

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Energētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Aivis Ašmanis

Doktora studiju programma „Elektrotehnoloģiju datorvadība”

**VIRSMAS MONTĀŽAS KOMPONENŠU IZPĒTE AR
3D MODELĒŠANAS PALĪDZĪBU FREKVENČU
DIAPAZONĀ 150 KHZ–100 MHZ**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. habil. sc. ing.*
LEONĪDS RIBICKIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2018

Ašmanis, A. Virsmas montāžas komponentu izpēte ar 3D modelēšanas palīdzību frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz.

Promocijas darba kopsavilkums.

Rīga: RTU Izdevniecība, 2018. 37 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padome “P-14” 2018. gada 14. jūnija lēmumu, protokols Nr. 2018-1(63).

ISBN 978-9934-22-120-0 (print)

ISBN 978-9934-22-121-7 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2018. gada 4. oktobrī Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Āzenes ielā 12 k-1.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Dr. sc. ing.* Oskars Krievs
Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Andris Mednis
SIA "Mikrofīkls", Latvija

Profesors *Dr. sc. ing.* Lauri Kütt,
Tallinas Tehnoloģiju universitāte, Igaunija

APSTIPRINĀJUMS

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

Aivis Ašmanis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, 3 nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 146 attēli, 15 tabulas, 2 pielikumi, kopā 172 lappuses. Literatūras sarakstā ir 52 nosaukumi.

Saturs

Saturs	4
VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne	5
Darba mērķis un uzdevumi	6
Metodika	7
Rezultāti un darba zinātniskā novitāte	7
Darba praktiskā vērtība	8
Rezultātu aprobācija	8
DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS	11
1. EMI filtru raksturošana un mērīšanas metodoloģijas izpēte	11
2. Virsmas montāžas komponentu telpisko modeļu izstrāde un to verificēšana	13
2.1. Virsmas montāžas kapacitatīvo komponentu telpisko modeļu izstrāde un to pārbaude	13
2.2. Virsmas montāžas induktīvo komponentu telpisko modeļu izstrāde un to pārbaude ...	14
2.3. Četru terminālu induktīvo virsmas montāžas komponentu telpisko modeļu izstrāde un pārbaude	17
2.4. Virsmas montāžas kondensatoru augstfrekvences parametru uzlabošana	19
3. Filtra prototipa izstrāde	20
Secinājumi	30
Izmantotā literatūra	33

VISPĀRĒJS DARBA RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un problēmas nostādne

Eiropas Savienības (ES) elektromagnētiskā savietojamības (EMS) direktīva 2014/30/ES [1] nosaka, ka visām elektroniskajām iekārtām, kas tiek pārdotas ES tirgū, ir jāatbilst tās prasībām. Mūsdienu elektronikas tendence ir darbības ātruma un darba frekvences palielināšanās, tajā pat laikā izmēru un svara samazināšana. Rezultātā tiek iegūta kompakta un viegla elektroniska ierīce, kuras komponentes ir novietotas ļoti tuvu cita citai, kas rada komponentu savstarpējo mijiedarbību. Par komponenti turpmākā tekstā pieņemts saukt elementu, kam piemīt noteikta kapacitāte – kondensators un elements, kam piemīt noteikta induktivitāte – induktivitātes spole.

Elektromagnētiskās interferences (EMI) filtri tiek lietoti visās elektroniskajās iekārtās, to pamatuzdevums ir samazināt vadāmības un ēterā izstaroto traucējumu izplatību. Sekojot elektronikas izmēru samazināšanas tendencei, EMI filtru izmēri un svars tiek samazināti, plaši izmantojot virsmas montāžas komponentes. Virsmas montāžas komponentes ir induktīvas un kapacitīvas komponentes, kuras uz spiestajām platēm tiek stiprinātas ar virsmas montāžas tehnoloģiju. Komponentu savstarpējā mijiedarbība ir ļoti atkarīga no komponentu novietojuma, mijiedarbība palielinās, novietojot komponentes arvien tuvāk cita citai. Līdz ar to virsmas montāžas komponentu mijiedarbība un novietojums uz spiestās plates kļūst par ļoti svarīgu aspektu filtru projektēšanas gaitā.

Daudzi pētījumi [5], [12] ir veikti par klasisko montāžas induktīvo un kapacitatīvo komponentu parametru mērīšanu un mērījumu kļūdu analīzi. Ir veikta arī EMI filtra starpkomponentu mijiedarbības izpēte, izmantojot telpiskās elektromagnētiskā lauka modelēšanas programatūras. Bet trūkst informācijas par virsmas montāžas komponentu EMI filtra starpkomponentu mijiedarbības izpēti, izmantojot telpiskās elektromagnētiskā lauka modelēšanas programatūru.

Pieejamos pētījumos [5], [20], [22], [26], [27] ir aprakstīta klasiskās montāžas induktīvo komponentu mijinduktivitātes analīze, taču pētījumi ir veikti neslogotām komponentēm, caur kuru neplūst darba strāva, kas reālā elektroniskā iekārtā var būt mainīga atkarībā no darba režīma un slodzes. Šādos mainīgas slodzes strāvas apstākļos induktīvās komponentēm serdes materiāls var piesātināties, un var notikt elektromagnētiska lauka izmaiņas ap komponenti, kas var ietekmēt induktīvo komponentu mijiedarbību ar citu komponenti vai plates celiņiem. Tāpēc ir ļoti svarīgi veikt šādu slogotu induktīvo komponentu izpēti, analizējot darba strāvas ietekmi uz induktīvo komponentu parazitiskajiem parametriem. Lai šādus pētījumus veiktu, ir

nepieciešams izveidot filtra prototipu. Veicot komponentes slogošanu ar līdzstrāvu, tā var tikt ievadīta vektora ķēžu analizatora portos, kas var šo iekārtu neatgriezeniski sabojāt vai izmainīt mērījumu rezultātus. Šādi filtri nodrošina slodzes strāvas ievadīšanu mērāmajā komponentē un pilnīgu līdzstrāvas izolāciju no mēraparāta pieslēgvietām. Papildus filtram jānodrošina induktīvās komponentes pilnās pretestības nemainību mērījumu laikā, ko var ietekmēt pieslēgts strāvas avots. Šāda filtra izveide un optimizācija dos iespēju veikt slogotu induktīvu komponentu pētījumus.

Promocijas darbs ietver: virsmas montāžas induktīvo un kapacitatīvo komponentu parametru mērīšanu un mērījumu kļūdu analīzi; virsmas montāžas induktīvo un kapacitatīvo komponentu starpkomponentu mijiedarbības analīzi, izmantojot telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku un tās kļūdu analīzi. Pētījuma gaitā ir izstrādāti vairāki telpiskie modeļi induktīvajām un kapacitatīvajām virsmas montāžas komponentēm. Telpiskie modeļi ir optimizēti, lai samazinātu laika un skaitļošanas resursu prasības un veiktu starpkomponentu parazitiskās mijiedarbības analīzi ar telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūru. Izmantojot pētījuma gaitā iegūtās zināšanas, iespējams samazināt virsmas montāžas komponentu parazitiskās mijiedarbības ietekmi uz EMI filtra veiktspēju, lietojot telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūru *CST MWS*. Izmantojot iegūtās zināšanas, izstrādāts un optimizēts filtra prototips *BT*, kas paredzēts slogotu virsmas montāžas induktīvo komponentu pilnās pretestības mērīšanai frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz. Izstrādātais prototips salīdzināts ar tirgū esošu filtra ekvivalentu, un veikta to rezultātu analīze.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir, izmantojot telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas programmatūru, veikt virsmas montāžas induktīvo un kapacitatīvo komponentu starpkomponentu mijiedarbības analīzi atkarībā no komponentu savstarpējā novietojuma.

Promocijas darbā definēto mērķu sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

1. apkopot jaunāko zinātnisko literatūru par virsmas montāžas komponentu parazitiskās mijiedarbības izpēti un tās jauninājumiem;
2. izpētīt virsmas montāžas komponentu parametru mērīšanas metodoloģiju;
3. veikt virsmas montāžas kondensatoru izpēti ar telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību;

4. veikt virsmas montāžas induktivitāšu izpēti ar telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību:
 - divu terminālu induktīvās komponentes;
 - četru terminālu induktīvās komponentes;
5. veikt dažādu virsmas montāžas komponentu savstarpējās mijiedarbības izpēti ar telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību;
6. izpētīt un veikt virsmas montāžas kondensatoru augstfrekvences parametru uzlabošanas iespējas ar telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību;
7. izstrādāt filtra prototipu, kas paredzēts induktīvo komponentu pilnās pretestības mērīšanai frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz, ievadot komponentē līdzstrāvu ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību;
8. veikta jaunā filtra prototipa darbības salīdzināšana ar ekvivalentu komerciāli pieejamu filtru un rezultātu analīze.

Metodika

Promocijas darbā autors ir izmantojis telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku “*Computer Simulation Technology Microwave Studio*” (CST MWS), veicis mērījumus ar ZVRE-vektora ķēžu analizatoru un rezultātus salīdzinājis ar matemātiskās analīzes programatūras “*Matlab*” palīdzību.

Rezultāti un darba zinātniskā novitāte

Veikti sistemātiski pētījumi jaunu virsmas montāžas komponentu parazitiskās mijiedarbības mērīšanas metodikai ar vektoru ķēžu analizatoru un tās kļūdas aprēķiniem.

Izstrādāti oriģināli telpiski virsmas montāžas kondensatoru un induktivitāšu modeļi, kas veiksmīgi lietoti starpkomponentu parazitiskās mijiedarbības noteikšanā ar telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz.

Izstrādāts jauns filtra prototips, kas paredzēts induktīvo komponentu pilnās pretestības mērīšanai frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz. Filtrs optimizēts ar šajā darbā izstrādāto telpisko modeļu un telpisko elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību. Izstrādātais filtrs, salīdzinot ar ekvivalentu komerciāli pieejamu zinātnisko mērījumu filtru. Jaunajam filtra prototipam ir lielāka pieļaujamā slodzes strāva par 0,5 A, var veikt mērījumus komponentei,

kuras pilnā pretestība ir mazāka par 17Ω un nenokompensētā virknes induktīvā komponente ir par 9 nH mazāka, sastādot 22 nH. Filtra prototips ir lietojams frekvenču diapazonā 100 kHz–1 GHz. Tāpēc filtra prototips ir pamatoti uzskatāms par labāku.

Promocijas darbā izstrādātie oriģinālie telpiskie virsmas montāžas kondensatoru un induktivitāšu modeļi dod iespēju ar augstu precizitāti paredzēt starpkomponenšu parazitisko mijiedarbību.

