

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Deniss STEPINS**

**FREKVENCES MODULĒTO IMPULSVEIDA SPĒKA  
PĀRVEIDOTĀJU IZPĒTE UN KVALITĀTES UZLABOŠANA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2011**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte  
Radioelektronikas institūts

**Deniss STEPINS**

Doktora studijas programmas “Radioelektronika” students  
(st. apl. Nr. 011REB013)

**FREKVENCES MODULĒTO IMPULSVEIDA SPĒKA  
PĀRVEIDOTĀJU IZPĒTE UN KVALITĀTES UZLABOŠANA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**J. JANKOVSKIS**

**Rīga 2011**

UDK 621.314.064 (043.2)

St 365 f

Stepins D. Frekvences modulēto impulsveida spēka pārveidotāju izpēte un kvalitātes uzlabošana. Promocijas darba kopsavilkums.- R.:RTU, 2011.-37 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2011.gada 2. marta lēmumu, protokols Nr. 2.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

ISBN

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU  
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI  
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.gada 9. jūnijā plkst. 16.30 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 210. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

profesors, Dr.sc.ing. Guntars Balodis  
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte, Rīgas Tehniskā universitāte

Dr.phys. Alberts Kristiņš  
LU Cietvielu fizikas institūts, Radioelektronikas nodaļas vadītājs

Dr.sc.ing. Leonards Latkovskis  
Fizikālās enerģētikas institūts, Spēka elektronikas nodaļas vadītājs

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Deniss Stepins .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 9 pielikumus, 108 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 144 lappuses. Literatūras sarakstā ir 122 nosaukumi.

## Saturs

1. IEVADS.....	5
Tēmas aktualitāte.....	5
Darba mērķi.....	7
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti.....	8
Aiztāvāmās tēzes.....	8
Pētījumu metodika.....	9
Darba praktiskais pielietojums.....	9
Darba rezultātu aprobācija.....	9
Darba struktūra.....	11
2. ELEKTROMAGNĒTISKIE TRAUČĒJUMI (EMT) IMPULSVEIDA SPĒKA PĀRVEIDOTĀJOS (ISP) UN TO SAMAZINĀŠANAS METODES.....	12
3. FREKVENČU MODULĀCIJAS (FM) PIELIETOŠANAS EFEKTIVITĀTES UZLABOŠANA ISP.....	14
4. IZPĒTE PAR FM IETEKMI UZ ISP PARAMETRIEM; ISP KVALITĀTES UZLABOŠANA.....	19
4.1 FM ietekme uz izejas sprieguma pulsācijām.....	19
4.2. FM ietekme uz lietderības koeficientu.....	24
4.3. FM ietekme uz ieejas enerģijas kvalitāti.....	28
5. SECINĀJUMI.....	32
DARBĀ LIETOTO GALVENO SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	34
LITERATŪRAS SARAKSTS.....	35

## TĒMAS AKTUALITĀTE

Mūsdienās impulsveida spēka pārveidotāji (ISP) ir nepieciešami elektriskās enerģijas pārveidošanas procesā no viena sprieguma līmeņa uz citu ar augstu lietderības koeficientu (agrāk plaši izplatītie lineārie regulatori ir ar ļoti zemu lietderības koeficientu un kā tādi tie tiek tagad lietoti tikai dažos specifiskos gadījumos). To pielietošanas sfēra ir plaša: elektronisku iekārtu un sistēmu sekundārie elektrobarošanas avoti, akumulatoru bateriju lādēšanas iekārtas, apgaismes tehnikas elektroniskie balasti, u.c. [1,2,3]. Impulsveida spēka pārveidotāji ir svarīga spēka elektronikas - dinamiska zinātniski-tehniska virziena sastāvdaļa. Elektriskās enerģijas pārveidošanas principi, pārveidošanas iekārtu elementu bāze, to konstruktīvie un tehnoloģiskie risinājumi nepārtraukti uzlabojas [1]. ISP galvenās tendences to dinamiskās attīstības posmā pēdējos 30 gados ir: īpatnējās jaudas palielināšana, lietderības koeficienta ( $\eta$ ) paaugstināšana, elektromagnētisko traucējumu (EMT) samazināšana, izejas sprieguma pulsāciju samazināšana, siltumrežīma uzlabošana, utt.

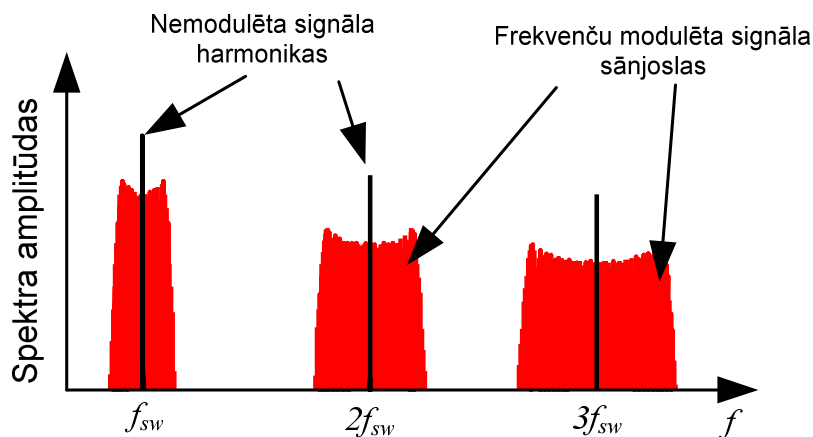
Impulsveida spēka pārveidotāju galvenās priekšrocības, salīdzinājumā ar citiem spēka pārveidotājiem (piem., lineāriem) ir augstais lietderības koeficients (modernajiem ISP tas var būt lielāks par 90%) un lielā īpatnējā jauda (kura, mūsdienās pārsniedza robežu  $3\text{kW}/\text{dm}^3$ ) [1].

Neskatoties uz minētajām ISP priekšrocībām, tiem piemīt arī trūkumi. Galvenie impulsveida spēka pārveidotāju trūkumi ir augstie EMT (kā konduktīvie, tā arī izstarotie traucējumi), un relatīvi lielas (ne vienmēr pieļaujamas) izejas sprieguma pulsācijas. EMT impulsveida spēka pārveidotājos rodas „dabīgi” – šeit pielietotā impulsveida regulēšanas dēļ - no pārslēdzošamies spēka pusvadītāju ierīcēm, kas rada izteikti lielas strāvas un sprieguma izmaiņas laikā:  $di/dt$ ,  $dV/dt$  [4]. Ar stingro elektromagnētiskās savietojamības starptautisko direktīvu ieviešanu (piem., CISPR 22), pasaulē būtiski ir pieaugusi nepieciešamība pēc EMT problēmu risināšanas impulsveida spēka pārveidotājos [5]. Klasiskās metodes EMT samazināšanai parasti ir: ieejas EMT filtru pielietošana, pareiza iespiedplates konstruēšana un elementu izvietošana, ekranēšana, „mīksta” komutācijas pielietošana, u.c. [6-10], taču to pielietošana jūtami palielina ISP izmērus un izmaksas.

Pēdējās desmitgadēs attīstās vēl viena veiksmīga metode EMT samazināšanai – izkliedētais spektrs, kas ir bāzēts uz komutācijas frekvences periodisku, haotisku vai varbūtīgu modulāciju [5,11,12]. Tās rezultātā ISP nemodulētās komutācijas frekvences diskrēto harmoniku enerģija tiek izkliedēta plašākā frekvenču diapazonā, kas savukārt būtiski samazina EMT galotnes līmeņus [6], (kā tas, piemēram, ir redzams 1.1. att.). Pirmie darbi par izkliedētā spektra metodi elektronikā parādījās deviņdesmitos gados kā mikroprocesoru sistēmu izstaroto EMT

samazināšana [13,14], tā arī spēka impulsveida pārveidotājos, galvenokārt konduktīvo EMT samazināšanai [15]. Pēdējos piecpadsmit gados izkliedēto spektru sāk pielietot visai plaši – ne tikai mikroprocesoru sistēmās un impulsu barošanas avotu pamattopoloģijās [5,6,8,11,16-20], bet arī jaudas koeficienta korektoros [21,22], apgaismes ierīču elektroniskajos balastos un invertoros [23,24] un pat jaunākajos D klases skaņas pastiprinātājos [25]. Visi iepriekšminēti izkliedēta spektra pielietojumi pasaulē ir kaut kādā mērā pētīti; pētījumu rezultāti parāda gan to priekšrocības, gan trūkumus. Tā, piemēram, salīdzinot varbūtīgo modulāciju ar periodisko, varam atzīmēt, ka periodiskai frekvenču modulācijai (FM) ir noteiktas priekšrocības: pirmkārt, to vienkāršāk īstenot; otrkārt, varbūtiskai FM pie tādas pašas frekvenču deviācijas kā periodiskai FM spektrs ir vairāk izkliedēts, kas no vienas puses, labāk samazina EMT pīķa līmeņus, bet no otras puses, stipri palielina zemfrekvences komponentes, kas, savukārt, palielina izejas sprieguma pulsācijas [11]. Šajā darbā mēs pētīsim ISP ar periodisku FM, bet daži iegūtie rezultāti ir ar vispārīgu nozīmi – tos var pielietot arī citiem FM veidiem.

Neskatoties uz to, ka ar FM var samazināt konduktīvos EMT spēka impulsveida pārveidotājos, tā var būt arī ne īpaši efektīva (piem., attiecība uz vājinājumu) pie konkrētiem modulējošā signāla  $m(t)$  parametriem. Tā, publikācijā [23] ir parādīts, ka frekvenču modulēta elektroniska balasta izejas strāvas amplitūdas modulācija (AM) var rādīt komutācijas frekvences ( $f_{sw}$ ) fundamentālās harmonikas sāņjoslu asimetriju un līdz ar to samazināt FM pielietošanas efektivitāti EMT samazināšanai. Līdzīgu efektu mēs novērojām arī savos pētījumos jaudas koeficienta korektoram [21] un paaugstinošam ISP [20]. Lai atrisinātu šo problēmu konkrēti elektroniskajiem balastiem (publikācijā [23]) tiek piedāvāts izmantot lauzta profila modulējošu signālu (kas tika nosaukts par „modificētu zāģveida signālu”), kas ļauj neitralizēt šo asimetriju un ar to uzlabot konduktīvo EMT vājinājumu vismaz par dažiem dB.



1.1.att. Frekvenču modulēta un nemodulēta komutācijas signālu spektri.

Mūsu pētījumos ir pierādīts, ka šī metode ir efektīva tikai pie vienas modulējošā signāla un spēka ķēdes elementu parametru kombinācijas. Tas nozīmē, ka tā nav optimāla pie citām šo parametru vērtībām. Tāpēc šajā darbā, pirmkārt, mēs pārbaudām, vai šo metodi var pielietot citās ISP topoloģijās ieejas EMT samazināšanai, un otrkārt, uzlabojam šīs metodes pielietošanas efektivitāti optimizējot to maksimāla EMT vājinājuma iegūšanai.

Frekvenču modulācijai kā jebkurai citai EMT samazināšanas metodei līdztekus priekšrocībām EMT samazināšanā, ir arī noteikti trūkumi:

- izejas sprieguma pulsāciju līmeņa palielināšanās [6,11,12,16,27-30];
- papildus „dabīgām” augstfrekvences (AF) pulsācijām parādās arī zemfrekvenču (ZF) pulsācijas (un ZF harmonikas) izejā [6,11,27-30];
- ieejas jaudas kvalitātes pasliktināšanās (kas ir svarīgs maiņstrāvas tīklam pieslēgtajiem ISP) [6,18,22,24,31];
- ir iespējama lietderības koeficienta samazināšanās [6,18,22,24,32].

Tā kā šie trūkumi ir ļoti būtiski impulsveida spēka pārveidotājos, tad FM negatīvo ietekmi ir nepieciešams izpētīt un samazināt. Zinātniskajās publikācijās saistībā ar šiem trūkumiem FM ISP ir pamanītas sekojošas problēmas:

- rezultāti pārsvarā ir eksperimentāli bāzēti (bez atbilstoša teorētiska vispārinājuma);
- galvenie problēmas cēloņi netiek atsegti;
- lielākā daļa no pētījumiem ir saistīti ar FM pielietošanu nestabilizētājiem ISP;
- pētījumos nav dotas rekomendācijas vai risinājumi problēmu efektīvai samazināšanai.

Tāpēc šajā darbā mēs mēģinām detalizēti izpētīt un novērst šīs problēmas.

## **DARBA MĒRĶI**

Darba pamatmērķis ir paaugstināt FM pielietošanas efektivitāti spēka impulsveida pārveidotājos, izpētīt un samazināt šīs metodes negatīvo ietekmi uz pārveidotāja elektroenerģijas kvalitāti izejā un ieejā (tīklam pieslēgtajos) un lietderības koeficientu.

Lai sasniegtu šo mērķi, tiek izvirzīti šādi pamatuzdevumi:

- izpētīt modulējošā signāla un ISP spēka ķēdes parametru ietekmi uz konduktīvo EMT samazināšanas efektivitāti, pielietojot periodisku FM;
- uzlabot ieejas EMT vājinājumu FM ISP, optimāli pielietojot lauza profila modulējošo signālu;
- izpētīt FM ietekmi uz izejas sprieguma pulsācijām un samazināt tās;

- izpētīt FM negatīvo ietekmi uz lietderības koeficientu un sniegt rekomendācijas tā paaugstināšanai;
- izpētīt un samazināt FM negatīvo ietekmi uz ISP elektroenerģijas kvalitāti tā ieejā un uzlabot to.

## **ZINĀTNISKA NOVITĀTE UN GALVENIE REZULTĀTI**

Promocijas darba galvenās novitātes un rezultāti ir saistītas ar ISP komutācijas frekvences modulācijas metodes pielietošanas efektivitātes uzlabošanu ieejas EMT samazināšanai un tās negatīvās ietekmes samazināšanu uz FM ISP svarīgiem parametriem. Šajā promocijas darbā:

- tiek uzlabota frekvences modulācijas pielietošanas efektivitāte maksimāla ieejas EMT vājinājuma iegūšanai frekvenču modulētos ISP, optimāli izmantojot lauza profila modulējošu signālu;
- ir izstrādāta metodika lauza profila modulējoša signāla parametru optimālas vērtības aprēķinam maksimāla EMT vājinājuma iegūšanai FM ISP;
- atrasti līdz šim nezināmie cēloņi, kas rada izejas sprieguma pulsāciju palielināšanos un ieejas elektroenerģijas kvalitātes pasliktināšanos kā nepārtrauktā droseles strāvas režīmā (NSR), tā arī pārtrauktā droseles strāvas režīmā (PSR);
- izstrādātas oriģinālas rekomendācijas izejas sprieguma pulsāciju efektīvai samazināšanai un ieejas enerģijas kvalitātes uzlabošanai;
- uz veiktās teorētiskās analīzes pamata par FM ietekmi uz lietderības koeficientu ir izstrādātas rekomendācijas tā paaugstināšanai;
- ir izstrādātas izejas sprieguma pulsāciju un lietderības koeficienta aprēķinu metodikas FM ISP, kas var būt noderīgas kvalitatīvu FM ISP projektēšanai un to optimizācijai;
- ir veikts oriģināls pētījums par FM ietekmi uz ISP ieejas enerģijas kvalitāti un izejas sprieguma pulsācijām PSR;
- ir piedāvāts oriģināls shēmtehnisks risinājums mazas komutācijas aizturu differences iegūšanai, kas ļauj ievērojami samazināt ZF pulsācijas NSR.

