

Izrada predloška laboratorijske vježbe na osnovu izrađenih maketa istosmjernih silaznih pretvarača i induktivnih trošila

Mihalj, Domagoj

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:200:552485>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

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 prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

IZRADA PREDLOŠKA LABORATORIJSKE VJEŽBE NA
OSNOVU IZRAĐENIH MAKETA ISTOSMJERNIH
SILAZNIH PRETVARAČA I INDUKTIVNIH TROŠILA

Završni rad

Domagoj Mihalj

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:	Domagoj Mihalj
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. pristupnika, god.	4855, 29.07.2020.
JMBAG:	0165087655
Mentor:	prof. dr. sc. Denis Pelin
Sumentor:	Andrej Brandis, univ. mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Izrada predloška laboratorijske vježbe na osnovu izrađenih maketa istosmjernih silaznih pretvarača i induktivnih trošila
Znanstvena grana završnog rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada:	Izraditi maketu silaznog pretvarača 12V/ 5-10V s istosmjernim motorićem kao trošilom. Za izrađenu maketu i ostale napraviti predložak za laboratorijsku vježbu prema specifičnostima odabranih maketa. Sumentor: Andrej Brandis Tema je rezervirana za studenta: Domagoj Mihalj!
Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:	16.09.2024.
Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:	25.09.2024.
Ocjena završnog rada nakon obrane:	Izvrstan (5)
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:	Domagoj Mihalj
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4855, 29.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Izrada predložka laboratorijske vježbe na osnovu izrađenih maketa istosmjernih silaznih pretvarača i induktivnih trošila**

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	2
3. ANALIZA RADA SILAZNOG PRETVARAČA.....	3
4. IZRADA SILAZNOG PRETVARAČA 12 V/70 mA.....	7
4.1. Pretvarački dio.....	8
4.2. Upravljački dio.....	8
4.3. Trošilo.....	8
5. SASTAVLJANJE MAKETE PRETVARAČA 12 V/70 mA.....	9
5.1. Izrada tiskane pločice	9
5.2. Izrada postolja makete	12
5.3. Usporedba modela i makete	13
5.4. Izrada silaznog pretvarača 12V/200mA	14
6. MJERENJE U LABORATORIJU	15
6.1. Rezultati mjerenja za maketu A	16
6.2. Rezultati mjerenja za maketu B	19
6.3. Usporedba rezultata mjerenja i analize rada	21
6.4. Faktor vođenja	22
7. ZAKLJUČAK	25
LITERATURA	26
POPIS OZNAKA	27
SAŽETAK.....	28
SUMMARY	29
ŽIVOTOPIS	30
PRILOG	31

1. UVOD

Istosmjerni pretvarač je elektronički energetska pretvarač koji povezuje istosmjernu mrežu sa istosmjernim trošilom. Njegova je uloga prilagoditi karakteristike mreže karakteristikama samog trošila da bi trošilo moglo raditi prema nazivnim karakteristikama.

U ovom radu izrađen je istosmjerni silazni pretvarač, prema shemi koja je pronađena na internetu [1], uz dodatne korekcije, koji se koristi za pokretanje istosmjernog motora male snage. To se postiže uz pomoć MOSFET-a kojim se upravlja na principu pulsno širinske modulacije – PŠM (engl. Pulse – width modulation – PWM) s pomoću mikroupravljača.

U drugom poglavlju dat je pregled područja istraživanja.

Treće poglavlje objašnjava analizu rada pretvarača u kontinuiranom režimu rada koji je opterećen motorom male snage, odnosno trošilom valovite struje.

Četvrto poglavlje opisuje izradu pretvarača, te podsustave pretvarača. Svaki dio pretvarača i njegova funkcija su detaljno objašnjeni.

U petom poglavlju se dotiče odabira komponenti, izrade tiskane pločice i postolja te sastavljanje makete.

U šestom poglavlju su provedena mjerenja i snimljeni valni oblici te prikazani i analizirani rezultati mjerenja. Za mjerenja su korištena dva pretvarača, pretvarač koji je izrađen u ovom radu 12V/70 mA i pretvarač izrađen u radu [2], 12V/200mA.

Cilj rada je objasniti, koristeći mjerenja valnih oblika, rezultate analize, princip rada silaznog istosmjernog pretvarača i uspoređivanje s rezultatima analize, te kreirati predložak za laboratorijsku vježbu iz kolegija Energetska elektronika na trećoj godini Preddiplomskog studija elektrotehnike.

1.1. Zadatak završnog rada

Izraditi maketu silaznog pretvarača 12V/ 5-10V s istosmjernim motorom kao trošilom. Za izrađenu maketu i ostale napraviti predložak za laboratorijsku vježbu prema specifičnostima odabranih maketa.

2. PREGLED PODRUČJA

„Istosmjerni pretvarači upotrebljavaju se u napajачima elektroničke opreme gdje upravljaju tokom električne energije između dva istosmjerna sustava. Istosmjerni pretvarač priključuje se na istosmjerni napon i pretvara ga u druge istosmjerne napone potrebne za napajanje elektroničkih sklopova. Upotrebljavaju se i u električnoj vuči za upravljanje brzinom vrtnje istosmjernih motora primjerice kod viličara i u elektromotornim vlakovima.“ [3]

U knjizi I. Flegara [4] detaljno su obrađene različite topologije elektroničkih energetskih pretvarača, uključujući i istosmjerne pretvarače. Istosmjerni pretvarači su klasificirani prema dva kriterija. Prvi kriterij je prema broju kvadranta izlazne $u-i$ karakteristike, a drugi prema količini generirane izmjenične snage. Prema drugom kriteriju, pretvarači se dijele na izravne i neizravne, s dodatnom podjelom neizravnih pretvarača na one s i bez galvanskog odvajanja. Matematički modeli ovih pretvarača, zajedno s Kirchhoffovim zakonima, koriste se za analizu rada, s ciljem određivanja karakterističnih valnih oblika struja i napona te upravljačkih karakteristika. Također se navodi i pojam ustaljeno stanje što je naziv za stanje mreže u kojemu su funkcije periodičke.

U svojim istraživanjima, autori A.W. Cristri i R.F. Iskandar [5], spominju široku primjenu istosmjernih pretvarača. Neke od primjena koje navode su elektronički sustavi, osobna računala, sustave kontrole punjenja baterija itd. Time se dokazuje velika primjena, te vrijednost i važnost ovih tipova pretvarača u današnjici.

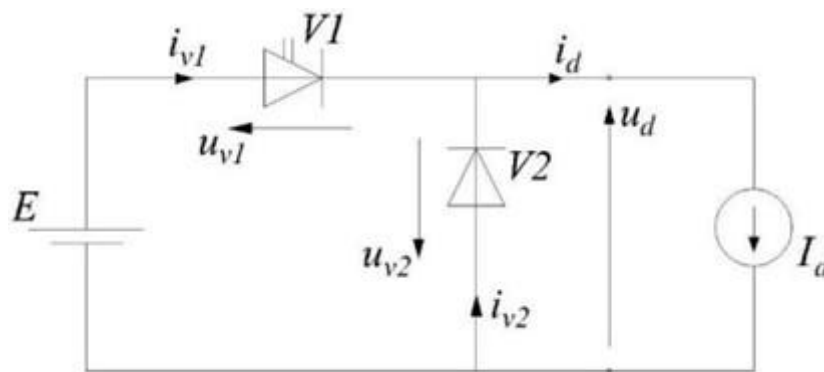
U radu [6] autorica objašnjava osnovne principe kontrole brzine vrtnje istosmjernog motora pulsno-širinskim upravljanjem te navodi prednosti ovog načina upravljanja među kojima navodi povoljnu cijenu izrade, pouzdanost sklopa, učinkovitost te dugotrajnost.

Autor rada [7] bavi se tematikom izrade sklopa za pulsno-širinsko upravljanje koristeći NE555 tajmer. Objašnjava princip rada sklopa i rezultate provedene simulacije. Na posljetku daje kratak osvrt o dobivenim rezultatima u kojima daje prijedloge uporabe sklopa, njegove prednosti te iznosi nedostatke.

3. ANALIZA RADA SILAZNOG PRETVARAČA

Silazni pretvarač je istosmjerni izravni pretvarač. To znači da u samom spoju nema dodatnih energetskih spremnika, pa je moguće direktno spojiti izvor i trošilo, što neće dovesti do prenapona ili prekostruje prilikom uklapanja. U ovom slučaju, riječ je o silaznom pretvaraču koji spaja naponski izvor i strujni izvor koji predstavlja induktivno trošilo.

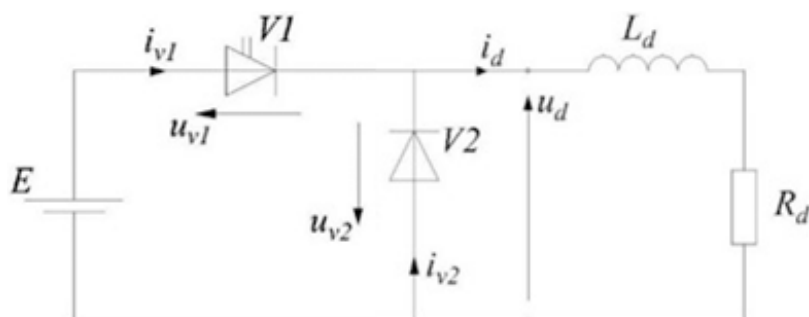
Pošto se radi o silaznom pretvaraču, na izlazu samog pretvarača potreban je niži napon nego na ulazu. Zato se u spoj dodaju dva ventila, jedan upravljivi ventil $V1$, a drugi je idealna dioda $V2$.



Slika 3.1. Shema silaznog pretvarača

Prilikom spajanja, za izvor se koristi istosmjerni izvor 12 V , a za trošilo je istosmjerni motor male snage, što će dovesti do valovitosti struje motora. To se rješava prepravkom modela sheme silaznog pretvarača. U prepravljenoj shemi trošilo se modelira kao serijski spoj induktiviteta; L_d i otpora trošila; R_d .

U dobro projektiranim aktivnim trošilima otpornost trošila; R_d se minimizira zbog smanjenja gubitaka. Zbog toga se u analizi otpornost trošila; R_d može s prihvatljivom tehničkom točnošću zanemariti.



Slika 3.2. Shema spoja pretvarača opterećenog trošilom valovite struje

S obzirom na korišteno trošilo u spoju i s obzirom na odabranu sklopnu frekvenciju, očekuje se da je zadovoljen uvjet kontinuirane struje trošila, što ujedno implicira kontinuirani režim rada, koji će se analizirati u spoju. Također

Analiziranje spoja započinje određivanjem intervala rada. Intervale rada određuje upravljački impuls na ventili $V1$, koji je određen faktorom vođenja; α . Ventili $V1$ i $V2$ rade protutaktno, što ukazuje na to da postoje dva intervala rada, koji se ponavljaju periodički. Prvi interval kada vodi ventil $V1$ i drugi interval kada vodi ventil $V2$.

Sljedeće što se određuje je kakva je mreža. Iz ovog spoja vidi se da je mreža dobro definirana, te za nju vrijede Kirchhoffovi zakoni struja i napona koji se koriste za analizu rada.

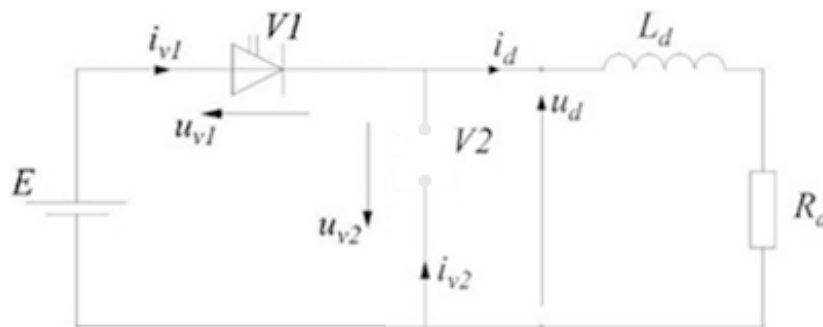
Interval A: ($0 \leq t \leq \alpha T$)

$$i_d = i_{v1} + i_{v2} \quad (3-1)$$

$$E = u_{v1} - u_{v2}$$

$$E = u_{v1} - u_d \quad (3-2)$$

$$0 = u_{v2} + u_d$$



Slika 3.3. Shema spoja mreža

U prvom intervalu vodi ventil $V1$, a ventil $V2$ ne vodi, zato što rade protutaktno. Ako ventil $V1$ vodi, kroz njega teče struja, a pošto se radi o modelu, napon upravljivog ventila će biti $u_{v1} = 0$. Shodno tome, struja ventila $V2$ će biti $i_{v2} = 0$.

