

## OVISNOST USTALJENIH STANJA UZLAZNOG PRETVARAČA O SKLOPNOJ FREKVENCiji

### BOOST CONVERTER STEADY-STATE DEPENDANCE ON SWITCHING FREQUENCY

Željko Stojanović<sup>1</sup>, Igor Božić<sup>1</sup>, Marko Miletić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup>Visoka tehnička škola u Bjelovaru, Bjelovar, Hrvatska

#### Sažetak

Na fizički izvedenom uzlaznom pretvaraču identificirana su ustaljena stanja za nekoliko različitih sklopnih frekvencija mijenjanjem ulaznog napona u punom opsegu njegovih vrijednosti. Izmjereni su valni oblici struje prigušnice, pilastog napona i napona povratne veze. Temeljem tih valnih oblika identificirana su ustaljena stanja, bifurkacije udvostručenjem periode i srazom granica, te put u kaos udvostručenjem periode. Dvoparametarskim bifurkacijskim dijagramom po sklopnoj frekvenciji i ulaznom naponu prikazana su područja identificiranih ustaljenih stanja. Smanjenjem sklopne frekvencije područja vrijednosti ulaznog napona za koja se postiže rad u ustaljenom stanju osnovne periode sve su uža, a područja subharmoničkih ustaljenih stanja i kaotičnog ustaljenog stanja sve su brojnija i šira. Pritom, bifurkacije nastaju na sve nižem ulaznom naponu. Temeljem identificiranih ustaljenih stanja moguće je odrediti prihvatljiv raspon vrijednosti sklopne frekvencije uzlaznog pretvarača.

*Ključne riječi: uzlazni pretvarač, ustaljeno stanje, sklopna frekvencija, bifurkacija*

#### Abstract

The boost converter is realized. By changing input voltage in its full range the steady-states of boost converter for a few switching frequencies are identified. The waveforms of inductor current, ramp voltage and feedback voltage are taken. Based on those waveforms steady-states, period doubling bifurcations, border collision bifurcations and period doubling route to chaos are identified. The ranges of identified steady-

states are shown in twoparameter bifurcation diagram with switching frequency and input voltage. By decreasing switching frequency ranges of input voltage which set fundamental period operation are getting narrower and ranges of input voltage which set subharmonic and chaotic steady-states are getting more numerous and broader. At the same time, input voltage causing bifurcations is lowering. On the basis of identified steady-states one can determine acceptable range of converter's switching frequency.

*Keywords: boost converter, steady-state, switching frequency, bifurcation*

#### 1. Uvod

##### 1. Introduction

U projektiranju istosmjernih pretvarača važan je projektantski zahtjev odabir sklopne frekvencije. Sklopna frekvencija s donje je strane ograničena valovitošću varijabli stanja – strujom prigušnice i naponom kondenzatora te izbjegavanjem mehaničkih titranja u čujnom području, a s gornje strane sklopnim gubicima [1], [2]. Pretvarači se projektiraju za rad u periodičkom ustaljenom stanju osnovne periode. Tada je perioda varijabli stanja jednaka periodi sklopne frekvencije. Istosmjerni su pretvarači nelinearni vremenski promjenljivi sklopovi i kao takvi sklone su prilikom mijenjanja parametara pretvarača „naglim“ promjenama ustaljenih stanja – bifurkacijama [3]. Pretvarač tada radi ili u ustaljenom stanju periode koja je višekratnik osnovne periode ili u kvaziperiodičnom

ustaljenom stanju ili u kaotičnom ustaljenom stanju. Sva su ova ustaljena stanja nepoželjna, jer povećavaju valovitost izlaznog napona, strujna i naponska opterećenja komponentata i nepovoljno djeluju na harmonički sastav valnih oblika varijabli stanja [3], [4]. Zato je ova ustaljena stanja potrebno izbjeći. Bifurkacije mogu nastati promjenom raznoraznih parametara, kao što su ulazni napon, induktivitet prigušnice pretvarača, struja trošila, koeficijent pojačanja povratne veze i drugo [3], [5]. Sklopna frekvencija pretvarača je parametar koji se u radu pulsno-širinski upravljanih pretvarača obično ne mijenja. To je jedan od razloga zašto je dosad u literaturi zabilježeno malo istraživanja ovisnosti ustaljenih stanja pretvarača o sklopnoj frekvenciji [5], [6].