## **AIZSTĀVAMĀS TĒZES**

Aizstāvēšanai tiek izvirzītas sekojošas tēzes:

- 1) ka EMT vājinājumu FM spēka impulsveida pārveidotājiem var palielināt, optimāli pielietojot lauza profila modulējošu signālu; maksimāla EMT vājinājuma iegūšanai

- jāizrēķina lauza profila modulējoša signāla parametru optimālas vērtības atbilstoši izstrādātai metodikai;
- 2) ka izejas sprieguma pulsācijas var samazināt, atbilstoši izstrādātajai teorijai izvēloties modulējoša signāla parametrus, ISP vadības ķēdes parametrus un to shēmtehnisko īstenojumu;
  - 3) ka lietderības koeficientu FM ISP var paaugstināt, izmantojot izstrādātās rekomendācijas;
  - 4) ka ieejas enerģijas kvalitāti FM ISP var uzlabot atbilstoši sniegtam rekomendācijām.

## **PĒTĪJUMU METODIKA**

FM ISP izpēte notika kā teorētiski, tā arī izmantojot datormodelēšanu un arī eksperimentālo pārbaudi. Sākumā problēmas tiek analizētas teorētiski, izvestās nepieciešamās analītiskās izteiksmes. Teorētiskie rezultāti ir pārbaudīti, izmantojot datormodelēšanu (pārsvarā izmantojot datormodelēšanas programmu Matlab Simulink). Pēc tam iegūtie rezultāti ir pārbaudīti arī eksperimentāli.

## **DARBA PRAKTISKAIS PIELIETOJUMS**

Iegūtie rezultāti un sniegtās rekomendācijas var tikt pielietoti kvalitatīvu FM ISP projektēšanai, praksei un to tālākai attīstībai.

## **DARBA REZULTĀTU APROBĀCIJA**

Promocijas darba galvenie zinātniskie rezultāti tika prezentēti sekojošās konferencēs:

- IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE10), Bari, Italy, July 4-7, 2010.
- International Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2008), TUT, Tallinn, Estonia, Oct. 6-8, 2008.
- International Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010), TUT, Tallinn, Estonia, Oct. 4-6, 2010.
- The 14th International Conference „Electronics ‘10”, Kaunas, Lithuania, May 18-20, 2010.
- The 12th International Conference „Electronics ‘08”, Kaunas, Lithuania, May 20-22, 2008.

- The 13th International Conference „Electronics ‘09”, Kaunas, Lithuania, May 12-14, 2009.
- The 10th International Conference „Electronics ‘06”, Kaunas, Lithuania, May 23-25, 2006.
- The 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC2010), Timisoara, Romania, Nov. 11-12, 2010.
- The 50th RTU International Conference, Rīga, Latvija, 2009. gada 14.-16. Oktobrī.

Kopumā ir publicēti 12 zinātniskie raksti dažādos zinātniskos izdevumos:

1. Stepins D. Analysis of Output Voltage of Switching Frequency Modulated DC-DC Converter Operating in Discontinuous Conduction Mode // *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE10)*, Bari, Italy, July 4-7, 2010. – pp. 670-675.
2. Stepins D. Examination of influence of periodic switching frequency modulation in dc/dc converters on power quality on a load // *Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn, Estonia, Oct. 6-8, 2008. – pp. 285-288.
3. Stepins D. Examination of Power Converters with Modulated Switching Frequency // *Electronics and Electrical Engineering*. - 9(105). – 2010. - pp. 33.-38.
4. Jankovskis J., Stepins D., Pikulins D. Improving effectiveness of the use of frequency modulation in power converters // *Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference*, Tallinn, Estonia, Oct. 4-6, 2010. – pp. 327-330.
5. Stepins D. Improving EMI attenuation in a frequency modulated boost converter // RTU zinātniskie raksti. 7. sēr., Telekomunikācijas un elektronika. - 9. sēj. (2009), 17.-23. lpp.
6. Jankovskis J., Stepins D., Tjukovs S., Pikulins D. Examination of Different Spread Spectrum Techniques for EMI Suppression in dc/dc Converters // *ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING*. - 6 (86). – 2008. – pp. 60.-64.
7. Jankovskis J., Stepins D., Pikulins D. Lowering of EMI Noise in Boost Type PFC by the use of Spread Spectrum// *ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING*. - 6 (94). – 2009. – pp. 15.-18.
8. Jankovskis J., Stepins D., Pikuļins D. Efficiency of PFC Operating in Spread Spectrum Mode for EMI Reduction // *Electronics and Electrical Engineering*. - 7. – 2010. – pp. 13.-16.
9. Jankovskis J., Stepins D., Pikuļins D. Effects of Increasing Switching Frequency in Frequency Modulated Power Converters // *Proceedings of the ”2010 9th International*

*Symposium on ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS*”, Timisoara, Romania, November, 11-12, 2010. – pp. 115-118.

10. Jankovskis J., Stepins D. An Examination of Parasitic Processes in DC/DC Power Converters // *ELECTRONICS AND ELECTRICAL ENGINEERING*. - 4(68). - 2006. – pp. 15.-18.
11. Stepins D. On the Figures of Merit for Planar Spiral Inductors // *RTU zinātniskie raksti*. 7. sēr., Telekomunikācijas un elektronika. - 7. sēj. (2007), 16.-18. lpp.
12. Stepins D. Performance-Analysis-Based Examination of Planar Spiral Inductors // *Materials of the 4th International Young Scientist Conference “Modern Issues in Radio Engineering and Telecommunications”*, Sevastopol, Ukraine, April 21-25, 2008. – pp. 312.

Četras publikācijas (1,2,4,9) ir pieejamas ciparu bibliotēkā IEEEXplore Digital Library.

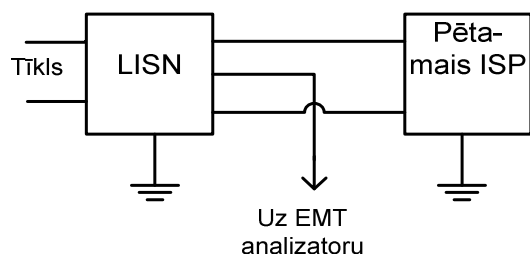
## **DARBA STRUKTŪRA**

Darbs sastāv no ievada, trīs nodaļām ar secinājumiem, gala secinājumiem, literatūras saraksta un pielikumiem. Ievadā tiek izklāstīta promocijas darba tēmas aktualitāte, tiek sniegta literatūras analīze, formulēts darba mērķis un promocijas darba praktiskā nozīme. 2. nodaļā tiek dotas vispārīgas ziņas par EMT spēka impulsu pārveidotājos, to tradicionālām samazināšanas metodēm un izkliedēto spektru. 3.nodaļā sākumā tiek dotas īsas vispārīgas ziņas par FM, frekvenču modulētu taisnstūru impulsu secību spektru un vājinājumu. 3.2 sadaļā tiek veikta EMT teorētiskā izpēte FM ISP. 3.3 sadaļā tiek analizēta lauza profila modulējošā zāgveida signāla pielietošana EMT vājinājuma paaugstināšanai. 3.4 sadaļā ir atspoguļotas eksperimentālas pārbaudes rezultāti, un 3.5 sadaļā tiek sniegti secinājumi. 4. nodaļa ir veltīta FM negatīvai ietekmei uz FM ISP svarīgiem kvalitātes rādītājiem: izejas sprieguma pulsāciju atvērzienu (4.1 sadaļa), lietderības koeficientu (4.2 sadaļa) un ieejas enerģijas kvalitāti (4.3 sadaļa). Pielikumos ir parādītas SIMULINK modelēšanas shēmas stabilizētam un nestabilizētam FM paaugstinošam un pazeminošam ISP, ir parādīta stabilizēta FM pazeminoša ISP principiālā shēma, kas tika izmantota eksperimentos, un sniegtas lietderības koeficienta un izejas sprieguma pulsāciju atvērzienu aprēķinu metodikas FM ISP.

## 2. ELEKTROMAGNĒTISKIE TRAUČĒJUMI IMPULSVEIDA SPĒKA PĀRVEIDOTĀJOS UN TO SAMAZINĀŠANAS METODEDES

Promocijas darba otrā nodaļā ir īsi sniegtas ziņas par EMT veidiem, to cēloņiem ISP un pasaules standartiem, kas nosaka EMT mērījumu nosacījumus. Ir sniegtas īsas ziņas par tradicionālām EMT samazināšanas metodēm ISP, to priekšrocībām un trūkumiem, kā arī par progresīvāko metodi – izkliedēta spektra metodi.

ISP ir vieni no visbūtiskajiem EMT avotiem. To radītie EMT var traucēt normāli darboties citām elektroniskām iekārtām, tāpēc EMT samazināšana ieņem svarīgu lomu ISP projektēšanā [10]. Šo elektromagnētisko traucējumu rašanās, galvenokārt, tiek saistīti ar to, ka ISP strāvām un spriegumiem ir impulsu raksturs, kas rada komutācijas frekvences ( $f_{sw}$ ) harmonikas, kas aizņem plašu MHz diapazonu. Tā kā ISP komutācijas frekvences ir parasti augstas (tās var būt no dažiem desmitiem kHz līdz pat dažiem MHz) šī problēma kļūst aizvien aktuālāka [7,10,11,15]. EMT pēc savas būtības var izplatīties gan pa vadītājiem (tā saucamie „konduktīvie traucējumi” – *conducted EMI*), gan arī izstaroties (tā saucamie „izstarotie traucējumi” – *radiated EMI*). Izstarotie traucējumi ir vairāk izteikti augstās frekvencēs, bet konduktīvie – zemākās. Tāpēc parasti konduktīvus EMT pārbauda no 150 kHz līdz 30 MHz, bet izstarotus – no 30 MHz



2.1 att. Tipiskā konduktīvo traucējumu mērījumu blokskāma.

impedances stabilizācijas iekārtu<sup>1</sup> (LISN), kuru slēdz starp tīklu un pētāmo ISP, un EMT analizatoru vai spektra analizatoru, kuru pieslēdz pie LISN (skat. 2.1. att.). Konduktīvos EMT mērījumus dažādos diapazonos veic ar dažādām EMT analizatora filtra joslas platumiem<sup>2</sup>. Piem., pēc CISPR 22 diapazonā 150 kHz – 30 MHz, mērījumus veic ar RBW=9kHz, bet pēc CISPR 16 diapazonā 9 kHz – 150 kHz, ar RBW=200 Hz [10].

Konduktīvos EMT var sadalīt divās grupās: diferenciālie (*differential mode*) un sinfāzie (*common mode*) traucējumi. Diferenciālie EMT ir saistīti ar ISP ieejas strāvu, bet sinfāzie –

līdz 1 GHz [4]. Eksistē dažādi standarti, kuri nosaka, kādos diapazonos ir jāmēra EMT. Viens no pasaules atzītākajiem standartiem ir CISPR Publication 22.

Konduktīvie EMT, piem., var izplatīties pa ieejas vadiem uz tīklu, tā caur to traucējot citām elektroniskām iekārtām. Konduktīvo traucējumu mērījumos pielieto tīkla

<sup>1</sup> Starptautiskais termins: Line Impedance Stabilization Network (LISN)

<sup>2</sup> To sauc parasti par RBW – Resolution Bandwidth

galvenokārt ar raksturīgo augsto  $dv/dt$  spēka tranzistora spriegumam un parasti noslēdzas caur parazītiskām kapacitātēm [26].

Konduktīvie un izstarotie EMT parasti tiek samazināti, izmantojot ieejas filtrus, kuri atkarībā no to izveidojuma var samazināt gan diferenciālos, gan arī sinfāzos traucējumus; speciālas slāpējošas (dempferējošas) RC un RCD ķēdes, kurus pieslēdz pie spēka tranzistoriem un diodēm; ferīta gredzenus, kurus uzver uz ISP ieejas/izejas vadiem un spēka komponentu izvadiem; ISP ekranēšanu izstaroto traucējumu samazināšanai; elektromagnētiskas savietojamības prasībām atbilstošu iespiedplates projektēšanu; ISP ar „mīksto” komutāciju [8,9].

Katrai EMT samazināšanas metodei ir savi trūkumi. Piemēram, neskatoties uz to ka pasīvo ieejas filtru pielietošana var efektīvi samazināt konduktīvus EMT, viņu dēļ jūtami palielinās ISP izmēri, svars, izmaksas un samazinās lietderības koeficients.

Efektīvākai EMT samazināšanai pēdējā laikā līdztekus tradicionālajām EMT samazināšanas metodēm bieži pielieto arī metodes, balstītas uz spektra izkliedi. Izkliegtā spektra<sup>3</sup> metode faktiski ir adaptēta no sakaru teorijas un, kā jau tas tika minēts iepriekš, deviņdesmitajos gados to sāka pielietot EMT samazināšanai datoru sinhronizācijas signāliem, kā arī dažāda veida ISP un pēdējā laikā pat D klases skaņas pastiprinātājiem. Pielietojot izkliegtā spektra metodi, nemodulētās komutācijas frekvences  $f_{sw}$  harmonikas izkliegtas plašākā frekvenču joslā, kas noved pie EMT pīķa līmeņu samazināšanos, ko ilustrē 1.1.att. Tas ļauj samazināt ne tikai konduktīvus, bet arī izstarotus EMT. Spektra izkliedi var iegūt, izmantojot dažādas pieejas: viena no efektīvākajām ir frekvenču modulācija (FM) [5,11,12]. Šajā darbā mēs pētīsim frekvenču modulētos ISP, jo FM pielietošana var dot labāku EMT vājinājumu nekā citas izkliegtā spektra metodes. Modulēt komutācijas frekvenci var periodiski, varbūtiski un haotiski. Dažos pētījumos (piem. [11]) ir atzīmēts, ka varbūtiska un haotiska FM var dot labākus EMT vājinājumus nekā periodiska FM (pie vienādām frekvenču deviācijām). Tomēr periodiskai FM ir dažas priekšrocības, piem., tā dot mazākas izejas sprieguma pulsācijas (galvenokārt, ZF pulsācijas), nekā varbūtiska un haotiska FM; to arī vienkāršāk realizēt. Šis darbs ir veltīts ISP, kuru  $f_{sw}$  ir periodiski modulēta, bet daži rezultāti ir ar vispārīgu nozīmi, un tos var arī izmantot citiem FM paveidiem.

---

<sup>3</sup> Angļu termins – spread spectrum

### 3. FM PIELIETOŠANAS EFEKTIVITĀTES UZLABOŠANA ISP

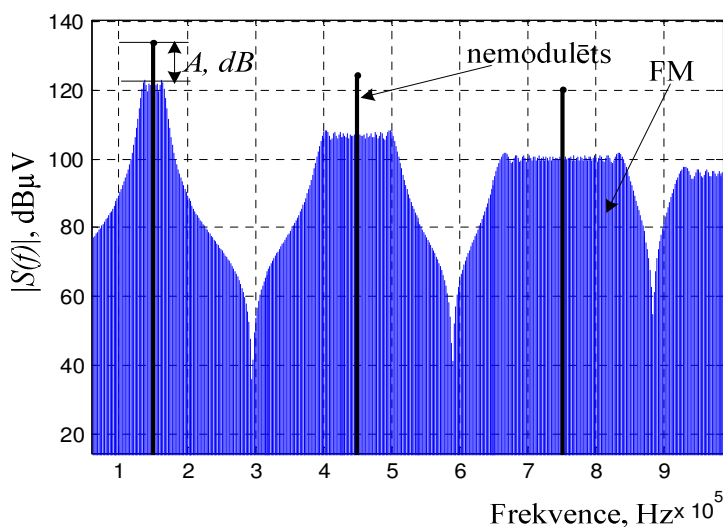
Promocijas darba trešajā nodaļā ir sniegta informācija par FM signālu galveniem parametriem, FM taisnstūru impulsu secību spektriem un EMT vājinājumu, kuru dod FM pielietošana ISP. Ir veikta oriģināla EMT teorētiska izpēte FM paaugstinoša ISP, ņemot vērā spēka ķēdes parazitiskus parametrus un LISN. Trešajā nodaļā ir arī pierādīts, ka optimizēts lauza profila modulācijas signāls var jūtami uzlabot FM pielietošanas efektivitāti, palielinot EMT vājinājumu ISP un ir izstrādāta metodika šī signāla parametru optimālas vērtības aprēķinam maksimāla EMT vājinājuma iegūšanai FM ISP.

