Utjecaj promjene induktivnosti prigušnice uzlaznog istosmjernog pretvarača napona realiziranog pomoću Lucas-Nulle eksperimentalne kartice

Blažević, Laura

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:200:697314

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-26**

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

UTJECAJ PROMJENE INDUKTIVNOSTI PRIGUŠNICE UZLAZNOG ISTOSMJERNOG PRETVARAČA NAPONA REALIZIRANOG POMOĆU LUCAS-NULLE EKSPERIMENTALNE KARTICE

Završni rad

Laura Blažević

Osijek, 2024.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju

Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Laura Blažević
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. pristupnika, god.	4789, 28.07.2020.
JMBAG:	0165086850
Mentor:	prof. dr. sc. Denis Pelin
Sumentor:	Andrej Brandis, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Utjecaj promjene induktivnosti prigušnice uzlaznog istosmjernog pretvarača napona realiziranog pomoću Lucas-Nulle eksperimentalne kartice
Znanstvena grana završnog rada:	**Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak završnog rada:	Za eksperimentalnu karticu uzlaznog pretvarača mijenjati induktivnost prigušnice, mijenjanjem zračnog raspora jezgre prigušnice. Snimati karakteristične valne oblike i identificirati režim rada, te podići frekvenciju rada u područje kilo Herca. Sumentor: Andrej Brandis Tema rezervirana za studenticu Lauru Blažević!

Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:	17.09.2024.
Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:	25.09.2024.
Ocjena završnog rada nakon obrane:	Vrlo dobar (4)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:	26.09.2024.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 26.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Laura Blažević
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4789, 28.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	14

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Utjecaj promjene induktivnosti prigušnice uzlaznog istosmjernog pretvarača napona realiziranog pomoću Lucas-Nulle eksperimentalne kartice**

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

i sumentora Andrej Brandis, univ. 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 pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1 Zadatak završnog rada 1

2. PREGLED PODRUČJA RADA 2

3. IZRAVNI ISTOSMJERNI PRETVARAČI NAPONA 4

3.1 Analiza rada uzlaznog istosmjernog pretvarača napona 5

3.1.1. Kontinuirani način rada 6

3.1.2. Diskontinuirani način rada 9

4. DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNA OPREMA LUCAS NUELLE 11

4.1. Opis opreme 11

4.2. Eksperimentalna kartica LNCO4205-1K 11

5. MJERENJA NA KARTICI UZLAZNOG PRETVARAČA 14

5.1. Mjerenja na prigušnici od 900 namota bez zračnog raspora 14

5.1.1. Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 50 Hz 15

5.1.2 Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 200 Hz 17

5.1.3. Promjena frekvencije pri konstantnom faktoru vođenja od 80% 19

5.1.4. Valni oblici napona i struje pretvaračkih komponenata 21

5.2. Mjerenja na prigušnici od 300 namota bez zračnog raspora 22

5.2.1. Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 50 Hz 23

5.2.2. Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 200 Hz 24

5.2.3. Promjena frekvencije pri konstantnom faktoru vođenja od 85% 26

5.3. Mjerenja na prigušnici od 900 namota sa zračnim rasporom 28

5.4. Mjerenja na prigušnici od 300 namota sa zračnim rasporom 32

ZAKLJUČAK **35**

LITERATURA **37**

SAŽETAK **38**

ABSTRACT **39**

ŽIVOTOPIS **40**

PRILOZI **41**

PRILOG 1: TESTIRANJE STRUJNOG OGRANIČENJA **41**

1. UVOD

Lucas-Nulle tvrtka je specijalizirana za proizvodnju obrazovnih sustava, specifično onih koji se koriste u području elektronike, elektrotehnike, telekomunikacija i automatizacije [1]. Jedan od primjera Lucas-Nulle obrazovne opreme je UniTrain sustav, pogodan za korištenje u području elektrotehnike i elektronike. Sastoji se od praktičnih eksperimenata i digitalnog materijala za obuku. UniTrain omogućava pristup više od 140 različitih tečajeva, time UniTrain pokriva širok spektar tehnologije.

Obzirom na iznos stvorene izmjenične snage tokom procesa pretvorbe razlikujemo izravne istosmjerne pretvarače i neizravne istosmjerne pretvarače, [2]. U ovome završnom radu promatra se utjecaj promjene induktivnosti prigušnice uzlaznog istosmjernog pretvarača napona koristeći Lucas-Nulle eksperimentalnu karticu, odnosno za eksperimentalne kartice uzlaznog pretvarača LNCO4205-1K, mijenjanjem zračnog raspora jezgre prigušnice snimaju se karakteristični valni oblici, te se identificira režim rada.

Kroz vježbe će se napraviti analiza rada jednokvadratnog uzlaznog istosmjernog pretvarača napona, te provesti mjerenja koja prikazuju utjecaj promjene širine zračnog raspora na induktivnost prigušnice. Također će se ispitati valni oblici napona i struje prigušnice te može li eksperimentalni pretvarač raditi u kontinuiranom režimu rada s većim sklopnim frekvencijama

1.1 Zadatak završnog rada

Za eksperimentalnu karticu uzlaznog pretvarača mijenjati induktivnost prigušnice, mijenjanjem zračnog raspora jezgre prigušnice. Snimati karakteristične valne oblike i identificirati režim rada, te podići frekvenciju rada u područje kilo Herca

2. PREGLED PODRUČJA RADA

U knjizi [2] Ivana Flegara temeljito je objašnjena analiza rada istosmjernih pretvarača napona u kontinuiranom i diskontinuiranom načinu rada na temelju prikaza valnih oblika i izraza dobivenih iu Kirchhoffovih zakona. Opisana su opća svojstva istosmjernih pretvarača napona te su prikazani karakteristični valni oblici napona i struje.

U skripti [3] čiji je autor M. Vukšić temeljno je objašnjena podjela i analiza istosmjernih pretvarača napona.

U svojoj knjizi [4] I. Flegar rješavanjem zadataka iz poglavlja istosmjernih pretvarača pobliže objašnjava isklapanje i komutaciju ventila te rješava različite sheme spoja.

M. K. Kazimierczuk [5] se u svojoj knjizi bavi upravljanjem istosmjernim pretvaračima napona pomoću pulsno-širinskog moduliranog signala, te o ulogama naponske i strujne povratne veze. U prvom dijelu knjige bavi se topologijama pretvarača bez transformatora i izoliranim pulsno-širinski moduliranim pretvaračima, kao što su silazni i uzlazni istosmjerni pretvarači napona, dok se u drugom dijelu knjige izvodi prijenosne funkcije pulsno-širinski moduliranih pretvarača, upravljanjem naponskim načinom rada te upravljanjem strujnim načinom rada puolsno-širinski moduliranih pretvarača.

U knjizi [6], E. A. Abdullah bavi se karakteristikama ventila pri visokim frekvencijama i velikim snagama koje se koriste u energetskoj elektronici. Analizom je zapaženo da se gubici na MOSFET-u mogu svesti na minimum odabirom odgovarajućeg otpora na upravljačkoj elektrodi.

U knjizi [7] K. Eguchi i F. Asadi govore o upravljanju istosmjernim pretvaračima. Objašnjena je uloga povratne veze te simuliraju rad pomoću programa MATLAB. Zaključuje se da se određneni problemi u radu pretvarača mogu spriječiti time da se ispravnost dizajna upravljačkog kruga ispita simulacijom.

S. Maniktala u svojoj knjizi [8] opisuje moguće nepravilnosti pri dizajniranju energetskih pretvarača. Praktičnom primjenom prikazuje nastanke grešaka te kako ih preventirati.

U svome radu [9], M. Biswal i S. Sabyasachi analiziraju suvremeni napredak istosmjernih pretvarača. Prema njihovom istraživanju, glavni ciljevi razvoja ovih uređaja u skladu s današnjim potrebama su

postizanje visoke učinkovitosti, značajnog pojačanja i brzog odziva. Autori ističu kako su istraživači fokusirani na razvoj pretvarača male snage. Proces razvoja takvih pretvarača ovisi o mnogim parametrima, zbog čega se kontinuirano unaprijeđuju razni računalni softveri za njihovo dizajniranje. Radom su predstavljeni novi tipovi pretvarača, zajedno s predloženim metodama upravljanja koje mogu biti od pomoći istraživačima. Simulacije su izvedene pomoću MATLAB-a i PSIM-a.

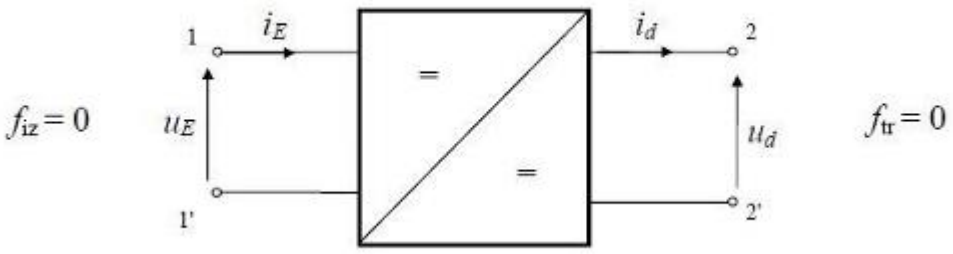
Mogućnost rada s Lucas Nuelle didaktičko-multimedijalnom opremom podrazumijeva usavršavanje znanja pomoću *UniTrain* sustava [10].

3. IZRAVNI ISTOSMJERNI PRETVARAČI NAPONA

Istosmjerni pretvarači energetski su sklopovi koji pretvaraju ulazni istosmjerni napon jedne vrijednosti u izlazni istosmjerni napon različite vrijednosti, koja može biti veća ili manja u odnosu na ulazni napon. Istosmjerni pretvarači se s obzirom na trenutne vrijednosti napona i struja dijele se na [2]:

- jednokvadratne istosmjerne pretvarače,
- dvokvadratne istosmjerne pretvarače,
- četverokvadratne istosmjerne pretvarače.

U ovom radu bavit će se jednokvadratnim izravnim istosmjernim pretvaračima, odnosno uzlaznim istosmjernim pretvaračem napona.



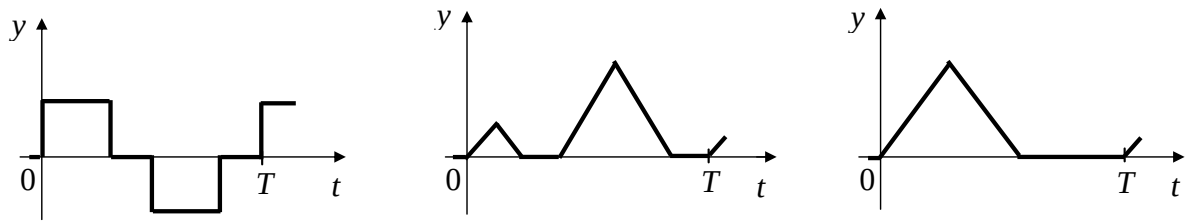
Slika 3.1. Simbol istosmjernog pretvarača i referentni smjerovi struja napona na prilazima

Sukladno slici 3.1. prema [2] na prilazu 1 priključena je istosmjerna pojna mreža napona u_E i struje i_E, dok je na prilazu 2 priključeno istosmjerno trošilo napona u_d i struje i_d. Analizom rada pretpostavlja se da je ulazna snaga jednaka izlaznoj snazi.

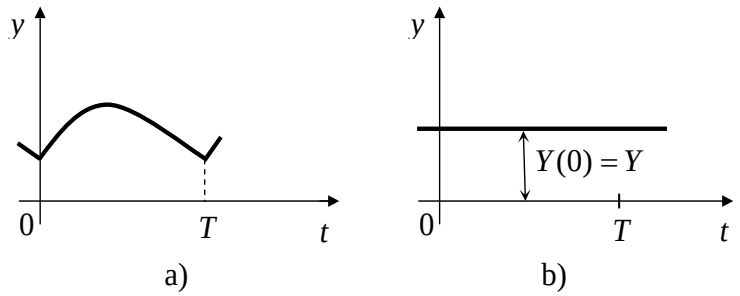
U ovisnosti o valnom obliku struje prigušnice razlikuju se dva načina rada istosmjernih pretvarača napona:

- diskontinuirani način rada,
- kontinuirani način rada.

Valni oblik je diskontinuiran kada unutar periode T postoji barem jedan interval u komu je vrijednost varijable mreže jednaka nuli, slika 3.2. [2], suprotno tome valni oblik je kontinuiran kada unutar sklopne periode T varijabla mreže nikada neće biti jednaka nuli, slika 3.3. [2].



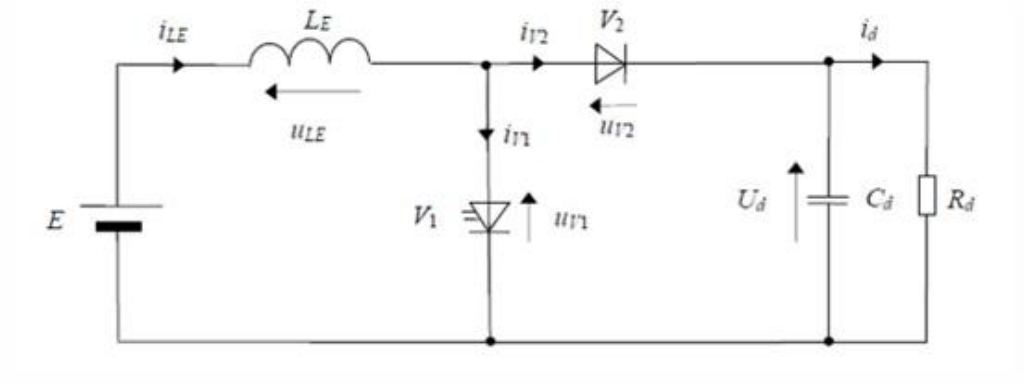
Slika 3.2. Tipični diskontinuirani valni oblici



Slika 3.3. a) primjer jednosmjerno kontinuiranog valnog oblika; b) Glatki valni oblik

3.1 Analiza rada uzlaznog istosmjernog pretvarača napona

Uzlazni istosmjerni pretvarači napona spoj su između strujnog izvora, okarakteriziranog kao serijski spoj istosmjernog naponskog izvora i prigušnice i naponskog uvora glatkog napona $u_d = U_d$. Uzlazni istosmjerni pretvarači koriste se kako bi se na izlazu dobio veći napon u odnosu na ulazni napon, također se koriste za napajanje elektroničkih sklopova, time trošilo smatra pasivnim i kapacitivnim s vremenskom konstantom $\frac{R_d}{C_d} \gg T_s$ [2]. Sklopka V1 realizirana je upravljivim ventilom, dok je sklopka V2 realizirana idealnom diodom te one rade protutaktno.