U radu će se na fizičkom modelu uzlaznog pretvarača prikazati ustaljena stanja i bifurkacije pretvarača izmjerena na nekoliko različitih frekvencija. Identificirat će se i putovi u kaos. Na temelju rezultata dobit će se za poznatu sklopnu frekvenciju područja ulaznog napona za siguran rad u ustaljenom stanju osnovne periode. Tako će biti određen još jedan uvjet kojeg treba imati na umu pri izboru sklopne frekvencije.

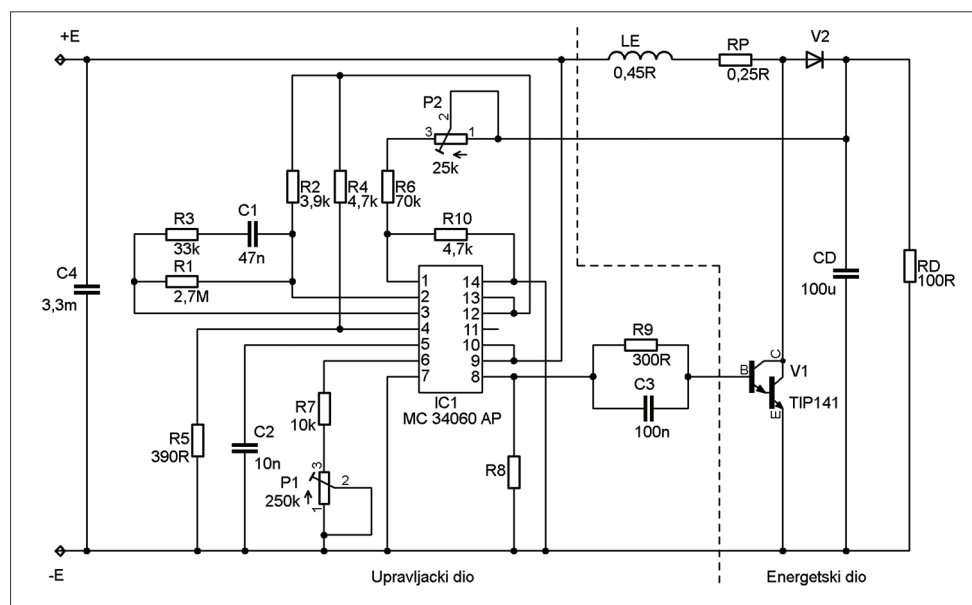
## 2. Fizička realizacija pretvarača

### 2. Physical realization of the boost converter

Fizička realizacija pretvarača (Slika 1) temelji se na integriranom sklopu MC34060A za pulsno-širinsku modulaciju upravljivog ventila  $V_1$ . Iz građe integriranog sklopa (Slika 2) vidi se da je trajanje vođenja ventila  $V_1$  određeno preko tri uvjeta [7].

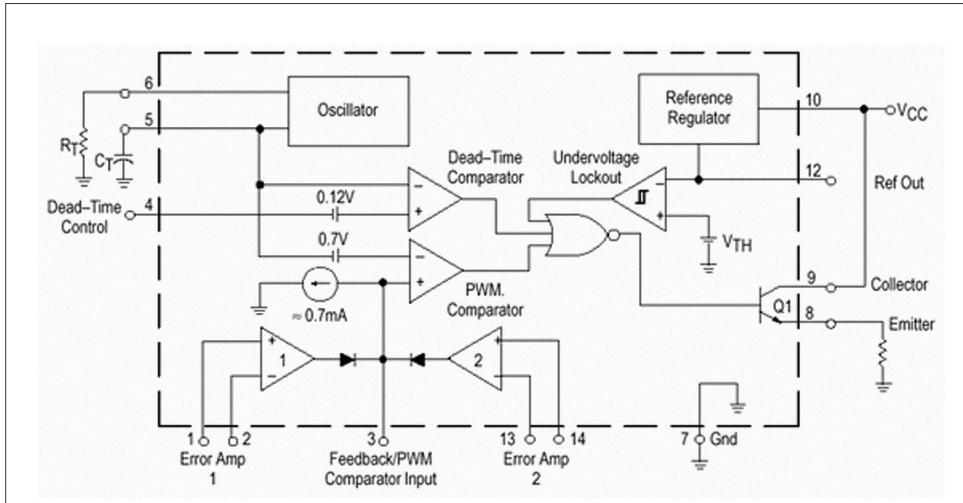
Jedan se dobije usporedbom dijela izlaznog napona  $u_3$  koji se dovodi na priključnicu 3 integriranog sklopa i pilastog napona  $u_5$  dovedenog na priključnicu 5 uvećanog za 0,7 V unutar integriranog sklopa. Ako je napon  $u_3$  veći, tada ventil  $V_1$  ne vodi. Drugi je uvjet da faktor vođenja ne može biti veći od 0,96 pa su time osigurani intervali nevođenja ventila  $V_1$ . Vrijednost 0,96 određena je naponom priključnice 4. Treći je uvjet da ventil  $V_1$  ne vodi ako se ulazni napon smanji ispod  $V_{TH} = 4,7$  V. To je zadano priključnicom 12.