Darba praktiskā vērtība

Izstrādātie virsmas montāžas kondensatoru un induktivitāšu telpiskie modeļi ļauj veikt starpkomponenšu mijiedarbības ietekmes izpēti uz EMI filtru efektivitāti frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz. Virsmas montāžas komponentu modeļi izveidoti, balstoties uz komponentu ražotāja sniegtajiem datiem. Lietojot izstrādātos telpiskos modeļus, iespējams ietaupīt līdzekļus un laiku EMI filtra prototipa izveidē, atsakoties no mēraparātu izmantošanas.

Izstrādātie virsmas montāžas komponentu telpiskie modeļi dod iespēju veikt starpkomponenšu mijiedarbības analīzi, aizstājot laikietilpīgus mērījumus ar mēraparatūru. Elektromagnētiskā lauka modelēšanai izstrādātie EMI filtra komponentu modeļi ir izveidojami, balstoties uz komponentu ražotāju sniegtajiem datiem – fiziskajiem izmēriem, materiālu īpašībām. Tādējādi EMI filtrs un tā efektivitāte var tikt sekmīgi analizēta pirms prototipa izveides, nelietojot dārgu mēraparatūru.

Rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti prezentēti astoņās starptautiskās konferencēs.

1. 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore.
2. 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Rīga, Latvia.
3. 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2017), Angers, France.
4. 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE 2016) Wroclaw, Poland.
5. 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, Spain.

6. 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Rīga, Latvia.
7. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europa 2015), Dresden, Germany.
8. 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europa 2014), Gothenburg, Sweden.

Promocijas darba rezultāti publicēti 11 publikācijās.

1. **A. Asmanis**, G. Asmanis, D. Stepins, L. Ribickis, "3D Modelling and Analysis of Parasitic Couplings between Surface-Mount Components of EMI Filters" 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 2018, pp. 1–6.
2. G. Džeriņš, **A. Asmanis**, G. Asmanis, A. Dzenis, "LED lighting equipment electromagnetic compatibility" 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2017, pp. 1–6.
3. **A. Asmanis**, D. Stepins, A. Dzenis, G. Asmanis, "3D modeling of surface-mount capacitors and mutual couplings between them" 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE, Angers, France, 2017, pp. 1–6.
4. **A. Asmanis**, G. Asmanis, D. Stepins, L. Ribickis, "Modeling of EMI filters with shields placed between the filter components" 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Wroclaw, Poland, 2016, pp. 776–779.
5. **A. Asmanis**, G. Asmanis, D. Stepins, L. Ribickis, "High-frequency modelling of EMI filters considering parasitic mutual couplings" 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, Spain, 2016, pp. 1–6.
6. G. Asmanis, L. Ribickis, D. Stepins, **A. Asmanis**, "Differential mode II-type EMI filter modeling using CST MWS" 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2015, pp. 1–5.
7. G. Asmanis, D. Stepins, **A. Asmanis**, L. Ribickis, "Mutual couplings between EMI filter components" 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), Dresden, Germany, 2015, pp. 908–913.

8. G. Asmanis, D. Stepins, L. Ribickis, **A. Asmanis**, “Modeling of mutual coupling between inductors” 2015 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, Silicon Valley, USA, 2015, pp. 294–299.

9. G. Asmanis, D. Stepins, **A. Asmanis**, L. Ribickis, “Capacitors mutual inductance modeling and reduction” 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Gothenburg, Sweden, 2014, pp. 1176–1181.

10. G. Asmanis, **A. Asmanis**, D. Stepins, “Mutual couplings in three phase T-type EMI filters” International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE, Roma, Italy, 2012, pp. 1–6.

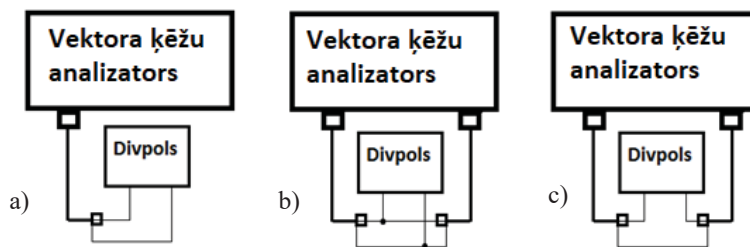
11. G. Asmanis, **A. Asmanis**, L. Ribickis, “Analysis of high frequency effects in three phase EMI filters” 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 2012, pp. 653–656.

DARBA ATSEVIŠĶO NODAĻU IZKLĀSTS

1. EMI filtru raksturošana un mērīšanas metodoloģijas izpēte

Šajā darba nodaļā autors apskata EMI filtra raksturošanas un mērīšanas metodoloģijas, tās ieviesto kļūdas matemātisko analīzi.

EMI filtru raksturo tā ienestais vājinājums, ko mēra decibelos (dB), papildu raksturojošie lielumi ir ieejas pilnā pretestība un izejas pilnā pretestība. Filtra ienestais vājinājums ir atkarīgs no frekvences, slodzes un traucējuma avota pilnās pretestības un strāvas. Mūsdienu industrijā EMI filtri netiek raksturoti pilnīgi, jo slodzes pilnā pretestība un avota pilnā pretestība ir frekvenču atkarīga. EMI filtra raksturošanā var lietot izkliedes parametrus (S -parametrus), tie sniedz iespēju raksturot filtra vājinājumu pie jebkuras slodzes un traucējuma avota pilnās pretestības plašā frekvenču diapazonā. Lietojot izkliedes parametrus filtru raksturošanā, filtrs tiek uzverts kā četrpols, kas sniedz iespēju analizēt filtru ar pārvades un atstarošanās koeficientiem. Šāda veida filtru analīze sniedz iespēju netiešā veidā mērīt filtru starpkomponentu parazitiskos parametrus, ko var izteikt no vienkāršotām ekvivalentajām shēmām. Izkliedes parametrus iespējams nomērīt ar vektora ķēžu analizatoru, lietojot matemātiskos aprēķinus, var noteikt gan filtru, gan komponentu pilno pretestību. Pastāv trīs mērīšanas metodes, izmantojot vektora ķēžu analizatoru.



1.1. att. Kondensatora un induktīvās komponentes mērīšanas metodes, izmantojot VNA.

1. Atstarošanas koeficienta (S_{11}) mērīšana, izmantojot vienu VNA portu (1.1. att. (a)).
2. Tiešās pārvades koeficienta (S_{21}) mērīšana, saslēdzot abus VNA portus un pētāmo divpolu paralēli (1.1. att. (b)).
3. Tiešās pārvades koeficienta (S_{21}) mērīšana, saslēdzot abus VNA portus un pētāmo divpolu virknē (1.1. att. (c)).

Katra no metodēm ievieš mērījumu kļūdu, kas ir atkarīga gan no komponentu parametriem, gan frekvenču diapazona, kurā tiek veikti mērījumi.

a) metodi labāk izmantot, ja $|Z_{11}|$ vērtība ir tuvu 50Ω . Šajā gadījumā atstarošanas koeficients $|S_{11}|$ būs ievērojami mazāks par 0 dB.

b) metodi labāk izmantot, ja $|Z_{11}|$ ir mazāks par 10Ω . Šajā gadījumā pārvades koeficienta vērtība $|S_{21}|$ būs ievērojami mazāka par 0 dB.

c) metodi labāk izmantot, ja $|Z_{11}|$ ir lielāks par 100Ω . Šajā gadījumā pārvades koeficients $|S_{21}|$ būs ievērojami mazāks par 0 dB.

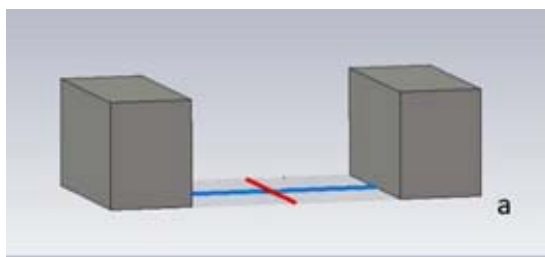
Kondensatoru mērījumiem frekvenču diapazonā 100 kHz–500 MHz vispiemērotākā metode ir kondensatoru slēdzot paralēli mērījumu portiem (b metode), jo kondensatora pilnā pretestība Z_{11} MHz diapazonā ir zemāka par 10Ω .

Induktīvo komponentu mērījumiem frekvenču diapazonā 100 kHz–500 MHz vispiemērotākā metode ir komponenti slēdzot virknē mērījumu portiem (c metode), jo induktīvās komponentes pilnā pretestība Z_{11} MHz diapazonā ir lielāka par 100Ω .

2. Virsmas montāžas komponentu telpisko modeļu izstrāde un to verificēšana

2.1. Virsmas montāžas kapacitatīvo komponentu telpisko modeļu izstrāde un to pārbaude

Autors darbā ir izveidojis virsmas montāžas kapacitatīvās komponentes telpisko modeli, kura precizitāte ir apmierinoša savienojumā ar tā vienkāršību (2.1. att.). Telpiskajam modelim kondensatora kapacitāte un virknes pretestība tiek definēta kā virsma ar izkliedētiem parametriem starp diviem kondensatora termināliem.



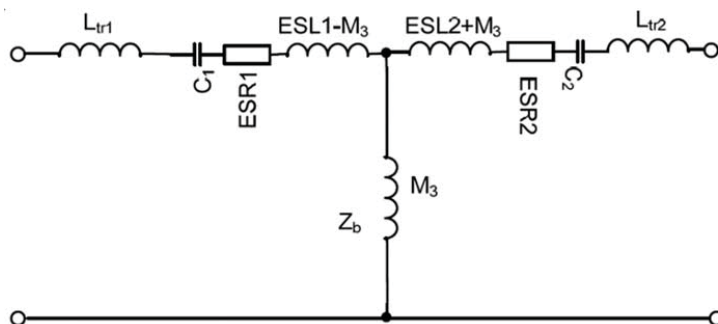
2.1. att. Kondensatora telpiskais modelis, izmantojot izkliedēto parametru virsma novietota paralēli kondensatora vadošajām virsmām.

Apakšnodaļā autors ir veicis apjomīgu pētījumu par virsmas montāžas kondensatora mērīšanas metodoloģiju un nonācis pie atziņas, ka atstarošanas koeficienta (S_{11}) mērīšana, izmantojot vienu VNA portu, lietojama, lai noteiktu kondensatora kapacitāti, bet tiešās pārvades koeficienta (S_{21}) mērīšana, saslēdzot abus VNA portus un pētāmo divpolu paralēli (1.1. att. (b)), lietojama, kad ir būtiski noteikt kondensatora ekvivalentā virknes pretestību un ekvivalentā virknes induktivitātes vērtību precizitāti.

