

# Mogućnosti u radu s eksperimentalnom karticom uzlaznog pretvarača LNC04205-1K

---

**Kovačević, Barbara**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:435199>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**MOGUĆNOSTI U RADU S EKSPERIMENTALNOM  
KARTICOM UZLAZNOG PRETVARAČA LNC04205-1K**

**Završni rad**

**Barbara Kovačević**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju****Osijek, 15.09.2023.****Odboru za završne i diplomske ispite****Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Barbara Kovačević
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4832, 29.07.2020.
<b>OIB Pristupnika:</b>	29014374826
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Denis Pelin
<b>Sumentor:</b>	Andrej Brandis, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Mogućnosti u radu s eksperimentalnom karticom uzlaznog pretvarača LNC04205-1K
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rad:</b>	Ispitati mogućnosti rada eksperimentalne kartice silaznog pretvarača LNC04205-1K s multimedijalno-didaktičkom opremom proizvođača Lucas-Nullle. Napraviti pregled svih pripremljenih vježbi uz karticu podržanih programskom podrškom LabSoft. SUMENTOR s FERIT-a: Andrej Brandis Tema je rezervirana za studenticu Barbaru Kovačević.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	15.09.2023.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	24.09.2023.
<b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 25.09.2023.

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Barbara Kovačević
<b>Studij:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4832, 29.07.2020.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mogućnosti u radu s eksperimentalnom karticom uzlaznog pretvarača LNC04205-1K**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Denis Pelin

i sumentora Andrej Brandis, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. PREGLED PODRUČJA RADA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNA OPREMA LUCAS NUELLE</b> .....	<b>3</b>
3.1. UniTrain sustav .....	3
3.2. Eksperimentalna kartica SO4203-6Y .....	4
3.3. Računalni program LabSoft .....	5
<b>4. ANALIZA RADA UZLAZNOG ISTOSMJERNOG PRETVARAČA NAPONA</b> .....	<b>6</b>
4.1. Uzlazni istosmjerni pretvarači .....	7
4.1.1. Kontinuirani način rada .....	8
4.1.2. Diskontinuirani način rada .....	11
4.2. Primjena uzlaznih istosmjernih pretvarača u hibridnim i električnim vozilima .....	14
<b>5. PREGLED VJEŽBI U LNCO4205-1K TEČAJU</b> .....	<b>16</b>
5.1. Izvedba uzlaznog pretvarača .....	17
5.2. Prva vježba: Provjera ulazne i izlazne naponske razine .....	17
5.3. Druga vježba: Mijenjanje faktora vođenja .....	19
5.4. Treća vježba: Mjenjanje sklopne frekvencije .....	20
5.5. Četvrta vježba: Valovitost izlaznog napona .....	20
<b>6. EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	<b>23</b>
6.1. Smanjivanje valovitosti izlaznog napona .....	23
6.2. Povećanje frekvencije rada .....	25
<b>ZAKLJUČAK</b> .....	<b>29</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>30</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>31</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>31</b>
Possibilities in operation with the experimental card LNC04205-1K of a boost converter .....	31



# 1. UVOD

Napretkom tehnologije prošireni su načini učenja i tehničkog osposobljavanja na područjima elektronike i elektrotehnike. Odličan primjer je UniTrain sustav, dio asortimana didaktičko-multimedijalne opreme proizvođača *Lucas Nuelle*. UniTrain je sustav obuke i eksperimentiranja temeljen na računalu te pokriva područja osnovne i napredne elektrotehnike, elektronike i automobilske tehnologije.

U ovom završnom radu dan je pregled multimedijalnog tečaja eksperimentalne kartice uzlaznog pretvarača LNCO2425-1K pod nazivom „Uzlazni istosmjerni pretvarači u hibridnim i električnim vozilima“. Svrha navedenog tečaja je osposobljavanje na području dijagnostike i otklanjanja problema u radu sustava na električnom i hibridnom vozilu. U sklopu obuke susreće se s pretvaračkim komponentama, uzlaznim istosmjernim pretvaračima te problemima s radom električnih vozila. Računalni program LabSoft daje teorijsku podlogu i simulaciju provođenja eksperimenata pomoću virtualnih mjernih instrumenata te interaktivno učenje kroz pitanja nakon svakog pokusa. Kroz vježbe tečaja i dodatne pokuse, napon trošila je pulsno-širinsko, frekvencijsko te širinsko-frekvencijsko upravljano što je omogućilo raznolike rezultate pomoću kojih je napravljena analiza kako bi se došlo do tehnički važnih zaključaka. Jedan je dio rada posebno posvećen analizi rada uzlaznog istosmjernog pretvarača te snimanju valnih oblika napona i struje vrlo mu bitne komponente - zavojnice. Na temelju svega navedenoga, tečaj, iako namijenjen korištenju u srednjoj školi, uz dodatne pokuse može se lako prilagoditi višim stupnjevima obrazovanja. On je zanimljiv, praktičan i jedinstven način omogućuje studentima usavršavanje znanja te lakše razumijevanje i primjenu prethodno stečenog znanja na području energetske elektronike, posebno tijekom laboratorijskih vježbi.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Smisao ovog završnog rada je ispitati mogućnosti rada eksperimentalne kartice uzlaznog pretvarača LNC04205-1K s multimedijalno-didaktičkom opremom proizvođača *Lucas-Nuelle*. Cilj je napraviti pregled svih pripremljenih vježbi uz karticu podržanih programskom podrškom *LabSoft*.

## 2. PREGLED PODRUČJA RADA

P. Rajaković u svojim predavanjima [1] objašnjava: „Istosmjerni pretvarači su uređaji energetske elektronike koji pretvaraju istosmjerne veličine jednih vrijednosti u istosmjerne veličine drugih vrijednosti, a također mogu povezivati dva istosmjerna sustava.“

M.Vukšić u svojoj skripti [2] detaljno objašnjava podjelu istosmjernih pretvarača napona te analizira svakog od njih.

U knjizi [3], I. Flegara objašnjene su osnove o pretvaračkim mrežama istosmjernih pretvarača, kao što su opća svojstva, valni oblici varijabli mreže, vrste istosmjernih trošila i izvora itd. Također, kroz mnoge sheme, prikaze valnih oblika i izvode formula, dana je teorijska podloga o kontinuiranom i diskontinuiranom radu uzlaznog istosmjernog pretvarača koji je vrlo bitna stavka ovog završnog rada.

I. Flegar u svojoj knjizi [4] detaljno pojašnjava isklapanje i komutaciju ventila kroz izvođenje izraza i jednadžbi mreža i rješavanje zadataka na primjerima mnogih, različitih shema spoja.

Knjiga [5], čiji je autor M. K. Kazimierczuk bavi se upravljanjem istosmjernim pretvaračima pomoću pulsno-širinski moduliranog signala. Također, postavlja temelje za proučavanje: poluvodičkih energetskih uređaja, topologija pulsno-širinski moduliranih (PMW) sklopnih istosmjernih pretvarača, modeliranja, dinamike i upravljanja PWM pretvaračima. Prvi dio knjige pokriva topologije pretvarača bez transformatora i izoliranih PWM pretvarača, kao što su uzlazni i silazni pretvarači. Drugi dio pokriva prijenosne funkcije stupnjeva snage PWM pretvarača, upravljanje naponskim načinom rada i upravljanje strujnim načinom rada PWM pretvarača.

M. Biswal i S. Sabyasachi u svom radu [6], bave se istraživanjem o novijem razvoju istosmjernih pretvarača. U skladu s potrebama današnjeg svijeta, govore kako su ciljevi razvoja pretvarača visoka učinkovitost i visoko pojačanje uz brz odziv te da su istraživači fokusirani na uređaje male snage. Proces razvoja takvih pretvarača ovisi o mnogo parametara. Stoga se mnoštvo računalnih softvera razvija i unaprijeđuje kako bi ih mogli dizajnirati. Njihov rad predstavlja neke nove pretvarače s predloženim metodama upravljanja koji mogu pomoći istraživačima u radu na tom području. Simulacija u radu izvedena je uz MATLAB i PSIM.

D. M. Bellur i M. K. Kazimierczuk u [7] govore o ulozi istosmjerno-izmjeničnih (eng. DC-AC) i istosmjernih (eng. DC-DC) pretvarača u električnim i hibridnim vozilima te njihovoj primjeni u istima. Također, ističu kako je potreba za dvosmjernim istosmjernim pretvaračima velike snage u budućnosti proizvodnje električnih vozila dovela do razvoja mnogih novih topologija istosmjernih



pretvarača. Njihov rad predstavlja pregled najsvremenijih istosmjernih pretvarača koji se koriste u baterijskim električnim vozilima (BEV), hibridnim električnim vozila (HEV) i vozilima na gorive ćelije (FCV).

Mogućnosti u radu s Lucas-Nuelle multimedijalnom didaktičkom opremom podrazumijevaju usavršavanje znanja na području energetike i energetske elektronike pomoću *UniTrain* sustava [8].

### **3. DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNA OPREMA LUCAS NUELLE**

Cilj *Lucas Nuelle* grupe je razvoj tehničko-industrijskog obrazovanja i obuke. *Lucas Nuelle* asortiman proizvoda razvrstan je prema tematskim područjima:

- elektrotehnički projekti za strukovno osposobljavanje i obrazovanje,
- sustavi za obuku i pokuse za praktični rad i demonstraciju,
- sustav za samostalno učenje zasnovan na multimediji za kombinirano učenje,
- infrastruktura za elektrotehničke laboratorije.

Njihova tehnologija poznata je kao „tehnologija s okom za didaktiku“ i smatra da eksperimentiranje s obrazovno optimiziranim sustavima vodi do tehničke stručnosti i praktičnih vještina [9].

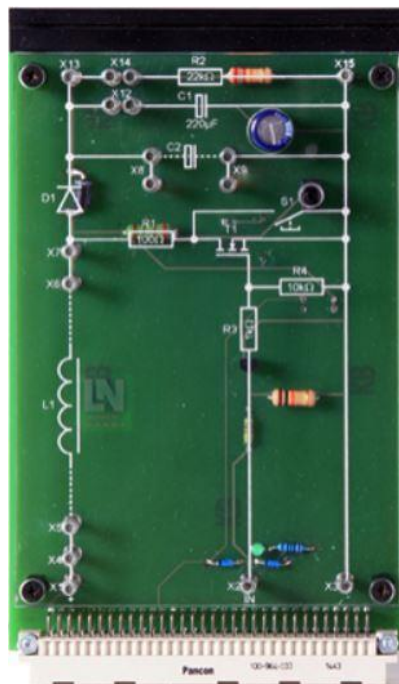
#### **3.1. UniTrain sustav**

*UniTrain* multimedijски tečajevi iz energetske elektronike koriste brojne slike, sheme, pokuse i animacije kako bi objasnili dizajn i funkciju različitih vrsta pretvarača. U tečaju su korištene različite vrste sklopova u mnogim eksperimentima koji se bave okidanjem, modulacijom i instrumentima poput multimetra i osciloskopa, kao i izvođenjem svojstava i mogućnosti pretvarača. *UniTrain* tečaj koncipiran je na način da osim što nudi velik broj eksperimenata i teorijsku podlogu za iste, sadrži i provjeru usvojenog znanja kroz niz pitanja koja sadrže povratnu informaciju jesu li točno odgovorena. Praktičnost *UniTrain* tečaja leži u tome što se sve dane vježbe mogu odraditi uz pomoć računala sa instaliranom LabSoft programskom podrškom i Lucas Nuelle opreme odnosno *UniTrain* sučelja, eksperimentalne kartice, eksperimentatora i pribora za spajanje.