Sklopna frekvencija pretvarača određena je izrazom  $f_s = 1,2/C_2(P_1 + R_7)$  i s obzirom na vrijednosti parametara može se mijenjati u rasponu od  $f_s = 1$  kHz do 13 kHz. Izlazni napon pretvarača namješten je na  $U_d = 16$  V. Ulazni napon može se mijenjati u rasponu od  $E = 0$  do 16 V.



**Slika 1**  
Električna shema realiziranog uzlaznog pretvarača

**Figure 1**  
Schematic of the experimental boost converter



**Slika 2**  
Načelna shema  
integriranog sklopa  
MC34060A

**Figure 2**  
Block diagram of  
integrated circuit  
MC34060A

### 3. Rezultati mjerenja

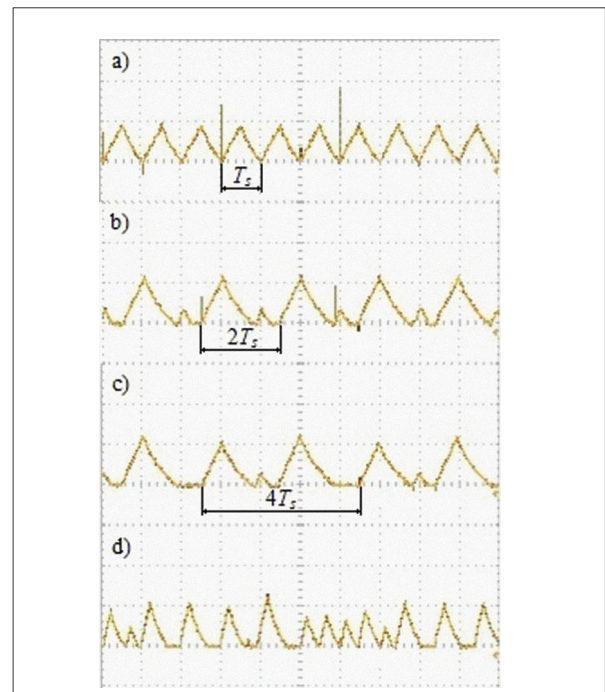
#### 3. Measurement results

Obavljena su mjerenja valnog oblika struje prigušnice  $i_L$ , pilastog napona  $u_{\text{ramp}} = u_3$  i napona povratne veze  $u_{\text{pv}} = u_3 - 0,7 \text{ V}$  na sedam različitih sklopnih frekvencija u rasponu od  $f_s = 1 \text{ kHz}$  do  $13 \text{ kHz}$ .

Iz valnih oblika struje prigušnice, pilastog napona i napona povratne veze (Slika 3) moguće je prepoznati bifurkaciju udvostručenjem periode i bifurkaciju srazom granica. Ti su valni oblici izmjereni na sklopnj frekvenciji  $f_s = 2 \text{ kHz}$ .

Bifurkacija udvostručenjem periode nastupa pri prelasku ustaljenog stanja osnovne periode u ustaljeno stanje dvostruke periode, a prepoznaje se po tome što je svaki drugi "trokut" struje prigušnice međusobno jednak pa je perioda struje prigušnice dvostruko veća od sklopne periode.

