

# MODEL NAPONSKI UPRAVLJANOG ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA ZA ANALIZU NEREGULARNIH USTALJENIH STANJA

---

Stojanović, Željko

Doctoral thesis / Disertacija

2022

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:744619>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-24**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I**  
**INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**  
**O S I J E K**

**Željko Stojanović**

**MODEL NAPONSKI UPRAVLJANOG ISTOSMJERNOG**  
**UZLAZNOG PRETVARAČA ZA ANALIZU**  
**NEREGULARNIH USTALJENIH STANJA**

**Doktorska disertacija**

**Osijek, 2021.**

Doktorska disertacija izrađena je na Zavodu za elektrostrojarstvo Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku

Mentor: prof.dr.sc. Denis Pelin

Disertacija ima 156 stranica.

Disertacija broj: 82

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Kruno Miličević, predsjednik, FERIT Osijek
2. Prof. dr. sc. Denis Pelin, član i mentor, FERIT Osijek
3. Prof. dr. sc. Viktor Šunde, član, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. dr. sc. Kruno Miličević, predsjednik, FERIT Osijek
2. Prof. dr. sc. Denis Pelin, član i mentor, FERIT Osijek
3. Prof. dr. sc. Viktor Šunde, član, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
4. Izv. prof. dr. sc. Krešimir Nenadić, član, FERIT Osijek
5. Prof. dr. sc. Željko Hederić, član, FERIT Osijek

Datum obrane doktorske disertacije: 20. rujna 2021. godine

## **Zahvale**

Zahvaljujem svom mentoru profesoru Denisu Pelinu na pomoći tijekom izrade disertacije, poticanju na rad i na strpljenju.

Zahvaljujem Leonu Šneleru što se pojavio kad sam bio u mračnom tunelu.

Zahvaljujem svojim kolegama Harisu Kovačeviću, Marku Miletiću, Goranu Vujisiću, Ivanu Biondiću i Draganu Vulinu te profesorima Kruni Miličeviću, Željku Kozlini i Franji Joviću za svu stručnu i moralnu potporu tijekom izrade disertacije. Zahvaljujem i profesoru Krešimiru Nenadiću. Na susretljivosti i pomoći zahvaljujem gospodinu Darku Mihiću i gospođi Miriam Arambašić iz studentske referade.

Na susretljivosti i pomoći zahvaljujem svojoj liječnici Slavi Posenjak-Pavišić.

Zahvaljujem Davoru za puno toga. Zahvaljujem i Darku, Karini, Vlatki i Lidiji i Goranu.

A kako zahvaliti majci i pokojnom ocu?

Može li se to uopće?

Majko i oče, hvala vam!

Zahvaljujem pokojnoj sestri što me je naučila da posumnjam u svoje rasuđivanje kada sam mislio da sve znam. Zahvaljujem bratu što me je naučio čemu služi struja baze i za pomoć tijekom izrade disertacije.

Zahvaljujem svom profesoru Ivanu Flegaru na svemu što me je naučio.

# SADRŽAJ

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| UVOD .....                                                                 | 1  |
| 1 PREGLED LITERATURE .....                                                 | 5  |
| 2 OSNOVNO O ISTOSMJERNOM UZLAZNOM PRETVARAČU .....                         | 10 |
| 2.1 Energetski dio uzlaznog pretvarača.....                                | 10 |
| 2.1.1 Kontinuirani način rada .....                                        | 11 |
| 2.1.2 Diskontinuirani način rada .....                                     | 14 |
| 2.2 Upravljanje pretvaračem.....                                           | 16 |
| 2.2.1 Naponsko upravljanje.....                                            | 16 |
| 2.2.2 Strujno upravljanje .....                                            | 17 |
| 2.2.3 Utjecaj vrste upravljanja na pojavu kvaziperiodičnosti .....         | 18 |
| 3 MODELIRANJE NAPONSKI UPRAVLJANOG ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA.....   | 19 |
| 3.1 Fizički model uzlaznog pretvarača .....                                | 19 |
| 3.2 Shema spoja matematičkog modela pretvarača .....                       | 24 |
| 3.3 Jednadžbe stanja energetskog dijela pretvarača .....                   | 26 |
| 3.4 Jednadžbe stanja upravljačkog dijela pretvarača.....                   | 27 |
| 3.4.1 Konstitutivne relacije komparatora i logičkog sklopa I .....         | 27 |
| 3.4.2 Ulazni naponi komparatora i logičkog sklopa I .....                  | 28 |
| 3.5 Parametri matematičkog modela pretvarača .....                         | 29 |
| 3.6 Simulacijski model pretvarača .....                                    | 34 |
| 3.6.1 Izvedba simulacije.....                                              | 34 |
| 3.6.2 Simulirane veličine i njihovi prikazi .....                          | 35 |
| 3.6.3 Preporučeni parametri simulacije.....                                | 35 |
| 3.6.4 Dijagram toka za programski kôd .....                                | 39 |
| 3.7 Odnos između matematičkog modela i fizičkog modela pretvarača .....    | 40 |
| 4 NELINEARNA DINAMIKA ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA .....               | 41 |
| 4.1 Pojave u uzlaznom pretvaraču .....                                     | 41 |
| 4.1.1 Ustaljena stanja .....                                               | 41 |
| 4.1.2 Bifurkacije .....                                                    | 44 |
| 4.1.3 Putovi u kaos .....                                                  | 47 |
| 4.2 Metode analize pretvarača.....                                         | 48 |
| 4.3 Metode identifikacije bifurkacija i ustaljenih stanja .....            | 49 |
| 4.3.1 Identifikacija ustaljenih stanja valnim oblicima.....                | 51 |
| 4.3.2 Identifikacija ustaljenih stanja trajektorijama .....                | 53 |
| 4.3.3 Identifikacija ustaljenih stanja Poincaréovim slikama .....          | 53 |
| 4.3.4 Identifikacija ustaljenih stanja bifurkacijskim dijagramima .....    | 55 |
| 4.3.5 Identifikacija ustaljenih stanja harmonijskih sastavom.....          | 55 |
| 4.3.6 Identifikacija ustaljenih stanja Ljapunovljevim koeficijentima ..... | 56 |

|            |                                                                                                   |            |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.4</b> | <b>O kvaziperiodičnom ustaljenom stanju .....</b>                                                 | <b>56</b>  |
| 4.4.1      | Identifikacija kvaziperiodičnog ustaljenog stanja .....                                           | 56         |
| 4.4.2      | Identifikacija bifurkacija pri pojavi kvaziperiodičnih ustaljenih stanja .....                    | 59         |
| 4.4.3      | Hopfova bifurkacija i Fareyev niz.....                                                            | 60         |
| <b>5</b>   | <b>NEREGULARNA USTALJENA STANJA NAPONSKI UPRAVLJANOG ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA.....</b>    | <b>61</b>  |
| <b>5.1</b> | <b>Rezultati simulacija .....</b>                                                                 | <b>61</b>  |
| 5.1.1      | Ustaljena stanja i slijedovi ustaljenih stanja.....                                               | 62         |
| 5.1.2      | Bifurkacije .....                                                                                 | 68         |
| 5.1.3      | Utjecaj bifurkacija na efektivnu i vršnu vrijednost struje induktiviteta .....                    | 71         |
| <b>5.2</b> | <b>Rezultati mjerenja .....</b>                                                                   | <b>72</b>  |
| 5.2.1      | Ustaljena stanja i slijedovi ustaljenih stanja.....                                               | 74         |
| 5.2.2      | Bifurkacije identificirane mjerenjem .....                                                        | 85         |
| 5.2.3      | Utjecaj bifurkacija na rad i svojstva pretvarača .....                                            | 86         |
| 5.2.4      | Usporedba rezultata mjerenja i rezultata simulacije.....                                          | 89         |
| <b>5.3</b> | <b>Multistabilnost i histereza.....</b>                                                           | <b>91</b>  |
| 5.3.1      | Identifikacija multistabilnosti i histereze .....                                                 | 91         |
| 5.3.2      | Eksperimentalno identificirana multistabilnost.....                                               | 92         |
| 5.3.3      | Simulacijama identificirana multistabilnost.....                                                  | 98         |
| 5.3.4      | Eksperimentalno identificirana histereza .....                                                    | 99         |
| 5.3.5      | Simulacijama identificirana histereza .....                                                       | 102        |
| 5.3.6      | Zaključna razmatranja o multistabilnosti i histerezi ustaljenih stanja.....                       | 103        |
| <b>5.4</b> | <b>Bifurkacija srazom granica .....</b>                                                           | <b>105</b> |
| 5.4.1      | Mehanizam bifurkacije srazom granica .....                                                        | 105        |
| 5.4.2      | Izbjegavanje bifurkacije srazom granica.....                                                      | 111        |
| 5.4.3      | Zaključna razmatranja .....                                                                       | 119        |
| <b>6</b>   | <b>REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....</b>                                                               | <b>120</b> |
|            | <b>LITERATURA .....</b>                                                                           | <b>125</b> |
|            | <b>SAŽETAK.....</b>                                                                               | <b>131</b> |
|            | <b>ABSTRACT .....</b>                                                                             | <b>132</b> |
|            | <b>ŽIVOTOPIS.....</b>                                                                             | <b>134</b> |
|            | <b>PRILOZI .....</b>                                                                              | <b>135</b> |
| Prilog 1   | Stručni pojmovi na hrvatskom i engleskom jeziku .....                                             | 135        |
| Prilog 2   | Matematičko modeliranje uzlaznog pretvarača .....                                                 | 136        |
| Prilog 3   | Kvantitativni rezultati mjerenja na pretvaraču u cijelom području vrijednosti ulaznog napona..... | 150        |
| Prilog 4   | Utjecaj bifurkacija na izlazni napon pretvarača.....                                              | 154        |
| Prilog 5   | Programski kodovi digitalnih simulacija.....                                                      | 156        |

## UVOD

Istosmjerni pretvarači služe za napajanje raznih elektroničkih trošila i u širokoj su upotrebi. Tijekom rada istosmjernih pretvarača dolazi do promjena parametara izvora, parametara trošila i parametara pretvarača. Da bi pretvarač nastavio obavljati svoju funkciju pretvaračem se mora upravljati. U praksi prevladava pulsno-širinsko upravljanje. Ventili pretvarača sklapaju konstantnom sklopnom periodom, a trajanje vođenja ventila je promjenljivo. Signali za sklapanje upravljivih ventila dobivaju se usporedbom signala nosioca, koji određuje nazivnu sklopnu periodu i kontrolnog napona ovisnog o parametrima izvora, trošila i pretvarača, koji određuje trajanje vođenja ventila. Nazivna sklopna perioda rada pretvarača jednaka je periodi pilastog napona kojem se obavlja pulsno-širinsko upravljanje pretvarača. Kada su perioda struje prigušnice i napona kondenzatora jednake nazivnoj sklopnoj periodi, to se ustaljeno stanje naziva ustaljeno stanje osnovne periode. Pri tom su valovitosti ulazne struje i izlaznog napona manje nego u drugim ustaljenim stanjima. Zato je željeni način rada pretvarača onaj u ustaljenom stanju osnovne periode. Svako ustaljeno stanje u kojem perioda struje prigušnice i napona kondenzatora više nisu jednake nazivnoj sklopnoj periodi naziva se neregularno ustaljeno stanje.

Energetski dio istosmjernog uzlaznog pretvarača koji je predmet ove disertacije sadrži jednu prigušnicu i jedan kondenzator. Tako se i uz zanemarenje nadomjesnih induktivnosti i kapacitivnosti drugih komponenata pretvarač ponaša kao sustav najmanje drugog reda. Pretvarač sadrži i sklopke, pa je zbog njihova sklapanja i nelinearan i vremenski promjenljiv odnosno neautonoman sustav. Tijekom upravljanja pretvarača trajanje vođenja sklopki mijenja se. Tako se unose dodatne nelinearnosti u sustav. Uz to, tranzistor i dioda nisu idealne sklopke pa unose dodatne nelinearnosti. Prigušnica je također najčešće nelinearna. U upravljačkom dijelu pretvarača redovito se nalaze i kondenzatori i operacijska pojačala povisujući red sustava i unoseći dodatnu nelinearnost. U nelinearnim neautonomnim sustavima drugog reda ili višeg prema Poincaré-Bendixonovom teoremu moguća je pojava neregularnih ustaljenih stanja.

Neregularno ustaljeno stanje može biti subharmonično, kvaziperiodično ili kaotično. U neregularnim ustaljenim stanjima povećana je valovitost, a to kvari karakteristike pretvarača. Povećana valovitost može povećati efektivne vrijednosti struja i napona što smanjuje stupanj djelovanja, a može i uzrokovati kvar pretvarača. Povećanjem valovitosti povećavaju se i vršne struje i naponi unutar pretvarača što znači veće strujno i naponsko opterećenje komponenata. Ako frekvencije subharmoničnih ustaljenih stanja ulaze u čujno područje onda se zbog magnetostrikcije u jezgri prigušnice može pojaviti i akustička i strukturna buka. Zato je važno poznavati neregularna

ustaljena stanja, moći ih predvidjeti i odrediti područje vrijednosti parametara pretvarača, trošila i izvora za koje se neregularna ustaljena stanja sa sigurnošću mogu izbjeći.

Zbog nelinearnosti pretvarača predviđanje neregularnih ustaljenih stanja kao i njihovo izbjegavanje prikladnim izborom parametara pretvarača ne može se obaviti analitički. Također, zbog različitosti vrsta pretvarača i načina njihovog upravljanja nije stvorena ni jedinstvena teorija koja objašnjava neregularno ponašanje pretvarača. Zato je svaki pretvarač potrebno analizirati zasebno.

U disertaciji je na jednom naponski upravljanim istosmjernom uzlaznom pretvaraču identificiran slijed kvaziperiodičnih ustaljenih stanja. Pritom je izmjereno značajno povećanje efektivne vrijednosti struje prigušnice, koje može uzrokovati kvar pretvarača. Izrađen je matematički model pretvarača i temeljem njega i simulacijski model za predviđanje kvaziperiodičnog ustaljenog stanja i pripadnih bifurkacija Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica (engl. *Border collision bifurcation*). Pokazano je kako se pretvarač mora matematički modelirati da bi se matematičkim modelom pretvarača mogla predviđati kvaziperiodična ustaljena stanja.

Identificirani su i slijedovi ustaljenih stanja pri pojavi kvaziperiodičnosti. Ustanovljeno je da ti slijedovi ovise o početnim uvjetima pretvarača, smjeru promjene bifurkacijskog parametra i brzini promjene bifurkacijskog parametra. Drugim riječima, iskazuje se multistabilnost pretvarača, jer se za isti ulazni napon pretvarača, ovisno o početnim uvjetima, može pojaviti više različitih ustaljenih stanja. Smjer promjene bifurkacijskog parametra utječe i na bifurkacijske točke Hopfovih bifurkacija i bifurkacija srazom granica što znači da se pri promjeni ustaljenih stanja pojavljuje i histereza.

Neka od kvaziperiodičnih ustaljenih stanja nastala su tako što je kontrolni napon u upravljačkom dijelu pretvarača izašao iz raspona vrijednosti pilastog napona. To je uzrokovalo bifurkaciju srazom granica. Bifurkacija srazom granica pojavljuje se i u periodičnim i u kvaziperiodičnim i u kaotičnim ustaljenim stanjima. Utvrđeno je kakav se odnos između kontrolnog napona i pilastog napona mora dogoditi da bi došlo do bifurkacije srazom granica kao i koje vrste ustaljenih stanja pritom mogu nastupiti.

Identifikacija ustaljenih stanja dobivenih simulacijama obavljena je valnim oblicima, trajektorijama, bifurkacijskim dijagramima i Poincaréovim slikama, a identifikacija ustaljenih stanja dobivenih mjerenjem obavljena je valnim oblicima, trajektorijama i harmonijskim sastavom.

Tri su pristupa analizi pretvarača. Koriste se metode diskretnih vremenskih trenutaka, metode usrednjavanja i izravne metode analize. Najtočnija se analiza pretvarača ostvaruje

izravnim metodama. U izravnim metodama diferencijalne se jednadžbe rješavaju računalom. Tako je za bilo koji skup parametara moguće proračunati ustaljeno stanje. Prepuštanjem proračuna računalu dijelom se gubi mogućnost identifikacije skupa parametara za koje se dobiva određeno ustaljeno stanje, otežana je identifikacija bifurkacija, a dobiva se veći broj isprobanih kombinacija parametara i pouzdanije određivanje valnih oblika. Proračun računalom može se obaviti ili primjenom komercijalnih programa za simulaciju električkih krugova ili vlastito napisanom digitalnom simulacijom. Primjenom komercijalnih računalnih alata ne može se pod kontrolom držati upotrijebljena numerička metoda proračuna, kao što je to slučaj s vlastito napisanom digitalnom simulacijom, jer struktura komercijalnih alata nije poznata. Nedostatak je izravne metode potreba za provođenjem većeg broja simulacija za što veći skup parametara pretvarača kako bi se model pretvarača s prihvatljivom sigurnošću mogao verificirati. U disertaciji će se primijeniti izravna metoda rješavanja diferencijalnih jednadžbi vlastito napisanom digitalnom simulacijom.

## **Struktura disertacije**

U uvodu disertacije opisana su neregularna ustaljena stanja od interesa i način istraživanja neregularnih ustaljenih stanja. U prvom je poglavlju dan pregled literature. U drugom se poglavlju opisuje istosmjerni uzlazni pretvarač s dva najčešća načina upravljanja, naponskim i strujnim. Fizički model pretvarača, matematički model pretvarača i simulacijski model pretvarača opisani su u trećem poglavlju. Posebno je obraćena pozornost na što točnije određivanje parametara fizičkog modela pretvarača. U četvrtom su poglavlju definirane pojave u pretvaraču koje su predmet ove disertacije. Opisane su i metode analize pretvarača, metode identifikacije bifurkacija i ustaljenih stanja pretvarača i putovi pretvarača u kaos. Posebna je pozornost posvećena kvaziperiodičnom ustaljenom stanju kao najčešćem ustaljenom stanju kojim se bavi ova disertacija.

U petom su poglavlju prikazani rezultati simulacija i mjerenja u rasponu vrijednosti ulaznog napona u kojem se pojavljuju Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica. Identificirani su do sada nepoznati slijedovi ustaljenih stanja, multistabilnost pretvarača i histereza ustaljenih stanja. Pokazano je da pojavom bifurkacije srazom granica nastaje značajno povećanje struje prigušnice koje može ugroziti rad pretvarača. Simulacijama su dobiveni bifurkacijski dijagrami s Neimark-Sackerovom bifurkacijom i bifurkacijom srazom granica te značajno povećanje struje prigušnice u području bifurkacija srazom granica. Pokazano je kako se temeljem odnosa upravljačkih signala pretvarača i signala nosioca može predvidjeti bifurkacija srazom granica i zaključiti o vrstama ustaljenih stanja koje pritom nastaju. Za bifurkaciju srazom granica

pokazano je da se može ukloniti ili odgoditi smanjenjem valovitosti napona trošila. Najvažniji rezultati istraživanja navedeni su u šestom poglavlju.

U prvom su prilogu navedeni prijevodi nekih važnijih engleskih izraza, kao i izraza za koje nisu pronađeni hrvatski prijevodi. U drugom je prilogu dan detaljan postupak matematičkog modeliranja istosmjernog uzlaznog pretvarača. U trećem su prilogu prikazani tablični rezultati izmjereni u cijelom području kvaziperiodičnosti pretvarača, kao i identificirani slijedovi ustaljenih stanja. U četvrtom je prilogu analiziran utjecaj bifurkacija i ustaljenih stanja na izlazni napon pretvarača. U petom je prilogu dan popis programskih kodova upotrijebljenih za simulaciju pretvarača.

# 1 PREGLED LITERATURE

U istraživanju neregularnih ustaljenih stanja istosmjernih pretvarača moguća su polazna točka metode kojima će se za odabrani matematički model promatranog pretvarača odrediti ustaljena stanja pretvarača i pojave koje se odnose na promjene ustaljenih stanja kao što su bifurkacije, multistabilnost i putovi u kaos. Pretvarači su nelinearni vremenski promjenljivi sustavi tako da svaka metoda analize matematičkog modela mora u konačnici biti numerička i dati rezultate u obliku brojčanih vrijednosti. Zato je potrebno razviti načine prikaza i identifikacije ustaljenih stanja i njihovih promjena. Uz odgovor na pitanje kako se događaju pojave traži se i odgovor na pitanje kako bi te pojave mogle biti štetne za pretvarač i njegovu okolinu. Metode analize istosmjernih pretvarača i metode identifikacije ustaljenih stanja i njihovih promjena (bifurkacija) načelno su iste za sve vrste istosmjernih pretvarača. S druge strane, vrste ustaljenih stanja i bifurkacija ovise o vrsti pretvarača i načinu njihova upravljanja [1].

Iako su se s neregularnim ustaljenim stanjima istosmjernih pretvarača projektanti i istraživači sretali i davno prije, zbog nedovoljnog poznavanja nelinearnih sustava o tome se počelo pisati tek krajem 80-tih godina 20-tog stoljeća. Tako su Hamill i Jefferies u radu [2] za strujom upravljan silazni istosmjerni pretvarač simulacijom pokazali da je nakon bifurkacije perioda novonastalog subharmonika parni višekratnik već postojeće periode. S pomoću jednoparametarskog bifurkacijskog dijagrama prikazano je za koje vrijednosti bifurkacijskog parametra dolazi do bifurkacija, kao i da je skup vrijednosti struje prigušnice u kaotičnom ustaljenom stanju ograničen. Pri tom su krug analizirali diskretnim preslikavanjem struje prigušnice  $i_{n+1} = f(i_n)$ . Na jednadžbu preslikavanja primijenjen je uvjet stabilnosti da je u ravnotežnoj točki gradijent promjene manji od jedan. Ova se metoda u disertaciji naziva metodom diskretnih vremenskih trenutaka (engl. *Discrete-time iterative maps*). Osnovu te metode i njenu vezu s analizom krugova metodom usrednjavanja dali su Brown i Middlebrook u radu [3]. Praktičnu realizaciju silaznog pretvarača s tri različita načina upravljanja s promjenljivom periodom i trajnjima vođenja ventila pokazao je Wood [4]. Prikazao je ustaljena stanja s pomoću valnih oblika, trajektorija i harmonijskog sastava. Naglasio je da se u kaotičnom ustaljenom stanju pojavljuje zvuk („... Audible noise ... bacon frying.“). Pokazao je bifurkaciju udvostručenjem periode i kaotično ustaljeno stanje pri promjeni ulaznog napona. Rezultate mjerenja popratio je izravnim rješavanjem jednadžbi stanja pretvarača. Bazu za sve buduće pulsno-širinski modulirane pretvarače dali su Deane i Hamill u svom radu [5]. Izradili su silazni pretvarač s integriranim sklopom MC34060, izmjerili su trajektorije i bifurkacijski dijagram te identificirali bifurkaciju udvostručenjem periode. Pokazali su i neregularna ustaljena stanja nekoliko drugih sklopova

energetske elektronike. Hamill, Deane i Jefferies su dalje u radu [6] na primjeru pulsno-širinski moduliranog silaznog pretvarača opisali nelinearne iterativne mape. Metodama kvalitativnog rješavanja diferencijalnih jednadžbi određivali su Ljapunovljeve eksponente i valne oblike, pokazali osjetljivost kaotičnog ustaljenog stanja na početne uvjete i da to nisu ni znali dobili i bifurkaciju srazom granica pokazavši preskok kontrolnog napona preko pilastog napona (signala nosioca). Numerički postupak potvrdili su mjerenjem.

Prvi uzlazni pretvarač, ali strujno upravljani, koji iskazuje kaotično ponašanje prikazali su Krein i Bass [7]. Prikazali su bifurkacijski dijagram struje prigušnice u ovisnosti o omjeru ulazne i izlazne struje. Rezultati su dobiveni izravnim rješavanjem jednadžbi stanja pretvarača i mjerenjem. Ujedno su i prvi uočili multistabilnost pretvarača. Prvi naponski upravljani uzlazni pretvarač obradio je Tse u [8]. Energetski krug pretvarača modeliran je induktivitetom, kapacitetom, nadomjesnim otporom kapaciteta i idealnim ventilima. Modelirao je pretvarač u diskontinuuiranom načinu rada. Analizu je obavio metodom diskretnih vremenskih trenutaka i promatrao je svojstvenu vrijednost matrice tog sustava. Prikazao je trajektorije i Poincaréove slike i iz njih bifurkacijski dijagram. Dobio je put u kaos udvostručenjem periode. Za strujno upravljani uzlazni pretvarač Chan i Tse su u radu [9] dobili uz bifurkaciju udvostručenja periode i kvaziperiodično ustaljeno stanje putem Neimark–Sackerove bifurkacije. Prikazani su valni oblici, trajektorije i harmonijski sastav slabe razlučivosti i osjetljivosti i Ljapunovljevi eksponenti i bifurkacijski dijagrami metodom diskretnih vremenskih trenutaka i izravnom simulacijom. Identifikacija kvaziperiodičnog ustaljenog stanja preko bifurkacijskih dijagrama nije sigurna pa promatraju i valne oblike i k tomu Ljapunovljeve eksponente kao siguran način identifikacije. Nemaju fizički realiziran model pa točnost svojih postupka „potvrđuju“ metodom izravne simulacije. U području kvaziperiodičnosti pokušavaju preko Ljapunovljevih eksponenata i preko harmonijskog sastava identificirati periodično ustaljeno stanje periode četiri puta veće od periode takta i razlikovati ga od ustaljenog stanja četverostruke periode. To je važan primjer pogrešne identifikacije kvaziperiodičnog ustaljenog stanja, koju su pokazali Banerjee i suradnici u radu [10]. Banerjee i suradnici bavili su se bifurkacijama sustava drugog reda linearnog po odsječcima. Klasificirali su vrste bifurkacija srazom granica s obzirom na ponašanje svojstvenih vrijednosti na granici dvaju prostora stanja. Opisali su i supostojanje atraktora (engl. *Coexisting attractors*) i kako razlikovati udvostručenje periode nastalo bifurkacijom udvostručenja periode od udvostručenja periode nastalo bifurkacijom srazom granica. Di Bernardo i suradnici su na strujno upravljanom uzlaznom pretvaraču u radu [11] primjenom metode diskretnih vremenskih trenutaka sa stroboskopskim slikama i slikama udara (engl. *stroboscopic maps i impact maps*) trajektorijama i analizom svojstvenih vrijednosti dobili različita kvaziperiodična ustaljena stanja u ovisnosti o

naponskom faktoru povratne veze. Prvi izvještaj o supostojećim atraktorima (coexistence of attractors) u ikojem sklopu energetske elektronike dao je Banerjee u radu [12]. Supostojeći atraktori su preduvjet multistabilnosti pretvarača i mogu biti štetni, jer se u ovisnosti o početnim uvjetima željeno ustaljeno stanje pretvarača može promijeniti u neko drugo, neželjeno ustaljeno stanje. Simulirani su bifurkacijski dijagrami tako da se uzmu različiti početni uvjeti i tako da se pri promjeni bifurkacijskog parametra uzimaju početni uvjeti dobiveni na kraju simulacije prethodnog parametra. El Aroudi i suradnici su u radu [13] na naponski upravljanom uzlaznom pretvaraču izravnom metodom dobili Hopfovu bifurkaciju i kvaziperiodično ustaljeno stanje. Opisuju cjelobrojan omjer između frekvencija koje čine ustaljeno stanje fazne zaključanosti (mode locking). Kvaziperiodično ustaljeno stanje naslućuju iz valnih oblika, jer se ono iz bifurkacijskog dijagrama ne razlikuje od kaotičnog ustaljenog stanja. Zato kao i Tse, za sigurnost identifikacije računaju i Ljapunovljeve koeficijente. Analiziraju utjecaj parazitnih elemenata, otpora prigušnice i napona diode na ustaljena stanja pa zaključuju da oni ne utječu na vrstu bifurkacija (a da dioda samo pomiče bif. dijagram) i da se zato smiju ugraditi u matematički model. Tranzistor su modelirali idealnom sklopkom. Rezultate simulacije potvrdili su mjerenjima. Bogatu dinamiku ovog pretvarača pri pojavi kvaziperiodičnosti nastavljaju proučavati El Aroudi i Leyva [14] ali ovog puta metodom diskretnih vremenskih trenutaka i s pomoću svojstvenih vrijednosti. Pri tom uvode strujno upravljanje pretvarača. Opisuju prelaske iz kontinuiranog načina rada u diskontinuirani, pojavu multistabilnosti i histereze, koje potvrđuju i mjerenjima. Multistabilnost identificiraju i u prostoru stanja, koje dijele na područja u kojima se pojavljuju različita ustaljena stanja. Benadero, El Aroudi i suradnici u radu [15] pokušavaju metodom usrednjavanja predvidjeti što više ustaljenih stanja i bifurkacija za tri osnovne vrste istosmjernih pretvarača. Umjesto svojstvenih vrijednosti koriste koncept kritične impedancije. Samo simulacijama utvrđuju i multistabilnost i histerezu te uspijevaju dobiti sedlasto-čvornu, Hopfovu i bifurkaciju srazom granica. Ova linija istraživanja nije dalje značajnije istraživana zato što se usrednjavanjem mogu uspješno modelirati pojave do najviše polovine sklopne frekvencije. Flegar i Pelin u radu [16] simuliraju bifurkacijske dijagrame po ulaznom naponu, induktivitetu trošila, periodi pilastog napona te otporu i kapacitetu trošila. Time daju korisne smjernice za izbor parametara pretvarača kako bi se izbjegla neregularna ustaljena stanja. Zatim u radu [17] pokazuju put u kaos udvostručenjem periode i identificiraju ustaljeno stanje dvostruke periode iz izmjerene harmonijskog sastava struje prigušnice. Naglašavaju, što je u istraživanjima rijetkost, negativnu stranu neregularnih ustaljenih stanja kroz povećanu valovitost i vršne vrijednosti napona i struja. Na primjeru silaznog istosmjernog pretvarača Zhushubaliyev, Soukhoterin i Mosekilde u radu [18] primjenom metode diskretnih vremenskih trenutaka i s pomoću svojstvenih vrijednosti

identificiraju Hopfovu bifurkaciju, multistabilnost i histerezu te pokazuju različite slijedove promjena ustaljenih stanja. Bave se i rotacijskim brojevima nastalih ustaljenih stanja fazne zaključanosti. Jain i Banerjee su se u radu [19] na općem slučaju bavili bifurkacijom srazom granica i pokazali različite bifurkacijske dijagrame koji iz takvih bifurkacija mogu proizaći. Godine 2004. Tse objavljuje knjigu „Complex behavior of switching power converters“ [20] prvu i dosad jedinu koja se bavi ustaljenim stanjima i bifurkacijama samo u istosmjernim pretvaračima.

Metodu za sigurno razlikovanje standardnih bifurkacija od nestandardnih bifurkacija bez određivanja svojstvenih vrijednosti opisali su Dai i suradnici u radu [21]. Primjenom te metode može se bifurkacija srazom granica identificirati već samo promatranjem valnih oblika. Maity, Tripathy i Banerjee u radu [22] u naponski upravljanoj silaznoj pretvaraču identificiraju bifurkaciju srazom granica po naglom skoku svojstvene vrijednosti izvan jedinične kružnice. Simuliraju Poincaréove slike, trajektorije, jednoparametarski i dvoparametarski bifurkacijski dijagram. Potvrđuju i pravilo pojavljivanja fazne zaključanosti u prozorima između kvaziperiodičnih ustaljenih stanja. Modeliraju pretvarač krugom drugog reda i tvrde da je to najjednostavniji krug na kojem je uočena bifurkaciju srazom granica. Zhusubaliyev, Mosekilde i suradnici su na tom polju za silazni pretvarač s dvorazinskim upravljanjem pokazali i simulacijama i mjerenjima put u kvaziperiodičnost bifurkacijama srazom granica [23]. Pokazuju da se amplituda kvaziperiodičnih oscilacija povećava linearno s promjenom bifurkacijskog parametra. Prvi ukazuju na mogućnost pojave kvaziperiodičnosti u istom pretvaraču i zbog Neimark-Sackerove bifurkacije i zbog bifurkacije srazom granica. Pokazali su i pojavu histereze za nekoliko različitih prijelaza ustaljenih stanja. Na naponski upravljanoj silaznoj pretvaraču i simulacijom i mjerenjem Alarcon, El Aroudi i suradnici u radu [24] pokazuju mogućnost predviđanja Hopfove bifurkacije određivanjem valovitosti kontrolnog napona koji se uspoređuje sa signalom nosiocem (pilastim naponom) tvoreći pulsno-širinski modulirani signal.

Banerjee, Giaouris i suradnici su u radu [25] klasificirali četiri vrste kvaziperiodičnosti i pripadnih slijedova promjena ustaljenih stanja za lokalne bifurkacije. Simulirali su strujom upravljanoj uzlaznoj pretvaraču kao krug trećeg reda. Identificirali su bifurkacije primjenom metode diskretnih vremenskih trenutaka i svojstvenih vrijednosti. Zhusubaliyev i Mosekilde su u radu [26] naveli primjere netipičnih prijelaza iz ustaljenog stanja osnovne periode u razna druga ustaljena stanja. Navode i da se vrsta bifurkacije koja je uzrokovala nastanak kvaziperiodičnog ustaljenog stanja može prepoznati i po pravilnosti promjene kvaziperiodičnih oscilacija mijenjanjem bifurkacijskog parametra. Slikovit prikaz metode diskretnih vremenskih trenutaka i svojstvenih vrijednosti u odabiru parametara kaskadnog silazno-uzlaznog pretvarača tako da se izbjegnu neregularna ustaljena stanja dali su u radu [27] Abusorrah, Mandal i suradnici. Upravljački je dio

pretvarača izveden s PI-regulatorom i strujnim i naponskim upravljanjem, a podešavanje parametara za izbjegavanje neregularnih ustaljenih stanja odvija se samo u upravljačkom dijelu pretvarača. Imrayed, Daho i suradnici [28] su na strujom upravljanim uzlaznom pretvaraču dobili kvaziperiodičnost i multistabilnost. Kombinirali su metodu diskretnih vremenskih trenutaka i svojstvenih vrijednosti s izravnom metodom. Dobivaju izmjene stabilnih i nestabilnih ustaljenih stanja osnovne periode i kvaziperiodičnog ustaljenog stanja Neimark-Sackerovom bifurkacijom.

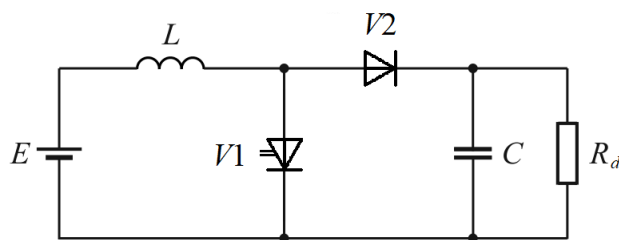
## 2 OSNOVNO O ISTOSMJERNOM UZLAZNOM PRETVARAČU

Istosmjerni pretvarači su pretvarači koji povezuju istosmjerne mreže. Jedna istosmjerna mreža je pojna mreža ili izvor, a druga je trošilo. Izvor i trošilo razlikuju se po nazivnom naponu. U istosmjernim pretvaračima odvija se promjena srednje vrijednosti napona izvora u drugačiju srednju vrijednost napona trošila. U uzlaznom pretvaraču nazivni napon trošila veći je od nazivnog napona izvora. Tijekom rada pretvarača dolazi do promjena u izvoru, trošilu i u samom pretvaraču. Da bi se zadržale nazivne karakteristike pretvarača potrebno je upravljati pretvaračem. Zato je prikladno pretvarač podijeliti na energetski dio i upravljački dio.

U energetskom se dijelu pretvarača obavlja proces pretvorbe istosmjerne snage pojne mreže u izmjeničnu snagu pretvarača i zatim u istosmjernu snagu trošila. Pretvorbu istosmjerne snage u izmjeničnu obavlja upravljiva sklopka sklapanjem nazivnom (sklopnom) periodom rada pretvarača. Pretvorbu izmjenične snage u istosmjernu obavlja neupravljiva sklopka. Upravljivom sklopkom upravlja upravljački dio pretvarača. U pretvaraču kojim se bavi ova disertacija upravljanje je pulsno-širinsko. Mijenja se trajanje vođenja upravljivog ventila pri nepromijenjanom trajanju nazivne periode rada pretvarača.

### 2.1 Energetski dio uzlaznog pretvarača

U analizi energetskog dijela pretvarača pretpostavlja se da su sve komponente idealne. Najjednostavniji model energetskog dijela istosmjernog uzlaznog pretvarača prikazuje Slika 2.1.



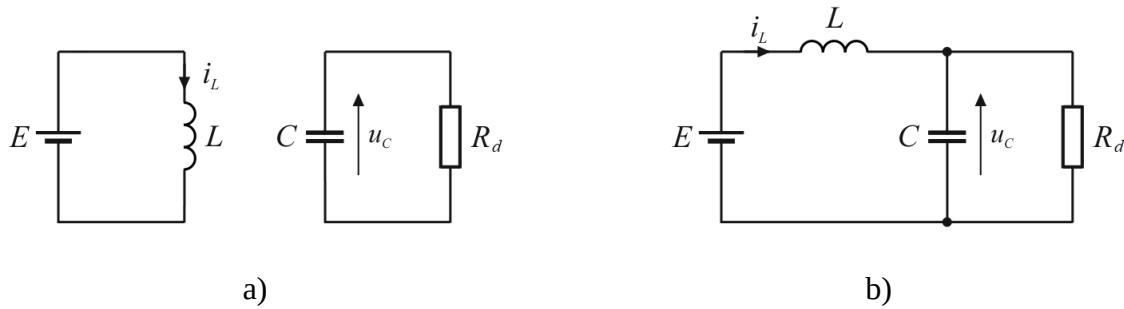
Slika 2.1 Najjednostavnija nadomjesna shema spoja istosmjernog uzlaznog pretvarača

Pretvaračem se upravlja pulsno-širinski, što znači da je sklopna perioda konstantna, a trajanjem vođenja ventila  $V1$  se upravlja i ono je promjenljivo. Ventil  $V1$  je punoupravljiv, a ventil  $V2$  neupravljiv. Sklapanje ventila  $V1$  ostvaruje se putem upravljačkog dijela pretvarača, a sklapanje ventila  $V2$  strujno-naponskim prilikama u energetskom dijelu pretvarača. U pretvaraču se nalaze dva ventila pa su u općem slučaju moguća četiri intervala rada pretvarača. Interval rada u kojem vode oba ventila ne može se pojaviti, jer tijekom vođenja ventila  $V1$  nisu zadovoljeni uvjeti za

istovremeno vođenje ventila V2. Tako pretvarač može raditi u dva ili tri intervala rada, ovisno o tome je li u kontinuiranom ili diskontinuiranom načinu rada.

### 2.1.1 Kontinuirani način rada

U kontinuiranom načinu rada struja induktiviteta tijekom sklopne periode veća je od nule. Pretvarač ima dva intervala rada u kojima ventili V1 i V2 vode protutaktno. U prvom intervalu ventil V1 vodi, a ventil V2 ne vodi pa se energetski dio pretvarača može prikazati s dva međusobno odvojena kruga, Slika 2.2a. U drugom intervalu ventil V1 ne vodi, a ventil V2 vodi, Slika 2.2b.



Slika 2.2 Kontinuirani način rada: a) ventil V1 vodi, a ventil V2 ne vodi, b) ventil V1 ne vodi, a ventil V2 vodi

Za vrijeme prvog intervala rada pretvarač je opisan sljedećim jednažbama stanja

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \quad (2.1)$$

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{1}{R_d} u_C \quad (2.2)$$

Za vrijeme drugog intervala rada pretvarač je opisan sljedećim jednažbama stanja

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{1}{L} u_C \quad (2.3)$$

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{C} \frac{1}{R_d} u_C \quad (2.4)$$

Vremenska konstanta kruga u kojem se prazni kapacitet u prvom intervalu rada je

$$\tau = R_d C \quad (2.5)$$

a frekvencija pseudoperiodičnog odziva u drugom intervalu rada je

$$\omega_d = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2R_d C}\right)^2} \quad (2.6)$$

Ako je zadovoljeno

$$\tau \gg T_s \quad (2.7)$$

i

$$\omega_d \ll \frac{2\pi}{T_s} \quad (2.8)$$

onda se izmjenične komponente struje induktiviteta i napona kapaciteta mogu nadomjestiti trokutastim valnim oblicima. Valne oblike napona i struje induktiviteta i kapaciteta prikazuje Slika 2.3. Pri tom su radi zornosti prikaza naglašene izmjenične komponente struje induktiviteta i napona kapaciteta, a struja trošila  $R_d$  i struja ventila  $V2$  u vođenju smatraju se konstantnim.

U kontinuiranom načinu rada je

$$T_{V1} + T_{V2} = T_s \quad (2.9)$$

gdje su  $T_{V1}$  i  $T_{V2}$  intervali vođenja ventila  $V1$  i  $V2$ , a  $T_s$  je sklopna perioda i određena je upravljačkim dijelom pretvarača. Omjer intervala

$$\alpha = \frac{T_{V1}}{T_s} \quad (2.10)$$

je faktor vođenja i kreće se u intervalu vrijednosti

$$0 < \alpha < 1 \quad (2.11)$$

Srednja vrijednost napona trošila određena je iz jednakosti voltsekundi napona na induktivitetu

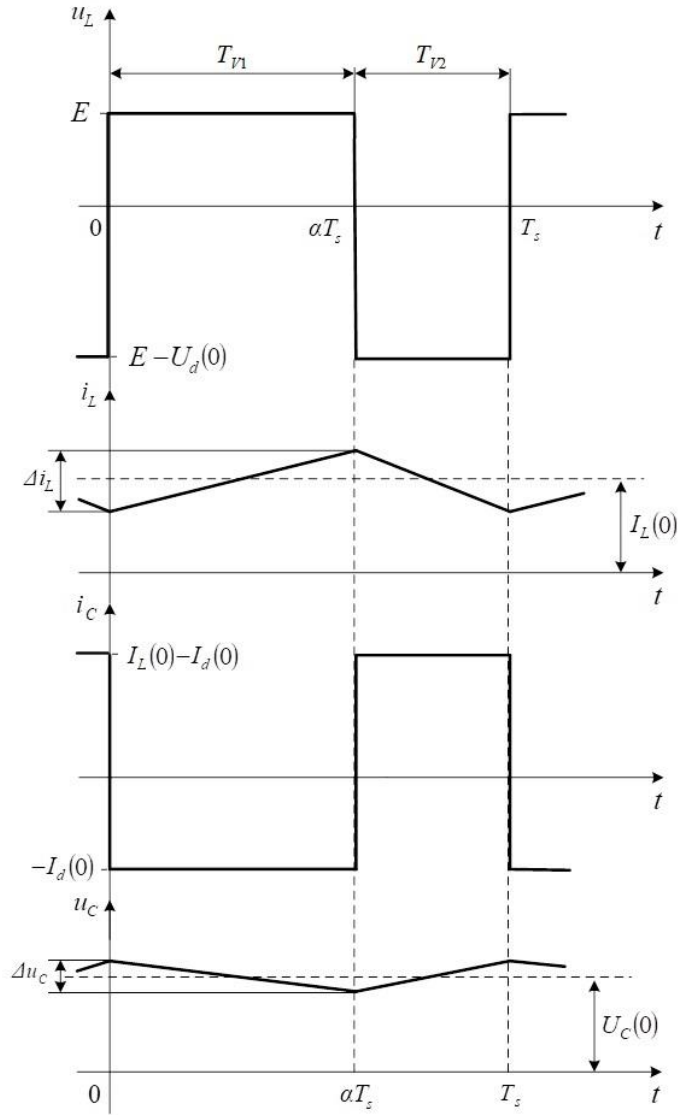
$$U_d(0) = \frac{E}{1 - \alpha} \quad (2.12)$$

Srednja vrijednost struje induktiviteta određena je iz načela jednakosti snaga pretvarača

$$I_L(0) = \frac{U_d^2(0)}{R_d E} \quad (2.13)$$

Valovitost struje induktiviteta je

$$\Delta i_L = \alpha T_s \frac{E}{L} \quad (2.14)$$



Slika 2.3 Karakteristični valni oblici u kontinuiranom načinu rada

a valovitost napona kapaciteta je

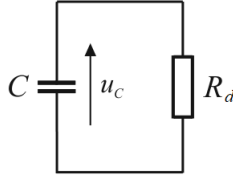
$$\Delta u_c = \frac{T_s}{R_d C} [U_d(0) - E] \quad (2.15)$$

pri čemu je  $U_d(0) = U_C(0)$ . Efektivna vrijednost struje induktiviteta je

$$I_L = \sqrt{I_L^2(0) + \left(\frac{\Delta i_L}{2\sqrt{3}}\right)^2} \quad (2.16)$$

### 2.1.2 Diskontinuirani način rada

U diskontinuiranom načinu rada struja induktiviteta tijekom sklopne periode padne na nulu. Tako pretvarač ima uz dva intervala rada u kojima ventili V1 i V2 vode protutaktno i treći interval rada u kojem ne vode ni ventil V1 ni ventil V2, Slika 2.4.



Slika 2.4 Diskontinuirani način rada u intervalu kad ne vode ni ventil V1 ni ventil V2

Za vrijeme trećeg intervala rada pretvarač je opisan sljedećim jednadžbama stanja

$$i_L = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{du_c}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{1}{R_d} u_c \quad (2.18)$$

Kada su zadovoljeni uvjeti (2.7) i (2.8) onda se izmjenične komponente struje induktiviteta i napona kapaciteta mogu nadomjestiti trokutastim valnim oblicima. Valne oblike napona i struje induktiviteta i kapaciteta prikazuje Slika 2.5. Pri tom je radi zornosti prikaza naglašena izmjenična komponenta napona kapaciteta, a struja trošila  $R_d$  i struja ventila V2 u vođenju smatraju se konstantnim.

U diskontinuiranom načinu rada je

$$T_{V1} + T_{V2} < T_s \quad (2.19)$$

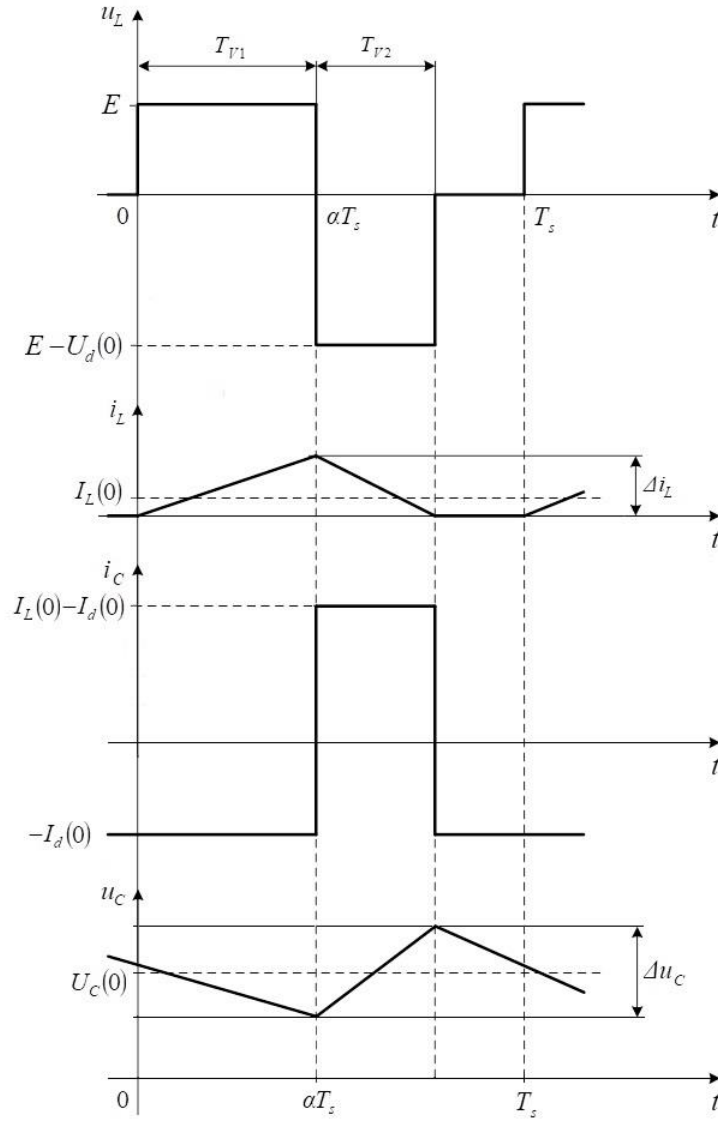
Srednja vrijednost napona trošila dana je prema [29]

$$U_d(0) = E \frac{1 + \sqrt{1 + 4R_d/\tilde{R}_{uz}}}{2} \quad (2.20)$$

pri čemu je

$$\tilde{R}_{uz} = \frac{2L_E}{\alpha^2 T_s} \quad (2.21)$$

izmjenični otpor istosmjernog uzlaznog pretvarača.



Slika 2.5 Karakteristični valni oblici u diskontinuiranom načinu rada

Srednja vrijednost struje induktiviteta određena je iz načela jednakosti snaga pretvarača

$$I_L(0) = \frac{U_d^2(0)}{R_d E} \quad (2.22)$$

Valovitost struje induktiviteta je

$$\Delta i_L = \alpha T_s \frac{E}{L} \quad (2.23)$$

a efektivna vrijednost struje induktiviteta je

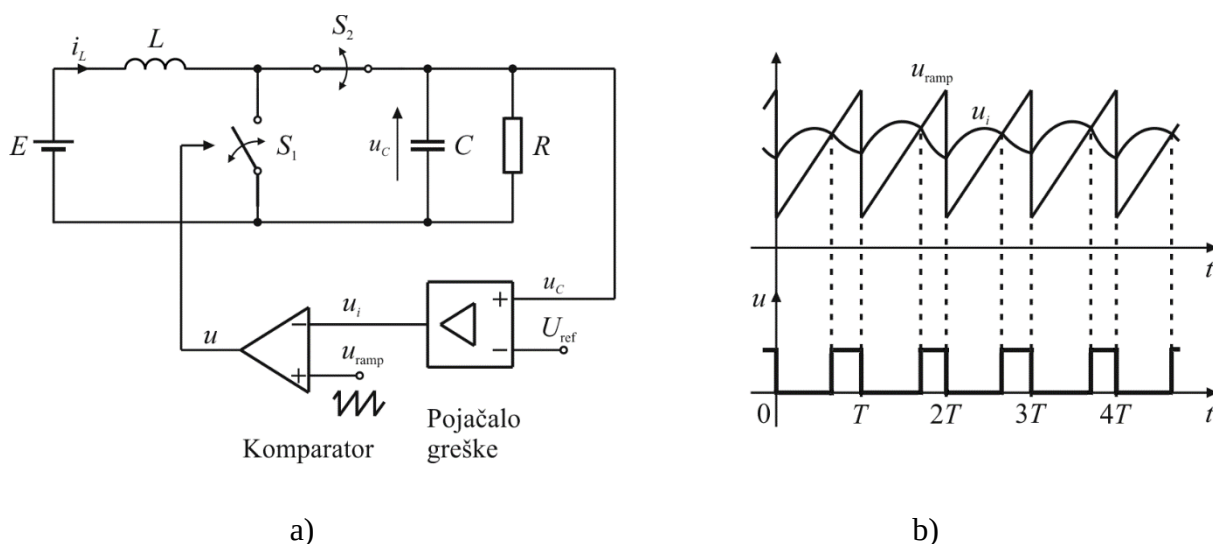
$$I_L = \sqrt{\left(\frac{T_{V1} + T_{V2}}{T_s}\right) \frac{\Delta i_L}{\sqrt{3}}} \quad (2.24)$$

## 2.2 Upravljanje pretvaračem

Tijekom rada pretvarača dolazi do promjena ulaznog napona i opterećenja, smetnji, promjena temperature i drugih veličina koje utječu na rad pretvarača i na njegov izlazni napon. Kako bi se izlazni napon održao stabilnim potrebno je upravljati pretvaračem. Upravljanje se redovito obavlja po varijablama stanja – naponu kapaciteta i struji induktiviteta pa tako postoje naponsko upravljanje i strujno upravljanje. Izvode se na različite načine kao što su predupravljanje, histerezno upravljanje, upravljanje po srednjoj i vršnoj vrijednosti struje, klizno upravljanje, prediktivno, fuzzy i druga [1, 30, 31, 32]. Opisat će se samo naponsko i strujno upravljanje u svojim osnovnim oblicima.

### 2.2.1 Naponsko upravljanje

Naponsko se upravljanje temelji na praćenju izlaznog napona. U skladu s izlaznim naponom upravlja se faktorom vođenja tako da izlazni napon zadrži prethodno namještenu vrijednost. Načelnu shemu spoja i valne oblike upravljačkog dijela naponski upravljanog uzlaznog pretvarača prikazuje Slika 2.6. Faktorom vođenja upravlja pulsno-širinski modulirani signal, koji nastaje usporedbom kontrolnog signala  $u_i$  i signala nosioca  $u_{ramp}$ . Signal nosilac realiziran je kao pilasti napon.



Slika 2.6 Naponski upravljan uzlazni pretvarač: a) Načelnna shema spoja, b) Valni oblici upravljačkog dijela pretvarača

Ako se primjerice smanji ulazni napon  $E$ , smanjit će se i izlazni napon  $U_c(0)$  pa posljedično i kontrolni napon  $U_i(0)$ . Na izlazu komparatora produljit će se trajanje pozitivnih impulsa pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala  $u$  pa će faktor vođenja  $\alpha$  biti veći. Povećanje faktora

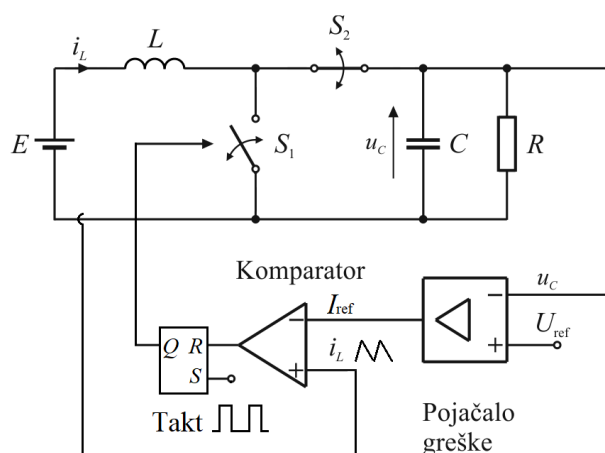
vođenja prema izrazu (2.10) kompenzirat će smanjenje ulaznog napona pa će se izlazni napon vraćati na početnu vrijednost. Ako se primjerice pri konstantnom ulaznom naponu poveća opterećenje, smanjit će se izlazni napon  $U_C(0)$  pa će se analogno prethodnom slučaju povećati faktor vođenja i također izlazni napon vratiti na početnu vrijednost.

Pri tom se u oba navedena slučaja regulacija odvija tako da se u početku regulacije trenutna vrijednost izlaznog napona nastavlja smanjivati zato što se produljio interval vođenja sklopke  $S_1$ . Tek kada prvi put provede sklopka  $S_2$  dolazi do povećanja trenutne vrijednosti izlaznog napona i njegovog povratka na početnu vrijednost. Takav je tijek regulacije usporava samu regulaciju.

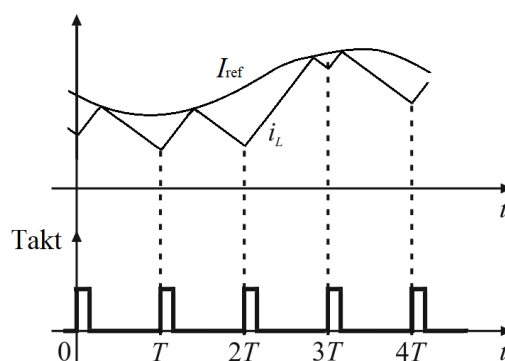
## 2.2.2 Strujno upravljanje

Strujno se upravljanje temelji i na praćenju izlaznog napona i na praćenju struje prigušnice. Upravljanje faktorom vođenja tako da izlazni napon zadrži prethodno namještenu vrijednost obavlja se i u skladu s izlaznim naponom i u skladu sa strujom prigušnice. Načelnu shemu spoja i valne oblike upravljačkog dijela strujno upravljanog uzlaznog pretvarača prikazuje Slika 2.7.

U unutarnjoj povratnoj vezi prati se struja prigušnice. Kada struja prigušnice postigne vrijednost jednaku struji  $I_{ref}$  komparator promijeni izlazni napon, a time i stanje bistabila koji onda isklopi punoupravljivu sklopku  $S_1$ . Struja prigušnice smanjuje se sve dok se ne pojavi impuls takta koji ponovo uklopi punoupravljivu sklopku  $S_1$ . Ako se primjerice ulazni napon smanji, struja prigušnice sporije će se povećavati pa će se povećati faktor vođenja. Tako se kompenzira promjena ulaznog napona i izlazni napon zadržava prethodno namještenu vrijednost.



a)



b)

Slika 2.7 Strujno upravljan uzlazni pretvarač: a) Načelna shema spoja, b) Valni oblici upravljačkog dijela pretvarača

Ako se primjerice smanji opterećenje, izlazni će se napon povećati i tako smanjiti struju  $I_{\text{ref}}$ . Struja prigušnice prije će postići vrijednost  $I_{\text{ref}}$  pa će se faktor vođenja smanjiti što vodi ka smanjenju izlaznog napona i njegovom vraćanju na početnu vrijednost.

Unutarnja povratna veza djeluje unutar jedne periode takta, a vanjska sporije, unutar više perioda takta.

### **2.2.3 Utjecaj vrste upravljanja na pojavu kvaziperiodičnosti**

Disertacija se bavi kvaziperiodičnim ustaljenim stanjima i pojavama koje su vezane uz kvaziperiodična ustaljena stanja. Usporedit će se uzlazni pretvarači s naponskim i strujnim upravljanjem s obzirom na vrstu kvaziperiodičnosti i na pojavu multistabilnosti u području kvaziperiodičnosti.

Hopfova bifurkacija identificirana je u naponski upravljanom uzlaznom pretvaraču u radovima [13, 14, 33], a u strujno upravljanom uzlaznom pretvaraču u radovima [11, 25, 28, 33, 34, 35]. Bifurkacija srazom granica koja uzrokuje pojavu kvaziperiodičnog ustaljenog stanja u naponski upravljanom uzlaznom pretvaraču do sada nije opisana i u disertaciji će biti prvi put obrađena. Bifurkacija srazom granica koja uzrokuje pojavu kvaziperiodičnog ustaljenog stanja u strujno upravljanom uzlaznom pretvaraču opisana je u radu [33]. Multistabilnost u području kvaziperiodičnih ustaljenih stanja u strujno upravljanom uzlaznom pretvaraču i Hopfovom bifurkacijom identificirana je u radu [35], a s bifurkacijom srazom granica u radu [33]. Multistabilnost u području kvaziperiodičnih ustaljenih stanja u naponski upravljanom uzlaznom pretvaraču i Hopfovom bifurkacijom identificirana je u radu [14].

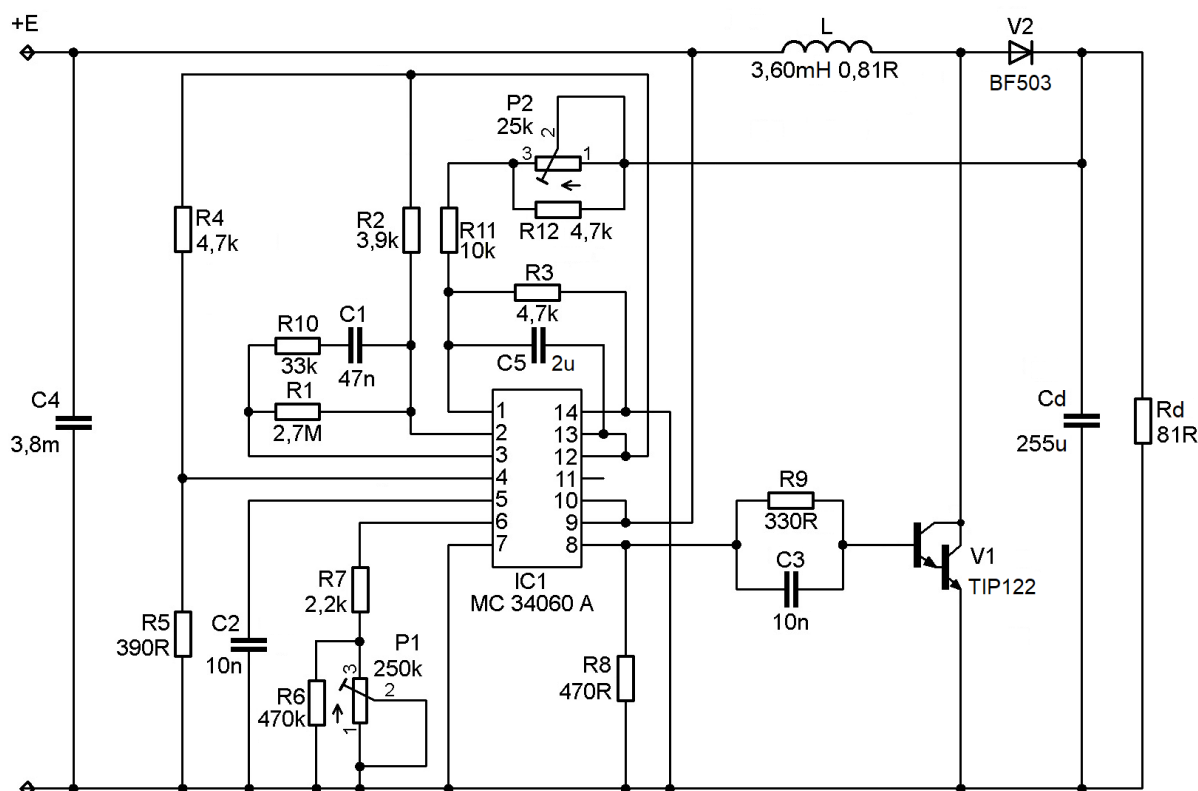
Neregularna ustaljena stanja i bifurkacije pojavljuju se i u strujno i u naponski upravljanim uzlaznim pretvaračima. Naponsko upravljanje jednostavnije je od strujnog i zato je odabrano za istraživanje.

### 3 MODELIRANJE NAPONSKI UPRAVLJANOG ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA

U poglavlju 2 opisan rad najjednostavnijeg modela istosmjernog uzlaznog pretvarača. Zadatak je disertacije uspješno predviđati neregularna ustaljena stanja pretvarača. Kako bi se to postiglo potrebno je temeljem fizički izvedenog pretvarača odabrati matematički model pretvarača. Zatim treba taj model transformirati u simulacijski model, provesti simulacije, usporediti rezultate simulacija i mjerenja, temeljem razlika u tim rezultatima korigirati matematički i simulacijski model i tako ponavljati sve faze dok se ne postigne tehnički prihvatljivo podudaranje rezultata simulacije s rezultatima mjerenja.

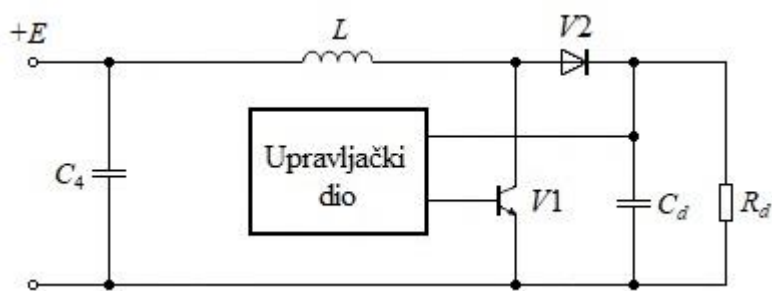
#### 3.1 Fizički model uzlaznog pretvarača

Fizički izveden uzlazni pretvarač prikazan je shemom spoja, Slika 3.1.



Slika 3.1 Shema spoja fizičke izvedbe uzlaznog pretvarača

U shemi spoja mogu se razlučiti energetski i upravljački dio pretvarača, Slika 3.2. Upravljački dio pretvarača prikazan je blokom, a energetski dio pretvarača čine sve ostale komponente. Upravljačka veličina je izlazni napon pa je pretvarač naponski upravljan.