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

Virsmas montāžas kondensatoru savstarpējās mijinduktivitātes pētījumos izmantoti izstrādātie telpiskie modeļi. Kondensatoriem atrodies nelielā attālumā citam no cita, parādās to mijiedarbība. Mijiedarbība var būt gan kapacitatīva rakstura, gan induktīva rakstura. Ja kondensatori nav novietoti milimetru daļu attālumā, tad dominē induktīvā mijiedarbības komponente – mijinduktivitāte M . Mijinduktivitāte starp diviem kondensatoriem ar kapacitāti C un virknes ekvivalento pretestību ESR ir iespējama kondensatoru virknes ekvivalentās

induktivitātes ESL dēļ. Mijinduktivitāti M starp diviem kondensatoriem nav iespējams nomērīt tiešā veidā [23].



2.2. att. Ekvivalentā shēma mijinduktivitātei starp diviem kondensatoriem.

Divu kondensatoru slēgumu var pārveidot ekvivalentā shēmā, kā tas redzams 2.2. att. No šīs ekvivalentās shēmas, izsakot pilnās pretestības plecu Z_b , iespējams noteikt mijinduktivitāti ar izteiksmi (2.1.).

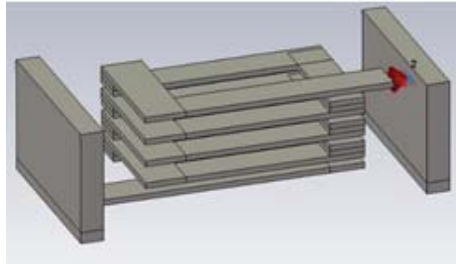
$$M_3 = \left| \operatorname{Im} \left(\frac{100S_{21}}{1 - S_{22} + S_{22}S_{11} - S_{11} - S_{21}^2} \right) \right| \frac{1}{2\pi f} \quad (2.1.)$$

Veicot izstrādāto virsmas montāžas kondensatoru telpisko modeļu spēju paredzēt starpkondensatoru mijinduktivitāti, tiek salīdzināti iegūtie rezultāti ar *CST MWS* un prototipu mērījumiem. Mērījumu un modelēšanas rezultāti sakrīt ar augstu precizitāti.

2.2. Virsmas montāžas induktīvo komponentu telpisko modeļu izstrāde un to pārbaude

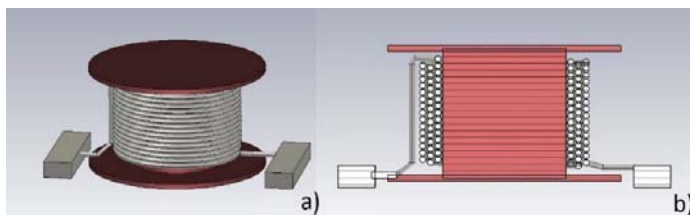
Autors šajā apakšnodaļā ir izveidojis vairākus telpiskus modeļus dažādām virsmas montāžas induktīvajām komponentēm, kā arī to kļūdas korekcijas aprēķinus, lai uzlabotu rezultātu precizitāti.

Komponentei *WE 74279141* telpisks modelis ar iekšējo struktūru, kurā ir integrētas izkliedes parametru vērtības (2.3. att.). Iekšējā struktūra prasa papildu skaitļojamo jaudu, taču komponentu mijiedarbības aprēķinos iekšējai struktūrai var būt noteicošā loma rezultātu prognozēšanā.



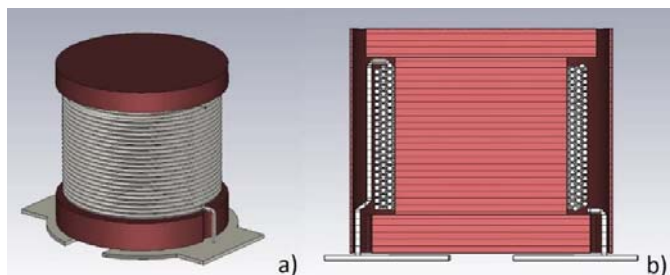
2.3. att. Induktīvas virsmas montāžas komponentes *WE 74279141* telpiskais modelis ar iekšējo vijumu struktūru un integrētām S-parametru vērtībām.

Komponentes *WE 744066151*, kas ir daļēji ekranēta virsmas montāžas komponente ar atsevišķu serdi un tinumiem, telpiskais modelis ir izstrādāts ar precīzu iekšējo struktūru (2.4. att.).



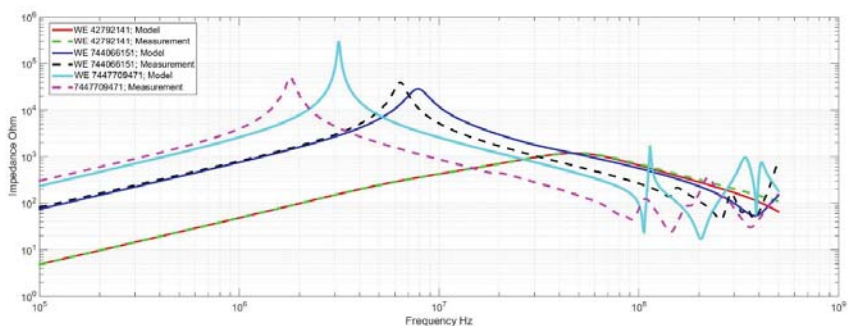
2.4. att. *WE 744066151* virsmas montāžas komponentes telpiskais modelis.
a – komponentes telpiskais modelis bez ārējās serdes; b – telpiskā modeļa šķērsgriezums bez ārējās serdes.

Komponentes *WE 7447709471*, kas ir pilnībā ekranēta virsmas montāžas komponente ar atsevišķu serdi un tinumiem, telpiskais modelis ir izstrādāts ar precīzu iekšējo struktūru (2.5. att.).



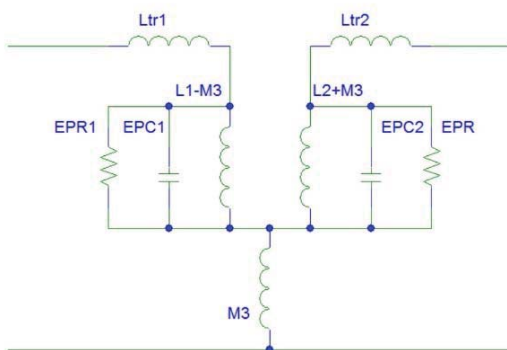
2.5. att. *WE 7447709471* virsmas montāžas komponentes telpiskais modelis.
a – komponentes telpiskais modelis bez ārējās serdes; b – telpiskā modeļa šķērsgriezums.

Induktīvo komponentu pilnās pretestības mērījumu un analītisko 3D elektromagnētiskā modeļa aprēķinu salīdzinājums ir redzams 2.6. att. Induktīvās komponentes *WE 74279141* telpiskajam modelim ir augsta precizitāte, induktīvo komponentu *WE 744066151* un *WE 7447709471* modelim ir apmierinoša precizitāte. Virs rezonanses frekvences aprēķinu rezultāti ir zemāki par mērījumu rezultātiem, kas norāda, ka analītiskā telpiskā modeļa induktivitāte ir nedaudz augstāka par komponentes induktivitāti, bet ekvivalentā paralēlā kapacitātes būtiski zemāka nekā reālai komponentei.



2.6. att. Induktīvo komponentu mērījumu un analītisko telpisko elektromagnētisko modeļu pilnās pretestības aprēķinu salīdzinājums.

Virsmas montāžas induktivitāšu savstarpējās mijinduktivitātes pētījumos izmantoti izstrādātie telpiskie modeļi. Divu induktivitāšu slēgumu ir iespējams pārveidot T veida ekvivalentajā shēmā ar mērķi netiešā ceļā aprēķināt starpkomponentu mijinduktivitāti *M3*. T veida ekvivalentā shēma dota 2.7. att.



2.7. att. T-veida ekvivalentā shēma mijinduktivitātei starp divām induktivitātēm.

Izveidojas trīs T veida ekvivalentās shēmas pleci, kur būtiskāko lomu spēlē plecs, kurā ietilpst mijindutivitāte M_3 . Mijinduktivitāti M_3 var aprēķināt, izmantojot sakarību (2.2.).

$$M_3 = \left| \operatorname{Im} \left(\frac{100S_{21}}{1 - S_{22} + S_{22}S_{11} - S_{11} - S_{21}^2} \right) \right| \frac{1}{2\pi f} \quad (2.2.)$$

Darbā autors ir veicis visu trīs induktīvo komponentu dažādu kombināciju mijindutivitātes analītiskos aprēķinus ar telpisko modeļu palīdzību un prototipu mērījumus. Mijinduktivitātes analītiskie aprēķini un mērījumi parāda, ka izstrādāto virsmas montāžas induktivitāšu mijiedarbību iespējams noteikt ar 2 dB–10 dB precizitāti frekvenču diapazonā 2 MHz — 100 MHz, frekvenču diapazonā zem 2 MHz telpisko modeļu paredzēšanas spējas ir grūti analizēt, jo sākas VĶA trokšņu līmenis.

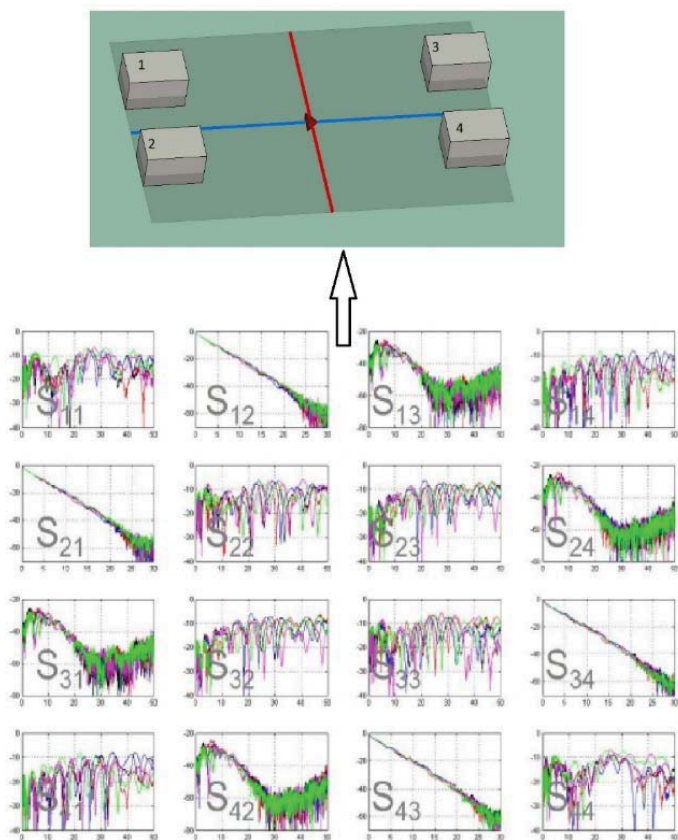
Balstoties uz izstrādātajiem analītiskajiem telpiskajiem modeļiem, ir iespējams analītiski noteikt mijinduktivitāti starp virsmas montāžas induktīvajām komponentēm ar apmierinošu precizitāti.

