodoloģijas, ir iespējams aplēst trīsfāžu EMI barošanas filtru starpkomponenšu parazitiskos parametrus. Tas dod iespēju diagnosticēt filtra trūkumus un funkcionālo traucējumu avotu, kā arī analizēt starpkomponenšu samazināšanai veikto pasākumu lietderību.

Izstrādātie EMI filtru 3D modeļi dod iespēju veikt starpkomponenšu mijiedarbības analīzi, aizstājot laukietilpīgus

mērījumus ar dārgu mēraparatūru. Elektromagnētiskā lauka modelēšanai izstrādātie EMI filtra komponentu modeļi ir izveidojami, balstoties uz komponentu ražotāju sniegtajiem datiem- fiziskie izmēri, materiālu īpašības. Tādējādi EMI filtrs var tikt izstrādāts un sekmīgi analizēts pirms prototipa izveides.

Pētīšanas metodika un pielietotie materiāli

Pētījumu veikšanai ir pielietota elektrisko ķēžu modelēšana, 3D elektromagnētisko lauku modelēšana un veikti mērījumi ar vektoru ķēžu analizatoru. Iegūtie modelēšanas rezultāti ir apstrādāti un salīdzināti ar mērījumu rezultātiem. Pētījumu laikā pielietotie rīki:

- Computer Simulation Technology Microwave Studio (CST MWS)- 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūra;
- MATLAB- modelēšanas un mērījumu datu apstrāde;
- Pspice- elektrisko ķēžu modelēšana;
- Orcad- spiesto plašu projektēšana;
- ZVRE- vektoru ķēžu analizators.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs ir veltīts elektromagnētiskās savietojamības (EMS) nozarei- elektrotehnisko zinātņu kopai, kas pēta netīšu elektromagnētiskās enerģijas ģenerēšanu, izplatīšanos un

uztveršanu vadāmības un ēterā emitēta lauka ceļā, kas var izraisīt nevēlamu elektromagnētisko interferenci. Promocijas darbs ietver vienu no EMS aspektiem- filtrus, precīzāk, EMI barošanas filtru modelēšanu, mērījumus un to analīzi.

Pirmā nodaļa ir veltīta vispārējam EMI filtru problemātikas apskatam, aktuāliem pētījumiem šajā nozarē.

Otrā nodaļa ietver matemātisko bāzi, kas pielietota turpmākajās promocijas darba nodaļās, analizējot EMI filtrus izmantojot S-parametrus.

Trešā nodaļa analizē trīsfāžu II tipa EMI barošanas filtru starpkomponentu parazitiskos parametrus.

Ceturtdā nodaļa ir veltīta trīsfāžu T tipa EMI barošanas filtru starpkomponentu parazitisko parametru analīzei.

Piektā nodaļa ietver EMI filtru kondensatoru 3D elektromagnētisko modeļu izstrādi un verificēšanu, izmantojot CST MSW programmatūru. Starpkondensatoru mijiedarbība tiek analizēta ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas palīdzību, izstrādātas mijiedarbības samazināšanas metodes.

Sestā nodaļa ietver EMI filtru induktīvo komponentu 3D elektromagnētisko modeļu izstrādi un verificēšanu, izmantojot CST MSW programmatūru. Mijiedarbība starp induktīvām komponentēm tiek analizēta ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas palīdzību, izstrādātas mijiedarbības samazināšanas metodes.

Promocijas darbs sastāv no sešām nodaļām, ietver 161 attēlu, 7 tabulas, 113 vienādojumu, 53 atsaucis uz avotiem literatūrā,

anotācijas latviešu un angļu valodā, ievada, satura rādītāja. Darbs ir uzrakstīts angļu valodā un ietverts 162 lappusēs.

Darbā iegūto rezultātu aprobācija starptautiskās konferencēs

1. Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ2010), Kuresare, Estonia.
2. International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2012 (EMC EUROPE 2012), Rome, Italy.
3. Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility 2012 (APEMC 2012), Sentosa, Singapore.
4. International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2014 (EMC Europe 2014), Gothenburg, Sweden.

Promocijas darba aprobācija

1. L.Ribickis, G. Asmanis. Elektromagnētiskā savietojamība. - Rīga, Latvija: RTU Izdevniecība, 2010. 230 p.
2. L. Ribickis, V. Novikovs, A. Rusko, G. Asmanis, "Matrix frequency converter conducted and radiated emissions," in *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Kuressaare, Estonia, 2010, pp. 131 - 136.
3. G. Asmanis, A. Asmanis, D. Stepins, "Mutual couplings in three phase T-type EMI filters," in *2012 International*

Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Rome, Italy, 2012, pp. 1-6.

4. D.Stepins, G. Asmanis, "Effects of Parasitic Parameters on Three Phase EMI Filters," *Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering*, Tallin, Estonia, 2012, pp. 93-102.
5. G. Asmanis, A. Asmanis, L. Ribickis, "Analysis of high frequency effects in three phase EMI filters," in *2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Sentosa, Singapore, 2012, pp. 653 - 656.
6. G. Asmanis, A. Asmanis, D. Stepins, "Measuring capacitor parameters using vector network analyzers," *Electronics*, Palanga, Lithuania, vol. 18, no. 1, pp. 29-38, June 2014.
7. D. Stepins, A. Asmanis, L. Ribickis, G. Asmanis, "Capacitors mutual inductance modeling and reduction," in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014)*, Gothenburg, Sweden, 2014, pp. 1176-1181.

