

# Značajke didaktičko-multimedijalne opreme bazirane na radu s istosmjernim motorom s permanentim magnetima

---

Gregić, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:200:814599>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ZNAČAJKE DIDAKTIČKO-MULTIMEDIJALNE  
OPREME BAZIRANE NA RADU S ISTOSMJERNIM  
MOTOROM S PERMANENTIM MAGNETIMA**

**Diplomski rad**

**Marin Gregić**

**Osijek, 2021.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA RADA .....</b>	<b>2</b>
<b>3. OPIS OPREME .....</b>	<b>3</b>
3.1. Sučelje .....	3
3.2. Eksperimentalna kartica s motorom .....	5
<b>4. BLDC motor .....</b>	<b>7</b>
4.1. Općenito .....	7
4.2. Usporedba s istosmjernim strojem .....	11
<b>5. IZMJENJIVAČ .....</b>	<b>12</b>
5.1. Naponski trofazni izmjenjivač .....	12
5.2. Karakteristični valni oblici.....	14
<b>6. PROVEDBA EKSPERIMENATA .....</b>	<b>19</b>
6.1. Određivanje uklopnih stanja za napajanje statora.....	19
6.2. Naponske razine koje napajaju statorske namote .....	20
6.3. Hallovi senzori.....	22
6.4. Protuelektromotorna sila.....	25
6.5. Utjecaj promjene momenta na struju .....	27
6.6. Kontrola motora.....	29
6.7. Kočenje.....	33
<b>7. TESTIRANJE PRETVARAČA S EKSPERIMENTALNE KARTICE .....</b>	<b>36</b>
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>43</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>44</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>45</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>45</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>46</b>



## 1. UVOD

U ovome radu proći će se kroz eksperimente zadane od strane proizvođača opreme Lucas Nuelle. Proizvođač Lucas Nuelle poznat je po izradi edukacijskih materijala s područja elektrotehnike i elektronike. Iz toga razloga oprema nije komplicirana za korištenje te pomoću programske podrške proizvođača moguće je koristiti virtualne instrumente kojima se očitavaju i snimaju vrijednosti.

Sve češće primjene istosmjernog motora s permanentnim magnetima (eng. brushless DC electric motor – BLDC motor) rezultirala je povećanim zahtjevima za tim motorima kao i zanimanjem za njihov način rada. Motor dolazi uz opremu Lucas Nuelle pa su tako i eksperimenti predviđeni za tu opremu. Dobiveni rezultati mjerenja usporedit će se s teorijskom analizom rada te će se utvrditi vjerodostojnost uvedenog modela pretvarača za napajanjem BLDC motora.

## 2. PREGLED PODRUČJA RADA

Autori Vanja Ambrožić i Peter Zajec u knjizi [1] pišu općenito o motorima i njihovim vrstama. U poglavlju knjige pod sinkronim motorima: motori s magnetskom uzbudnom na rotoru nalazi se BLDC motor. O BLDC motoru pišu osnovne značajke, napravljena je i usporedba s PMSM (eng. permanent magnet synchronus machine) radi uvida u njihove sličnosti i razlike. Također, prikazani su i oblici magnetskih i električnih veličina.

Ramu Krishnan u knjizi [2] se bazira na radu motora s permanentim magnetima. Knjiga je podjeljena u 3 dijela, od kojih se jedan dio tiče upravo BLDC motora i njihovog modeliranja.

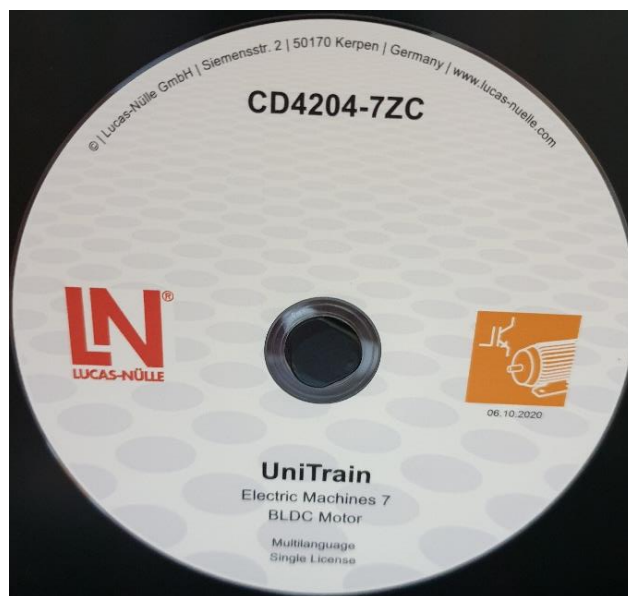
U knjizi autora Xia Chang-liang [3] nalaze se informacije od povijesnog razvoja, preko modela i simulacije pa sve do kontrole brzine, stabilizacije momenta i kontrole BLDC motora bez senzora.

U knjizi Ivana Flegara [4] autor je opisao rad neupravljivog trofaznog mosnog spoja. Uz opis rada dolaze i jednadžbe koje podupiru pretpostavke prema kojima se konačno dobijaju karakteristični valni oblici napona, kao i vrijeme vođenja ventila i kombinacije u kojima vode.

Završni rad Vinka Barišića [5] navodi jednu od primjena BLDC motora. Također, daje usporedbu BLDC motora i asinkronog motora, navodeći tako prednosti i mane koje očekuju proizvođača automobila prilikom odabira pogonskog motora.

### 3. OPIS OPREME

Oprema Lucas Nuelle dolazi sa svim potrebnim komponentama za uspješno provođenje eksperimenata. Jedino što je potrebno, a što uz opremu ne dolazi, je računalo. Računalo je ključno jer se preko USB kabela vrši komunikacija između sučelja i računala, te pomoću računala uključujemo virtualne instrumente i očitavamo rezultate. Na računalu je potrebno prvo instalirati program LabSoft koji se lako instalira preko CD koji se dobije uz motor, a CD je prikazan slikom 3.1. Program koji je instaliran obuhvaća samo motor i njegove eksperimente te na taj način proizvođač omogućava korištenje samo one programske podrške za koju je kupljen.



Slika 3.1. CD s programom LabSoft

#### 3.1. Sučelje

Sučelje služi za povezivanje eksperimentalne kartice i računala, uz to se podrazumijeva sva popratna analiza i generiranje signala koji se kasnije prikazuju na računalu. Na sučelje se spaja napajanje i kabel koji povezuje sučelje i računalo. Slike kabela za komunikaciju i napajanje prikazani su slikom 3.2.



Slika 3.2 Kabel napajanja i kabel za komunikaciju

Na sučelje se spaja eksperimentator u koji ulazi eksperimentalna kartica. Na slici 3.3. prikazano je sučelje s eksperimentatorom.

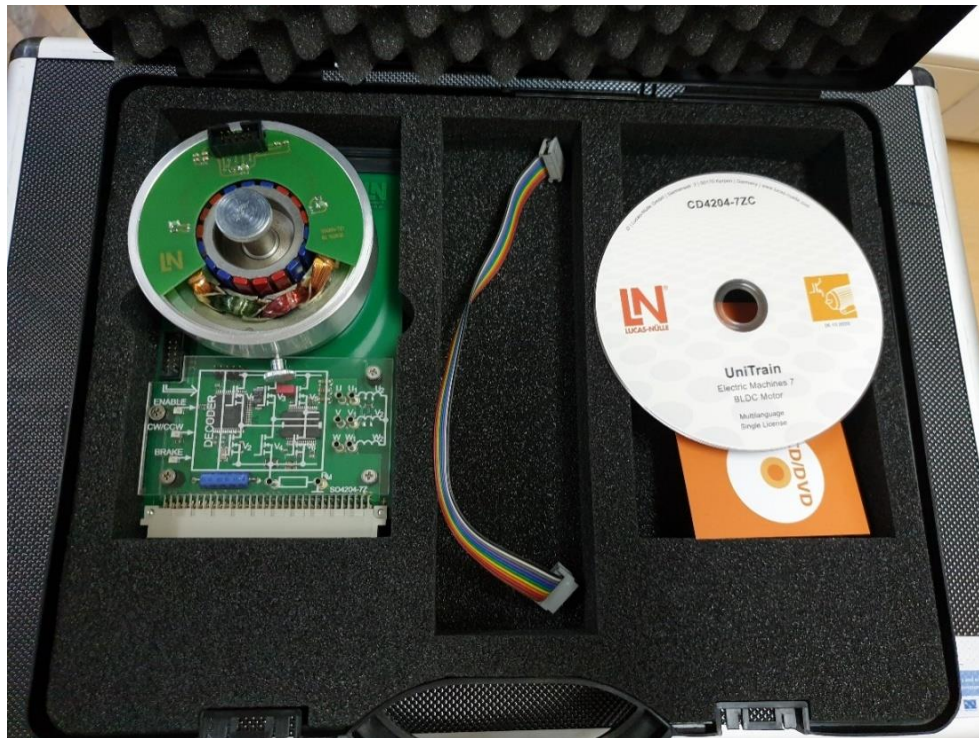


Slika 3.3. Sučelje s eksperimentatorom



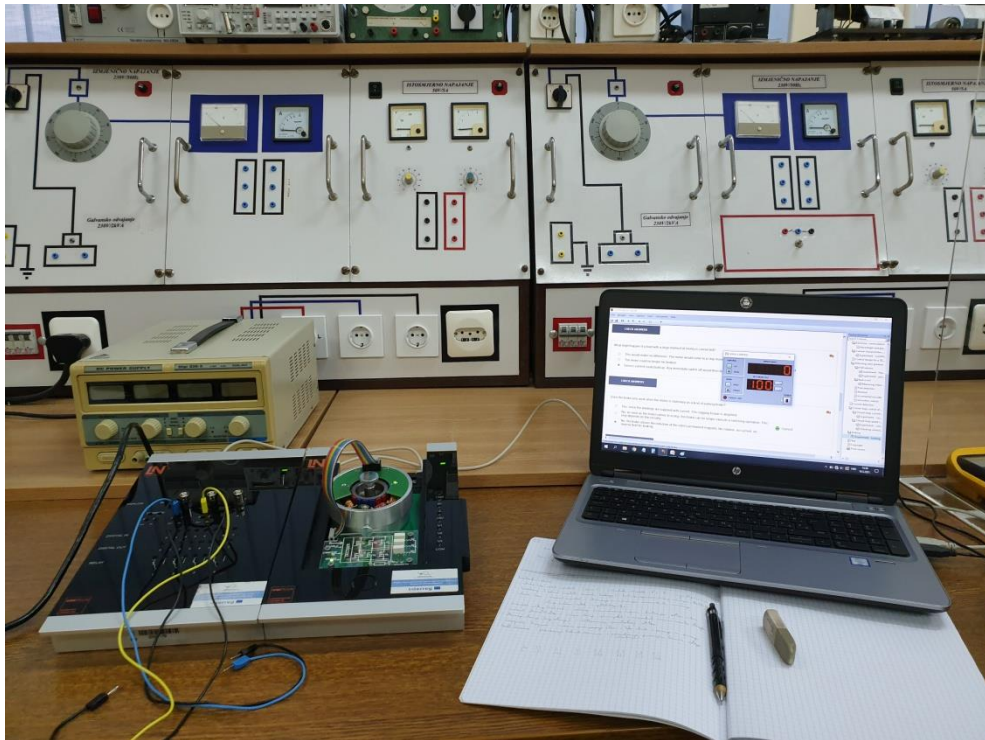
### 3.2. Eksperimentalna kartica s motorom

Eksperimentalna kartica s istosmjernim motorom s permanentnim magnetima je kartica koja se koristi. Osim same ekperimentalne kartice s BLDC motorm u kompletu još dolazi CD i kabel kojim se povezuju Hallovi senzori s motorom odnosno kontrolnim dijelom motora. Cijeli sadržaj kompleta prikazan je slikom 3.4. Na eksperimentalnoj kartici se nalaze mjerne točke koje se pomoću spojnih vodiča povezuju sa kanalima na sučelju.



Slika 3.4. Lucas Nuelle komplet za BLDC

Pripremljena kompletna oprema, prije konačnog spajanja za obavljanje određenog eksperimenta prikazana je na slici 3.5. U kompletnu opremu, dakle, spadaju: računalo, sučelje, eksperimentator, eksperimentalna kartica na kojoj se nalazi BLDC motor, kablovi za spajanje na eksperimentalnoj kartici, kabel za napajanje i kabel za komunikaciju.