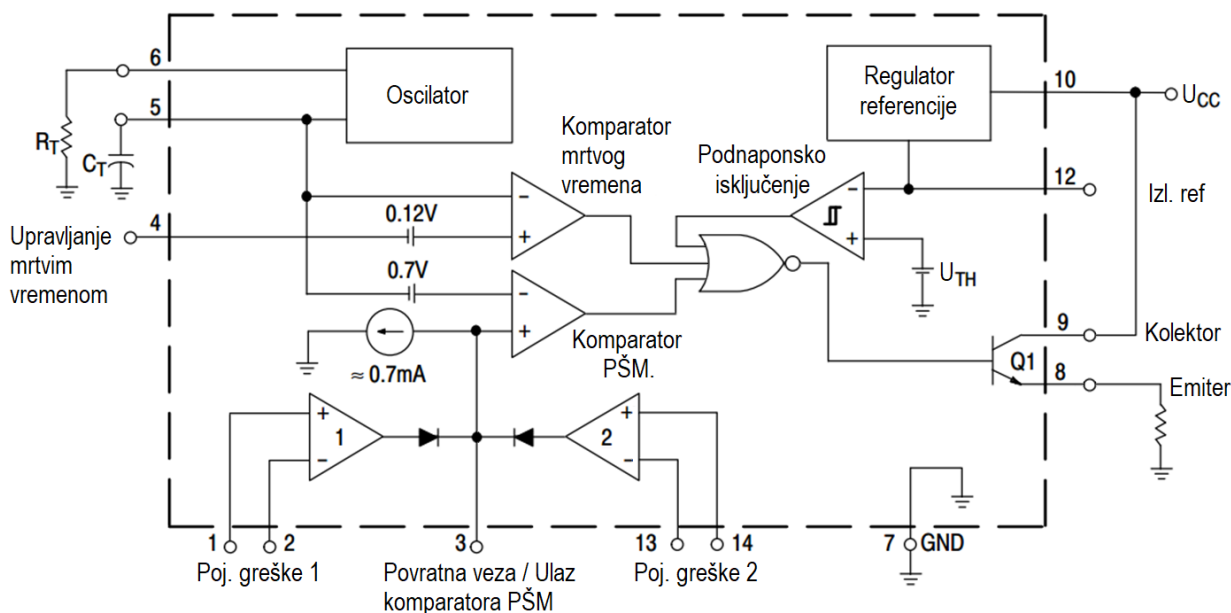
Slika 3.2 Načelna shema spoja uzlaznog pretvarača rastavljena na energetski i upravljački dio.

Popis komponenata uzlaznog pretvarača i njihove funkcije navedene su u tablici 3.1.

Tablica 3.1 Popis komponenata uzlaznog pretvarača i njihova funkcija.

| Komponenta | Vrijednost                                            | Funkcija                                                                                                            |
|------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $R_1$      | 2,7 k $\Omega$                                        | Namještanje proporcionalnog faktora PI-regulatora                                                                   |
| $R_2$      | 3,9 k $\Omega$                                        |                                                                                                                     |
| $R_3$      | 4,7 k $\Omega$                                        | Otpornički djelitelj za podešavanje izlaznog napona                                                                 |
| $R_4$      | 4,7 k $\Omega$                                        | Podešavanje mrtvog vremena                                                                                          |
| $R_5$      | 390 $\Omega$                                          |                                                                                                                     |
| $R_6$      | 470 k $\Omega$                                        | Podešavanje sklopne frekvencije                                                                                     |
| $R_7$      | 2,2 k $\Omega$                                        | Podešavanje sklopne frekvencije                                                                                     |
| $R_8$      | 470 $\Omega$                                          | Namještanje radne točke izlaza 8 integriranog sklopa                                                                |
| $R_9$      | 330 $\Omega$                                          | Namještanje struje baze i brzine sklapanja                                                                          |
| $R_{10}$   | 33 k $\Omega$                                         | Namještanje proporcionalnog faktora PI-regulatora                                                                   |
| $R_{11}$   | 10 k $\Omega$                                         | Otpornički djelitelj za podešavanje izlaznog napona                                                                 |
| $R_{12}$   | 4,7 k $\Omega$                                        |                                                                                                                     |
| $R_d$      | 81 $\Omega$                                           | Trošilo 3,9 k $\Omega$   470 $\Omega$   100 $\Omega$ = 81 $\Omega$                                                  |
| $P_1$      | 250 k $\Omega$                                        | Promjena sklopne frekvencije                                                                                        |
| $P_2$      | 25 k $\Omega$                                         | Promjena izlaznog napona                                                                                            |
| $C_1$      | 47 nF/100 V                                           | Kondenzator PI-regulatora                                                                                           |
| $C_2$      | 10 nF/100 V + 390 pF/400 V                            | Podešavanje sklopne frekvencije                                                                                     |
| $C_3$      | 10 nF/32 V                                            | Brže uklapanje ventila V1                                                                                           |
| $C_4$      | 470 $\mu$ F/63 V + 3300 $\mu$ F/35 V                  | Smanjenje valovitosti izvora                                                                                        |
| $C_5$      | 2 $\mu$ F/63 V + tantal K5K                           | Smanjenje osjetljivosti pretvarača na smetnje                                                                       |
| $C_d$      | $C_d = 255 \mu\text{F}$ , $R_C = 165 \text{ m}\Omega$ | Smanjenje valovitosti izlaznog napona.<br>Drugi kondenzator $C_d = 165 \mu\text{F}$ , $R_C = 220 \text{ m}\Omega$ . |
| IC         | MC34060AP                                             | Pulsno-širinska modulacija upravljive sklopke                                                                       |
| V1         | TIP122                                                | Upravljiva sklopka                                                                                                  |
| V2         | BF503                                                 | Neupravljiva sklopka                                                                                                |
| L          | $L = 3,60 \text{ mH}$ , $R_L = 0,81 \Omega$           | Zračna prigušnica. Druga prigušnica $L = 2,37 \text{ mH}/0,62 \Omega$ .                                             |

Upravljački dio pretvarača temelji se na integriranom sklopu MC34060AP. Njime je realizirana pulsno-širinska modulacija pretvarača. Načelnu shemu spoja integriranog sklopa MC34060AP prikazuje Slika 3.3.



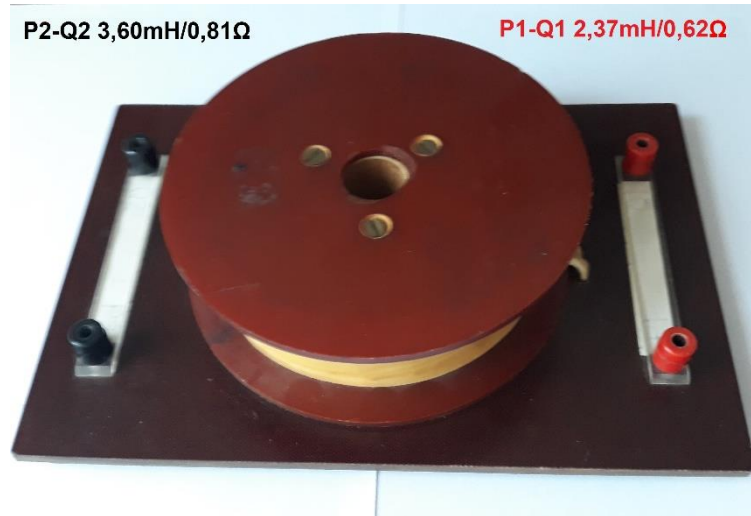
Slika 3.3 Načelna shema spoja integriranog sklopa MC34060AP

Temeljem shema spojeva, Slika 3.1 i Slika 3.3, modelira se shema spoja matematičkog modela pretvarača, Slika 3.5. Za svaku od komponenata sa shema spojeva, Slika 3.1 i Slika 3.3, bit će obrazloženo njeno uvrštavanje ili neuvrštavanje u matematički model.

### Energetski dio pretvarača

- Naponski izvor s paralelno spojenim kondenzatorom  $C_4$  modelira se idealnim naponskim izvorom  $E$ . Ulazni napon kreće se u rasponu  $7\text{ V} \leq E \leq 18\text{ V}$ .
- Zračna prigušnica  $L$  modelira se linearnim induktivitetom  $L$  i njenim otporom  $R_L$ . Otpor  $R_L$  čine uz otpor prigušnice i otpori petlji ventila V1 i ventila V2. Fizički model prigušnice čine dvije prigušnice, Slika 3.4. Većina je mjerenja obavljena s prigušnicom označenom s P2-Q2, a poneko je mjerenje obavljeno i s prigušnicom označenom s P1-Q1.
- Ventil V1 modelira se idealnom punoupravljivom sklopkom S1 sa serijski spojenim naponskim izvorom  $U_{V1}$ .
- Ventil V2 modelira se idealnom neupravljivom sklopkom S2 sa serijski spojenim naponskim izvorom  $U_{V2}$ .
- Kondenzator  $C_d$  modelira se kapacitetom  $C$ .
- Otpornik  $R_d$  modelira se otporom  $R_d$ .

- Napon trošila  $U_d(0) = 20,0 \text{ V}$  dobiven je pri ulaznom naponu  $E = 12,00 \text{ V}$ .



Slika 3.4 Zračna prigušnica upotrijebljena u pretvaraču

### Upravljački dio pretvarača

- Potenciometar  $P_2$  i otpornički djelitelj tri otpornika  $R_3$ ,  $R_{11}$  i  $R_{12}$  modeliraju se otporima  $R_{11} + R_{12} \parallel P_2 = R_X$  i  $R_3$ . Otpornim djeliteljem  $R_X$ ,  $R_3$  namješta se izlazni napon. Izlazni napon u cijeloj je disertaciji namješten na istu vrijednost pa se djelitelj modelira koeficijentom povratne veze

$$k = \frac{R_3}{R_X + R_3} \quad (3.1)$$

- Izlazni napon izvora referentnog napona *Regulator referencije* na priključnici 12 integriranog sklopa modelira se naponskim izvorom  $U_{\text{ref}}$ .
- Otpornici  $R_2$  i  $R_{10}$  spojeni na pojačalo greške *Poj. greške 1* modeliraju se otporima  $R_2$  i  $R_{10}$ .
- Dioda spojena na izlaz pojačala greške *Poj. greške 1* modelira se naponskim izvorom  $U_D = 0,3 \text{ V}$ .
- Kontrolni napon *Povratna veza / Ulaz komparatora PŠM* na priključnici 3 integriranog sklopa ujedno je i izlazni napon pojačala greške *Poj. greške 1* umanjen za napon  $U_D$  označava se sa  $u_i$  i kreće se u rasponu

$$0,3 \text{ V} - U_D \leq u_i \leq U_{\text{ref}} - U_D \quad (3.2)$$

U pojačalu greške *Poj. greške 1* pozitivniji od dva napona zasićenja je  $E_{Z+} = U_{\text{ref}}$ , a negativniji od dva napona zasićenja je  $E_{Z-} = 0,3 \text{ V}$ .

- Izlazni napon izvora referentnog napona *Regulator referencije* na priključnici 12 integriranog sklopa i otpornički djelitelj  $R_4$  i  $R_5$  spojen na upravljanje mrtvim vremenom *Upravljanje mrtvim vremenom* na priključnici 4 integriranog sklopa i modeliraju se naponom

$$u_4 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} U_{\text{ref}} = 0,385 \text{ V} \quad (3.3)$$

Napon  $u_4$  i naponski izvor 0,12 V spojen na neinvertirajući ulaz komparatora mrtvog vremena *Komparator mrtvog vremena* modeliraju se naponskim izvorom

$$U_{dt} = u_4 + 0,12 = 0,505 \text{ V} \quad (3.4)$$

- Kondenzator  $C_2 = C_T$  spojen na priključnicu 5 integriranog sklopa i tri otpornika  $R_7 + R_6 \parallel P_1 = R_T$  spojeni na priključnicu 6 integriranog sklopa i na njihove priključnice spojen oscilator *Oscilator* modeliraju se pilastim naponom  $u_5$  minimalne vrijednosti napona  $u_{5,m} = 0$ , maksimalne vrijednosti napona  $u_{5,M} = 3 \text{ V}$  i periode

$$T_{\text{ramp}} = C_2(R_7 + R_6 \parallel P_1) \quad (3.5)$$

Napon  $u_5$  i naponski izvor 0,7 V spojen na invertirajući ulaz komparatora pulсно-širinske modulacije *Komparator PŠM* modeliraju se naponskim izvorom pilastog napona

$$u_{\text{ramp}} = u_5 + 0,7 \text{ V} \quad (3.6)$$

pri čemu je minimalna vrijednost napona  $u_{\text{ramp},m} = 0,7 \text{ V}$  a maksimalna vrijednost napona  $u_{\text{ramp},M} = 3,7 \text{ V}$ . Perioda pilastog napona je  $T_{\text{ramp}} = 500 \mu\text{s}$ , određuje nazivnu sklopnu periodu i namještena je pri ulaznom naponu  $E = 12,00 \text{ V}$  i naponu trošila  $U_d(0) = 20,0 \text{ V}$ .

- Komparator pulсно-širinske modulacije *Komparator PŠM* i komparator mrtvog vremena *Komparator mrtvog vremena* spojeni su na logički sklop NILI. Primjenom De Morganovih teorema

$$\overline{A + B} = \bar{A} + \bar{B} \quad (3.7)$$

spoj je transformiran u logički sklop I s invertiranim ulazima. Transformacija je obavljena da bi se lakše napisao programski kôd simulacijskog modela.

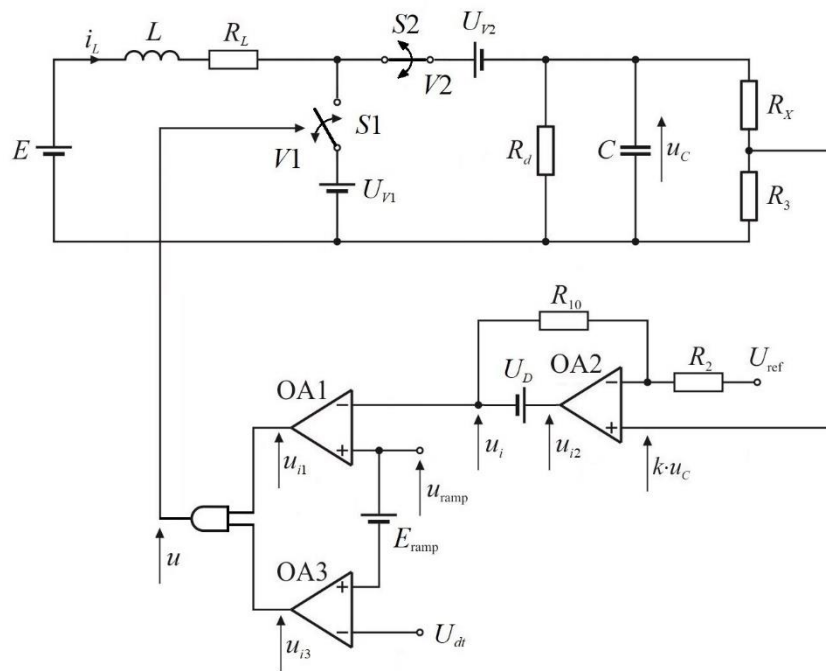
- Strujni izvor  $\approx 0,7 \text{ mA}$  na priključnici 3 integriranog sklopa izostavlja se iz matematičkog modela, jer nisu poznati drugi parametri tog izvora. Otpornik  $R_1$  i kondenzator  $C_1$  izostavljaju se iz matematičkog modela radi jednostavnosti modela. Pojačalo greške *Poj. greške 2* izostavlja se iz matematičkog modela, jer se ne upotrebljava. Tranzistor  $Q1$  i na njegov emiter spojeni otpornici  $R_8, R_9$  i kondenzator  $C_3$  izostavljaju se iz matematičkog modela radi jednostavnosti

modela. *Regulator referencije* i *Podnaposko isključenje* izostavljaju se iz matematičkog modela jer ne utječu na rad pretvarača u promatranom intervalu ulaznog napona.

U postojećem fizičkom modelu u nekim su mjerenjima vrijednosti parametara prigušnice i otpora i kapaciteta trošila mijenjani. Promijenjene vrijednosti posebno su navedene uz rezultate mjerenja.

### 3.2 Shema spoja matematičkog modela pretvarača

Shemu spoja matematičkog modela naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača prikazuje Slika 3.5.



Slika 3.5 Potpuni matematički model uzlaznog pretvarača

Bit će obrazložene razlike u odnosu na shemu spoja pretvarača koju prikazuju Slika 2.1 i Slika 2.6.

- Otpor prigušnice  $R_L \neq 0$  nužan je da bi pretvarač mogao raditi u ustaljenom stanju osnovne periode za zadani proporcionalni faktor P-regulatora. Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami uz  $R_L = 0$  i  $R_L \neq 0$  prikazani su u prilogu 2.
- Naponi ventila  $U_{V1}$  i  $U_{V2}$  modelirani su naponima izmjerenim u stanju vođenja, tablica 3.2. i Slika 3.7. Odabirom vrijednosti napona  $U_{V1} = U_{V2} > 0$  bifurkacijski dijagram po ulaznom naponu translata se udesno za vrijednost  $U_{V1} = U_{V2}$ . Odabirom vrijednosti napona ventila dobivenih mjerenjem u stanju vođenja postiže se bolje podudaranje između rezultata simulacije i rezultata mjerenja za točku prve Neimark-Sackerove bifurkacije (oznaka NS, Slika 5.7).

Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami za različite vrijednosti napona  $U_{V1}$  i  $U_{V2}$  prikazani su u prilogu 2.

- Otpornim djeliteljem  $R_X$ ,  $R_3$  namješta se izlazni napon. Tako se izlazni napon namješta mijenjanjem koeficijenta povratne veze

$$k = \frac{R_3}{R_X + R_3}$$

- Otpornici  $R_{10}$  i  $R_2$  određuju proporcionalni faktor

$$k_p = \frac{R_{10}}{R_2} \quad (3.8)$$

P-regulatora upravljačkog dijela pretvarača. Proporcionalni faktor suštinski utječe na dinamiku pretvarača jer ako je njegova vrijednost nula pretvarač je neupravljiv i u njemu se ne mogu pojaviti bifurkacije. Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami za različite vrijednosti proporcionalnog faktora P-regulatora prikazani su u prilogu 2.

- Naponom diode  $U_D$  modeliran je napon diode na izlazu pojačala greške OA2. Odabirom vrijednosti napona  $U_D = 0,3 \text{ V}$  prema tehničkim podacima integriranog sklopa MC34060A postiže se bolje podudaranje raspona vrijednosti valnog oblika napona  $u_i$  dobivenog simulacijom i mjerenjem. Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami uz  $u_i = 0$  i  $u_i \neq 0$  prikazani su u prilogu 2.
- Naponom mrtvog vremena  $U_{dt}$  i naponskim izvorom  $0,7 \text{ V}$  priključenim na komparator mrtvog vremena OA3 omogućava se ispravan rad pretvarača. Dodatno, utječe se i na ustaljena stanja pretvarača. Tako i napon mrtvog vremena i kontrolni napon obavljaju funkciju upravljačkih napona pretvarača. Tijekom rada pretvarača može se dogoditi da je kontrolni napon  $u_i$  manji od minimalne vrijednosti pilastog napona  $u_{\text{ramp},m}$  u trenutku kad pilasti napon postiže svoju minimlanu vrijednost. Komparator pulсно-širinske modulacije bio bi trajno u pozitivnom zasićenju, ventil V1 trajno bi vodio i pretvarač ne bi radio kad ne bi bilo komparatora mrtvog vremena. Uvođenjem napona mrtvog vremena  $U_{dt}$  ograničava se maksimalni faktor vođenja

$$\alpha_M = (\Delta u_{\text{ramp}} - U_{dt}) / \Delta u_{\text{ramp}} \quad (3.9)$$

i tako se osigurava da ventil V2 vodi minimalno

$$T_{V2,m} = T_{\text{ramp}} \cdot U_{dt} / \Delta u_{\text{ramp}} \quad (3.10)$$

Pri tom, trajanje vođenja ventila V1 može biti i  $T_{V1} = 0$ , odnosno faktor vođenja kreće se u intervalu

$$0 \leq \alpha \leq \alpha_M \quad (3.11)$$

Kako se ulazni napon  $E$  smanjuje, tako se povećava faktor vođenja  $\alpha$ . Pri maksimalnom faktoru vođenja  $\alpha_M$  ulazni je napon

$$E_m = (1 - \alpha_M)U_{d,n}(0) \quad (3.12)$$

gdje je  $U_{d,n}(0)$  namještena vrijednost izlaznog napona. Daljnjim smanjivanjem ulaznog napona faktor vođenja ne može se više povećavati pa se izlazni napon pretvarača  $U_d(0)$  smanjuje i jednak je

$$U_d(0) = E/(1 - \alpha_M) \quad (3.13)$$

- Raspon vrijednosti ulaznog napona  $E$  određen je tehničkim karakteristikama integriranog sklopa MC34060AP [36]. Minimalni ulazni napon je 7 V, a maksimalni ulazni napon je određen kao  $U_{d,n}(0) - 2 \text{ V} = 18 \text{ V}$ . Tako se ulazni napon kreće u granicama

$$7 \text{ V} \leq E \leq 18 \text{ V} \quad (3.14)$$

Temeljem sheme spoja matematičkog modela naponski upravljani istosmjernog uzlaznog pretvarača, Slika 3.5, dobivaju se jednadžbe stanja energetskog i upravljačkog dijela pretvarača. Uz poznate parametre pretvarača, izvora i trošila to je osnova za simulacijski model pretvarača.

### 3.3 Jednadžbe stanja energetskog dijela pretvarača

Energetski dio pretvarača krug je drugog reda pa se jednadžbe stanja energetskog dijela pretvarača mogu izraziti dvjema diferencijalnim jednadžbama prvog reda. Pretvarač ima dvije sklopke, koje mogu raditi u tri različite kombinacije (intervala rada) određene uvjetima vođenja. Za svaki interval rada bit će naveden uvjet intervala iskazan logičkim funkcijama **I** i **II** te pripadne jednadžbe stanja.

#### Interval rada A

Uvjet intervala

$$i_L > 0 \text{ I } u_i \leq u_{\text{ramp}} \text{ I } u_{\text{ramp}} - 0,7 \text{ V} > U_{dt} \quad (3.15)$$

Pripadne jednadžbe stanja

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{U_{V1}}{L} - \frac{1}{L}R_L i_L \quad (3.16)$$

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{1}{R_d} u_C \quad (3.17)$$

### Interval rada B

Uvjet intervala

$$i_L > 0 \quad \text{I} \quad (u_i > u_{\text{ramp}} \quad \text{ILI} \quad u_{\text{ramp}} - 0,7 \text{ V} < U_{dt}) \quad (3.18)$$

Pripadne jednađbe stanja

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{U_{V2}}{L} - \frac{1}{L} R_L i_L - \frac{1}{L} u_C \quad (3.19)$$

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{C} \frac{1}{R_d} u_C \quad (3.20)$$

### Interval rada C

Uvjet intervala

$$i_L \leq 0 \quad \text{I} \quad (u_i > u_{\text{ramp}} \quad \text{ILI} \quad u_{\text{ramp}} - 0,7 \text{ V} < U_{dt}) \quad (3.21)$$

Pripadne jednađbe stanja

$$i_L = 0 \quad (3.22)$$

$$\frac{du_C}{dt} = -\frac{1}{C} \frac{1}{R_d} u_C \quad (3.23)$$

## 3.4 Jednađbe stanja upravljačkog dijela pretvarača

Uvjeti intervala rada A, B i C navedeni u izrazima (3.15), (3.18) i (3.21) dobivaju se iz jednađbi stanja upravljačkog dijela pretvarača. Potrebno je odrediti ulazne i izlazne napone komparatora pulsno-širinske modulacije, komparatora mrtvog vremena i logičkog sklopa I.

### 3.4.1 Konstitutivne relacije komparatora i logičkog sklopa I

#### Komparator pulsno-širinske modulacije (OA1)

Ako  $u_{\text{ramp}} > u_i$  onda  $u_{i1} = +E_z$

Ako  $u_{\text{ramp}} < u_i$  onda  $u_{i1} = -E_z$

### Komparator mrtvog vremena (OA3)

Ako  $u_{\text{ramp}} > U_{dt} + 0,7 \text{ V}$  onda  $u_{i3} = +E_z$

Ako  $u_{\text{ramp}} < U_{dt} + 0,7 \text{ V}$  onda  $u_{i3} = -E_z$

### Logički sklop I

Ako su i napon  $u_{i1} = +E_z$  i napon  $u_{i3} = +E_z$  onda vodi ventil V1 i pretvarač radi u intervalu rada A. U suprotnom, pretvarač radi u intervalu rada B ili C. Logički signal na izlazu logičkog sklopa I naziva se pulсно-širinski modulirani upravljački signal.

### Ulazni naponi komparatora

Ulazne napone komparatora pulсно-širinske modulacije i komparatora mrtvog vremena čine tri napona:

- Kontrolni napon  $u_i$  kao jedan upravljački napon.
- Pilasti napon pulсно-širinske modulacije  $u_{\text{ramp}}$ .
- Napon mrtvog vremena  $U_{dt}$  kao sastavni dio drugog upravljačkog napona ( $U_{dt} + 0,7 \text{ V}$ ).

### 3.4.2 Ulazni naponi komparatora i logičkog sklopa I

#### Kontrolni napon $u_i$ (OA2)

Ako  $u_{d2} = 0$ , kontrolni je napon u rasponu  $0,3 \text{ V} - U_D < u_i < E_z - U_D$ . Pojačalo greške radi u linearnom načinu rada i kontrolni je napon

$$u_i = -\frac{R_{10}}{R_2} U_{\text{ref}} + \left(1 + \frac{R_{10}}{R_2}\right) \frac{R_8}{R_8 + R_x} u_c - U_D \quad (3.24)$$

a koeficijent povratne veze

$$k = \frac{R_8}{R_8 + R_x} \quad (3.25)$$

Ako  $u_{d2} > 0$ , izlazni je napon pojačala greške u pozitivnom zasićenju. Pojačalo greške radi u nelinearnom načinu rada i kontrolni je napon

$$u_i = E_z - U_D \quad (3.26)$$

Ako  $u_{d2} < 0$ , izlazni je napon pojačala greške u negativnom zasićenju. Pojačalo greške radi u nelinearnom načinu rada i kontrolni je napon

$$u_i = 0,3 \text{ V} - U_D \quad (3.27)$$

### Pilasti napon pulsno-širinske modulacije $u_{\text{ramp}}$

Pilasti napon određen je u izrazu (3.6) i s uvrštenim naponom oscilatora  $u_5$  je

$$u_{\text{ramp}} = \frac{u_{\text{ramp},M} - u_{\text{ramp},m}}{T_{\text{ramp}}} t + u_{\text{ramp},m} \quad (3.28)$$

Perioda pilastog napona  $T_{\text{ramp}}$  konstantna je, određuje nazivnu sklopnu periodu rada, dana je izrazom (3.5) i ne mijenja se u ovoj disertaciji.

### Napon mrtvog vremena $U_{dt}$

Napon mrtvog vremena  $U_{dt}$  određen je izrazima (3.3) i (3.4), a ovdje će radi preglednosti biti opet navedeni ti izrazi

$$U_{dt} = u_4 + 0,12 = 0,505 \text{ V} \quad (3.29)$$

$$u_4 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} U_{\text{ref}} = 0,385 \text{ V} \quad (3.30)$$

## 3.5 Parametri matematičkog modela pretvarača

Matematički model pretvarača sastoji se od elemenata mreže. Neki od tih elemenata mreže kao otpornosti otpora poznati su iz sheme spoja pretvarača, neki su zadani tehničkim karakteristikama proizvođača pulsno-širinskog modulatora izvedenog integriranim sklopom, a druge je potrebno odrediti mjerenjem ili procijeniti. Uz parametre pretvarača, nužno je poznavati parametre izvora i parametre trošila. Sa stajališta pojavljivanja neregularnih ustaljenih stanja izvor, pretvarač i trošilo čine nerastavljivu cjelinu. Zato će se radi jednostavnosti, kad nije potrebno razlikovati nabrojane tri grupe parametara, svi parametri smatrati parametrima pretvarača. Također, i početni uvjeti pretvarača, a to su početna struja induktiviteta  $i_L(0)$  i početni napon kapaciteta trošila  $u_C(0)$  smatrat će se parametrima pretvarača. Sve parametre pretvarača prikazuje tablica 3.2.

Tablica 3.2 Parametri matematičkog modela pretvarača

| Parametar    | Vrijednost                             | Komentar                                                                                   |
|--------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E$          | $7 \text{ V} \leq E \leq 18 \text{ V}$ | Ulazni napon. Stabilizirani izvor BK PRECISION 9201.                                       |
| $U_{d,n}(0)$ | $U_{d,n}(0) = 20,00 \text{ V}$         | Nazivna vrijednost izlaznog napona                                                         |
| $L$          | $L = 3,60 \text{ mH}$                  | Induktivnost zračne prigušnice                                                             |
| $R$          | $R = 0,81 \Omega$                      | Otpornost namota zračne prigušnice                                                         |
| $R_L$        | $R_L = 1 \Omega$                       | Otpornost petlji ventila V1 i ventila V2 uključujući i otpornost namota zračne prigušnice. |

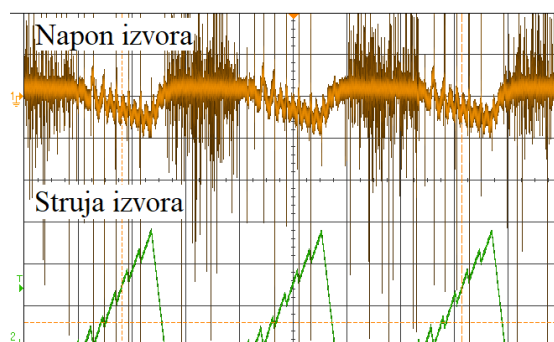
|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   |                                                                                                                                                                                                                                                                           | Otpornost u fizičkoj izvedbi pretvarača je $R_L = 1,05 \Omega$ , a u simulacijama je $R_L = 1 \Omega$ . Vrijednost $R_L = 1 \Omega$ lakša je za uvrštavanje u simulaciju.                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $U_{V1}$          | $U_{V1} = 0,7 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                                  | Napon kolektor-emiter ventila V1 u vođenju                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $U_{V2}$          | $U_{V2} = 0,8 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                                  | Napon vođenja ventila V2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| $C_d$             | $C_d = 255 \mu\text{F}$                                                                                                                                                                                                                                                   | Kapacitivnost kondenzatora trošila. Nadomjesna otpornost kondenzatora $R_C = 0,165 \Omega$ je zanemarena.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $R_d$             | $R_d = 81 \Omega$                                                                                                                                                                                                                                                         | Otpornost trošila. Izmjereno je $R_d = 80,75 \Omega$ . Konačnoj vrijednosti pribrojena je i procijenjena prijelazna otpornost kontakata.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| $R_X$             | $R_X = 14,00 \text{ k}\Omega$                                                                                                                                                                                                                                             | Izmjerena otpornost potenciometra za namještanje nazivne vrijednosti izlaznog napona pretvarača pri ulaznom naponu $E = 12,00 \text{ V}$ .                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $R_3$             | $R_3 = 4,64 \text{ k}\Omega$                                                                                                                                                                                                                                              | Nepromjenljivi dio otpornog djelitelja za namještanje izlaznog napona pretvarača                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $k$               | $k = R_3/(R_3 + R_X) = 0,235$                                                                                                                                                                                                                                             | Koeficijent povratne veze.<br>Vrijednost koeficijenta u fizičkoj izvedbi pretvarača je $k = 0,249$ , a u simulacijama je $k = 0,235$ . Uz vrijednost $k = 0,235$ manje je statičko odstupanje izlaznog napona pri promjeni ulaznog napona.                                                                                                                                                                                                          |
| $U_{\text{ref}}$  | $U_{\text{ref}} = 5 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                            | Referentni napon pojačala greške                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $R_{10}$          | $R_{10} = 33 \text{ k}\Omega$                                                                                                                                                                                                                                             | Otpornost u grani povratne veze pojačala greške                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| $R_2$             | $R_2 = 3,9 \text{ k}\Omega$                                                                                                                                                                                                                                               | Otpornost na ulazu pojačala greške                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $R_{10}/R_2$      | $k_p = R_{10}/R_2 = 8,346$                                                                                                                                                                                                                                                | Proporcionalni faktor P-regulatora                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| $u_{i2}$          | $0,3 \text{ V} \leq u_{i2} \leq 5,0 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                            | Izlazni napon pojačala greške<br>Napon pozitivnog zasićenja $u_{i2} = +E_z = 5,0 \text{ V}$<br>Napon negativnog zasićenja $u_{i2} = -E_z = 0,3 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| $U_D$             | $U_D = 0,3 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                                     | Napon diode D na izlazu pojačala greške                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $u_i$             | $0 \leq u_i \leq 4,7 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                           | Kontrolni napon<br>$u_i = u_{i2} - U_D$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| $u_{\text{ramp}}$ | $u_{\text{ramp}} = \frac{\Delta u_{\text{ramp}}}{T_{\text{ramp}}} t + u_{\text{ramp},m}$ $\Delta u_{\text{ramp}} = u_{\text{ramp},M} - u_{\text{ramp},m}$ $u_{\text{ramp}} = \frac{3}{T_{\text{ramp}}} t + 0,7$ $u_{\text{ramp}} = \frac{2,87}{T_{\text{ramp}}} t + 0,77$ | $u_{\text{ramp},m}$ je minimalna vrijednost pilastog napona<br>$u_{\text{ramp},M}$ je maksimalna vrijednost pilastog napona<br><br>Nazivne vrijednosti u simulacijama<br>$u_{\text{ramp},m} = 0,7 \text{ V}$ , $u_{\text{ramp},M} = 3,7 \text{ V}$ , $\Delta u_{\text{ramp}} = 3 \text{ V}$<br><br>Izmjerene vrijednosti<br>$u_{\text{ramp},m} = 0,77 \text{ V}$ , $u_{\text{ramp},M} = 3,64 \text{ V}$ , $\Delta u_{\text{ramp}} = 2,87 \text{ V}$ |
| $T_{\text{ramp}}$ | $T_{\text{ramp}} = C_2(R_7 + R_6 \parallel P_1) = 500 \mu\text{s}$                                                                                                                                                                                                        | Perioda pilastog napona. Određuje nazivnu sklopnu periodu rada pretvarača.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| $E_{\text{ramp}}$ | $E_{\text{ramp}} = u_{\text{ramp},m} = 0,7 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                     | Nazivna vrijednost napona pomaka pilastog napona                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| $U_{dt}$          | $U_{dt} = u_4 + 0,12 = 0,505 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                   | Napon mrtvog vremena.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|            |                                                                         |                                                                                                                           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            | $u_4 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} U_{\text{ref}} = 0,385 \text{ V}$          |                                                                                                                           |
| $\alpha_M$ | $\alpha_M = (\Delta u_{\text{ramp}} - U_{dt}) / \Delta u_{\text{ramp}}$ | Maksimalni faktor vođenja<br>Za nazivni pilasti napon $\alpha_M = 0,832$<br>Za izmjereni pilasti napon $\alpha_M = 0,824$ |

Bit će obrazložen odabir vrijednosti parametara:

- Induktivnost i otpornost prigušnice izmjereni su *RLC*-metrom Keysight U1733C. Ustanovljeno je da otpornost prigušnice utječe na neregularna ustaljena stanja pretvarača. Zato se umjesto otpornosti prigušnice u matematički model pretvarača uvrštava otpornost petlje kojima teče struja prigušnice. Otpornost petlje ventila V1 čine uz otpornost prigušnice i otpornosti dviju strujnih sondi, otpornost ampermetra, otpornost vodiča i unutarnja otpornost izvora. Otpornost petlje ventila V2 čine iste otpornosti kao i u petlji ventila V1. Otpornost ampermetra je  $R_A = 30 \text{ m}\Omega$ , a otpornost svake strujne sonde je  $R_{i-u} = 100 \text{ m}\Omega$ .

Otpornost vodiča i unutarnja otpornost izvora zanemareni su. Unutarnja otpornost izvora i induktivnost petlje na ulazu pretvarača smanjeni su posebnim mjerama. Vodiči između izlaza izvora i ulaza pretvarača su što kraći i međusobno isprepleteni. Izvor ima posebne priključnice za mjerenje napona na trošilu (ulazu pretvarača). Sa tih su priključnica spojeni što kraći i isprepleteni vodiči na ulaz pretvarača. Tako se izvorom mjeri pad napona na vodičima između izlaza izvora i ulaza pretvarača i taj se pad napona kompenzira mijenjanjem napona na izlazu izvora. Snimljeni su valni oblici pri najvećim opterećenjima pretvarača koja su se pojavljivala u ovoj disertaciji, Slika 3.6.



Slika 3.6 Propad napona izvora uzlaznog pretvarača pri najvećim opterećenjima. Osjetljivost je 50 mV/ds i 2 A/ds.

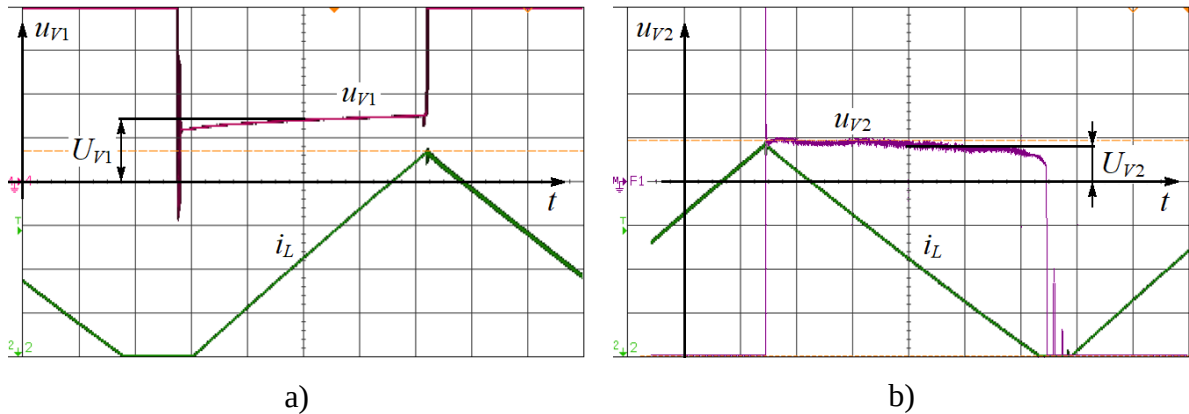
Na maksimalnoj struji  $\hat{I} \approx 5 \text{ A}$  je propad napona  $\Delta E \approx 30 \text{ mV}$ . Nadomjesna induktivnost u petlji koju čine izvor i pretvarač zanemarena je. Unutarnja otpornost izvora je  $R_u \approx \Delta E / \hat{I} \approx 6 \text{ m}\Omega$  i puno je manja od ostalih otpornosti u petljama ventila V1 i ventila V2.

Tako je za otpornost petlje ventila V1 i ventila V2 dobiveno  $R_A = R + R_A + 2R_{i-u} = 1,05 \Omega$ . Dodatno, otpornost petlje kojom se puni prigušnica, znači otpornost petlje ventila V1 utječe na upravljačku karakteristiku pretvarača. Upravljačka karakteristika s pretvarača u kojem je u analizi uzeta u obzir i otpornost petlje kojom se prigušnica puni dana je izrazom

$$U_d(0) = \frac{E}{(1 - \alpha) \left[ 1 + \frac{R}{R_d(1 - \alpha)^2} \right]} \quad (3.31)$$

prema [29], na str. 115. U tom su izrazu zanemareni naponi ventila  $U_{V1}$  i  $U_{V2}$  pa bi za primjenu izraza (3.31) ventile trebalo modelirati otpornostima. Ako se otpornost petlje procijeni na  $R = 3 \Omega$  uz otpornost trošila  $R_d = 81 \Omega$  tada će pri ulaznom naponu  $E = 7,8 \text{ V}$  faktor vođenja postići maksimalnu vrijednost  $\alpha_M = 0,832$ . Posljedično, na manjim vrijednostima ulaznog napona od  $E = 7,8 \text{ V}$  izlazni napon uzlaznog pretvarača bit će manji od namještene vrijednosti, jer se faktor vođenja ne može povećati preko vrijednosti  $\alpha_M$ .

- Naponi ventila  $U_{V1}$  i  $U_{V2}$  izmjereni su osciloskopom Keysight DSOX2004A i prikazuje ih Slika 3.7. Vidljivo je da vrijednosti napona nisu konstantne pa su vrijednosti  $U_{V1}$  i  $U_{V2}$  upotrijebljene u matematičkom modelu određene procjenom.



Slika 3.7 Valni oblici: a) Napon ventila  $u_{V1}$  i struja prigušnice  $i_L$  uz osjetljivost 0,5 V/ds i 0,2 A/ds, b) Napon ventila  $u_{V2}$  i struja prigušnice  $i_L$  uz osjetljivost 1 V/ds i 0,2 A/ds.

- Kapacitivnost kondenzatora trošila  $C_d$  i njegova nadomjesna otpornost  $R_C$  izmjereni su  $RLC$ -metrom Keysight U1733C. Nadomjesna otpornost  $R_C$  izostavljena je iz matematičkog modela pretvarača.
- Otpornost trošila izmjerena je  $RLC$ -metrom Keysight U1733C. Izmjerena je vrijednost  $80,75 \Omega$ . Tu otpornost čine i prijelazne otpornosti kontakata, koje se mogu mijenjati i nisu točno poznate. Zato je otpornost trošila procijenjena na  $R_d = 81 \Omega$ .

- Napon diode  $U_D$  i napon pomaka pilastog napona  $E_{\text{ramp}}$  ne mogu se mjeriti i preuzeti su iz tehničkih karakteristika integriranog kruga MC34060AP.
- Parametri pilastog napona  $u_{\text{ramp},m}$ ,  $u_{\text{ramp},M}$  i  $T_{\text{ramp}}$  izmjereni su osciloskopom Keysight DSOX2004A.

Pri određivanju parametara matematičkog modela pretvarača upotrebljeni su:

- *RLC*-metar Keysight U1733C za mjerenje otpornosti, kapacitivnost i induktivnosti,
- osciloskop Keysight DSOX2004A sa sondama Keysight N2862B i Keysight N2783B za mjerenje pilastog napona i napona i struje izvora napona i ventila,
- *True-RMS* voltmetar Voltcraft MXD-4660A za mjerenje srednjih i efektivnih vrijednosti struja i napona.

Zbog svoje vremenske promjenljivosti, nelinearnosti  $u$ - $i$  karakteristika ventila i reda kruga istosmjerni uzlazni pretvarač sklon je neregularnim ustaljenim stanjima. Osjetljivost ustaljenih stanja na „male“ promjene parametara pretvarača znatno je veća nego u krugovima koji se ponašaju linearno. Zato broj značajnih znamenaka kojima su izraženi parametri pretvarača može utjecati na simulacijom dobivena ustaljena stanja. S druge strane postoji mjerna nesigurnost instrumenata. Mnogi su parametri određeni mjerenjem osciloskopom, a neke se veličine nisu mogle ni mjeriti, što zbog nedostatne mjerne opreme, što zbog nedostupnih mjernih točaka unutar integriranog sklopa MC34060AP.

Od matematičkog se modela pretvarača očekuje da predviđa bifurkacijske točke, vrste bifurkacija, ustaljena stanja i njihove slijedove, multistabilnost, histerezu ustaljenih stanja kao i značajnu promjenu efektivnih i vršnih vrijednosti struje prigušnice i napona kondenzatora pri prvoj bifurkaciji srazom granica. Modeliranje, simuliranje i mjerenje iterativni su i međusobno isprepleteni postupci koji završavaju kad predloženi matematički model zadovoljavajuće predviđa pojave koje su od interesa. Pri tom nedovoljno poznavanje pojava i parametara koji utječu na pojavu neminovno vode k razlikama između rezultata dobivenih simulacijom matematičkog modela i mjerenjem. Vjerojatno bi se uz dodatnu količinu vremena moglo postići bolje modeliranje i bolje podešavanje parametara matematičkog modela pa time i veća podudarnost između rezultata simulacije i rezultata mjerenja, ali modeliranje je ograničeno i vremenskim rokom. U predviđanju neregularnih ustaljenih stanja zato treba tražiti dovoljno dobro kvalitativno podudaranje rezultata simulacije s rezultatima mjerenja što znači da se mogu predvidjeti važna svojstva pretvarača.

### 3.6 Simulacijski model pretvarača

Matematički model pretvarača [37] sadrži jednadžbe, nejednadžbe, granične uvjete i drugo potrebno za određivanje valnih oblika pretvarača. Zbog složenosti matematičkog modela pretvarača za rješenje jednadžbi mreže ne mogu se upotrijebiti analitičke metode, nego numeričke metode. Rješavanje jednadžbi mreže primjenom numeričkih metoda obavlja se digitalnom simulacijom. Za to je potrebno izgraditi simulacijski model pretvarača [38].

#### 3.6.1 Izvedba simulacije

Digitalna simulacija napisana je u programskom jeziku C, a za prikaz rezultata simulacije napisani su programski kodovi u programskom paketu MATLAB. U prilogu 3 navedeni su svi programski kodovi upotrijebljeni u disertaciji i priloženi su na CD-u kao sastavni dio disertacije. Izvedbu simulacije pretvarača uz matematički model pretvarača čine i:

- **Numerička metoda rješavanja diferencijalnih jednadžbi.** Pri numeričkom rješavanju diferencijalnih jednadžbi varijable stanja potrebno je razviti u Taylorov red. Zanimarivanjem određenog broja viših članova reda te se jednadžbe rješavaju nekom od numeričkih metoda. Metodom Runge-Kutta četvrtog reda [39], str. 32 postiže se dobar kompromis između točnosti i brzine računanja.
- **Odabir koraka integracije.** Manji korak integracije znači veću točnost i dulje vrijeme računanja.
- **Odabir broja prikazanih vrijednosti unutar jedne periode pilastog napona.** Manji broj prikazanih vrijednosti znači lakše pretraživanje vrijednosti u .txt datoteci rezultata simulacije i netočniji grafički prikaz simulacijom dobivenih veličina.
- **Prijenos početnih uvjeta** u simulaciji bifurkacijskog dijagrama i u simulaciji valnih oblika pri promjeni ulaznog napona. U simulaciji bifurkacijskog dijagrama, simulacija se odvija na više vrijednosti ulaznog napona. Moguće je odabrati trenutak unutar periode pilastog napona u kojem se u simulaciji prelazi s jedne vrijednosti ulaznog napona na drugu vrijednost. U tom trenutku se prenose i početni uvjeti za proračun na novoj vrijednosti ulaznog napona.
- **Odabir broja početnih perioda bez prikaza** u simulaciji valnih oblika i u simulaciji bifurkacijskih dijagrama. Vremenske konstante kruga i perioda pilastog napona razlikuju se za više redova veličina pa treba obaviti simulaciju za više stotina ili čak tisuća perioda pilastog napona [40], str. 11. Kad je potrebno simulirati samo ustaljeno stanje, a ne i prijelazno stanje, potrebno je iz rezultata simulacije izostaviti prijelazno stanje. Moguće je iz prikaza rezultata izostaviti proizvoljan početni interval iskazan kao broj perioda pilastog napona. Ovo je nužno

u prikazu bifurkacijskog dijagrama, jer bi se uključenjem prijelaznog stanja u bifurkacijski dijagram dobio pogrešan bifurkacijski dijagram i onemogućilo bi se točno određivanje ustaljenih stanja.

- **Odabir broja početnih perioda bez proračuna** u simulaciji srednjih i efektivnih vrijednosti. Kao i u proračunu bifurkacijskog dijagrama, za srednje i efektivne vrijednosti potrebno je dobiti ustaljeno stanje. Dodatna okolnost je što treba odabrati interval proračuna srednje i efektivne vrijednosti takav da je taj interval višekratnik periode ustaljenog stanja. Ali ustaljeno stanje ne mora biti poznato! Zato se uz odabir broja perioda koje nisu obuhvaćene proračunom odabiru i dva sljedeća intervala (broja perioda pilastog napona) koja su obuhvaćena prvim i drugim proračunom srednjih i efektivnih vrijednosti. Usporedbom srednjih i efektivnih vrijednosti u dva uzastopna intervala i promatranjem valnih oblika može se zaključiti je li nastupilo ustaljeno stanje i jesu li srednja i efektivna vrijednost dobivene simulacijom valjane.

### 3.6.2 Simulirane veličine i njihovi prikazi

Karakteristične valne oblike pretvarača potrebno je prikazati na više načina kako bi se identificirala ustaljena stanja, bifurkacije, putovi u kaos kao i pojave koje im prethode. Za to se upotrebljavaju:

- **Valni oblici** struje induktiviteta, napona kapaciteta, pilastog napona i kontrolnog napona. Pri tom će se posebno pratiti odnos pilastog i kontrolnog napona, jer je to pokazatelj bifurkacije srazom granica. Valni oblici mogu se simulirati za jednu vrijednost ulaznog napona i za više uzastopnih različitih vrijednosti ulaznog napona različitog trajanja.
- **Srednje i efektivne vrijednosti** struje induktiviteta i napona kapaciteta.
- **Trajektorije** struje induktiviteta i napona kapaciteta.
- **Poincaréove slike** izvedene iz trajektorija struje induktiviteta i napona kapaciteta.
- **Bifurkacijski dijagrami** struje induktiviteta po ulaznom naponu. Pri tom se dijagrami računaju s različitim početnim uvjetima za svaki bifurkacijski parametar čime se postiže realnije ponašanje pretvarača pri promjeni ulaznog napona. Simulacija se može obavljati i za povećavanje i za smanjivanje ulaznog napona kako bi se identificirala multistabilnost i histereza.

### 3.6.3 Preporučeni parametri simulacije

Pri odabiru vrijednosti parametara simulacije treba voditi računa o tomu:

- simuliraju li se prijelazna stanja ili ustaljena stanja,
- koja se ustaljena stanja nastoje simulirati i
- simuliraju li se bifurkacijski dijagrami ili valni oblici.

Preporuke parametara i komentari koje se odnose na valne oblike vrijede i za trajektorije i Poincaréove slike. Kako bi se nazivi parametara simulacije i njihove vrijednosti razlikovale od ostalog teksta pisani su fontom Courier New. Bit će navedeni parametri simulacije, komentirat će se njihova funkcija i dat će se preporučene vrijednosti.

### **1) Parametar Broj koraka po periodi**

Parametar Broj koraka po periodi određuje s koliko koraka unutar periode pilastog napona će se računati valni oblici.

Parametrom Broj koraka po periodi određuje se vrijednost drugog parametra Korak integracije  $h$ . Veći broj koraka daje točniji rezultat, ali je dulje izvođenje simulacije.

Preporučena vrijednost 10000 prikladna je neovisno o tomu simuliraju li se valni oblici ili bifurkacijski dijagrami i simulira li se ustaljeno stanje ili prijelazno stanje.

### **2) Parametar Korak integracije $h$**

Parametar Korak integracije  $h$  dobije se dijeljenjem periode pilastog napona s parametrom Broj koraka po periodi.

Preporučena vrijednost je  $h = 0.0000000500$  s.

### **3) Parametar Perioda za proračun (bez ispisa, ispis)**

Parametar Perioda za proračun (bez ispisa, ispis) zadaje se u simulaciji bifurkacijskog dijagrama. Broj perioda bez ispisa je broj perioda pilastog napona unutar kojeg se očekuje da će nastupiti ustaljeno stanje. Broj perioda s ispisom je broj perioda pilastog napona unutar kojeg se uzorkuju vrijednosti potrebne za crtanje bifurkacijskog dijagrama. Veći broj perioda bez ispisa znači veću vjerojatnost da će nastupiti ustaljeno stanje. Veći broj perioda sa ispisom znači bolju rezoluciju bifurkacijskog dijagrama. Što je zbroj perioda sa ispisom i bez ispisa veći to će dulje izvoditi simulacija. U procjeni trajanja simulacije treba uzeti u obzir i parametar  $dE$ .

Preporučene vrijednosti su 200, 100 za ustaljeno stanje osnovne periode i subharmonična ustaljena stanja.

Preporučene vrijednosti su 500, 200 za kvaziperiodično ustaljeno stanje i ustaljena stanja u okolini kvaziperiodičnog ustaljenog stanja. Tako se uz preporučenu vrijednost  $dE = 0.010$  V postižu simulacije trajanja 20-tak minuta.

#### **4) Parametar $dE$**

Parametar  $dE$  zadaje se u simulaciji bifurkacijskog dijagrama. Njime je određen korak promjene ulaznog napona. Kraći korak promjene znači bolju rezoluciju bifurkacijskog dijagrama. Ujedno će se i dulje izvoditi simulacija. U procjeni trajanja simulacije treba uzeti u obzir i parametar Perioda za proračun (bez ispisa, ispis).

Preporučena vrijednost je  $dE = 0.010$  V za bifurkacijske dijagrame većeg raspona ulaznog napona i trajanja simulacije 20-tak minuta.

Preporučena vrijednost je  $dE = 0.001$  V za bifurkacijske dijagrame manjeg raspona ulaznog napona i trajanja simulacije 90-tak minuta.

#### **5) Parametar Točka uzorkovanja**

Parametar Točka uzorkovanja zadaje se u simulaciji bifurkacijskog dijagrama. Njime je određen trenutak unutar periode pilastog napona u kojem nastupa nova vrijednost ulaznog napona veća ili manja od prethodne vrijednosti za  $dE$ . Parametar Točka uzorkovanja može biti bilo koji broj između 1 i Broj koraka po periodi. Mijenjanjem parametra Točka uzorkovanja može se u bifurkacijskom dijagramu provjeriti osjetljivost bifurkacijskog dijagrama na početne uvjete.

Preporučena vrijednost je 1 ili 10000 (početak ili kraj periode pilastog napona), ako se ne provjerava osjetljivost bifurkacijskog dijagrama na početne uvjete.

#### **6) Parametar Točka za uzimanje rezultata**

Parametar Točka za uzimanje rezultata zadaje se u simulaciji bifurkacijskog dijagrama. Njime je određen trenutak unutar periode pilastog napona u kojem se uzorkuje vrijednost struje induktiviteta koja će se prikazati u bifurkacijskom dijagramu.

Prikladnim odabirom parametra Točka za uzimanje rezultata mogu se u bifurkacijskom dijagramu dobiti maksimalna ili minimalna struja induktiviteta na nekoj vrijednosti ulaznog napona.

Preporučena vrijednost je 1 ili 10000.

#### **7) Parametar Broj točaka ispisa po periodi**

Parametar Broj točaka ispisa po periodi zadaje se u simulaciji valnih oblika. Njime je zadan broj izračunatih vrijednosti tijekom jedne periode pilastog napona koje će se spremi u datoteku s rezultatima simulacije. Za rukovanje tom datotekom nepraktično je u datoteku spremi

svaku izračunatu vrijednost. Prema preporuci Broj koraka po periodi to bi značilo 10000 vrijednosti. Zato je potrebno spremati manje vrijednosti nego što je izračunato.

Preporučena vrijednost je 100. To bi značilo da će za periodu pilastog napona 500  $\mu$ s biti spremljene vrijednosti s razmakom 5  $\mu$ s.

### **8) Parametar Broj perioda za jedan ulazni napon**

Parametar Broj perioda za jedan ulazni napon zadaje se u simulaciji valnih oblika. U simulaciji valnih oblika valni se oblici mogu računati za više vrijednosti ulaznih napona. Pritom se za svaku vrijednost ulaznog napona može zadati različito trajanje, odnosno broj perioda pilastog napona. Tako se promjena napona može inicirati i dok još nije nastupilo ustaljeno stanje na prethodnoj vrijednosti ulaznog napona. U ovim razmatranjima treba imati na umu kakva se ustaljena stanja očekuju u simulaciji. Veći broj perioda znači nespretnije rukovanje datotekom s rezultatima simulacije. Pri tom se veličina datoteke s rezultatima simulacije procjenjuje temeljem parametra Broj perioda za cijelu simulaciju.

Preporučena vrijednost parametra Broj perioda za jedan ulazni napon može biti bilo koja vrijednost između 1 i 3000. Ako se žele usporediti simulirani valni oblici i bifurkacijski dijagrami, onda je preporuka odabrati Broj perioda za jedan ulazni napon kao zbroj Perioda za proračun (bez ispisa, ispis). U tom slučaju je preporučena vrijednost 300 za ustaljeno stanje osnovne periode i subharmonična ustaljena stanja, a 700 za kvaziperiodično ustaljeno stanje i ustaljena stanja u okolini kvaziperiodičnog ustaljenog stanja. Pri tom se simulacija obavlja za maksimalno pet do deset vrijednosti ulaznog napona.

### **9) Parametar Broj perioda za cijelu simulaciju**

Parametar Broj perioda za cijelu simulaciju zadaje se u simulaciji valnih oblika. Obično je ovaj parametar cjelobrojni višekratnik parametra Broj perioda za jedan ulazni napon i preko njega se zadaje ukupan broj vrijednosti ulaznog napona za koje će se simulacija obaviti.

Preporučena vrijednost određuje se u skladu s parametrom Broj perioda za cijelu simulaciju i brojem vrijednosti ulaznog napona za koje se želi obaviti simulacija. Ako se kao maksimalan Broj perioda za cijelu simulaciju odabere 3000 do 6000 perioda, onda bi se uz prikaz 100 točaka po periodu pilastog napona dobila datoteka s rezultatima simulacije s 300 do 600 tisuća linija.

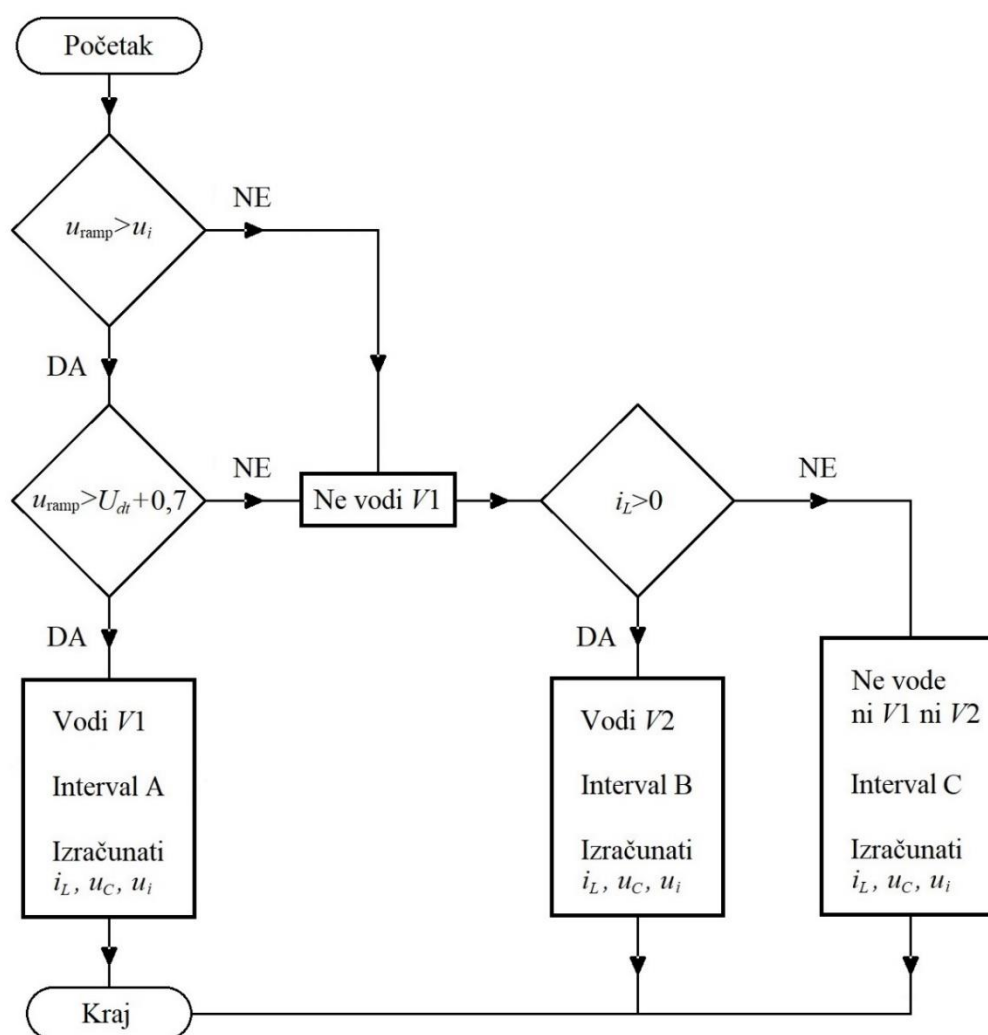
## 10) Parametar Točka uzorka u zadnjoj periodi proračuna

Parametar Točka uzorka u zadnjoj periodi proračuna zadaje se u simulaciji valnih oblika. Ovaj parametar ima istu funkciju kao i parametar Točka uzorkovanja u simulaciji bifurkacijskog dijagrama uz razliku da se u simulaciji valnih oblika mogu simulirati i prijelazna stanja.

Preporučena vrijednost je 1 ili 10000, ako se ne provjerava osjetljivost ustaljenih stanja na početne uvjete.

### 3.6.4 Dijagram toka za programski kôd

Prema jednadžbama stanja energetskog dijela pretvarača i upravljačkog dijela pretvarača gradi se dijagram toka. Slika 3.8 prikazuje dijagram toka upotrijebljen za izradu programskog kôda simulacije za jedan korak integracije.



Slika 3.8 Dijagram toka proračuna varijabli stanja za jedan korak integracije

### **3.7 Odnos između matematičkog modela i fizičkog modela pretvarača**

U identifikaciji ustaljenih stanja uzlaznog pretvarača valja voditi računa o tomu obavlja li se identifikacija temeljem rezultata mjerenja ili rezultata simulacije. Naime fizički izveden pretvarač je kontinuirani sustav, a simulacijski model pretvarača diskretni je sustav. Tumačenje razlika tih dvaju sustava dodatno usložnjava to što je matematički model pretvarača pojednostavnjen opis fizički izvedenog pretvarača. Primjerice, kondenzator trošila modeliran je kapacitetom i pri tom su zanemarene njegova nadomjesna otpornost i induktivnost. Na kapacitetu nije moguć skok napona. Ako se kondenzator modelira serijskim spojem kapaciteta i otpora, onda je na takvom kondenzatoru moguć skok napona zato što je moguć skok struje. Doda li se tom modelu serijski induktivitet, onda nije moguć skok struje. Tako se različitim modeliranjem komponenata pretvarača mogu dobiti različiti rezultati simulacije. Dodatno, svi parametri fizičkog modela pretvarača uvijek se mogu poznavati samo s ograničenom točnošću, a zbog ograničenosti ljudskog znanja nisu ni poznate sve pojave koje utječu na ponašanje fizičkog modela.

Zato treba imati na umu da razlika između rezultata mjerenja i rezultata simulacije može biti i samo zbog razlike između matematičkog i fizičkog modela pretvarača. Valjanost matematičkog modela određuje se jedino time mogu li se njime uspješno predviđati pojave od interesa, a u ovoj disertaciji to su neregularna ustaljena stanja, bifurkacije i posljedice po pretvarač koje iz njih proizlaze.

## 4 NELINEARNA DINAMIKA ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA

Istosmjerni uzlazni pretvarač vremenski je promjenljiv nelinearan sustav drugog reda ili višeg i zato se u pretvaraču mogu pojaviti neregularna ustaljena stanja [41]. Pod neregularnim ustaljenim stanjima podrazumjeva se svako ustaljeno stanje u kojem perioda struje prigušnice i napona kondenzatora više nisu jednake nazivnoj sklopnoj periodi rada pretvarača. Pri tom se pod nazivnom sklopnom periodom rada pretvarača misli na periodu pilastog napona kojom se obavlja pulsno-širinska modulacija pretvarača. Promjene ustaljenih stanja nagle su i neočekivane, a nazivaju se bifurkacije. Slijed promjena ustaljenih stanja vodi ka kaotičnom ustaljenom stanju pretvarača. Postoje različiti takvi slijedovi (putovi u kaos).

Neregularna ustaljena stanja mogu povećati: valovitost ulazne struje i izlaznog napona [17], gubitke pretvarača [42], strujno i naponsko opterećenje ventila uzrokovano povećanim vršnim vrijednostima struja i napona [17], [42]. Dodatno, mogu stvoriti buku, ako frekvencije rada pretvarača uđu u čujno područje [20], [43]. Neregularna ustaljena stanja u pravilu kvare nazivne karakteristike pretvarača pa ih je potrebno izbjeći. Da bi se neregularna ustaljena stanja mogla izbjeći, treba poznavati mehanizam njihova nastanka i kako ta ustaljena stanja identificiraju. Opisat će se neregularna ustaljena stanja, pojave tijekom nastajanja neregularnih ustaljenih stanja, kako se te pojave predviđaju i kako se identificiraju.

### 4.1 Pojave u uzlaznom pretvaraču

Pojavama u istosmjernom uzlaznom pretvaraču smatrat će se ustaljena stanja i bifurkacije kao i slijedovi tih pojava kao što su putovi u kaos, multistabilnost i histereza ustaljenih stanja. Opisat će se poznate pojave s naglaskom na one pojave kojima se bavi ova doktorska disertacija.

#### 4.1.1 Ustaljena stanja

Svaka se mreža za vrijeme rada nalazi u ustaljenom ili prijelaznom stanju [44]. Ustaljeno stanje je svako stanje mreže u kojem varijable mreže ostaju konačne za  $t \rightarrow \infty$  i pri tome ispunjavaju jedan od idućih uvjeta [6], [20], [44], [45]:

- Istosmjerno ustaljeno stanje ako je  $f(t) = \text{konst.}$  Tada varijable mreže ne mijenjaju vrijednost.
- Periodično ustaljeno stanje ako je  $f(t + T) = f(t)$ . Tada se varijable mreže ponavljaju s primitivnom periodom  $T$ .

