

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Dmitrijs PIKUĻINS

**SPRIEGUMA IMPULSVEIDA PĀRVEIDOTĀJU NELINEĀRĀS
DINAMIKAS IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2012

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Radioelektronikas institūts

Dmitrijs PIKUĻINS
Doktora studiju programmas „Elektronika” doktorants

**SPRIEGUMA IMPULSVEIDA PĀRVEIDOTĀJU NELINEĀRĀS
DINAMIKAS IZPĒTE**

Promocijas darba kopsavilkums

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

RTU Izdevniecība
Rīga 2012

UDK

.....

Pikuļins D. Sprieguma impulsveida pārveidotāju nelineārās dinamikas izpēte. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-50 lpp.

Iespiests saskaņā ar ETF promocijas padomes „RTU P-08” 2012. gada 14. jūnija lēmumu, protokols Nr. 10.



EIROPAS SAVIENĪBA

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 2012.g. 20. septembrī plkst. 16.30 Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

profesors, Dr.sc.ing. Pēteris Misāns
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte, Rīgas Tehniskā Universitāte
(Promociju padome P-08)

asoc.profesors, Dr.sc.ing. Vitālijs Beresņevičs
Transporta un Mašīnbūves fakultāte, Mehānikas institūta pētnieks, RTU

profesors, Dr.sc.ing. Aleksandrs Grakovskis
Transporta un sakaru institūts, Telekomunikāciju katedras 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.

Dmitrijs Pikuļins(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, nobeigumu, literatūras sarakstu, 7 pielikumus, 117 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 263 lappuses. Literatūras sarakstā ir 198 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS	6
<i>Tēmas aktualitāte</i>	6
<i>Darba mērķi</i>	9
<i>Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti</i>	11
<i>Aizstāvamās tēzes</i>	12
<i>Pētījumu metodika</i>	13
<i>Pētījumu objekti</i>	13
<i>Darba rezultātu praktiskie pielietojumi</i>	13
<i>Darba rezultātu aprobācija</i>	14
<i>Darba struktūra</i>	16
DARBA APRAKSTS	17
1. SPRIEGUMA IMPULSVEIDA PĀRVEIDOTĀJU (SIP) DARBĪBAS ANALĪZE	17
<i>Impulsu barošanas avotu pamattopoloģiju pārskats</i>	17
<i>SIP stabilitātes pētīšana, balstoties uz vidējotiem modeļiem</i>	18
<i>Izklaidētā spektra metodes pielietošana EMT vājināšanai SIP</i>	19
2. HAOS UN BIFURKĀCIJAS KĀ NELINEĀRO DINAMISKO SISTĒMU RAKSTUROTĀJI.....	20
<i>Nelineāro dinamisko sistēmu apskats</i>	20
<i>Gludās un negludās bifurkācijas</i>	20
<i>Deterministisks haoss</i>	21
<i>Invariantie kolektori un krīze</i>	22
3. SPRIEGUMA IMPULSVEIDA PĀRVEIDOTĀJU NELINEĀRĀS DINAMIKAS GLOBĀLĀS PĒTĪŠNAS METODES	23
<i>Sistēmas dinamikas pētīšana pie fiksētiem parametriem; diskretizētā laika modeļi</i>	23
<i>Sistēmas dinamika pie mainīgiem parametriem</i>	25
4. PILNO BIFURKĀCIJU GRŪPU METODE UN TĀS MODIFICĒŠANA SIP NELINEĀRĀS DINAMIKAS GLOBĀLAI PĒTĪŠANAI.....	25
<i>PBGM būtība un fundamentālās koncepcijas</i>	25
<i>PBGM ietvaros izmantotie algoritmi un to pilnveidojumi</i>	27
• <i>Ņūtona - Kantoroviča metodes izmantošana dinamisko sistēmu periodisko režīmu atrašanai</i>	27
• <i>Periodisko režīmu stabilitātes novērtēšana</i>	27
• <i>Pilno bifurkāciju diagrammu konstruēšana un reto atraktoru meklēšana</i>	28
• <i>Bifurkāciju karšu un divdimensionālo bifurkāciju diagrammu konstruēšana parametru plaknē</i>	29
5. NELINEĀRĀS DINAMIKAS PĒTĪŠANA BUCK UN BOOST PĀRVEIDOTĀJOS, TIEM DARBOJOTIES PĀTRAUKTAS STRĀVAS REŽĪMĀ (PSR).....	29
<i>Buck un boost SIP diskrētie modeļi</i>	30
<i>Buck un boost SIP nelineārās dinamikas analītiskā pētīšana</i>	31
<i>Buck un boost pārveidotāju dinamikas pētīšana PSR ar PBGM, modelēšanu PSpice vidē un laboratorijas eksperimentiem</i>	32
6. NELINEĀRĀS DINAMIKAS PĒTĪŠANA AR STRĀVU VADĀMAM BOOST PĀRVEIDOTĀJAM, KURŠ DARBOJAS NEPĀRTRAUKTAS STRĀVAS REŽĪMĀ.....	36
<i>Boost pārveidotāja diskrētā modeļa realizācija</i>	36
<i>Ar strāvu vadāmā boost pārveidotāja dinamikas pētīšana ar PBGM un modelēšanu</i>	37
<i>SIMULINK vidē</i>	37
7. NELINEĀRĀS DINAMIKAS PĒTĪŠANA AR SPRIEGUMU VADĀMAM BUCK PĒRVEIDOTĀJAM, KURŠ DARBOJAS NEPĀRTRAUKTAS STRĀVAS REŽĪMĀ.....	40
<i>Buck pārveidotāja diskretizētā laika modeļa realizācija</i>	40
<i>Periodisko režīmu stabilitātes analītiskās novērtēšanas metode</i>	42
<i>Ar spriegumu vadāmā buck SIP dinamikas pētīšana NSR ar PBGM un laboratorijas eksperimentiem</i>	44
NOBEIGUMS	47
LITERATŪRA	48

Darbā lietoto galveno saīsinājumu un terminu atšifrējumi

Saīsinājums	Atšifrējums (latviešu valodā)	Atšifrējums (Angļu valodā)
SIP	Sprieguma impulsveida pārveidotājs	Switching Power Converter
EMT	Elektromagnētiskie traucējumi	Electromagnetic Interference
EMS	Elektromagnētiskā saderība	Electromagnetic Compatibility
NSR	Nepārtrauktas strāvas režīms	Continuous Conduction Mode
PSR	Pārtrauktas strāvas režīms	Discontinuous Conduction Mode
<i>Buck</i>	Pazeminošā tipa sprieguma impulsveida pārveidotājs	Buck Switching Power Converter
<i>Boost</i>	Paaugstinošā tipa sprieguma impulsveida pārveidotājs	Boost Switching Power Converter
PBGM	Pilno Bifurkāciju Grupu Metode	Method of Complete Bifurcation Groups
NPB	Nestabils Periodisks režīms Bezgalības apgabals	Unstable Periodic Infinitium
NP	Nekustīgais punkts	Fixed Point
BG	Bifurkāciju Grupa	Bifurcation Group
PD	Perioda dubultošanas bifurkācija	Period Doubling Bifurcation
SN	Seglu-mezglpunkta bifurkācija	Saddle-node Bifurcations
PIB, DIB	Pārrāvuma izraisītā bifurkācija	Discontinuity Induced Bifurcation

Darbā lietoto galveno apzīmējumu saraksts

Apzīmējums	Atšifrējums	Apzīmējums	Atšifrējums
E	Ieejas sprieguma līdzkomponente	D	Vidējais darbcikla koeficients
V_{out}	Izejas sprieguma līdzkomponente	d	Momentānais darbcikla koeficients
C	Izejas kondensatora kapacitāte	ϕ_{pm}	Fāzes rezerve
L	Spēka droseles induktivitāte	V_{pp}	SIP izejas sprieguma pulsāciju vēziens
R	SIP slodzes pretestība	Δi_L	Induktora strāvas pulsāciju amplitūda
f_{sw}	SIP komutācijas frekvence	I_{ref}	Atbalsta strāva
T	SIP komutācijas periods	Pn	n-tās kārtas periodiskais režīms
f_c	Nogriešanas frekvence	nT	n-tās kārtas bifurkāciju grupa

DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

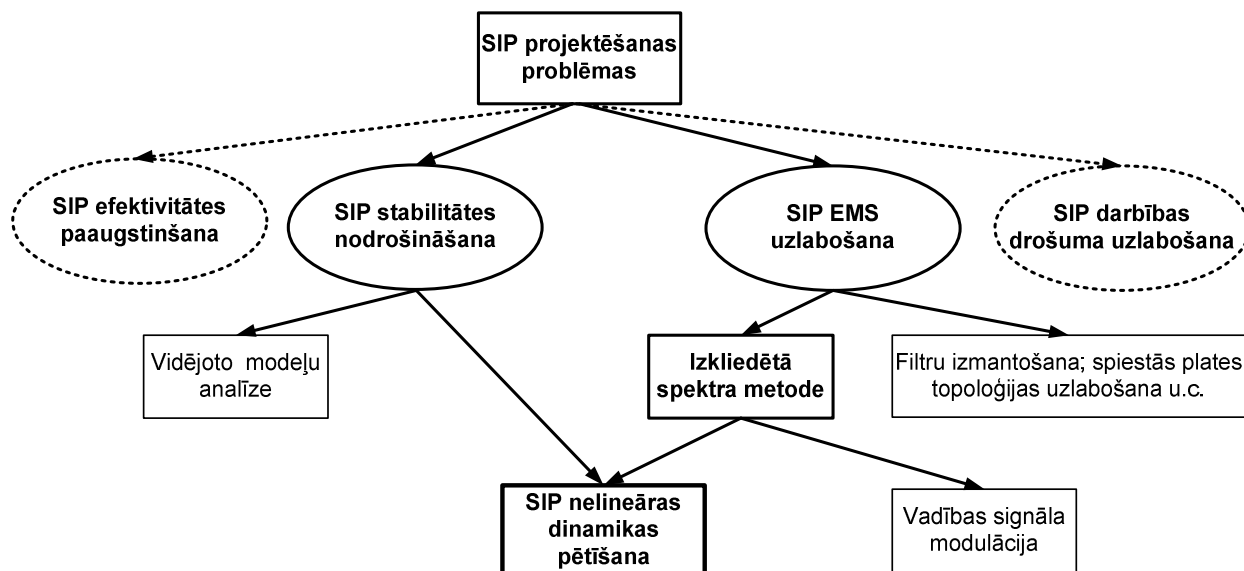
Jauna tipa pusvadītāju ierīču izmantošana [77,79] un straujais progress mikroelektronikā atklāj plašas iespējas spēka elektronikas impulsveida pārveidotāju izstrādē uz impulsu-platuma modulatora automātisko vadības sistēmu bāzes ar principiāli jauniem shēmtehnikiskiem un konstruktīviem risinājumiem, kuri nodrošina augstu ātrdarbību, lietderības koeficientu un drošumu pie relatīvi mazas masas un gabarītiem. Tāda veida sistēmas ļauj ar nelieliem zudumiem kontrolēt enerģijas plūsmas, mainīt to parametrus, īstenojot optimālās procesa vadības metodes [53,88,91].

Norādītās klases sistēmu darbības pamatrežīms ir periodisko svārstību režīms, kurš tiek uzturēts, pateicoties ārējai periodiskai iedarbībai (sistēmās ar impulsu-platuma modulāciju), vai tiek nodrošināts ar sistēmas īpašībām (sistēmās ar releju vadību). Tai pašā laikā skaitliskajos un fizikālajos eksperimentos, kā arī reālos ekspluatācijas apstākļos, bieži vien tiek novēroti sarežģītāki dināmiskie režīmi, ieskaitot kvaziperiodiskās un haotiskās svārstības. Tāpat ir noskaidrots, ka parametru izmaiņu plašā diapazonā ir iespējama vairāku režīmu līdzāspastāvēšana. Ņemot vērā minēto, pat niecīgā ārēja trokšņa iedarbība vai parametru variēšana, ko nosaka ekspluatācijas nosacījumi un slodzes darbības režīmi, var novest pie katastrofiskām parādībām [75,76], kas izpaužas sistēmas dinamikas straujā pārmaiņā (piemēram, pārejā no viena stabila periodiska režīma citā, vai katastrofiskā svārstību haotizācijā). Minēto parādību rezultātā tiek novērots ne tikai būtisks dināmisko kļūdu pieaugums un kvalitātes rādītāju pasliktināšanās, bet arī pēkšņas elektroniskās aparatūras kļūmes, kuras noved pie nopietnām avārijām [81,82].

Sprieguma impulsveida pārveidotāju (SIP) projektēšanas laikā speciālisti līdztekus shēmas izstrādei sastopas ar virkni specifisku problēmu un papildus projektēšanas uzdevumiem, kuri ir apkopoti 1. att. (ar nepārtrauktām līnijām ir norādītās problēmas, kuras tiek apskatītas promocijas darba ietvaros). Īpaši liela nozīme ir **SIP stabilās darbības nodrošināšanai** un **elektromagnētiskās saderības (EMS) uzlabošanai**, tāpēc apskatīsim šīs problēmas detalizētāk.

SIP stabilās darbības nodrošināšana (bez subharmonisko režīmu un pašerosmes parādīšanās) ir pretrunīgs uzdevums [2,8,13,40,53], kura atrisināšana prasa kompleksās sistēmas pieejas un kuras pamatā ir daudzi kompromisi. Praksē visplašāk tiek izmantotas uz SIP frekvenču raksturlīknēm balstītās pieejas [23,31,32,33,53]. Frekvenču raksturlīknes tiek konstruētas uz pārvades funkciju bāzes, kuras, savukārt, tiek iegūtas mazā signāla modelēšanas rezultātā [57,58]. Dotās metodes izplatība ir izskaidrojama ar tās pielietošanas vienkāršību un skaidru fizikālu būtību. Tomēr dotai metodei piemīt virkne trūkumu:

- mazā signāla modeļi ir pielietojami tikai pie mazām sistēmas stāvokļu mainīgo perturbācijām darba punkta apkārtņē;
- nav iespējams prognozēt daudzu principā iespējamu nevēlamo dināmisko procesu parādīšanos (piemēram, subharmoniskos un haotiskos režīmus [56]);
- nepastāv viennozīmīgums, kas ir saistīts ar SIP nogriešanas frekvences (f_c) izvēli attiecībā pret pārveidotāja pārslēgšanas frekvenci (f_{sw}); saskaņā ar dažiem avotiem attiecība f_{sw}/f_c būtu jāizvēlas diapazonos : >5 [2], 4-10 [39], 3-10 [17], 10-15 [86]; jāpiezīmē, ka norādītie diapazoni tiek noteikti empīriski, savukārt, sintēzes procesā konkrētās vērtības izvēle tiek veikta heuristiski; tiek atzīmēts tikai tas, ka samazinoties f_{sw}/f_c vērtībai, palielinās nevēlamo darbības režīmu un efektu parādīšanās iespējamība [86]; savukārt, f_{sw}/f_c pārmērīga palielināšana arī netiek uzskatīta par efektīvu problēmas risinājumu, jo var novest pie SIP vadības sistēmas parametru pasliktināšanas (palielinās regulēšanas laiki, statiskās kļūdas utt.); daži autori atzīmē



1.att. SIP projektēšanas problēmas un to iespējamie risinājumi

arī to, ka pat ievērojot mazā signāla modeļu stabilitātes kritērijus, SIP ir iespējama nevēlamās dinamikas parādīšanās [56], it īpaši pie minimālām f_{sw}/f_c vērtībām.

Tāpat par dotās problēmas aktualitāti liecina tas fakts, ka 2005. gadā IEEE ietvaros tika izveidota speciāla pētnieku grupa, kuras uzdevums ir novērtēt nelineāro locekļu (augstākās kārtas locekļu) ieviešanu dažāda tipa matemātiskos modeļos (tai skaitā arī SIP) mazā signāla analīzes procesā [66].

Ņemot vērā iepriekšminēto, dotā darba autors uzskata par aktuālu kompleksās SIP dinamikas pētīšanas metožu attīstību, kuru ietvaros pārveidotāji tiek apskatīti kā būtiski nelineāras sistēmas ar bifurkāciju un haosa parādīšanās iespējām.

Otrā apskatāmā problēma ir saistīta ar augstu elektromagnētisko traucējumu (EMT) līmeni SIP. EMT sprieguma pārveidotājos rodas impulsveida regulēšanas rakstura dēļ - pārslēgšanu nodrošināšanai pusvadītāju ierīcēm radot izteikti straujas sprieguma un strāvas izmaiņas laikā: di/dt un dv/dt . Ar stingro elektromagnētiskās savietojamības direktīvu ieviešanu (piemēram, CISPR 22), pasaulē būtiski pieaugusi nepieciešamība pēc EMT problēmu risināšanas SIP pārveidotājos [64]. Klasiskās metodes EMT samazināšanai (sk. 1.att.) parasti iekļauj sevī ieejas EMT filtru pielietošanu, iespaidplates speciālās projektēšanas metodes, ekranēšanu, mīkstās komutācijas ieviešanu, u.c. [20,43,45,54,67], taču to pielietošana būtiski palielina SIP izmērus, masu un ražošanas izmaksas.

Pēdējo divu dekāžu laikā EMT samazināšanai SIP sāk ieviesties izkliedētā spektra metode, kuras pamatā ir pārveidotāja komutācijas frekvences periodiska, haotiska vai gadījumu modulācija, kuras rezultātā trokšņu enerģija (kura nemodulētā vadības signāla gadījumā ir koncentrēta diskrētās harmonikās) tiek „izsmērēta” plašākā frekvenču diapazonā, būtiski samazinot EMT amplitūdas [32,65]. Pēdējos piecpadsmit gados izkliedētā spektra metode tiek plaši pētīta un pielietota dažādās SIP pamattopoloģijās, jaudas koeficienta korektors, rezonanses SIP un apgaismes ierīču elektroniskajos balastos. Neskatoties uz plašu izkliedētā spektra metodes pielietojumu, tai piemīt virkne būtisku trūkumu:

- vadības signāla modulācijas rezultātā palielinās ieejas sprieguma pulsāciju līmenis;
- papildus augstfrekvences pulsācijām pārveidotāja ieejas parādās arī modulācijas izraisītās zemfrekvences pulsācijas;
- metodes realizācijai vadības ķēdē ir jāpielieto papildus modulējošā signāla ģenerators.

Pirmā un otrā trūkuma novēršanai, pētnieki piedāvā specifisku modulējošu signālu izmantošanu (sk., piemēram, [24,25]), kuri ļauj iegūt pieļaujamo EMT vājināšanu, vienlaikus nebūtiski ietekmējot pārveidotā sprieguma kvalitāti. Trešā trūkuma novēršanai pētnieki ir

piedāvājuši specifisku risinājumu. Virkne autoru ir pierādījuši, ka SIP darbība haotiskā režīmā, kad visi spriegumi un strāvas pārveidotājā kļūst par neperiodiskiem signāliem, izraisa traucējumu spektra izkliedi *bez papildus vadības shēmu modifikācijas un ārējo modulējošo avotu pielietošanas* [15,16]. Lai sasniegtu minēto EMT samazinājumu jānodrošina pārveidotāja darbība noturīgā jeb *robustā haosa apgabalā*, kurā nelielas sistēmas parametru deviācijas un ārējie trokšņi nerada pēkšņu pāreju subharmoniskos režīmos [4], kuri nav pielietojami pārveidotāju EMS uzlabošanai. Robustā haosa nodrošināšanai nepieciešamo nosacījumu definēšana un sistēmas parametru ietekmes novērtēšana attiecībā uz haotiskām svārstībām ir diezgan komplicēts uzdevums, jo nelineārās sistēmās haotiskās darbības apgabalos ir novērojami dažāda tipa retie atraktori [47], kuri izjauc haotiskā apgabala viendabīgumu un izslēdz šī apgabala lietderīgās pielietošanas iespēju. Tāpēc haotiskā pārveidotāja projektēšanai tiek piedāvāts izmantot nelineārās dinamikas pētīšanas metodes un rezultātus, kuri ļauj sistemātiski izpētīt pārveidotāju parametru telpu un stāvokļu sadalījumu pēc periodiskiem režīmiem un noteikt robustā haosa apgabalus.

Neskatoties uz būtiskiem sasniegumiem kā vadības un regulēšanas teorijas, tā arī nelineāro svārstību un haosa teorijas attīstībā, releju un impulsu-platuma automātiskās regulēšanas sistēmu sarežģītās dinamikas īpatnības un katastrofisko parādību cēloņi nav līdz galam izskaidroti. Tas piespiež veikt lielu eksperimentālo pētījumu apjomu ar mērķi noskaidrot konkrētiem ekspluatācijas apstākļiem pieņemamos dinamiskos raksturojumus, kā arī uzlabot ekspluatācijas rādītājus un palielināt drošumu.

Releja un impulsu-platuma automātiskās regulēšanas sistēmu svārstību pētījumiem ir veltīta virkne darbu (sk. piemēram, [44,80,90] u.c.). Lielākā daļā darbos tiek risināti periodisko režīmu eksistēšanas nosacījumu noteikšanas un to stabilitātes novērtēšanas uzdevumi. Pie tam parasti šie jautājumi tiek apskatīti, neņemot vērā sistēmas sarežģīto dinamiku. Vispārinātās releju un nelineāro impulsa sistēmu teorijas galvenie pētījuma objekti ir periodiskie režīmi, kas manāmi sašaurina apskatāmo sistēmu klasi. Sarežģītās dinamikas sistēmu aprakstam ir veltīts mazāks darbu skaits (sk. piemēram, [18,21,22,78,85] u.c.), pie kam pamatā šie darbi ir saistīti ar konkrētās klases impulsu-platuma modulācijas kontroles modeļu haotiskās dinamikas skaitliskiem rēķiniem.

Releju un impulsu-platuma sistēmas parasti tiek aprakstītas ar diferenciālvienādojumu sistēmām, kuru labās pusēs eksistē pārrāvumi uz noteiktām gludām virsmām. Dotās virsmas sadala dinamiskās sistēmas fāzes telpu atsevišķos apgabalos, katrā no kuriem sistēmas dinamika tiek aprakstīta ar dažādiem diferenciālvienādojumiem ar pietiekami gludām labajām pusēm. Šāda veida sistēmas tiek sauktas par gabaliem gludām.

Gabaliem gludās sistēmās pāreja no periodiskiem svārstību režīmiem uz haosu var notikt tipiskā veidā: caur perioda dubultošanas bifurkācijām (Feigenbauma scenārijs), periodisko svārstību krīzi un pāreju uz haosu caur mijību (*intermittency*) un dažādiem kvaziperiodiskiem scenārijiem [2,11,37,38].

Pēdējo dekāžu laikā ir noskaidrots, ka gabaliem lineāro sistēmu gadījumā norādītie mehānismi nav vienīgie sistēmas dinamisko režīmu haotizācijas veidi. Eksistē daudz plašāka bifurkāciju parādību un pāreju uz haotiskiem režīmiem klase (kuru klasifikācijas pamati tiek apskatīti darbos [11,89]), kuru teorētiskai un skaitliskai analīzei tiek izstrādātas specializētās pieejas un jaunie algoritmi.

Apskatāmo sistēmu fāzes trajektorijas tiek sastādītas (sašūtas) no vairākiem gludiem apgabaliem un tāpēc šādās sistēmās ir iespējami divi bifurkāciju tipi:

- pirmā tipa, pie kurām pieskaita visas bifurkācijas, kas ir novērojamas gludās sistēmās (t.i., lokālās bifurkācijas, kuras atbilst noteikta periodiskā atrisinājuma stabilitātes izmaiņai);
- otrā tipa, kur bifurkācijām nav analogu gludās sistēmās un tas ir saistīts ar vienas periodiskā atrisinājuma fāzes trajektoriju daļas pieskaršanos apgabalu sašūšanas robežai, kā rezultātā mainās apgabalu skaits, no kuriem tiek sastādīta dotā atrisinājuma trajektorija; dotās pārmaiņas fāzu telpas

topoloģiskā struktūrā tiek sauktas par „C-bifurkācijām” [89] vai arī pārrāvumu izraisītām bifurkācijām (PIB) [11,41,42]; vienkāršākās C-bifurkācijas gadījumā ir novērojama nepārtraukta pāreja no viena tipa atrisinājuma citā; ir iespējamās arī daudz sarežģītākas situācijas - piemēram, svārstību perioda dubultošanās, trīskāršošanās, divu dažāda tipa atrisinājumu apvienošanās un tālākā izzušana.

Nelineāro parādību ārkārtējā sarežģītība un daudzveidība, kura ir novērojama gabaliem gludās sistēmās, ir cieši saistīta ar gludo bifurkāciju mijiedarbību ar dažāda veida PIB izpausmēm. Minētie apstākļi nosaka to, kāpēc pēdējās dekādēs arvien lielāka uzmanība tiek veltīta haosa un sarežģītās dinamikas rašanās likumsakarību dziļākai izpētei gabaliem gludās disipatīvās sistēmās [1,3,5,11,12]. Teorētiskos pētījumus stimulē arī plaši potenciālie rezultātu pielietojumi daudzās zinātnes un tehnikas nozarēs [2,11].

Var uzskatīt, ka galvenā problēma izriet no tā, ka dotajā brīdī nepastāv vienota kompleksās dinamikas un haosa pētīšanas metodika gabaliem gludām sistēmām, kuru būtu iespējams izmantot dažāda veida praktiskajos pielietojumos. Eksistējošie rezultāti apraksta galvenokārt konkrētās klases viendimensionāla vai divdimensionāla gabaliem lineāro attēlojumu dinamikas īpatnības un nav saistīti ar vienotiem teorētiskiem priekšstatiem. Apskatāmo sistēmu klasei daudzi haosa attīstības bifurkāciju scenāriji un katastrofisko parādību cēloņi nav nopamatoti. Neskatoties uz minētām neskaidrībām, norādītās klases sistēmas tiek plaši izmantotas mehānikā, mūsdienu automatiskās vadības un regulēšanas teorijā, radiotehnikā un elektronikā, kā arī sprieguma pārveidotāju tehnikā.

No iepriekšminētā izriet, ka metodiku izstrāde un attīstība haotiskās dinamikas un katastrofisko parādību prognozēšanai un novēršanai SIP (ar releja vai impulsu-platuma modulācijas vadību) ir aktuāla zinātniski-tehniska problēma.

Noformulētās problēmas zinātniskais aspekts iekļauj sevī nepieciešamību attīstīt haotisko svārstību teoriju gabaliem gludām dināmiskām sistēmām un izpētīt likumsakarības doto sistēmu dinamisko režīmu haotizācijas bifurkāciju mehānismos.

Problēmas praktiskais aspekts iekļauj sevī matemātisko modeļu, skaitļošanas algoritmu un specializētās programmatūras izstrādi komplicētās dinamikas un haosa analīzei impulsu-platuma automatiskās vadības sistēmās, kas ļautu veikt pamatotu struktūru, vadības shēmu, koriģējošo shēmu parametru un modulācijas tipa izvēli un nodrošināt nepieciešamos enerģētiskos kvalitātes rādītājus plašā sistēmas parametru un perturbāciju izmaiņas diapazonā.