FM taisnstūru impulsu secību, kas tuvināti reprezentē, piemēram, MOSFET vadības signālu un arī citus spēka ķēdes spriegumus ar kuriem ir saistīti EMT, apraksta izteiksme:

$$s(t) = \text{sign}[\cos(2\pi f_{sw}t + \theta(t))], \quad (3.1)$$

kur  $f_{sw}$  ir centrāla komutācijas frekvence;  $\theta(t)$  – laika atkarīgs fāzes leņķis.

FM taisnstūru impulsu secību spektru sinusoidāla modulējoša signāla gadījumā var aprēķināt izmantojot Besseļa funkcijas, bet citu periodisku modulējošo signālu  $m(t)$  gadījumā var pielietot izvirzījumu eksponentfunkciju Furjē rindā, saprotot, ka ja  $f_{sw}/f_m$  ( $f_m$  ir modulācijas frekvence) ir vesels skaitlis, tad FM signāla periods ir vienāds ar modulējošā signāla  $m(t)$  periodu  $T_m$ . FM taisnstūru impulsu secību spektrs sastāv no sājnoslam, kurus veido sānsvarstības  $nf_{sw} \pm kf_m$  ( $n, k$  – veseli skaitļi) [33], ko var redzēt arī 3.1 att. Nemodulētas  $f_{sw}$  harmoniku vājinājums, kuru dod FM pielietošana ISP, atšķiras katrai konkrētai harmonikai (kā to var redzēt 3.1 att.). Tā kā parasti nemodulēta  $f_{sw}$  fundamentālā harmonika konduktīvo EMT spektrā ir dominējoša, tad vājinājumu ir jēgas novērtēt tieši šai harmonikai: to definē kā attiecību (ko izteic dB) starp nemodulētas  $f_{sw}$  fundamentālas harmonikas amplitūdu  $|C_1|=2|d_1|$  un FM signāla pirmās sājnoslas



3.1 att. Frekvenču modulēto un nemodulēto taisnstūru impulsu secību spektrs (nosacījumi:  $f_{sw}=150\text{kHz}$ ;  $f_m=2\text{kHz}$ ; frekvences deviācija  $\Delta f_{sw}=20\text{kHz}$ ;  $m(t)$  – zāģveida formas).

sānsvārstību amplitūdu maksimālo vērtību [24]:

$$A = 20 \log_{10} \left( \frac{|C_1|}{\max(|S_{1\text{mod}}(f)|)} \right), \quad (3.2)$$

kur  $|S_{1\text{mod}}(f)|$  – FM signāla 1. harmonikas sānjoslas amplitūdas spektrs.

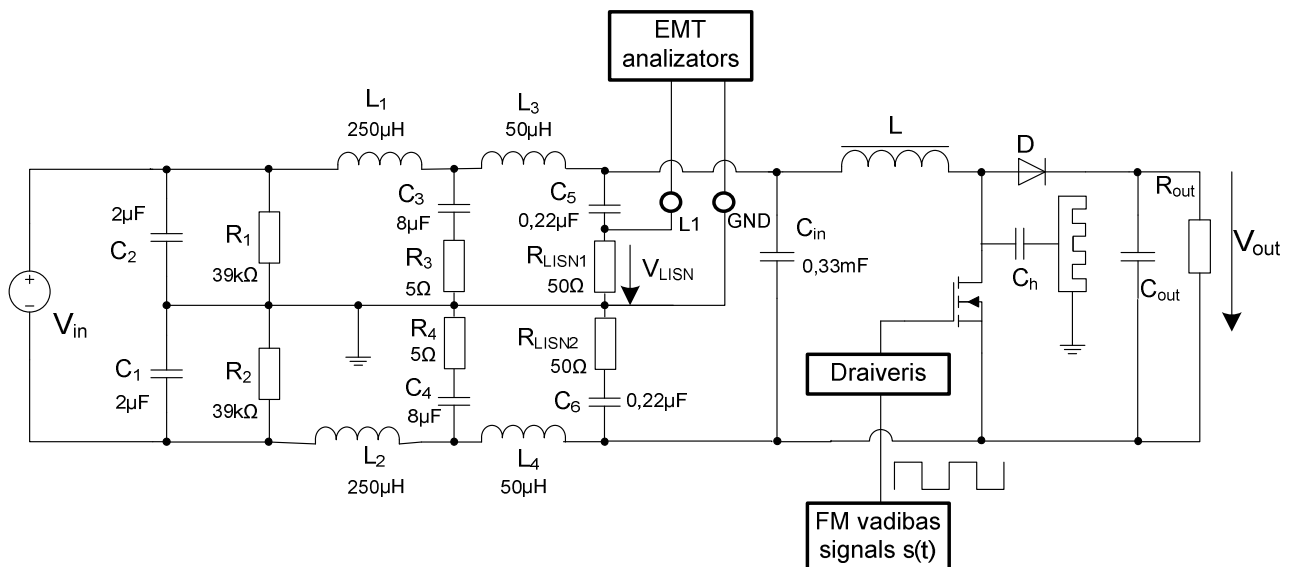
Nemodulētu komutācijas frekvences  $f_{sw}$  harmoniku vājinājums palielinās, palielinoties modulācijas indeksam  $\beta = \Delta f_{sw} / f_m$ , un nav atkarīgs no  $f_{sw}$  [6,11]. Bieži lietotiem modulācijas signāliem (sinuss, zāģveida vai trīsstūrveida formas) vājinājums ir gandrīz vienāds līdz  $\beta=10$ . Pēc tam labākus rezultātus dod zāģveida formas modulācijas signāls, bet sliktākus – sinuss [6]. Ja modulācijas indekss ir pietiekami liels, vājinājums, tam augot, palielinās lēni. FM signāla pirmās  $f_{sw}$  harmonikas sānjoslas spektrs ir simetrisks pret  $f_{sw}$ .

Pārsvarā publikācijās (piem., [6,11,15]) par FM pielietošanu EMT samazināšanai, teorētiskai analīzei tiek pakļauti tikai FM taisnstūru impulsu secību spektri, kas neļauj atsegt cēloņus kas var samazināt FM pielietošanas efektivitāti. Šajā promocijas darbā EMT ir izpētīti, ņemot vērā paaugstinoša FM ISP (skat. 3.2 att.) spēka ķēdes parazitiskus parametrus un LISN. Šim nolūkam ir izmantota pilno EMT ekvivalenta shēma [35] (skat. 3.3 att.), kuru apraksta kompleksais pārvades koeficients starp ekvivalento EMT avotu  $V_s$  un spriegumu LISN mērīšanas izejā  $V_{LISN}$ :

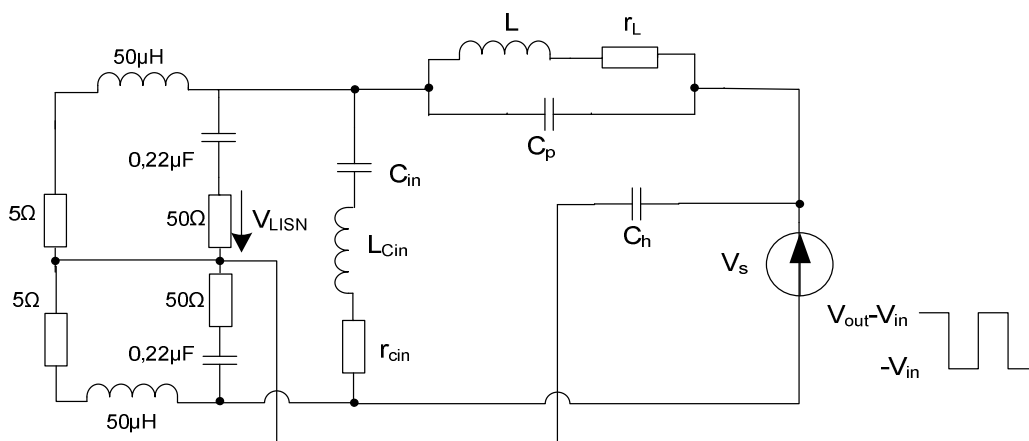
$$\underline{K}_{EMI}(f) = \frac{50}{50 + \underline{Z}_{C5}} \left( \frac{(25 + \underline{Z}_{C5}/2)(5 + \underline{Z}_{L3}) / (55 + \underline{Z}_{C5} + \underline{Z}_{L3})}{\underline{Z}_{Ch} + (25 + \underline{Z}_{C5}/2)(5 + \underline{Z}_{L3}) / (55 + \underline{Z}_{C5} + \underline{Z}_{L3})} - \frac{\underline{Z}_{Cin}}{2(\underline{Z}_{Cin} + \underline{Z}_L)} \right), \quad (3.3)$$

kur  $\underline{Z}_{C5}, \underline{Z}_{Ch}, \underline{Z}_{L3}$  ir kompleksās pilnās pretestības.

Analizējot  $V_{LISN}$  spektrus dažādam  $f_{sw}$  ir secināts, ka pirmās harmonikas vājinājums  $A_{EMI}$  ir atkarīgs ne tikai no modulācijas indeksa (kā tas ir FM taisnstūru impulsu secības pirmās

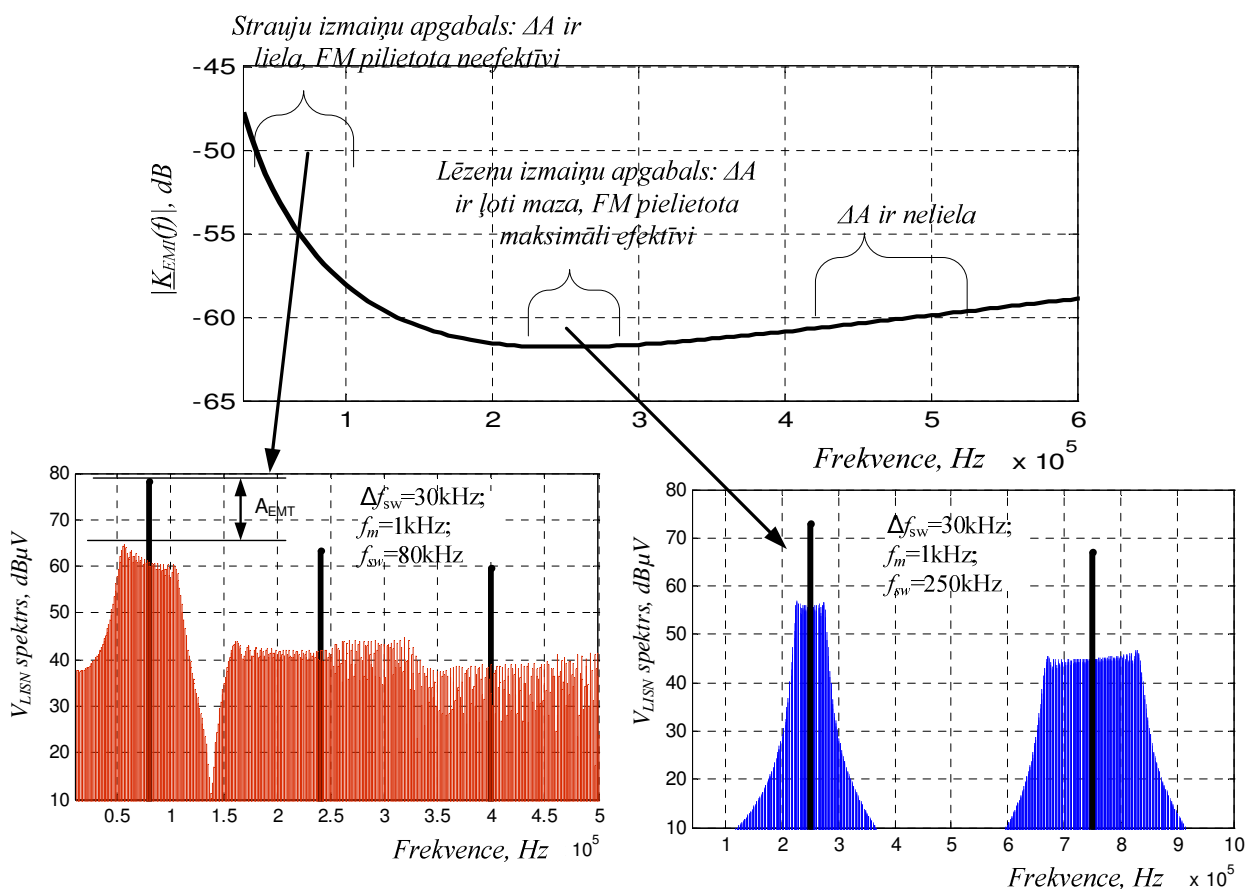


3.2. att. Paaugstinoša ISP shēma (kopā ar LISN).

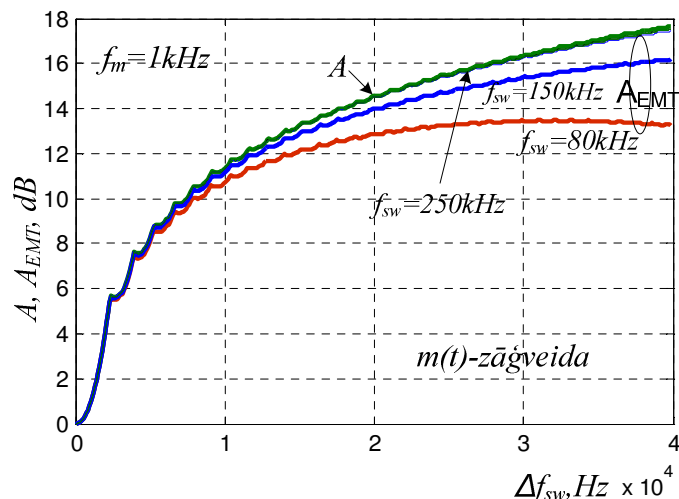


3.3. att. EMT pilnā ekvivalentā shēma paaugstinošam ISP.

harmonikas vājinājumam  $A$ ), bet arī no  $f_{sw}$ , kas nosaka sāņjoslas izvietojumu pārvades funkcijas frekvenču apgabalā, ko skaidro 3.4 un 3.5 att. Ja sāņjosla iekrīt apgabalā, kur  $|K_{EMT}(f)|$  mainās strauji (tas ir raksturīgs zemāko frekvenču apgabalam, kur dominē diferenciālie EMT), tad difference starp  $A$  un  $A_{EMT}$  ( $\Delta A$ ) būs liela un savukārt FM pielietošanas efektivitāte būs maza; ja sāņjosla iekrīt  $|K_{EMT}(f)|$  lēnu izmaiņas apgabalā, kas parasti ir augstākajās frekvencēs,



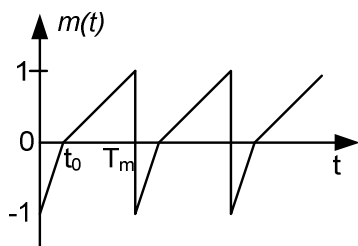
3.4 att. Pārvades koeficients  $|K_{EMT}(f)|$ . Atkāribā no fundamentālas harmonikas sāņjoslas vietas mainās FM pielietošanas efektivitāte.