Slika 3.4. Nadomjesna shema uzlaznog istosmjernog pretvarača napona

Iz sheme spoja na slici 3.4. mogu se izraziti jednadžbe Kirchhoffovih zakona za struje i napone u mreži:

$$E = u_{LE} + u_{V1} \tag{3-1}$$

$$u_{V1} = u_{V2} + U_d \tag{3-2}$$

$$i_{LE} = i_{V1} + i_{V2} \tag{3-3}$$

3.1.1. Kontinuirani način rada

U kontinuiranom načinu rada razmatrat će se slučajevi kada zasebno vodi upravljivi ventil V1 i kada zasebno vodi idealna dioda V2. Budući da je struja u kontinuiranom načinu rada uvijek veća od nule, u analizi rada razmatrat će se dva intervala rada:

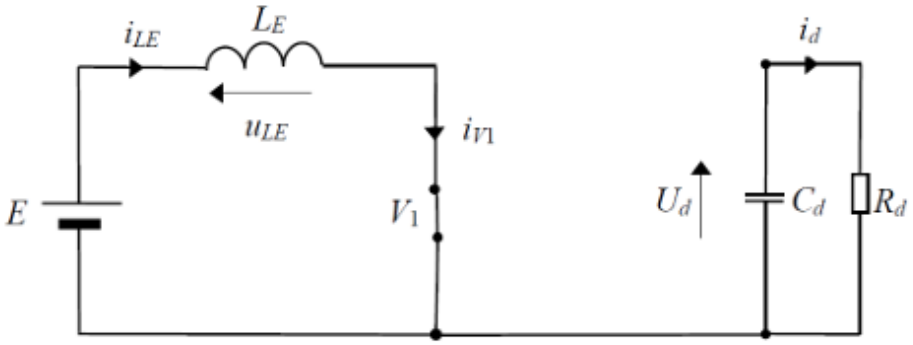
- interval A, vodi upravljivi ventil V1, slika 4.2.
- interval B, vodi idealna dioda V2, slika 4.3.

Interval A

Pretpostavljamo da u vremenskom intervalu [0,αT_s] vodi upravljivi ventil V1, a ne vodi idealna dioda V2, slika 3.5., tada je napon $u_{V1} = 0$ i struja $i_{V2} = 0$.

Gdje je α faktor vođenja, definiran kao omjer trajanja vođenja upravljivog ventila T_{V1} i sklopne periode T_s:

$$\alpha = \frac{T_{V1}}{T_s} \tag{3-4}$$



Slika 3.5. Nadomjesna shema uzlaznog pretvarača u interval A

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u (3-1) primjećuje se da je napon induktiviteta L_E jednak naponu izvora E [2]:

$$E = u_{LE} = L_E \frac{di_{LE}}{dt} \tag{3-5}$$

time se zaključuje da struja induktiviteta raste linearno jer je na induktivitet narinut konstantan pozitivan napon.

Integriranjem jednadžbe (3-4) dobiva se struja induktiviteta i_{LE} [2]:

$$i_{LE} = \frac{E}{L_E} t + i_{LE}(0) \tag{3-6}$$

struja induktiviteta u trenutku nula je konstantna, a $i_{LE}(0) = I_0$ označava početnu vrijednost struje induktiviteta. Pošto je struja idealne diode V2 u prvom interval jednaka nuli, uvrštavanjem poznatih vrijednosti u (3-3) dobiva se struja upravljivog ventila V1:

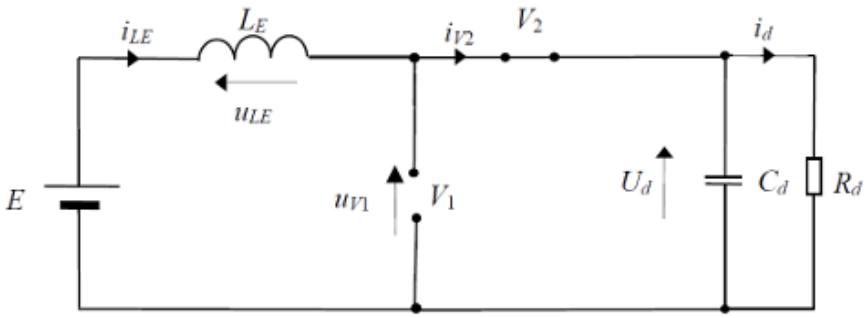
$$i_{LE} = i_{V1} \tag{3-7}$$

Poznavanjem vrijednosti napona na upravljivom ventilu V1, iz jednadžbe (3-2) može se odrediti napon idealne diodeV2:

$$u_{V2} = -U_d \tag{3-8}$$

Interval B

U drugom intervalu $[\alpha T_s, T_s]$ vodi idealna diode V2, a ne vodi upravljivi ventil V1, slika 3.6., iz toga proizlazi da je napon $u_{V2} = 0$ i struja $i_{V1} = 0$.



Slika 3.6. Nadomjesna shema uzlaznog pretvarača u intervalu B

Uvrštavanjem poznatih vrijednosti u jednadžbe (3-1) i (3-2) zaključuje se da se induktivitet ponaša kao izvor:

$$u_{LE} = E - U_d \rightarrow \; L_E \frac{di_{LE}}{dt} = E - U_d \tag{3-9}$$

integriranjem jednadžbe (3-8) dobije se izraz struje induktiviteta:

$$i_{LE} = \frac{E - U_d}{L_E}(\tau - \alpha T_s) + i_{LE}\,(\alpha T_s) \tag{3-10}$$

gdje je $i_{LE}(\alpha T_s) = I_1$ početna vrijednost struje induktiviteta intervala B.

Na temelju poznatih vrijednosti napona idealne diodeV2 i struje upravljivog ventila V1 pomoću jednadžbi (3-2) i (3-3) mogu se odrediti $u_{V1} = U_d$ i $i_{LE} = i_{V2}$. Prema [2] za vrijeme vođenja ventila V2 Kirchhoffove jednadžbe glase:

$$E = U_{V2}(0) + U_d \tag{3-11}$$

$$E = U_{V1}(0) \tag{3-12}$$

iz valnog oblika napona upravljivog ventila V1 dobiva se:

$$U_{V1}(0) = \frac{T_{V2}}{T_s} U_d \rightarrow U_d = \frac{T_s}{T_{V2}} E \tag{3-13}$$

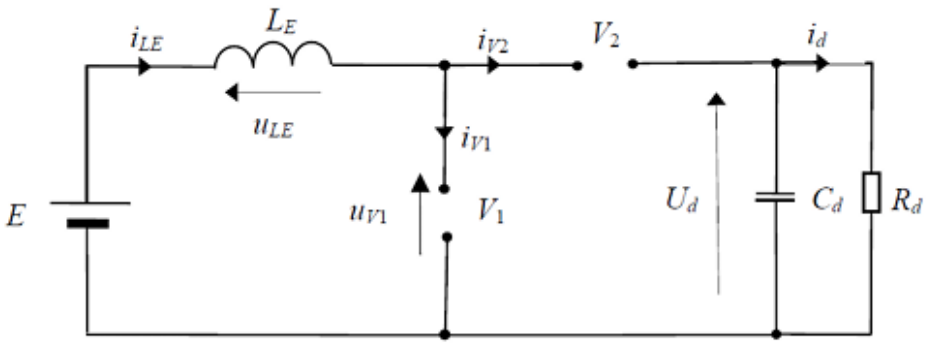
Ako se u obzir uzme faktor vođenja upravljivog ventila V1, dobiva se da je $T_{V2} = (1 - \alpha)T_s$, pri tome je upravljačka karakteristika dana izrazom [2]:

$$U_d = \frac{E}{1-\alpha} \tag{3-14}$$

3.1.2. Diskontinuirani način rada

U diskontinuiranom načinu rada postoje tri intervala rada unutar sklopne periode T_s. U intervalu A i intervalu B, pretvarač radi kao i u kontinuiranom načinu rada, jedina razlika koja se javlja u analizi rada je ta da struja idealne diodeV2 padne na nulu prije nego ponovo provede upravljivi ventil V1. Zato se u analizi diskonitnuiranog načina rada promatra još i treći interval.

Interval C



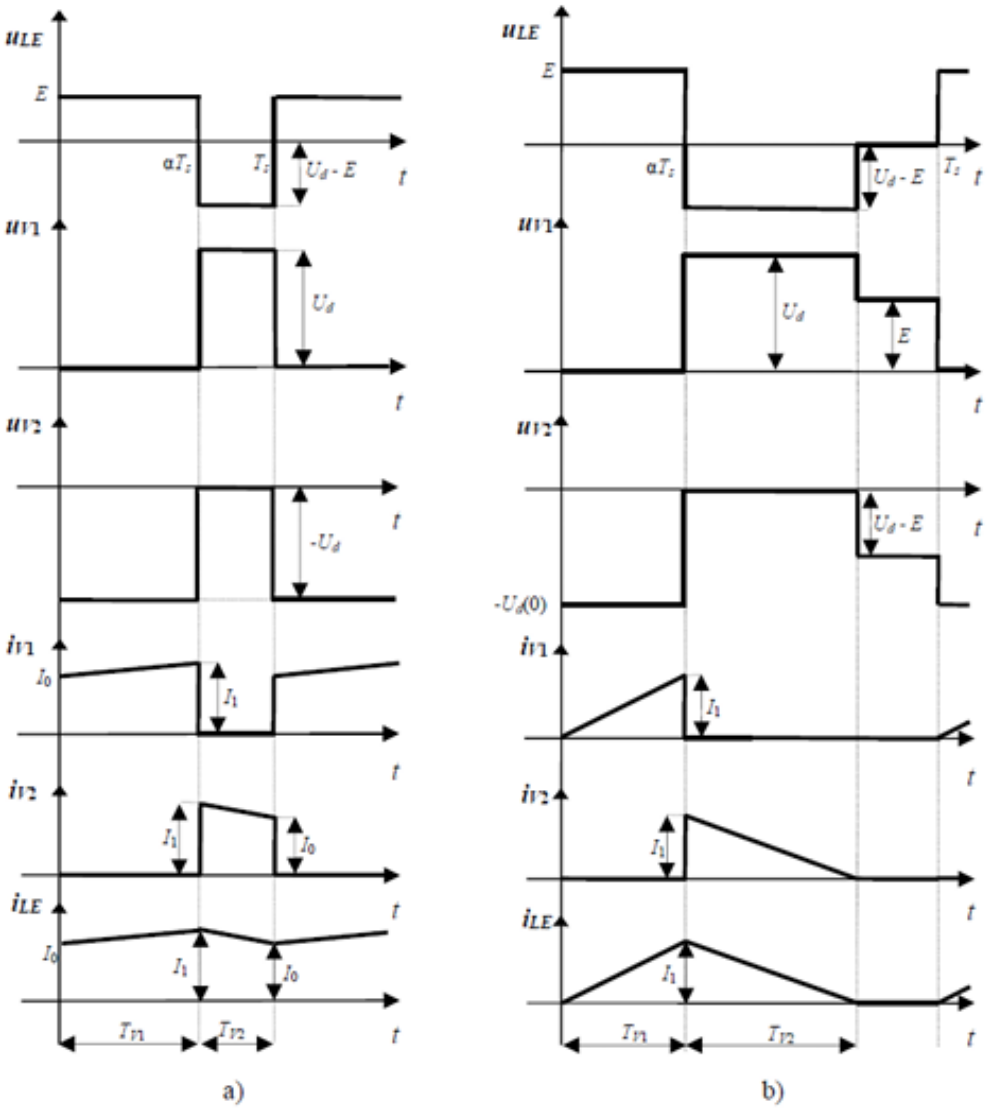
Slika 3.7. Nadomjesna shema uzlaznog pretvarača u interval C

U intervalu C ne vode niti upravljivi ventil V1 niti idealna dioda V2, zbog čega su napon i struja induktiviteta jednaki nuli, a zbog protjecanja struje i_d pada napon kapaciteta. Prema [2] srednja vrijednost struje izvora veća je od struje trošila, što je dano s:

$$I_E(0) = \frac{E}{\tilde{R}_{uz}} + I_d(0) \tag{3-15}$$

Izraz $\tilde{R}_{uz} = \frac{2L_E}{\alpha^2 T_s}$ [2] je faktor koji se naziva izmjenični otpor uzlaznog istosmjernog pretvarača u diskontinuiranom načinu rada. Određivanjem upravljačke karakteristike u diskontinuiranom načinu rada srednja vrijednost struje iznosi:

$$I_E(0) = \frac{1}{2}\Delta i_e \cdot \frac{T_{V1}+T_{V2}}{T_s} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E\alpha T_s}{L_E} \cdot \frac{T_{V1}+T_{V2}}{T_s} \tag{3-16}$$



Slika 3.8. Karakteristični valni oblici uzlaznog istosmjernog pretvarača

a) kontinuirani način rada, b) diskontinuirani način rada

4. DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNA OPREMA LUCAS NUELLE

Lucas Nuelle grupa ima u cilju razvijati obrazovanje tehničko-industrijskog područja, te proizvodi asortiman razvrstan po tematskim područjima. Sama oprema sadrži kućište s mogućnošću nadogradnje različitim eksperimentalnim pločicama koje su povezane s računalom preko računalnog programa *LabSoft* [10] koji nudi velik izbor virtualnih mjernih instrumenata te izvora električne energije potrebnih za uspješno obavljanje vježbi. *UniTrain* [11] sustav sadrži teoretski dio koji olakšava korištenje programa, također sadrži virtualne mjerne instrumente te vrši mjerenja.