Plaši pielietojamās skaitliskās bifurkāciju analīzes metodes, kuras balstās uz pārejas procesiem, neļauj sistemātiski atrast visus svarīgos stacionāros režīmus. Nepilnā bifurkāciju analīze, kura pielietošanas rezultāta tiek izveidotas nepilnas bifurkāciju diagrammas (kuras sauc arī par Monte Karlo bifurkāciju diagrammām), tiek plaši pielietotas dažāda tipa sistēmu dinamikas pētīšanas gaitā [9-11]. Minētā stabilo režīmu un diagrammu konstruēšanas pieeja neņem vērā komplicētu atrisinājuma zaru topoloģiju un neļauj sistemātiski atrast stabilus režīmus, kuri rodas, virzoties pa nestabilo atrisinājumu.

Iepriekšminēto eksistējošo nelineāro dinamisko sistēmu analīzes metožu trūkumu dēļ dotajā darbā tiek izmantota inovatīva pieeja – Pilno Bifurkāciju Grupu Metodi (PBGM), kura sākotnēji tika izstrādāta subharmonisko un haotisko režīmu pētīšanai mehāniskās sistēmās [68-74]. Tāpat darbā tiek piedāvāti PBGM ietvaros izmantoto skaitlisko algoritmu izstrāde un pilnveidojumi tieši SIP dinamikas pētīšanai. Visi izstrādātie algoritmi tiek realizēti MATLAB vidē realizētajā programmatūrā.

Darba mērķi

Galvenie dotā promocijas darba **mērķi** ir :

- izpētīt dināmisko režīmu haotizācijas bifurkāciju mehānismus un katastrofisko parādību rašanās likumsakarības plaši pielietotajās sprieguma impulsveida pārveidotāju topoloģijās un novērtēt minēto darba režīmu ietekmi uz svarīgākiem SIP parametriem;

- pilnveidot eksistējošus un izveidot jaunus algoritmus līdzsprieguma impulsveida pārveidotāju haotiskās un subharmoniskās dinamikas analīzei uz PBGM bāzes;
- paaugstināt SIP izejas sprieguma kvalitāti, jau projektēšanas stadijā ļaujot prognozēt nevēlamo dinamisko režīmu parādīšanos sprieguma pārveidotāju darbībā;
- parādīt dažāda tipa SIP haotisko režīmu pielietošanas iespējamību pārveidotāju ģenerēto elektromagnētisko traucējumu līmeņu samazināšanai.

Izvirzīto mērķu īstenošanas nolūkā darbā tiek atrisināti sekojoši **uzdevumi**:

- izanalizētas moderno nelineārās dinamikas pētīšanas metožu pielietošanas iespējas SIP kompleksās dinamikas pētīšanai;
- izveidota SIP nelineārās dinamikas pētīšanas algoritmiskā bāze, kura iekļauj:
 - metodes izstrādi, kas ļauj reducēt SIP matemātiskos modeļus, kas tiek aprakstīti ar diferenciālvienādojumu sistēmām ar pārrāvumiem, uz Puankaré attēlojumu;
 - periodisko režīmu lokālās stabilitātes analīzes metodes un algoritmus, kas ietver sevī: algoritmu, kas ļauj atrast kā stabilos, tā arī nestabilos periodiskos režīmus; metodi, kura ļauj precīzi atrast pārslēgšanas momentus, atrisinot transcendentos vienādojumus; periodisko režīmu stabilitātes novērtēšanu, izmantojot analītiskos un skaitliskos monodromijas matricas rēķinus;
 - periodisko režīmu skaitliskās atrašanas metodi un algoritmu, kas tiek orientēts uz gadījumiem, kad pastāv apriorā nenoteiktība attiecībā uz stabilu un nestabilu periodisko režīmu skaitu un tipu, kuri eksistē pie uzdotiem parametriem;
 - vienotu pieeju gludo bifurkāciju un pārrāvumu izraisīto bifurkāciju pētīšanai daudzdimensionālās gabaliem lineārās sistēmās;
 - skaitliskos algoritmus pilno bifurkāciju diagrammu un arī dināmisko režīmu bifurkāciju karšu sastādīšanai sistēmām ar pārrāvumiem;
 - skaitliskos algoritmus stabilo un nestabilo kolektoru konstruēšanai diskrētiem attēlojumiem bez inversijas;
 - algoritmu, kurš ļauj veikt gludo un negludo bifurkāciju punktu iziešanu un to turpinājumu parametru plaknē, nosakot bifurkāciju robežas;
 - specializēto programmu kompleksa izstrādi MATLAB/SIMULINK vidē subharmonisko un haotisko svārstību pētīšanai sprieguma impulsveida pārveidotājos, balstoties uz PBGM.
- noskaidrotas īpašības: dināmisko režīmu bifurkāciju kartēm parametru telpā; gludo un negludo bifurkāciju mijiedarbībai; pārejām no periodiskām uz haotiskām svārstībām SIP;
- atklātas parametru telpas sadalīšanas īpatnības periodisko un haotisko režīmu apgabalos, kā arī izpētīta dinamisko režīmu haotizācijas bifurkāciju mehānismu atkarība no izvēlētiem primāriem un sekundāriem bifurkāciju parametriem;
- noskaidrotas SIP svārstību haotizācijas likumsakarības;
- veikta dinamisko režīmu bifurkāciju karšu pētīšana parametru telpā, konstruējot gludo un negludo bifurkāciju robežas, kā arī izpētot haotisko režīmu rašanās scenārijus caur lokālām un pārrāvumu izraisītām bifurkācijām;
- novērtētā dažādu SIP haotisko režīmu pielietošanas iespējas to ģenerēto EMT trokšņu līmeņu samazināšanai un sniegtas rekomendācijas robustā haosa nodrošināšanai;
- veiktas iegūto rezultātu pārbaudes ar skaitlisko simulāciju, sistēmu datormodelēšanu un praktiskiem eksperimentiem uz izstrādātā laboratorijas maketa bāzes.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

- Pirmoreiz sprieguma impulsveida pārveidotāju pētīšanai ir izmantota progresīvā nelineārās dinamikas metodika – PBGM, kura ļāva: veikt dinamisko režīmu karšu struktūras un īpašību analīzi parametru telpā; sastādīt pilnās bifurkāciju diagrammas, nosakot tipiskās svārstību režīmu izmaiņu īpašības caur gludām un pārrāvumu izraisītām bifurkācijām; noskaidrot, ka sprieguma impulsveida pārveidotajos plašos parametru izmaiņas apgabalos ir novērojama multistabilitāte (kā arī reto atraktoru parādīšanās), kā rezultātā nelielas parametru variācijas, pastāvot ārējiem trokšņiem, var novest pie katastrofiskām dinamikas rakstura izmaiņām.
- Noskaidrotas SIP kompleksās dinamikas un haotizācijas likumsakarības, īpašības un bifurkāciju mehānismi:
 - haotiskā vai subharmoniskā dinamika rodas, ja pie konkrētām parametru vērtībām eksistē vairāki lokāli stabili periodiski vai haotiski režīmi (tai skaitā arī retie atraktori) un sistēmā trokšņu amplitūda pārsniedz šo režīmu pievilksanas apgabalu rādiusu lielumus;
 - haotiskās svārstības var parādīties, ja eksistē viens periodiskais režīms, bet ārējo trokšņu ietekmē notiek fāzes punkta pārlejšana no vienas periodiskā režīma trajektorijas daļas citā tā paša režīma trajektorijas daļā, ja režīma pievilksanas apgabalam piemīt mazs rādiuss;
 - pārrāvumu izraisītās bifurkācijas var novest pie: pēkšņas svārstību perioda dubultošanās; periodisko režīmu kopas veidošanas ar dažādiem raksturojumiem; laidenas pārejas no viena periodiskā režīma citā; vienas bifurkāciju grupas nestabilās periodiskās bezgalības veidošanas vienā punktā un līdz ar to pēkšņas pārejas haotiskā darbības režīmā;
 - SIP ir iespējams novērot nelielus periodisko režīmu apgabalus – retos atraktorus, kuri pastāv gan haotisko režīmu ietvaros, gan arī kā līdzāspastāvošie atraktori; ar strāvu vadāmajam *boost* tipa pārveidotājam nedefinēti nosacījumi, kuriem izpildoties SIP visi sistēmā pastāvošie retie atraktori izzūd vai arī kļūst nestabili;
 - ***pirmoreiz konstatēts***, ka SIP nestabilo periodisko orbītu bezgalības apgabali var parādīties negludo bifurkāciju ietekmē, kad plašais parametru apgabals, kurā ir novērojama perioda dubultošanas kaskāde un izrietošā jauno nestabilo periodisko režīmu parādīšanās, saraujas līdz vienam punktam parametru plaknē;
 - atrasts ***jauns gala tipa retais atraktors un protuberances***, kuru veidošanos no vienas puses nosaka gludo un no otras puses – pārrāvuma izraisīto bifurkāciju izpausmes;
 - ***pirmoreiz parādītas*** īpatnējās perioda dubultošanas seglu-mezglpunkta bifurkācijas izpausmes SIP un to ietekme uz robustā haosa apgabala veidošanos, kā arī ***jauno bifurkāciju grupu tipu*** parādīšanos.
- Noskaidroti sekojoši raksturīgākie haotizācijas scenāriji:
 - bezgalīga perioda dubultošanas kaskāde, kura izbeidzas ar neperiodiskā režīma parādīšanos;
 - pēkšņa lokāli stabilo periodisko režīmu parādīšanās ar dažādiem dinamiskiem raksturojumiem, katrā no kuriem, mainoties sistēmas parametriem, var tikt novērota bezgalīga vai galīga tiešo vai inverso perioda dubultošanas bifurkāciju kaskāde, kura beidzas ar pāreju haotiskā režīmā;
 - straujas pārejas no stabiliem periodiskiem režīmiem uz haosu;
 - galīgā lokālo perioda dubultošanas un dažāda tipa pārrāvumu izraisīto bifurkāciju secība, kas beidzas ar svārstību haotizāciju.
- Pierādīts, ka daudzu pētnieku novēroto un līdz šim nepietiekami izpētīto parādību (tādu kā gludo un negludo bifurkāciju kompleksā mijiedarbība sistēmās ar

pārslēgšanām) būtību ir iespējams izskaidrot, izmantojot PBGM ietvaros konstruējamās nestabilo periodisko režīmu zarus, kā arī izpētīt periodisko režīmu multiplikatoru dinamiku, mainoties sistēmas parametriem.

- Definēti robustā haosa (kurš var tikt izmantots pārveidotāju EMS uzlabošanai izklaidētā spektra metodes ietvaros) parādīšanas nosacījumi ar strāvu vadāmos *boost* pārveidotājos, kā arī konstatēta kompensējošā zāģveida signāla ietekme uz robustā haosa realizācijas nosacījumiem.
- Tika pilnveidoti un *izstrādāti sekojoši algoritmi* nelineārās dinamikas pētīšanai sistēmās ar impulsu-platuma modulāciju:
 - metode sprieguma impulsveida pārveidotāju matemātisko modeļu reducēšanai no diferenciālvienādojumu sistēmām ar pārrāvumiem uz Puankarē attēlojumu, kura tika nodemonstrēta uz pazeminošā tipa sprieguma pārveidotāja piemēra;
 - skaitliskā periodisko režīmu atrašanas metode un algoritms, kas tiek piemērots SIP dinamikas īpatnībām, ļaujot ar uzdoto precizitāti atrast stabilos, nestabilos periodiskos režīmus pie fiksētiem parametriem, kā arī klasificēt tos, sadalot pa attiecīgām bifurkāciju grupām;
 - periodisko režīmu atrašanas algoritms un metodika, kura balstās gan uz Ņūtona-Kantoroviča metodes bāzes, gan uz transcendentu vienādojumu risināšanu attiecībā pret pārslēgšanas momentiem; abas pieejas ļauj atrast gan stabilos, gan nestabilos periodiskos režīmus sistēmās, kas tiek aprakstītas ar iteratīviem attēlojumiem vai arī diferenciālvienādojumu sistēmām ar pārrāvumiem;
 - lokālās periodisko režīmu stabilitātes analīzes algoritms, kurš balstās uz iegūtā stroboskopiskā attēlojuma linearizāciju periodiskā režīma apkārtnē un tālākiem analītiskiem un skaitliskiem monodromijas matricas aprēķiniem, kas ļauj ar uzdoto precizitāti noteikt bifurkāciju un stabilitātes robežu parametrus, kā arī identificēt gludās vai negludās (pārrāvumu izraisītās) bifurkācijas;
 - skaitļošanas algoritmi, kuri ļauj veikt gludo un negludo bifurkāciju analīzi, dinamisko režīmu bifurkāciju karšu un pilno bifurkāciju diagrammu sastādīšanu, stabilo un nestabilo kolektoru konstruēšanu, ļaujot izanalizēt kompleksās dinamikas un haosa parādīšanas bifurkāciju scenārijus un mehānismus sistēmās ar impulsu-platuma modulāciju.

Aizstāvamās tēzes

Tiek izvirzītas un aizstāvētas tēzes par to, ka:

1. ***garantēti*** stabilu un drošu sprieguma impulsveida pārveidotāju (SIP) izstrāde nav iespējama bez to nelineārās dinamikas globālās analīzes, kas balstās uz mūsdienīgām haosa un bifurkāciju pētīšanas metodēm;
2. uz jauno Pilnās Bifurkāciju Grupas Metodes (PBGM) izstrādāto algoritmu pamata veiktā SIP kvalitatīvās nelineārās dinamikas globālā analīze ļauj uzlabot sprieguma pārveidošanas kvalitāti SIP un paaugstināt to drošumu jau projektēšanas stadijā, ļaujot prognozēt un izvairīties no nevēlamo dinamisko režīmu parādīšanās SIP darbībā;
3. jauno PBGM algoritmu izstrāde ļauj veikt SIP novērojamo fundamentāli dažādo bifurkāciju tipu – gludo un pārrāvuma izraisīto bifurkāciju – analīzi un novērtēt to ietekmi uz SIP dinamiku, pētīt PBGM ietvaros konstatējamās nestabilo periodisko režīmu zarus, kuriem ir ***būtiska loma*** bifurkāciju ainas veidošanas procesā;
4. PBGM un tajā ietilpstošo algoritmu pilnveidošana, balstoties uz monodromijas matricu analītiskiem aprēķiniem, ļauj būtiski uzlabot pilno bifurkāciju diagrammu konstruēšanas efektivitāti, noteikt robustā haosa apgalus, kuri var tikt izmantoti SIP elektromagnētiskās saderības uzlabošanai, kā arī novērtēt pārveidotāju parametru ietekmi uz iegūtā haotiskā režīma noturīgumu pret ārējo trokšņu un parametru deviācijas iedarbību.

Pētījumu metodika

Tā balstās uz fakta, ka SIP projektēšanas algoritmu un metožu izveidošana, kuri ļautu izvairīties no nevēlamo dināmisko režīmu parādīšanās, nav iespējama bez pārveidotāju nelineārās dinamikas analīzes. SIP dinamikas pētīšanas veltītajās publikācijās [2,11,60-63] izmantotās pieejas neļauj iegūt pilnu priekšstatu par pārveidotāja darbību, jo tās balstās uz tā saucamām rupjām (*brute-force*) jeb Monte Karlo metodēm, kuru izmantošana pēc savas būtības neļauj veikt *sistemātisku* visu periodisko režīmu atrašanu, klasifikāciju un to mijiedarbības pētīšanu.

Ievērojot iepriekšminēto pieeju un metožu trūkumus, dotā darba ietvaros SIP dinamikas analīzei ir tālāk attīstīta un modificēta inovatīvā nelineāro sistēmu pētīšanas pieeja - PBGM, kura tika izstrādāta (1993-2012) Rīgas Tehniskās universitātes Mehānikas Institutā prof. M. Zakrčevska pētnieku grupā „Nelineārā dinamika, haoss, katastrofas un vadība”. PBGM un uz tās bāzes izveidotais algoritmu un programmatūras komplekss ļauj tipiskajos un plaši pielietojamos nelineāros modeļos atrast jaunus periodiskus un neperiodiskus (haotiskus) režīmus, jaunas bifurkāciju grupas un veikt dažādu bifurkāciju grupu mijiedarbības analīzi.

Darbā svarīgākie pētījumu rezultāti tika iegūti, izmantojot uz PBGM balstītās skaitliskās modelēšanas metodes. Visi izmantotie pārveidotāju modeļi tika pārveidoti diskrēto attēlojumu formā. Iegūto datu ticamība tiek pierādīta, izmantojot MATLAB un PSpice simulācijas, laboratorijas eksperimentus, un, gadījumos, kad tas ir iespējams, salīdzinot rezultātus ar citu autoru nopublicētiem rezultātiem.

Pētījumu objekti

Pētījumu objekti ir spēka elektronikas SIP pamattopoloģijas, kas darbojas to tipiskajos režīmos:

- ar spriegumu vadāms pazeminošā tipa (*buck*) pārveidotājs, kurš darbojas pārtrauktas strāvas režīmā;
- ar spriegumu vadāms paaugstinošā tipa (*boost*) pārveidotājs, kurš darbojas pārtrauktas strāvas režīmā;
- ar strāvu vadāms *boost* pārveidotājs, kurš darbojas nepārtrauktas strāvas režīmā (ar/bez kompensējošā zāģveida signāla);
- ar spriegumu vadāms *buck* pārveidotājs (ar proporcionālo kompensācijas shēmu), kurš darbojas nepārtrauktas strāvas režīmā.

Darba rezultātu praktiskie pielietojumi

- Darbā ir parādīts, ka PBGM pielietošana ļauj veikt stabilizēto SIP nelineārās dinamikas un stabilitātes pētījumus un analīzi, kas var jūtami atvieglot šo ierīču projektēšanas procesu. SIP nelineārās dinamikas analīzei izstrādātās skaitliskās metodes ļauj noteikt sakarību starp sistēmas struktūru, parametriem un sistēmas oscilācijas īpašībām, noteikt potenciāli bīstamus funkcionēšanas režīmus, prognozēt katastrofiskās parādības.
- Izstrādāto matemātisko modeļu, skaitlisko algoritmu un programmu kopums ļauj veikt pilno bifurkāciju analīzi parametru un fāzu telpās un iegūt praktiskas rekomendācijas regulatoru struktūras, koriģējošo ierīču un to parametru izvēlē ar mērķi nodrošināt nepieciešamos vadības kvalitātes rādītājus.
- Ieviestais vienotais apraksts haotisko svārstību parādīšanās bifurkāciju scenāriju attīstības mehānismiem, svārstību haotizācijas un katastrofisko parādību rašanas cēloņiem SIP ļauj veikt dināmisko režīmu bifurkāciju karšu un pilno bifurkāciju diagrammu specifisku īpašību noteikšanu.
- Izstrādātās stabilitātes novērtēšanas metodes var tikt izmantotas, lai nodrošinātu SIP nepieciešamo darba režīmu (t.i., nepieļaut darbību subharmoniskā un haotiskā

režīmā, ja tas apdraud drošu shēmas darbību, vai arī pretēji – speciāli nodrošināt haotisko darbības režīmu atsevišķo pārveidotāja rādītāju uzlabošanai).

- Izstrādātais programmu komplekss var tikt integrēts SIP automatizētās projektēšanas paketēs, lai noteiktos projektēšanas etapos veiktu sprieguma pārveidotāju nelineārās dinamikas prognozēšanu.

Darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba galvenie rezultāti tika prezentēti sekojošās konferencēs:

- „The 12th International Conference of ELECTRONICS”, Kaunas, Lietuva, 18.-20. maijs, 2008;
- „The 13th International Conference of ELECTRONICS”, Kaunas, Lietuva, 12.-14. maijs, 2009;
- „The 14th International Conference of ELECTRONICS”, Kaunas, Lietuva, 18.-20. maijs, 2010;
- „The 15th International Conference of ELECTRONICS”, Kaunas, Lietuva, 17.-19. maijs, 2011;
- „The 16th International Conference of ELECTRONICS”, Palanga, Lietuva, 18.-20. jūnijs, 2012;
- „The 50th RTU International Conference”, Rīga, Latvija, 14.-16. oktobris, 2009;
- „The 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference”, Hanja, Krēta, Grieķija, 1.-5. jūnijs 2010;
- „The 9th International Symposium on Electronics and Telecommunications”, Timisoara, Rumānija, 11.-12. novembris, 2010;
- Starptautiskā Zinātniski Praktiskā Konference „Jaunatnes Loma un Iespējas Inženierzinātnes Attīstībā”, Daugavpils, Latvija, 28. aprīlis, 2011;
- Starptautiskā Zinātniski Praktiskā Konference „Jaunatnes Loma un Iespējas Inženierzinātnes Attīstībā”, Daugavpils, Latvija, 26.aprīlis, 2012;
- „2nd International Symposium AR’11”, Jūrmala, Latvija, 16.-20. maijs, 2011;
- „7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics CPE” Tallina, Igaunija, 3. jūnijs, 2011;
- Starptautiskā zinātniski praktiskā konference „Tehnoloģija. Vide. Resursi”, Rēzekne, Latvija, 20.-22. jūnijs, 2011;
- „52nd RTU International Scientific Conference (Section – Power and Electrical Engineering Conference)”, Rīga, Latvija, 13.-14. oktobris 2011;
- 52nd RTU International Scientific Conference (Section – Electronics, Telecommunications and eSociety), Rīga, Latvija, 13.-14. oktobris 2011;
- „4th International Interdisciplinary Chaos Symposium on Chaos and Complex Systems”, Antālija, Turcija, 29.aprīlis- 2.maijs., 2012.

Kopumā ir nopublicēti un pieņemti publicēšanai 16 raksti dažādos zinātniskos izdevumos:

1. J.Jankovskis, D.Stepins, **D.Pikulins**, S.Tjukovs. Examination of Different Spread Spectrum Techniques for EMI Suppression in dc/dc Converters // Electronics and Electrical Engineering – Kaunas: Technologija, 2008.- No.6 (86). – 60. – 64. lpp.
2. **Pikulins D.**, Tjukovs S. Investigation of EMI reduction and output voltage ripple minimization using interleaved buck converters // Scientific Proceedings of RTU. Series 7. Telecommunication and Electronics, 2008, Vol.8, 27.-30. lpp.
3. **Pikulins D.** Tools for Investigation of Dynamics of DC-DC Converters within Matlab/Simulink // CHAOS THEORY Modeling, Simulation and Applications Selected Papers from the 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS2010)), World Scientific Publishing, 2011. – 317.-325. lpp.

4. Jankovskis J., Stepins D., **Pikuļins D.** Improving Effectiveness of the Use of Frequency Modulation in Power Converters // Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010), Igaunija, Tallina, 4.-6. Oktobris, 2010. – 327.-330. lpp.
5. Jankovskis J., **Pikuļins D.**, Stepins D. Effects of Increasing Switching Frequency in Frequency Modulated Power Converters // Proceedings of the "2010 9th International Symposium on ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS", Rumānija, Timisoara, 11.-12. novembris, 2010. – 115.-118. lpp.
6. **Pikuļins D.** Some Applications of Numerical Path-following in the Analysis of Dynamics of Switching Converters // Student Forum Proceedings of the 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics CPE 2011, Igaunija, Tallina, 3. jūnijs, 2011. – 11.-14. lpp.
7. Zakrževiskis M., Ščukins I., Frolov V., Klokovs A., Jevstignejevs V., Smirnova R., **Pikuļins D.** RARE ATTRACTORS IN DISCRETE NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEMS // Proceedings of the 2nd International Symposium RA'11, Latvija, Jūrmala, 16.-20. maijs, 2011. – 21.-25. lpp.
8. **Pikuļins D.** SMOOTH AND NONSMOOTH NONLINEAR PHENOMENA IN DC-DC CONVERTERS // Proceedings of the 2nd International Symposium RA'11, Latvija, Jūrmala, 16.-20. maijs, 2011. - 26.-30. lpp.
9. **Pikuļins D.** Nonlinear Dynamics of Buck Converter // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference "Environment.Technology. Resources", Latvija, Rēzekne, 20.-22. jūnijs, 2011. – 156.-162.lpp.
10. **Pikuļins D.** The Investigation of Complex Behaviour in Buck Converters by Means of Matlab and Simulink // Scientific Journal of RTU. 7. series., Telekomunikācijas un elektronika. - 9. vol. (2009), 24.-33. lpp.
11. Jankovskis J., Stepins D., **Pikulins D.** Lowering of EMI in boost type PFC by the use of spread spectrum. Electronics and Electrical Engineering – Kaunas: Technologija, 2009.- No.6 (94). – 15.-18. lpp.
12. Jankovskis J., **Pikuļins D.**, Stepins D. Efficiency of PFC Operating in Spread Spectrum Mode for EMI Reduction // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, -No.7 (2010), 13.-16. lpp.
13. **Pikulins D.** Effects of Non-smooth Phenomena on the Dynamics of DC-DC Converters // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Enerģētika un elektrotehnika. - 29. sēj. (2011), 119.-122. lpp.
14. **Pikuļins D.** The Complete Bifurcation Analysis of Boost DC-DC Converter // RTU zinātniskie raksti. 7. sēr., Telekomunikācijas un elektronika. - 11. sēj. (2011), 22.-26. lpp.
15. Zakrzhevsky M., Schukin I., Yevstigneev V., Klovov A., **Pikulins.D.** Complete Bifurcation Analysis of Discrete Nonlinear Dynamical Systems (grāmata pieņemta publicēšanai).
16. **Pikuļins D.** Subharmonic Oscillations and Chaos in DC-DC Switching Converters // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, -No.X (2012), X.-X. lpp (raksts pieņemts publicēšanai) .

Divas publikācijas (4 un 5) ir pieejamas ciparu bibliotēkā IEEEExplore Digital Library, viena publikācija (3) ir pieejama World Scientific Books ciparu bibliotēkā; raksti (2,10-14, 16) ir pieejami EBSCO, ProQuest, VINITI datu bāzēs.

Darba struktūra

Darbs ir veidots no ievada, 7 nodaļām, nobeiguma un pielikumiem.

Ievadā tiek nopamatota izvēlētās tēmas aktualitāte, noformulēti galvenie pētījuma mērķi un norādītas darba ietvaros izmantotas pētījumu metodes, tiek apskatīta zinātniskā novitāte un darba rezultātu praktiskie pielietojumi, kā arī tiek formulētas aizstāvamās tēzes.

Darba pirmajā nodaļā tiek īsi apskatītas sprieguma impulsveida pārveidotāju pamattopoloģijas, vadības shēmu tipi un pārveidotāju funkcionēšanas principi.

