

Izrada istosmjernog silaznog pretvarača za napajanje istosmjernog motora male snage upravljanog s LM555CN

Borić, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:576414>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

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

**IZRADA ISTOSMJERNOG SILAZNOG PRETVARAČA
ZA NAPAJANJE ISTOSMJERNOG MOTORA MALE
SNAGE UPRAVLJANOG S LM555CN**

Završni rad

Dora Borić

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 13.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Dora Borić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4791, 28.07.2020.
OIB Pristupnika:	29390672777
Mentor:	prof. dr. sc. Denis Pelin
Sumentor:	Andrej Brandis, mag. ing. el.
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Izrada istosmjernog silaznog pretvarača za napajanje istosmjernog motora male snage upravljano s LM555CN
Znanstvena grana rada:	Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	Napraviti maketu silaznog pretvarača (dizajn pločice, izbor komponenata, trošila) za napajanje istosmjernog motora male snage. Napraviti analizu rada silaznog pretvarača i usporediti rezultate analize s rezultatima mjerenja u karakterističnim točkama. Komentirati dobiveno! SUMENTOR: Andrej Brandis Tema je rezervirana za studenticu Doru Borić.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	13.09.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	24.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

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

Osijek, 24.09.2023.

Ime i prezime studenta:

Dora Borić

Studij:

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4791, 28.07.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Izrada istosmjernog silaznog pretvarača za napajanje istosmjernog motora male snage upravljano s LM555CN**

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

i sumentora Andrej Brandis, mag. ing. el.

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

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA	2
3. ANALIZA RADA SILAZNOG PRETVARAČA	3
3.1. Kontinuirani režim rada – valovita struja trošila.....	4
3.2. Upravljanje.....	5
4. IZRADA SILAZNOG PRETVARAČA	7
4.1. Pretvarački dio sklopa.....	8
4.2. Upravljački dio sklopa	8
4.3. Trošilo – istosmjerni motor.....	9
4.4. Tiskana pločica	9
5. MJERENJA NA SILAZNOM PRETVARAČU	11
5.1. Karakteristični valni oblici, režim rada i sklopna frekvencija	11
5.2. Postotna pogreška faktora vođenja pretvarača.....	13
5.3. Naponska nadvišenja pri sklapanju.....	15
6. ZAKLJUČAK	18
LITERATURA.....	19
POPIS OZNAKA	20
SAŽETAK.....	21
SUMMARY	22
ŽIVOTOPIS	23
PRILOG	24

1. UVOD

Izravnim istosmjernim pretvaračima povezuju se istosmjerne pojne mreže i istosmjerna trošila različitog karaktera. Zbog toga postoje samo dvije vrste izravnih istosmjernih pretvarača: oni koji povezuju naponske izvore sa strujnim uvorima i oni koji povezuju strujne izvore sa naponskim uvorima, [1] pri čemu se pod naponskim uvorom podrazumijeva kapacitivno-radna trošila čija je vremenska konstanta puno veća od sklopne periode pretvarača. Strujni uvor podrazumijeva induktivno-radno trošilo, ponovno izražene vremenske konstante u odnosu na sklopnu frekvenciju.

Općenito, istosmjerni pretvarači povezuju dvije istosmjerne mreže različitih naponskih razina pa se tako razlikuju dvije vrste izravnih istosmjernih pretvarača, a to su silazni i uzlazni pretvarači. U nastavku će detaljnije biti objašnjeni silazni pretvarači.

Treće poglavlje obuhvaća analizu rada osnovne strukture silaznog pretvarača u kontinuiranom režimu rada kada je opterećen trošilom valovite struje. Analizira rad idealnog pretvarača i objašnjava metode upravljanja pretvaračem.

Četvrto poglavlje opisuje izradu silaznog pretvarača realiziranog pomoću tzv. tajmera NE555P počevši od odabira komponenata, izrade tiskane pločice pa sve do spajanja u cjelinu.

U petom poglavlju su izvršena mjerenja karakterističnih valnih oblika u dvije radne točke uz komentar dobivenih valnih oblika i izmjerena je frekvencija rada pretvarača. Dodatno, na temelju izmjerenih vrijednosti izračunati su faktori vođenja u tim i još nekoliko dodatnih radnih točaka kako bi se odredila postotna pogreška faktora vođenja.

Posljednja mjerenja odnose se na promatranje pojave pseudoperiodičkog odziva prilikom uključivanja ventila.

1.1. Zadatak završnog rada

Napraviti maketu silaznog pretvarača (dizajn pločice, izbor komponenata, trošila) za napajanje istosmjernog motora male snage. Napraviti analizu rada silaznog pretvarača i usporediti rezultate analize s rezultatima mjerenja u karakterističnim točkama. Komentirati dobiveno.

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 izlazni napon izmjenično-istosmjernog pretvarača 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.“ [2]

U knjizi I. Flegara [1] detaljno su objašnjene različite topologije elektroničkih energetskih pretvarača među kojima su i istosmjerni pretvarači. Izvršena je podjela po dva kriterija, obzirom na broj kvadranta izlazne u-i karakteristike te obzirom na iznos stvorene izmjenične snage. Prema drugom kriteriju pretvarači su podijeljeni na izravne i neizravne pretvarače, te su kao dodatna podjela navedeni neizravni pretvarači sa i bez galvanskog odvajanja. Dani su matematički modeli spomenutih pretvarača uz Kirchhoffove zakone na temelju kojih je izvršena analiza rada u svrhu određivanja karakterističnih valnih oblika struja i napona te upravljačkih karakteristika.

Autori A.W. Cristri i R.F. Iskandar u svom istraživanju [3] spominju široku primjenu istosmjernih pretvarača. Kao primjere iz prakse navode elektroničke sustave, osobna računala, telekomunikacijske sustave, sustav kontrole punjenja baterija itd. Ovime se dokazuje iznimno veliku vrijednost i važnost ovog tipa pretvarača u današnjici.

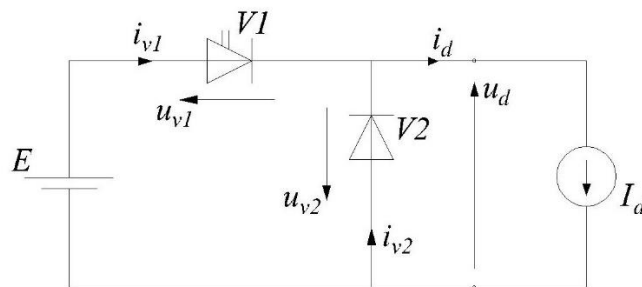
U radu [4] autorica objašnjava osnovne principe kontrole brzine vrtnje istosmjernog motora pulsno-širinskim upravljanjem te navodi prednosti ovog načina upravljanja među kojima navodi povoljnu cijenu izrade, pouzdanost sklopa, učinkovitost te dugotrajnost.

Autor rada [5] 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

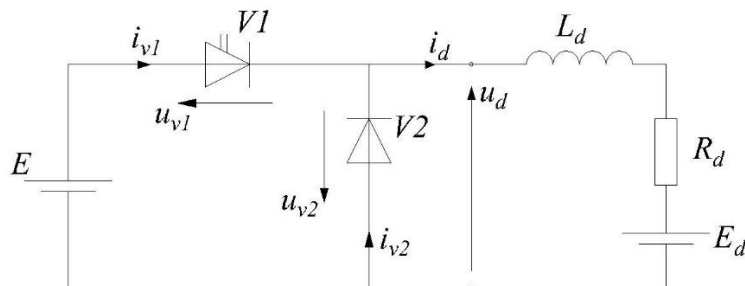
Općenito govoreći, silazni pretvarači nalaze se u skupini istosmjernih izravnih pretvarača što znači da nemaju dodatne energetske spremnike, odnosno spajaju izvor i trošilo različitog karaktera pa je izravan spoj dozvoljen i neće uzrokovati prenapone i prekostruje pri sklapanju. U ovome slučaju govori se o silaznom pretvaraču koji spaja naponski izvor i strujni uvor kojim je opisano trošilo.

Kako bi se ostvarila niža naponska razina na trošilu dodana su dva ventila od kojih je jedan upravljivi [1], a drugi je idealna dioda. Takav spoj prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Shema silaznog pretvarača

Dodatno, važno je naglasiti da će u kasnijim mjerenjima trošilo predstavljati istosmjerni motor male snage, dakle, struja trošila neće biti glatka već valovita pa je pri analizi rada potreban realniji model, slika 3.2.