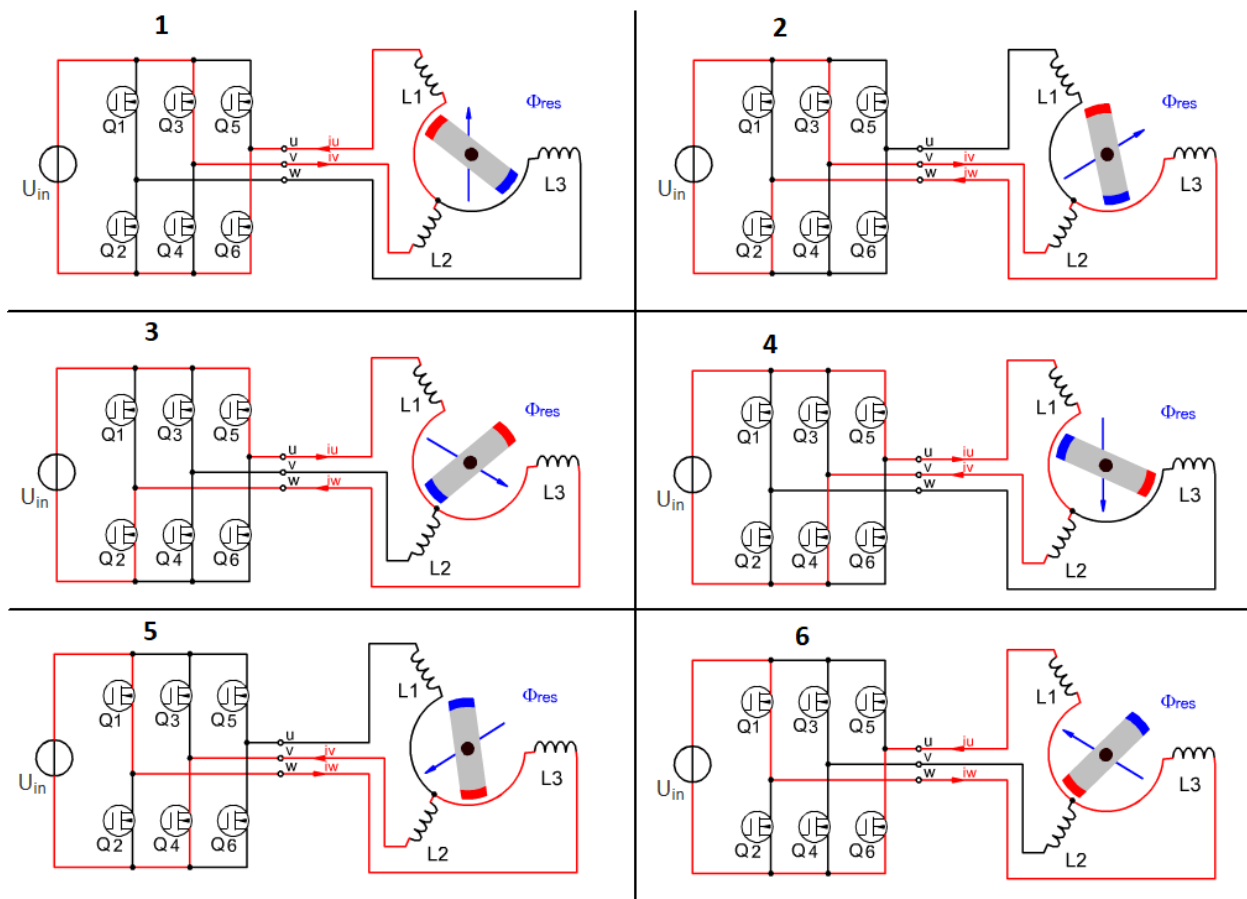
Slika 3.5. Prikaz radnog mjesta sa spojenom kompletnom opremom

## 4. BLDC motor

### 4.1. Općenito

BLDC motor je kombinacija istosmjernog i sinkronog motora. Vrlo sličan BLDC-u je PMSM (eng. permanent magnet synchronus machine) ili kako se još naziva BLAC. Glavna razlika između BLDC i BLAC motora je ta što je statorski namot projektiran tako da uzrokuje sinusnu distribuciju protjecanja u zračnom rasporu, a kod BLDC motora uzrokuje pravokutnu ili trapezoidnu distribuciju protjecanja, [1]. Uspoređujući način kontrole i razinu jednostavnosti što se tiče kontrole BLDC motor ima prednost. BLDC motor ima 6 pozicija rotora za trofazni stroj u svakom električnom ciklusu, [2]. Kao signali, koji se koriste za komunikaciju s upravljačkom jedinicom, mogu se koristiti Hallovi senzori. Hallovi senzori jednostavniji su i jeftiniji od mehaničkog mjerača kuta rotora kakav se koristi kod BLAC motora za precizno određivanje položaja rotora zbog pravilne transformacije u  $d-q$  koordinatni sustav, [1]. Što se tiče usporedbe rada BLDC i BLAC motora, BLAC motori se napajaju sve tri grane statorskog namota konstantno. Prostornim pomakom od  $120^\circ$  međusobno sve tri faze prilikom napajanja osigurava se pomak rotora. Kod BLDC motora situacija je drugačija. Naime, BLDC motori se napajaju pomoću trofaznog mosnog spoja napaja dvije grane odjednom, dok je treća grana bez napajanja. Na taj način ostvaruje se 6 pozicija toka spomenutih ranije i na taj način se pokreće rotor. Slika 4.1. prikazuje 6 pozicija u kojima se vide se kombinacije ventila koje vode i na taj način se ostvaruje napajanje BLDC motora. Napajaju se namoti koji stvaraju magnetski tok koji ostvaruje pomak rotora. Napajanje se osigurava iz elektroničkog energetskog pretvarača realiziranog sa 6 MOSFET-a u topologiji trofaznog mosnog spoja. Radi se o trofaznom naponskom autonomnom izmjenjivaču koji na osnovu algoritma upravljanja osigurava potreban iznos i polaritet napona na namotu BLDC motora koji osigurava vrtnju. Sve se faze tijekom vrtnje rotora izmjenjuju, ali ukupna struja, koja je zbroj sve 3 faze, je istosmjerna, pa se BLDC motor pri podjeli smatra istosmjernim motorom, [1].

Statorski namoti unutar BLDC motora prikazani su slikom 4.2. Sve tri faze su međusobno pomaknute, ali nisu isprepletene već se svaka faza sastoji od 3 posebna svitka.



Slika 4.1. 6 stanja vrtnje rotora [6]

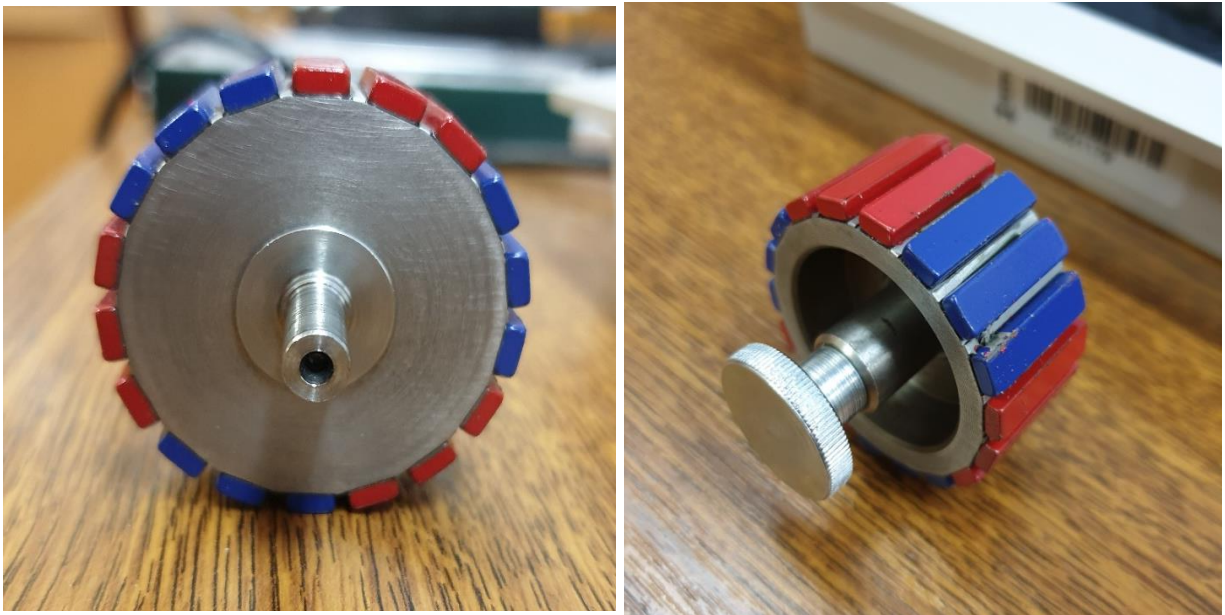


Slika 4.2. Namoti unutar statora

BLDC motor korišten u ovom radu ima rotor smješten s unutarnje strane s obzirom na statorske namote i ima 3 para polova, a rotor na kojemu se vidi broj polova prikazan je slikom 4.3. Treba spomenuti izraz po kojem se vidi da što je veći broj para polova to je manja brzina koju motor može ostvariti. Formula je prikazana brojem 4-1.

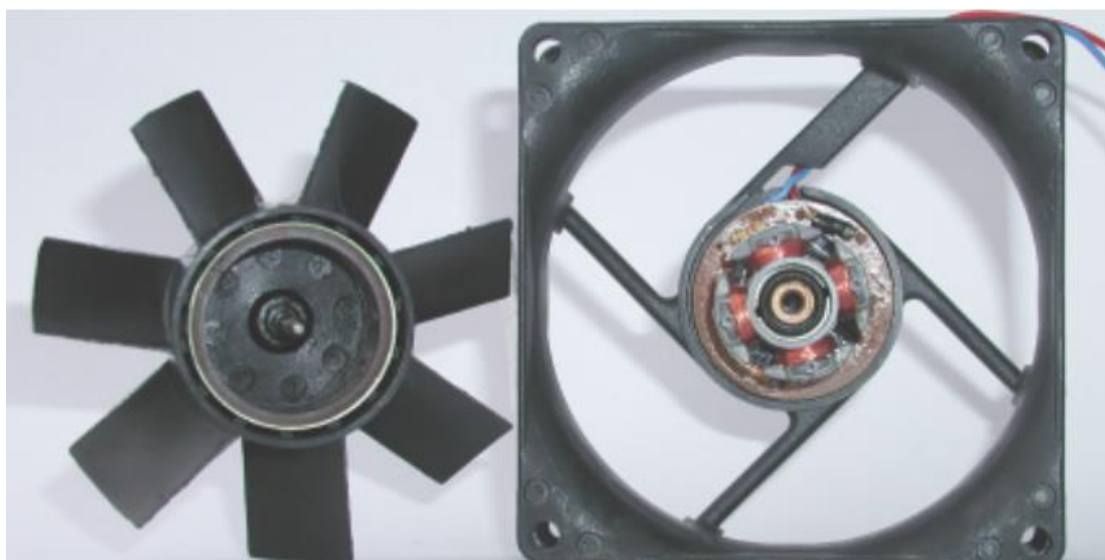
$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4-1)$$

gdje  $n$  predstavlja brzinu vrtnje,  $f$  predstavlja frekvenciju, a  $p$  broj para polova.