3.5 att. EMT vājinājumi fundamentālajai  $f_{sw}$  harmonikai, kā FM taisnstūru impulsu sēcībai ( $A$ ), tā arī FM ISP  $V_{LISN}$  ( $A_{EMT}$ ). Rezultāti ir garfiski attēloti dažādiem  $f_{sw}, f_m, \Delta f_{sw}$ .

tad  $\Delta A$  būs neliela. Vislabākie rezultāti var tikt sasniegti, ja sānjosla iekrīt apgabalā, kur sinfāzie un diferenciālie EMT ir samērojami, kur tiek novērotas lēzenas  $|K_{EMT}(f)|$  izmaiņas (šajā konkrētā gadījumā pie  $f_{sw}=250\text{kHz}$ ). Atšķirība  $\Delta A$  starp  $A_{EMT}$  un  $A$  palielinās, palielinoties  $\Delta f_{sw}$ . Tomēr pie mazām  $\Delta f_{sw}$  atšķirība starp tiem ir visai maza. Sinusoidāla FM dod visslielāko, bet trīsstūra FM dod vismazāko  $\Delta A$  pie vienādiem modulācijas indeksiem. Pie lielākām  $f_m$  difference  $\Delta A$  nedaudz samazinās.

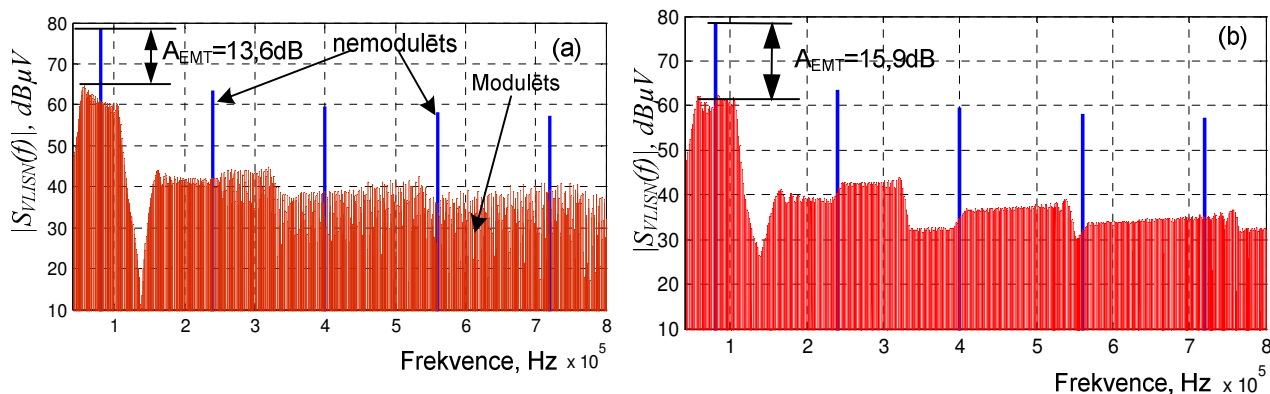
Kaut gan dažreiz  $f_{sw}$  izvēli nosaka citi ISP parametri, galvenokārt lietderības koeficients, tāpēc jāmeklē alternatīvs risinājums, kā pie dotiem  $m(t)$  parametriem var iegūt maksimālo  $A_{EMT}$  (jeb minimālo  $\Delta A$ ), nemainot  $f_{sw}$ . Publikācijā [23] bija piedāvāta metode, kā var samazināt AM un saistīto ar to fundamentālas  $f_{sw}$  harmonikas sānjoslas asimetriju un kropļojumu frekvenču modulēta elektroniskā balasta izejas strāvas spektrā. Šī metode balstās uz lauza profila modulējoša zāģveida signāla pielietošanas, kas ir parādīts 3.6. att. Tā kā šī metode nebija pielietota citās topoloģijās ieejas EMT samazināšanai, tad viens no mūsu uzdevumiem ir pārbaudīt un pierādīt, kā tā ir arī efektīva frekvenču modulētos ISP ieejas konduktīvo EMT samazināšanai un FM efektivitātes paaugstināšanai. Sānjoslas asimetrijas samazināšanu var



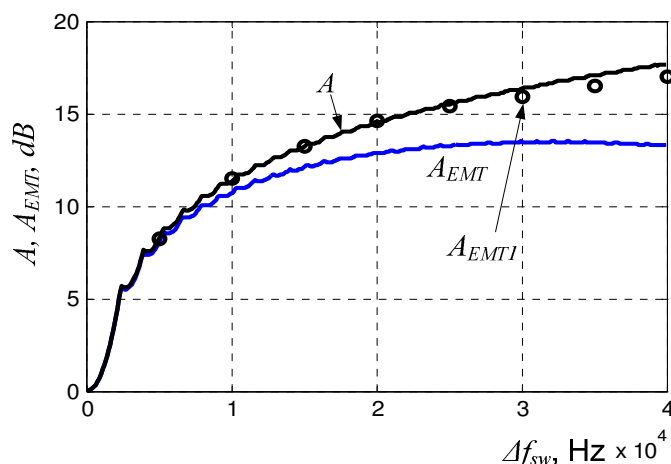
3.6. att. Lauza profila zāģveida modulācijas signāls.

īstenot, izmantojot dažādus slīpumus zāģveida modulācijas signālam [23] (skat. 3.6 att.). Šos slīpumus var kontrolēt, mainot  $t_0$  vērtības. Publikācijā [23] ir atzīmēts, ka izejas strāvas fundamentālas  $f_{sw}$  harmonikas sānjoslas asimetriju un AM var samazināt pie  $t_0=0,35T_m$ . Tomēr, kā ir pierādīts šajā promocijas darbā, sānjoslu

asimetrija un savukārt  $\Delta A$  ir atkarīgas kā no spēka ķēdes komponentu nomināliem, tā arī spēka ķēdes parazitiskiem parametriem un modulējoša signāla un komutācijas signāla parametriem. Tāpēc  $t_0=0,35T_m$  var dot minimālu  $\Delta A$  jeb maksimālu  $A_{EMT}$  tikai pie vienas šo parametru kombinācijas. Bet pie citām šo parametru vērtībām tas var pat pasliktināt  $A_{EMT}$  salīdzinājumā ar parasta zāģveida signāla pielietošanu ar  $t_0=0,5T_m$ . Tāpēc vēl viens mūsu uzdevums ir izstrādāt metodiku un atrast optimālu  $t_0$  minimāla  $\Delta A$  jeb maksimāla  $A_{EMT}$  iegūšanai pie dotām  $m(t)$  un ISP parametru vērtībām, ka arī izpētīt, vai šī signāla pielietošana nepasliktina EMT vājinājumu augstākajās frekvencēs. Jāatzīmē, ka zāģveida  $m(t)$  vietā var izmantot arī citus  $m(t)$ , pielietojot līdzīgu modifikāciju. Mainot  $t_0$  vērtību ar mazu soli un rēķinot  $V_{LISN}$  spektru, izmantojot spektra aprēķinu metodiku un izvēstās izteiksmes, kas sniegtas šī promocijas darbā, var atrast optimālas  $t_0$  vērtības. Tātad optimizēta lauza profila modulējoša signāla pielietošana ļauj ievērojami uzlabot  $A_{EMT}$  un savukārt samazināt  $\Delta A$ , kas palielina FM pielietošanas efektivitāti FM ISP, ko var arī redzēt 3.7 un 3.8 att. (ar  $A_{EMTI}$  ir apzīmēts EMT vājinājums pielietojot modificēto  $m(t)$ ). Šīs metodes pielietošana FM ISP nepasliktina EMT vājinājumu augstākajās frekvencēs.



3.7. att. Teorētiski aprēķināts  $V_{LISN}$  spektrs nemodulētam un FM ISP. Modulācijas parametri:  $\Delta f_{sw}=30\text{kHz}$ ,  $f_m=1\text{kHz}$ ,  $f_{sw}=80\text{kHz}$ , (a)  $t_0=0,5T_m$ ; (b)  $t_0=0,29T_m$ .



3.8. att. Teorētiski aprēķināta  $A_{EMT}$  (pie  $t_0=0,5T_m$ ),  $A$  un  $A_{EMTI}$  (izmantojot optimālas  $t_0$ ) kā funkcija no  $\Delta f_{sw}$  pie  $f_m=1\text{ kHz}$  un  $f_{sw}=80\text{kHz}$ .

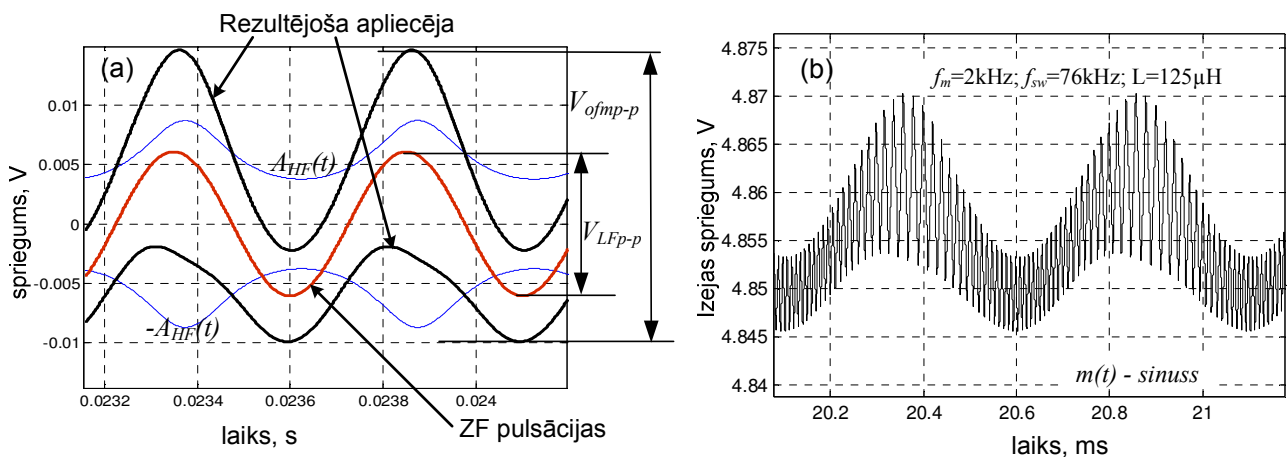
## 4. IZPĒTE PAR FM IETEKMI UZ IMPULSU SPĒKA PĀRVEIDOTĀJU PARAMETRIEM UN KVALITĀTES UZLABOŠANA

### 4.1. FM ietekme uz izejas sprieguma pulsācijām

Darba 4.1 sadaļā ir izpētītas izejas sprieguma pulsācijas kā nestabilizētajos, tā arī stabilizētajos FM ISP abos režīmos: PSR un NSR. Ir izvestas izteiksmes izejas sprieguma pulsāciju aprēķiniem abiem režīmiem. Iegūtie rezultāti ir eksperimentāli pārbaudīti. Ir izstrādātas efektīvas oriģinālas rekomendācijas izejas sprieguma pulsāciju samazināšanai, kā arī ir piedāvāts viens shēmtehniskais risinājums, kā samazināt ZF pulsācijas NSR.

Dažās publikācijās, piem. [6,11,16], ir eksperimentāli nomērīts, ka ISP izejas sprieguma pulsācijas palielinās, pielietojot FM. Detalizēta izpēte par FM ietekmi uz izejas sprieguma pulsācijām nestabilizētā FM ISP NSR bija veikta tikai [27] un neatkarīgi no tās arī mūsu publikācijās ([17,30] NSR un [29] PSR). Kaut gan [27] ir atsegti galvenie cēloņi izejas sprieguma pulsāciju palielināšanai nestabilizētā pazeminošā FM ISP NSR, šajā publikācijā nebija pētītas izejas sprieguma pulsācijas kā PSR, tā arī stabilizētos FM ISP, nebija izvestas izteiksmes vai izstrādātas metodikas pulsāciju aprēķiniem abos režīmos, un galvenais, nebija sniegtas rekomendācijas efektīvai izejas sprieguma pulsāciju samazināšanai.

Veiktas detalizētas teorētiskas analīzes rezultātā mēs secinājām, kā FM palielina izejas sprieguma pulsācijas, kuras vispārīgā gadījumā kā nestabilizētā, tā arī stabilizētā FM ISP sastāv



4.1.att. Teorētiski aprēķinātās izejas sprieguma pulsāciju apliecējas (a) un simulētās izejas sprieguma pulsācijas (b) FM pazeminošam ISP NSRā, ņemot vērā nenulles  $|t_d|=110\text{ns}$ . Parametri:  $C_{\text{out}}=330\mu\text{F}$ ;  $L=125\mu\text{H}$ ;  $V_{\text{in}}=10\text{V}$ ;  $m(t)$ -sinuss;  $f_m=2\text{kHz}$ ;  $\Delta f_{\text{sw}}=30\text{kHz}$ ;  $f_{\text{sw}}=76\text{kHz}$ ;  $r_{\text{cout}}=0,04\Omega$ ;  $r_L=0,12\Omega$ ;  $D=0,5$ ; izejas slodze  $R_{\text{out}}=10\Omega$ .

no AF komutācijas un ZF pulsācijām ar  $f_m$ , kas ir parādītas 4.1 att. Pilno pulsāciju atvērzienu FM ISP vispārīgā gadījumā apraksta izteiksme:

$$V_{ofmp-p} = \max\{\tilde{v}_{LF}(t) + A_{HF}(t)\} - \min\{\tilde{v}_{LF}(t) - A_{HF}(t)\}, \quad (4.1)$$

kur  $\tilde{v}_{LF}(t)$  ir ZF pulsācijas;  $A_{HF}(t)$  ir AF pulsāciju apliecēja, kas raksturo AF pulsācijas. Šis apliecējas izteiksmi var iegūt, ņemot nemodulēta ISP izejas sprieguma pulsāciju izteiksmi, ievietojot tajā momentāno komutācijas frekvenci  $f_{sw}(t)$  konstantas  $f_{sw}$  vietā. Tad, piemēram, NSR pazeminošam FM ISP ar tipisko izejas kondensatoru:

$$A_{HF}(t) = \frac{r_{cout}V_{out}(1-D)}{2Lf_{sw}(t)}, \quad (4.2)$$

kur  $r_{cout}$  ir izejas kondensatora ekvivalenta virknes pretestība (EVP);  $D$  – vidējais darbcikla koeficients;  $V_{out}$  – izejas sprieguma līdzkomponente.