1. Elektromagnētiskās savietojamības problēmu analīze

Elektromagnētiskā savietojamība (EMS) ir iekārtu spēja darboties tai paredzētajā vidē bez traucējumu radīšanas apkārt esošajām iekārtām. Iekārtu var saukt par elektromagnētiski savietojamu, ja tā:

- Nerada traucējumus citām iekārtām;
- Ir noturīga pret traucējumiem, ko rada citas iekārtas;
- Ir noturīga pret traucējumiem, ko rada pati iekārta.

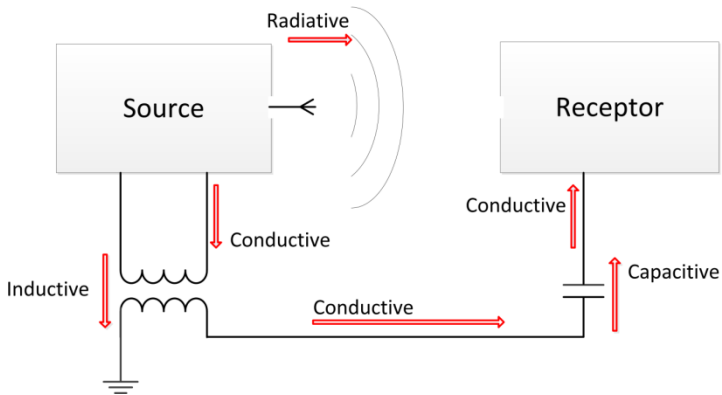
Elektromagnētiskā interference (EMI) ir elektrisko un elektronisko iekārtu mijiedarbība.

Elektromagnētiskā savietojamība ir viena no obligātajām prasībām, kam jāatbilst jebkurai elektronikas iekārtai visā pasaulē. Eiropas Savienībā šādas prasības nosaka elektromagnētiskās savietojamības direktīva [1], kas ir ieviesta katrā no dalībvalstīm. Lai pierādītu atbilstību direktīvas prasībām tiek pielietota virkne elektromagnētiskās savietojamības standartu, kas ietver praktiski visas elektromagnētiskās savietojamības aspektus.

Pamatā, EMS ir elektromagnētiskās enerģijas ģenerēšana, pārvade un uztveršana- 1.1.att. Lai novērstu EMS radītu problēmu, ir nepieciešams iedarboties uz vienu no šiem posmiem. Pastāv vairāki elektromagnētiskās enerģijas pārvades jeb elektromagnētisko traucējumu pārvades veidi:

- Parazītiskā kapacitāte;
- Mijinduktivitāte;
- Vadāmība;

- Elektromagnētisko viļņu izplatība.

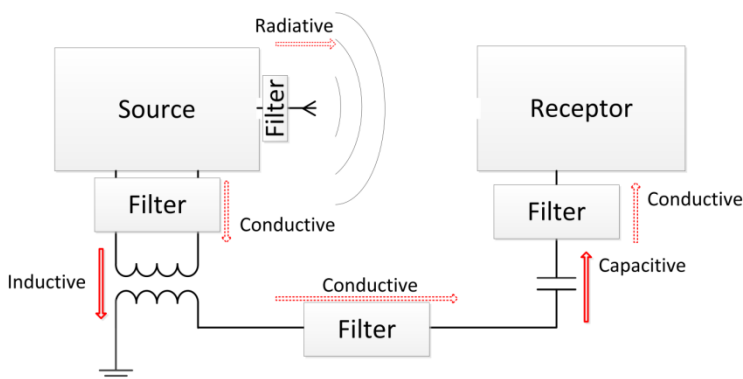


1.1.att. Elektromagnētiskās savietojamības aspekti:
elektromagnētiskās enerģijas ģenerēšana, pārvade un uztveršana

Filtru pielietošanas mērķis EMS problēmu risināšanā ir ierobežot elektromagnētisko traucējumu izplatību un samazināt traucējumu avota radīto traucējumu līmeni, lai tas nespētu iedarboties uz traucējumu uztvērēju, 1.2.att.

Elektromagnētisko traucējumu spektrs ir plašs, sākot no līdzstrāvas līdz vairākiem desmitiem GHz. Promocijas darbs ir veltīts vadāmības traucējumu filtru izpētei frekvenču diapazonā 150kHz- 30MHz. Šādi filtri tiek pielietoti visās elektronikas iekārtās, kas tiek pieslēgtas elektroapgādes tīklam. Tā kā mūsdienu elektronikas iekārtu izmēri samazinās, tiek samazināti arī filtru izmēri. Filtru samazināšana notiek uz komponentu novietojuma blīvuma paaugstināšanas. Samazinot attālumu starp filtra

komponentēm, ir jāņem vērā komponentu mijiedarbība, kas krasi samazina filtra lietderību, it sevišķi MHz diapazonā [2], [3]. Filtra lietderību iespaido arī pašu filtra komponentu parazitiskie parametri, kas liedz sasniegt augstu elektromagnētisko traucējumu vājinājumu [4], [5], [6], [7], [8], [9].