Slika 3.2. Silazni pretvarač opterećen trošilom valovite struje

Realniji model trošila ostvaren je serijskim spojem induktiviteta L_d , otpora trošila R_d i istosmjernog naponskog izvora E_d (protuelektromotorna sila).

U dobro projektiranim aktivnim trošilima otpornost trošila R_d se minimalizira zbog smanjenja gubitaka. Zbog toga se u analizi otpornost trošila R_d može s prihvatljivom tehničkom točnošću zanemariti. [1]

3.1. Kontinuirani režim rada – valovita struja trošila

Od ranije je poznato da ventili $V1$ i $V2$ rade protutaktno, pa se pri analizi rada mogu promatrati dva intervala rada koji se odvijaju periodički, pri čemu se trajanje oba intervala zove sklopna perioda T_s .

Nadalje, obzirom da je na nivou modela pretvarački sklop silaznog pretvarača dobro definirana mreža, vrijede Kirchhoffovi zakoni za struje (3-1) i napone (3-2/3/4) koji će biti potrebni za analizu rada.

$$i_{v1} + i_{v2} - i_d = 0 \quad (3-1)$$

$$E - u_{v1} + u_{v2} = 0 \quad (3-2)$$

$$E - u_{v1} - u_d = 0 \quad (3-3)$$

$$u_{v2} + u_d = 0 \quad (3-4)$$

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

U prvom intervalu rada vodi upravljivi ventil $V1$, a pošto ventili rade protutaktno, kako je ranije i spomenuto, idealna dioda $V2$ ne vodi.

Analogno tome zna se da je napon ventila $u_{v1} = 0$, dok je struja ventila $i_{v2} = 0$.

Uvrštavanjem ove dvije poznate vrijednosti u ranije definirane KZS i KZN dolazi se do slijedećih jednakosti:

$$u_d = E = -u_{v2} \quad (3-5)$$

$$i_d = i_{v1} \quad (3-6)$$

Moguće je i točnije odrediti struju trošila i_d ukoliko se pretpostavi da je to zapravo struja induktiviteta za koju prema konstitutivnim relacijama vrijedi:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E - E_d) \quad (3-7)$$

pa se integracijom dolazi do točnog izraza za struju induktiviteta koja tada glasi:

$$i_L = \frac{E - E_d}{L} t \quad (3-8)$$

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

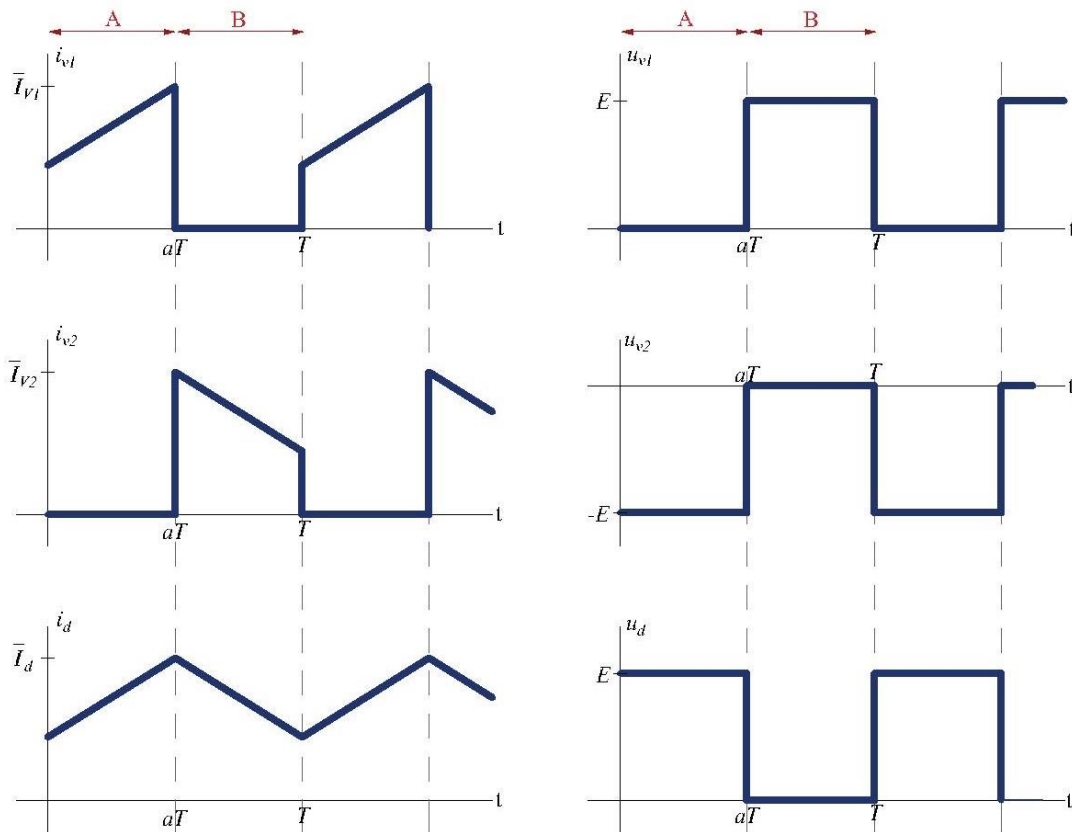
U drugom intervalu rada ventil $V1$ ne vodi, a idealna dioda $V2$ vodi pa vrijedi da je struja ventila $i_{v1} = 0$, a sada je napon ventila $u_{v2} = 0$. Dalje se sve odvija analogno i vrijede slijedeće relacije:

$$u_{v1} = E \quad (3-9)$$

$$u_d = 0 \quad (3-10)$$

$$i_d = i_{v2} = i_L = -E_d t + i_L(t_0) \quad (3-11)$$

Svi valni oblici struja i napona za oba ventila i trošilo prikazani su za oba intervala na slici 3.3.



Slika 3.3. Valni oblici napona i struja sklopki dobiveni analizom

3.2. Upravljanje

Ranijim razmatranjima došlo se do zaključka o iznosu napona na trošilu u_d koji poprima vrijednosti iznosa E ili nula, odnosno matematički zapisano:

$$u_d = \begin{cases} E & 0 \leq t \leq \alpha T \\ 0 & \alpha T \leq t \leq T \end{cases} \quad (3-12)$$

pa se srednja vrijednost napona na trošilu može odrediti prema izrazu (2-13).

$$U_d(0) = \alpha E = \frac{T_{V1}}{T_s} E \quad (3-13)$$

Iz (3-13) vidi se kako se srednji iznos napona može regulirati na više načina:

- pulsno-širinsko upravljanje: mijenja se T_{V1} , odnosno vrijeme trajanja vođenja upravljivog ventila V1, a sklopna perioda je stalna
- frekvencijsko upravljanje: mijenja se trajanje sklopne periode T_s , a vrijeme vođenje ventila V1 je nepromijenjeno
- širinsko-frekvencijsko upravljanje: istodobno se mijenjaju i T_{V1} i T_s

Još je važno naglasiti kako se u sva tri navedena slučaja regulacija zapravo ostvaruje promjenom faktora vođenja α čija funkcijska veza sa srednjom vrijednošću napona trošila daje upravljačku karakteristiku.

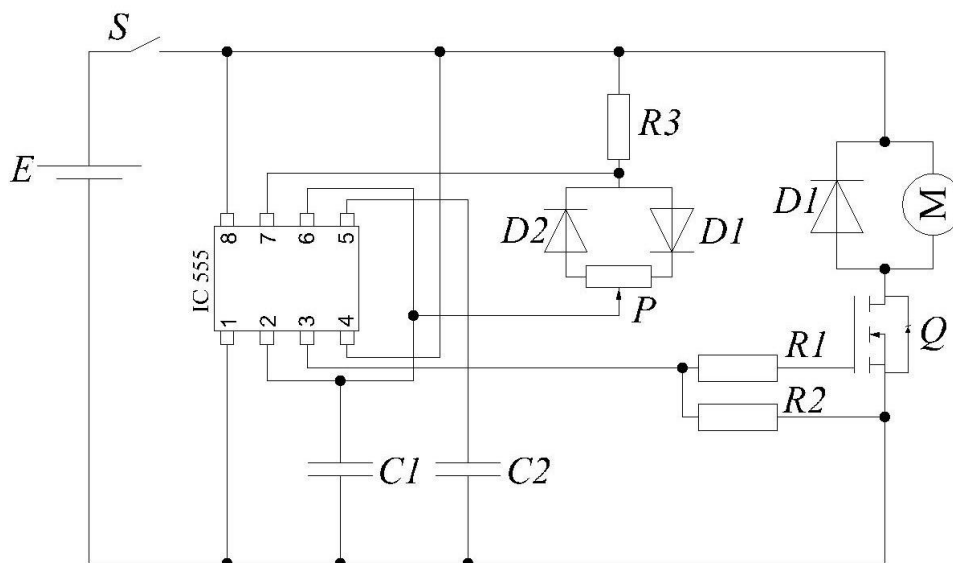
Obzirom da će se kasnija mjerenja i zaključci donositi na temelju faktora vođenja α dobro je uočiti jednakost koja vrijedi za α :

$$\alpha = \frac{T_{V1}}{T_S} = \frac{U_d(0)}{E} \quad (3-14)$$

4. IZRADA SILAZNOG PRETVARAČA

Izrađeni silazni istosmjerni pretvarač koristi se za napajanje istosmjernog motora male snage te pruža mogućnost regulacije brzine vrtnje motora. Regulacija je ostvarena pulsno-širinskim upravljanjem.