Kada su poznati podatci, uvrštavaju se u Kirchhoffove zakone struja (3-1) i napona te se dobiju sljedeći izrazi (3-2):

$$u_d = E = -u_{v2}$$

$$i_d = i_{v1}$$

Pošto se R_d zanemaruje, struja i_L se može zapisati kao struja i_{v1} i iz toga, konstitutivna relacija za induktivitet glasi:

$$u_d = L \frac{di_{v1}}{dt} \quad (3-3)$$

Sređivanjem konstitutivne relacije (3-3), te integriranjem, dobije se struja i_{v1} za interval A:

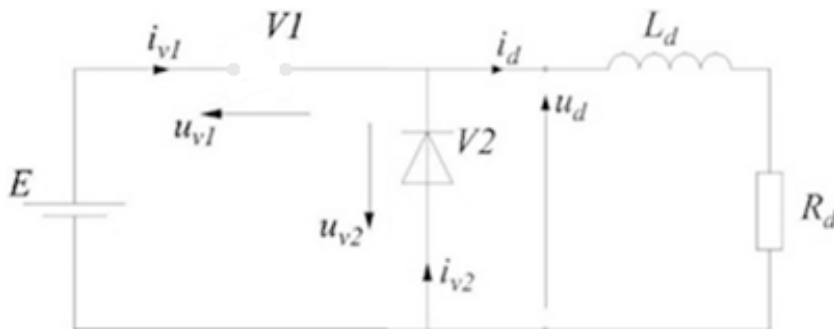
$$u_d \int_0^t dt = L \int_0^{i_{v1}} di_{v1}$$

$$i_{v1} = \frac{u_d}{L} t + i_{v1}(0) \quad (3-4)$$

U izrazu (3-4), $i_{v1}(0)$ je struja trošila u trenutnu 0, odnosno početna vrijednost struje induktiviteta; L_d u intervalu A. Struja $i_{v1}(0)$ može se zapisati kao struja I_1 te nakon sređivanja izraza (3-4), struja i_d u intervalu A iznosi:

$$i_d = \frac{u_d}{L} t + I_1$$

Interval B: ($\alpha T \leq t \leq T$)



Slika 3.4. Shema spoja intervala B

U drugom intervalu ne vodi upravljivi ventil $V1$, a idealna dioda $V2$ vodi. Kroz ventil $V2$ će teći struja, pa će napon na njemu biti $u_{v2} = 0$, a struja ventila $V1$ će biti $i_{v1} = 0$. Za interval B također se uvrštava u početne jednadžbe Kirchhoffovog zakona pa se dobije sljedeće:

$$u_{v1} = E$$

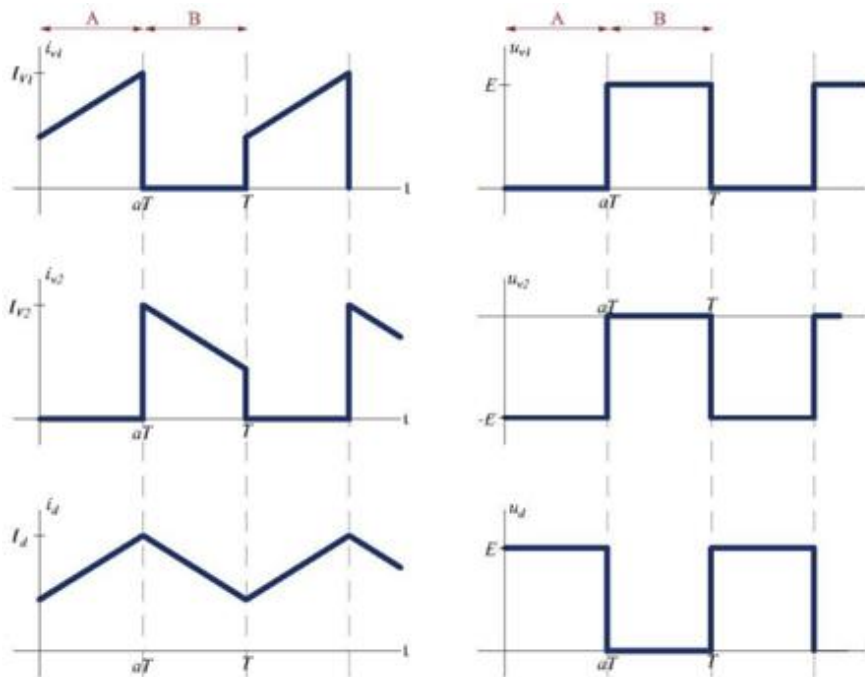
$$u_d = 0$$

$$i_d = i_{v2} = i_L$$

Zbog ustaljenog stanja ovog kruga, valni oblik struje mora biti jednak na početku i na kraju periode rada. Zato za struju I_2 , što je početna vrijednost struje induktiviteta; L_d u intervalu B, a završna vrijednost struje induktiviteta; L_d u intervalu A, slijedi:

$$I_2 = i_{v1}(\alpha T)$$

Svi valni oblici nacrtani prema dobivenim izrazima prikazani su na slici 3.5.



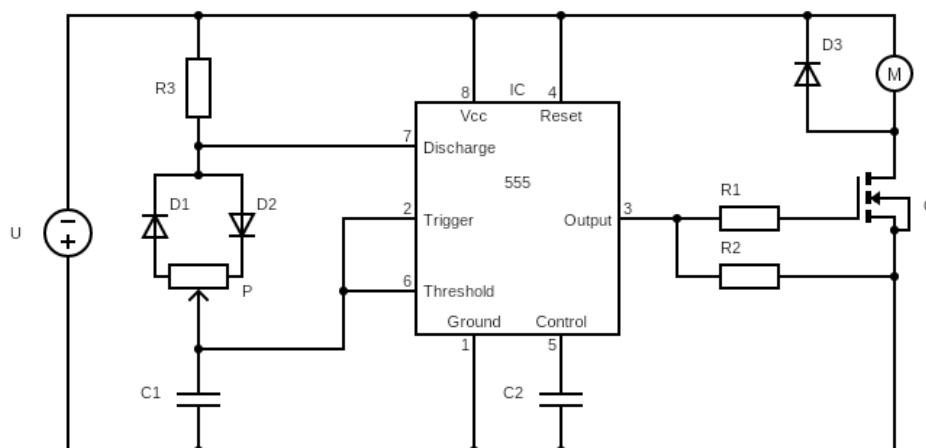
Slika 3.5. Valni oblici napona i struja dobiveni analizom

4. IZRADA SILAZNOG PRETVARAČA 12 V/70 mA

Za izradu ovog pretvarača potrebna je shema koja je preuzeta sa interneta [1] i prilagođena te su prema njoj odabrane sve komponente.

Cijeli spoj se sastoji od dva podsustava, upravljački i pretvarački podsustav. Svaki ima određenu funkciju koja dovodi do ispravnog rada pretvarača.

Shema spoja silaznog pretvarača dana je slikom 4.1.



Slika 4.1. Shema spoja silaznog pretvarača

Najvažniji dio izrade ove makete bio je izabrati komponente koje su potrebne kako bi se postiglo željeno ustaljeno stanje trošila. Pošto se rad bazira na upravljanju motora male snage, te su ulazni i izlazni parametri mali, korištene su komponente koje su prilagođene takvim uvjetima rada.

U tablici 4.1 dan je popis korištenih komponenata.

Tablica 4 Pogreška! U dokumentu nema teksta navedenog stila..1. Popis korištenih komponenata

Komponenta	Količina	Oznaka	Vrijednost
integrirani krug (IC)	1	NE555P	
tranzistor (Q)	1	IRF540N	
diode (D ₁ , D ₂ , D ₃)	3	FR207	
otpornici (R ₁ , R ₂ , R ₃)	3		1 kΩ
potenciometar (P)	1		100 kΩ
kondenzator (C ₁)	1		680 pF
kondenzator (C ₂)	1		100 nF

4.1. Pretvarački dio

Pretvarački dio ovog spoja ima za ulogu prilagoditi karakteristike mreže na koju je spojen s karakteristikama pogodnim za rad motora. Sastoji se od MOSFET-a i diode koja je antiparalelno spojena s motorom. MOSFET je modeliran upravljivim ventilom, a dioda idealnom diodom.

Analiza rada modela upravljačkog podsustava prikazana je u trećem poglavlju.

4.2. Upravljački dio

Upravljački dio upravlja pretvaračkom sklopnom komponentom, odnosno upravljivim ventilom. Glavni zadatak je davati upravljačke impulse MOSFET-u, koji će sklapati uvijek istom sklopnom frekvencijom. MOSFET na svoju upravljačku elektrodu dobiva impulse iz integriranog kruga, odnosno tajmera NE555P. Amplituda impulsa se neće mijenjati, zato što je uloga NE555P integriranog kruga da na svom izlazu daje stabilni pravokutni napon, stanja 0 ili 1. U stanju 0, MOSFET ne vodi, a u stanju 1, MOSFET vodi.

Amplituda impulsa se ne može mijenjati, ali trajanje stanja 1 može. Promjena trajanja stanja 1 se mijenja položajem potenciometra. Kako se mijenja otpornost tako se mijenja brzina vrtnje motora.

4.3. Trošilo

Pošto je riječ o maketi, za trošilo je izabran istosmjerni motor male snage.

U analizi rada, trošilo je modelirano serijskim spojem induktiviteta i otpora.

Za maketu je korišten motor FK-180SH-14180. Napajanje motora prilagođeno je karakteristikama pretvarača. Specifikacije motora su prikazane u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Specifikacije trošila

Izlazni napon	5 – 12 V
Nazivni napon	12 V

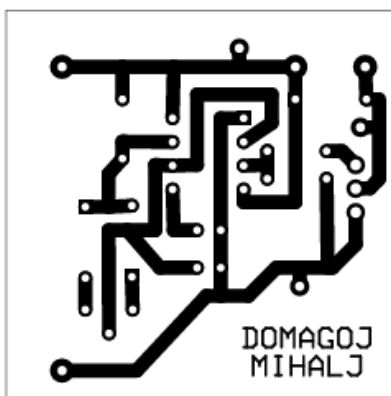
Neopterećeni motor	
Struja	0.07 A
Broj okretaja	12000 o/min

5. SASTAVLJANJE MAKETE PRETVARAČA 12 V/70 mA

Nakon odabira i pripreme svih potrebnih komponenti, slijedi spajanje sheme. Kroz poglavlja 5.1 i 5.2 je objašnjen postupak izbora komponenti pretvarača. Pošto će se rad bazirati na mjerenjima na dvije makete pretvarača, kroz završni rad [2] je napravljena maketa pretvarača 12V/200 mA, a kroz ovaj rad 12V/70 mA s istim upravljačkim krugom, baziranim na integriranom krugu NE555.

5.1. Izrada tiskane pločice

Prva verzija pretvarača spojena je na eksperimentalnu pločicu. No zbog lakšeg izvođenja mjerenja, kao i točnijih rezultata pretvarač je izrađen na tiskanoj pločici. Tiskana pločica je nacrtana na osnovu sheme sa slike 4.1 u programu ExpressPCB. Veze iskane pločice (eng. PCB ili Printed Circuit Board) su prikazane na slici 5.1. Pločica se sastoji od plastične osnove koja je premazana bakrenim premazom. Na bakreni premaz se lijepi proziran papir sa shemom, koja se polaže ispod UV lampe i ozračuje se 5 minuta. Postupak se može vidjeti na slici 5.2.



Slika 5.1. Ispisana shema spoja



Slika 5.2. Osvjetljivanje pločice UV lampom

Nakon osvjetljavanja, pločica se podvrguje postupku jetkanja. Jetkanje se provodi sa kemikalijom solnom kiselinom. Slika 5.3 prikazuje pločicu nakon osvjetljenja UV lampom i prije uranjanja u kiselinu. Na slici 5.4 prikazano je kako solna kiselina jetka, odnosno nagriza dijelove bakrenog premaza koji nije bio zaštićen i dobiva se željeni izgled pločice.