### 3.2. Eksperimentalna kartica SO4203-6Y

UniTrain tečaj „Uzlazni istosmjerni pretvarači u hibridnim i električnim vozilima“ dan je eksperimentalnom karticom SO4203-6Y koja sadrži gumb te jednostavan elektronički sklop i zavojnicu za pretvaranje niskog istosmjernog ulaznog napona u visoki izlazni napon. Kartica je dimenzija 100 x 170 mm, a komponente su joj:

- tipkalo
- elektronički sklop za istosmjernu pretvorbu kod uzlaznog pretvarača napona,
- električni upravljački sustav za elektroniku s LED indikatorom,
- konektori za zavojnicu,
- konektori za dodatni kondenzator i
- konektori za prenosnike za spajanje komponenti.



Slika 3.1. Eksperimentalna kartica

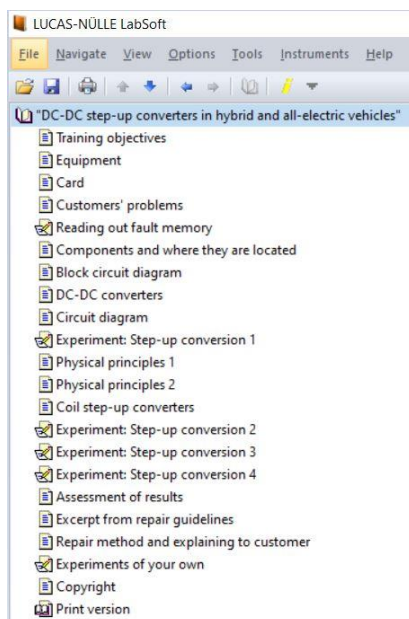
Tehnički podaci eksperimentalne kartice su:

- ulazni napon 5 V istosmjerno,
- maksimalni izlazni napon 40 V istosmjerno.

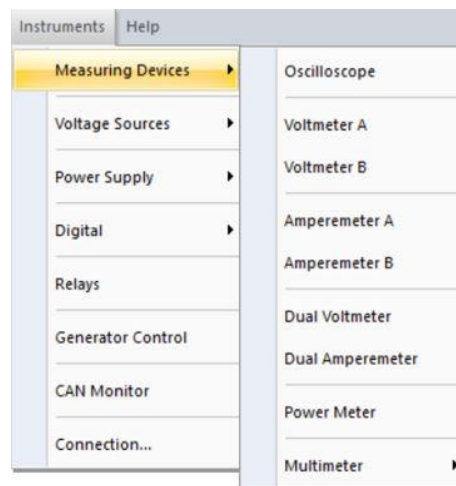
Pri provedbi eksperimenata danih u tečaju eksperimentalna kartica prikazana na slici 3.1 [10] stavlja se u eksperimentator i koriste se na nju priključeni kondenzator od 100  $\mu$ F i zavojnica sa 900 namotaja induktivnosti 2,8 H.

### 3.3. Računalni program LabSoft

Računalni program *LabSoft*, kao otvorena platforma za isporuku eksperimenta, sadrži virtualne mjerne instrumente i vrši simulaciju mjerenja vrijednosti traženih veličina te daje prikaz električnih signala sa virtualnog osciloskopa. Komunikacija između računala sa instaliranim *LabSoft* programom i *UniTrain* sučelja odvija se pomoću USB-a. Nakon fizičkog spajanja sučelja opreme i računala te pojave indikatora ispravnog povezivanja i rada u obliku zelenog svjetla na sučelju, pokreće se *LabSoft*. Početni zaslon programa sadrži padajući izbornik sa temom tečaja te podtemama koje se zasebno otvaraju, slika 3.2. *LabSoft* također raspolaže sa mnogim virtualnim instrumentima i izvorima što je prikazano na slici pod b) [10]:



a)



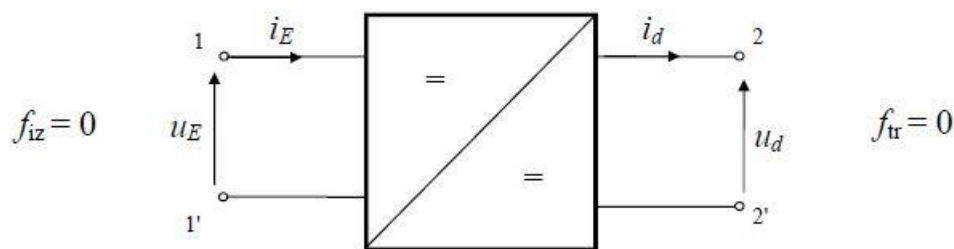
b)

Slika 3.2. a) Prikaz padajućeg izbornika *LabSoft* programa  
b) Mogućnosti odabira virtualnih instrumenata *LabSoft* programa

## 4. ANALIZA RADA UZLAZNOG ISTOSMJERNOG PRETVARAČA NAPONA

U današnje vrijeme elektronički uređaji su nešto bez čega je čovječanstvu vrlo teško opstati. Stoga se pridaje velika važnost razvoju uređaja bez grešaka sa brзом reakcijom te uz visoku učinkovitost - što je područje primjene istosmjernih pretvarača napona. Istosmjerni pretvarači su električki uređaji koji se upotrebljavaju u napajanjima elektroničke opreme, gdje upravljaju tokom energije između dva istosmjerna sustava. Istosmjerni pretvarači priključuju se na istosmjerni izvor ili izlaz ispravljača i pretvaraju ga u druge istosmjerne napone potrebne za napajanje elektroničkih sklopova. Za spajanje istosmjernih sustava različitih naponskih razina koriste se pretvarači poznati pod nazivom visokofrekvencijski istosmjerni pretvarači [2]. Istosmjerni visokofrekvencijski pretvarači prema načinu rada se mogu podijeliti na:

- pretvarače bez galvanskog odvajanja izlaza od ulaza i
- pretvarače s galvanskim odvajanjem.



Slika 4.1. Simbol istosmjernog pretvarača i referentni smjerovi struja i napona na prilazima

Istosmjerni se pretvarač, jednostavnosti analize radi, smatra dvoprilazom. Sukladno slici 4.1. , prema [3] na ulazu (prilazu 1) priključuje se istosmjerna pojna mreža napona  $u_E$  i struje  $i_E$  dok je na prilazu 2 (izlazu) priključeno istosmjerno trošilo napona  $u_d$  i struje  $i_d$ .

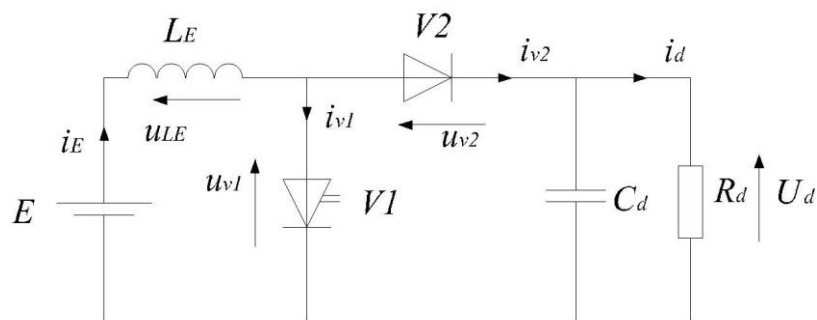
Postoje četiri osnovne topologije istosmjernog pretvaračabez galvanskog odvajanja kod kojih se uglavnom primjenjuje upravljanje pri konstantnoj frekvenciji:

- silazni pretvarač (eng. buck),
- uzlazni pretvarač (eng. boost),
- silazno-ulazni pretvarač (eng. buck-boost) i
- Čukov pretvarač.

Analizom valnih oblika napona i struja prilaza kao i varijabli mreže istosmjernih pretvarača razlikuju se dva osnovna valna oblika: diskontinuirani i kontinuirani valni oblik.

#### 4.1. Uzlazni istosmjerni pretvarači

Pod pojmom uzlazni pretvarač podrazumijeva se istosmjerni pretvarač okarakteriziran spojem naponskog uvora glatkog napona  $u_d = U_d$  i strujnog izvora predstavljenog serijskim spojem istosmjernog naponskog izvora i prigušnice. Trošilo je pasivno i kapacitivno s vremenskom konstantom  $\frac{R_d}{C_d} \gg T_s$ , gdje je  $T_s$  sklopna perioda [3]. Sklopke rade protutaktno te je V1 realizirana upravljivim ventilom, a sklopka V2 idealnom diodom.



Slika 4.2. Shema spoja uzlaznog istosmjernog pretvarača

Sa sheme spoja 4.2. mogu se izraziti jednadžbe Kirchhoffova zakona napona za dvije petlje u mreži kao i jednadžba Kirchhoffova zakona struje za jedan čvor:

$$u_{LE} + u_{V1} = E \quad (4-1)$$

$$u_{V2} + U_d = u_{V1} \quad (4-2)$$

$$i_{V1} + i_{V2} = i_{LE} \quad (4-3)$$

Ovisno o valnom obliku struje prigušnice u ustaljenom stanju, uzlazni se pretvarači razlikuju po dva načina rada, a to su kontinuirani i diskontinuirani način rada. Kod kontinuiranog načina rada, struja prigušnice unutar sklopne periode je neisprekidana odnosno nikada ne pada na nulu, dok je u diskontinuiranom načinu rada struja prigušnice isprekidana, odnosno postoji vremenski interval unutar sklopne periode u kojemu je struja jednaka nuli. U tom periodu sklopka ne vodi te struja prigušnice ostaje nula sve dok sklopka ponovno ne provede.

### 4.1.1. Kontinuirani način rada

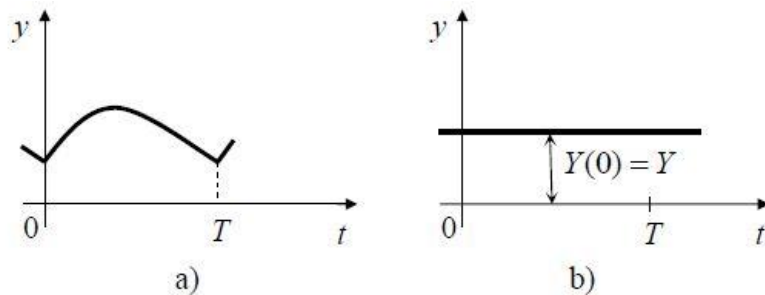
Ako unutar periode  $T_s$  varijabla mreže  $y$  u  $n$  trenutaka, gdje  $n$  može biti i jednak nuli, poprima vrijednost nula, tj. ako je

$$y(t) = 0; \quad t = t_1, t_2, \dots \quad (4-4)$$

valni oblik je kontinuiran. U analizi valnih oblika napona i struja, osobito onih na prilazima istosmjernih pretvarača, važan je posebni slučaj kad je  $n = 0$ . Dakle, kada vrijednost varijable mreže niti u jednom trenutku unutar periode  $T_s$  nije jednaka nuli, tj. ako je

$$y(t) > 0 \quad \text{ili} \quad y(t) < 0; \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (4-5)$$

valni oblik s tim svojstvom smatra se jednosmjerno kontinuiranim, slika 4.3. a) [11].

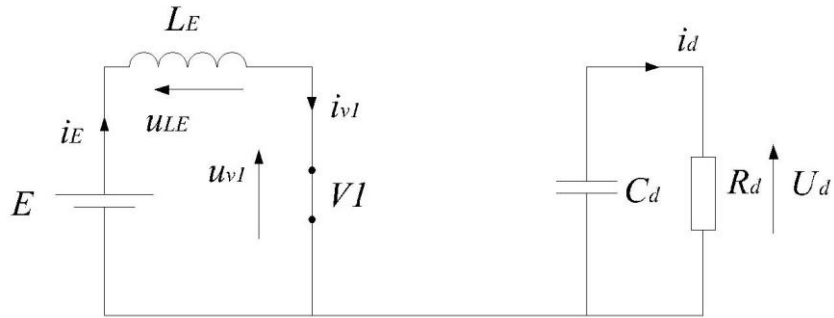


Slika 4.3. a) Primjer jednosmjerno kontinuiranog valnog oblika  
b) Primjer glatkog valnog oblika

U većini se slučajeva, zbog jednostavnije analize rada, smatrati da su varijable mreže na prilazima glatke, tj. da je trenutna vrijednost varijable mreže jednaka srednjoj vrijednosti a time i efektivnoj vrijednosti varijable mreže;

$$y(t) = Y(0) = Y. \quad (4-6)$$

Budući da je struja induktiviteta u kontinuiranom režimu rada stalno veća od nule, u analizi rada razmatraju se dva intervala - kada vodi ventil  $V1$ , a ne vodi ventil  $V2$  i obrnuto.