Pri prelasku iz ustaljenog stanja dvostruke periode u ustaljeno stanje četverostruke periode također nastupa udvostručenje periode, ali je uzrokovano "preskokom" napona povratne veze preko pilastog napona tako što je za vrijeme nekih cijelih sklopnih perioda  $u_{\text{pv}} > u_{\text{ramp}}$  pa izostaje uklop upravljivog ventila. Zato je to bifurkacija srazom granica (border collision). Preskok je uočljiv na valnom obliku struje prigušnice tako što u odnosu na dva ustaljena stanja kraćih perioda nedostaje svaki četvrti "trokut" – preskočen je.



**Slika 3** Bifurkacija udvostručenjem periode, bifurkacija srazom granica i put u kaos udvostručenjem periode. Prikazana je struja prigušnice  $i_L$  za: a) ustaljeno stanje osnovne periode, b) ustaljeno stanje dvostruke periode, c) ustaljeno stanje četverostruke periode i d) kaotično ustaljeno stanje. Sklopna frekvencija je  $2 \text{ kHz}$ .

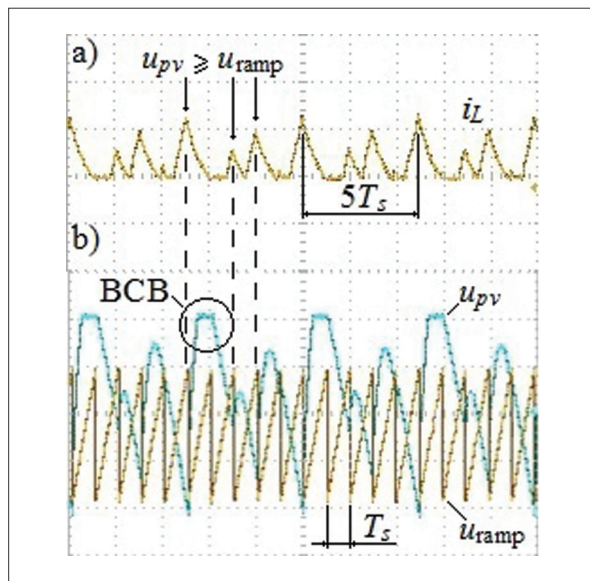
**Figure 3** Period doubling bifurcation, border collision bifurcation and period doubling route to chaos. The inductor current  $i_L$  is shown: a) Fundamental period operation, b) Period – two operation, c) Period – four operation, d) Chaotic operation. The switching frequency is  $2 \text{ kHz}$ .

Detaljniji prikaz bifurkacije srazom granica dan je za ustaljeno stanje peterostruke periode (Slika 4). Kružnicom je označena sklopna perioda u kojoj nastupa bifurkacija srazom granica.

Za vrijeme takve sklopne periode nije niti u jednom trenutku zadovoljen uvjet uklopa upravljivog ventila  $u_{ramp} > u_{pv}$ . Neupravljivi ventil vodi cijelo vrijeme dok se struja prigušnice ne smanji na nulu, a izlazni napon i napon povratne veze dovoljno smanje i bude ispunjen uvjet uklopa upravljivog ventila.

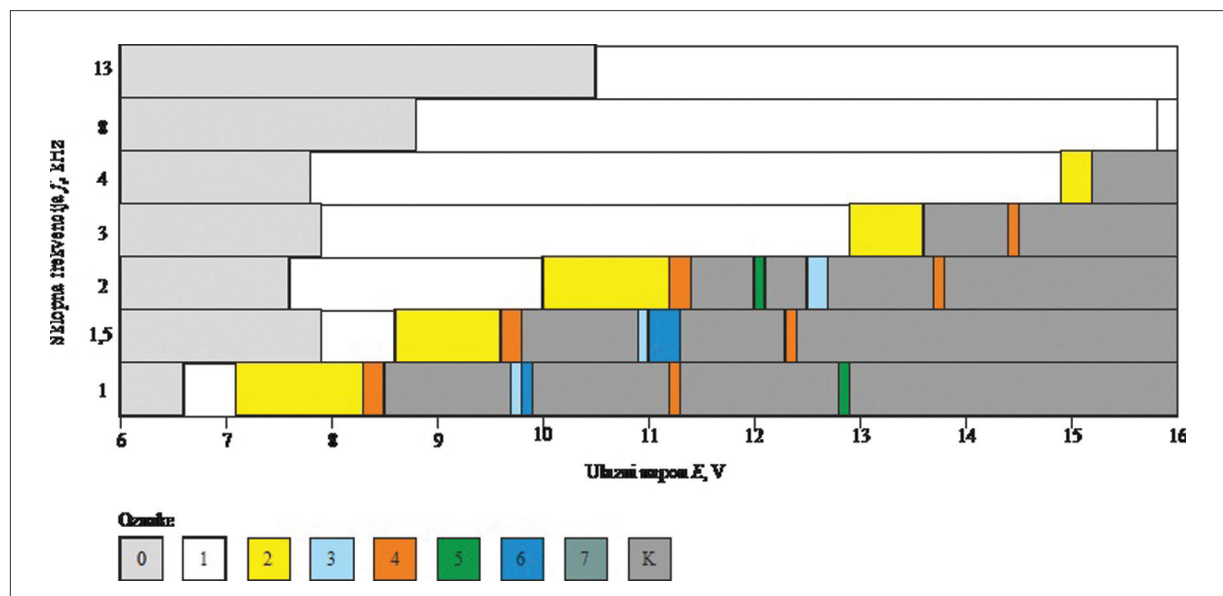
Prikazom svih ustaljenih stanja u ovisnosti o sklopnoj frekvenciji i ulaznom naponu nastaje dvoparametarski bifurkacijski dijagram  $f_s - E$  (Slika 5).