Sam sklop sastoji se od pretvaračkog i upravljačkog dijela koji su detaljnije opisani u nastavku. Na slici 4.1. prikazana je shema silaznoga pretvarača s upravljačkim dijelom, te su u tablici 4.1. prikazane osnovne specifikacije pretvarača.



Slika 4.1. Shema spoja izrađenog silaznog pretvarača

Tablica 4.1. Osnovne specifikacije pretvarača

Ulazni napon	12V
Izlazni napon	0-12V
Izlazna struja	≈0.2A
Snaga	maks. 2.4W

Nadalje, u tablici 4.2. dane su točne oznake svih korištenih komponenti.

Tablica 4.2. Popis korištenih komponenata

integrirani krug	NE555P	kondenzatori	C_1	680pF
tranzistor (Q)	IRF540N		C_2	100nF
otpornici ($R_1 R_2 R_3$)	1k Ω	diode	D_1	1N4001
potenciometar	100k Ω		$D_2 D_3$	1N4148

4.1. Pretvarački dio sklopa

Pretvarački dio sklopa obavlja proces energetske pretvorbe i ovome slučaju sastoji se od dva ventila od kojih je jedan upravljivi kao što je to ranije i objašnjeno. Kao upravljivi ventil korišten je IRF MOSFET, a kao realizacija idealne diode dioda D1, oznaka 1N4001.

Rad pretvaračkog sklopa detaljnije je objašnjen u trećem poglavlju kroz analizu rada silaznog pretvarača.

4.2. Upravljački dio sklopa

Upravljački dio sklopa, kao što i samo ime navodi, upravlja procesom energetske pretvorbe. Preciznije, upravlja procesom uklapanja i isklapanja MOSFET-a te tako regulira vrijeme vođenja T_{VI} ostvarujući pulsno-širinsko upravljanje sklopa.

Sam proces upravljanja ostvaren je pomoću tajmera NE555. Vremenski sklop koncipiran je tako da na izlazu ima dva moguća stanja 0 ili 1, pri čemu stanje 0 odgovara vođenju, a stanje 1, nevođenju MOSFET-a.

Sada je samo potrebno regulirati koliko dugo će trajati intervali rada u kojima MOSFET vodi. Ovaj se zahtjev zadovoljava kontrolom vremena punjenja/praznjenja kondenzatora C odnosno kontrolom vremenske konstante τ , prema [6]:

$$\tau = RC \quad (4-1)$$

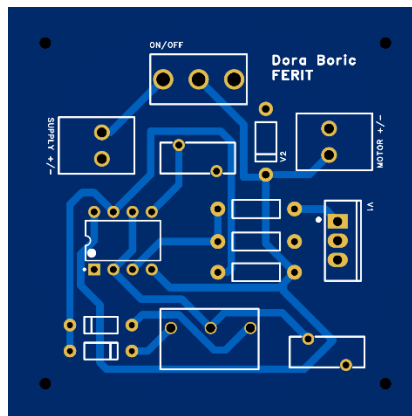
Iz (4-1) uočava se kako vremenska konstanta trošila τ ovisi o serijskom otporu pa je zato u seriju sa kondenzatorom CI spojen i promjenjivi otpornik (potenciometar).

Imajući sve prethodno na umu zaključuje se:

- promjenom iznosa otpora potenciometra mijenja se i trajanje vremenske konstante τ , ove su veličine proporcionalne pa veći otpor znači i dulje vrijeme punjenja kondenzatora CI
- dulje vrijeme punjenja i praznjenja CI uzrokuje upravljački signal na vremenskom sklopu takav da dulje zadržava stanje 1 na izlazu

Dakle, promjenom iznosa otpora potenciometra zapravo se regulira vrijeme vođenja MOSFET-a i tako ostvaruje pulsno-širinsko upravljanje.

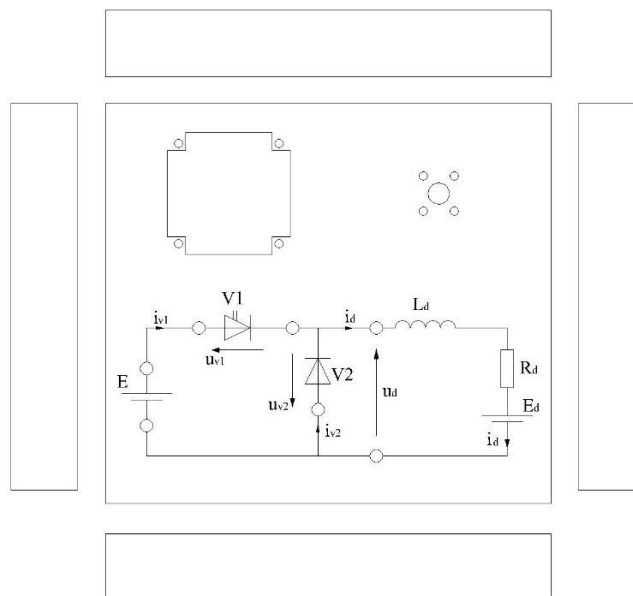
Konačan izgled tiskane pločice prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Tiskana pločica

Na posljetku, izrađeno je i postolje sklopa na kojemu se osim tiskane pločice i istosmjernog motora nalazi i osnovna shema sklopa sa priključnicama u točkama potrebnim za izvođenje mjerenja karakterističnih veličina i valnih oblika struja i napona pretvarača.

Postolje sklopa nacrtano je pomoću programskog alata AutoCAD, slika 4.4. Zatim je pomoću laserskog rezača na pleksiglasu izrezan zadani oblik, a shema osnovnog sklopa ugravirana na površinu.

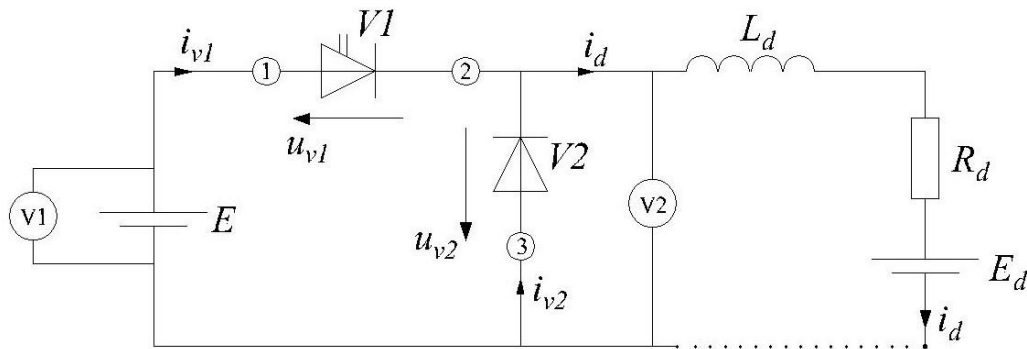


Slika 4.4. Priprema za izrezivanje postolja na laserskom rezaču

Konačan izgled gotovog pretvarača prikazan je u prilogu [1].

5. MJERENJA NA SILAZNOM PRETVARAČU

Sva mjerenja izvršena su na izrađenom pretvaraču koji je opterećen ranije opisanim istosmjernim motorom. Motor se tijekom svih mjerenja nalazio u praznom hodu, tj. motor je neopterećen.



Slika 5.1. Shema spoja za provedbu mjerenja

Na slici 5.1. prikazani su spojevi korištenih instrumenata te mjerne točke za spajanje osciloskopa. Voltmetar $V1$ mjeri napon izvora, a voltmetar $V2$ napon trošila potrebnih za provedbu prvog i drugog pokusa.