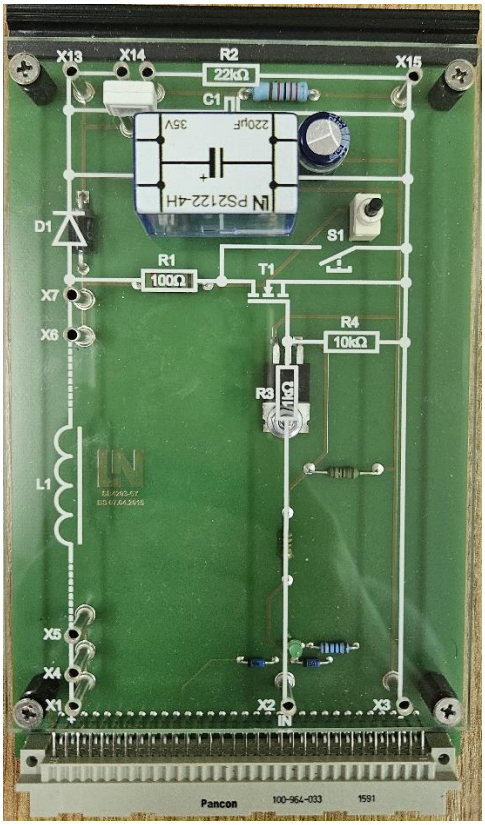
4.1. Opis opreme

UniTrain multimedijski tečajevi iz energetske elektronike koriste razne slike, pokuse, sheme te animacije kako bi objasnili funkciju različitih pretvarača. Tečaj je napravljen na način da osim što nudi velik broj eksperimenata potkrijepljenih teorijskom podlogom, sadrži i mogućnost provjere usvojenog znanja pomoću niza pitanja i interaktivnog sadržaja koje daje povratne informacije korisniku. Praktičnost sustava je ta da se vježbe mogu odraditi pomoću računalnog programa *LabSoft* i Lucas Nuelle opreme koja sadrži UniTrain sustav, eksperimentalne kartice, sučelje s pripadnim eksperimentatorom te pribor za spajanje. Računalni program LabSoft i UniTrain sučelje komuniciraju pomoću USB konekcije.

4.2. Eksperimentalna kartica LNCO4205-1K

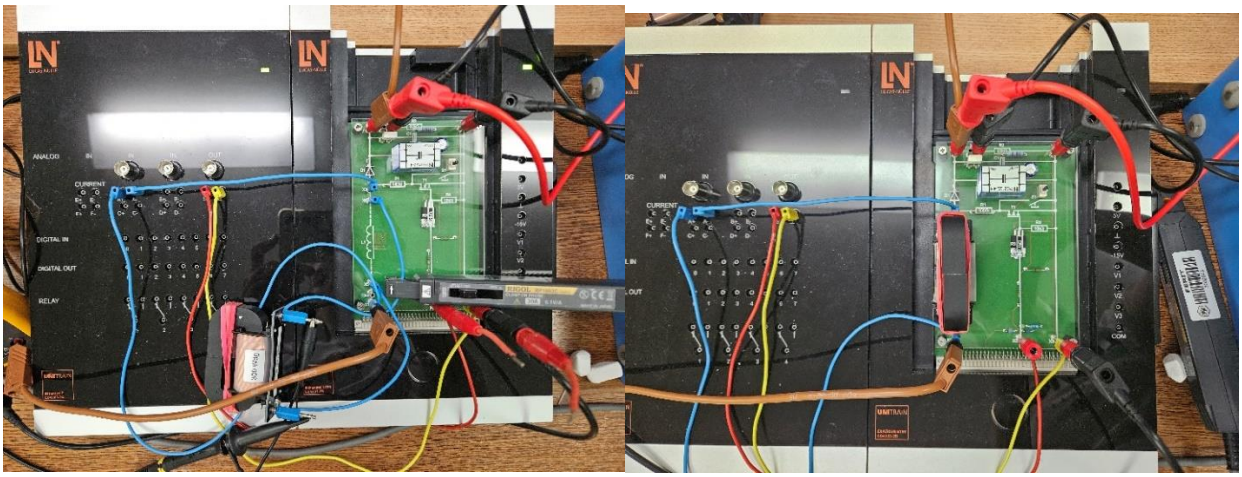
Eksperimentalna kartica uzlaznog istosmjernog pretvarača napona pretvara niski istosmjerni ulazni napon u visoki istosmjerni izlazni napon. Eksperimentalna kartica je dimenzija 100 x 170 mm, a sadrži komponente:

- sklop za istosmjernu pretvorbu,
- upravljački sustav s LED indikatorom,
- tipkalo,
- konektori za prigušnicu,
- konektori za kondenzator,
- konektori za spajanje komponenti.



Slika 4.1. Eksperimentalna kartica uzlaznog pretvarača napona

Pri provedbi eksperimenata uočeni su nedostatci eksperimentalne kartice. Naime nije moguće odrediti valni oblik struje i napona na prigušnici kada je ista umetnuta u karticu. Kada je prigušnica direktno spojena na karticu moguće je odrediti jedino valni oblik napona na prigušnici, da bi se odredio valni oblik struje potrebno je izvaditi prigušnicu iz kartice. Također je uočeno da je izlazna struja reda mili-ampera, što značajno otežava mjerenja zbog osjetljivotsti standardne mjerne laboratorijske opreme. U prilogu 1, prikazana su mjerenja koja upućuju da eksperimentalna kartica ima softverski ugrađeno strujno ogreničenje ulazne struje na oko 3 mA. Ovaj podatak nije naveden u uputama za provođenje vježbi i proizvođač ga je vjerojatno uveo radi sigurnosti mjerenja i korištenja opreme.



a) b)

Slika 4.2. a) prigušnica izvađena iz eksperimentalne kartice
b) prigušnica spojena na eksperimentalnu karticu

5. MJERENJA NA KARTICI UZLAZNOG PRETVARAČA

Cilj provođenja ovoga pokusa je provjeriti pri kojim uvjetima eksperimentalna kartica uzlaznog pretvarača može raditi u kontinuiranom načinu rada u kilo-hertznom području pri promjeni induktivnosti promjenom broja namotaja te pri promjeni zračnog raspora prigušnice koristeći Lucas Nuelle eksperimentalnu karticu uzlaznog pretvarača napona. Pri provedbi pokusa koriste se četiri različite prigušnice. Prigušnica od 900 namotaja, prigušnica od 300 namotaja, prigušnica od 900 namotaja sa zračnim rasporom te prigušnica od 300 namotaja sa zračnim rasporom, svaka sa magnetskom jezgrom koja se nalazi oko prigušnice koja je učvršćena gumicom.

Slika 5.1. prigušnice korištene u pokusima

5.1. Mjerenja na prigušnici od 900 namota bez zračnog raspora

Mjerenja se provode u tri radne točke. Za svaku radnu točku određuju se bitne veličine vezane za rad istosmjernog pretvarača, te valni oblici napona i struje prigušnice. Mjerenja se provode tako da se pri konstantnoj frekvenciji 50 Hz povećava faktor vođenja α [2], zatim se frekvencija poveća na 200 Hz te se također mijenja faktor vođenja. Treće mjerenje se provodi tako što se pri konstantnom

faktoru vođenja postupno povećava frekvencija te se za svako mjerenje promatra kada će istosmjerni pretvarač napona biti u kontinuiranom režimu rada.

5.1.1. Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 50 Hz

Provedenim mjerenjem se utvrđuje pri kojem faktoru vođenja će uzlazni istosmjerni pretvarač napona prijeći iz diskontinuiranog režima u kontinuirani režim rada pri frekvenciji od 50 Hz i ulaznom naponu 5 V. Frekvencija i faktor vođenja podese se pomoću generatora impulsa koji je u sklopu računalne opreme *LabSoft.* Rezultati mjerenja dani su tablicom:

Tablica 5.1. Faktor vođenja u ovisnosti o režimu rada za $f_s = 50\ Hz$ i $E = 5V$

Faktor vođenja / Vrijednosti	$\alpha_1 = 60\%$	$\alpha_2 = 70\%$	$\alpha_3 = 72\%$	$\alpha_4 = 80\%$
$U_d(0)[V]$	12,88	14,93	15,67	20,84
$U_d(0)[V]$ (proračun)			17,71	24,8
$I_d(0)[mA]$	0,59	0,68	0,71	0,95
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	1,53	2,05	2,38	3,99
Režim rada	Diskontinuirani	Diskontinuirani	Kontinuirani (granični)	Kontinuirani

Kao što se može primjetiti izmjereni izlazni napon ne odgovara idealnom izlaznom naponu $U_d(0)$ danog prema formuli (3-14) koji vrijedi samo za kontinuirani režim rada, zato u tablici nema podataka za srednju vrijednost izlaznog napona u diskontinuiranom režimu rada. Izmjereni izlazni napon manji je od idealnog zbog toga što uvedene pretpostavke o idealnosti modela pretvaračkih komponenti ne vrijede za energetske pretvaračke komponente. Izlazna struja također je jako mala ukoliko se usporedi s ulaznom strujom koja je dobivena računski, tj. ulazna struja je procijenjena. Ulazna struja računski

se dobiva prema jednakosti ulazne i izlazne snage te ona podrazumijeva idealne elemente, odnosno dobivena je na osnovu modela koji je opisan idealnim elementima. Ulaznu struja računa se prema:

$$P_{ul}(0) = P_{izl}(0) \tag{5-1}$$

$$E \cdot I_E(0) = U_d(0) \cdot I_d(0) \tag{5-2}$$

$$I_E(0) = \frac{U_d(0) \cdot I_d(0)}{E} \tag{5-3}$$

Zasivljeni redovi tablice izračunati su na osovu izreza (3-14) i (5-3).

Kako bi se na graničnom slučaju procijenila induktivnost zavojnice potrebno je odrediti valovitost struje Δi_L:

$$I_E(0) = \frac{\Delta i_L}{2} \tag{5-4}$$

Pomoću dobivenih vrijednosti može se procijeniti induktivnost prigušnice L_E u graničnom slučaju:

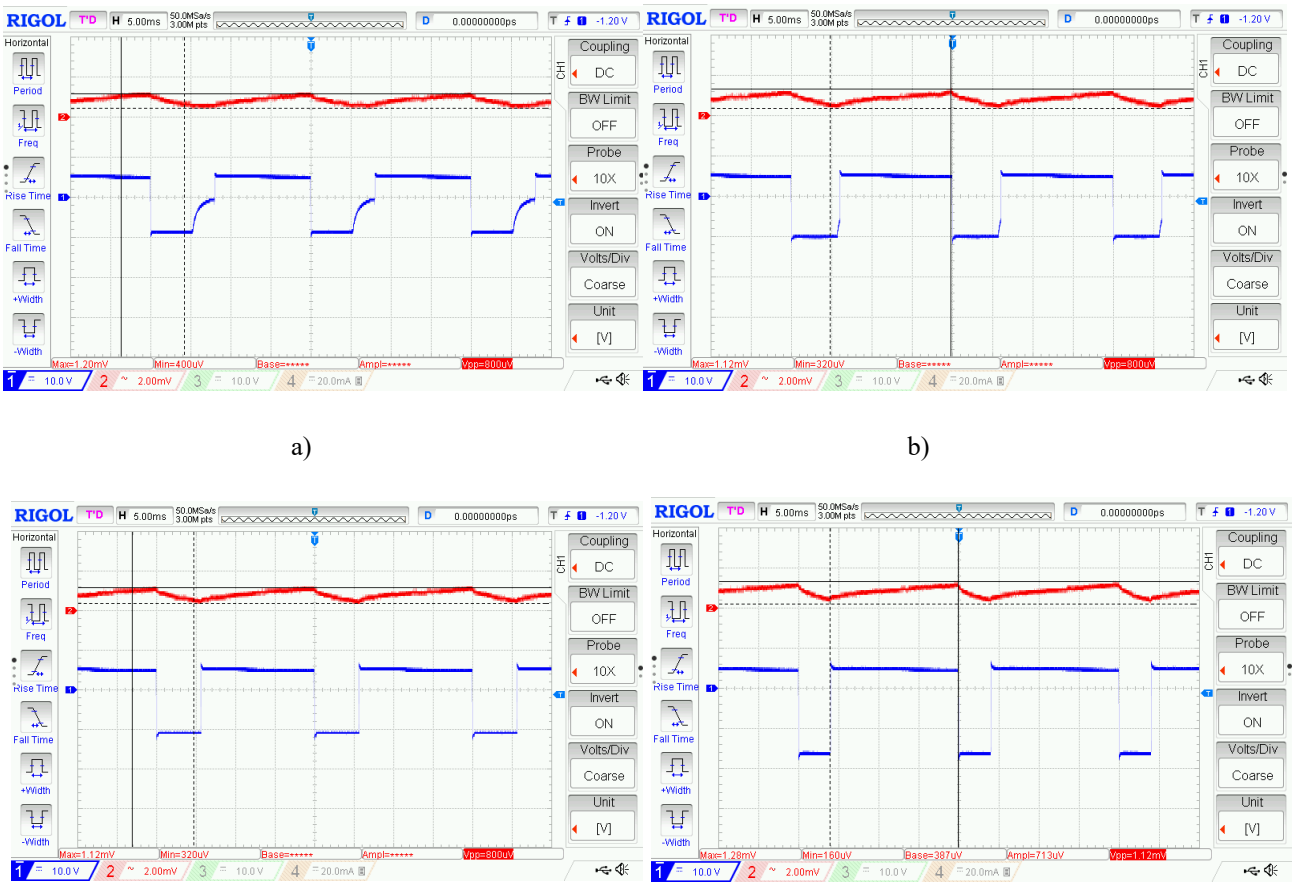
$$L_E = \frac{(E - U_R)\alpha}{f_s \cdot \Delta i_L} \tag{5-5}$$

$$L_E = \frac{\left(4{,}96 - 71 \cdot 10^{-3}\right) * 0{,}72}{50 * 4{,}76 \cdot 10^{-3}} = 14{,}79\ H$$

Zbog razlike u rezultatima između izmjerenog i računski dobivenog izlaznog napona moguće je odrediti odstupanje dobivenog izlaznog napona od očekivanog:

$$\left| \frac{U_{d\ oč} - U_{d\ dob}}{U_{d\ oč}} \right| * 100\% \tag{5-6}$$

Za faktor prigušenja $\alpha = 72\%$ pogreška iznosi 11,52%, dok za $\alpha = 80\%$ pogreška iznosi 15,97% za što je posljedica toga što se pretvarač sastoji od realnih komponenti te se zbog toga pretpostavlja da će postojati gubici, a očekivane vrijednosti su dobivene u idealnim uvjetima pri kojima nema gubitaka. Također se može primjetiti da zbog softverskog ograničenja izlaznog napona pri većim faktorima vođenja veća je i pogreška, tj. odstupanje je izraženo. Odnosno vrijedi da se povećanjem faktora vođenja povećava odstupanje izlaznog napona.