Uočljivo je da se sa smanjenjem sklopne frekvencije smanjuje i naponski opseg vrijednosti ulaznog napona za koje pretvarač radi u ustaljenom stanju osnovne periode, na slici označeno bijelom bojom. Istovremeno se smanjuje i vrijednost ulaznog napona na kojoj nastupa prvo kaotično ustaljeno stanje, povećava se broj područja kaotičnih ustaljenih stanja na jednoj sklopnoj frekvenciji i širina tih područja. Kaotična područja razdvojena su prozorima subharmoničkih ustaljenih stanja. Na temelju



**Slika 4** Bifurkacija srazom granica: a) struja prigušnice u ustaljenom stanju peterostruke periode, b) pilasti napon  $u_{ramp}$  i napon povratne veze  $u_{pv}$ . Perioda u kojoj nastupa bifurkacija srazom granica (BCB) označena je kružnicom. Sklopna frekvencija je 2 kHz.

**Figure 4** Border collision bifurcation: a) inductor current of period - five operation, b) ramp voltage  $u_{ramp}$  and feedback voltage  $u_{pv}$ . The period in which border collision bifurcation (BCB) appears is signed by circle. The switching frequency is 2 kHz.



**Slika 5** Dvoparametarski bifurkacijski dijagram  $f_s - E$ . Bojama su označena različita ustaljena stanja. Broj n unutar kvadratića označava omjer perioda prikazanog ustaljenog stanja i ustaljenog stanja osnovne periode. S nulom je označeno ustaljeno stanje u kojem pretvarač ne obavlja pretvorbu zbog preniskog ulaznog napona, a s K je označeno kaotično ustaljeno stanje.

**Figure 5** Two parameter bifurcation diagram with  $f_s$  and  $E$ . Steady-states are signed by different colors. The number inside colored squares denotes a quotient of the state variable period and switching frequency period. The sign 0 denotes that the converter is out of operation caused by too low input voltage. The letter K denotes chaotic steady-state.

prikaza moguće je odrediti područje sklopnih frekvencija i ulaznih napona za siguran rad pretvarača u ustaljenom stanju osnovne periode. Tako bi povećanjem ulaznog napona trebalo povećati i sklopnu frekvenciju da se pretvarač zadrži u ustaljenom stanju osnovne periode. Time je dobiven još jedan važan kriterij odabira sklopne frekvencije.

#### 4. Zaključak

#### 4. Conclusion

U radu su prikazani rezultati mjerenja ustaljenih stanja uzlaznog pretvarača na

nekoliko različitih sklopnih frekvencija. Identificirane su i opisane bifurkacije udvostručenjem periode i srazom granica, prikazan put u kaos udvostručenjem periode i dvoparametarski bifurkacijski dijagram po sklopnoj periodu i ulaznom naponu. Iz bifurkacijskog dijagrama određena su područja sigurnog rada pretvarača u ustaljenom stanju osnovne periode. Time je dobiven dodatni uvjet za izbor sklopne frekvencije pretvarača. Dobiveni rezultati temelj su za stvaranje matematičkog modela i simulacije pretvarača. Tu je zadaću potrebno obaviti u idućim radovima.