Slika 4.3. Rotor BLDC motora

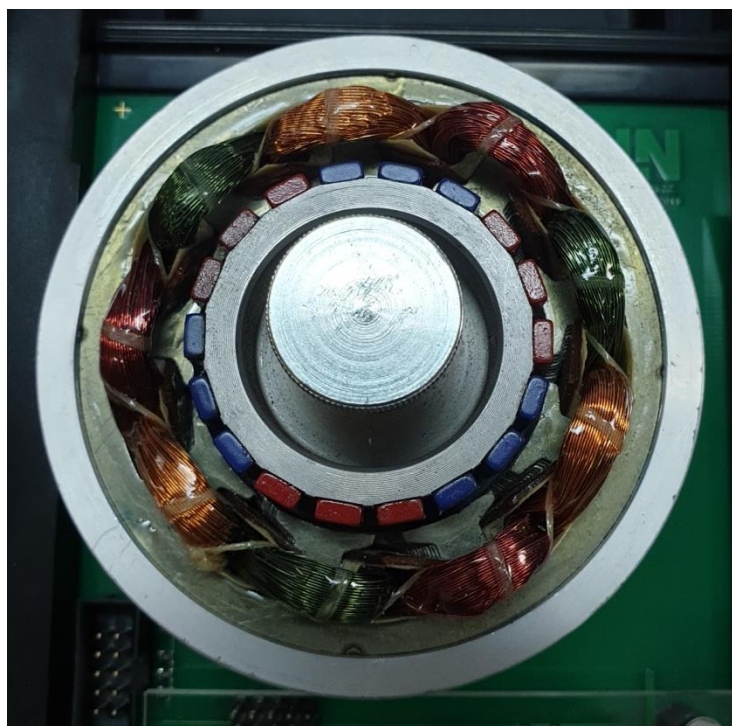
Postoji i izvedba s vanjskim rotorom pri čemu se namoti nalaze s unutarnje strane dok je rotor s permanentnim magnetom sa vanjske. Zbog takve konstrukcije magneti zadržavaju toplinu te motor radi pri nižoj nazivnoj struji, a samim time ima manji moment, [5]. Slika 4.4. prikazuje jedan takav primjer.



Slika 4.4. BLDC s vanjskim rotorom [6]

Takvi primjeri nisu rijetki, a najčešće se koriste u manjim ventilatorima.

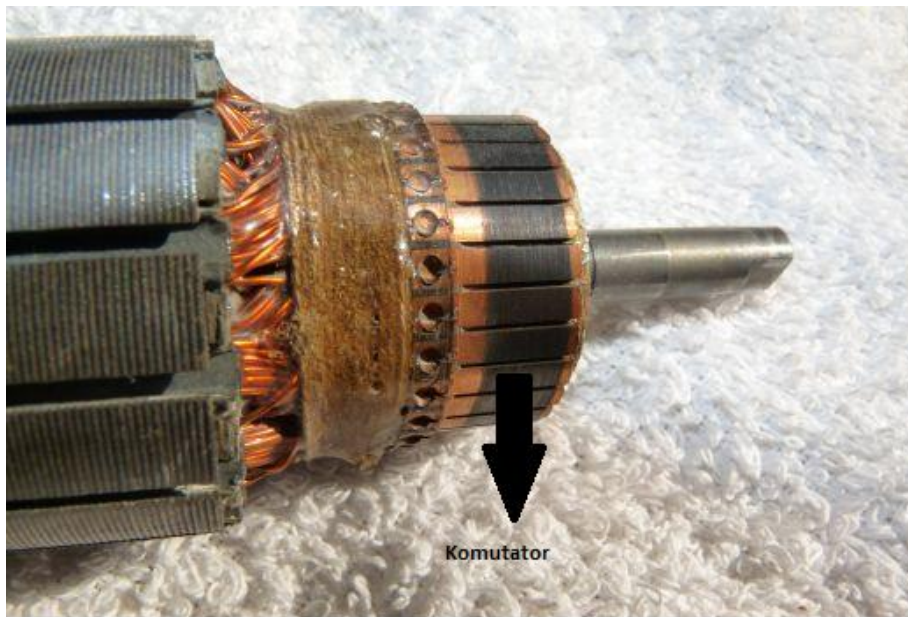
Konačno, prikaz motora je na slici 4.5. Motor je bez poklopca zbog bolje preglednosti unutrašnjosti.



Slika 4.5. Motor bez poklopca

## 4.2. Usporedba s istosmjernim strojem

Usporedbom BLDC stroja sa tradicionalnim istosmjernim strojem, BLDC stroj ima nekoliko prednosti. Istosmjerni stroj sadrži komutator, prikazan slikom 4.6., koji ima zadaću ispravljača/izmjenjivača ovisno o režimu rada, a BLDC stroj ga nema jer je elektronički komutiran. Crni trag na komutatoru ostao je zbog klizanja četkica.



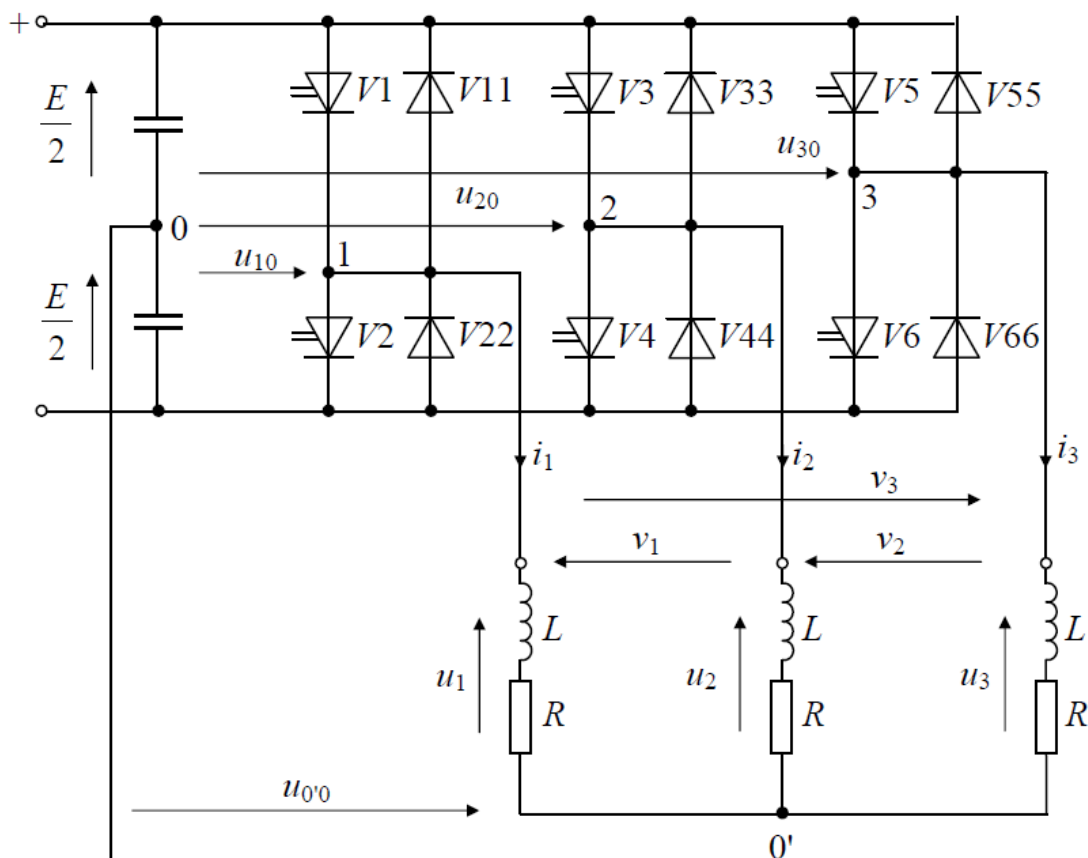
Slika 4.6. Rotor istosmjernog stroja gdje je fokus na komutatoru [7]

Zbog toga što nema komutator BLDC stroj ima kompaktniji dizajn (manje prostora je potrebno), samim time izostanak četkica uzrokuje izostanak iskrenja te se može primjeniti u prostorima koji imaju zapaljivu okolinu. Također, nema mehaničkog trošenja dijelova u tolikoj mjeri kao kod istosmjernih motora. Osim prednosti, BLDC stroj naspram istosmjernog stroja ima i nekoliko nedostataka. Potreba za većom tehničkom kompleksnosti zbog električne komutacije sa sobom vuče i veću potrebu za poluvodičkim komponentama. Također, potrebna je tehnologija detekcije rotorske pozicije koja se izvodi pomoću Hallovih senzora, mehaničkog mjerača kuta rotora i optičkih uređaja za kodiranje. Tehnologija detekcije rotora koja je primjenjena na ovom motoru je ujedno i najčešće korištena, a to je pomoću Hallovih senzora.

## 5. IZMJENJIVAČ

### 5.1. Naponski trofazni izmjenjivač

Trofazni naponski izmjenjivač koji se koristi za napajanje BLDC motora je neupravljivi trofazni mosni spoj. On je karakterističan za napajanje simetričnih trošila poput sinkronih i asinkronih motora. Shema neupravljivog trofaznog mosnog spoja prikazana je slikom 5.1. Na shemi su označeni svi ventili, kao i stuje i naponi. Ventili su prikazani antiparalelnim spojem upravljivog ventila i idealne diode, što se realizira MOSFET-om. Upravljački uređaj pretvarača uključuje i isključuje ventile napajajući tako namote koristeći se logikom koja uključuje signale Hallovih senzora, [3].



Slika 5.1. Shema trofaznog neupravljivog mosnog spoja

Naponi priključaka trošila prema srednjoj točki izvora jednaki su faznim naponima trofaznog izmjenjivača s dostupnim zvjezdastim trošila, [4]. Prema tome:

$$u_{10} = E \left( x_{v1} - \frac{1}{2} \right) \quad (5-1a)$$



$$u_{20} = E \left( x_{v3} - \frac{1}{2} \right) \quad (5-1b)$$

$$u_{30} = E \left( x_{v5} - \frac{1}{2} \right) \quad (5-1c)$$

gdje su  $x_{v1} - x_{v5}$  upravljački impulsi pretvaračkih komponenti, a  $E$  ulazni napon pretvarača.

Međufazni naponi su naponi jednaki razlici faznih napona, odnosno:

$$v_1 = u_1 - u_2 = u_{10} - u_{20} = E(x_{v1} - x_{v3}) \quad (5-2a)$$

$$v_2 = u_2 - u_3 = u_{20} - u_{30} = E(x_{v3} - x_{v5}) \quad (5-2b)$$

$$v_3 = u_3 - u_1 = u_{30} - u_{10} = E(x_{v5} - x_{v1}) \quad (5-2c)$$

Za određivanje faznih napona na trošilu potrebno je uvesti nekoliko pretpostavki. Jedna od njih je da je trošilo spojeno u zvijezdu:

$$u_{j0} = u_j + u_{0'0} \quad j = 1, 2, 3 \quad (5-3)$$

Drugo da je trošilo simetrično:

$$u_j = Ri_j + L \frac{di_j}{dt} \quad j = 1, 2, 3 \quad (5-4)$$

Sumom svih jednadžba u (5-3), i uzimajući u obzir (5-4)

$$\sum_{j=1}^3 i_j = 0 \quad (5-5)$$

slijedi da je:

$$\sum_{j=1}^3 u_j = 0 \quad (5-6)$$

Zaključuje se da je napon koji je između zvjezdišta (trošila) i srednje točke istosmjernan i jednak je:

$$u_{0'0} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 u_{j0} \quad j = 1, 2, 3 \quad (5-7)$$

Samim time dobiveni su fazni naponi trošila:

$$u_j = u_{j0} - \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 u_{j0} \quad j = 1, 2, 3 \quad (5-8)$$

Napišu li se fazni naponi za sve tri faze pomoću upravljačkih signala dobije se:

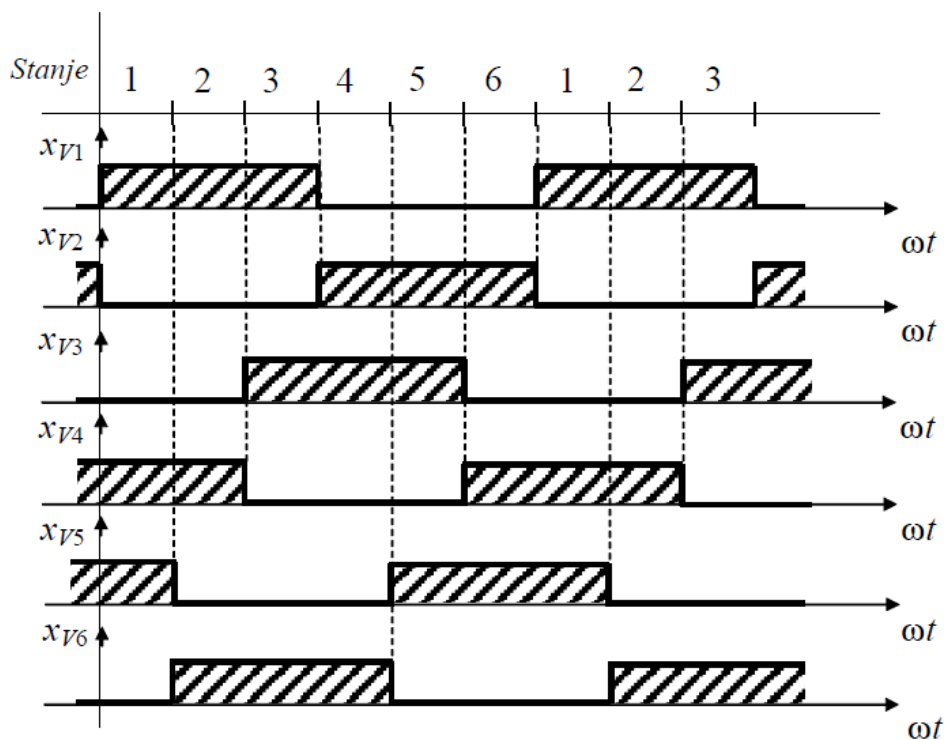
$$u_1 = \frac{E}{3}(2x_{V1} - x_{V3} - x_{V5}) \quad (5-9a)$$

$$u_2 = \frac{E}{3}(2x_{V3} - x_{V1} - x_{V5}) \quad (5-9b)$$

$$u_3 = \frac{E}{3}(2x_{V5} - x_{V1} - x_{V3}) \quad (5-9c)$$

## 5.2. Karakteristični valni oblici

Na slici 5.2. prikazani su upravljački signali pojedinih ventila te njihov slijed.