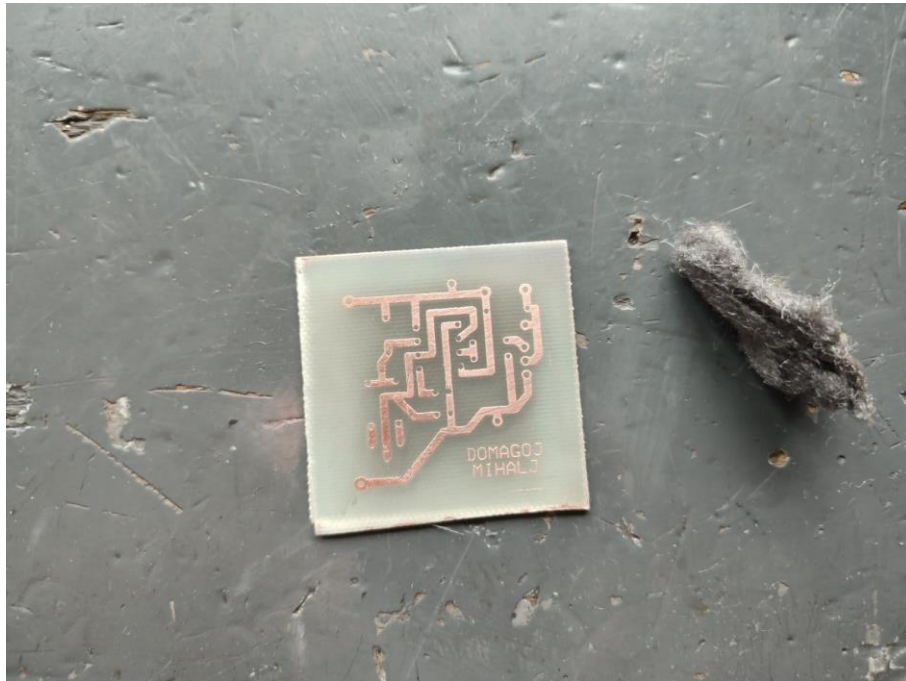


Slika 5.3. Osvjetljena pločica



Slika 5.4. Jetkanje pločice u solnoj kiselini

Posljednji korak u pripremi pločice je skidanje zaštitnog sloja sa preostaloga bakrenog premaza i bušenje pločice. Zaštitni sloj se skida čeličnom vunom. Razlog skidanja je da bi se lem mogao zalemiti za bakrene vodove. Postupci skidanja zaštitnog sloja i bušenja su prikazani na slikama 5.5. i 5.6.



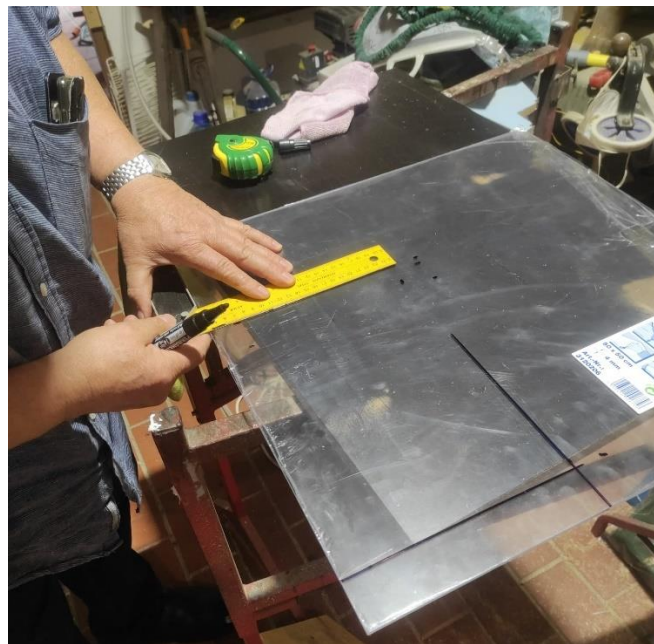
Slika 5.5. Skidanje zaštitnog sloja



Slika 5.6. Bušenje pločice

5.2. Izrada postolja makete

Postolje makete izrađeno je od pleksiglasa. Na pleksiglasu su, na osnovu veličine ostalih komponenti, ucrtane dimenzije postolja koje su $20 \times 30 \text{ cm}$. Najpogodniji način za rezanje pleksiglasa je rezanje ubodnom pilom. Postolje je, također, izdignuto za 3 cm. Ono je realizirano savijanjem krajeva pleksiglasa prema dolje zagrijavanjem industrijskim puhalom na vrući zrak. Na kraju postupka, rubovi postolja su obrađeni i odstranjene su sve nepravilnosti. Slike 5.7. i 5.8. prikazuju dio postupka izrade postolja.

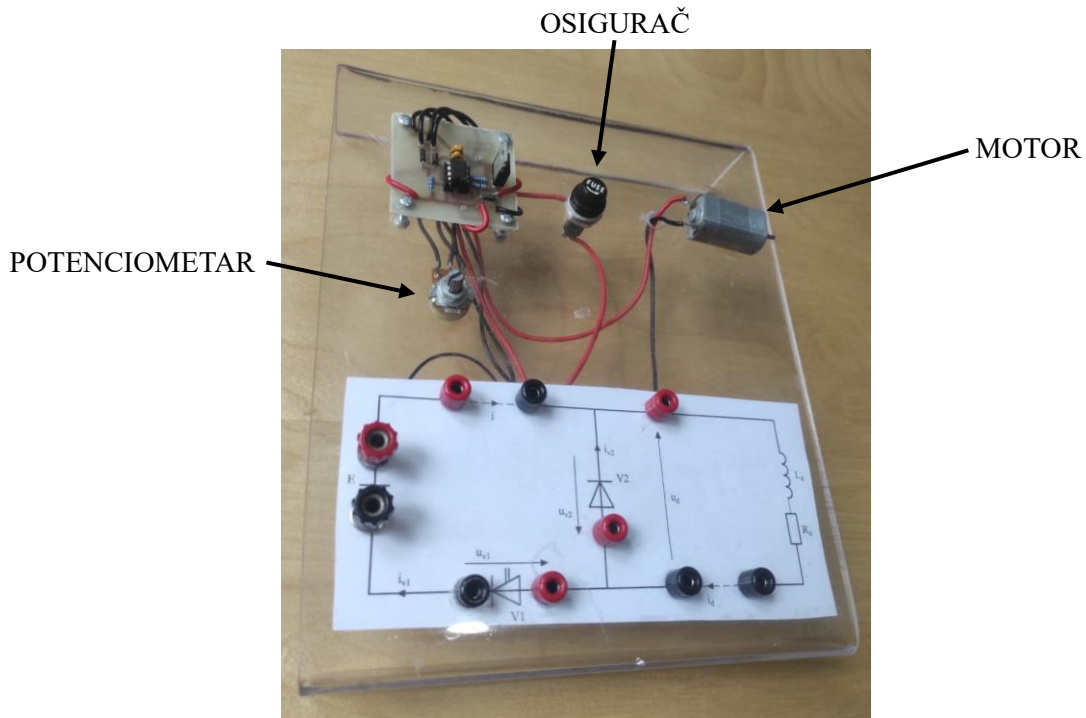


Slika 5.7. Ucertavanje dimenzija postolja



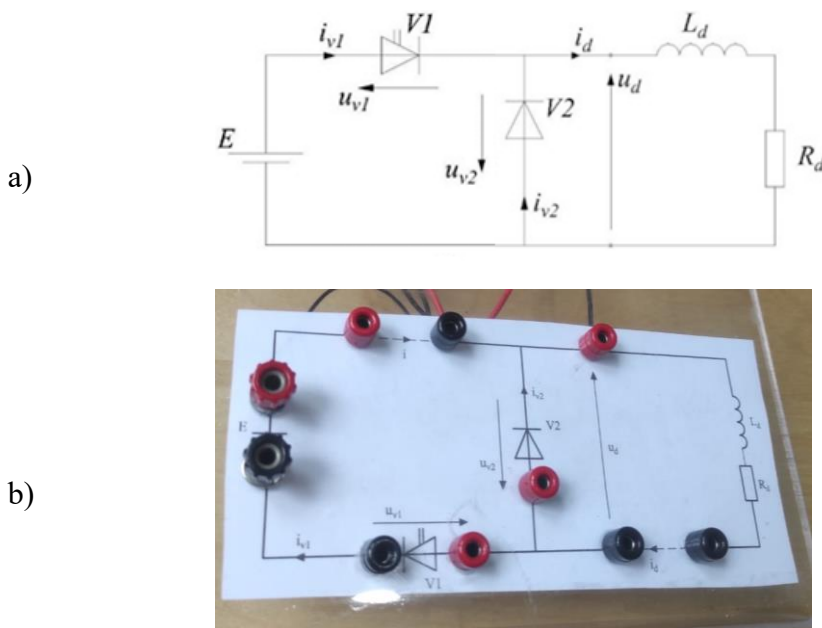
Slika 5.8. Zagrijavanje postolja prije savijanja

Na posljjetku, na postolje je zalijepljena shema spoja, na kojoj su prikazana mjesta priključaka uz pomoć kojih je pločica izbušena. Nakon svih priprema, maketa je sastavljena u jednu cjelinu. U spoj je također dodan osigurač od $1 A$ koji osigurava spoj od prekostruja. Finalni izgled makete prikazan je na slici 5.9. U daljnjem tekstu napravljena maketa se označava kao maketa A.



Slika 5.9. Konačan izgled makete

5.3. Usporedba modela i makete



Slika 5.10. Usporedba sheme iz: a) analize i b) makete

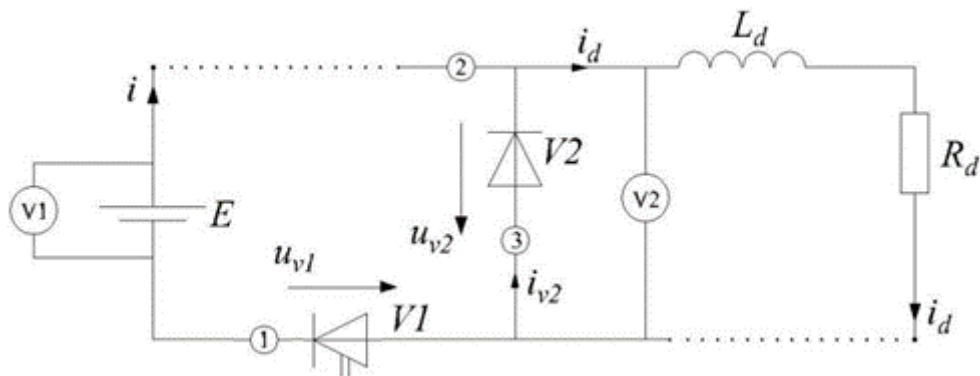
Na slikama 5.10. a) i b) jasno se može vidjeti razlika između sheme spoja koja je analizirana i sheme spoja koja je izrađena u maketi. U shemi koja je analizirana, upravljački ventil se nalazi u tzv. gornjoj grani, a na maketi MOSFET je izveden u donjoj grani. Razlog takvog izvoda je upravljanje MOSFET-a fiksiranjem napona elektrode uvoda (eng. source). Tako se upravlja promjenom napona upravljačke elektrode zbog čega se u shemi simbol upravljivog ventila V1 spaja na „-“ priključnicu istosmjernog naponskog izvora E na ulazu.

5.4. Izrada silaznog pretvarača 12V/200mA

Za ispunjavanja zadatka završnog rada, točnije osmišljavanje predložka laboratorijske vježbe za dva radna mjesta, u rad je uključena gotova maketa koja je izrađena u završnom radu studentice Dore Borić [2]. Uz minimalne preinake, maketa je prilagođena i usklađena sa izrađenom maketom iz ovog rada, te je spremna za uporabu. Kroz rad, maketa je nazvana maketom B.

6. MJERENJE U LABORATORIJU

Kao što je ranije spomenuto, mjerenja su određena isprva na eksperimentalnoj pločici. Spoj je napajan preko laboratorijskog istosmjernog napajanja od 12 V. Motor je tijekom svih mjerenja bio neopterećen, tj. bio je u praznom hodu.



Slika 6.1. Shema spoja za provedbu mjerenja

Na slici 6.1. označene su sve veličine koje se mjere i pozicije na kojima su postavljeni mjerni instrumenti i mjerne sonde za valne oblike. U shemi su dva voltmetra, voltmetar $V1$ za mjerenje ulaznog napona E i voltmetar $V2$ za mjerenje srednje vrijednosti napona trošila; $U_d(0)$.

Za mjerenje signala na osciloskopu, korištene su dvije mjerne sonde za mjerenje napona, te jedna strujna sonda za mjerenje valnog oblika struje. Prvi kanal osciloskopa spojen u točku 1, a njegova masa u točku 3. Sa njime se mjeri valni oblik napona na ventilu $V1$, odnosno na MOSFET-u. Na drugi kanal je spojena druga sonda koja je spojena u točku 2, a masa je zajednička točka 3. Zbog ispravnosti signala ventila $V1$, na osciloskopu je uključena opciju *invert* da bi signal bio prikazan kakav zapravo jest.