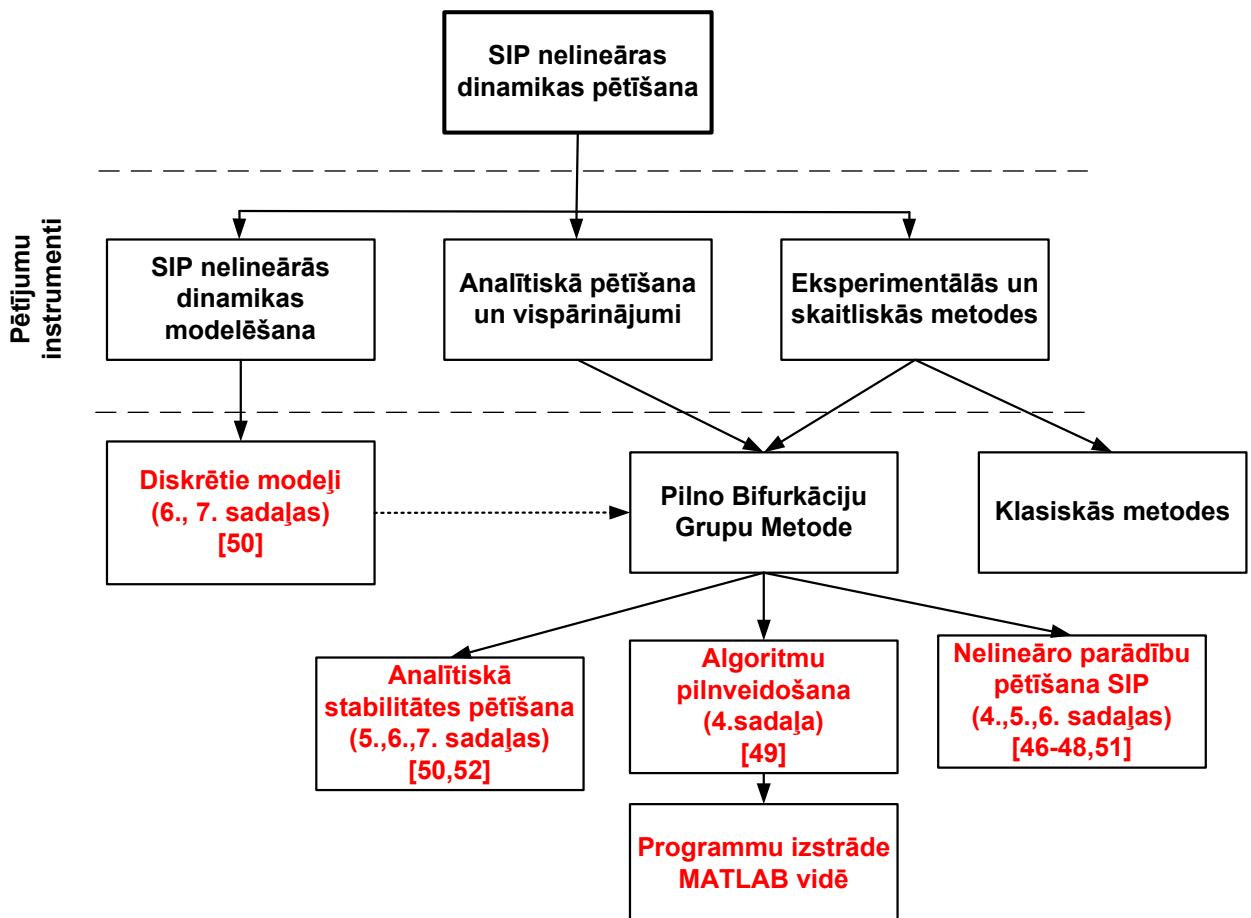
Darba 2. un 3. sadaļās tiek apskatīta haosa un bifurkāciju teorijas būtība, kā arī haosa identificēšanas un raksturošanas instrumenti, kuri tiks izmantoti SIP kompleksās dinamikas pētīšanai un novēroto parādību izskaidrošanai.

Darba 4.-7. sadaļu idejiskā struktūra un autora ieguldījums tiek shematiski atspoguļots 2. att., kurā ir norādītas arī atbilstošo problēmu risināšanai veltītās darba autora publikācijas.

Darba 4. sadaļā tiek aprakstīta PBGM būtība un tās ietvaros pielietojamās definīcijas un specifiski jēdzieni; PBGM pamatā esošie un autora izstrādātie nelineāro sistēmu dinamikas pētīšanas algoritmi, kuri tiks izmantoti SIP kompleksās dinamikas analīzei.

Darba 5. sadaļa tiek veltīta nelineārās dinamikas pētīšanai pazeminošā un paaugstinošā tipa sprieguma impulsveida pārveidotājos, kuri darbojas pārtrauktās strāvas režīmā.

Darba 6. un 7. sadaļā tiek apskatīta ar strāvu un ar spriegumu vadāmu sprieguma impulsveida pārveidotāju darbība nepārtrauktās strāvas režīmā un ar to saistītās bifurkāciju secības un haotizācijas scenāriji. Pielietojot darba 3. un 4. nodaļās aprakstītās metodes, tiek izpētīta robežu saduršanas parādība un tās ietekme uz pārveidotājā dinamiku.



2. att. Darba idejiskā struktūra, norādot (ar iekrāsojumu) autora ieguldījumus

DARBA APRAKSTS

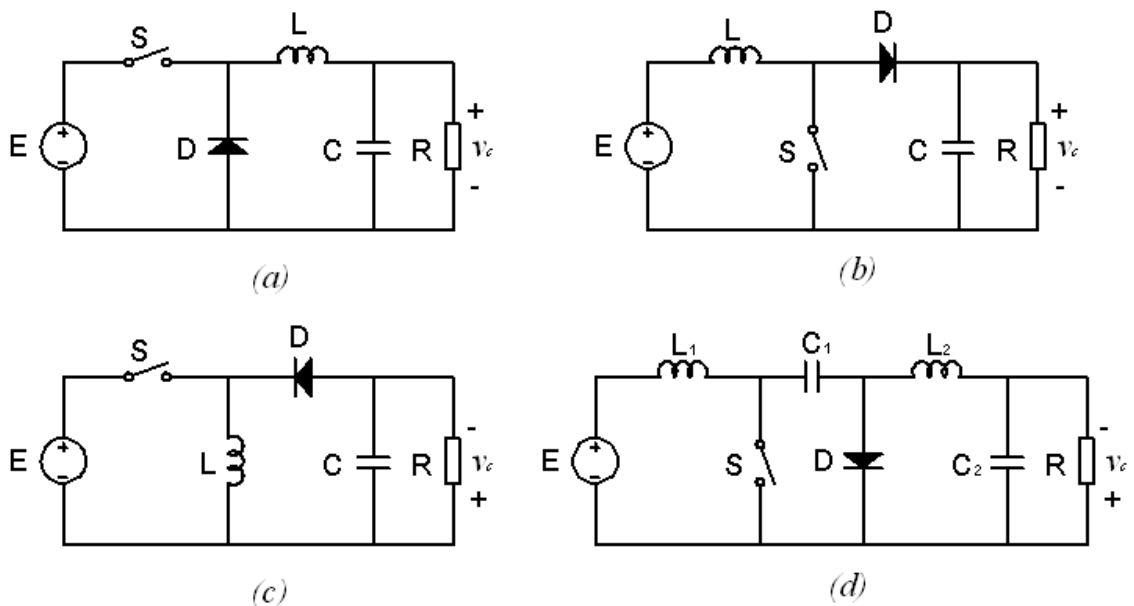
1. SPRIEGUMA IMPULSVEIDA PĀRVEIDOTĀJU (SIP) DARBĪBAS ANALĪZE

Promocijas darba pirmās nodaļas ietvaros tiek aprakstīti SIP pamattopoloģiju un to vadības shēmu darbības būtība un definēti nosacījumi buck un boost pārveidotāju darbībai PSR un NSR; apskatītas SIP stabilitātes pētīšanas metodes, balstoties uz vidējiem modeļiem, kuru pielietojamība dažāda tipa nelineāro parādību prognozēšanai SIP tiek pārbaudīta promocijas darba ietvaros; izklāstīta ISM būtība un atzīmēta pārveidotāju haotiskās darbības pielietošanas iespējas EMT vājināšanai SIP.

Spēka elektronika un tās nozares, kas ir saistītas ar elektriskās enerģijas pārveidošanu, ir dināmisks zinātniski-tehnisks virziens, kura ietvaros iegūto rezultātu pielietošana ļauj attīstīties arī daudzām citām elektronikas nozarēm. Elektriskās enerģijas pārveidošanas principi, elementārā bāze un tehnoloģiskie risinājumi tiek nepārtraukti atjaunoti un katru 3-4 gadu laikā dotajā nozarē notiek paaudzes maiņa. Radioelektroniskās aparatūras barošanas avoti (t.i., sekundārie barošanas avoti) veido plašu tranzistoru ierīču klasi, kuru darbībai ir jābūt saskaņotai ar elektriskā tīkla parametriem ieejā, kā arī jāatbilst plašam prasību klāstam, iekļaujot izmaiņas tīkla un slodzes darbības režīmos.

Impulsu barošanas avotu pamattopoloģiju pārskats

DC-DC pārveidotāji, kuru dinamikas pētīšanai ir veltīts dotais promocijas darbs, pārveido ieejas līdzspriegumu nepieciešamā, bieži vien regulējamā izejas līdzspriegumā. SIP jānodrošina konstants izejas spriegums, mainoties ieejas spriegumam un slodzes pretestībai. Atšķirībā no lineāriem pārveidotājiem, DC-DC SIP izejas sprieguma vērtības var būt gan mazākas (piemēram, *buck* un *buck-boost* pārveidotājos), gan arī lielākas (piemēram, *boost* un *buck-boost* pārveidotājos) par ieejas spriegumu.



1.1. att. (a)-(c) SIP pamattopoloģijas: (a) pazeminošais (*buck*) pārveidotājs; (b) paaugstinošais (*boost*) pārveidotājs ; (c) *buck-boost* pārveidotājs; (d) to kombinācija Čuka pārveidotājā

Lielākā daļa SIP tiek īstenota uz vienkāršāko pārveidotāju bāzes, kuri ir attēloti 1.1. att. Parasti, atslēgas elements un diode tiek ieslēgti un izslēgti cikliski un komplementārā

veidā. Atslēgas darbību vada impulsu platuma modulēts signāls, kas tiek iegūts ar atgriezeniskās saites shēmas palīdzību, savukārt diode ieslēdzas un izslēdzas atbilstoši sprieguma izmaiņām uz diodes spailēm. Kad atslēga ir saslēgta (*ON* stāvoklis), diodei ir pielikts sprostsprriegums un diode ir ciet, bet induktora strāva pieaug. Kad atslēga ir atvērta (*OFF* stāvoklis), tad diodei tiek pielikts spriegums tiešā virzienā, diode ir vaļā un induktora strāva samazinās. Aprakstītais process cikliski atkārtojas. Sistēma var tikt nepārprotami aprakstīta ar stāvokļa vienādojumu kopu, kurā katrs vienādojums atbilst konkrētam atslēgu stāvoklim. Iepriekšaprakstītam procesam var definēt divus stāvokļa vienādojumus:

$$\text{Atslēga saslēgta (ON), diode ciet : } \dot{x} = A_1x + B_1E, \quad (1.1)$$

$$\text{Atslēga atvērta (OFF), diode vaļā : } \dot{x} = A_2x + B_2E, \quad (1.2)$$

kur x - stāvokļa vektors, kas parasti iekļauj sevī kondensatoru spriegumus un induktoru strāvas;

\dot{x} - dx/dt ;

A_1, A_2 , - sistēmu aprakstošās matricas;

B_1, B_2

E - ieejas spriegums.

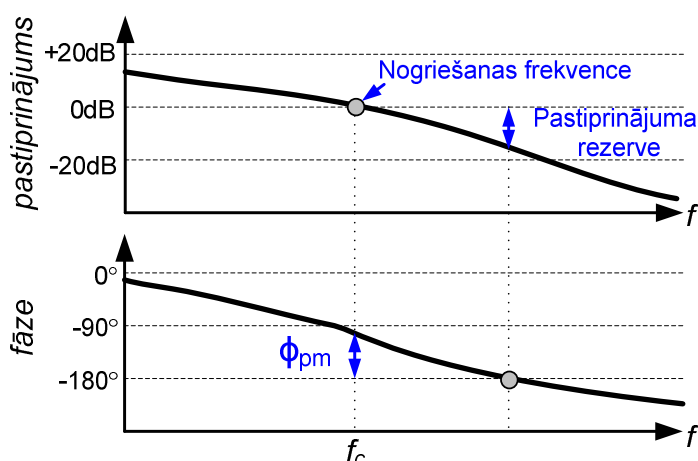
Tā kā diodes pārslēgšanās ir atkarīga no spriegumiem uz tās izvadiem, pastāv iespēja, ka diode var aizvērties, pat ja atslēga ir vaļā. Spēka elektronikas literatūrā šādu sistēmas darbību sauc par **pārtrauktās strāvas režīmu (PSR)**, kas parādās barošanas avotos pretstatā **nepārtrauktās strāvas režīmam (NSR)**, kad atslēgas elements un diode darbojas stingri komplementārā veidā. Rodas jauns stāvokļu vienādojums situācijai, kad diode strāvu nelaiž un atslēga ir atvērta:

$$\text{Atslēga atvērta (OFF), diode ciet : } \dot{x} = A_3x + B_3E \quad (1.3)$$

Praksē izvēle starp PSR un NSR parasti ir tehniskais lēmums. Nepārtrauktās strāvas režīms ir labāk pielāgots lieljaudas pielietojumiem, savukārt pārtrauktās strāvas režīms tiek ierobežots ar mazjaudas pielietojumiem. Jāpiebilst, ka PSR tiek bieži vien izmantots, jo pieļauj vienkāršāku vadības shēmas projektēšanu un parasti atšķiras ar mazāku reakcijas laiku.

SIP stabilitātes pētīšana, balstoties uz vidējiem modeļiem

SIP projektēšanas procesā stabilai darbības nodrošināšanai (t.i., darbībai bez subharmonisko režīmu parādīšanās un pašierosmes) tiek izmantotas uz SIP frekvenču raksturlīknēm balstītās pieejas. Frekvenču raksturlīknes tiek konstruētas uz atbilstošo pārvades funkciju bāzes, un tālāk tiek veikta šo raksturlīkņu parametru atbilstības pārbaude definētiem stabilitātes kritērijiem [29].



1.2. att. Nogriešanas frekvences, fāzes un pastiprinājuma rezerves definīcijas

SIP pārveidotāju stabilitātes nodrošināšanai tiek izvirzīti sekojoši kritēriji [7] :

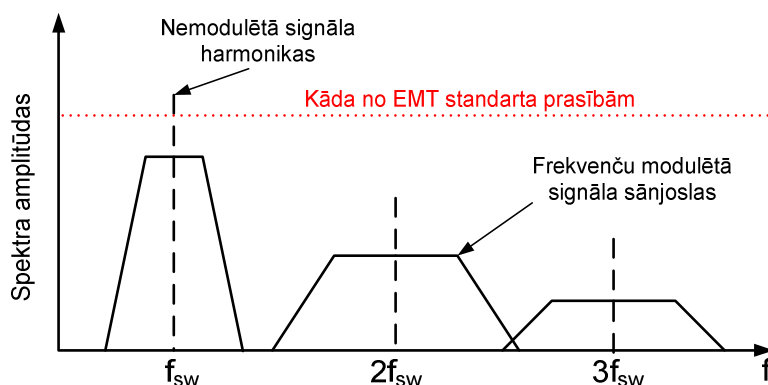
1. pie nogriešanas frekvences f_c , cilpas pārvades funkcijas rādītās **fāzes aiztures** vērtībai jābūt mazākai par 180° ; tāpat pie f_c , definē tā saucamo **fāzes rezervi** ϕ_{pm} , kas tiek aprēķināta kā starpība starp pārvades raksturlīknes fāzes leņķi un -180° (sk.1.2. att.); lai nodrošinātu stabilu pārveidotāja darbību, teorētiski pietiek arī ar $\phi_{pm} \approx 1^\circ$, tomēr parasti atgriezeniskās saites cilpa tiek projektēta, lai nodrošinātu fāzes rezervi $\phi_{pm} \approx 20^\circ - 60^\circ$, jo mazās vērtības var novest pie lieliem uzplaisnījumiem (*overshoot*);
2. **pastiprinājuma rezervi** definē kā starpību starp 0dB un atgriezeniskās saites cilpas pārvades raksturlīknes amplitūdas vērtību pie frekvences, kurā pārvades raksturlīknes fāzes leņķis var (bet ne vienmēr to īsteno) šķērsot -180° ; ja fāzes leņķis sasniedz -180° vērtību, tad pastiprinājuma rezervei jābūt vismaz 10dB lielai, lai neļautu sistēmā parādīties nevēlamām svārstībām, mainoties shēmas parametru vērtībām.

Tādējādi tiek uzskatīts, ka, ja SIP aprakstošā pārvades raksturlīkne vadība-izeja atbilst minētiem stabilitātes kritērijiem, tad pārveidotājā nav iespējama subharmonisko un pašerosmes svārstību parādīšanās.

Izkliedētā spektra metodes pielietošana EMT vājināšanai SIP

Viens no būtiskajiem SIP trūkumiem ir augsts ģenerēto elektromagnētisko traucējumu (EMT) līmenis. EMT sprieguma pārveidotājos rodas pateicoties straujām sprieguma un strāvas izmaiņām atslēgas elementu komutācijas laikā. Ģenerējamie konduktīvie trokšņi spēj rādīt interferenci ar citām elektroniskām sistēmām, tai skaitā arī ar paša SIP palīgķēdēm.

Viena no progresīvākām EMT vājināšanas metodēm, kura ļauj samazināt trokšņu līmeni jau to ģenerēšanas avotā, ir izkliedētā spektra metode (ISM), kuru tagad plaši pielieto elektronikā (mikroprocesori, D klases pastiprinātāji, telekomunikāciju sistēmās, u.c. [26-28,43,54]). Metodes pamatā ir vadības signāla modulēšana ar noteiktās formas periodisko vai gadījumsignālu, kā rezultātā diskrētās harmoniskās koncentrētā trokšņu enerģija tiek „izsmērēta” plašākā frekvenču diapazonā (sk. 1.3. att.), nodrošinot EMT standarta prasības.



1.3. att. Frekvenču modulētā un nemitētā vadības signāla harmonikas

Detalizēti konduktīvo traucējumu vājināšanas analīze, izmantojot *gadījummodulāciju un haotisko modulāciju*, ir apskatīta virknē darbos (sk., piem., [24,30,65]). Salīdzinot analītiski un eksperimentāli iegūtos rezultātus ar periodiskās modulācijas pētījumiem, autori parāda, ka haotiskās modulācijas pielietošanas rezultātā tiek iegūts labāks traucējumu vājinājums, izraisot mazāku izejas sprieguma pulsāciju pieaugumu.

Visām plaši pielietotām ISM realizācijas shēmām piemīt viens būtisks trūkums - SIP vadības ķēdē jāievieš papildus modulējošā signāla avots (kurš var būt gan atsevišķais atbilstošo signālu ģenerators, gan arī vadības mikroshēmā integrētais avots). Lai izvairītos no papildus signālu avotu pielietošanas, tiek piedāvāts [16] izmantot pašu SIP haotiskos darbības režīmus, kā rezultātā visi pārveidotāja strāvas un spriegumi kļūst neperiodiski, nodrošinot „dabisku” izkliedētā spektra parādīšanos.

Dotā darba ietvaros tiek sniegtas rekomendācijas SIP robustās haotiskās darbības nodrošināšanai, kura var tikt efektīvi pielietota EMT vājināšanai pārveidotajos ISM ietvaros.

2. HAOS UN BIFURKĀCIJAS KĀ NELINEĀRO DINAMISKO SISTĒMU RAKSTUROTĀJI

Promocijas darba otrās nodaļas ietvaros tiek apkopoti daži haosa teorijas aspekti, iekļaujot: dinamiskās sistēmas koncepciju; līdzsvara un nekustīgo punktu klasifikāciju divdimensionālo sistēmu gadījumā; gludo un negludo bifurkāciju klasifikāciju un galveno īpašību aprakstu; krīžu klasifikāciju un to ietekmi uz globālo nelineārās sistēmas dinamiku; determinētā haosa galvenās īpašības un rašanas priekšnosacījumus.

Nodaļā aprakstīto nelineāro parādību īpašības tiks izmantotas SIP subharmonisko un neperiodisko režīmu pētīšanas procesā un sistēmu haotizācijas bifurkācijas scenāriju izskaidrošanā.

Nelineāro dinamisko sistēmu apskats

Dotajā darbā tiek pētīti SIP, kuri var tikt modelēti, izmantojot diferenciālos vienādojumus vai diferencu vienādojumus. Kopumā, jebkura sistēma, kuru var aprakstīt ar vienu no minētiem paņēmieniem, tiek saukta par *dinamisko sistēmu (DS)*, ja tās dinamika mainās atkarībā no laika.

Tipiskajās RLC ķēdēs, piemēram, kondensatora spriegums un induktora strāva, veido neatkarīgo stāvokļu mainīgo kopu. Galvenie elementu aprakstošie likumi ($v_R = i_R R$ rezistoriem, $L(di_L/dt) = v_L$ induktoriem, $C(dv_C/dt) = i_C$ kondensatoriem, u.c.), kopā ar neatkarīgiem Kirhofa likumu izteiksmēm veido saistošo funkciju. Sistēmas dinamikas izpēte reducējas uz šo stāvokļu mainīgo izmaiņu pētīšanu atkarībā no laika. Matemātiski tas tiek realizēts, attiecinot šo stāvokļu mainīgo izmaiņas ātrumu pret to sākuma vērtībām, izmantojot diferenciālvienādojumus:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), \mu, t), \quad (2.1)$$

kur x - vektors, kurš satur stāvokļu mainīgos,

f - saistošā funkcija,

μ - parametru vektors.

Pētot noteiktas dinamiskās sistēmas uzvedību, ir nepieciešams aprēķināt trajektoriju no kāda konkrēta sākuma stāvokļa. Tomēr parasti, lai aprakstītu kādas sistēmas dinamiku, nav nepieciešamības aprēķināt visas iespējamās trajektorijas. Vienādības (2.1) kreisā puse attēlo stāvokļu mainīgo izmaiņas ātrumu. Tas pēc būtības ir vektors, kas ir izteikts kā funkcija no stāvokļu mainīgajiem. Tādējādi izteiksme (2.1) definē vektoru katrā stāvokļu telpas punktā. Pētāmās sistēmas īpašības var tikt aprakstītas, pētot šo *vektoru lauku*

Nelineāro dinamisko sistēmu analīze tiek veikta, balstoties arī uz iteratīviem attēlojumiem, kuri tiek definēti, izmantojot izteiksmi:

$$x_{n+1} = f(x_n) \quad (2.2)$$

Pētījuma sākumā tiek atrasti noteikta perioda T nekustīgie punkti (NP) $x_{n+T} = x_n = x_T^*$. Tad, izmantojot Jakobiāna matricu, ir iespējams lokāli linearizēt diskrēto sistēmu NP apkārtnē. Jakobiāna matricas īpašvērtības (multiplikatori) nosaka atrasto NP stabilitāti – diskretizētā sistēmā NP ir stabils, ja visi Jakobiāna matricas īpašvērtību moduļi ir mazāki par vieninieku.

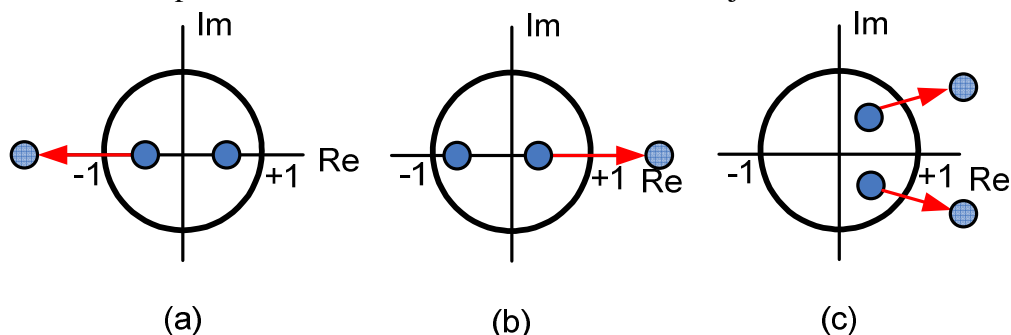
Gludās un negludās bifurkācijas

Dinamiskai sistēmai var pastāvēt vairāki līdzsvara punkti: pie noteiktas sākuma parametru un sistēmas stāvokļu kopas sistēma konverģē uz vienu no līdzsvara punktiem. Šāds

līdzsvara atrisinājums arī ir atraktors. Ja sistēmas parametri mainās, esošais līdzsvara stāvoklis var kļūt nestabils, un sistēma konverģē uz citu atrisinājumu. Doto parādību sauc par **bifurkāciju**. Vispārīgi bifurkāciju var uzskatīt par pēkšņu sistēmas kvalitatīvās uzvedības izmaiņu, kad tiek mainīts viens no parametriem.

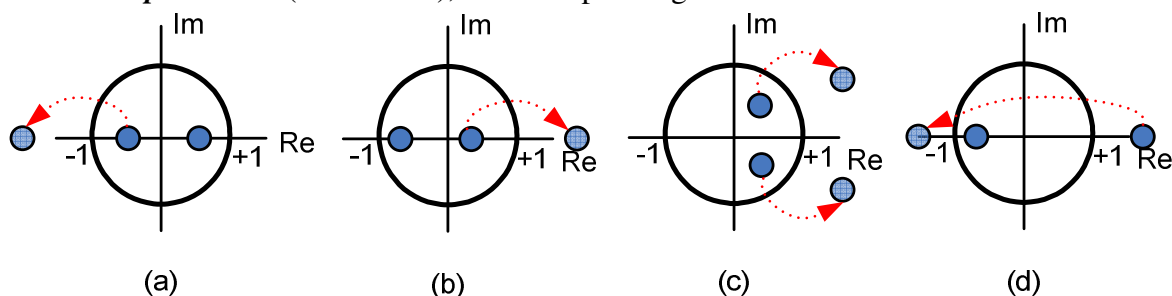
Dinamiskās sistēmās ar pārslēgšanām (pie kurām tiek pieskaitīti arī SIP) ir iespējams izdalīt divus principiāli atšķirīgus bifurkāciju tipus:

1. Pirmā kategorija iekļauj sevī visas klasiskās bifurkācijas, kuras ir sastopamas gludās dinamiskās sistēmās. Tās, savukārt, var tikt iedalītas lokālās bifurkācijās (perioda dubultošanas, seglu-mezglpunkta, dakšas un Hopfa bifurkācija), kurās periodiskais režīms zaudē stabilitāti vienam no multiplikatoriem *laideni šķērsojot vienības riņķi* (sk. 2.1. att.), un globālās bifurkācijās (homokliniskās bifurkācijās), kad bifurkāciju izraisa saite starp stabiliem un nestabiliem sistēmas atrisinājumiem.



2.1. att. Multiplikatoru iziešana ārpus vienības riņķa, divdimensionālam periodiskam režīmam zaudējot stabilitāti gludās bifurkācijas ceļā : (a) perioda dubultošanas; (b) seglu-mezglpunkta vai dakšas; (c) Hopfa bifurkācija

2. Otrā bifurkāciju kategorija tiek saukta par pārrāvumu izraisītām bifurkācijām (PIB). Dotajā gadījumā trajektorija šķērso vienu no sašūšanas virsmām – t.i., virsmām, kas sadala fāzu telpu apgabalos ar dažādu dinamiku. Katrā dota apgabala ietvaros sistēma ir gluda, bet dinamiku aprakstošie vienādojumi strauji mainās apgabalu robežās. Dotā veida bifurkācijas, kuras parasti raksturo *lēcienvēidīgas izmaiņas orbītas multiplikatoros* (sk. 2.2. att.), nav sastopamas gludās dinamiskās sistēmās.



2.2. att. Multiplikatoru iziešana ārpus vienības riņķa, divdimensionālam periodiskam režīmam zaudējot stabilitāti negludās bifurkācijas ceļā: (a) PI perioda dubultošanas; (b) PI seglu-mezglpunkta vai dakšas; (c) PI Hopfa; (d) perioda dubultošanas seglu-mezglpunkta bifurkācija

Vienkāršās PIB gadījumā ir novērojama nepārtrauktā pāreja no viena atrisinājuma veida citā. Tomēr, var tikt novērotas arī daudz sarežģītākas parādības, iekļaujot tiešo pāreju uz haotisko režīmu, dažāda veida atrisinājumu apvienošanu un pazušānu.