- Kvaziperiodično ustaljeno stanje (QP). Tada se pojavljuju dvije ili više frekvencija čiji je omjer iracionalan broj. U upotrebi je i šira definicija za gotovo periodičnu funkciju (engl. *Almost periodic function*). Prema njoj za kvaziperiodično ustaljeno stanje vrijedi  $|f(t + T(\epsilon)) - f(t)| < \epsilon$  u kojem se varijable mreže razlikuju za po volji malu vrijednost  $\epsilon$  s periodom  $T(\epsilon)$ . Obje su definicije primjenjive u ovoj disertaciji, ali je prva praktičnija u identifikaciji periodičnih prozora koji se izmjenjuju s intervalima kvaziperiodičnog ustaljenog stanja. Prva definicija prevladava i u literaturi i upotrebljavat će se u ovoj disertaciji. Pri tom treba imati na umu da su interval promatranja pojava i točnost instrumenata ograničeni pa se identifikacija kvaziperiodičnog ustaljenog stanja mora prilagoditi tim ograničenjima. Budući da je identifikacija kvaziperiodičnog ustaljenog stanja jedan od temeljnih zadataka ove disertacije, tomu je posvećen poseban prostor u potpoglavlju 4.4.
- Kaotično ustaljeno stanje (K). To je ustaljeno stanje neperiodično, prividno slučajno, s vrijednostima varijabli mreže u ograničenom rasponu i izrazito je osjetljivo na početne uvjete.

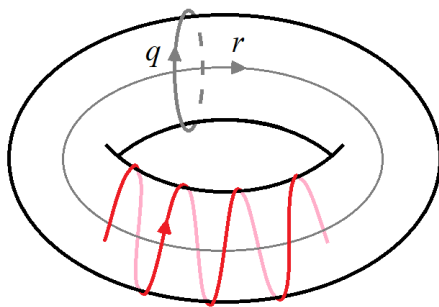
Periodičnih ustaljenih stanja ima više vrsta, a naziv im se definira u odnosu na nazivnu sklopnu periodu rada pretvarača. Ustaljeno stanje periode jednake periodi pilastog napona, odnosno nazivnoj sklopnoj periodi rada pretvarača naziva se ustaljeno stanje osnovne periode (1P). Bifurkacijama nastaju periodična ustaljena stanja periode veće od periode pilastog napona. Način nastanka tih periodičnih ustaljenih stanja razlikuje se za svaku bifurkaciju pa se i tako dobivena ustaljena stanja različito nazivaju. Periodično ustaljeno stanje  $n$  puta veće periode od nazivne sklopne periode nastalo putom u kaos putem udvostručenja periode naziva se periodično ustaljeno stanje  $n$ -terostruke periode ( $nP$ ),  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 2$ . Sva se takva ustaljena stanja nazivaju subharmonična ustaljena stanja.

S druge strane, nastankom kvaziperiodičnog ustaljenog stanja dinamiku pretvarača vode dvije periode, Slika 4.1. Jedna je približna perioda vlastitog titranja pretvarača, a druga je perioda pilastog napona kojim se postiže pulsno-širinska modulacija. Omjer tih dviju perioda iskazuje se kao rotacijski broj (engl. *Rotation number*) [13], [14], [23], [46], str. 844

$$w = \frac{r}{q} \quad (4.1)$$

gdje  $r$  označava rotaciju velikog polumjera torusa i odgovara transformiranoj (približnoj) periodi vlastitog titranja pretvarača, a  $q$  označava rotaciju malog polumjera torusa i odgovara periodi pilastog napona. Ako je rotacijski broj racionalan, onda je ustaljeno stanje periodično i naziva se fazna zaključanost (engl. *Phase locking, Mode locking*), a ako je iracionalan, onda je ustaljeno stanje neperiodično i naziva se kvaziperiodično ustaljeno stanje. U disertaciji će se primjenjivati

pojednostavnjeno označavanje ustaljenog stanja fazne zaključanosti (ML, od engl. *Mode locking*) i kvaziperiodičnog ustaljenog stanja (QP, od engl. *Quasiperiodic steady-state*). Tako se ustaljeno stanje fazne zaključanosti označava s ML  $n:1$  ili  $MLn$  gdje je  $n \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 3$  i pokazuje koliko je puta perioda ustaljenog stanja fazne zaključanosti veća od periode pilastog napona. Kvaziperiodično ustaljeno stanje označava se s  $QPn/m$  gdje su  $n, m \in \mathbb{N}$ ,  $n \geq 3$ ,  $m = n + 1$ . Omjer  $n/m$  označava da je perioda više od  $n$  puta i manje od  $m$  puta veća od periode pilastog napona. Transformirana perioda vlastitog titranja pretvarača mijenja se s promjenom parametara pretvarača mijenjajući i rotacijski broj pa se tako izmjenjuju kvaziperiodično ustaljeno stanje i ustaljeno stanje fazne zaključanosti.



Slika 4.1 Geometrijski prikaz gibanja materijalne točke uzrokovan dvama periodičnim gibanjima

Ustaljena stanja pretvarača ovise o parametrima pretvarača. Ponekad se čini da za isti skup parametara pretvarač može raditi u dva ili više različitih ustaljenih stanja. Tada posebna vrsta parametara, početni uvjeti određuju koje od ustaljenih stanja će se pojaviti. Opisana pojava naziva se multistabilnost [47], str. 270. Kad pretvarač radi s takvim skupom parametara koji omogućuju multistabilnost i kada se jedan od parametara pretvarača mijenja može se dogoditi da prijelaz između dva različita ustaljena stanja bude na različitoj vrijednosti bifurkacijskog parametra pri povećavanju i pri smanjivanju bifurkacijskog parametra [48], str. 40. Ta se pojava naziva histereza i pojavljuje se u sustavima s „pamćenjem“.

Pretvarač je interakcijski složen pa iskazuje izrazitu osjetljivost ustaljenih stanja o parametrima pretvarača. Neki parametri, kao temperatura okoline nisu pod kontrolom, neki parametri, kao nelinearnost ventila nisu poznati, a neki parametri, kao nadomjesna otpornost kondenzatora trošila  $R_C$  ili kapacitivnost kondenzatora PI-regulatora u grani povratne veze jesu poznati, ali nisu modelirani. Sve navedeno otežava istraživanje kvaziperiodičnosti i histereze ustaljenih stanja uzlaznog pretvarača.

#### 4.1.2 Bifurkacije

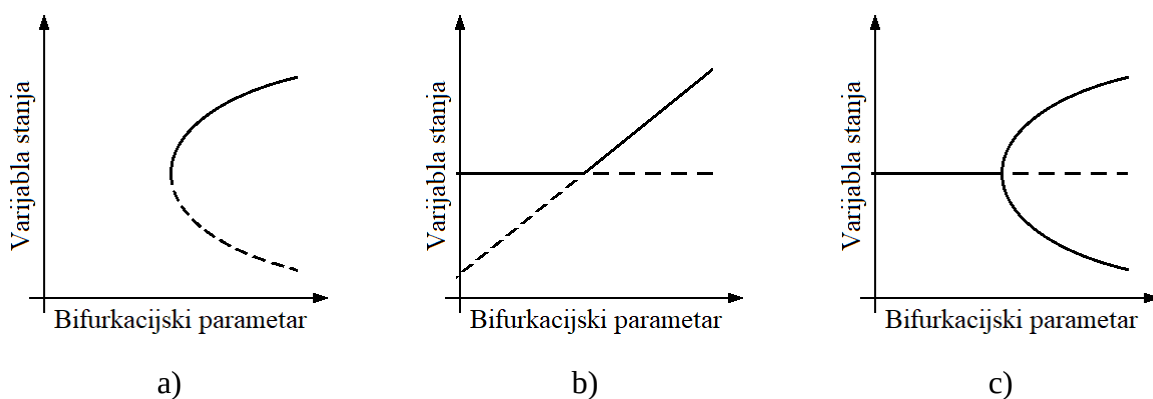
Bifurkacija je "iznenadna" kvalitativna promjena ustaljenog stanja nastala "malom" promjenom nekog od parametara promatrane mreže [20], str. 234. Mala promjena znači da je vrijednost promjene parametra zanemariva u odnosu na raspon unutar kojeg se u promatranom slučaju parametar kreće. Parametar čijim mijenjanjem nastaje bifurkacija naziva se bifurkacijski parametar. Vrijednost bifurkacijskog parametra na kojoj nastaje bifurkacija naziva se bifurkacijska točka.

Bifurkacije se s obzirom na nastanak strukturne promjene sustava dijele na standardne (glatke), kod kojih nema strukturne promjene sustava pa imaju kontinuiranu prvu derivaciju jednadžbi mapiranja i na nestandardne (neglatke), kod kojih se pojavljuje strukturna promjena i skok prve derivacije jednadžbi mapiranja [1], [49], [50], [51]. Drugim riječima, u standardnim bifurkacijama slijed vođenja ventila pretvarača ostaje nepromijenjen, a u nestandardnim bifurkacijama mijenja se slijed vođenja ventila pretvarača što znači i promjena slijeda jednadžbi stanja. Standardne bifurkacije su sedlasto-čvorna bifurkacija, transkritična bifurkacija, bifurkacija udvostručenjem periode, viljuškasta bifurkacija i Hopfova bifurkacija. Nestandardnih bifurkacija ima veći broj i njihova klasifikacija prelazi granice ove disertacije. Bit će navedena samo bifurkacija srazom granica kao najvažnija bifurkacija u ovoj disertaciji.

Ukratko će se opisati vrste standardnih i nestandardnih bifurkacija i prikazati grafički – bifurkacijskim dijagramom. Bifurkacijski dijagram istosmjernog uzlaznog pretvarača nastaje uzorkovanjem nekog prikladnog napona ili struje periodom jednakom periodi pilastog napona tako da se pri tom mijenja jedan parametar pretvarača – bifurkacijski parametar [52]. U dijagramima je punom linijom prikazano ustaljeno (stabilno) stanje, a iscrtkanom linijom nestabilno stanje. O primjeni bifurkacijskih dijagrama u identifikaciji ustaljenih stanja više u odsječku 4.3.4.

Sedlasto-čvorna bifurkacija, Slika 4.2a, karakterizirana je naglim nestankom ili pojavom nekog rješenja, odnosno točke u bifurkacijskom dijagramu tako što se mijenjanjem bifurkacijskog parametra dva rješenja, od kojih jedno stabilno, a drugo nestabilno, međusobno približavaju dok se ne stope i rješenja nestanu [20], str. 15. Sustav nakon toga prelazi u neko drugo ustaljeno stanje koje može biti različitih vrsta.

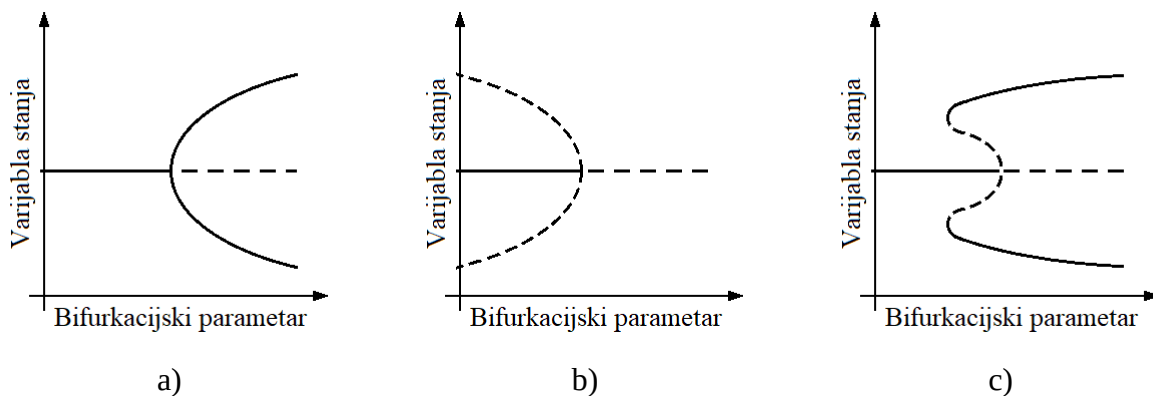
Transkritičnu bifurkaciju, Slika 4.2b, karakterizira razmjena stabilnosti dva rješenja tako što je do bifurkacijske točke jedno rješenje stabilno, a drugo nestabilno. Nakon bifurkacijske točke prethodno stabilno rješenje postalo je nestabilno, a prethodno nestabilno rješenje postalo je stabilno [48], str. 37.



Slika 4.2 Bifurkacijski dijagrami: a) Sedlasto-čvorna bifurkacija, b) Transkritična bifurkacija, c) Bifurkacija udvostručenjem periode.

Bifurkacija udvostručenjem periode (engl. *Period doubling bifurcation*, PD), Slika 4.2c, karakterizirana je naglim gubitkom stabilnosti postojećeg periodičnog rješenja i nastankom rješenja dvostruko dulje periode [20], str. 18.

Viljuškasta bifurkacija, Slika 4.3, nazvana je po obliku bifurkacijskog dijagrama, a karakteriziraju je dvije različite pojave općenito svojstvene sustavima koji iskazuju simetričnost [20], str. 16.

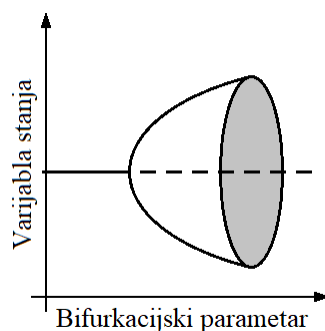


Slika 4.3 Bifurkacijski dijagrami viljuškaste bifurkacije: a) Nadkritična bifurkacija, b) Podkritična bifurkacija, c) Podkritična bifurkacija s histerezom.

Hopfova bifurkacija (H), Slika 4.4, karakterizirana je različitim načinima prijelaza iz jednog rješenja u drugo. Jedan tipičan način prijelaza je kad osnovno periodično ustaljeno stanje prelazi u kvaziperiodično [14], [43], [48]. Hopfova bifurkacija često se miješa s Neimark-Sackerovom (NS) bifurkacijom. Hopfova bifurkacija nastaje u kontinuiranim sustavima, a Neimark-Sackerova u diskretnim sustavima [20], str. 241.

Tako se u fizičkom modelu pretvarača pojavljuje Hopfova bifurkacija, a u simulacijskom modelu Neimark-Sackerova bifurkacija. Mjerni i pokazni instrumenti obavljaju obradu rezultata

digitalno (diskretno), ali su zbog konačne brzine širenja elektromagnetskih valova i sastavne komponente instrumenata i sami instrumenti uvijek analogni. Tako dvojba je li neka bifurkacija Hopfova ili Neimark-Sackerova zahtijeva dodatne kriterije odlučivanja. U ovoj disertaciji to pitanje nije važno, ali je važno znati da se te dvije bifurkacije odnose na istu promjenu ustaljenih stanja pa da se ne unosi zabuna u tumačenju pojava.



Slika 4.4 Bifurkacijski dijagram natkritične Hopfove bifurkacije [48], str. 121.

U bifurkaciji srazom granica (BC) [20], [53] trajektorija prolazi kroz dva područja prostora stanja različite dinamike. U svakom od tih dvaju prostora stanja sustav je gladak, ima kontinuiranu prvu derivaciju jednadžbi mapiranja. Na mjestu granice između tih dvaju prostora stanja (engl. *Border*) je nagla promjena svojstvene vrijednosti jednadžbi mapiranja. U bifurkacijskom dijagramu na tom se mjestu pojavljuje prekid ili diskontinuirana promjena derivacije. Bifurkacija srazom granica može se dogoditi u bilo kojoj vrsti ustaljenog stanja. Zato se nijedan bifurkacijski dijagram bifurkacije srazom granica neće prikazati ovdje, nego na mjestima na kojima će obrađivati ta bifurkacija. Pojava bifurkacije srazom granica vezana je uz odnos kontrolnog napona i pilastog napona pulsno-širinskog modulatora. Poznata su tri slučaja, kad kontrolni napon prolazi ispod ili iznad okomitog brida pilastog napona, kada dodiruje okomiti brid pilastog napona i kada dodiruje kosi brid pilastog napona. U svakom od tih slučajeva mijenja se dotadašnji slijed sklapanja ventila i samim time i ustaljeno stanje pretvarača. U disertaciji će se pokazati do sada nepoznat slučaj nastanka bifurkacije srazom granica temeljene na izjednačenju pilastog napona s dodatnim upravljačkim naponom tvorenim od takozvanog napona mrtvog vremena.

Prema [1] vrsta bifurkacije ovisi o vrsti pretvarača, redu kruga i vrsti upravljanja, ali klasifikacija bifurkacija po navedenim svojstvima pretvarača ne postoji. Istosmjerni pretvarači toliko su interakcijski složeni da do danas nije stvorena opća teorija kojom bi se za svaki pretvarač moglo sa sigurnošću predvidjeti vrsta bifurkacija koja bi se u pretvaraču mogla pojaviti.

### 4.1.3 Putovi u kaos

U pretvaračima se pojavljuje više vrsta bifurkacija, ovisno o tome koji se parametri pretvarača mijenjaju. Pri projektiranju pretvarača važno je pronaći znakove koji upućuju na mogućnost pojave kaotičnog ustaljenog stanja. Niz bifurkacija kojima pretvarač iz nekaotičnih ustaljenih stanja prelazi u kaotično ustaljeno stanje naziva se put u kaos. Putovi u kaos mogu se grafički pokazati bifurkacijskim dijagramom. Poznata su četiri puta u kaos [20]. To su put u kaos udvostručenjem periode, put u kaos putem kvaziperiodičnosti, put u kaos intermitencijama i put u kaos krizama.

Put u kaos udvostručenjem periode nastaje slijedom bifurkacija udvostručenjem periode. Pritom svako sljedeće udvostručenje periode nastupa pri manjoj promjeni bifurkacijskog parametra nego pri prethodnom udvostručenju periode. Primjeri ovog puta u kaos dani su u radovima [54] i [55]. U istosmjernim se pretvaračima uz bifurkaciju udvostručnja periode, često pojavljuje i bifurkacija srazom granica pa je put u kaos udvostručenjem periode popraćen objema bifurkacijama.

Put u kaos putem kvaziperiodičnosti nedovoljno je istražen. Prvi su model tog puta u kaos razvili Landau i Lifshitz. Prema tom modelu kaotično ustaljeno stanje nastaje tako što se broj nesumjerljivih frekvencija kvaziperiodičnosti povećava težeći u beskonačnost. Kada taj broj dosegne beskonačnost nastupilo je kaotično ustaljeno stanje. Jednostavniji model, i uz to eksperimentalno potvrđen, dali su Newhouse, Ruelle i Takens [56]. Prema njihovom modelu iz periodičnog ustaljenog stanja mijenjanjem bifurkacijskog parametra nastane granični ciklus (ustaljeno stanje fazne zaključanosti). Daljim mijenjanjem bifurkacijskog parametra nastane kvaziperiodično ustaljeno stanje s dvije nesumjerljive frekvencije, zatim s tri nesumjerljive frekvencije i nakon toga nastane kaotično ustaljeno stanje. Prema modelu Curryja i Yorka [57] kaotično ustaljeno stanje može nastati već i nakon kvaziperiodičnog ustaljenog stanja s dvije nesumjerljive frekvencije. Svi su ovi putevi u kaos uzrokovani Hopfovima bifurkacijama. Afraimovič i Šiljnikov pokazali su tri različita scenarija puta u kaos iz kvaziperiodičnog ustaljenog stanja s dvije nesumjerljive frekvencije. To su put u kaos nizom bifurkacija udvostručnja perioda, bifurkacijom sedlo-čvor i mekim prijelazom (engl. *Soft transition*) zbog gubitka glatkoće torusa (engl. *Torus smoothness*) [58]. Eksperimentalno potvrđeni putovi u kaos u osnovnim izravnim istosmjernim pretvaračima prikazani su u radovima [14], [18] i [59].

Put u kaos intermitencijama nastaje iznenadnim promjenama iz periodičnog ustaljenog stanja u kaotično ustaljeno stanje i natrag u periodično ustaljeno stanje. Daljim mijenjanjem bifurkacijskog parametra te se promjene ponavljanju, a kaotično ustaljeno stanje obuhvaća sve šira

područja vrijednosti bifurkacijskog parametra sve dok trajno ne nastupi kaotično ustaljeno stanje. Ispitivanja ovih pojava provode se namjernim unošenjem smetnji u pretvarač [20].

Put u kaos krizama nastaje iznenada i nema prativih slijedova bifurkacija kao u ostala tri puta u kaos [20], str. 24.

## 4.2 Metode analize pretvarača

Metode analize pretvarača ovise o matematičkom modelu pretvarača kao i o pitanju na koje se želi odgovoriti [37]. Pretvarač je proizvod i mora se moći analizirati kako bi tehničke karakteristike pretvarača odgovarale prethodno zadanim karakteristikama. Uz to, neregularna ustaljena stanja nastoje se izbjeći pa je tim važnije moći provesti analizu pretvarača.

Analiza pretvarača polazi od diferencijalnih jednadžbi koje se postavljaju za pretvarač i zatim preoblikuju u jednadžbe diferencija. Jednadžbe su redovito drugog reda ili višeg, a pretvarači se ponašaju kao sustavi linearni po odsječcima pa se rješenja jednadžbi za jedan odsječak moraju „spajati“ s rješenjima jednadžbi za drugi odsječak. Spajanje se događa u trenutku sklapanja sklopki ako je zadovoljen određeni uvjet sklapanja. Ako pretvarač radi u kontinuiranom načinu rada, onda su unutar periode pilastog napona dva linearna odsječka i dva trenutka spajanja tih odsječaka, a ako pretvarač radi i u diskontinuiranom načinu rada, onda su unutar periode pilastog napona tri linearna odsječka i tri trenutka spajanja tih odsječaka. To čini rješavanje dobivenog sustava jednadžbi analitički nerješivim. Tri su pristupa rješavanju dobivenog sustava jednadžbi. To su metoda diskretnih vremenskih trenutaka, metoda usrednjavanja i izravna metoda [20], [39], [40], [43].

Metodom diskretnih vremenskih trenutaka određuju se vrijednosti varijabli stanja na kraju svake periode ili prilikom sklapanja [20], str. 63. Metodom se nastoje odrediti neka pogodna „međurješenja“ (svojstvene vrijednosti) jednadžbi stanja. Zatim se temeljem tih međurješenja zaključuje o bifurkacijama i ustaljenim stanjima. Metoda se temelji na matematičkoj analizi pa zahtijeva znatno veću matematičku vještinu od izravne metode, unosi veću pogrešku u proračun od izravne metode, a na kraju daju rezultate primjenom komercijalnih alata za numeričko rješavanje rekurzivnih jednadžbi (kao što može biti i u izravnoj metodi). U odnosu na druge dvije metode jedna od prednosti ove metode je mogućnost određivanja (predviđanja) skupa parametara pretvarača za koje nastaje koja vrsta bifurkacije. Također, temeljem svojstvenih vrijednosti pouzdana je identifikacija bifurkacija. No, treba znati da se i uz sve prednosti metode diskretnih vremenskih trenutaka zadovoljavajuće podudaranje između rezultata simulacije i rezultata mjerenja često postiže samo na kvalitativnoj razini, a ne i na kvantitativnoj razini.

Metodom usrednjavanja određuju se vremenske ovisnosti srednjih vrijednosti varijabli stanja. Prednost ove metode u odnosu na druge dvije metode je jednostavnost upotrebe, a nedostataka ima više [3], [60]. Tako točnost metode opada s povećanjem brzine kojom se neka pojava odvija i metoda je neupotrebljiva kada su prijelazno stanje ili sama pojava kraći od dvostruke periode pilastog napona. Metoda usrednjavanja eliminira dinamiku unutar periode pilastog napona pa se usrednjavanjem ne mogu identificirati promjene unutar te periode. Zato metoda može biti tehnički zadovoljavajuće točna samo ako su vremenske konstante pretvarača puno veće od periode pilastog napona. Pored toga, metoda ne uzima u obzir ni početne uvjete. Zato je metoda usrednjavanja neprimjenljiva za identifikaciju takozvanih brzih promjena u periodi i njima uzrokovanim bifurkacijama, kao i brzih prijelaznih pojava i multistabilnosti. Time je neprimjenljiva i za određivanje područja vrijednosti parametara pretvarača za koje nastupaju bifurkacije i ustaljena stanja koje su predmet istraživanja u disertaciji.

Najtočnija se analiza ostvaruje izravnim metodama rješavanja diferencijalnih jednadžbi. U izravnim metodama jednadžbe diferencija rješavaju se računalom. Tako je za bilo koji skup parametara moguće proračunati ustaljeno stanje. Prepuštanjem proračuna računalu dijelom se gubi mogućnost identifikacije skupova parametara za koje se dobiva određeno ustaljeno stanje, a dobiva se veći broj isprobanih kombinacija parametara. Proračun računalom može se obaviti ili primjenom komercijalnih računalnih alata za simulaciju električkih krugova ili vlastito napisanom digitalnom simulacijom. Primjenom komercijalnih računalnih alata ne može se pod kontrolom držati upotrijebljena numerička metoda proračuna, kao što je to slučaj s vlastito napisanom digitalnom simulacijom, jer struktura komercijalnih alata nije poznata. Nedostatak je izravne metode potreba za provođenjem većeg broja simulacija za što veći skup parametara pretvarača kako bi se model pretvarača s prihvatljivom sigurnošću mogao verificirati. Nedostatak je i ograničena identifikacija bifurkacija, jer se izravnom metodom može prepoznati da je nastupila bifurkacija, ali se samo u slučaju bifurkacije srazom granica može ta bifurkacija i identificirati.

Ova se disertacija temelji na izravnoj metodi rješavanja diferencijalnih jednadžbi opisanoj u potpoglavlju 3.6.

### **4.3 Metode identifikacije bifurkacija i ustaljenih stanja**

Pitanje identifikacije ustaljenih stanja uopće nije važno u linearnim vremenski nepromjenljivim mrežama. U njima se zna da nije moguća pojava novih frekvencija pa tako ni novih valnih oblika ni novih ustaljenih stanja [44], str. 9. U nelinearnim i vremenskim promjenljivim mrežama nastaju nove frekvencije. Ako se promijeni način stvaranja novih frekvencija promijenit će se i ustaljeno

stanje. U pretvaraču je svako ustaljeno stanje, osim ustaljenog stanja osnovne periode, neregularno i neželjeno. Identificirati neregularno ustaljeno stanje važno je zbog:

- nepovoljnog djelovanja neregularnih ustaljenih stanja na komponente pretvarača uključujući i izvor i trošilo,
- mogućnosti otkrivanja kako je do neregularnog ustaljenog stanja došlo i kako bi ga se moglo spriječiti,
- stjecanja znanja o tome u kojim se vrstama pretvarača i načinima upravljanja pojavljuju koja neregularna ustaljena stanja.

Bavljenje neregularnim ustaljenim stanjima neodvojivo je od bavljenja bifurkacijama. Identifikacija neregularnog ustaljenog stanja pruža informaciju o bifurkaciji koja je to ustaljeno stanje je uzrokovala, kao i obratno. Kada se analiza pretvarača obavlja metodom diskretnih vremenskih trenutaka, onda se identifikacija bifurkacija obavlja putem svojstvenih vrijednosti. Temeljem mjesta na kojem svojstvene vrijednosti sijeku jediničnu kružnicu i brzine kojom ju sijeku zaključuje se o bifurkaciji koja se dogodila [20], [43]. Identifikacija bifurkacija bez određivanja svojstvenih vrijednosti obavlja se ili identifikacijom ustaljenih stanja i puta u kaos (za bifurkaciju udvostručenja periode i Hopfovu bifurkaciju) ili izravno identifikacijom bifurkacije srazom granica opisanom u poglavlju 5.

Identifikacija ustaljenih stanja može se neovisno o metodi analize pretvarača obavljati:

- u vremenskom području putem valnih oblika i trajektorija,
- u frekvencijskom području putem harmonijskog sastava promatranih valnih oblika,
- u frkevencijskom području putem Poincaréovih slika i bifurkacijskih dijagrama,
- Ljapunovljevim koeficijentima, Coweb dijagramima i drugim načinima koji se ne primjenjuju u ovoj disertaciji.

U identifikaciji ustaljenih stanja treba razlikovati obavlja li se ona temeljem rezultata analize, što znači rezultata dobivenih simulacijom ili temeljem rezultata mjerenja. Identifikacija ustaljenih stanja simulacijom lakša je od identifikacije mjerenjem. U simulaciji se dobivaju valni oblici s brojem značajnih znamenaka određenim programskim kôdom, dakle po volji, a obrada podataka obavlja se računalom. U mjerenju pak postoje neidealnosti valnih oblika varijabli mreže i periode pilastog napona i smetnje, potreban je zahtjevan mjerni sustav i sustav za obradu podataka i tek nakon toga slijede iste operacije kao i u simulaciji. Obama načinima identifikacije pridat će se pozornost. Pitanje pouzdanosti identifikacije ustaljenih stanja bit će detaljnije razmatrano u analizi rezultata simulacija i posebno pri analizi rezultata mjerenja. Kad je identifikacija ustaljenog stanja nedovoljno pouzdana treba voditi računa i o tome je li važno koje je ustaljeno stanje ili koje su posljedice tog ustaljenog stanja.

Tijekom identifikacije ustaljenih stanja mjerenjem najčešće se promatraju napon kondenzatora i struja prigušnice. Obično je iz struje prigušnice lakše odrediti periodu i lakše je razlučiti intervale vođenja ventila V1 i V2. Zato će se svi postupci opisati na primjeru struje prigušnice, a navedeno će vrijediti i za napon kondenzatora. Identifikacija ustaljenih stanja obavljala se prema, [20], [21] i [61].

#### 4.3.1 Identifikacija ustaljenih stanja valnim oblicima

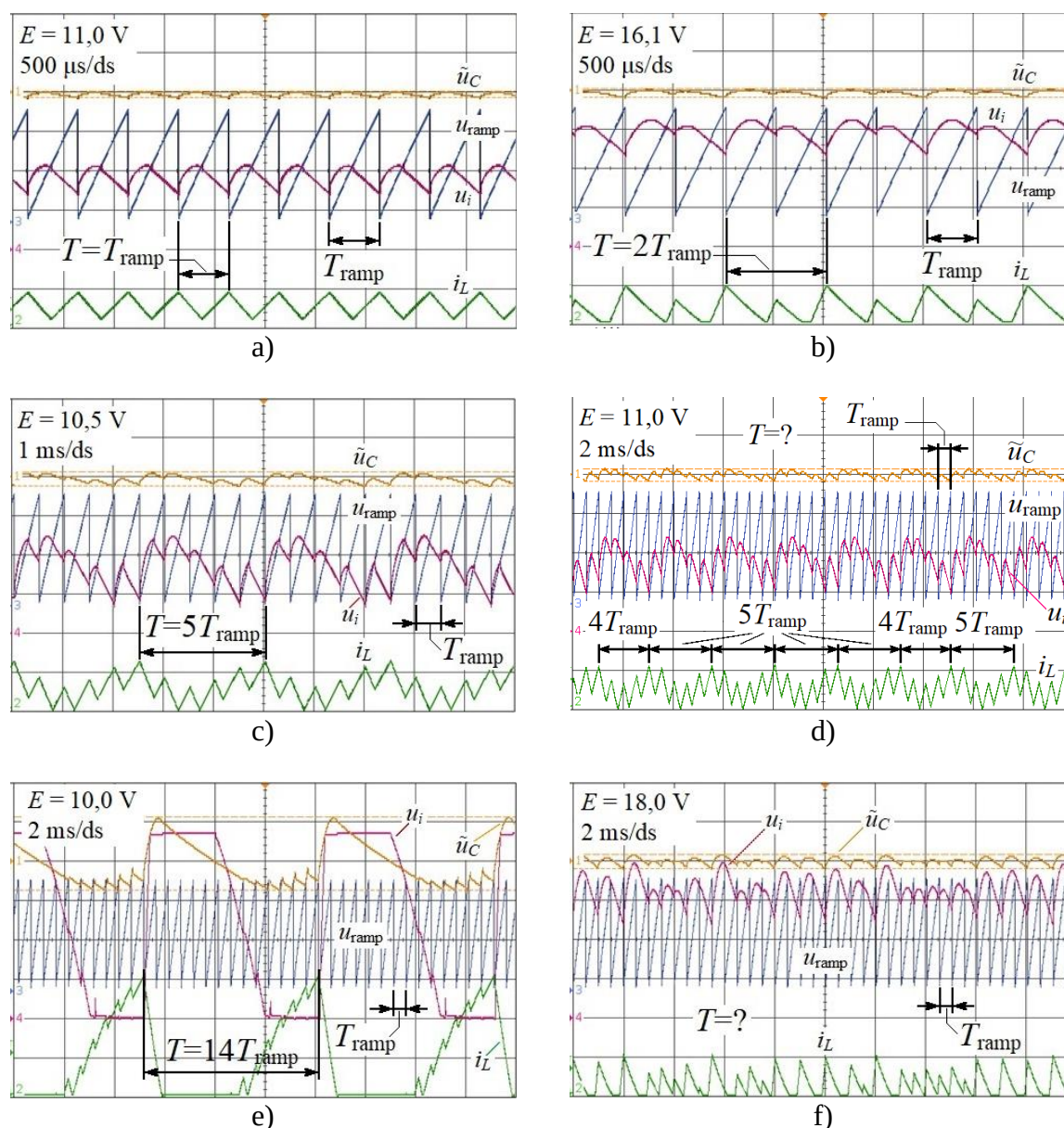
Ovom se metodom uspoređuje perioda struje prigušnice s periodom pilastog napona. Prvo se nastoji utvrditi je li struja periodična. Ako nije, onda je ustaljeno stanje kvaziperiodično ili kaotično. U razlikovanju kvaziperiodičnog i kaotičnog ustaljenog stanja korisno je znati kojom bifurkacijom je nastalo ustaljeno stanje, kao i put u kaos. Ako je struja periodična, nastoji se utvrditi jesu li periode struje i pilastog napona jednake ili su višekratnici. Ako su višekratnici, također u razlikovanju ustaljenih stanja potrebno je znati kojom bifurkacijom je nastalo ustaljeno stanje i put u kaos. Nekoliko ustaljenih stanja identificiranih valnim oblicima izmjerenim na pretvaraču prikazuje Slika 4.5. Za sve prikaze osjetljivost za napon kondenzatora  $\tilde{u}_C$  je 2 V/ds, za struju prigušnice  $i_L$  je 1 A/ds, za kontrolni napon  $u_i$  je 1 V/ds i za pilasti napon  $u_{ramp}$  je 1 V/ds. Ustaljeno stanje dvostruke periode i kaotično ustaljeno stanje dobiveni su tako što je promijenjena induktivnost prigušnice na  $L = 2,37$  mH.

Ustaljeno stanje osnovne periode prikazuje Slika 4.5a. Identificira se po tome što je perioda struje prigušnice  $T$  jednaka periodi pilastog napona  $T_{ramp}$ . Ovo ustaljeno stanje jedino je regularno ustaljeno stanje pretvarača. Sva su ostala ustaljena stanja neregularna.

Ustaljeno stanje dvostruke periode prikazuje Slika 4.5b. Perioda struje prigušnice  $T$  jednaka je dvostrukoj periodi pilastog napona  $T_{ramp}$ .

Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 5:1 prikazuje Slika 4.5c. Perioda struje prigušnice  $T$  jednaka je trajanju pet perioda pilastog napona  $T_{ramp}$ . Ovo bi se stanje po duljini periode moglo zamijeniti za ustaljeno stanje peterostruke periode, ali poznat je slijed ustaljenih stanja pa se zna da je ustaljeno stanje nastalo dinamikom na torusu, a to znači da je to ustaljeno stanje fazne zaključanosti. Dodatno, valni je oblik sličan sljedećem ustaljenom stanju koje će biti prikazano pa je zato uputno upotrijebiti i dodatne metode identifikacije.

Kvaziperiodično ustaljeno stanje koje nastupa između ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotirajućih brojeva 4:1 i 5:1 prikazuje Slika 4.5d. Ovo ustaljeno stanje nastupit će smanjivanjem ulaznog napona prije ustaljenog stanja fazne zaključanosti rotirajućeg broja 5:1, ali je ovdje prikazano nakon identifikacije fazne zaključanosti, jer je prikladnije opisati kvaziperiodičnost preko fazne zaključanosti nego obrnuto. U prikazanom ustaljenom stanju razmak između najviših



Slika 4.5 Identifikacija ustaljenih stanja valnim oblicima: a) Ustaljeno stanje osnovne periode, b) Ustaljeno stanje dvostruke periode, c) Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 5:1, d) Kvaziperiodično ustaljeno stanje koje nastupa između ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotirajućih brojeva 4:1 i 5:1, e) Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 14:1, f) Kaotično ustaljeno stanje.

vrhova struje prigušnice traje četiri ili pet perioda pilastog napona. Iz oscilograma se ne može odrediti perioda struje prigušnice. Ovo ustaljeno stanje prikazuje i Slika 5.13. Iz pripadne se trajektorije može prepoznati neperiodično ustaljeno stanje koje može biti i kvaziperiodično i kaotično. Simulacijom valnih oblika, trajektorije i Poincaréove slike utvrđena podudarnost između valnih oblika i trajektorije dobivenih mjerenjem i simulacijom, a iz simulirane Poincaréove slike, Slika 5.3, identificirano je kvaziperiodično ustaljeno stanje.

Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 14:1 prikazuje Slika 4.5e. Perioda struje prigušnice  $T$  jednaka je trajanju 14 perioda pilastog napona  $T_{\text{ramp}}$ . Kaotično ustaljeno stanje prikazuje Slika 4.5f. Ne može se odrediti perioda struje prigušnice. Veća je od vremenskog intervala koji obuhvaća prikaz. Ustaljeno stanje nastalo je putem u kaos putem udvostručenja periode i trajektorija obuhvaća plohu pa je identificirano kaotično ustaljeno stanje.

Ako se identifikacija obavlja temeljem rezultata mjerenja, onda se odvija vizualnom usporedbom dvaju valnih oblika i podložna je nesavršenosti oka. Ako se identifikacija obavlja temeljem rezultata simulacije, onda se identifikacija osim vizualnom usporedbom dvaju valnih oblika može obaviti i numeričkom usporedbom valnih oblika. Prednost identifikacije ustaljenih stanja valnim oblicima pred drugim metodama su minimalni zahtjevi na mjernu opremu i obradu podataka, brzina identifikacije i slikovitost prikaza kojom se ustanovljava postoji li kvalitativna promjena struje prigušnice. Nedostatak je nesavršenost oka u prepoznavanju istih i sličnih uzoraka.

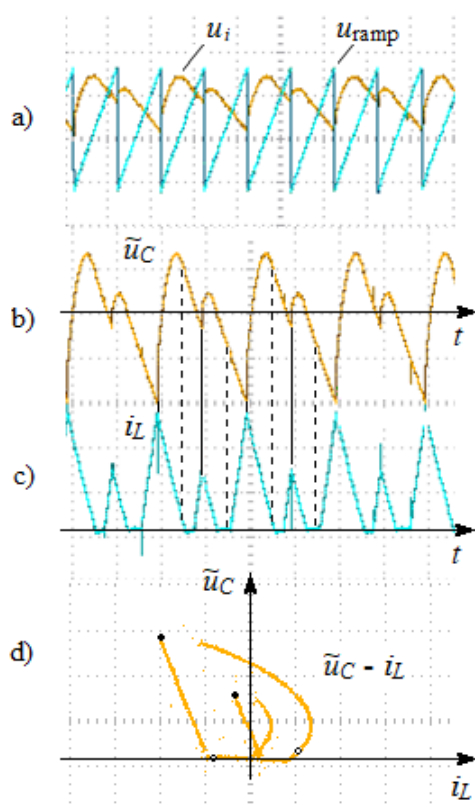
#### **4.3.2 Identifikacija ustaljenih stanja trajektorijama**

Obično se prati trajektorija napona kondenzatora po struji prigušnice. Trajektorije su parametarske krivulje i u njima je vrijeme sadržano samo implicitno. Zato se ne može pratiti perioda ustaljenog stanja, ali se i dalje može pratiti promjena ustaljenog stanja. Trajektorije periodičnih ustaljenih stanja su zatvorene krivulje, a trajektorije kvaziperiodičnog i kaotičnog ustaljenog stanja ispunjavaju cijelu plohu. Tako se mogu razlikovati periodična od neperiodičnih ustaljenih stanja. Trajektorije su korisne i za određivanje veličine faznog prostora zahvaćenog varijablama stanja. U kaotičnom ustaljenom stanju taj je prostor ograničen. Identifikaciju ustaljenih stanja trajektorijama i valnim oblicima prikazuje Slika 4.6. Nedostatak identifikacije ustaljenih stanja trajektorijama je i nemogućnost određivanja tipa periodičnog ustaljenog stanja.

#### **4.3.3 Identifikacija ustaljenih stanja Poincaréovim slikama**

Poincaréove slike nastaju uzorkovanjem trajektorija. Za periodu uzorkovanja prikladno je odabrati periodu pilastog napona. Ako je tako, onda će se za ustaljeno stanje osnovne periode uzorkovati uvijek ista točka u faznom prostoru pa Poincaréovu sliku ustaljenog stanja osnovne periode čini jedna točka. Za periodično ustaljeno stanje  $n$ -terostruke periode Poincaréova slika sadrži  $n$  točaka, Slika 4.6. Isto vrijedi i za drugo periodično ustaljeno stanje faznu zaključanost rotacijskog broja  $n:1$ . Za razlikovanje tih dvaju periodičnih ustaljenih stanja potrebno je kao dodatni kriterij znati koja je bifurkacija uzrokovala promjenu ustaljenog stanja. Poincaréova slika kvaziperiodičnog ustaljenog stanja je zatvorena krivulja, a kaotičnog ustaljenog stanja ploha.

Za ustaljeno stanje dvostruke periode koje prikazuje Slika 4.6 prikazano je kako Poincaréova slika ovisi o trenutku uzorkovanja trajektorije  $u_C - i_L$ . Ako Poincaréova slika nastaje uzorkovanjem u trenucima označenim punim linijama, onda ju čine dva puna kružića, a ako nastaje u trenucima označenim iscrtkanim linijama onda ju čine dva neispunjena kružića.



Slika 4.6 Identifikacija ustaljenih stanja trajektorijama i Poincaréovim slikama za ustaljeno stanje dvostruke periode: a) Valni oblici napona  $u_{ramp}$  i kontrolnog napona  $u_i$ , b) napona kondenzatora  $u_C$ , c) struje prigušnice  $i_L$  i d) trajektorije  $u_C - i_L$  i Poincaréove slike za dva različita trenutka uzorkovanja.

Kada se identifikacija ustaljenog stanja obavlja temeljem rezultata simulacije, onda se za periodično ustaljeno stanje osnovne periode dobivaju točke iste vrijednosti. Kada se identifikacija obavlja temeljem rezultata mjerenja, onda se za periodično ustaljeno stanje osnovne periode dobivaju vrijednosti koje ovise o nesavršenosti sustava kao što su promjene trajanja periode pilastog napona, trenutka uzorkovanja struje prigušnice i napona kondenzatora, smetnji i drugih razloga. Te razlike uzrokuju razmazanost točaka Poincaréove slike. Analogija vrijedi i za ustaljena stanja perioda većih od periode pilastog napona. U blizini bifurkacijske točke razlike između točaka Poincaréove slike mogu biti toliko male da je kao dodatan kriterij pri procjeni vrste ustaljenog stanja potrebno identificirati vrstu bifurkacije.

#### 4.3.4 Identifikacija ustaljenih stanja bifurkacijskim dijagramima

Bifurkacijski dijagram nastaje uzorkovanjem nekog prikladnog napona ili struje periodom jednakom periodi pilastog napona tako da se pri tom mijenja jedan ili više parametara pretvarača [52]. Ako se mijenja jedan parametar, takav je bifurkacijski dijagram jednoparametarski, a ako se mijenja više parametara, onda je bifurkacijski dijagram višeparametarski. U disertaciji se upotrebljava samo jednoparametarski bifurkacijski dijagram i to bifurkacijski dijagram struje induktiviteta po ulaznom naponu. Tu se ulazni napon smatra kao poticaj, a uzorkovana vrijednost struje induktiviteta je odziv. Ulazni napon ne može se mijenjati kontinuirano, nego s nekim korakom promjene.

Ustaljeno stanje identificira se temeljem broja točaka na jednoj, promatranoj vrijednosti ulaznog napona. Ako se za jednu vrijednost poticaja dobije uvijek isti odziv, odnosno uvijek ista točka, onda je pretvarač u ustaljenom stanju osnovne periode. Ako se za jednu vrijednost poticaja dobije  $n$  točaka, onda je pretvarač u ustaljenom stanju  $n$ -terostruke periode ili u ustaljenom stanju fazne zaključanosti  $n:1$ . Na svakom se ulaznom naponu uzorkuje  $m$  perioda pilastog napona. Ako se pri tom dobije  $m$  različitih vrijednosti odziva onda je ustaljeno stanje kvaziperiodično ili kaotično. Ova se dva ustaljena stanja razlikuju po Poincaréovoj slici. Poincaréova slika kvaziperiodičnog ustaljenog stanja je zatvorena krivulja, a kaotičnog ustaljenog stanja ploha.

Prednosti identifikacije ustaljenih stanja bifurkacijskim dijagramima pred drugim metodama su slikovitost prikaza i širi uvid u bifurkacije i ustaljena stanja u nekom području vrijednosti parametara pretvarača. Nedostaci identifikacije ustaljenih stanja bifurkacijskim dijagramima su veliki zahtjevi na mjerni sustav i obradu podataka i vremenska zahtjevnost mjerenja ili simulacije bifurkacijskog dijagrama.

#### 4.3.5 Identifikacija ustaljenih stanja harmonijskih sastavom

Svako ustaljeno stanje ima drugačiji harmonijski sastav. Promjenom ustaljenog stanja mijenja se i harmonijski sastav, odnosno pojavljuju se i nestaju harmonijske komponente. Harmonijski sastav ustaljenog stanja osnovne periode čine osnovni harmonik određen periodom pilastog napona i njegovi viši harmonici. Pojava harmonijskih komponenata niže frekvencije od osnovnog harmonika upućuje na pojavu neregularnog ustaljenog stanja. Harmonijski sastav kaotičnog ustaljenog stanja je kontinuirana funkcija, a ostalih ustaljenih stanja je diskretna funkcija.

Nedostaci identifikacije ustaljenih stanja harmonijskih sastavom su nepouzdanost identifikacije ustaljenih stanja zbog netočnosti mjerne opreme i utjecaja šuma na rezultate mjerenja. Ovaj nedostatak posebno dolazi do izražaja kada treba razlikovati kvaziperiodično ustaljeno stanje od kaotičnog ustaljenog stanja. Nedostatak je i zahtjevna mjerna oprema. Zato se

identifikacija ustaljenih stanja harmonijskim sastavom obavlja kao pomoćna metoda uz druge metode identifikacije ustaljenih stanja.

#### **4.3.6 Identifikacija ustaljenih stanja Ljapunovljevim koeficijentima**

U ovoj se disertaciji ustaljena stanja ne identificiraju Ljapunovljevim koeficijentima. Njihovo određivanje često je složen numerički problem. No zbog važnosti ove metode, ona će biti opisana. Ako se zadavanjem različitih početnih uvjeta zadaju dvije (kaže se bliske) trajektorije, može se promatrati hoće li se one s vremenom približavati, udaljavati ili će razlika ostajati jednaka. I približavanje i udaljavanje odvijaju se po eksponencijalnom zakonu, a koeficijent eksponencijalne funkcije koja opisuje udaljenost između trajektorija naziva se Ljapunovljev koeficijent. Pozitivan Ljapunovljev eksponent karakterizira kaotično ustaljeno stanje i označava udaljavanje trajektorija, negativan Ljapunovljev eksponent karakterizira periodično ustaljeno stanje i označava približavanje trajektorija, a Ljapunovljev eksponent jednak nuli karakterizira kvaziperiodično ustaljeno stanje i konstantan razmak između trajektorija. Sustav  $n$ -tog reda ima  $n$  Ljapunovljevih koeficijenata. Ustaljeno stanje sustava određuje najveći Ljapunovljev koeficijent pa je dovoljno da je jedan Ljapunovljev koeficijent pozitivan i sustav će biti u kaotičnom ustaljenom stanju.

### **4.4 O kvaziperiodičnom ustaljenom stanju**

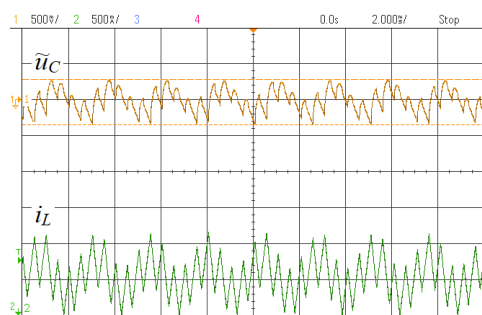
Kvaziperiodično ustaljeno stanje od posebne je važnosti u ovoj disertaciji. Zato će se razmotriti kako definirati i zatim po toj definiciji i identificirati kvaziperiodično ustaljeno stanje. Pored toga, u pretvaraču se pojavljuju dva kvaziperiodična ustaljena stanja nastala različitim bifurkacijama pa je potrebno opisati kako će se razlikovati te dvije bifurkacije.

Kvaziperiodično ustaljeno stanje je ustaljeno stanje u kojem se pojavljuju dvije ili više frekvencija čiji omjer je iracionalan broj. Drugim riječima, nesumjerljive su. Interval promatranja pojava i točnost instrumenata ograničeni su. Zato definiciju i identifikaciju kvaziperiodičnog ustaljenog stanja treba zadati i provesti unutar intervala promatranja i točnosti pokaznih i mjernih instrumenata.

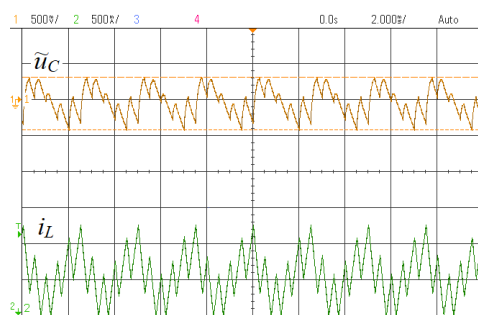
#### **4.4.1 Identifikacija kvaziperiodičnog ustaljenog stanja**

Tijekom identifikacije ustaljenih stanja u području kvaziperiodičnosti pojavljuje se problem kako razlikovati kvaziperiodično ustaljeno stanje, ustaljeno stanje fazne zaključanosti i kaotično ustaljeno stanje. Nesigurnu identifikaciju ustaljenih stanja s pomoću izmjerenih valnih oblika prikazuje Slika 4.7. U slučajevima a) i b) otežano je razlikovanje kvaziperiodičnog ustaljenog stanja od ustaljenog stanja fazne zaključanosti, a u slučaju c) i d) otežano je razlikovanje kaotičnog

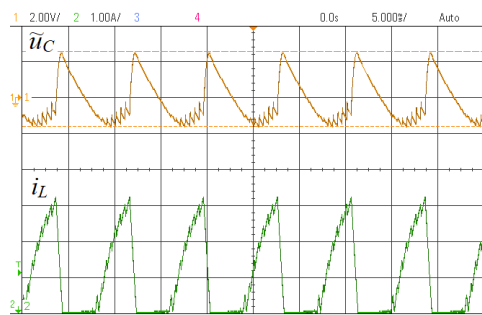
ustaljenog stanja od ustaljenog stanja fazne zaključanosti. Pouzdanost identifikacije ustaljenog stanja ovisi o tome koliko se značajnih znamenaka uzima u obzir pri identifikaciji, koliki je interval promatranja pojava, je li kvaziperiodično ustaljeno stanje osjetljivo na početne uvjete i ima li smetnji. Pri tom treba razlikovati obavlja li se identifikacija ustaljenog stanja i bifurkacija iz analitički dobivenih rezultata, rezultata simulacije ili rezultata mjerenja.



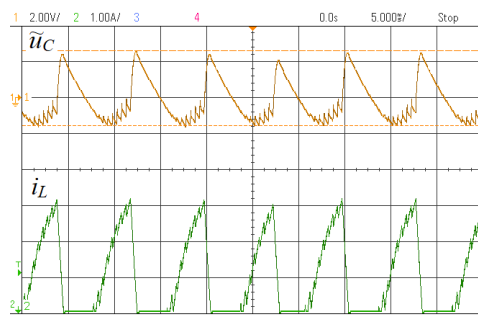
a)



b)



c)



d)

Slika 4.7 Nesigurna identifikacija ustaljenih stanja samo s pomoću valnih oblika. a) Kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5 ( $E = 11$  V), b) Ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML5 ( $E = 10,5$  V), c) Kaotično ustaljeno stanje ML16+K ( $E = 9,7$  V), d) Ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML16 ( $E = 9,7$  V).

### Broj značajnih znamenaka

Simulacija je ograničena preciznošću računala. Ta je preciznost za više redova veličine veća od točnosti mjernih instrumenata. Tako se u simulacijama za periodično ustaljeno stanje periodičnost identificira uz periodičnu podudarnost uzorkovanih vrijednosti na svih sedam do osam znamenaka na koliko se u ovoj disertaciji vrijednosti tablično prikazuju. U kvaziperiodičnom ustaljenom stanju podudarnost uzorkovanih vrijednosti razmaknutih za cjelobrojni višekratnik periode pilastog napona može biti tipično tri do četiri znamenke, ovisno o kvaziperiodičnom ustaljenom stanju. U rezultatima mjerenja ne može se očekivati točnost instrumenata bolja od 1 % zato što se valni oblici, trajektorije i harmonijski sastav snimaju osciloskopom. To znatano otežava

razlikovanje ustaljenog stanja fazne zaključanosti, kvaziperiodičnog ustaljenog stanja i kaotičnog ustaljenog stanja.

### **Interval promatranja pojava**

U simulacijama se mogu uspoređivati uzorkovane vrijednosti i za više od 1000 perioda pilastog napona. U mjerenjima taj podatak najčešće nije ni poznat. U identifikaciji valnih oblika najčešće se zbog razlučivosti određene ljudskim okom identifikacija obavlja na manje od 100 perioda pilastog napona.

### **Osjetljivost na početne uvjete i smetnje**

Zhusubaliyev i Mosekilde u [53], str. 21, navode da kvaziperiodično ustaljeno stanje, za razliku od kaotičnog ustaljenog stanja, ne iskazuje ovisnost o početnim uvjetima. Pri tom se misli na ponašanje Ljapunovljevog koeficijenta. S druge strane, Feudel i suradnici u [62], str. 2 navode da početni uvjeti mogu utjecati na to hoće li sustav biti u periodičnom ili kvaziperiodičnom ustaljenom stanju. To je potvrđeno u radu [63] na primjeru Chuinog kruga četvrtog reda. U radu [64] naglašeno je da se primjenom izravnih metoda rješavanja diferencijalnih jednadžbi, a tako je i u ovoj disertaciji, teško može identificirati bifurkacija koja je nastupila te da rezultati simulacije mogu iskazivati osjetljivu zavisnost (engl. *Sensitive dependence*) o početnim uvjetima. Tako je u radu Banerjeea i suradnika [10] ukazano na grešku u numeričkom određivanju Ljapunovljevog koeficijenta temeljem koje je u radu Chana i Tsea [9] pogrešno identificirano kvaziperiodično ustaljeno stanje.

Smetnje su prirodan način mijenjanja početnih uvjeta, a koji nije pod kontrolom korisnika pretvarača. U radu [65] pokazano je kako smetnje mogu uzrokovati prelazak iz kvaziperiodičnog ustaljenog stanja u stanje slično kaotičnom ustaljenom stanju, ali negativnog najvećeg Ljapunovljevog koeficijenta. Takvo se stanje prema atraktoru naziva čudni nekaotični atraktor (engl. *Strange nonchaotic attractor*) i po složenosti se klasificira između kvaziperiodičnog ustaljenog stanja i kaotičnog ustaljenog stanja [62], str. 6. Također se i slabi kaos (engl. *Weak chaos*) klasificira između kvaziperiodičnog ustaljenog stanja i kaotičnog ustaljenog stanja, a najvećeg Ljapunovljevog koeficijenta jednakog nuli [66]. Identifikacija ovih ustaljenih stanja teža je od osnovnih ustaljenih stanja definiranih u odsječku 4.1.1. Dodatno, kvaziperiodično ustaljeno stanje tijekom bifurkacija može prijeći iz ustaljenog stanja s dvije nesumjerljive frekvencije u ustaljeno stanje s tri nesumjerljive frekvencije, a kasnije i u ustaljeno stanje s više nesumjerljivih frekvencija. Također je i takvo ustaljeno stanje teže identificirati. Da bi se identificirala opisana ustaljena stanja, čudni nekaotični atraktor, slabi kaos i kvaziperiodično ustaljeno stanje s više od

dvije nesumjerljive frekvencije potrebno je razviti posebne alate. U ovoj se disertaciji ta ustaljena stanja, ako se i pojavljuju, ne mogu identificirati, a ne mogu se ni razlikovati od kvaziperiodičnog ustaljenog stanja i kaotičnog ustaljenog stanja.

U mjerenjima pak, dodatni je problem i multistabilnost pretvarača praktički u cijelom području Hopfovih bifurkacija i bifurkacija srazom granica. To dodatno otežava identifikaciju ustaljenih stanja. Od svih ustaljenih stanja u području Hopfovih bifurkacija i bifurkacija srazom granica jedino se za ustaljeno stanje fazne zaključanosti može s razumnom pouzdanosti tvrditi da je ispravno identificirano.

### **Zaključno o identifikaciji kvaziperiodičnog ustaljenog stanja**

Identifikacija nesumjerljivosti frekvencija koje definiraju kvaziperiodično ustaljeno stanje mora se provoditi na ograničenom vremenskom intervalu s ograničenom točnosti instrumenata i na sustavu koji je multistabilan i u kojem uvijek djeluju i smetnje. Sve to otežava identifikaciju kvaziperiodičnih ustaljenih stanja.

Tehnički je važno hoće li se zbog pojave nekog ustaljenog stanja povećati gubici komponentata pretvarača i pretvarača u cjelini, hoće li se povećati strujna i naponska opterećenja komponentata i hoće li se povećati valovitost napona trošila i struje izvora. U disertaciji će se pokazati da nema značajnih razlika u amplitudama u ustaljenim stanjima fazne zaključanosti i kvaziperiodičnim i kaotičnim ustaljenim stanjima kada su ta stanja nastala istom vrstom bifurkacije, tablica P3.1. U tom slučaju, razlikovati te tri vrste ustaljenih stanja nije nužno, jer područje vrijednosti amplituda ne ovisi o ustaljenom stanju, nego o vrsti bifurkacije. Razvoj i primjena uspješnijih načina identifikacije ustaljenih stanja ostaje za buduća istraživanja.

#### **4.4.2 Identifikacija bifurkacija pri pojavi kvaziperiodičnih ustaljenih stanja**

Treba razlikovati kvaziperiodično ustaljeno stanje nastalo Hopfovom, odnosno Neimark-Sackerovom bifurkacijom, od kvaziperiodičnog ustaljenog stanja nastalog bifurkacijom srazom granica. Postupak razlikovanja bez određivanja svojstvenih vrijednosti opisan je u radu [21]. Bifurkacija srazom granica prepoznaje se po specifičnom odnosu kontrolnog napona i pilastog napona kad kontrolni napon prolazi ispod ili iznad okomitog brida pilastog napona, kada dodiruje okomiti brid pilastog napona i kada dodiruje kosi brid pilastog napona. Kad je upravljanje realizirano s dvije ili više veličina koje imaju funkciju kontrolnog napona, onda i te (kontrolne) veličine uzrokuju pojavu bifurkacije srazom granica, zato što mijenjaju slijed uvjeta koji određuju sklapanje ventila. Tako u ovoj disertaciji napon mrtvog vremena ima funkciju kontrolnog napona

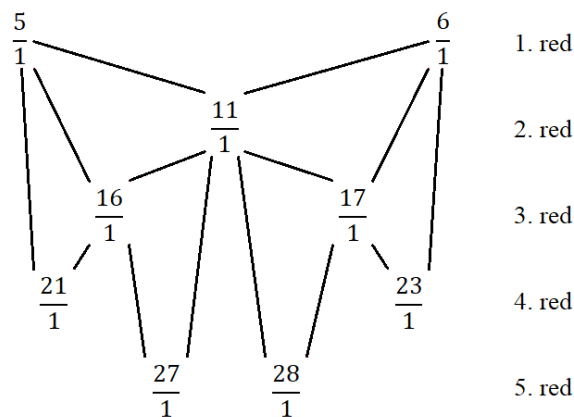
i određuje jednu od bifurkacija srazom granica. Ta je bifurkacija srazom granica opisana u potpoglavlju 5.4.

Prema tome, kvaziperiodično ustaljeno stanje nastalo bifurkacijom srazom granica identificirat će se temeljem promjene slijeda vođenja energetske ventila pretvarača i postizanjem određenih vrijednosti kontrolnog napona. Za svako kvaziperiodično ustaljeno stanje koje nije nastalo bifurkacijom srazom granica, smatrat će se da je nastalo Hopfovom, odnosno Neimark-Sackerovom bifurkacijom.

#### 4.4.3 Hopfova bifurkacija i Fareyev niz

Tijekom rada pretvarača u području Hopfovih bifurkacija prilikom mijenjanja bifurkacijskog parametra mijenja se i rotacijski broj  $f_{\text{ramp}}/f_0'$ . Ovisno o smjeru promjene bifurkacijskog parametra perioda ustaljenog stanja fazne zaključanosti može se povećavati ili smanjivati.

Neka se bifurkacijski parametar mijenja tako da pretvarač prelazi iz ustaljenog stanja fazne zaključanosti rotacijskog broja  $m:1$  u ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja  $n:1$  pri čemu je  $n = m + 1$ . Dakle perioda se povećava. Povećavanje periode je kontinuirana funkcija bifurkacijskog parametra zato što je i rotacijski broj  $f_{\text{ramp}}/f_0'$  kontinuirana funkcija u kojoj se frekvencija  $f_0'$  mijenja kontinuirano. Tako rotacijski broj naizmjenično postaje racionalan i iracionalan pa se izmjenjuju ustaljena stanja fazne zaključanosti i kvaziperiodična ustaljena stanja. Pravilo izmjene ustaljenih stanja je u skladu s Fareyevim nizom [13], [18]. Shemu ovog pravila za ustaljena stanja fazne zaključanosti ML5:1 i ML6:1 prikazuje Slika 4.8. Vidi se da ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML11:1 nastaje kombinacijom ustaljenih stanja 1. reda ML5:1 i ML6:1, ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML16:1 nastaje kombinacijom ustaljenog stanja 1. reda ML5:1 i ustaljenog stanja 2. reda ML11:1 i tako dalje.



Slika 4.8 Shema izmjene ustaljenih stanja fazne zaključanosti ML5:1 i ML6:1 prema Fareyevom nizu

## 5 NEREGULARNA USTALJENA STANJA NAPONSKI UPRAVLJANOG ISTOSMJERNOG UZLAZNOG PRETVARAČA

U nelinearnim neautonomnim sustavima drugog reda ili višeg prema Poincaré-Bendixonovom teoremu moguća je pojava neregularnih ustaljenih stanja [38], str. 60. Dakle mogu se pojaviti neregularna ustaljena stanja, ali i ne moraju.

Nastankom neregularnih ustaljenih stanja dolazi do promjene struja i napona pretvarača. Te promjene zatim utječu na komponente pretvarača, pretvarač u cjelini i na kvalitetu procesa pretvorbe. U ovoj su disertaciji od posebnog interesa pojave koje utječu na:

- gubitke komponenata pretvarača i pretvarača u cjelini,
- strujna i naponska opterećenja pretvaračkih komponenata,
- valovitost napona trošila i struje izvora.

Načine nastanka neregularnih ustaljenih stanja kao i njihove štetne posljedice po pretvarač i sustav koji čine izvor, pretvarač i trošilo potrebno je identificirati mjerenjem. Zatim treba odabrati matematički model kojim se neregularna ustaljena stanja mogu uspješno predviđati kako bi se u konačnici mogao odrediti skup parametara pretvarača za koji se neregularna ustaljena stanja neće pojaviti.

Ovo poglavlje sadrži:

- rezultate simulacija i mjerenja ustaljenih stanja, slijedova ustaljenih stanja i bifurkacija,
- razmatranja o kvaziperiodičnom ustaljenom stanju,
- razmatranja o multistabilnosti pretvarača i histerezi u slijedovima ustaljenih stanja,
- razmatranja o bifurkaciji srazom granica.