Nadalje, prvi kanal osciloskopa spojen je u točki 1, a drugi kanal u točki 3 dok je masa osciloskopa izvedena u točki 2, tako je dobiveno izravno mjerenje valnog oblika prvog ventila (MOSFET-a), ali je zato na drugom kanalu dobiven invertirani napon ventila $V2$ (diode), pa je za ispravne rezultate potrebno uključiti opciju *invert* u postavkama osciloskopa. Prema potrebi, moguće je signal drugog kanala ostaviti u izvornom obliku i tako zapravo promatrati valni oblik napona trošila.

Signal koji predstavlja struju trošila i_d snimljen je pomoću strujne sonde postavljene oko žice prikazane isprekidanom linijom na slici 5.1.

5.1. Karakteristični valni oblici, režim rada i sklopna frekvencija

Pri prvom je mjerenju cilj bio odrediti režim i frekvenciju rada pretvarača. Kako bi cilj bio i ostvaren, osciloskopom su snimljeni valni oblici struje trošila (i_d) te naponi ventila (MOSFET, dioda), a izmjerena je i sklopna frekvencija. Voltmetrom su dodatno izmjerene srednje vrijednosti napona izvora (E) i napona trošila (U_d).

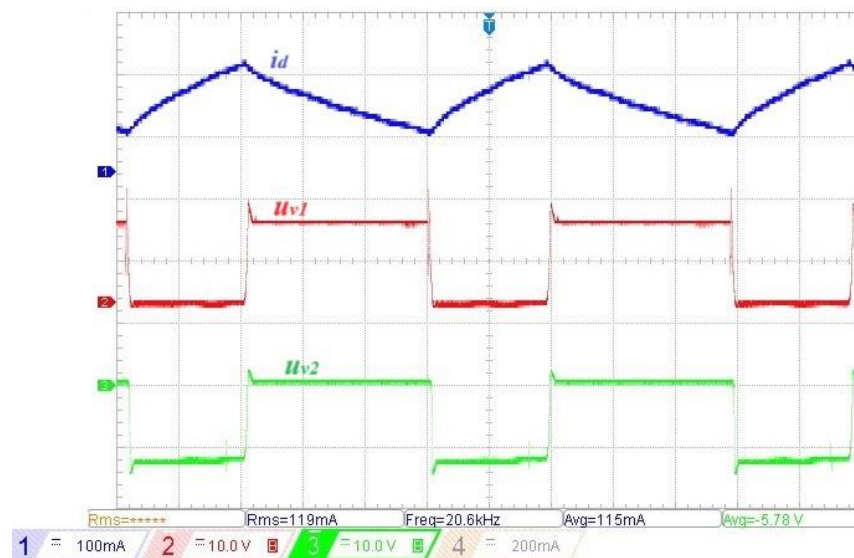
Kako bi jednak režim rada u cijelom području rada pretvarača bio potvrđen, mjerenja su izvršena u dvije radne točke, za malu i najveću brzinu rada motora pri kojima karakteristični valni oblici i dalje imaju izgled koji podupire analizu.

Dobiveni izmjereni rezultati dani su tablici 5.1., a dobiveni valni oblici nalaze se u nastavku, slika 5.2.

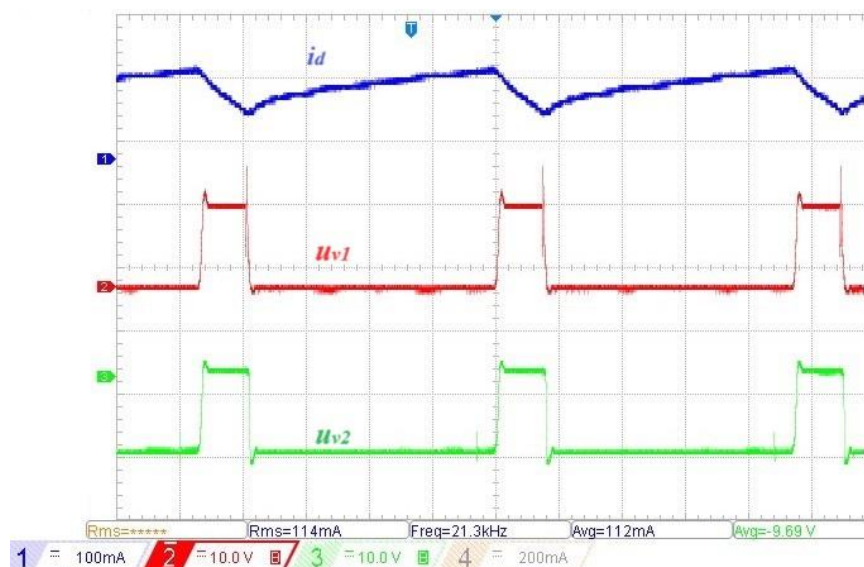
Tablica 5.1. Rezultati prvog mjerenja za dvije radne točke

		I. mjerenje	II. mjerenje
U_d	[V]	5.78	9.69
E	[V]	12.07	11.95
I_d	[mA]	115	112
f	[kHz]		20.7

a)



b)



Slika 5.2. Snimljeni valni oblici pri: a) maloj brzini motora, b) velikoj brzini motora

Očitana i izmjerena vrijednost frekvencije od $\approx 21\text{kHz}$ nije slučajna. Pri radu istosmjernih pretvarača namjerno se odabire sklopna frekvencija van čujnog područja čovjeka ($>16\text{kHz}$) jer su navedeni pretvarači uglavnom korišteni u audio i video uređajima gdje je zbog magnetrostrikcije [7] iznimno važno izbjeći čujno područje.

Dobiveni valni oblici su periodičkog karaktera i imaju dva intervala u kojima se izmjenjuje protutaktni rad ventila (tj. MOSFET-a i diode) pa je zaključak kako se radi o kontinuiranom režimu rada silaznoga pretvarača, a obzirom da su mjerenja izvršena u dvije radne točke kojima je obuhvaćeno cijelo područje rada pretvarača može se reći kako pretvarač radi u kontinuiranom režimu rada u obje odabrane radne točke, tj. za cijelo područje promjene izlaznog napona od 5.8V do 9.7V.

Pri analizi dobivenih valnih oblika i izmjerenih vrijednosti uočava se kako je u prvom mjerenju srednja vrijednost napona na trošilu $U_d(0)$ manja nego u drugom slučaju pa je očekivano i brzina vrtnje motora u prvom slučaju manja nego pri drugom mjerenju.

Također, potvrđen je i izraz (3-13), odnosno dokazano je da se promjenom vremena vođenja ventila VI mijenja i srednja vrijednost napona na trošilu, te što je vrijeme vođenja veće i napon na trošilu je veći.

Ono što se može uočiti pri promatranju valnog oblika struje trošila jest da ona ima eksponencijalni oblik koji u prvom intervalu raste, a u drugome pada. Razlog tomu je što je odabrana sklopna frekvencija od 20kHz, pa je odnos između vremenske konstante trošila i sklopne periode reda veličine, zbog toga rast i pad struje nije linearan, već eksponencijalan. Dodatno, u prvom intervalu dok je napon na trošilu veći od 0 zavojnica se magnetizira tj. skladišti energiju pa struja trošila raste, a zatim, kada napon na trošilu u drugome intervalu padne na 0 i magnetiziranje prestane uskladištena se energija prenosi otporu (trošilo) te struja zavojnice opada, ali ne doseže nulu prije početka slijedećeg intervala magnetiziranja.

5.2. Postotna pogreška faktora vođenja pretvarača

Izrađeni pretvarač sastoji se od realnih komponenti te je pri mjerenju očekivano odstupanje između karakterističnih vrijednosti u odnosu na analizu. Pogreška će u nastavku biti izražena kao postotna pogreška faktora vođenja prema [8]:

$$p_{\%} = \frac{\alpha_m - \alpha_r}{\alpha_r} \cdot 100\% \quad (5-1)$$

Kao referentnu, računsku vrijednost uzet će se faktor vođenja izračunat pomoću precizno izmjerenih vrijednosti napona izvora i napona trošila prema (5-2), dok će se za izmjerenu vrijednost koristiti vrijednosti perioda vođenja T_{V1} i sklopne periode T_S izmjerene pomoću osciloskopa kako je prikazano na slici 5.3., a zatim uvrštene u (3-14).