2.3. Četru terminālu induktīvo virsmas montāžas komponentu telpisko modeļu izstrāde un pārbaude

Elektromagnētisko vadāmības traucējumu filtros tiek izmantotas ne tikai divu terminālu induktīvās komponentes, bet arī četru un sešu terminālu komponentes. Četru terminālu induktīvās komponentes ir sinfāzes (*CM*) un asinfāzes traucējumu (*DM*) samazināšanai paredzētas induktivitātes spoles. Autors četru terminālu induktīvo komponentu izkliedes parametru mērījumus veic, izmantojot divu portu vektoru ķēžu analizatoru. Veicot sešus dažādu kombināciju izkliedes parametru mērījumus ar vektora ķēžu analizatoru, rezultātā iegūst iegūta izkliedes parametru matricu, kas pilnībā raksturo pētāmo objektu – četru terminālu induktīvo komponenti (2.3.).

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (2.3.)$$

Šo izkļiedes parametru matricu integrējot telpiskajā četrus terminālu induktīvajā komponentē, iegūst precīzu telpisku modeli (2.8. att), kas apraksta četrus terminālu induktīvo komponentes sinfāzes un asinfāzes īpašības.



2.8. att. Četrus terminālu induktīvas virsmas montāžas komponentes telpiskais modelis ar integrētām S -parametru vērtībām.

Lai uzlabotu četrus terminālu induktīvās komponentes izkļiedes parametru mērījumu, ir izveidota rezultātu korekciju matemātiskā bāze, ar kuru palīdzību var uzlabot rezultātu precizitāti.

Izstrādātie telpiskie modeļi ir pārbaudīti un verificēti ar prototipu mērījumiem. Analītisko aprēķinu rezultātā iespējams aprēķināt gan komponentes CM pilno pretestību, gan induktivitāti ar augstu precizitāti. DM induktivitāte ir salīdzinoši niecīga komponentes izkļiedes

induktivitāte, un tās aprēķinu precizitāte iepriekš analizētajos gadījumos ir ierobežota noteiktā frekvenču diapazonā. Mērījumu korekcija nespēj būtiski uzlabot *DM* aprēķinu precizitāti.

2.4. Virsmas montāžas kondensatoru augstfrekvences parametru uzlabošana

Šunta kondensators, kas savieno signāla celiņu un spiestās plātes *GND*, ir zemu izmaksu efektīvs augstfrekvenču filtrs, kas tiek izmantots daudzās jomās. Šunta virsmas montāžas kondensatoru veiktspēju augstfrekvences diapazonā ierobežo ne tikai kondensatoru ekvivalentā virknes induktivitāte, bet arī mijinduktivitāte starp kondensatora kontūra ieeju un izeju, kas rada kondensatora induktīvo raksturu virs tā rezonanses frekvences [38], [39], [1], [40], [41].

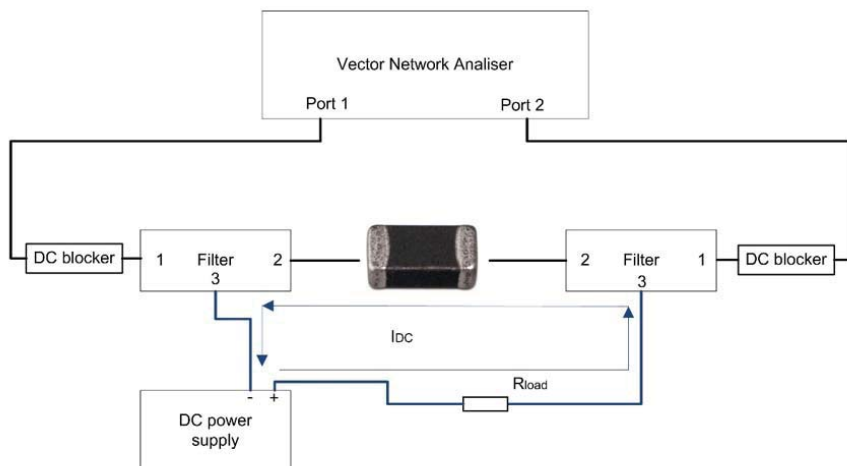
Šādus trūkumus iespējams novērst, izmantojot konstruktīvus risinājumus – minimizē celiņu garumu un augstumu virs zemētās plaknes, kas pieslēgti kondensatoram caur starpslāņu pāreju vai vairākām pārējām [40], [42]. Lai vēl vairāk uzlabotu šunta kondensatora filtra veiktspēju, ir nepieciešams izmantot metodes, kas kompensē šunta kondensatora parazitisko induktivitāti [43], [44], [45], [46], [47], [48]. Tomēr šīs parazitiskās induktivitātes kompensēšanas shēmas ir paredzētas fiziski lieliem kondensatoriem, kas parasti tiek izmantoti lielas jaudas ķēdēs.

Darbā [39] ir prezentēta jauna metode, kas veiksmīgi piemērota [44] kondensatora filtriem parazitiskās induktivitātes kompensēšanai. Šī metode ļauj kompensēt šunta kondensatora parazitisko induktivitāti, izmantojot magnētisko mijiedarbību starp vienas plaknes celiņiem. Rezultāti [39] parāda, ka efektīvu šunta kondensatora parazitiskās induktivitātes kompensēšanu, izmantojot virsmas montāžas tehnoloģiju, var sasniegt, palielinot filtra izmēru.

3. Filtra prototipa izstrāde

Trešajā nodaļā autors, izmantojot otrajā nodaļā izstrādātos un pārbaudītos virsmas montāžas komponentu modeļus, izstrādā un optimizē filtru, kas darbojas frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz. Šādi filtri ir nepieciešami induktīvo komponentu mērījumiem, lai novērtētu strāvas ietekmi uz magnētiskā materiāla piesātinājumu un pilnās pretestības maiņu (gan aktīvās komponentes, gan induktīvās komponentes). Šādu filtru ir iespējams izmantot arī citu EMI filtru mērījumiem, lai noteiktu strāvas iespaidu uz filtra vājinājumu. Šādu mērījumu blokshēma ir parādīta 3.1. att.

Ar prototipa filtru paredzēts nodrošināt slodzes strāvu > 1 A. Ar barošanas bloka palīdzību tiks nodrošināta maināma slodzes strāva I_{DC} , kas plūdis tikai caur induktīvo komponenti. Filtri nodrošinās, lai līdzstrāvas komponente neplūst analizatora ieejās, kas tiks bojātas, ja tajās parādīsies līdzstrāvas komponente. Līdz ar to filtram jānodrošina pilnīga līdzstrāvas izolācija no mēraparāta pieslēgvietām, ja barošanas spriegums nepārsniedz 50 V.



3.1. att. Filtra izmantošanas blokshēma.

Filtra prototipam jānodrošina, lai netiktu mainīta induktīvās komponentes pretestība pieslēgto papildu ķēžu un barošanas bloka dēļ. Ar filtra palīdzību paredzēts veikt mērījumus induktīvajām komponentēm frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz, kurās komponentu pilnā pretestība pārsniedz 1,5 k Ω .

Filtram jāatstāj niecīgs iespaids uz mērījumu rezultātiem, lai tiktu nodrošināti precīzi induktīvās komponentes mērījumi.

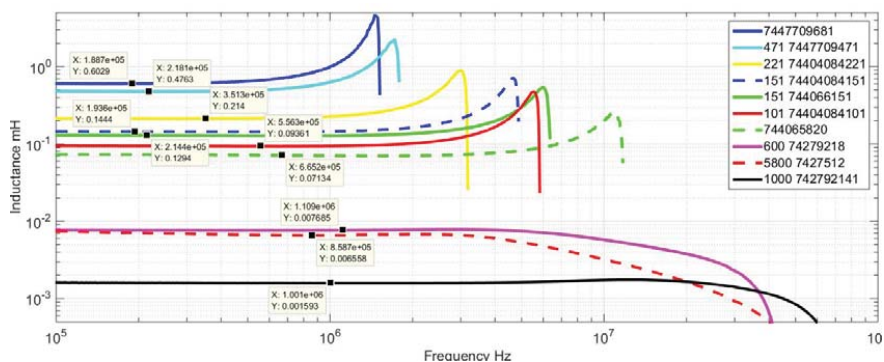
Filtra prototipam tiek izvirzītās šādas prasības:

1. nodrošināt 1A strāvu (starp pieslēgvietām 2–3);
2. nodrošināt līdzsprieguma izolāciju (pieslēgvietā 1);
3. pārvades koeficients S_{12} un $S_{21} < 0,5$ dB;
4. atstarojumu koeficients S_{11} un $S_{22} < -25$ dB;
5. pārvades koeficients $S_{13} < -25$ dB.

Pamata komponente prototipa filtra izveidei ir induktīvās komponentes, kuru parametri nosaka filtra parametrus visā frekvenču diapazonā. Prototipa izveidei ir izvēlētas *Würth Elektronik* virsmas montāžas induktīvās komponentes. Visām komponentēm veikti mērījumi un korekcijas saskaņā ar promocijas darbā izstrādāto mērījumu korekcijas metodiku. Komponentu pilnās pretestības mērījumi veikti ekranētā bezatbalss kamerā, lai iegūtu augstas precizitātes mērījumus bez apkārtējās elektromagnētiskās vides iespaida. Virsmas montāžas induktīvo komponentes var iedalīt divās daļās:

1. EMI induktīvās komponentes paredzētas traucējumu filtrēšanai, kurām raksturīgs zems labums, līdz ar to rezonanse nav ar augstu amplitūdu; šādām komponentēm nav nepieciešams paralēli slēgt pretestību rezonances slāpēšanai, jo tādu nodrošina pati induktīvās komponentes konstrukcija;
2. induktīvās komponentes, kas paredzētas pārveidotāju magnētiskās enerģijas uzkrāšanai; šīm komponentēm raksturīgi zemi zudumi, augsts labums un izteikta pilnās pretestības rezonanse, ko nepieciešams slāpēt, paralēli slēdzot pretestību.

Izvēlēto induktīvo komponentu induktivitātes aprēķini ir doti 3.2. att.