Slika 5.2. Valni oblici napona i struje prigušnice pri f=50 Hz

a) diskontinuirani režim pri $\alpha = 60\%$, b) diskontinuirani režim pri $\alpha = 70\%$,
c) kontinuirani (granični slučaj) režim pri $\alpha = 72\%$, d) kontinuirani režim pri $\alpha = 80\%$

Uspoređivajući dobivene valne oblike mjerenja s onima dobivenim analitički, slika 3.8, uočava se da napon u kontinuiranom režimu rada odgvara analiziranom. Odstupanja su uočena u diskontinuiranom režimu rada za valni oblik napona, gdje se za vrijeme intervala C napon ne mijenja trenutno, već je uočen eksponencijalni porast negativnog napona. Ovo, kao i mala valovitost struje ukazuje na veliku induktivnost prigušnice, a što odgovara procjeni prema izrazu (5-5).

5.1.2 Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 200 Hz

Cilj mjerenja je prikazati kako će se povećanjem frekvencije sa 50 na 200 Hz mijenjati granica između kontinuiranog i diskontinuiranog režima rada.

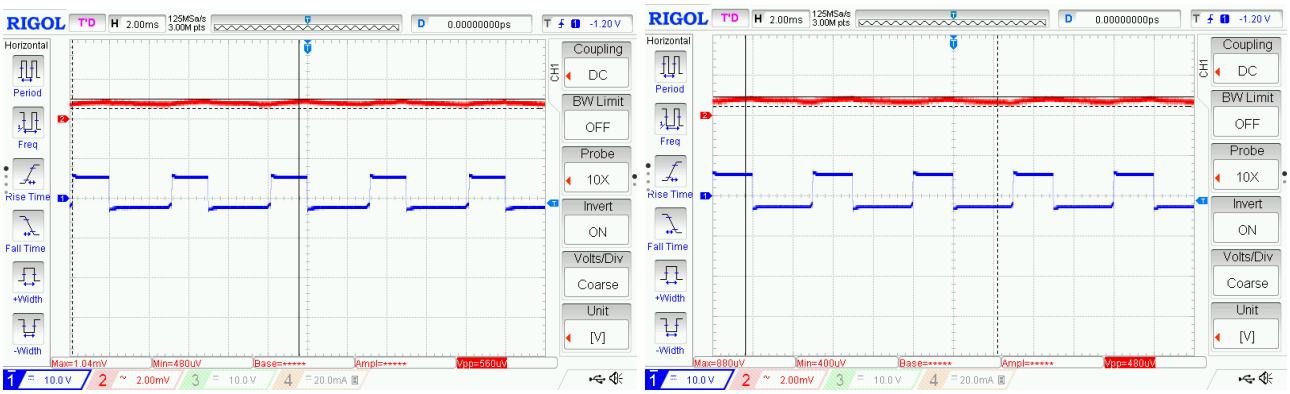
Tablica 5.2. Faktor vođenja u ovisnosti o režimu rada za $f_s = 200\ Hz$ i $E = 5V$

Faktor vođenja / vrijednosti	$\alpha_1 = 37\%$	$\alpha_2 = 40\%$	$\alpha_3 = 50\%$	$\alpha_4 = 60\%$
$U_d(0)[V]$	7,30	7,68	9,16	11,44
$U_d(0)[V]$ (proračun)	7,87	8,27	9,92	12,4
$I_d(0)[mA]$	0,33	0,35	0,42	0,52
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	0,486	0,54	0,776	1,2
Režim rada	Kontinuirani (granični)	Kontinuirani	Kontinuirani	Kontinuirani

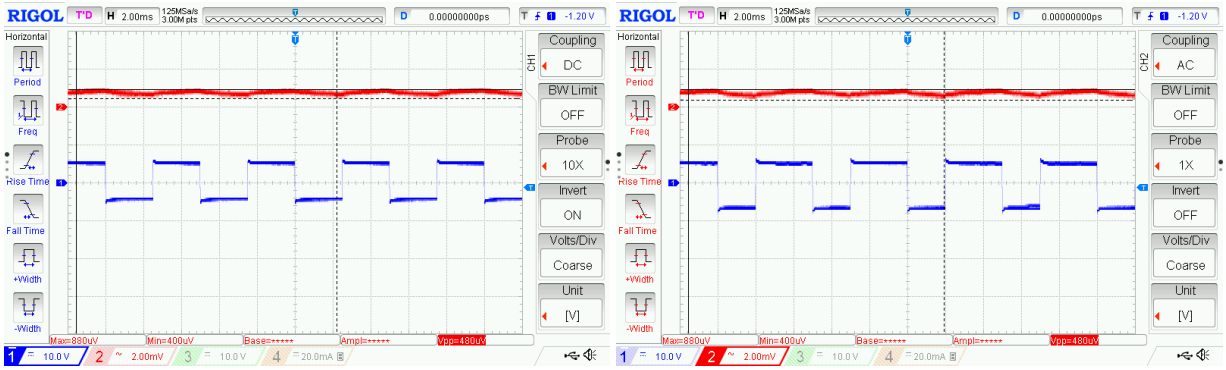
Izmjereni izlazni napon razlikuje se od idealnog izlaznog napona, a izlazna struja je i dalje reda mili-ampera. Ulazna struja dobije se računski po formuli (5-3), induktivnost se također može procijeniti pri graničnom slučaju prema formuli (5-5) te iznos:

$$L_E = 9{,}38\ H$$

Pri graničnom slučaju, odnosno kada je faktor vođenja $\alpha = 37\%$ moguće je odrediti odstupanje idealnog i izmjerenog izlaznog napona formulom (5-6) te ono iznosi 7,24%. Dok za faktor vođenja $\alpha = 60\%$ odstupanje iznosi 7,74%.



a) b)



b) d)

Slika 5.3. Valni oblici napona i struje prigušnice pri f=200 Hz

a) kontinuirani (granični slučaj) režim pri $\alpha = 32\%$, b) kontinuirani režim pri $\alpha = 40\%$, c) kontinuirani režim pri $\alpha = 50\%$, d) kontinuirani režim pri $\alpha = 60\%$

Povećanjem frekvencije uz nepromijenjene ostale parameter pretvarača smanjuje se valovitost struje, te pretvarač tijekom cijelog područja promjene frekvencije ostaje u kontinuiranom režimu rada.

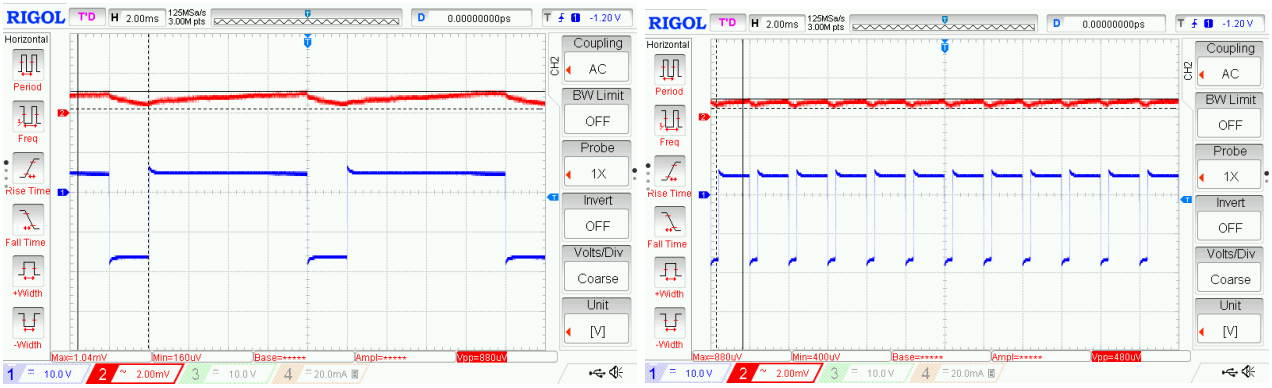
5.1.3. Promjena frekvencije pri konstantnom faktoru vođenja od 80%

Mjerenjem se pokazuje kako povećanje frekvencije pri konstantnom faktoru vođenja pretvarač može raditi u kontinuiranom režimu rada i za veće sklopne frekvencije, tj. da može raditi u kilo-herznom području. Također, na osnovu ovih mjerenja preporučuje se odabir faktora vođenja koji jamči kontinuirani režim rada s odabranom prigušnicom, pri povećanju sklopne frekvencije.

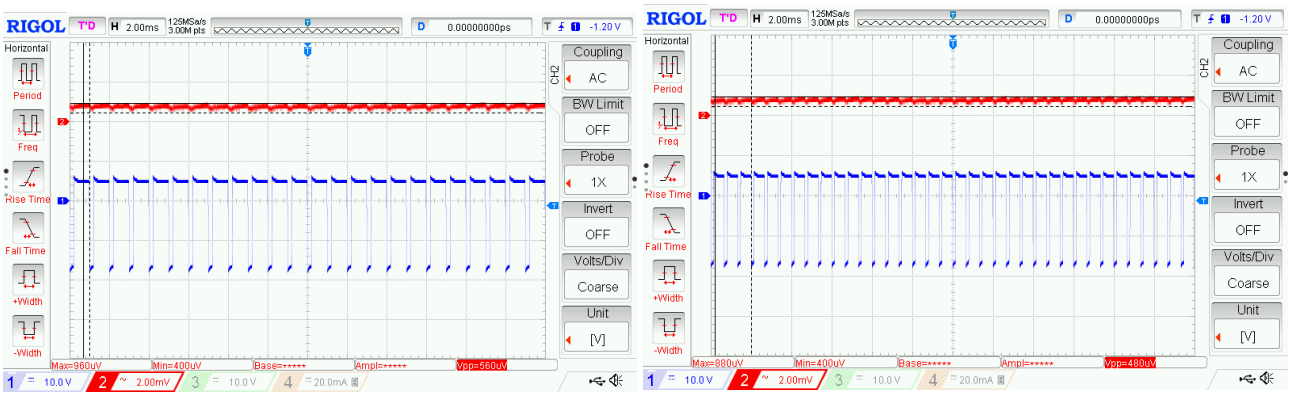
Tablica 5.3. Sklopna frekvencija u ovisnosti o režimu rada za $\alpha = 80\%$ i $E = 5V$

Frekvencija / Vrijednosti	$f_1 = 100Hz$	$f_2 = 500Hz$	$f_3 = 1000Hz$	$f_4 = 1500Hz$
$U_d(0)[V]$	21,01	21,07	20,88	20,61
$U_d(0)[V]$ (proračun)	24,8	24,8	24,8	24,8
$I_d(0)[mA]$	0,96	0,96	0,95	0,94
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	4,07	4,078	3,999	3,91
Režim rada	kontinuirani	kontinuirani	kontinuirani	kontinuirani

Prema rezultatima u tablici može se primjetiti kako se pri povećanju frekvencije smanjuje izlazni napon, a izlazna struja ostaje skoro pa ne promijenjena, ovo ukazuje na proradu softverskog ograničenja identificiciranog mjerenjima u prilogu 1. Ulazna struja se također računski odredi prema formuli (5-3). Odstupanje izlaznog napona se povećava povećanjem sklopne frekvencije, odnosno pri frekvenciji 100 Hz odstupanje iznosi 15,28% dok za frekvenciju 1500 Hz odstupanje iznosi 16,9%.



a) b)



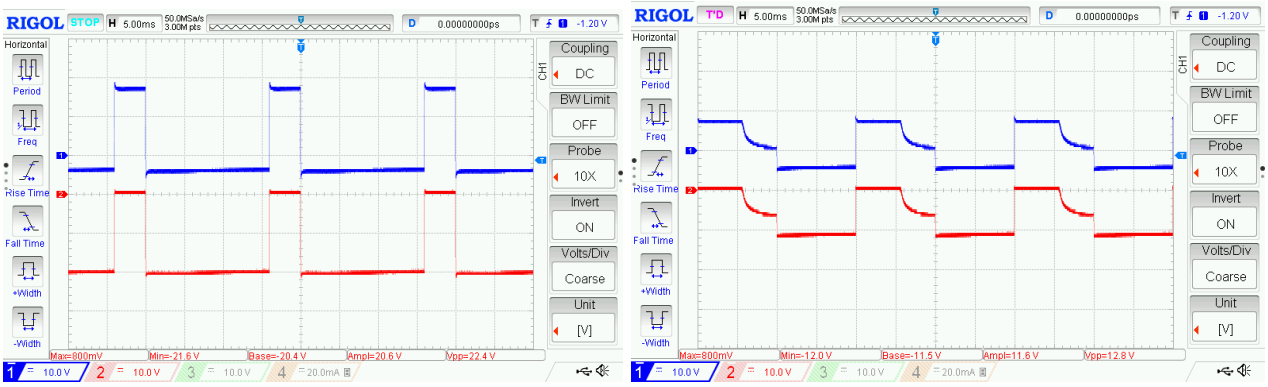
c) d)

Slika 5.4. valni oblici napona i struje prigušnice pri faktoru vođenja $\alpha = 80\%$ i frekvenciji:

a) *f=100 Hz*, b) *f=500 Hz*, c) *f=1000 Hz*, d) *f=1500 Hz*

5.1.4. Valni oblici napona i struje pretvaračkih komponenata

Kako bi se dodatno pojasnio rad uzlaznog istosmjernog pretvarača napona potrebno je prikazati valne oblike pojedinih pretvaračkih komponenata u kontinuiranom, odnosno diskontinuiranom režimu rada.