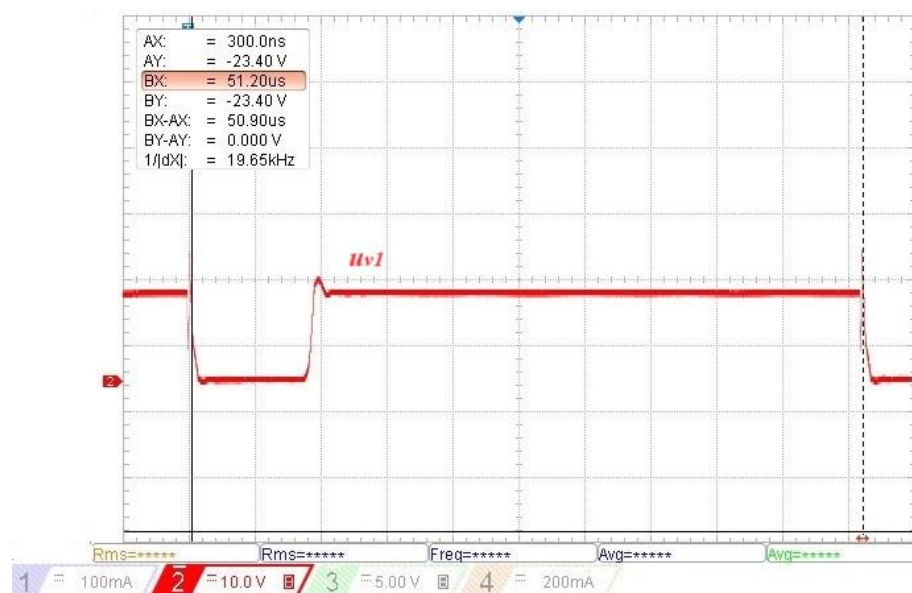
$$\alpha_r = \frac{U_d(0)}{E}$$

$$\alpha_m = \frac{T_{V1}}{T_S}$$

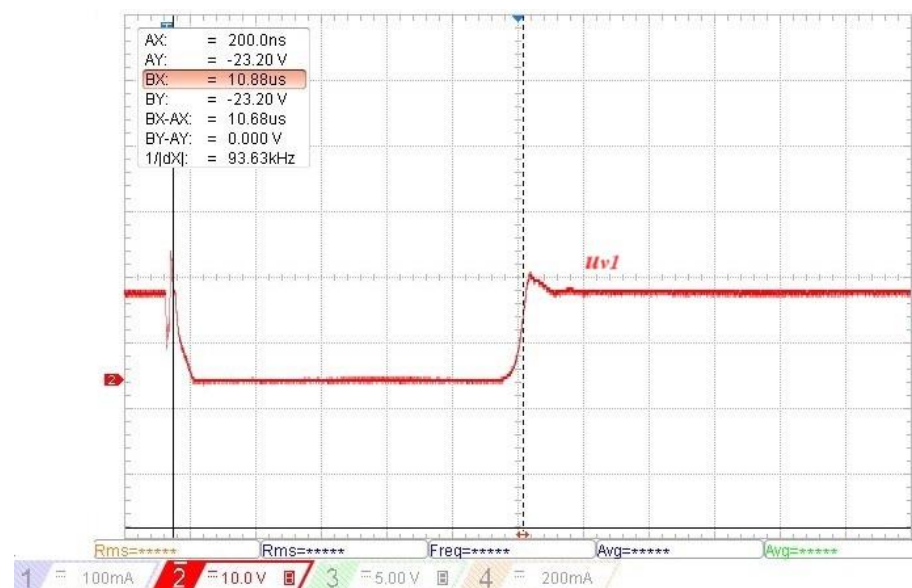
gdje su: α_m =izmjereni faktor vođenja

α_r =izračunati faktor vođenja

a)



b)



Slika 5.3. Mjerenje: a) sklopne periode, b) vremena vođenja MOSFET-a

Na slikama 5.3 a) i 5.3. b) prikazan je postupak za samo jedno mjerenje, međutim, kako bi se odredila što točnija postotna pogreška, provedeno je više mjerenja čiji su rezultati prikazani u tablici 5.2.

		1	2	3	4
E	[V]	12.11	12.07	12.07	11.94
$U_d(0)$	[V]	2.31	4.03	5.26	9.05
α_r	[/]	0.19	0.33	0.44	0.76
T_{VI}	[μ s]	10.68	18.36	19.50	38.2
T_S	[μ s]	51.00	49.30	48.60	45.8
α_m	[/]	0.21	0.37	0.40	0.83
p	[%]	10.53	12.12	9.09	9.21
$\bar{p} = 10.23\%$					

Tablica 5.2. Rezultati mjerenja postotne pogreške

Na temelju izmjerenih i izračunatih vrijednosti faktora vođenja kao glavnog pokazatelja upravljanja srednjom vrijednosti napona trošila dolazi se do zaključka da je postotno odstupanje mjerenja od 9% do 12% što ovisi o odabranoj mjernoj točki.

To znači da je teoretski dobiven faktor vođenja samo početni faktor vođenja pri prvom parametrisiranju pretvarača, a za ostvarenje zadane srednje vrijednosti napona trošila ipak će se trebati povećati faktor vođenja, u prosijeku za 10%.

5.3. Naponska nadvišenja pri sklapanju

Ukoliko se ponovno promotre valni oblici napona MOSFET-a, slika 5.1., uočavaju se naponska nadvišenja i odstupanja od pravokutnog valnog oblika dobivenog analizom. Ponovno, razlog tome je idealiziranje modela korištenih komponenti.

Obzirom da su prilikom izrade pretvarača korištene realne komponente odnosno MOSFET i dioda, trenutna promjena napona nije moguća kao što je slučaj kod idealnih sklopki pa se prilikom uključivanja i isključivanja sklopke javlja naponsko nadvišenje koje je posljedica pojave tzv. parazitskih svojstava realnih sklopnih komponenata. Nakon uklapanja MOSFET-a napon još ne poprima konačnu stalnu vrijednost već oscilira oko ravnotežnog položaja i

postepeno se smanjuje sve do zadane vrijednosti što odgovara odzivu karakterističnom za mrežu 2. reda, točnije RLC krug.

Ovakvo dinamičko ponašanje napona može se okarakterizirati kao pseudoperiodički ili jedan od slobodnih odziva RLC kruga, a što znači da bi se točniji model MOSFET-a trebao sastojati od kapaciteta, induktiviteta i otpora. Ovi elementi mreže ukazuju na parazitska svojstva poluvodičkih učinkivih ventila.

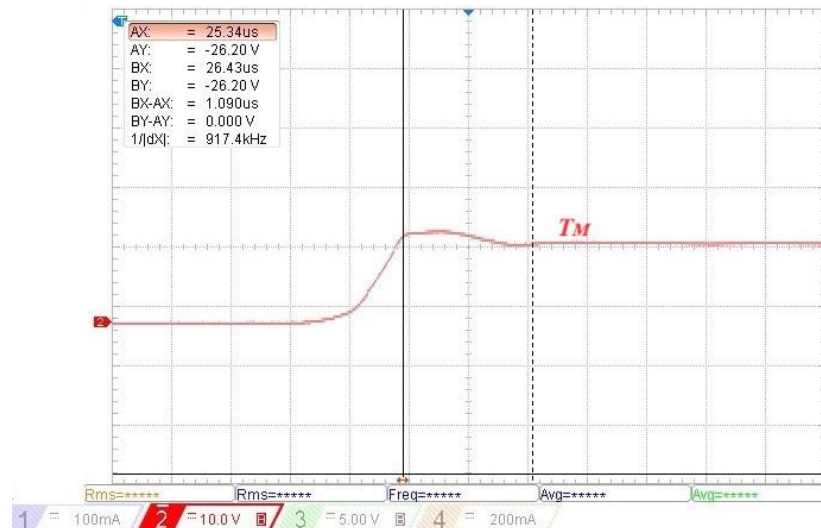
Na slici 5.4. prikazani su trenutci uklapanja diode i MOSFET-a te je izmjereno trajanje smirivanja napona za oba slučaja.