### 5.1 Rezultati simulacija

Svaki je matematički model valjan samo ako zadovoljavajuće predviđa pojave koje su od interesa. To je misao vodilja pri odabiru matematičkog modela. Od matematičkog modela očekuje se da u zadanom području vrijednosti ulaznog napona pretvarača:

- predviđa prelazak pretvarača iz ustaljenog stanja osnovne periode u kvaziperiodično ustaljeno stanje,
- predviđa kvaziperiodično ustaljeno stanje dvaju različitih skupova vrijednosti amplituda, što znači dviju različitih bifurkacija,
- u području pojave kvaziperiodičnog ustaljenog stanja predviđa multistabilnost i pojavu histereze ustaljenih stanja.

Postupak matematičkog modeliranja pretvarača i izbor parametara pretvarača zasebna su cjelina unutar istraživanja provedenih tijekom izrade disertacije i dani su u Prilogu 2. Parametri odabranog matematičkog modela pretvarača su:  $L = 3,6 \text{ mH}$ ,  $R_L = 1,0 \text{ } \Omega$ ,  $R_d = 81 \text{ } \Omega$ ,  $C_d = 255 \text{ } \mu\text{F}$ ,  $k = 0,235$ ,  $U_{V1} = 0,7 \text{ V}$ ,  $U_{V2} = 0,8 \text{ V}$ ,  $U_D = 0,3 \text{ V}$ ,  $u_{\text{ramp},m} = 0,7 \text{ V}$ ,  $u_{\text{ramp},M} = 3,7 \text{ V}$ . Rezultati simulacija tog modela dalje će se uspoređivati s rezultatima mjerenja i iz rezultata tih simulacija obavljat će se identifikacija i predviđanja pojava u pretvaraču. Svi parametri simulacije pri simulaciji bifurkacijskih dijagrama navedeni su Tablici 5.1.

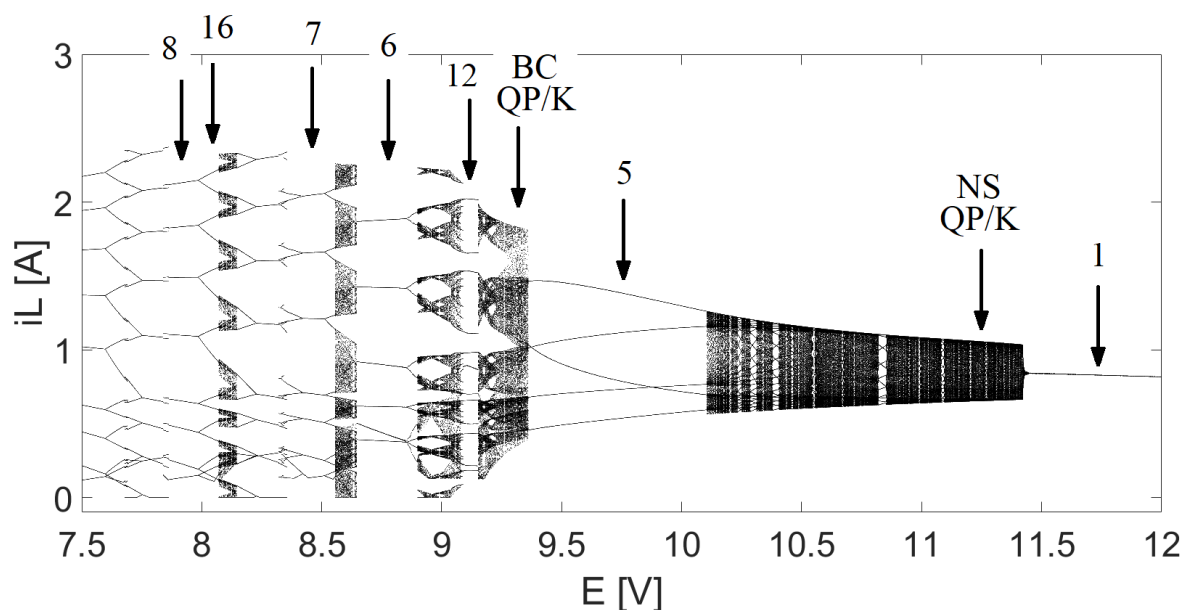
Tablica 5.1 Parametri simulacije odabranog matematičkog modela naponski upravljalog uzlaznog pretvarača

| POCETNI UVJETI, PARAMETRI PRETVARACA I PARAMETRI SIMULACIJE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Induktivitet prigusnice $L = 0.003600 \text{ H}$<br>Otpor prigusnice $R_L = 1.000 \text{ ohm}$<br>Otpor trosila $R_d = 81.000 \text{ ohm}$<br>Kapacitet trosila $C_d = 0.000255 \text{ F}$<br>Otpor kondenzatora $R_c = 0.000 \text{ ohm}$<br>Pocetni napon $U_{c0} = 0.0000 \text{ V}$<br>Pocetna struja $I_{l0} = 0.0000 \text{ A}$<br>Koeficijent $K = 0.2350$<br>Pilasti napon:<br>$U_{rm} = 0.700 \text{ V}$<br>$U_{rM} = 3.700 \text{ V}$<br>Napon mrtvog vremena $U_{dt} = 0.5050 \text{ V}$<br>Otpor $R_{l0} = 33000.000 \text{ ohm}$<br>Otpor $R_2 = 3900.000 \text{ ohm}$<br>Napon ventila $U_{v1} = 0.700 \text{ V}$<br>Napon ventila $U_{v2} = 0.800 \text{ V}$<br>Napon diode pojačala greske $U_D = 0.300 \text{ V}$<br>Perioda $T = 0.000500 \text{ s}$<br>Broj koraka po periodi: 10000<br>Korak integracije $h = 0.000 \text{ } 000 \text{ } 050 \text{ s}$<br>Perioda za proračun (bez ispisa, ispis): 500 200<br>Granice bifurkacijskog parametra:<br>Povećavanje ulaznog napona $E_{poc} = 7.000 \text{ V}$ , $E_{kraj} = 18.000 \text{ V}$ , $dE = 0.010 \text{ V}$<br>Smanjivanje ulaznog napona $E_{poc} = 18.000 \text{ V}$ , $E_{kraj} = 7.000 \text{ V}$ , $dE = 0.010 \text{ V}$<br>Tocka uzorkovanja: 1<br>Tocka za uzimanje rezultata: 1 |

Usporedba rezultata simulacije s rezultatima mjerenja dana je na kraju odsječka s rezultatima mjerenja u 5.2.4.

### 5.1.1 Ustaljena stanja i sljedovi ustaljenih stanja

Simulacijom dobiven bifurkacijski dijagram struje induktiviteta po ulaznom naponu pri smanjivanju ulaznog napona i označena karakteristična ustaljena stanja prikazuje Slika 5.1.



Slika 5.1 Prikaz ustaljenih stanja na bifurkacijskom dijagramu  $i_L = f(E)$  uz smanjivanje ulaznog napona.

Na dijagramu se mogu uočiti tri karakteristična područja. To su područje ustaljenog stanja osnovne periode označeno oznakom 1, područje kvaziperiodičnosti nastalo Neimark-Sackerovim bifurkacijama označeno oznakama NSQP/K i 5 i područje kvaziperiodičnosti u kojem dominiraju bifurkacije srazom granica označeno oznakom BCQP/K i svim oznakama lijevo. Ta tri područja prikazuje Tablica 2. Identifikacija bifurkacija opisana je u odsječku 5.1.2, a ovdje se obrađuju ustaljena stanja i slijedovi ustaljenih stanja.

Tablica 5.2 Karakteristična područja ustaljenih stanja i pripadnih bifurkacija pri smanjivanju ulaznog napona.

| Ulazni napon<br>7,5 V – 9,3 V                                       | Ulazni napon<br>9,4 V – 11,4 V                                      | Ulazni napon<br>11,5 V – 12,0 V     |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Bifurkacije srazom granica<br>Bifurkacije udvostručenja periode     | Neimark-Sackerove bifurkacije                                       | Ustaljeno stanje<br>osnovne periode |
| Ustaljena stanja<br>- Periodično<br>- Kvaziperiodično<br>- Kaotično | Ustaljena stanja<br>- Periodično<br>- Kvaziperiodično<br>- Kaotično |                                     |

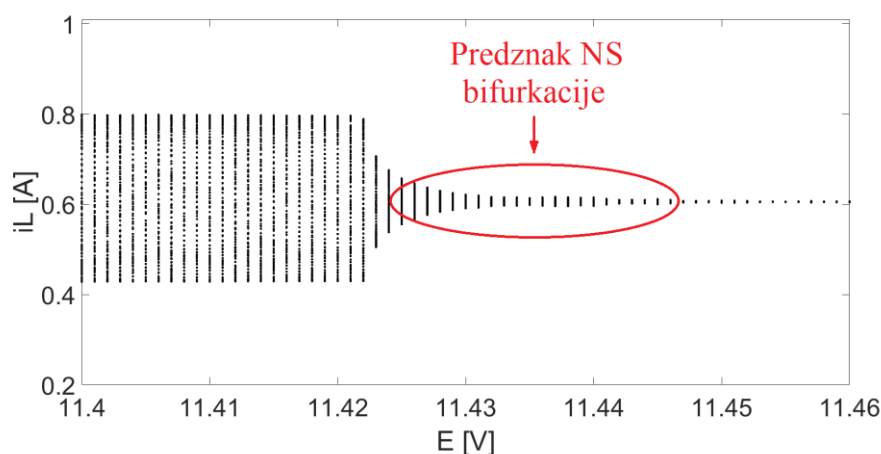
Gledajući bifurkacijski dijagram zdesna na lijevo može se uočiti slijed promjena ustaljenih stanja tako da se rotacijski broj povećava za jedan. Ta se pojava naziva približavanje perioda i

karakteristična je za razne slijedove promjena ustaljenih stanja. Ti su slijedovi pokazani u [13] i [22]. Opisat će se ustaljena stanja koja prikazuje Slika 5.1.

### Ustaljeno stanje osnovne periode i predznak prve Neimark-Sackerove bifurkacije

Oznakom 1 označeno je ustaljeno stanje osnovne periode. To je jedino željeno (regularno) ustaljeno stanje pretvarača. Sva su ostala ustaljena stanja neregularna i neželjena.

Smanjivanjem ulaznog napona i dovoljnim približenjem kvaziperiodičnom ustaljenom stanju počinje se primjećivati modulacija amplitude struje induktiviteta. U tablici 5.2 ta su ustaljena stanja pridružena intervalu ustaljenih stanja osnovne periode. Ta se ustaljena stanja mogu prepoznati u uvećanom bifurkacijskom dijagramu oko bifurkacijske točke prve Neimark-Sackerove (NS) bifurkacije, Slika 5.2. Primjećuje se razmazivanje točaka koja označavaju ustaljeno stanje osnovne periode. Što je ulazni napon niži, to je promjena (modulacija) vršne vrijednosti struje veća, a ostaje tipično unutar  $\pm 5\%$  od vršne vrijednosti. Ova je modulacija amplitude predznak prve Neimark-Sackerove bifurkacije.

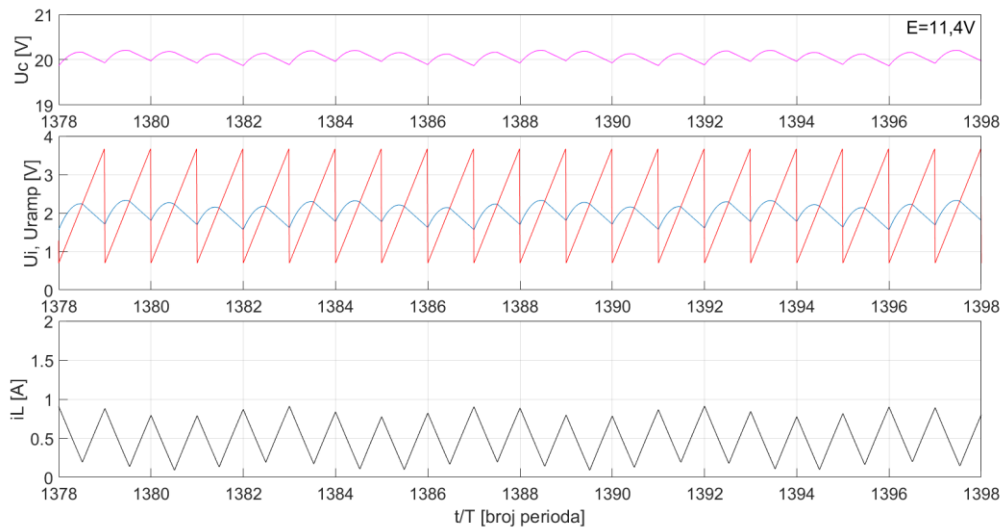


Slika 5.2 Uvećan prikaz bifurkacijskog dijagrama oko bifurkacijske točke prve Neimark-Sackerove (NS) bifurkacije; Korak promjene ulaznog napona je  $\Delta E = 1 \text{ mV}$  uz 200 perioda uzorkovanja po ustaljenom stanju.

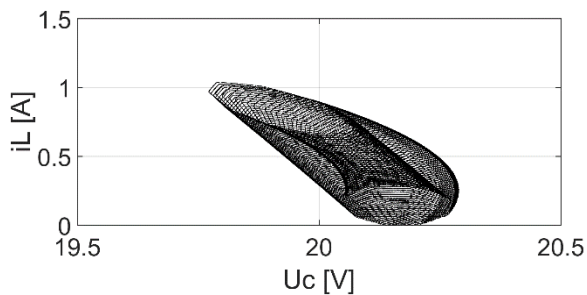
### Kvaziperiodična i kaotična ustaljena stanja u području Neimark-Sackerove bifurkacije

Oznakom NSQP/K označena su kvaziperiodična i kaotična ustaljena stanja nastala slijedom Neimark-Sackerovih bifurkacija započevši iz ustaljenog stanja osnovne periode. Jedno tipično ustaljeno stanje u tom području prikazuje Slika 5.3. Trajektorija ispunjava plohu što znači da je ustaljeno stanje neperiodično. Može biti kvaziperiodično ili kaotično. Poincaréova slika čini krivulju, što znači da je to kvaziperiodično ustaljeno stanje. U prikazu valnih oblika na apscisama

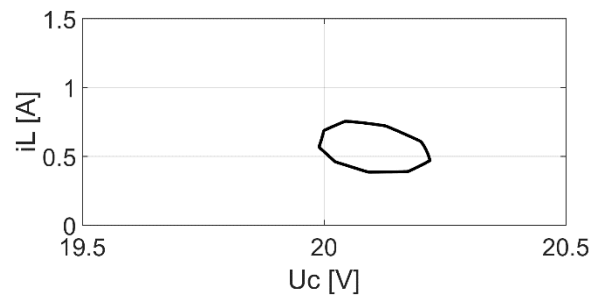
je označeno  $t/T = 1378$  do 1398 perioda. To znači da su prikazani valni oblici nakon što je proteklo 1378. do 1398. perioda pilastog napona počevši od priključenja pretvarača na zadani ulazni napon.



a)



b)



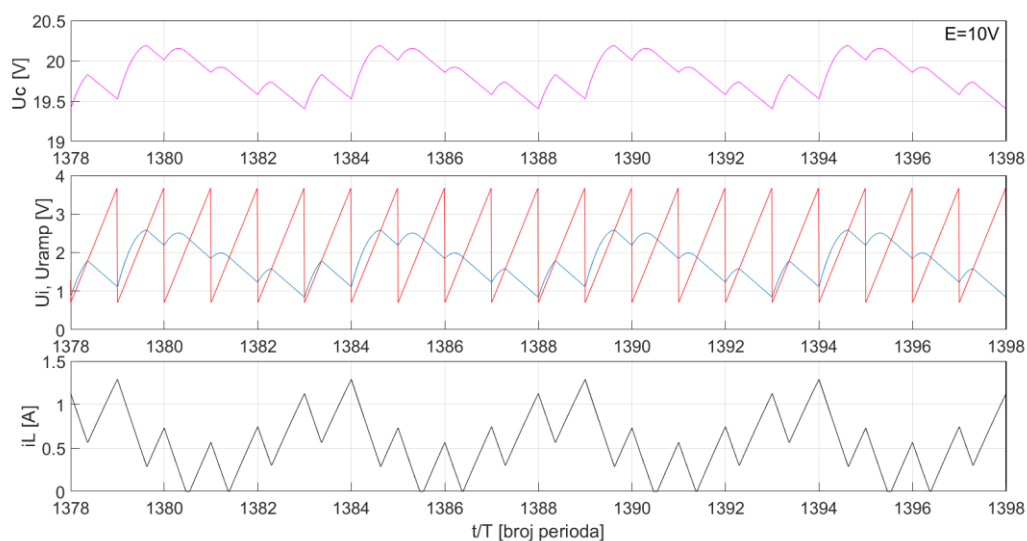
c)

Slika 5.3 Kvaziperiodično ustaljeno stanje za  $E = 11,4$  V: a) Valni oblici, b) Trajektorija  $i_L - u_C$  prikazana s 1000 perioda  $T_{\text{ramp}}$ , c) Poincaréova slika za trenutak uzorkovanja  $0,2T_{\text{ramp}}$  prikazana s 1000 točaka.

### Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 5:1

Oznakom 5 označeno je ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 5:1, Slika 5.4. Perioda struje induktiviteta pet je puta veća od periode pilastog napona. To se vidi i iz valnih oblika i iz bifurkacijskog dijagrama koji u tom području čine pet linija. Prema radu [13] faznu zaključanost čine dvije frekvencije. Jedna je frekvencija određena frekvencijom pilastog napona  $f_{\text{ramp}} = 1/T_{\text{ramp}}$ , a druga je frekvencija vezana uz vlastitu frekvenciju titrajnog kruga uzlaznog pretvarača. No, taj titrajni krug je u matematičkom modelu krug linearan po odsječcima, a veza između vlastite frekvencije titrajnog kruga kad je ventil V1 trajno isklopljen, a ventil V2 trajno

uklopljen i vlastite frekvencije titrajnog kruga kada se sklapanje ventila V1 i V2 izmjenjuje ne navodi se u literaturi.



Slika 5.4 Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 5:1, za  $E = 10,0$  V

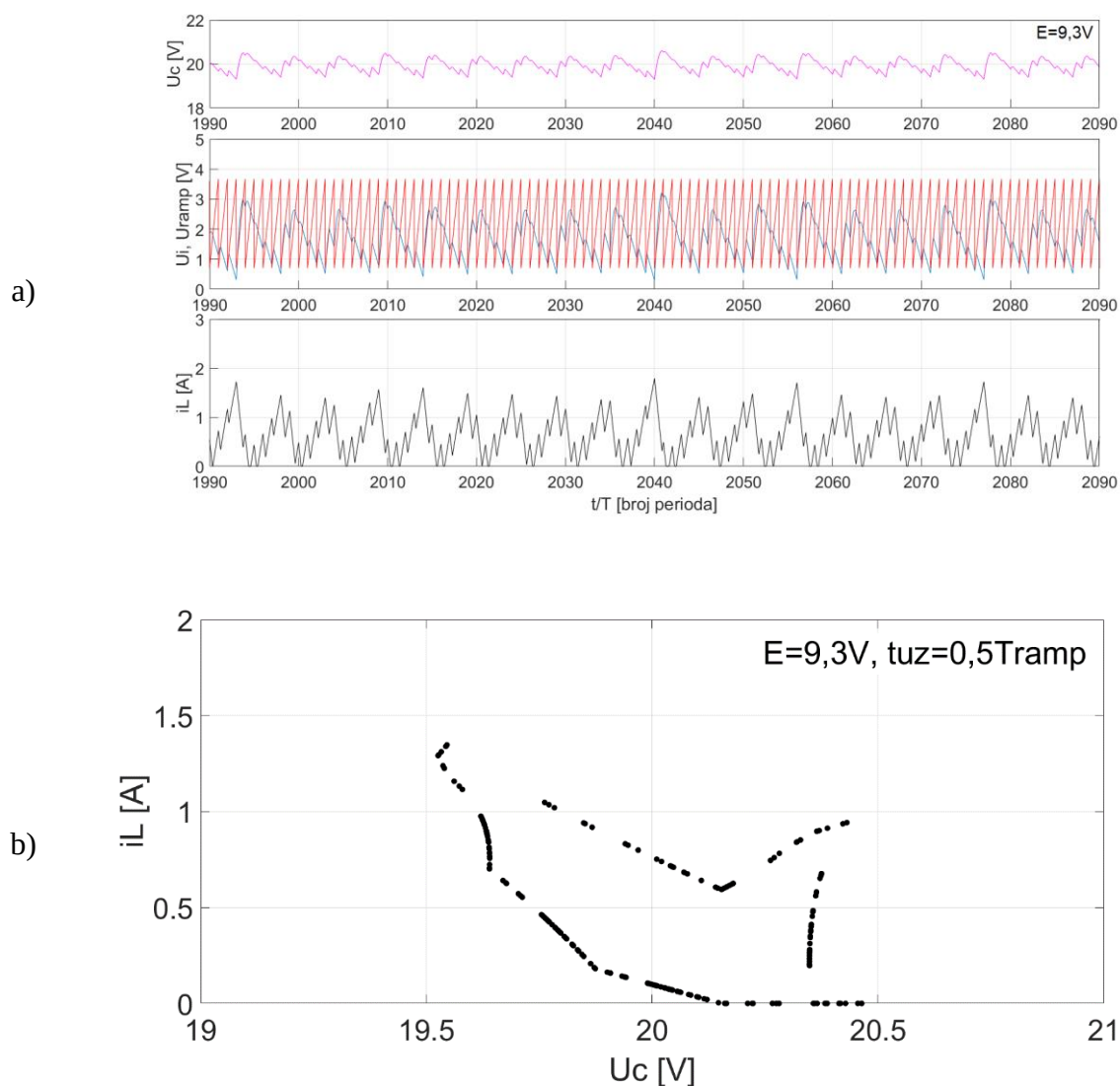
### Kvaziperiodična i kaotična ustaljena stanja u području bifurkacije srazom granica

Oznakom BCQP/K označena su kvaziperiodična i kaotična ustaljena stanja nastala bifurkacijama srazom granica počevši iz ustaljenog stanja fazne zaključanosti 5:1. Valne oblike i Poincaréovu sliku prikazuje Slika 5.5. Promatrajući valne oblike u 100 perioda pilastog napona ne može se uočiti periodičnost. Iz Poincaréove slike prikazane s 10000 točaka dobiveno je toliko točaka da ih se bez posebnog uvećavanja slike ne može prebrojati. Te točke ne čine plohu pa se kaotično ustaljeno stanje može isključiti. Pregledom datoteke rezultata simulacije utvrđeno je da je ustaljeno stanje periodično s periodom  $1044T_{\text{ramp}}$ . Do takvog se zaključka ne može doći mjerenjem zbog ograničenja mjerene opreme.

U rezultatima mjerenja i simulacija u odsječku 5.2.3 pokazano je da nema značajnih razlika u amplitudama u ustaljenim stanjima fazne zaključanosti i kvaziperiodičnim i kaotičnim ustaljenim stanjima kada su ta stanja nastala istom vrstom bifurkacije. Tada razlikovati te tri vrste ustaljenih stanja nije nužno, jer područje vrijednosti amplituda ne ovisi o ustaljenom stanju, nego o vrsti bifurkacije.

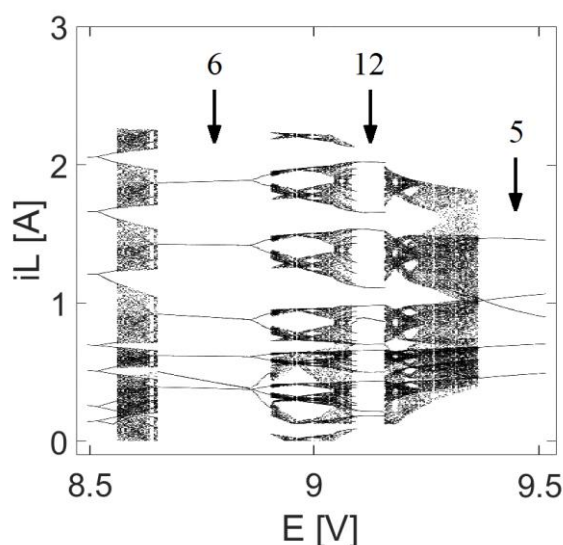
## Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 12:1

Oznakom 12 označeno je ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 12:1. Prema Fareyovom načelu zbrajanja rotacija ustaljenog stanja fazne zaključanosti opisanom u odsječku 4.4.3 između ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotacijskih brojeva  $m:1$  i  $n:1$  nalazi se ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja  $(m + n):1$ . Tako se između ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotacijskih brojeva 5:1 i 6:1 treba nalaziti ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 11:1. Uvećanim prikazom bifurkacijskog dijagrama u području interferencije ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotacijskih brojeva 5:1 i 6:1, umjesto 11 linija vidi se 12 linija pa je to ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 12:1, Slika 5.6. Odstupanje od Fareyevog načela za jedan uočljivo je i za druga ustaljena stanja fazne zaključanosti. Primjerice,



Slika 5.5 Ustaljeno stanje za  $E = 9,3$  V; a) Valni oblici, b) Poincaréova slika za trenutak uzorkovanja  $0,5T_{\text{ramp}}$  prikazana s 1000 točaka.

između ustaljenih stanja fazne zaključanosti 6:1 i 7:1 nije smješteno ustaljeno stanje fazne zaključanosti 13:1, nego 14:1 i između ustaljenih stanja fazne zaključanosti 7:1 i 8:1 nije smješteno ustaljeno stanje fazne zaključanosti 15:1, nego 16:1. Moguće je da su ove razlike posljedica bifurkacije udvostručenja periode ili drugih bifurkacija. Identifikacija svih ustaljenih stanja i bifurkacija u području ulaznih napona koje obuhvaća Slika 5.6 nije obavljena, jer nije bilo tehničkih razloga tomu. U cijelom području bifurkacija srazom granica amplituda i efektivna vrijednost struje prigušnice nisu se značajnije mijenjale.



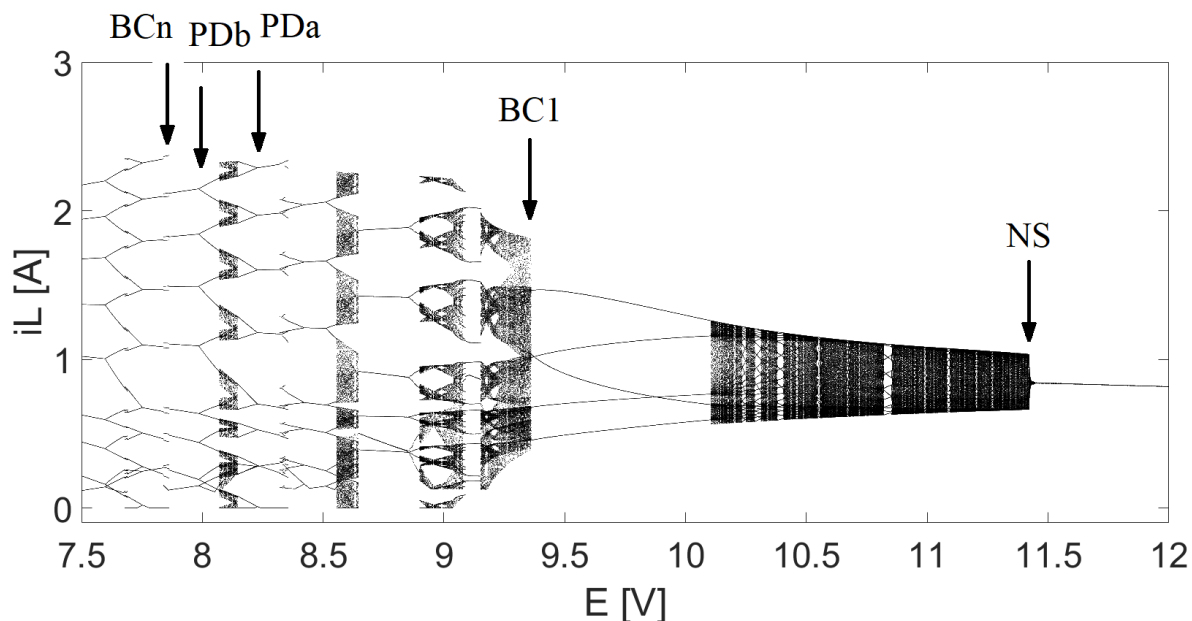
Slika 5.6 Uvećan prikaz bifurkacijskog dijagrama oko ustaljenog stanja fazne zaključanosti rotacijskog broja 12:1.

### Ostala ustaljena stanja

Oznakama 6, 7, 16 i 8 označena su ustaljena stanja fazne zaključanosti rotacijskih brojeva 6:1, 7:1, 16:1 i 8:1. Sva se ustaljena stanja mogu identificirati iz bifurkacijskog dijagrama prebrojavanjem linija u pripadnim intervalima ulaznog napona.

#### 5.1.2 Bifurkacije

Simulacijom dobiven bifurkacijski dijagram struje induktiviteta po ulaznom naponu pri smanjivanju ulaznog napona i označene karakteristične bifurkacije prikazuje Slika 5.7. Opisat će se karakteristične bifurkacije gledajući dijagram zdesna na lijevo.



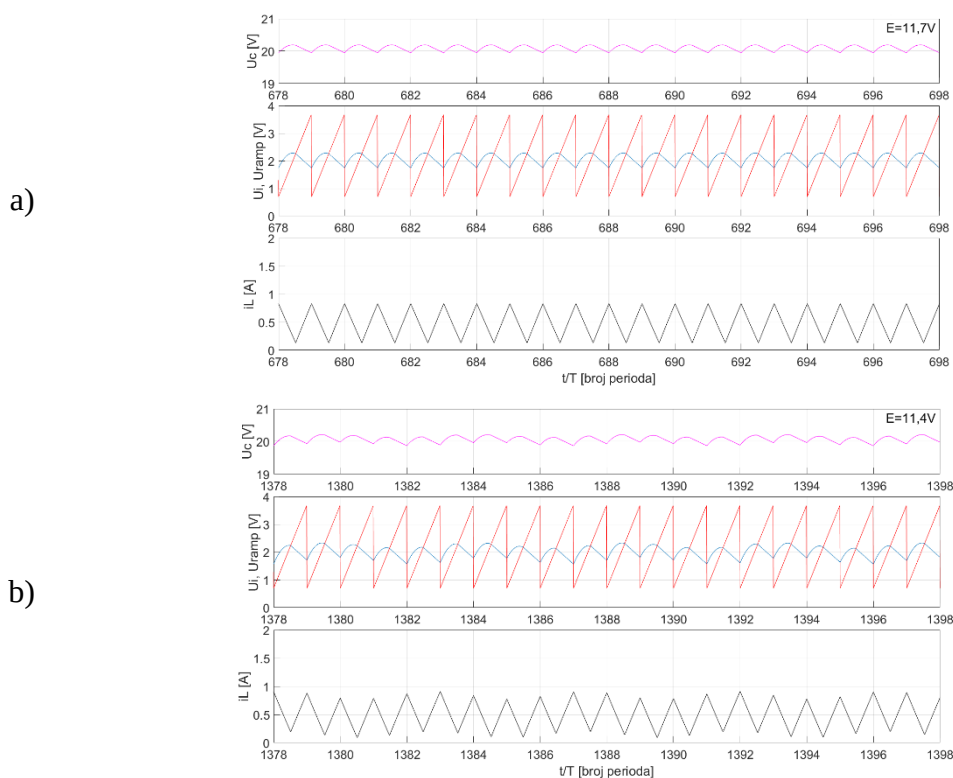
Slika 5.7 Prikaz karakterističnih bifurkacija na bifurkacijskom dijagramu  $i_L = f(E)$  uz smanjivanje ulaznog napona.

### Neimark-Sackerove bifurkacije

Oznakom NS označena je prva Neimark-Sackerova bifurkacija pri smanjivanju ulaznog napona. Bifurkacija nastupa pri ulaznom naponu  $E \approx 11,4$  V. Pojavom te bifurkacije pretvarač prestaje raditi u ustaljenom stanju osnovne periode i počinje raditi u području kvaziperiodičnosti kada se izmjenjuju ustaljena stanja fazne zaključanosti, kvaziperiodičnosti i kaotična ustaljena stanja.

Siguran način identifikacije Neimark-Sackerove bifurkacije je putem svojstvenih vrijednosti. Budući da se ta metoda u ovoj disertaciji ne upotrebljava, Neimark-Sackerova bifurkacija identificirana je principom isključenja trećeg opisanom u [21]. Zna se da je ustaljeno stanje kvaziperiodično, Slika 5.3, i zna se da nije nastupila bifurkacija srazom granica, jer u svakoj periodi pilastog napona vode oba ventila. Prema tome, jedina preostala bifurkacija je Neimark-Sackerova bifurkacija. Područje Neimark-Sackerovih bifurkacija proteže se na dijagramu sve do ulaznog napona  $E \approx 9,3$  V i bifurkacije srazom granica.

Simulacijom dobivena ustaljena stanja prije i poslije pojave prve Neimark-Sackerove bifurkacije prikazuje Slika 5.8. Kvalitativne promjene u odnosu upravljačkog napona  $u_i$  i pilastog napona  $u_{ramp}$  nema, a kvantitativne su promjene uočljive tek pažljivijim promatranjem valnih oblika.



Slika 5.8 Simulacijom dobiveni valni oblici pri nastanku prve Neimark-Sackerove bifurkacije; a) Ulazni napon  $E = 11,7 \text{ V}$  i ustaljeno stanje osnovne periode, b) Ulazni napon  $E = 11,4 \text{ V}$  i kvaziperiodično ustaljeno stanje.

## Bifurkacije srazom granica

Oznakom BC1 označena je prva bifurkacija srazom granica. Valne oblike prije i poslije prve bifurkacije srazom granica već prikazuju Slika 5.4 i Slika 5.5. Jedan način identifikacije bifurkacije srazom granica je putem svojstvenih vrijednosti. Drugi je način prepoznati da je došlo do promjene ishoda uvjeta sklapanja ventila V1 i V2 kao što je primijenjeno u ovoj disertaciji. Identifikacija bifurkacije srazom granica i način njena nastanka detaljnije su opisani u potpoglavlju 5.4. Pojavom bifurkacija srazom granica pretvarač i dalje radi u području kvaziperiodičnosti. I dalje se pojavljuju ustaljena stanja fazne zaključanosti, kvaziperiodičnosti i kaotična ustaljena stanja, ali se mijenja način njihova nastanka. Pojavom prve bifurkacije srazom granica dolazi do naglog i značajnog povećanja efektivne i vršne vrijednosti struje induktiviteta, kao i valovitosti struje induktiviteta i napona kapaciteta. Tomu je posebna pozornost posvećena u odsječku 5.1.3.

Oznakom BCn označena je bifurkacija srazom granica koja spada u vizualno drugačiju grupu bifurkacija od ostalih bifurkacija na dijagramu. Vidi se prekid između svih linija bifurkacijskog dijagrama, a to je znak bifurkacije srazom granica [19].

## **Bifurkacije udvostručenja periode**

Oznakom PDa označena je jedna od bifurkacija udvostručenja periode pri kojoj se perioda udvostručuje. Iz [18] je poznato da se bifurkacije srazom granica i bifurkacije udvostručenja periode mogu izmjenjivati. Oznakom PDb označena bifurkacija udvostručenja periode, ali ovog puta u suprotnom smjeru, što znači da se perioda prepolavlja.

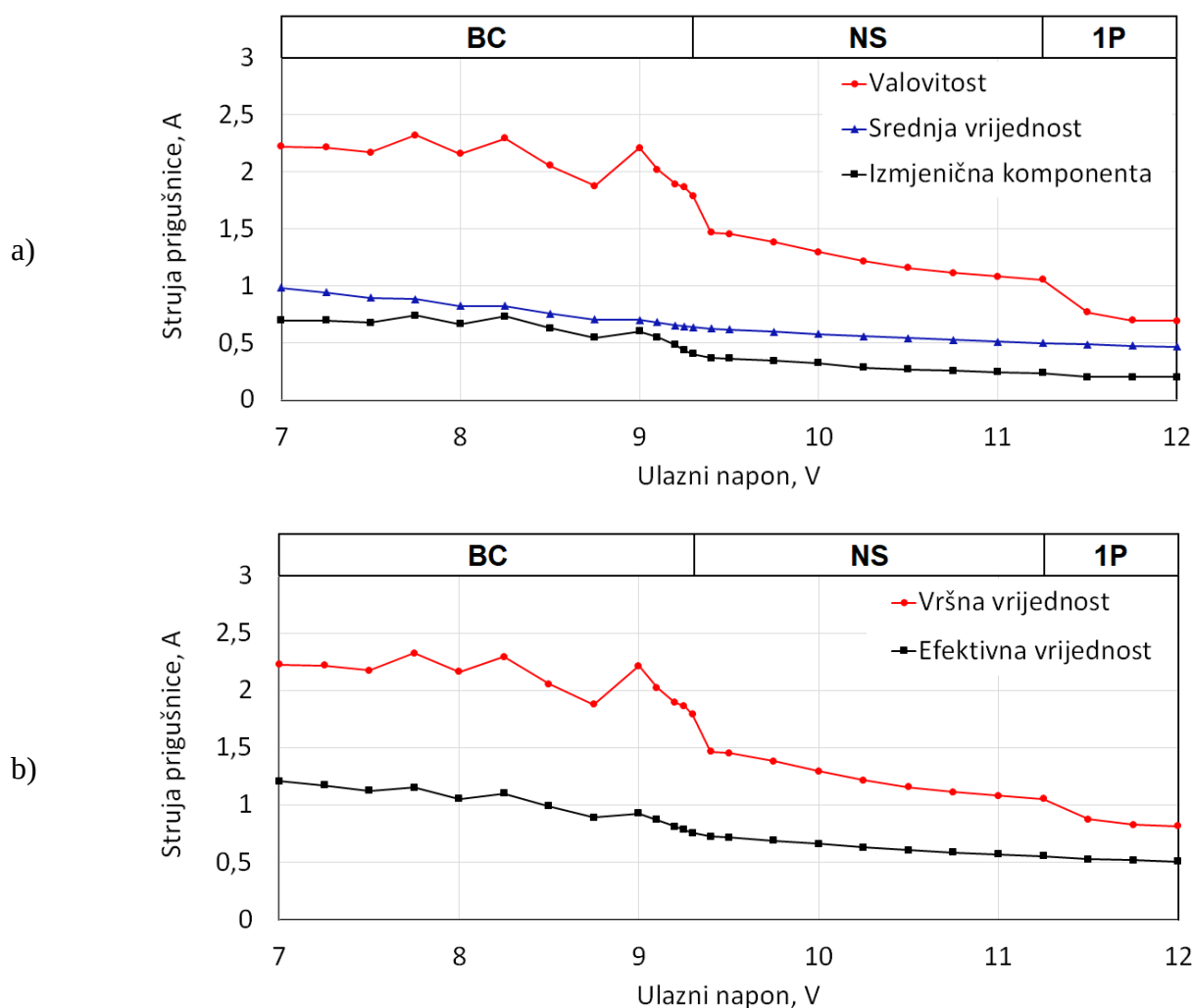
### **5.1.3 Utjecaj bifurkacija na efektivnu i vršnu vrijednost struje induktiviteta**

Smanjivanjem ulaznog napona dolazi do grananja bifurkacijskog dijagrama pa se može očekivati povećanje valovitosti struje induktiviteta. Prema načelu jednakosti snaga zna se i da se smanjivanjem ulaznog napona povećava srednja vrijednost struje induktiviteta. Promjena valovitosti i srednje vrijednosti struje induktiviteta utjecat će i na efektivnu i vršnu vrijednost struje induktiviteta, a to su važni parametri u projektiranju pretvarača. Prikazat će se ovisnost struje induktiviteta o ulaznom naponu i komentirati promjene struje koje nastaju smanjivanjem ulaznog napona i ulaskom pretvarača u različita područja bifurkacija. Simulacija je obavljena za raspon ulaznog napona od 7,0 V do 12,0 V s korakom napona od 0,25 V ili manjim uz ostale parametre simulacije prema tablici 5.1. Rezultate simulacije struje induktiviteta prikazuje Slika 5.9. Označena su područja bifurkacije srazom granica (BC), Neimark-Sackerove bifurkacije (NS) i ustaljenog stanja osnovne periode (1P).

Može se uočiti da je s povećanjem valovitosti (vrijednosti od vrha do vrha) ujedno povećana i izmjenična komponenta struje induktiviteta. Oba su povećanja struje i relativno i apsolutno veća pri pojavi prve bifurkacije srazom granica nego pri pojavi prve Neimark-Sackerove bifurkacije.

Struju induktiviteta karakterizira značajno povećanje nastalo bifurkacijom srazom granica na ulazom naponu  $E = 9,3$  V. Povećanje efektivne vrijednosti utječe na gubitke pretvarača, posebice na gubitke prigušnice, što može uzrokovati prekomjerno zagrijavanje prigušnice i smanjuje stupanj djelovanja pretvarača. Također, povećana je i vršna vrijednost struje pa ventili pretvarača imaju veće strujno opterećenje, što im skraćuje vijek trajanja.

Povećanje izmjenične komponente i efektivne vrijednosti struje induktiviteta na ulaznom naponu  $E = 11,1$  V uslijed Neimark-Sackerove bifurkacije jedva je zamjetno u odnosu na povećanje na ulaznom naponu  $E = 9,3$  V uslijed bifurkacije srazom granica.



Slika 5.9 Ovisnost struje prigušnice o ulaznom naponu; a) Valovitost, srednja vrijednost i izmjenična komponenta, b) Vršna vrijednost i efektivna vrijednost

## 5.2 Rezultati mjerenja

Obavljena su mjerenja na fizički izvedenom istosmjernom uzlaznom pretvaraču opisanom u potpoglavlju 3.1. Mjerenja su obavljena pri povećavanju i smanjivanju ulaznog napona. Kvantitativni rezultati mjerenja dani su u Prilogu 3. Kao referentni smjer promjene napona odabran je slijed smanjivanja ulaznog napona. Tada pretvarač prelazi iz željenog načina rada, a to je ustaljeno stanje osnovne periode u neko od neregularnih ustaljenih stanja, a to su sve neželjeni načini rada. Smanjenje ulaznog napona tipično je i za kvarna stanja izvora pa je to dodatni razlog za odabir smanjivanja ulaznog napona kao referentni smjer promjene napona. U mjerenjima se promatralo:

- Ustaljena stanja i slijedove ustaljenih stanja.
- Bifurkacije.

- Karakteristične napone i struje, a ponajviše značajno povećanje struje prigušnice pri pojavi bifurkacije srazom granica.
- Multistabilnost i histerezu u slijedovima ustaljenih stanja. To se posebno razmatra u potpoglavlju 5.3.

### Parametri pretvarača

Nazivni parametri pretvarača u mjerenjima navedeni su u potpoglavljima 3.1 i 3.5. Radi lakšeg praćenja ovdje se ponovno navode nazivni napon trošila  $U_d(0) = 20,0 \text{ V}$  dobiven pri ulaznom naponu  $E = 12,00 \text{ V}$ , perioda pilastog napona  $T_{\text{ramp}} = 500 \mu\text{s}$ , zračna prigušnica  $L = 3,60 \text{ mH}/0,81 \Omega$ , kapacitivnost trošila  $C_d = 255 \mu\text{F}$  i otpornost trošila  $R_d = 81 \Omega$ . Ako su u nekim mjerenjima parametri pretvarača drugačiji od nazivnih, onda se navode posebno pored rezultata mjerenja. Ulazni se napon kreće u rasponu  $7 \text{ V} \leq E \leq 13 \text{ V}$ . U rasponu  $13 \text{ V} \leq E \leq 18 \text{ V}$  pojavljuje se samo ustaljeno stanje osnovne periode i nema bifurkacija pa taj interval nije od interesa. Povećavanje i smanjivanje ulaznog napona vrši se u koracima po  $100 \text{ mV}$ . To se pokazalo u većini slučajeva dovoljnim s obzirom na osjetljivost pretvarača na promjene parametara koji nisu poznati ili nisu pod kontrolom. U te parametre spada i temperatura pretvarača. Ona ovisi o trajanju rada pretvarača, ustaljenom stanju pretvarača i temperaturi okoline. Na početku svih mjerenja pretvarač je bio zagrijan najmanje jedan sat, a za neka mjerenja i više od deset sati. To je važno naglasiti, jer se rezultati mjerenja mijenjaju i ovise o temperaturi pretvarača. Tako se bifurkacijske točke tijekom desetak sati mogu pomaknuti za red veličine stotina milivolti.

U nekim je mjerenjima upotrijebljen pretvarač iste načelne sheme spoja kao i opisani pretvarač, ali s nelinearnom prigušnicom i sljedećih parametara pretvarača  $U_d(0) = 26,8 \text{ V} - 27,5 \text{ V}$ ,  $T_{\text{ramp}} = 200 \mu\text{s}$ ,  $L = 1,08 \text{ mH}/0,7 \Omega$ ,  $C_d = 100 \mu\text{F}$ ,  $R_d = 39,4 \Omega$  ili  $89,2 \Omega$ . U tim su slučajevima parametri pretvarača posebno navedeni uz rezultate mjerenja.

### Mjerna oprema

Mjerenja su obavljena mjernom opremom:

- Napajanje BK PRECISION 9201,  $60 \text{ V}/10 \text{ A}/200 \text{ W}$ .
- Osciloskopi Keysight DSOX2004A i EDUX1002A sa sondama Keysight N2862B i Keysight N2783B za:
  - snimanje valnih oblika izmjeničnih komponenata napona kondenzatora  $\tilde{u}_C$  (odnosno napona trošila  $\tilde{u}_d$ ), struje prigušnice  $i_L$  (izvora), pilastog napona  $u_{\text{ramp}}$  i kontrolnog napona  $u_i$ ,
  - snimanje trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ ,
  - snimanje harmonijskog sastava struje prigušnice  $i_L$  (prozor Flat top),

- mjerenje valovitosti (vrijednost od vrha do vrha) napona trošila  $\Delta u_d$  i valovitosti (vrijednost od vrha do vrha) struje prigušnice  $\Delta i_L$ .

U prikazima valnih oblika i trajektorija za napon kondenzatora prikazana je izmjenična komponenta, a za ostale veličine prikazana je totalna vrijednost to jest zbroj istosmjerne i izmjenične komponente.

- *True-RMS* voltmetar Voltcraft MXD-4660A za:

- mjerenje srednje vrijednosti ulaznog napona  $E$ , srednje vrijednosti napona trošila  $U_d(0)$  i srednje vrijednosti struje prigušnice  $I_L(0)$ ,
- mjerenje izmjenične komponente struje prigušnice  $\tilde{I}_L$ ,
- mjerenje frekvencije struje prigušnice  $f = 1/T$ .

### 5.2.1 Ustaljena stanja i slijedovi ustaljenih stanja

Snimljena su ustaljena stanja uzlaznog pretvarača. Pri snimanju uvijek vrijedi isti slijed pojava *Ustaljeno stanje*  $\rightarrow$  *Promjena ulaznog napona*  $\rightarrow$  *Prijelazno stanje*  $\rightarrow$  *Novo ustaljeno stanje*. Ako se novo ustaljeno stanje i prethodno ustaljeno stanje kvalitativno razlikuju, onda je nastupila bifurkacija. U protivnom, bifurkacija nije nastupila. Sve su identifikacije ustaljenih stanja obavljene putem valnih oblika, trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$  i harmonijskog sastava struje prigušnice.

Unatoč otežanoj identifikaciji nekih ustaljenih stanja kvalitativne promjene su u skladu s očekivanjima i dosad poznatim ustaljenim stanjima, slijedovima ustaljenih stanja, bifurkacijama i tendencijama promjene izmjerenih struja, napona i njihova harmonijskog sastava.

Uopćavanjem kvantitativnih rezultata mjerenja iz Priloga 3 dobivena je tablica 5.3. U tablici 5.3a prikazana su područja ulaznog napona grupirana po vrsti bifurkacija. To su područje bifurkacija srazom granica, područje Hopfovih bifurkacija i područje bez bifurkacija, odnosno područje ustaljenog stanja osnovne periode. Prikazi se odnose i na povećavanje ulaznog napona i na smanjivanje ulaznog napona. U tablici 5.3b ponovljena su mjerenja iz tablice 5.3a. Mogu se uočiti razlike u granicama pojedinih područja i u vrstama bifurkacija. Tako se u tablici 5.3a pri povećavanju ulaznog napona ne pojavljuju Hopfove bifurkacije za razliku od povećavanja ulaznog napona u tablici 5.3b. Vidi se da je pretvarač multistabilan i da se pri promjeni ustaljenih stanja pojavljuje i histereza ustaljenih stanja.

Bit će prikazani karakteristični valni oblici pretvarača, trajektorije i harmonijski sastav struje prigušnice za nekoliko različitih ustaljenih stanja i ujedno komentirana ustaljena stanja, slijedovi ustaljenih stanja, te ovisnost promatranih struja, i napona o ulaznom naponu. Sva su ustaljena stanja snimljena pri smanjivanju ulaznog napona.

Tablica 5.3 Ustaljena stanja i bifurkacije promatranog istosmjernog uzlaznog pretvarača dobivene povećavanjem i smanjivanjem ulaznog napona: a) Prvo mjerenje, s povećavanjem ulaznog napona bez pojave Hopfove bifurkacije, b) Drugo mjerenje, s povećavanjem ulaznog napona i pojavom Hopfove bifurkacije.

**a) Prvo mjerenje**

|                            |                                |                                  |
|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Povećavanje ulaznog napona | Ulazni napon<br>7,0 V – 11,2 V | Ulazni napon<br>11,3 V – 18,0 V  |
|                            | Bifurkacije srazom granica     | Ustaljeno stanje osnovne periode |

|                               |                                 |                                  |                            |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Bifurkacije srazom granica    | Hopfove bifurkacije             | Ustaljeno stanje osnovne periode | Smanjivanje ulaznog napona |
| Ulazni napon<br>7,0 V – 9,9 V | Ulazni napon<br>10,0 V – 11,1 V | Ulazni napon<br>11,2 V – 18,0 V  |                            |

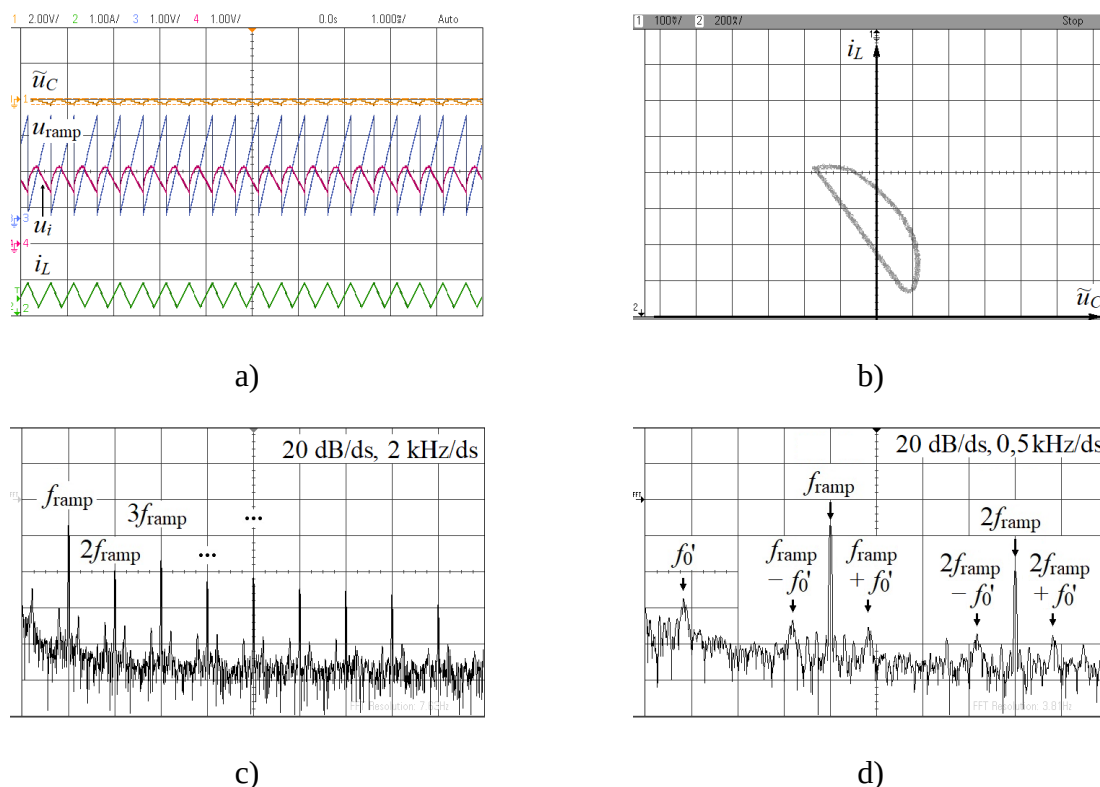
**b) Drugo mjerenje**

|                            |                                |                                 |                                  |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Povećavanje ulaznog napona | Ulazni napon<br>7,0 V – 10,7 V | Ulazni napon<br>10,8 V – 11,0 V | Ulazni napon<br>11,1 V – 18,0 V  |
|                            | Bifurkacije srazom granica     | Hopfove bifurkacije             | Ustaljeno stanje osnovne periode |

|                               |                                |                                  |                            |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Bifurkacije srazom granica    | Hopfove bifurkacije            | Ustaljeno stanje osnovne periode | Smanjivanje ulaznog napona |
| Ulazni napon<br>7,0 V – 9,6 V | Ulazni napon<br>9,7 V – 11,0 V | Ulazni napon<br>11,1 V – 18,0 V  |                            |

## Ustaljeno stanje osnovne periode

Pretvarač započinje svoj rad u ustaljenom stanju osnovne periode, Slika 5.10.



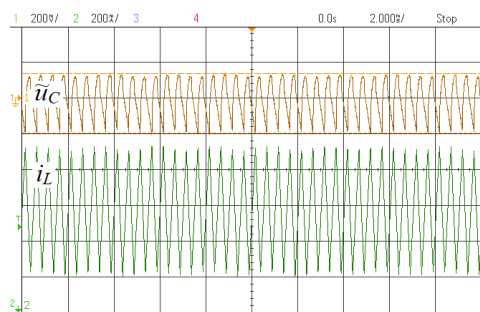
Slika 5.10 Ustaljeno stanje osnovne periode za  $E = 11,0$  V; a) Valni oblici, b) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ , c) Harmonijski sastav struje prigušnice, d) Bočne komponente oko višekratnika osnovnog harmonika  $f_{ramp}$ .

U harmonijskom sastavu struje prigušnice ističu se članovi koji su višekratnici frekvencije pilastog napona  $f_{ramp} = 2$  kHz. Tako se osim iz periode pilastog napona  $T_{ramp} = 500 \mu s$  ustaljeno stanje osnovne periode može identificirati i iz harmonijskog sastava.

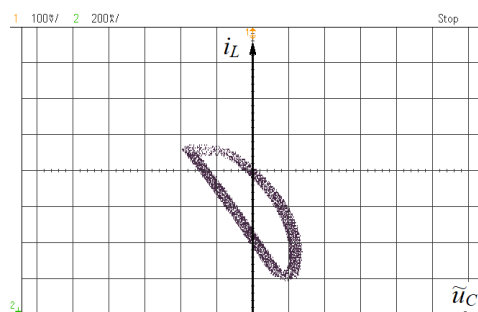
Pored višekratnika osnovnog harmonika od 2 kHz naziru se bočne komponente tih višekratnika, Slika 5.10 c i d. One su razmaknute od višekratnika od 2 kHz za  $f_0' \approx 400$  Hz i uzrokovane su vlastitom frekvencijom titrajnog kruga pretvarača  $f_0'$ . Daljim smanjivanjem ulaznog napona pokazat će se da je za zadane parametre pretvarača harmonijska komponenta  $f_0'$  predznak Hopfove bifurkacije.

## Predznak prve Hopfove bifurkacije

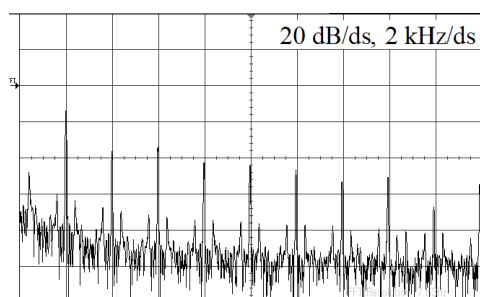
Smanjivanjem ulaznog napona i dovoljnim približenjem kvaziperiodičnom ustaljenom stanju počinje se primjećivati modulacija amplitude struje prigušnice, Slika 5.11.



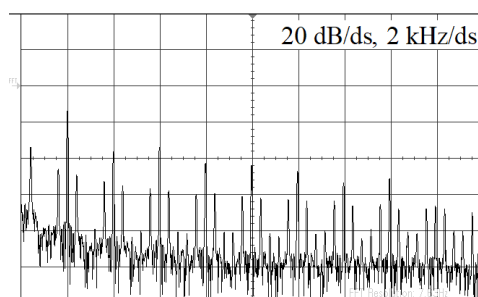
a)



b)



c)



d)

Slika 5.11 Ustaljeno stanje osnovne periode s predznakom kvaziperiodičnosti za  $E = 10,9$  V; a) Valni oblici, b) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ , c) Harmonijski sastav struje prigušnice kad modulacija nije istaknuta i d) kad je modulacija istaknuta.

U odnosu na ustaljeno stanje osnovne periode trajektorija je „podebljana“. Također, bočne su komponente uzrokovane vlastitom frekvencijom titrajnog kruga pretvarača  $f_0'$  smještene oko harmonijskih članova  $n \times 2$  kHz puno izraženije nego u ustaljenom stanju osnovne periode. Amplituda struje prigušnice i napona kondenzatora stalno su se mijenjali bez uočene pravilnosti. Harmonijski sastav struje prigušnice kad je modulacija amplitude bila približno najmanja i najveća prikazuje Slika 5.11 c i d. Promjene su posljedice izraženije osjetljivosti sustava na smetnje nego u ustaljenom stanju osnovne periode. S obzirom na to da je cijelo vrijeme bila prepoznatljiva struktura valnih oblika, trajektorija i harmonijskog sastava ustaljenog stanja osnovne periode ustaljeno je stanje identificirano kao ustaljeno stanje osnovne periode, a u tablici P3.1a označeno je s 1P + QP. Pri tom je dubina modulacije amplitude promatranih valnih oblika promjenljiva, a promjena amplitude struje tipično je manja od  $\pm 5\%$ . Ova promjenljiva modulacija predznak je prve Hopfove bifurkacije.

## Slijed ustaljenih stanja u području Hopfovih bifurkacija

Daljim smanjivanjem ulaznog napona dolazi do naglog povećanja modulacije amplitude prigušnice, a time i efektivne vrijednosti struje prigušnice. Nastupila je bifurkacija. U odsječku 5.2.2 ta je bifurkacija identificirana kao Hopfova bifurkacija. U pretvaraču je identificirano kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5. Nastavljanjem smanjivanja ulaznog napona identificirano je ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML 5:1, a zatim i kvaziperiodično ustaljeno stanje QP5/6. Slijed ustaljenih stanja  $QP4/5 \rightarrow ML\ 5:1 \rightarrow QP5/6$  u skladu je s pravilom pribrajanja perioda prilikom uzastopnih bifurkacija istog tipa [14]. Da su se daljim smanjivanjem ulaznog napona mogle nastaviti Hopfove bifurkacije nastupilo bi ustaljeno stanje ML 6:1. Ustaljeno stanje ML 6:1 nije nastupilo, zato što se prije toga dogodila drugačija vrsta bifurkacije koja je poremetila postojeći slijed ustaljenih stanja. U odsječku 5.2.2 ta je bifurkacija identificirana kao bifurkacija srazom granica. U području Hopfovih bifurkacija nisu identificirana kaotična ustaljena stanja, a u području bifurkacija srazom granica jesu. Zbog nepouzdanosti identifikacije ustaljenih stanja nema dovoljno podataka da bi se tvrdilo da u području Hopfovih bifurkacija nije bilo kaotičnih ustaljenih stanja.

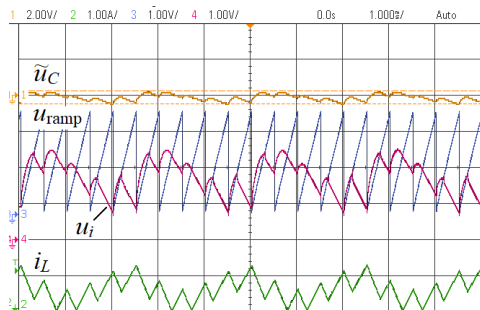
U nastavku će se prikazati kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5 i ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML 5:1 i opisati kako su ta ustaljena stanja identificirana. Radi lakšeg praćenja identifikacije ustaljenih stanja prvo je prikazano ustaljeno stanje fazne zaključanosti pa zatim kvaziperiodično ustaljeno stanje.

### Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 5:1

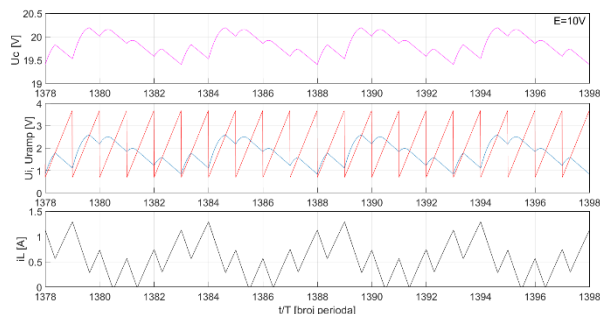
Slika 5.12 prikazuje ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 5:1 (ML 5:1). Iz slijeda ustaljenih stanja zna se da je ustaljeno stanje nastalo dinamikom na torusu. Ako je to ustaljeno stanje periodično onda to može biti samo ustaljeno stanje fazne zaključanosti. Perioda ustaljenog stanja može se odrediti već samo promatranjem valnih oblika. Za točno ovo ustaljeno stanje to je već pokazano u odsječku 4.3.1. Iz trajektorija se također može identificirati periodično ustaljeno stanje, ali ne može se odrediti perioda.

Harmonijski sastav ustaljenog stanja zaključane faze ponaša se kao harmonijski sastav amplitudno moduliranog signala  $nf_{\text{ramp}} \pm mf_0'$ . Pri tom su  $f_{\text{ramp}} = 1/T_{\text{ramp}}$  i  $f_0'$  frekvencije pilastog napona i približne vlastite frekvencije titrajnog kruga pretvarača, a  $n$  i  $m$  su cijeli brojevi. U harmonijskom sastavu vide se istaknuti harmonijski članovi. To su višekratnici osnovnog harmonika pilastog napona od 2 kHz kao i višekratnici petine frekvencije od 2 kHz, znači 400 Hz, 800 Hz, 1200 Hz, 1600 Hz itd. Višekratnici osnovnog harmonika od 2 kHz posljedica su sklapanja periodom pilastog napona  $T_{\text{ramp}} = 500\ \mu\text{s}$ , a frekvencija  $f_0' = 400\ \text{Hz}$  uzrokovana je vlastitom

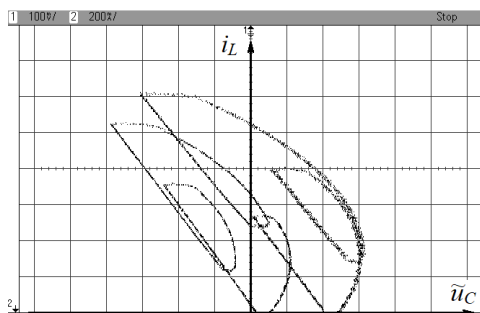
frekvencijom titrajnog kruga pretvarača. Omjer  $f_{\text{ramp}}/f_0'$  je 5:1 pa se tako može zaključiti da ustaljeno stanje fazne zaključanosti ima rotirajući broj 5:1. Simulacijom dobiveni valni oblici odgovaraju rezultatima mjerenja.