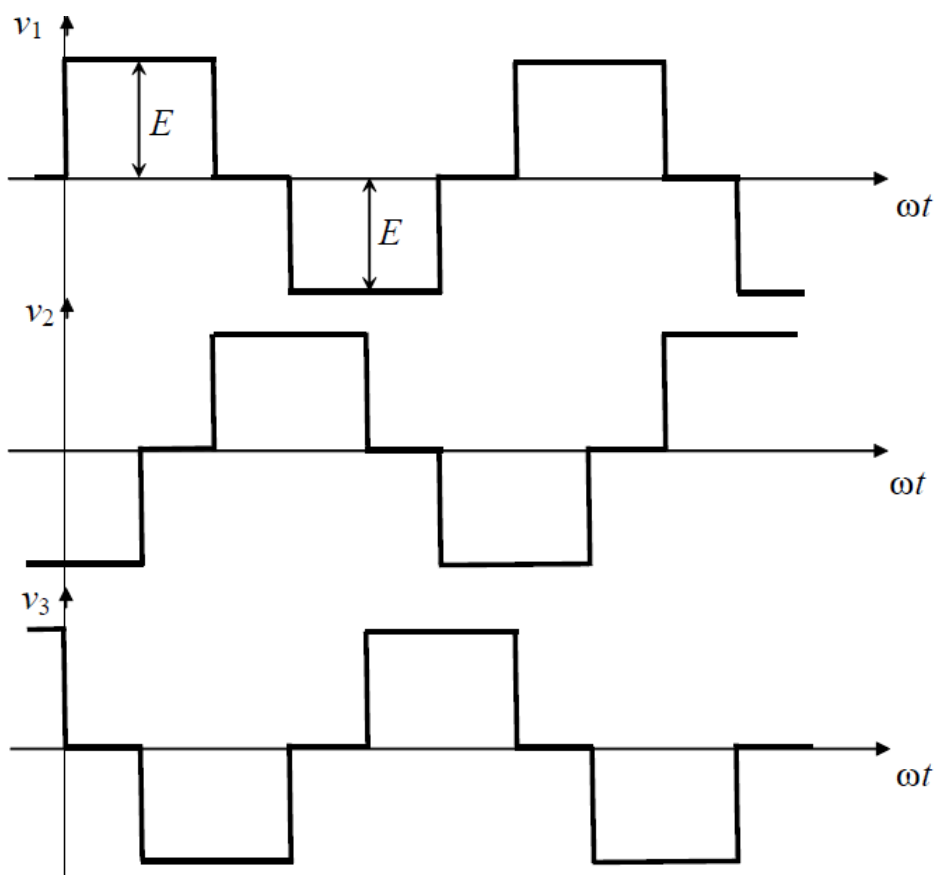
Slika 5.2. Upravljački signali ventila

Prema slici 5.2. napravljena je tablica 5.1. vođenja ventila.

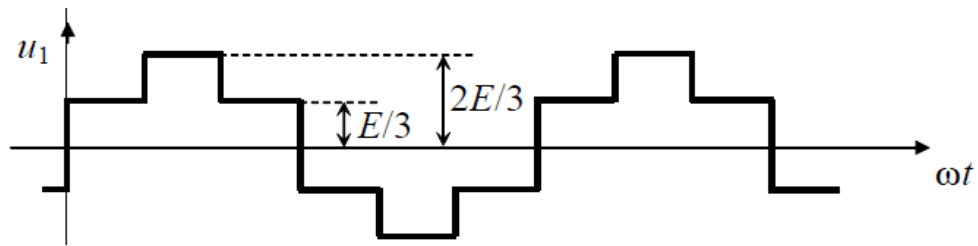
Tablica 5.1. Stanja signala ventila neupravljivog trofaznog mosnog spoja

Ventili	Stanja upravljačkih signala					
	1	2	3	4	5	6
V1	1	1	1	0	0	0
V2	0	0	0	1	1	1
V3	0	0	1	1	1	0
V4	1	1	0	0	0	1
V5	1	0	0	0	1	1
V6	0	1	1	1	0	0

Pomoću izraza iz prethodnog poglavlja odrede se karakteristični oblici faznih i međufaznih napona. Međufazni naponi prikazani su slikom 5.3., a fazni napon prve faze slikom 5.4.



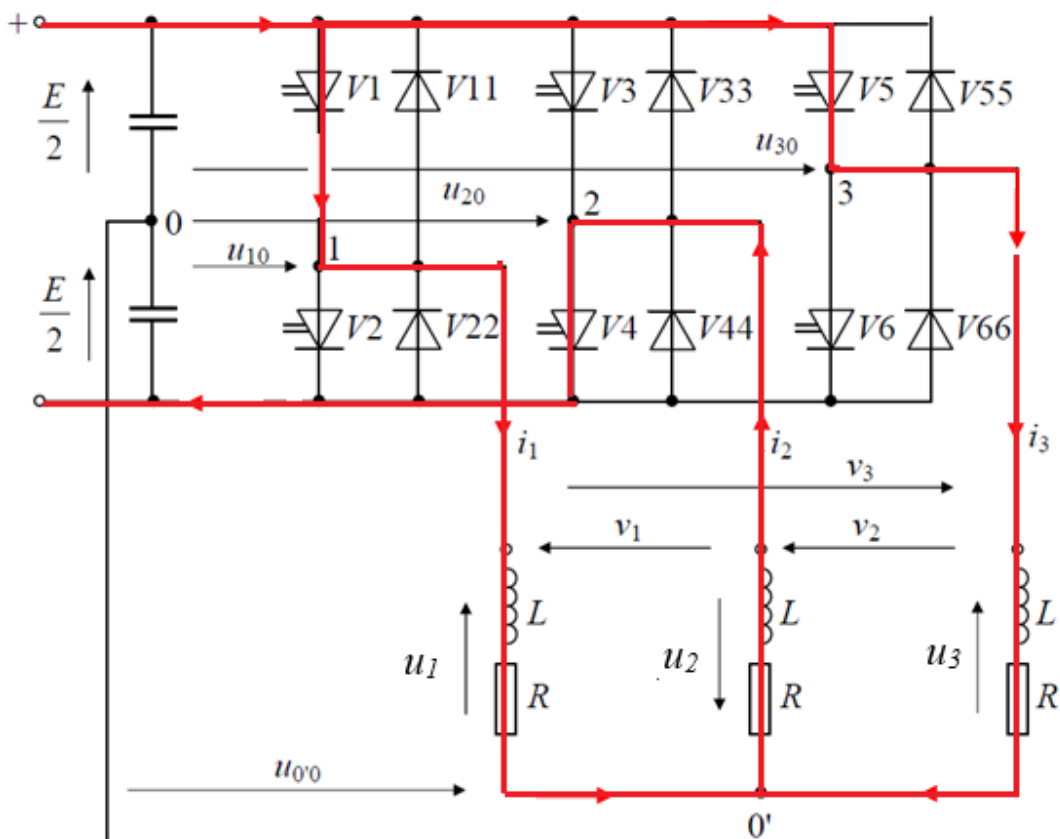
Slika 5.3. Karakteristični oblici međufaznih napona



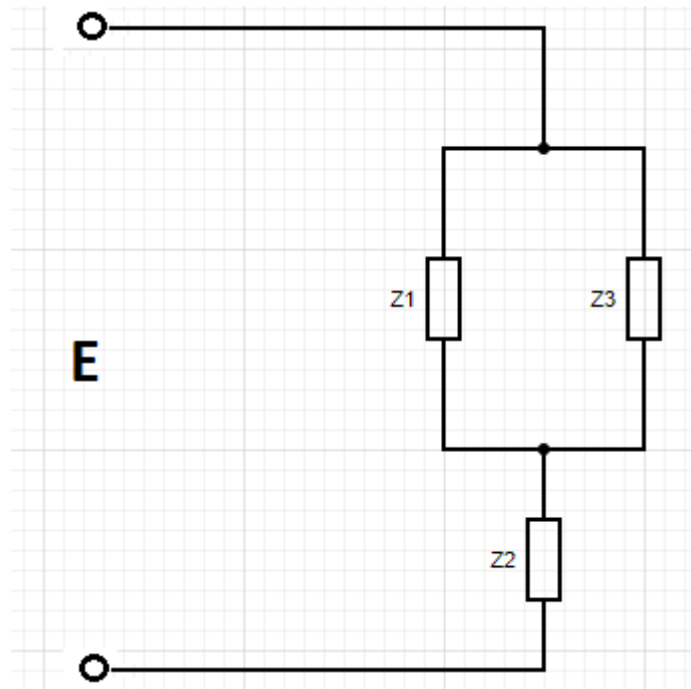
Slika 5.4. Karakteristični oblik napona prve faze

Fazni naponi sve tri faze imaju isti valni oblik samo su kao i međufazni pomaknuti tako da su im osnovni harmonici pomaknuti za  $120^\circ$ .

Analizom jednog od stanja dobit će se iznosi naponskih razina. Za analizu uzet će stanje 1 iz tablice 5.1 u kojemu vode ventili V1, V4 i V5, a ostali ventili ne vode. Slikom 5.5. prikazana je nadomjesna shema vođenja tih ventila, odnosno prolaska struje kroz izmjenjivač. Slikom 5.6. je prikazana nadomjesna shema za izračunavanje impedancija.



Slika 5.5. Nadomjesna shema mreže za odabrano 1. sklopno stanje



Slika 5.6 Nadomjesna shema impedancija

Impedancije  $Z_1$  i  $Z_3$  su u paraleli stoga je  $Z_{13} = \frac{Z}{2}$ , a impedancija je  $Z_2 = Z$ . Ukupna struja kruga je jednaka:

$$I = \frac{E}{Z_{13} + Z_2} = \frac{E}{\frac{Z}{2} + Z}$$

Napon faze  $I$  jednak je:

$$U_1 = Z_{13} \cdot I = \frac{Z}{2} \cdot \frac{E}{Z + \frac{Z}{2}} = E \cdot \frac{\frac{Z}{2}}{\frac{3}{2}Z} = \frac{1}{3}E$$

Fazni napon  $U_3$  jednak je  $U_1$ , a napon  $U_2$  jednak je:

$$U_2 = Z_2 \cdot I = Z \cdot \frac{E}{Z + \frac{Z}{2}} = E \cdot \frac{Z}{\frac{3}{2}Z} = -\frac{2}{3}E$$

Napon  $U_2$  negativnog je predznaka zbog drugačijeg smjera struje što se može i vidjeti na slici 5.5.