Slika 4.4. Nadomjesna shema uzlaznog pretvarača u prvom intervalu rada

U prvom intervalu rada  $[0, \alpha T_s]$  vodi upravljivi ventil  $V1$ , 4.4., i tada je napon  $u_{V1} = 0$  i struja  $i_{V2} = 0$ . Uvrštavanjem navedenog u (4-1) zaključuje se da je napon na induktivitetu  $L_E$  jednak naponu izvora [3]:

$$u_{LE} = E = L_E \frac{di_{LE}}{dt} \quad (4-7)$$

što znači da će struja induktiviteta rasti linearno jer je na njoj konstantan i pozitivan napon što se i vidi na slici. Integriranjem izraza (4-7) dobije se struja induktiviteta  $i_{L_E}$  [3]:

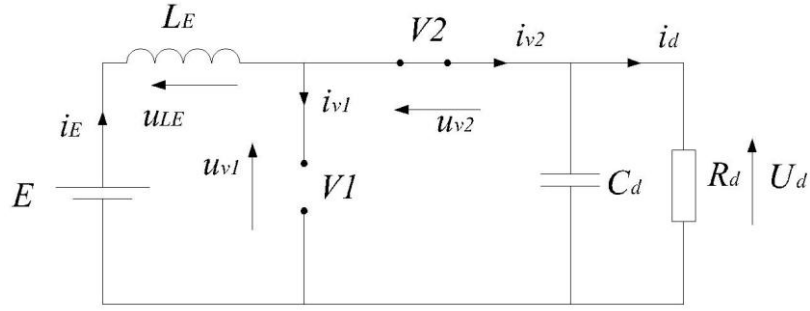
$$i_{L_E} = \frac{E}{L_E} t + i_{L_E}(0) \quad (4-8)$$

Pri čemu je struja induktiviteta u trenutku nula konstanta zbog pretpostavke početnog uvjeta jer pretvarač radi u kontinuiranom načinu rada;  $i_{L_E}(0) = I_0$ . Budući da je u prvom intervalu  $i_{V2} = 0$ , uvrštavanjem u jednadžbu (4-3) dobije se struja koja prolazi ventilom  $V1$ :

$$i_{V1} = i_{L_E} \quad (4-9)$$

Kako je  $u_{V1} = 0$  napon na ventilu  $V2$  određuje se iz jednadžbe (4-2):

$$u_{V2} = -U_d \quad (4-10)$$



Slika 4.5. Nadomjesna shema uzlaznog pretvarača u drugom intervalu rada

U drugom intervalu rada  $[\alpha T_s, T_s]$  vodi ventil  $V2$  odnosno idealna dioda, 4.5., iz čega proizlazi da je napon  $u_{V2} = 0$  i struja  $i_{V1} = 0$ . Pomoću jednadžbi (4-1) i (4-2) dolazi se do zaključka da induktivitet djeluje kao izvor [3].

$$u_{L_E} = E - U_d \quad \rightarrow \quad L_E \frac{di_{L_E}}{dt} = E - U_d \quad (4-11)$$

Integriranjem gornje jednadžbe dobiva se sljedeći izraz za struju induktiviteta:

$$i_{L_E} = \frac{E - U_d}{L_E} (t - dT_s) + i_{L_E}(dT_s) \quad (4-12)$$

gdje je  $i_{L_E}(dT_s) = I_1$  početna vrijednost struje, a  $\alpha$  faktor vođenja dan izrazom [3]:

$$\alpha = \frac{T_{V1}}{T_s} \quad (4-13)$$

Faktor vođenja predstavlja omjer vremena vođenja ventila  $V1$  i sklopne periode. Iz jednadžbi (4-2) i (4-3) proizlazi da je  $u_{V1} = U_d$  i  $i_{V2} = i_{L_E}$ . Prema [3], kada vodi  $V2$  jednadžbe Kirchoffovih zakona napona su:

$$E = U_{V2}(0) + U_d \quad (4-14)$$

$$E - U_{V1}(0) = 0 \quad \rightarrow \quad E = U_{V1}(0) \quad (4-15)$$

Sa prikaza valnog oblika napona  $u_{v1}$  na slici 4.7. dobije se sljedeće:

$$U_{V1}(0) = \frac{T_{V2}}{T_s} U_d \quad \rightarrow \quad U_d = \frac{T_s}{T_{V2}} E \quad (4-16)$$

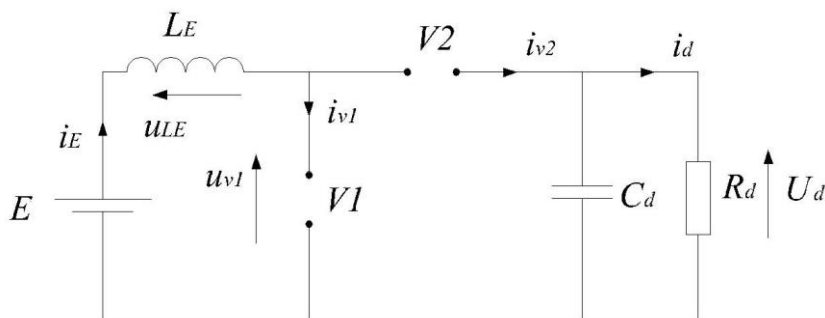


Pomoću gornjeg izraza, u kojem je  $T_{V2}$  vrijeme vođenja idealne diode  $V2$ , lako je odrediti upravljačku karakteristiku u kontinuiranom načinu rada uz uvjet da je  $U_{LE}(0) = 0$ . Kada se uvede faktor vođenja ventila  $V1$   $\alpha$ , dobiva se da je  $T_{V2} = (1 - \alpha)T_s$  te je upravljačka karakteristika uzlaznog istosmjernog pretvarača prema [3] jednaka:

$$U_d = \frac{E}{1-\alpha} \quad (4-17)$$

#### 4.1.2. Diskontinuirani način rada

U diskontinuiranom načinu rada uzlazni istosmjerni pretvarač radi u tri intervala unutar periode  $T_s$ . Tijekom intervala A i intervala B, pretvarač radi na isti način kao i u kontinuiranom načinu rada. Razlika u analizi rada javlja se u slučaju kada struja ventila  $V2$  padne na nulu prije nego što upravljivi ventil  $V1$  ponovno provede. Stoga se u analizi diskontinuiranog režima rada razmatra i treći interval.



Slika 4.6. Nadomjesna shema uzlaznog pretvarača u trećem intervalu rada

U trećem intervalu rada ne vode niti ventil  $V1$  niti idealna dioda  $V2$  iz čega proizlazi da su napon i struja induktiviteta jednaki nuli, a zbog protjecanja struje  $i_d$  pada napon na kapacitetu, slika 4.6. Pomoću valnog oblika struje izvora prikazanog na slici 4.7., može se odrediti srednja vrijednost struje ventila  $V1$  te znajući da je  $I_E(0) > I_d$  prema [3] srednja vrijednost struje:

$$I_E(0) = \frac{E}{\tilde{R}_{uz}} + I_d(0) \quad (3-18)$$

gdje se faktor  $\tilde{R}_{uz} = \frac{2L_E}{\alpha^2 T_s}$  [3] naziva izmjenični otpor uzlaznog istosmjernog pretvarača u diskontinuiranom načinu rada jer je njegova snaga, preuzeta iz izvora, jednaka istosmjernoj snazi ventila  $V1$ , odnosno po apsolutnom iznosu jednaka je izmjeničnoj snazi koja se stvori tijekom

procesa pretvorbe u pretvaraču. Kod određivanja upravljačke karakteristike u diskontinuiranom režimu rada srednja vrijednost struje izvora je [3]:

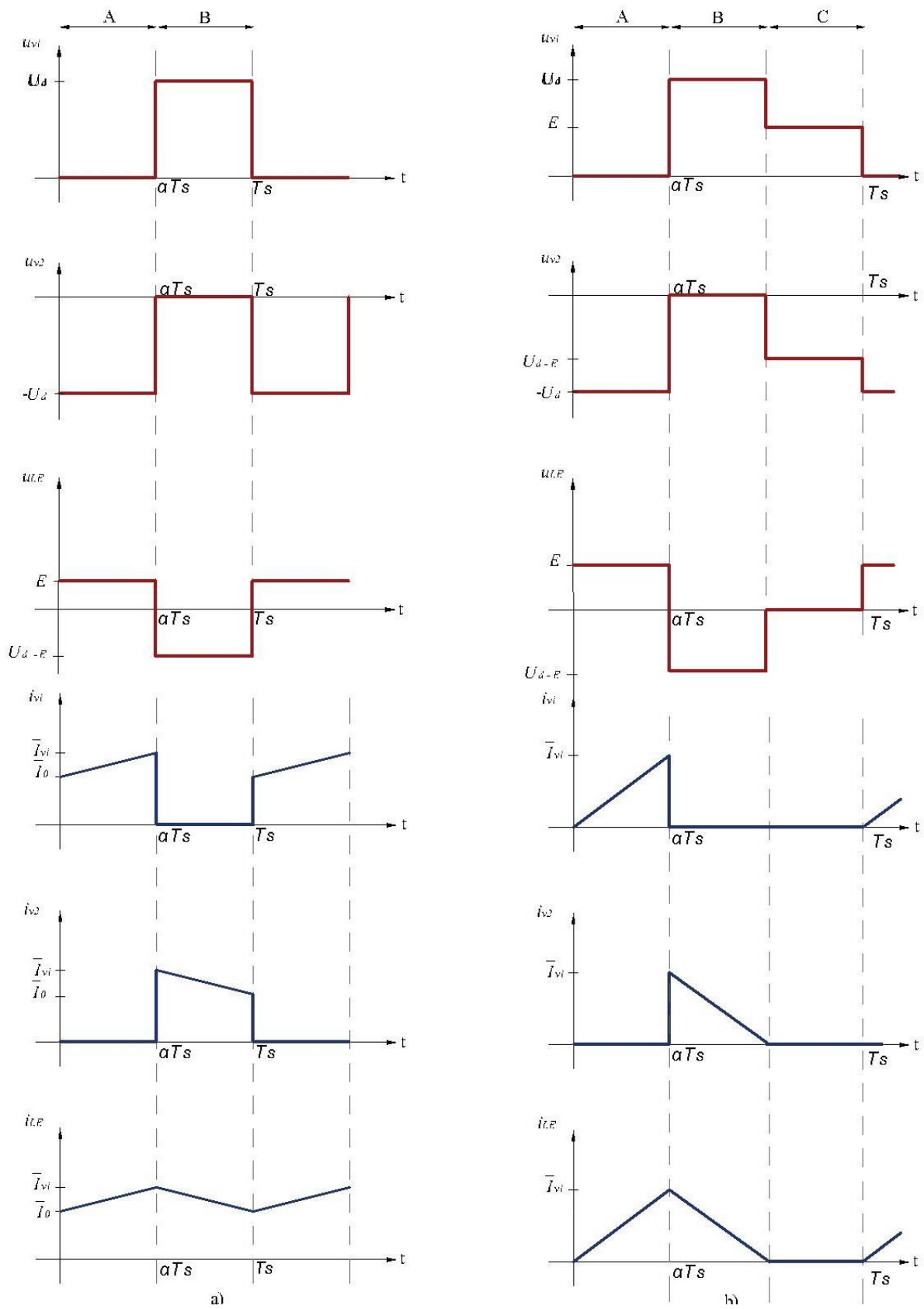
$$I_E(0) = \frac{1}{2} \Delta i_E \cdot \frac{T_{V1} + T_{V2}}{T_s} = \frac{1}{2} \frac{E \alpha T_s}{L_E} \cdot \frac{T_{V1} + T_{V2}}{T_s} \quad (3-19)$$