#### 5. Reference

#### 5. References

- [1] Flegar I.; Elektronički energetska pretvarači; Kigen; ISBN 953697085-6; Zagreb; 2010.
- [2] Skvarenina T.; The power electronics handbook; CRC Press LLC; ISBN 0-8493-7336-0; 2002.
- [3] Tse C.K.; Complex behaviour of switching power converters; CRC Press; ISBN 0849318629; Boca Raton; Florida, 2004.
- [4] Banerjee S.; Verghese G.C.; Nonlinear phenomena in power electronics: attractors, bifurcations, chaos, and nonlinear control; IEEE Press; ISBN 978-0-7803-5383-1; Piscataway; NJ; 2001.
- [5] Flegar I.; Pelin D.; Bifurcation diagrams- Insight into the modes of operation of a boost converter; Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology; Maribor; ISSN 0-7803-7852-0; pp: 836-841; 2003.
- [6] Benadero L.; Aroudi A. El; Olivar G.; Toribio E.; Gomez E.; Two-Dimensional bifurcation Diagrams: Background Pattern of Fundamental Dc-dc converters with PWM Control; International Journal of Bifurcation and Chaos; Vol. 13; No. 2; pp: 427-451; 2003.
- [7] MC34060A datasheet, ON Semiconductor

#### AUTORI · AUTHORS



#### Željko Stojanović

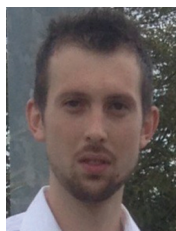
Željko Stojanović rođen je u Zagrebu 1972. godine. Višu tehničku školu Zagreb završio je 1994. godine, a Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu 1997. godine. Na

Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek pohađa poslijediplomski doktorski studij elektrotehnike. Zaposlen je na Elektrotehničkom odjelu Tehničkog veleučilišta u Zagrebu od 1999. godine. Trenutno drži nastavu iz Analognih sklopova, Elektroničkih sklopova,

Linearnih i nelinearnih mreža, Energetske elektronike i Osnova elektrotehnike i elektronike na stručnim studijima, a iz Osnova projektiranja električkih uređaja na specijalističkom studiju. Objavio je šest stručnih radova objavljenih u časopisima i zbornicima radova na domaćim stručnim skupovima. Kao mentor nagrađen je za najbolji rad u konkurenciji studentskih radova na konferenciji MIPRO 2016. Područja interesa su mu energetska i analogna elektronika, teorija mreža i metode poučavanja.

#### Korespondencija

zeljko.stojanovic@tvz.hr

**Igor Božić**

Igor Božić rođen je 1992. godine. Srednju školu pohađao je i završio u „1. tehničkoj školi Tesla“ u Zagrebu smjer elektrotehničar. Stručni prvostupnik smjera

Komunikacijske i računalne tehnike na Tehničkom Veleučilištu u Zagrebu postaje 2015. godine temom ustaljenih stanja istosmjernog uzlaznog pretvarača. Radi kao informatičar.

**Marko Miletić**

Marko Miletić rođen je 1988. godine u Bjelovaru. Završio je Stručni studij mehatronike na Visokoj tehničkoj školi u Bjelovaru 2011. godine i Politehnički specijalistički

diplomski stručni studij elektrotehnike na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu 2016. godine. Radio je u poduzeću Microstar d.o.o. u Odjelu razvoja na poslovima projektiranja elektroničkih sklopova i tiskanih pločica, programiranju mikrokontrolera te ispitivanjima, proizvodnji i servisiranju elektroničkih uređaja, a sada je laborant na Visokoj tehničkoj školi u Bjelovaru i vanjski suradnik na projektima razvoja i izrade elektroničkih uređaja za domaće i strane tvrtke. Autor je četiriju članaka i koautor udžbenika za kolegij Mikroracunala. Kao učenik sudjelovao je na tri državna natjecanja iz područja robotike i elektrotehnike. Kao laborant mentorirao je petero studenata Visoke tehničke škole u Bjelovaru koji su odlikovani značajnim nagradama na salonima inovacija poput zlatne i srebrne medalje na izložbi inovacija INOVA.