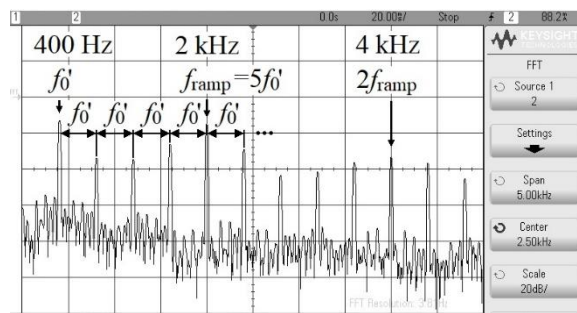
a)



b)



c)



d)

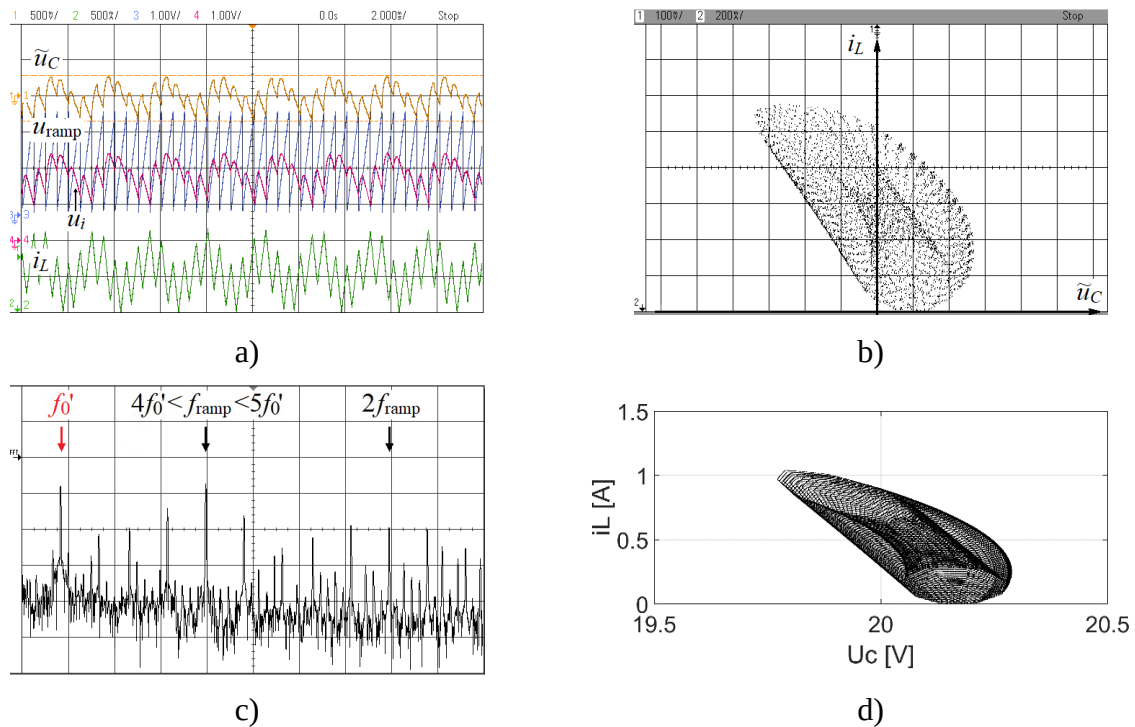
Slika 5.12 Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 5:1; a) Izmjereni valni oblici za  $E = 10,5 \text{ V}$ , b) Simulacijom dobiveni valni oblici za  $E = 10,0 \text{ V}$  c) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ , d) Harmonijski sastav struje prigušnice.

### Kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5

Slika 5.13 prikazuje kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5 koje nastupa između ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotirajućih brojeva 4:1 i 5:1. Iz valnih se oblika jedino vidi da je perioda veća od intervala prikazanog na zaslonu osciloskopa. Trajektorija obuhvaća plohu pa se može procijeniti da je ustaljeno stanje neperiodično. Ako se uspoređi izmjerena trajektorija s trajektorijom dobivenom simulacijom, Slika 5.3, vidi se sličnost pa se temeljem simulirane trajektorije može zaključiti da je ustaljeno stanje kvaziperiodično. Dakle trajektorije dobivene mjerenjem izvrstan su način za razlikovanje neperiodičnih ustaljenih stanja od periodičnih ustaljenih stanja

Identifikacija ustaljenog stanja može se obaviti i iz harmonijskog sastava. Harmonijski sastav struje prigušnice je diskretan, a to znači da ustaljeno stanje nije kaotično. Prethodno je

ustanovljeno da nije ni periodično. Preostaje jedino kvaziperiodično ustaljeno stanje. U ustaljenom stanju fazne zaključanosti 5:1 dominiraju četiri harmonijska člana u rasponu frekvencija od 0 do 2 kHz (Slika 5.12). Harmonijski članovi nastaju prema pravilu  $nf_{\text{ramp}} \pm mf_0'$  i međusobno se preklapaju, upravo zato što je ustaljeno stanje periodično odnosno omjer  $f_{\text{ramp}}/f_0'$  je cjelobrojan. Analogno tomu u ustaljenom stanju fazne zaključanosti 4:1 dominiraju tri harmonijska člana u rasponu frekvencija od 0 do 2 kHz. U kvaziperiodičnom ustaljenom stanju koje nastupa između ustaljenih stanja zaključane faze rotirajućih brojeva 4:1 i 5:1 harmonijski članovi u rasponu frekvencija od 0 do 2 kHz ne preklapaju se, kao što to prikazuje i Slika 5.13. Dijeljenjem frekvencije  $f_{\text{ramp}} = 2 \text{ kHz}$  s frekvencijom istaknutog najnižeg harmonika  $f_0'$  dobije se rezultat između brojeva 4:1 i 5:1. Tako se dolazi do zaključka da je to kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5.

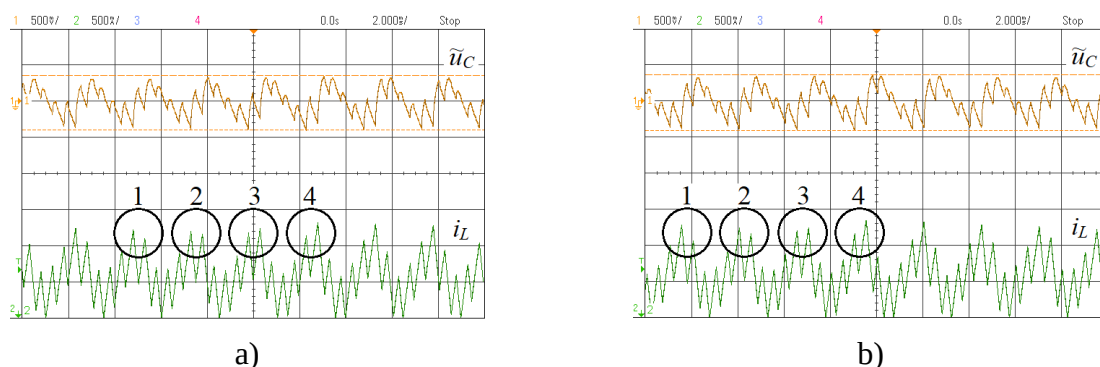


Slika 5.13 Kvaziperiodično ustaljeno stanje koje nastupa između ustaljenih stanja fazne zaključanosti rotirajućih brojeva 4:1 i 5:1 za  $E = 11,0 \text{ V}$ ; a) Valni oblici, b) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ , c) Harmonijski sastav struje prigušnice, d) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$  dobivena simulacijom.

### Razlikovanje kvaziperiodičnih ustaljenih stanja nastalih Hopfovima bifurkacijama

Dva kvaziperiodična ustaljena stanja između ustaljenih stanja fazne zaključanosti ML5:1 i ML6:1 prikazuje Slika 5.14. Za razlikovanje kvaziperiodičnih ustaljenih stanja pokazalo se najprikladnijim prebrojavanje perioda pilastog napona između lokalno najviših vrhova označenih kružnicama 1, 2, 3 i 4 ili praćenje odnosa između vrhova razmaknutih za jednu periodu pilastog

napona također označenih kružnicama 1, 2, 3 i 4. Tako se kvaziperiodična ustaljena stanja mogu razlikovati. U nastavku će se pokazati kako ta različita ustaljena stanja ubuduće označavati.



Slika 5.14 Dva različita kvaziperiodična ustaljena stanja QP5/6 između ustaljenih stanja fazne zaključanosti ML5:1 i ML6:1; a)  $E = 10,3 \text{ V}$ , b)  $E = 10,2 \text{ V}$ .

Broj ustaljenih stanja između ustaljenih stanja fazne zaključanosti ML5:1 i ML6:1 teorijski je beskonačan. U simulacijama i u mjerenjima broj tih ustaljenih stanja može biti najviše jednak broju koraka promjene bifurkacijskog parametra. U ovoj je disertaciji korak promjene bifurkacijskog parametra najčešće manji u simulaciji nego u mjerenjima. Tako je tipičan korak promjene ulaznog napona u simulaciji bio 10 mV, a u mjerenjima 100 mV.

Što je perioda ustaljenog stanja fazne zaključanosti veća, odnosno što je veći red članova Fareyevog niza, to je prozor tog ustaljenog stanja u bifurkacijskom dijagramu uži pa je za namještanje pretvarača za rad u tom ustaljenom stanju nužan manji korak promjene bifurkacijskog parametra. Pored toga, pretvarač je temperaturno zavisn i multistabilan pa se promjene ustaljenih stanja mogu dogoditi i bez promjene bifurkacijskog parametra i mogu uzrokovati promjene ustaljenih stanja prvog reda. Dodatno, u području Hopfovih bifurkacija pri promjeni ustaljenih stanja nema značajnije promjene efektivne i vršne vrijednosti struje prigušnice i napona kondenzatora.

Zbog svega navedenog nema tehničkog opravdanja za razlikovanje kvaziperiodičnih ustaljenih stanja između dva susjedna ustaljena stanja fazne zaključanosti prvog reda Fareyevog niza. Zato će se sva kvaziperiodična ustaljena stanja smještena između ustaljenih stanja fazne zaključanosti ML5:1 i ML6:1 označavati s QP5/6.

### Slijed ustaljenih stanja u području bifurkacija srazom granica

Pojavom bifurkacije srazom granica nastupilo je još veće povećanje modulacije amplitude prigušnice i što je s projektantskog stajališta puno važnije, značajno povećanje efektivne i vršne

vrijednosti struje prigušnice. Zato je toj bifurkaciji posvećeno posebno mjesto u disertaciji. Identifikacija bifurkacije srazom granica ukratko je opisana u odsječku 5.2.2, a detaljnije u potpoglavlju 5.4. Prvo ustaljeno stanje koje pripada području bifurkacija srazom granica je kaotično ustaljeno stanje s izraženom strukturom kvaziperiodičnog ustaljenog stanja QP15/16. Zatim se ustaljena stanja mijenjaju prema pravilu pribrajanja perioda [67]. Može se uočiti da se pribrajanje perioda ne odvija striktno uzlazno, nego sveukupno gledajući. Tako slijed ustaljenih stanja nije  $ML14 \rightarrow ML15 \rightarrow ML16 \rightarrow ML17$ , nego je  $ML14 \rightarrow ML16+K \rightarrow ML16 \rightarrow ML16+K \rightarrow ML15+K \rightarrow ML15 \rightarrow ML17$ . Ustaljena se stanja mijenjaju prema pravilu pribrajanja perioda sve dok ulazni napon ne dosegne prema preporuci proizvođača minimalnu vrijednost  $E = 7,0 \text{ V}$ .

U području pojave bifurkacije srazom granica, osim na početku, nije identificirano kvaziperiodično ustaljeno stanje. Kvaziperiodična ustaljena stanja identificirana su pri povećanju ulaznog napona pa je utemeljeno pretpostaviti da su se kvaziperiodična ustaljena stanja pojavljivala i pri smanjivanju ulaznog napona, ali nisu identificirana.

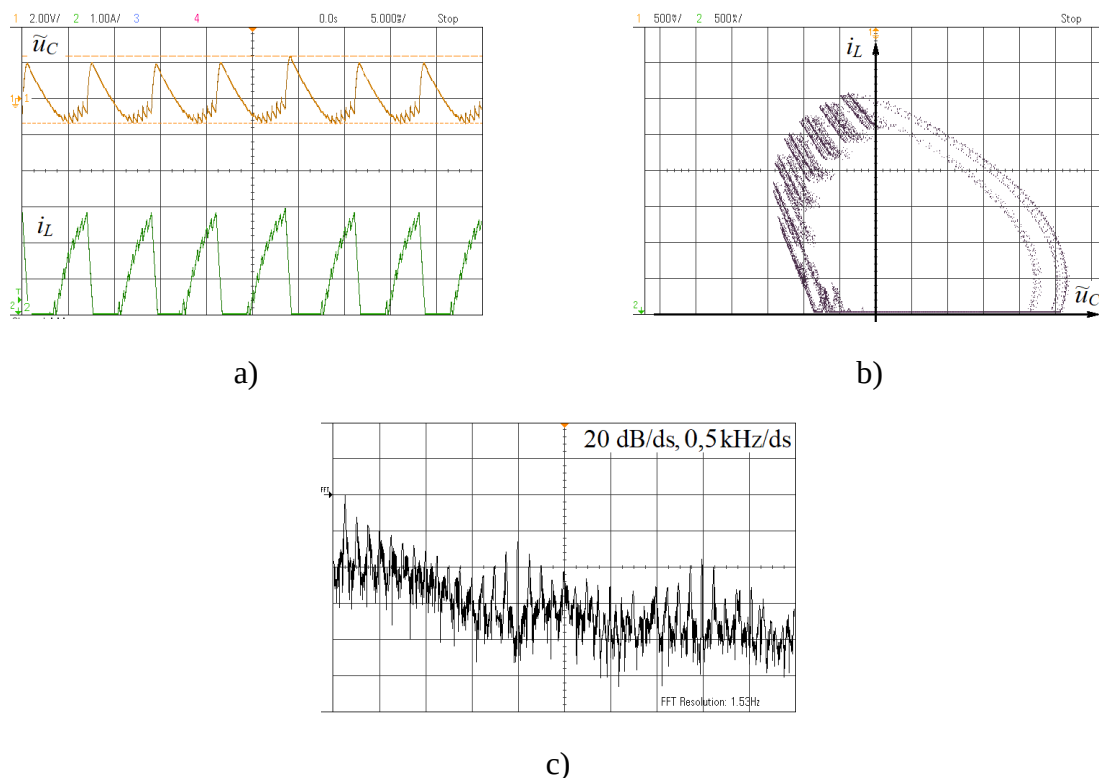
U nastavku će se prikazati jedno kaotično ustaljeno stanje i ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML 19:1 i opisati kako su ta ustaljena stanja identificirana.

### **Kaotična ustaljena stanja**

Kad kaotično ustaljeno stanje nastaje tijekom puta u kaos udvostručenjem periode promatranjem valnih oblika, trajektorija i harmonijskog sastava mogu se razlikovati dvije krajnosti. Jedna je kaotično ustaljeno stanje u kojem se prepoznaje struktura periodičnog ustaljenog stanja, a druga je kaotično ustaljeno stanje u kojem se ne prepoznaje struktura periodičnog ustaljenog stanja. Za razliku od puta u kaos udvostručenjem periode, tijekom puta u kaos putem kvaziperiodičnosti uvijek se mogla prepoznati struktura periodičnog i kvaziperiodičnog ustaljenog stanja. U tim je ustaljenim stanjima u tablicama P3.1 oznakom + povezano kaotično ustaljeno stanje i postojeća struktura periodičnog i kvaziperiodičnog ustaljenog stanja.

Slika 5.15 prikazuje kaotično ustaljeno stanje s izraženom strukturom ustaljenog stanja fazne zaključanosti rotirajućeg broja 16:1. Nemirni prikaz valnih oblika na osciloskopu upućuje na neperiodično ustaljeno stanje. U intervalu od 100 perioda pilastog napona može se uočiti sličnost u uzorcima valnih oblika trajanja 16 perioda pilastog napona, ali nisu svi uzorci jednaki pa se periodično ustaljeno stanje ne može tvrditi. Trajektorija je razmazana (vremenski nepravilno promjenljiva). To je tipično za kaotično ustaljeno stanje u kojem se može prepoznati struktura periodičnog ustaljenog stanja. Prikazana je trajektorija s perzistencijom prikaza od 200 ms. U harmonijskom sastavu može se prebrojavanjem istaknutih harmonijskih komponenata prepoznati

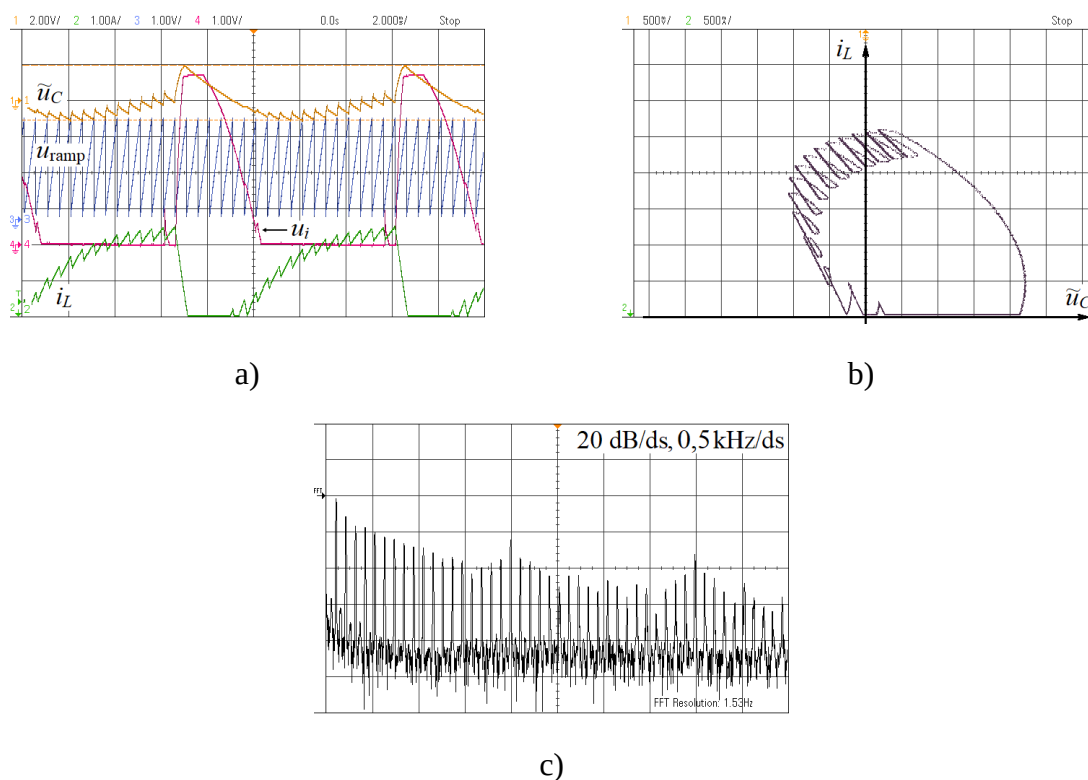
struktura i vrsta periodičnog ustaljenog stanja. Razina šuma veća je za 20-tak decibela od razine šuma u drugim prikazima nekaotičnih ustaljenih stanja pa je to indikacija kaotičnog ustaljenog stanja. Dakle, harmonijski sastav je kontinuiran. Razina šuma još je i vremenski promjenljiva, a to je također karakteristično za kaotično ustaljeno stanje.



Slika 5.15 Kaotično ustaljeno stanje za  $E = 9,2$  V; a) Valni oblici, b) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ , c) Harmonijski sastav struje prigušnice.

### Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 19:1

Slika 5.16 prikazuje ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 19:1 (ML 19:1). Iz valnih oblika vidi se ponavljanje valnog oblika nakon 19 perioda pilastog napona. Na tako velikom intervalu teže je uočiti razlike pa time i neperiodičnost valnih oblika. Zato je uputno upotrijebiti druge dvije metode identifikacije ustaljenog stanja. Iz trajektorije se vidi da je ustaljeno stanje periodično. Analogijom s drugim ustaljenim stanjima zaključane faze uočava se da harmonijski sastav sadrži pored osnovnog člana od 2 kHz i 18 nižih i jednako razmaknutih harmonijskih članova.



Slika 5.16 a) Ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotirajućeg broja 19:1 za  $E = 7,6$  V; a) Valni oblici, b) Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$ , c) harmonijski sastav struje prigušnice.

### Razlike u ustaljenim stanjima, slijedovima ustaljenih stanja i bifurkacijama pri povećavanju i smanjivanju ulaznog napona

Povećavanjem ulaznog napona može izostati Hopfova bifurkacija kako to prikazuje tablica 5.3a. Neovisno o tomu, uočava se da za isti ulazni napon pretvarač ne mora raditi u istom ustaljenom stanju kada se ulazni napon povećava i kada se smanjuje. Drugim rječima pretvarač je multistabilan. Moguća su dva slučaja. Jedan je da je došlo samo do pomaka bifurkacijske točke bez promjene slijeda ustaljenih stanja. To se naziva histereza. Drugi je slučaj da dođe i do promjene slijeda ustaljenih stanja. To je multistabilnost u širem smislu. U području kvaziperiodičnosti pretvarač je puno osjetljiviji na smetnje i početne uvjete nego u ustaljenom stanju osnovne periode. Tako se događalo da se više ustaljenih stanja izmjenjuje na jednom te istom ulaznom naponu. Taj primjer bistabilnosti, odnosno multistabilnosti opisan je u odsječku 5.3.2c.

Slijed promjena ustaljenih stanja i odnosi struja i napona pretvarača pri smanjivanju i povećavanju ulaznog napona međusobno se kvalitativno podudaraju. Povećavanjem ulaznog napona može izostati Hopfova bifurkacija kako to prikazuje tablica 5.3a. Čak i ako Hopfova bifurkacija ne izostane, pretvarač iskazuje multistabilnost i pojavljuje se i histereza ustaljenih stanja. Multistabilnosti i histerezi ustaljenih stanja pretvarača posvećeno je potpoglavlje 5.3.

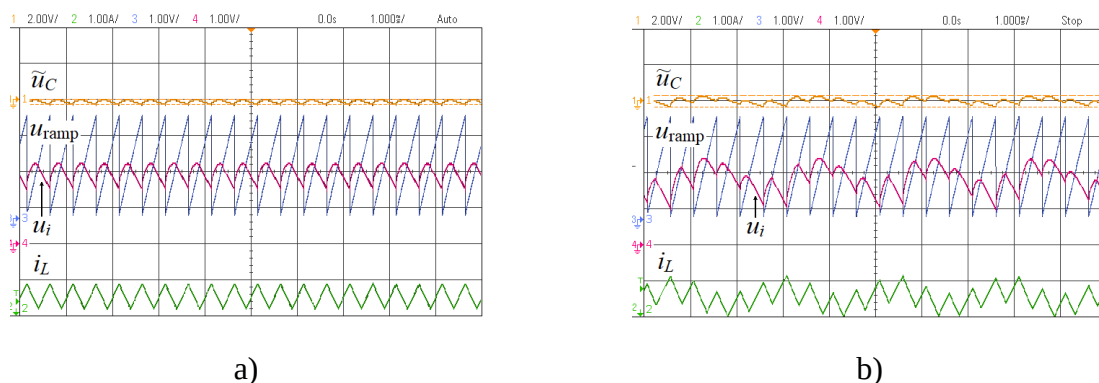
### 5.2.2 Bifurkacije identificirane mjerenjem

Eksperimentalno se identifikacija bifurkacija obavlja tako da se prati kada dolazi do kvalitativne promjene ustaljenog stanja. U disertaciji su se promatrali valni oblici, trajektorije i harmonijski sastav, a u slučaju kad je prigušnica bila nelinearna, onda se čula i zvučna promjena buke koji je stvarala zavojnica.

Tijekom mjerenja, smanjivanjem ulaznog napona pretvarač prelazi Hopfovom bifurkacijom iz ustaljenog stanja osnovne periode u kvaziperiodično ustaljeno stanje. Daljim smanjivanjem napona nastupaju bifurkacije u kojima se izmjenjuju kvaziperiodično ustaljeno stanje i ustaljeno stanje fazne zaključanosti sve dok ne dođe do skokovitog povećanja amplitude bifurkacijom srazom granica. Nakon toga amplitude ostaju povećane i dalje se izmjenjuju kvaziperiodično ustaljeno stanje i ustaljeno stanje fazne zaključanosti. U oba područja pojavljivanja kvaziperiodičnog ustaljenog stanja moguća je i pojava kaotičnog ustaljenog stanja. Sve ove slijedove ustaljenih stanja prikazuju tablica 5.3 i tablica u prilogu P3.1.

Od značaja su bifurkacija na kojoj se dogodi prijelaz iz ustaljenog stanja osnovne periode u kvaziperiodično ustaljeno stanje i bifurkacija na kojoj se dogodi skokovito povećanje amplitude u kvaziperiodičnom ustaljenom stanju. Skokovito povećanje amplitude dogodit će se ako je kontrolni napon (upravljački signal)  $u_i$  u trenutku mrtvog vremena manji od pilastog napona (signala nosioca)  $u_{ramp}$ . Tada dolazi do promjene ishoda uvjeta sklapanja ventila V1 i V2. Ovaj je scenarij karakterističan za bifurkaciju srazom granica i opisan je u potpoglavlju 5.3. Za drugu bifurkaciju, onu kojom pretvarač iz ustaljenog stanja osnovne periode prelazi u kvaziperiodično ustaljeno stanje nije uočena nikakva specifičnost u odnosu upravljačkih napona  $u_i$  i  $U_{dt} + E_{ramp}$  i signala nosioca  $u_{ramp}$ . Tako je slijed vođenja ventila V1 i V2 ostao isti kao u ustaljenom stanju osnovne periode. Tako je zaključeno da su prva i druga bifurkacija dvije različite bifurkacije kojima nastupa kvaziperiodično ustaljeno stanje. Uz bifurkaciju srazom granica, jedino se još Hopfovom bifurkacijom može dobiti kvaziperiodično ustaljeno stanje. Načelom isključenja trećeg zaključeno je da je prva bifurkacija Hopfova bifurkacija. Ni za jednu bifurkaciju koja se dogodila između prve Hopfove bifurkacije i prve bifurkacije srazom granica nije ni u mjerenjima ni u simulacijama utvrđeno ispunjenje uvjeta bifurkacije srazom granica. Zato su sve bifurkacije u tom skupu bifurkacija identificirane kao Hopfove bifurkacije.

Mjerenjem dobivena ustaljena stanja prije i poslije pojave prve Hopfove bifurkacije prikazuje Slika 5.17. Slijed vođenja ventila V1 i V2 u kvaziperiodičnom ustaljenom stanju ostao je isti kao u ustaljenom stanju osnovne periode.



Slika 5.17 Prva Hopfova bifurkacija uz smanjenje ulaznog napona; a)  $E = 11,5$  V i ustaljeno stanje osnovne periode, b)  $E = 11,0$  V i kvaziperiodično ustaljeno stanje.

Valni oblici prije i poslije prve bifurkacije srazom granica neće se ovdje prikazati. Značajno povećanje struje prigušnice od tehničkog je značaja pa se bifurkacija srazom granica posebno obrađuje u potpoglavlju 5.4.

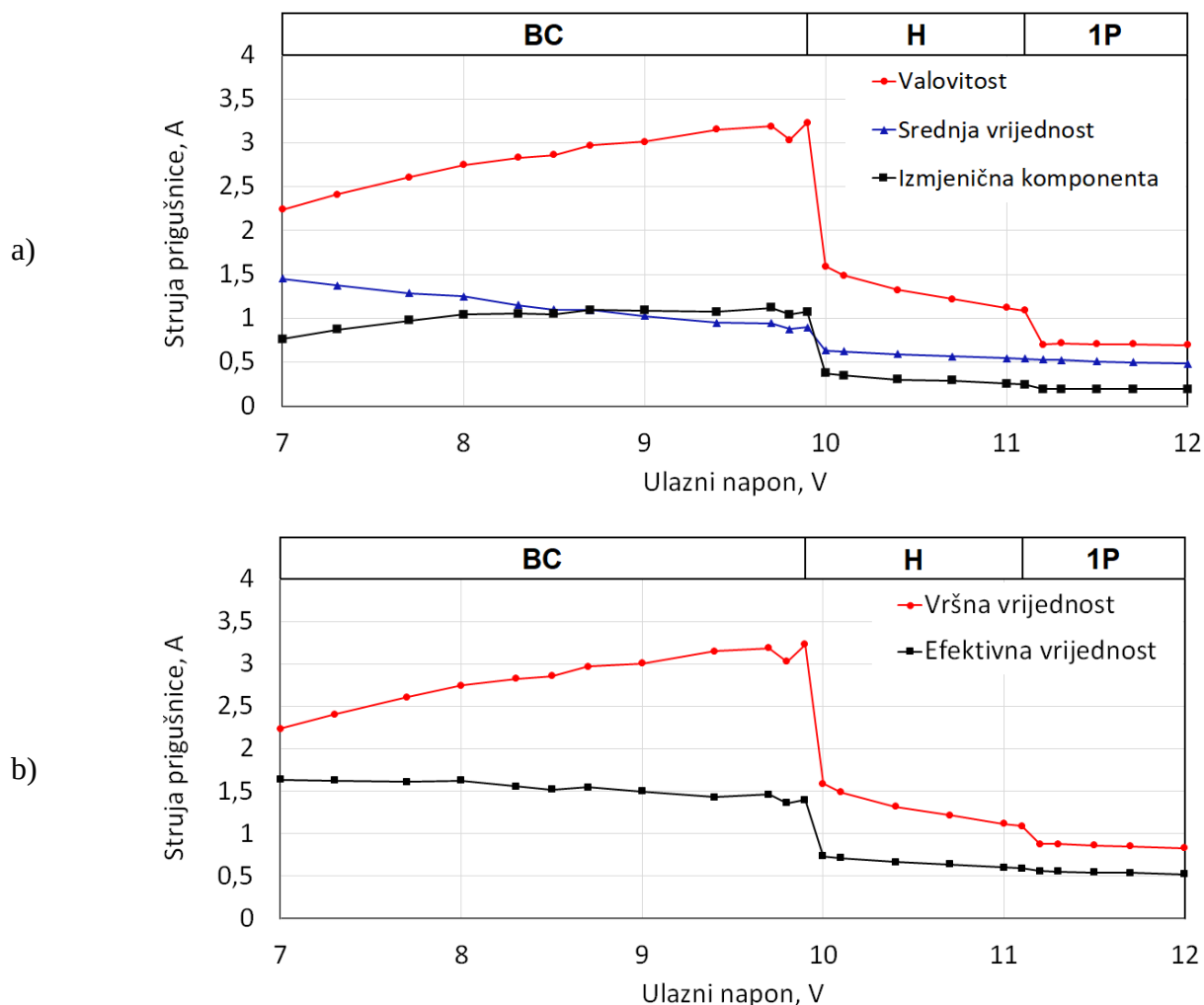
### 5.2.3 Utjecaj bifurkacija na rad i svojstva pretvarača

Bifurkacijama se mijenjaju ustaljena stanja pretvarača. Pretvarač prelazi iz ustaljenog stanja osnovne periode u druga ustaljena stanja. Pri tom se mijenjaju srednje i efektivne vrijednosti, izmjenične komponente, valovitosti i vršne vrijednosti struje prigušnice i napona kondenzatora. Efektivne vrijednosti, uključujući i izmjeničnu komponentu, određuju gubitke pretvarača, a vršne vrijednosti utječu na stres komponenata pa povećanje tih veličina može uzrokovati kvar pretvarača. Promjena srednje vrijednosti i povećanje valovitosti pak degradira tehničke karakteristike pretvarača, ali ne uzrokuje kvar pretvarača.

Disertacija se bavi kvaziperiodičnošću uzrokovanom Hopfovima bifurkacijama i bifurkacijama srazom granica. Pokazat će se da su ove bifurkacije neželjene pojave, jer povećavaju valovitost, efektivnu i vršnu vrijednost struje prigušnice i napona kondenzatora. Promjena srednje vrijednosti napona kondenzatora (izlaznog napona) i povećanje njegove valovitosti ne uzrokuju kvar pa su analizirani u Prilogu 4.

Zavisnost promatranih vrijednosti struje prigušnice (ulazne struje) o ulaznom naponu, odnosno o ustaljenom stanju i vrsti bifurkacija, prema rezultatima iz tablice u prilogu P3.1a prikazuje Slika 5.18. Označena su područja bifurkacije srazom granica (BC), Hopfove bifurkacije (H) i ustaljenog stanja osnovne periode (1P). Prikazani su rezultati dobiveni smanjivanjem ulaznog napona. Relativna povećanja struje u bifurkacijskim točkama prve Hopfove bifurkacije i prve bifurkacije srazom granica od posebnog su značaja pa su kvantitativno prikazana u tablici 5.4.

Zatim su za bifurkaciju srazom granica u tablici 5.5 dodatno prikazana povećanja struje za još dvije skupine parametara pretvarača.



Slika 5.18 Ovisnost struje prigušnice o ulaznom naponu; a) Valovitost, srednja vrijednost i izmjenična komponenta, b) Vršna vrijednost i efektivna vrijednost.

### Valovitost, izmjenična komponenta i srednja vrijednost struje prigušnice.

Smanjivanjem ulaznog napona pretvarača srednja vrijednost ulazne struje povećava se u skladu s načelom jednakosti snaga. Promjena ustaljenih stanja koja se pritom događa ne utječe na načelo jednakosti snaga. U kvaziperiodičnim i kaotičnim ustaljenim stanjima očitavanje srednje vrijednosti ulazne struje ponekad se mijenjalo. Tada su očitane procijenjene vrijednosti. U bifurkacijskoj točki bifurkacije srazom granica dolazi do značajnog povećanja srednje vrijednosti ulazne struje. To je popraćeno sa značajnim povećanjem izlaznog napona pretvarača i prikazano je u Prilogu 4. Uzrok značajnog povećanja izlaznog napona nije utvrđen.

Tablica 5.4 Relativne promjene struje prigušnice u bifurkacijskim točkama bifurkacije srazom granica i Hopfove bifurkacije pri smanjenju ulaznog napona.

| Parametri pretvarača                                                                                                                                                                                   |                |                     |                          |                  |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------|--------------------------|------------------|------------------------|
| $U_d(0) = 20,05 \text{ V}$ , $T_{\text{ramp}} = 499 \text{ }\mu\text{s}$ , $L = 3,60 \text{ mH}$ , $0,81 \text{ }\Omega$ , $C_d = 255 \text{ }\mu\text{F}$ , $R_d = 81 \text{ }\Omega$ , Tablica P3.1a |                |                     |                          |                  |                        |
| Hopfova bifurkacija                                                                                                                                                                                    |                |                     |                          |                  |                        |
| Ustaljeno stanje                                                                                                                                                                                       | $E, \text{ V}$ | $I_L(0), \text{ A}$ | $\tilde{I}_L, \text{ A}$ | $I_L, \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ |
| 1P + QP                                                                                                                                                                                                | 11,2           | 0,529               | 0,194                    | 0,563            | 0,879                  |
| QP4/5                                                                                                                                                                                                  | 11,1           | 0,538               | 0,244                    | 0,591            | 1,09                   |
| Povećanje struje                                                                                                                                                                                       |                | 1,7 %               | 26 %                     | 5,0 %            | 24 %                   |
| Bifurkacija srazom granica                                                                                                                                                                             |                |                     |                          |                  |                        |
| Ustaljeno stanje                                                                                                                                                                                       | $E, \text{ V}$ | $I_L(0), \text{ A}$ | $\tilde{I}_L, \text{ A}$ | $I_L, \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ |
| QP5/6                                                                                                                                                                                                  | 10,0           | 0,633               | 0,373                    | 0,735            | 1,59                   |
| QP15/16 + K                                                                                                                                                                                            | 9,9            | 0,895               | 1,075                    | 1,399            | 3,23                   |
| Povećanje struje                                                                                                                                                                                       |                | 41 %                | 288 %                    | 190 %            | 103 %                  |

Valovitost struje prigušnice (vrijednost od vrha do vrha) znatno se razlikuje u područjima ustaljenog stanja osnovne periode ( $E = 11,2 - 12,0 \text{ V}$ ), Hopfovih bifurkacija ( $E = 10,0 - 11,1 \text{ V}$ ) i bifurkacija srazom granica ( $E = 7,0 - 9,9 \text{ V}$ ). Smanjivanjem ulaznog napona u bifurkacijskim točkama Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica dolazi do skokovitog povećanja valovitosti struje izvora. Povećanje valovitosti je neželjena pojava, jer pogoršava harmonijski sastav ulazne struje. Tijekom smanjivanja ulaznog napona i sve dubljeg ulaženja u područje Hopfove bifurkacije valovitost se povećava, a sve dubljim ulaženjem u područje bifurkacije srazom granica valovitost se smanjuje. U području Hopfove bifurkacije valovitost je 1,5 do 2 puta veća nego u ustaljenom stanju osnovne periode, a u području bifurkacije srazom granica valovitost je 3 do 4 puta veća nego u ustaljenom stanju osnovne periode.

Smanjivanjem ulaznog napona dolazi do povećanja izmjenične komponente struje prigušnice na ulaznom naponu  $E = 11,1 \text{ V}$  uslijed Hopfove bifurkacije. Do puno većeg relativnog i apsolutnog povećanja izmjenične komponente struje prigušnice dolazi na ulaznom naponu  $E = 9,9 \text{ V}$  uslijed bifurkacije srazom granica. Ta su povećanja neželjene pojave, jer smanjuju kvalitetu ulazne struje.

### Efektivna i vršna vrijednost struje prigušnice

Smanjivanjem ulaznog napona efektivna vrijednost ulazne struje povećava se u skladu s povećanjem njene srednje vrijednosti. U bifurkacijskoj točki bifurkacije srazom granica dolazi do

značajnog povećanja efektivne vrijednosti ulazne struje. Zatim se efektivna vrijednost struje povećava na račun povećanja srednje vrijednosti struje, iako se izmjenična komponenta struje smanjuje. Povećanje efektivne vrijednosti struje prigušnice povećava gubitke pretvarača, posebice gubitke prigušnice, što može uzrokovati prekomjerno zagrijavanje prigušnice i smanjuje stupanj djelovanja pretvarača.

Također je povećana i vršna vrijednost struje. Ventili pretvarača imaju veće strujno opterećenje pa im to skraćuje vijek trajanja. Kao i za valovitost, puno veće relativno i apsolutno povećanje vršne vrijednosti struje prigušnice nastaje prvom bifurkacijom srazom granica, nego prvom Hopfovom bifurkacijom.

Povećanje efektivne i vršne vrijednosti struje prigušnice s pojavom bifurkacije srazom granica reda je veličine 100 % i može biti kritično za pretvarač. Zato je važno znati da bifurkacija srazom granica može uzrokovati toliko velika povećanja struje prigušnice i kako se ta bifurkacija može izbjeći ili odgoditi. O tomu više u odsječku 5.4.2.

### **Bifurkacija srazom granica**

Zbog značajnog povećanja struje pri pojavi bifurkacije srazom granica prikazat će se rezultati mjerenja dobiveni za još dva skupa parametara pretvarača. Rezultati su prikazani tablicom 5.5. Jedni su rezultati dobiveni na pretvaraču upotrijebljenom u ovoj disertaciji, ali s promijenjenom prigušnicom i parametrima  $U_d(0) = 20,12 \text{ V}$ ,  $T_{\text{ramp}} = 505 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $L = 2,37 \text{ mH}/0,81 \text{ } \Omega$ ,  $C_d = 255 \text{ } \mu\text{F}$ ,  $R_d = 81 \text{ } \Omega$ . Drugi su rezultati dobiveni na pretvaraču iste sheme spoja s drugačijim komponentama. Parametari tog pretvarača su  $U_d(0) = 26,8 \text{ V}$ ,  $T_{\text{ramp}} = 200 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $L = 1,08 \text{ mH}/0,7 \text{ } \Omega$ ,  $C_d = 100 \text{ } \mu\text{F}$ ,  $R_d = 89 \text{ } \Omega$ , a rezultati su objavljeni u radu [42]. Ti su rezultati sumjerljivi s rezultatima iz tablice 5.4.

#### **5.2.4 Usporedba rezultata mjerenja i rezultata simulacije**

Usporedit će se rezultati mjerenja s rezultatima simulacije za dosad prikazane rezultate simulacije i mjerenja. Težište će biti na kvaziperiodičnom ustaljenom stanju i pripadnim bifurkacijama. Prvo se navode podudaranja u rezultatima mjerenja i simulacija, a zatim se navode i komentiraju razlike. Usporedba rezultata mjerenja s rezultatima simulacije za multistabilnost, histerezu ustaljenih stanja i bifurkaciju srazom granica dana je u sljedećim odsječcima.

Tablica 5.5 Relativne promjene struje prigušnice u bifurkacijskim točkama bifurkacije srazom granica za dvije dodatne verzije uzlaznog pretvarača.

| Parametri pretvarača                                                                                                                                                                                                   |                |                     |                        |                  |                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| $U_d(0) = 20,12 \text{ V}$ , $T_{\text{ramp}} = 505 \text{ } \mu\text{s}$ , $L = 2,37 \text{ mH}/0,81 \text{ } \Omega$ , $C_d = 255 \text{ } \mu\text{F}$ , $R_d = 81 \text{ } \Omega$                                 |                |                     |                        |                  |                        |
| Bifurkacija srazom granica, jedno mjerenje                                                                                                                                                                             |                |                     |                        |                  |                        |
| Ustaljeno stanje                                                                                                                                                                                                       | $E, \text{ V}$ | $I_L(0), \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ | $I_L, \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ |
| 1P + QP                                                                                                                                                                                                                | 8,4            | 0,799               | 0,262                  | 0,841            | -                      |
| ML7                                                                                                                                                                                                                    | 8,3            | 0,937               | 0,701                  | 1,170            | -                      |
| QP8/10 + K                                                                                                                                                                                                             | 8,2            | 1,074               | 0,925                  | 1,417            | -                      |
| Povećanje struje $E = 8,4 \text{ V} \rightarrow 8,3 \text{ V}$                                                                                                                                                         |                | 17 %                | 268 %                  | 39 %             | -                      |
| Povećanje struje $E = 8,4 \text{ V} \rightarrow 8,2 \text{ V}$                                                                                                                                                         |                | 34 %                | 353 %                  | 68 %             | -                      |
| Bifurkacija srazom granica, drugo mjerenje                                                                                                                                                                             |                |                     |                        |                  |                        |
| Ustaljeno stanje                                                                                                                                                                                                       | $E, \text{ V}$ | $I_L(0), \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ | $I_L, \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ |
| 1P                                                                                                                                                                                                                     | 8,6            | 0,788               | 0,265                  | 0,831            | 1,25                   |
| ML7                                                                                                                                                                                                                    | 8,3            | 0,976               | 0,705                  | 1,204            | 2,41                   |
| Povećanje struje                                                                                                                                                                                                       |                | 24 %                | 266 %                  | 45 %             | 93 %                   |
| Parametri pretvarača                                                                                                                                                                                                   |                |                     |                        |                  |                        |
| $U_d(0) = 26,8 \text{ V}$ , $T_{\text{ramp}} = 200 \text{ } \mu\text{s}$ , nelinearna prigušnica $L = 1,08 \text{ mH}/0,7 \text{ } \Omega$ , $C_d = 100 \text{ } \mu\text{F}$ , $R_d = 89 \text{ } \Omega$ , rad [42]. |                |                     |                        |                  |                        |
| Bifurkacija srazom granica                                                                                                                                                                                             |                |                     |                        |                  |                        |
| Ustaljeno stanje                                                                                                                                                                                                       | $E, \text{ V}$ | $I_L(0), \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ | $I_L, \text{ A}$ | $\hat{I}_L, \text{ A}$ |
| 1P                                                                                                                                                                                                                     | 8,5            | 1,196               | 0,287                  | 1,230            | 1,780                  |
| ML17                                                                                                                                                                                                                   | 8,4            | 1,507               | 1,753                  | 2,312            | 5,350                  |
| Povećanje struje                                                                                                                                                                                                       |                | 26 %                | 661 %                  | 188 %            | 301 %                  |

Najvažnija podudaranja rezultata mjerenja s rezultatima simulacija s obzirom na kvaziperiodično ustaljeno stanje i pripadne bifurkacije:

- Predviđanje ustaljenog stanja osnovne periode i pripadnog raspona vrijednosti ulaznog napona.
- Predviđanje predznaka prve Hopfove bifurkacije i predviđanje Hopfovih bifurkacija i bifurkacija srazom granica.
- Kvalitativno podudaranje između sljedova ustaljenih stanja u području kvaziperiodičnosti, odnosno multistabilnosti dobivenih mjerenjem i simulacijom.
- Predviđanje promjena ustaljenih stanja po načelu približavanja periode.
- Predviđanje značajnog povećanja valovitosti struje prigušnice i napona kondenzatora i posljedično njihovih efektivnih i vršnih vrijednosti uslijed bifurkacije srazom granica.

- Predviđanje povećanja izlaznog napona uslijed bifurkacije srazom granica.

U najvažnije razlike između rezultata mjerenja i rezultata simulacija spada uspješnost predviđanja bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica. Izmjerene valne oblike karakteriziraju skokovi napona kondenzatora u trenucima sklapanja ventila. U simuliranim valnim oblicima nema tih skokova zato što je nadomjesna otpornost kondenzatora  $R_C = 0$ . To bi moglo utjecati na točnost predviđanja bifurkacije srazom granica. Utjecaj izostavljanja nadomjesne otpornosti kondenzatora iz matematičkog modela pretvarača komentiran je u odsječku 5.4.2, a valne oblike napona kondenzatora dobivene simulacijom i mjerenjem prikazuje Slika 5.32.

### 5.3 Multistabilnost i histereza

Multistabilnost je pojava u kojoj se za isti skup parametara može dobiti više različitih stanja. Prema determinističkom pogledu na svijet to nije moguće. Pri pojavi multistabilnosti parametri pretvarača ipak se mijenjaju, ali promjena može ostati nezamijećena pa se čini da se za isti skup parametara dobivaju različita ustaljena stanja. Histereza je poseban slučaj multistabilnosti vezan uz promjenu bifurkacijskog parametra tako da se prijelaz iz jednog ustaljenog stanja u drugo ustaljeno stanje ne događa na istoj vrijednosti bifurkacijskog parametra prilikom povećavanja i prilikom smanjivanja bifurkacijskog parametra. Strožije definicije multistabilnosti i histereze mogu se pogledati u odsječku 4.1.1.

Temeljem rezultata simulacije i mjerenja prikazanih u potpoglavljima 5.1 i 5.2 pokazat će se primjeri multistabilnosti i histereze ustaljenih stanja te komentirati njihova važnost.

#### 5.3.1 Identifikacija multistabilnosti i histereze

Identifikacija histereze može se obaviti iz bifurkacijskog dijagrama tako što se prepozna „pomak“ dijagrama, odnosno pomak bifurkacijske točke s obzirom na smjer promjene bifurkacijskog parametra. Identifikacija multistabilnosti može se provesti putem bifurkacijskog dijagrama snimljenog za različite početne uvjete. Ako se promjenom početnih uvjeta mijenja i bifurkacijski dijagram, onda na dijelovima bifurkacijskih dijagrama koji se međusobno razlikuju postoji multistabilnost. I histereza i multistabilnost nastaju promjenom ustaljenog stanja. Zato se mogu identificirati već i valnim oblicima. Pri tom, ne treba posebno mijenjati početne uvjete, nego je dovoljno mijenjati bifurkacijski parametar u različitim smjerovima i tako će se promijeniti i početni uvjeti.

Važno je naglasiti da „male“ promjene parametara pretvarača nisu pod kontrolom eksperimentatora, a one mogu utjecati na rezultirajuće ustaljeno stanje. Primjerice, promjenom

bifurkacijskog parametra mijenjaju se i opterećenja komponenata i parametri pretvarača koji jesu i koji nisu modelirani matematičkim modelom pretvarača. Uz to, ne samo da ti parametri nisu pod kontrolom eksperimentatora, nego se ne zna ni koji parametri, odnosno njihova kombinacija, utječu na promjenu ustaljenih stanja. Njihov se utjecaj na ustaljena stanja može utvrditi tako što se prividno nije promijenio nijedan parametar pretvarača, a ustaljeno stanje pretvarača ipak se promijenilo. Dodatno, mnoga su mjerenja ponovljena više puta, uz različitu sobnu temperaturu i uz razlike u periodu pilastog napona i vrijednosti izlaznog napona tipično manje od 1 %. Tako su također uz „iste“ parametre pretvarača nastale razlike dovoljne za pojavu multistabilnosti i histereze.

### **5.3.2 Eksperimentalno identificirana multistabilnost**

Multistabilnost promatranog uzlaznog pretvarača uočena je u cijelom području kvaziperiodičnosti odnosno dinamike pretvarača na torusu. Pri tom nastaju slijedovi ustaljenih stanja koji do sada nisu zabilježeni u istraživanjima istosmjernih uzlaznih pretvarača. Detaljan popis identificiranih ustaljenih stanja u području kvaziperiodičnosti, a ujedno i multistabilnosti može se naći u Prilogu 3 u Tablici P3.1. Karakteristična ustaljena stanja i bifurkacije koje su popraćene multistabilnošću već su opisane u potpoglavlju 5.2 Rezultati mjerenja. Ovdje će se opisati načini na koje je multistabilnost identificirana s naglaskom na bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica i prve Hopfove bifurkacije. Multistabilnost je identificirana na četiri načina:

- a) Tako da se ulazni napon povećava ili smanjuje, a na istom se ulaznom naponu identificiraju različita ustaljena stanja.
- b) Tako da se ulazni napon povećava ili smanjuje različitom brzinom pa se na nekom ulaznom naponu identificiraju različita ustaljena stanja kao i nestabilna ili prijelazna stanja koja traju i po više desetaka sekundi.
- c) Tako da se za isti ulazni napon bez ikakve promjene parametara pretvarača nakon nekog vremena promijeni ustaljeno stanje.
- d) Tako da se pri uključanju pretvarača na isti ulazni napon, a s početnim uvjetima nula dobiju različita ustaljena stanja. Pri tom se za svako uključanje pretvarača mogu razlikovati temperatura okoline i temperatura komponenata.

Za sve četiri iskazane multistabilnosti prikazat će se i komentirati rezultati mjerenja.

#### **a) Multistabilnost identificirana povećavanjem i smanjivanjem ulaznog napona**

Multistabilnost pretvarača može se identificirati usporedbom intervala ulaznog napona u kojima su identificirane različite bifurkacije i ustaljena stanja. Tako se u tablicama P3.1 i 5.3 vidi da se na

nekim ulaznim naponima za isti skup parametara pretvarača dobivaju različita ustaljena stanja i bifurkacije. Također, pri smanjivanju ulaznog napona u tablici P3.1a pojavljuje se interval Hopfovih bifurkacija, a pri povećavanju ulaznog napona tog intervala nema, nego to područje zauzima bifurkacija srazom granica. To je važno jer je za bifurkaciju srazom granica u odsječku 5.2.3 pokazano da uzrokuje značajno povećanje vršne i efektivne vrijednosti struje prigušnice.

Za promatrani pretvarač prikazat će se dva slučaja multistabilnosti pri povećavanju i smanjivanja ulaznog napona:

- Slučaj s dva različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu s kapacitetom trošila  $C_d = 165 \mu\text{F}$  pri ulaznom naponu  $E = 11,1 \text{ V}$ , Slika 5.19.

- Slučaj s četiri različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu s kapacitetom trošila  $C_d = 255 \mu\text{F}$  pri ulaznom naponu  $E = 11,0 \text{ V}$ , Slika 5.20.

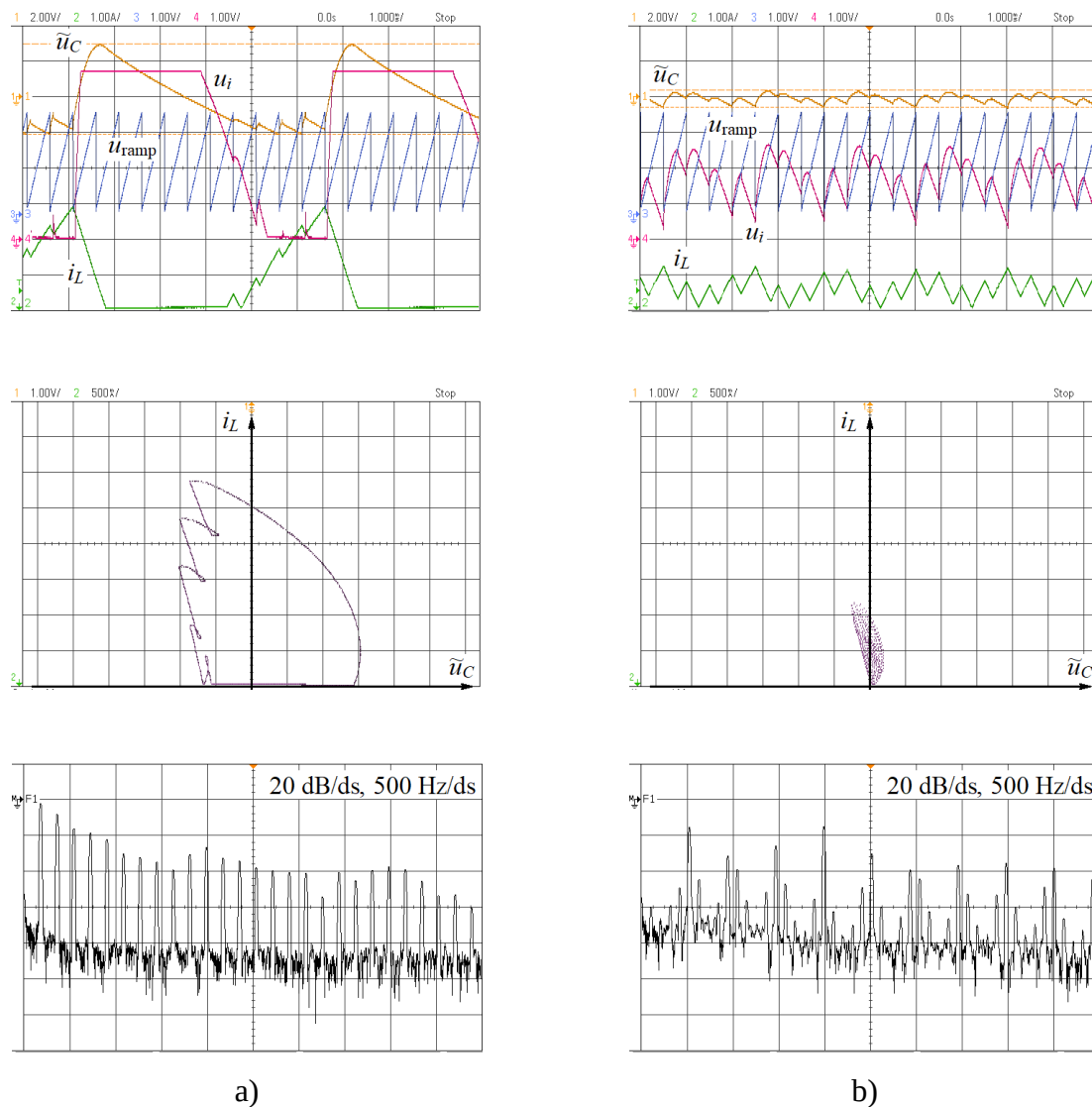
Oba se slučaja nalaze u blizini bifurkacijske točke bifurkacije srazom granica. Tako se mogu dobiti ustaljena stanja nastala bifurkacijom srazom granica i Hopfovom bifurkacijom i vidjeti potencijalno opasno povećanje struje prigušnice pri pojavi bifurkacije srazom granica.

### **Multistabilnost s dva različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu**

Valni oblici obaju ustaljenih stanja, Slika 5.19, prikazani su istim mjerilom kako bi se naglasilo povećanje amplitude pri pojavi bifurkacije srazom granica. Vrijednosti karakterističnih napona i struja za dva različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu s kapacitetom trošila  $C_d = 165 \mu\text{F}$  pri ulaznom naponu  $E = 11,1 \text{ V}$  uspoređene su u tablici 5.6.

Povećavanjem ulaznog napona na vrijednost  $E = 11,1 \text{ V}$  dobiveno je ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 11:1. Iz valnih oblika vidi se da je perioda struje prigušnice 11 puta veća od periode pilastog napona. Trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$  zatvorena je krivulja, a to je pokazatelj periodičnosti i time je isključeno da je ustaljeno stanje kvaziperiodično. Harmonijski sastav u pojasu frekvencija od 0 do 2 kHz sastoji se od 10 harmonijskih članova što znači da je perioda struje prigušnice 11 puta veća od periode pilastog napona.

Smanjivanjem ulaznog napona na vrijednost  $E = 11,1 \text{ V}$  dobiveno je kvaziperiodično ustaljeno stanje rotacijskog broja između 3:1 i 4:1. Iz valnih se oblika vidi da struja prigušnice nije periodična. Također i trajektorija  $\tilde{u}_C - i_L$  upućuje na neperiodičnost, jer pokriva plohu. Može se uočiti sličnost s trajektorijom koju pokazuje Slika 5.3. Trajektorija koja obuhvaća plohu zajednička je karakteristika i kvaziperiodičnog ustaljenog stanja i kaotičnog ustaljenog stanja. No, harmonijski sastav kaotičnog ustaljenog stanja je „razmazan“ odnosno kontinuiran, a za kvaziperiodično ustaljeno stanje prikaz je diskretan.



Slika 5.19 Multistabilnost na  $E = 11,1$  V uz  $C_d = 165$   $\mu$ F; a) Povećavanje ulaznog napona i fazna zaključanost ML11, b) Smanjivanje ulaznog napona i kvaziperiodično ustaljeno stanje QP3/4.

Tablica 5.6. Izmjerene veličine za dva različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu s kapacitetom trošila  $C_d = 165$   $\mu$ F pri ulaznom naponu  $E = 11,1$  V

| Ulazni napon, $E$ | Smjer promjene  | Ustaljeno stanje | Bifurkacija | Izlazni napon $U_d(0)$ | $I_L$    | $\tilde{I}_L$ |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------|------------------------|----------|---------------|
| 11,1 V            | Povećavanje $E$ | ML11             | BC          | 20,70 V                | 1191 mA  | 944 mA        |
|                   | Smanjivanje $E$ | QP3/4            | H           | 20,07 V                | 601,1 mA | 262 mA        |

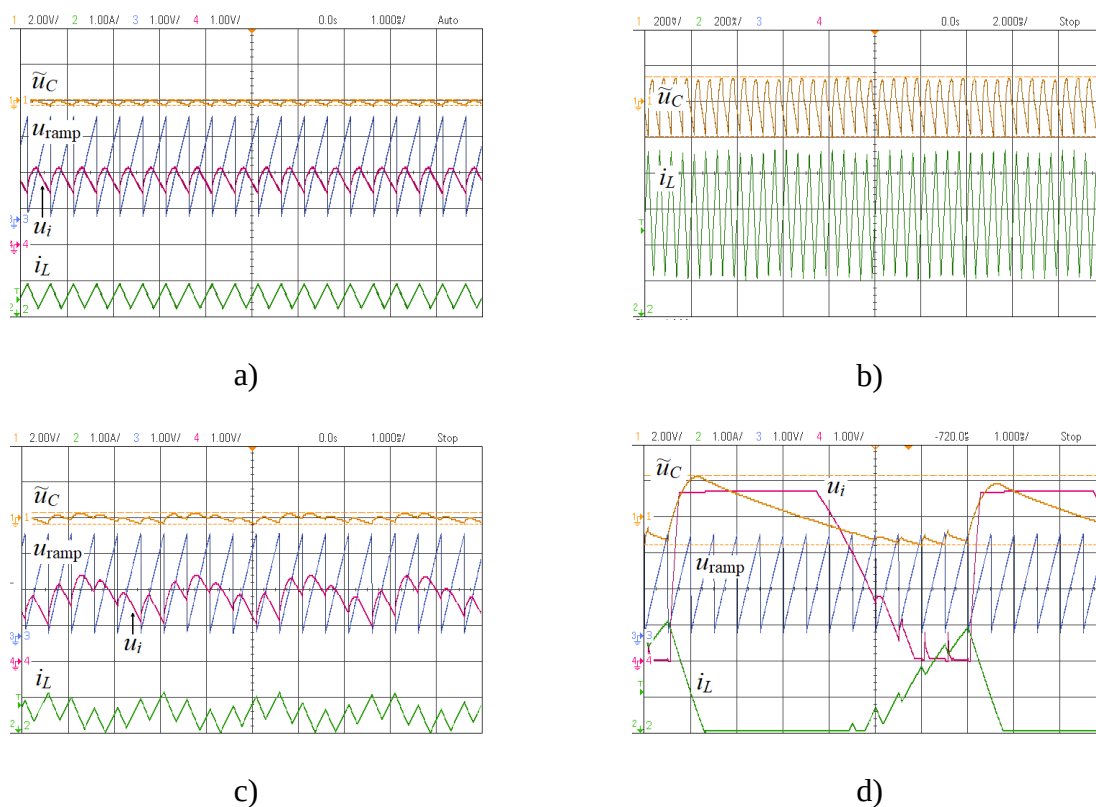
Međusobni odnos kontrolnog napona  $u_i$  i pilastog napona  $u_{ramp}$  kvalitativno se razlikuju u ustaljenom stanju fazne zaključanosti, Slika 5.19a, i u kvaziperiodičnom ustaljenom stanju, Slika 5.19b. To znači da su valni oblici dovoljni za identifikaciju multistabilnosti. U ovom slučaju

multistabilnosti ustaljena su stanja nastala i različitim vrstama bifurkacija. Tako je ustaljeno stanje fazne zaključanosti ML11:1 nastalo bifurkacijom srazom granica (BC), a kvaziperiodično ustaljeno stanje QP3/4 nastalo je Hopfovom bifurkacijom (H).

Prikazani rezultati mjerenja od tehničkog su značaja, jer ova promjena ustaljenog stanja uzrokuje značajnu promjenu efektivne i vršne vrijednosti te valovitosti struje prigušnice. To je već detaljnije komentirano u odsječku 5.2.3. Također i izlazni se napon povećao u odnosu na nazivnu vrijednost. To je još jedna od nepovoljnih posljedica neregularnih ustaljenih stanja i analizirana je u Prilogu 4.

### Multistabilnost s četiri različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu

Multistabilnost iskazanu s četiri različita ustaljena stanja pri istom ulaznom naponu prikazuje Slika 5.20. Od toga, Slika 5.20a, b, c prikazuje ustaljena stanja nastala smanjivanjem ulaznog naponu, a Slika 5.20d prikazuje ustaljena stanja nastala povećavanjem ulaznog naponu.



Slika 5.20 Multistabilnost na  $E = 11,0$  V pri čemu su: a) Ustaljeno stanje osnovne periode, b) Ustaljeno stanje osnovne periode s predznakom kvaziperiodičnosti i c) Kvaziperiodično ustaljeno stanje QP4/5 dobiveni smanjivanjem ulaznog naponu, a d) Kvaziperiodično ustaljeno stanje QP13/14 dobiveno je povećavanjem ulaznog naponu.

Prikazana ustaljena stanja nisu mjerena istog dana. Sva su ustaljena stanja prikazana s istim osjetljivostima kako bi se naglasila promjena amplitude pri promjeni ustaljenog stanja. Karakteristične vrijednosti napona i struja za ta četiri različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu  $E = 11,0 \text{ V}$  uspoređene su u tablici 5.7.

Smanjivanjem ulaznog napona na vrijednost  $E = 11,0 \text{ V}$  dobiveno je ustaljeno stanje osnovne periode. Drugom prilikom, smanjivanjem ulaznog napona na vrijednost  $E = 11,0 \text{ V}$  dobiveno je ustaljeno stanje osnovne periode s predznakom kvaziperiodičnosti. U tom ustaljenom stanju valni oblici izgledaju prividno jednako kao u ustaljenom stanju osnovne periode. Zato su uvećano prikazani samo napon kondenzatora i struja prigušnice. Slika 5.11 daje više prikaza za identifikaciju ovog ustaljenog stanja. Trećom prilikom, smanjivanjem ulaznog napona na vrijednost  $E = 11,0 \text{ V}$  dobiveno je kvaziperiodično ustaljeno stanje rotacijskog broja između 4:1 i 5:1.

Tablica 5.7. Izmjerene veličine za dva različita ustaljena stanja na istom ulaznom naponu s kapacitetom trošila  $C_d = 255 \text{ }\mu\text{F}$  pri ulaznom naponu  $E = 11,0 \text{ V}$ .

| Ulazni napon, $E$ | Smjer promjene  | Ustaljeno stanje | Bifurkacija | Izlazni napon $U_d(0)$ | $I_L$   | $\tilde{I}_L$ |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------|------------------------|---------|---------------|
| 11,0 V            | Smanjivanje $E$ | 1P               | -           | 20,05 V                | 580 mA  | 192 mA        |
|                   | Smanjivanje $E$ | 1P + QP          | (H)         | 20,05 V                | 600 mA  | 192 mA        |
|                   | Smanjivanje $E$ | QP4/5            | H           | 20,07 V                | 608 mA  | 250 mA        |
|                   | Povećavanje $E$ | QP13/14          | BC          | 20,37 V                | 1258 mA | 998 mA        |

Povećavanjem ulaznog napona na vrijednost  $E = 11,0 \text{ V}$  dobiveno je kvaziperiodično ustaljeno stanje rotacijskog broja između 13:1 i 14:1. To je ustaljeno stanje od posebnog značaja, jer je nastalo bifurkacijom srazom granica pa su valovitost, efektivna i vršna vrijednost struje prigušnice i napona kondenzatora znatno veće nego u prethodna tri ustaljena stanja i detaljnije je komentirano u odsječku 5.2.3.