Deterministisks haoss

Haoss ir nelineārās sistēmas kvalitatīvā uzvedība, kuru raksturo neperiodiska un acīmredzami gadījumtrajektorija. Pie tam, dotā trajektorija nav prognozējama lielā laika

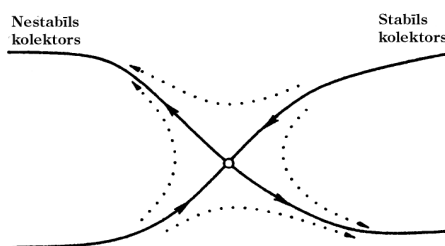
intervālā, t.i., ja ir zināma sistēmas trajektorija vienā laika momentā, tā nesniedz nekādu precīzu informāciju par to, kāda būs trajektorija tālajā nākotnē [35].

Minēsim dažas tipiskākās haosa īpašības:

- **nelinearitāte:** haotiskās parādības nav novērojamas lineārās sistēmas; nelinearitāte ir nepieciešamais, bet ne pietiekamais nosacījums haotiskās dinamikas parādīšanai;
- **determinisms:** haotisko dinamiku apraksta viens vai vairāki vienādojumi, kuru sastāvā nav iekļauti gadījums faktori; sistēmas esošo un nākamo stāvokli nosaka determinisma, nevis varbūtības likumi;
- **jūtīga atkarība no sākuma nosacījumu izvēles:** nelielas izmaiņas sistēmas sākuma nosacījumos var novest pie pilnīgi atšķirīgas sistēmas dinamikas attīstības;
- **neperiodiskums:** haotiskās orbītas ir neperiodiskas, tomēr ne visas neperiodiskas orbītas ir haotiskas (piemēram, kvaziperiodiskas orbītas nav ne periodiskas, ne haotiskas).

Invariantie kolektori un krīze

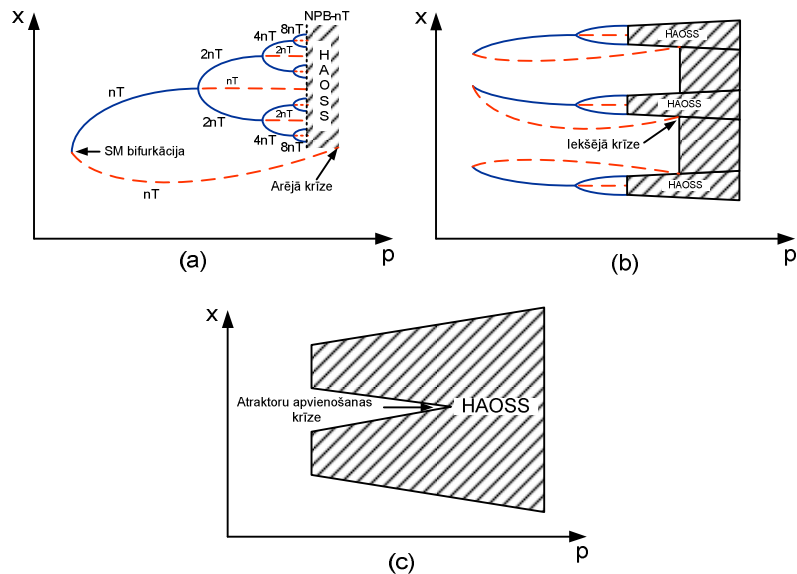
Ārpus NP apkārtnes iepriekšējās sadaļās minētais lineārizētās sistēmas apraksts nav pielietojams. Piemēram, ja tiek apskatīts seglu tipa nekustīgais punkts, īpašvektoram, kurš atrodas NP apkārtnē, piemīt sekojošā īpašība: ja sākuma nosacījums atrodas uz īpašvektora, tālāko iterāciju iegūtie punkti arī atradīsies uz īpašvektora. Ārpus NP tuvējās apkārtnes līnijas, kurām piemīt dotā īpašība, vairs nav taisnes. Tādējādi var novērot izliektas līnijas, kuras šķērso nekustīgo punktu, pie kam, ja sākuma nosacījumi atrodas uz šīm līnijām, tālāko attēlojuma iterāciju gaitā iegūtie punkti atradīsies tikai uz tām. Dotās līknes sauc par *invariantu kolektoru (invariant manifold)* (sk.2.3. att.).



2.3 .att. Regulāro seglu nestabils kolektors pievelk punktus stāvokļu telpā, bet stabils kolektors punktus atgrūž

Terminu „*krīze*” pirmoreiz ieviesa Grebogi, Ott un Jorke [19], lai aprakstītu pēkšņas kvalitatīvās izmaiņas disipatīvās sistēmas haotiskā dinamikā, mainoties vadības parametram. Krīze ir novērojama gadījumos, kad haotiskais atraktors saskaras ar nestabilu periodisku atrisinājumu (vai tā kolektoru). Savā darbā [2] autori izdalīja trīs krīzes tipus, atkarībā no haotiskā atraktora izmaiņas veida:

- pirmajā gadījumā haotiskais atraktors pēkšņi tiek iznīcināts, kad vadības parametrs a sasniedz noteiktu kritisku vērtību a_c ; doto parādību sauc par *robežas* vai arī *ārējo krīzi* (sk.2.4,(a). att.);
- otrās krīzes parādīšanas gadījumā haotiskā atraktora izmērs pēkšņi palielinās, parametram a šķērsojot noteiktu vērtību a_c – šo parādību sauc par *iekšējo krīzi* (sk.2.4,(b).att.); dotās krīzes iestāšanās laikā haotiskais atraktors saskaras ar nestabilo NP vai periodiski atrisinājumu, kas atrodas šī atraktora pievilksanas apgabalā;
- trešajā gadījumā divi vai vairāki haotiskie atraktori apvienojas, lai izveidotu vienu haotisko atraktoru, parametram a šķērsojot noteiktu vērtību a_c – šo parādību sauc par *atraktoru apvienošanas krīzi* (sk.2.4,(c).att.); jaunā haotiskā atraktora izmēri var būt lielāki nekā atsevišķo pirmskrīzes haotisko atraktoru izmēru summa.



2.4. att. Dažādi krīzes veidi: (a) ārējā krīze; (b) iekšējā krīze; (c) atraktoru apvienošanas krīze
Stabili bifurkāciju diagrammas zari tiek apzīmēti ar tumšām nepārtrauktām līnijām, nestabili- ar gaišākām pārtrauktām līnijām, iesvītrotās zonas- haotiskās darbības apgabali.

3. SPRIEGUMA IMPULSVEIDA PĀRVEIDOTĀJU NELINEĀRĀS DINAMIKAS GLOBĀLĀS PĒTĪŠNAS METODES

Promocijas darba trešajā nodaļā tiek īsi pārskatīti SIP nelineāras dinamikas pētīšanai piemērotie instrumenti. Īpaša uzmanība tiek veltīta diskrēto modeļu definēšanai, izmantojot stroboskopiskos attēlojumus, jo šāda veida attēlojumi tiks izmantoti tālāko apakšnodaļu ietvaros, veicot dažāda tipa SIP haosa un bifurkāciju pētīšanu, balstoties uz PBGM.

Dinamiskās sistēmas globālo analīzi veic pie fiksētiem sistēmas parametriem vai arī pie mainīgiem parametriem (bifurkāciju analīze). Globālā sistēmas analīze pie fiksētiem parametriem ir visu iespējamo stacionāro un nestacionāro režīmu pētīšana un to pievilksanas apgabalu konstruēšana. Globālā sistēmas analīze pie mainīgiem parametriem iekļauj visu iespējamo stacionāro un nestacionāro (pārejas) režīmu un to bifurkāciju pētīšanu, kā arī pievilksanas apgabalu struktūrās izmaiņu noteikšanu mainoties vienam vai vairākiem sistēmas parametriem.

Sistēmas dinamikas pētīšana pie fiksētiem parametriem; diskretizētā laika modeļi

Pētot sistēmas dinamiku ar fiksēto parametru kopu, tiek apskatīti daži sistēmas attīstību raksturojošie lielumi: izvēlēto mainīgo laika diagrammas, stabilā stāvokļa trajektorijas stāvokļu telpā (atraktori), izvēlēto mainīgo stabilā stāvokļa frekvenču spektri utt.

Sākotnējā attēlošanas veidā minētie parametri dažreiz neļauj atklāt sistēmas uzvedības īpatnības (piemēram, ne vienmēr var atšķirt haotiskās un kvaziperiodiskās sistēmas darbības mainīgo laika diagrammas), tomēr attēlojot dotos raksturlielumus atbilstošos formātos, noteiktas sistēmas uzvedības identificēšana ir realizējama daudz vieglāk. Darbā tiek izmantoti trīs datu attēlošanas formāti:

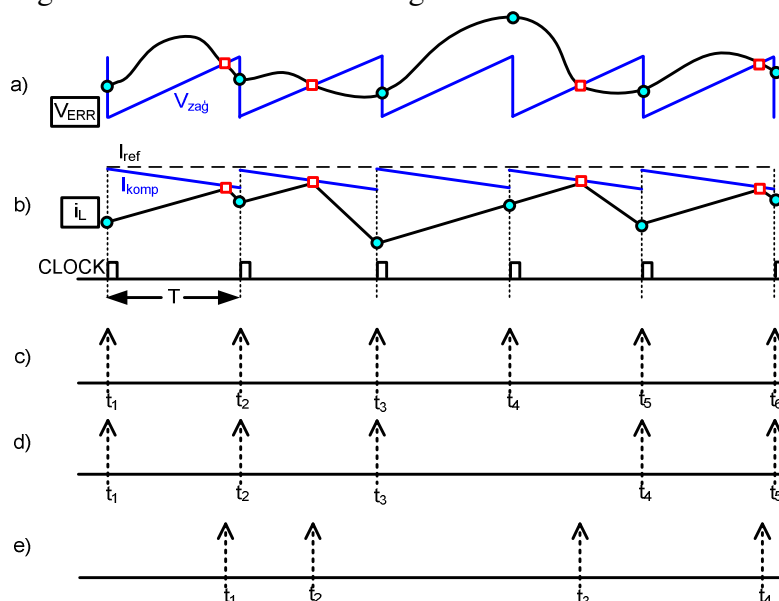
- nolašu dati vai stroboskopiskie attēlojumi;
- fāzes portreti vai divdimensionālās projekcijas;
- Puankarē šķēlumi.

Viens no svarīgākajiem soļiem jebkuras dinamiskās sistēmas haosa un bifurkāciju pētīšanas procesā ir sistēmas darbību aprakstošu modeļu izvēle. Pētījumu mērķim piemērotā

apraksta izvēle ir svarīga precīzu rezultātu ieguvei, kurus vēlāk ir iespējams salīdzināt ar eksperimentāli iegūtiem datiem. SIP dinamika tiek aprakstīta ar diferenciālvienādojumu sistēmām kopā ar atbilstošiem pārslēgšanas nosacījumiem. Šie modeļi parāda sistēmas dinamiku nepārtraukta laika apgabalā un var tikt izmantoti, lai iegūtu analītisko un skaitlisko modelējamās fiziskās sistēmas aprakstu. Tomēr, ja pētnieka mērķis ir saprast nelineāro parādību būtību un dabu, ko rada nepārtraukta laika dinamiskā sistēma, tad plaši tiek pielietoti alternatīvie diskretie modeļi. Plaši pielietojamos diskretizētā laika attēlojumus var iedalīt atkarībā no nolases momenta izvēles [10]:

- stroboskopiskie attēlojumi;
- pārslēgšanas attēlojumi;
 - S-tipa attēlojumi;
 - A-tipa attēlojumi.

Minēto attēlojumu veidi ir parādīti 3.1.att., kur kā piemēri tiek izmantoti ar strāvu vadāmo un ar spriegumu vadāmo SIP vadības signāli.



3.1. att. (a) Tipiskie zāģveida (V_{zag}) un kļūdas (V_{ERR}) signāli ar spriegumu vadāmam SIP; (b) tipiskās induktora strāvas (i_L) un atbalsta strāvas (I_{ref}) laika diagrammas ar strāvu vadāmam SIP ar kompensējošu zāģveida signālu (I_{komp}); (c) stroboskopiskā attēlojuma nolases (tiem (a) un (b) attēlos atbilst iekrāsotie aplī); (d) S-tipa attēlojuma nolases; (e) A-tipa attēlojuma nolases (tiem (a) un (b) zīmējumos atbilst iekrāsotie kvadrāti)

Jāpiezīmē, ka visi 3.1. att. parādītie diskreto modeļu iegūšanas paņēmieni ir gandrīz ekvivalenti sistēmas periodisko režīmu pētīšanas procesā. Atšķirības rodas tad, kad sistēmas dinamika kļūst neperiodiska. Šādos gadījumos nolases laiki stroboskopiskam attēlojumam paliek periodiski, bet A-tipa un S-tipa pārslēgšanas attēlojumiem tie kļūst atkarīgi no pārslēgšanas nosacījumu izpildes. Darba ietvaros sprieguma pārveidotāju nelineārās dinamikas analīzei tiek izmantoti, galvenokārt, stroboskopiskie attēlojumi vairāku iemeslu dēļ:

- SIP ar impulsu platumu modulatoriem ir sistēmas ar periodisku ārēju iedarbību un stroboskopisko attēlojumu definēšana šāda veida sistēmām ir vienkāršāka nekā citu veidu attēlojumu iegūšana;
- darbā izmantotā PBGM balstās uz dinamisko sistēmu aprakstu uz stroboskopisko attēlojumu bāzes.

Sistēmas dinamika pie mainīgiem parametriem

Nelineārās sistēmas dinamika ir atkarīga no dažādu parametru vērtību izmaiņām. Pāreja no viena uzvedības veida citā var notikt pēkšņi pat tad, ja kādi sistēmas parametri tiek lēni mainīti. Kā jau tika minēts iepriekšējās sadaļās, tādu negaidītu sistēmas uzvedības izmaiņu sauc par ***bifurkāciju***.

Visplašāk bifurkāciju pētīšanai izmanto ***bifurkāciju diagrammu***, kura pēc būtības ir dažādu sistēmas uzvedību tipu pārskata grafiks, mainoties kādam sistēmas parametram. Vienkāršākā gadījumā tiek mainīts tikai viens parametrs un bifurkācijas diagramma ir $p - x$ grafiks, kurā dati x tiek attēloti pret izvēlēto parametru p .

Praksē sistēmas dinamikas pētīšanai pie mainīgiem parametriem tiek izmantotas ***Monte Karlo bifurkāciju diagrammas***, kuru konstruēšanas pamati balstā uz vienkāršo pārejas procesu un fāzu telpas skenēšanas metodi. Iegūtās bifurkāciju diagrammas dod noteiktu priekšstatu par sistēmas dinamiku, parametram mainoties noteiktā vērtību intervāla ietvaros. Tomēr šāda veida diagrammām piemīt virkne būtisku trūkumu, kuri tika atzīmēti darba ievaddaļā.

4. PILNO BIFURKĀCIJU GRUPU METODE UN TĀS MODIFICĒŠANA SIP NELINEĀRĀS DINAMIKAS GLOBĀLAI PĒTĪŠANAI

Darba ceturtā nodaļā tiek aprakstītas PBGM ietvaros pielietojamās koncepcijas un specifiski jēdzieni, metodes pamatā esošie nelineāro sistēmu dinamikas pētīšanas algoritmi un to pilnveidojumi, pielāgojot tos SIP kompleksās dinamikas analīzei, kā arī darba autora piedāvātie bifurkāciju karšu robežu un invarianto kolektoru konstruēšanas algoritmi.

Kā jau tika atzīmēts šī darba ievaddaļā, promocijas darbs ir veltīts PBGM pielietošanas iespēju pētīšanai, veicot sprieguma impulsveida pārveidotāju nelineārās dinamikas globālo analīzi. Pētījuma virziena izvēle ir saistīta ar to, ka veicot SIP dinamikas analīzi, izmantojot tradicionālās analītiskās un skaitliskās pieejas, daudzi svarīgi un dažreiz pat būtami darbības režīmi paliek nepamanīti.

PBGM un ar to saistīto pieeju komplekss nav pilnīgi izkopts tādēļ, ka šīs pieejas ideoloģija ir izstrādāta tikai pēdējos gados. Tāpēc dotajā nodaļā tiek aprakstīta PBGM būtība, pilnveidoti metodē pielietojamie algoritmi, sniegtas galvenās rekomendācijas, pielietojot šo metodi SIP nelineārās dinamikas analīzei.

PBGM būtība un fundamentālās koncepcijas

PBGM un uz tās bāzes izveidotais algoritmu un programmatūras komplekss ļauj tipiskajos un plaši pielietojamos nelineāros modeļos atrast jaunus periodiskus un neperiodiskus (haotiskus) režīmus, jaunas bifurkāciju grupas un veikt dažādu bifurkāciju grupu mijiedarbības analīzi. PBGM tika izstrādāta periodiskām dinamiskām sistēmām, kuras var tikt aprakstītas ar diferenciālvienādojumu vai diskretizētā laika vienādojumu sistēmām. Metodes ietvaros par ***periodisko sistēmu*** tiek uzskatīta dinamiskā sistēma, kurai var atrast vismaz vienu periodisku atrisinājumu visā apskatāmo parametru diapazonā.

PBGM pamatā ir sekojošas koncepcijas (tālāk pieminēto terminu definīcijas ir atrodamas darba 2. pielikumā):

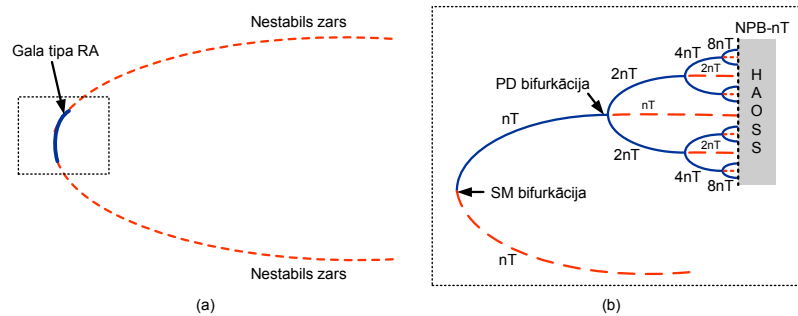
- 1) DS ***periodiskais skelets*** parametru telpas punktam p_0 un atrasto ***periodisko un haotisko orbītu pases***;
- 2) ***pilnā bifurkāciju grupa nT*** ir tāda grupa, kura sastāv no visiem stabiliem un nestabiliem nT atrisinājumiem (orbītām, režīmiem), kuri ir apvienoti ar elementārām bifurkācijām kopā ar visiem atzarojumiem, kas parādās bifurkāciju punktos;
- 3) ***NPB apakšgrupa*** ir pilnās bifurkāciju grupas nT daļa ar Nestabilo Periodisko režīmu Bezgalību (NPB) un, tāpat, haotisko darbību; NPB apakšgrupa sastāv tikai no apskatāmās bifurkāciju grupas nestabilām orbītām un NPB parādīšanās gludās sistēmās ir saistīta ar perioda dubultošanas kaskādes beigām [71,72]; savukārt

negludās sistēmās NPB var parādīties arī pēc pārrāvumu izraisītās bifurkācijās, kad perioda dubultošanas kaskāde tiek „saspiesta” līdz vienam punktam;

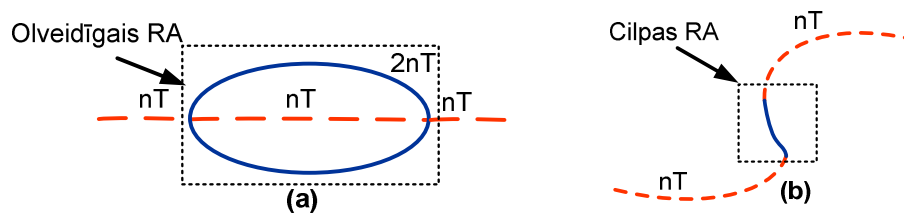
- 4) **retie atraktori** ir strukturāli stabili atraktori, kuri eksistē ierobežotā (šaurā) parametru telpas apgabalā; retie atraktori var būt gan periodiski, gan haotiski un tie veido nozīmīgu topoloģiskās struktūras sastāvdaļu visās nelineārās DS;

PBGM ietvaros uz doto brīdi izšķir četrus RA veidus:

1. gala tipa (tip type) RA (sk.4.1. att.);
2. olveidīgais (egg-like) RA (sk.4.2,(a). att.);
3. cilpas (kink) jeb histerēzes (hysteresis) RA (sk.4.2,(b). att.);
4. izolētās salas (isola isle) RA .

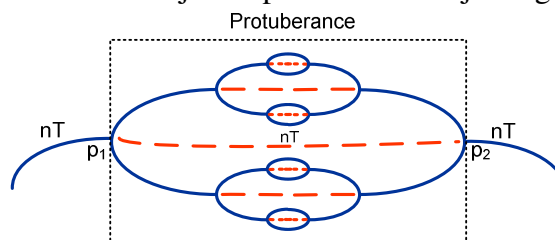


4.1. att. Gala tipa retais atraktors: (a) garš nestabils zars ar nelielu stabilu apgabalu – gala tipa RA; (b) gala tipa RA raksturīgā struktūra: no vienas puses atraktoru rada seglumezglpunkta bifurkācija, no otras puses ir novērojama perioda dubultošanas kaskāde, kura beidzās ar nestabilo periodisko režīmu bezgalības radīšanu un haotisko režīmu. Tumšās nepārtrauktās līnijas attēlo stabilos režīmus un gaišās pārtrauktās līnijas – nestabilos režīmus.



4.2. att. (a) Olveidīga RA raksturīgās struktūras piemērs: no abām pusēm atraktoru rada subkritiskā vai superkritiskā perioda dubultošanas bifurkācija; (b) cilpas tipa RA – gara nestabila zara cilpas vietā novērojams neliels stabils apgabals. Tumšās nepārtrauktās līnijas attēlo stabilos režīmus un gaišās pārtrauktās līnijas – nestabilos režīmus.

- 5) **kompleksās protuberances**, kas parādās starp iekšējiem bifurkāciju punktiem (kuros nT atrisinājumi maina savu stabilitāti) pie atbilstošām parametru vērtībām p_1 un p_2 (sk. 4.3. att.); protuberances var attīstīties tālu no punktiem p_1 un p_2 , un to topoloģiskā struktūra var būt ļoti komplicēta pat vienkāršo nelineāro sistēmu gadījumā; teorija, kura balstās uz protuberances pētījumiem, ļauj prognozēt un izskaidrot daudzas negaidītās parādības, kas izpaužas plašos parametru telpas apgabalos ar NPB un retiem atraktoriem un ir novērojamas pilnās bifurkāciju diagrammās;



4.3. att. Protuberance ar komplicētu struktūru.

Tumšās nepārtrauktās līnijas attēlo stabilos režīmus un gaišās pārtrauktās līnijas – nestabilos režīmus. Protuberance parādās starp diviem bifurkāciju punktiem p_1 un p_2 , kuros režīms nT maina savu stabilitāti.

- 6) *tipiskās bifurkāciju topoloģiskās grupas* ar stabilām un nestabilām orbītām un NPB, un to mijiedarbība vienā parametru apgabalā;
- 7) *haotisko atrektoru un pārejas procesu topoloģiskā struktūra*, to parādīšanas un pazušanas mehānismi; DS vienā parametru apgabalā var veidot vairākus NPB, kuri savukārt veido haotiskos atrektorus.

PBGM ietvaros izmantotie algoritmi un to pilnveidojumi

- **Ņūtona - Kantoroviča metodes izmantošana dinamisko sistēmu periodisko režīmu atrašanai**

Veicot dinamisko sistēmu pētīšanu, plašu pielietojumu guva punktveida attēlojuma metode (PAM) [87]. Nekustīgo punktu atrašanai parasti izmanto vienkāršas iterācijas metodes, kā arī palīgattēlojuma metodes [87]. Vienkāršas iterācijas metodei (arī palīgparametra ieviešanas gadījumā) piemīt zems konverģences ātrums un tā neļauj atrast daļu no seglu tipa NP, kuriem ir liela nozīme fāžu telpas pētījumu procesā. Tādējādi rodas nepieciešamība pielietot punktveida attēlojuma operatoram komplicētākās metodes – piemēram, Ņūtona metodi, kuras vispārinājumu L.Kantorovičs ir pielietojis operatora vienādojumu risināšanai [83,84].

- **Periodisko režīmu stabilitātes novērtēšana**

Periodisko režīmu stabilitātes pētījumi [2,11] balstās uz Floke teoriju, no kuras izriet, ka sistēmas periodiskais atrisinājums ir stabils tad un tikai tad, ja tā multiplikatori kompleksā plaknē atrodas vienības riņķa iekšpusē, t.i., $|\lambda_i| \leq 1$ visiem i . Tā kā multiplikatori tiek aprēķināti kā attiecīgās monodromijas matricas (kura tiek izskaitļota pētāmajam periodiskam režīmam) īpašvērtības, galvenais uzdevums, veicot stabilitātes novērtēšanu reducējas uz monodromijas matricas G konstruēšanu.

Pieņemsim, ka pētāmai sistēmai tiek nodefinēts atbilstošs diskretizētā attēlojuma operators F :

$$x^* = F_T(x^*) , \quad (4.1)$$

kur $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ - sistēmas fāžu koordinātu vektors;
 $F(x) = (F(x_1), F(x_2), \dots, F(x_n))^T$ - diskretā attēlojuma operatora vektor-funkcija.

Pētāmā režīma stabilitātes novērtēšanai (t.i., multiplikatoru λ atrašanai) tiek sastādīts atbilstošais raksturīgais vienādojums:

$$|G - I\lambda| = 0. \quad (4.2)$$

Praksē monodromijas matricas G iegūšana analītiskā formā parasti ir apgrūtināta, tāpēc matricas atrašanai var tikt izmantota skaitliskā aproksimācija:

$$\begin{vmatrix} \frac{F_1(x_1 + \Delta, x_2, \dots, x_n) - F_1(x)}{\Delta} - \lambda & \frac{F_1(x_1, x_2 + \Delta, \dots, x_n) - F_1(x)}{\Delta} & \dots & \frac{F_1(x_1, x_2, \dots, x_n + \Delta) - F_1(x)}{\Delta} \\ \frac{F_2(x_1 + \Delta, x_2, \dots, x_n) - F_2(x)}{\Delta} & \frac{F_2(x_1, x_2 + \Delta, \dots, x_n) - F_2(x)}{\Delta} - \lambda & \dots & \frac{F_2(x_1, x_2, \dots, x_n + \Delta) - F_2(x)}{\Delta} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{F_n(x_1 + \Delta, x_2, \dots, x_n) - F_n(x)}{\Delta} & \frac{F_n(x_1, x_2 + \Delta, \dots, x_n) - F_n(x)}{\Delta} & \dots & \frac{F_n(x_1, x_2, \dots, x_n + \Delta) - F_n(x)}{\Delta} - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (4.3)$$

kur Δ - neliela ierosināšana atvasinājumu skaitliskam aprēķinam.

Jāpiezīmē, ka diskretizācijas parametram Δ ir jābūt pietiekoši mazam, lai samazinātu operatora F nelinearitātes ietekmi uz matricas G_k aprēķiniem.