Momentānā komutācijas frekvence ir:

$$f_{sw}(t) = f_{sw} + \Delta f_{sw}m(t). \quad (4.3)$$

AF pulsācijas palielinās dabīga cēloņa dēļ: minimālai komutācijas frekvencei  $f_{swmin}=f_{sw}-\Delta f_{sw}$  atbilst maksimālais AF pulsāciju atvēziens [27,30]. Pie augstākām  $f_{sw}$  un tā paša  $\Delta f_{sw}$  relatīva AF pulsāciju atvēziena palielināšana pret nemodulēta ISP pulsāciju atvēzienu ir mazāka. Paaugstinošam FM ISP ar izejas elektrolītisko kondensatoru, kā arī dažiem citiem FM ISP, kuriem izejas kondensatora strāva ir arī atkarīga no spēka droseles strāvas vai transformatora sekundāra tinuma līdzkomponentes  $I_{Lavg}$  (piem. atpakaļgaitas vai pazeminoši-paaugstinošais ISP), izejas sprieguma pulsāciju atvēziens palielinās daudzkārt mazāk, nekā FM pazeminošā ISP un dažos citos ISP, kur izejas sprieguma pulsācijas ir atkarīgas tikai no droseles strāvas mainīkomponentes. Tas nozīmē, ka FM pielietošana paaugstinošā FM ISP un ar to saistītās topoloģijās ir daudzkārt mazāk kaitīga nekā pazeminošā no AF pulsāciju atvēziena viedokļa.

Komutācijas aiztures laiku nulles diference  $|t_d|$  ir galvenais cēlonis tam, ka FM ISP NSRā izejas spriegumā parādās un palielinās ZF pulsācijas ( kaut gan līdzīgs secinājums bija izdarīts arī [27], mēs bijam pirmie kas izdarīja šo secinājumu [17]). Komutācijas aiztures ISP saistītas galvenokārt ar spēka tranzistoru slēdžiem, to draiveriem un arī impulsu platumu modulatoru (IPM) mikroshēmu loģiskiem elementiem (trigeriem, utt). Dažreiz komutācijas aiztures ir speciāli pielietotas vadības signāliem, piemēram, sinhronos pazeminošos ISP, kuros aizture ir vajadzīga lai abi tranzistori nebūtu vienlaicīgi vadoši, kas var radīt lielas caurejošas strāvas. Ja  $|t_d| \neq 0$ , tad FM izraisa parazītisko IPM NSRā, kuras dēļ momentānais darbcikla koeficients  $d$  mainās laikā ar  $f_m$ , izraisot lielas ZF pulsācijas izejas spriegumā. Šī promocijas darbā ir izvesta vispārīga izteiksme izejas sprieguma ZF pulsāciju aprēķinam stabilizētam FM ISP NSRā operatoru formā, ņemot vērā  $|t_d|$ :

$$\tilde{v}_{LF}(s) = \tilde{d}(s)H_{co}(s)/(1+T(s)) = |t_d| \Delta f_{sw} m(s)H_{co}(s)/(1+T(s)), \quad (4.4)$$

kur  $H_{co}(s)$  ir pārvades funkcija „vadība-izeja”;  $T(s)$  ir atvērtas cilpas pastiprinājuma koeficients (*open loop gain*). ZF pulsācijas laika apgabalā  $\tilde{v}_{LF}(t)$  stacionāra stāvoklī var atrast, pielietojot inverso Laplasa transformāciju izteiksmei (4.4), meklējot atrisinājumu stacionārā stāvoklī un saprotot, ka modulācijas signāls  $m(t)$  ir periodiska laika funkcija. Sinusoidālas FM gadījumā no (4.4) var vienkārši iegūt ZF pulsācijas laika apgabalā:

$$\tilde{v}_{LF}(t) = |t_d| \Delta f_{sw} \cos \left[ 2\pi f_m t + \arg \left( \frac{H_{co}(j2\pi f_m)}{1+T(j2\pi f_m)} \right) \right] \left| \frac{H_{co}(j2\pi f_m)}{1+T(j2\pi f_m)} \right|. \quad (4.5)$$

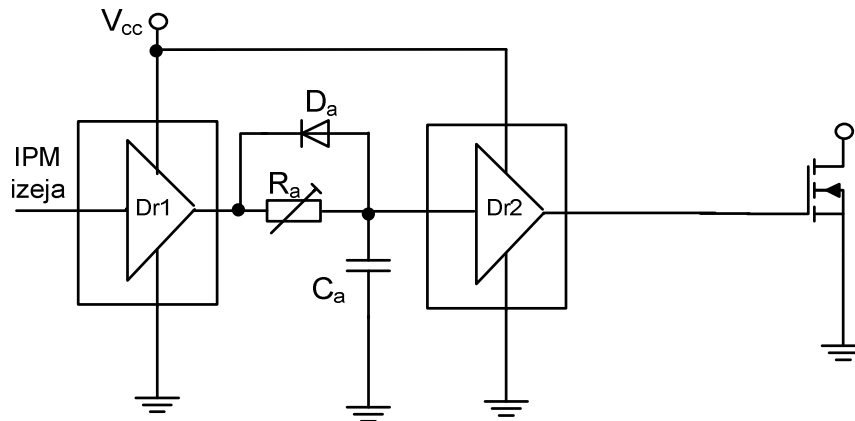
No izteiksmes seko, ka ZF pulsāciju atvēziens NSRā sinusoidālas FM gadījumā ir:

$$V_{LFP-p} = 2 |t_d| \Delta f_{sw} \left| \frac{H_{co}(j2\pi f_m)}{1+T(j2\pi f_m)} \right|. \quad (4.6)$$

No kurienes seko, ka ZF pulsāciju atvēziens  $V_{LFP-p}$  ir tieši proporcionāls  $|t_d|$  un  $\Delta f_{sw}$ , un ir atkarīgs no  $f_m$  un modulācijas signāla  $m(t)$  formas. Ja  $|t_d|=0$ , tad ZF pulsāciju izejā nav, pat nestabilizētā ISP. Tad izejas sprieguma pulsāciju atvēzienu  $V_{ofmp-p}$  nosaka tikai AF pulsācijas.

### **Rekomendācijas izejas sprieguma pulsāciju samazināšanai NSR.**

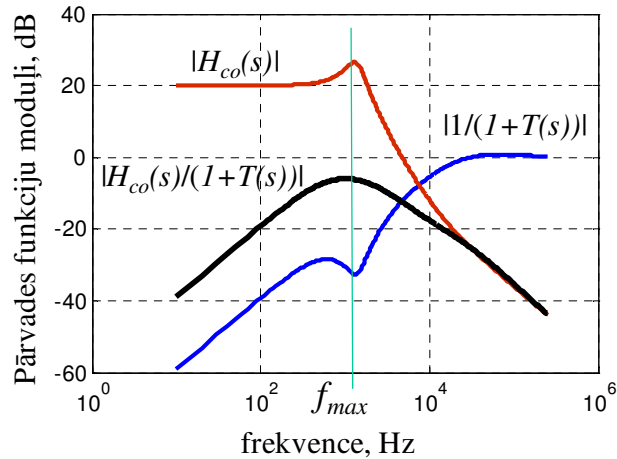
1) Spēka MOSFET vadības ķēde jāprojektē tā, lai  $|t_d|$  būtu maza, kas ļautu neitralizēt ZF pulsācijas. To var izdarīt, piemēram, pielietojot divus draiverus, starp kuriem ir ieslēgta aiztures RCD ķēde, kā tas ir parādīts 4.2 att. Jāatzīmē, ka šis paņēmiens neprasa īpaši palielināt izmaksas un laukumu iespiedplatē tāpēc, ka mūsdienas draiveru mikroshēmas bieži ietver sevī divus draiverus ar atsevišķām izejam.



4.2. att. Mazas  $|t_d|$  iegūšana, pielietojot divus draiverus.

2) Ja ir iespēja izvēlēties ISP topoloģiju, tad labāk ņemt paaugstinošo vai atvasinātas topoloģijas, kur izejas kondensatora strāva ir vairāk atkarīga no  $I_{L_{avg}}$ .

3) Stabilizētā FM ISP  $f_m$  ir ieteicams ņemt tālu no tās frekvences  $f_{max}$ , kur izteiksmei  $|H_{co}(s)/(1+T(s))|$  ir maksimums (kas pazeminošam ISP sakrīt ar izejas filtra rezonanses frekvenci, ko skaidro arī 4.3 att.).



4.3.att. Stabilizēta pazeminoša FM ISP pārvades raksturlīknes. Parametri:  $C_{out}=330\mu F$ ;  $L=125\mu H$ ;  $\Delta f_{sw}=30\text{kHz}$ ;  $r_c=0,04\Omega$ ;  $r_L=0,12\Omega$ ;  $R_{out}=10\Omega$ ;  $f_{sw}=80\text{kHz}$ ;  $f_{cut}=5\text{kHz}$ .

4) Par modulējošo signālu labāk izvēlēties trīsstūrveida signālu. Zāģveida modulācijas signālu ieteicams izmantot, ja  $f_m > f_{max}$ . Nav ieteicams izmantot zāģveida  $m(t)$ , ja tā pirmās harmonikas iekrīt diapazonā, kur  $|H_{co}(s)/(1+T(s))|$  pieaug.

FM pielietošana ISP PSRā noved pie izejas sprieguma pulsāciju atvērziņa  $V_{ofmp-p}$  palielināšanās. Līdzīgi kā NSR, pulsācijas vispārīgā gadījumā var sadalīt divās sastāvdaļās: ZF pulsācijās ar  $f_m$  un komutācijas AF pulsācijās. Savukārt frekvenču apgabalā izejas sprieguma spektrs sastāv no ZF  $f_m$  harmonikām un sāņjoslu sānsvārstībām. AF pulsāciju atvērziņa palielināšanu pazeminoša FM ISP PSRā līdzīgi kā NSRā nosaka  $f_{swmin}$ .

ZF pulsāciju cēlonis PSRā nav tāds pats kā NSRā; ZF pulsācijas PSRā rodas tāpēc, ka izejas spriegums, vidējots pēc  $T_{sw}$ , ir atkarīgs no  $f_{sw}$ , tas nozīmē, ka šīs ZF pulsācijas ir dabīgas, un nav saistītas ar parazitiskiem parametriem, kā tas ir NSRā, ko arī atspoguļo izvestā analītiska izteiksme sinusoidālas FM gadījumā:

$$V_{LFP-p} \approx \frac{\Delta f_{sw}}{f_{sw}^2} \left| \frac{H_{out}(j2\pi f_m)}{1+T(j2\pi f_m)} \right| \frac{D^2 V_{in} (V_{in} - V_{out})}{LV_{out}}, \quad (4.7)$$

kur  $H_{out}(j2\pi f)$  ir pārvades koeficients starp izejas spriegumu un droseles strāvu PSR. Var secināt, ka  $V_{LFP-p}$  ir aptuveni proporcionālas  $\Delta f_{sw}$  un aptuveni apgriezti proporcionālas  $f_{sw}$  kvadrātā. Tas nozīmē, ka pie augstākas  $f_{sw}$  un tās pašas  $\Delta f_{sw}$  var iegūt mazākas ZF pulsācijas.

Vispārīgā gadījumā citām ISP topoloģijām un modulācijas signāliem, ZF pulsācijas var atrast sākumā, aprēķinot nestabilizēta FM ISP ZF pulsācijas  $\tilde{v}_{LFunreg}(t)$ , pielietojot vidējotas aizvietošanas shēmas PSRā. Pēc tam var atrast ZF pulsācijas stabilizētā FM ISP, ņemot vērā  $T(s)$  PSRā.  $V_{LFP-p}$  ir arī atkarīgs no  $f_m$  un modulācijas signāla formas  $m(t)$ . Stabilizētā FM ISP ar mazākam  $f_m$  var sasniegt mazāku  $V_{LFP-p}$ .

### **Rekomendācijas izejas sprieguma pulsāciju samazināšanai PSR.**

1) Nodrošināt mazu  $|t_d|$  nav nepieciešams tāpēc, ka tā gandrīz neietekmē ZF pulsācijas PSR, kas seko arī no vidējotas pēc  $T_{sw}$  droseles strāvas izteiksmes pazeminošam FM ISP PSRā:

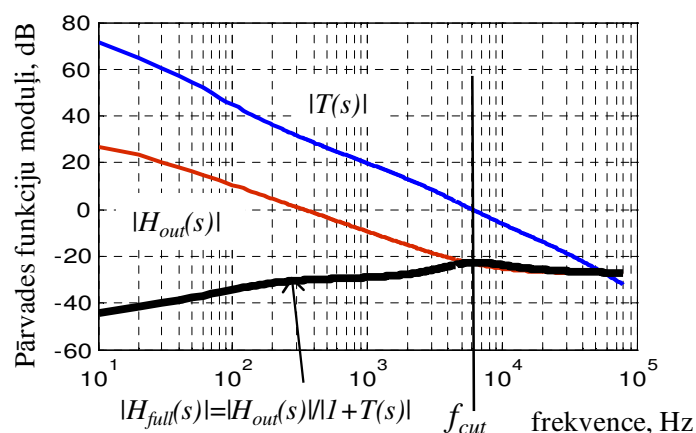
$$\langle i_L \rangle = \frac{V_{in}(V_{in} - V_{out})}{2LV_{out}} \cdot \left( \frac{D^2}{f_{sw}(t)} + 2Dt_d + t_d^2 f_{sw}(t) \right). \quad (4.8)$$

Šajā izteiksmē 1. loceklis iekavās ir tāds pats kā FM ISP ar  $t_d=0$ ; 2. loceklis ir niecīga līdzkomponente; savukārt 3. loceklis ir ZF maiņkomponente, kuru rada nenulles  $t_d$ . Ņemot vērā tipiskās  $|t_d|$  un FM parametrus, var secināt, ka šī maiņkomponente ir daudzkārt mazāka par 1. loekli-maiņkomponenti (4.8) izteiksmes iekavās.

2) Lai samazinātu ZF pulsācijas stabilizētā FM ISP,  $f_m$  jāņem vismaz dažas reizes mazāks par atvērta cilpas pastiprinājuma koeficienta nogriešanas frekvenci  $f_{cut}$ , ko skaidro 4.4 att.

3) Par  $m(t)$  labāk izvēlēties trīsstūrveida signālu. Zāģveida  $m(t)$  ieteicams izmantot, ja  $f_m > f_{cut}$ . Nav ieteicams izmantot zāģveida  $m(t)$ , ja tās pirmās harmonikas iekrīt diapazonā, kur  $H_{full}(s)$  pieaug (kad  $f_m < f_{cut}$ ).

4) Ja ir iespēja izvēlēties  $f_{sw}$ , tad to labāk ņemt augstāku, kas ļaus iegūt mazāku  $V_{LFP-p}$  tāpēc, ka, pirmkārt, var palielināt  $f_{cut}$ , un, otrkārt,  $V_{LFP-p}$  ir apgriezti proporcionālas  $f_{sw}$  kvadrātā.



4.4.att. Stabilizēta pazeminoša FM ISP pārvades raksturlīknes PSRā. Parametri:  $C_{out}=470\mu F$ ;  $L=42,5\mu H$ ;  $\Delta f_{sw}=30\text{kHz}$ ;  $r_{cut}=0,043\Omega$ ;  $r_L=0,07\Omega$ ;  $R_{out}=30\Omega$ ;  $f_{sw}=80\text{kHz}$ ;  $f_{cut}=6\text{kHz}$ .

## 4.2 FM ietekme uz lietderības koeficientu

Promocijas darba 4.2 sadaļā ir veikts oriģināls pētījums par FM ietekmi uz ISP aktīviem jaudas zudumiem un lietderības koeficientu  $\eta$ . Teorētiski iegūtie rezultāti ir pārbaudīti eksperimentāli. Ir izstrādāta  $\eta$  aprēķinu metodika FM ISP un izvestas izteiksmes jaudas zudumu un  $\eta$  aprēķiniem FM paaugstinoša ISP NSRā. Ir sniegtas rekomendācijas par FM negatīvās ietekmes samazināšanu FM ISP.