#### **b) Multistabilnost identificirana povećavanjem i smanjivanjem ulaznog napona različitim brzinom**

Primijećeno je da mijenjanje ulaznog napona različitim brzinom također utječe na pojavu multistabilnosti. Utjecaj brzine promjene ulaznog napona na ustaljeno stanje takav je da se pri određivanju skupa svih ustaljenih stanja u zadanom intervalu ulaznih napona (tipično

$E = 8 - 12 \text{ V}$ ) redovito dobivaju različiti sljedovi ustaljenih stanja. To je karakteristično svojstvo toliko jako nelinearnog odnosno multistabilnog sustava, ali je protuintuitivno. Naime, električki se uređaji grade tako da se sa stajališta korisnika ponašaju predvidivo [38]. Nepredvidivo ponašanje pretvarača usporava mjerenje i otežava ponovljivost rezultata. Zato se pri zahtijevanju ponovljivosti rezultata treba prednost dati kvalitativnim, a ne kvantitativnim rezultatima. U cilju veće ponovljivosti rezultata mjerenja, određeno je da se ulazni napon mijenja brzinom manjom od  $0,1 \text{ V/min}$ . Donja granica brzine promjene ulaznog napona nije strogo zadana, jer identifikacija ustaljenog stanja i spremanje podataka traju različito za svaki ulazni napon. Tako su rezultati tablica P3.1a i b dobiveni uz brzinu promjene ulaznog napona manju od  $0,1 \text{ V/min}$ .

Zajedno s multistabilnošću pojavljuje se i histereza ustaljenih stanja. Primjer histereze nastale pri promjeni ulaznog napona brzinom reda  $\sim 0,3 \text{ V/s}$  i brzinom reda  $\sim 1 \text{ V/min}$  pokazan je u odsječku 5.3.4 u tablici 5.9.

### c) Multistabilnost identificirana bez mijenjanja ulaznog napona

Jedan primjer ove multistabilnosti već prikazuje Slika 5.20a, b, c. Sva se tri ustaljena stanja nastala smanjivanjem ulaznog napona mogu dobiti na istom ulaznom naponu i bez njegovog mijenjanja uz dovoljno dugo čekanje da se ustaljeno stanje pretvarača promijeni zbog temperaturne osjetljivosti pretvarača.

Veći broj primjera ove multistabilnosti može se pronaći Prilogu 3 u tablici P3.1. Na nekim su ulaznim naponima identificirana dva različita ustaljena stanja. Tablica 5.8 prikazuje isječak iz tablice P3.1a za ulazni napon  $E = 8,2 \text{ V}$ . Navedeno je da je pretvarač na istom ulaznom naponu radio najprije u ustaljenom stanju fazne zaključanosti 17:1, a zatim „sam od sebe“ nastavio raditi u ustaljenom stanju fazne zaključanosti 18:1.

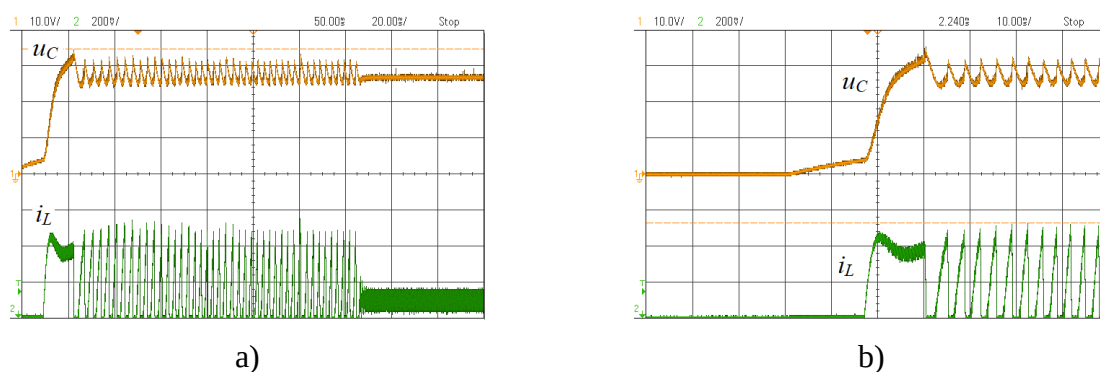
Primjer iz tablice 5.8 može biti zanimljiv sa znanstvenog stajališta, ali nije od tehničkog značaja, jer promjena ustaljenog stanja ne uzrokuje značajniju promjenu efektivne i vršne vrijednosti te valovitosti struje prigušnice. S druge strane, takva se promjena može dogoditi i u blizini bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica. Tada bi došlo do značajnijih promjena efektivne i vršne vrijednosti te valovitosti struje prigušnice opisanih u odsječku 5.2.3.

Tablica 5.8 Primjer multistabilnosti bez mijenjanja ulaznog napona identificirane mjerenjem.

| Ustaljeno stanje | $E, \text{ V}$ | $U_d(0), \text{ V}$ | $U_{dpp}, \text{ V}$ | $i_{Lpp}, \text{ A}$ | $I_L(0), \text{ A}$ | $\tilde{I}_L, \text{ A}$ | $f, \text{ Hz}$ |
|------------------|----------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|-----------------|
| ML17, ML18       | 8,2            | 19,92               | 3,4                  | 2,79                 | 1,160               | 1,060                    | 111             |

#### d) Multistabilnost identificirana pri uključenjima pretvarača na isti ulazni napon

Tijekom uključivanja pretvarača na ulazni napon u rasponu vrijednosti ulaznog napona na kojima se pojavljuje Hopfova bifurkacija ili bifurkacija srazom granica, a u dovoljno malenoj okolini bifurkacijskih točaka, utvrđeno je da se za isti ulazni napon mogu pojaviti različita ustaljena stanja. Dovoljno malena okolina je reda veličine  $\pm 100$  mV. Primjer ove multistabilnosti prikazuje Slika 5.21, a snimljena je za pretvarač parametara  $E = 10,0$  V,  $U_d(0) = 26,8$  V,  $T_{\text{ramp}} = 200$   $\mu$ s,  $L = 1,08$  mH/0,7  $\Omega$ ,  $C_d = 100$   $\mu$ F,  $R_d = 89,2$   $\Omega$ .



Slika 5.21 Valni oblici pri uključenju pretvarača na  $E = 10,0$  V; a) Ustaljeno stanje osnovne periode, b) Kvaziperiodično ustaljeno stanje ili ustaljeno stanje fazne zaključanosti.

U uvodu je ovog poglavlja navedeno da su od posebnog interesa pojave koje utječu na gubitke komponenata pretvarača i pretvarača u cjelini, na strujna i naponska opterećenja pretvaračkih komponenata i valovitost napona trošila i struje izvora. Te se pojave odnose na bifurkacije srazom granica, a multistabilnosti „pomiče“ bifurkacijsku točku na kojoj se događa značajno povećanje efektivne i vršne vrijednosti struje prigušnice. Zato bi se pojava multistabilnosti pri uključenju pretvarača trebala identificirati tijekom projektiranja pa se zatim izbjeći promjenom parametara pretvarača. O utjecaju parametara pretvarača na pojavu bifurkacije srazom granica više u odsječku 5.4.2.

#### 5.3.3 Simulacijama identificirana multistabilnost

Simulacijama se predviđa pojava multistabilnosti samo u slučajevima histereze pri prvoj pojavi Neimark-Sackerove bifurkacije. Naime, bifurkacijski dijagrami simulirani pri smanjivanju i povećavanju ulaznog napona razlikuju se jedino oko bifurkacijske točke prve Neimark-Sackerove bifurkacije. Ta je razlika prikazana u odsječku 5.3.5.

U rezultatima mjerenja naveden je utjecaj temperature kao jedan od presudnih faktora za pojavu multistabilnosti. U predloženom matematičkom modelu pretvarača temperaturna zavisnost nije modelirana.

Promjenom početnih uvjeta nije se iskazala multistabilnost pretvarača osim tijekom generiranja matematičkog modela pretvarača opisanom u Prilogu 2. Osim promjene početnih uvjeta, nijedan drugi način promjene parametara matematičkog modela pretvarača nije primijenjen kako bi se potaknulo iskazivanje multistabilnosti pretvarača.

Jedan od mogućih smjerova budućih istraživanja je i usložnjavanje matematičkog modela kako bi se otkrio parametar, odnosno kombinacija parametara koji dovode do multistabilnosti.

#### 5.3.4 Eksperimentalno identificirana histereza

Eksperimentalno su utvrđene histereze ustaljenih stanja uzrokovane različitim smjerom promjene ulaznog napona pretvarača. Pored toga, utvrđeno je da brzina promjene ulaznog napona utječe na širinu histereze.

##### Histereze ustaljenih stanja s obzirom na ulazni napon pretvarača

Identificirane su tri različite vrste histereze ustaljenih stanja:

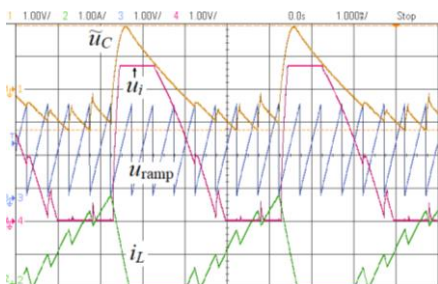
- Histereza iz ustaljenog stanja osnovne periode u ustaljeno stanje uzrokovano Hopfovom bifurkacijom (1P-H).
- Histereza iz ustaljenog stanja uzrokovano Hopfovom bifurkacijom u ustaljeno stanje uzrokovano bifurkacijom srazom granica (H-BC).
- Histereza između različitih ustaljenih stanja u području Hopfovih bifurkacija i u području bifurkacija srazom granica.

Histerezu iz ustaljenog stanja osnovne periode (1P) u ustaljeno stanje uzrokovano Hopfovom bifurkacijom (H) i histerezu iz ustaljenog stanja uzrokovano Hopfovom bifurkacijom u ustaljeno stanje uzrokovano bifurkacijom srazom granica (BC) prikazuju Slika 5.22 i tablica 5.9. Obje su histereze snimljene za parametre pretvarača  $E = 8,2 - 8,5 \text{ V}$ ,  $U_d(0) = 20 \text{ V}$ ,  $L = 2,37 \text{ mH} / 0,62 \Omega$ ,  $C_d = 165 \mu\text{F}$ ,  $R_d = 81 \Omega$ . Uočljivo je da je za oba smjera promjene ulaznog napona pretvarač iskazao ista ustaljena stanja i iste bifurkacije, ali na različitim vrijednostima bifurkacijskog parametra (ulaznog napona), a to je obilježje histereze. Slijedovi ustaljenih stanja i bifurkacija pri smanjivanju ulaznog napona su *ustaljeno stanje osnovne periode*  $\rightarrow$  *kvaziperiodično ustaljeno stanje rotacijskog broja između 3:1 i 4:1* nastalo Hopfovom bifurkacijom  $\rightarrow$  *ustaljeno stanje fazne zaključanosti rotacijskog broja 8:1* nastalo bifurkacijom srazom granica. Od posebnog je interesa histereza koja nastupa na prvoj bifurkaciji srazom

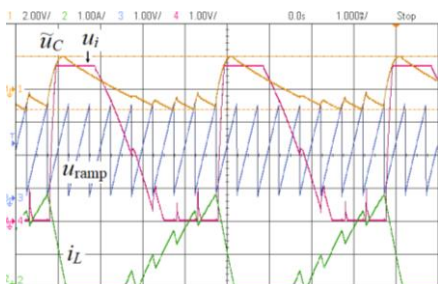
granica. Tada dolazi do značajnog povećanja efektivne i vršne vrijednosti struje prigušnice, kao i valovitosti. To je opisano u odsječku 5.2.3. Dodatni primjeri histereza 1P-H i H-BC mogu se pronaći u tablici 5.3, odnosno u prilogima u tablici P3.1.

#### Povećavanje ulaznog napona

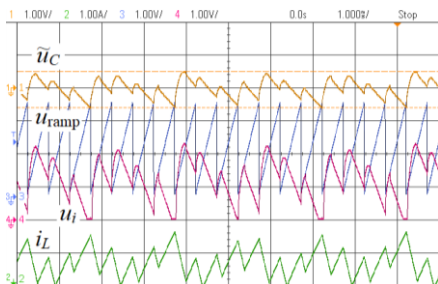
$E = 8,2 \text{ V}$  ML 8:1



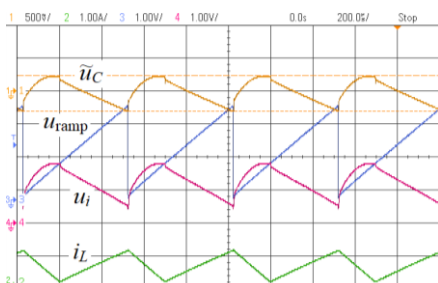
$E = 8,3 \text{ V}$  ML 8:1



$E = 8,4 \text{ V}$  QP3/4



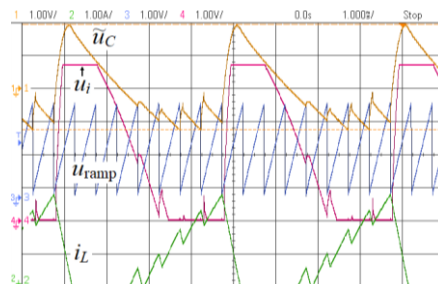
$E = 8,5 \text{ V}$  1P



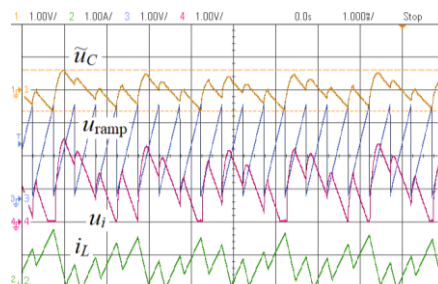
a)

#### Smanjivanje ulaznog napona

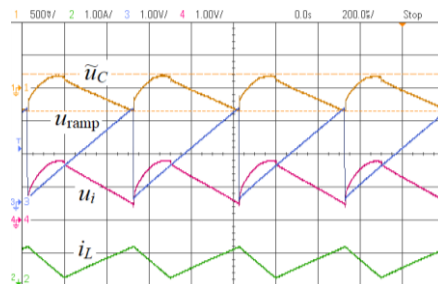
$E = 8,2 \text{ V}$  ML 8:1



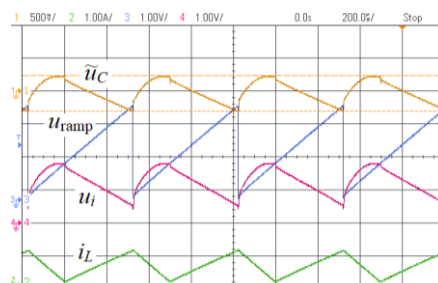
$E = 8,3 \text{ V}$  QP3/4



$E = 8,4 \text{ V}$  1P



$E = 8,5 \text{ V}$  1P



b)

Slika 5.22 Histereze pri pojavi Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica uz: a) Povećavanje ulaznog napona, b) Smanjivanje ulaznog napona.

Tablica 5.9 Histereze pri promjeni: a) Ustaljenog stanja osnovne periode u ustaljeno stanje uzrokovano Hopfovom bifurkacijom i b) Ustaljenog stanja uzrokovnog Hopfovom bifurkacijom u ustaljeno stanje uzrokovano bifurkacijom srazom granica.

|                               |                     |                                                                                                                  |                                                                                                                  |                     |                               |
|-------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Povećavanje<br>ulaznog napona | $E = 8,2 \text{ V}$ | $E = 8,3 \text{ V}$                                                                                              | $E = 8,4 \text{ V}$                                                                                              | $E = 8,5 \text{ V}$ |                               |
|                               | BC                  |                                                                                                                  | H                                                                                                                | 1P                  |                               |
|                               |                     | Širina<br>histereze<br>H-BC<br> | Širina<br>histereze<br>1P-H<br> |                     |                               |
|                               | BC                  | H                                                                                                                | 1P                                                                                                               |                     | Smanjivanje<br>ulaznog napona |
|                               | $E = 8,2 \text{ V}$ | $E = 8,3 \text{ V}$                                                                                              | $E = 8,4 \text{ V}$                                                                                              | $E = 8,5 \text{ V}$ |                               |

Histereze između različitih ustaljenih stanja u području Hopfovih bifurkacija i u području bifurkacija srazom granica nisu od tehničkog značaja pa se njima neće posvetiti poseban prostor. Brojni primjeri tih histereza mogu se također pronaći u tablici P3.1. Radi potpunosti bit će navedena i histereza iz jednog periodičnog ustaljenog stanja u drugo periodično ustaljeno stanje u području bifurkacija udvostručenja periode. Te su histereze tipično reda veličine desetaka milivolti, nisu od interesa u ovoj disertaciji i neće se prikazati.

## Utjecaj brzine promjene ulaznog napona na širinu histereze

Utjecaj brzine promjene ulaznog napona na širinu histereze izmjeren je u pretvaraču parametara  $U_d(0) = 27,0 \text{ V}$ ,  $T_{\text{ramp}} = 200 \text{ }\mu\text{s}$ ,  $L = 1,08 \text{ mH}/0,7 \text{ }\Omega$ ,  $C_d = 100 \text{ }\mu\text{F}$ ,  $R_d = 89,2 \text{ }\Omega$ . Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5.10.

Pri obje brzine mijenjanja ulaznog napona pretvarač prelazi iz ustaljenog stanja osnovne periode (1P) u područje kvaziperiodičnih ustaljenih stanja (QP, K) uključujući i ustaljeno stanje fazne zaključanosti. Pri sporom mijenjanju ulaznog napona ( $\sim 1 \text{ V/min}$ ) širina histereze za bifurkacijsku točku prve bifurkacije srazom granica je 2 V, a pri brzom mijenjanju ulaznog napona ( $\sim 0,3 \text{ V/s}$ ) širina histereze za bifurkacijsku točku prve bifurkacije srazom granica je 0,5 V. Pri brzom smanjivanju ulaznog napona identificirana je i Hopfova bifurkacija (H). Pojava Hopfove bifurkacije komentirana je u odsječku 5.3.2a. Ovisnost histereze i multistabilnosti o brzini promjene ulaznog napona znatno usporava identifikaciju ovih pojava kao i ustaljenih stanja.

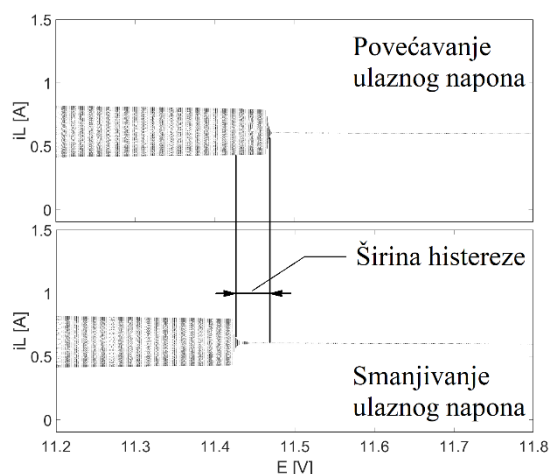
Tablica 5.10 Histereza pri sporom i brzom mijenjanju ulaznog napona.

| <b>Sporo mijenjanje ulaznog napona <math>\sim 1</math> V/min</b>               |                          |             |                            |  |              |              |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------|--|--------------|--------------|
| Širina histereze za bifurkacijsku točku prve bifurkacije srazom granica je 2 V |                          |             |                            |  |              |              |
| $E = 7$ V                                                                      | $Povećavanje E \uparrow$ |             |                            |  | $E = 10,3$ V | $E \uparrow$ |
| QP $\sim 20:1$                                                                 | QP + K                   |             | QP $\sim 14:1$             |  | 1P           |              |
| QP + K                                                                         | QP $\sim 17:1$           |             | 1P                         |  |              |              |
| $E = 7$ V                                                                      | $E \downarrow$           | $E = 8,3$ V | $Smanjivanje E \downarrow$ |  |              |              |

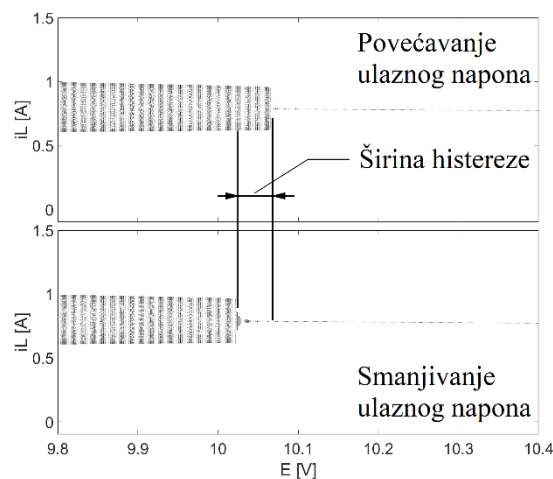
| <b>Brzo mijenjanje ulaznog napona <math>\sim 0,3</math> V/s</b>                  |                            |  |                |                |                   |                |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| Širina histereze za bifurkacijsku točku prve bifurkacije srazom granica je 0,5 V |                            |  |                |                |                   |                |
| $E = 7$ V                                                                        | $Povećavanje E \uparrow$   |  |                |                | $E = 10,5$ V      | $E \uparrow$   |
| QP $\sim 20:1$                                                                   | QP + K                     |  | QP $\sim 14:1$ |                | 1P                |                |
| QP + K                                                                           | QP $\sim 17:1$             |  | QP - H         |                | 1P                |                |
| $E = 7$ V                                                                        | $Smanjivanje E \downarrow$ |  | $E = 10,0$ V   | $E \downarrow$ | $\sim E = 10,5$ V | $E \downarrow$ |

### 5.3.5 Simulacijama identificirana histereza

Usporedbom bifurkacijskih dijagrama dobivenih simulacijom uz povećavanje ulaznog napona i uz smanjivanje ulaznog napona mogu se temeljem različitih vrijednosti napona bifurkacijskih točaka identificirati histereze ustaljenih stanja.



a)



b)

Slika 5.23 Uvećan prikaz oko bifurkacijske točke prve Neimark-Sackerove bifurkacije u bifurkacijskom dijagramu  $i_L = f(E)$  pri povećavanju i smanjivanju ulaznog napona za: a) odabrani matematički model pretvarača (Slika 5.1). b) nužni matematički model pretvarača prikazan u Prilogu 2, Slika P 2.7.

U rezultatima simulacije ne pojavljuje se histereza za prvu bifurkacijsku točku bifurkacije srazom granica, a histereza za prvu bifurkacijsku točku Neimark-Sackerove bifurkacije se pojavljuje.

Pokazat će se kolika je širina histereze za prvu bifurkacijsku točku Neimark-Sackerove bifurkacije za dva matematička modela pretvarača. Jedan je model onaj prema kojem su obavljene sve simulacije u ovoj disertaciji. Pripadnu histerezu prikazuje Slika 5.23a. Drugi je model jednostavniji model nastao tijekom matematičkog modeliranja pretvarača i pripadnu histerezu prikazuje Slika 5.23b. Za oba će se modela pretvarača u tablici 5.11 usporediti širina histereze dobivena rezultatima simulacije i mjerenja.

Vidi se da je u simulacijama dobivena histereza reda veličine desetaka milivolti, a u mjerenjima je širina jednaka najmanjem koraku promjene ulaznog napona  $\Delta E = 100 \text{ mV}$ .

Tablica 5.11 Bifurkacijske točke i širine histereze za bifurkacije koje uzrokuju pojavu kvaziperiodičnog ustaljenog stanja.

|                                       |                  | Bifurkacija srazom granica | Hopfova ili Neimark-Sackerova bifurkacija |
|---------------------------------------|------------------|----------------------------|-------------------------------------------|
| Rezultati mjerenja iz Tablice 5.3a    | Ulazni napon     | 9,9 – 11,2 V               | 11,1 V – Nema bifurkacije                 |
|                                       | Širina histereze | 1,3 V                      | -                                         |
| Rezultati mjerenja iz Tablice 5.3b    | Ulazni napon     | 9,6 – 10,8 V               | 11,1 V                                    |
|                                       | Širina histereze | 1,2 V                      | 0 – 0,1 V                                 |
| Rezultati simulacije odabranog modela | Ulazni napon     | 9,3 V                      | 11,42 – 11,46 V                           |
|                                       | Širina histereze | 0                          | 40 mV                                     |
| Rezultati simulacije polaznog modela  | Ulazni napon     | 8,14 V                     | 9,99 – 10,08 V                            |
|                                       | Širina histereze | 0                          | 90 mV                                     |

### 5.3.6 Zaključna razmatranja o multistabilnosti i histerezi ustaljenih stanja

Pokazana su četiri načina postizanja multistabilnosti mjerenjem. Iskustveno pravilo pokazalo je da ako se multistabilnost manifestira na jedan od ova četiri opisana načina, onda se manifestira i na preostala tri načina. Multistabilnost promatranog uzlaznog pretvarača uočena je u cijelom području kvaziperiodičnosti pretvarača. Simulacijama je uspješno reproducirana pojava multistabilnosti samo u slučajevima histereze pri prvoj pojavi Neimark-Sackerove bifurkacije. Identificiranje multistabilnosti eksperimentalnim putem vremenski je zahtjevno. Iako se zna da bi na nekom ulaznom naponu mogla nastupiti promjena ustaljenog stanja, ne zna se kad će nastupiti.

Pokazana su tri načina postizanja histereze mjerenjem. Uočljive su kvalitativne i kvantitativne razlike između rezultata mjerenja i rezultata simulacije. Histereza se u rezultatima simulacije pojavljuje samo za prvu Neimark-Sackerovu bifurkaciju, a ne i za ostale Neimark-Sackerove bifurkacije i bifurkaciju srazom granica. U rezultatima mjerenja za tablicu 5.3b navedeno je da nema histereze pri pojavi prve Neimark-Sackerove bifurkacije. To treba uzeti s rezervom, zato što se tijekom mjerenja pokazalo da širina histereze i područje multistabilnosti ovise o brzini promjene ulaznog napona. Iako je općepoznato da multistabilnost i histereza ovise o početnim uvjetima, to je teško provjeriti mjerenjem uz kontrolirano namještanje početnih uvjeta, jer bi traebalo dizajnirati poseban uređaj za namještanje početnih uvjeta uzlaznog pretvarača i taj bi uređaj morao biti sinkroniziran s izvorom ulaznog napona. Uz to, mjerenjem je identificirana zavisnost širine histereze o brzini promjene ulaznog napona, a matematički model pretvarača takvu zavisnost ne predviđa.

U radovima drugih istraživača, praktički ni nema mjerenja širine histereze pri pojavi bifurkacija koje uzrokuju kvaziperiodičnost. U jednom netipičnom pretvaraču izmjerena je širina histereze Hopfove (Neimark-Sackerove) bifurkacije oko 100 mV [68]. Mjerenje širine histereze otežano je i zato što temperaturne promjene u pretvaraču uzrokuju pomake bifurkacijskih točaka za red veličine 100 mV, a to je često veće od širine histereze pa je mjerna nesigurnost reda veličine kao i sama mjerena veličina. Dodatno, ovisnost histereze i multistabilnosti o brzini promjene ulaznog napona znatno otežava identifikaciju ovih pojava. Svemu tomu treba pridodati nepoznat i nemodeliran utjecaj temperature na pretvarač.

Nove vrste slijedova u području multistabilnosti pretvarača uspješno se predviđaju matematičkim modelom pretvarača i verificirane su na fizičkom modelu pretvarača. Kvaziperiodično ustaljeno stanje nastalo bifurkacijom srazom granica kao i cijeli slijed ustaljenih stanja u području kvaziperiodičnosti pretvarača do sada nisu zabilježeni u literaturi za istosmjerni uzlazni pretvarač.

Matematičkim modelom pretvarača uspješno se predviđa histereza u bifurkacijskoj točki prve Hopfove (Neimark-Sackerove) bifurkacije. Neuspješno je predviđanje histereze u bifurkacijskoj točki prve bifurkacije srazom granica. Neuspješno je i predviđanje multistabilnosti. Uspješno je, i tehnički važno, predviđanje naglog povećanja struje prigušnice u bifurkacijskoj točki prve bifurkacije srazom granica. Jedan od smjerova budućih istraživanja može biti usložnjavanje matematičkog modela kako bi se otkrio parametar, odnosno kombinacija parametara koji dovode do pojave histereze za bifurkacijsku točku bifurkacije srazom granica.

## 5.4 Bifurkacija srazom granica

Pri pojavi bifurkacija srazom granica dolazi do promjene slijeda sklapanja ventila V1 i V2. Prema radu [21] to je dovoljan uvjet za identifikaciju bifurkacije srazom granica i za razlikovanje te bifurkacije od standardnih bifurkacija. Pri pojavi standardnih bifurkacija kao što su Hopfova bifurkacija i bifurkacija udvostručenjem periode ne dolazi do promjene ishoda uvjeta sklapanja ventila V1 i V2. Samim tim ne dolazi ni do promjene slijeda sklapanja ventila V1 i V2.

Pokazat će se kako nastaje bifurkacija srazom granica koja uzrokuje pojavu kvaziperiodičnog ustaljenog stanja. Time će se ujedno pokazati i kako se temeljem odnosa upravljačkih signala i signala nosioca može identificirati vrsta ustaljenih stanja. Zatim će se pokazati kako izbjeći ili odgoditi bifurkaciju srazom granica.

### 5.4.1 Mehanizam bifurkacije srazom granica

Pod mehanizmom bifurkacije srazom granica podrazumjevat će se uvjet nastanka bifurkacije srazom granica i slijed pojava tijekom kojeg će se taj uvjet dogoditi.

#### Uvjet nastanka bifurkacije srazom granica

Ponovno će se prikazati shema spoja matematičkog modela naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača, Slika 5.24.

Ventil V2 vodi ako je ispunjen jedan od dva uvjeta

$$U_{dt} + E_{\text{ramp}} > u_{\text{ramp}} \quad (5.1)$$

ili

$$u_i > u_{\text{ramp}} \quad (5.2)$$

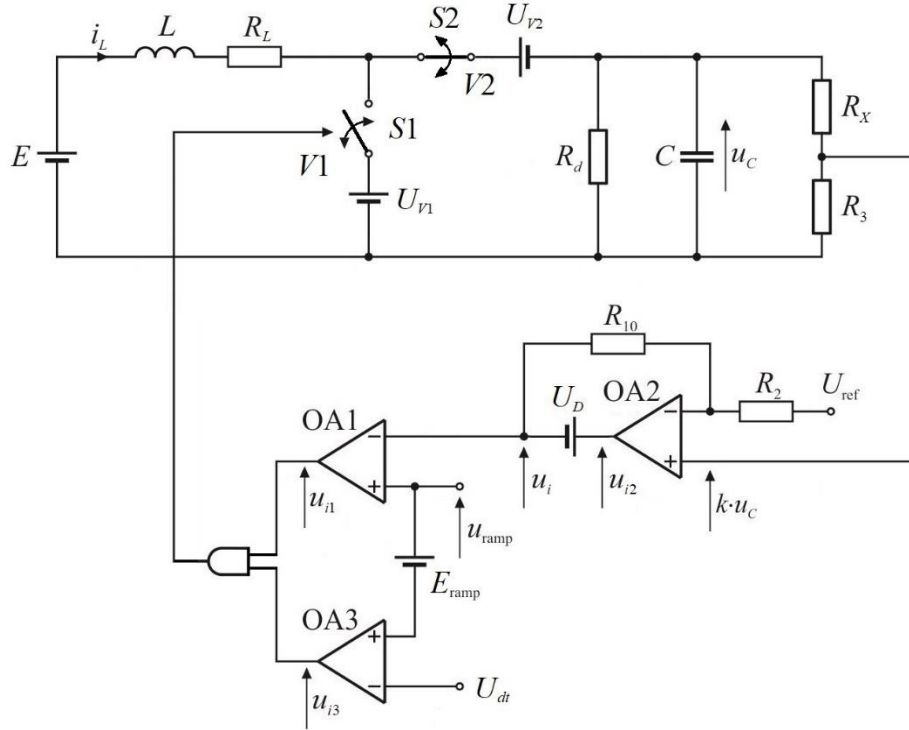
Napon mrtvog vremena  $U_{dt}$  i komparator mrtvog vremena OA3 uvedeni su da bi se osiguralo pulsno-širinsko upravljanje. Tako ventil V2 vodi u svakoj periodi pilastog napona počevši od trenutka kad je pilasti napon na minimumu pa najmanje dok se ne ispuni uvjet

$$u_{\text{ramp}} = U_{dt} + E_{\text{ramp}} \quad (5.3)$$

To se trajanje vođenja naziva mrtvo vrijeme  $t_{dt}$ . Mrtvo vrijeme određuje najkraće trajanje vođenja ventila

$$T_{V2,m} = t_{dt} \quad (5.4)$$

odnosno maksimalni faktor vođenja  $\alpha_M$ . Slika 5.25 prikazuje vremenske odnose trajanja vođenja ventila V1 i V2 kad je trajanje vođenja ventila V2 jednako mrtvom vremenu, odnosno kad je ispunjen uvjet (5.1).



Slika 5.24 Shema spoja matematičkog modela naponski upravljanog istosmjernog uzlaznog pretvarača

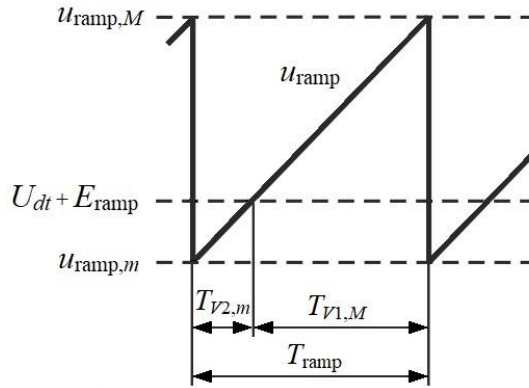
Maksimalni faktor vođenja je

$$\alpha_M = \frac{T_{V1,M}}{T_{\text{ramp}}} \quad (5.5)$$

i može se odrediti iz sličnosti trokuta

$$\frac{T_{V1,M}}{T_{\text{ramp}}} = \frac{u_{\text{ramp},M} - (U_{dt} + E_{\text{ramp}})}{u_{\text{ramp},M} - u_{\text{ramp},m}} \quad (5.6)$$

Za zadane parametre pretvarača maksimalan faktor vođenja je  $\alpha_M = 0,8317$ , a mrtvo vrijeme  $t_{dt} = (1 - \alpha_M)T_{\text{ramp}} = 84,2 \mu\text{s}$ . U mrtvom se vremenu pilasti napon povećava s početne vrijednosti  $u_{\text{ramp},m} = E_{\text{ramp}} = 0,7 \text{ V}$  na vrijednost  $u_{\text{ramp}}(t_{dt}) = U_{dt} + E_{\text{ramp}} = 1,205 \text{ V}$ . Nakon toga je pilasti napon veći od napona  $U_{dt} + E_{\text{ramp}}$  sve do kraja periode pilastog napona pa ventil V2 može nastaviti voditi samo ako je ispunjen drugi uvjet njegovog vođenja (5.2).



Slika 5.25 Vremenski odnosi vođenja ventila za vrijeme maksimalnog faktora vođenja

Bit će pokazano da bifurkacija srazom granica nastaje kada se trajanje vođenja ventila V2 smanji na minimalnu vrijednost jednaku mrtvom vremenu odnosno kada se dogodi

$$u_i(t_{dt}) = U_{dt} + E_{ramp} \quad (5.7)$$

Tad prestaje vrijediti uvjet (5.2) i započinje prijelazno stanje koje vodi do bifurkacije srazom granica.

### Slijed pojava pri nastanku prve bifurkacije srazom granica

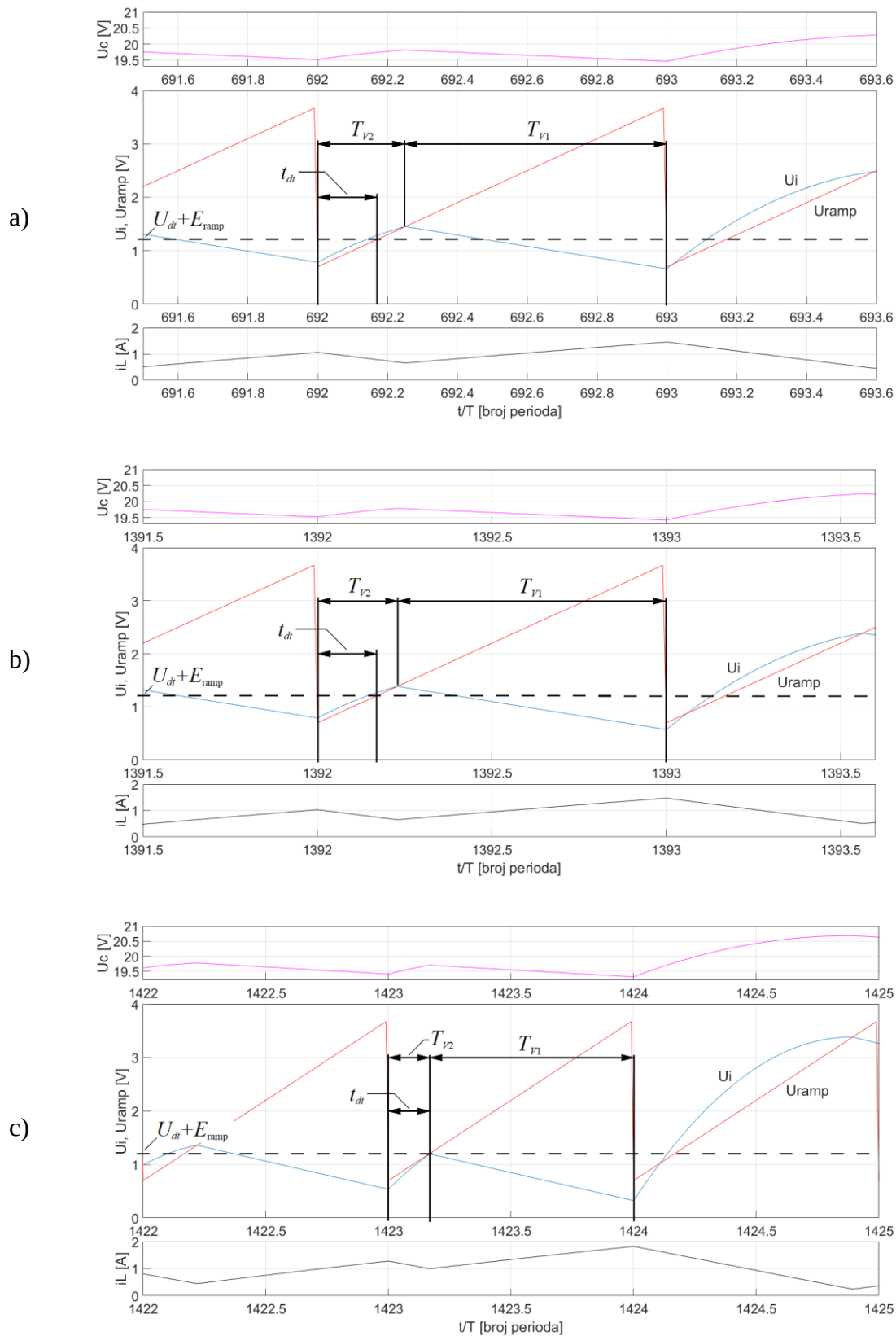
Karakteristične valne oblike pretvarača na ulaznim naponima u okolini bifurkacijske točke srazom granica prikazuje Slika 5.26. Smanjivanjem ulaznog napona kao sa Slika 5.26a i b smanjuje se trajanje vođenja ventila V2, ali se još nije smanjilo na vrijednost jednaku mrtvom vremenu pa bifurkacija srazom granica ne može nastupiti. U ustaljenom stanju osnovne periode i u području kvaziperiodičnosti uzrokovane Hopfovom bifurkacijom trajanje vođenja ventila V2 uvijek je veće od mrtvog vremena

$$T_{V2} > t_{dt} \quad (5.8)$$

Kako se ulazni napon smanjuje tako se prema rezultatima simulacija povećava valovitost napona kondenzatora, a time i valovitost kontrolnog napona  $u_i$ . Interval vođenja  $T_{V2}$  smanjuje se, jer se produljuje interval u kojem je kontrolni napon manji od pilastog napona. Kada se tijekom prijelaznog stanja prvi put dogodi da je

$$u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp} \quad (5.9)$$

tada za  $t > t_{dt}$  više neće biti ispunjen nijedan od uvjeta vođenja ventila V2 pa provede ventil V1. Time je narušen prethodni slijed sklapanja za koji je vrijedilo  $T_{V2} > t_{dt}$  i u kojem je i za  $t > t_{dt}$  još

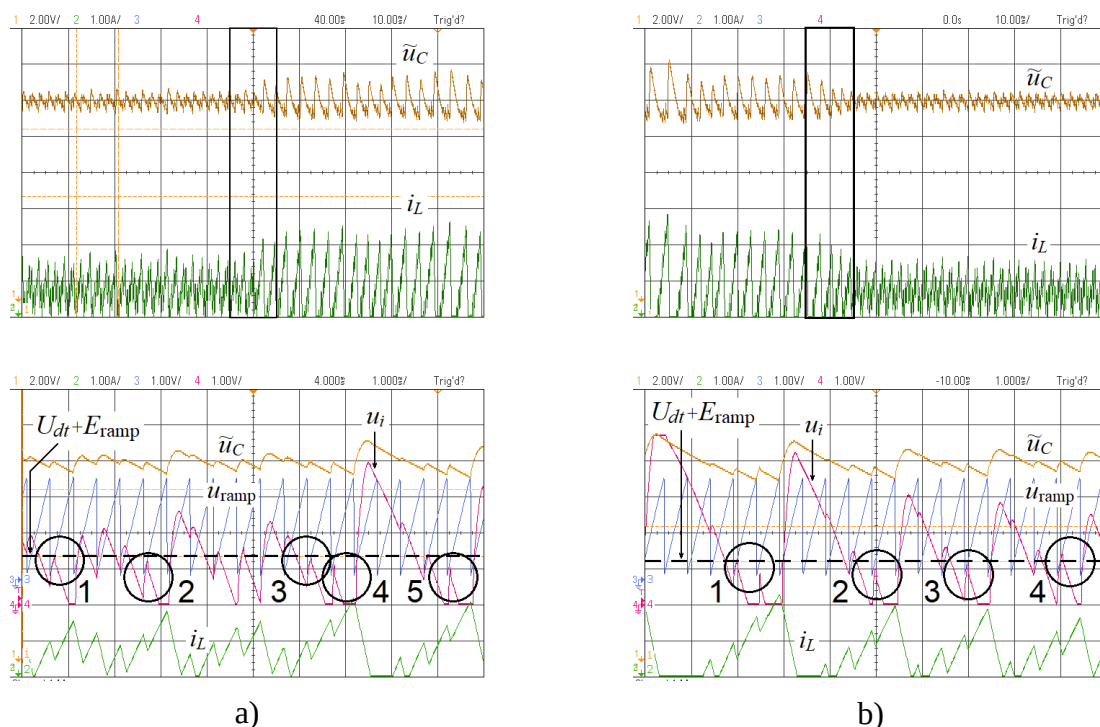


Slika 5.26 Uz opis bifurkacije srazom granica; a)  $E = 9,50$  V, ustaljeno stanje fazne zaključanosti 5:1,  $T_{V2} > t_{dt}$ ,  
b)  $E = 9,40$  V, ustaljeno stanje fazne zaključanosti 5:1,  $T_{V2} > t_{dt}$ , c) Promjena s  $E = 9,40$  V na  $E = 9,30$  V,  
prijelazno stanje,  $T_{V2} = t_{dt}$ .

neko vrijeme vodio ventil V2. Nastupa bifurkacija srazom granica. Slika 5.26c prikazuje upravo taj slučaj. Vidi se da za napone  $E > 9,30$  V vrijedi  $u_i(t_{dt}) > U_{dt} + E_{ramp}$  pa ventil V2 vodi osim intervala  $t_{dt}$  i još neko vrijeme nakon toga. Za napone  $E \leq 9,30$  V pojavljuju se intervali u kojima je  $T_{V2} = t_{dt}$ . Kako se ulazni napon smanjuje, slučajeva iz (5.9) sve je više, jer se valovitost kontrolnog napona povećava.

### Prijelazne pojave pri nastanku prve i posljednje bifurkacije srazom granica dobivene mjerenjem

Mjerenjem dobivene prijelazne pojave tijekom kojih nastupaju prva i posljednja bifurkacija srazom granica prikazuje Slika 5.27. Prikazan je slučaj pri smanjenju ulaznog napona - lijevo i pri povećanju ulaznog napona - desno. Parametri pretvarača su  $L = 2,37$  mH/0,62  $\Omega$ ,  $C_d = 165$   $\mu$ F, a promjena ulaznog napona je s  $E = 8,40$  V na  $E = 8,30$  V i s  $E = 8,30$  V na  $E = 8,40$  V.



Slika 5.27 Valni oblici pri pojavi bifurkacije srazom granica dobiveni mjerenjem; a) Promjena s  $E = 8,40$  V na  $E = 8,30$  V b) Promjena s  $E = 8,30$  V na  $E = 8,40$  V.

Prvo ispunjenje uvjeta  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  pri smanjivanju ulaznog napona, čime dolazi do prve bifurkacije srazom granica, snimljeno je tijekom prijelaznog stanja i prikazuje ga Slika 5.27a. Vidi se značajna promjena struje prigušnice i napona kondenzatora. Iz ovojnice valnih oblika struje prigušnice i napona kondenzatora može se steći dojam o veličini te promjene. Tako se struja prigušnice od vrha do vrha povećala za oko 60 %, a napona kondenzatora od vrha do vrha za oko

130 %. Kako bi se vidjeli prvi trenuci u kojima se ispunjava uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  uokvireni dio oscilograma uvećan je i prikazuje ga Slika 5.27a, dolje. Trenuci ispunjenja uvjeta  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  zaokruženi su i obrojčani. Vidi se da je u kružnicama 2, 4 i 5 ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  i taj se uvjet nastavlja ispunjavati i dalje, što znači da je nastupila bifurkacija srazom granica. Za kružnice 1 i 3, zbog nedovoljne rezolucije oscilograma nije sigurno je li ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ , ali to nije važno zato što je uvjet ispunjen u preostalim kružnicama.

Posljednje ispunjenje uvjeta  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  pri povećavanju ulaznog napona, čime dolazi do posljednje bifurkacije srazom granica, snimljeno je tijekom prijelaznog stanja i prikazuje ga Slika 5.27b. Opet se promatranjem ovojnica struje prigušnice i napona kondenzatora uočava njihova značajna promjena. Tako se struja prigušnice od vrha do vrha smanjila za oko 40 %, a napon kondenzatora od vrha do vrha za oko 68 %. Kako bi se vidjeli prvi trenuci u kojima se više ne ispunjava uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  uokvireni dio oscilograma uvećan je i prikazuje ga Slika 5.27b, dolje. Vidi se da je u kružnicama 1, 2 i 3 još uvijek ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ . U kružnici 4 više nije ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  i nakon toga više neće ni biti ispunjen. To je znak da je nastupila posljednja bifurkacija srazom granica i pretvarač nastavlja raditi u području kvaziperiodičnosti uzrokovanom Hopfovom bifurkacijom.

### **Identifikacija vrste ustaljenih stanja s temeljem odnosa upravljačkih signala i signala nosioca**

Važno je naglasiti da pojava kvaziperiodičnog ustaljenog stanja bifurkacijom srazom granica na naponski upravljanoj uzlaznoj pretvaraču nije pronađena u dostupnoj literaturi, kao ni kvaziperiodična ustaljena stanja nastala kombinacijama bifurkacije srazom granica i Hopfove bifurkacije. Mogući je razlog tomu što se nije upotrebljavao model pretvarača s mrtvim vremenom. Zato je i način nastanka bifurkacije srazom granica u vremenskom području drugačiji od do sada opisanih načina. U donjem području vrijednosti pilastog napona bifurkacija srazom granica tipično nastaje kad kontrolni napon prođe ispod minimalne vrijednosti pilastog napona  $u_{ramp,m}$ . U pretvaraču dodatno modeliranim naponom mrtvog vremena, a takav se razmatra u ovoj disertaciji, do bifurkacije dolazi kad je ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ .

Bifurkacija srazom granica pri povećanju ulaznog napona može se pojaviti u kombinaciji s bifurkacijom udvostručenja periode tijekom puta u kaos udvostručenjem periode [10]. Bifurkacija srazom granica pri smanjivanju ulaznog napona vodi u područje kvaziperiodičnosti kako je pokazano u disertaciji. Na tomu se temelji postupak određivanja vrste ustaljenih stanja pretvarača na osnovu odnosa upravljačkog signala i signala nosioca.

Tako kad pri povećanju ulaznog napona dođe do preskoka upravljačkog napona  $u_i$  preko pilastog napona zna se da je nastalo jedno od periodičnih ustaljenih stanja iz scenarija udvostručenja periode ili kaotično ustaljeno stanje. Kada se pak pri smanjenju ulaznog napona upravljački napon  $u_i$  smanji toliko da se ispuni uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$  pretvarač ulazi u područje kvaziperiodičnosti i nastaje ustaljeno stanje fazne zaključanosti, kvaziperiodično ustaljeno stanje ili kaotično ustaljeno stanje. Nastavkom bifurkacija srazom granica, dolazi do daljeg povećanja periode ustaljenog stanja - takozvanog pribrajanja periode [67].

#### 5.4.2 Izbjegavanje bifurkacije srazom granica

Znatno povećanje struje prigušnice pri pojavi bifurkacija srazom granica može uzrokovati kvar pretvarača ili skratiti njegov radni vijek. Zato je potrebno razmotriti načine izbjegavanja tih bifurkacija.

Sa signalom nosiocem  $u_{ramp}$  uspoređuju se dva signala. Jedan je kontrolni napon  $u_i$  kojim se ostvaruje regulacija napona trošila pretvarača. Drugi je konstantni napon  $U_{dt} + E_{ramp}$  kojim se osigurava opstojnost pulsno-širinskog upravljanja. Oba napona zajedno omogućavaju ispravan rad pretvarača i oba imaju funkciju upravljačkih signala.

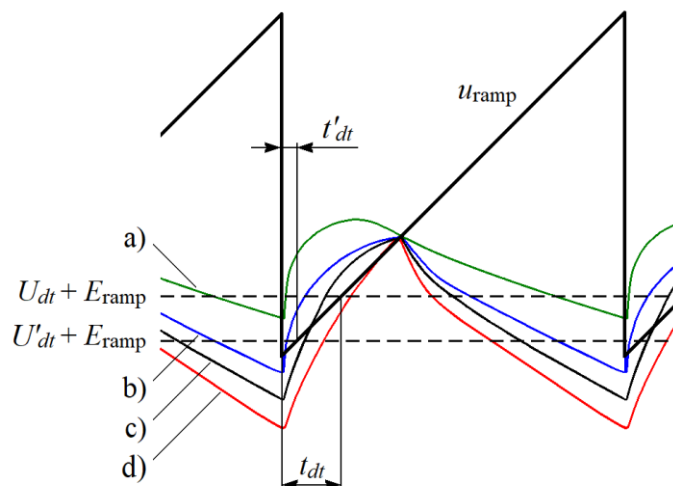
Neka je pretvarač u ustaljenom stanju osnovne periode i neka je bifurkacijski parametar ulazni napon. Tada kontrolni napon siječe okomiti brid pilastog napona. U općem slučaju, bifurkacija srazom granica nastaje pri promjeni ulaznog napona kad kontrolni napon prvi put prođe ispod ili iznad okomitog brida pilastog napona. Za izbjegavanje bifurkacija srazom granica dovoljno je smanjiti valovitost napona trošila, a time i valovitost kontrolnog napona. Metodu su u analizi pretvarača prvi primijenili Alarcon, El Aroudi i suradnici u radu [24] za naponom upravljani silazni pretvarač.

Disertacija se bavi bifurkacijom srazom granica u području kvaziperiodičnosti. U tom slučaju dolazi do bifurkacije kad je ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ , a ne dolazi kad kontrolni napon prođe ispod pilastog napona. Do bifurkacije bi i dalje moglo doći prolaskom kontrolnog napona iznad pilastog napona, ali se to ne može dogoditi prije nego što se ispuni uvjet određen naponom mrtvog vremena. Naime, promatrano kvaziperiodično ustaljeno stanje nastaje smanjenjem ulaznog napona, a to znači povećanjem faktora vođenja. Faktor vođenja manji je od 0,5 i srednja je vrijednost kontrolnog napona  $U_i(0)$  bliža vrijednosti  $U_{dt} + E_{ramp}$ , nego maksimalnoj vrijednosti pilastog napona, Slika 5.28. Zato će se prije ispuniti uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ , nego uvjet  $u_i(0) > u_{ramp,M}$ .

Pokazat će se načelno u kakvom bi odnosu trebali biti upravljački signali  $u_i$  i  $U_{dt} + E_{ramp}$  spram pilastog napona  $u_{ramp}$  da se bifurkacija srazom granica izbjegne.

## Smanjenje valovitosti izlaznog napona

Odnos upravljačkih signala  $u_i$  i  $U_{dt} + E_{ramp}$  spram pilastog napona  $u_{ramp}$  prikazuje Slika 5.28.



Slika 5.28 Bifurkacija srazom granica; a) ne može se dogoditi, b) za zadane napone mrtvog vremena  $U_{dt}$  i  $U'_{dt}$  ne može se dogoditi, c) dogoditi će se za napon mrtvog vremena  $U'_{dt}$ , d) dogoditi će se za oba napona mrtvog vremena  $U_{dt}$  i  $U'_{dt}$ .

Kontrolni napon  $u_i$  prikazan je krivuljama a, b, c i d za isti faktor vođenja i za ustaljeno stanje osnovne periode. Prikazane su i dvije granične vrijednosti napona mrtvog vremena  $U_{dt} + E_{ramp}$  i  $U'_{dt} + E_{ramp}$  za koje će se dogoditi bifurkacija srazom granica kada se ispuni uvjet za pripadni napon mrtvog vremena. Četiri su slučaja:

- Za kontrolni napon  $u_i$  ne može se dogoditi bifurkacija srazom granica.
- Za kontrolni napon  $u_i$  ne može se dogoditi bifurkacija srazom granica. Mogla bi se dogoditi u pretvaračima bez napona mrtvog vremena.
- Za kontrolni napon  $u_i$  može se dogoditi bifurkacija srazom granica, ako je napon mrtvog vremena jednak vrijednosti  $U'_{dt}$ , jer je ispunjen uvjet  $u_i(t'_{dt}) < U'_{dt} + E_{ramp}$ . Ne može se dogoditi bifurkacija srazom granica ako je napon mrtvog vremena jednak vrijednosti  $U_{dt}$ , jer nije ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ .
- Za kontrolni napon  $u_i$  može se dogoditi bifurkacija srazom granica, ako je napon mrtvog vremena jednak vrijednosti  $U'_{dt}$ , jer je ispunjen uvjet  $u_i(t'_{dt}) < U'_{dt} + E_{ramp}$ . Može se dogoditi bifurkacija srazom granica i ako je napon mrtvog vremena jednak vrijednosti  $U_{dt}$ , jer je ispunjen uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{ramp}$ .

U slučaju d) veća je valovitost  $\Delta u_i$  kontrolnog napona (vrijednost od vrha do vrha), nego u slučaju c) pa iz prethodno navedenog slijedi da će se pri istom ulaznom naponu prije dogoditi bifurkacija srazom granica, ako je valovitost izlaznog napona veća.

Na manjem naponu mrtvog vremena  $U'_{dt}$  dogodit će se bifurkacija srazom granica u dva slučaja, a na većem naponu mrtvog vremena  $U_{dt}$  dogodit će se bifurkacija srazom granica u jednom slučaju. Slijedi da će se pri istom ulaznom naponu prije dogoditi bifurkacija srazom granica ako je napon mrtvog vremena manji. Odnosno, ako se napon mrtvog vremena poveća, smanjit će se napon prve bifurkacijske točke bifurkacije srazom granica.

Valovitost  $\Delta u_i$  može se izaziti prema izrazu (3.24) kao

$$\Delta u_i = \left(1 + \frac{R_{10}}{R_2}\right) \frac{R_3}{R_3 + R_x} \Delta u_c \quad (5.10)$$

Slijedi da se bifurkacije srazom granica mogu izbjeći ili odgoditi smanjenjem valovitosti kontrolnog napona, odnosno izlaznog napona pretvarača (napona kondenzatora). Karakteristike ovakvog pristupa izbjegavanja bifurkacija srazom granica su:

- Ako pretvarač ne radi u ustaljenom stanju osnovne periode, nego u nekom drugom ustaljenom stanju i dalje vrijedi načelo da valovitost treba biti što manja.
- Čak i ako bifurkacija srazom granica nastupa kad je ispunjen uvjet  $u_i(0) < u_{\text{ramp},M}$  a ne uvjet  $u_i(t_{dt}) < U_{dt} + E_{\text{ramp}}$  i dalje vrijedi načelo da valovitost treba biti što manja.
- Valni oblik napona trošila, a time i kontrolnog napona ovisi o nadomjesnom otporu kondenzatora  $R_C$ , koji ne mora biti poznat. Dodatno, na tom nadomjesnom otporu moguć je skok napona pa napon realnog trošila ima veću valovitost od napona trošila pripadnog matematičkog modela.

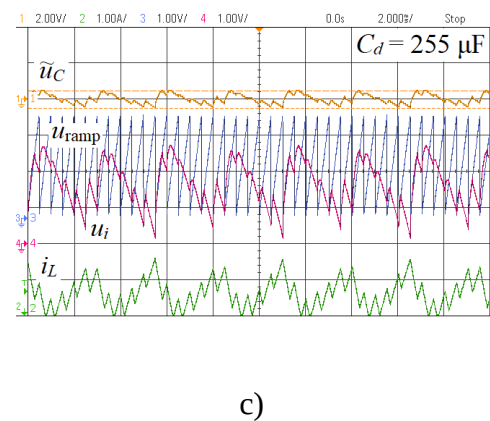
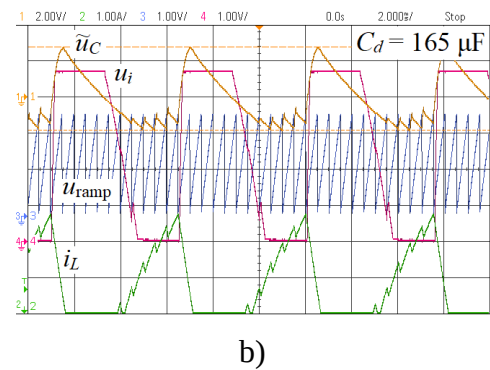
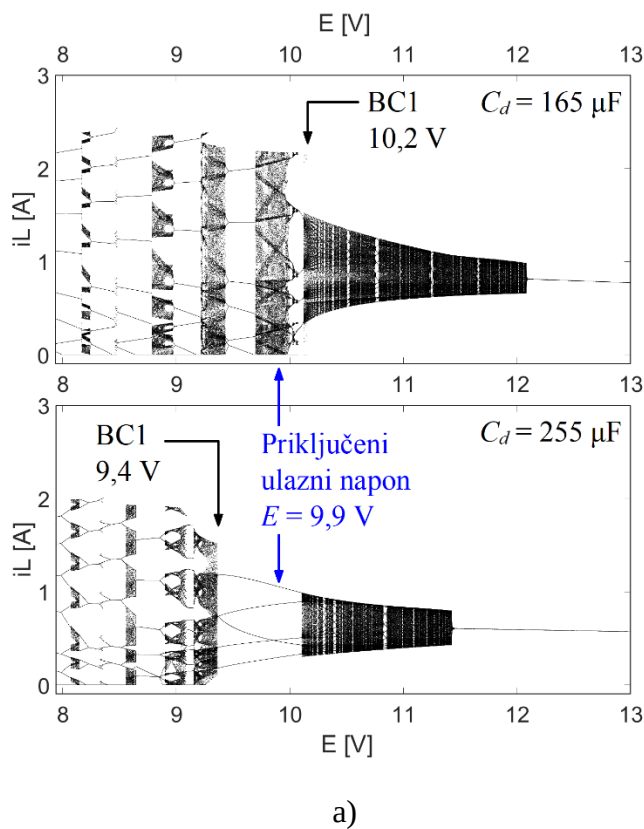
U nastavku će se verificirati izbjegavanje bifurkacija srazom granica tako što će se na različite načine smanjiti valovitost kontrolnog napona. Od parametara u izrazu (5.10) koji utječu na valovitost kontrolnog napona mijenjat će se kapacitivnost kondenzatora trošila  $C_d$ , otpornost trošila  $R_d$  i proporcionalni faktor P-regulatora upravljačke grane pretvarača  $k_p$ . Pokazat će se da promjenom ovih parametara dolazi do promjene valovitosti kontrolnog napona i u skladu s tim i do promjene bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica. Dodatno, istražiti će se utjecaj napona mrtvog vremena na bifurkacijsku točku prve bifurkacije srazom granica.

### **Ovisnost bifurkacijskih točaka o kapacitivnosti kondenzatora trošila $C_d$**

Valovitost napona trošila obrnuto je proporcionalna kapacitivnosti trošila. Pokazat će se da se povećanjem kapacitivnosti trošila može smanjiti valovitost napona trošila pa time i kontrolnog napona te odgoditi ili spriječiti pojava bifurkacije srazom granica. Drugim riječima, povećanjem kapacitivnosti trošila smanjuje se vrijednost napona prve bifurkacije srazom granica.

Slika 5.29 prikazuje bifurkacijske dijagrame dobivene simulacijom i valne oblike pretvarača dobivene mjerenjem za isti ulazni napon, a različite kapacitivnosti trošila. S

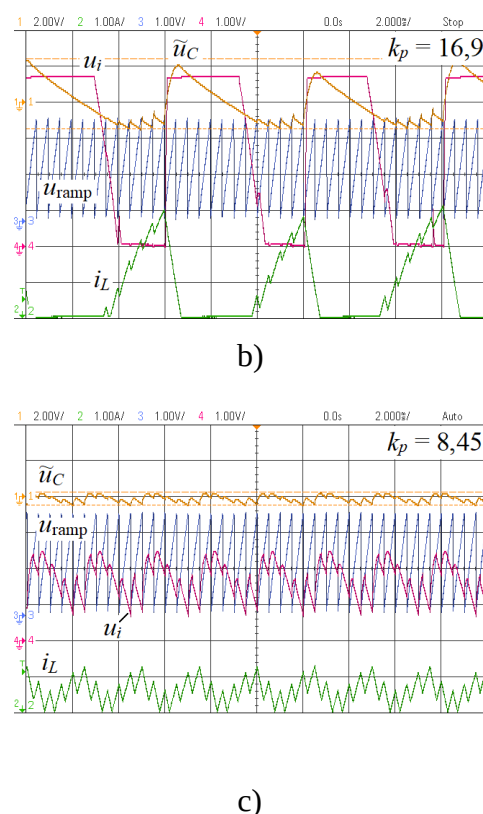
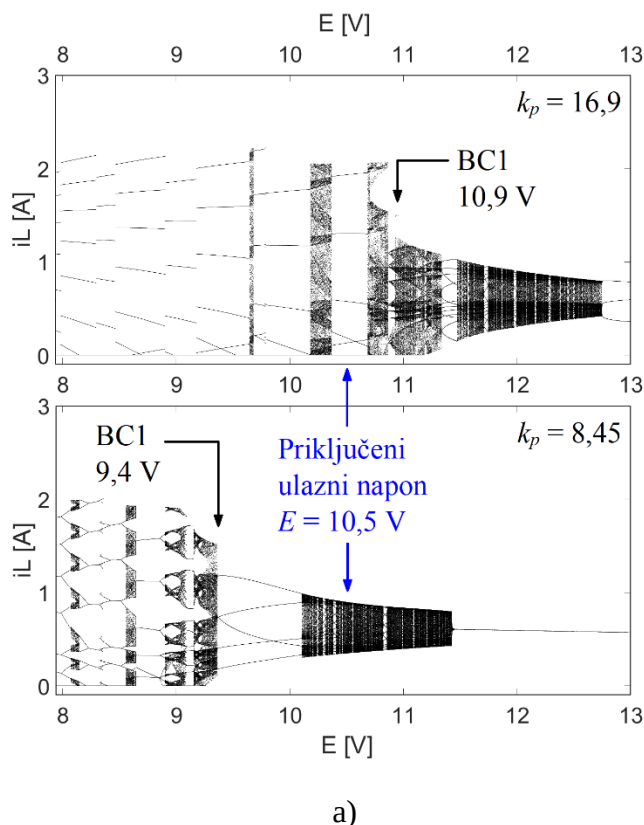
kapacitivnosti trošila  $C_d = 165 \mu\text{F}$  smanjivanjem ulaznog napona na  $E = 9,9 \text{ V}$  pretvarač radi u ustaljenom stanju fazne zaključanosti ML11 u području bifurkacija srazom granica. Ulazni je napon manji od napona prve bifurkacije srazom granica (BC1). Pripadne izmjerene valne oblike prikazuje Slika 5.29b. Povećanjem kapacitivnosti trošila na  $C_d = 255 \mu\text{F}$  uz isti ulazni napon pretvarač više neće raditi u području bifurkacija srazom granica. Napon prve bifurkacije srazom granica (BC1) smanjio se pa je ulazni napon veći od napona prve bifurkacije srazom granica. Pretvarač će raditi ustaljenom stanju fazne zaključanosti ML11 u području Hopfovih bifurkacija. Pripadne izmjerene valne oblike prikazuje Slika 5.29c. Područje Neimark-Sackerovih (Hopfovih) bifurkacija pomaknulo se prema manjim vrijednostima i smanjila se vrijednost napona prve Hopfove bifurkacije. Povećanjem kapacitivnosti proširio se raspon vrijednosti ulaznog napona bez bifurkacija srazom granica. Tako je smanjenje valovitosti napona trošila povećanjem kapacitivnosti trošila valjan pristup za izbjegavanje bifurkacije srazom granica.