Zbog ravnoteže narinutih voltsekunda u intervalima A i B na induktivitetu  $L_E$  vrijedi [3]:

$$E T_{V1} = (U_d - E) T_{V2} \quad (3-20)$$

Kako su ulazna i izlazna snaga istosmjernog pretvarača jednake daljnjim uvrštavanjem dobiva se upravljačka karakteristika [3] koja vrijedi za svaku srednju vrijednost struje izvora manju od granične.

$$U_d = E \frac{1 + \sqrt{1 + 4R_d / \tilde{R}_{uz}}}{2} \quad (3-21)$$



Slika 4.7. Valni oblici napona i struja u a) kontinuiranom režimu rada i b) diskontinuiranom režimu rada

## **4.2. Primjena uzlaznih istosmjernih pretvarača u hibridnim i električnim vozilima**

Istosmjerni pretvarači u električnom vozilu (eng. EV) mogu biti jednosmjerni i dvosmjerni. Dvosmjerni istosmjerni pretvarači primjenjuju se na mjestima punjenja baterije, regenerativnog kočenja i pomoćnog napajanja. Tok snage u dvosmjernom pretvaraču obično polazi s niskog napona kao što je baterija ili superkondenzator na stranu visokog napona i ta se radnja naziva podizanje napona. S obzirom da mu je jedna od funkcija pomoćno napajanje sustava, dvosmjerni istosmjerni pretvarač olakšava siguran rad vozila kada motori s unutarnjim izgaranjem ili električni motori ne uspijevaju startati. I kod jednosmjernih i dvosmjernih istosmjernih pretvarača poželjno je da budu galvanski izolirani kako bi omogućili sigurnost uređaja za pokretanje. Stoga, većina istosmjernih pretvarača sadrži visokofrekventni transformator, čije uključivanje može dovesti do nekih od sljedećih problema:

1. rasipni induktivitet propuštanja transformatora dovodi do prenapona pri sklapanju upravljivog ventila pretvarača i diode zbog oscilacija uzrokovanih parazitskim induktivitetima i kapacitetima tranzistora ili diode, kao i njihovim ožičenjem,
2. povećava izmjere pretvarača; volumen, težinu i cijenu i
3. povećava elektromagnetske smetnje.

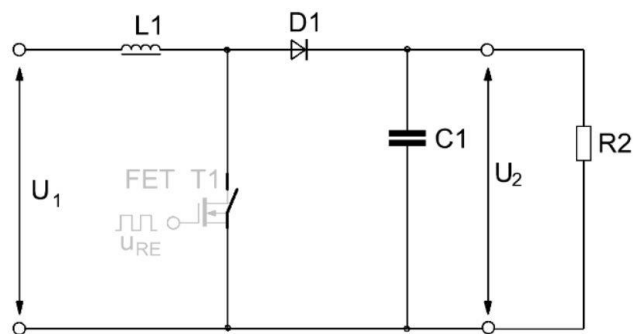
Cilj je većine dizajna istosmjernih pretvarača prevladati navedene probleme kako bi se doprinijelo visokoučinkovitosti i isplativosti istosmjernih pretvarača. Na električnim vozilima i hibridnim električnim vozila (HEV), pretvarač i izmjenjivač i integrirani su u jednu jedinicu, ali svaki obavlja različite zadatke. Takva elektronika stvara mnogo topline pa ima svoj namjenski sustav hlađenja odvojen od motora koji uključuje vlastitu pumpu i hladnjak. Istosmjerni pretvarač ključna je komponenta u električnim vozilima jer pretvara istosmjerni napon jedne razine na drugu, u slučaju uzlaznog pretvarača, višu razinu. Uzlazni istosmjerni pretvarač primjenjuje se za pretvaranje napona EV/HEV baterije (obično 180-300 V) u oko 650 V za napajanje pogonskog motora [12]. Prednost korištenja pretvarača za povećanje napona iz baterije je što se može koristiti manja i jeftinija baterija dok se i dalje koristi učinkovit visokonaponski motor. Neke od ostalih prednosti primene istosmjernog uzlaznog pretvarača su to da:

- osigurava galvansko odvajanje između ulazne i izlazne strane,
- njegovo korištenje pojednostavljuje napajanje,
- dolazi u hibridnim sklopovima koji imaju sve komponente krugova u jednom kućištu itd.

Uz prednosti uvijek postoje i neki nedostaci, a u slučaju ovog pretvarača najčešći su to da:

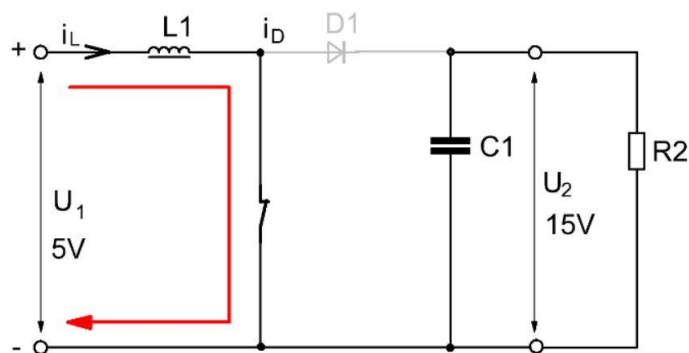
- uzrokuje buku tokom rada, pojava magnetostrikcije [13]
- ima izraženu valovitost struje izvora i visoku vrijednost ulaznog i izlaznog kapaciteta
- ima visoku cijenu,
- daje nestabilan napon.

Uzlazni pretvarač u električnom vozilu koji se razmatra u LNCO4205-1K tečaju radi u kontinuiranom režimu rada odnosno u dva intervala, što je prikazano kroz sljedeće sheme uzlaznog pretvarača realiziranog tranzistorom i diodom, slika 4.8. [10].



Slika 4.8. Pretvarački sklop uzlaznog pretvarača

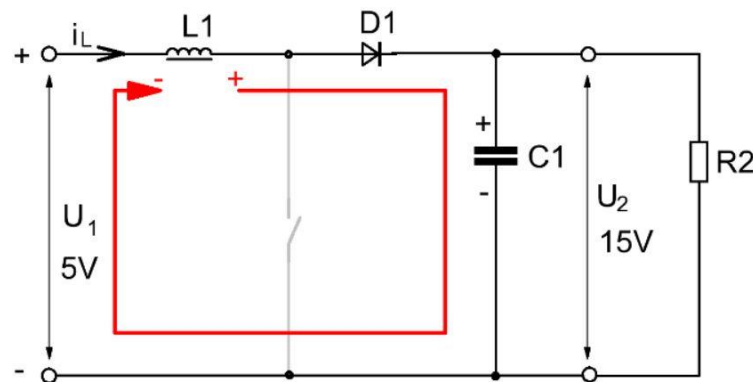
U radu navedenog pretvarača posebno važnu ulogu ima realizacija zavojnice koja je modelirana induktivitetom  $L1$ . Za vrijeme uklapanja, kada je sklopka zatvorena, zavojnica  $L1$  se puni strujom  $i_L$  i količina naboja raste tijekom trajanja struje, slika 4.9. [10]



Slika 4.9. Vrijeme uklapanja; ON-period

Kada sklopka isklopi, slika 4.10. [10], zavojnica održava struju  $i_L$  dok se ne isprazni te u tom procesu struja kontinuirano opada. Napon induciran zavojnicom  $L1$  u trenutku isključivanja spojen je serijski na ulazni napon  $U1$ . Ulazni napon i inducirani napon se zbrajaju i pune izlazni

kondenzator  $C1$  preko diode te se na trošilu;  $R2$  pojavljuje viši izlazni napon - što je pobliže objašnjeno u tečaju „Uzlazni pretvarači u hibridnim i električnim vozilima“ pod temom koja se bavi objašnjavanjem rada uzlaznih pretvarača.



Slika 4.10. Vrijeme isklapanja; OFF-period

## 5. PREGLED VJEŽBI U LNCO4205-1K TEČAJU

Svrha je tečaja naziva „Uzlazni pretvarači u hibridnim i električnim vozilima“ dijagnosticiranje problema s radom električnih vozila te razumijevanje uloge pretvaračkih komponenti i uzlaznih pretvarača. Prvi dio tečaja obuhvaća teme koje polaznika upoznaju sa opremom, primjerom problema s kojim se korisnik automobila susreće. Uvodi se i u metode popravka navedenog automobila te upoznaje sa lokacijom svih komponenata u električnom vozilu, a time i onima koje su u kvaru. Kroz te točke trebalo bi se:

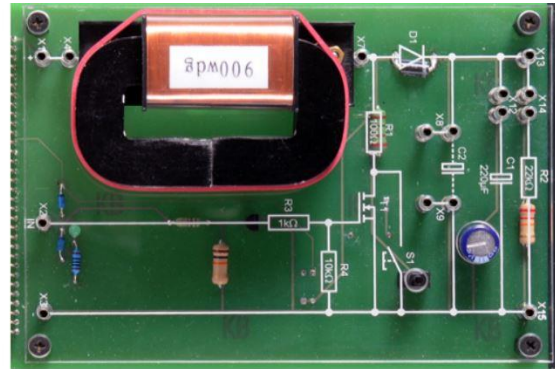
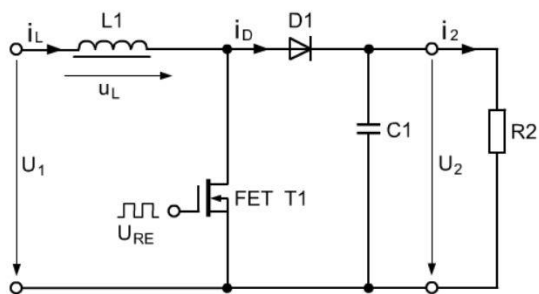
- usvojiti razumijevanje pritužbi vlasnika vozila,
- razviti rutinu testiranja,
- dijagnosticirati problem u radu podsustava električnog vozila pri vožnji uz pomoć dokumentacije proizvođača i dijagnostičke opreme te
- čitati i razumijeti servisiranje takvog vozila [10].

U drugom dijelu tečaja, koji je više baziran na davanje teorijske podloge o ulozi zavojnice, radu pretvarača, spojnim shemama i proračunu izlaznog napona, svladavaju se vještine:

- rada sa spojnim shemama,
- određivanja utjecaja kvara na sustav kao cjelinu i osmišljavanja dijagnostičkih metoda i
- vrednovanje rezultata mjerenja [10].

Preduvjeti za razumijevanje tečaja i situacije osposobljavanja koja se njime nudi su osnovna znanja iz područja elektrotehnike i elektronike, hibridnih i električnih vozila i njihovih podsustava te poznavanje blok dijagrama i spojnih shema kao i izvođenja mjerenja na električnim sustavima.

## 5.1. Izvedba uzlaznog pretvarača



Slika 5.1. Shema i izvedba uzlaznog pretvarača sa zavojnicom

Za izvođenje vježbi iz tečaja potrebno je razumijevanje uloge zavojnice u radu uzlaznih pretvarača. Slika 5.1. preuzeta iz [10] prikazuje shemu za uzlazni pretvarač koji koristi zavojnicu lijevo i izvedbu uzlaznog pretvarača za eksperiment desno. U prvom intervalu rada se tranzistor s efektom polja (FET tranzistor) *T1* "uključuje", čime se zavojnica *L1* kratkotrajno spaja na ulazni napon *U1*. To uzrokuje struju kroz zavojnicu *L1*, čime se energija pohranjuje u zavojnicu *L1*. U drugom položaju, gdje se tranzistor s efektom polja *T1* "isključuje", prema fizikalnim zakonima, zavojnica *L1* održava struju. Kroz diodu *D1* teče struja do kondenzatora *C1* i otpornika *R2*, odnosno potrošača.