Isprekidana linija na slici 6.1. označena strujom; i_d prikazuje mjesto gdje je postavljena strujna sonda i na tom mjestu je mjeren valni oblik struje trošila. Na isprekidanoj liniji koja je označena strujom i mjeri se ukupna struja koju pretvarač uzima iz izvora.

Prije početka mjerenja potrebno je odabrati nekoliko radnih točaka, odnosno nekoliko različitih napona trošila. Različiti naponi trošila značile su i različite brzine vrtnje motora. Takvi naponi trošila postignuti su promjenom položaja potencijometra. Cijeli postupak upravljanja je objašnjen u poglavlju 4.2.

Za mjerenje su izabrane tri radne točke na kojima su provedena mjerenje valnih oblika napona ventila $V1$ i $V2$, te valnog oblika struje trošila; i_d . Iz valnih oblika iščitane su vrijednosti frekvencije rada sklopa; f_s , vrijeme vođenja ventila $V1$; T_{V1} te periode rada; T_s . Postupak iščitavanja tih vrijednosti objašnjen je u poglavlju 6.3. Iznosi srednjih vrijednosti ulaznog napona; E , napona trošila; U_d , ulazne struje; I i struje trošila; I_d su iščitane sa mjernih instrumenata. Rezultati mjerenja za obje makete prikazane su u poglavljima 6.1 i 6.2.

6.1. Rezultati mjerenja za maketu A

Izgled postave za mjerenje u laboratoriju prikazan je na slici 6.2.



Slika 6.2. Spoj makete prilikom mjerenja u laboratoriju

Slijede rezultati mjerenja za maketu A:

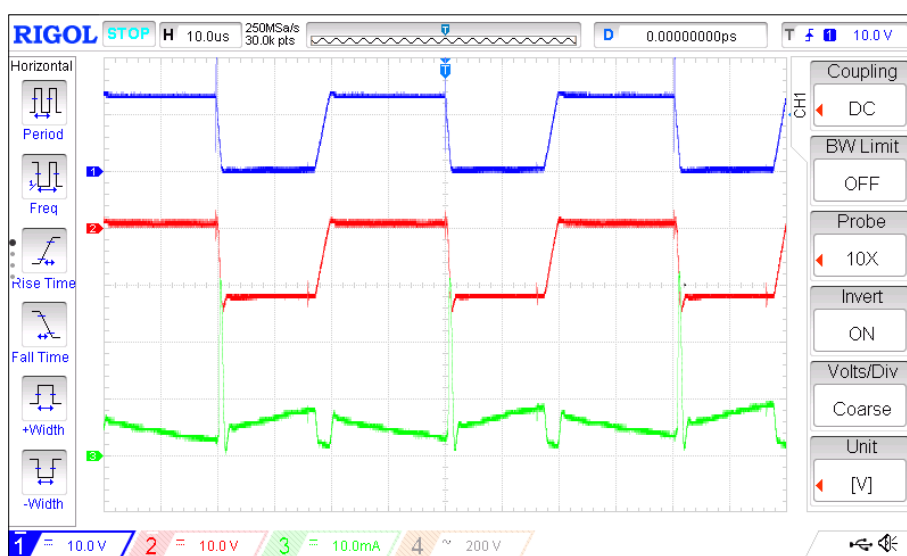
Tablica 6.1. Rezultati mjerenja za tri radne točke očitane sa instrumenata

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
E	[V]	11.98	11.99	11.94
U_d	[V]	5.02	7.02	9.04
I	[mA]	47.60	54.40	61.50
I_d	[mA]	45.30	47.04	49.10

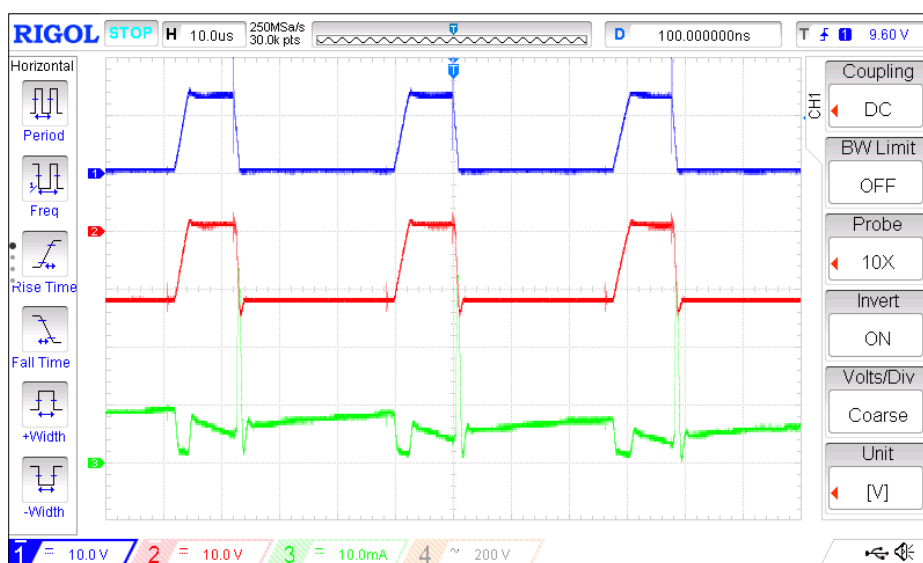
Tablica 6.2. Rezultati mjerenja za tri radne točke očitane sa osciloskopa

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
f_s	[kHz]	24.92	24.04	26.45
T_s	[μ s]	40.2	41.6	37.8
T_{V1}	[μ s]	17.5	24.7	27.6

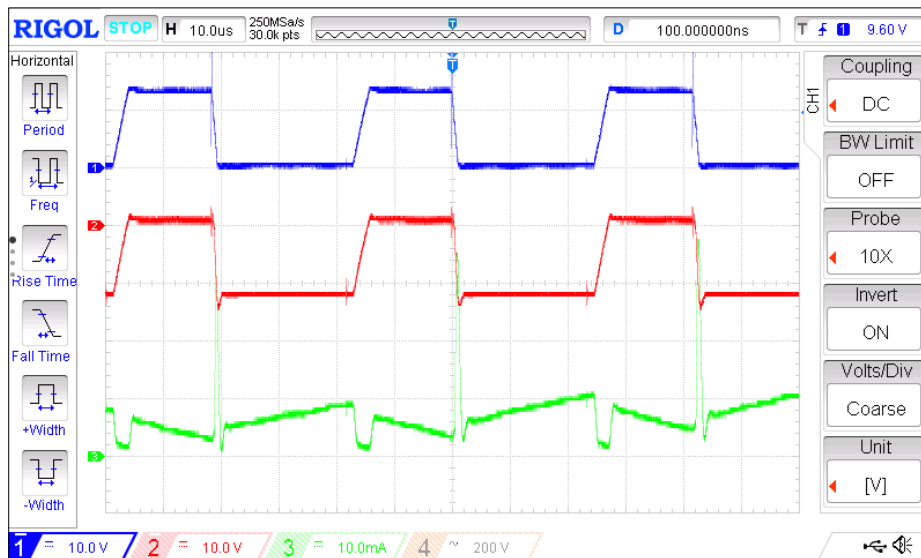
Slike 6.3 – 6.5 prikazuju valne oblike napona ventila $V1$ plavom bojom, ventila $V2$ crvenom bojom i struje trošila zelenom bojom.



Slika 6.3. Valni oblici za prvu radnu točku



Slika 6.4. Valni oblici za drugu radnu točku



Slika 6.5. Valni oblici za treću radnu točku

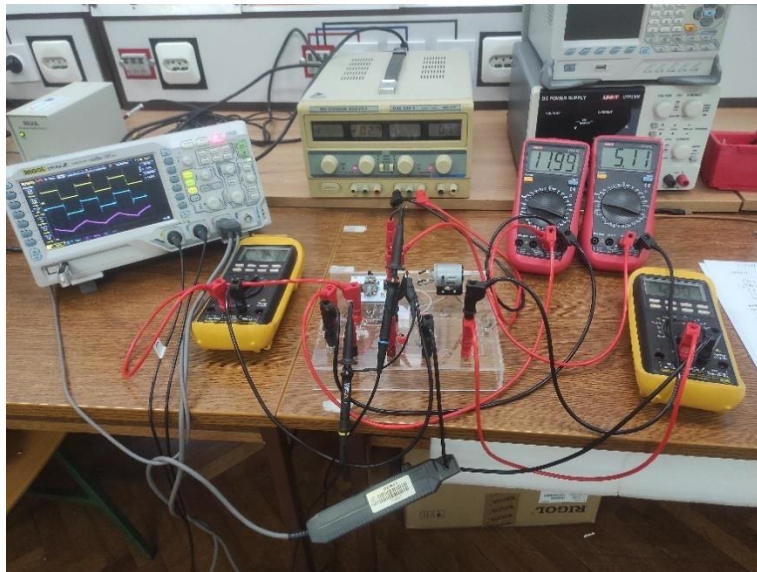
Iz valnih oblika napona ventila, za svaku radnu točku, kako je napon trošila veći, tako se povećava vrijeme vođenja MOSFET-a, a smanjuje se vrijeme vođenja diode.

Frekvencija rada pretvarača je oko 25 kHz , što je pogodno za primjenu pretvarača u audio i video uređajima gdje se traži da frekvencija elektro-magnetnih pojava stvorenih radom prigušnice budu u tzv. nečujnom području.

Struja trošila u trenutcima uklapanja MOSFET-a ima propade, odnosno struja pada približno nuli. Također se vidi iz napona, u trenutku propada struje, napon MOSFET-a ima spori rast. Razlog ovakvoj pogrešci mogu biti zbog upravljačkih krugova koji nisu zadovoljavajuće dizajnirani ili zbog postojanja smetnje pri mjerenjima. U slučaju kada MOSFET prestane voditi, također postoje smetnje, ali su tu manje zamjetne nego u prvom slučaju.

6.2. Rezultati mjerenja za maketu B

Prikaz postupka mjerenja dan je na slici 6.6.



Slika 6.6. Spoj makete prilikom mjerenja u laboratoriju

Slijede rezultati mjerenja za maketu B:

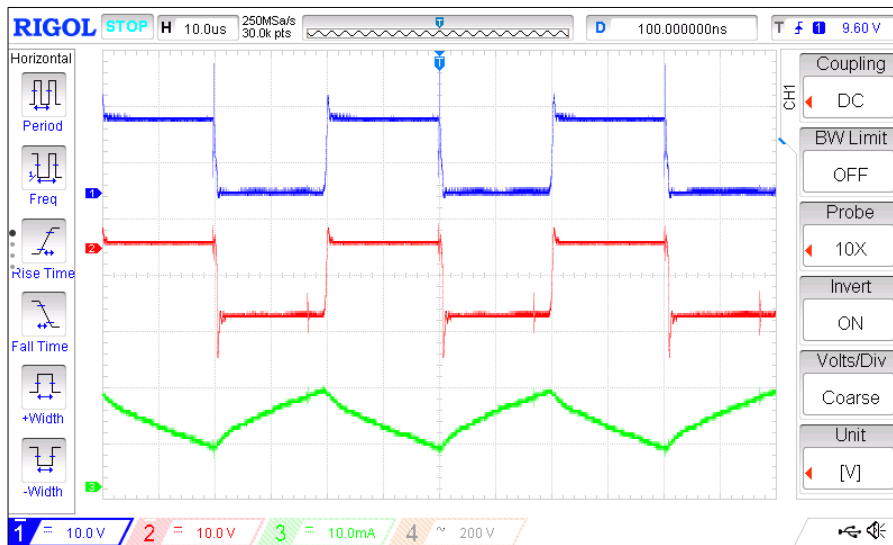
Tablica 6.3. Rezultati mjerenja za tri radne točke očitane sa instrumenata

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
E	[V]	11.97	11.91	11.99
U_d	[V]	5.02	7.00	9.04
I	[mA]	103.20	126.00	145.60
I_d	[mA]	134.50	136.80	140.20

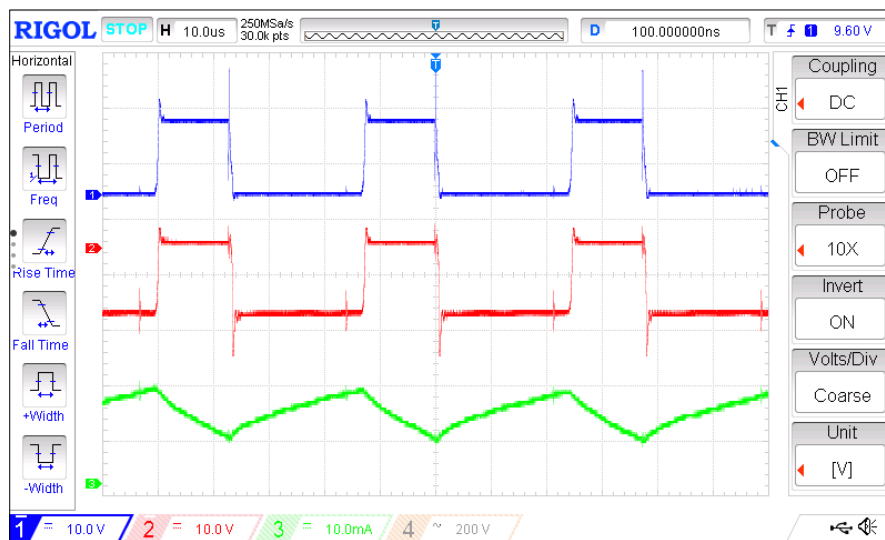
Tablica 6.4. Rezultati mjerenja za tri radne točke očitane sa osciloskopa