Iz toga proizlazi za međufazne napone:

$$V_1 = U_1 - U_2 = \frac{1}{3}E - \left(-\frac{2}{3}E\right) = E$$

$$V_2 = U_2 - U_3 = -\frac{2}{3}E - \frac{1}{3}E = -E$$

$$V_3 = U_3 - U_1 = \frac{1}{3}E - \frac{1}{3}E = 0$$

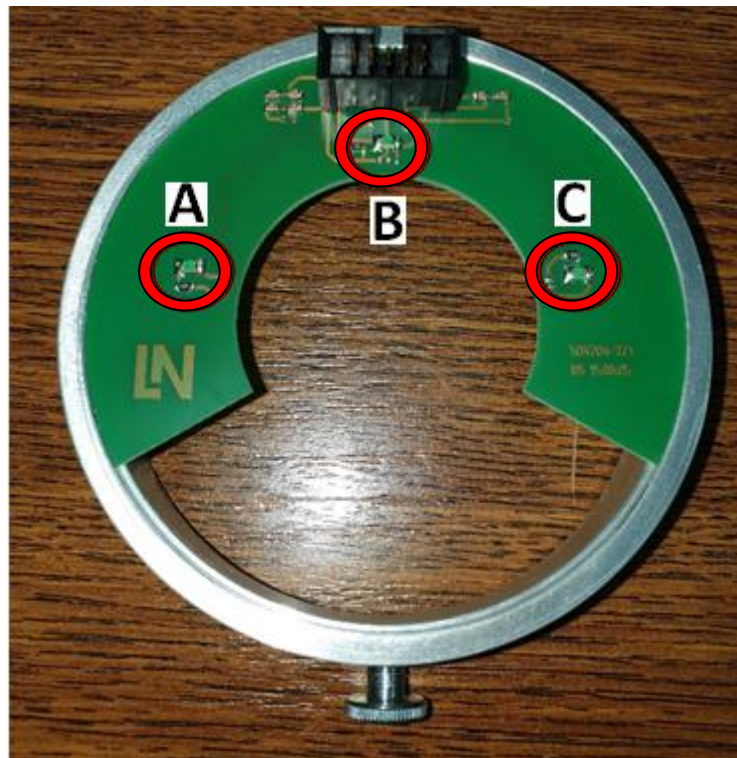
Rezultati dobiveni analizom odgovaraju 1. sklopnom stanju prema slikama 5.3. i 5.4. na kojima se nalaze karakteristični valni oblici.

## 6. PROVEDBA EKSPERIMENATA

Ekperimenti predviđeni proizvođačem Lucas Nuelle napravljeni su i prikazani u ovom poglavlju rada. Ekperimenti koji su predviđeni pokušavaju upoznati korisnika sa BLDC motorom, njegovom načinu rada, kontroli i slično.

### 6.1. Određivanje uklopnih stanja za napajanje statora

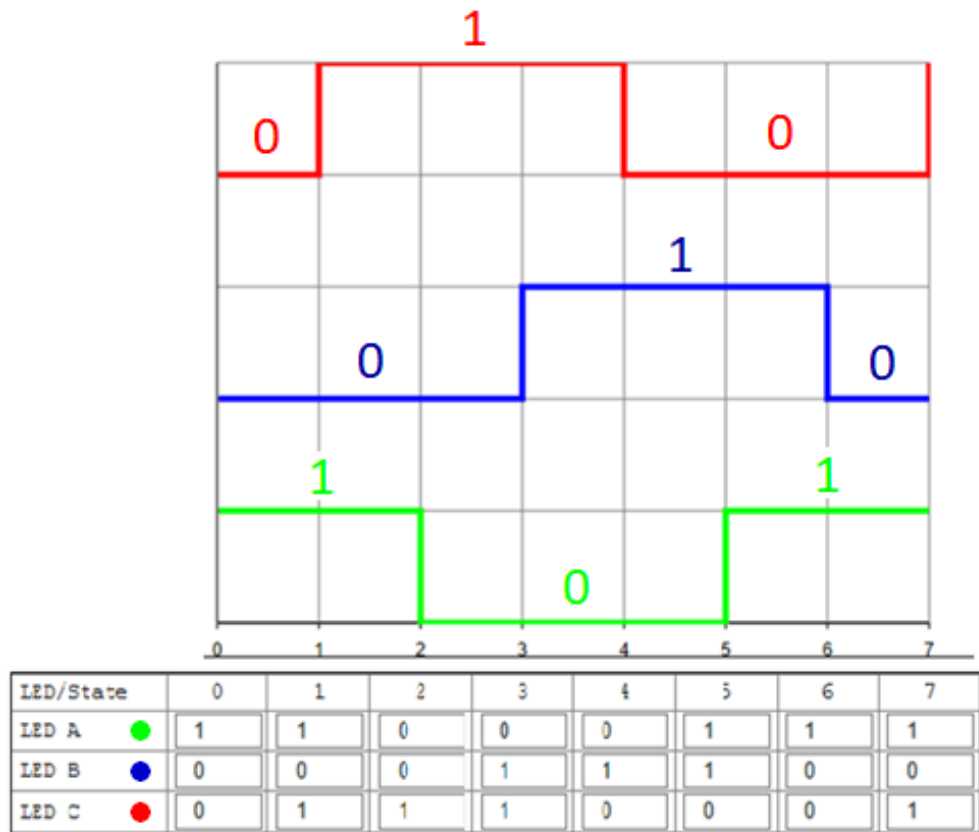
Prvi ekperiment sastojao se od 2 dijela. Prvi dio bio je da se rotor ručno zavrti i na temelju toga donese se zaključak o postojanju određenog okretnog momenta koji se mora savladati prilikom pokretanja rotora, odnosno prelaska, rotora iz jednog stanja u drugo. Taj moment na engleskom se zove cogging torque, a predstavlja moment koji nastaje zbog odnosa između permanentnih magneta i željeza koje predstavlja utor statora. Za drugi dio zadatka bilo je potrebno također ručno vrtjeti rotor i prilikom svakog zakreta promatrati stanja LED-ica, koje se nalaze na poklopcu motora, a vide se na slici 6.1. gdje su zaokružene.



Slika 6.1. Gornja strana poklopca motora

S obzirom na položaj rotora zasvijetli pojedina LED-ica. Odnosno, pomoću Hallovih senzora upravljački dio zaključuje koje statorske namote je potrebno napajati da bi se ostvarila vrtnja rotora. Dakle LED-ica je povezana sa signalom Hallovih senzora koji se nalaze sa donje strane poklopca. Napajanje realizira pomoću uklopa i isklopa MOSFET-a izmjenjivača. Slike

zabilježenih rezultata prikazane su slikama 6.2. Za stanje upaljene LED potrebno je bilo upisati broj 1, a za ugašeno stanje LED broj 0. Oznake dioda naznačene su na slici, odnosno LED A označava diodu koja je lijevo, LED B diodu koja je u sredini i LED C koja je desno. Pošto su namoti spojeni u zvijezdu minimalno 2 namota moraju biti napajana. Zaključak je bio da se utvrdi da postoji 6 različitih stanja rotora nakon kojih se stanja opet ponavljaju. Odnosno 6 mogućih je kombinacija za napajanje namota statora kojima se ostvaruje pomak rotora.



Slika 6.2. Stanja rotora

## 6.2. Naponske razine koje napajaju statorske namote

Zadatak ovog eksperimenta bio je za svako prethodno određeno stanje rotora napisati razine napona kojima se statorski namoti napajaju. U eksperimentu ranije određen je broj stanja rotora te se sada za ista ta stanja određuju naponske razine, odnosno, pravokutni oblik napona koji napaja statorske namote motora. Slika 6.3. prikazuje shemu spajanja za mjerenje naponskih razina, odnosno mjerenje napona MOSFET-a donje ventilne grane.

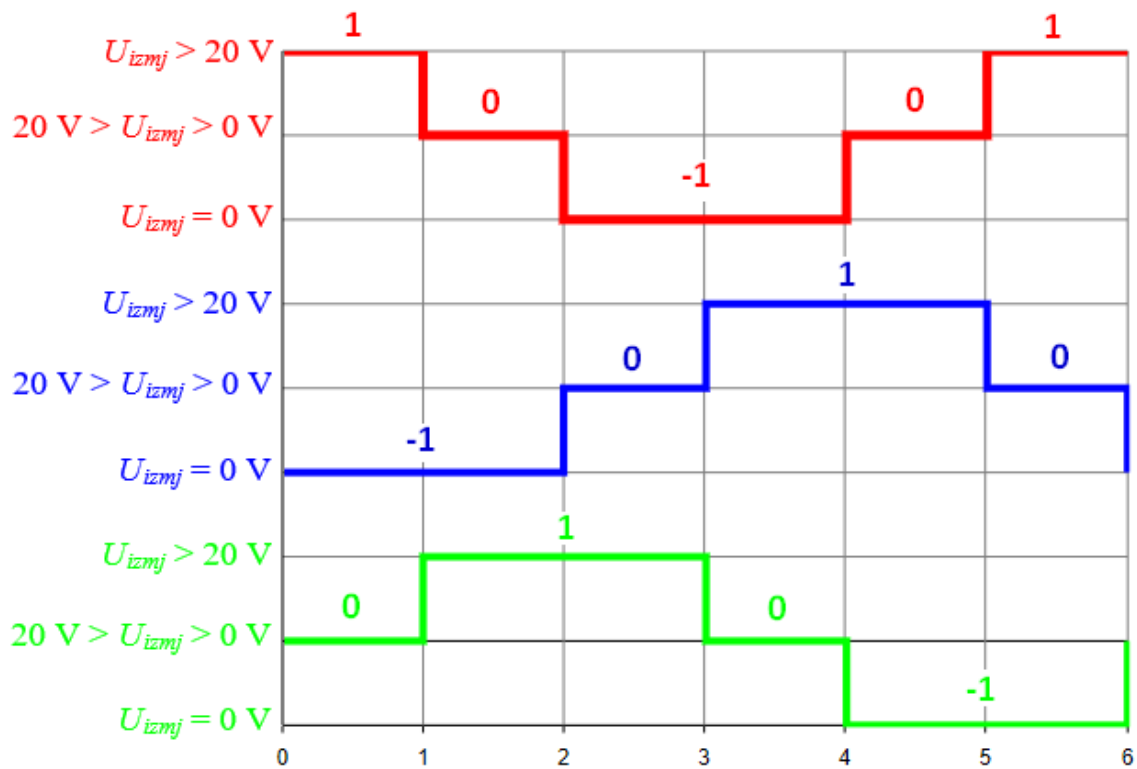




Slika 6.3. Shema spajanja za određivanja naponskih razina

Slika 6.4. pokazuje rezultate eksperimenta na kojoj je nacrtan graf na temelju vrijednosti koje su upisivane u tablicu iznad grafa. Za vrijednosti digitalnog voltmetra koji prikazuje iznos veći od 20 V potrebno je bilo upisati u tablicu broj 1. Za iznos jednak 0 V potrebno je bilo upisati -1 u tablicu, a za iznos između 20 V i 0 V potrebno je bilo upisati 0. Pošto se koristio voltmetar mogla se znati točna vrijednost koja bi se dobile kada bi se upisivala vrijednost „1“, a ona je iznosila 38 V, kada bi se upisivao „-1“ iznosilo bi već spomenuto 0 V, a kada bi se upisivala „0“ iznos bi varirao između raspona od 3 V do 10 V. Naravno, prilikom mjerenja potrebno je bilo obratiti pozornost na stanja LED. Kada su upaljene upisivao se broj 1, a kada su isključene 0. Oznake dioda su iste kao i na slici 6.1.