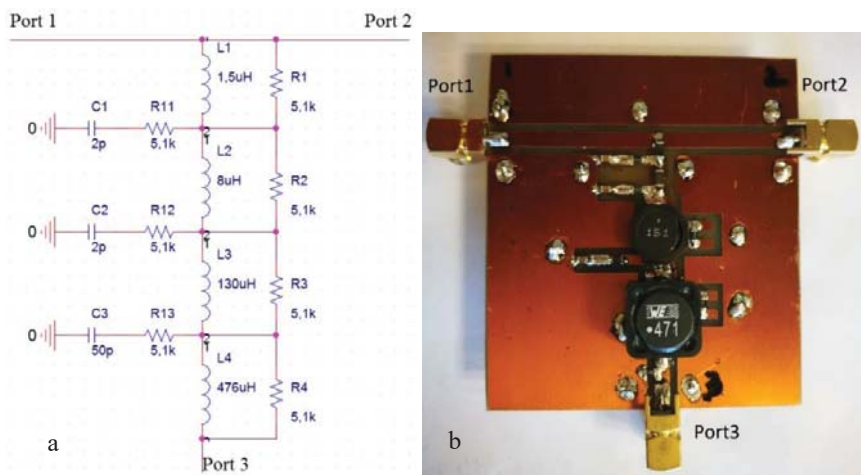


3.2. att. Virsmas montāžas induktīvo komponentu induktivitātes aprēķinu rezultāti.

Filtra noteiktajam frekvenču diapazonam 150 kHz–100 MHz nepieciešams izvēlēties komponentes, kas vienmērīgi nosegtu visu frekvenču diapazonu un nodrošinātu vienmērīgu vājinājumu visā frekvenču diapazonā. Viena induktīvā komponente to nespēj nodrošināt, tāpēc ir jālieto vairākas induktīvās komponentes. Komponentes ar lielu induktivitāti nodrošina augstu pretestību zemo frekvenču diapazonā, taču virs pilnās pretestības rezonanses frekvences dominē komponentes paralēlā parazitiskā kapacitāte, kas samazina pretestību. Komponentes ar zemu induktivitāti nodrošina zemu pretestību zemo frekvenču diapazonā, taču tām ir arī daudz zemāka paralēlā parazitiskā kapacitāte, kas nodrošina augstāku pretestību augsto frekvenču diapazonā nekā komponentes ar lielu induktivitāti.

Prototipa izveidei izmanto četras induktīvās komponentes *WE 1000_742792141*, *WE 600_74279218*, *WE 151_744066151*, *WE 471_7447709471*.

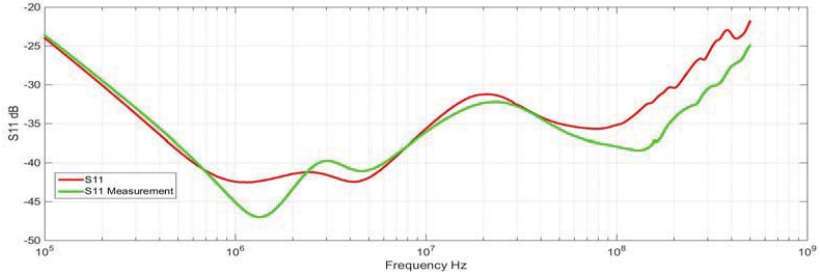
Balstoties uz iepriekšējās nodaļās izstrādāto metodiku un analītiskajiem telpiskajiem modeļiem, ir izveidota optimizēta filtra shēma (3.3. att. (a)), kam ir veikti analītiskie izkliedes parametru aprēķini ar *CST MWS*. Analītiskā ceļā aprēķinātie parametri atbilst izvīrītajam filtra prasībām.



3.3. att. Filtra prototips.

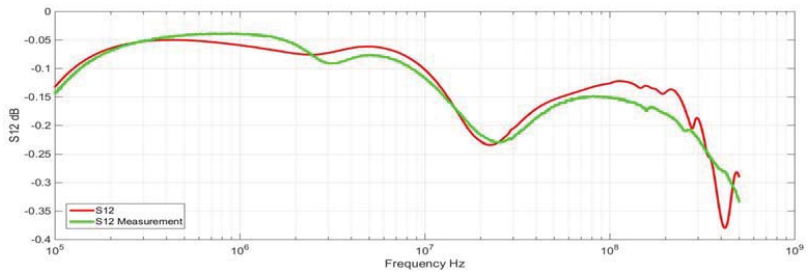
a – shēma; b – filtra prototipa spiestā plate ar komponentēm bez korpusa.

Balstoties uz izstrādāto shēmu 3.3. att. (a), ir izveidots filtra prototipa spiestā plate (3.3. att. (b)), lai veiktu izkliedes parametru mērījumus. Filtra prototipa analītisko un mērījumu rezultātu salīdzinājums dots 3.4. att.–3.6. att.



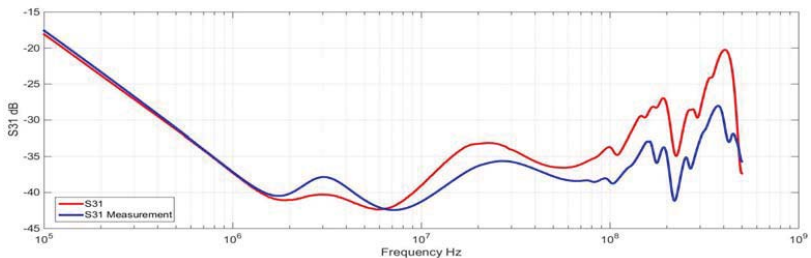
3.4. att. Filtra prototipa pieslēgvietas 1 atstarošanās koeficientu analītisko un mērījumu rezultātu salīdzinājums.

Mērītās atstarošanas koeficienta S_{11} vērtības sakrīt ar analītiskajiem aprēķiniem ar 5 dB precizitāti (3.4. att.). Rezultāti uzrāda, ka atstarošanās koeficienta vērtība ir zemāka par -25 dB frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz.



3.5. att. Filtra prototipa pieslēgvietas 1–2 pārvades koeficienta analītisko un mērījumu rezultātu salīdzinājums.

Mērītās pārvades funkcijas vērtības S_{21} sakrīt ar analītiskajiem aprēķiniem ar <0,1 dB precizitāti (3.5. att.). Rezultāti uzrāda, ka pārvades funkcijas vērtības S_{21} ir zemāka par 0,5 dB frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz.



3.6. att. Filtra prototipa pārvades funkcijas starp pieslēgvietām 3–1, analītisko aprēķinu un mērījumu salīdzinājums.

Mērītās prototipa pārvades funkcijas S_{31} sakrīt ar analītiskajiem aprēķiniem frekvenču diapazonā līdz 10 MHz (3.6. att). Frekvenču diapazonā 10 MHz–100 MHz rezultātu sakritība 8 dB robežās. Mērījumu rezultāti ir virs -25 dB, kas teorētiski neatbilst izvirzītajam uzdevumam. Taču, ja mērījumu tiktu veikti reālos apstākļos, kad pieslēgvietā pretestība ir $< 1 \Omega$, S_{31} vērtības būtu būtiski zemākas un izvirzītais uzdevums tiktu izpildīts.



3.7. att. Filtra prototips ar korpusu.

Prototipa pilnvērtīgai darbībai nepieciešams korpusu, kas veiktu ekranēšanas funkcijas un nodrošinātu references virsmu (*reference plane*) strukturālu stingrību SMA savienotāju montāžai un korektu mērījumu veikšanai. Korpusu izgatavots no misiņa. Korpusa un filtra prototipa attēli doti (BT1) 3.7. att. Filtra attēlā nav iekļauts filtra korpusa vāks. Korpusu tiek nosepts ar vāku mērījumu veikšanas laikā. Saskaņā ar mērījumu metodoloģiju (3.1. att.) induktīvo komponentu mērījumiem nepieciešami divi identiski filtri, līdz ar to izgatavoti divi identiski filtri BT1 un BT2.

Filtra spiestās plates *GND* slānis novietots kontaktā ar korpusu un SMA savienotāju ārējais slānis pievienots spiestās plates *GND* slānim. BT1 un BT2 ar spiesto plati, kuras *GND* slānis savienots ar korpusu, rada 22 nH induktīvo komponenti un 0,58 pF kapacitatīvo komponenti. Induktīvā komponente ir vērā ņemama, ja tiek veikti mērījumi virsmas SMD komponentēm ar ļoti zemu pretestību. Induktīvā komponente 22 nH, rada 13,8 Ω papildu pretestību pie 100 MHz un 0,013 Ω pretestību pie 100 k Ω . Šāda papildu pretestība būtiski neiespaido induktīvo un kapacitatīvo komponentu mērījumus.

Induktīvo komponentu mērījumiem mērījumu metodoloģijas blokshēmā (3.1. att) ir ārējā līdzkomponentes bloķēšanas ķēdēm (*DC-blocker*) BLK-89-S+, kuru darba diapazons ir līdz

50 V), līdzstrāvas komponente plūst tikai caur pieslēgvietām Nr. 3, bet tā neplūst caur BT1 un BT2 korpusu. Šādā situācijā BT1 un BT2 korpusi ir izolēti no līdzstrāvas komponentes, kas varētu radīt problēmas augstāko frekvenču diapazonā nenoteiktības dēļ, ko rada parazitiskā kapacitāte starp korpusu un spiesto plati un komponentēm.

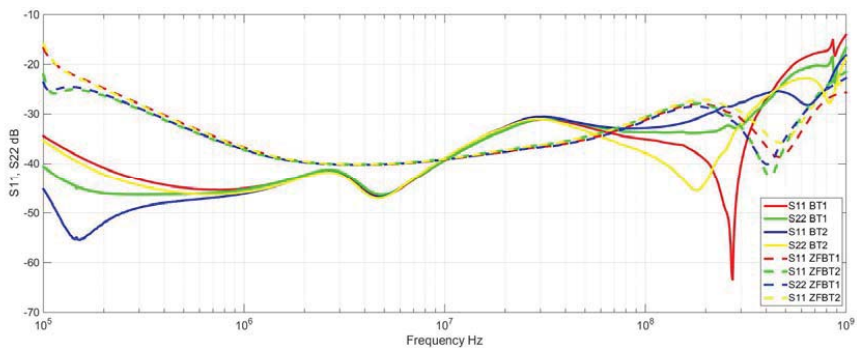
Zinātniskajos pētījumos, veicot induktīvo komponentu parametru mērījumus, mainot komponentes slodzes strāvu, tiek izmantoti filtri. Šādi filtri ir plaši pieejami tirgū, taču ierobežotam frekvenču diapazonam. Strāva ir robežās līdz 0,5 A. Piemēram, pētījumā [51] izmantots *MiniCircuits ZFBT-4R2GW+*. Izklāstītajā pētījumā netiek analizēta *ZFBT-4R2GW+* iedarbība uz mērījumu rezultātiem. Tiek pieņemts, ka mērījumu korekcija būs ideāla un *ZFBT-4R2GW+* neatstās nekādu iespaidu uz mērījumu rezultātiem. Analogs pieņēmums tiek izdarīts arī attiecībā uz slodzes strāvas ietekmi uz mērījumiem. Lai analizētu šī pētījuma kvalitāti un *ZFBT-4R2GW+* ietekmi uz mērījumiem, tika iegādāti vairāki *ZFBT-4R2GW+* un veikti mērījumi. Izklādes parametru mērījumu rezultāti salīdzināti ar izstrādāto filtru BT1 un BT2. *ZFBT-4R2GW+* attēli un iekšējā struktūra ir dota 3.8. att.