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
f_s	[kHz]	24.69	26.81	27.85
T_s	[μ s]	40.50	37.30	35.90
T_{V1}	[μ s]	19.80	24.00	28.70

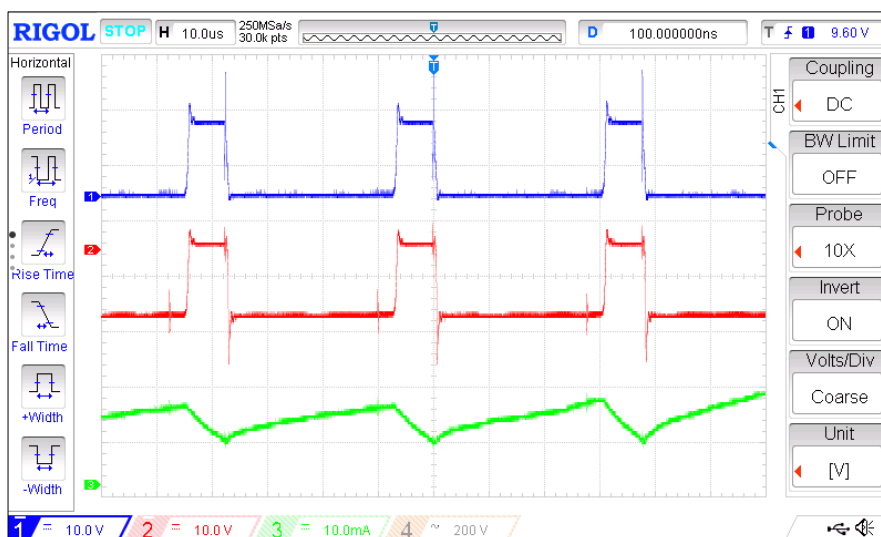
Slike 6.7 – 6.9 prikazuju valne oblike napona ventila $V1$, ventila $V2$ i struje trošila.



Slika 6.7. Valni oblici za prvu radnu točku

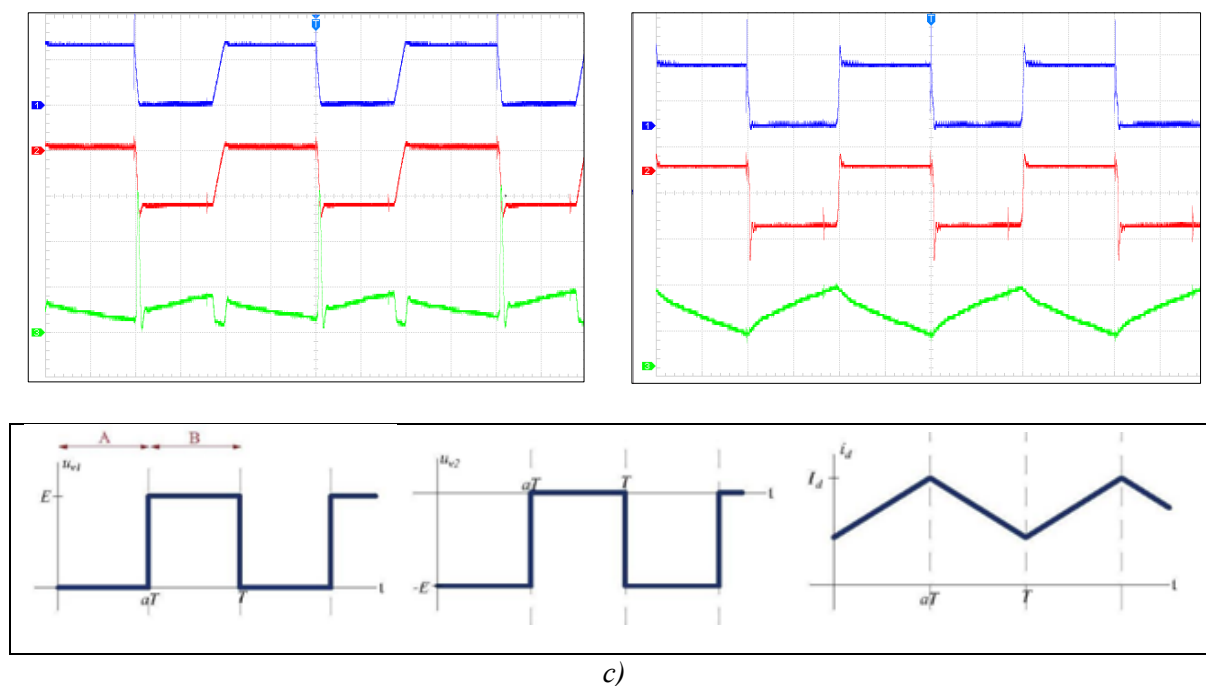


Slika 6.8. Valni oblici za drugu radnu točku



Slika 6.9. Valni oblici za treću radnu točku

6.3. Usporedba rezultata mjerenja i analize rada



Slika 6.10. Uspoređivanje valnih oblika maketa i provedene analize za jednu odabranu radnu točku

Usporedbom valnih oblika maketa i provedene analize, jasno se može vidjeti da se valni oblici poklapaju iz čega se zaključuje da su makete ispravno izrađene. Usporedbom valnih oblika makete A i makete B, vidi se da su valni oblici na maketi B sličniji valnim oblicima dobivenim analizom rada. Na maketi A se jasno vide propadi struje u trenutcima sklapanja MOSFET-a, dok na maketi B propada nema i nagib napona je manji, približno pod 90° .

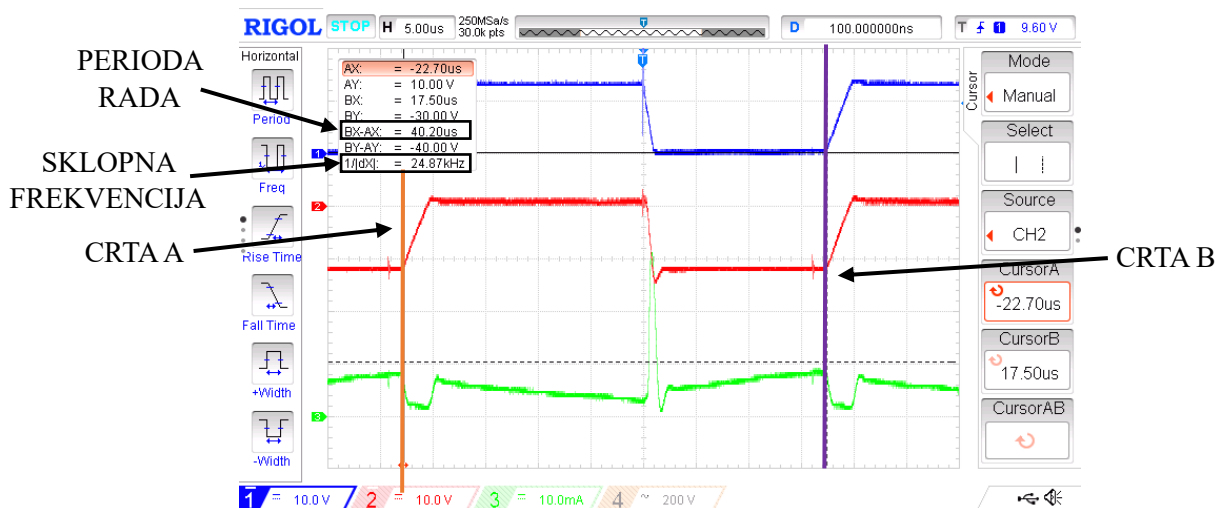
6.4. Faktor vođenja

Pošto je maketa izrađena od realnih komponenti, očekuju se odstupanja stvarnih rezultata od očekivanih. Takvo odstupanje najbolje se može iščitati iz faktora vođenja α . Faktor vođenja je omjer vremena vođenja upravljivog ventila u odnosu na period rada [8]. Isto tako, faktor vođenja se može odrediti iz upravljačke karakteristike (3.x). Očekivani faktor vođenja se računa kao omjer izlaznog i ulaznog napona (7-1), a stvarni faktor vođenja računa se iz očitanih vrijednosti osciloskopa kao omjer vremena vođenja MOSFET-a i ukupne periode rada (7-2).

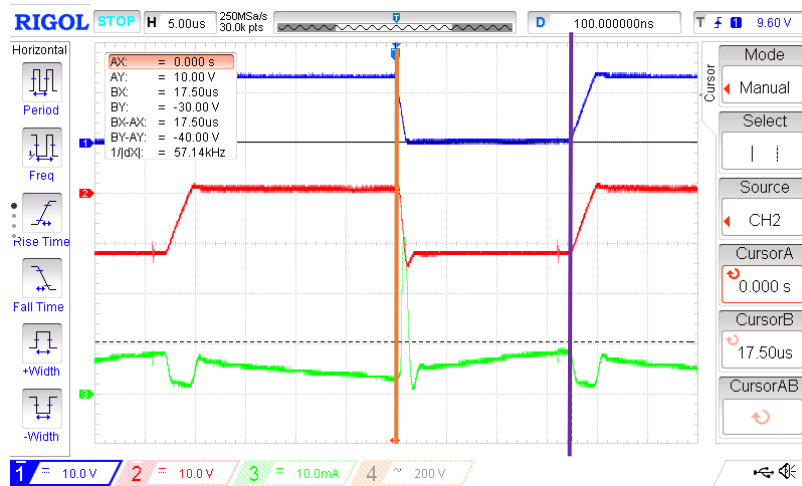
$$\alpha_{oček.} = \frac{U_d}{E} \quad (7-1)$$

$$\alpha_{stv.} = \frac{T_{V1}}{T_s} \quad (7-2)$$

Vrijednosti vremena vođenja ventila V_1 i ukupnog perioda (T_s) iščitava se direktno sa signala napona. Funkcijom *cursor* na osciloskopu se uključuje funkcija sa kojom se mjeri udaljenost između dvije paralelne crte (crta A - narančasta i crta B - ljubičasta) koje se mogu namješati po želji. Crta A postavlja se na početak perioda, odnosno na početak vođenja ventila V_1 , a crta B se postavlja na kraj perioda. Cijeli postupak, kao i duljina periode rada koji je označen sa BX-AX, prikazan je na slici 6.10. Slično se očitava i vrijeme vođenja ventila V_2 . Crta A je postavljena na početak vođenja ventila V_2 , a crta B ostaje na istom mjestu kao i na prethodnoj slici. Taj postupak je prikazan na slici 6.11. U tablicama 6.2. i 6.4. prikazana su očitavanja svih provedenih mjerenja.



Slika 6.10. Očitavanje periode rada



Slika 6.11. Očitavanje vremena vođenja ventila V2

Vrijeme vođenja ventila V1 računa se prema izrazu:

$$T_{V1} = T_S - T_{V2}$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz tablica 6.1. – 6.4. u izraze (7-1) i (7-2) za maketu A za 1. radnu točku dobiju se rezultati:

$$\alpha_{oček.} = \frac{U_d}{E} = \frac{5.02}{11.98} = 0.42 \quad (7-1)$$

$$\alpha_{stv.} = \frac{T_{V1}}{T_S} = \frac{17.50}{40.20} = 0.43 \quad (7-2)$$

Rezultati za ostale makete i radne točke prikazane su u tablici 7.3.