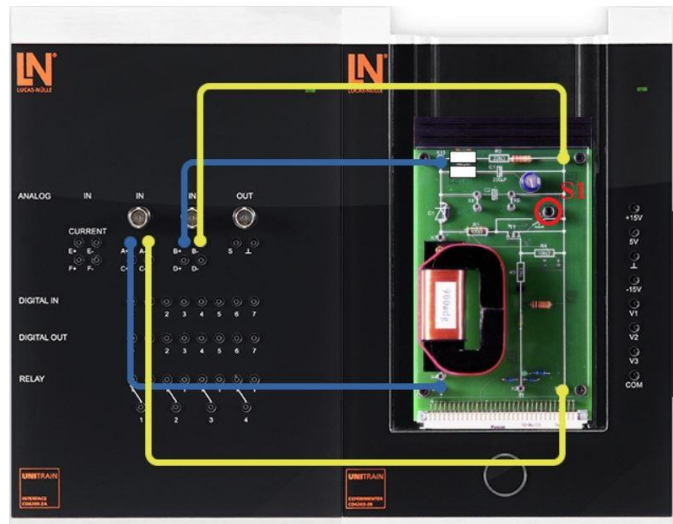
Izlazni napon *U2* je proporcionalan povećanju struje kada je zavojnica uključena i smanjenju struje kada je zavojnica isključena. Time se dakle postavlja njegova vrijednost. Uz odgovarajući faktor vođenja za dva sklopna intervala, pravim izborom zavojnice (važan je pravi odabir tipa željezne jezgre) i kondenzatora, izlazni napon će biti kontinuiran, zadovoljavajuće valovitosti.

## 5.2. Prva vježba: Provjera ulazne i izlazne naponske razine

Ovaj pokus, spojen prema slici 5.2.[10], istražuje temeljne fizikalne osnove u uzlaznom pretvaraču bez potencijalne izolacije. Struja u zavojnici se uključuje i isključuje i stvara inducirani napon te tako stvara viši izlazni napon. Kao prvi korak, nakon provjere je li zavojnica sa 900 namotaja te njena željezna jezgra pravilno umetnuta i pričvršćena na eksperimentalnu karticu,

ručno će se oponašati radnja prebacivanja, kojom će kasnije upravljati tranzistor, pomoću gumba S1. Vježba se izvodi pomoću 2 virtualna voltmetra gdje je:

- A - ulazni napon;
- B - izlazni napon.



Slika 5.2. Način spajanja opreme za Vježbu 1

Mjeri se ulazni i izlazni napon na uzlaznom pretvaraču i zatim treba prepoznati gdje se određene komponente nalaze u spojnoj shemi te nakon provedbe pokusa odgovoriti na pitanja vezana uz promjenu izlaznog napona koja se dogodi pritiskom gumba S1. Na temelju dobivenih rezultata se vidi da je izlazni napon veći od ulaznog napona koji iznosi 5 V. Također zaključujemo se brzim pritiskom gumba nekoliko puta izlazni napon povećava, što se vidi iz dijaloškog okvira 5.3. iz *LabSoft* programa [10].

What happens to the output voltage reading when the button is actuated quickly several times?

- The output voltage does not change.
- The output voltage decreases.
- The output voltage increases.

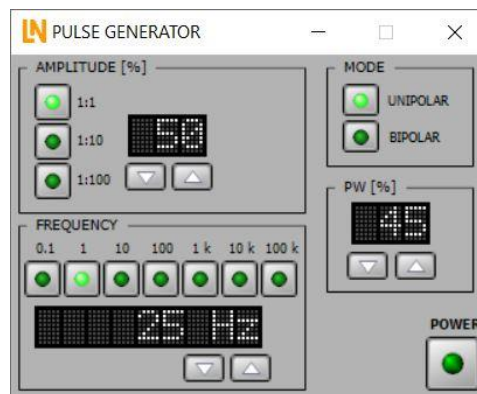
😊 Correct

Slika 5.3. Zaključak prve vježbe



### 5.3. Druga vježba: Mijenjanje faktora vođenja

U ovom pokusu uzima se ulazni napon 5 V i generira izlazni napon od 15 V. Tranzistorom se upravlja pomoću funkcijskog generatora koji omogućuje precizno postavljanje razine izlaznog napona. Kako bi se generirao izlazni napon 15 V, pulsna širina, odnosno faktor vođenja, mora se postupno povećavati sve do 45%, slika 5.4. [10]



To which value must the pulse width be set to attain the output voltage of 15 V?

The pulse width PW[%] must be set to .

Correct

Which value did you change in order to adjust the voltage?

- The pulse width PW[%].
- The amplitude [%].
- The frequency.

Correct

Slika 5.4. Zaključak druge vježbe

Nakon provođenja vježbe može se primijetiti odstupanje rezultata od idealne upravljačke karakteristike u kontinuiranom načinu rada. Ista se izvodi kroz analizu rada u 2 intervala, odnosno kada vodi upravljivi ventil (u ovom slučaju tranzistor) i kada vodi dioda. Postavljanjem Kirchoffovih jednadžbi zakona napona i zakona struja za te intervale, integriranjem, uvrštavanjem dobivenog faktora vođenja te određivanjem preostalih veličina iz početnih jednadžbi mreže, uz uvjet da je u periodičkom načinu rada srednja vrijednost napona induktiviteta jednaka nuli, dobiva se upravljačka karakteristika dana formulom (4-17).

Iz nje je moguće, izračunom iz napona, odrediti faktor vođenja:

$$1 - \alpha = \frac{E}{U_d} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{E}{U_d} \rightarrow \alpha = 1 - \frac{5}{15} = 0.67 \quad (5-1)$$

u koji se ubacujući vrijednosti parametara iz Vježbe 2 tj.  $E = 5V, U_d = 15V$  dobije očekivani faktor vođenja  $\alpha$  koji značajno odstupa od u pokusu dobivenih 0.45.

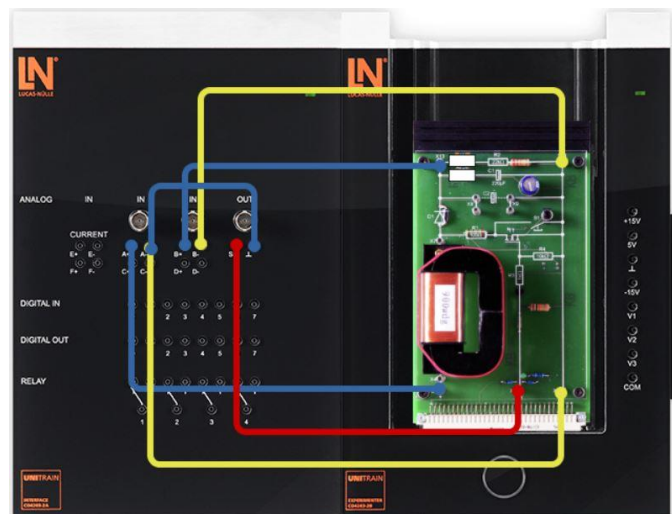
Moguće je izračunati odstupanje dobivenog faktora vođenja od očekivanog:

$$\left| \frac{d_{oč} - d_{dob}}{d_{oč}} \right| * 100\% = \left| \frac{0.45 - 0.67}{0.45} \right| * 100\% = 48.88\% \quad (5-2)$$

Veliko odstupanje za isti napon posljedica je toga što se uzlazni pretvarač sastoji od realnih komponenti, ali i toga da pretvarač na maketi uz faktor vođenja  $\alpha=0.45$  radi u diskontinuiranom načinu rada. Da bi pretvarač prešao u kontinuirani način rada, očito je potreban viši faktor vođenja.

### 5.4. Treća vježba: Mjenjanje sklopne frekvencije

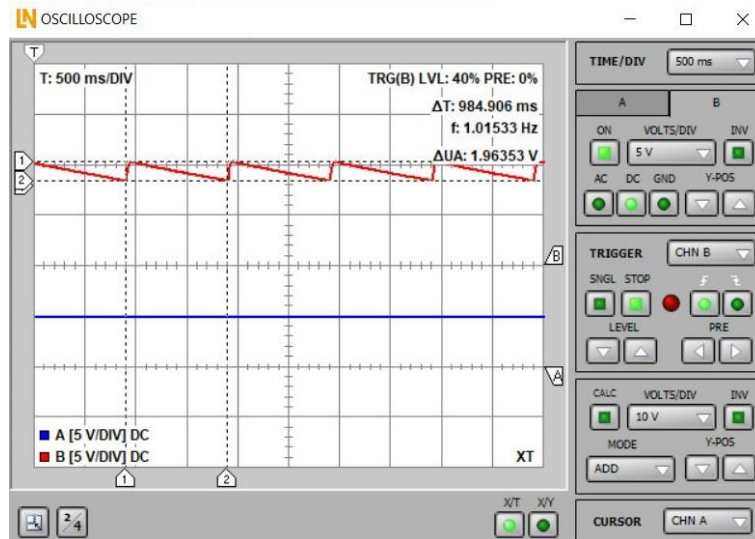
Cilj trećeg pokusa je od početnog napona 5 V dobiti izlazni napon od 12 V mijenjanjem frekvencije. Spoj za izvođenje vježbe identičan je kao i u 2. i 4. vježbi, slika 5.5. [10]. Vježba se izvodi pomoću virtualnog funkcijskog generatora i dva voltmetra. Kako bi se dobio traženi napon, frekvencija se mora postaviti na 5 Hz.



Slika 5.5. Prikaz načina spajanja vježbi

### 5.5. Četvrta vježba: Valovitost izlaznog napona

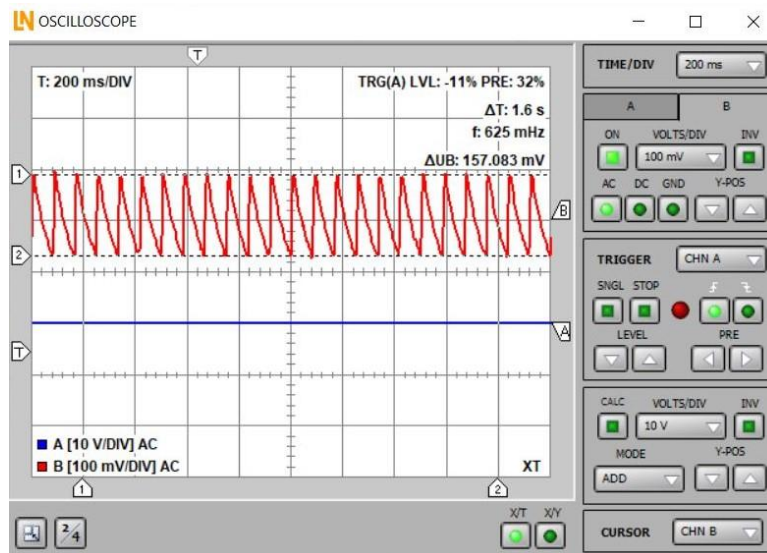
Prilikom izvođenja ovog pokusa također se uzima ulazni napon od oko 5 V i generira viši izlazni napon. Cilj je istražiti i procijeniti kako frekvencija utječe na valovitost napona s time da funkcijski generator prvo postavimo na 1 Hz a zatim na 12 Hz, s tim da u oba slučaja pulsna širina treba biti postavljena na 22%, a amplituda na 50%.