3.8. att. Filtrs *ZFBT-4R2GW+*.

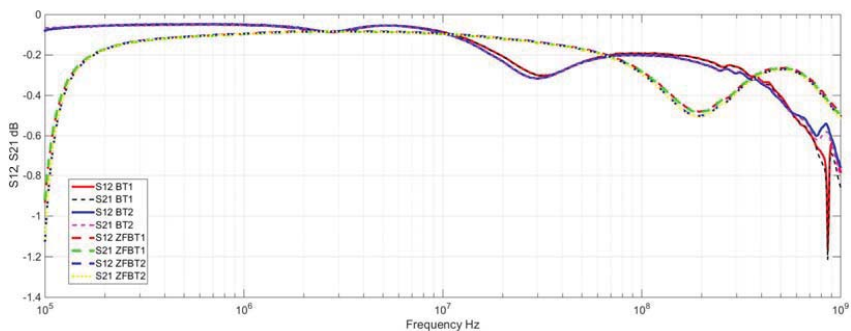
a – skats no priekšas; b – skats no priekšas bez vāka; c – skats no aizmugures bez vāka.

Izklādes parametru mērījumi *ZFBT-4R2GW+* un to salīdzinājums ar izstrādātajiem filtriem BT ir dots 3.9. att. un 3.10. att. *ZFBT-4R2GW+* atstarošanās koeficienti 3.8. att. ir ļoti līdzīgi (5 dB robežās), kas liecina par labu parametru atkārtotamību no filtra uz filtru. Salīdzinot ar BT, atstarošanās koeficients Γ ir augstāks frekvenču diapazonā 0,1 MHz–10 MHz. Frekvenču diapazonā 10 MHz–70 MHz atstarošanās koeficienti ir augstāki BT filtram. Virs 100 MHz abiem filtru veidiem ir novērojamas atstarošanās koeficientu rezonanses.



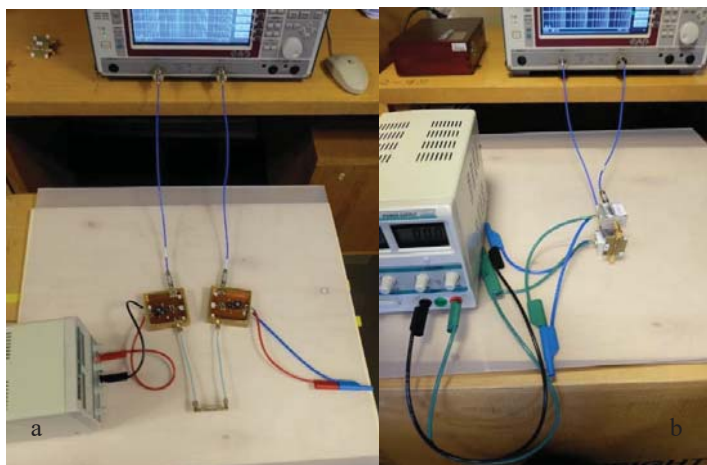
3.9. att. Atstarošanās koeficientu mērījumi BT un *ZFBT-4R2GW+*.

Pārvades koeficientu S_{21} vērtības *ZFBT-4R2GW+* ir salīdzinātas ar BT pārvades koeficientiem 3.10. att. BT pārvades koeficienta vērtības frekvenču diapazonā 0,1 MHz–100 MHz ir augstākas par $-0,4$ dB. *ZFBT-4R2GW+* pārvades koeficienta vērtības sasniedz $-1,1$ dB paša frekvenču diapazona sākumā pie 10 MHz.

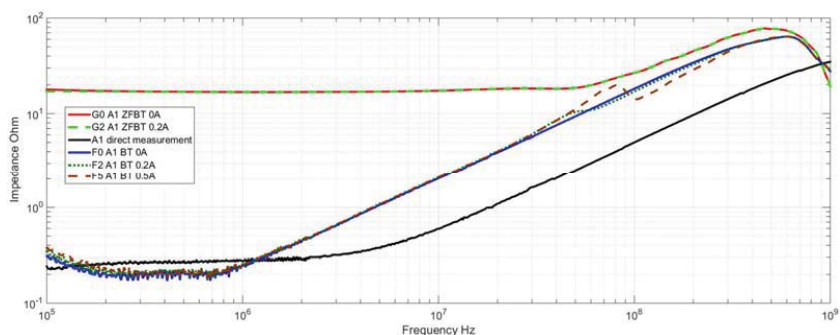


3.10. att. Pārvades koeficientu mērījumi BT un *ZFBT-4R2GW+*.

Lai salīdzinātu *ZFBT-4R2GW+* sniegumu ar BT, ir veikti mērījumi (3.11. att.), izmantojot slēgumu 3.1. att. Mērījumi veikti spiestajai platei, kas imitē īsslēgumu (mazu pilno pretestību) un spiestajai platei, uz kuras montētas pretestības 1Ω , $1 \text{ k}\Omega$ un induktīvās komponentes L1 *WE 42 792141* un L2 *WE 742 782 18*. Mērījumi veikti ar līdzstrāvas komponenti 0 A, 0,2 A. Mērījumi ar līdzstrāvas komponenti 0,5 A nav veikti, jo tā ir robežvērtība, pie kuras *ZFBT-4R2GW+* varētu tikt bojāts. Mērījumu korekcija veikta attiecībā uz spiesto plati, kas tiek mērīta kopā ar virsmas montāžas komponenti nevis tikai virsmas montāžas komponenti. Mērījumi ir salīdzināti ar BT mērījumiem, kā arī tiešajiem mērījumiem, kas veikti, izmantojot tikai VNA.



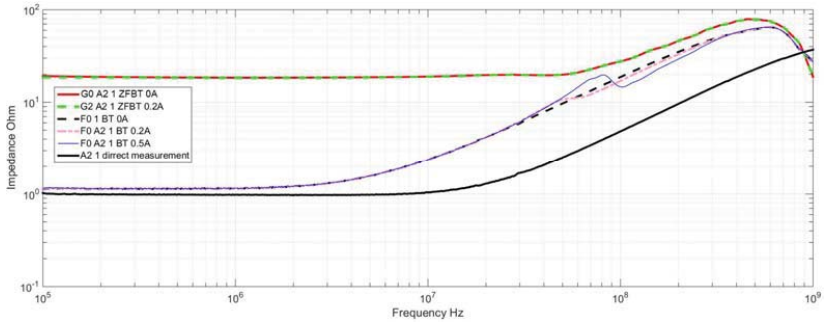
3.11. att. Mērījumu veikšana.
a – filtra prototips BT; b – komerciālais filtrs *ZFBT-4R2GW+*.



3.12. att. Īsslēguma spiestās plates mērījumi, izmantojot *ZFBT-4R2GW+*, salīdzinot ar BT mērījumiem.

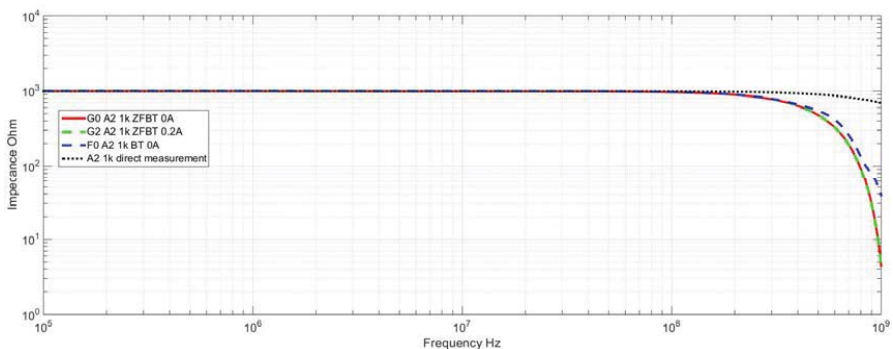
Analizējot spiestās plates, kas imitē īsslēgumu mērījumus 3.12. att., var redzēt, ka ar *ZFBT-4R2GW+* veiktie mērījumi frekvenču diapazonā līdz 70 MHz būtiski atšķiras no BT mērījumiem un tiešajiem mērījumiem, izmantojot tikai VNA. Ar *ZFBT-4R2GW+* nav iespējams veikt mērījumus, kas ir zemāki par 17 Ω . Arī nenokompensētā virknes induktīvā komponente ir lielāka nekā BT gadījumā, tā sasniedz 36 nH. Izmantojot BT, induktīvā komponente ir 27 nH, bet, veicot tiešos mērījumus, 7,7 nH. Līdzstrāvas komponente neatstāj ietekmi uz *ZFBT-4R2GW+* mērījumu rezultātiem.

Spiestās plates ar 1 Ω rezistora mērījumi ir attēloti 3.13. att. Arī šajos mērījumos apstiprinās, ka ar *ZFBT-4R2GW+* veiktie mērījumi nav zemāki par 17 Ω .



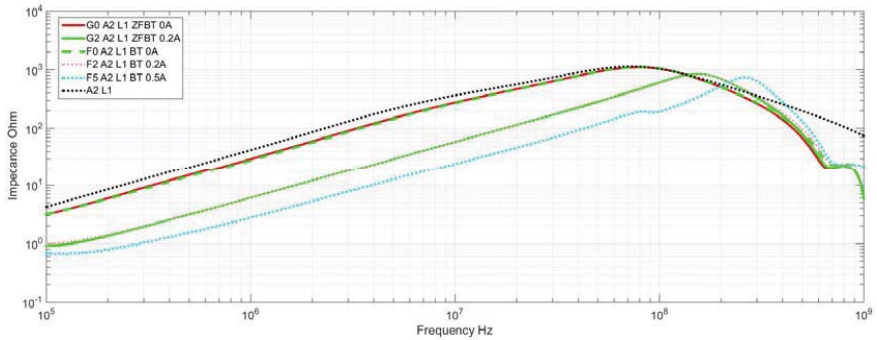
3.13. att. A2 spiestās plates mērījumu ar 1 Ω pretestību, izmantojot *ZFBT-4R2GW+*, salīdzinot ar BT mērījumiem.