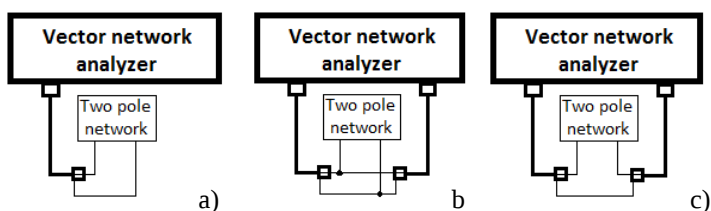
1.2.att. Filtru pielietošana EMS problēmu risināšanā

2. Filtru analizēšana pielietojot S-parametrus

EMI filtru raksturo vairāki parametri- ieejas pilnā pretestība, izejas pilnā pretestība, taču viens no būtiskākajiem ir traucējumu vājināšana. Traucējumu vājinājums ir atkarīgs no frekvences, slodzes pilnās pretestības un traucējumu avota pilnās pretestības, strāvas. Praktiski visi ražotāji, vadoties pēc standarta CISPR17 [10], nodrošina filtrus ar tehnisko dokumentāciju, kur filtra vājinājums ir

mērīts pie fiksētām slodzes un avota pretestībām- 0.1Ω , 50Ω , 100Ω , kas nesniedz pilnīgu filtra raksturojumu, jo slodzes un avota pretestība ir frekvenču atkarīgs lielums. S-parametru mērījumi sniedz iespēju aprēķināt filtra traucējumu vājinājumu pie jebkuras filtra slodzes/traucējumu avota pilnās pretestības jebkurā frekvencē. Izmantojot S-parametrus, filtrs tiek uztverts kā četrpols, sniedzot iespēju analizēt tā pārvades un atstarošanās koeficientus, kā arī izvirzīt vienkāršotas ekvivalentās shēmas, kas dod iespēju netiešā veidā mērīt filtra starpkomponenšu parazītiskos parametrus.

S-parametri tiek mērīti ar vektoru ķēžu analizatoru. Vektoru ķēžu analizators ir pielietojams arī filtra komponentu mērījumiem, aizstājot pilnās pretestības analizatorus, kas ir reti sastopami tirgū, dārgi un ar šauru pielietojuma spektru. Pastāv vairākas komponentu mērījumu metodes 2.1.att. Katra no metodēm ir pielietojama komponentu mērījumiem, taču mērījumu kļūda ir atkarīga gan no izvēlētajās metodes, gan komponentu parametriem, gan frekvenču diapazona, kurā tiek veikti mērījumi.



2.1.att. Komponentu parametru mērīšana ar vektoru ķēžu analizatoru: a) mērot atstarošanas koeficientu S_{11} ; b) mērot pārvades koeficientu S_{21} , paralēlā slēgumā; c) mērot pārvades koeficientu S_{21} virknes slēgumā

Šī promocijas darba nodaļa aptver un analizē visu matemātisko bāzi, kas pielietota turpmākajiem mērījumiem, metodikas izstrādei un modelēšanas rezultātu analizēšanai. Tiek izveidotas filtra kapacitatīvo un induktīvo komponentu ekvivalentās shēmas ietverot parazītiskos elementus, kas ir būtiski promocijas darba izstrādei, balstoties uz komponentu S-parametru mērījumiem, pielietojot metodes ar iespējami mazāko mērījumu kļūdu.

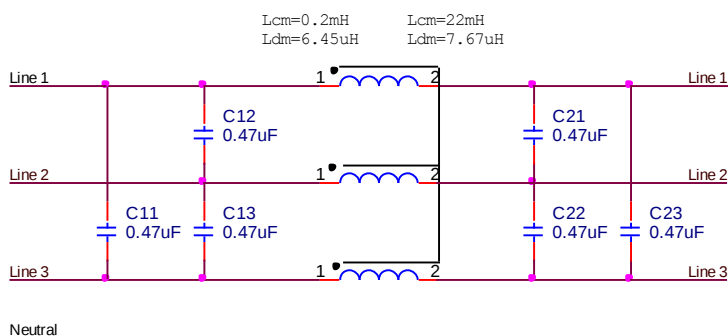
3. Parazītisko komponentu iespaids uz trīsfāžu II tipa EMI filtru

Šī promocijas darba nodaļa veltīta trīsfāžu II tipa EMI filtra starpkomponentu parazītisko parametru analīzei. Analīzes veikšanai, metodikas izstrādei un tās verificēšanai izvēlēts tipisks trīsfāžu EMI filtrs, kas bieži atrodams industriālās elektronikas iekārtās. Filtra shēma ir dota 3.1.att. EMI filtram ir iespējami dažādi izpildījumi-komponentu novietojums, spiestās plates celiņu konfigurācija un komponentu izpildījums.

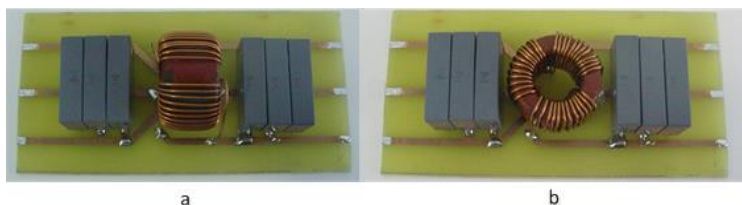
II tipa EMI filtram netieši mērīti un analizēti sekojoši starpkomponentu parazītiskie parametri:

- Mijinduktivitāte starp kondensatoriem;
- Mijinduktivitāte starp kondensatoru un sinfāzes induktivitātes spoli;
- Mijinduktivitāte starp induktivitātes spoli un spiestās plates zemējuma slāni;

- Mijinduktivitāte starp filtra ieeju un izeju;
- Mijinduktivitāte starp filtra ieeju/izeju un sinfāzes inductivitātes spoli;
- Parazītiskā kapacitāte starp filtra ieeju un izeju.