LED/State	0	1	2	3	4	5	6
LED A	1	1	0	0	0	1	1
LED B	0	0	0	1	1	1	0
LED C	0	1	1	1	0	0	0
U <span style="color: green;">●</span>	0	1	1	0	-1	-1	0
V <span style="color: blue;">●</span>	-1	-1	0	1	1	0	-1
W <span style="color: red;">●</span>	1	0	-1	-1	0	1	1

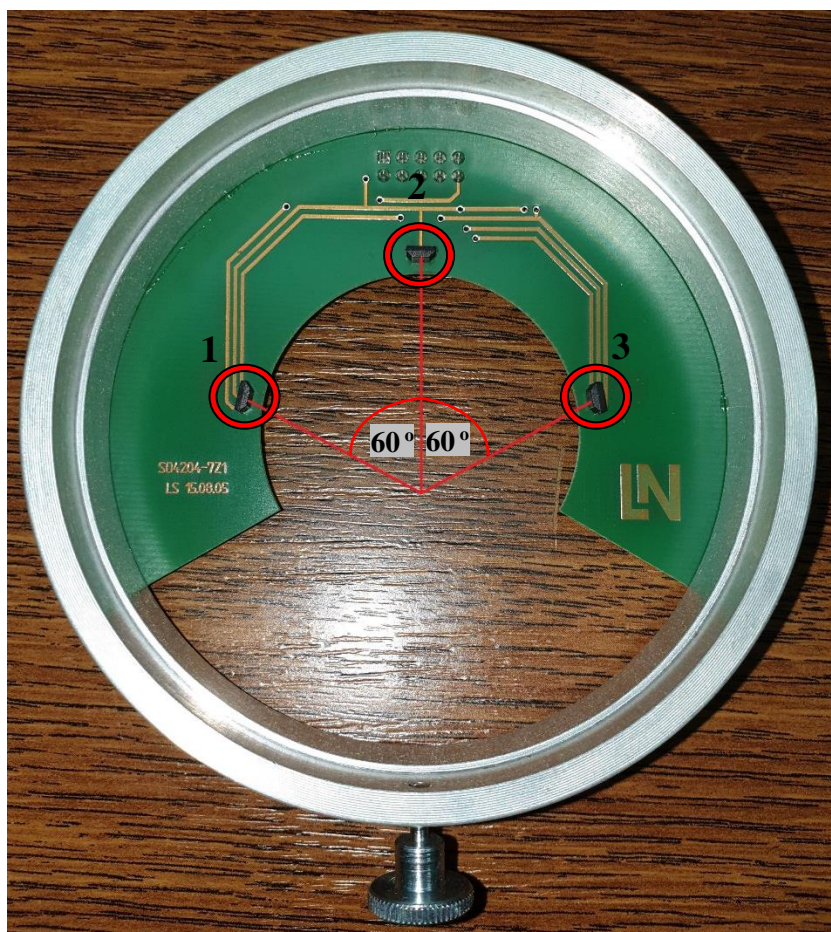


Slika 6.4. Naponi na MOSFET-ima donje grane

Bitno je napomenuti da se motor ne vrti prilikom provedbe eksperimenta. Ranije je već navedeno da su Hallovi senzori i LED povezani te pomoću LED se prati šalje li Hallov senzor signal ili ne, odnosno ukoliko zasvjetli LED zna se da Hallov senzor šalje signal. Upravljački dio potom pomoću signala koji se dobiju s Hallovih senzora i na osnovu implementirane logike napaja statorske namote. U ovom slučaju snimljeni su naponi na MOSFET-ima donje grane odnosno preko slike 6.4. se može vidjeti kada koji MOSFET vodi s obzirom na stanje Hallovih senzora.

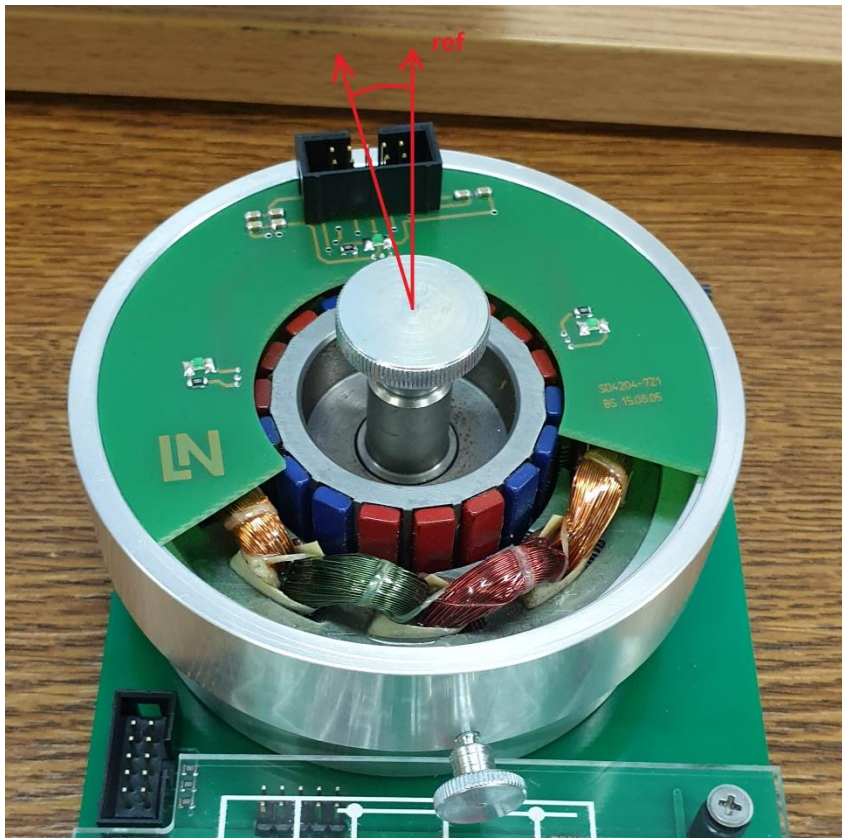
### 6.3. Hallovi senzori

Položaj Hallovih senzora mijenja brzinu vrtnja motora. Hallovi senzori na BLDC motoru nalaze se s donje strane poklopca motora i ima ih 3, što se vidi na slici 6.5. gdje su i označeni.



Slika 6.5. Donja strana poklopca motora

Gledano s točke oko koje se rotor vrti, kut između prvog i drugog, kao i između drugog i trećeg senzora jednak je  $60^\circ$ , a razmak između prvog i trećeg sukladno tome  $120^\circ$ . Zakretanjem poklopca, s namjerom da se promjeni pozicija Hallovih senzora, promjena brzine motora je očita. Unutar  $360^\circ$  zakreta poklopca dolazi se do maksimalne brzine u smjeru kazaljke na satu na 3 pozicije. Također, u 3 pozicije se dolazi i do maksimalne brzine u smjeru obrnuto od kazaljke na satu. Razlog tomu je što postoji 3 svitka za svaku od 3 faze. Da se ostvari pomak rotora potrebno je napajati točno odgovarajuće faze s obzirom na položaj rotora. Upravljačka jedinica programirana je tako da napaja faze određenim redoslijedom u ovisnosti kako prima informaciju od Hallovih senzora. Jedan od položaja poklopca motora pri kojoj je maksimalna brzina u smjeru kazaljke na satu prikazana je slikom 6.6. Gdje je referentna os, ukoliko zamislimo satne brojeve, na 12 sati. Referentna os je na slici 6.6. također i označena. Maksimalna brzina u smjeru obrnuto kazaljke na satu znači da će brzina u smjeru kazaljke na satu neće biti maksimalna. Ukoliko motor mora raditi u oba smjera vrtnje Hallovi senzori moraju se namjestiti tako da će u oba smjera vrtnje motora brzina biti otprilike jednaka.



Slika 6.6. Odmak od referentne osi pri maksimalnoj brzini

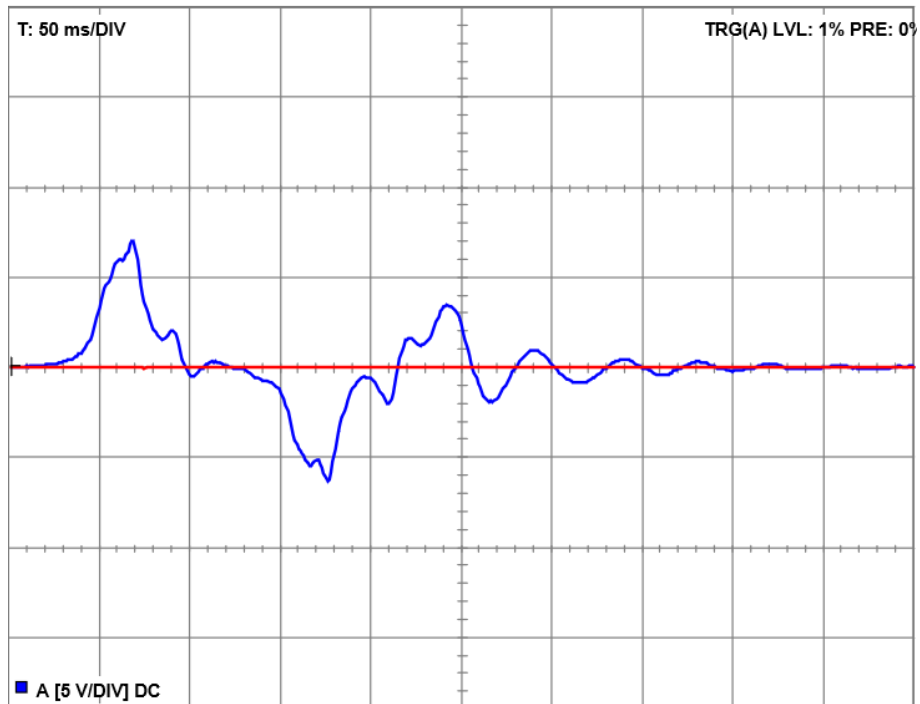
Za provođenje ovog eksperimenta potrebno je bilo spojiti kabel koji povezuje Hallove senzore koji se nalaze na poklopcu motora sa kontrolnim dijelom eksperimentalne pločice, te je potrebno spojiti kratko svaku fazu izmjenjivača s pripadajućom fazom motora. Odnosno fazu izmjenjivača  $U$  sa fazom motora  $U_1$ ,  $V$  sa  $V_1$  i  $W$  sa  $W_1$ . Radi boljeg shvaćanja shema je prikazana slikom 6.7. gdje je zaokruženo spajanje koje je prethodno objašnjeno.



Slika 6.7. Shema spajanja

## 6.4. Protuelektromotorna sila

Ovaj eksperiment pokazuje ukoliko se zavrti rotor koji je u stacionarnom stanju da ta vrtnja uzrokuje pojavu induciranog napon u motoru. Ta pojava je poznata, a dokazuje da stroj može raditi i kao generator, a ne samo kao motor. Zadatak je bio da se rotor ručno zavrti te potom snimi inducirani napon. Slikom 6.8. je prikazan rezultat eksperimenta. Poznat je utjecaj brzine vrtnje na razinu induciranog napona, odnosno, što je veća brzina to je veća razina induciranog napona. To je isto vidljivo na slici 6.8. gdje se u početku inducira veći napon jer rotor ima veću brzinu, dok kasnije napon opada jer rotor sve više usporava i na kraju se zaustavlja. Iz slike se, također, vidi da je za ovaj graf najveći inducirani napon iznosa 7 V. Ta se vrijednost dobije očitavanjem sa grafa s obzirom na vrijednost podioka koja iznosi 5 V/DIV koja piše u donjem lijevom kutu grafa. Kako piše vrijednost po y-osi tako piše i za x-os koja predstavlja vremensku os, a iznosi 50 ms/DIV. Od trenutka vrtnje do trenutka kada je iznos induciranog napona zanemariv, prošlo je oko 300 ms. To pokazuje da se rotor nije zavrtio velikim momentom.



Slika 6.8. Inducirani napon

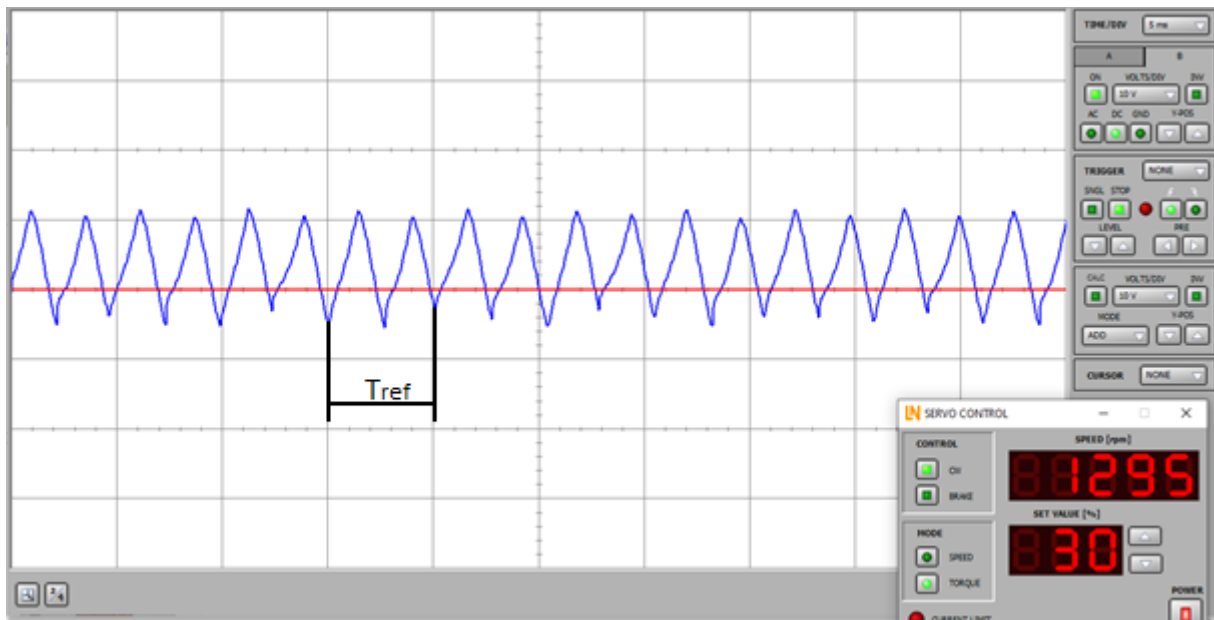
Schema spajanja prikazana je slikom 6.9., a sniman je graf za samo jednu fazu.