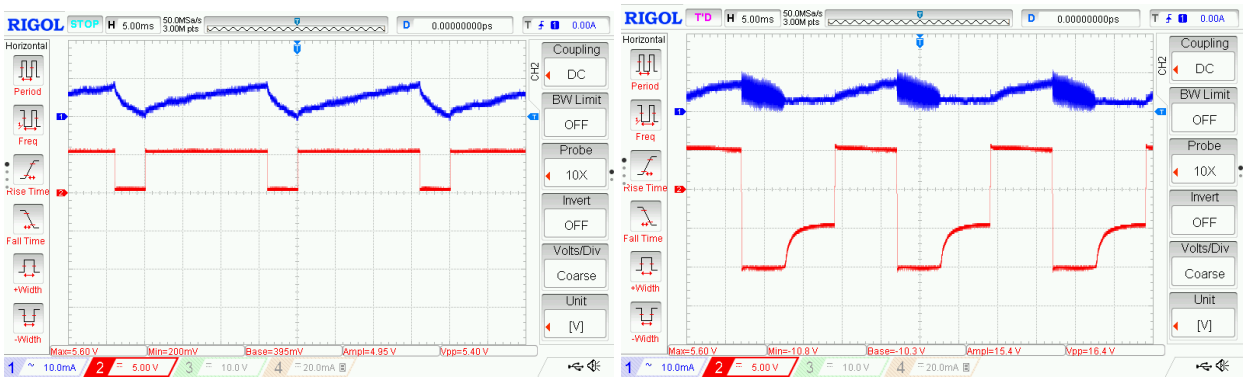
a) b)

Slika 5.5. valni oblici napona prigušnice i napona diode pri $f = 50\ Hz$ u:

a) kontinuiranom režimu rada, b) diskontinuiranom režimu rada

Slika 5.5. prikazuje valne oblike napona prigušnice prikazanih kanalom 1 (plava boja) i napona diode prikazanog kanalom 2 (crvena boja) u kontinuiranom, odnosno diskontinuiranom režimu rada.

Ako se faktor vođenja drži u području 80%, mogu se postići sklopne frekvencije u kilo-herznom području rada. Za razliku od frekvencije od 50 Hz koje proizvođač definira u predloženim vježbama uz karticu. Što se primjena tiče tipične sklopne frekvencije izravnih istosmjernih pretvarača, ovisno o primjeni, oni se kreću od nekoliko kilo-herza do 50-ak kilo-herza. Ključna komponenta koja ovisi o sklopnoj frekvenciji rada jest prigušnica. Zato se u sljedećim mjerenjima mijenja induktivnost prigušnice i ponavlja analiza mijenjanjem faktora vođenja o frekvenciji i obrnuto, snimanjem i analiziranjem karakterističnih valnih oblika struje i napona prigušnice.



a) b)

Slika 5.6. valni oblici struje prigušnice i upravljačkog signala pri $f = 50Hz$ u:
a) kontinuiranom režimu rada, b) diskontinuiranom režimu rada

Slika 5.6. prikazuje valne oblike struje prigušnice prikazane kanalom 1 (plava boja) i valni oblik upravljačkog signala prikazan kanalom 2 (crvena boja) u kontinuiranom odnosno diskontinuiranom režimu rada. Izmjereni valni oblici pri kontinuiranom režimu rada su bliži idealnima od valnih oblika pri diskontinuiranom režimu rada. Ovo je izraženo za valni oblik struje gdje dolazi do izraženih smetnji pri snimanju valnog oblika zbog male vrijednosti struje i osjetljivosti mjerne opreme.

5.2. Mjerenja na prigušnici od 300 namota bez zračnog raspora

Pri provođenju mjerenja koristi se prigušnica s manjim brojem namota, odnosno prigušnica od 300 namota. Također se određuju bitne veličine i valni oblici napona i struje prigušnice. Mjerenja se provode u tri radne točke, dvije od kojih su pri odabranim sklopnim frekvancijama te se mijenja

faktor vođenja, dok se treća radna točka provodi pri konstantnom faktoru vođenja pri komu se mijenja sklopna frekvencija.

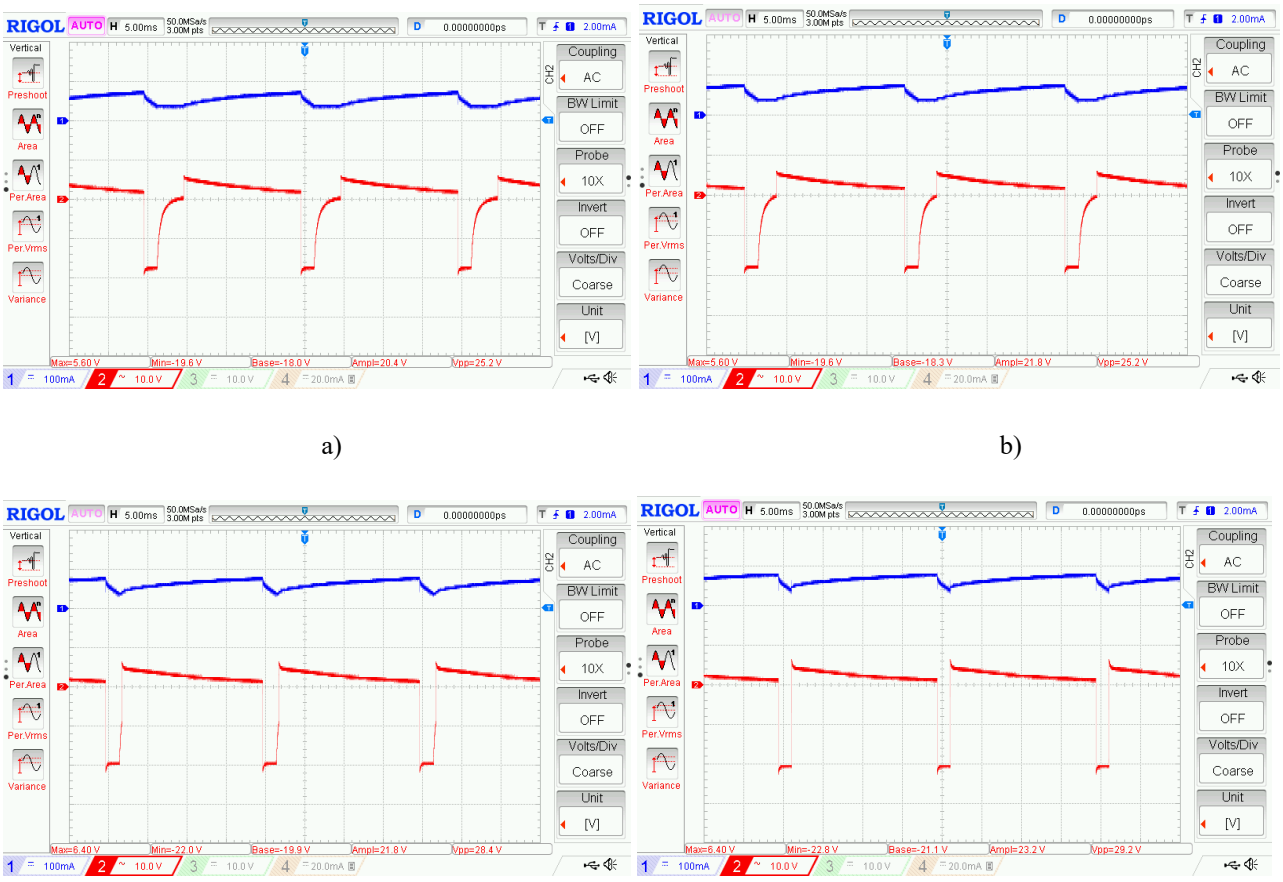
5.2.1. Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 50 Hz

Prilikom određivanja granice između režima, odnosno faktora vođenja za granični slučaj primjećuje se kako kontinuirani režim rada nastupa pri većem faktoru vođenja za prigušnicu s manjim brojem namota.

Tablica 5.4. Faktor vođenja u ovisnosti o režimu rada za $f_s = 50\ Hz$ i $E = 5V$

Faktor vođenja / Vrijednosti	$\alpha_1 = 75\%$	$\alpha_2 = 80\%$	$\alpha_3 = 90\%$	$\alpha_4 = 92\%$
$U_d(0)[V]$	22,02	22,67	24,5	25,37
$U_d(0)[V]$ (računski)			49,6	62
$I_d(0)[mA]$	1,01	1,03	1,11	1,16
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	4,48	4,71	5,48	5,93
Režim rada	Diskontinuirani	Diskontinuirani	Kontinuirani (granični)	Kontinuirani

Izmjereni izlazni napon u ovome slučaju znatno je manji od idealnog, što također dovodi do zaključka da eksperimentalna kartica ima ograničenje ulazne struje koje proizvođač nije dao u uputama. Izlazna struja je i dalje reda mili-ampera, a ulazna struja također se računa formulom (5-3), pri graničnom slučaju se procijeni induktivnost prigušnice formulom (5-5) te ona iznosi $L_E = 7{,}96\ H$. Prema formuli (5-6) određuje se odstupanje izlaznog napona za dva slučaja kontinuiranog režima rada, pri $\alpha = 90\%$ odstupanje iznosi 50,6%, dok za $\alpha = 92\%$ odstupanje izosi 59,1%.



Slika 5.7. valni oblici napona i struje prigušnice pri frekvenciji f=50 Hz

a) diskontinuirani režim pri $\alpha = 75\%$, b) diskontinuirani režim pri $\alpha = 80\%$, c) kontinuirani (granični slučaj) režim pri $\alpha = 90\%$, d) kontinuirani režim pri $\alpha = 92\%$

Primjećeno značajno odstupanje srednje vrijednosti izlaznog napona dobiveno mjerenjem u odnosu na vrijednost dobivenu analitički uočava se i iz snimljenih valnih oblika napona prigušnice. Za vrijeme vođenja MOSFET-a (Interval A iz analize rada) uočava se smanjenje napona, koje u prethodnim slučajevima nije bilo identificirano.

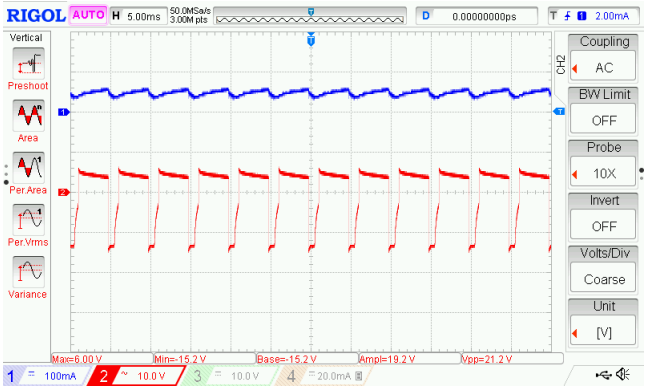
5.2.2. Promjena faktora vođenja pri sklopnoj frekvenciji 200 Hz

Izvođenjem ovoga pokusa prikazano je kako povećanjem sklopne frekvencije s 50 na 200 Hz energetski pretvarač prelazi iz diskontinuiranog režima rada u kontinuirani režim rada pri manjoj vrijednosti faktora vođenja.