Izanalizējot literatūru [6,18,22] par FM ietekmi uz ISP aktīviem jaudas zudumiem un  $\eta$ , var secināt, ka pastāv būtiskas neskaidrības galvenokārt tāpēc, ka visi rezultāti balstās tikai uz eksperimentāliem datiem bez atbilstošas teorētiskas analīzes. Tā, piemēram, publikācijā [22] ir eksperimentāli noteikts, ka FM 600W paaugstinošas topoloģijas jaudas koeficienta korektora  $\eta$  samazinās par dažiem procentiem, ko autori skaidro ar aktīvo zudumu pieaugumu galvenokārt ieejas induktora magnētiskajā serdē. Bet publikācijā [6], kur tie paši autori pēta to pašu jaudas faktora korektoru, ir eksperimentāli nomērīts, ka FM neietekmē  $\eta$ . Publikācijā [18], kur ir eksperimentāli pētīts FM 600W paaugstinošais pārveidotājs, arī ir konstatēts, ka FM neietekmē  $\eta$ . Tikai mūsu publikācijā [32] bija dots teorētiskais pamatojums šai problēmai, tā tika arī eksperimentāli pamatota, izmantojot FM jaudas koeficienta korektoru.

Problēmu detalizētas izpētes rezultātā ir secināts, ka FM ISP aktīvo jaudas zudumus  $P_{lossmod}$  var aprēķināt, zinot nemodulēta ISP aktīvo jaudas zudumu  $P_{loss}$  izteiksmi:

$$P_{lossmod} = \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} p_{loss}(t) dt = \frac{1}{T_m} \sum_{k=1}^{T_m/T_{sw}} P_{loss}(T_{sw,k}) T_{sw,k} \quad (4.9)$$

kur  $p_{loss}(t)$  ir momentānie zudumi FM ISP;  $P_{loss}(T_{sw,k})$  – aktīvie jaudas zudumi  $k$ -tā komutācijas periodā  $T_{sw,k}$ ;  $T_{sw}$  ir nemodulēta ISP komutācijas periods;  $T_m$  ir modulējošā signāla periods. Jāatzīmē, ka šī formula ir derīga, ja  $T_m/T_{sw}$  ir vesels skaitlis. Detalizētas analīzes rezultātā mēs secinājām, ka ISP pilnus zudumus nosacīti var sadalīt trīs sastāvdaļās: zudumi, kas ir neatkarīgi no  $f_{sw}$  ( $P_{const}$ ), lineāri atkarīgie ( $P_{lin}(f_{sw})$ ), un nelineāri atkarīgie no  $f_{sw}$  ( $P_{nonlin}(f_{sw})$ ). Tad pilnie jaudas zudumi nemodulētā ISP ir:

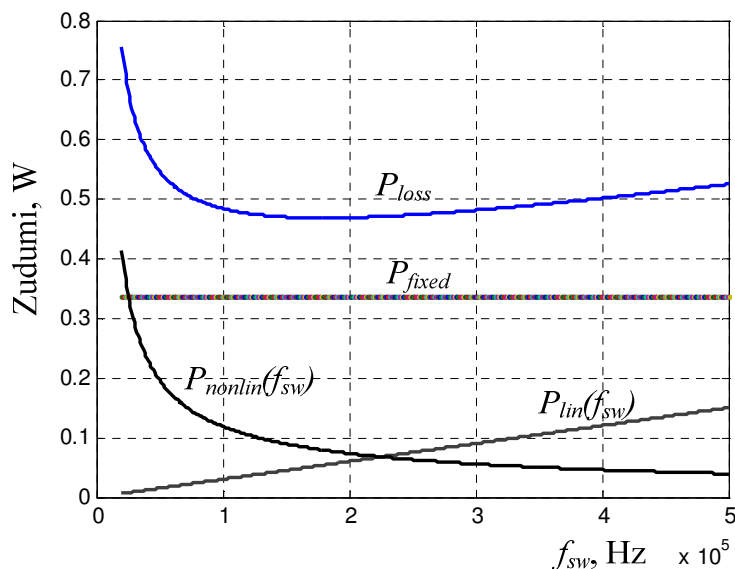
$$P_{loss} = P_{const} + P_{lin}(f_{sw}) + P_{nonlin}(f_{sw}) = A_1 + A_2 f_{sw} + P_{nonlin}(f_{sw}), \quad (4.10)$$

kur  $A_1$  un  $A_2$  ir koeficienti, atkarīgi no konkrētas ISP topoloģijas. Promocijas darbā ir parādīts, ka, piem., paaugstinošam ISP tie ir:

$$P_{const} = I_{Lavg}^2 [R_{LDC} + DR_{DS(on)} + (1-D)R_d + V_d(1-D)/I_{Lavg} + D(1-D)r_{Cout}] = A_1 \quad (4.11)$$

$$P_{lin}(f_{sw}) = \frac{1}{2} V_{out} I_{Lavg} (t_r + t_f) f_{sw} = A_2 f_{sw} \quad (4.12)$$

kur  $V_d$  ir diodes sliekšņa spriegums,  $R_{Ldc}$  ir droseles aktīvā pretestība līdžstrāvai;  $R_d$  - diodes

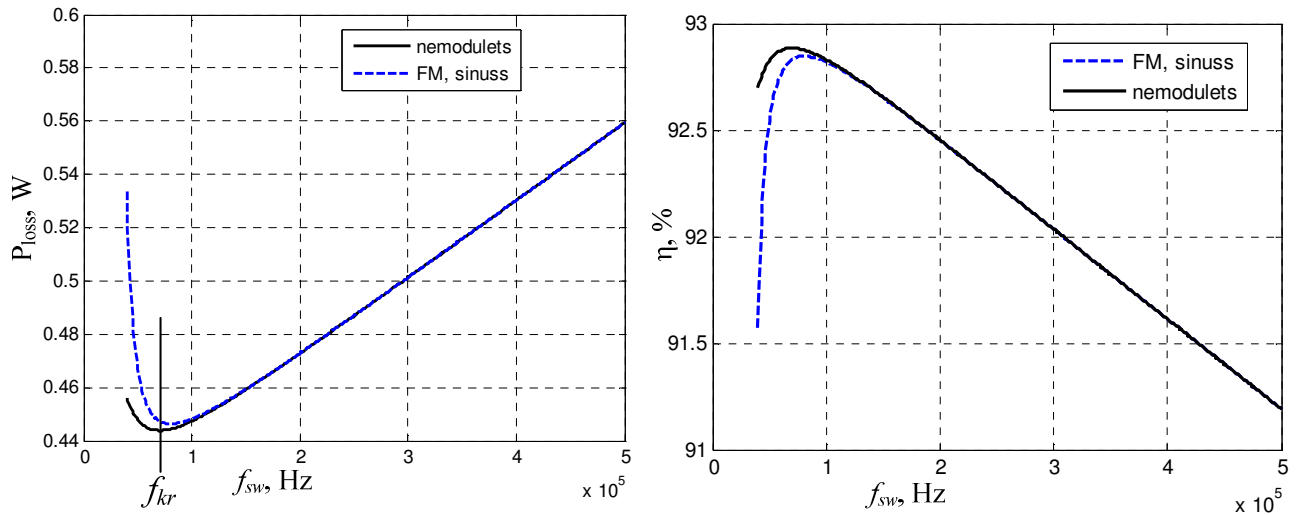


4.5 att. Teorētiskie aprēķināta  $P_{loss}$  un to sastāvdaļu atkarība no  $f_{sw}$  NSRā nemodulētam paaugstinošam ISP ar induktoru ar pulverveida dzelzs serdi ( $L=46\mu H$ ;  $C_{out}=330\mu F$ ;  $V_{in}=5V$ ;  $R_{out}=12,7\Omega$ ).

aktīva pretestība atvērtā stāvoklī;  $R_{DS(on)}$  ir MOSFET aktīva pretestība atvērtajā stāvoklī;  $t_r$  un  $t_f$  ir spēka MOSFET ieslēgšanas un izslēgšanas laiki respektīvi.  $P_{const}$ , galvenokārt raksturīgie vadāmības zudumiem saistītiem ar līdžstrāvu,  $P_{lin}(f_{sw})$  galvenokārt raksturīgie komutācijas zudumiem, bet  $P_{nonlin}(f_{sw})$  galvenokārt ir raksturīgie zudumiem magnētiskajā serdē un vadāmības zudumiem saistītiem ar maiņkomponenti. Promocijas darbā ir parādīts, ka paaugstinošam nemodulētam ISP šie zudumi ir:

$$P_{nonlin}(f_{sw}) = \frac{V_{in}^2 D^2 [R_{LDC} + DR_{DS(on)} + (1-D)R_d + (1-D)r_{Cout} + r_{Cin}]}{12L^2 f_{sw}^2} + C_m V_c \left( \frac{V_{in} D}{2NS} \right)^\beta \frac{1}{f_{sw}^{\beta-\alpha}} = \frac{A_3}{f_{sw}^2} + \frac{A_4}{f_{sw}^{\beta-\alpha}} \quad (4.13)$$

kur  $r_{cin}$  – ieejas kondensatora EVP;  $N$  – spoles vijumu skaits;  $S$  – magnētiskās serdes šķērsgriezuma laukums;  $\alpha$ ,  $\beta$  ir Šteinmeca izteiksmes empīriskie koeficienti, kurus parasti kopā ar īpatnējo serdes zudumu grafisku atkarību no  $B_m$  un frekvences dod magnētisko materiālu ražotāji, piem., [34];  $V_c$  – magnētiskas serdes tilpums. Nelineāri atkarīgie zudumi ir vairāk izteikti zemākiem  $f_{sw}$ , bet lineāri atkarīgie - augstākiem, kā to var izsecināt no 4.5 att.



4.6 att. Teorētiskie aprēķināta  $P_{lossmod}$  un  $\eta$  atkarība no  $f_{sw}$  NSRā nemodulētam un FM paaugstinošam ISP. FM parametri:  $f_{sw}=70\dots500\text{kHz}$ ;  $\Delta f_{sw}=60\text{kHz}$ ;  $f_m=1\text{kHz}$ ;  $m(t)$  – sinuss.

Izteiksmi (4.9) var pierakstīt:

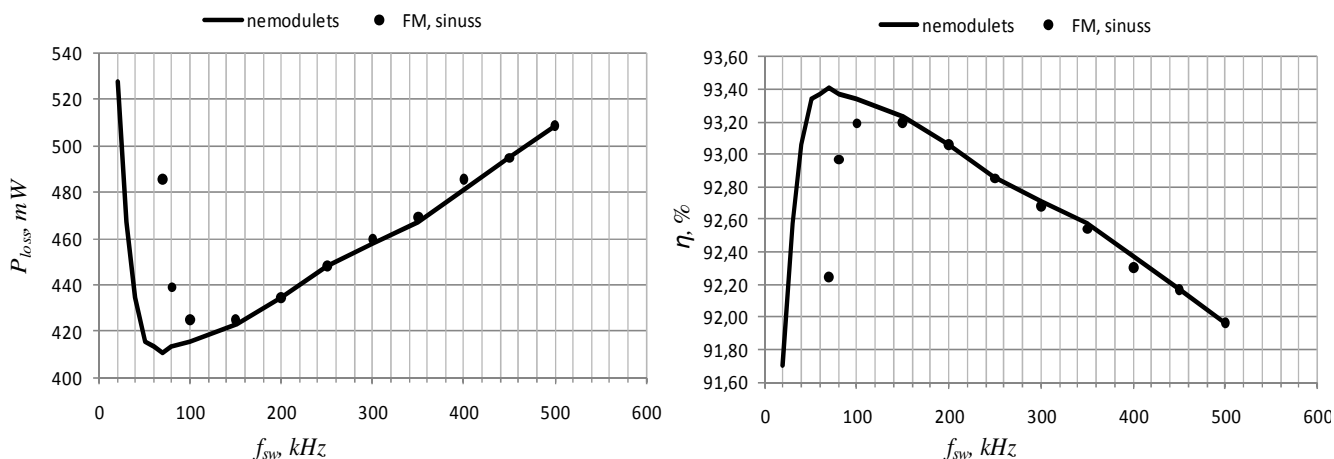
$$P_{loss\ mod} = A_1 + A_2 f_{sw} + \frac{1}{T_m} \sum_{k=1}^{T_m/T_{sw}} P_{nonlin}(T_{sw,k}) T_{sw,k} \quad (4.14)$$

No šejienes seko, ka pirmais un otrais locekli izteiksmes labajā pusē ir tādi paši kā izteiksmē (4.10) nemodulētam ISP. Tas nozīmē, ka FM spēj ietekmēt tikai to aktīvo zudumu sastāvdaļu, kura ir nelineāri atkarīga no komutācijas frekvences  $f_{sw}$ . Pieņemot, ka  $T_m$  ir lielāks par  $T_{sw}$  vismaz par kārtu un, ka  $f_{sw}$  ir periodiski modulēta ar  $m(t)$ , kas ir nepāru laika funkcija (piemēram, sinuss, vai trīsstūris), (4.14) var pārrakstīt kā:

$$P_{loss\ mod} = P_{const} + A_2 f_{sw} + \frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} P_{nonlin}(f_{sw}(t)) dt \quad , \quad (4.15)$$

no kurienes trīsstūra vai zāģveida modulācijas signāla gadījumā nelineāro zudumu atkarību no  $f_{sw}$  FM ISP var izteikt kā:

$$P_{nonlin\ mod}(f_{sw}) = \frac{A_3}{f_{sw}^2 - \Delta f_{sw}^2} + A_4 \frac{(f_{sw} + \Delta f_{sw})^{\alpha-\beta+1} - (f_{sw} - \Delta f_{sw})^{\alpha-\beta+1}}{2\Delta f_{sw}(\alpha - \beta + 1)} \quad . \quad (4.16)$$



4.7 att. Eksperimentāla  $\eta$  un zudumu atkarība no  $f_{sw}$  NSRā nemodulētam un FM paaugstinošam ISP. Modulācijas, spēka ķēdes parametri un induktors ir tādi paši, ka 4.6 att.

Promocijas darbā ir secināts, ka nelinearitāte ir gandrīz neredzama virs frekvences  $f_{kr}$ , pie kuras sastopams  $P_{loss}$  minimums. Ja minimālā komutācijas frekvence, kas FM pārveidotājam ir  $f_{swmin} = f_{sw} - \Delta f_{sw}$ , ir lielāka par  $f_{kr}$ , tad modulējot  $f_{sw}$  pat ar ļoti augstām deviācijām gandrīz neietekmēs zudumus un  $\eta$ . Ja  $f_{swmin} < f_{kr}$ , kur ir izteikta nelinearitāte, tad palielinoties  $\Delta f_{sw}$ , zudumi pieaugs. Par to arī liecina gan teorētiski, gan arī eksperimentāli iegūtie rezultāti, kas parādīti 4.6 un 4.7 att.