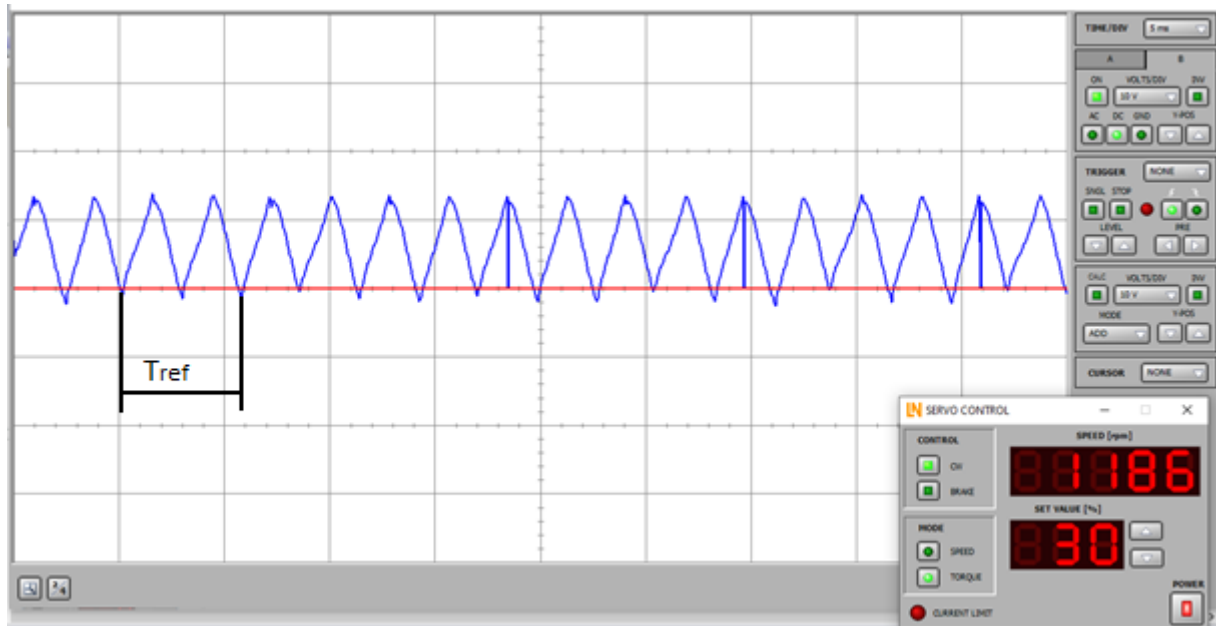
Slika 6.9. Shema spajanja za mjerenje inducirano napona

## 6.5. Utjecaj promjene momenta na struju

Način na koji struja reagira na promjenu momenta vidljiv je iz slike 6.10. i slike 6.11. Na slici 6.10. je prikazana struja prilikom neopterećenog motora, dok je na slici 6.11. rotor lagano pritisnut prstom simulirajući tako opterećenje te promatrajući potom promjenu struje. Opterećenjem motora smanjuje se brzina, a samim time dolazi do pada induciranog napona. Kao rezultat struja se potom povećava do gornje granice. Usporedbom slika primjećuje se da je efektivna vrijednost struje prilikom opterećenja porasla, kao i period valnog oblika struje. Naravno promjena struje ovisi o opterećenju. Na slikama je naznačen referentni period  $T_{ref}$  radi lakšeg primjećivanja razlike u trajanju perioda. Također na slikama je  $x$ -os označena crvenom bojom kako bi se bolje uočila promjena opterećenja na efektivnu vrijednost struju.



Slika 6.10. Valni oblik struje bez opterećenja



Slika 6.11. Valni oblik struje pod opterećenjem

U ovom slučaju opterećenje je smanjilo brzinu vrtnje za:

$$n_1 - n_2 = 1295 - 1186 = 109 \text{ okr/min}$$

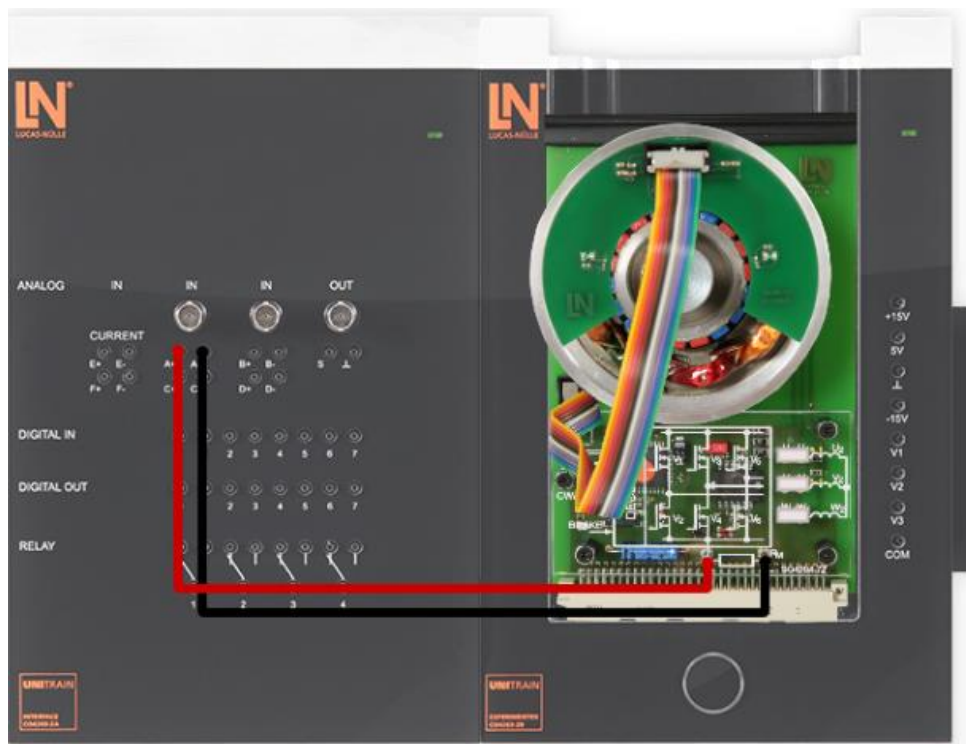
gdje je  $n_1$  brzina bez opterećenja, a  $n_2$  brzina pod opterećenjem.

Period pod opterećenjem povećao se za:

$$\frac{T_{ref2}}{T_{ref1}} = \frac{6}{5} = 1,2$$

gdje je  $T_{ref1}$  referentni period bez opterećenja i iznosi 5 ms, a  $T_{ref2}$  referentni period pod opterećenjem i iznosi 6 ms. Iznosi referentnih perioda očitani su s grafova, na kojima vrijednost po podioku iznosi 5 ms/DIV. Rezultat bi u postotku iznosio 20 %, odnosno period pod opterećenjem se povećao za 20 %. Shema spajanja za mjerenja prikazana je slikom 6.12.

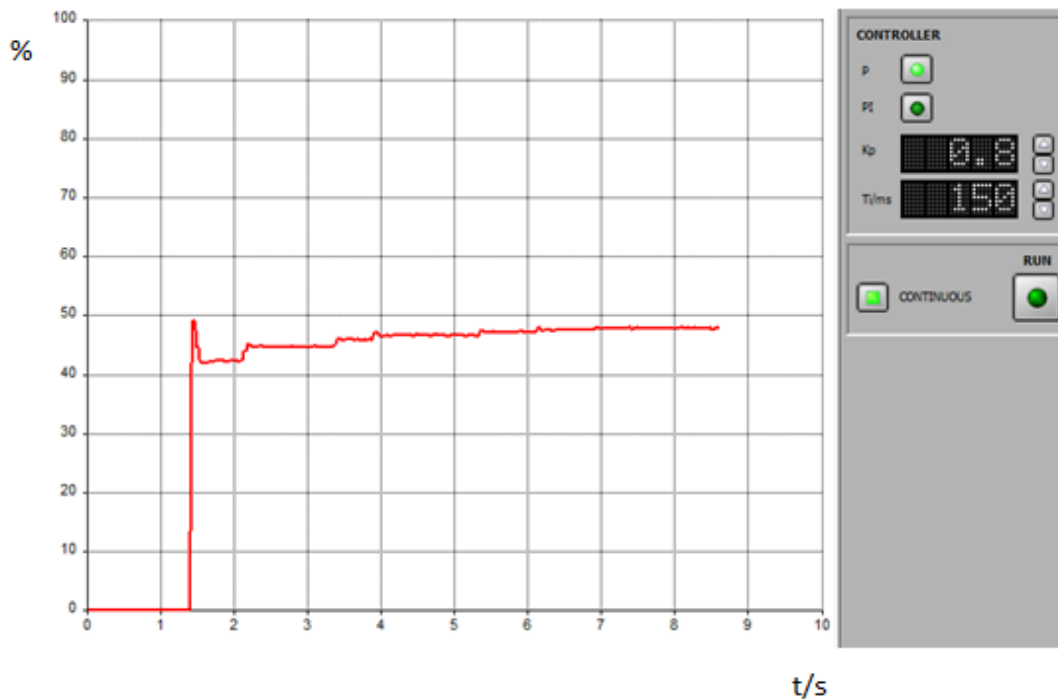




Slika 6.12. Shema spajanja

## 6.6. Kontrola motora

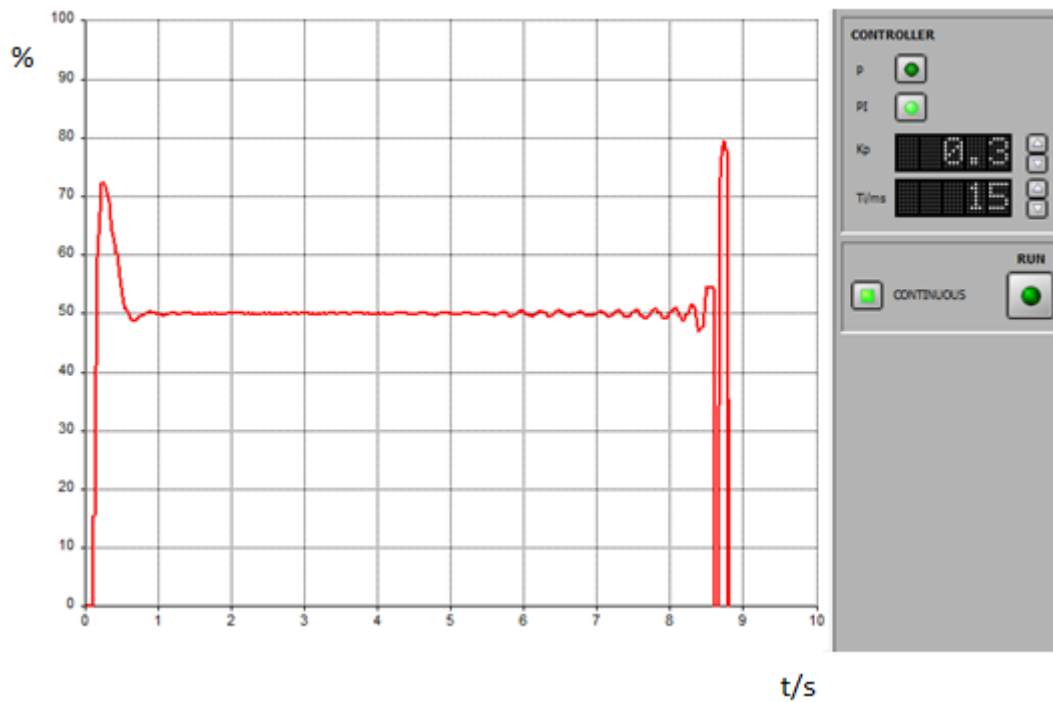
Eksperiment kontrole motora obuhvaća usporedbu P i PI regulatora, njihovo podešavanje i promjene ponašanja motora na promjenu parametara regulatora. Shema spajanja ista je kao u poglavlju 6.3. Prvi dio eksperimenta je uspoređivanje ponašanja motora na zadanu karakteristiku brzine vrtnje s obzirom na P regulator. Na slici 6.13. je prikazan odziv brzine vrtnje motora P regulatora uz polagano povećanje pojačanja  $K_p$ . Zadana brzina u postotku koju je motor morao doseći namještena je na 50% nazivne, odnosno 650 okr/min. Pojačanje se povećavalo od vrijednosti 0,1 do vrijednosti 0,8.