Slika 5.6. Prikaz valnih oblika napona pri 1 Hz:  
plavo označen - ulazni napon, crveno označen- izlazni napon

Pomoću virtualnog osciloskopa i pulsnog generatora dobiveni su rezultati koji se ubacuju na za njih predviđeno mjesto. Valni oblici napona i struje u prvom slučaju, kada je frekvencija 1 Hz, prikazan je slikom 5.6. Radi boljeg prikaza valovitosti pri frekvenciji od 12 Hz promatrala se izmjenična (AC) komponenta istosmjernog izlaza prikazana kanalom B.

Uz frekvenciju od 12 Hz dobiju se valni oblici sa slike 5.7.:



Slika 5.7. Prikaz valnih oblika napona pri 12 Hz:  
plavo označen - ulazni napon, crveno označen- izlazni napon

Ulazni napon, prikazan kanalom A, uvijek je „gladak“, a izlazni napon je „gladi“ pri višoj frekvenciji. Analizom rezultata može se zaključiti da se povećanjem sklopne frekvencije smanjuje valovitost, a to je potvrđeno i sa 5.6. [10]

---

Compare the oscillograms. What can be said about the ripple of the input and output voltages? How "smooth" is the input voltage; how "smooth" or "rippled" is the output voltage?

- The input voltage is always "smooth".
- The input voltage is always extremely "rippled".
- The output voltage is "very smooth" at low frequencies.
- The output voltage is "smooth" at high frequencies.

😊 Correct

---

Complete the text. To achieve a low voltage ripple voltage, the control frequency should preferably be ...

- high.
- low.

😊 Correct

Slika 5.6. Zaključak četvrte vježbe

Budući da istosmjerni pretvarači rade izvan područja čujnih frekvencija - iznad 16kHz, frekvencija rada 12 Hz nije pogodna za primjenu pretvarača. Frekvencija rada pretvarača može prijeći u čujno područje, ali se to u tehničkim primjenama nastoji izbjeći zbog magnetostrikcije. „Pojava magnetostrikcije iskorištena je u tehnici za produkciju zvučnih valova visoke frekvencije (ultrazvuk) i velikih amplituda s pomoću magnetostrikcijских rezonatora. Magnetostrikcija je odgovorna za zvuk kojega proizvode transformatori i drugi uređaji sa željeznim jezgrama koji rade na izmjeničnu struju.“ [14]

Provođenjem pokusa zaključuje se da je maketa dizajnirana za rad pri velikim faktorima vođenja, ali na niskim frekvencijama, tj. do predloženih 12 Hz. Osim velike induktivnosti zavojnice razlog za takav dizajn je i pokušaj dobivanja valnih oblika što bližih idealnim valnim oblicima. U svrhu postizanja i usavršavanja navedenog, u vježbama se uvodi koncept pulsno-širinskog i frekvencijskog upravljanja, čime se na razmatranje stavlja i pojam valovitosti.

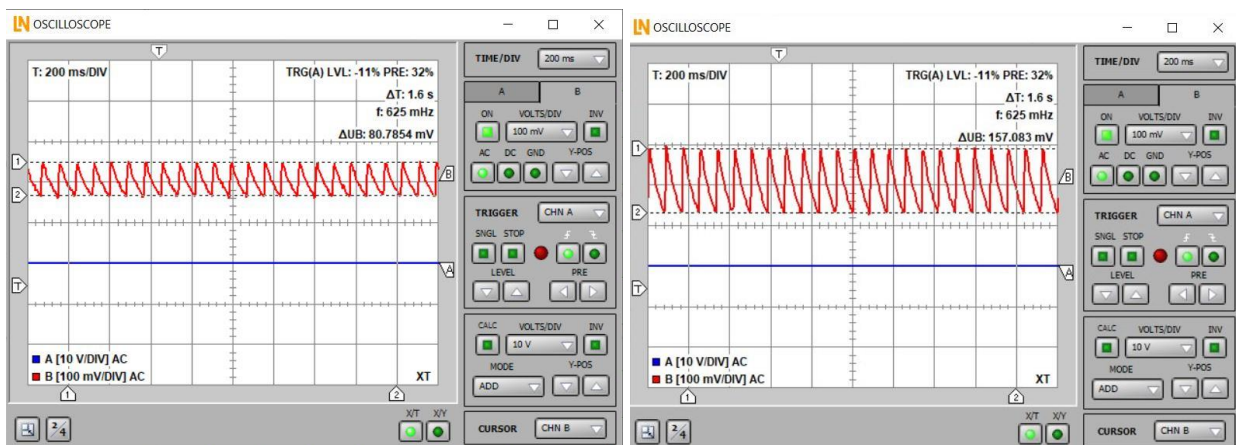
Kako je maketa dizajnirana za niže frekvencije, induktivitet je prevelik što stvara nepogodnosti kod snimanja valnih oblika struje zavojnice. Osim nemogućnosti mjerenja struje, ostali nedostaci, zapaženi prilikom rada, su i nemogućnost mjerenja otpora trošila te promjena ulaznog napona koji je fiksiran na 5V.

Može se reći da su prethodni pokusi prilagođeni srednjoškolskoj razini radi sadržaja tečaja te interaktivnosti i jednostavnosti izvođenja vježbi. No UniTrain sustav, kako postavlja temelje znanja, tako nudi i usavršavanje i proširivanje istoga. Na samom završetku tečaja postoji mogućnost osmišljanja i izvođenja vlastitih eksperimenata kojima se otvaraju mogućnosti ispitivanja rada eksperimentalne kartice uzlaznog pretvarača. Stoga je tečaj moguće odvesti na višu razinu i prilagoditi ga potrebama visokoškolskog obrazovanja. Konkretno gledajući temu uzlaznih pretvarača u električnim i hibridnim vozilima, tečaj bi bilo moguće uklopiti u izvođenje laboratorijskih vježbi kolegija Osnove energetske elektronike kada bi se nadgradilo postojeće četiri vježbe i uvelo nove. Kako bi se otišlo korak dalje u izvođenju vježbi, ispitat će se valovitost izlaznog napona i ulazne struje; prvo uvođenjem dodatnog kondenzatora u postojeću četvrtu vježbu, a zatim i povećanjem frekvencije.

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

### 6.1. Smanjivanje valovitosti izlaznog napona

Cilj provođenja ovog pokusa je provjeriti kako dodatni kondenzator, koji je dio Lucas Nuelle opreme, ali se ne koristi u vježbama tečaja, utječe na valovitost izlaznog napona. Na spoj za četvrtu vježbu, slika 5.5., paralelno na trošilo dodaje se kondenzator od 220  $\mu\text{F}$ , slika 6.1.



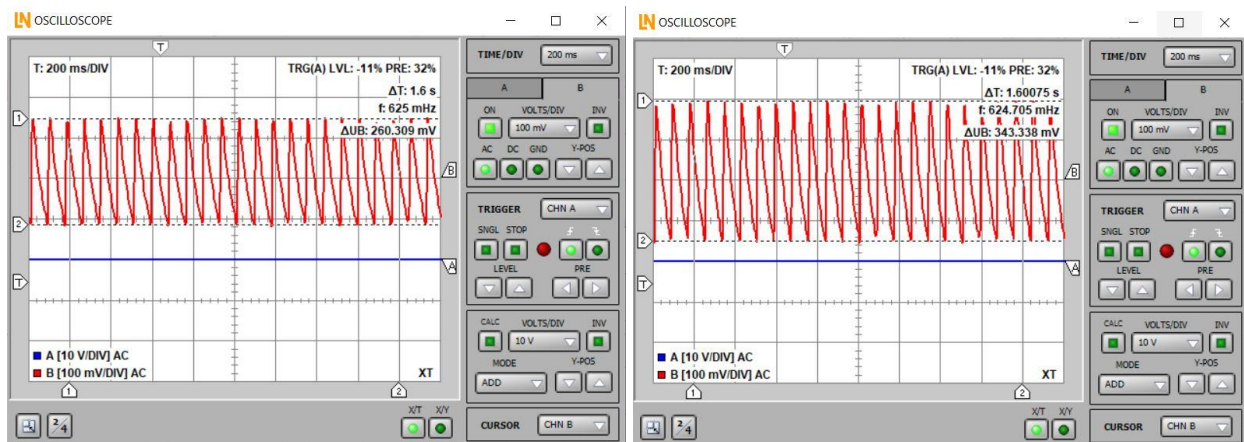
a)

b)

Slika 6.1. a) Valni oblik izlaznog napona uz dodatni kondenzator;  $\alpha = 22\%$ ,  $f_s = 5\text{Hz}$   
 b) Valni oblik izlaznog napona bez dodatnog kondenzatora

Usporedbom sa slikom 5.7. primjeti se da se valovitost izlaznog napona dvostruko smanji, sa približno 160 mV na 80 mV. Dakle, dodavanjem kondenzatora, smanjuje se valovitost i poboljšava valni oblik izlaznog napona. Gornji je prikaz snimljen pri frekvenciji 12 Hz uz faktor vođenja

$\alpha=22\%$ . Nakon povećavanja faktora vođenja na 50% i 80%, uz istu frekvenciju, slika 6.2. , da se primijetiti da je valovitost veća. To dovodi do zaključka da manji faktor vođenja znači manju valovitost i obratno, ako se faktor vođenja poveća i valovitost će biti veća.



a)

b)

Slika 6.2. Valni oblik izlaznog napona uz:  
a)  $\alpha = 50\%$ , b)  $\alpha = 80\%$

Teorijski gledano, kada je struja diode odnosno ventila  $V_2$  veća od izlazne struje, kondenzator se u jednom intervalu puni a u drugom prazni te je količina naboja koja se šalje na kondenzator jednaka je količini naboja koja se odvodi iz kondenzatora. Neka  $U_d$  predstavlja izlazni napon a  $\Delta U_d$  valovitost izlaznog napona. Prema [2] vrijedi:

$$\Delta U_d = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_d \alpha T_s}{C} \quad (6-1)$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} \rightarrow \Delta U_d = \frac{U_d \alpha T_s}{R_d C} \quad (6-2)$$

$$\frac{\Delta U_d}{U_d} = \frac{\alpha T_s}{RC} \quad (6-3)$$

Iz gornje relacije potvrđuje se da je prethodni zaključak da je valovitost manja uz manji faktora vođenja točan. Može se primijetiti i da su valovitost i kapacitet obrnuto proporcionalni, odnosno što je veći kapacitet manja je valovitost i obrnuto. Također, što je veći otpor manja je izlazna struja te je i valovitost manja. Ako je  $T_s = \frac{1}{f_s}$  i  $RC = \tau$  izraz (6-3) može se zapisati kao:

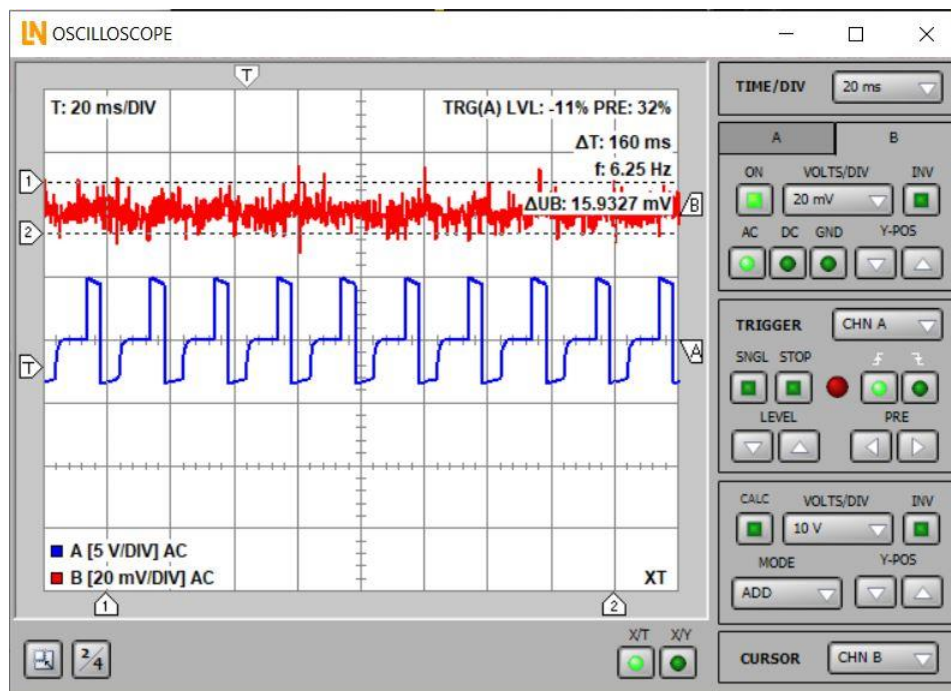
$$\frac{\Delta U_d}{U_d} = \frac{\alpha}{f_s \tau} \quad (6-4)$$

Iz čega se vidi i kako se valovitost izlaznog napona mijenja promjenom sklopne frekvencije - povećanjem frekvencije smanjuje se valovitost.