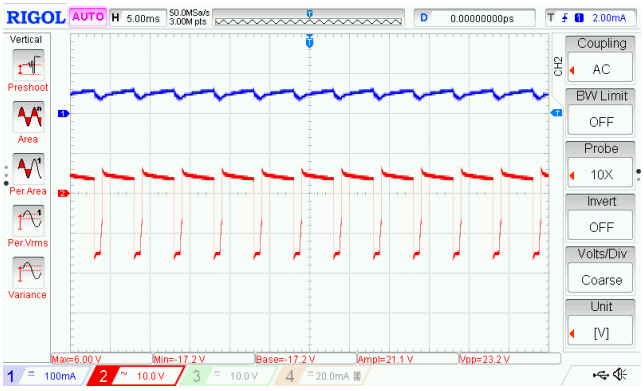
Tablica 5.5. Faktor vođenja u ovisnosti o režimu rada za $f_s = 200\,Hz$ i $E = 5V$

Faktor vođenja / Vrijednosti	$\alpha_1 = 75\%$	$\alpha_2 = 80\%$	$\alpha_3 = 83\%$	$\alpha_4 = 85\%$
$U_d(0)[V]$	18,23	19,93	21,18	22,53
$U_d(0)[V]$ (proračun)			29,18	33,07
$I_d(0)[mA]$	0,83	0,91	0,96	1,02
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	3,05	3,66	4,099	4,63
Režim rada	Diskontinuirani	Diskontinuirani	Kontinuirani (granični)	Kontinuirani

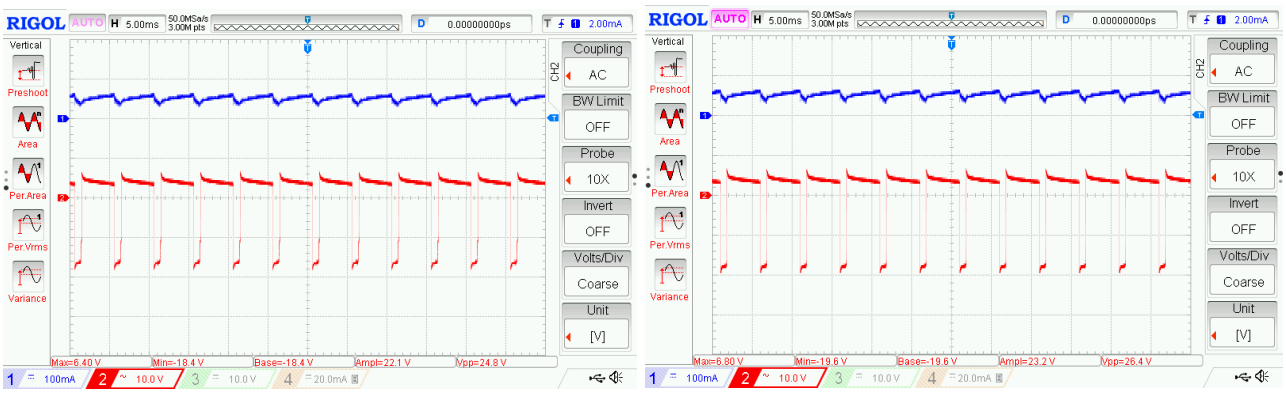
Kao i u prethodnom pokusu moguće je procijeniti induktivnost prigušnice primjenom formule (5-5) te ona u ovom slučaju iznosi $L_E = 2{,}46\,H$



a)



b)



c) d)

Slika 5.8. Valni oblici napona i struje prigušnice pri frekvenciji f=200 Hz

a) diskontinuirani režim pri α = 75%, b) diskontinuirani režim pri α = 80%, c) kontinuirani (granični slučaj) režim pri α = 83%, d) kontinuirani režim pri α = 85%

5.2.3. Promjena frekvencije pri konstantnom faktoru vođenja od 85%

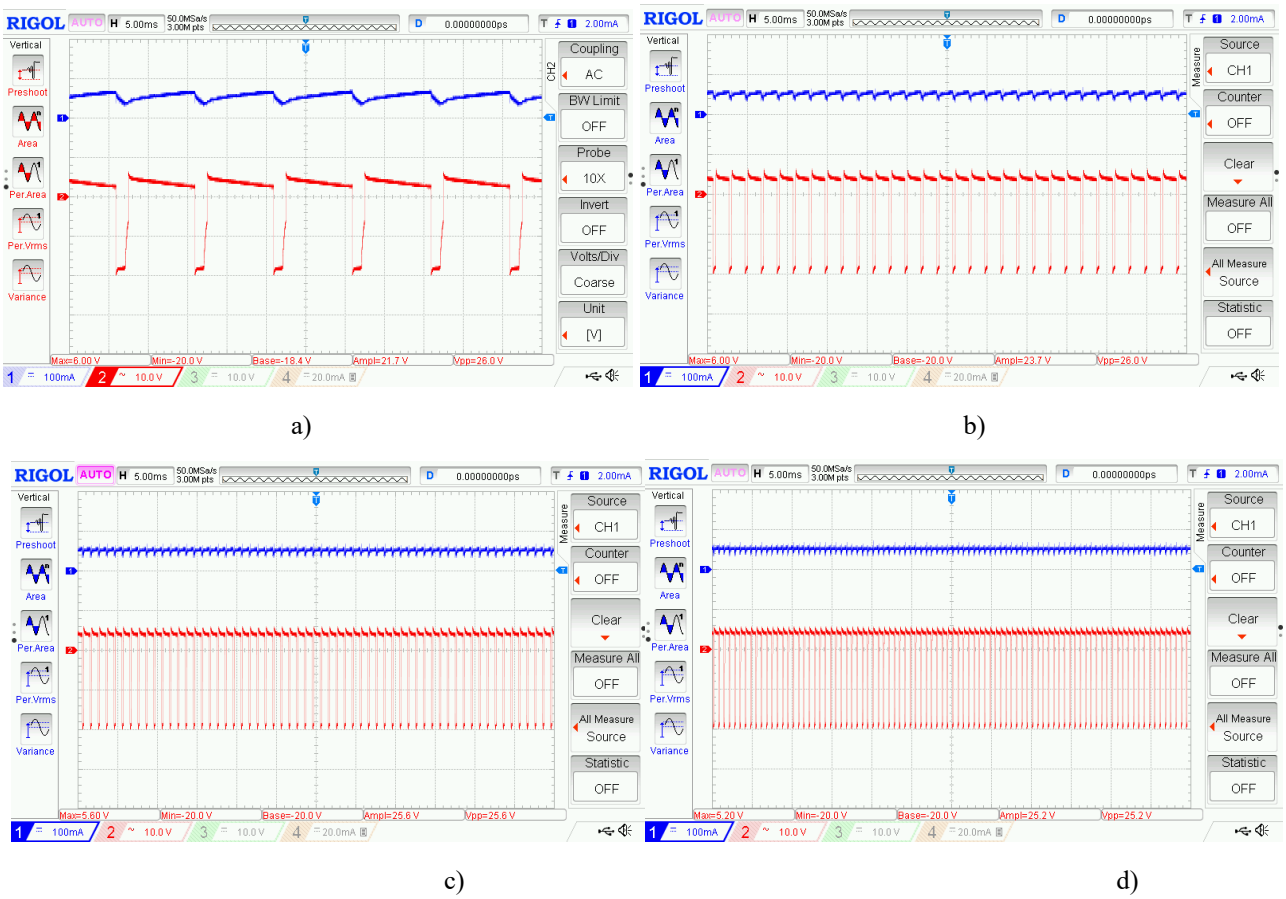
Mjerenje se provodi pri konstantnom faktoru vođenja, a sklopna frekvencija se postupno povećava. Za razliku od prethodne prigušnice koja ima 900 namota čije se mjerenje provodilo pri konstantnom faktoru prigušenja $\alpha = 80\%$, prigušnica od 300 namota neće biti u kontinuiranom režimu rada za svaku od pojedinih frekvencija, također faktor vođenja se za ovo mjerenje morao povećati, sa 80 % na 85% što se može vidjeti tablicom:

Tablica 5.5. Sklopna frekvencija u ovisnosti o režimu rada za $\alpha = 80\%$ i $E = 5V$

Frekvencija / Vrijednosti	$f_1 = 100\ Hz$	$f_2 = 500\ Hz$	$f_3 = 1000\ Hz$	$f_4 = 1500\ Hz$
$U_d(0)[V]$	22,82	23,05	23,06	22,9
$U_d(0)[V]$ (proračun)		33,07	33,07	33,07
$I_d(0)[mA]$	1,04	1,04	1,05	1,04

$I_E(0)[mA]$ (proračun)	4,78	4,83	4,88	4,8
Režim rada	Diskontinuirani	Kontinuirani (granični)	Kontinuirani	Kontinuirani

Izmjereni izlazni napon je i u ovome slučaju znatno manji od idealnog izlaznog napona koji se dobije računski prema formuli (3-14), te se može primjetiti kako je odstupanje veliko ukoliko se primjeni formula (5-6).

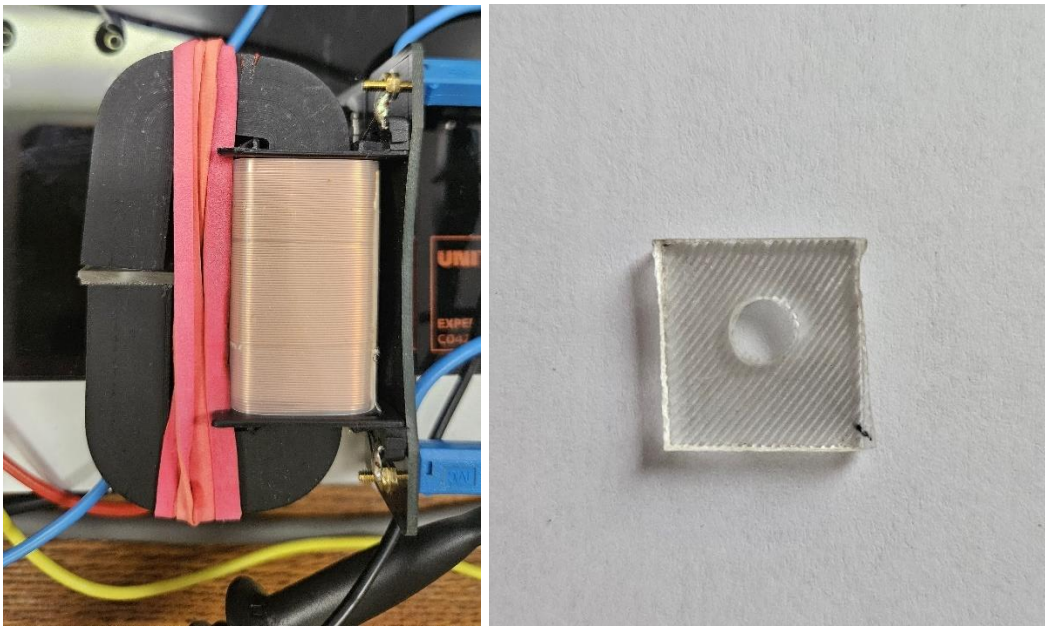


Slika 5.9. Valni oblici napona i struje prigušnice pri $\alpha = 85\%$ i:

a) f=100 Hz, b) *f=500 Hz*, c) *f=1000 Hz*, d) *f=1500Hz*

5.3. Mjerenja na prigušnici od 900 namota sa zračnim rasporom

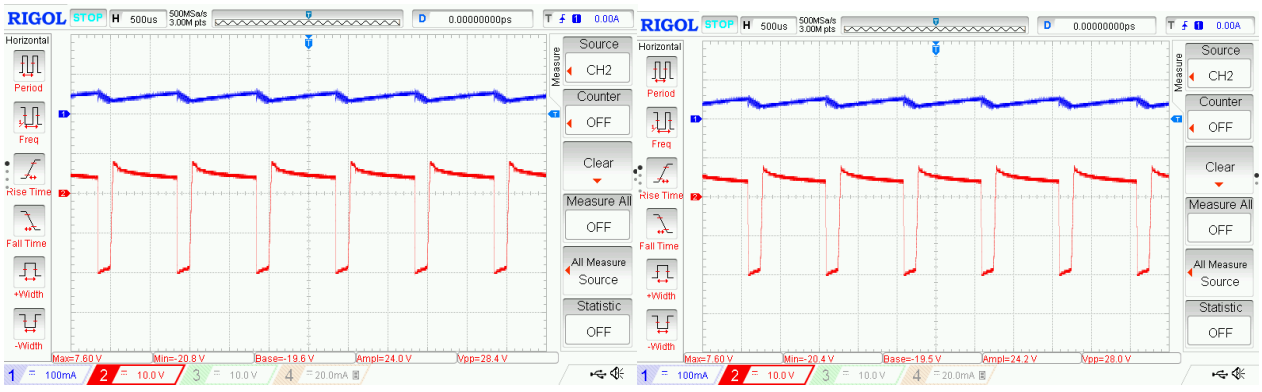
Mjerenja se provose s prigušnicom od 900 namota na dva načina. Prvi, da se između dvije c-magnetske jezgre umetne komad pleksiglasa, slika 5.10. a). komad pleksiglasa je probušen u sredini, tako da se na taj način osigura zračni raspor. Izgled umetnutog pleksiglasa je prikazan slikom 5.10. b). Na ovaj način se smanjuje induktivnost prigušnice i promjena (de)magnetiziranja čine bržima, a što je primjećeno kao nedostatak analizom valnog oblika napona na prigušnici u diskontinuiranom režimu rad. Dodatno, uz iste ostale parameter na ovaj način se povećava valovitost struje. Drugi način je da se komad pleksiglasa stavi samo u pola poprečnog presjeka između dvije c-jezgre, slika 5.12. Ponovo se smanjuje induktivnost prigušnice.