Izmjereni su vremena: $T_M=25.34\mu\text{s}$ i $T_D=26.48\mu\text{s}$, gdje je:

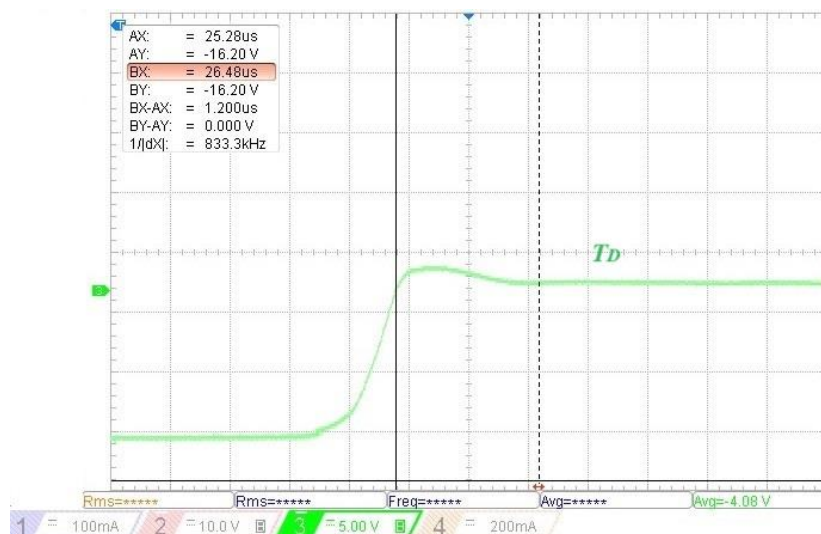
- T_M =vrijeme smirivanja napona MOSFET-a

- T_D =vrijeme smirivanja napona diode

a)



b)



Slika 5.4. Postupak određivanja vremena smirivanja napona: a) MOSFET-a b) diode

Na osnovu očitano vremena smirivanja napona MOSFET-a i diode, slika 5.4., moguće je procijeniti kužnu frekvenciju pseudoperiodičkog odziva, ω_d :

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T}$$

Tablica 5.3. Izračunate vrijednosti kružne frekvencije

$\omega_d(T_M)$	[rad/s]	247.96×10^3
$\omega_d(T_D)$	[rad/s]	237.28×10^3

Na osnovu poznate kružne frekvencije i mjerenja na samom MOSFET-u, kao i podatkovnih tablica u prilogu [P3] moguće je odrediti nadomjesni otpor, kao i parazitski induktivitet jer je kružna frekvencija pseudoperiodičkog odziva dana izrazom [9]:

$$\omega_d = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right)^2 + \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

U ovom završnom radu određivanje parazitskih svojstava MOSFET-a nije zadatak rada, već isključivo usporedba i komentar karakterističnih valnih oblika, kao i parametara važnih za proces pretvorbe dobivenih analizom na matematičkom modelu i mjerenjem na fizičkoj realizaciji silaznog pretvarača.

6. ZAKLJUČAK

Temeljem dobivenih rezultata mjerenja zaključeno je kako izrađeni pretvarač radi u kontinuiranom režimu rada u cijelom području rada izlaznog napona od 5.8V do 9.7V.

Pretvarač radi na odabranoj frekvenciji rada od ≈ 21 kHz što je potvrđeno mjerenjima. Odabrana frekvencija nalazi se van čujnog spektra čovjeka što se pokazalo važnim prilikom ugradnje silaznih pretvarača u audio i video opremu zbog magnetostrikcije.

Mjerenjima je utvrđeno i kako promjena srednje vrijednosti napona trošila mijenja brzinu istosmjernog motora kojim je opterećen pretvarač. Promjena vremena vođenja T_{VI} MOSFET-a od $10\mu\text{s}$ do $38\mu\text{s}$ utječe na povećanje brzine vrtnje motora te je uz fiksnu sklopnu frekvenciju ostvareno pulsno-širinskom upravljanje.

Temeljem mjerenja utvrđeno je postotno odstupanje faktora vođenja pretvarača od izračunate očekivane vrijednosti koja iznosi između 9% i 12% u ovisnosti o odabranoj radnoj točki pretvarača. Zaključeno je kako će prilikom ostvarenja željene srednje vrijednosti napona trošila biti nužno povećati faktor vođenja za $\approx 10\%$ u odnosu na teoretski dobiven faktor vođenja.

Promatranjem trenutaka uklopa MOSFET-a i diode uočavaju se odstupanje od pravokutnog valnog oblika i naponska nadvišenja čiji su uzrok parazitska svojstva realnih sklopnih komponenata. Ovakvo dinamičko ponašanje napona okarakterizirano je kao odziv mreže drugog reda tzv. pseudoperiodički odziv iz čijeg je vremenskog prikaza očitano vrijeme smirivanja napona na temelju kojega je i izračunata kružna frekvencija sustava.

LITERATURA

- [1] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Kigen d.o.o. Zagreb, Zagreb, 2010.
- [2] M. Vukšić, Elektronički pretvarači, Sveučilište u Splitu, Split, 2019.
- [3] 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,
- [4] 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
- [5] C. P. Darji, Design of PWM Using NE-555, Department Of Electronics And Communication faculty Of Technology dharmasinh Desai University, 2020., dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/347574141_DESIGN_OF_PULSE_WIDTH_MODULATOR_USING_NE-555#fullTextFileContent
- [6] B. Kuzmanović, Osnove elektrotehnike II, Element, Zagreb, 2011.
- [7] G. Yu, Magnetostriction: Engineering Libre Texts, University of California, 2015, dostupno na: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Magnetic_Properties/Magnetostriction](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Magnetic_Properties/Magnetostriction)
- [8] Ž. Mioković, Fizika 1 - Priručnik za laboratorijske vježbe, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2013.
- [9] I. Flegar, Teorija mreža - bilješke s predavanja, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2001.

POPIS OZNAKA

E	napon izvora
E_d	protuuelektromotorna sila trošila
I_d	struja trošila
L_d	induktivitet trošila
$p\%$	postotna pogreška
R_d	otpor trošila
T_D	period pseudoperiodičkog odziva diode
T_M	period pseudoperiodičkog odziva tranzisotra
T_S	sklopni period
T_{V1}	period vođenja ventila V_1
u_d	napon na trošilu
V_1	ventil 1
V_2	ventila 2
α	faktor vođenja
α_m	izmjereni faktor vođenja
α_r	izračunati faktor vođenja
τ	vremenska konstanta kondenzatora

SAŽETAK

Napravljena je analiza rada istosmjernog silaznog pretvarača u slučaju opterećenja trošilom valovite struje, pri čemu su dani karakteristični valni oblici napona i struja ventila i trošila rada pomoću Kirchohoffovih zakona, a zatim su predstavljeni i osnovni principi upravljanja istosmjernih pretvarača.

Opisana je izrada silaznog pretvarača opterećenog istosmjernim motorom male snage. Prvenstveno su objašnjena osnovna dva dijela koja čine pretvarač, pretvarački i upravljački dio. Dane su specifikacije istosmjernog motora. Objašnjen je postupak izrade tiskane pločice sklopa i postolja.

Izvršena su mjerenja izvršenim na izrađenom pretvaraču, objašnjen je postupak mjerenja i dani su rezultati mjerenja. Komentirani su mogući razlozi pojave pogreške u određivanju faktora vođenja pretvarača.

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

SUMMARY

Design od DC-DC buck converter to supply a low power DC motor controlled by LM555CN

An analysis of the operation of the DC step-down converter in the case of load with a ripple current consumer was made, whereby the characteristic waveforms of the voltage and current of the valve and the work consumer were given using Kircohhoff's laws, and then the basic principles of the control of the DC converters were presented.

The building of a step-down converter loaded with a low-power DC motor is described. Firstly, the two main parts that make up the converter, the converter and the control part, are explained. DC motor specifications are given. The process of making the circuit board and the base is explained.

Measurements were performed on the manufactured converter, the measurement procedure was explained and the measurement results were given. The possible reasons for the occurrence of an error in the determination of the driving factor of the converter are commented on.

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

ŽIVOTOPIS

Dora Borić rođena je u Osijeku 23. lipnja, 2001. godine. Tijekom osnovne škole počinje pokazivati interes za tehničke znanosti te više puta sudjeluje na natjecanjima iz područja matematike, fizike i tehničke kulture te zbog ostvarenog uspjeha na istim ostvaruje pravo na izravan upis u tehničke srednje škole. 2016. godine upisuje Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku, paralelno volontira u Zajednici tehničke kulture grada Osijeka, te 2017. dobiva Povelju zahvalnosti Grada Osijeka i Osječko-baranjske županije za doprinos tehničkoj kulturi. Tijekom 2019. godine odrađuje tromjesečnu stručnu praksu u Ujedinjenom Kraljevstvu, a godinu dana kasnije završava srednjoškolsko obrazovanje sa odličnim uspjehom i ostvaruje izravan upis na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku te isti i upisuje 2020. godine. Odlučuje se za preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike smjer Energetika i nada nastaviti obrazovanje na diplomskom studiju Automatizacije industrijskih sustava.