3.1.att. Tipiska trīsfažu filtra shēma



3.2.att. Trīsfažu filtrs ar: a) vertikālu sinfāzes inductivitātes spoli; b) horizontālu sinfāzes inductivitātes spoli

Izstrādātā trīsfažu filtra ekvivalentā shēma, kas ietver komponentu parazītiskos parametrus un starpkomponentu parazītiskos parametrus

ir modelēta PSpice vidē. Prototipu mērījumu rezultāti salīdzināti ar modelēšanas rezultātiem.

Izmantojot PSpice modelēšanas vidi ir analizēts starpkomponenšu parazitisko parametru iespaids uz filtru traucējumu vājinājumu, definējot svarīgākās parazitiskās komponentes, kas rada efektīvu augstfrekvences traucējumu pārvades ceļu.

4. Parazitisko komponentu iespaids uz trīsfāžu T tipa EMI filtru

Šī promocijas darba nodaļa veltīta trīsfāžu T tipa EMI filtra starpkomponentu parazitisko parametru analīzei. Analīzes veikšanai, metodikas izstrādei un tās verificēšanai izvēlēts tipisks trīsfāžu EMI filtrs, kas bieži atrodams industriālā elektronikas iekārtā. Filtra shēma ir dota 4.1.att. EMI filtram ir iespējami dažādi izpildījumi-komponentu novietojums, spiestās plates celiņu konfigurācija un komponentu izpildījums. Pētījuma vajadzībām ir izvēlētas filtra konfigurācijas, kurās atšķiras sinfāzes induktivitātes spoles novietojuma izpildījums- horizontāls, vertikāls- 4.2.att.

T tipa EMI filtram netieši mērīti un analizēti sekojoši starpkomponentu parazitiskie parametri:

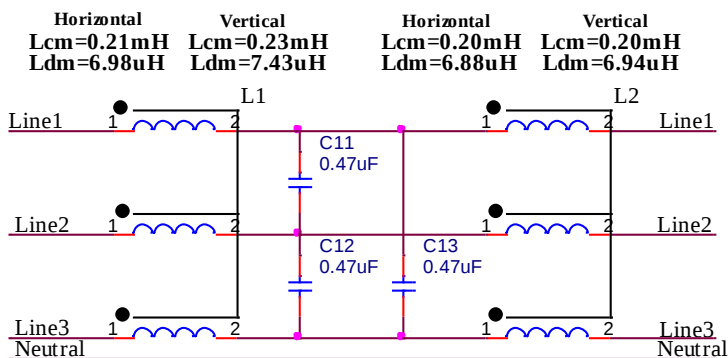
- Mijinduktivitāte starp sinfāzes induktivitātes spolēm;
- Mijinduktivitāte starp kondensatoru un sinfāzes induktivitātes spoli;
- Mijinduktivitāte starp induktivitātes spoli un spiestās plates zemējuma slāni;

- Parazītiskā kapacitāte starp filtra ieeju un izeju.

Tādi EMI filtra starpkomponenšu parazītiskie parametri kā:

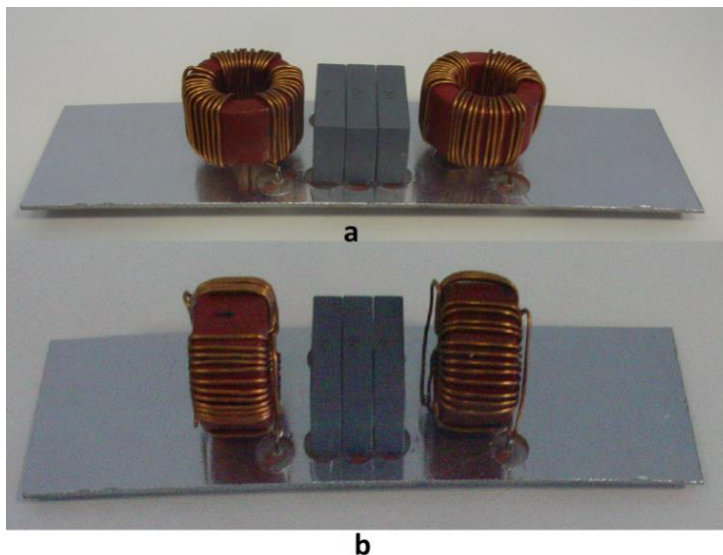
- Mijinduktivitāte starp filtra ieeju un izeju;
- Mijinduktivitāte starp filtra ieeju/izeju un sinfāzes inductivitātes spoli,

netika ņemti vērā, jo atstāj niecīgu iespaidu uz filtra traucējumu vājinājumu.



4.1.att. Tipiska trīsfāžu EMI filtra shēma

Izstrādātā trīsfāžu filtra ekvivalentā shēma, kas ietver komponentu parazītiskos parametrus un starpkomponentu parazītiskos parametrus, ir modelēta PSpice vidē. Prototipu mērījumu rezultāti salīdzināti ar modelēšanas rezultātiem.