Slika 5.10. *a)* prigušnica s umetnutim komadom pleksiglasa,
b) izgled umetnutog pleksiglasa

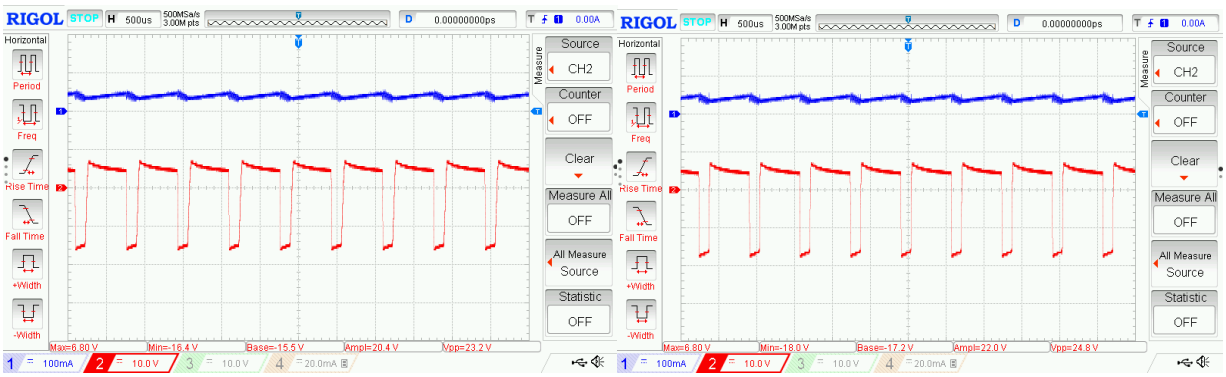
Tablica 5.6. karakteristične vrijednosti struje i napona u ovisnosti o faktoru vođenja i induktivnosti prigušnice

Faktor vođenja Frekvencija vrijednosti	$\alpha = 75\%$ $f = 1\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 1\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 75\%$ $f = 1{,}5\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 1{,}5\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 1\ kHz$ (drugo mjerenje)	$\alpha = 85\%$ $f = 1\ kHz$ (drugo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 1\ kHz$ (drugo mjerenje)	$\alpha = 85\%$ $f = 1{,}5\ kHz$ (drugo mjerenje)
$U_d(0)\ [V]$	23,58	23,46	19,14	20,89	23,4	24,95	20,88	24,45
$U_d(0)\ [V]$ (proračun)	19,84	24,8	19,84	24,8	24,8	33,07	24,8	33,07
$I_d(0)\ [mA]$	1,08	1,07	0,87	0,95	1,06	1,13	0,95	1,13
$I_E(0)\ [mA]$ (proračun)	5,13	5,06	3,36	4	5	5,68	4	5,64



a) b)

Slika 5.11. Valni oblici napona i struje prigušnice (prvo mjerenje) u kontinuiranom režimu rada pri f=1000 Hz i: a) $\alpha = 75\%$, b) $\alpha = 80\%$

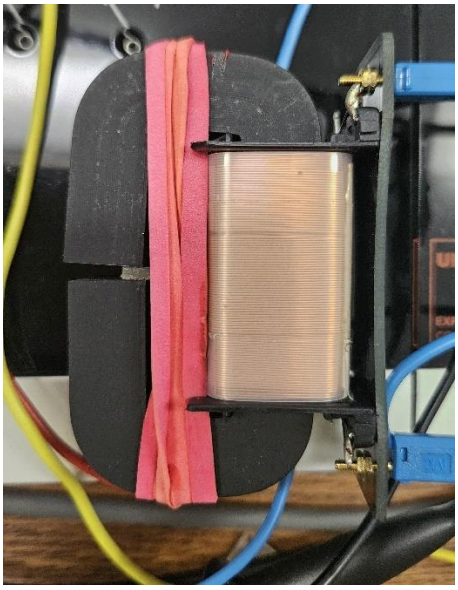


a) b)

Slika 5.12. Valni oblici napona i sruje prigušnice (prvo mjerenje) u kontinuiranom režimu rada pri *f=1500 Hz* i:

a) $\alpha = 75\%$, b) $\alpha = 80\%$

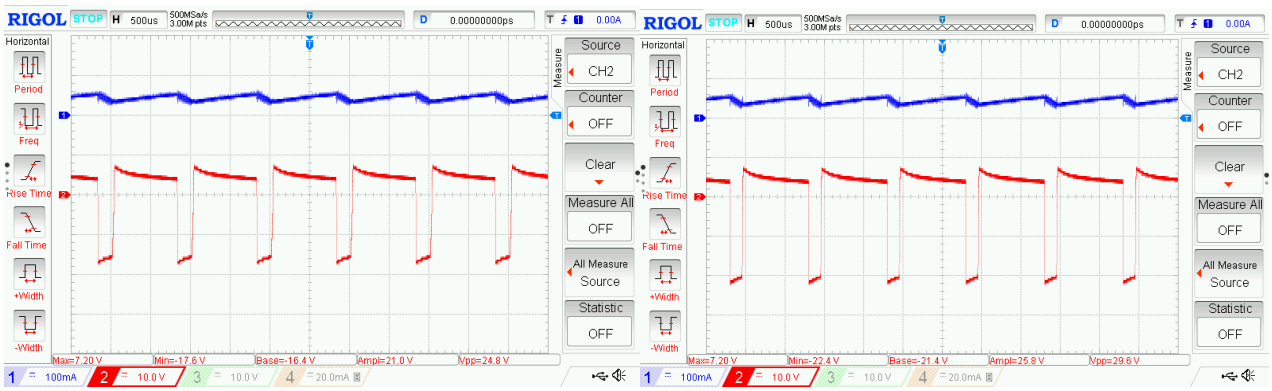
Sukladno slikama 5.11. i 5.12. te tablicom 5.6. može se primjetiti kako istosmjerni pretvarač može raditi u kontinuiranom režimu rada pri visokim frekvencijama, no za to je potreban također i velik faktor vođenja. Također vidljivo je kako je računski dobivena ulazna struja mnogo veća od izmjerene izlazne struje.



Slika 5.12. *zavojnica sa pola pleksiglasa između magnetske jezgre.*

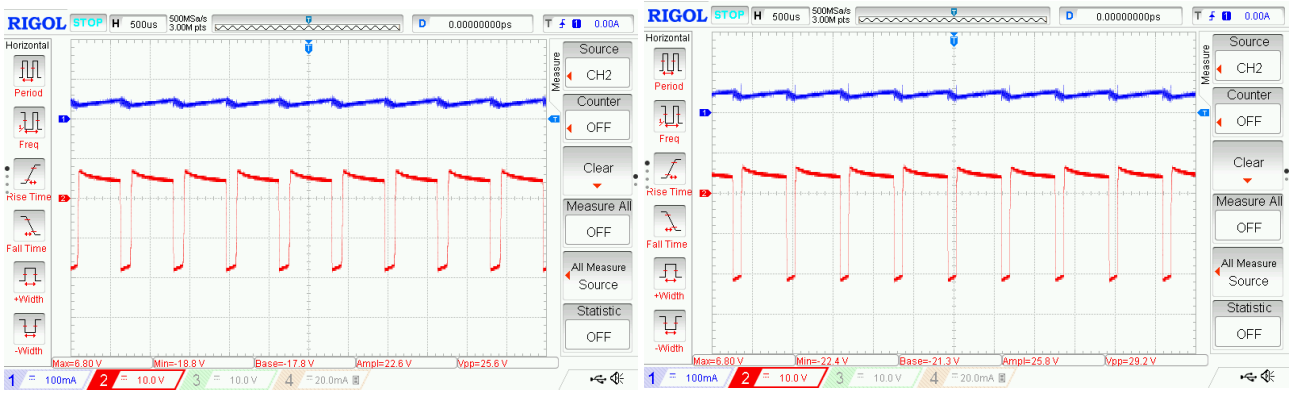
Drugim mjerenjem želi se prikazati hoće li zračni raspor kojeg ne čini pleksiglas napraviti razliku u radu istosmjernog pretvarača, tj. kada će nastupiti kontinuirani režim rada pri određenim sklopnim frekvencijama i kako će to utjecati na izlazni napon i struju.

Usporede li se vrijednosti dobivene tablicom 5.6. za prvo i drugo mjerenje primjetiti će se kako pri zračnom rasporu gdje se samo pola pleksiglasa nalazi između magnetske c-jezgre kontinuirani režim rada nastupa pri većem faktoru vođenja pri konstantnim frekvencijama. Također povećao se izlazni napon pri većim faktorima vođenja. Izlazna struja pri konstantnom faktoru vođenja također se nije promijenila.



a) b)

Slika 5.13. Valni oblici napona i struje prigušnice (drugo mjerenje) pri *f=1000 Hz* i:
a) $\alpha = 80\%$, b) $\alpha = 85\%$



a) b)

Slika 5.14. Valni oblici napona i struje prigušnice (drugo mjerenje) pri *f=1500 Hz* i:
a) $\alpha = 80\%$, b) $\alpha = 85\%$

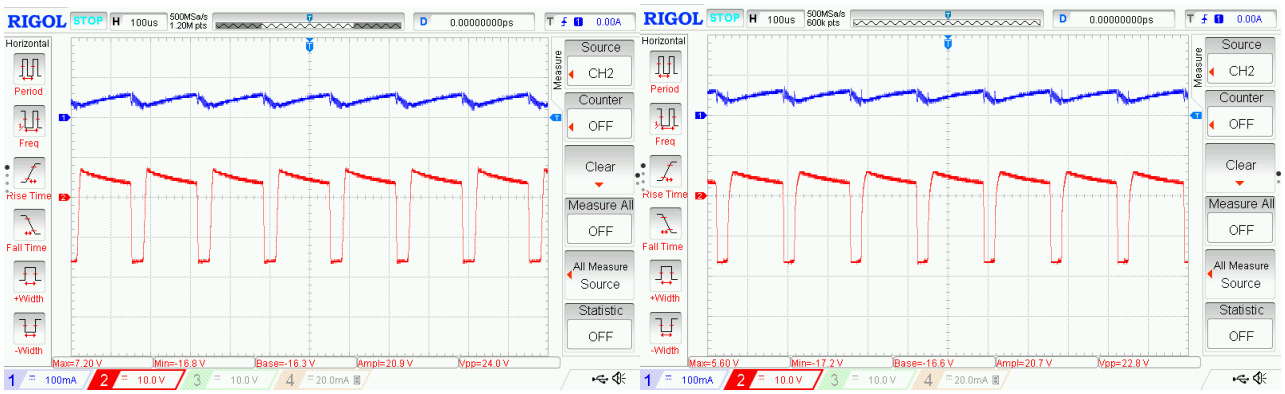
5.4. Mjerenja na prigušnici od 300 namota sa zračnim rasporom

Ponovo se provode mjerenja na isti način kao u prethodnom poglavlju samo sa prigušnicom od 300 namota. Ovime se dodatno smanjuje induktivnost prigušnice i omogućuje rad u višem sklopnom području.

Tablica 5.7. Karakteristične vrijednosti struje i napona u osvisnosti o faktoru vođenja i induktivnosti prigušnice

Faktor vođenja Frekvencija Vrijednosti	$\alpha = 80\%$ $f = 6\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 85\%$ $f = 6\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 7\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 85\%$ $f = 7\ kHz$ (prvo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 5\ kH$ (drugo mjerenje)	$\alpha = 85\%$ $f = 5\ kH$ (drugo mjerenje)	$\alpha = 80\%$ $f = 6\ kH$ (drugo mjerenje)	$\alpha = 85\%$ $f = 6\ kH$ (drugo mjerenje)
$U_d(0)\ [V]$	18,92	20,67	18,24	19,81	20,34	21,53	18,91	20,56
$U_d(0)\ [V]$ (proračun)	24,8	33,07	24,8	33,07	24,8	33,07	24,8	33,07
$I_d(0)[mA]$	0,87	0,94	0,83	0,9	0,92	0,98	0,86	0,94
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	3,32	3,92	3,05	3,59	3,77	4,25	3,28	3,91

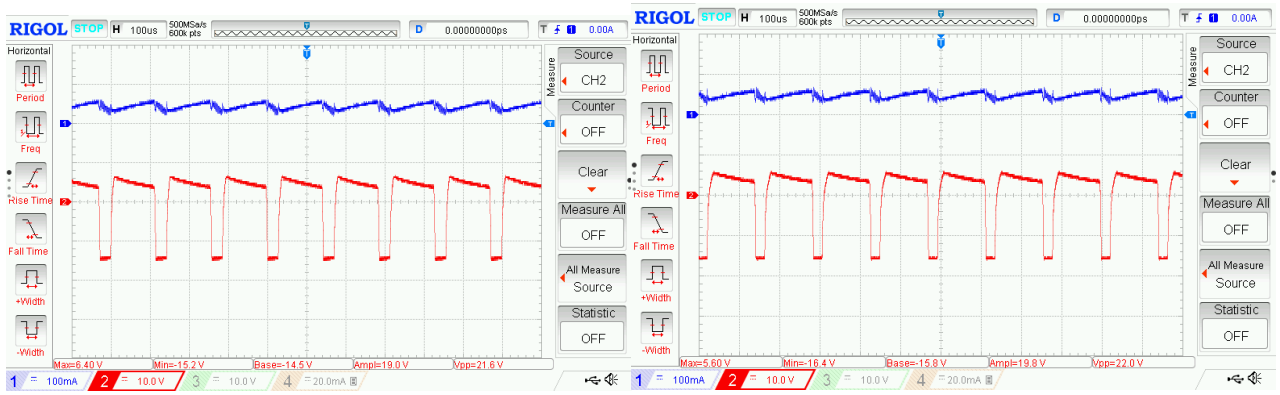
Zamjenom prigušnice od 900 namota prigušnicom od 300 namota može se primjetiti kako se pretvarač može dovesti u područje rada frekvencije 6 kHz i 7 kHz pri istim faktorima vođenja. No zbog softverskog ograničenja ulazne struje odstupanje izlaznog napona je veliko.



a) b)

Slika 5.15. Valni oblici napona i struje prigušnice(prvo mjerenje) pri f=6 kHz i:

a) $\alpha = 80\%$, b) $\alpha = 85\%$



a) b)

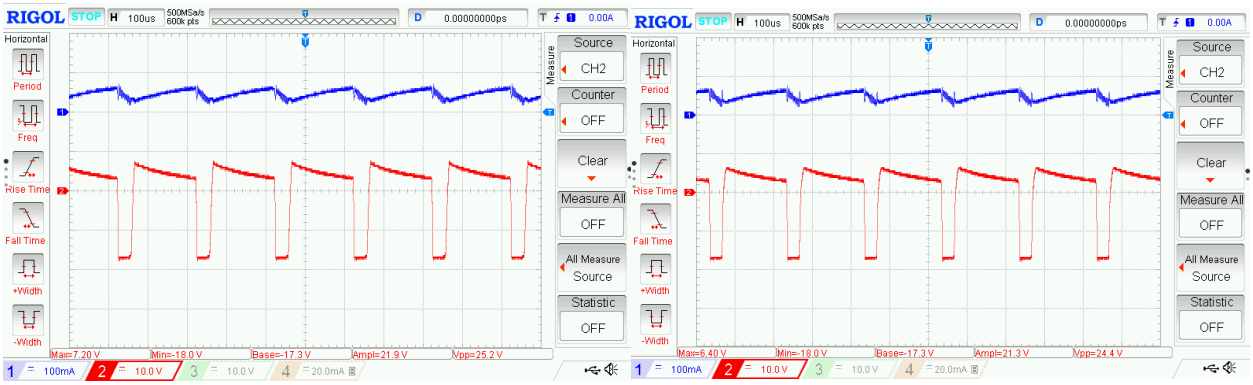
Slika 5.16. Valni oblici napona i struje prigušnice (prvo mjerenje) pri f=7 kHz i:

a) $\alpha = 80\%$, b) $\alpha = 85\%$

Ovim mjerenjem se želi prikazati koliko će se razlikovati izmjerene vrijednosti ako zračni raspor postavimo kao na slici 5.12., te pri kojim frekvencijama će nastupiti kontinuirani režim rada.