Slika 5.29 Utjecaj kapaciteta trošila na ustaljena stanja pretvarača; a) Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami s kapacitetima  $C_d = 165 \mu\text{F}$  i  $C_d = 255 \mu\text{F}$ , b) Valni oblici za  $E = 9,9 \text{ V}$  i  $C_d = 165 \mu\text{F}$ , c) Valni oblici za  $E = 9,9 \text{ V}$  i  $C_d = 255 \mu\text{F}$ .

## Ovisnost bifurkacijskih točaka o proporcionalnom faktoru P-regulatora $k_p$

U izrazu (5.10) član  $R_{10}/R_2$  jednak je proporcionalnom faktoru P-regulatora upravljačke grane pretvarača  $k_p$ . Pokazat će se da se smanjenjem proporcionalnog faktora može smanjiti valovitost napona trošila pa time i kontrolnog napona te odgoditi ili spriječiti pojava bifurkacije srazom granica. Drugim riječima, smanjenjem proporcionalnog faktora smanjuje se vrijednost napona prve bifurkacije srazom granica.



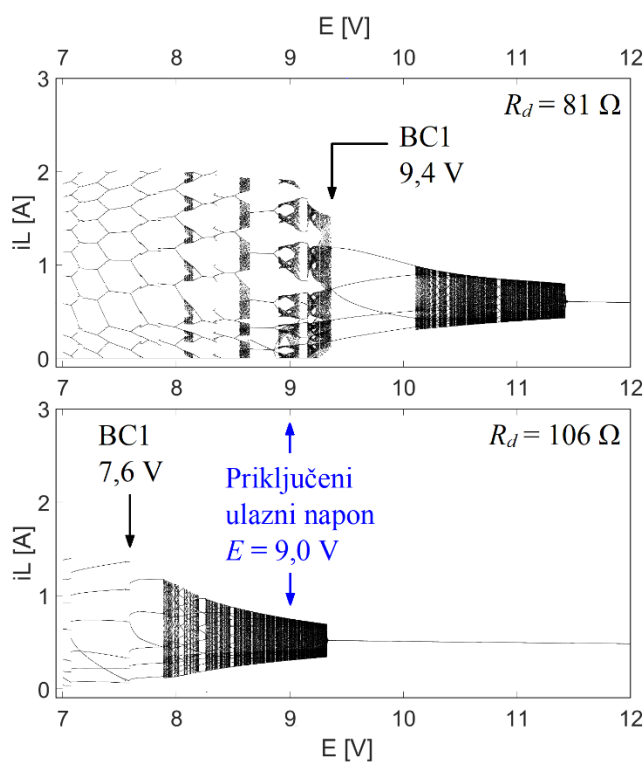
Slika 5.30 Utjecaj proporcionalnog faktora P-regulatora na ustaljena stanja pretvarača; a) Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami s proporcionalnim faktorima  $k_p = 16,9$  i  $k_p = 8,45$ , b) Valni oblici za  $E = 10,5$  V i  $k_p = 16,9$ , c) Valni oblici za  $E = 10,5$  V i  $k_p = 8,45$ .

Slika 5.30 prikazuje bifurkacijske dijagrame dobivene simulacijom i valne oblike pretvarača dobivene mjerenjem za isti ulazni napon, a različite proporcionalne faktore P-regulatora. S proporcionalnim faktorom  $k_p = 16,9$  smanjivanjem ulaznog napona na  $E = 10,5$  V pretvarač radi u ustaljenom stanju ML12+K u području bifurkacija srazom granica. Ulazni je napon manji od napona prve bifurkacije srazom granica (BC1). Pripadne izmjerene valne oblike prikazuje Slika 5.30b. Smanjenjem proporcionalnog faktora na  $k_p = 8,45$  uz isti ulazni napon pretvarač više neće raditi u području bifurkacija srazom granica. Napon prve bifurkacije srazom granica (BC1)

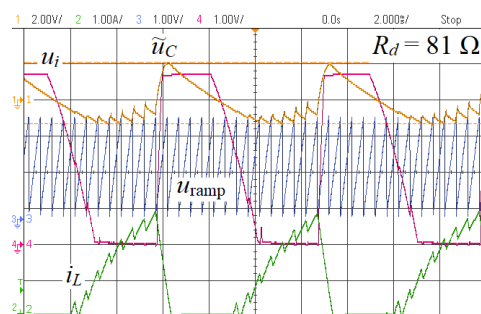
smanjio se pa je ulazni napon veći od napona prve bifurkacije srazom granica. Pretvarač će raditi u ustaljenom stanju fazne zaključanosti ML5 u području Hopfovih bifurkacija. Pripadne izmjerene valne oblike prikazuje Slika 5.30c. Područje Hopfovih bifurkacija pomaknulo se prema manjim vrijednostima i smanjila se vrijednost napona prve Hopfove bifurkacije. Smanjenjem proporcionalnog faktora proširio se raspon vrijednosti ulaznog napona bez bifurkacija srazom granica. Tako je smanjenje valovitosti napona trošila smanjenjem proporcionalnog faktora P-regulatora valjan pristup za izbjegavanje bifurkacije srazom granica.

### Ovisnost bifurkacijskih točaka o otpornosti trošila $R_d$

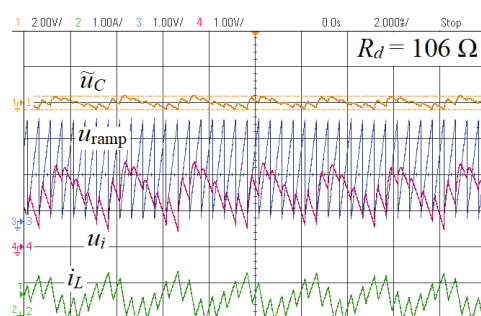
Otpornost trošila zajedno s kapacitivnošću kondenzatora trošila čini vremensku konstantu pražnjenja kondenzatora trošila. Tako se povećanjem otpornosti trošila povećava i vremenska konstanta i smanjuje valovitost napona trošila. Slijedi da se povećanjem otpornosti trošila smanjuje vrijednost napona prve bifurkacije srazom granica.



a)



b)



c)

Slika 5.31 Utjecaj otpornosti trošila na ustaljena stanja pretvarača; a) Simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami s otpornostima  $R_d = 81 \Omega$  i  $R_d = 106 \Omega$ , b) Valni oblici za  $E = 9,0 \text{ V}$  i  $R_d = 81 \Omega$ , c) Valni oblici za  $E = 9,0 \text{ V}$  i  $R_d = 106 \Omega$ .

Slika 5.31 prikazuje bifurkacijske dijagrame dobivene simulacijom i valne oblike pretvarača dobivene mjerenjem za isti ulazni napon, a različite otpornosti trošila. S otpornosti trošila  $R_d = 81 \Omega$  smanjivanjem ulaznog napona na  $E = 9,0 \text{ V}$  pretvarač radi u kaotičnom ustaljenom stanju u području bifurkacija srazom granica. Ulazni je napon manji od napona prve bifurkacije srazom granica (BC1). Pripadne izmjerene valne oblike prikazuje Slika 5.31b. Povećanjem otpornosti trošila na  $R_d = 106 \Omega$  uz isti ulazni napon pretvarač više neće raditi u području bifurkacija srazom granica. Napon prve bifurkacije srazom granica (BC1) smanjio se pa je ulazni napon veći od napona prve bifurkacije srazom granica. Pretvarač će raditi u kvaziperiodičnom ustaljenom stanju QP5/6 u području Hopfovih bifurkacija. Pripadne izmjerene valne oblike prikazuje Slika 5.31c. Područje Hopfovih bifurkacija pomaknulo se prema manjim vrijednostima i smanjila se vrijednost napona prve Hopfove bifurkacije. Povećanjem otpornosti proširio se raspon vrijednosti ulaznog napona bez bifurkacija srazom granica. Smanjenje valovitosti napona trošila povećanjem otpornosti trošila mogu se izbjeći bifurkacije srazom granica, ali treba znati da je otpornost trošila redovito unaprijed zadana i ne može se mijenjati. Ipak, ovim je mjerenjem dodatno potvrđena hipoteza da se smanjivanjem valovitosti kontrolnog napona mogu izbjeći bifurkacije srazom granica.

#### Ovisnost bifurkacijskih točaka o naponu mrtvog vremena $U_{dt}$

Kada se analizirala Slika 5.28 postavljena je hipoteza da ako se napon mrtvog vremena poveća, smanjit će se napon prve bifurkacijske točke bifurkacije srazom granica.

Tablica 5.12 Ovisnost bifurkacijskih točaka Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica o naponu mrtvog vremena pri povećavanju i smanjivanju ulaznog napona.

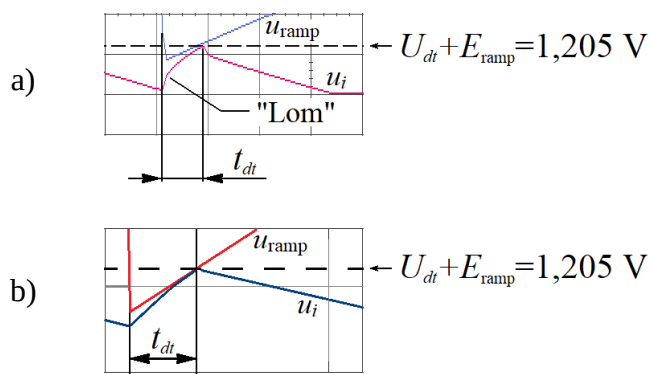
| Rezultati mjerenja            |                            |                                 |                                       |                                |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
|                               | Smanjivanje ulaznog napona |                                 | Povećavanje ulaznog napona            |                                |
| Napon mrtvog vremena $U_{dt}$ | Prva Hopfova bifurkacija   | Prva bifurkacija srazom granica | Posljednja bifurkacija srazom granica | Posljednja Hopfova bifurkacija |
| 0,48 V                        | 10,6 V                     | 9,7 V                           | 10,9 V                                | -                              |
| 0,505 V                       | 10,8 V                     | 9,8 V                           | 11,1 V                                | -                              |
| 0,52 V                        | 10,8 V                     | 9,7 V                           | 10,7 V                                | -                              |
| 0,58 V                        | 10,8 V                     | 9,6 V                           | 9,8 V                                 | 11,0 V                         |
| 0,66 V                        | 10,7 V                     | 9,3 V                           | 9,3 V                                 | 11,0 V                         |
| Rezultati simulacija          |                            |                                 |                                       |                                |
| Svi naponi                    | 11,42 V                    | 9,36 V                          | 9,36 V                                | 11,47 V                        |

U tablici 5.12 dani su rezultati mjerenja i simulacija. Rezultati mjerenja potvrđuju hipotezu. Prema rezultatima simulacije, bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica ne zavise o naponu mrtvog vremena i to nije u skladu s hipotezom. Bifurkacijski dijagrami za četiri različita mrtva vremena i drugačiji napon ventila V1 prikazuje Slika P 2.11 u prilogu ove disertacije. I u tom slučaju bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica ne zavise o naponu mrtvog vremena.

Komentar odstupanja rezultata simulacije od rezultata mjerenja:

- Hopfova bifurkacija kao i svaka standardna bifurkacija ne zavisi o naponu mrtvog vremena. Hopfova bifurkacija može se shvatiti kao kontrolni parametar za provjeru valjanosti simulacije. U tom je smislu simulacijom dobivena nezavisnost Hopfove bifurkacije o naponu mrtvog vremena potvrda valjanosti matematičkog modela pretvarača.
- U matematičkom modelu pretvarača nije modelirana nadomjesna otpornost kondenzatora trošila. Zato se valni oblici napona trošila dobiveni simulacijom i mjerenjem razlikuju po nagibu, Slika 5.32. Kontrolni napon  $u_i$  jednak je skaliranom naponu trošila pa se navedena razlika odnosi i na taj napon. U nastavku istraživanja bifurkacija srazom granica, multistabilnosti pretvarača i histereznosti ustaljenih stanja pretvarača valjalo bi kondenzator trošila modelirati serijskim spojem kapacitivnosti i nadomjesne otpornosti kondenzatora.

Slika 5.32 prikazuje slučaj kad je ispunjen uvjet za pojavu bifurkacije srazom granica. Na valnom obliku dobivenom mjerenjem vidi se nagliji porast kontrolnog napona  $u_i$  na početku i nakon toga „lom“ valnog oblika. Za razliku od toga, u simuliranom valnom obliku nema loma. Lom u izmjenjenom valnom obliku posljedica je skoka napona na nadomjesnoj otpornosti kondenzatora trošila. Kako mjesto „sraza“ kontrolnog napona  $u_i$  i pilastog napon  $u_{ramp}$  ovisi o nagibu kontrolnog napona, utemeljeno je postaviti hipotezu da nadomjesna otpornost kondenzatora trošila utječe na pojave vezane uz napon mrtvog vremena.



Slika 5.32 Valni oblici napona trošila dobiveni a) mjerenjem i b) simulacijom.

### 5.4.3 Zaključna razmatranja

Bifurkacija srazom granica u području kvaziperiodičnosti tehnički je značajna jer se njenom pojavom značajno povećava struja što može uzrokovati kvar pretvarača ili skratiti njegov radni vijek. Bifurkacija nastaje kad u trenutku mrtvog vremena upravljački napon  $u_i$  postane manji od upravljačkog napona  $U_{dt} + E_{ramp}$ . I pojava bifurkacije i značajno povećanje struje kvalitativno se podudaraju u mjerenjima i simulacijama. Ako pak bifurkacija srazom granica nastaje preskokom kontrolnog napona preko pilastog napona (signala nosioca), onda nastaje na putu u kaos udvostručenjem periode. Poznavanjem odnosa upravljačkih signala  $u_i$  i  $U_{dt} + E_{ramp}$  i signala nosioca  $u_{ramp}$  može se odrediti vrsta ustaljenih stanja koja nastaje bifurkacijama srazom granica.

Zbog potencijalno štetnog djelovanja bifurkacija srazom granica korisno ih je spriječiti ili odgoditi. To se postiže mjerama smanjenja valovitosti kontrolnog napona  $u_i$ . Pokazano je da se smanjenjem proporcionalnog faktora P-regulatora upravljačke grane pretvarača ili povećanjem kapacitivnosti trošila prva bifurkacija srazom granica pojavljuje na nižem ulaznom naponu. Time se i proširuje područje rada pretvarača u ustaljenom stanju osnovne periode, a to je jedino željeno područje rada. Povećanjem otpornosti također se može proširiti područje rada pretvarača u ustaljenom stanju osnovne periode, ali je u praksi otpor trošila veličina na koju se ne može utjecati. Pored toga i povećanjem napona mrtvog vremena također se može proširiti područje rada pretvarača u ustaljenom stanju osnovne periode. To je potvrđeno mjerenjem, ali ne i simulacijama.

Potrebno je naglasiti da su se bifurkacijske točke prve Neimark-Sackerove (Hopfove) bifurkacije dobivene mjerenjem i simulacijom u prethodnim razmatranjima znatno razlikovale. U odsječku 5.2.3 pokazano je da povećanje struje prigušnice u području Hopfovih bifurkacija nije veliko kao u području bifurkacija srazom granica pa zato nije ni tehnički toliko značajno. Stoga se modeliranju Hopfovih bifurkacija u disertaciji nije posvetila veća pozornost. Točnije modeliranje Hopfovih bifurkacija može biti predmet budućih istraživanja.

## 6 REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na fizičkom modelu naponski upravljani istosmjernog uzlaznog pretvarača identificirana su kvaziperiodična ustaljena stanja i značajno povećanje karakterističnih vrijednosti struje prigušnice u odnosu na ustaljeno stanje osnovne periode. Za uspješno predviđanje ovih pojava bilo je potrebno matematički modelirati pretvarač i verificirati predloženi matematički model.

### Matematičko modeliranje istosmjernog uzlaznog pretvarača

U najzastupljenijem matematičkom modelu pretvarača sve se komponente energetskog dijela pretvarača modeliraju kao idealne, osim prigušnice, koja je modelirana i svojom induktivnošću i nadomjesnom otpornošću. Tijekom modeliranja pretvarača analizirana je ovisnost bifurkacijskog dijagrama struje induktiviteta po ulaznom napon na promjene nekoliko parametara modela. Osnovni parametar modela koji osigurava generiranje pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala je komparator mrtvog vremena s naponom mrtvog vremena. Bez komparatora mrtvog vremena moglo bi se dogoditi da tijekom rada pretvarača na komparatoru pulsno-širinskog upravljanja bude trajno zadovoljen uvjet vođenja tranzistora u energetskom dijelu pretvarača. Tada pretvarač ne bi radio.

Isprobani su matematički modeli pretvarača i bez komparatora mrtvog vremena. Pokazano je da se u pretvaraču može osigurati generiranje pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala prikladnim izborom početnih uvjeta pretvarača, proporcionalnog faktora P-regulatora upravljačkog dijela pretvarača i nadomjesne otpornosti prigušnice. Simulacijama bifurkacijskih dijagrama s raznim početnim uvjetima pretvarača i proporcionalnim faktorom P-regulatora pokazalo se da ti parametri značajno utječu na ustaljena stanja pretvarača. Početni uvjeti pretvarača nisu odabrani kao parametar kojim bi se osiguralo generiranje pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala zato što nisu pod kontrolom. Nezavisni su o modelaru pretvarača, jer ovise o ponašanju trošila pretvarača. Proporcionalni faktor P-regulatora jest pod kontrolom, ali bi se njegovim podešavanjem za osiguranje generiranja pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala znatno suzio raspon vrijednosti proporcionalnog faktora pri odabiru regulacijskih svojstava pretvarača. Samo s nadomjesnom otpornosti prigušnice (bez komparatora mrtvog vremena) nisu se mogla zadovoljavajuće predviđati neregularna ustaljena stanja pretvarača.

Tako se matematički model istosmjernog uzlaznog pretvarača s komparatorom mrtvog vremena i s nadomjesnom otpornosti prigušnice pokazao kao osnova za najjednostavniji model pretvarača kojim se mogu predvidjeti kvaziperiodična ustaljena stanja i značajno povećanje struje prigušnice pri prvoj pojavi bifurkacija srazom granica u području kvaziperiodičnih ustaljenih

stanja. Time je pokazano i kako se pretvarač mora matematički modelirati da bi se matematičkim modelom pretvarača mogla predviđati kvaziperiodična ustaljena stanja. Uzimanjem u obzir i napona ventila upravljačkog dijela pretvarača postignuto je kvantitativno poboljšanje predviđanja ponašanja pretvarača. Za napon mrtvog vremena pokazano je da utječe na bifurkacijsku točku bifurkacije srazom granica. Ni dodavanje diode na izlazu pojačala greške ni promjena amplitudnih parametara pilastog napona nisu utjecali na kvantitativna poboljšanja matematičkog modela. Tako je dobiven odabrani matematički model pretvarača za predviđanje neregularnih ustaljenih stanja. Predloženi matematički model pretvarača i obrazloženje modela nisu pronađeni u dostupnoj literaturi.

### **Bifurkacije i ustaljena stanja pretvarača**

Mjerenjima na pretvaraču identificirana je multistabilnost pretvarača kao i histereza pri pojavi bifurkacija. Kao bifurkacijski parametar odabran je ulazni napon pretvarača zato što se taj parametar u normalnom radu pretvarača mijenja pa njegovom promjenom dolazi do neregularnih ustaljenih stanja. Mjerenja i simulacije obavljeni su za oba smjera promjene ulaznog napona. Smanjivanje ulaznog napona odabrano je kao referentni smjer, jer je tako utvrđena raznolikija dinamika pretvarača. Smanjivanjem ulaznog napona pretvarač iz ustaljenog stanja osnovne periode prelazi prvom Hopfovom bifurkacijom u kvaziperiodično ustaljeno stanje koje se daljnjim Hopfovima bifurkacijama izmjenjuje s ustaljenim stanjima fazne zaključanosti.

Daljim smanjenjem ulaznog napona povećava se valovitost struje. Harmonijski sastav struje sadrži ili dvije sumjerljive frekvencije, koje čine periodično ustaljeno stanje fazne zaključanosti ili dvije nesumjerljive frekvencije, koje čine kvaziperiodično ustaljeno stanje. Daljnjim smanjivanjem ulaznog napona nastupa prva bifurkacija srazom granica. Pritom se struja prigušnice poveća za red veličine 100 %. To povećava gubitke prigušnice i pretvarača u cjelini. Povećana vršna vrijednost struje prigušnice povećava i strujno opterećenje pretvaračkih komponenata pretvarača. Povećana valovitost ogleda se i u struji kojom pretvarač opterećuje izvor i u naponu koji pretvarač predaje trošilu. Pokazalo se i da dolazi do kvarenja vanjske karakteristike pretvarača. Dodatno, pojavom neregularnih ustaljenih stanja u feritnim prigušnicama zbog magnetostrikcije jezgre prigušnice nastaje i akustička i strukturna buka.

Kvalitativno gledajući, matematičkim modelom pretvarača uspješno se predviđaju obje bifurkacije koje su bile od interesa, a to su Hopfova bifurkacija i bifurkacija srazom granica. U dostupnoj literaturi do sada nije zabilježena pojava kvaziperiodičnih ustaljenih stanja nastalih i Hopfovom bifurkacijom i bifurkacijom srazom granica na istom uzlaznom pretvaraču. Predviđaju se i slijedovi ustaljenih stanja i povećanja valovitosti vršnih i efektivnih vrijednosti struja i napona.

## Identifikacija ustaljenih stanja i bifurkacija

U mjerenjima su ustaljena stanja identificirana valnim oblicima i trajektorijama, a kao pomoćne metode primijenjene su i identifikacija ustaljenih stanja iz harmonijskog sastava struje prigušnice i mjerenje frekvencije. Bifurkacija srazom granica identificirana je pojavom specifičnog odnosa između pilastog napona i dvaju upravljačkih napona uz istovremenu kvalitativnu promjenu valnog oblika struje prigušnice. Ta bifurkacija do sada nije zabilježena u radovima o istosmjernom naponski upravljanoj uzlaznoj pretvaraču. Druga bifurkacija koja uzrokuje pojavu kvaziperiodičnog ustaljenog stanja - Hopfova bifurkacija obično se identificira tijekom analize pretvarača metodom diskretnih vremenskih trenutaka promatranjem svojstvenih vrijednosti jednadžbi stanja. Taj način analize nije primijenjen u disertaciji, nego se analiza izvodila izravnim rješavanjem jednadžbi stanja računalom. S obzirom na to da su u pretvaračima poznate samo dvije bifurkacije koje uzrokuju pojavu kvaziperiodičnosti, svaka bifurkacija koja nije identificirana kao bifurkacija srazom granica identificirana je u mjerenjima kao Hopfova bifurkacija, a u simulacijama kao Neimark-Sackerova bifurkacija. Predznak Hopfove bifurkacije je promjenljiva modulacija amplitude valnih oblika u ustaljenom stanju osnovne periode.

Za odabrani matematički model pretvarača napisan je programski kôd za simulaciju valnih oblika, njihovih srednjih i efektivnih vrijednosti, trajektorija, Poincaréovih slika i bifurkacijskih dijagrama. Simulacija valnih oblika, osim za pojedinačni ulazni napon, izvedena je za slijed više vrijednosti ulaznih napona kako bi se dobilo mijenjanje ulaznog napona što sličnije realnim situacijama na fizičkom modelu pretvarača. Pri tom su kao početni uvjeti za idući ulazni napon iskorišteni početni uvjeti dobiveni na prethodnom naponu. Analogno ovakvoj simulaciji valnih oblika obavljena je i simulacija za bifurkacijski dijagram. Temeljem sigurnih identifikacija ustaljenih stanja putem simulacija i sličnosti između valnih oblika i trajektorija dobivenih mjerenjem i simulacijama stekla se i veća sigurnost u identifikaciji ustaljenih stanja mjerenjem.

## Multistabilnost i histereza

U cijelom rasponu ulaznog napona u kojem se pojavljuju kvaziperiodična ustaljena stanja pretvarač je multistabilan. Uz multistabilnost pojavljuje se i histereza ustaljenih stanja. Od posebnog je interesa histereza koja tijekom smanjivanja ulaznog napona nastupa na prvoj bifurkaciji srazom granica. Tada dolazi do značajnog povećanja efektivne i vršne vrijednosti struje prigušnice, kao i valovitosti. Na pojavu multistabilnosti i histereze utječu početni uvjeti, smetnje, brzina promjene ulaznog napona, temperatura i drugi mogući nepoznati uzroci. Ti parametri većinom nisu pod kontrolom pa je znatno otežano i predviđanje i identifikacija multistabilnosti. Tako se u matematičkom modelu pretvarača mogu namještati jedino početni uvjeti pretvarača, a

ne mogu smetnje, brzina promjene ulaznog napona i temperatura. Promjenom početnih uvjeta nije se iskazala multistabilnost pretvarača osim tijekom generiranja matematičkog modela pretvarača kojim bi se uspješno predviđale pojave od interesa u ovoj disertaciji. U disertaciji je pokazano više primjera multistabilnosti i histereze dobivenih mjerenjem. Matematičkim modelom pretvarača jedino se uspješno predviđa histereza pri pojavi Hopfove bifurkacije. Predviđanje multistabilnosti i histereze još je u začecima, kako u istraživanjima drugih istraživača tako i u ovoj disertaciji. Za bolje rezultate trebalo bi matematički model pretvarača dodatno usložniti.

### **Bifurkacija srazom granica**

Bifurkaciji srazom granica posvećena je dodatna pozornost jer ona uzrokuje toliko povećanje struje prigušnice da to utječe na dimenzioniranje prigušnice i pretvaračkih komponenata pretvarača. Ustanovljeno je da se ta bifurkacija pojavljuje kada se pojavi specifičan odnos između signala nosioca i dvaju upravljačkih signala, koji se dovode na komparator pulsno-širinske modulacije i komparator mrtvog vremena. Utvrđeno je da se bifurkacija srazom granica može izbjeći ili odgoditi smanjenjem valovitosti kontrolnog napona. Kao potvrda tom pristupu pokazano je da se povećanjem kapacitivnosti trošila, smanjenjem proporcionalnog faktora P-regulatora, povećanjem otpornosti trošila i povećanjem napona mrtvog vremena smanjuje ulazni napon na kojem nastupa prva bifurkacija srazom granica. Navedene mjere utječu i na prvu Hopfovu bifurkaciju, što može biti predmet budućih istraživanja.

Bifurkacija srazom granica pri povećanju ulaznog napona pojavljuje se u kombinaciji s bifurkacijom udvostručenja periode i putem u kaos udvostručenjem periode, a bifurkacija srazom granica pri smanjivanju ulaznog napona pojavljuje se u kombinaciji s Hopfovom bifurkacijom i putem u kaos putem kvaziperiodičnosti. Tako je svaka identifikacija bifurkacije ujedno korisna i u identifikaciji ustaljenih stanja.

### **Nastavak istraživanja**

Odabrani matematički model pokazao se kao zadovoljavajući u predviđanju Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica te skokovitog povećanja struje prigušnice pri prvoj bifurkaciji srazom granica. Za uspješnije predviđanje multistabilnosti i histereze potrebna su daljnja istraživanja. Nameću se tri puta. Jedan je put osposobiti mjerni sustav kojim bi se mogli snimati bifurkacijski dijagrami i Poincaréove slike čime bi se olakšala identifikacija ustaljenih stanja na fizičkom modelu pretvarača. Drugi je put modelirati i nadomjesnu otpornost kondenzatora trošila i kapacitet PI-regulatora upravljačkog dijela pretvarača kako bi se postigla što veće podudarnost između ponašanja simulacijskog modela pretvarača i fizičkog modela pretvarača. To se posebno odnosi

na multistabilnost pretvarača i bifurkacijske točku prve bifurkacije srazom granica i prve Hopfove bifurkacije. Treći je put analizirati pretvarač metodom diskretnih vremenskih trenutaka i identificirati bifurkacije temeljem svojstvenih vrijednosti jednadžbi stanja.

## LITERATURA

- [1] A. El Aroudi, M. Debbat, R. Giral, E. Toribio, G. Olivar i L. Benadero, »Bifurcations in DC-DC Switching Converters: Review of Methods and Applications,« *International Journal of Bifurcation and Chaos*, svez. 15, br. 5, pp. 1549-1578, 2005.
- [2] D. C. Hamill i D. J. Jeffries, »Subharmonics and chaos in a controlled switched-mode power converter,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I*, svez. 35, br. 8, pp. 1059-1061, 1988.
- [3] A. R. Brown i R. D. Middlebrook, »Sampled-data modeling of switching regulators,« u *Proc. Power Electronics Specialists Conf.*, 1981.
- [4] J. R. Wood, »Chaos a real phenomenon in power electronics,« u *IEEE Applied Power Electronics Conferention*, Baltimore, 1989.
- [5] J. H. B. Deane i D. C. Hamill, »Instability Subharmonics and Chaos in Power Electronics Systems,« *IEEE Transactions on Power Electronics*, svez. 5, br. 3, pp. 260-268, 1990.
- [6] D. C. Hamill, J. H. B. Deane i D. J. Jefferies, »Modeling of chaotic DC-DC converters by iterated nonlinear mappings,« *IEEE Transaction on Power Electronic*, svez. 7, br. 1, pp. 25-36, 1992.
- [7] P. T. Krein i R. M. Bass, »Types of instability encountered in simple power electronic circuits: unboundedness, chattering, and chaos,« u *APEC '90, Conference Proceedings*, 1990.
- [8] C. K. Tse, »Flip Bifurcation and Chaos in Three-State Boost Switching Regulators,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, svez. 41, br. 1, 1994.
- [9] W. C. Y. Chan i C. K. Tse, »Study of Bifurcations in Current Programmed DC/DC Boost Converters From Quasi Periodicity to Period Doubling,« *IEEE Transactions on circuits and systems—I, Fundamental theory and applications*, svez. 44, br. 12, pp. 1129-1142, 1997.
- [10] S. Banerjee, P. Ranjan i C. Grebogi, Bifurcations in two-dimensional piecewise smooth maps—Theory and applications in switching circuits, svez. 47, IEEE, 2000.
- [11] M. Di Bernardo, F. Garofalo, L. Glielmo i F. Vasca, »Quasi-periodic behaviours in DC/DC converters,« u *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Proc. PESC'96*, Milan, 1996.

- [12] S. Banerjee, »Coexisting Attractors, Chaotic Saddles, and Fractal Basins in a Power Electronic Circuit,« *IEEE Transactions on circuits and systems—I, Fundamental theory and applications*, svez. 44, br. 9, pp. 847-849, 1997.
- [13] A. El Aroudi, L. Benadero, E. Toribio i G. Olivar, »Hopf bifurcation and chaos from torus breakdown in a PWM voltage-controlled DC-DC boost converter,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, svez. 46, br. 11, pp. 1374-1382, 1999.
- [14] A. El Aroudi i R. Leyva, »Quasi-Periodic Route to Chaos in a PWM Voltage-Controlled DC-DC Boost Converter,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, svez. 48, br. 8, pp. 967-978, 2001.
- [15] L. Benadero, A. El Aroudi, G. Olivar, E. Toribio i V. Moreno, »Bifurcation Analysis in PWM Regulated DC-DC Converters using Average Models,« Dubrovnik, Cavtat, 2002.
- [16] I. Flegar i D. Pelin, »Bifurcation diagrams - Insight into the modes of operation of a boost converter,« Maribor, 2003.
- [17] I. Flegar i D. Pelin, »Steady-state responses of the boost converter,« u *Proceedings of International Symposium on Industrial Electronics*, Dubrovnik, 2005.
- [18] Z. T. Zhusubaliyev, E. A. Soukhoterlin i E. Mosekilde, »Quasi-Periodicity and Border-Collision Bifurcations in a DC-DC Converter With Pulsewidth Modulation,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, svez. 50, br. 8, pp. 1047-1057, August 2003.
- [19] P. Jain i S. Banerjee, »Border collision bifurcation in one dimensional discontinuous maps,« *International Journal of Bifurcation and Chaos*, svez. 13, br. 11, pp. 3341-3351, 2003.
- [20] C. K. Tse, *Complex Behavior of Switching Power Converters*, CRC Press LLC, 2004.
- [21] D. Dai, C. K. Tse i X. Ma, »Symbolic Analysis of Switching Systems Application to Bifurcation Analysis of DC/DC Switching Converters,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, svez. 52, br. 8, pp. 1632-1643, 2005.
- [22] S. Maity, D. Tripathy i S. Banerjee, »Birth of Quasiperiodicity through Border Collision in a Power Electronic Circuit,« u *National conference on nonlinear systems & dynamics*, 2006.
- [23] Z. T. Zhushubaliyev, E. Mosekilde, S. Maity, S. Mohanan i S. Banerjee, »Border collision route to quasiperiodicity Numerical investigation and experimental confirmation,« svez. 16, 2006.

- [24] E. Alarcon, A. El Aroudi, J. Martinez-Artega, G. Villar, F. Guinjoan i A. Poveda, »Predicting fast-scale instabilities in switching power converters: a ripple-based unified perspective," in *Circuits and Systems*,« u *ISCAS 2006 Proceedings*, 2006.
- [25] S. Banerjee, D. Giaouris, P. Missailidis i O. Imrayed, »Local Bifurcations of a Quasiperiodic Orbit,« *International Journal of Bifurcation and Chaos*, svez. 22, br. 12, 2012.
- [26] Z. T. Zhushubaliyev i E. Mosekilde, »Multistability and hidden attractors in a multilevel DC/DC converter,« *Mathematics and Computers in Simulation*, svez. 109, pp. 32-45, 2015.
- [27] A. Abbusirah, K. Mandal, D. Giaouris, A. El Aroudi, M. M. Al-Hindawi, Y. Al-Turki i B. Soumitro, »Avoiding Instabilities in Power Electronic Systems: Toward an On-Chip Implementation,« *IET Power Electronics*, July 2017.
- [28] O. Imrayed, I. Daho, H. Amreiz i A. Ahtaiba, »Subcritical & Supercritical Neimark-Sacker Bifurcation in DCM Boost Converter,« u *Libyan International Conference on Electrical Engineering and Technologies 2018*, Tripoli, 2018.
- [29] I. Flegar, *Elektronički energetska pretvarači*, Zagreb: Kigen, 2010.
- [30] S. Maniktala, »Reducing Converter Stresses,« *Power Electronics Technology*, 2002.
- [31] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Butterworth Hinemann Publishing, , 2011.
- [32] B. T. Lynch, *Under the hood of a DC/DC boost converter*, Dallas: Texas Instruments, 2008/2009.
- [33] L. Benadero, A. E. Aroudi, G. Olivar, E. Toribio i E. Gomez, »Two-Dimensional bifurcation Diagrams: Background Pattern of Fundamental Dc-dc converters with PWM Control,« *International Journal of Bifurcation and Chaos*, svez. 13, br. 2, pp. 427-451, 2003.
- [34] A. El Aroudi, M. Debbat, R. Giral i L. M. Salamero, »Quasiperiodic route to chaos in DC-DC switching regulators,« u *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Pusan, 2001.
- [35] D. Giaouris, S. Banerjee, O. Imrayed, K. Mandal, B. Zahawi i V. Pickert, »Complex interaction between tori and onset of three frequency quasi-periodicity in a current mode controlled boost converter,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, svez. 59, pp. 207-214, 2012.
- [36] *MC34060A datasheet*, ON Semiconductor.
- [37] I. Flegar, »Uloga matematičkih modela u projektiranju električkih uređaja,« Zagreb, 2019.
- [38] I. Flegar, *Osnove projektiranja električkih uređaja*, 3. izdanje ur., Zagreb: Element, 2020.

- [39] D. Pelin, Ustaljena stanja istosmjernog uzlaznog pretvarača, Osijek: Elektrotehnički fakultet Osijek, 2006.
- [40] S. G. Kriventsov, Nonlinear techniques for analysis of DCDC power converter systems, The Pennsylvania State University, 2004.
- [41] S. H. Strogatz, Nonlinear dynamics and chaos, reading: Perseus Books publishing, 1994.
- [42] Ž. Stojanović, D. Pelin i A. Brandis, »Impact of quasiperiodic steady-state on boost converter current stress and inductor copper losses,« u *Book of abstract ; 20th International Symposium on Power Electronics - Ee2019*, Novi Sad, 2019.
- [43] S. Banerjee i G. C. Verghese, Nonlinear phenomena in power electronics: attractors, bifurcations, chaos, and nonlinear control, Wiley, 2001.
- [44] I. Flegar, *Teorija mreža - Bilješke s predavanja*, Osijek: Elektrotehnički fakultet Osijek, 2001.
- [45] H. Kanz i T. Schreiber, Nonlinear Time Series Analysis, Cambridge University Press, 2004.
- [46] I. N. Bronstein, K. A. Semendjajev, G. Musiol i H. Muehlig, Matematički priručnik, 4th ur., Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga, 2004.
- [47] S. Banerjee, Dynamics for Engineers, Wiley, 2005.
- [48] D. Kuzmanović, N. Vasović, S. Kostić, S. Simić, I. Franović, I. Grozdanović, K. Todorović-Vasović i B. Ranković Plazinić, Uvod u teoriju haosa, Beograd: Univerzitet u Beogradu – Saobraćajni fakultet, 2013.
- [49] S. Banerjee, M. S. Karthik, G. Yuan i J. A. Yorke, »Bifurcations in One-Dimensional Piecewise Smooth Maps—Theory and Applications in Switching Circuits,« *Bifurcations in One-Dimensional Piecewise Smooth Maps—Theory and Applications in Switching Circuits*, svez. 47, br. 3, pp. 389-394, 2000.
- [50] Y. Ma, H. Kawakami i C. K. Tse, »Bifurcation analysis of switched dynamical systems with periodically moving borders,« *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, svez. 51, br. 6, 2004.
- [51] Z. T. Zhusubaliyev, O. O. Yanochkina i E. Mosekilde, »Coexisting tori and torus bubbling in non-smooth systems,« *Physica D: Nonlinear Phenomena*, svez. 240, br. 4-5, pp. 397-405, 2011.
- [52] K. Miličević, *Vrednovanje matematičkog modela ferorezonantnih dijelova elektroenergetske mreže.*, Osijek, 2008.

- [53] Z. T. Zhusubaliyev i E. Mosekilde, *Bifurcations and Chaos in Piecewise-Smooth Dynamical Systems*, 2003.
- [54] K. Chakrabarty, G. Poddar i S. Banerjee, »Bifurcation Behavior of the Buck Converter,« *IEEE Transactions on Power Electronics*, svez. 11, br. 3, May 1996.
- [55] I. Flegar i D. Pelin, »Period - doubling route to chaos in a buck converter,« u *Proc. 10 - th International Conference EDPE*, Dubrovnik, 1998.
- [56] S. E. Newhouse, D. Ruelle i F. Takens, »Occurrence of strange axiom A-attractors near quasiperiodic flows on  $T^m$ ,  $m \geq 3$ ,« *Communications in Mathematical Physics*, svez. 64, pp. 303-308, 1971.
- [57] J. H. Curry i J. A. Yorke, »A transition from hopf bifurcation to chaos: Computer experiments with maps on  $R^2$ ,« u *The Structure of Attractors in Dynamical Systems. Lecture Notes in Mathematics*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1978.
- [58] V. S. Afraimovič i L. P. Šiljnikov, »Invariant two-dimensional tori, their destruction and stochasticity,« u *Methods of Qualitative Theory of Differential Equations*, Moskva, 1983, pp. 3-26.
- [59] A. El Aroudi, L. Benadero, E. Toribio i S. Machiche, »Quasiperiodicity and chaos in the DC–DC buck-boost converter,« *International Journal of Bifurcation and Chaos*, svez. 10, br. 2, pp. 359-371, 2000.
- [60] S. K. Mazumder, *Nonlinear Analysis and Control of Standalone, Parallel DC-DC, and Parallel Multi-Phase PWM Converters*, Blacksburg, Virginia, USA, 2001.
- [61] D. Pelin, I. Flegar i I. Miličević, »Identifikacija ustaljenih stanja istosmjernog uzlaznog pretvarača,« *TEHNIČKI VJESNIK - TECHNICAL GAZETTE*, svez. 16, br. 2, pp. 9-15, 2009.
- [62] U. Feudel, S. Kuznetsov i A. Pikovsky, *Strange Nonchaotic Attractors: Dynamics between Order and Chaos in Quasiperiodically Forced Systems*, World Scientific Publishing Company, 2006, p. 226.
- [63] I. N. Stouboulos, I. M. Kyprianidis i M. S. Papadopoulou, »Initial Conditions and Coexisting Attractors in an Autonomous Circuit,« Bucharest, 2006.
- [64] J. L. Huang i W. D. Zhu, »An incremental harmonic balance method with two timescales for quasiperiodic motion of nonlinear systems whose spectrum contains uniformly spaced sideband frequencies,« *Nonlinear Dynamics*, svez. 90, pp. 1015-1033, 2017.

- [65] I. A. Khovanov, N. A. Khovanova, V. S. Anishchenko i P. W. E. McClintock, »Sensitivity to initial conditions and Lyapunov exponent of a quasiperiodic system,« *Technical Physics*, svez. 45, br. 5, pp. 633-635, 2000.
- [66] R. Klages, »Weak Chaos, Infinite Ergodic Theory, and Anomalous Dynamics,« u *From Hamiltonian Chaos to Complex Systems*, New York, Springer, 2013, pp. 3-42.
- [67] M. Di Bernardo, C. J. Budd, A. R. Champneys i P. Kowalczyk, *Piecewise-smooth Dynamical Systems Theory and Applications*, Springer, 2008.
- [68] A. El Aroudi, V. Moreno-Font i L. Benadero, »Dynamical Analysis of an Interleaved Single Inductor TITO Switching Regulator,« *Mathematical Problems in Engineering*, p. 19p, 2009.

## SAŽETAK

Neregularna ustaljena stanja neželjena su pojava u radu istosmjernih pretvarača. Uzrokuju povećanje valovitosti napona i struja pretvarača i akustičku i strukturnu buku. Kvaziperiodično ustaljeno stanje nastalo bifurkacijom srazom granica uzrokuje značajno povećanje vršne i efektivne vrijednosti struje prigušnice naponski upravljaniog istosmjernog uzlaznog pretvarača. To povećava gubitke pretvarača, prvenstveno prigušnice i strujno opterećenje pretvaračkih komponenata pa može doći do kvara pretvarača. Zato je takav način rada potrebno izbjeći. To se postiže matematičkim modeliranjem pretvarača kojim će se predvidjeti bifurkaciju srazom granica i štetne posljedice te pojave te omogućiti odabir parametara pretvarača, izvora i trošila da se izbjegne bifurkacija srazom granica koja uzrokuje kvaziperiodično ustaljeno stanje.

Matematički model pretvarača definiran je tako da je simuliran utjecaj svakog od parametara modela na pojavu neregularnih ustaljenih stanja. Tako je utvrđeno koji parametri pretvarača imaju presudnu ulogu u pojavi neregularnih ustaljenih stanja. Matematičkim modelom pretvarača postignuto je predviđanje Hopfovih bifurkacija i bifurkacija srazom granica. Te bifurkacije uzrokuju slijedove ustaljenih stanja do sada nezabilježene u literaturi. Ustaljena stanja dobivena simulacijama identificirana su temeljem valnih oblika, bifurkacijskih dijagrama, trajektorija i Poincaréovih slika. Bifurkacijski dijagrami simulirani su tako da se za idući bifurkacijski parametar koriste početni uvjeti postignuti pri prethodnom bifurkacijskom parametru. Tako je postignuto predviđanje histereze prve Hopfove bifurkacije.

Pri pojavi bifurkacija na fizičkom modelu pretvarača uočene su histereze ustaljenih stanja u području Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica. Bifurkacijom srazom granica nastaje značajno povećanje struje prigušnice pa je histereza bifurkacijske točke prve bifurkacije srazom granica od tehničkog značaja. Uz to, pretvarač iskazuje multistabilnost u cijelom području ulaznih napona za koje se pojavljuju kvaziperiodična ustaljena stanja. Ustaljena stanja dobivena mjerenjem identificirana su iz valnih oblika, trajektorija i harmonijskog sastava.

U vremenskom području opisano je kako nastaje bifurkacija srazom granica. Utvrđena je pravilnost u promjeni ustaljenih stanja temeljem odnosa upravljačkih signala i signala nosioca. Na osnovi toga pokazano je izbjegavanje bifurkacije srazom granica kad pretvarač radi u ustaljenom stanju osnovne periode.

Ključne riječi: bifurkacija srazom granica, Hopfova bifurkacija, istosmjerni naponski upravljani uzlazni pretvarač, kvaziperiodičnost, multistabilnost, neregularno ustaljeno stanje

## **ABSTRACT**

### **MODEL OF THE VOLTAGE CONTROLLED BOOST CONVERTER FOR NONSTABILITY STEADY-STATE ANALYSIS**

The nonstability steady-states of the voltage controlled boost converter are an unwanted phenomena. These nonstability steady-states cause increased ripple values as well as acoustic and structural noise. In the voltage mode controlled DC-DC boost converter a significant increase of effective currents and peak currents is caused by quasiperiodic steady-state obtained by border collision bifurcation. Furthermore, the converter efficiency is decreased, and component stresses are increased. The quasiperiodic steady-state obtained by border collision bifurcation can lead to converter failure. Therefore, it is important to predict the bifurcation and avoid it, by proper adjustment of the converter parameters. In order to do this, it is necessary to build a mathematical model of the converter that predicts these nonstability steady-states.

The mathematical model of the converter is built by changing each of the parameters of the model separately. In that way it is determined which of the converter's parameters lead to the emergence of the nonstability steady-states. The chosen mathematical model successfully predicts border collision bifurcation and Hopf bifurcation. These bifurcations are the cause of a new phenomena and new steady-states not previously known to power electronic engineers. The steady-states obtained by the simulations are identified by waveforms, trajectories, Poincaré maps and bifurcation diagrams. The initial values at each input voltage of bifurcation diagrams are calculated using previous values of input voltages. In this way the hysteresis of Hopf bifurcation was successfully predicted.

The hysteresis of Hopf bifurcation and border collision bifurcation was identified in the boost converter. The converter also exhibits multistability in the whole range of its quasiperiodic behaviour. The border collision bifurcation significantly increases the inductor current. Hence, the border collision bifurcation and its hysteresis have significant technical relevance. The steady-states obtained by measurements were identified by waveforms, trajectories and harmonic analysis.

In the time domain, it is described how the border collision bifurcation occurs. The regularity in the change of steady-states was determined on the basis of the relationship between control signals and carrier signals. The avoidance of border collision bifurcations when the converter is operating in period-one steady-state was demonstrated.

Keywords: border collision bifurcation, Hopf bifurcation, voltage mode controlled DC-DC boost converter, quasiperiodic steady-state, multistability, nonstability steady-states

## ŽIVOTOPIS

Željko Stojanović rođen je u Zagrebu 14. rujna 1972. godine. Srednju školu “Ruđer Bošković” završio je 1991. godine, Višu tehničku školu Zagreb završio je 1994. godine, a Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu smjer Radiokomunikacije i profesionalna elektronika 1997. godine. Zaposlen je na Elektrotehničkom odjelu Tehničkog veleučilišta u Zagrebu od 1999. godine i trenutno je u zvanju višeg predavača. Drži nastavu iz Analognih sklopova, Elektroničkih sklopova, Linearnih i nelinearnih mreža, Energetske elektronike, Osnova projektiranja električkih uređaja i Osnova elektrotehnike i elektronike. Objavio je jednu knjigu i 12 stručnih i znanstvenih radova objavljenih u zbornicima radova na međunarodnim skupovima i u časopisima. Za rad Buck converter controlled by Arduino Uno nagrađen je kao mentor u konkurenciji studentskih radova na konferenciji MIPRO 2016.

## PRILOZI

### PRILOG 1    STRUČNI POJMOVI NA HRVATSKOM I ENGLESKOM JEZIKU

Tijekom izrade disertacije upotrebljavani su mnogi termini iz nelinearne dinamike. Neki od tih termina nisu općepoznati, a neki nisu ni standardizirani. Radi lakšeg snalaženja u tekstu prijevodi nekih važnijih engleskih termina, kao i termina za koje nisu pronađeni hrvatski prijevodi dani su u tablici P1.1

Tablica P1.1 Prijevodi nekih važnijih engleskih termina

| Hrvatski termin                          | Engleski termin                                     |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| bifurkacija srazom granica               | border collision bifurcation                        |
| bifurkacija udvostručenja periode        | period doubling bifurcation                         |
| čudni atraktor                           | strange attractor                                   |
| čudni nekaotični atraktor                | strange nonchaotic attractor                        |
| Fareyev niz                              | Farey sequence                                      |
| fazna zaključanost                       | phase locking, mode locking, frequency locking      |
| glatka bifurkacija                       | smooth bifurcation                                  |
| glatkoća torusa                          | torus smoothness                                    |
| gotovo periodična funkcija               | almost periodic function                            |
| granica prostora stanja                  | border                                              |
| kvaziperiodično ustaljeno stanje         | quasiperiodic steady-state                          |
| meki prijelaz                            | soft transition                                     |
| metoda diskretnih vremenskih trenutaka   | discrete-time iterative maps, sampled-data modeling |
| osjetljiva zavisnost o početnim uvjetima | sensitive dependence                                |
| rotacijski broj                          | rotation number, winding number                     |
| slabi kaos                               | weak chaos                                          |
| supostojanje atraktora                   | coexisting attractors                               |

## **PRILOG 2     MATEMATIČKO     MODELIRANJE     UZLAZNOG PRETVARAČA**

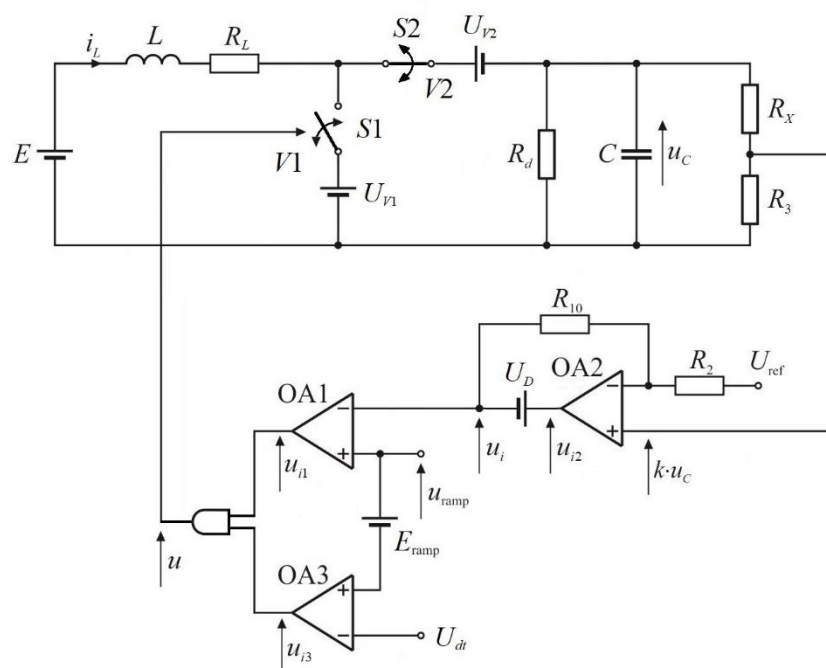
U pregledu literature dane su potpunije informacije o matematičkim modelima uzlaznog pretvarača kao i o uočenim pojavama u pretvaraču. Ovdje će se ukratko naglasiti samo ono što je znanstveni doprinos ove disertacije. U postojećim modelima naponski upravljano uzlazno pretvarača redovito je modelirana otpornost prigušnice. Modeliranje regulatora u upravljačkom dijelu pretvarača modelira se na više načina, a prevladavajući način je modeliranje P-regulatorom. Izbor modela pretvarača redovito nije obrazložen. Jedino je u radu El Aroudija i suradnika [13] pokazano da se Hopfova bifurkacija pojavljuje u pretvaraču neovisno o tomu je li se otpornost prigušnice i napon diode (neupravljivog ventila) modeliraju ili ne modeliraju. Što se tiče bifurkacija koje uzrokuju pojavu kvaziperiodičnosti u dostupnim radovima spominje se ili Hopfova bifurkacija ili bifurkacija srazom granica. Samo se u radu [23] spominju i Hopfova bifurkacija i bifurkacija srazom granica, ali se one pojavljuju u silaznom pretvaraču.

Pokazat će se kako se pretvarač mora matematički modelirati da bi se matematičkim modelom pretvarača mogla predviđati kvaziperiodična ustaljena stanja.

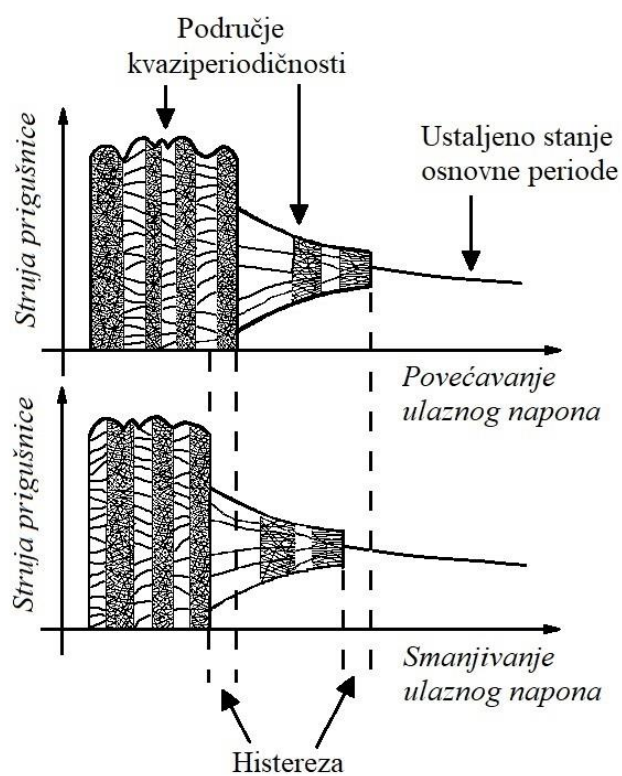
### **a) Polazni matematički model pretvarača**

U dostupnoj literaturi o neregularnim ustaljenim stanjima istosmjernih pretvarača malo se toga može naći o matematičkom modeliranju pretvarača. Dakako, poznato je da se neregularna ustaljena stanja mogu dobiti u krugovima drugog reda koji su uz to nelinearni i vremenski promjenljivi. Primjerice, nije poznato mora li se matematičkim modelom pretvarača modelirati otpornost prigušnice, nadomjesna otpornost kondenzatora te kako modelirati ventile i upravljački dio pretvarača. To se saznaje usporedbom rezultata simulacije s rezultatima mjerenja. Ako odabrani matematički model predviđa pojave koje se pojavljuju na fizičkom modelu pretvarača, onda je matematički model dobar!

Pokazat će se kako se uzimanjem u obzir pojedinih parametara fizičkog modela pretvarača dolazi do matematičkog modela pretvarača korištenog u ovoj disertaciji, Slika P 2.1. Da bi se mogao izgraditi matematički model s pomoću kojeg se uspješno predviđaju određene pojave, mora se znati kako te pojave izgledaju. Mjerenjem je ustanovljeno da smanjivanjem ulaznog napona pretvarač prelazi iz ustaljenog stanja osnovne periode u dinamiku na torusu. Najprije prolazi kroz slijed Hopfovih bifurkacija, a zatim i kroz slijed bifurkacija srazom granica, Slika P 2.2. Pri tom je valovitost varijabli stanja u području Hopfove bifurkacije znatno manja nego u području



Slika P 2.1 Shema spoja matematičkog modela naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača upotrijebljenog u disertaciji.



Slika P 2.2 Kvalitativan prikaz ustaljenih stanja fizičkog modela pretvarača prikazan konturama bifurkacijskog dijagrama

ulaznog napona, dakle pojavljuje se histereza ustaljenih stanja. Za promatranje utjecaja parametara na pojavu različitih ustaljenih stanja pretvarača prikladan je bifurkacijski dijagram struje induktiviteta po ulaznom naponu, jer se iz njega vide ustaljena stanja pretvarača za cijelo područje vrijednosti ulaznog napona  $E = 7 - 18$  V kao i pojava Hopfove (Neimark-Sackerove bifurkacije) i bifurkacije srazom granica. Modeliranjem pretvarača nastojat će se prvo postići bifurkacijski dijagram kvalitativnog izgleda kao što prikazuje Slika P 2.2. Zatim će se izborom vrijednosti parametara modela pretvarača nastojati postići zadovoljavajuća kvantitativna podudarnost s rezultatima mjerenja.

Parametri simulacije pretvarača analiziranog u poglavlju 2. prikazani su tablicom 5.1 i čine polazni matematički i simulacijski model pretvarača.

Tablica P2.1 Parametri simulacije naponski upravljano uzlaznog pretvarača analiziranog u poglavlju 2.

| POCETNI UVJETI, PARAMETRI PRETVARACA I PARAMETRI SIMULACIJE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Induktivitet prigusnice $L = 0.003600$ H<br>Otpor prigusnice $R_L = 0.000$ ohm<br>Otpor trosila $R_d = 81.000$ ohm<br>Kapacitet trosila $C_d = 0.000255$ F<br>Otpor kondenzatora $R_c = 0.000$ ohm<br>Pocetni napon $U_{c0} = 0.0000$ V<br>Pocetna struja $I_{l0} = 0.0000$ A<br>Koeficijent $K = 0.2490$<br>Pilasti napon:<br>$U_{rm} = 0.700$ V<br>$U_{rM} = 3.700$ V<br>Napon mrtvog vremena $U_{dt} = -1.0000$ V<br>Otpor $R_{l0} = 33000.000$ ohm<br>Otpor $R_2 = 3900.000$ ohm<br>Napon ventila $U_{v1} = 0.000$ V<br>Napon ventila $U_{v2} = 0.000$ V<br>Napon diode pojačala greske $U_D = 0.000$ V<br>Perioda $T = 0.000500$ s<br>Broj koraka po periodi: 10000<br>Korak integracije $h = 0.000\ 000\ 050$ s<br>Perioda za proračun (bez ispisa, ispis): 500 200<br>Granice bifurkacijskog parametra:<br>Povećavanje ulaznog napona $E_{poc} = 7.000$ V, $E_{kraj} = 18.000$ V, $dE = 0.010$ V<br>Smanjivanje ulaznog napona $E_{poc} = 18.000$ V, $E_{kraj} = 7.000$ V, $dE = 0.010$ V<br>Tocka uzorkovanja: 1<br>Tocka za uzimanje rezultata: 1 |

## b) Uvjet generiranja pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala

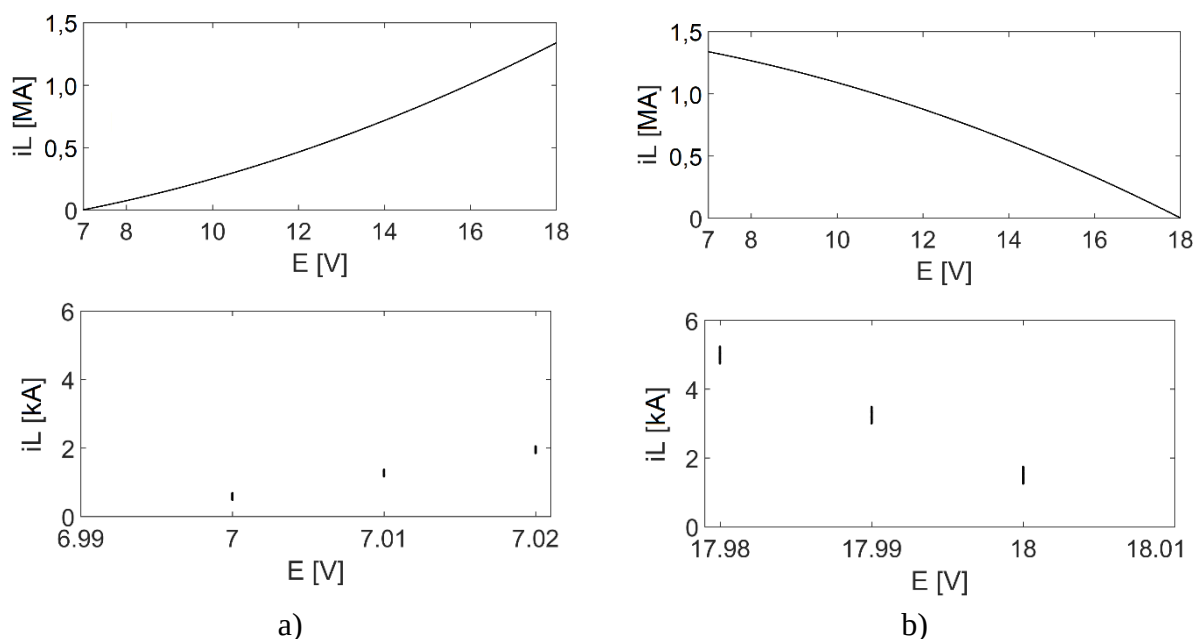
Pokazat će se kako odabrati i namjestiti parametre zadanog matematičkog modela da se u pretvaraču trajno održi pulsno-širinski modulirani upravljački signal (logički signal na izlazu logičkog sklopa I). U tablici P2.2 navedeni su samo parametri simulacije koji su promijenjeni u odnosu na parametre iz tablice P2.1. Zatim su prikazani bifurkacijski dijagrami za svaku od ispitanih kombinacija parametara uz komentiranje podudarnosti rezultata simulacije s rezultatima mjerenja.

Tablica P2.2 Parametri simulacije koji su promijenjeni u odnosu na parametre iz tablice P2.1 i pripadne slike na kojima su prikazani simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami.

| Promijenjeni parametri simulacije                                         | Vrijednosti parametara simulacije                                                                                                                              | Slika       |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Napon mrtvog vremena                                                      | $U_{dt} = -1 \text{ V}$                                                                                                                                        | Slika P 2.3 |
| Napon mrtvog vremena i početni uvjeti                                     | $U_{dt} = -1 \text{ V}$ , $u_C(0) = 21 \text{ V}$ , $i_L(0) = 3 \text{ A}$                                                                                     | Slika P 2.4 |
| Napon mrtvog vremena, početni uvjeti i proporcionalni faktor P-regulatora | $U_{dt} = -1 \text{ V}$ , $u_C(0) = 21 \text{ V}$ , $i_L(0) = 3 \text{ A}$<br>$R_{10} = 16,5 \text{ k}\Omega$ , $8,25 \text{ k}\Omega$ i $3,3 \text{ k}\Omega$ | Slika P 2.5 |
| Napon mrtvog vremena, početni uvjeti i otpor prigušnice                   | $U_{dt} = -1 \text{ V}$ , $u_C(0) = 21 \text{ V}$ , $i_L(0) = 3 \text{ A}$<br>$R_L = 1,0 \Omega$                                                               | Slika P 2.6 |
| Napon mrtvog vremena i otpor prigušnice                                   | $U_{dt} = 0,505 \text{ V}$<br>$R_L = 0,0 \Omega$ , $1,0 \Omega$ i $1,44 \Omega$                                                                                | Slika P 2.7 |

Multistabilnost i histereza pojave su koje su predmet ove disertacije pa je važno prikazati bifurkacijske dijagrame dobivene za oba smjera promjene ulaznog napona. Smanjivanje ulaznog napona je odabrano kao referentno zato što je u mjerenjima obavljenim na pretvaraču prije njegovog matematičkog modeliranja identificirano više različitih ustaljenih stanja pri smanjivanju ulaznog napona, nego pri njegovom povećavanju.

Bifurkacijske dijagrame za napon mrtvog vremena namješten na negativnu vrijednost prikazuje Slika P 2.3. Na izlazu komparatora mrtvog vremena, Slika P 2.1, uvijek je logička jedinica, jer je uvijek  $u_{\text{ramp}} > U_{dt} + 0,7$ . Kapacitet se prazni i kad napon kapaciteta postane dovoljno malen da vrijedi  $u_{\text{ramp},m} > u_i$  ventil V1 prelazi u trajno vođenje. Zato upravljački dio pretvarača ne može generirati pulsno-širinski moduliran upravljački signal. Pretvarač radi u nestabilnom stanju – struja induktiviteta teži u beskonačnost.



Slika P 2.3 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  uzlaznog pretvarača za  $U_{dt} = -1$  V uz a) povećavanje ulaznog napona, b) smanjivanje ulaznog napona.