Aprakstītais periodisko režīmu stabilitātes novērtēšanas paņēmiens ir universāls un var tikt pielietots gan analītiskām izteiksmēm, gan arī iekļauts skaitliskos algoritmos. Pielietojot

NP atrašanai NKM, lielākā daļa skaitļošanas laika tiek veltīta skaitliskiem monodromijas matricas aprēķiniem, kas manāmi apgrūtina pētīšanas procesu.

Promocijas darba ietvaros tiek pielietots NP atrašanas un to stabilitātes novērtēšanas algoritma pilnveidojums, atrodot analītiskās izteiksmes monodromijas matricas un atbilstošo periodisko režīmu stabilitātes noteicošo multiplikatoru aprēķinam. Iegūtās izteiksmes tiek izmantotas gan skaitlisko algoritmu rezultātu pārbaudei, gan arī tiek iekļautas darba autora izstrādātā programmatūrā, daudzkārt paātrinot NP meklēšanas un to stabilitātes novērtēšanas algoritmu izpildi, vienlaikus uzlabojot arī algoritma precizitāti.

- ***Pilno bifurkāciju diagrammu konstruēšana un reto atraktoru meklēšana***

Viens no svarīgākajiem nelineāro sistēmu dinamikas pētīšanas etapiem ir bifurkāciju diagrammu konstruēšana. Konstruēšanas procesa rezultātā iegūtā informācija uzskatāmi raksturo izmaiņas sistēmas kvalitatīvajā uzvedībā, mainoties sistēmas tiešam vai kompleksam parametram. Bifurkāciju diagrammas ļauj noteikt visu bifurkāciju atrašanas vietas, noteikt apgabalus ar haotisko dinamiku, atrast retos atraktorus, kuri noved pie negaidītām sistēmas dinamikas izmaiņām.

Darbā tiek konstruētas:

- pilnās bifurkāciju diagrammas, izmantojot turpinājumu pēc parametra – dotā metode ļauj konstruēt zarus, kas atbilst stabiliem un nestabiliem periodiskiem režīmiem, ļaujot atrast jaunas BG un RA;
- Monte Karlo bifurkāciju diagrammas, izmantojot pārejas procesu metodi – minētā pieeja tiek izmantota neperiodiskās darbības bifurkāciju diagrammu apgabalu konstruēšanai.

Konstruējot pilnās bifurkāciju diagrammas, problēmas rodas tad, kad bifurkāciju diagrammas zars maina savu virzienu uz pretējo (piemēram, seglu-mezglpunkta bifurkācijas rezultātā). Dotajā gadījumā tiek plaši pielietota metode, ko literatūrā [34] dēvē par „turpinājumu pēc līknes garuma” (*arc-length continuation*).

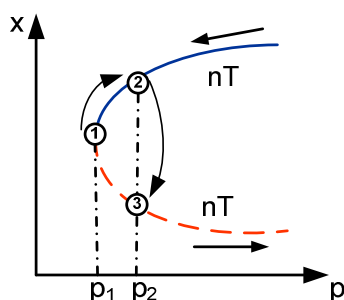
Atzīmēsim būtiskos minētās metodes trūkumus:

- bifurkāciju zara turpinājuma procesā tiek izmantots ar bifurkāciju parametru saistītais kompleksais lielums, kura aprēķins jāveic katrā diagrammas punktā, kas prasa papildus resursus un daudzkārt palielina skaitliskiem aprēķiniem nepieciešamo laiku;
- „turpinājums pēc līknes garuma” ļoti reti ļauj iziet negludo bifurkāciju punktus un veikt tālāko bifurkāciju diagrammas konstruēšanu [11].

Minēto iemeslu dēļ promocijas darbā tiek piedāvāta inovatīva metode, kura ļauj ātri un efektīvi veikt bifurkāciju zaru konstruēšanu, palēninot skaitlisko aprēķinu procesu tikai bifurkāciju punktu apkārtnē un sniedzot iespēju veikt turpinājumu pēc parametra, izejot gan gludo, gan SIP īpaši bieži sastopamo negludo bifurkāciju punktus. Jaunas metodes pamatā ir PBGM ietvaros izstrādātā periodiskā skeleta koncepcija.

Apskatīsim darba autora SMPS CHAOS programmatūrā realizētā kritisko punktu iziešanas oriģinālā algoritma būtību. Pieņemsim, ka nT režīma bifurkācijas zara konstruēšana sākas ar stabilo periodisko režīmu (sk.4.7. att.) bifurkāciju parametra samazināšanas virzienā. Nonākot punktā 1 algoritms konstatē, ka tālākais parametra samazinājums noved pie dotā periodiskā režīma pazušanas. Aprakstītā situācija var tikt novērota, piemēram, seglu-mezglpunkta bifurkācijas rezultātā, kad stabils periodiskais režīms zaudē stabilitāti un bifurkācijas punktā saplūst ar nestabilo periodisko režīmu. Bifurkāciju diagrammas konstruēšanai ir nepieciešams veikt pāreju punktā 3. Dotā pāreja ir iespējama, ja no punkta 1 tiek realizēta pāreja punktā 2 (t.i., tiek veikts „solis atpakaļ”) un pie parametra p_2 vērtības (sk.4.7 .att.) sistēmai tiek sastādīts periodiskais skelets, kurā tiek iekļauti tikai nT periodiskie režīmi. Periodiskā skeleta iekļautie dati tiek izmantoti atbilstošā turpinājuma punkta izvēlei. Jāpiebilst, ka tuvojoties bifurkāciju punktam vai bifurkāciju zara krokai atbilstošais skaitliskās

modelēšanas soļa kontroles algoritms manāmi samazina aprēķinu soli, lai pēc iespējas precīzāk noteiktu pagrieziena punkta koordinātes.



4.7. att. Kritisko punktu iziešanas algoritms

Tumšas nepārtrauktas līnijas attēlo stabilos režīmus un gaišas pārtrauktas līnijas – nestabilos režīmus.

Atšķirībā no plaši pielietojama algoritma, kas balstās uz turpinājuma pēc līknes garuma, darba autora piedāvātā metode bez jebkādas modifikācijas var tikt pielietota gludo un negludo bifurkāciju, kā arī bifurkāciju zaru pagriešanas punktu iziešanai. Minētais algoritms prasa papildus skaitļošanas resursu piesaistīšanu tikai bifurkāciju zaru pagriešanas punktos (kad tiek realizēta periodiskā skeleta konstruēšana), manāmi samazinot kopīgo skaitļošanai nepieciešamo laiku.

- ***Bifurkāciju karšu un divdimensionālo bifurkāciju diagrammu konstruēšana parametru plaknē***

Veicot nelineāro sistēmu dinamikas analīzi, bieži vien ir nepieciešams izpētīt sistēmas kvalitatīvās uzvedības izmaiņas, mainoties diviem vai vairākiem parametriem (piemēram, SIP darbības laikā var mainīties gan slodzes pretestības, gan ieejas sprieguma vērtības). Tāpēc viens no svarīgākajiem dinamisko sistēmu bifurkāciju analīzes uzdevumiem ir ***bifurkāciju karšu*** konstruēšana, kuras sadala divu sistēmas parametru plakni apgabalos ar kvalitatīvi vienādu dinamiku (periodiskiem režīmiem un haotisko dinamiku).

Bifurkāciju karšu konstruēšanas procesā visplašāk tiek izmantota šūnu attēlošanas metode [59], kuras ietvaros parametru plakne tiek sadalīta vienādās šūnās un tiek veiktas iterācijas, nosakot katras šūnas režīma periodiskumu. Dotai metodei piemīt virkne būtisku trūkumu:

- lieli skaitļošanas laiki;
- ja sistēmā eksistē vairāki līdzāspastāvoši atraktori, to atrašanai katrā šūnā ir nepieciešams izmantot vairākus sākuma nosacījumus, kas palielina aprēķinu laikus vēl par vairākām kārtām;
- bieži vien nav iespējams precīzi noteikt divu režīmu bifurkāciju robežu.

Minēto trūkumu dēļ pilnās bifurkāciju analīzes realizācijai PBGM ietvaros tiek pielietota daudz efektīvākā metode – ***pārvietošanās pa bifurkāciju robežām***. Šīs metodes ietvaros tiek uzdotas bifurkāciju punktu koordinātes un tiek veikts šo punktu turpinājums divu parametru plaknē. SMPS CHAOS programmatūrā tiek izmantota aprakstītās metodes modifikācija, kura ļauj daudzkārt samazināt skaitļošanas laikus, kā arī var tikt pielietota negludo bifurkāciju punktu turpinājumam. ***Darba autora piedāvātā algoritma detalizēts apraksts ir atrodams promocijas darba 1. pielikumā.***

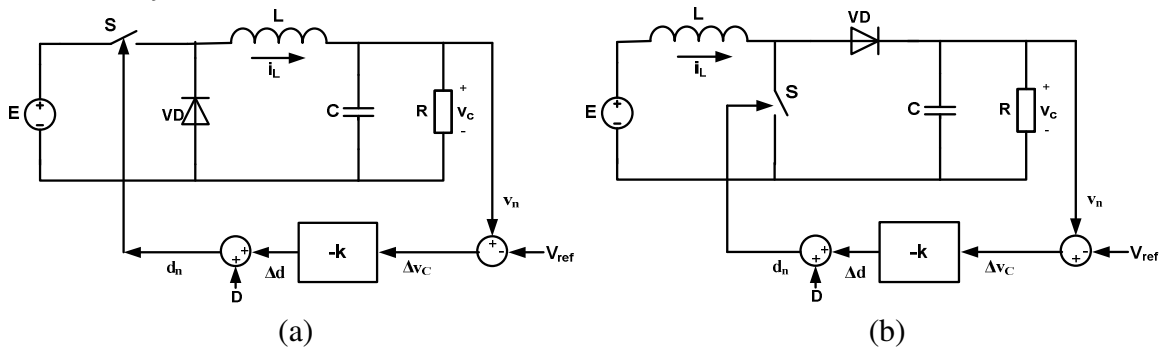
5. NELINEĀRĀS DINAMIKAS PĒTĪŠANA BUCK UN BOOST PĀRVEIDOTĀJOS, TIEM DARBOJOTIES PĀTRAUKTAS STRĀVAS REŽĪMĀ (PSR)

Darba piektā nodaļā tiek veikta nelineārās dinamikas izpēte buck un boost tipa SIP, kuri darbojas pārtrauktās strāvas režīmā (PSR). Pirmajā apakšnodaļā tiek definēti buck un

boost pārveidotāju dinamiku aprakstošie diskrētie modeļi, kuri otrās apakšnodaļas ietvaros tiek izmantoti, veicot SIP dinamikas analītiskos pētījumus, kā arī uz to pamata trešā apakšnodaļā tiek veikta skaitliskā analīze, balstoties uz PBGM: sastādītas bifurkāciju kartes dažādu parametru plaknēs, pilnās vienparametriskās bifurkāciju diagrammas, izpētītas galvenās buck un boost SIP nelineārās dinamikas īpatnības. Ceturtā apakšnodaļa ir veltīta analītiski un skaitliski iegūto rezultātu pārbaudei, izmantojot datora modelēšanu PSpice vidē, kā arī laboratorijas eksperimentus (buck pārveidotājam). Piektais apakšnodaļas ietvaros tiek veikta pārveidotāju stabilitātes analīze, balstoties uz amplitūdas–frekvenču raksturlīknēm, kas tiek iegūtas no vidējotiem modeļiem. Tiek novērtēta šo praksē plaši pielietojamo modeļu izmantošanas iespējas dažāda veida bifurkāciju prognozēšanai SIP, kuri darbojas pārtrauktas strāvas režīmā.

Buck un boost SIP diskrētie modeļi

SIP atslēgu pārslēgšanas procesu vada periodiskie signāli, tāpēc sistēmas dinamiku ir iespējams aprakstīt, izmantojot stroboskopisko attēlojumu, kurā stāvokļu mainīgo vērtības x laika momentā $t_n=nT$ tiek izteiktas, izmantojot x vērtības laika momentā $t_{n-1}=(n-1)T$. Šāds diskrētais modelis atvieglos pārveidotāju nelineārās dinamikas analītisko pētīšanu un skaitliskos rēķinus.



5.1. att. (a) Buck un (b) boost pārveidotāju shēmas ar atgriezenisko saiti pēc sprieguma

C.K.Tse savos darbos [61,62] ir piedāvājis diskrētos modeļus buck un boost tipa pārveidotāju ar proporcionālo atgriezeniskos saiti (sk. 5.1. att.) dinamikas aprakstam PSR. Tāpat minētais autors ir eksperimentāli pierādījis [62], ka neskatoties uz to, ka modeļu iegūšanas procesā tika izmantoti vienkāršojumi, tai skaitā izvērzišana Teilora rindā un augstākās kārtas locekļu atmešana, piedāvātie modeļi ļoti precīzi apraksta pārveidotāju dinamiku un ļauj prognozēt daudzas nelineārās parādības. Tse izveidotie modeļi pēc būtības ir sekojošie pirmās kārtas iteratīvie attēlojumi:

$$buck : v_{C,n+1} = \alpha v_{C,n} + \frac{\beta(H(D - k(v_{C,n} - V_{ref})))^2 E(E - v_{C,n})}{v_{C,n}} ; \quad (5.1)$$

$$boost : v_{C,n+1} = \alpha v_{C,n} + \frac{\beta(H(D - k(v_{C,n} - V_{ref})))^2 E^2}{v_{C,n} - E} , \quad (5.2)$$

kur

$$buck: D = \sqrt{\frac{(1-\alpha)V_C^2}{\beta E(E - V_C)}} ; boost: D = \sqrt{\frac{(1-\alpha)(V_C - E)V_C}{\beta E^2}} ; \alpha = 1 - \frac{T}{RC} + \frac{T^2}{2C^2 R^2}$$

$$\beta = \frac{T^2}{2LC} ,$$

kur D - stabilā stāvokļa (vidējais) darbcikla koeficients;

V_C - stabilā stāvokļa (vidējais) spriegums uz kondensatora ($V_C = V_{ref}$);

k - maza signāla atgriezeniskās saites pastiprinājums;

V_{ref} - atbalsta spriegums;

$H(.)$ - funkcija, kas tiek ieviesta, ņemot vērā ierobežotu darbcikla koeficienta pieļaujamo vērtību apgabalu [0...1].

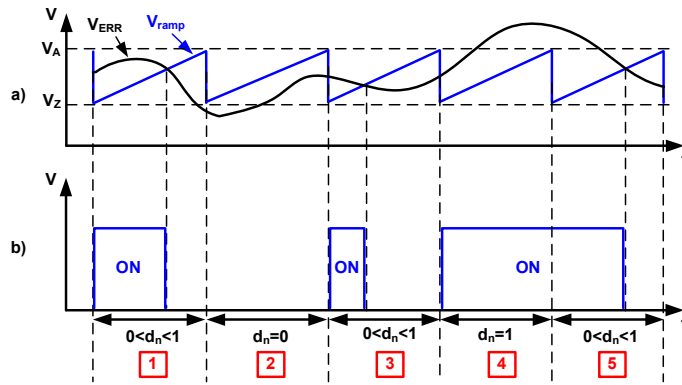
Tse piedāvātie modeļi ir pirmās kārtas diferencu vienādojumi, jo katrā pārslēgšanas momentā nT pārveidotāju induktora strāva ir nulle, tāpēc diskrētos modeļos i_L netiek apskatīts kā stāvokļa mainīgais un sistēmu dinamiku nosaka pirmās kārtas vienādojumi $v_{n+1}(v_n)$.

Iegūtie diskrētie modeļi tiek izmantoti nākamo apakšnodaļu ietvaros pētīt *buck* un *boost* pārveidotāju nelineāro dinamiku, izmantojot atbilstošās analītiskās un skaitliskās metodes.

Buck un boost SIP nelineārās dinamikas analītiskā pētīšana

Veicot *buck* pārveidotāja diskrētā modeļa analītisko pētīšanu apakšnodaļas ietvaros:

- tiek konstatēts, ka dotā veida SIP, darbojoties PSR, var tikt novērotas gan gludās bifurkācija, gan arī negludās bifurkācijas, kuras rodas vadības ķēdes impulsu



5.2. att. Vadības shēmas a) kļūdas un zāģveida sprieguma signāli; (b) vadības signāls

platuma modulatora darbcikla koeficienta piesātinājuma (sk.5.2.att. apgabalus 2 un 4) rezultātā un kuru parādīšanos ir iespējams prognozēt, izmantojot sekojošās izteiksmēs definētās robežas:

$$\text{ja } d_n=0, \text{ tad } v_{C,n_BORD_0} = \frac{D}{k} + V_{ref}; \quad (5.3)$$

$$\text{ja } d_n=1, \text{ tad } v_{C,n_BORD_1} = \frac{D-1}{k} + V_{ref}. \quad (5.4)$$

- tika noteikts, ka proporcionālas atgriezeniskās saites ieviešanas gadījumā, palielinoties atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficientam k , *buck* pārveidotājā kā pirmā ir novērojama perioda dubultošanas kaskāde, kura noved pie haotiskās darbības un tikai vēlāk parādās arī negludās bifurkācijas;
- iepriekšējā punktā minētā bifurkāciju parādīšanas secība ļāva veikt perioda dubultošanas kaskādes analītiskos pētījumus:
 - tika parādīts, ka P1 un augstāko kārtu periodisko režīmu stabilitāti ir iespējams novērtēt, izmantojot sekojošo analītisko izteiksmi:

$$\lambda = \frac{\partial(v_{C,n+1})}{\partial(v_{C,n})} = \alpha + \frac{\beta E [2k(-kv_{C,n}^3 + (D + V_{ref}k)v_{C,n}^2 - EDV_{ref}) - Ek^2(V_{ref}^2 - v_{C,n}^2) - ED^2]}{v_{C,n}^2}; \quad (5.5)$$

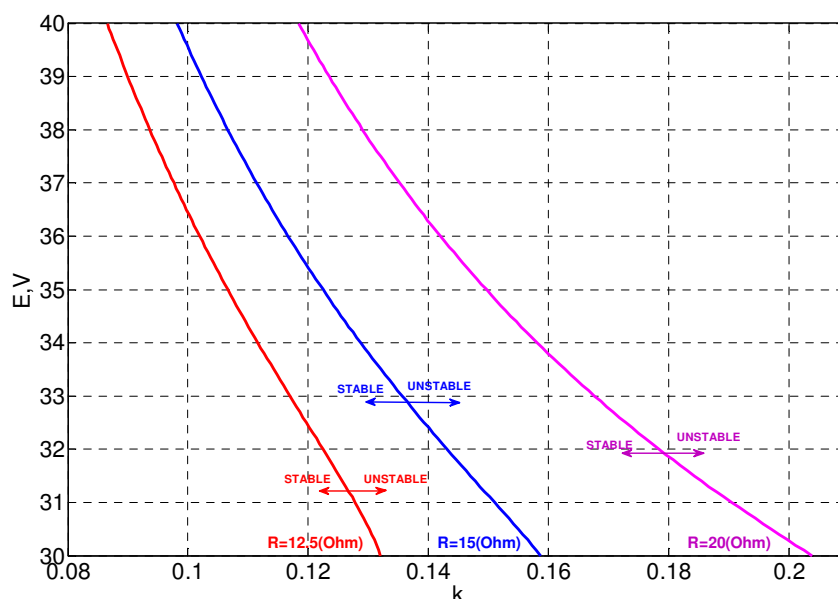
- pārveidotājs darbojas stabilā P1 režīmā, kamēr multiplikatora λ absolūtā vērtība ir mazāka par 1, t.i.:

$$|\lambda| = \left| \alpha - \frac{\beta ED[2kV_{ref}(E - V_{ref}) + DE]}{V_{ref}^2} \right| < 1, \quad (5.6)$$

kas ļauj definēt kritisko atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficienta vērtību k_{krit} , pārsniedzot kuru sistēmā ir novērojamas perioda dubultošanas bifurkācijas (subharmoniskās svārstības un haoss) [61]:

$$k_{krit} = \frac{(1 + \alpha)V_{ref}^2 - \beta E^2 D^2}{2\beta EDV_{ref}(E - V_{ref})}; \quad (5.7)$$

- o tika iegūti grafiki, kuri ļauj noteikt k_{krit} , mainoties *buck* pārveidotāja ieejas spriegumam un slodzes pretestībai (sk.5.3. att.), ka arī konstatēts, ka projektēšanas laikā pieļaujamo k diapazons, kurā sistēma darbosies stabilā P1 režīmā, ir jānosaka pie maksimālā pieļaujamā ieejas sprieguma un minimālās slodzes pretestības.



5.3. att. Kritiskā atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficienta atkarība no ieejas sprieguma pie dažādām slodzes pretestību vērtībām

Pa labi no katras līnijas atrodas nestabilās (subharmoniskās) darbības apgabals, bet pa kreisi - stabilas perioda-1 darbības apgabals

Atzīmēsim, ka visi minētie apakšnodaļas secinājumi ir attiecināmi arī uz *boost* pārveidotāju, kura analītiskā pētīšana ir atrodama darba 3. pielikumā.

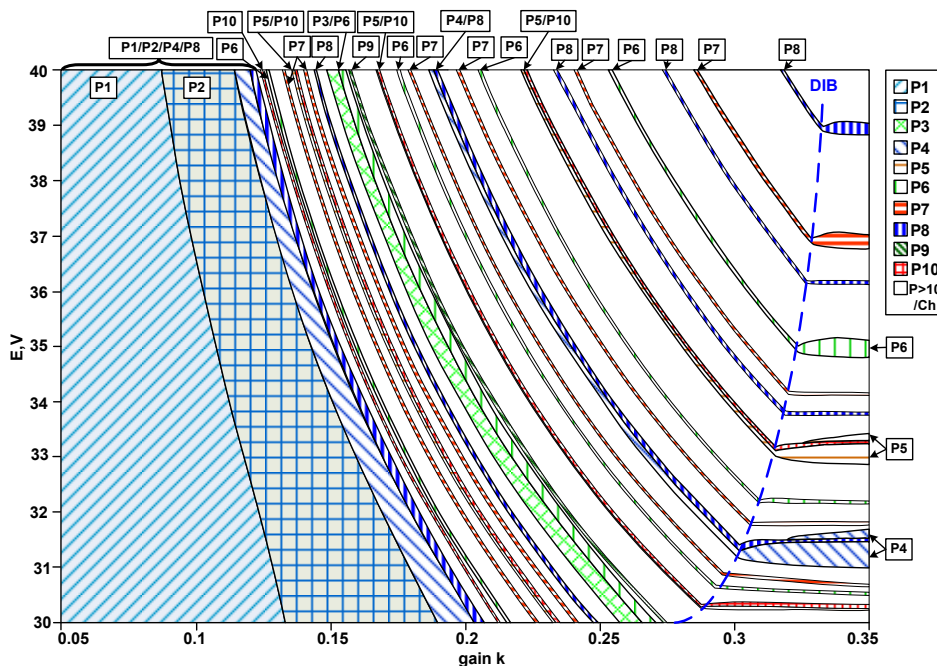
Buck un boost pārveidotāju dinamikas pētīšana PSR ar PBGM, modelēšanu PSpice vidē un laboratorijas eksperimentiem

Pētījuma sākumā tiek izvēlēti primārais un sekundārais bifurkāciju parametri, kuru izmaiņa ietekmē SIP kvalitatīvos radītājus, kā arī dažādu periodisko režīmu stabilitātes apgabalu izmērus un izvietojumu parametru plaknē: ieejas spriegums E un atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficients k .

Veicot *buck* un *boost* pārveidotāju nelineārās dinamikas pētīšanu PSR, izmantojot PBGM, PSpice modelēšanu un laboratorijas eksperimentus, ir iespējams izdarīt sekojošus secinājumus, kuri ir saistīti ar:

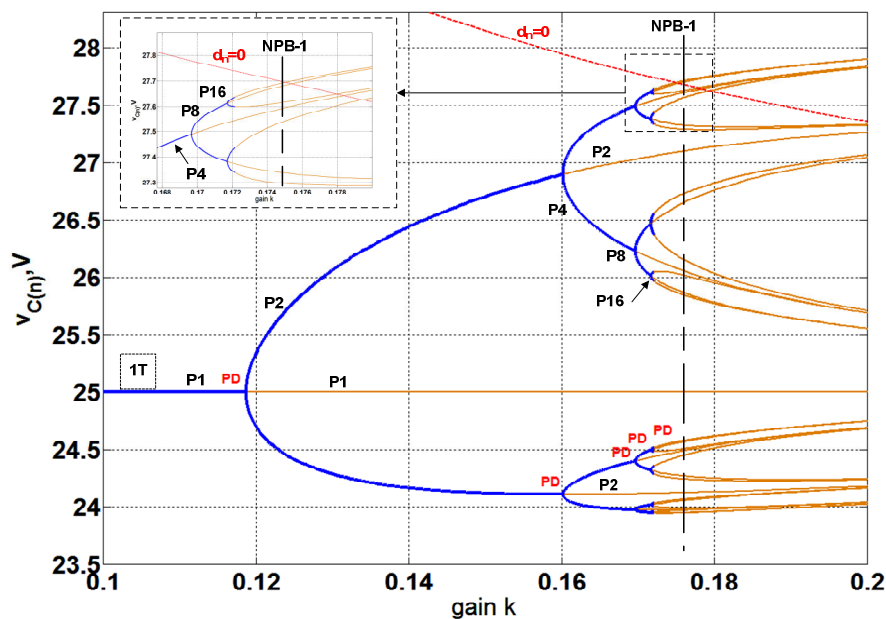
A. SIP stabilitāti un haotizāciju:

- sastādītās bifurkāciju kartes (sk., piemēram, 5.4. att.) ļauj secināt par dažādu parametru plakņu komplekso sadalījumu periodisko un haotisko režīmu apgabalos;



5.4. att. PSR *buck* pārveidotāja bifurkācijas karte $E-k$ parametru plaknē

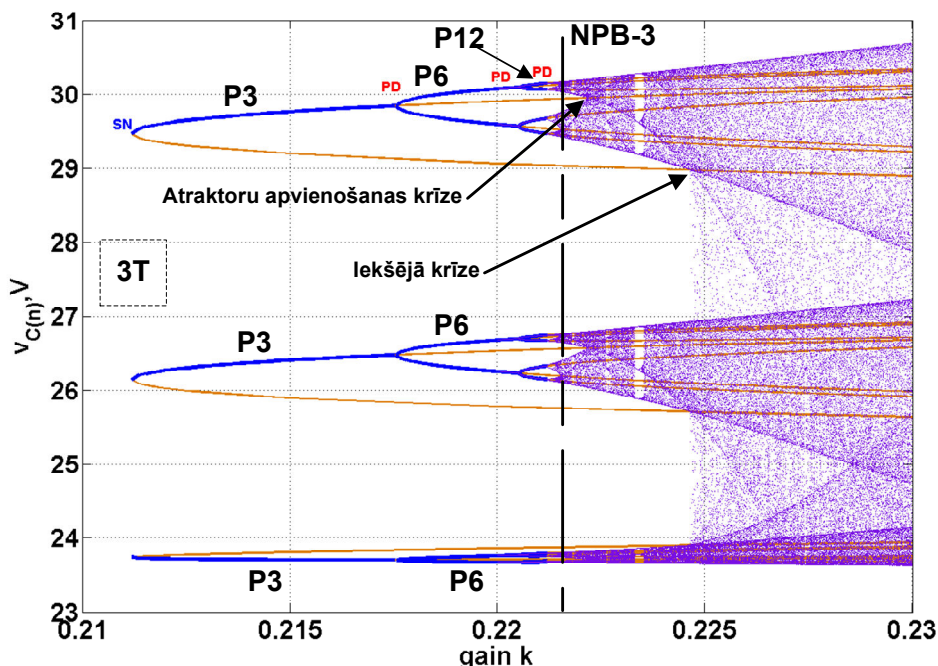
- iegūtās kartes ļauj pārveidotāja projektēšanas procesā izvēlēties atbilstošo darbības apgabalu pēc iespējas tālāk no bifurkāciju robežām;
- iegūtās pilnās bifurkāciju diagrammas ļāva izpētīt tipiskās BG, *buck* un *boost* pārveidotāju haotizācijas scenārijus, reto atrektoru, protuberanču un iegremdēto salu parādīšanās iespējamību:
 - konstatēts, ka mainoties atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficienta vērtībai, pārveidotājā ir iespējama gludo perioda dubultošanas bifurkāciju secība (sk. 5.5. att.) ar tālāko haotizāciju bifurkāciju akumulācijas punktā (kurā rodas atbilstošās BG NPB un kura atrašanās vietu ir iespējams novērtēt, izmantojot Feigenbauma haosa universāluma teoriju);



5.5. att. *Buck* pārveidotāja pilnās bifurkāciju diagrammas *IT* BG pie $E=33$ V

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi līdz P16. Pārtrauktā līnija parāda darbcikla koeficienta momentānās vērtības piesātinājuma robežu. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija; NPB – bezgalīgā skaita nestabilo periodisko režīmu apgabals.