Promjenom položaja pleksiglasa koji tvori zračni raspor može se primjetiti kako kontiniorani režim rada nastupa pri frekvenciji 5 kHz, a zbog usporedbe koristit će se vrijednosti dobivene pri frekvenciji 6 kHz. Budući da je faktor vođenja nepromijenjen pri frekvenciji 6 kHz vidi se da su dobiveni gotovo

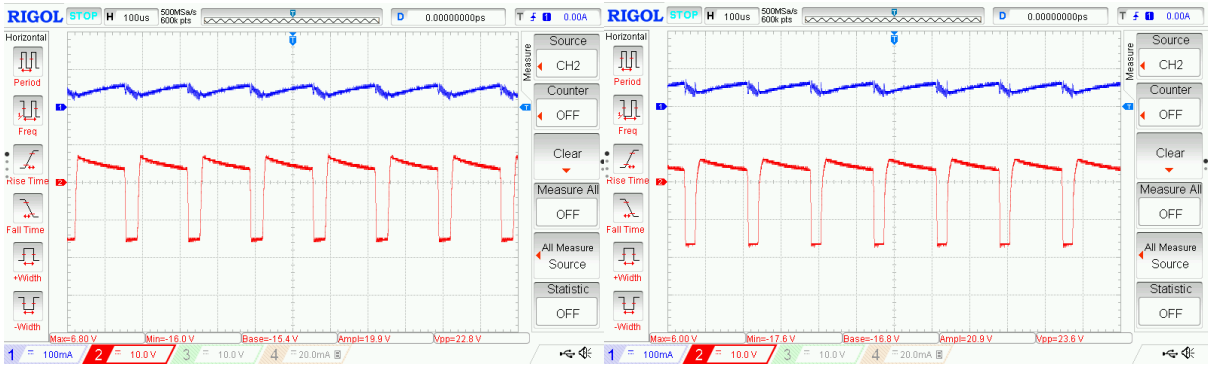
isti rezultati izlaznog napona i izlazne struje. Time se može zaključiti da promjena zračnog raspora utječe na to pri kojoj će frekvenciji nastupiti kontinuirani režim rada, dok pri istim frekvencijama ne radi nikakvu značajnu razliku.



a) b)

Slika 5.17. Valni oblici napona i struje prigušnice (drugo mjerenje) pri f=5 kHz i:

a) $\alpha = 80\%$, b) $\alpha = 85\%$



a) b)

Slika 5.18. Valni oblici napona i struje prigušnice (drugo mjerenje) pri f=6 kHz i:

a) $\alpha = 80\%$, b) $\alpha = 85\%$

ZAKLJUČAK

Lucas Nuelle didaktičko-multimedijalna oprema koristi se za eksperimentiranje, proučavanje, razumijevanje te odrađivanje laboratorijskih vježbi iz područja energetske elektronike, ali i raznih drugih tema iz područja elektrotehnike. Oprema pruža olakšano provođenje vježbi pomoću simulacija te raznih prezentacija putem računala te računalnih programa LabSoft i UniTrain. Vježbe su osmišljene na način da studenti samostalno odrađuju vježbu uporabom pripadajućih mjernih instrumenata. Uz zadatke studenti mogu provjeriti usvojeno znanje odgovarajući na pitanja koja su m postavljena uz vježbu, a ona su osmišljena tako da studenti osim što spajaju opremu moraju razmišljati na koji način oprema funkcionira te koji je smisao dane vježbe.

Završni rad obrađuje karticu istosmjernog uzlaznog pretvarača napona realiziranog pomoću Lucas Nuelle ekspreimentalne kartice te se isti želi dovesti u kontinuirani režim rada sa višim sklopnim frekvencijama promjenom induktivnosti prigušnice. Koristeći dvije različite prigušnice, jednu od 900 namota te drugu od 300 namota pokazano je da istosmjerni pretvaračmože rediti sa sklopnim frekvencijama u kilo-herznom području. Povećanjem sklopne frekvencije je postignuto smanjivanjem induktivnosti prigušnice, čime se smanjuju procesi pohrane elektromagetske energije te oni postaju brži. Prilikom korištenja prigušnice s manjim brojem namota mjerenjem su uočeni problemi u smislu značajnog odstupanja srednje vrijednosti izlazno gnapona dobivene mjerenjem od izračunate i pojavljuju se ne regularna stanja.

Prilikom izvođenja pokusa primjećuje se da pri frekvencijama rada od 50 Hz pretvarač radi u kontinuiranom načinu rada tek na faktorima vođenja koji su veći od 70%. Dodavanjem zračnoga raspora prigušnici od 900 namota pretvarač može raditi u kontinuiranom načinu rada pri frekvencijama od 1 kHz i 1,5 kHz, no uvjet je da je faktor vođenja jako velik, tj 80% i veći. Za razliku od prigušnice od 900 namota, ukoliko se zračni raspor stavi u prigušnicu od 300 namota može se primjetiti kako će pretvarač raditi u kontinuiranom načinu rada pri mnogo većim frekvencijama. Pretvarač u tome slučaju radi na frekvencijama rada 5 kHZ, 6 kHz te 7 kHz, no opet uz uvjet da je faktor vođenja veći od 80%.

Zaključuje se da eksperimentalna kartica uzlaznog istosmjernog pretvarača napona ima nedostatke koji bitno utječu na rad. Kartica je vrlo nepristupačna za mjerenje jer se ne može mjeriti

stuja prigušnice, te je zbog toga prigušnice izdvojena sa pločice dodatnim spajanjem vodiča što utječe na povećanje parazitnih parametara same prigušnice. Zbog dodatnih vodiča se pojavljuju dodatni parazitski induktiviteti i kapaciteti. Smatra se da kartica ima softversko ograničenje ulazne struje koje proizvođač nije naglasio u uputama korištenja te ne dopušta porast izlaznog napona preko 27 V. Procesi pohrane magnetske energije su jako spori što upućuje na velike iznose induktiviteta. Na velike iznose induktiviteta također upućuju jako male frekvencije rada. Eksperimentalna kartica može funkcionirati pri većim frekvencijama rada, ali to značajno utječe na iznos izlaznog napona. Maketa je napravljena za niske frekvencije do 200 Hz i tako su dizajnirane i prigušnice. Kako su ove frekvencije za red veličine manje od tipičnih frekvencija u primjenama, maketa se može koristiti samo u didaktičke svrhe.

LITERATURA

[1] „Lucas Nuelle službena stranica “. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.lucas-nuelle.com/

[2] *I. Flegar, Elektronički energetski pretvarači, Kiegen d.o.o., Zagreb, Zagreb, 2010.*

[3] „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

[4] *I. Flegar, Sklopovi energetske elektronike, Graphis Zagreb, Zagreb, 1996.*

[5] M. K. Kazimierczuk, Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, John Wiley & Sons, 2008.

[6] E. Awwad, Abdullah, On the perspectives of SiC MOSFETs in high-frequency and high-power isolated DC/DC converters, Universitätsverlag der TU Berlin, Berlin, 2020.

[7] F. Asadi, K. Eguchi, Dynamics and Control of DC-DC Converters, Morgan & Claypool Publishers, 2018.

[8] S. Maniktala, Troubleshooting Switching Power Converters, Elsevier Inc., 2008.

[9] „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

[10] „Lucas Nuelle UniTrainSystem “. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.lucas-nuelle.us/2768/apg/11858/UniTrain-System.htm

[11] „Lucas Nuelle LabSoft Classroom Manager “. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.lucas-nuelle.us/2768/apg/14703/Learning-management-software-LabSoft-Classroom-Manager.htm

SAŽETAK

Napravljena je analiza rada istosmjernog uzlaznog pretvarača napona u kontinuiranom i diskontinuiranom režimu rada. Razmatrana je i opisana didaktičko-multimedijalna oprema Lucas Nuelle te eksperimentalna kartica uzlaznog pretvarača napona LNCO4205-1K. Provedena su mjerenja pomoću eksperimentalne kartice uzlaznog pretvarača napona te dvije prigušnice s različitim brojem namota. Prilikom provođenja mjerenja koriste se prigušnice bez zračnog raspora i sa zračnim rasporom. U pokusima se promatra režim rada eksperimentalne kartice promjenom sklopne frekvencije faktora vođenja.

Ključne riječi: faktor vođenja, Lucas Nuelle didaktičko-multimedijalna oprema, prigušnica, sklopna frekvencija, uzlazni istosmjerni pretvarač napona

ABSTRACT

The impact of inductance variation in the boost converter implemented using the Lucas-Nuelle experimental board

An analysis of the operation of DC voltage boost converter in continuous and discontinuous mode was carried out. The Lucas Nuelle didactic-multimedia equipment and the experimental voltage boost converter board were considered. Measurements were conducted using the experimental board and two inductors with different numbers of windings. During the measurements, inductors with and without an air gap were used. In the experiments, the operating mode of the experimental board was observed by changing the switching frequency and duty cycle.

Key words: duty cycle, Lucas Nuelle didactic-multimedia equipment, inductor, switching frequency, boost converter

ŽIVOTOPIS

Laura Blažević rođena je u Osijeku, 1.11.2001. godine. Živi u Bilju gdje je pohađa osnovnu školu. Godine 2016., upisuje I. gimnaziju Osijek. Srednju školu završava odličnim uspjehom te 2020., godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na drugoj se godini opredjeljuje za smjer Elektroenergetika.

PRILOZI

Prilog 1: Testiranje strujnog ograničenja

Strujno ograničenje eksperimentalne kartice uzlaznog pretvarača napona provodi se uporabom prigušnice s 900 namota bez zračnog raspora pri sklopnoj frekvenciji od 50 Hz i ulaznom naponu 5 V.

Faktor vođenja / Vrijednosti	$\alpha_1 = 0{,}6$	$\alpha_2 = 0{,}7$	$\alpha_3 = 0{,}72$	$\alpha_4 = 0{,}8$
Režim rada	Diskontinuirani	Diskontinuirani	Kontinuirani	Kontinuirani
$U_d(0)[V]$	12,88	14,93	15,67	20,84
$U_d(0)[V]$ (proračun)			17,71	24,8
U_d % (pogreška)			11,52%	15,97%
$I_d(0)[mA]$	0,59	0,68	0,71	0,95
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	1,53	2,05	2,38	3,99

Prilikom provođenja mjerenja pri kontinuiranom režimu rada moguće je računski odrediti iznos izlaznog napona prema formuli:

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

Također je moguće računski odrediti pretpostavku koliki bi bio iznos ulazne struje (zasivljeni red tablice).

$$I_E(0) = \frac{U_d(0) \cdot I_d(0)}{E}$$

Pomoću izračunatoe i izmjerene vrijednosti izlaznog napona moguće je odrediti postotnu pogrešku:

$$\left|\frac{U_{d\,oč}-U_{d\,dob}}{U_{d\,oč}}\right|*100\%$$

koja za slučaj faktora vođenja α=0,72 iznosi 11, 52%, dok za slučaj faktora vođenja α=0,8 iznosi 15,97%. Iz dobivenih podataka zaključuje se da je odstupanje od 15% i više preveliko te proračuje struja zaštita, dok je odstupanje od 11,52% prihvatljivo te se može reći da kartica ima strujno ograničenje ulazne struje 3 mA.

Provjera strujnog ograničenja: Provjera će se provoditi korištenjem prigušnice s 900 namota pri konstantnoj sklopnoj frekvenciji 1,5 kHz i ulaznom naponu 5 V.

Faktor vođenja / Vrijednosti	$\alpha = 0{,}75$	$\alpha = 0{,}8$
Režim rada	kontinuirani	kontinuirani
$U_d(0)[V]$	19,14	20,89
$U_d(0)[V]$ (proračun)	19,84	24,8
$U_d\%$	3,52%	15,77%
$I_d(0)[mA]$	0,87	0,95
$I_E(0)[mA]$ (proračun)	3,36	4

U ovome slučaju primjećuje se kako odstupanje za slučaj faktora prigušenja α=0,75 iznosi 3,52% što umućuje na to kako je ograničenje ulazne struje zaista oko 3 mA.

Zaključak: Prorada strujnog ograničenja je na vrijednostima ulazne struje većim od 3 mA, odnosno što je veća ulazna struja, veće je odstupanje izlaznog napona što upućuje na to da je proradilo strujno ograničenje.