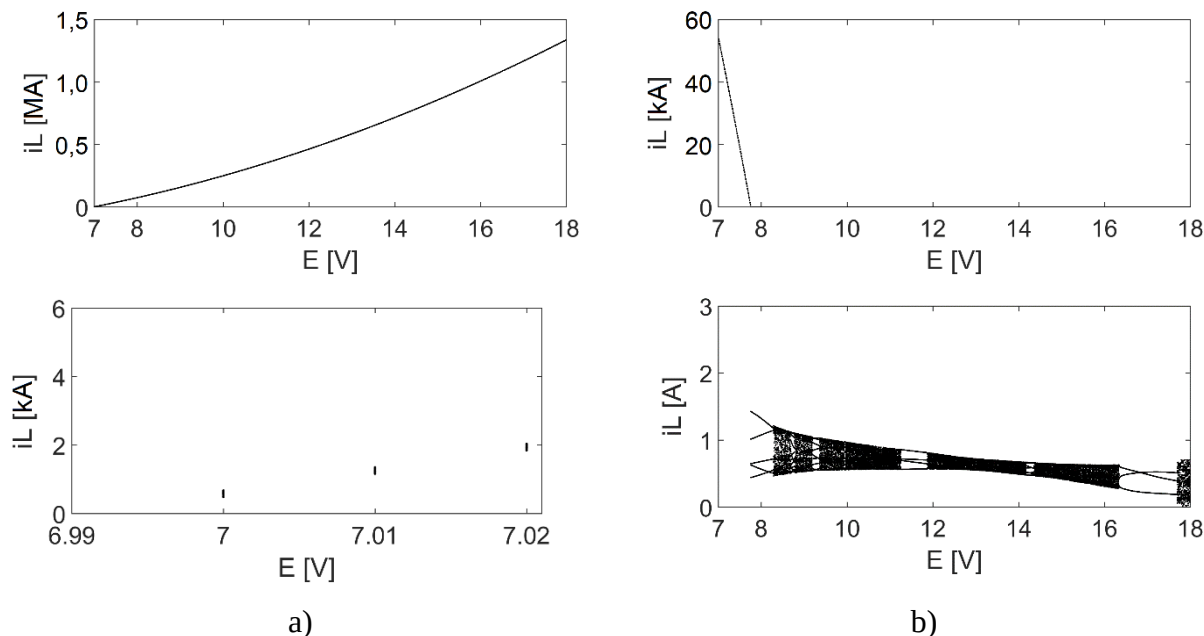
Dobiveni bifurkacijski dijagrami izgledaju kao da prikazuju ustaljeno stanje osnovne periode, ali to je zapravo nestabilno stanje. To se vidi iz donjih prikaza, koji su dobiveni zumiranjem gornjih prikaza za prve tri vrijednosti ulaznog napona. Korak promjene ulaznog napona je  $\Delta E = 10$  mV. Zbog konstantnog napona na induktivitetu na svakom ulaznom naponu struja se linearno povećava tijekom svih 200 perioda pilastog napona koje ulaze u grafički prikaz bifurkacijskog dijagrama. Vidi se da što je dulje ulazni napon priključen na pretvarač to je struja induktiviteta veća i približava se beskonačnosti. Na donjim slikama izgleda kao da se s promjenom ulaznog napona dogodi skokovita promjena struje induktiviteta, ali nije tako. Naime za svaki ulazni napon struja induktiviteta nije prikazana za prvih 500 perioda pilastog napona.

Ovaj matematički model pretvarača nije zadovoljavajući. Zato se mora uvesti napon mrtvog vremena  $U_{dt} > 0$ . Tako će se na izlazu komparatora mrtvog vremena pojaviti logička nula kad bude ispunjen uvjet  $u_{ramp} < U_{dt} + 0,7$  i ventil V1 više neće trajno voditi, nego će se ventili V1 i V2 izmjenjivati u vođenju.

Umjesto namještanja napona mrtvog vremena mogu se pokušati postaviti početni uvjeti veći od nula, Slika P 2.4. Odabrane su maksimalne vrijednosti početnih uvjeta koje se pojavljuju tijekom simulacija.

Uz povećavanje ulaznog napona pretvarač uopće ne radi u ustaljenom stanju. Bifurkacijski dijagrami gotovo su jednaki kao i prethodni dijagrami s početnim uvjetima nula. Uz smanjivanje ulaznog napona pretvarač za ulazne napone od 18 V do 7,85 V radi u raznim ustaljenim stanjima,

a za ulazne napone od 7,85 V do 7 V ne radi u ustaljenom stanju nego je u nestabilnom stanju. Na donjem se prikazu vidi da se u rasponu ulaznog napona od 18 V do 7,85 V pojavljuju bifurkacije i razna ustaljena stanja, ali bez ustaljenog stanja osnovne periode.



Slika P 2.4 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  uzlaznog pretvarača za početne uvjete različite od nula uz a) povećavanje ulaznog napona, b) smanjivanje ulaznog napona.

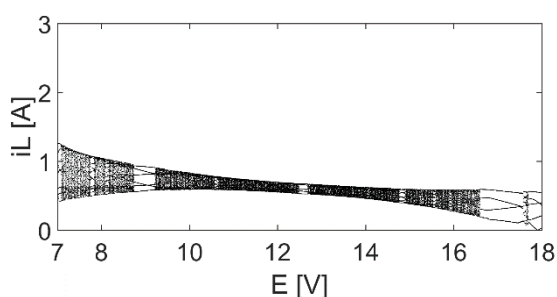
Namještanjem početnih uvjeta može se postići uvjet generiranja pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala i postići rad pretvarača u ustaljenom stanju, ali takvo modeliranje pretvarača nema uporište u stvarnosti, jer pretvarač može biti odspojen od napona izvora pa će se početni uvjeti smanjiti na nulu i pri ponovnom uključanju pretvarača opet bi trajno vodio ventil V1.

Ovaj matematički model pretvarača nije zadovoljavajući. U nastavku će se provjeriti utjecaj proporcionalnog faktora pretvarača i otpornosti induktiviteta uz početne uvjete različite od nula.

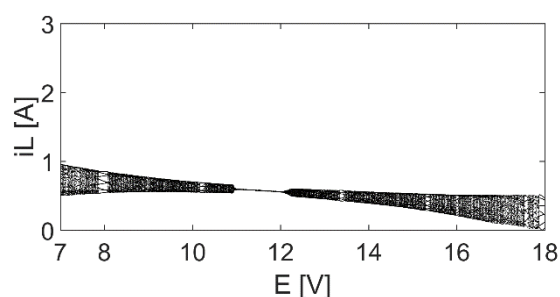
Utjecaj napona  $U_{ref}$  na uvjet  $u_{ramp} > u_i$  može se smanjiti smanjenjem proporcionalnog faktora P-regulatora  $k_p = R_{10}/R_2$  i tako osigurati trajno ispunjenje uvjeta  $u_{ramp,m} < u_i$  i trajno generiranje pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala. Bifurkacijske dijagrame prikazuje Slika P 2.5.

Bifurkacijski dijagram odabranog matematičkog modela pretvarača dobiven je za proporcionalni faktor  $k_p = 8,346$  i prikazuje ga Slika 5.1. Simulirani su bifurkacijski dijagrami s upola manjim faktorom  $k_p = 4,173$ , s četvrtinom faktora  $k_p = 2,087$  i s desetinom faktora  $k_p = 0,8346$ . U sva se tri slučaja može postići uvjet generiranja pulsno-širinski moduliranog

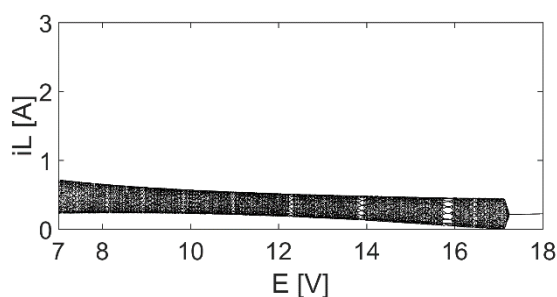
upravljačkog signala i dobiti ustaljena stanja, ali takvo modeliranje pretvarača utječe na regulacijska svojstva pretvarača. Ona nisu predmet disertacije. Pored toga proporcionalni faktor je unaprijed zadana vrijednost odabranog fizičkog modela pretvarača i ne može se mijenjati.



a)



b)

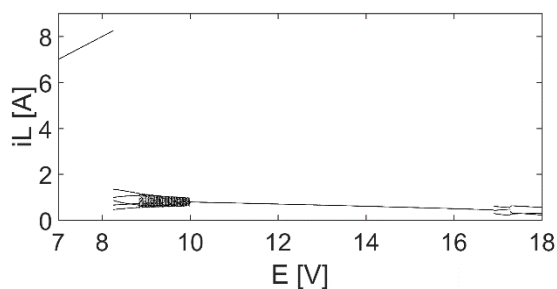


c)

Slika P 2.5 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  uzlaznog pretvarača uz početne uvjete različite od nula i smanjivanje ulaznog napona za proporcionalne faktore P-regulatora a)  $k_p = 4,173$ , b)  $k_p = 2,087$ , c)  $k_p = 0,8346$ .

Zato će se proporcionalni faktor P-regulatora  $k_p = 8,346$  smatrati osnovnom postavkom pretvarača.

Utjecaj otpora prigušnice  $R_L$  uz početne uvjete veće od nula prikazuje Slika P 2.6.



Slika P 2.6 Bifurkacijski dijagram  $i_L = f(E)$  uzlaznog pretvarača uz početne uvjete različite od nula i otpornost prigušnice  $R_L = 1,0 \Omega$ .

Modeliranjem otpora prigušnice  $R_L$  vrijednošću koja odgovara otpornosti petlje fizičkog modela pretvarača dobivena su ustaljena stanja pretvarača, ali su odstupanja od izmjerenih rezultata neprihvatljiva. Zato ovaj matematički model pretvarača nije zadovoljavajući.

Zaključak je da se u matematički model pretvarača mora uvesti napon mrtvog vremena  $U_{dt} > 0$ . Vrijednost  $U_{dt} = 0,505$  V izmjerena je na fizičkom modelu pretvarača i smatrat će se osnovnom postavkom pretvarača. U nastavku će se također smatrati da su osnovne postavke pretvarača s početnim uvjetima jednakim nuli. Treba i naglasiti da ni u jednom radu koji se bavi naponski upravljanim istosmjernim uzlaznim pretvaračem upravljački dio pretvarača nije izveden s naponom mrtvog vremena.

Namještanjem napona mrtvog vremena na  $U_{dt} = 0,505$  V i uzimanjem u obzir otpora prigušnice  $R_L$  dobit će se polazni matematički model koji daje ustaljena stanja kvalitativno podudarna ustaljenim stanjima dobivenim mjerenjem na fizičkom modelu pretvarača.

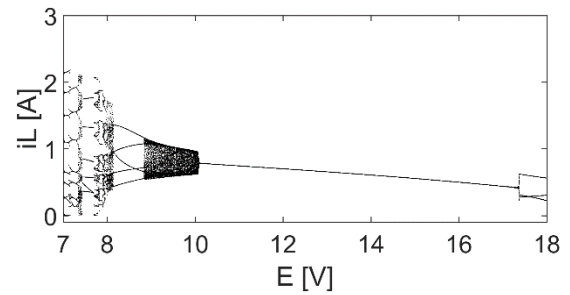
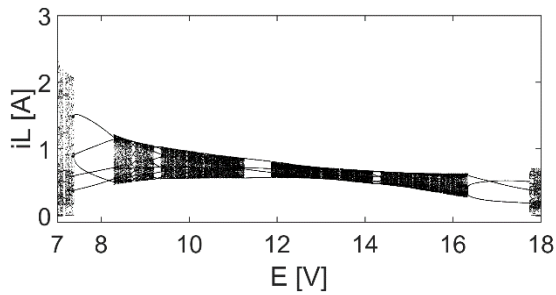
Bifurkacijske dijagrame za otpore prigušnice  $R_L = 1,0 \Omega$  i  $R_L = 1,44 \Omega$  prikazuje Slika P 2.7. U oba se slučaja dobije ustaljeno stanje osnovne periode, Neimark-Sackerova bifurkacija za  $E \approx 8 - 10$  V i bifurkacija srazom granica za  $E < 8$  V. U odnosu na rezultate mjerenja razlike su samo kvantitativne prirode. Također, za  $R_L = 1,0 \Omega$  i  $R_L = 1,44 \Omega$  dobije se histereza, ali samo za Neimark-Sackerovu bifurkaciju, a ne i za bifurkaciju srazom granica. Za  $R_L = 1,0 \Omega$  na ulaznom naponu  $E > 17$  V pojavljuje se periodično ustaljeno stanje kakvo se ne pojavljuje u mjerenjima. Uzroci tome nisu ustanovljeni. Vrijednost  $R_L = 1,0 \Omega$  izmjerena je na fizičkom modelu pretvarača i smatrat će se uz napon  $U_{dt} = 0,505$  V osnovnim postavkama pretvarača.

### **Nužni matematički model pretvarača**

Utvrđeno je da su vrijednosti parametara matematičkog modela pretvarača  $R_L = 1,0 \Omega$  i  $U_{dt} = 0,505$  V nužne da bi se postiglo kvalitativno podudaranje ustaljenih stanja i bifurkacija dobivenih simulacijama i dobivenih mjerenjima na fizičkom modelu pretvarača. Također, tada će se u pretvaraču trajno održati pulsno-širinski modulirani upravljački signal.

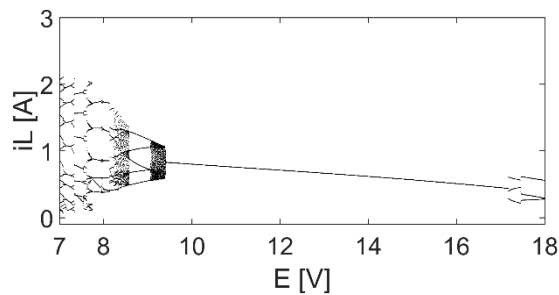
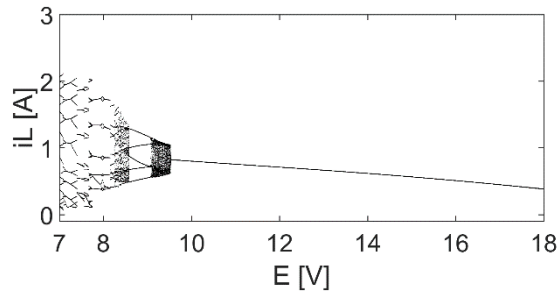
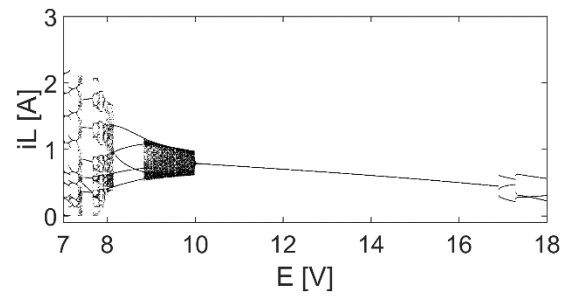
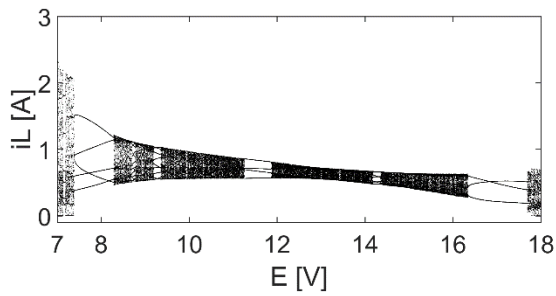
Otpor prigušnice  $R_L$  je parametar koji mora biti u matematičkom modelu pretvarača da bi se u simulacijama pojavile pojave koje su identificirane na fizičkom modelu pretvarača. To se razlikuje od zaključka izvedenog u radu El Aroudija i suradnika [13], ali važno je naglasiti da su kriteriji odlučivanja bili različiti. U tom je radu kriterij bio hoće li se pojaviti kvaziperiodično ustaljeno stanje u određenom rasponu vrijednosti periode pilastog napona ne zahtijevajući pojavljivanje ustaljenog stanje osnovne periode. Bifurkacijski parametar bila je perioda pilastog napona. U ovoj se disertaciji analizira pretvarač na jednoj vrijednosti periode pilastog napona i

promatra se kako se mijenjanjem ulaznog napona mijenja ustaljeno stanje osnovne periode u kvaziperiodično ustaljeno stanje. Bifurkacijski parametar je ulazni napon.



a)

b)



c)

Slika P 2.7 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  uzlaznog pretvarača pri povećavanju (gore) i smanjivanju (dolje) ulaznog napona uz napon mrtvog vremena  $U_{dt} = 0,505$  V i otpore prigušnice a)  $R_L = 0$ , b)  $R_L = 1,0 \Omega$ , c)  $R_L = 1,44 \Omega$ .

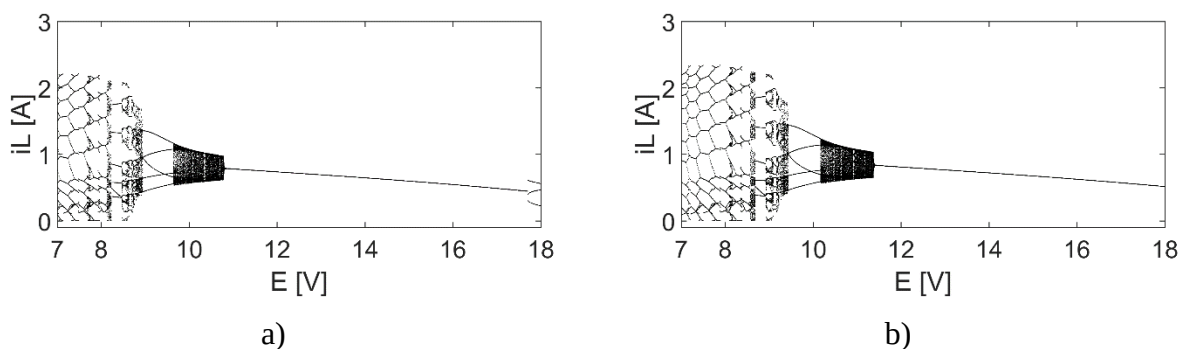
Radi sažetosti neće se pokazati da uvođenje samo napona ventila  $V1$  i  $V2$  i diode  $U_D$ , a bez otpor prigušnice  $R_L$  u matematički model pretvarača, neće rezultirati postizanjem uvjeta generiranja pulsno-širinski moduliranog upravljačkog signala i dobivanje ustaljenih stanja. Uz to, treba podsjetiti da su kondenzator PI-regulatora i nadomjesna otpornost kondenzatora trošila izostavljeni iz modeliranja.

### c) Poboljšavanje matematičkog modela

Pristupa se ugađanju matematičkog modela za postizanje što veće kvantitativne podudarnosti između rezultata mjerenja i rezultata simulacije. Potrebno je uspoređivati rezultate simulacije s rezultatima mjerenja u potpoglavlju 5.2. Dodat će se novi parametri matematičkog modela i promatrati kako utječu na bifurkacijski dijagram. U tablici P2.3 navedeni su samo parametri simulacije koji su promijenjeni u odnosu na parametre iz tablice P2.1. Zatim su prikazani bifurkacijski dijagrami i na kraju dani komentari.

Tablica P2.3 Parametri simulacije koji su promijenjeni u odnosu na parametre iz tablice P2.1 i pripadne slike na kojima su prikazani simulacijom dobiveni bifurkacijski dijagrami.

| Promijenjeni parametri simulacije                                                                                                                               | Vrijednosti parametara simulacije                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Slika        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Napon mrtvog vremena, otpor prigušnice, naponi ventila i koeficijent povratne veze                                                                              | $U_{dt} = 0,505 \text{ V}$ , $R_L = 1,0 \Omega$<br>$U_{V1} = U_{V2} = 0,8 \text{ V}$ , $k = 0,235$ i $0,249$                                                                                                                                                                                                                                                                            | Slika P 2.8  |
| Napon mrtvog vremena, otpor prigušnice, naponi ventila, koeficijent povratne veze i napon diode pojačala greške                                                 | $U_{dt} = 0,505 \text{ V}$ , $R_L = 1,0 \Omega$<br>$U_{V1} = U_{V2} = 0,8 \text{ V}$ , $k = 0,235$ i $0,249$ ,<br>$U_D = 0,3 \text{ V}$                                                                                                                                                                                                                                                 | Slika P 2.9  |
| Napon mrtvog vremena, otpor prigušnice, naponi ventila, koeficijent povratne veze, napon diode pojačala greške i trenutak uzorkovanja i granice pilastog napona | $U_{dt} = 0,505 \text{ V}$ , $R_L = 1,0 \Omega$ , $k = 0,235$ ,<br>$U_D = 0,3 \text{ V}$<br>$U_{V1} = 0,7 \text{ V}$ , $U_{V2} = 0,8 \text{ V}$<br>$t_{uz} = 0,1684T_{\text{ramp}}$ , $u_{\text{ramp,m}} = 0,7 \text{ V}$ ,<br>$u_{\text{ramp,M}} = 3,7 \text{ V}$<br>$t_{uz} = 0,1516T_{\text{ramp}}$ , $u_{\text{ramp,m}} = 0,77 \text{ V}$ ,<br>$u_{\text{ramp,M}} = 3,64 \text{ V}$ | Slika P 2.10 |
| Napon mrtvog vremena, otpor prigušnice, naponi ventila, koeficijent povratne veze i napon diode pojačala greške                                                 | $U_{dt} = 0,505 \text{ V}$ , $R_L = 1,0 \Omega$ , $k = 0,235$ ,<br>$U_D = 0,3 \text{ V}$<br>$U_{V1} = U_{V2} = 0,8 \text{ V}$ ,<br>$U_{dt} = 0,4 \text{ V}$ , $0,505 \text{ V}$ , $0,55 \text{ V}$ i $0,6 \text{ V}$                                                                                                                                                                    | Slika P 2.11 |

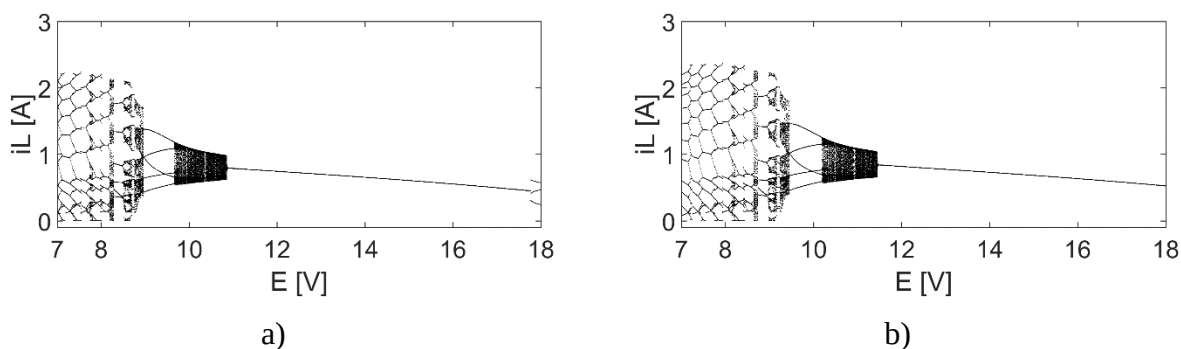


Slika P 2.8 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  pri smanjivanju ulaznog napona za napone ventila  $U_{V1} = U_{V2} = 0,8$  V i koeficijente povratne veze a)  $k = 0,249$ , b)  $k = 0,235$ .

U prethodni matematički model pretvarača dodani su naponi ventila. Pripadne bifurkacijske dijagrame prikazuje Slika P 2.8. Lijevi bifurkacijski dijagram simuliran je za  $k = 0,249$ , a desni za  $k = 0,235$ . Za slučaj s  $k = 0,249$  točka Neimark-Sackerove bifurkacije pomakla se udesno za vrijednost  $U_{V1} = U_{V2} = 0,8$  V u odnosu na matematički model bez napona ventila koji prikazuje Slika P 2.7c. Uvođenjem istih vrijednosti napona ventila u matematički model pretvarača unosi se samo kvantitativna promjena u bifurkacijski dijagram. Kvalitativnih razlika nema. Dobiveni se bifurkacijski dijagrami za ovaj matematički model bolje kvantitativno podudaraju s rezultatima mjerenja od bifurkacijskih dijagrama koje prikazuje Slika P 2.7c. Vidi se da su u oba bifurkacijska dijagrama kvalitativno slična ustaljena stanja, a postoji kvantitativna razlika u točkama bifurkacije.

Potrebno je obrazložiti mijenjanje koeficijenata povratne veze  $k$ . Za  $k = 0,249$  dobivena je srednja vrijednost napona trošila  $U_d(0) = 18,8$  V, a za  $k = 0,235$  dobivena je srednja vrijednost napona trošila  $U_d(0) = 19,8$  V. Na srednjoj vrijednosti napona trošila  $U_d(0) = 20,0$  V mjerenjem je dobiven koeficijent povratne veze  $k = 0,249$ . Odstupanje srednje vrijednosti napona trošila u simulaciji od nazivne vrijednosti napona trošila  $U_d(0) = 20,0$  V uz koeficijent povratne veze  $k = 0,249$  vjerojatno je posljedica toga što P-regulator matematičkog modela pretvarača unosi statičku pogrešku pri regulaciji napona trošila. Za razliku od toga, fizički model pretvarača realiziran je PI-regulatorom. Izostavljanjem kapaciteta PI-regulatora iz matematičkog modela dolazi do razlike u srednjoj vrijednosti napona trošila. S druge strane bifurkacijska točka prve Neimark-Sackerove bifurkacije bolje se podudara s mjerenjima za  $k = 0,249$ , nego za  $k = 0,235$ .

Procijenjeno je da je važnije podudaranje u srednjoj vrijednosti napona trošila nego u bifurkacijskoj točki prve Neimark-Sackerove bifurkacije pa je vrijednost koeficijenta povratne veze  $k = 0,235$  odabrana kao referentna vrijednost matematičkog modela pretvarača u ovoj disertaciji.



Slika P 2.9 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  pri smanjivanju ulaznog napona za napone ventila  $U_{V1} = U_{V2} = 0,8$  V, napon diode  $U_D = 0,3$  V i koeficijente povratne veze a)  $k = 0,249$ , b)  $k = 0,235$ .

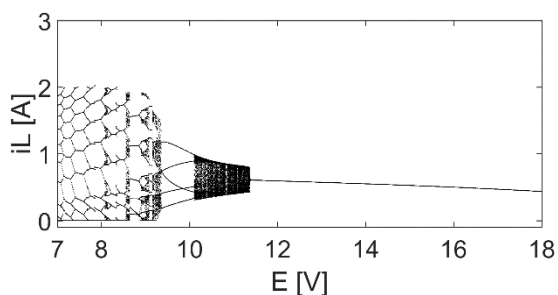
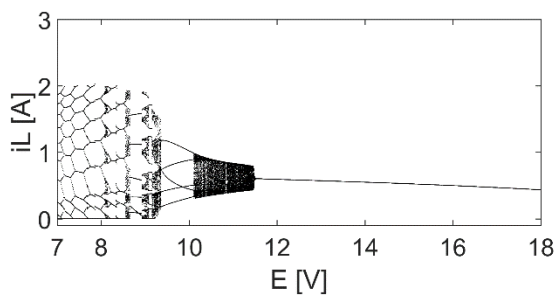
Dodavanjem napona diode  $U_D = 0,3$  V u matematički model pretvarača dobije se bifurkacijski dijagram koji prikazuje Slika P 2.9. Lijevi bifurkacijski dijagram simuliran je za  $k = 0,249$ , a desni za  $k = 0,235$ . U oba se bifurkacijska dijagrama točka bifurkacije Neimark-Sackerove bifurkacije pomakla zanemarivo u odnosu na matematički model bez napona diode, Slika P 2.8. Dobiveni se bifurkacijski dijagrami podjednako kvantitativno podudaraju s rezultatima mjerenja.

Vidi se da su u oba bifurkacijska dijagrama kvalitativno ista ustaljena stanja, a postoji kvantitativna razlika u točkama bifurkacije. Razlog uvođenja napona diode  $U_D$  je točnije simuliranja kontrolnog napona  $u_i$ .

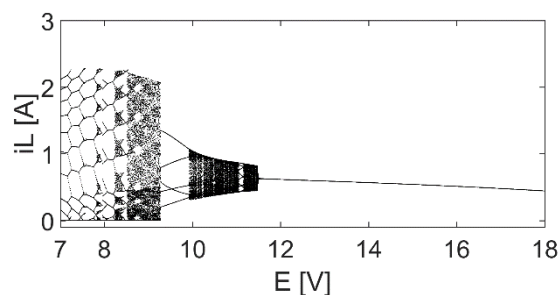
Vrijednost napona diode  $U_D = 0,3$  V odabrana je kao referentna vrijednost matematičkog modela pretvarača u ovoj disertaciji.

Mijenjanje trenutka uzorkovanja ne utječe na ustaljena stanja pretvarača, ali može dati informativniji prikaz, Slika P 2.10. U prikazanom se slučaju želi odrediti na kojoj vrijednosti ulaznog napona nastupa diskontinuirani način rada koji se ujedno povezuje i s maksimalnim faktorom vođenja. Izborom trenutka uzorkovanja kao onaj trenutak kada završava vođenje ventila V2 tijekom graničnog faktora vođenja rezultirat će i minimalnom strujom prigušnice. To se u bifurkacijskim dijagramima vidi kao nagliji prijelaz iz Neimark-Sackerove bifurkacije u bifurkaciju srazom granica pri naponu izvora  $E \approx 9,3$  V.

Svi su bifurkacijski dijagrami simulirani za napone  $U_{V1} = 0,7$  V,  $U_{V2} = 0,8$  V i  $U_D = 0,3$  V i s koeficijentom povratne veze  $k = 0,235$ . U dijagramima lijevo trenutak uzorkovanja struje induktiviteta je  $t_{uz} = 0,1684T_{ramp}$  uz parametre pilastog napona  $u_{ramp,m} = 0,7$  V,  $u_{ramp,M} = 3,7$  V. Pri tom su parametri pilastog napona jednaki nazivnim vrijednostima navedenim u tehničkim karakteristikama integriranog kruga MC34060AP. Gornji je dijagram simuliran pri povećavanju ulaznog napona, a donji pri smanjivanju ulaznog napona. U dijagramu desno granice pilastog napona promijenjene su na vrijednosti izmjerene na fizičkom modelu pretvarača i prema tome je

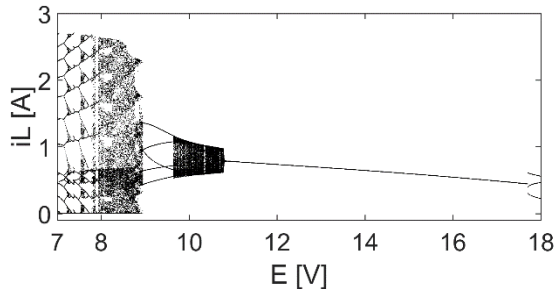


a)

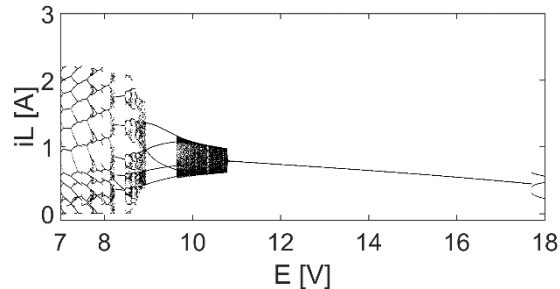


b)

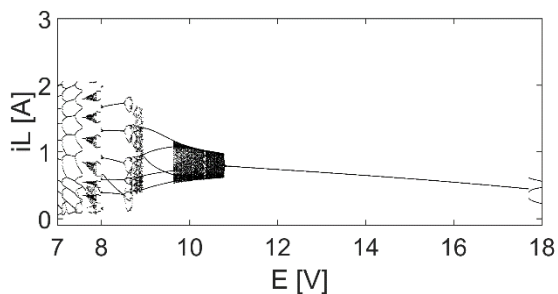
Slika P 2.10 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  za: a)  $t_{uz} = 0,1684T_{ramp}$ ,  $u_{ramp,m} = 0,7$  V,  $u_{ramp,M} = 3,7$  V i povećavanje (gore) i smanjivanje (dolje) ulaznog napona, b)  $t_{uz} = 0,1516T_{ramp}$ ,  $u_{ramp,m} = 0,77$  V,  $u_{ramp,M} = 3,64$  V i smanjivanje ulaznog napona.



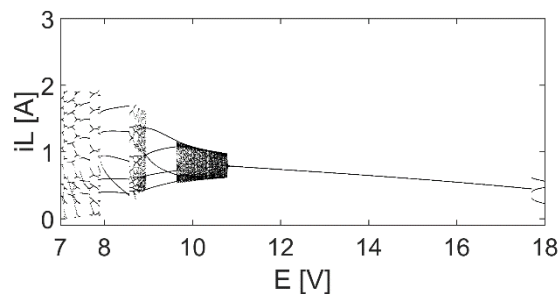
a)



b)



c)



d)

Slika P 2.11 Bifurkacijski dijagrami  $i_L = f(E)$  za napone mrtvog vremena: a)  $U_{dt} = 0,4$  V, b)  $U_{dt} = 0,505$  V, c)  $U_{dt} = 0,55$  V, d)  $U_{dt} = 0,6$  V.

određen trenutak uzorkovanja za dobivanje najmanje vrijednosti struje induktiviteta pri maksimalnom faktoru vođenja. Parametri simulacije su  $t_{uz} = 0,1516T_{ramp}$ ,  $u_{ramp,m} = 0,77 \text{ V}$ ,  $u_{ramp,M} = 3,64 \text{ V}$ . Dijagram je simuliran pri smanjivanju ulaznog napona.

Dijagrami lijevo uzeti su kao referentni dijagrami u ovoj disertaciji i prema tim parametrima rađene su simulacije, koje su se zatim uspoređivale s rezultatima mjerenja.

Utjecaj napona mrtvog vremena na bifurkacijsku točku prve bifurkacije srazom granica prikazuje Slika P 2.11. Vidi se da se bifurkacijska točka prve bifurkacije srazom granica nije promijenila za četiri različite vrijednosti napona mrtvog vremena.

### Odabrani matematički model pretvarača

Parametri odabranog matematičkog modela pretvarača su:  $L = 3,6 \text{ mH}$ ,  $R_L = 1,0 \Omega$ ,  $R_d = 81 \Omega$ ,  $C_d = 255 \mu\text{F}$ ,  $k = 0,235$ ,  $U_{V1} = 0,7 \text{ V}$ ,  $U_{V2} = 0,8 \text{ V}$ ,  $U_D = 0,3 \text{ V}$ ,  $u_{ramp,m} = 0,7 \text{ V}$ ,  $u_{ramp,M} = 3,7 \text{ V}$ . Rezultati simulacija ovog modela uspoređuju se s rezultatima mjerenja i iz rezultata tih simulacija obavlja se predviđanje i identifikacija pojava u pretvaraču.

Tablica P2.4 Parametri simulacije odabranog matematičkog modela naponski upravljalog uzlaznog pretvarača

| POCETNI UVJETI, PARAMETRI PRETVARACA I PARAMETRI SIMULACIJE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Induktivitet prigusnice $L = 0.003600 \text{ H}$<br>Otpor prigusnice $R_L = 1.000 \text{ ohm}$<br>Otpor trosila $R_d = 81.000 \text{ ohm}$<br>Kapacitet trosila $C_d = 0.000255 \text{ F}$<br>Otpor kondenzatora $R_c = 0.000 \text{ ohm}$<br>Pocetni napon $U_{c0} = 0.0000 \text{ V}$<br>Pocetna struja $I_{l0} = 0.0000 \text{ A}$<br>Koeficijent $K = 0.2350$<br>Pilasti napon:<br>$U_{rm} = 0.700 \text{ V}$<br>$U_{rM} = 3.700 \text{ V}$<br>Napon mrtvog vremena $U_{dt} = 0.5050 \text{ V}$<br>Otpor $R_{l0} = 33000.000 \text{ ohm}$<br>Otpor $R_2 = 3900.000 \text{ ohm}$<br>Napon ventila $U_{v1} = 0.700 \text{ V}$<br>Napon ventila $U_{v2} = 0.800 \text{ V}$<br>Napon diode pojacala greske $U_D = 0.300 \text{ V}$<br>Perioda $T = 0.000500 \text{ s}$<br>Broj koraka po periodi: 10000<br>Korak integracije $h = 0.000 \ 000 \ 050 \text{ s}$<br>Perioda za proracun (bez ispisa, ispisa): 500 200<br>Granice bifurkacijskog parametra:<br>Povecavanje ulaznog napona $E_{poc} = 7.000 \text{ V}$ , $E_{kraj} = 18.000 \text{ V}$ , $dE = 0.010 \text{ V}$<br>Smanjivanje ulaznog napona $E_{poc} = 18.000 \text{ V}$ , $E_{kraj} = 7.000 \text{ V}$ , $dE = 0.010 \text{ V}$<br>Tocka uzorkovanja: 1<br>Tocka za uzimanje rezultata: 1 |

### **PRILOG 3    KVANTITATIVNI    REZULTATI    MJERENJA    NA PRETVARAČU U CIJELOM PODRUČJU VRIJEDNOSTI ULAZNOG NAPONA**

Detaljan prikaz ustaljenih stanja istosmjernog uzlaznog pretvarača dobivenih smanjivanjem i povećavanjem ulaznog napona prikazani su tablicom P3.1. Podebljano su označena ustaljena stanja na kojima se prvi put pojavljuju Hopfova bifurkacija i bifurkacija srazom granica. Prikazane su redom vrijednosti ulaznog napona  $E$ , napona trošila  $U_d(0)$ , valovitosti napona trošila (vrijednost od vrha do vrha)  $\Delta u_d$ , valovitosti (vrijednost od vrha do vrha) struje prigušnice  $\Delta i_L$ , srednje vrijednosti struje prigušnice  $I_L(0)$ , izmjenične komponente struje prigušnice  $\tilde{I}_L$  i frekvencija struje prigušnice  $f$ .

Značenja akronima ustaljenih stanja i drugih oznaka:

1P – Ustaljeno stanje osnovne periode

QP – Kvaziperiodično ustaljeno stanje

ML – Periodično ustaljeno stanje zaključane faze

K – Kaotično ustaljeno stanje.

+ – Ustaljeno stanje se mijenja tako da je ili periodično ustaljeno stanje s naznakama kvaziperiodičnog ustaljenog stanja ili kaotično ustaljeno stanje u kojem se u valnom obliku i harmonijskom sastavu prepoznaje struktura periodičnog ili kvaziperiodičnog ustaljenog stanja.

i – Oznaka da se dva ili više ustaljenih stanja izmjenjuju tijekom mjerenja.

Broj uz akronim ustaljenog stanja – Oznaka uz ustaljena stanja ML i QP. Označava omjer periode tog ustaljenog stanja i periode pilastog napona. Pored QP uvijek je razlomak  $m/n$  koji označava da je omjer „periode“ tog ustaljenog stanja i periode pilastog napona između cjelobrojnih vrijednosti  $m$  i  $n$ .

Frekvencija struje prigušnice izmjerena je posredno TrueRMS instrumentom, koji mjeri periodu struje prigušnice. Ne može se smatrati pouzdanim načinom identifikacije ustaljenog stanja, nego kao pomoćna metoda i za uočavanje kvalitativnih odnosa.

Tablica P3.1 Ustaljena stanja istosmjernog uzlaznog pretvarača: a) Uz smanjivanje ulaznog napona, b) Uz povećavanje ulaznog napona, c) Pregled ustaljenih stanja za dvije grupe mjerenja sa smanjivanjem i povećavanjem ulaznog napona.

| a) Smanjivanje ulaznog napona |         |              |                  |                  |              |                   |          |
|-------------------------------|---------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------------------|----------|
| Ustaljeno stanje              | $E$ , V | $U_d(0)$ , V | $\Delta u_d$ , V | $\Delta i_L$ , A | $I_L(0)$ , A | $\tilde{I}_L$ , A | $f$ , Hz |
| 1P                            | 12,0    | 20,03        | 0,280            | 0,695            | 0,485        | 0,194             | 2004     |
| 1P                            | 11,7    | 20,03        | 0,290            | 0,705            | 0,500        | 0,195             | 2003     |
| 1P                            | 11,5    | 20,04        | 0,292            | 0,705            | 0,511        | 0,195             | 2003     |
| 1P + QP                       | 11,3    | 20,04        | 0,302            | 0,715            | 0,522        | 0,194             | 2003     |
| <b>1P + QP</b>                | 11,2    | 20,04        | 0,305            | 0,700            | 0,529        | 0,194             | 2003     |
| <b>QP4/5</b>                  | 11,1    | 20,04        | 0,600            | 1,09             | 0,538        | 0,244             | ~470     |
| QP4/5                         | 11,0    | 20,04        | 0,650            | 1,12             | 0,545        | 0,253             | 486      |
| QP4/5                         | 10,9    | 20,04        | 0,680            | 1,16             | 0,552        | 0,262             | ~438     |
| ML5                           | 10,8    | 20,04        | 0,700            | 1,19             | 0,561        | 0,284             | 401      |
| ML5                           | 10,7    | 20,04        | 0,700            | 1,22             | 0,568        | 0,290             | 401      |
| QP5/6                         | 10,6    | 20,04        | 0,730            | 1,25             | 0,576        | 0,285             | ~580     |
| QP5/6                         | 10,5    | 20,04        | 0,750            | 1,29             | 0,584        | 0,292             | ~500-540 |
| QP5/6                         | 10,4    | 20,05        | 0,780            | 1,32             | 0,592        | 0,303             | ~387     |
| QP5/6                         | 10,3    | 20,05        | 0,800            | 1,37             | 0,601        | 0,315             | 381      |
| QP5/6                         | 10,2    | 20,05        | 0,830            | 1,42             | 0,611        | 0,332             | 376      |
| QP5/6                         | 10,1    | 20,05        | 0,900            | 1,49             | 0,622        | 0,350             | 369      |
| <b>QP5/6</b>                  | 10,0    | 20,05        | 1,02             | 1,59             | 0,633        | 0,373             | 363      |
| <b>QP15/16 + K</b>            | 9,9     | 20,30        | 4,3              | 3,23             | ~0,895       | 1,075             | 135      |
| ML14                          | 9,8     | 20,24        | 3,7              | 3,03             | 0,876        | 1,041             | 143      |
| ML16 + K                      | 9,7     | 20,37        | 4,2              | 3,19             | 0,943        | 1,120             | 125      |
| ML16                          | 9,6     | 20,32        | 4,1              | 3,17             | 0,951        | 1,114             | 125      |
| ML16 + K, ML16                | 9,5     | 20,30        | 4,2              | 3,18             | ~0,961       | 1,107             | 126      |
| ML15 + K                      | 9,4     | 20,22        | 4,2              | 3,15             | ~0,950       | 1,073             | 133      |
| ML15                          | 9,3     | 20,17        | 3,7              | 3,02             | 0,960        | 1,067             | 133      |
| ML17                          | 9,2     | 20,26        | 4,1              | 3,14             | 1,026        | 1,131             | 118      |
| ML16 + K                      | 9,1     | 20,18        | 3,9              | 3,06             | 1,014        | 1,091             | 125      |
| ML16                          | 9,0     | 20,15        | 3,8              | 3,01             | 1,029        | 1,090             | 125      |
| ML16 + K                      | 8,9     | 20,10        | 3,7              | 2,98             | 1,037        | 1,077             | 125      |
| ML17                          | 8,8     | 20,16        | 3,9              | 3,01             | 1,088        | 1,110             | 118      |
| ML17                          | 8,7     | 20,09        | 3,8              | 2,97             | 1,094        | 1,095             | 118      |
| ML17 + K                      | 8,6     | 20,07        | 3,8              | 2,95             | 1,109        | 1,084             | 118      |
| ML16                          | 8,5     | 20,00        | 3,5              | 2,86             | 1,099        | 1,049             | 125      |
| ML17 + K                      | 8,4     | 20,00        | 3,7              | 2,89             | 1,134        | 1,062             | 117      |
| ML17                          | 8,3     | 19,97        | 3,5              | 2,83             | 1,153        | 1,052             | 118      |
| ML17, ML18                    | 8,2     | 19,92        | 3,4              | 2,79             | 1,160        | 1,060             | 111      |
| ML18                          | 8,1     | 19,93        | 3,5              | 2,76             | 1,207        | 1,041             | 111      |
| ML19                          | 8,0     | 19,94        | 3,5              | 2,75             | 1,248        | 1,040             | 105      |
| ML19 + K                      | 7,9     | 19,91        | 3,5              | 2,70             | 1,256        | 1,018             | 105      |
| ML18                          | 7,8     | 19,86        | 3,1              | 2,64             | 1,250        | 0,981             | 111      |
| ML19                          | 7,7     | 19,85        | 3,2              | 2,61             | 1,285        | 0,975             | 105      |
| ML20                          | 7,6     | 19,83        | 3,2              | 2,56             | 1,318        | 0,959             | 100      |
| ML21                          | 7,5     | 19,80        | 3,2              | 2,52             | 1,347        | 0,942             | 95       |
| ML20                          | 7,4     | 19,81        | 2,9              | 2,45             | 1,350        | 0,896             | 100      |
| ML21                          | 7,3     | 19,78        | 2,9              | 2,41             | 1,375        | 0,872             | 95       |
| ML22                          | 7,2     | 19,75        | 2,8              | 2,35             | 1,398        | 0,842             | 91       |
| ML22                          | 7,1     | 19,79        | 2,6              | 2,29             | 1,418        | 0,796             | 91       |
| ML23                          | 7,0     | 19,77        | 2,6              | 2,24             | 1,453        | 0,761             | 83       |

| b) Povećavanje ulaznog napona |         |              |                  |                  |              |                   |          |
|-------------------------------|---------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------------------|----------|
| Ustaljeno stanje              | $E$ , V | $U_d(0)$ , V | $\Delta u_d$ , V | $\Delta i_L$ , A | $I_L(0)$ , A | $\tilde{I}_L$ , A | $f$ , Hz |
| ML26 + K                      | 7,0     | 19,66        | 2,3              | 2,12             | 1,534        | 0,699             | 77       |
| ML25                          | 7,1     | 19,64        | 2,5              | 2,21             | 1,507        | 0,740             | 80       |
| ML23                          | 7,2     | 19,68        | 2,6              | 2,29             | 1,478        | 0,789             | 87       |
| ML21 + K                      | 7,3     | 19,70        | 2,7              | 2,32             | 1,444        | 0,815             | 95       |
| ML22 + K                      | 7,4     | 19,67        | 2,8              | 2,37             | 1,438        | 0,860             | 91       |
| ML21 + K                      | 7,5     | 19,70        | 2,9              | 2,41             | 1,416        | 0,888             | 95       |
| ML20 + K                      | 7,6     | 19,72        | 2,9              | 2,45             | 1,391        | 0,909             | 100      |
| ML19 + K                      | 7,7     | 19,74        | 3,0              | 2,50             | 1,363        | 0,930             | 105      |
| ML20                          | 7,8     | 19,74        | 3,1              | 2,56             | 1,358        | 0,970             | 100      |
| ML19                          | 7,9     | 19,77        | 3,1              | 2,58             | 1,326        | 0,988             | 105      |
| ML19                          | 8,0     | 19,80        | 3,2              | 2,62             | 1,290        | 0,998             | 105      |
| ML18                          | 8,1     | 19,79        | 3,2              | 2,64             | 1,290        | 0,993             | 111      |
| ML18 i ML18 + K               | 8,2     | 19,84        | 3,3              | 2,68             | 1,278        | 1,104             | 111      |
| ML17                          | 8,3     | 19,85        | 3,2              | 2,68             | 1,242        | 1,013             | 118      |
| ML18 + K                      | 8,4     | 19,86        | 3,5              | 2,77             | 1,242        | 1,044             | 111      |
| ML18                          | 8,5     | 19,91        | 3,5              | 2,80             | 1,236        | 1,068             | 111      |
| ML17                          | 8,6     | 19,89        | 3,4              | 2,79             | 1,191        | 1,052             | 118      |
| ML17                          | 8,7     | 19,94        | 3,5              | 2,84             | 1,188        | 1,070             | 118      |
| ML16 i ML17 + K               | 8,8     | 19,93        | 3,4              | 2,82             | 1,137        | 1,052             | 125      |
| ML16 i ML17 + K               | 8,9     | 19,99        | 3,5              | 2,86             | 1,128        | 1,072             | 125      |
| ML17                          | 9,0     | 20,08        | 3,9              | 3,01             | 1,120        | 1,126             | 118      |
| ML32                          | 9,1     | 20,07        | 3,8              | 3,01             | 1,072        | 1,098             | 125      |
| ML16                          | 9,2     | 20,09        | 3,8              | 3,02             | 1,058        | 1,106             | 125      |
| ML16                          | 9,3     | 20,15        | 3,8              | 3,05             | 1,051        | 1,118             | 125      |
| QP15/16                       | 9,4     | 20,15        | 4,0              | 3,11             | 1,023        | 1,108             | 127      |
| ML15                          | 9,5     | 20,14        | 3,7              | 3,03             | 0,984        | 1,084             | 133      |
| ML15                          | 9,6     | 20,19        | 3,8              | 3,06             | 0,977        | 1,095             | 133      |
| QP15/16 + K                   | 9,7     | 20,24        | 4,1              | 3,17             | 0,978        | 1,116             | 128      |
| ML16                          | 9,8     | 20,28        | 4,1              | 3,18             | 0,975        | 1,132             | 125      |
| ML16                          | 9,9     | 20,34        | 4,2              | 3,21             | 0,969        | 1,141             | 125      |
| ML14 i ML14 + K               | 10,0    | 20,23        | 3,7              | 3,05             | 0,893        | 1,057             | 143      |
| QP14/15 + K                   | 10,1    | 20,28        | 4,2              | 3,22             | 0,893        | 1,075             | 137      |
| QP14/15 + K                   | 10,2    | 20,32        | 4,2              | 3,23             | 0,885        | 1,083             | 136      |
| ML15                          | 10,3    | 20,38        | 4,1              | 3,20             | 0,886        | 1,101             | 134      |
| QP14/15 + K                   | 10,4    | 20,36        | 4,3              | 3,27             | 0,856        | 1,070             | 137      |
| QP14/15 + K                   | 10,5    | 20,39        | 4,3              | 3,28             | 0,842        | 1,068             | 139      |
| QP14/15 + K                   | 10,6    | 20,38        | 4,3              | 3,29             | 0,828        | 1,060             | 141      |
| QP13/14 + K                   | 10,7    | 20,39        | 4,3              | 3,25             | 0,817        | 1,044             | 145      |
| QP13/14 + K                   | 10,8    | 20,39        | 4,3              | 3,25             | 0,794        | 1,037             | 144      |
| QP13/14 + K                   | 10,9    | 20,38        | 4,3              | 3,25             | 0,775        | 1,015             | 148      |
| QP13/14 + K                   | 11,0    | 20,37        | 4,2              | 3,22             | 0,766        | 0,998             | 151      |
| QP13/14 + K                   | 11,1    | 20,39        | 4,2              | 3,20             | 0,748        | 0,986             | 153      |
| QP13/14 + K                   | 11,2    | 20,38        | 4,1              | 3,17             | 0,737        | 0,975             | 154      |
| <b>1P</b>                     | 11,3    | 20,04        | 0,32             | 0,72             | 0,533        | 0,194             | 2004     |
| 1P                            | 11,4    | 20,04        | 0,32             | 0,72             | 0,526        | 0,194             | 2004     |
| 1P                            | 11,5    | 20,04        | 0,31             | 0,71             | 0,519        | 0,193             | 2004     |
| 1P                            | 11,6    | 20,04        | 0,31             | 0,71             | 0,514        | 0,193             | 2004     |
| 1P                            | 11,8    | 20,04        | 0,31             | 0,71             | 0,503        | 0,193             | 2005     |
| 1P                            | 12,0    | 20,04        | 0,30             | 0,71             | 0,493        | 0,19              | 2005     |

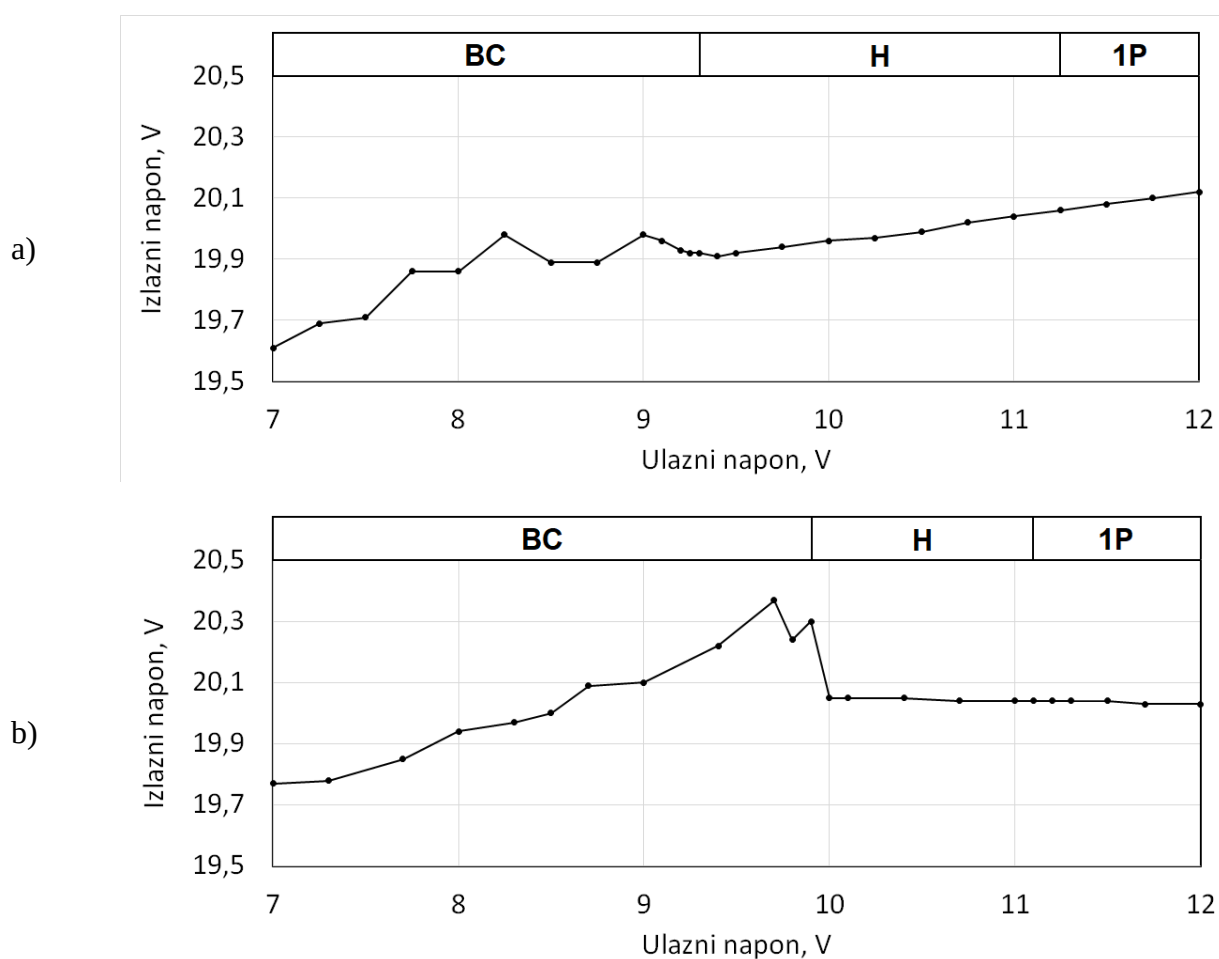
| c) Pregled ustaljenih stanja za dvije grupe mjerenja |                              |                      |  |                      |                      |
|------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|--|----------------------|----------------------|
| Ulazni napon<br><i>E</i> , V                         | Prvo mjerenje, Tablica P3.1a |                      |  | Treće mjerenje       |                      |
|                                                      | Smanjivanje <i>E</i>         | Povećavanje <i>E</i> |  | Smanjivanje <i>E</i> | Povećavanje <i>E</i> |
|                                                      | Ustaljeno stanje             | Ustaljeno stanje     |  | Ustaljeno stanje     | Ustaljeno stanje     |
| 12,0                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,9                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,8                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,7                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,6                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,5                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,4                                                 | 1P                           | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,3                                                 | 1P + QP                      | 1P                   |  | 1P                   | 1P                   |
| 11,2                                                 | 1P + QP                      | QP13/14 + K          |  | 1P + QP              | 1P                   |
| 11,1                                                 | QP4/5                        | QP13/14 + K          |  | 1P + QP              | 1P                   |
| 11,0                                                 | QP4/5                        | QP13/14 + K          |  | 1P + QP              | QP12/13 + K          |
| 10,9                                                 | QP4/5                        | QP13/14 + K          |  | 1P + QP              | QP12/13 + K          |
| 10,8                                                 | ML5                          | QP13/14 + K          |  | 1P + QP, QP4/5       | ML13 + K             |
| 10,7                                                 | ML5                          | QP13/14 + K          |  | QP4/5 i ML5          | QP13/14 + K          |
| 10,6                                                 | QP5/6                        | QP14/15 + K          |  | ML5                  | QP13/14 + K          |
| 10,5                                                 | QP5/6                        | QP14/15 + K          |  | QP5/6                | QP13/14 + K          |
| 10,4                                                 | QP5/6                        | QP14/15 + K          |  | QP5/6                | ML14 + K             |
| 10,3                                                 | QP5/6                        | ML15                 |  | QP5/6                | QP14/15 + K          |
| 10,2                                                 | QP5/6                        | QP14/15 + K          |  | QP5/6                | ML15                 |
| 10,1                                                 | QP5/6                        | QP14/15 + K          |  | QP5/6                | QP14/15 + K          |
| 10,0                                                 | QP5/6                        | ML14 i ML14 + K      |  | QP5/6                | QP14/15 + K          |
| 9,9                                                  | QP15/16 + K                  | ML16                 |  | ML11-Hopf            | ML14                 |
| 9,8                                                  | ML14                         | ML16                 |  | ML14 + K             | ML14 + K             |
| 9,7                                                  | ML16 + K                     | QP15/16 + K          |  | ML15 + K i ML16      | ML15 + K             |
| 9,6                                                  | ML16                         | ML15                 |  | ML15 + K             | ML15 + K             |
| 9,5                                                  | ML16 + K, ML16               | ML15                 |  | ML15                 | ML15                 |
| 9,4                                                  | ML15 + K                     | QP15/16              |  | ML15                 | ML15                 |
| 9,3                                                  | ML15                         | ML16                 |  | ML15 + K             | ML15 + K             |
| 9,2                                                  | ML17                         | ML16                 |  | ML32                 | ML16                 |
| 9,1                                                  | ML16 + K                     | ML32                 |  | ML16                 | ML32                 |
| 9,0                                                  | ML16                         | ML17                 |  | ML16 i ML32          | ML32                 |
| 8,9                                                  | ML16 + K                     | ML16 i ML17 + K      |  | ML16 i ML32          | ML15                 |
| 8,8                                                  | ML17                         | ML16 i ML17 + K      |  | ML15                 | ML17                 |
| 8,7                                                  | ML17                         | ML17                 |  | ML16 i ML32          | ML32                 |
| 8,6                                                  | ML17 + K                     | ML17                 |  | ML16                 | ML16                 |
| 8,5                                                  | ML16                         | ML18                 |  | ML16                 | ML16, ML16 + K       |
| 8,4                                                  | ML17 + K                     | ML18 + K             |  | ML17                 | ML17                 |
| 8,3                                                  | ML17                         | ML17                 |  | ML17                 | ML17                 |
| 8,2                                                  | ML17, ML18                   | ML18 i ML18 + K      |  | ML16 + K             | ML18, ML16           |
| 8,1                                                  | ML18                         | ML18                 |  | QP17/18 + K          | ML17 + K             |
| 8,0                                                  | ML19                         | ML19                 |  | ML17                 | ML17                 |
| 7,9                                                  | ML19 + K                     | ML19                 |  | ML18                 | ML18                 |
| 7,8                                                  | ML18                         | ML20                 |  | ML18                 | ML18 + K             |
| 7,7                                                  | ML19                         | ML19 + K             |  | ML19                 | ML19 + K             |
| 7,6                                                  | ML20                         | ML20 + K             |  | ML18 + K             | ML19 + K             |
| 7,5                                                  | ML21                         | ML21 + K             |  | ML19                 | ML19 + K             |
| 7,4                                                  | ML20                         | ML22 + K             |  | ML20                 | ML20                 |
| 7,3                                                  | ML21                         | ML21 + K             |  | ML21                 | ML21 + K             |
| 7,2                                                  | ML22                         | ML23                 |  | ML20                 | ML20                 |
| 7,1                                                  | ML22                         | ML25                 |  | ML21                 | ML22                 |
| 7,0                                                  | ML23                         | ML26 + K             |  | ML23                 | ML23                 |

## PRILOG 4 UTJECAJ BIFURKACIJA NA IZLAZNI NAPON PRETVARAČA

U odsječku 5.2.3 analizira se nepovoljan utjecaj bifurkacija na svojstva pretvarača. Pokazat će se utjecaj bifurkacija na srednju vrijednost izlaznog napona i na njegovu valovitost.

### Vanjska karakteristika uzlaznog pretvarača

Smanjivanjem ulaznog napona pretvarača izlazni napon pretvarača  $U_d(0)$  mijenja se kako to prikazuju vanjske karakteristike dobivene simulacijom i mjerenjem, Slika P 4.1.



Slika P 4.1 Vanjska karakteristika pretvarača dobivena a) simulacijom i b) mjerenjem.

Uočljivo je povećanje izlaznog napona na mjestu prve bifurkacije srazom granica. Uz to, vidi se kvalitativna razlika u regulaciji izlaznog napona pretvarača prije i poslije bifurkacije srazom granica. Tako se u području ustaljenog stanja osnovne periode i Hopfove bifurkacije izlazni napon s obzirom na ulazni mijenja u simulaciji s približno 80 mV/V, a u mjerenjima s približno

$-10 \text{ mV/V}$ . U području bifurkacije srazom granica izlazni se napon s obzirom na ulazni mijenja u mjerenjima s približno  $180 \text{ mV/V}$ , a u simulaciji promjena izlaznog napona nije monotona. I promjena izlaznog napona i degradacija regulacije izlaznog napona smanjuju kvalitetu izlaznog napona i neželjene su pojave. Promjena izlaznog napona podudara se s naglim povećanjem srednje vrijednosti struje prigušnice (ulazne struje), Slika 5.18. Uzročno-posljedična veza promjene izlaznog napona, degradacije regulacije izlaznog napona, kao i povezanosti značajnih promjena izlaznog napona i ulazne struje nije istražena.

### **Valovitost izlaznog napona**

Valovitost izlaznog napona (napona trošila, napona kondenzatora) znatno se međusobno razlikuje u područjima ustaljenog stanja osnovne periode, Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica. Smanjivanjem ulaznog napona u bifurkacijskim točkama Hopfove bifurkacije i bifurkacije srazom granica dolazi do skokovitog povećanja valovitosti izlaznog napona. To je neželjena pojava, jer smanjuje kvalitetu izlaznog napona. Također se povećavaju i gubici kondenzatora. Tijekom smanjivanja ulaznog napona i sve dubljeg ulaženja u područje Hopfove bifurkacije valovitost se povećava, a sve dubljim ulaženjem u područje bifurkacije srazom granica valovitost se smanjuje. Tako je prema tablici P3.1 iz Priloga 3 u području Hopfove bifurkacije valovitost 2 do 4 puta veća nego u ustaljenom stanju osnovne periode, a u području bifurkacije srazom granica valovitost je za red veličine veća nego u ustaljenom stanju osnovne periode.

## **PRILOG 5     PROGRAMSKI KODOVI DIGITALNIH SIMULACIJA**

U prilogu ovog rada, u elektroničkom obliku pohranjenom na CD-u nalazi se:

- programski kôd u jeziku C za računanje karakterističnih valnih oblika naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\Valni.c`)
- programski kôd u jeziku C za računanje srednjih i efektivnih vrijednosti karakterističnih valnih oblika naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\Valni_Srednja.c`)
- programski kôd u jeziku C za računanje bifurkacijskog dijagrama struje induktiviteta po ulaznom naponu naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\Bif.c`)
- programski kôd u jeziku C za računanje Poincaréovih slika naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\PMape.c`)
- programski kôd u programskom paketu MATLAB za crtanje karakterističnih valnih oblika naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\crtajStrujuNapon.m`)
- programski kôd u programskom paketu MATLAB za crtanje trajektorija naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\crtajTrajekt.m`)
- programski kôd u programskom paketu MATLAB za crtanje bifurkacijskog dijagrama struje induktiviteta po ulaznom naponu naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\crtajBif.m`)
- programski kôd u programskom paketu MATLAB za crtanje Poincaréovih slika naponski upravljano istosmjernog uzlaznog pretvarača (`_:\Programi\crtajMape.c`)