- *sastādītās BG, modelēšanas un eksperimentu rezultāti liecina par to, ka dotā procesa ietvaros, palielinoties perioda dubultošanas kaskādē iekļautā režīma periodam, manāmi pieaug izejas sprieguma pulsāciju līmenis;*
- konstatēts, ka pārveidotāju globālo haotisko atraktoru izveidošanās ir saistīta ar atsevišķu BG rādīto haotisko atraktoru savstarpējo mijiedarbību (krīzes rezultātā – sk. 5.6. att.), vai arī ar šo atraktoru saskaršanos ar pētāmās BG minimālā periodiskā režīma nestabiliem bifurkācijas diagrammas zariem (t.i., ar atraktora izplēšanās seglu punktu nestabila kolektora apgabalā);

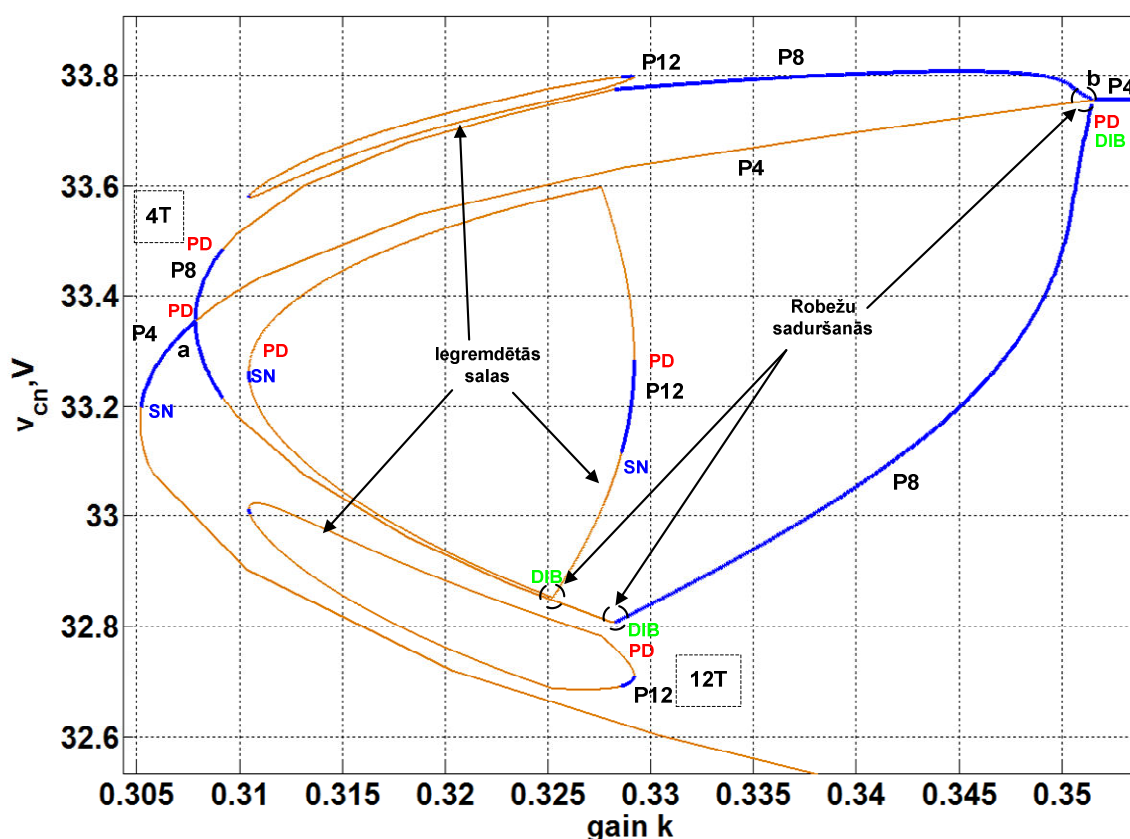


5.6. att. Buck pārveidotāja pilnās bifurkācijas diagrammas 3T BG pie $E=33$ V apvienotā ar Monte Karlo bifurkācijas diagrammu (aizkrāsots apgabals)

Diagrammā attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi. Tiek pielietoti apzīmējumi: PD- perioda dubultošanās bifurkācija; NPB-bezgalīgā skaita nestabilo periodisko režīmu apgabals; SN- seglu-mezglpunkta bifurkācija.

- *tā kā seglu punkta nestabilo kolektoru izmēri var būt lielāki par atsevišķiem pētāmo BG ietvaros novērotiem haotiskās dinamikas apgabaliem, tad iekšējās krīzes iestāšanās var novest pie manāma izejas sprieguma pulsāciju pieauguma;*
- izpētīta negludo parādību (t.i., darbcikla koeficienta piesātinājuma) ietekme uz pārveidotāja dinamiku un konstatēts, ka saduršanās ar izteiksmē (5.3) definēto robežu nerada kvalitatīvās izmaiņas BG struktūrā, tātad arī pārveidotāja darbībā;
 - *minētais novērojums norāda uz to, ka izlaisto ciklu parādīšanās ISP darbībā (t.i., gadījumos, kad kļūdas signāls komparatora ieejā kļūst mazāks par zāģveida signāla apakšējo robežu un atslēgas elements paliek nevadošā stāvoklī veselu periodu- sk. 5.2. att.) nenoved pie būtiskām kvalitatīvām izmaiņām pārveidotājā dinamikā;*
- konstatēts, ka saduršanās ar izteiksmē (5.4) definēto robežu (t.i., kad atslēgas elements paliek vadošā stāvoklī vairāk par vienu periodu), rada pārrāvuma izraisīto perioda dubultošanas un seglu-mezglpunkta bifurkāciju parādīšanos, kuru rezultātā ir novērojamas straujas pārmaiņas pārveidotāju dinamikā;
 - *kļūdas signālam komparatora ieejā pārsniedzot augšējo zāģveida signāla robežu un atslēgas elementam paliekot vadošā stāvoklī veselu periodu, buck un boost pārveidotājos ir novērojama pēkšņa subharmonisko režīmu parādīšanās ar tālāko svārstību haotizāciju;*

- izpētīta PIB izraisīto komplekso protuberanču un iegremdēto salu veidošanās atsevišķo BG ietvaros;



5.7. att. (a) *Boost* pārveidotāja pilnās bifurkācijas diagrammas 4T BG pie $E=11.4$ V

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanās bifurkācija; SN- segļu-mezglpunkta bifurkācija; DIB – pārrāvuma izraisītā bifurkācija.

- *nelielu ieejas sprieguma izmaiņu rezultātā vai ārēju trokšņu ietekmē ir novērojama pāreja subharmoniskos un haotiskos darbības režīmos, kā arī pārleķšana uz līdzāspastāvošiem iegremdēto salu ietvaros novērojamiem reti atraktoriem, kas noved pie ārkārtējās pārveidotāju dinamikas komplicēšanas.*

- veiktā *buck* un *boost* vidējoto modeļu analīze ļauj secināt, ka tie nav izmantojami haosa un subharmonisko svārstību prognozēšanai;

B. SIP EMS uzlabošanu:

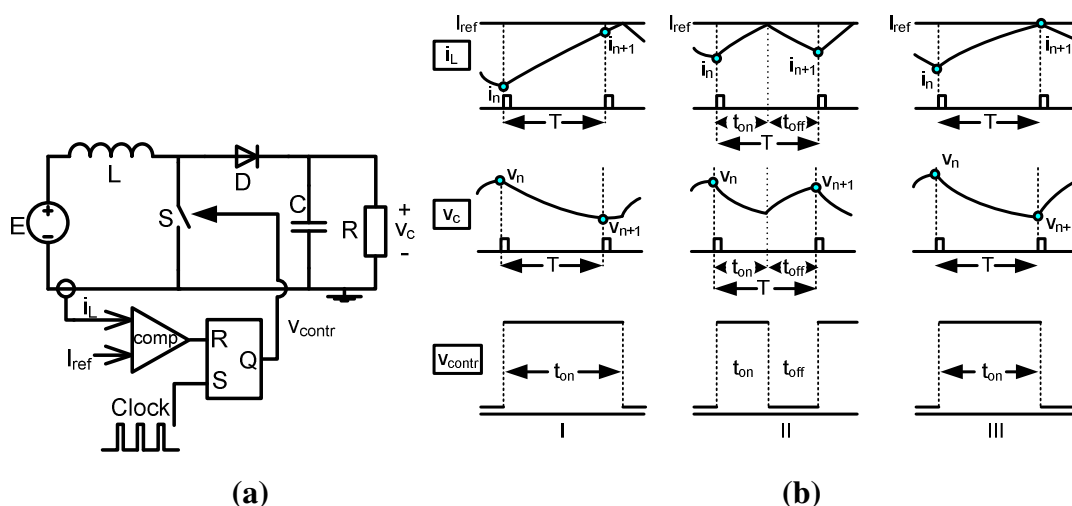
- tiek parādīts, ka haotiskā apgabalā pastāv arī citas gludo un negludo segļu-mezglpunkta bifurkāciju radītās BG, kuru ietvaros ir novērojami arī gala tipa retie atraktori, nosakot to, ka haotiskā darbība nav robustā;
 - *periodisko logu un reto atraktoru parādīšanās neļauj izmantot haotisko režīmu pārveidotāja elektromagnētiskās saderības uzlabošanai, jo vismazākie trokšņi var novest pie pārejas no haotiskā režīma subharmonisko svārstību apgabalā;*
- izklāsta gaitā veiktais iegūto rezultātu salīdzinājums ar analītiski un eksperimentāli iegūtajiem datiem ļauj konstatēt, ka uz PBGM pamata veiktie pētījumi ļauj iegūt precīzus datus par pārveidotāja dinamikas raksturojumiem un to izmaiņām.

6. NELINEĀRĀS DINAMIKAS PĒTĪŠANA AR STRĀVU VADĀMAM BOOST PĀRVEIDOTĀJAM, KURŠ DARBOJAS NEPĀRTRAUKTAS STRĀVAS REŽĪMĀ

Sestās nodaļas ietvaros tiek veikta boost pārveidotāja ar atgriezenisko saiti pēc strāvas nelineārās dinamikas izpēte, izmantojot diskretizētā laika modelēšanas pieeju, analītiskās metodes, skaitliskos rēķinus uz autora izstrādāto algoritmu un PBGM bāzes, kā arī modelēšanu SIMULINK vidē. Galvenā uzmanība tiek pievērsta iekšējās strāvas cilpas dinamikai, kura noteiktos apstākļos var kļūt nestabila, izraisot virkni nelineāro parādību.

Boost pārveidotāja diskrētā modeļa realizācija

Praktiski pielietojamiem boost SIP izejas sprieguma regulēšana notiek, izmantojot divas atgriezeniskās saites – iekšējo strāvas saiti un ārējo sprieguma saiti. Nodaļā galvenā uzmanība tiek pievērsta iekšējās strāvas cilpas dinamikas pētīšanai, tāpēc analīzei var izmantot arī modeli bez atgriezeniskās saites pēc sprieguma (sk. 6.1,(a). att.). Šāds pieņēmums ir pieļaujams, jo ārējās atgriezeniskās saites darbība ir daudz lēnāka un tās mērķis ir pieskaņot atbalsta strāvas vērtības atbilstoši slodzes pretestības izmaiņām. Tādējādi atgriezeniskās saites pēc sprieguma izslēgšana no analīzes neietekmē iekšējās strāvas cilpas augstfrekvences dinamiku.



6.1. att. (a) Boost pārveidotājs ar strāvas vadību; (b) induktora strāvas, kondensatora sprieguma un vadības signāla laika diagrammas

Boost pārveidotāja darbību ir iespējams aprakstīt, izmantojot diferenciālvienādojumu sistēmas, tomēr aprēķinos un analītiskajos pētījumos daudz vienkāršāk ir darboties ar diskrētiem attēlojumiem. Ar strāvu vadāms boost pārveidotājs izceļas ar to, ka šim SIP ir iespējams iegūt diskrēto modeli noslēgtā formā bez jebkādiem vienkāršojumiem [6,14,52] (kuri tika pielietoti, iegūstot ar spriegumu vadāmu buck un boost pārveidotāju modeļus PSR).

Balstoties uz novērojumu, ka boost pārveidotājā pastāv trīs iespējamie pārslēgšanas varianti starp diviem takts impulsiem (sk.6.1,(b). att.), katram no variantiem tiek sastādīts SIP dinamiku aprakstošais diskrētais modelis, vēlāk apvienojot iegūtos diferenču vienādojumus, definējot attiecīgo pārslēgšanas nosacījumu:

$$I_{border} = I_{ref} - \frac{ET}{L}. \quad (6.1)$$

Ja induktora strāvas vērtība apskatāmā intervāla sākumā $i_n < I_{border}$, tad nākamo nolasi atrod, izmantojot izteiksmes :

$$\begin{cases} v_{(n+1)} = v_n e^{-T/RC} \\ i_{(n+1)} = i_n + ET/L \end{cases} \quad (6.2)$$

savukārt, ja $i_n \geq I_{border}$, ir jāizmanto izteiksmes (6.3) un (6.4):

$$v_{n+1} = e^{-mt_{off}} [K_1 \cos(\mu t_{off}) + K_2 \sin(\mu t_{off})] + E; \quad (6.3)$$

$$i_{n+1} = e^{-mt_{off}} \left[C[-m(K_1 \cos(\mu t_{off}) + K_2 \sin(\mu t_{off})) + \mu(-K_1 \sin(\mu t_{off}) + K_2 \cos(\mu t_{off}))] + \frac{K_1 \cos(\mu t_{off}) + K_2 \sin(\mu t_{off})}{R} \right] + \frac{E}{R}, \quad (6.4)$$

kur $K_1 = v_n e^{-2mt_{on}} - E$; $K_2 = (I_{ref} / C - m(v_n e^{-2mt_{on}} + E)) / \mu$; $t_{on} = (I_{ref} - i_n)L / E$; $t_{off} = T - t_{on}$; $\mu = \sqrt{p^2 - m^2}$; $m = 1 / 2RC$ un $p = \sqrt{1 / LC}$.

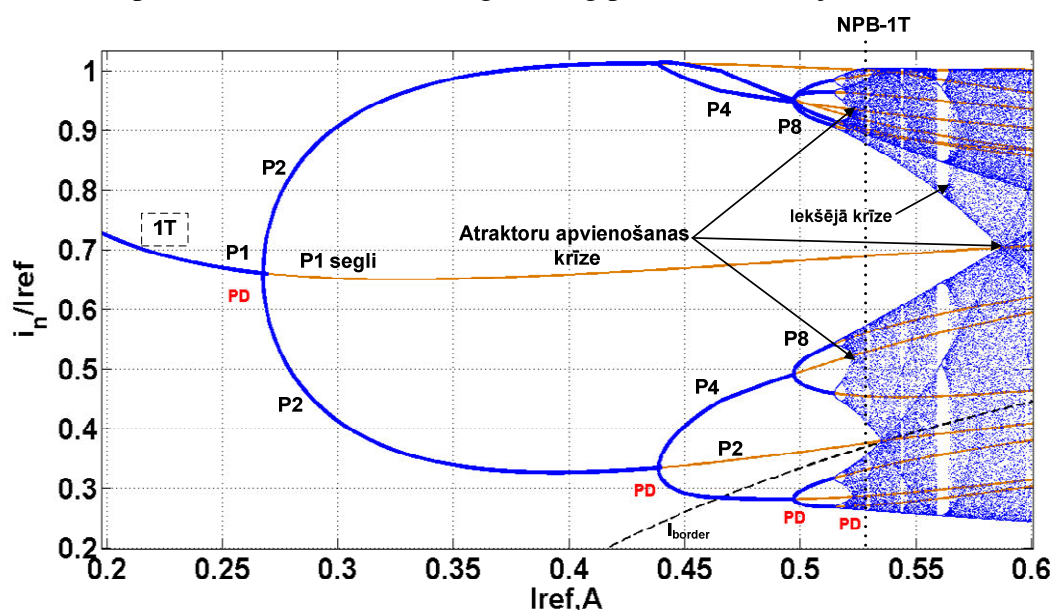
Izmantojot iegūto modeli, ir iespējams veikt *boost* pārveidotāja nelineārās dinamikas pētīšanu uz PMBG pamata, nerisīnāt diferenciālvienādojumu sistēmas un neveicot Puankarē šķēluma aprēķinus (iegūtais modelis pēc būtības ir stroboskopiskais attēlojums).

Ar strāvu vadāmā boost pārveidotāja dinamikas pētīšana ar PBGM un modelēšanu SIMULINK vidē

6. nodaļas ietvaros veiktā ar strāvu vadāmā *boost* pārveidotāja nelineārās dinamikas analīze, balstoties uz PBGM un modelēšanu SIMULINK vidē ļauj izdarīt sekojošus secinājumus, kas ir saistīti ar:

A. SIP stabilitāti un haotizāciju:

- izpildoties nosacījumam $T / RC \gg 1$ SIP ir novērojamas gludo bifurkāciju izpausmes, kad sistēmas periodisko režīmu stabilitātes zudumu un jauno režīmu parādīšanos nosaka perioda dubultošanas un seglu-mezglpunkta bifurkācijas (sk. 6.2. att.);

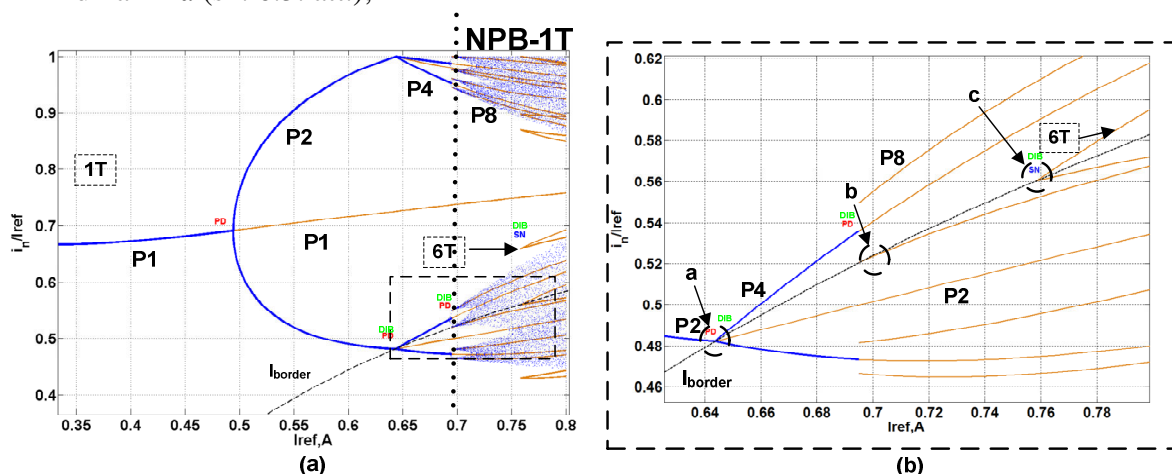


6.2. att. *Boost* pārveidotāja pilnā bifurkāciju diagramma *IT* BG pie $T / RC \gg 1$ apvienotā ar Monte Karlo bifurkāciju diagrammu (aizkrāsots apgabals)

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi līdz P8. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija; SN- seglu-mezglpunkta bifurkācija; NPB- bezgalīgā skaita nestabilo periodisko režīmu apgabals. Uz ordinātu ass tiek atlikta pret atbalsta strāvu normētā induktora strāva. Pārtrauktā līnija parāda izteiksmē (6.1) definēto robežu.

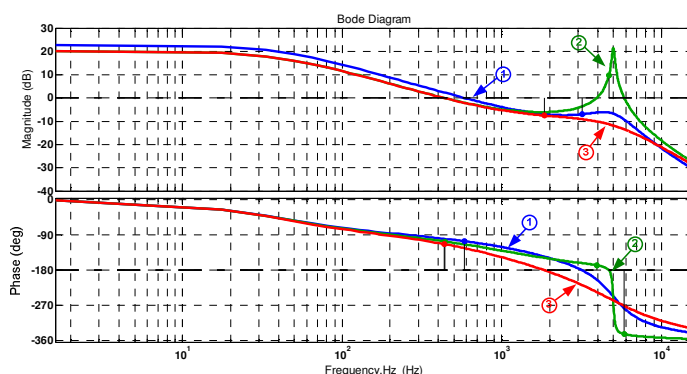
- sistēmas globālā haotiskā atraktora veidošanos nosaka atraktoru apvienošanas, iekšējā un ārējā krīze, kuru rezultātā būtiski pieaug strāvu un spriegumu pulsāciju amplitūdas SIP;

- PBGM ietvaros nestabilo bifurkāciju diagrammas zaru konstruēšanai ir būtiska nozīme SIP nelineāro parādību identificēšanā un izskaidrošanā:
 - nestabilo periodisko režīmu dinamikas pētīšana, mainoties shēmas parametriem, ļauj prognozēt dažāda tipa krīžu iestāšanos (sk. 6.2. att.);
 - seglu tipa nekustīgā punkta nestabilā kolektora struktūra viennozīmīgi nosaka jaunizveidoto subharmonisko un haotisko atraktoru parametrus un izvietojumu stāvokļu plaknē (tātad arī atbilstošās induktora strāvas un kondensatora sprieguma amplitūdas);
 - nestabilo periodisko režīmu bifurkāciju diagrammas zari ļauj izpētīt fundamentāli dažādu bifurkāciju tipu (gludo un PIB) mijiedarbību vienas diagrammas ietvaros un precīzi klasificēt jaunizveidotos režīmus;
- *boost* pārveidotājā ir novērojams jauns *gala tipa reto atraktoru veids*, kuru nosaka perioda trīskāršošana un nestabilo periodisko režīmu kopas izveidošana PIB punktā;
- izpildoties nosacījumam $T/RC \ll 1$ *boost* pārveidotāja nelineāro dinamiku lielā mērā nosaka dažāda tipa PIB, izraisot negludo perioda dubultošanas un seglu-mezglpunkta bifurkāciju parādīšanos, kuras noved pie pēkšņām kvalitatīvām izmaiņām SIP dinamikā (sk. 6.3. att.);



6.3. att. (a) *Boost* pārveidotāja pilnā bifurkāciju diagramma $1T$ un $6T$ BG pie $T/RC \ll 1$; (b) diagrammas fragments, kas parāda negludo perioda-dubultošanas un seglu-mezglpunkta bifurkāciju parādīšanos

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi līdz P8. Pielietoti sekojoši apzīmējumi: PD - perioda dubultošanas bifurkācija; SN - seglu-mezglpunkta bifurkācija; DIB - pārrāvuma izraisītā bifurkācija. Izteiksmē (6.1) definētā robeža ir attēlota kā pārtrauktā tumšā līnija.



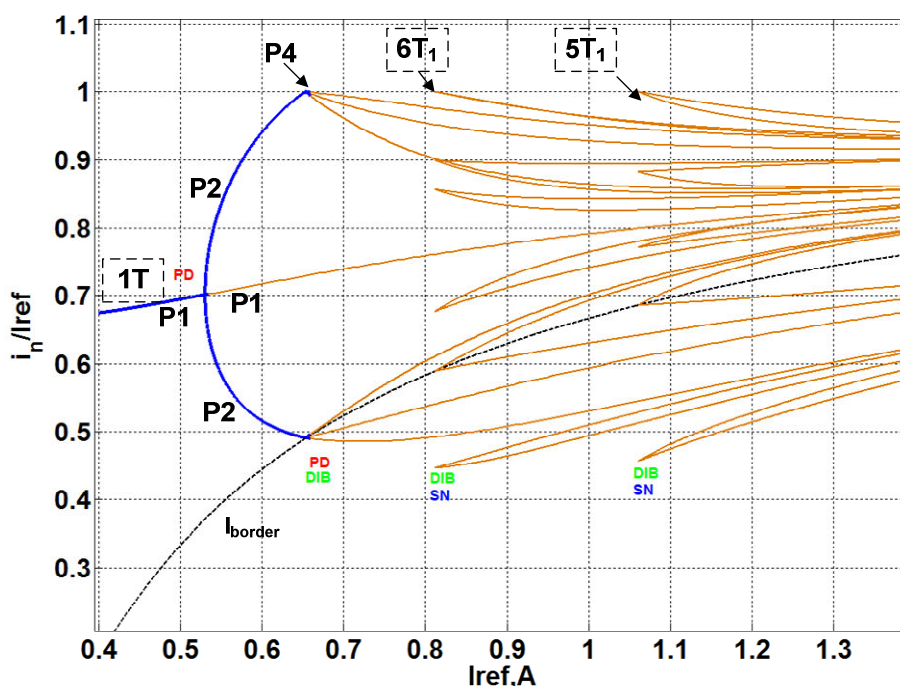
6.4. att. Uz Ridlija modeļa pamata iegūtās *boost* SIP amplitūdas un fāzes frekvenču raksturlīknes

Līknēm 1 atbilst stabils perioda-1 režīms (fāzes rezerve ap 76° un pastiprinājuma rezerve ap 7dB); līknēm 2 atbilst haotiskais SIP darbības režīms (amplitūdas frekvenču raksturlīkne šķērso 0dB pie $f=5850$ Hz *bez* fāzes rezerves, kā arī pie $f=4700$ Hz nepastāv pastiprinājuma rezerve, kas norāda uz nevēlamo subharmonisko svārstību parādīšanas iespējām un sistēmas nestabilitāti); līknēm 3 atbilst stabils perioda-1 darba režīms, sistēmā ieviešot kompensējošu zāgveida signālu (fāzes rezerve ap 67° un pastiprinājuma rezerve ap 7.5dB).