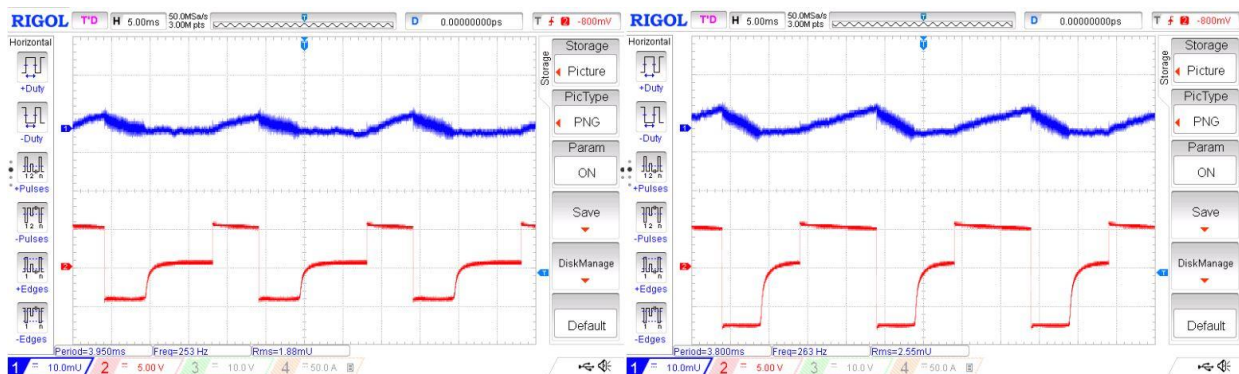
## 6.2. Povećanje frekvencije rada

Cilj je sljedećeg dijela pokusa ispitati kako prigušnica radi ako se poveća sklopna frekvencija. Sklop će se testirati pri sklopnim frekvencijama od 50Hz, 500Hz i 1kHz. Mjerila se izmjenična komponenta napona i struje zavojnice sa 900 namotaja. Na slici 6.3., kanal A prikazuje napon, a kanal B struju zavojnice pri 50Hz.



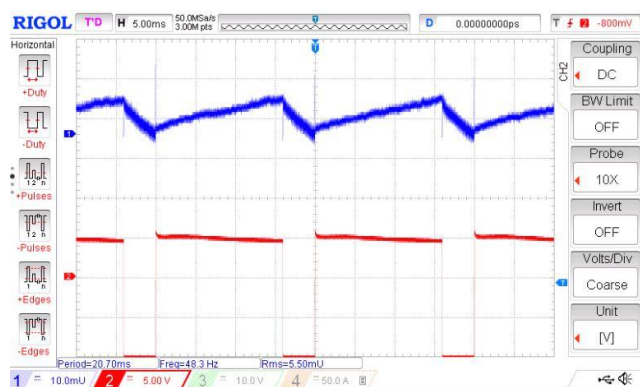
Slika 6.3. Valni oblik struje i napona zavojnice uz:  $\alpha = 22\%$ ,  $f_s = 50\text{Hz}$ ;  
crveno označena - struja, plavo označen - napon

Kako postoji interval u kojem je napon zavojnice jednaki nuli, može se zaključiti da pretvarač radi u diskontinuiranom načinu rada. To se na slici 6.3. lakše identificira sa valnog oblika napona, jer je induktivnost zavojnice prevelika za maketu koja je po uvodnim vježbama dizajnirana za niže frekvencije te je stoga valni oblik struje zavojnice male valovitosti, za što osjetljivost virtualne instrumentacije nije dovoljna. Povećanjem frekvencije na 50 Hz, struja se smanjila te više izmjeničnu komponentu nije bilo moguće izmjeriti bez pomoći vrlo preciznih strujnih klješta. Za daljnja mjerenja potrebno je koristiti vanjski osciloskop i strujna klješta bolje osjetljivosti i preciznosti mjerenja. Uzimajući u obzir da je valovitost proporcionalna faktoru vođenja, predlaže se mjerenje u kojem će se mijenjati tri faktora vođenja od 30%, 50% i 80%.



a)

b)



c)

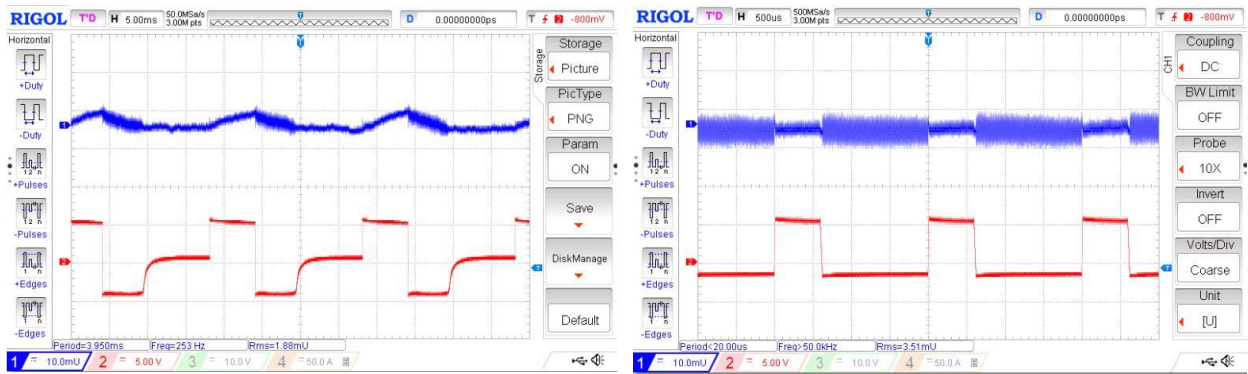
Slika 6.4. Valni oblici struje i napona prigušnice pri  $f_s = 50\text{Hz}$  i:

a)  $\alpha = 30\%$ , b)  $\alpha = 50\%$ , c)  $\alpha = 80\%$

Sa slike 6.4. može se uočiti da je struja uz faktor vođenja  $\alpha = 30\%$  najmanja te da povećanjem faktora vođenja raste valovitost struje zavojnice, a time i valovitost ulazne struje. Pri faktoru vođenja  $\alpha = 80\%$  uzlazni istosmjerni pretvarač iz diskontinuiranog područja rada prelazi u kontinuirani način rada.

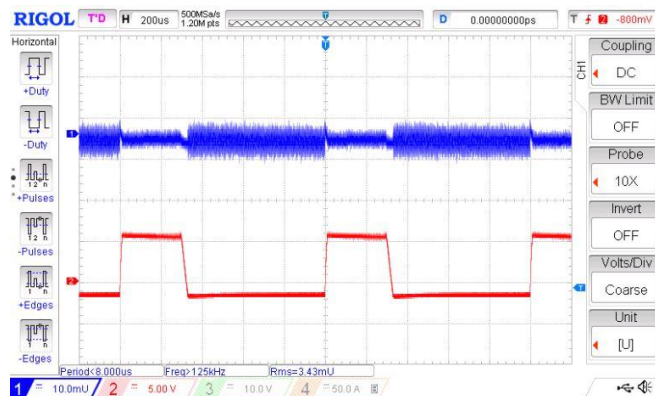
Zadržavanjem istog faktora vođenja, a povećavanjem frekvencije, zaključuje se da pretvarač prelazi u kontinuirani način rada pri frekvenciji 500Hz, slika 6.5. c), čime se smanjuje valovitost. S daljnjim povećanjem frekvencije pretvarač nastavlja raditi kontinuirano što je vidljivo i sa slike 6.6. .





a)

b)



c)

Slika 6.5. Valni oblici struje i napona zavojnice pri faktoru vođenja  $\alpha = 30\%$  i:

a)  $f_s = 50\text{Hz}$ , b)  $f_s = 500\text{Hz}$ , c)  $f_s = 1\text{kHz}$

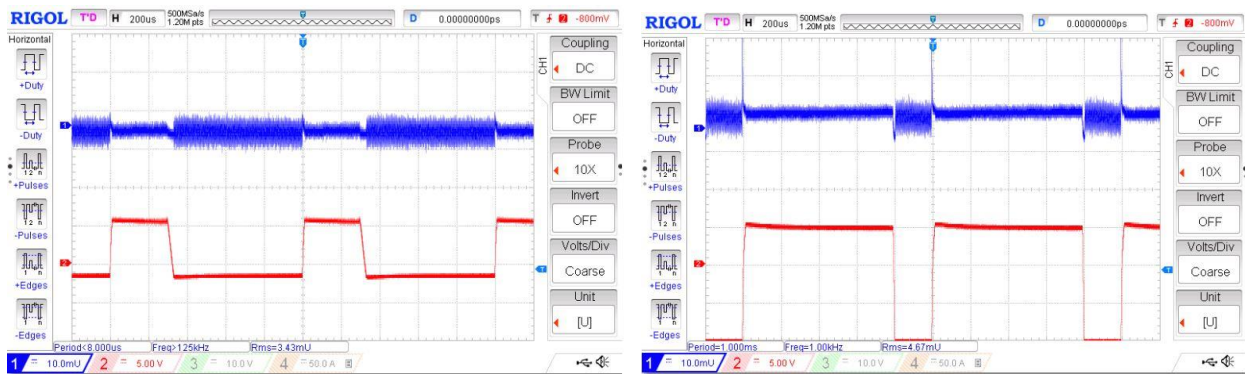
Prema [3], odnos sklopne frekvencije i struje zavojnice dan je jednačbom:

$$\Delta i_{L_E} = \alpha \frac{ET_s}{L_E} \quad (6-5)$$

koja se, izvedeći izraz za induktivitet, može zapisati i kao:

$$L_E = \frac{\alpha E}{f_s \Delta i_{L_E}} \quad (6-6)$$

Iz gornjih izraza može se zaključiti da se povećanjem sklopne frekvencije  $f_s$  smanjuje perioda  $T_s$ , induktivitet  $L_E$  se prazni, a struja prigušnice  $\Delta i_{L_E}$  raste.