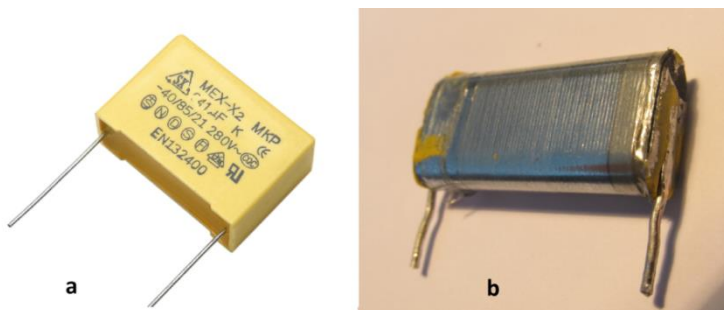
4.2.att. Trīsfāžu filtrs ar: a) horizontālu sinfāzes induktivitātes spoli; b) vertikālu sinfāzes induktivitātes spoli

Izmantojot PSpice modelēšanas vidi, ir analizēts starpkomponenšu parazītisko parametru iespaids uz filtru traucējumu vājinājumu, definējot svarīgākās parazītiskās komponentes, kas rada efektīvu augstfrekvences traucējumu pārvades ceļu.

5. Kondensatoru mijinduktivitātes modelēšana

EMI filtros komponentes ir novietotas pēc iespējas tuvāk viena otrai, lai samazinātu filtra izmērus, kas noved pie filtra komponentu mijiedarbības [11], samazinot filtra traucējumu vājināšanas spēju.

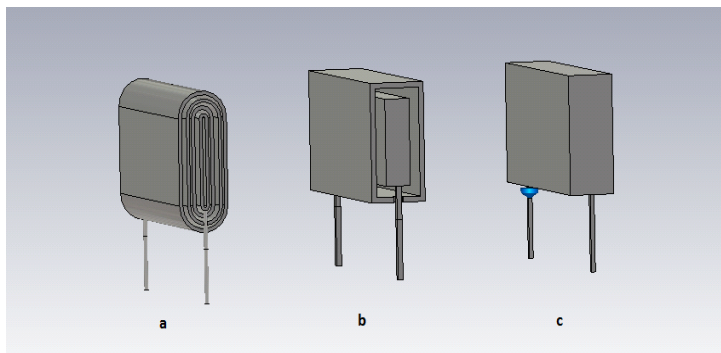
Literatūrā ir atrodama virkne metodiku un paņēmieni, lai veiktu tiešu un netiešu komponentu mērīšanu [12], [11], [13], parazitisko parametru samazināšanu [14] un optimizāciju [15], [16], [17]. Taču, pašlaik nav pieejama informācija par tirgū populārāko 3D elektromagnētisko lauku modelēšanas programmatūru pielietojumu EMI filtru kondensatoru mijinduktivitātes modelēšanā. Lai gan literatūrā ir pieejami pētījumi par 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanas pielietojumu filtra kondensatoru mijinduktivitātes modelēšanā, taču šie nav industrijas vadošie modelēšanas rīki, bet gan programmatūra, kas piemērota šaura spektra uzdevumu veikšanai [18], [19], [20].



5.1.att. Barošanas filtru EMI kondensators: (a) Mērījumiem izmantotais kondensators; (b) Kondensatora iekšējā struktūra

Barošanas filtru EMI kondensatori parasti ir izveidoti no vairākiem tūkstošiem metalizētas filmas kārtām, kā attēlots 5.1.att. Šāda veida kondensatora struktūra nav piemērota modelēšanai, jo prasa lielus skaitļošanas ātruma un atmiņas apjoma resursus.

Promocijas darbā izstrādāti trīs veidu modeļi EMI filtru kondensatoru modelēšanai CST MSW vidē, 5.2.att.



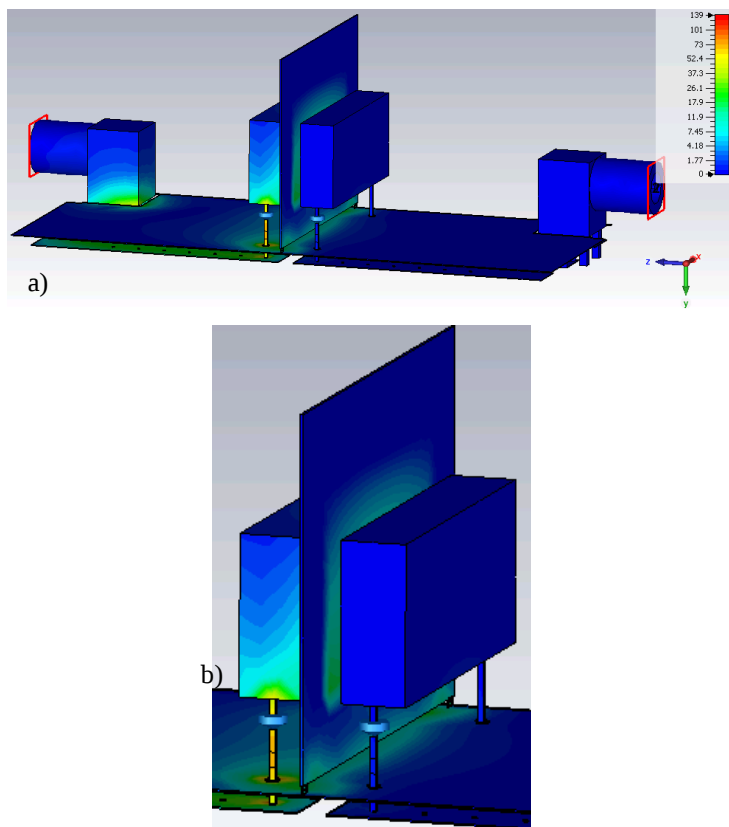
5.2.att. Izstrādātie kondensatoru modeļi: (a) modelis - Cap1; (b) modelis - Cap2; (c) modelis - Cap3