- Ridlija [55] piedāvātais vidējotais *boost* SIP modelis ļauj prognozēt ne tikai subharmonisko, bet **arī haotisko režīmu** parādīšanos ar strāvu vadāmā pārveidotājā, kā arī novērtēt kompensējošā zāģveida signāla ietekmi uz P1 režīma stabilitāti (sk. 6.4. att.);

B. SIP EMS uzlabošanu:

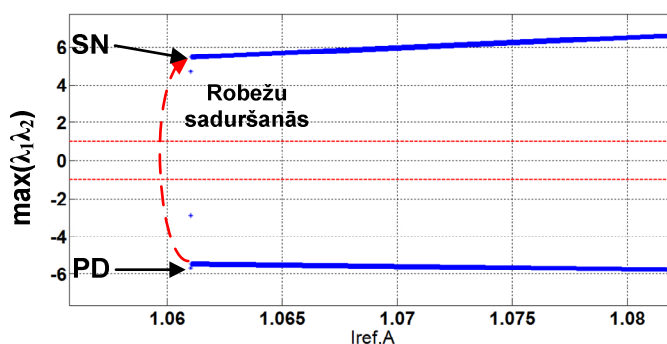
- pārveidotāja EMS uzlabošanai ir iespējams izmantot robustā haosa apgabalus, kuri izveidojas *boost* pārveidotājā bez kompensējošā zāģveida signāla, izpildoties nosacījumam $T/RC \ll 1$;
- robustā haosa parādīšanās ir saistīta ar:
 - **pirmoreiz novēroto** nestabilo periodisko režīmu bezgalības apgabalu izveidošanos PIB ceļā, visai perioda dubultošanas kaskādei attīstoties vienā parametru plaknes punktā (sk. 6.5. att.);



6.5 att. *Boost* pārveidotāja pilnā bifurkāciju diagramma $1T$, $5T$ un $6T$ BG pie $T/RC \ll 1$

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi līdz P6. Pielietoti sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija; SN- segļu-mezglpunkta bifurkācija; DIB- pārrāvuma izraisītā bifurkācija.

- netipisko perioda dubultošanas segļu-mezglpunkta bifurkāciju, kuras rezultātā izveidojas tikai nestabili periodiskie režīmi, neizveidojot periodiskos logus (sk. $6T_1$ un $5T_1$ BG 6.5. att.);



6.17. att. $5T$ bifurkāciju grupas P5 režīma multiplikatoru atkarība no I_{ref}

Pārtrauktās horizontālās līnijas parāda kritiskās multiplikatora vērtības (-1 un +1), pie kurām ir novērojamas bifurkācijas. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija; SN- segļu-mezglpunkta bifurkācija.

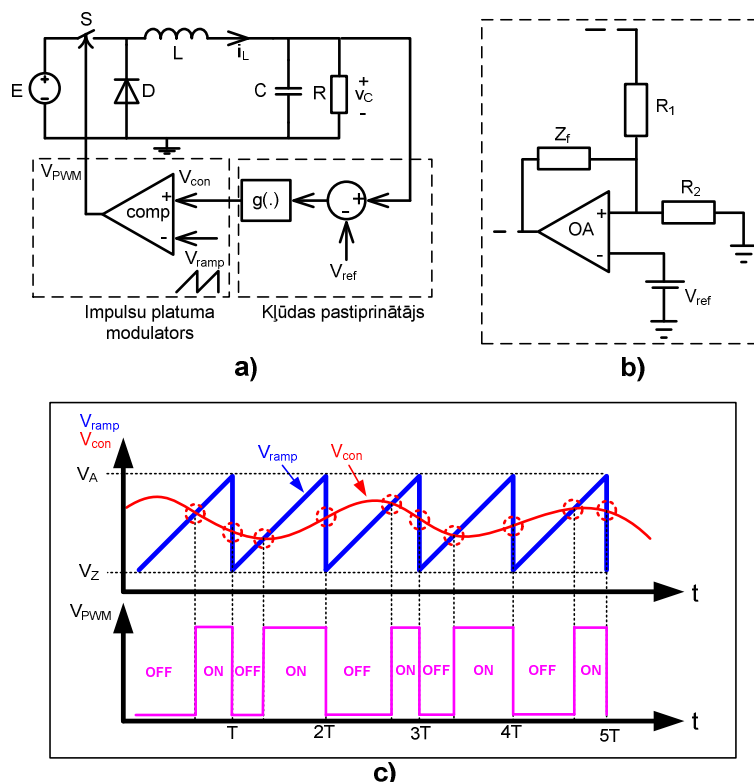
- kompensējošā zāģveida signāla ieviešana ne tikai būtiski palielina P1 režīma darbības apgabalu, bet izmaina arī visu parametru plaknes sadalījumu pēc stabilo periodisko režīmu darbības apgabaliem, nepieļaujot robustā haosa izveidošanos, tāpēc EMS uzlabošanas pielietojumos ar robustā haosa palīdzību nav pieļaujama kompensējošā zāģveida signāla ieviešana pārveidotāja atgriezeniskas saites cilpā.

7. NELINEĀRĀS DINAMIKAS PĒTĪŠANA AR SPRIEGUMU VADĀMAM BUCK PĒRVEIDOTĀJAM, KURŠ DARBOJAS NEPĀRTRAUKTAS STRĀVAS REŽĪMĀ

Septītās nodaļas ietvaros tiek veikta ar spriegumu vadāmā buck pārveidotāja nelineārās dinamikas izpēte, izmantojot stroboskopisko attēlojumu, analītiskās pētīšanas metodes, skaitliskos rēķinus, kā arī laboratorijas eksperimentus. Atšķirībā no iepriekšējās nodaļās aprakstītiem SIP, buck pārveidotāja dinamiku NSR ar atgriezenisko saiti pēc sprieguma nav iespējams aprakstīt, izmantojot slēgtā veidā definēto diskrēto modeli, tāpēc Puankaré šķēluma konstruēšanai tiek piedāvāta metode, kuras pamatā ir uzdevuma reducēšana uz transcendentu vienādojumu risināšanu attiecībā pret pārslēgšanas momentiem.

Buck pārveidotāja diskretizētā laika modeļa realizācija

Dotajā apakšnodaļā tiek apskatīta buck pārveidotāja (ar atgriezenisko saiti pēc sprieguma) darbība nepārtrauktas strāvas režīmā. Tiek veikta detalizētāka dinamikas analīze un pārveidotāja diskretizētā laika modeļa izstrāde.



7.1. att. Buck pārveidotājs ar atgriezenisko saiti pēc sprieguma: (a) vienkāršotā shēma; (b) kļūdas pastiprinātāja shēma; (c) impulsu platuma modulatora izejas signāla formēšana

Shēmā ar proporcionālo atgriezenisko saiti pēc sprieguma atbalsta sprieguma vērtība tiek atņemta no izejas sprieguma un pastiprināta, lai iegūtu kontroles spriegumu:

$$V_{con}(t) = A(v_C - V_{ref}), \quad (7.1)$$

kas tiek salīdzināts ar zāģveida signālu, kurš tiek definēts sekojoši:

$$V_{ramp}(t) = V_Z + (V_A - V_Z) \left(\frac{t}{T} \bmod 1 \right), \quad (7.2)$$

kur A - proporcionālas atgriezeniskās saites pastiprinājuma koeficients;

V_Z - zāģveida signāla zemākais līmenis;

V_A - zāģveida signāla augstākais līmenis;

$mod1$ - atlikums pēc dalīšanas.

Komparatora izejā tiek iegūts impulsu platuma modulēts signāls, kas tiek pievadīts atslēgas elementam. Atslēga ir *ON* stāvoklī, ja $V_{con}(t) \leq V_{ramp}$ un *OFF* stāvoklī, ja $V_{con}(t) > V_{ramp}$ (sk.7.1,(c). att.).

Sistēmas dinamikas aprakstam var pierakstīt sekojošas diferenciālvienādojumu sistēmas:

$$OFF \text{ intervālam } \begin{cases} \frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{CR} + \frac{i_L}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{v_C}{L} \end{cases} \rightarrow \ddot{v}_C + \dot{v}_C \frac{1}{RC} + v_C \frac{1}{LC} = 0; \quad (7.3)$$

$$ON \text{ intervālam } \begin{cases} \frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{CR} + \frac{i_L}{C} \\ \frac{di_L}{dt} = -\frac{v_C}{L} + \frac{E}{L} \end{cases} \rightarrow \ddot{v}_C + \dot{v}_C \frac{1}{RC} + v_C \frac{1}{LC} = \frac{E}{LC}. \quad (7.4)$$

Atrisinot vienādojumus (7.3) un (7.4), atradīsim \dot{v}_C un v_C vērtības, savukārt induktora strāvu būs iespējams aprēķināt, izsakot to no diferenciālvienādojumu sistēmu (7.3) un (7.4) pirmā vienādojuma:

$$i_L = \dot{v}_C C + v_C / R. \quad (7.5)$$

Tālākā izklāsta un analīzes vienkāršošanai ievēdīsim sekojošus apzīmējumus:

$$m = 1/2RC; p = \sqrt{1/LC}; \mu = \sqrt{p^2 - m^2} \quad (7.6)$$

Tādējādi vienādojumu (7.3) un (7.4) atrisinājumi izsakās sekojoši:

$$OFF \text{ intervālam } \begin{cases} v_C(t) = e^{-mt} (K_1 \cos(\mu t) + K_2 \sin(\mu t)) \\ \dot{v}_C(t) = e^{-mt} [\lambda(K_1 \cos(\mu t) + K_2 \sin(\mu t)) + \mu(-K_1 \sin(\mu t) + K_2 \cos(\mu t))] \end{cases}; \quad (7.7)$$

$$ON \text{ intervālam } \begin{cases} v_C(t) = e^{-mt} (K_3 \cos(\mu t) + K_4 \sin(\mu t)) + E \\ \dot{v}_C(t) = e^{-mt} [-m(K_3 \cos(\mu t) + K_4 \sin(\mu t)) + \mu(-K_3 \sin(\mu t) + K_4 \cos(\mu t))] \end{cases}. \quad (7.8)$$

Ir redzams, ka atrastās izteiksmes (7.7) un (7.8) iekļauj sevī četras konstantes (K_1 - K_4), kuras tiek atrastas, ievietojot vienādojumā noteiktas sākuma vērtības.

Atzīmēsim, ka, izmantojot izteiksmes (7.7) un (7.8), var tikt izveidots algoritms, kurš ar noteiktu pastāvīgu soli precīzi modelētu pazeminošā tipa pārveidotāja dinamiku nepārtrauktas strāvas režīmā. Algoritma kritiskais moments ir pārslēgšanas laiku noteikšana un konstanšu vērtību aprēķins nākamam shēmas stāvoklim. Izvēloties pat mazu modelēšanas soli, tomēr pastāv varbūtība, ka aprēķinu algoritms „pārleks” pāri pārslēgšanas punktiem (sk. 7.1. att.), kuru precīza atrašana ir izšķiroša vienādojumu (7.7) un (7.8) konstanšu aprēķinos, kas nosaka sistēmas tālāko atrisinājumu gaitu un var novest pie aprēķinu kļūdas akumulācijas. Minētās problēmas atrisināšanai ir iespējams vairākkārt samazināt algoritmā izmantojamo soli, kas par kārtām palielinās modelēšanai nepieciešamo laiku un iegūto nelietderīgo datu

apjomu. Lietderīgākai datora resursu izmantošanai un būtiskai modelēšanas laika samazināšanai tālāk tiks aprakstīta cita precīza pārslēgšanas momentu aprēķinu metode.

Modelēšanas sākumā uzstādīsim pieļaujamu aprēķinu soli Δt un veiksīm modelēšanu, katrā laika momentā pārbaudot, vai nav mainījusies noteiktās pārslēgšanas funkcijas $\delta(v_C, t)$ zīme (kura nosaka pāreju jaunajā stāvoklī). Pārslēgšanas funkcija ar spriegumu vadāmajam *buck* pārveidotājam ar proporcionālo atgriezenisko saiti tiek definēta, izmantojot zāģveida signāla un pastiprinātā kļūdas signāla izteiksmes (7.1) un (7.2):

$$\delta(v_C, t) = V_{ramp} - V_{con} = V_Z + (V_A - V_Z) \left(\frac{t}{T} \bmod 1 \right) - A(v_C(t) - V_{ref}). \quad (7.9)$$

Izmantojot doto funkciju, ir iespējams pārdefinēt izteiksmju (7.7) un (7.8) pielietošanas nosacījumus. Tādējādi, ja $\delta(v_C, t) < 0$ sistēmas dinamiku nosaka (7.7), savukārt, ja $\delta(v_C, t) \geq 0$, tad jāizmanto izteiksme (7.8).

Ja algoritma darbības rezultātā laika momentā t_x tiek konstatēta funkcijas $\delta(v_C, t)$ zīmes izmaiņa (t.i., notiek pārslēgšana uz jaunu konfigurāciju), tad pārslēgšanas momenta precīzai noteikšanai ir jāatrisina sekojošais transcendentais vienādojums attiecībā pret t :

$$\delta(v_C, t) = V_{ramp} - V_{con} = V_Z + (V_A - V_Z) \left(\frac{t}{T} \bmod 1 \right) - A(v_C(t) - V_{ref}) = 0 \quad (7.10)$$

laika intervālā $[t_x - \Delta t; t_x]$. Pēc vienādojuma (7.10) precīza atrisinājuma t_x atrašanos ir nepieciešams pārrēķināt iepriekšējās konfigurācijas pēdējo iegūto punktu $v_C(t_x)$, $\dot{v}_C(t_x)$ un izmantot iegūtos lielumus attiecīgo konstanšu K_1, K_2 vai K_3, K_4 aprēķinam. Aprakstītā pieeja ļauj atrast pārslēgšanas momentus ar nepieciešamo precizitāti, ko ir iespējams uzstādīt transcendentā vienādojuma atrisināšanas algoritmā.

Izmantojot dotās sadaļas ietvaros definēto *buck* pārveidotāja dinamiku aprakstošo modeli, kā arī ņemot vērā pārslēgšanas momentu īpatnības, tiek sastādīts atbilstošais diskretizētā laika modelis stroboskopiskā attēlojuma veidā, iegūstot induktora strāvas un kondensatora sprieguma nolases katra zāģveida signāla perioda beigās.

Periodisko režīmu stabilitātes analītiskās novērtēšanas metode

SIP tiek projektēti tā, lai to darbība būtu periodiska, ar atbilstoša ārējā vadības signāla frekvenci. Pastāvošais periodiskais darbības režīms var zaudēt stabilitāti, mainoties tādiem sistēmas parametriem kā ieejas spriegums (E) vai slodzes pretestība (R), nosakot subharmonisko svārstību parādīšanos pārveidotājā. Praktiskajās shēmās subharmonisko un haotisko režīmu parādīšanos novēršanai tiek noteikts parametru (E un R) diapazons, kurā SIP droši darbosies pieņemamā darba režīmā. Tādējādi, projektēšanas procesā rodas nepieciešamība noteikt augstfrekvences nestabilitāšu parādīšanas robežas parametru plaknē, nodrošinot SIP periodisko darbību bez subharmonisko un neperiodisko svārstību parādīšanas iespējas.

Minēto stabilitātes robežu noteikšanai tiek izmantotas specifiskas nelineārās dinamikas metodes, kuru pamatā ir dotā darba 3. apakšnodaļā aprakstītā Puankarē attēlojumu konstruēšana. Iegūtie diskretizētā laika modeļi ļauj reducēt sistēmas stāvokļu telpas trajektoriju stabilitātes novērtēšanas problēmu uz nekustīgā punkta stabilitātes novērtēšanu. Iegūtā nekustīgā punkta stabilitātes noteikšanai izmantosim Floke teoriju [36] (kura tika izveidota periodisko orbītu stabilitātes pētīšanai) un tās papildinājumu, ko izstrādāja Aizermanis, Gantmaheris un Filipovs, lai analizētu dažāda veida slīdēšanas un sadursmju parādības mehāniskās sistēmās ar pārslēgšanām. Tiek parādīts, ka minēto autoru izstrādātie teorētiskie pamati ļauj ātri un efektīvi veikt periodisko režīmu stabilitātes pētīšanu arī SIP, kuri ir pieskaitāmi pie tās pašas dinamisko sistēmu klases kā mehāniskās sistēmas ar pārslēgšanām.

Filipova metodes būtība

Veicot SIP nelineārās dinamikas pētīšanu parasti ir nepieciešams noteikt stabilitāti periodiskai orbītai, kuras sākums pārslēgšanas perioda sākumā atrodas noteiktā stāvokļa telpas punktā un pēc n periodiem orbītas beigas sakrīt ar sākuma stāvokļu telpas punkta koordinātēm. Dotās periodiskās orbītas stabilitāti var pētīt, apskatot noteikta lieluma perturbācijas attīstību. Ja sākuma nosacījumam pieliek noteikta lieluma perturbāciju un atrisinājums konverģē atpakaļ uz sākotnējo orbītu, tad režīms ir stabils. Stabilitātes rezervi, jeb attālumu līdz nestabilitātes robežai ir iespējams noteikt, novērtējot konverģences ātrumu.

Pieņemsim, ka sistēmā laika momentā t_0 eksistē sākuma stāvoklis $x(t_0)$, un perturbētais stāvoklis $\bar{x}(t_0)$ tāds, ka perturbācijas lielums ir $\Delta x(t_0) = x(t_0) - \bar{x}(t_0)$. Sākuma trajektorija un perturbētā trajektorija attīstās laikā un perturbācijas lielums perioda beigās tiek saistīts ar perturbāciju perioda sākumā, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$\Delta x(t) = \Phi \Delta x(t_0), \quad (7.11)$$

kur Φ ir stāvokļa pārejas matrica, kura tiek definēta kā funkcija no sākuma stāvokļa, sākuma un beigu laikiem. Lineārām sistēmām stāvokļa pārejas matricu definē kā matricas eksponenti:

$$\Phi = e^{A(t-t_0)}, \quad (7.12)$$

kur A - matrica, kuru nosaka no sistēmu aprakstošā stāvokļu vienādojuma $\dot{x} = Ax + Bu$.

Jebkurš SIP darbības laikā pārslēdzas starp lineārām laika invariantam apakšsistēmām, tāpēc perturbācijas attīstību katrā no tām ir iespējams aprakstīt, izmantojot izteiksmi (7.12) (ja ir zināmi sākuma nosacījumi, sākuma un beigu laiki).

Pieņemsim, ka sistēmas stāvoklis attīstās no laika momenta t_A līdz laika momentam t_B un stāvokļa pārvades matrica apskatāmajam laika posmam ir Φ_1 . Tad stāvoklis attīstās no t_B līdz t_C un pārvades matrica šim intervālam ir Φ_2 . Ja pāreja no t_A uz t_C ir gluda (orbīta ir diferencējama visos punktos), tad stāvokļu pārvades matrica no t_A uz t_C tiek izskaitļota kā jau minēto matricu reizinājums $\Phi_2\Phi_1$. Tomēr, ja punktā B notiek pārslēgšanās – pāreja dotajā punktā kļūst negluda, jo dinamiku aprakstošie vienādojumi pirms un pēc pārslēgšanas ir dažādi. Aizermanis un Gantmaheris, kā arī Filipovs [36] ir parādījuši, ka minētajā sistēmas dinamikas attīstības gadījumā ir nepieciešams ņemt vērā arī perturbācijas attīstību pārslēgšanas procesā un konstruēt stāvokļa pārvades matricu, kura saistītu perturbāciju tieši pirms un tieši pēc pārslēgšanas momenta:

$$\Delta x(t_{B+}) = S \Delta x(t_{B-}), \quad (7.13)$$

kur matricu S sauc par „**lēciena matricu**” [36] vai „korigējošu matricu”.

Pētot periodisko orbītu stabilitāti, nepieciešams iegūt stāvokļu pārvades matricu veselam pārslēgšanas ciklam. Šādu matricu sauc par **monodromijas matricu**. Atgriežoties pie iepriekšējā piemēra un pieņemot, ka laika momentā t_B sistēmā ir novērojama pārslēgšanās, monodromijas matricu ir iespējams atrast, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$\Phi_{mon} = \Phi_2 \times S_{12} \times \Phi_1. \quad (7.14)$$

Ja dotās matricas visas īpašvērtības (Floke multiplikatori) atrodas vienības riņķa iekšpusē, tad perturbācijas rimst un pētāmais periodiskais režīms ir stabils.

Balstoties uz darbā [36] aprakstīto metodiku, tika iegūta pārslēgšanas matricas izteiksme ar spriegumu vadājamam *buck* pārveidotāja, kurš darbojas NSR:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E/L} & 0 \\ \frac{Ri_L(t) - v_C(t) - V_A - V_Z}{RC} & \frac{V_A - V_Z}{AT} \end{bmatrix}. \quad (7.15)$$

Iegūtā lēciena matrica kopā ar atbilstošām stāvokļu pārvades matricām, kuras tiek definētas *ON* un *OFF* intervāliem izmantojot izteiksmi (7.12), ļauj konstruēt monodromijas matricu *buck* pārveidotāja periodiskiem režīmiem to stabilitātes novērtēšanai.

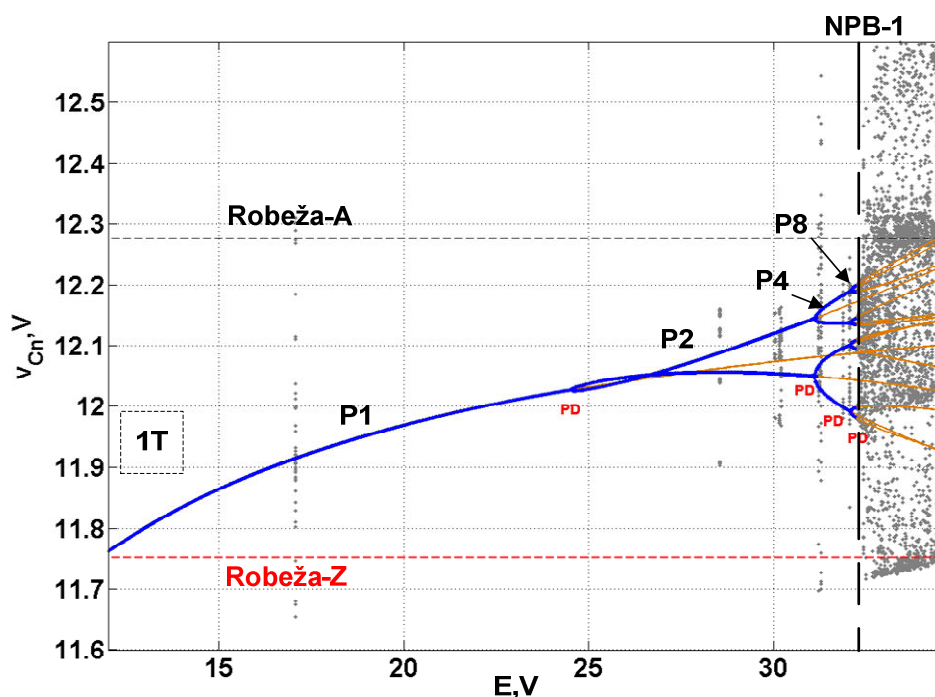
Aprakstītā metodika tika izmantota analītiskai periodisko režīmu stabilitātes pētīšanai *buck* tipa SIP, kā arī tika integrēta autora izstrādātā programmatūrā, ļaujot manāmi samazināt skaitliskiem rēķiniem nepieciešamo laiku un vienlaikus palielināt veikto aprēķinu precizitāti.

Ar spriegumu vadāmā *buck* SIP dinamikas pētīšana NSR ar PBGM un laboratorijas eksperimentiem

7. nodaļas ietvaros veiktā ar spriegumu vadāmā *buck* pārveidotāja nelineārās dinamikas analīze, balstoties uz analītiskām pētīšanas metodēm, PBGM un eksperimentāliem mērījumiem, ļauj izdarīt sekojošus secinājumus, kas ir saistīti ar :

A. SIP stabilitāti un haotizāciju:

- sadaļas ietvaros tiek atzīmēts, ka pētāmajam SIP nav iespējams iegūt iteratīvo attēlojumu slēgtā formā, tomēr tiek parādīta atbilstošā Puankaré attēlojuma iegūšanas metodika, kura balstās uz precīziem diferenciālvienādojumu un skaitliskiem transcendentu vienādojumu risinājumiem;
- Filipova metodes pielietošana SIP periodisko režīmu stabilitātes novērtēšanai ļauj būtiski uzlabot pilno vienparametrisko bifurkāciju diagrammu konstruēšanas efektivitāti, ļaujot veikt analītisku monodromijas matricas iegūšanu atbilstošo režīmu stabilitātes novērtēšanai;
- ar spriegumu vadāmajam *buck* SIP, kurš darbojas NSR ir raksturīga gludā perioda dubultošanas kaskādes parādīšanās ar tālāko svārstību haotizāciju saskaņā ar klasisko Feigenbauma scenāriju (sk. 7. 2. att.);



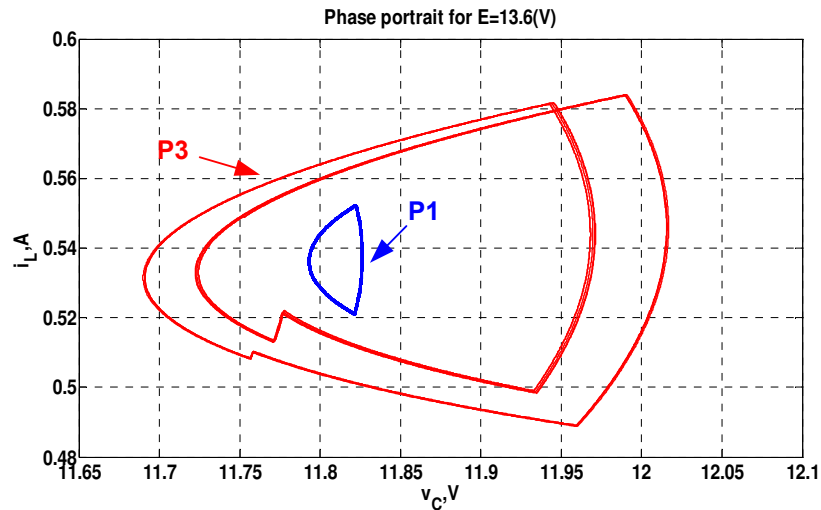
7.2. att. *Buck* pārveidotāja pilnā bifurkāciju diagramma *IT* BG apvienota ar Montē Karlo bifurkāciju diagrammu

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi līdz P8. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija; NPB –bezgalīgā skaita nestabilo periodisko režīmu apgabals. Diagrammā ir redzama perioda dubultošanas kaskāde ar svārstību haotizāciju aiz nestabilo periodisko orbītu akumulācijas punkta.