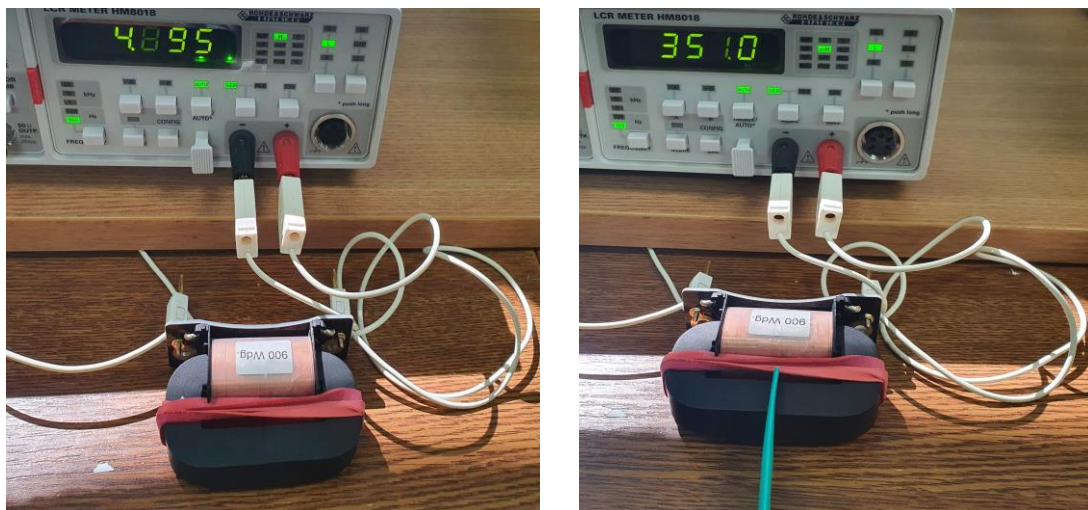
a)

b)

Slika 6.6. Valni oblici struje i napona prigušnice pri frekvenciji od 1kHz i:

a)  $\alpha = 30\%$ , b)  $\alpha = 80\%$

Sa slike se da uočiti da valni oblik struje ima velika istitravanja i šum, što može biti posljedica prevelike induktivnosti zavojnice te preciznosti i osjetljivosti mjerne opreme. Da bi valni oblik struje bio bolje razlučivosti, potrebno je smanjiti induktivnost zavojnice kako bi se povećala frekvencija za daljnji rad, (6-6). Izmjerena je induktivnost prigušnice pri frekvenciji 100Hz i iznosila je 4,6H. Smanjenje induktivnosti prigušnice postiže se povećanjem zračnog raspora, širenjem željezne jezgre, slika 6.7.



Slika 6.7. Mjerenje induktiviteta prigušnice:

a) bez zračnog raspora b) sa zračnim rasporom

## ZAKLJUČAK

*Lucas Nuelle* didaktičko-multimedijalna oprema služi za eksperimentiranje, proučavanje i razumijevanje različitih tema iz područja elektronike i elektrotehnike. Budući da je Uni-Train sustav namijenjen općem obrazovanju i usavršavanju, ova se oprema uz računalnu podršku *LabSoft* može koristiti i na višoj razini obrazovanja. Unatoč pojedinim nedostacima, *Lucas Nuelle* oprema odličan je alat za unaprijeđivanje vještina studenata te osmišljavanje i provođenje novih pokusa, što je čini i dobrim dodatkom pri izvođenju laboratorijskih vježbi iz područja energetske elektronike.

Tečaj „Uzlazni istosmjerni pretvarači u hibridnim i električnim vozilima“ nudi vježbe koje obuhvaćaju pulsno-širinsko, frekvencijsko te širinsko-frekvencijsko upravljanje naponom trošila i snimanje valnih oblika ulaznog i izlaznog napona. Provođenjem prethodno spomenutih vježbi može se primijetiti da je oprema namijenjena za rad na niskim frekvencijama. Tako se u predloženim vježbama predlaže rad na sklopnoj frekvenciji od 12 Hz maksimalno, što je ispod frekvencije koja se koristi u primjeni; iznad 16 kHz. Stoga su uvedeni novi eksperimenti u smislu dodavanja izlaznog kondenzatora i povećanja sklopne frekvencije.

Dodavanjem kondenzatora, smanjuje se valovitost i poboljšava valni oblik izlaznog napona. Povećanjem faktora vođenja, uz istu frekvenciju, raste i srednja vrijednost izlaznog napona kao i njegova valovitost.

Pretvarač prilikom izvođenja zadanih vježbi radi u diskontinuiranom načinu rada. Za potrebe ispitivanja utjecaja promjene sklopne frekvencije na zavojnicu, zbog premale valovitosti struje zavojnice, za daljnja se mjerenja koriste vanjski osciloskop i strujna klješta bolje osjetljivosti i preciznosti mjerenja. Struja je uz faktor vođenja  $\alpha = 30\%$  najmanja, a povećanjem faktora vođenja primjećuje se i rast valovitosti struje zavojnice, a time i valovitosti ulazne struje. Pri faktoru vođenja  $\alpha = 80\%$  uzlazni istosmjerni pretvarač iz diskontinuiranog područja rada prelazi u kontinuirani način rada. Snimanjem valnih oblika uz isti faktor vođenja, ali uz povećanje frekvencije sa 50 Hz na 500 Hz i 1 kHz zaključuje se da struja zavojnice raste povećanjem frekvencije. Također, promjenom sklopne frekvencije mijenja se i valovitost izlaznog napona - povećanjem frekvencije smanjuje se valovitost. Uzlazni istosmjerni pretvarač pri frekvenciji 500Hz prelazi u kontinuirani način rada te ostaje u istom uz dalje podizanje frekvencije. Tim prelaskom u prirodni način rada istosmjernih pretvarača smanjuje se valovitost. Na valnim oblicima dobivenim frekvencijom 1 kHz primjećuju se velik šum i istitravanja zbog premale valovitosti struje prigušnice te osjetljivosti mjerena i mjerne opreme.

Kako bi se povećala razlučivost valnog oblika struje potrebno je povećati frekvenciju jer istosmjerni pretvarači obično rade izvan čujnog područja odnosno na velikim frekvencijama - preko 10 kHz.

## LITERATURA

- [1] „P. Rajaković Energetska elektronika - Istosmjerni pretvarači“, [Na internetu]. Dostupno na: <https://nastava.asoo.hr/wp-content/uploads/2020/03/Energetska-elektronika-ISTOSMJERNI-PRETVARA%C4%8CI.ppsx>
- [2] „M. Vukšić, Elektronički pretvarači, Sveučilište u Splitu, Split, 2019.“ [Na internetu]. Dostupno na: [https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file\\_attach/Elektroni%C4%8Dki%20pretvara%C4%8Di%20-%20Marko%20Vuk%C5%A1i%C4%87.pdf](https://www.oss.unist.hr/sites/default/files/file_attach/Elektroni%C4%8Dki%20pretvara%C4%8Di%20-%20Marko%20Vuk%C5%A1i%C4%87.pdf)
- [3] I. Flegar, *Elektronički energetske pretvarači, Kiegen d.o.o., Zagreb, Zagreb, 2010.*
- [4] I. Flegar, *Sklopovi energetske elektronike, Graphis Zagreb, Zagreb, 1996.*
- [5] „M. K. Kazimierczuk, Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, John Wiley and Sons, Ltd, United Kingdom, 2008.“ [Na internetu]. Dostupno na: [http://iranswitching.ir/wp-content/uploads/2016/01/Marian\\_K\\_Kazimierczuk\\_Pulse-width\\_Modulated\\_DcDc\\_Power\\_Converters\\_www.IranSwitching.ir\\_.pdf](http://iranswitching.ir/wp-content/uploads/2016/01/Marian_K_Kazimierczuk_Pulse-width_Modulated_DcDc_Power_Converters_www.IranSwitching.ir_.pdf)
- [6] „M. Bishwal, S. Sabyasachi, A Study on Recent Dc-DC Converters“, *Int. J. Eng. Res. Appl. IJERA*, sv. 2, izd. 6, pros. 2012, [Na internetu]. Dostupno na: [www.ijera.com](http://www.ijera.com)
- [7] „D. M. Bellur, M. Kazimierczuk, DC-DC Converters for Electric Vehicle Applications“. IEEE, 2007.
- [8] „Lucas Nuelle službena stranica“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.com/>
- [9] „Lucas Nuelle UniTrainSystem“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.lucas-nuelle.us/2768/apg/18884/UniTrain-System.htm>
- [10] Lucas Nuelle authoring team, „Lucas Nuelle LabSoft: UniTrain Course: „DC-DC step-up converters in hybrid and all-electric vehicles“. Lucas-Nülle GmbH · Siemensstraße 2 · D-50170 Kerpen, 2017.
- [11] „Osnovno o DC-DC pretvorbi - materijali s predavanja kolegija Osnove energetske elektronike“. [Na internetu]. Dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7031953/mod\\_folder/content/0/Osnovno%20o%20DC-DC%20pretvorbi-materijali.pdf?forcedownload=1](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7031953/mod_folder/content/0/Osnovno%20o%20DC-DC%20pretvorbi-materijali.pdf?forcedownload=1)
- [12] Christine and Scott Gable, „Inverters and Converters in Hybrids and EV“, *Treehugger Sustain. All*, sij. 2021, [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.treehugger.com/how-inverters-and-converters-work-85612>
- [13] „Magnetostrikcija“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://hr.unionpedia.org/i/Magnetostrikcija>
- [14] „<https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnetostrikcija>“.

## SAŽETAK

U ovom se završnom radu detaljno razmatra didaktičko-multimedijalna oprema tvrtke *Lucas Nuelle*, koja se primjenjuje za izvođenje laboratorijskih vježbi iz područja energetske elektronike. Prezentirane su vježbe vezane za tečaj pod nazivom „Uzlazni istosmjerni pretvarači u hibridnim i električnim vozilima“.

Također, dana je osnovna teorija o istosmjernim pretvaračima nakon koje slijedi analiza rada uzlaznog istosmjernog pretvarača u kontinuiranom i diskontinuiranom načinu rada.

Nakon teorijske podloge ključne za razumijevanje rada uzlaznog pretvarača objašnjena je njihova primjena u električnim i hibridnim vozilima.

Predlaže se ispitivanje valovitosti izlaznog napona i ulazne struje, zbog čega se proučava povećanje frekvencije rada i utjecaj dodatnog kondenzatora na smanjivanje valovitosti. Također su, pomoću vanjskog osciloskopa, snimljeni valni oblici struja i napona zavojnice pri različitim frekvencijama i faktorima vođenja.

Predloženo je smanjenje induktivnosti zavojnice.

**Ključne riječi:** uzlazni pretvarač, *Lucas Nuelle*, *LabSoft*, *UniTrain-I*, faktor vođenja, sklopna frekvencija, induktivnost zavojnice

## SUMMARY

### **Possibilities in operation with the experimental card LNC04205-1K of a boost converter**

**Key words:** step-up converter, *Lucas Nuelle*, *LabSoft*, *UniTrain-I*, duty cycle, switching frequency, inductance of the coil

This final thesis thoroughly examines the *Lucas Nuelle* didactic-multimedia equipment, used for conducting laboratory exercises in the field of power electronics. The presented exercises are related to a course titled "Step-up DC-DC Converters in Hybrid and Electric Vehicles."

Also, the basic theory of DC converters is given, followed by an analysis of the step-up DC-DC converter in both continuous and discontinuous modes of operation.

After establishing the theoretical foundation crucial for understanding the operation of the boost converter, its applications in electric and hybrid vehicles are explained. It is proposed to examine the output voltage ripple and the ripple of the input current, which is why the increase of the operating frequency and the influence of the additional capacitor in reducing ripple.

Additionally, waveforms of current and voltage across the coil are recorded at various frequencies and duty cycles using an external oscilloscope.

The thesis proposes reducing the inductance of the coil.

## ŽIVOTOPIS

Barbara Kovačević rođena je u Osijeku, 6. 4. 2001. godine. Živi u Podravskim Podgajcima gdje i pohađa osnovnu školu. Godine 2016., odlazi u Osijek i upisuje II. gimnaziju, tijekom koje sudjeluje na raznim dramskim natjecanjima, kako na hrvatskom tako i na engleskom i njemačkom jeziku a neki od njih su: LiDraNo, English All Around, 17. Internationales Deutschsprachiges Theaterfestival u Osijeku te Max sucht den superstar II u Varaždinu povodom 20.-te obljetnice postojanja Njemačke jezične diplome (DSD). Po završetku srednjoškolskog obrazovanja odlučuje otići u potpuno drugom smjeru i istražiti svoje afinitete prema tehničkim znanostima. Stoga, 2020. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer Elektrotehnika. Na drugoj godini preddiplomskog sveučilišnog studija opredjeljuje za smjer Elektroenergetika.

---

*Barbara Kovačević*