Tablica 6 Pogreška! U dokumentu nema teksta navedenog stila..3. Vrijednosti faktora vođenja za maketu A i maketu B

	1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
$\alpha_{oček.}$	0.42	0.58	0.76
$\alpha_{stv.}$	0.43	0.59	0.73
$\alpha_{oček.}$	0.42	0.59	0.75
$\alpha_{stv.}$	0.49	0.64	0.80

Za usporedbu faktora vođenja, najpogodnije je koristiti relativnu pogrešku. Relativna pogreška računa se prema izrazu (7-3). U tablici 7.4 prikazane su relativne pogreške za sva mjerenja.

$$r_P = \frac{|\alpha_{stv.} - \alpha_{oček.}|}{\alpha_{oček.}} * 100 \% = \frac{0.43 - 0.42}{0.43} * 100 \% = 2.33 \quad (7-3)$$

Tablica 6.4. Relativna pogreška faktora vođenja

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
r_{pa}	[%]	2.33	1.69	4.11
r_{pb}	[%]	14.29	7.81	6.25

Maksimalna relativna pogreška za maketu A iznosi 4.11 %, a za maketu B iznosi 14.29 %. Iz toga se vidi da postoji odstupanje stvarne vrijednosti faktora vođenja od očekivane i da bi se ostvarila stvarna vrijednost, faktor vođenja se mora povećati u prosjeku 3 % za maketu A, a za maketu B u prosjeku 10 %.

7. ZAKLJUČAK

Mjerenjem je dokazano da je na cijelom području rada izlaznog napona od 5.02 V do 9.04 V pretvarač u kontinuiranom režimu rada. Pretvarač radi na frekvenciji od oko 25 kHz što je frekvencija koja je van čujnog spektra, što omogućuje ugradnju u uređaje koji se koriste u svakodnevnom životu.

Utvrđeno je da promjenom izlaznog napona dovodi do promjene brzine istosmjernog motora. Promjena vremena vođenja MOSFET-a utječe na povećanje brzine vrtnje motora koje je ostvareno pulsno-širinskom modulacijom.

Analizom faktora vođenja, vidi se da postoji odstupanje očekivanih od stvarnih vrijednosti faktora vođenja. Za maketu A najveće odstupanje iznosi 4.11 %, a za maketu B 14.29 % s obzirom na očekivanu vrijednost što je tehnički prihvatljivo.

Usporedbom valnih oblika struje trošila iz analize i mjerenja makete A može se zaključiti da u upravljačkom krugu makete A postoje nesavršenosti što dovodi do propada struje prilikom uklapanja MOSFET-a. Tu nesavršenost uzrokuju loše dizajnirani upravljački krugovi ili smetnje prilikom provedbe mjerenja.

LITERATURA

- [1] "PWM DC Motor Speed and LED Dimmer Circuit Using 555 IC," Elonics, dostupno na: <https://elonics.org/pwm-dc-motor-speed-and-led-dimmer-circuit-using-555-ic/> [08.06.2024.]
- [2] D. Borić, "Izrada istosmjernog silaznog pretvarača za napajanje istosmjernog motora male snage upravljano s LM555CN", Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2023. dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:576414>
- [3] M. Vukšić, Elektronički pretvarači, Sveučilište u Splitu, Split, 2019.
- [4] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Kigen d.o.o. Zagreb, Zagreb, 2010.
- [5] A.W. Cristri, R.F. Iskandar, Analysis and Design of Dynamic Buck Converter with Change in Value of Load Impedance, Engineering Physics International Conference, EPIC 2016, sv. 170. str. 398-403, Indonesia, 2017,
- [6] M. Ayyanathan, DC Motor Speed Control Using PWM, International Journal of Innovative Science and Research Technology, Vol. 3, Issue 2, veljača, 2018. dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/338116979_DC_Motor_Speed_Control_Using_PWM#fullTextFileContent
- [7] C. P. Darji, Design of PWM Using NE-555, Department Of Electronics And Communicationfaculty Of Technologydharmsinh Desai University, 2020., dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/347574141_DESIGN_OF_PULSE_WIDTH_MODULATOR_USING_NE-555#fullTextFileContent [12.08.2024.]
- [8] Weik, M.H. (2000). duty cycle. In: Computer Science and Communications Dictionary. Springer, Boston, MA., dostupno na: https://doi.org/10.1007/1-4020-0613-6_5714

POPIS OZNAKA

E	napon izvora
$V1$	ventil 1
$V2$	ventil 2
i_d	struja trošila
i_{V1}	struja kroz ventil 1
i_{V2}	struja kroz ventil 2
U_d	napon trošila
u_{v1}	napon na ventilu 1
u_{v2}	napon na ventilu 2
L_d	induktivnost trošila
R_d	otpornost trošila
α	faktor vođenja
$\alpha_{oček.}$	očekivani faktor vođenja
$\alpha_{stv.}$	stvarni faktor vođenja
T_S	period rada
T_{V1}	vrijeme vođenja upravljivog ventila
f_S	frekvencija rada sklopa

SAŽETAK

Analiziran je rad silaznog pretvarača u kontinuiranom režimu rada. Napisane su jednadžbe mreže i prikazani su očekivani valni oblici. Napravljena je maketa silaznog pretvarača 12 V / 70 mA i opisani su podsustavi pretvarača. Opisan je cijeli postupak izrade makete, od izrade tiskane pločice, te sastavljanje makete. Izmjerene su i analizirane veličine i valni oblici napona i struja ventila i trošila za maketu koja je izrađena u radu i maketu koja je preuzeta za potrebe rada. Također su izvršena mjerenja na osciloskopu za određivanje faktor vođenja i uspoređene su razlike između stvarnog i očekivanog faktora vođenja za obje makete.

KLJUČNE RIJEČI: faktor vođenja, istosmjerni silazni pretvarač, širinsko impulsno upravljanje, poluvodički učinski ventili

SUMMARY

TITLE:

Drafting of a template for a laboratory exercise on the basis of physical models of buck converters and inductive load

The operation of a buck converter in continuous mode has been analyzed. Network equations were written, and the expected waveforms were presented. A 12 V / 70 mA buck converter model was built, and the subsystems of the converter were described. The entire process of model creation was explained, from the production of the printed circuit board to the assembly of the model. Voltage and current values and waveforms for the switch and load were measured and analyzed for both the model built in this work and the model acquired for the purpose of the study. Additionally, oscilloscope measurements were performed to determine the duty cycle, and the differences between the actual and expected duty cycles for both models were compared.

KEY WORDS: duty cycle, pulse width modulation, step-down DC converter, semiconductor power switches

ŽIVOTOPIS

Domagoj Mihalj rođen je u Slavonskom Brodu 06.11.2001. godine. Pohađao je Osnovnu školu Ivan Filipović u Velikoj Kopanici u kojoj je kroz nekoliko županijskih natjecanja iz matematike pokazao znanje i volju za učenjem. Pri završetku osnovne škole pokazuje interes za tehničkim znanostima, odnosno elektrotehnici te upisuje Tehničku školu Slavonski Brod, smjer elektrotehničar u 2016. godini. Kroz srednju školu pokazao je niz znanja i svojim odličnim uspjehom upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku 2020. godine. Na fakultetu je upisao smjer Preddiplomskog sveučilišnog studija Elektrotehnike, smjer elektroenergetika i nada se nastaviti školovanje u tom području.

Domagoj Mihalj

PRILOG

P1 – predložak za laboratorijsku vježbu

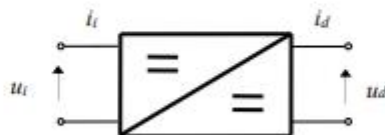
I. vježba

I. vježba

IZRAVNI ISTOSMJERNI PRETVARAČI NAPONA

1.1. UVOD

Izravni istosmjerni pretvarači napona električki su uređaji koji povezuju dvije istosmjerne mreže različitih napona. Ovisno o modelima pojne mreže i trošila izravnim pretvaračima povezuju se naponski izvor i induktivno trošilo, te strujni izvor i kapacitivno trošilo. Simbol istosmjernog pretvarača napona prikazan je na slici 1.1.



Sl. 1.1. Simbol istosmjernog pretvarača napona.

Dvije osnovne topologije izravnih istosmjernih pretvarača napona silazni su istosmjerni pretvarač (eng. *buck converter*, *step-down converter*) i uzlazni istosmjerni pretvarač (eng. *boost converter*, *step-up converter*). Izraz topologija odnosi se na način na koji su međusobno povezane pretvaračke komponente.

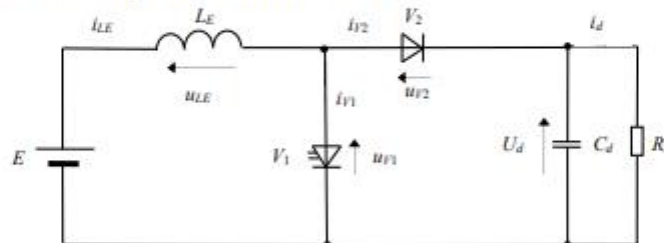
U vježbi treba usporediti karakteristične valne oblike dobivene analizom matematičkog modela i mjerenjima na fizičkom modelu:

- uzlaznog pretvarača napona 27 V/1 A,
- silaznog pretvarača napona 12 V/200 mA ili 12V/70 mA.

1.2. ANALIZA RADA PRETVARAČA

a) Uzlazni pretvarač napona

Pretvaračke komponente modelirane su idealnim ventilima (upravljivi ventil $V1$ i idealna dioda $V2$). Trošilo možemo smatrati naponskim uvorom U_d ($C_d R_d \gg T_s$), slika 1.2. Serijski spoj naponskog izvora i induktiviteta smatrat ćemo strujnim izvorom čija je struja valovita zbog konačne induktivnosti L_E .



Sl. 1.2. Nadomjesna shema spoja uzlaznog pretvarača napona.

Za pretpostavljenu shemu spoja istosmjernog uzlaznog pretvarača prema slici 1.2. vrijede sljedeće jednačbe mreže:

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

$$u_{V1} = u_{V2} + U_d \quad (1-2)$$

$$i_{LE} = i_{V1} + i_{V2} \quad (1-3)$$

U ovisnosti o valnom obliku struje prigušnice razlikujemo kontinuirani i diskontinuirani način rada. U kontinuiranom načinu rada struja induktiviteta veća je od nule tijekom cijele periode rada T_s , dok u diskontinuiranom načinu rada postoji vremenski interval unutar periode rada T_s u kojemu je struja induktiviteta jednaka nuli.

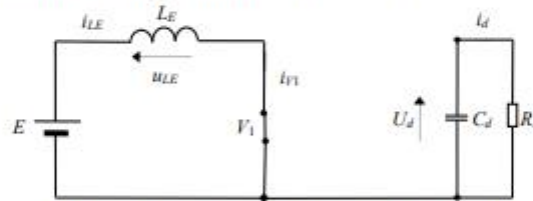
KONTINUIRANI NAČIN RADA

Budući da je struja induktiviteta u kontinuiranom načinu rada stalno veća od nule, u analizi rada postoje dva intervala unutar periode rada:

- interval A; vodi ventil $V1$ i ne vodi ventil $V2$ (slika 1.3.),
- interval B; vodi ventil $V2$ i ne vodi ventil $V1$ (slika 1.4.).

Interval A

Interval A započinje u trenutku $t = 0$ kada je dan impuls za uklapanje ventila $V1$. Budući da u ovom intervalu vodi ventil $V1$ i ne vodi ventil $V2$, pri primjenjivanju jednačbi mreže od (1-1) do (1-3), vrijedit će $u_{V2} = 0$ i $i_{V2} = 0$.



SI. 1.3. Nadomjesna shema spoja pretvarača u intervalu A.

Iz jednačbe (1-1) proizlazi $E = L_E \frac{di_{LE}}{dt}$, te se integriranjem dobije izraz za struju izvora i_{LE} tijekom intervala A:

$$i_{LE} = \frac{E}{L_E} t + i_{LE}(0) \quad (1-4)$$

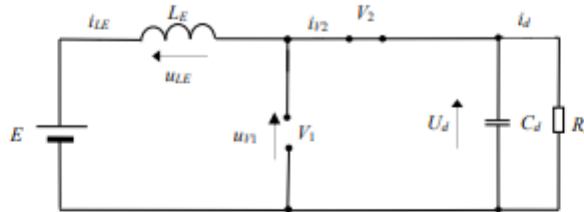
gdje je $i_{LE}(0) = I_0$ početna vrijednost struje induktiviteta.

Struja ventila $V1$ određuje se iz (1-3), $i_{V1} = i_{LE}$, a napon na ventilu $V2$ određuje se iz (1-2), $u_{V2} = -U_d$.

Interval A traje do trenutka t_1 kada ventil $V1$ dobije impuls za isklapanje.

Interval B

Budući da u ovom intervalu vodi ventil $V2$ i ne vodi ventil $V1$, pri primjenjivanju jednadžbi mreže od (1-1) do (1-3), vrijedit će $u_{V2} = 0$ i $i_{V1} = 0$.



Sl. 1.4. Nadomjesna shema spoja pretvarača u intervalu B.