### Rekomendācijas lietderības koeficienta uzlabošanai FM ISP

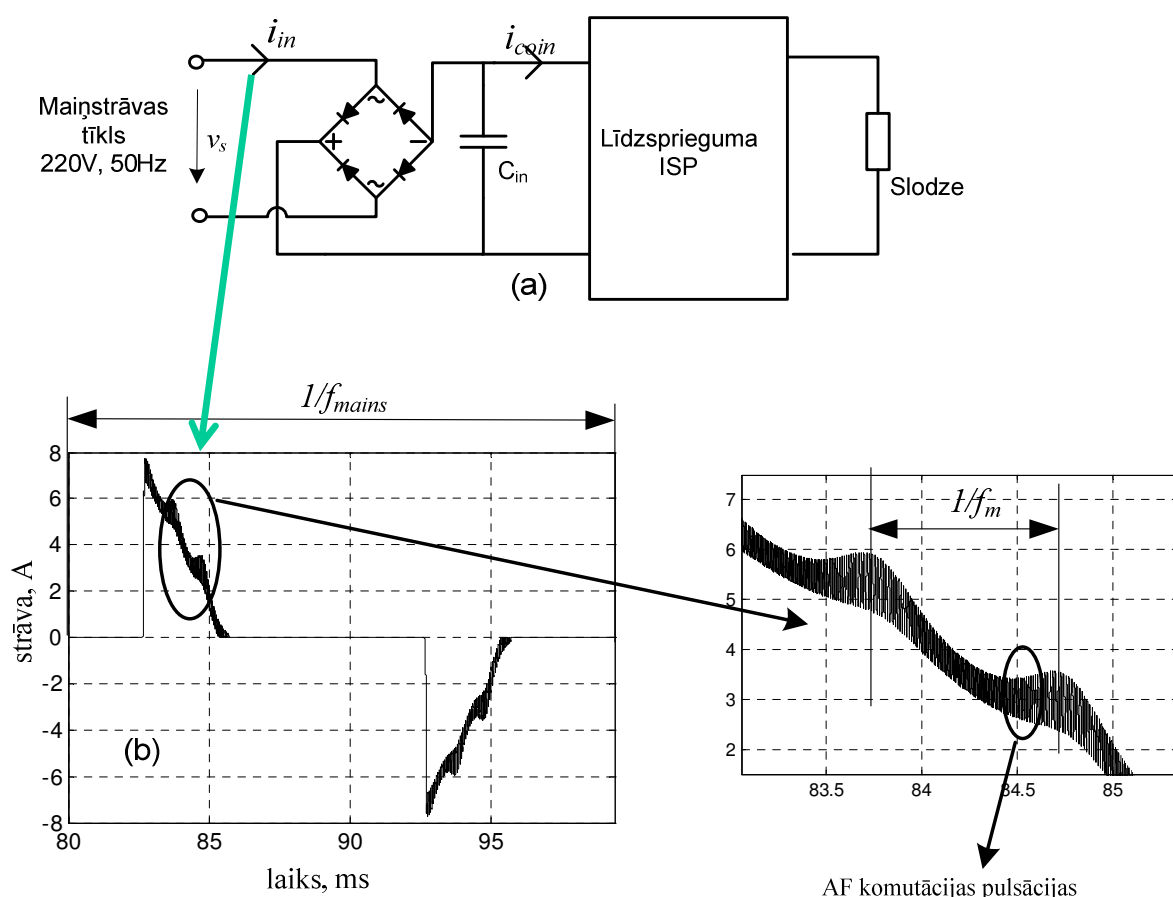
- Projektējot FM ISP,  $f_{swmin} = f_{sw} - \Delta f_{sw}$  jābūt lielākai par  $f_{kr}$ , kas nodrošina darbību izteikti lineārā apgabalā, kur zudumu pieaugums būs niecīgs. Ja nav iespējams to nodrošināt, tad jāizvēlas mazas  $\Delta f_{sw}$ , protams ņemot vērā kompromisu starp  $A_{EMT}$  un  $\eta$ .
- Par modulācijas signālu jāizvēlas tāds, kam ir mazāka vidēja taisngrieztā vērtība, piemēram, trīsstūri.
- Tā kā FM var rādīt lielas droseles strāvas ZF pulsācijas, tad tās jāsamazina.

### 4.3 FM ietekme uz ieejas enerģijas kvalitāti

Promocijas darba 4.3 sadaļā detalizēti izpētīta FM negatīva ietekme uz ieejas strāvas pilniem harmoniskiem kropļojumiem (THD), jaudas koeficientu (JK) un ieejas strāvas spektru ZF apgabalā kā NSRā, tā arī PSRā. Ir atrasti problēmu cēloņi un piedāvātas rekomendācijas šo problēmu efektīvai samazināšanai, kas arī ir pārbaudīts eksperimentāli, izmantojot FM jaudas koeficienta korektoru (JKK).

No publikāciju analīzes [6,22,24,31] var secināt, ka līdz šim brīdim literatūrā nav zināmi galvenie cēloņi ieejas enerģijas kvalitātes pasliktināšanai FM ISP, kā arī nav dotas rekomendācijas, kā efektīvi samazināt negatīvo FM ietekmi uz ieejas enerģijas kvalitāti, ko raksturo galvenokārt THD un JK.

Detalizētas izpētes rezultāta šajā promocijas darbā ir secināts, ka FM pielietošana ISP var



4.8.att. Tipiska maiņstrāvas tīklam pieslēgta ISP blokskāma (a) un simulētas paaugstinoša nestabilizēta FM ISP ieejas strāvas laika diagrammas PSRā (b). Paaugstinoša FM ISP shēma bija simulēta ar pieslēgto pie ieejas sinusoidālo maiņsprieguma avotu ar amplitūdu 300V, frekvenci 50Hz; taisngriezi un filtrējošo kondensatoru  $C_{in}=100\mu\text{F}$ . Pārējie parametri:  $C_{out}=330\mu\text{F}$ ;  $L=250\mu\text{H}$ ;  $m(t)$ -sinuss;  $\Delta f_{sw}=30\text{kHz}$ ;  $f_{sw}=100\text{kHz}$ ;  $R_{out}=1\text{k}\Omega$ ;  $f_m=1\text{kHz}$ .

palielināt ieejas strāvas kropļojumus un samazināt JK, kas ir saistīts ar to, ka FM rada ieejas strāvas ZF pulsācijas ar frekvenci  $f_m$ . Maiņstrāvas tīklam pieslēgtajam FM ISP vispārīgā gadījumā ieejas strāva  $i_{in}$  sastāv no trīs komponentēm: ZF strāvas impulsiem ar tīkla frekvenci  $f_{mains}$ , AF komutācijas pulsācijām un ZF pulsācijām ar  $f_m$ , ko rada FM (skat.4.8 att.). Šīs ZF komponentes var pasliktināt JK, un palielināt kropļojumus. ZF pulsācijas ieejas strāvā  $i_{in}$  ir saistītas ar to, ka tās jau ir līdzsprieguma ISP (kas ir maiņstrāvas tīklam pieslēgta FM ISP galvenā sastāvdaļa) ieejas strāvā  $i_{coin}$ . Tāpēc, lai izpētītu FM ietekmi uz ieejas enerģijas kvalitāti, sākumā jāizrēķina  $i_{coin}$  spektru ZF apgabalā, pēc tam, pielietojot THD un JK standarta aprēķinu izteiksmes, kā arī zinot ieejas kondensatora, tilta un maiņsprieguma avota pilnās pretestības un saprotot, ka  $i_{in}$  plūst tikai īsu laika intervālu, var aprēķināt THD un JK.

Izpētes rezultātā ir secināts, ka ieejas strāvas spektrs vispārīgā gadījumā līdzsprieguma FM ISP sastāv no  $f_m$  harmonikām, kas nosaka ieejas strāvas ZF pulsācijas, un sāņjoslu sāņsvārstībām, kas nosaka AF komutācijas pulsācijas; maiņstrāvas tīklam pieslēgtajam ISP frekvences modulācija ieejas strāvā ZF apgabalā rada interharmonikas ar frekvencēm  $nf_m \pm mf_{mains}$  (kur  $m \geq 1$  un  $n \geq 1$ ). Galvenie cēloņi, kas izraisa ZF komponentes FM līdzsprieguma ISP ieejas strāvā, ir tādi paši, kā izejas sprieguma ZF pulsāciju gadījumā: NSRā – nenulles difference starp komutācijas aizturēm  $|t_d|$ ; PSRā – tas, ka ieejas strāva vidējota pēc  $T_{sw}$  ir atkarīga no  $f_{sw}$ , kas ir modulēta. Promocijas darbā ir izvestas analītiskas izteiksmes ieejas strāvas  $i_{coin}$  spektra ZF komponentu aprēķiniem, kas ļauj izrēķināt THD un JK. Šo ZF komponentu amplitūdas, ko rada FM: NSRā – ir tieši proporcionālas  $\Delta f_{sw}$  un  $|t_d|$ ; PSRā – ir aptuveni proporcionālas  $\Delta f_{sw}$  un aptuveni apgriezti proporcionālas  $f_{sw}$  kvadrātam. Tas nozīmē, ka maiņstrāvas tīkla pieslēgtajam FM ISP NSRā, pieaugot  $\Delta f_{sw}$  un  $|t_d|$ , THD palielinās un JK samazinās; PSRā – samazinoties attiecībai  $\Delta f_{sw}/f_{sw}$ , THD samazināsies, bet JK palielināsies.

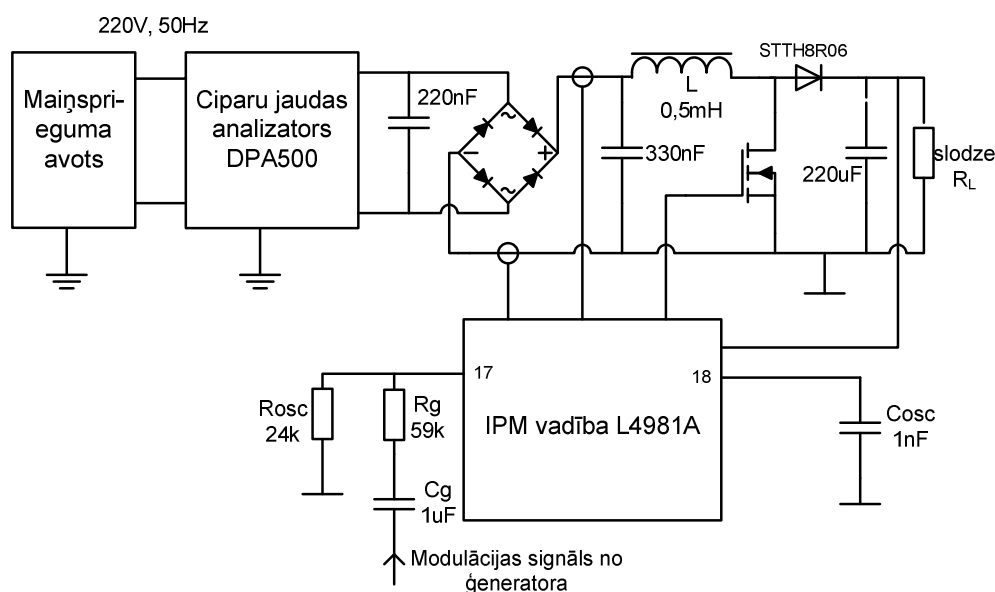
Modulācijas frekvence arī ietekmē THD un ZF komponentes, ko rada FM. Ja  $f_m$  ir nedaudz lielāka par  $F_{max}$  -frekvenci līdz kurai JK mērītājs-jaudas analizators mēra harmonikas, THD un JK, tad no normatīva viedokļa ieejas enerģijas kvalitāte nepasliktināsies, bet tad šīs ZF komponentes var tikt pieskaitītas pie EMT ZF apgabalā (tāpēc ka daži standarti, piem. CISPR16, prasa mērīt EMT no 9kHz). NSRā: ja  $f_m$  ir tālu no stabilizētā FM ISP pārvades funkcijas „droseles strāva-izejas spriegums” maksimuma, tad vājinājums šīm ZF komponentēm ir liels, kuru zemākās frekvences nodrošina atgriezeniska saite, bet augstākajās - izejas kondensatora un spēka droseles pilnās pretestības. PSRā šī situācija ir sliktāka: šeit ZF komponentes var tikt samazinātas tikai tad, kad  $f_m$  ir vismaz dažas reizes mazāka par  $f_{cut}$ , jeb samazinoties attiecībai  $\Delta f_{sw}/f_{sw}$ .

Tradicionālos maiņstrāvas tīklam pieslēgtajos ISP, FM radīs ievērojami mazākas problēmas, nekā JKK. Tāpēc ka tradicionālos maiņstrāvas tīkla pieslēgtajos ISP, FM rādītus ieejas strāvas kropļojumus palīdzēs samazināt lielas kapacitātes filtrējošais kondensators, kas ir ieslēgts pēc taisngrieža, un tas, ka ieejas strāva plūst tikai īsu laiku intervālu.

### Rekomendācijas ieejas enerģijas kvalitātes uzlabošanai FM ISP

- no normatīva viedokļa FM negatīvo ietekmi uz ieejas enerģijas kvalitāti var pilnīgi novērst, ja  $f_m$  ir nedaudz lielāka par  $F_{max}$ ;
- par FM ISP darbības režīmu labāk izvēlēties NSR. Šim režīmam ir jānodrošina mazs  $|t_d|$ , izmantojot paņēmienus, kas, piem., bija pielietotas mazu izejas sprieguma ZF pulsāciju iegūšanai;  $f_m$  ieteicams izvēlēties tālu no stabilizēta FM ISP pārvades funkcijas „droseles strāva-izejas spriegums” maksimuma, protams, ņemot vērā, ka  $f_m$  ietekmē arī  $A_{EMT}$ .
- ja tomēr FM ir pielietota ISP, kas darbojas PSRā, tad  $f_m$  ir jāizvēlas vismaz dažas reizes mazāks par  $f_{cut}$  (JKK gadījumā par  $f_{cut}$  mēs saprotam ieejas strāvas cilpas pastiprinājuma koeficienta nogriešanas frekvenci); alternatīvais variants – ir jāsamazina  $\Delta f_{sw}/f_{sw}$  attiecību, ko var izdarīt piem., palielinot  $f_{sw}$  pie konstantas  $\Delta f_{sw}$ , nezaudējot  $A_{EMT}$ .

Sniegtas rekomendācijas ieejas enerģijas kvalitātes uzlabošanai NSRā bija eksperimentāli



4.9 att. Eksperimentāla FM JKK vienkāršota shēma.

pārbaudītas, izmantojot FM JKK (ar nominālu izejas jaudu 360 W), kura vienkāršota shēma ir parādīta 4.9 att. Izmantojot jaudas analizatoru DPA 500, bija nomērīti JK un ieejas strāvas THD FM JKK. 4.1 tabulā ir parādīti nomērītie THD un JK dažādiem  $\Delta f_{sw}$ ,  $f_m$  un divām izejas aktīvām jaudām:  $P_{out}=360W$  (nomināla) un  $P_{out}=102W$ .

4.1 Tabula

Eksperimentāli nomērītie JK un ieejas strāvas THD nemodulētam un frekvenču modulētam JKK.