PRILOG

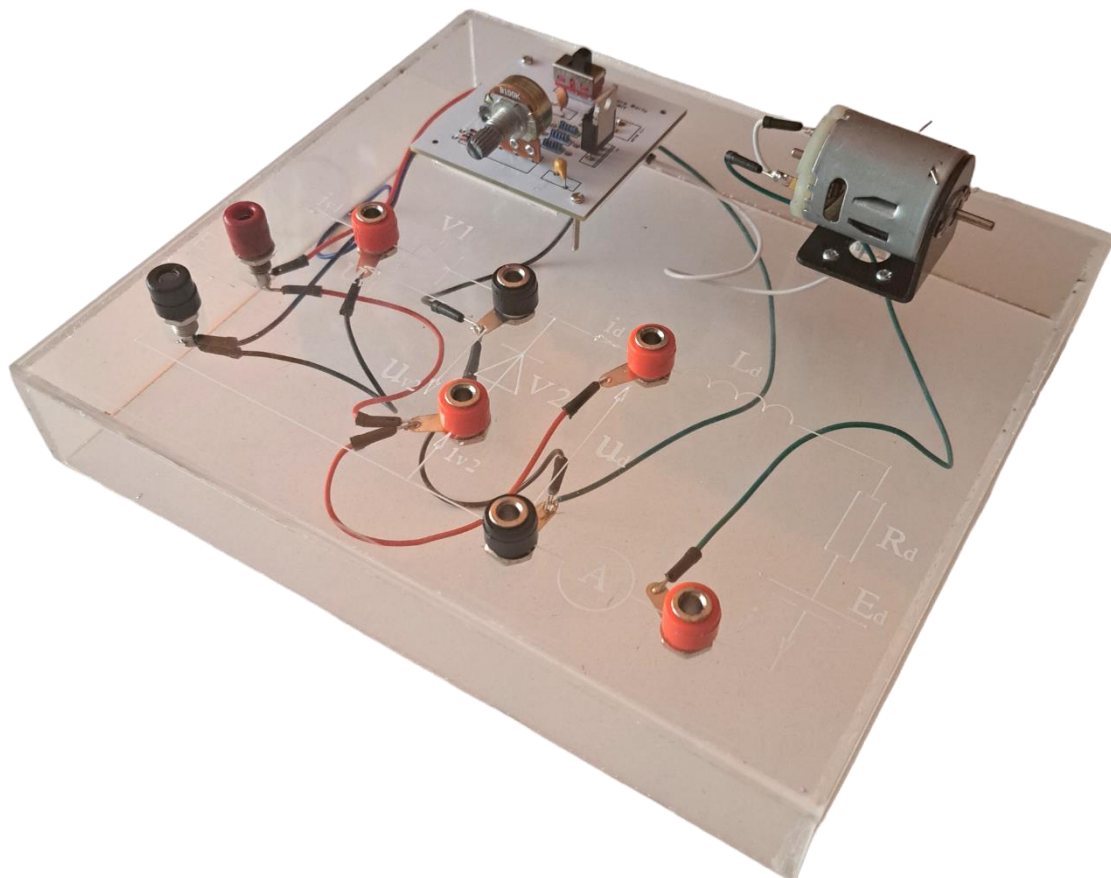
P1 – konačan izgled silaznog pretvarača

P2 – kataloški podatci NE555P mikroupravljača

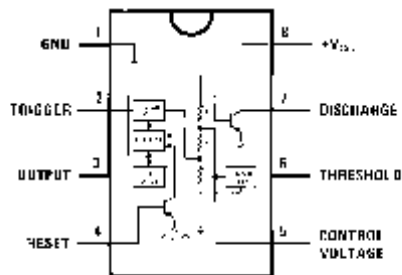
P3 – kataloški podatci IRF540N tranzistora

P4 – kataloški podatci 1N4001 diode

P1 – konačan izgled silaznog pretvarača



P2 – kataložski podatci NE555N mikroupravljača



General Description

is a highly stable device for generating accurate time delays or oscillation. Additional terminals are provided for triggering or resetting if desired. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For astable operation as an oscillator, the free running frequency and duty cycle are accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output circuit can source or sink up to 200mA or drive TTL circuits.

Features

- Direct replacement for SE555/NE555
- Timing from microseconds through hours
- Operates in both astable and monostable modes
- Adjustable duty cycle
- Output can source or sink 200 mA
- Output and supply TTL compatible
- Normally on and normally off output

Applications

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation
- Pulse position modulation
- Linear ramp generator



($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = +5\text{V}$ to $+15\text{V}$, unless otherwise specified)

Parameter	Conditions	Limits			Units
		Min	Typ	Max	
Supply Voltage		4.5		16	V
Supply Current	$V_{CC} = 5\text{V}, R_L = \infty$ $V_{CC} = 15\text{V}, R_L = \infty$		3 10	6 15	mA
Timing Error, Monostable					
Initial Accuracy	$R_A = 1\text{k}$ to $100\text{k}\Omega$, $C = 0.1\mu\text{F}$, (Note 5)		1		%
Drift with Temperature			50		ppm/ $^\circ\text{C}$
Accuracy over Temperature			1.5		%
Drift with Supply			0.1		%/V
Timing Error, Astable					
Initial Accuracy	$R_A, R_B = 1\text{k}$ to $100\text{k}\Omega$, $C = 0.1\mu\text{F}$, (Note 5)		2.25		%
Drift with Temperature			150		ppm/ $^\circ\text{C}$
Accuracy over Temperature			3.0		%
Drift with Supply			0.30		%/V
Threshold Voltage			0.667		$\times V_{CC}$
Trigger Voltage	$V_{CC} = 15\text{V}$ $V_{CC} = 5\text{V}$		5 1.67		V V
Trigger Current					
Reset Voltage					
Reset Current			0.1	0.4	mA
Threshold Current	(Note 6)				
Control Voltage Level	$V_{CC} = 15\text{V}$ $V_{CC} = 5\text{V}$	9 2.6	10 3.33	11 4	V
Pin 7 Leakage Output High			1	100	nA
Pin 7 Sat (Note 7)					
Output Low	$V_{CC} = 15\text{V}, I_T = 15\text{mA}$		180		mV
Output Low	$V_{CC} = 4.5\text{V}, I_T = 4.5\text{mA}$		80	200	mV



Electrical Characteristics (Notes 1, 2) (Continued)

($T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = +5\text{V}$ to $+15\text{V}$, unless otherwise specified)

Parameter	Conditions	Limits			Units
		Min	Typ	Max	
Output Voltage Drop (Low)	$V_{CC} = 15\text{V}$				
	$I_{SINK} = 10\text{mA}$		0.1	0.25	V
	$I_{SINK} = 50\text{mA}$		0.4	0.75	V
	$I_{SINK} = 100\text{mA}$		2	2.5	V
	$I_{SINK} = 200\text{mA}$		2.5		V
	$V_{CC} = 5\text{V}$				
	$I_{SINK} = 8\text{mA}$				V
	$I_{SINK} = 5\text{mA}$		0.25	0.35	V
Output Voltage Drop (High)	$I_{SOURCE} = 200\text{mA}$, $V_{CC} = 15\text{V}$		12.5		V
	$I_{SOURCE} = 100\text{mA}$, $V_{CC} = 15\text{V}$	12.75	13.3		V
	$V_{CC} = 5\text{V}$	2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100		ns
Fall Time of Output			100		ns

Note 1: All voltages are measured with respect to the ground pin, unless otherwise specified.

Note 2: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. Operating Ratings indicate conditions for which the device is functional, but do not guarantee specific performance limits. Electrical Characteristics state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which guarantee specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not guaranteed for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.

Note 3: For operating at elevated temperatures the device must be derated above 25°C based on a $+150^\circ\text{C}$ maximum junction temperature and a thermal resistance $170^\circ\text{C}/\text{W}$ (80-6), junction to ambient.

Note 4: Supply current when output high typically

Note 5: Tested at $V_{CC} = 5\text{V}$ and $V_{CC} = 15\text{V}$.

Note 6: This will determine the maximum value of $R_A + R_B$ for 15V operation. The maximum total ($R_A + R_B$) is 20M Ω .

Note 7: No protection against excessive pin 7 current is necessary providing the package dissipation rating will not be exceeded.