Iz jednadžbe (1-1) i (1-2) proizlazi $E = L_E \frac{di_{LE}}{dt} + U_d$, te se integriranjem dobije izraz za struju izvora i_{LE} tijekom intervala B:

$$i_{LE} = \frac{E - U_d}{L_E} (t - \alpha T_s) + i_{LE}(\alpha T_s) \quad (1-5)$$

gdje je $i_{LE}(\alpha T_s) = I_1$ početna vrijednost struje induktiviteta u intervalu B, a α je faktor vođenja, $\alpha = \frac{T_{V1}}{T_s}$.

Napon na ventilu $V1$ određuje se iz (1-2), $u_{V1} = U_d$, a struja ventila $V2$ određuje se iz (1-3), $i_{V2} = i_{LE}$.

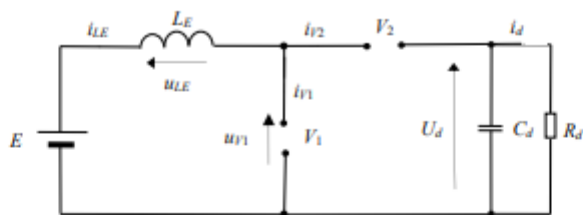
Karakteristični valni oblici u kontinuiranom načinu rada prikazani su na slici 1.6.

Budući da je srednja vrijednost napona induktiviteta u periodičkom režimu rada jednaka nuli, $U_{LE}(0) = 0$, za valni oblik napona na induktivitetu sa slike 1.6. vrijedi $\alpha E T_s = (1 - \alpha)(U_d - E)T_s$, odakle se dobije upravljačka karakteristika uzlaznog pretvarača:

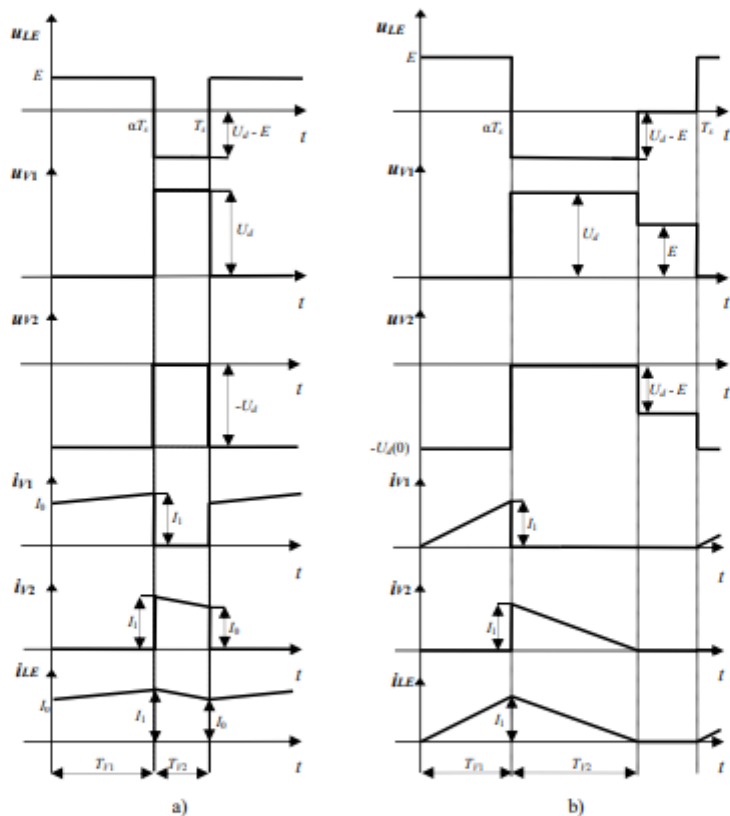
$$\frac{U_d}{E} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (1-6)$$

DISKONTINUIRANI NAČIN RADA

U diskontinuiranom načinu rada uz vremenske intervale A i B, koji su opisani za kontinuirani način rada, javlja se i vremenski interval C tijekom kojega je struja induktiviteta jednaka nuli. Taj interval počinje padom struje ventila $V2$ na nulu, a završava ponovnim uključanjem ventila $V1$. Nadomjesna shema istosmjernog uzlaznog pretvarača napona za interval C prikazana je na slici 1.5. Karakteristični valni oblici struja i napona dani su na slici 1.6.



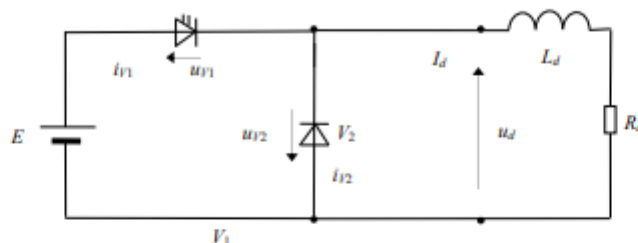
Sl. 1.5. Nadomjesna shema spoja pretvarača u intervalu C.



Sl. 1.6. Karakteristični valni oblici uzlaznog pretvarača u:
 a) kontinuiranom načinu rada,
 b) diskontinuiranom načinu rada.

b) Silazni pretvarač napona

Ponovno su pretvaračke komponente idealne (upravljivi ventil $V1$ i idealna dioda $V2$), a trošilo smatramo strujnim uvorom $I_d (L_d/R_d \gg T_s)$, slika 1.7.



Sl. 1.7. Nadomjesna shema spoja silaznog pretvarača napona.

Za pretpostavljenu shemu spoja istosmjernog silaznog pretvarača prema slici 1.7. vrijede sljedeće jednadžbe mreže:

$$E = u_{v1} - u_{v2} \quad (1-7)$$

$$E = u_{v1} - u_d \quad (1-8)$$

$$0 = u_{v2} + u_d \quad (1-9)$$

$$i_d = i_{v1} + i_{v2} \quad (1-10)$$

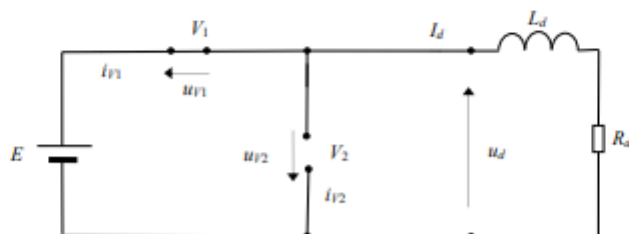
Pritom je moguć samo kontinuirani način rada jer je trošilo modelirano strujnim uvorom.

U analizi rada postoje dva intervala unutar periode rada:

- interval A; vodi ventil $V1$ i ne vodi ventil $V2$ (slika 1.8.),
- interval B; vodi ventil $V2$ i ne vodi ventil $V1$ (slika 1.9.).

Interval A: ($0 \leq t \leq \alpha T$)

Interval A započinje u trenutku $t = 0$ kada je dan impuls za uklapanje ventila $V1$. Budući da u ovom intervalu vodi ventil $V1$ i ne vodi ventil $V2$, pri primjenjivanju jednadžbi mreže od (1-7) do (1-10), vrijedit će $u_{v1} = 0$ i $i_{v2} = 0$.



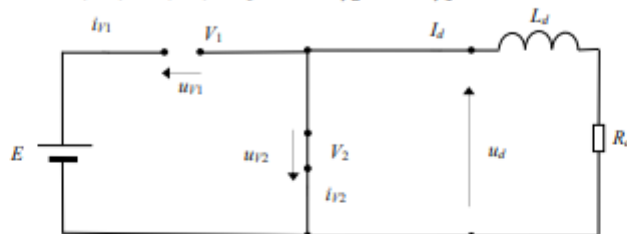
Sl. 1.8. Nadomjesna shema spoja pretvarača u intervalu A.

Struja ventila $V1$ određuje se iz (1-10), $i_{v1} = I_d$, a napon na ventilu $V2$ određuje se iz (1-7), (1-8) i (1-9), $u_{v2} = -E$.

Interval A traje do trenutka t_1 kada ventil $V1$ dobije impuls za isklapanje.

Interval B: ($\alpha T \leq t \leq T$)

Budući da u ovom intervalu vodi ventil $V2$ i ne vodi ventil $V1$, pri primjenjivanju jednačbi mreže od (1-7) do (1-9), vrijedit će $u_{V2} = 0$ i $i_{V1} = 0$.



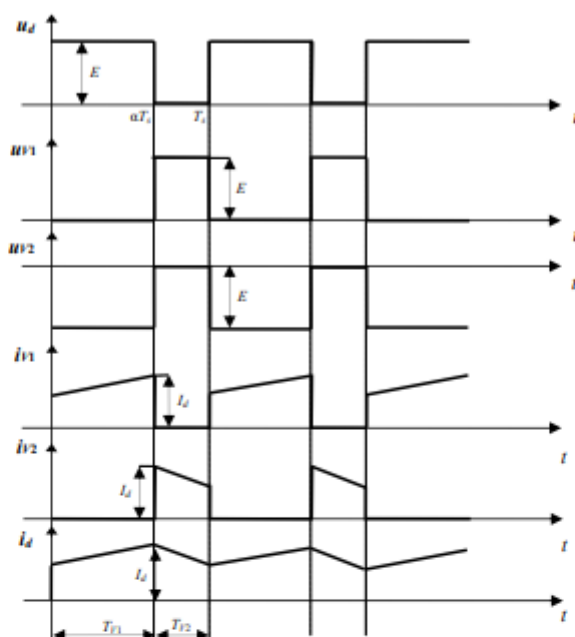
Sl. 1.9. Nadomjesna shema spoja pretvarača u intervalu B.

Napon na ventilu $V1$ određuje se iz (1-7), (1-8) i (1-9), $u_{V1} = E$, a struja ventila $V2$ određuje se iz (1-10), $i_{V2} = I_d$.

Iz valnog oblika napona na trošilu sa slike 1.10. dobije se upravljačka karakteristika silaznog pretvarača:

$$\frac{U_d(0)}{E} = \alpha \quad (1-11)$$

Karakteristični valni oblici u kontinuiranom načinu rada prikazani su na slici 1.10.

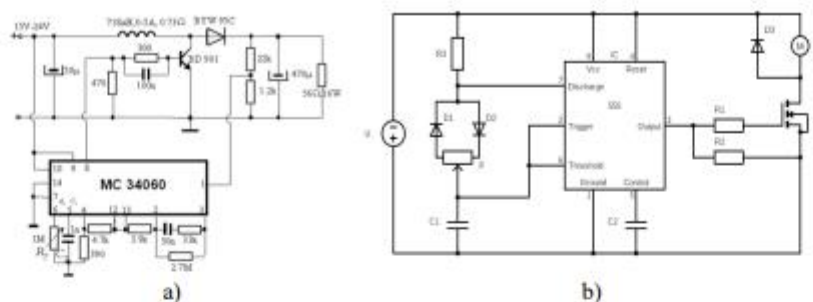


Sl. 1.10. Karakteristični valni oblici silaznog pretvarača u kontinuiranom načinu rada.

1.3. FIZIČKI MODELI PRETVARAČA

Na slici 1.11. prikazane su sheme spojeva izravnih istosmjernih pretvarača napona. Maketa istosmjernog silaznog pretvarača napravljena je kroz završni rad [1]. Sklopna frekvencija rada pretvarača f_s može se odrediti s pomoću dviju vanjskih komponenti R_T i C_T , a prema [1] računa se kao $f_s = \frac{1,2}{R_T \cdot C_T}$.

Maketa istosmjernog silaznog pretvarača napravljena je kroz završni rad [2]. Korišten je isti upravljački krug NE555P, koji radi na principu pulsno-širinske modulacije.



Sl. 1.11. Sheme spojeva izravnih istosmjernih pretvarača:
 a) istosmjerni uzlazni pretvarač napona 27 V/1 A,
 b) istosmjerni silazni pretvarač napona 12 V/70 mA.

1.4. ZADACI ZA PRIPREMU

- Istosmjerni uzlazni pretvarač sheme spoja prema slici 1.2. radi u kontinuiranom i diskontinuiranom načinu rada, ovisno o izboru sklopne frekvencije. Nacrtajte valni oblik struje induktiviteta L_E za oba načina rada i naznačite karakteristične vrijednosti. Odredite izraz za valovitost struje induktiviteta pri kontinuiranom načinu rada.
- Uzlaznim istosmjernim pretvaračem napona treba povezati trošilo modelirano naponskim uvorom $U_d = 120$ V i strujni izvor modeliran serijskim spojem naponskog izvora $E = 24$ V i induktiviteta L_E tako odabranog da je $\frac{di_E}{dt} \approx 0$. Koliki faktor upravljanja α treba odabrati? Koliko dugo vodi upravljivi ventil $V1$, ako je odabrana frekvencija rada $f_s = 20$ kHz i pretpostavljen kontinuirani način rada?
- Izvedite upravljačku karakteristiku silaznog pretvarača u kontinuiranom načinu rada računajući srednju vrijednost napona na trošilu u_d sa slike 1.10.