Izstrādātie 3D kondensatoru modeļi ir verificēti, veicot prototipu mērījumus un modelēšanu. Mērījumu un modelēšanas rezultāti sakrīt ar augstu precizitāti.

Pielietojot CST MSW 3D elektromagnētisko lauku modelēšanas vidi un matemātisko bāzi, kas apkopota promocijas darba otrajā nodaļā, ir iespēja noteikt starpkondensatoru mijinduktivitāti, neveicot virkni laikietilpīgu prototipu mērījumus ar dārgu mēraparatūru.

Promocijas darbā novērtētas starpkondensatoru mijinduktivitātes samazināšanas metodes, izmantojot CST MSW vidi. Kondensatoru mijiedarbību iespējams vizualizēt izmantojot struktūru virsmas strāvu modelēšanu, diagnosticējot apgabalus ar paaugstinātu virsmas strāvas blīvumu. Šāda situācija vizualizēta 5.3.att. gadījumam, kad

ekranējums nav pilnībā pievienots pie spiestās plates zemējuma slāņa.



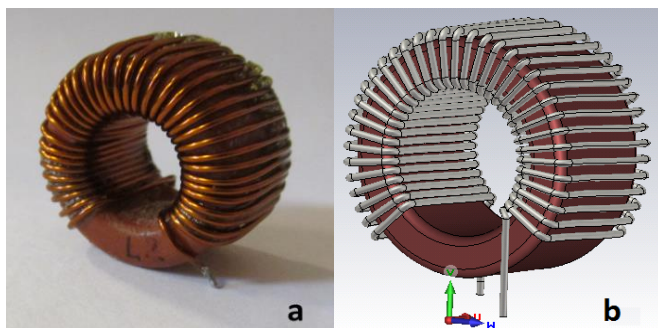
5.3.att. Virsmas strāvu modelēšana CST MSW vidē: a) kopējā struktūrā; b) pietuvināts kondensators un ekranējums

6. Induktivitātes spoļu mijinduktivitātes modelēšana

Elektronikas evolūcijas rezultātā elektronisko ierīču izmēri ir samazinājušies. Elektronikas ierīču evolūcijai seko EMI filtru evolūcija, lai nodrošinātu elektronisko iekārtu elektromagnētisko savietojamību. Kompaktos EMI filtros komponentes ir novietota ļoti tuvu viena otrai, kas rada komponentu mijiedarbības risku [11]. Induktīvu komponentu- induktivitātes spoļu ciešs novietojums sekmē vērā ņemamas mijinduktivitātes rašanos starp šīm komponentēm. Literatūrā ir prezentētas šādu mijiedarbību mērīšanas metodikas [13], [12], tajā skaitā mijiedarbības samazināšanas pasākumi un mijiedarbības optimizācija [21], [15], [17], [14]. Taču literatūrā nav pieejama informācija par populārāko tirgū esošo 3D elektromagnētisko lauku modelēšanas programmatūru pielietojumu šādu problēmu risināšanā. Literatūrā ir apskatīta specifisku modelēšanas rīku pielietošana, lai modelētu induktivitātes spoļu mijinduktivitāti [19], [20], [18].

EMI filtru induktivitātes spole parasti ir veidota no ferīta serdes uz kuras atrodas vairāki vijumi no izolētas vara stieples. Induktivitātes spoļu raksturošana ir komplekss un laikietilpīgs pasākums. Induktivitātes spoles parazītiskie parametri ir atkarīgi no tās fiziskajiem izmēriem un elektromagnētiskajām īpašībām- serdes izmēriem, serdes izolācijas biezuma, stieples diametra, stieples izolācijas biezuma, vijumu novietojuma, vijumu skaita, stieples un serdes materiāla īpašībām. Promocijas darbā izstrādātais induktivitātes spoles modelis ir redzams 6.1.att. Modelis ir verificēts,

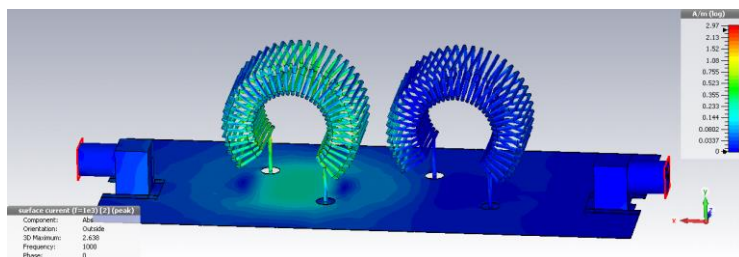
veicot prototipa mērījumus un 3D modeļa modelēšanu CST MSW vidē. Modelēšanas un mērījumu rezultāti sakrīt, taču precizitāte ir atkarīga no šādiem faktoriem: 3D modeļa precizitāte, materiālu definēšana 3D modelim, modeļa optimizācija kādam noteiktam frekvenču diapazonam.