- *buck* SIP reto atraktoru parādīšanās var izraisīt būtisku izejas sprieguma un induktora strāvas pulsāciju pieaugumu; piemēram, 7.3. att. parādīto fāzu portretu izmēri liecina par to, ka, ja sistēmā ārējo trokšņu ietekmē pāriet no P1 režīma uz P3 reto atraktoru, pārveidotājā ir novērojams būtisks izejas sprieguma un induktora strāvas pulsāciju

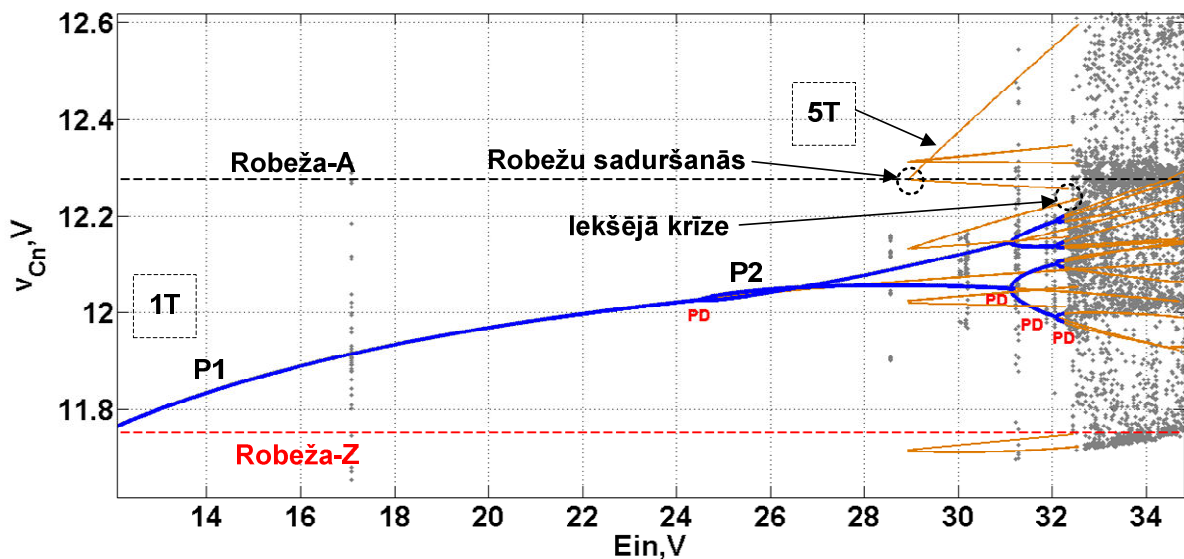
pieaugums, jo:

- P1 režīmam $V_{p-p} \approx 40$ mV un $\Delta i_L \approx 30$ mA;
- P3 režīmam $V_{p-p} \approx 300$ mV un $\Delta i_L \approx 90$ mA.



7.3. att. P1 režīma un P3 retā atraktora līdzāspastāvēšanu raksturojošie fāzes portreti

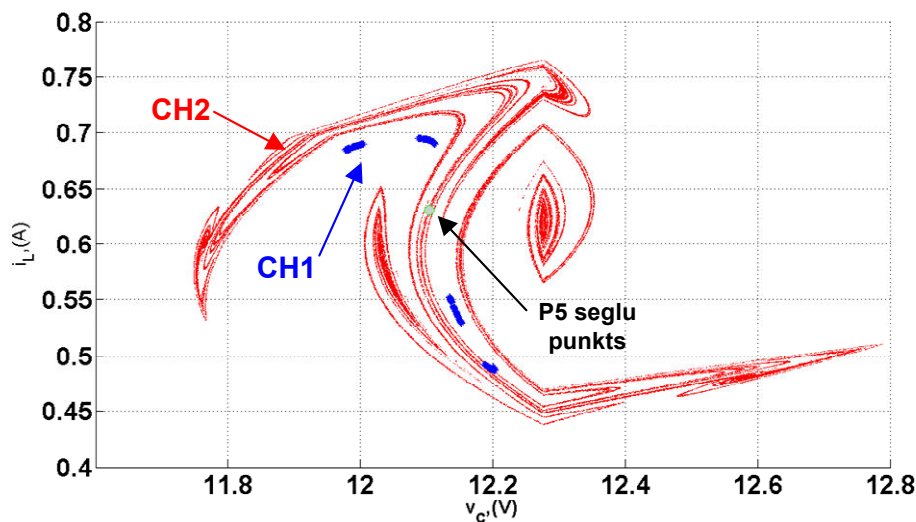
- buck pārveidotāja dinamikā novērotās robežu saduršanas rezultātā sistēmā parādās specifiskas perioda dubultošanas seglu-mezglpunkta bifurkācija, kas rada **jauno bifurkāciju grupu** tipa parādīšanos, kas sastāv tikai no **nestabiliem** periodiskiem režīmiem (sk. 7. 4. att. 5T BG);



7.4. att. Buck pārveidotāja pilnā bifurkāciju diagramma 1T un 5T BG

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija.

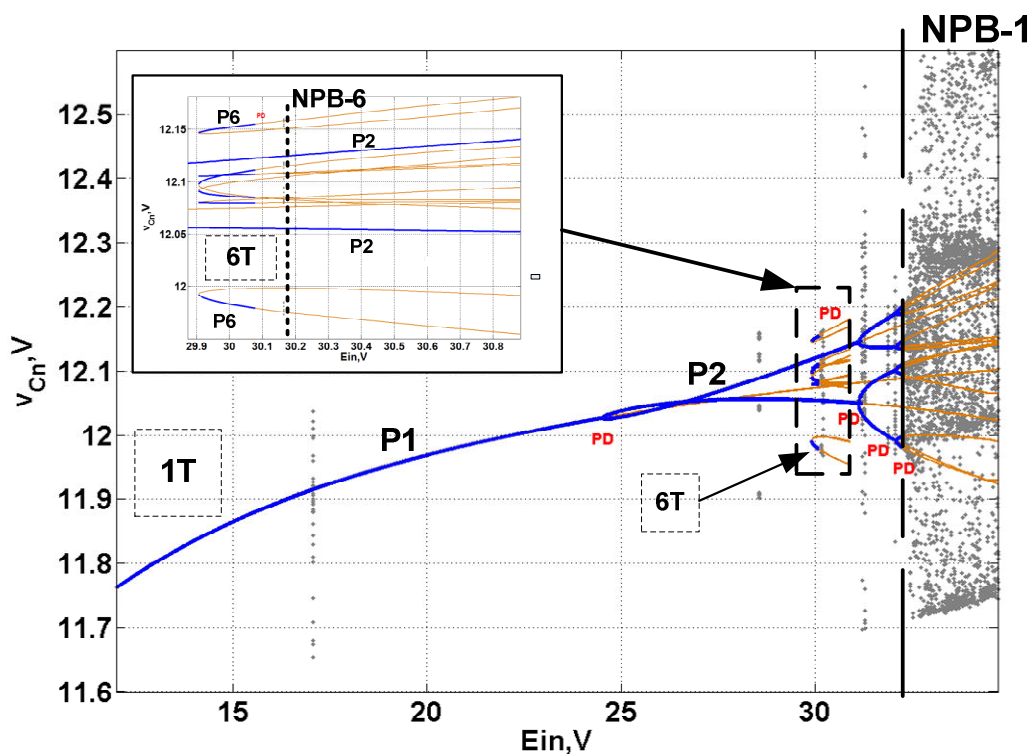
- jaunās BG nevar tikt novērotas eksperimentāli (jo ārējo trokšņu ietekmē notiek pārlēkšana uz citiem blakusesošiem režīmiem), tomēr tām ir liela nozīme pārveidotāja globālās haotizācijas procesā: 1T bifurkāciju grupas radītām haotiskam atraktoram saskaroties ar jaunās BG seglu punkta nestabilo kolektoru ir novērojama haotiskā atraktora pēkšņa izplešanās (V_{p-p} un Δi_L vērtību pieaugumu dotajā gadījumā nosaka tieši nestabilā kolektora izmēri – sk. 7.4. un 7.5. att.).



7.5. att. CH1 haotiskais atraktors pie $E=32.5$ V un P5 seglu tipa nekustīgā punkta nestabils kolektors pie $E=33$ V

B. SIP EMS uzlabošanu:

- ar spriegumu vadāmā *buck* pārveidotāja plašā parametru apgabalā tika novērota reto periodisko un haotisko atraktoru līdzāspastāvēšana (piemēram, sk. 7.6. att. 6T BG), kas norāda uz to, ka sistēmā nav novērojama robustā haotiskā darbība, kura potenciāli varētu tikt izmantota pārveidotāja EMS uzlabošanai ISM ietvaros.



7.6. att. *Buck* pārveidotāja pilnā bifurkāciju diagramma 1T un 6T BG

Diagrammā ir attēloti stabili (tumšās līnijas) un nestabili (gaišās līnijas) periodiskie režīmi. Tiek pielietoti arī sekojoši apzīmējumi: PD- perioda dubultošanas bifurkācija; NPB – bezgalīgā skaita nestabilo periodisko režīmu apgabals. Tiek parādīta reta atraktora un P2 režīma līdzāspastāvēšana.

NOBEIGUMS

Sprieguma impulsveida pārveidotāju projektēšanas gaitā līdztekus citām problēmām pastāv arī SIP stabilitātes nodrošināšanas un EMS uzlabošanas problēmas. Darba ietvaros šo problēmu risināšanai ir piedāvāts izmantot mūsdienīgas haosa un bifurkāciju pētīšanas metodes.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti liecina par to, ka sprieguma impulsveida pārveidotāju projektēšanas laikā garantēti stabili SIP izstrāde ir iespējama, efektīvi pielietojot Pilno Bifurkāciju Grupu Metodi, kura ļauj prognozēt un izvairīties no nevēlamo dinamisko režīmu parādīšanas pārveidotāju darbībā. Tiek parādīts, ka spēka elektronikā izplatīto vidējoto modeļu pielietošanas iespējas subharmonisko un haotisko režīmu prognozēšanai ir visai ierobežotas – tie vai nu vispār neļauj konstatēt nelineāro parādību izpausmes pārveidotāju darbībā (sk. 5.5. apakšnodaļu), vai arī nav iespējams atšķirt periodisko režīmu parādīšanos no haotiskiem režīmiem (sk. 6.4. apakšnodaļu). Minētie modeļu trūkumi rosināja SIP stabilitātes pētīšanai izmantot inovatīvo pieeju – PBGM, kuras pielietošanai SIP dinamikas pētīšanai autors ir izstrādājis atbilstošos algoritmus, realizējot tos MATLAB programmu veidā.

Viena no izmantotās PBGM īpatnībām, salīdzinājumā ar citām nelineārās dinamikas pētīšanas metodēm, ir nestabiliem periodiskiem režīmiem atbilstošo bifurkāciju diagrammas zaru konstruēšana. Neskatoties uz to, ka eksperimentu gaitā šie nestabīlie režīmi nevar tikt novēroti (jo vismazākās deviācijas shēmas parametros un ārējie trokšņi izraisa šo režīmu pazūšanu), promocijas darba ietvaros tiek pierādīts, ka tiem ir būtiska nozīme SIP dinamikas attīstībā, jo:

- nestabīlo periodisko režīmu bifurkāciju diagrammas zari ļauj atrast sistēmā pastāvošos retos atraktorus un konstatēt dažāda tipa krīžu iestāšanos (kas ir saistītas ar būtisku spriegumu un strāvu pulsāciju pieaugumu SIP), kā arī izpētīt fundamentāli dažādu bifurkāciju tipu (gludo un PIB) mijiedarbību vienas diagrammas ietvaros un precīzi klasificēt jaunizveidotos režīmus;
- PBGM ietvaros konstruējamo segļu tipa nekustīgo punktu nestabīlo kolektoru struktūra viennozīmīgi nosaka jaunizveidoto subharmonisko un haotisko atraktoru parametrus un izvietojumu stāvokļu plaknē (tātad arī atbilstošās induktora strāvas un kondensatora sprieguma amplitūdas).

Pārveidotāju elektromagnētiskās saderības uzlabošanai izklaidētā spektra metodes ietvaros (sk. 1.3. sadaļu) ir piedāvāts izmantot SIP haotiskos darbības režīmus. Darbā ir apskatīta robustā haosa apgabalu nodrošināšanas iespējamība dažāda tipa SIP un noskaidroti šo apgabalu izveidošanas nosacījumi, kā arī pārveidotāju parametru ietekme uz to realizāciju.

Uz darbā izstrādāto algoritmu pamata izveidotā programmatūra var tikt integrēta SIP automatizētās projektēšanas paketēs, ļaujot noteiktos projektēšanas etapos veikt sprieguma pārveidotāju nelineārās dinamikas prognozēšanu, nodrošinot nepieciešamo darba režīmu (t.i., nepieļaujot darbību subharmoniskā un haotiskā režīmā, jo tas apdraud drošu shēmas darbību, vai arī speciāli nodrošinot haotisko darbības režīmu atsevišķu pārveidotāja rādītāju uzlabošanai).

LITERATŪRA

1. Banerjee S., Ranjan P., Grebogi C. Bifurcation in two-dimensional piecewise smooth maps –theory and applications in switching circuits // IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I. – Vol.47, no.3 (2000). – P. 389-794.
2. Banerjee S. and Verghese G.C. (Eds.). Nonlinear Phenomena in Power Electronics, New York: IEEE Press, 2001, 441 p.
3. Banerjee S., Ott E., Yorke J.A. Anomalous bifurcation in dc/dc converters: borderline collisions in piecewise smooth maps, IEEE Power Electron. Spec. Conf. Rec., P. 1337–1344, 1997.
4. Banerjee S., Yorke J. A., and Grebogi C. Robust chaos //Physical Review Letters.- vol. 80, P. 3049-3052, 1998.
5. Banerjee S., Karthik M. S., Yorke J. A.. Bifurcations in one-dimensional piecewise smooth maps—theory and applications in switching circuits// IEEE Trans, on Circuits and Systems.-I, vol. 47, no. 3, 2000.
6. Banerjee S. and Chakrabarty K. Nonlinear modeling and bifurcations in the boost converter//IEEE Trans, on Power Electronics.- vol. 13, no. 2, P. 252-260, 1998
7. Basso. C. Switch-Mode Power Supplies Spice Simulations and Practical Designs.- McGraw-Hill Professional, 2008. – 889 p.
8. Bass R.M., Heck B.S., Khan R.A. Average modelling of current-controlled converters: Instability predictions// Int.J. Electronics.-vol.77, no. 5, P.613-628, 1994.
9. di.Bernardo M., Fosas E., Olivar G., Vasca F. Secondary bifurcations and high-periodic orbits in voltage controlled buck converter // International Journal of Bifurcation and Chaos. – Vol.12, no.7 (1997) – P. 2755-2771.
10. di Bernardo M., Vasca F. On discrete time maps for the analysis of bifurcations and chaos in dc/dc converters // IEEE Trans.on Circuits and Systems- I. – Vol.47, no.2 (2000) – P. 130-143.
11. di Bernardo M., Budd C.J., Champneys A.R., Kowalczyk P. Piecewise-Smooth Dynamical Systems : Theory and Applications. – Springer-Verlag, 2008. – 505 p.
12. Chen G., Dong X. From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and Applications. – Singapore: World Scientific, 1998. – 462 p.
13. Chryssis G.C. High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and Design. - New York: McGraw Hill, 1989. – 287 p.
14. Deane J.H.B. , Hamill D.C. Chaotic behavior in a current-mode controlled dc/dc converter//Electron. Lett.- vol. 27, P. 1172–1173, 1991.
15. Deane J. H. B., Ashwin P., Hamill D. C. et al. Calculation of the periodic spectral components in a chaotic dc-dc converter // IEEE Trans, on Circuits and Systems—I, vol. 46, no. 11, P. 1313-1319, 1999.
16. Deane J. H. B. and Hamill D. C. Improvement of power supply EMC by chaos// Electronic Letters.- vol. 32, p. 1045, June 1996.
17. Dragan V. Mathematical methods in robust control of linear stochastic systems – New York: Springer Science + Business Media LLC, 2006. – 312 p.
18. Fosas E., Olivar G. Study of chaos in buck converter // IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I. – Vol.43, no.1 (1996) – P. 13-25.
19. Grebogi C., Ott, E Yorke, J.A. Crisis, sudden changes in chaotic attractors, and transient chaos // Physica D. – Vol.7D (1983) - P. 181-200.
20. 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. – P. 2271 – 2281.
21. Hammil D.C., Deane, J.H.B. Jefferies, D.J. Modeling of chaotic dc/dc converters by iterative nonlinear mappings // IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I. – Vol.35, no.8 (1992) - P. 25-36.
22. Hamill D. C. Power electronics: A field rich in nonlinear dynamics// 3rd Int. Specialists' Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (University College, Dublin), P. 165-178, 1995.
23. Holland B. Modelling, analysis and compensation of the current-mode converter // Proceedings of Powercon. - Vol.11 (1984), P. 1-2-1-1-2-6.
24. Jankovskis J., D.Stepins, D.Pikulins, S.Tjukovs. Examination of Different Spread Spectrum Techniques for EMI Suppression in dc/dc Converters // Electronics and Electrical Engineering – Kaunas: Technologija, 2008.- No.6 (86). - P. 60 – 64.
25. Jankovskis J., Stepins D., Pikuļins D. Improving Effectiveness of the Use of Frequency Modulation in Power Converters // Proceedings of the 12th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2010), Estonia, Tallinn, 4.-6. October, 2010. – pp 327-330.
26. Jankovskis J., Pikuļins D., Stepins D. Effects of Increasing Switching Frequency in Frequency Modulated Power Converters // Proceedings of the "2010 9th International Symposium on ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS", Rumānija, Timisoara, 11.-12. novembris, 2010. – 115.-118. lpp.
27. Jankovskis J., Stepins D., Pikulins D. Lowering of EMI in boost type PFC by the use of spread spectrum. Electronics and Electrical Engineering – Kaunas: Technologija, 2009.- No.6 (94). – 15.-18.lpp.
28. Jankovskis J., Pikuļins D., Stepins D. Efficiency of PFC Operating in Spread Spectrum Mode for EMI Reduction // Electronics and Electrical Engineering. - – Kaunas: Technologija, -No.7 (2010) 13.-16. lpp.
29. Kassakian J.K., Schlecht M. Verghese G. Principles of Power Electronics. – MA : Addison-Wesley, 1991. – 740 p.
30. Kirilin R., Bech M.M., Trzynadlowski A.M. Analysis of Power and Power Spectral Density in PWM Inverters with Randomized Switching Frequency // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49, No.2. – P. 486 – 499.
31. Kiskovski A.S., Redl R., Sokal N.O. Dynamical Analysis of Switching-Mode DC/DC Converters. - New York : Van Nostrand Reinhold, 1996.
32. Krein, P.T. Elements of Power Electronics. - New York: Oxford University Press, 1998. – 784 p.

33. Krein P.T, Beitsman J., Bass R.M. On the use of averaging for the analysis of power electronic systems// IEEE Trans. On Power Electronics.- vol.5, no.2, P182-190, 1990.
34. Kubicek, M. Algorithm 502. Dependence of solution of nonlinear systems on a parameter// ACM Trans. of Math. Software 2.- (1976), P 98–107
35. Kuznetsov Y.A. Elements of applied Bifurcation Theory. - New York : Springer-Verlag, 1996. – 630 p.
36. Leine R.I. *Bifurcations in Discontinuous Mechanical Systems of Filippov-Type*, Ph.D. thesis Eindhoven University of Technology, June 2000, 143 p.
37. Li T. Y. , Yorke J. A. Period three implies chaos// American Mathematical Monthly.- vol. 82, P. 985-992, 1975.
38. Lim Y.H., Hamill D.C. Problems of computing Lyapunov exponents in power electronics
39. Middlebrook R.D., Cuk S. A general unified approach to modeling switching-converter power stages // IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, 1976. – P. 18-34.
40. Mohan N., Undeland T., Robbins W. Power electronics.2nd ed. - New York : Wiley, 1995. – 684 p.
41. Nusse H.E., Ott, E., Yorke J.A. Border-collision bifurcations: an explanation for observed phenomena // Physical Review E. - Vol.49 (1994), P.1073-1076.
42. Nusse H.E., Yorke J.A. Border-collision bifurcations including “period two to period three” for piecewise smooth systems // Physica D. - Vol.57 (1992), P. 39-57.
43. Ott H.W. Electromagnetic Compatibility Engineering. – New York: J. Wiley&Sons, 2009. – 845 p.
44. Palmor Z.J. Limit cycles in decentralized relay systems // Int. J.Control. – 1992. – N. 56. – P. 744.
45. Pikulins D., Tjukovs S. Investigation of EMI reduction and output voltage ripple minimization using interleaved buck converters // Scientific Proceedings of RTU. Series 7. Telecommunication and Electronics, 2008, Vol.8, pp. 27.-30.
46. Pikulins D. Tools for Investigation of Dynamics of DC-DC Converters within Matlab/Simulink // CHAOS THEORY Modeling, Simulation and Applications Selected Papers from the 3rd Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS2010)), World Scientific Publishing, 2011. – 317.-325. lpp.
47. Pikulins D. Some Applications of Numerical Path-following in the Analysis of Dynamics of Switching Converters // Student Forum Proceedings of the 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics CPE 2011, Igaunija, Tallina, 3. jūnijs, 2011. – 11.-14. lpp.
48. Pikulins D. SMOOTH AND NONSMOOTH NONLINEAR PHENOMENA IN DC-DC CONVERTERS // Proceedings of the 2nd International Symposium RA'11, Latvija, Jūrmala, 16.-20. maijs, 2011. - 26.-30. lpp.
49. Pikulins D. Nonlinear Dynamics of Buck Converter // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference “Environment.Technology. Resources”, Latvija, Rēzekne, 2011. -20.-22.jūnijs, 156.-162.lpp.
50. Pikulins D. The Investigation of Complex Behaviour in Buck Converters by Means of Matlab and Simulink // Scientific Journal of RTU. 7. series., Telekomunikācijas un elektronika. - 9. vol. (2009), pp 24-33.
51. Pikulin D. Effects of Non-smooth Phenomena on the Dynamics of DC-DC Converters // RTU zinātniskie raksti. 4. sēr., Energētika un elektrotehnika. - 29. sēj. (2011), 119.-122. lpp.
52. Pikulins D. The Complete Bifurcation Analysis of Boost DC-DC Converter // RTU zinātniskie raksti. 7. sēr., Telekomunikācijas un elektronika. - 11. sēj. (2011), 22.-26.
53. Pressman A.I. Switching Power Supply Design. - New York : McGraw Hill, 1992. – 628p.
54. Redl R. Electromagnetic Environmental Impact of Power Electronics Equipment // Proceedings of the IEEE. – 2001. – Vol. 89, No.6. – P. 926 – 938.
55. Ridley R.. A New, Continuous-Time model for Current-Mode Control// IEEE Trans. Power Elecetronics.-vol.6, no.2, P.271-280,1991.
56. Sakharuk, T.A. Effects of finite switching frequency and delay on PWM controlled systems // IEEE Trans. Circuits Syst. I: Regular papers. – 2000. – Vol. 47., No. 4. – P. 555 – 567.
57. Sanders S.R., Noworolski J.M, Liu X.Z., Verghese G.C. Generalized averaging method for power conversion circuits // IEEE Trans.on Power Electronis. - Vol.6, no.2 (1991), P.251-259.
58. Sanders J.A. Averaging methods in nonlinear dynamical systems. — New York: Springer Verlag, 1985. — 247 p
59. Schukin I., Zakrzhevsky M., Ivanov Yu. et al. Application of software SPRING and method of complete bifurcation groups for the bifurcation analysis of nonlinear dynamical system - Vol.10, iss.4 (2008), P. 510-518.
60. Tse C.K., Chan W.C.Y. Chaos from current-programmed Cuk converter // International Journal of Circuit Theory and Applications. - Vol.23, no.3 (1995), P. 217-225.
61. Tse C.K. Chaos from a buck regulator operating in discontinuous conduction mode // International Journal of Circuit Theory and Applications. - Vol.22 (1994), P. 263-278.
62. Tse C.K. Flip bifurcation and chaos in three-state boost switching regulators // IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I. Vol.41, no.1 (1994), P. 16-23.
63. Tse,C.K. Recent developments in the study of nonlinear phenomena in power electronics circuits // IEEE Circuits and Systems Society Newsletter. - Vol.11, no.1 (2000), P. 14-12; 47-48.
64. 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. – P. 171 – 182.
65. 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. – P. 618 – 627.
66. Tse C.K., Ming Li. Design-Oriented bifurcation Analysis of Power Electronics Systems. I// J. Bifurcation and Chaos .- vol.21, no.6, P.1523-1537,2011.
67. Wenston D.A. Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications. 2nd Ed., Marcel Dekker, Inc, 2001.
68. Zakrčevskis M., Ščukins I., Frolov V., Klovovs A., Jevstignejevs V., Smirnova R., Pikulins D. RARE ATTRACTORS IN DISCRETE NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEMS // Proceedings of the 2nd International Symposium RA'11, Latvija, Jūrmala, 16.-20. maijs, 2011. – 21.-25. lpp.
69. Zakrzhevsky M., Schukin I., Yevstignejev V., Klovov A., **Pikulin.D.** Complete Bifurcation Analysis of Discrete Nonlinear Dynamical Systems (book in print).
70. Zakrzhevsky M. Bifurcation Theory of Nonlinear Dynamics and Chaos. Periodic Skeletons and Rare Attractors //

- Proceeding of the 2nd International Symposium RA'11.– RTU, 2011. – P.26–30.
71. Zakrzhevsky M. New concepts of nonlinear dynamics: complete bifurcation groups, protuberances, unstable periodic infinitiums and rare attractors//Journal of Vibroengineering.- vol.10, iss.4 (2008), P.421-441.
 72. Zakrzhevsky M. Global Nonlinear Dynamics Based on the Method of Complete Bifurcation Groups and Rare Attractors. // Proceedings of the ASME 2009 (IDETC/CIE 2009), CD, San Diego, USA (2009), 8 p.
 73. Zakrzhevsky M. How to Find Rare Periodic and Rare Chaotic Attractors? // Abstracts of the 8th AIMS International Conference, <http://www.math.tudresden.de/kokschi/AIMS/>, Dresden, Germany (2010), 9 p.
 74. Zakrzhevsky M. Bifurcation Theory of Nonlinear Dynamics and Chaos. Periodic Skeleton and Rare Attractors. // Proceedings of the 2nd International Symposium RA'11 on “Rare Attractors and Rare Phenomena in Nonlinear Dynamics”, May 17 - 20, 2011, Riga - Jurmala, Latvia.
 75. Zeeman E.G. Catastrophe theory // Reading Mass.: Addison-Wesley – 1977. – P. 1972 – 1977.
 76. Арнольд В.И. Теория катастроф. — М.: Наука, 1990. – 128 с.
 77. Браун М. Источники питания.-Киев: МК-Пресс, 2005. – 280 с.
 78. Гелиг А.Х., Чурилов А.Н. Колебания иустойчивость нелинейных импульсных систем. — СПб.: Издательство С.-Петербургского университета,1993. — 268 с.
 79. Глазенко Т.А., Томасов В.С. Состояние и перспективы применения полу- проводниковых преобразователей в приборостроении // Изв. вузов. При- боростроение. – 1996. – Т. 39. № 3. – С. 6-12.
 80. Джури Э.И. Импульсные системы автоматического управления. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. — 456 с.
 81. Жусубалиев Ж.Т. К исследованию хаотических режимов преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией // Электричество. – 1997. – С. 40 – 46.
 82. Жусубалиев Ж.Т., Колоколов Ю.В., Пинаев С.В., Рудаков В.Н. Детерминированные и хаотические режимы преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией // Изв. РАН. Энергетика. – 1997. - № 3. – С. 157 – 170.
 83. Канторович Л.В. Некоторые дальнейшие применения метода Ньютона// Вестн. Ленингр. ун-таю- 1957ю- №7.- С.68-103.
 84. Канторович Л.В., Акилов Г.П. Функциональный анализ.- Москва.-1977.-741с.
 85. Кипнис М.М. Хаотические явления в детерминированной одномерной широтноимпульсной системе управления // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1992. - № 1. – С. 108 – 112.
 86. Куо. Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. — М.: Машиностроение, 1986. — 448 с.
 87. Неймарк Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний.- Москва.-1972.- 472с.
 88. Розанов Ю.К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 184 с.
 89. Фейгин М.И. Вынужденные колебания систем с разрывными нелинейностями. — М.: Наука, 1994. — 288 с.
 90. Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. – М.: Наука, 1974. – 576 с.
 91. Четти П. Проектирование ключевых источников электропитания.- Москва: Энергоиздат,1990.-240с.