P3 - kataložki podatci IRF540N tranzistora

INCHANGE Semiconductor

isc Product Specification

isc N-Channel Mosfet Transistor

IRF540N

• FEATURES

- Drain Current $I_D = 27A @ T_C = 25^\circ C$
- Static Drain-Source On-Resistance
: $R_{DS(on)} = 0.052 \Omega$ (Max)
- Fast Switching Speed
- Minimum Lot-to-Lot variations for robust device performance and reliable operation

• DESCRIPTION

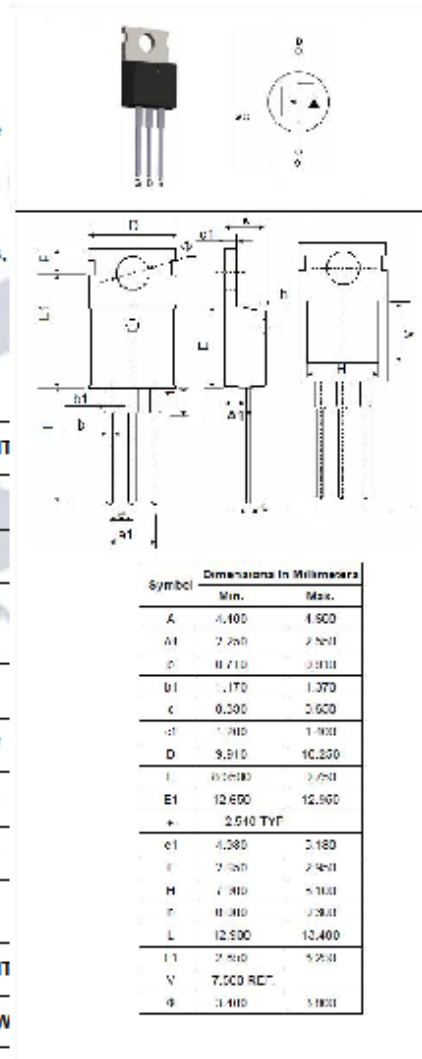
- Designed especially for high voltage, high speed applications, such as off-line switching power supplies, UPS, AC and DC motor controls, relay and solenoid drivers.

• ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_a = 25^\circ C$)

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
V_{DS}	Drain-Source Voltage	100	V
V_{GS}	Gate-Source Voltage-Continuous	± 20	V
I_D	Drain Current-Continuous @ $T_C = 25^\circ C$	27	A
	Drain Current-continuous @ $T_C = 100^\circ C$	19	
I_{DM}	Drain Current-Single Pulsed	110	A
P_D	Total Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$	100	W
T_J	Max. Operating Junction Temperature	-55~175	$^\circ C$
T_{stg}	Storage Temperature	-55~175	$^\circ C$

• THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	MAX	UNIT
$R_{th(j-c)}$	Thermal Resistance, Junction to Case	1.6	$^\circ C/W$
$R_{th(j-a)}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	62	$^\circ C/W$



isc website: www.iscsemi.com

1 isc & iscsemi is registered trademark

isc N-Channel Mosfet Transistor**IRF540N****ELECTRICAL CHARACTERISTICS** $T_c=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	MAX	UNIT
$V_{(BR)DSS}$	Drain-Source Breakdown Voltage	$V_{GS}=0$; $I_D=250\mu\text{A}$	100		V
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	$V_{DS}=V_{GS}$; $I_D=250\mu\text{A}$	2	4	V
$R_{DS(on)}$	Drain-Source On-Resistance	$V_{GS}=10\text{V}$; $I_D=16\text{A}$		0.052	Ω
I_{GSS}	Gate-Body Leakage Current	$V_{GS}=\pm 20\text{V}$; $V_{DS}=0$		± 100	nA
I_{DSS}	Zero Gate Voltage Drain Current	$V_{GS}=100\text{V}$; $V_{DS}=0$		25	μA
V_{SD}	Forward On-Voltage	$I_S=16\text{A}$; $V_{GS}=0$		1.3	V

P4 – kataložki podatki za 1N4001 diodu

1N4001 THRU 1N4007

PLASTIC SILICON RECTIFIER

VOLTAGE - 50 to 1000 Volts CURRENT - 1.0 Ampere

FEATURES

- Low forward voltage drop
- High current capability
- High reliability
- High surge current capability
- Exceeds environmental standards of MIL-S-19500/228

MECHANICAL DATA

Case: Molded plastic, DO-41

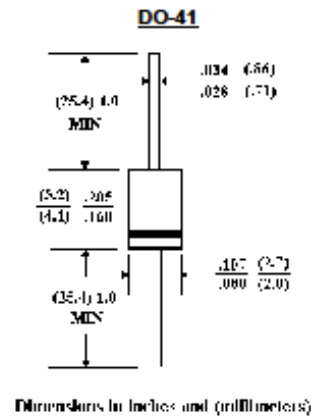
Epoxy: UL 94V-0 rate flame retardant

Lead: Axial leads, solderable per MIL-STD-202,
method 208 guaranteed

Polarity: Color band denotes cathode end

Mounting Position: Any

Weight: 0.012 ounce, 0.3 gram



MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Ratings at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.

Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.

For capacitive load, derate current by 20%.

	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNITS
Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS Voltage	35	75	140	280	420	560	700	V
Maximum DC Blocking Voltage	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum Average Forward Rectified Current .375"(9.5mm) Lead Length at T _A =75 °C	1.0							A
Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load (JEDEC method)	30							A
Maximum Forward Voltage at 1.0A DC and 25 °C	1.1							V
Maximum Full Load Reverse Current Full Cycle Average at 75 °C Ambient	30							µA
Maximum Reverse Current at T _A =25 °C At Rated DC Blocking Voltage T _A =100 °C	5.0							µA
Typical Junction capacitance (Note 1)	15							pF
Typical Thermal Resistance (Note 2) R _{θJA}	50							°C/W
Typical Thermal resistance (NOTE 2) R _{θJL}	25							°C/W
Operating and Storage Temperature Range T _o , T _{stg}	-55 to +150							°C

NOTES:

1. Measured at 1 MHz and applied reverse voltage of 4.0 VDC.
2. Thermal Resistance Junction to Ambient and from junction to lead at 0.375"(9.5mm) lead length P.C.B mounted.

RATING AND CHARACTERISTIC CURVES

1N4001 THRU 1N4007

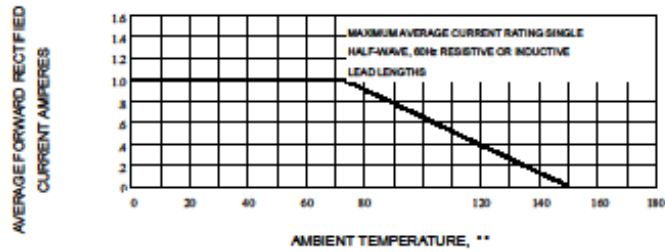


Fig. 1-TYPICAL FORWARD CURRENT DERATING CURVE

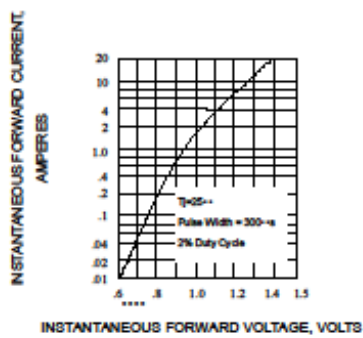


Fig. 2-TYPICAL FORWARD CHARACTERISTICS

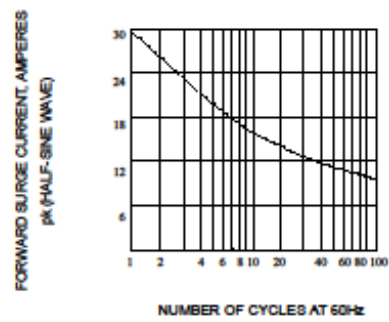


Fig. 3-MAXIMUM NON-REPETITIVE FORWARD SURGE CURRENT

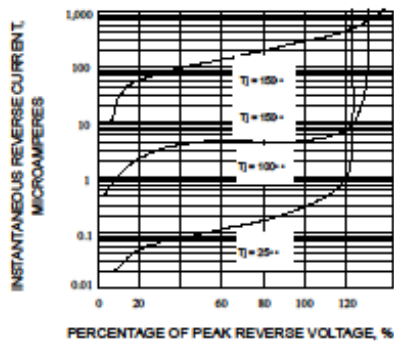


Fig. 4-TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS

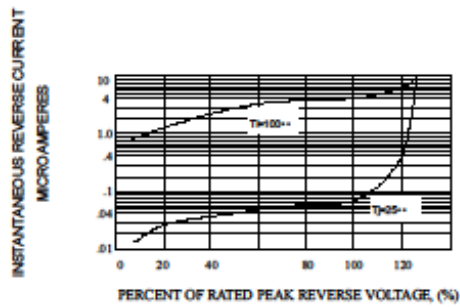


Fig. 5-TYPICAL REVERSE CHARACTERISTICS