Spiestās plates ar 1 k Ω mērījumi ir doti 3.14. att. Frekvenču diapazonā līdz 70 MHz *ZFBT-4R2GW+* mērījumi un BT mērījumi sakrīt 10 Ω robežās. Virs 70 MHz BT mērījumi ir tuvāki tiešajiem mērījumiem, izmantojot tikai VNA. Tas izskaidrojams ar nenokompensēto kapacitatīvo komponenti, kas, izmantojot *ZFBT-4R2GW+*, ir lielāka nekā gadījumā, ja tiek izmantoti BT. Frekvenču diapazonā 0,1 MHz–100 MHz mērījumi ar BT un *ZFBT-4R2GW+* ir ļoti tuvi tiešajiem mērījumiem, izmantojot tikai VNA.

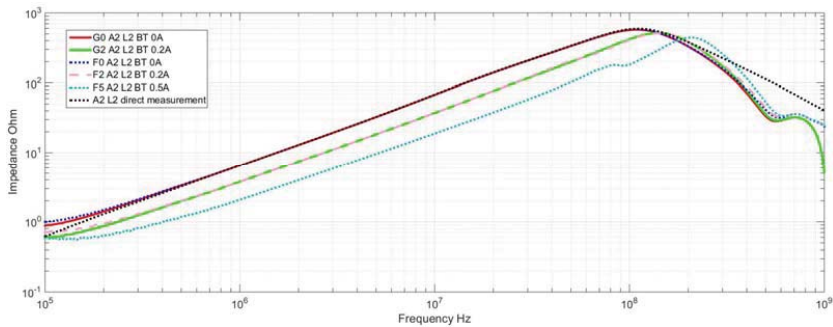


3.14. att. A2 spiestās plates mērījumi ar 1 k Ω pretestību, izmantojot *ZFBT-4R2GW+*, salīdzinot ar BT mērījumiem.

Induktīvo komponentu mērījumu rezultāti ir attēloti 3.15. att. un 3.16. att. Mērījumi, kas veikti, izmantojot *ZFBT-4R2GW+*, sakrīt ar mērījumiem, kas veikti, izmantojot BT.



3.15. att. Spiestās plātes mērījumi ar L1 WE 42 792141 induktīvo virsmas montāžas komponenti, izmantojot ZFBT-4R2GW+, salīdzinot ar BT mērījumiem.



3.16. att. Spiestās plātes mērījumi ar L2 WE 742 782 18 induktīvo virsmas montāžas komponenti, izmantojot ZFBT-4R2GW+, salīdzinot ar BT mērījumiem.

Izvērtējot iepriekš minētos rezultātus, var secināt, ka izveidotie filtru prototipi BT ir ar būtiski labākiem parametriem un sniedz vairāk priekšrocību nekā tirgū pieejamais un zinātniskajā pētījumā [51] izmantotais ZFBT-4R2GW+. Ar BT var veikt būtiski zemākus pretestības mērījumus, un nenokompensētā virknes induktivitāte ir zemāka nekā ZFBT-4R2GW+ gadījumā. Pašreizējais BT prototipos spēj nodrošināt 1 A lielu līdzstrāvas komponenti. Viens no BT trūkumiem ir nepieciešamība izmantot viļņvadus, lai pieslēgtu mērāmo objektu.

Secinājumi

Izstrādāti oriģināli telpisko virsmas montāžas kondensatoru un induktivitāšu modeļi, ko iespējams izmatot elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīkā *CST MW*, lai analizētu komponentu savstarpējo mijiedarbību frekvenču diapazonā 150 kHz–100 MHz. Telpiskie modeļi ir optimizēti, lai samazinātu skaitļojamo resursu prasību un paaugstinātu modeļu prognozēšanas precizitāti. Izstrādātie telpiskie modeļi ir verificēti ar prototipu mērījumiem, izmantojot vektora ķēžu analizatoru. Oriģinālie telpiskie modeļi ir veiksmīgi izmantoti jauna filtra prototipa izveidē, kas paredzēts slogotu induktīvo komponentu pilnās pretestības mērīšanai. Izstrādātais filtra prototips ir salīdzināts ar tirgū pieejamu filtra ekvivalentu *ZFBT-4R2GW+*, un veikta parametru analīze.

Izstrādāti telpiskie virsmas montāžas kondensatora modeļi, kuru analītiskajā ceļā iegūtās pilnās pretestības vērtības ir ar < 2,2 % kļūdu, salīdzinot ar veiktajiem mērījumiem, neatkarīgi no izmantotās mērīšanas metodes un lietotā SMA savienotāja novietojuma pozīcijas. Virsmas kondensatoru mijiedarbība ir niecīga diapazonā (0,3 nH–0,045 nH), taču frekvenču diapazonā virs 100 MHz tai var būt būtiska loma, nodrošinot vismaz 40 dB saiti starp atsaisītām ķēdēm. Pie frekvences 1 GHz veidotos jau 25 dB parazītiskā saite – starpkondensatoru mijinduktivitāte. Mijinduktivitāti ir iespējams aprēķināt analītiskā ceļā bez mērījumu veikšanas ar 30 % kļūdu, ja kondensatori atrodas vairāk nekā 1 mm attālumā citam no cita. Kondensatoriem atrodoties 1 mm attālumā vienam no otra, mijinduktivitātes kļūda ir tikai 14 %.

Izstrādātie telpiskie virsmas montāžas induktivitāšu modeļu pilnās pretestības analītiskie aprēķini un mērījumu rezultātu atšķirība frekvenču diapazonā zem 100 MHz, kas ir šī darba pamatizpētes frekvenču diapazons, ir niecīga, atšķirības ir < 1 %, frekvenču diapazonā virs 100 MHz atšķirība ir < 10 %. Induktīvo virsmas montāžas komponentes ar atsevišķu serdi un tinumiem pilnās pretestības raksturlielnes sakrīt līdz pilnās pretestības rezonanses frekvencei komponentei (*WE 7447709471* ar ~ 2 % un *WE 744066151* ar ~ 4 % kļūdu), kas liecina par to, ka analītisko aprēķinu rezultātā iegūtā induktīvā komponente ir korekti aprēķināta ar pieļaujamu kļūdas precizitāti, bet ekvivalentā paralēlā kapacitāte ir aprēķināta neprecīzi, abām komponentēm pārsniedzot 7 % kļūdu. Trīsdimensiju modeļu lielā kļūda ir izskaidrojama gan ar nezināmo feromagnētiskā materiāla sastāvu un īpašībām, gan arī ar sarežģīto virsmas montāžas induktivitāšu iekšējo struktūru, kam ir īpaša loma ekvivalentā paralēlā kapacitātes aprēķinos. Mijinduktivitātes analītiskie aprēķini un mērījumi parāda, ka izstrādāto virsmas montāžas induktivitāšu mijiedarbību iespējams noteikt ar 2 dB–10 dB precizitāti frekvenču diapazonā

2 MHz–100 MHz, frekvenču diapazonā zem 2 MHz telpisko modeļu paredzēšanas spējas ir grūti analizēt, jo sākas VĶA trokšņu līmenis.

Četru terminālu induktīvās komponentes ir iespējams mērīt, izmantojot divu portu VNA. Iegūtos rezultātus ir iespējams integrēt telpiskajā analītiskajā modelī kā četru portu izkliedes parametrus, kas dod iespēju vienā analītiskajā modelī ietvert induktīvās komponentes sinfāzes un asinfāzes īpašības. Ar analītiskajiem aprēķiniem iespējams aprēķināt gan komponentes sinfāzes (*CM*) pilno pretestību, gan induktivitāti ar augstu precizitāti.

Virsmas montāžas kondensatora parazitisko parametru samazināšana ir iespējama, veicot vienkāršas kondensatora novietojuma variācijas, kas ļauj samazināt mijinduktivitātes ietekmi kondensatora vājinājumu augstā frekvenču diapazonā. Ar dažādām spiesto ceļu variācijām iespējams iegūt kompensējošo mijinduktivitāti un paaugstināt kondensatora rezonanses frekvenci.

Trešajā darba nodaļā ir izstrādāts filtra prototips BT, kas paredzēts induktīvo komponentu pilnās pretestības mērīšanai ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku palīdzību. Pēc filtra prasību definēšanas (nodrošināt 1 A strāvu starp pieslēgvietām 2–3, nodrošināt līdzsprieguma izolāciju pieslēgvietai 1, pārvades koeficients S_{12} un S_{21} , 0,5 dB, atstarojumu koeficients S_{11} un $S_{22} < -25$ dB, pārvades koeficients $S_{13} < -25$ dB). Filtra prototips BT izstrādāts ar telpisko komponentu modeļiem, kas izstrādāti otrajā nodaļā. Pēc veiksmīgas elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīka *CST MW* izmantošanas filtra optimizācijā tiek sasniegti iepriekš definētās filtra prasības un veikta tā pārbaude ar reāla prototipa mērījumiem.

Izstrādātā filtra prototips (BT) ir salīdzināts ar komerciāli jau pieejamu filtra ekvivalentu *ZFBT-4R2GW+*. Salīdzināšana veikta, pamatojoties uz vektora ķēžu analizatora mērījumiem – platēm ar 1 Ω , 1 k Ω un induktīvajām komponentēm L1 (*WE 42 792141*) un L2 (*WE 742 782 18*), papildus induktīvajām komponentēm veikti mērījumi ar līdzstrāvas komponenti 0 A, 0,2 A. Mērījumi apstrādāti ar mērījumu korekcijas izteiksmēm. Analizējot iegūtos datus, var secināt, ka:

- filtrs BT rada nenokompensētā 22 nH induktīvo komponenti un 0,58 pF kapacitāto komponenti, bet komerciāli pieejamais filtrs *ZFBT-4R2GW+* – 36 nH induktīvo komponenti un 0,74 pF kapacitāto komponenti;
- filtra BT maksimālā pieļaujamā strāva ir 1 A, bet filtram *ZFBT-4R2GW+* – 0,5 A;

- filtrs *ZFBT-4R2GW+* nespēj veikt mērījumus, ja mērāmās komponentes pilnā pretestība ir zemāka par 17Ω , turpretī filtram BT nav šādu ierobežojumu;
- frekvenču diapazonā līdz 70 MHz filtra *ZFBT-4R2GW+* mērījumi un filtra BT mērījumi sakrīt 10Ω robežās.