$\Delta f_{sw}$ , kHz	$f_m$ , kHz	$P_{out}=102W$		$P_{out}=360W$	
		JK	THD, %	JK	THD, %
nemodulēts		0,983	9,8	0,993	6,45
10	1	0,983	9,8	0,993	6,45
20	1	0,981	9,9	0,992	6,5
30	1	0,982	9,85	0,992	6,5
40	1	0,981	9,95	0,991	6,6
10	5	0,983	9,8	0,993	6,45
20	5	0,983	9,8	0,993	6,45
30	5	0,983	9,8	0,993	6,45
40	5	0,982	9,8	0,993	6,45

No iegūtiem rezultātiem var redzēt, ka pie  $f_m=5\text{kHz}$  un dažādām  $\Delta f_{sw}$ , jaudas kvalitāte nepasliktinās, pielietojot FM, pat pie augstām  $\Delta f_{sw}$ . Bet pie  $f_m=1\text{kHz}$ , THD nedaudz palielinās. Tas izskaidrojams ar to, ka pie  $f_m=5\text{kHz}$  ZF komponentu frekvences, ko rada FM, ir ārpus mērītāja diapazona (DPA500 maksimāla analīzes frekvence  $F_{max}=3\text{kHz}$ ), tāpēc FM negatīva ietekme uz JK, no normatīvā viedokļa ir pilnīgi novērsta. Pie  $f_m=1\text{kHz}$ , THD palielināšanās ir niecīga, tāpēc, ka izstrādātās rekomendācijas ir ņemtas vērā: pirmkārt,  $f_m$  vismaz dažas reizes ir mazāka par ieejas strāvas cilpas pastiprinājuma koeficienta nogriešanas frekvenci (šim JKK  $f_{cut}=10\text{kHz}$ ), un, otrkārt bija pielietots šī promocijas darbā piedāvātais shēmtehniks risinājums maza  $t_d$  iegūšanai NSR. Iegūtie eksperimentālie rezultāti ļauj secināt, ka sniegtās rekomendācijas var būt efektīvas FM negatīvas ietekmes samazināšanai JKK.

## 5. SECINĀJUMI

Iegūtie rezultāti ļauj secināt, ka FM kā viena no izklidētā spektra metodēm ir efektīvs risinājums EMT samazināšanai, kas gandrīz nepasliktina svarīgus FM ISP kvalitātes rādītājus: izejas sprieguma pulsācijas, lietderības koeficientu un ieejas enerģijas kvalitāti (galvenokārt jaudas koeficientu un THD), ja rekomendācijas, kas ir sniegtas promocijas darbā ir ņemtas vērā. Darba rezultāti arī liecina, ka FM pielietošanai ir jāieņem būtiska loma EMT samazināšanā ISP tāpēc, ka līdzās daudzām pozitīvām īpašībām, tai piemīt relatīvi mazāki trūkumi, nekā citām EMT samazināšanas metodēm, pirmkārt, tāpēc, ka FM ir pietiekami vienkārši īstenojama un praktiski nepalielina ISP izmērus un izmaksas (it īpaši, ja tā ir integrēta IPM mikroshēmā), otrkārt, tās negatīvās ietekmes uz ISP svarīgiem kvalitātes rādītājiem ir salīdzinoši mazas un dažreiz var pat pilnīgi tikt novērstas, (piem. darbā ir pierādīts, ka no normatīvā viedokļa FM negatīvo ietekmi uz ieejas enerģijas kvalitāti var pilnīgi novērst, ja  $f_m$  ir nedaudz lielāka par  $F_{max}$  – frekvenci, līdz kurai mērītājs-jaudas analizators mēra JK).

FM pielietošanas efektivitāte, ko galvenokārt raksturo 1. harmonikas vājinājums, ir atkarīga ne tikai no modulējošā signāla parametriem (kā tas tika uzskatīts lielākā daļā no esošām publikācijām), bet arī no komutācijas frekvences  $f_{sw}$  un spēka ķēdes parametriem. FM pielietošanas efektivitāti var jūtami uzlabot, atbilstoši izvēloties  $f_{sw}$  vai pielietojot optimizēto lauzta profila zāģveida modulējošo signālu, kuram ir jāatrod optimālo parametra  $t_0$  vērtību, pie kuras sasniegtais vājinājums ir maksimāls.

ZF pulsācijas, kas līdz šim tika uzskatītas par vienu no nopietnākajām FM pielietošanas blakusparādībām, principā nav būtiska problēma, kā tas ir pierādīts darbā. Piemēram, NSR ZF pulsācijas var ievērojami samazināt, samazinot komutācijas aizturu diferenci – kas ir galvenais cēlonis šai problēmai. To var panākt, piem., pielietojot piedāvāto shēmtehnisko risinājumu maza  $t_d$  iegūšanai. PSRā ZF pulsācijas var tikt samazinātas tikai tad, ja modulācijas frekvence ir vismaz dažas reizes ir mazāka par  $f_{cut}$ , vai arī samazinot attiecību  $\Delta f_{sw}/f_{sw}$ . No AF pulsāciju samazināšanas viedokļa par FM ISP topoloģiju labāk pielietot paaugstinošo (vai atvasinātas).

Ieejas strāvas ZF komponentes, kurus rada FM, ir atbildīgas par ieejas enerģijas kvalitātes pasliktināšanos. Cēloņi, kuri izraisa šo problēmu, ir tādas pašas, kā izejas

sprieguma ZF pulsāciju gadījumā. Ieejas enerģijas kvalitāte FM ISP var tikt ievērojami uzlabota, ņemot vērā līdzīgas rekomendācijas kā izejas sprieguma ZF pulsāciju samazināšanai.

Iegūtie rezultāti liecina arī par to, ka pie augstākām  $f_{sw}$ , FM negatīvā ietekme uz izejas sprieguma pulsācijām un ieejas enerģijas kvalitāti ir mazāka, kas saskan ar kopējo ISP attīstības tendenci – pēc iespējas paaugstināt ISP komutācijas frekvenci.

Darba rezultāti un izstrādātās aprēķinu metodikas var tikt pielietotas kvalitatīvu FM ISP projektēšanai un to tālākai attīstībai. Kopumā varam uzskatīt, ka FM ir efektīvs veids, kā samazināt EMT ISP vienlaikus ar mazu negatīvu ietekmi uz ISP svarīgiem kvalitātes rādītājiem, ja darba rezultāti un sniegtas rekomendācijas tiek ņemtas vērā.

## Darbā lietoto galveno saīsinājumu atšifrējumi

Saīsinājums	Atšifrējums (latviešu valodā)	Atšifrējums (angļu valodā)
ISP	Impulsveida spēka pārveidotājs	Switching Power Converter
EMT	Elektromagnētiskie Traucējumi	Electromagnetic Interference
FM	Frekvenču modulācija; Frekvenču modulēts	Frequency Modulation; Frequency Modulated
NSR	Nepārtrauktais strāvas režīms	Continuous Conduction Mode
PSR	Pārtrauktais strāvas režīms	Discontinuous Conduction Mode
MOSFET	Lauktranzistors metāls-oksīds-pūsvādītājs	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
LISN	Tīkla impedances stabilizācijas iekārta	Line Impedance Stabilization Network
AM	Amplitūdas modulācija	Amplitude Modulation
JKK	Jaudas koeficienta korektors	Power Factor Corrector
THD	Pilnie harmoniskie kropļojumi	Total Harmonic Distortion
ZF	Zemo frekvenču	Low Frequency
AF	Augsto frekvenču	High Frequency
RBW	Filtra joslas platums	Resolution Bandwidth
EVP	Kondensatora ekvivalenta virknes pretestība	Equivalent Series Resistance

## Darbā lietoto galveno apzīmējumu saraksts

Apzīmējums	Atšifrējums	Apzīmējums	Atšifrējums
$V_{in}$	Ieejas sprieguma līdzkomponente	$D$	Vidējais darbcikla koeficients
$V_{out}$	Izejas sprieguma līdzkomponente	$A$	Taisnstūru impulsu secības pirmās harmonikas vājinājums
$\eta$	Lietderības koeficients	$A_{EMT}$	LISN mērīšanas izejas sprieguma pirmas harmonikas vājinājums
$C_{out}$	Izejas kondensatora kapacitāte	$t_d$	Komutācijas aizturu diference
$C_{in}$	Ieejas kondensatora kapacitāte	$d$	Momentānais darbcikla koeficients
$L$	Spēka droseles induktivitāte	$H_{co}(s)$	Pārvades funkcija „vadība-izeja”
$R_{out}$	ISP slodzes pretestība	$\langle \rangle$	Vidējotas pēc komutācijas perioda laika atkarīgas sprieguma/strāvas vērtības
$f_{sw}$	Nemodulēta ISP komutācijas frekvence; FM ISP centrāla komutācijas frekvence	$f_{cut}$	Atvērtas cilpas pastiprinājuma koeficienta nogriešanas frekvence
$f_m$	Modulācijas frekvence	$\sim$	Vidējoto strāvu/spriegumu mainīkomponente
$m(t)$	Modulējošais signāls ar vienības amplitūdu	$T(s)$	Atvērtas cilpas pastiprinājuma koeficients
$\Delta f_{sw}$	Komutācijas frekvences deviācija	$A_{HF}(t)$	AF pulsāciju apliecēja
$T_m$	Modulējoša signāla periods	$V_{op-p}$	Nemodulēta ISP izejas sprieguma pulsācijas atvēziens
$r_{cins} r_{cout}$	Ieejas/Izejas kondensatora EVP	$V_{ofmp-p}$	FM ISP izejas sprieguma pulsācijas atvēziens

## IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Rashid M.H. Power Electronics Handbook. – New York: Academic Press, 2001. –895 p.
2. Tse. C.K. Complex Behavior of Switching Power Converters. – New York: CRC Press LCC, 2004. – 262 p.
3. Erickson R.W. Fundamentals of Power Electronics. – New York: Kluwer Academic Publishers, 1997. – 791 p.
4. Mammano B. and Carsten B. Understanding and optimizing electromagnetic compatibility in switchmode power supplies // Proceedings of Unitrode (TI) Power Supply Design Seminar Topics, 2002, SEM1500.
5. Tse K.K., Chung H.S., Hui S.Y., So H.C. An Evaluation of the Spectral Characteristics of Switching Converters with Chaotic Carrier-Frequency Modulation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. - Vol.50, No.1. - pp. 171-181.
6. Gonzalez D., Balcells J., Santolaria A., Bunetel J., Gago J., Magnon D., Brehaut S. Conducted EMI Reduction in Power Converters by Means of Periodic Switching Frequency Modulation // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. - Vol.22, No.6. - pp. 2271-2281.
7. Wang S., Lee F. C., Odendaal W. G. Improving the performance of boost PFC EMI filters // Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Feb. 2003. - pp. 368–374.
8. H. Li, Z. Li, B. Zhang, K. Tang, W. Halang. Suppressing electromagnetic interference in direct current converters // IEEE Circuits and Systems Magazine, no.4. – 2009.– pp.10-28.
9. K. Mainali, R. Oruganti. Conducted EMI Mitigation Techniques for Switch-Mode Power Converters: A Survey // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. - Vol. 25, No.9. - pp. 2344 - 2356.
10. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New York: J. Wiley&Sons, 2009. – 845 p.
11. Tse K., Chung H., Hui S., So H. Comparative Study of Carrier-Frequency Modulation Techniques for Conducted EMI Suppression in PWM Converters // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. - Vol. 49, No.3. - pp. 618-627.
12. Kuisma M. Variable Frequency Switching in Power Supply EMI-control: An Overview. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. - Vol. 18, No 12. - Dec. 2003. – pp.18 - 22.
13. Hardin K.B., Fessler J.T., Bush D.R. Spread Spectrum Clock Generation for the Reduction of Radiated Emissions // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. - August 1994. – pp. 227-231.

14. Skinner H., Slattery K. Why spread spectrum clocking of computing devices is not cheating // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001. – pp. 537 - 540.
15. Lin F., Chen D.Y. Reduction of Power Supply EMI Emission by Switching Frequency Modulation // IEEE Trans. On Power Electronics. – 1994. – Vol.9, No.1. – pp.132-137.
16. Kuisma M., Jarvelainen T., Silventoinen P. Analyzing Voltage Ripple in Variable Frequency DC/DC Boost Converter // IEEE 2004 Power Electronics Specialists conference. – 2004. - pp. 1085-1089.
17. Stepins D. Examination of influence of periodic switching frequency modulation in dc/dc converters on power quality on a load // Proceedings of the 11th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, Estonia, Oct. 6-8, 2008. – pp. 285-288.
18. Balcells J., Gonzales D., Gago J., Satolaria A., Bunetel J.C.L., Magnon D., Brehaut S. Frequency modulation techniques for EMI reduction in SMPS // Proceedings of the 9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'05. – 2005. – P. 1 – 8.
19. Gosavi A. Application of Spread Spectrum technique for EMI reduction in boost converter - A case study // Proceedings of 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC 2008). - 2008. – P. 145-148.
20. Jankovskis J., Stepins D., Pikulins D. Improving effectiveness of the use of frequency modulation in power converters // Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, Estonia, Oct. 4-6, 2010. – pp. 327-330.
21. Jankovskis J., Stepins D., Pikulins D. Lowering of EMI Noise in Boost Type PFC by the use of Spread Spectrum // Electronics and Electrical Engineering. - 6 (94). – 2009. – pp. 15.-18.
22. J.-C. Bunetel, D. Gonzalez, J. Balcell. Impact of periodic switching frequency modulation control to reduce conducted EMI in power factor converters // *32<sup>nd</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON2006)*, Paris, France, Nov. 7-10, 2006. – pp. 2541-2545.
23. Johnson S. and Zane R. Custom spectral shaping for EMI reduction in high-frequency inverters and ballasts // IEEE Transactions on Power Electronics. - vol. 20, No.6. - November 2005. - pp. 1499 – 1505.
24. Barragan, L., Navarro, D., Acero, J., Urriza, I. and Burdío, J-M. FPGA Implementation of a Switching Frequency Modulation Circuit for EMI Reduction in Resonant Inverters for Induction Heating Appliances // IEEE Transactions on Industrial Electronics. - vol. 55, No.1. - January 2008. - pp. 11 – 20.
25. Mei-Ling Yeh, Wan-Rone Liou, Hsiang-Po Hsieh, Yu-Jei Lin. An Electromagnetic Interference (EMI) Reduced High-Efficiency Switching Power Amplifier // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2010. - Vol.25, No.3. - pp. 710-718.

26. Mainali K., Oruganti R. Simple analytical models to predict conducted EMI noise in a power electronic converter // Proceedings of IEEE Industrial Electronics Society Conference, 2007. - pp. 1930–1936.
27. Santolaria A. Effects of Switching Frequency Modulation on the Power Converter's Output Voltage // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. - Vol.56, No.7. - pp. 2729-2737.
28. Kultgen M.A. Spread spectrum modulation of a clock signal for reduction of electromagnetic interference // U.S. Patent 7417509, August, 26 2008.
29. Stepins D. Analysis of Output Voltage of Switching Frequency Modulated DC-DC Converter Operating in Discontinuous Conduction Mode // *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE10)*, Bari, Italy, July 4-7, 2010. – pp. 670-675.
30. Stepins D. Examination of Power Converters with Modulated Switching Frequency // *Electronics and Electrical Engineering*. - 9(105). – 2010. - pp. 33.-38.
31. Mihalic F., Milanovic M. EMI reduction in randomized boost rectifier // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE'99), Bled, Slovenia, 1999. - pp. 457-462.
32. Jankovskis J., Stepins D., Pikuļins D. Efficiency of PFC Operating in Spread Spectrum Mode for EMI Reduction // *Electronics and Electrical Engineering*. - 7.– 2010.–pp.13.-16.
33. Beķeris E. *Signālu Teorijas Elementi 1. daļa*. – Rīga: Zinātne, 1998. – 198. lpp.
34. A. van den Bossche, V.Valchev, *Inductors and Transformers for Power Electronics*, 1st ed., Taylor and Francis, 2005. – 447p.
35. Musznicki P., Schanen JL., Granjon P., Chrzan P.J. Better understanding EMI generation of power converters // Proceedings of IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC2005), Recife, Brazil, June 2005. – pp. 1052-1056.