6.1.att. a) Induktivitātes spoles prototips, b) CST MSW 3D induktivitātes spoles modelis

Pielietojot CST MSW 3D elektromagnētisko lauku modelēšanas vidi un matemātisko bāzi, kas apkopota promocijas darba otrajā nodaļā, ir iespēja noteikt mijinduktivitāti starp divām induktivitātes spolēm, neveicot virkni laikietilpīgu prototipu mērījumus ar dārgu mēraparatūru.

Promocijas darbā novērtētas mijinduktivitātes samazināšanas metodes, izmantojot CST MSW vidi. Induktivitātes spoļu mijiedarbību iespējams vizualizēt, izmantojot struktūru virsmas strāvu modelēšanu, diagnosticējot apgabalus ar paaugstinātu virsmas strāvas blīvumu. Šāda situācija ir vizualizēta 6.2.att.



6.2.att. Virsmas strāvu modelēšana CST MSW

10. Secinājumi

Promocijas darbā veikti EMI filtru starpkomponenšu parazitisko parametru pētījumi. Darbu var iedalīt divās daļās, kur viena daļa veltīta trīsfāžu EMI filtru starpkomponenšu parametru netiešas mērīšanas metodikas izstrādei, analīzei un verificēšanai, otra daļā mijinduktivitātes modelēšanai starp kondensatoriem un starp induktivitātes spolēm ar 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūru CST MSW.

Starpkomponenšu parazitisko parametru mērīšana trīsfāžu EMI filtriem ir laikietilpīgs process. Balstoties uz mērījumiem ar vektoru ķēžu analizatoru, šie parametri tiek aprēķināti katrai filtra fāzei atsevišķi. Līdz ar to vienlaicīgi ir iespējams analizēt tikai katras filtra fāzes traucējumu slāpēšanas spēju pat, ja filtrs ir simetrisks. Šāda veida analīze ir būtiska, lai diagnosticētu EMI filtra prototipa trūkumus- nespēju sniegt nepieciešamo traucējumu vājinājumu:

- Mijinduktivitāte starp kondensatoriem II tipa EMI filtra un mijinduktivitāte starp induktivitātes spolēm T tipa filtra gadījumā veido efektīvu traucējumu pārvades ceļu no filtra ieejas uz filtra izeju, tādā veidā būtiski degradējot trīsfāžu EMI filtra sniegumu;
- Otrs būtiskākais parazitiskais parametrs ir parazitiskā kapacitāte starp filtra ieeju un izeju, tā loma pieaug, pieaugot traucējumu frekvencei;

- Mijinduktivitāte starp filtra ieeju un izeju spēlē būtisku lomu gadījumos, kad filtra ieeja un izeja atrodas viena otrai līdzās.

Pārējie parazītiskie parametri- mijinduktivitāte starp kondensatoru un induktivitātes spoli, mijinduktivitātes starp induktivitātes spoli un spiesto plati, atstāj niecīgu iespaidu uz trīsfāžu EMI filtra traucējumu vājinājumu.

Starpkomponenšu parazītisko parametru aprēķins, balstoties uz mērījumu rezultātiem, ir sarežģīts process, turklāt ir nepieciešams jau gatavs filtra prototips, kuram veikt modifikācijas, lai sekmīgi veiktu mērījumus. Turklāt mērījumu veikšanai ir nepieciešama dārga mēraparatūra, kas nav plaši pielietojama elektronisko iekārtu projektēšanā un izstrādē. Filtru starpkomponenšu parazītiskos parametrus iespējams modelēt, izmantojot 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūru CST MWS.

Promocijas darbā ir izveidoti trīs veidu, dažādu sarežģītības pakāpju kondensatoru modeļi- Cap1, Cap2, Cap3. Visi modeļi ir verificēti. Šāda veida modeļi dod iespēju veikt EMI filtru kondensatoru mijinduktivitātes modelēšanu un dod iespēju izpētīt mijinduktivitātes samazināšanas pasākumu lietderību. Pirmais kondensatora modelis Cap1 ir sarežģītākais no modelēšanas skatupunkta, jo sastāv no liektām virsmām un detaļām, kurām ir liela garuma, platuma, augstuma attiecība. Vienkāršākā konstrukcija ir Cap3 modelim, kurš sastāv tikai no taisnstūra paralēlskaldņa detaļām. Taču arī šāda vienkāršota konstrukcija dod iespējas modelēt kondensatoru mijinduktivitāti ar augstu precizitāti.

EMI filtros starp induktivitātes spolēm pastāv mijiedarbība, kas ir tieši proporcionāla induktivitātes spoļu attālumam. Promocijas darbā izstrādāts induktivitātes spoles 3D modelis, kas ar augstu precizitāti dod iespēju modelēt mijinduktivitāti starp induktivitātes spolēm. Induktivitātes spoļu savstarpējais novietojums atstājniecīgu iespaidu uz spoļu mijiedarbību, taču šo secinājumu nevar attiecināt uz visām situācijām, jo mijiedarbība ir atkarīga no induktivitātes spoļu pilnās pretestības.