Līdz ar to var secināt, ka izstrādātā filtra prototips BT ir ar labākiem parametriem nekā komerciāli pieejamais filtra ekvivalents *ZFBT-4R2GW+*.

Darbā izvirzītais mērķis sasniegts, un darba uzdevumi izpildīti. Izstrādātie oriģinālie EMI filtru telpiskie modeļi ir uzskatāmi par nozares novitāti, jo dod iespēju veikt precīzu starpkomponentu mijiedarbības analīzi un mijiedarbības ietekmi uz EMI filtra efektivitāti, lietojot elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku. Telpiskie modeļi ir izveidoti, lai samazinātu skaitļojamo resursu prasības un skaitļošanas laiku.

Darba turpinājums

Promocijas darbs aptver tikai daļu no nepieciešamajiem pētījumiem, lai veiktu pilnīgu un sekmīgu EMI filtra modelēšanu ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku *CST MSW*.

Turpmākos pētījumus ir paredzēts veikt:

- filtru prototipa BT apvienošana vienā korpusā;
- slogotu virsmas montāžas induktivitāšu izpēti ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku *CST MSW*;
- virsmas montāžas kondensatoru un virsmas montāžas induktivitāšu telpisko modeļu precizitātes uzlabošana frekvenču diapazonā 150 kHz–500 MHz;
- pilnīga vienfāzes filtra modelēšanai ar elektromagnētiskā lauka modelēšanas rīku *CST MSW*.

Izmantotā literatūra

- [1] EIROPAS PARLAMENTA UN PADOMES DIREKTĪVA 2014/30/ES (2014. gada 26. februāris) par dalībvalstu tiesību aktu saskaņošanu attiecībā uz elektromagnētisko savietojamību).
- [2] “MIL-STD-220C:2009, Military standart: Method of insertion loss measurement”.
- [3] “CISPR 17:2011 Methods of measurement of the suppression characteristics of passive EMC filtering device”.
- [4] K. Kurokawa, “Power Waves and the Scattering Matrix,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 2, no. 13, pp. 194–202, Mart 1965.
- [5] G. Asmanis, “Measurement and modeling of EMI filters high frequency parasitic parametrs,” PhD thesis, Rīga, 2014.
- [6] D. P. Newkirk, U. L. Rohde, “RF/Microwave Circuit Design for Wireless Applications,” London: Wiley-Interscience, 2000, p. 920.
- [7] Kenneth L. Kaiser, “Electromagnetic Compatibility Handbook.”Florida: CRS press, 2005, p. 2568.
- [8] S. Wang, F. C. Lee, W. G. Odendaal, “Using scattaring parametrs to characterize EMI filters,” Power electronics specialists’ conference, 2004, PESC, 2004, pp. 297–303.
- [9] Kye Yak See and Junhong Deng, “Measurement of noise source impedance of SMPS using a two probes approach,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 862–868, May 2004.
- [10] V. Tarateeraseth, Bo Ho, Kye See, and F. G. Canavero, “Accurate Extraction of Noise Source Impedance of an SMAP Under Operating Conditions,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 1, pp. 111–117, Jan. 2010.
- [11] Lee Smith, Jeff Gruszynski Dick Anderson. (1996, November) Test & Measurement Application Note 95-1 S-Parameter Techniques. Hewlett Packard.
- [12] G. Asmanis, A. Asmanis, D. Stepins, “Measuring capacitor parametrs using vector network analyzers,” Electronics, vol. 18. no. 1, pp. 29–38, June 2014.
- [13] Ultra low impedance measurements using 2-port measuraments, Agilent application note., 2004, p. 52.

- [14] R. Dosoudil. "Determination of permeability from impedance measurement using vector network analyzer," *Journal of electrical engineering*, vol. 63, no. 7, pp. 94–96, 2012.
- [15] G. Ghione, M. Pirola "Microwave Electronics," Cambridge university press. pp. 96, 2017.
- [16] <http://katalog.we-online.com/en/pbs>
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Ceramic_capacitor
- [18] R. P. Deshpande "Capacitors: Technology and Trends" Tata McGraw-Hill Education, 2012, pp. 319.
- [19] CST microwave studio workflow & solver overview. : CST, 2016,p. 127.
- [20] A. Asmanis, D. Stepins, A. Dzenis, G. Asmanis, "3D Modeling of Surface-Mount Capacitors and Mutual Couplings Between Them," *EMC EUROPE 2017*, Angers, France, September 4–8, 2017.
- [21] R&S Test and Measurement Division, "Vector network analyzer," p. 322.
- [22] I. F. Kovacevic, T. Friedli, A. M. Musing, J. W. Kolar, "3-D Electromagnetic Modeling of Parasitics and Mutual Coupling in EMI Filters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 135–149, Jan. 2014.
- [23] S. Wang, Lee, F. C., Odendaal W. G., "Characterization and parasitic extraction of EMI filters using scattering parameters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, No. 2, pp. 502 – 510, March 2005.
- [24] R&S Test and Measurement Division, "Vector Network Analyzer (VNA) Calibration: The Basics", p. 10.
- [25] Agilent "De-embedding and Embedding S-Parameter Networks Using a Vector Network Analyzer," *Application Note 1364-1*, May 30, 2004, p. 24.
- [26] G. Asmanis, D. Stepins, L. Ribickis, and A. Asmanis, "Modeling of Mutual Coupling between Inductors," *Proc. of IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility and Signal Integrity, USA*, Santa Clara, 15–20 March, 2015, pp. 294–299.
- [27] A. Asmanis, D. Stepins, G. Asmanis, L. Ribickis, "3D Modelling and Analysis of Parasitic Couplings between Surface-Mount Components of EMI Filters," *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore*, 2018, pp. 1–6.

- [28] A. B. Meničević, M. S. Damnjanović, Lj. D. Živanov. "MODELING OF EMI FILTERS WITH SHIELDS PLACED BETWEEN THE FILTER COMPONENTS," 2009 7th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics. Serbia, Subotica, 25–26 Sept., 2009, pp. 77–80.
- [29] Zhurbenko V. "Advanced Microwave Circuits and Systems," 2010.
- [30] Würth Electronics "Trilogy of Magnetics," 4th edition. 2012 p. 700.
- [31] J. Frei, Xiao-Ding Cai, S. Muller, "Multiport S-Parameter and T-Parameter Conversion With Symmetry Extension" IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 56, NO. 11, NOVEMBER 2008, pp. 2493–2504.
- [32] M. Salter "4 port VNA versus 2 port VNA: A comparison of methods for measuring the S parameters of a directional coupler," 4th European ANAMET Seminar METAS, Bern, Switzerland 3rd June 2015
- [33] D. G. Kam, J Kim, "Multiport Measurement Method Using a Two-Port Network Analyzer With Remaining Ports Unterminated," IEEE Microwave and Wireless Components Letters (Volume: 17, Issue: 9, Sept. 2007) pp. 694– 696.
- [34] A. Asmanis, G. Asmanis, D. Stepins un L. Ribickis, "High-frequency modelling of EMI filters considering parasitic mutual couplings," *ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC)*, Valencia, Spain, 2016.
- [35] G. Asmanis, A. Asmanis un D. Stepins, "Modeling of EMI filters with shields placed between the filter components," *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Wroclaw, Poland, 2016.
- [36] G. Asmanis, L. Ribickis, D. Stepins un A. Asmanis, "Differential mode II-type EMI filter modeling using CST MWS," *56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, Latvia, 2015.
- [37] I. F. Kovačević, T. Friedli, A. M. Müsing un J. W. Kolar, "3-D Electromagnetic Modeling of Parasitics and Mutual Coupling in EMI Filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, sēj. 29, nr. 1, pp. 135–149, 2014.

- [38] T. Zeeff, T. Hubing, T. Van Doren un D. Pommerenke, "Analysis of simple two capacitor low pass filters," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, pp. 595–601, Nov 2003.
- [39] J. McDowell un T. Hubing, "Parasitic Inductance Cancellation for Surface Mount Shunt Capacitor Filters," *IEEE Transaction of Electromagnetic Compatibility*, pp. 74–82, Feb 2014.
- [40] G. Tang, "Surface mount capacitor loop inductance calculation and minimization," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 6 Aug 1998.
- [41] C. N. Olsen, T. Van Doren, T. Hubing, J. Drewniak un R. DuBroff, "Improving the high-frequency attenuation of shunt capacitor, low-pass filters," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 13–17 Aug 2001.
- [42] E. Bogatin, *Signal and Power Integrity-Simplified*, NJ: Engelwood Cliffs, 2004.
- [43] T. Neugebauer, J. Phinney un D. Perreault, "Filters and components with inductance cancellation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, sēj. 40, nr. 2, pp. 483–491, 2004.
- [44] T. Neugebauer un D. Perreault, "Filters with inductance cancellation using printed circuit board transformers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, sēj. 19, nr. 3, pp. 591–602, 2004.
- [45] F. L. W. O. S. Wang, "Cancellation of capacitor parasitic parameters for noise reduction application," *IEEE Transactions on Power Electronics*, sēj. 21, nr. 4, 2006.
- [46] B. Pierquet, T. Neugebauer un D. Perreault, "A Fabrication Method for Integrated Filter Elements With Inductance Cancellation," *IEEE Transaction Power Electronics*, pp. 838–848, Mar 2009.
- [47] H.-F. Chen, C.-Y. Yeh un K.-H. Lin, "A Method of Using Two Equivalent Negative Inductances to Reduce Parasitic Inductances of a Three-Capacitor EMI Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, sēj. 24, nr. 12, pp. 2867–2872, 2009.
- [48] B. J. Pierquet, T. C. Neugebauer un D. J. Perreault, "Inductance Compensation of Multiple Capacitors With Application to Common- and Differential-Mode Filters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, sēj. 21, nr. 6, pp. 1815–1824, 2006.

- [49] J. Bernal, M. Freire un S. Ramiro, "Simple and cost-effective method for improving the high frequency performance of surface-mount shunt capacitors filters," %1 2015 *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, 2015.
- [50] Clayton R. Paul, "Introduction to Electromagnetic Compatibility," 2nd ed. London: Wiley-Interscience, 2006.
- [51] Čedo J. Žlebič; Dragan R. Kljajić; Nelu V. Blaž; Ljiljana D. Živanov; Aleksandar B. Menićanin; Mirjana S. Damnjanović, "Influence of DC Bias on the Electrical Characteristics of SMD Inductors," *IEEE Transactions on Magnetics*, Year: 2015, Volume: 51, Issue: 1 (Article Sequence Number: 6500204).
- [52] EN 55032 – Electromagnetic compatibility of multimedia equipment – Emission Requirements.