1.5. RAD U LABORATORIJU

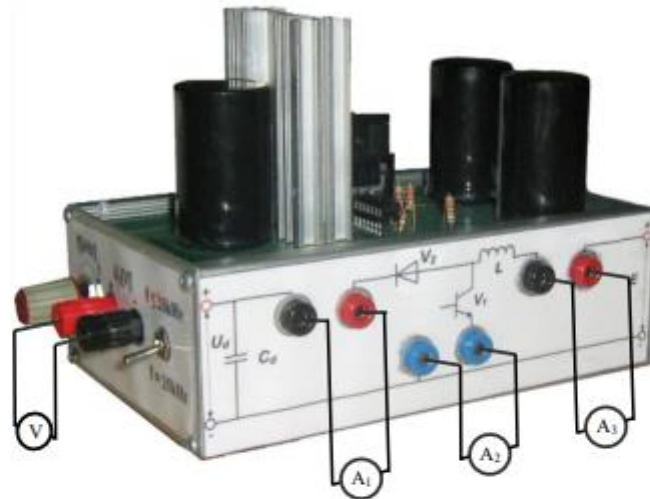
U vježbi se koristi sljedeća oprema:

- osciloskop RIGOL DS1054Z sa 10x naponskim sondama te RIGOL RP1003C strujne sonde;
- mjerni instrumenti – standardni multimetar na DC području;
- trošilo za uzlazni pretvarač – programabilno trošilo U CR radu podešeno na 560hm;
- spojni vodiči.

a) Snimanje valnih oblika i mjerenje karakterističnih veličina za uzlazni pretvarač

Mjernu opremu spojite prema shemi spajanja danog na slici 1.12., a zatim provedite mjerenja ovim redoslijedom:

1. Dovedite napon od 14,5 V iz istosmjernog naponskog izvora koji se nalazi na laboratorijskom stolu na ulaz pretvarača i prekidačem odaberite područje frekvencije $f \leq 25$ kHz.



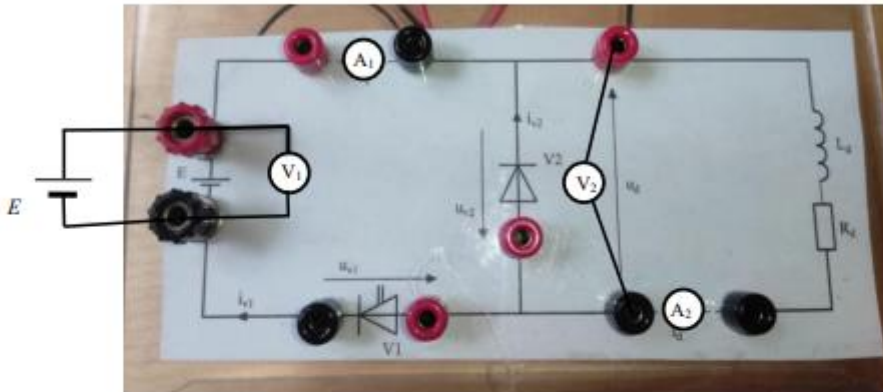
Sl. 1.12. Shema spajanja istosmjernog uzlaznog pretvarača.

2. Uključite pretvarač (sklopku postavite u položaj "ON"), te na osciloskopu promatrajte valni oblik struje prigušnice L_E . Podesite frekvenciju rada pretvarača tako da pretvarač radi u kontinuiranom načinu rada sa sklopnom frekvencijom $f_s = 6,5$ kHz. Očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju ampermetri i voltmetar.
3. Promatrajte i snimite na osciloskopu valne oblike struje i napona tranzistora, struje i napona diode, te struje i napona prigušnice.
4. Ne mijenjajući vrijednost ulaznog napona E , smanjite frekvenciju na 2,4 kHz, te očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju ampermetri i voltmetar.
5. Ponovite mjerenja iz točke 3.

b) Snimanje valnih oblika i mjerenje karakterističnih veličina za silazni pretvarač

Na slikama 1.7 i 1.14 jasno se može vidjeti razlika između sheme spoja koja je analizirana i sheme spoja koja je izrađena u maketi. U shemi koja je analizirana, upravljački ventil se nalazi u tzv. gornjoj grani, a na maketi MOSFET je izveden u donjoj grani. Razlog takvog izvoda je upravljanje MOSFET-a fiksiranjem napona elektrode uvoda (eng. source). Tako se upravlja promjenom napona upravljačke elektrode zbog čega se u shemi simbol upravljivog ventila V1 spaja na „-“ priključnicu istosmjernog naponskog izvora E na ulazu.

Mjernu opremu spojite prema shemi spajanja danoj na slici 1.13., a zatim provedite mjerenja ovim redoslijedom:



Sl. 1.13. Shema spajanja istosmjernog silaznog pretvarača.

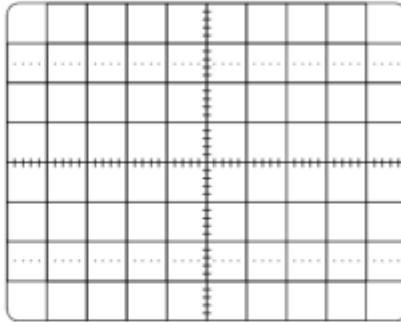
1. Postavite potencijometar u krajnju desni položaj.
2. Dovedite napon od 12 V iz istosmjernog naponskog izvora koji se nalazi na laboratorijskom stolu na ulaz pretvarača.
3. Ako postoji, uključite pretvarač na sklopki.
4. Potencijometrom namjestite izlazni napon na 5 V/7 V/9 V.
5. Očitajte i zapišite vrijednosti koje pokazuju ampermetri i voltmetri.
6. Promatrajte na osciloskopu valni oblik napona ventila V1 i V2 te valni oblik izlazne struje.
7. Očitajte sa osciloskopa vrijeme vođenja ventila V1 i periode rada za sva mjerenja.

1.6. OBRADA REZULTATA

1. Snimljene valne oblike napona i struja zalijepite na za to predviđena mjesta u predlošku za laboratorijske vježbe. Označite na njima karakteristične intervale dane u analizi rada samo za uzlazni pretvarač.
2. Što se događa s načinom rada uzlaznog pretvarača pri smanjivanju frekvencije rada sa 6,5 kHz na 2,4 kHz?
3. Komentirajte snimljene valne oblike struja i napona uzlaznog pretvarača uspoređujući ih s onima na slici 1.6.
4. Što se događa sa brzinom vrtnje motora prilikom promjene izlaznog napona?
5. Komentirajte snimljene valne oblike napona i struja silaznog pretvarača uspoređujući ih sa onima na slici 1.10.

Rezultati mjerenja za kontinuirani način rada uzlaznog pretvarača:

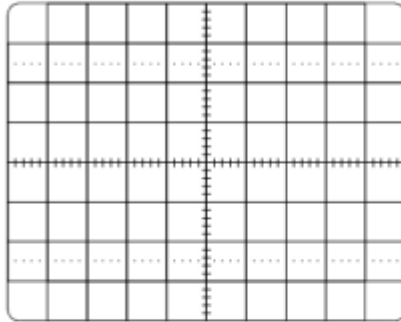
V [V]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]



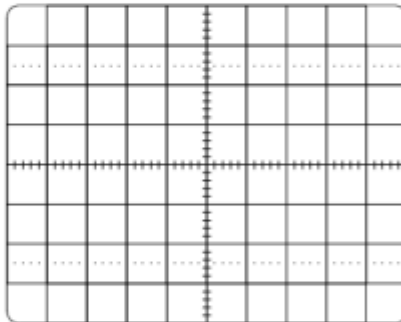
Struja i napon tranzistora – kontinuirani rad.

Rezultati mjerenja za diskontinuirani način rada uzlaznog pretvarača:

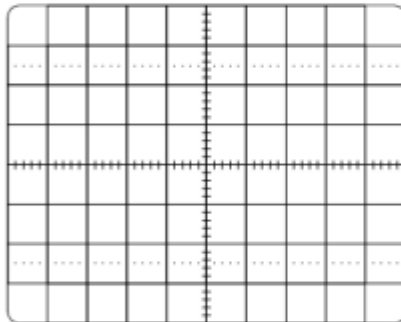
V [V]	A_1 [A]	A_2 [A]	A_3 [A]



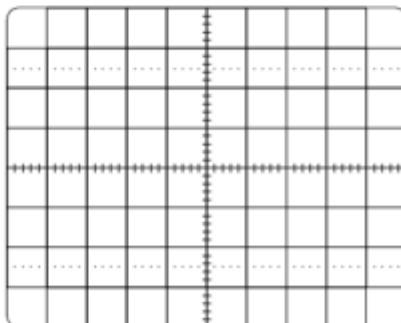
Struja i napon tranzistora – diskont. rad.



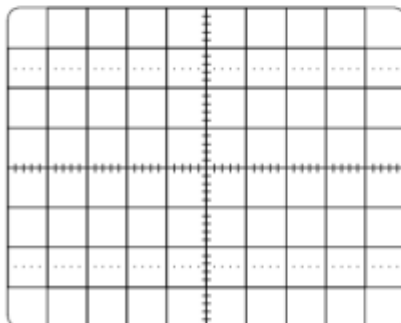
Struja i napon diode – kontinuirani rad.



Struja i napon diode – diskont. rad.



Struja i napon prigušnice – kontinuirani rad.



Struja i napon prigušnice – diskont. rad.

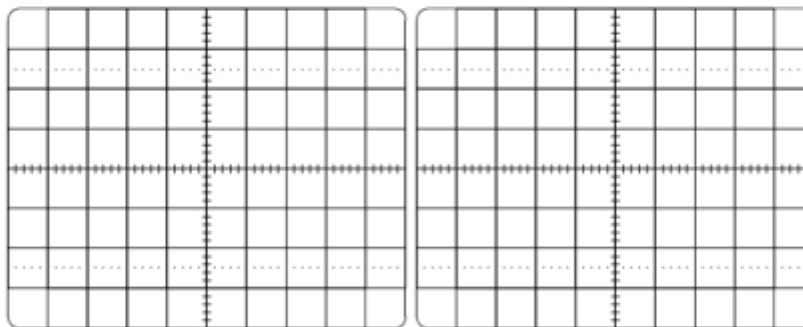
Rezultati mjerenja za kontinuirani način rada silaznog pretvarača:

Tablica 1.1. Rezultati mjerenja za tri radne točke sa multimetara

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
E	[V]			
U_d	[V]			
I	[mA]			
I_d	[mA]			

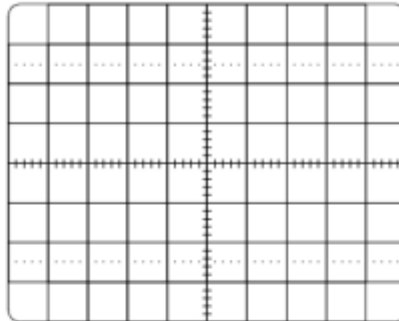
Tablica 1.2. Rezultati mjerenja za tri radne točke sa osciloskopa

		1. radna točka	2. radna točka	3. radna točka
f_s	[kHz]			
T_s	[us]			
T_{V1}	[us]			

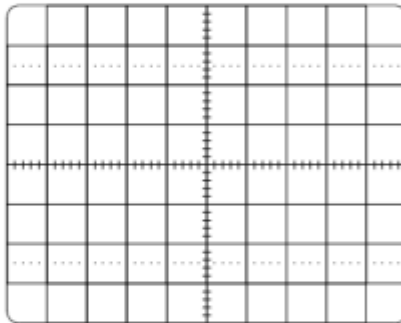


Valni oblici napona na ventilima V1, V2 i struja trošila, 1. radna točka; Maketa A

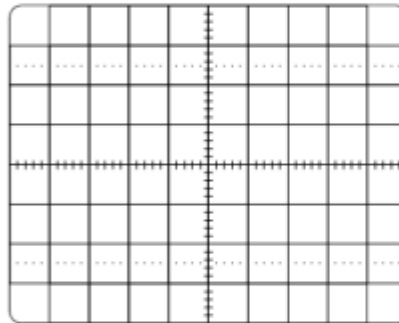
Valni oblici napona na ventilima V1, V2 i struja trošila, 2. radna točka; Maketa A



Valni oblici napona na ventilima V1, V2 i
struja trošila, 3. radna točka; Maketa A



Očitavanje periode rada



Očitavanje vremena vođenja ventila V2

LITERATURA

- [1] I. Železnik, "Način rada istosmjernog uzlaznog pretvarača napona 27V/1A", diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2010.
- [2]