CST MSW programmatūra ir sekmīgi pielietojama induktivitātes spoļu parazitisko parametru modelēšanā, induktivitātes spoļu savstarpējās mijiedarbības modelēšanā, kondensatoru parazitisko parametru modelēšanā un mijinduktivitātes modelēšanā starp kondensatoriem.

11. Darba turpinājums

Promocijas darbs aptver tikai daļu no nepieciešamajiem pētījumiem, lai veiktu pilnīgu un sekmīgu EMI filtra modelēšanu CST MSW. Pašlaik šāda veida modelēšanai netiek pielietoti tirgū populārākie 3D elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīki. EMI filtru modelēšanai tiek pielietota specializēta programmatūra, kura ir izstrādes stadijā un kura pielietojama šaura spektra uzdevumu veikšanai. Turpmākos pētījumus ir paredzēts veltīt:

- Mijinduktivitātes modelēšanai starp induktivitātes spoli un kondensatoru;
- Parazītisko parametru modelēšanai starp filtra komponentēm un spiesto plati;
- Sinfāzes induktivitātes spoles modelēšanai;
- Pilnīgai vienfāzes filtra modelēšanai;
- Pilnīgai trīsfāžu filtra modelēšanai.

12. Izmantotās literatūras saturs

- [1] " EMC Directive 2014/30/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility," , 2004.
- [2] Shuo Wang, F.C. Lee, and W.G. Odendaal, "Characterization and parasitic extraction of EMI filters using scattering parameters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 2, pp. 502 - 510 , Marth 2005.
- [3] Shuo Wang, W.G. Odendaal, and F.C. Lee, "Extraction of parasitic parameters of EMI filters using scattering parameters," in *Industry Applications Conference*, 2004, pp. 2672 - 2678.
- [4] Shuo Wang, F.C. Lee, and W.G. Odendaal, "Cancellation of capacitor parasitic parameters for noise reduction application," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1125 - 1132 , July 2006.
- [5] Li Fangzheng, Xudong Sun, Lipei Huang, and Jiang Jianguo, "Parasitic parameters of capacitor tank in converter and the effect on switching transient process," in *Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, MI , Sept 2009, pp. 736 - 739.
- [6] G. Ašmanis, O. Krievs, and A. Ašmanis, "Active Power Filter LCL Filter Insertion Loss Calculation Analysis," *Electronics*

and Electrical Engineering, vol. 18, no. 9, pp. 23-26, 2012.

- [7] M. L. Heldwein, L. Dalessandro, and J. W. Kolar, "The Three-Phase Common-Mode Inductor: Modeling and Design Issues," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 8, pp. 3264-3274, August 2011.
- [8] Qin Yu, T.W. Holmes, and K Naishadham, "RF equivalent circuit modeling of ferrite-core inductors and characterization of core materials ," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 1, pp. 258 - 262, February 2002.
- [9] Burkhard U., Thomas K., and Henry G., "A measurement system for determining inductor losses in inverters in the MHz range," in *International Conference on Integrated Power Systems*, Naples, Italy, 2006, pp. 1-6.
- [10] "CISPR 17:2011 Methods of measurement of the suppression characteristics of passive EMC filtering device".
- [11] A. Asmanis, D. Stepins G. Asmanis, "Mutual couplings in three phase T-type EMI filters," in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Rome, 2012, pp. 1-6.
- [12] A. Asmanis, and L. Ribickis G. Asmanis, "Analysis of high frequency effects in three phase EMI filters," in *Asia-Pacific Symp. on Electromag. Compatibility (APEMC)*, Singapore, 2012, pp. 653-656.
- [13] Lee, F.C., Odendaal W.G. S. Wang, "Characterization and

Parasitic Extraction of EMI Filters Using Scattering Parameters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 502 – 510, 2005.

- [14] R.Chen, and F. C. Lee, S. Wang, "Improved passive filter configurations for high-frequency conducted EMI in power electronics," in *Europ. Conf. on Pow. Electron. and Applications*, Dresden, 2004, p. 16.
- [15] J. Schanen, J. Guichon, and L. Gerbaud T. Oliveira, "Automatic layout optimization of an EMC filter," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Atlanta, 2010, pp. 2679-2685.
- [16] J. Schanen, J. Guichon, J. Roudet, and L. Gerbaud T. Oliveira, "PEEC-Models for EMC filter layout optimization," in *6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, Nuremberg, 2010, p. 6.
- [17] J. Schanen, J. Guichon, and J. Roudet T. Oliveira, "Optimized layout for an EMC filter: Analysis and validations," in *International Symp. on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Rome, 2012, p. 6.
- [18] T. Friedli, A. Musing, and J. W. Kolar I. F. Kovacevic, "PEEC-based virtual design of EMI input filters," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Phoenix, 2011, pp. 1935-1941.
- [19] T. Friedli, A. M. Musing, and J. W. Kolar I. F. Kovacevic, "3-D Electromagnetic Modeling of Parasitics and Mutual Coupling in

EMI Filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 135-149, Jan 2014.

- [20] T. Friedli, A. M. Muesing, and J. W. Kolar I. F. Kovacevic, "Electromagnetic Modeling of EMI Input Filters," in *International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, Nuremberg, 2012, p. 9.
- [21] D.Y. Chen and W.G. Odendaal Shuo Wang F.C. Lee, "Effects of Parasitic Parameters on the Performance of EMI Filters," *IEEE Power Electronics Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 869-877, May 2004.