Slika 6.13. Odziv brzine vrtnje motora prilikom korištenja P regulatora

Povećanje pojačanja uzrokuje sve veću nestabilnost i brzina počinje oscilirati. Također, zamjećuje se da vrijednost brzine nikada nije došla do zadane vrijednosti što znači da je regulacija motora pomoću P regulatora veoma nepouzdana i neprecizna.

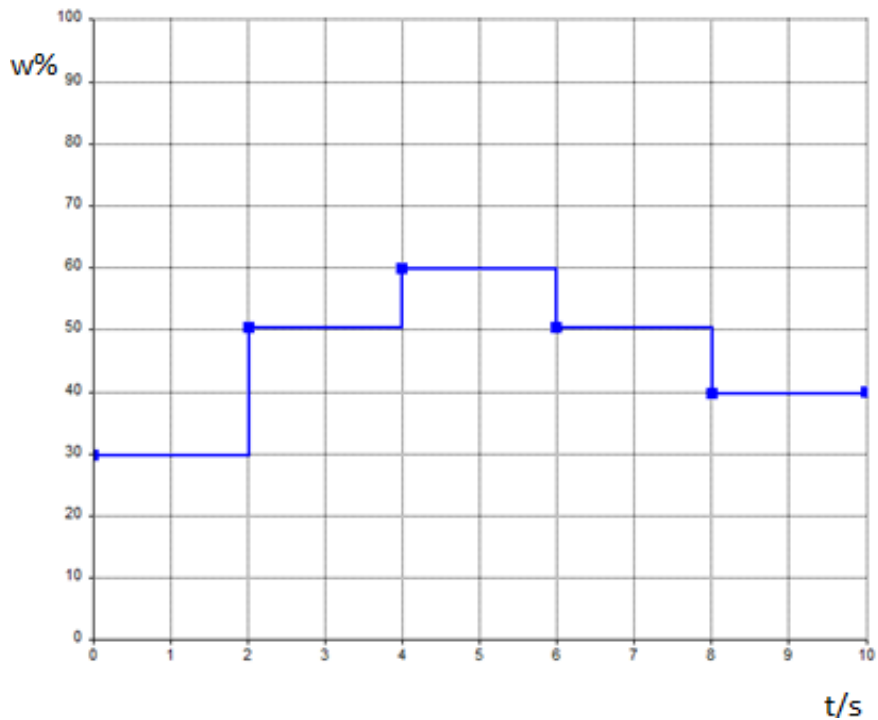
Drugi dio eksperimenta je sličan kao i prvi samo što se koristi PI regulator, a samim time se mijenjaju parametri. Na slici 6.14. je prikazan odziv na zadanu brzine vrtnje motora, koja je kao u prethodnom zadatku 50 % , uz smanjivanje vremenske konstante  $T_i$  od 150 ms do 15 ms dok je pojačanje konstantno namješteno na vrijednost od  $K_p = 0,3$ .



Slika 6.14. Odziv brzine vrtnje motora prilikom korištenja PI regulatora

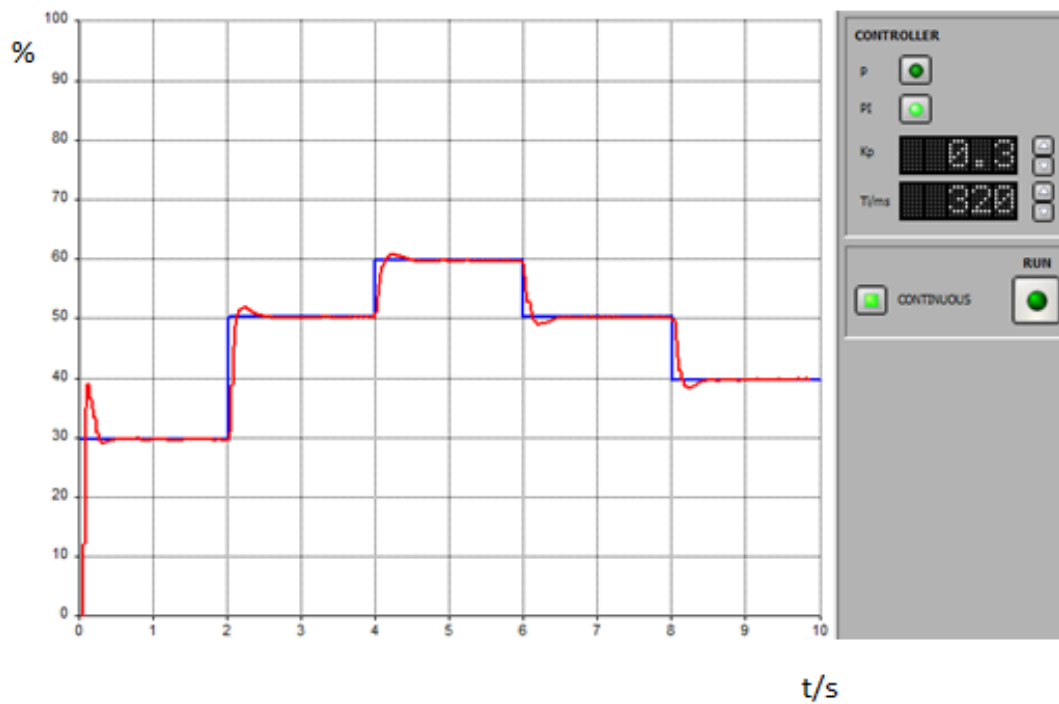
Što se više smanjuje  $T_i$  to oscilacije počinju dolaziti do izražaja te na kraju dobiveni odziv postaje nestabilan. PI regulator je dobar za korištenje te se postiže određeno optimalno stanje, ali samo ukoliko se pravilno zadaju parametri.

Treći dio eksperimenta bio je određivanje parametara PI regulatora za odabranu karakteristiku brzine vrtnje. Zadana karakteristika prikazana je na slici 6.15. i mora imati više radnih točaka odnosno više promjena brzine vrtnje.



Slika 6.15. Karakteristika zadanog odziva brzine

Nakon toga potrebno je bilo podesiti parametre tako da dobiveni odziv brzine vrtnje prati zadanu karakteristiku. Odziv je prikazan na slici 6.16. i vidljivo je da je regulator dobro podešen uz vrijednosti  $K_p = 0,3$  i  $T_i = 320$  ms.



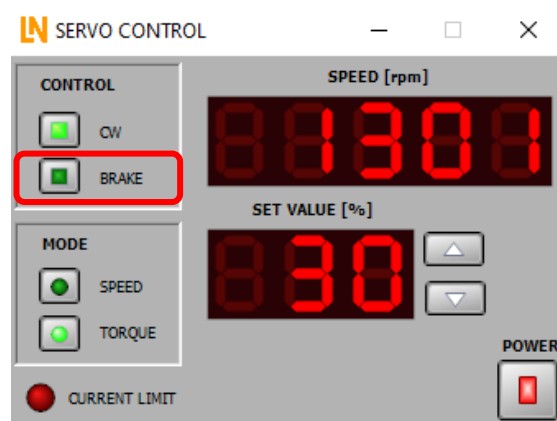
Slika 6.16. Karakteristika odziva stvarne brzine

Dobro podešen regulator nema prevelikih nadvišenja, uredno prati promjene radne karakteristike i s prihvatljivijim kašnjenjem. Treći eksperiment pokazuje da BLDC motor može raditi i kao servo motor jer je moguće izregulirati motor da prati radnu karakteristiku servo pogona.

Eksperimenti obuhvaćeni ovim poglavljem spadaju pod područje regulacije i kontrole motora. Osim što pokazuju razliku između korištenja P i PI regulatora, oni omogućuju i isprobavanje različitih vrijednosti parametara na zadane vrijednosti brzine vrtnje. Također te zadane vrijednosti ne moraju biti konstantne, nego se mogu odrediti tako da simuliraju servo pogon.

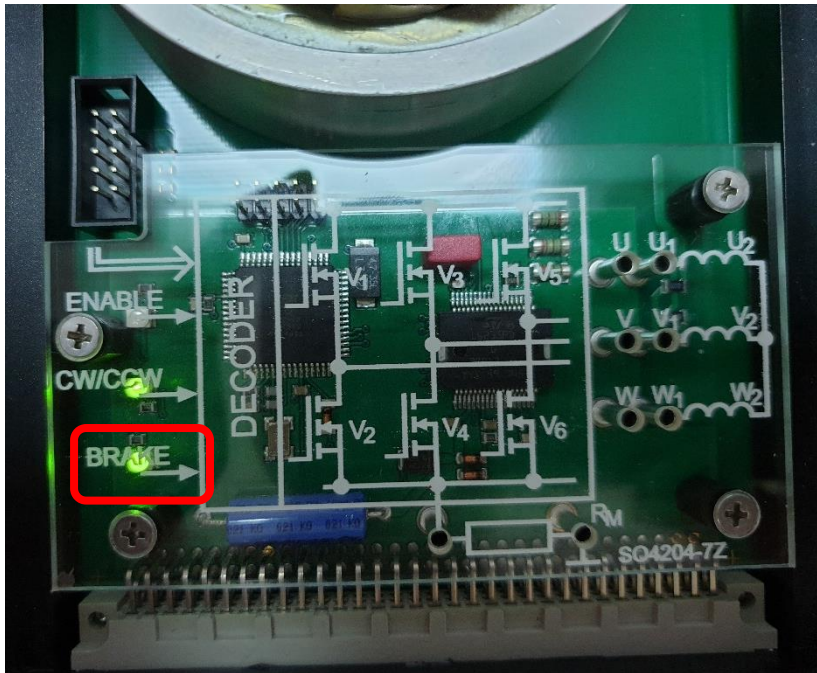
## 6.7. Kočenje

Zadnji eksperiment bio je provesti načine kočenja motora. Kočenje motora moguće je izvesti na 3 načina. Prvi način je isključivanjem napajanja. Na taj način motor polagano usporava dok ne dođe do male brzine pri kojoj je rotacijska sila vrtnje motora manja od sile privlačenja između magneta rotora i željeza utora statora te se potom motor zaustavlja. Vrijeme zaustavljanja ovisi o brzini vrtnje prilikom koje je isključeno napajanje. Od sva 3 načina provedena u ovom poglavlju ovaj način treba najviše vremena da zaustavi motor. Drugi način je pomoću tipke „Brake“ na kontrolnom prozoru za pokretanje motora. Na slici 6.17. označena je tipka koja aktivira kočnicu, a na ovoj slici nije aktivirana kočnica što se vidi po boji tipke i po brzini vrtnje koja ima vrijednost različitu od 0.



Slika 6.17. Kontrolni prozor

Slikom 6.18. je prikazan zakočen motor i upaljena LED iznad koje piše „Break“ , koja je indikator za uključenu kočnicu. Tada se motor zakoči u stanje u kojemu je bilo prilikom pritiska na tipku. Druga LED koja je upaljena, a označena je tekстом „CW/CCW“ označava smjer vrtnje motora u smjeru kazaljke na satu, a na engleskom jeziku „Clockwise/Counter clockwise“ što znači u prijevodu znači „u smjeru kazaljke na satu/suprotno od smjera kazaljke na satu“ od kuda i dolaze te skraćenice.



Slika 6.18. Prikaz upaljene LED koja signalizira kočnicu

Treći je način tako da se krato spoje sve tri faze. Slika 6.19. prikazuje način spajanja motora za kočenje. Motor reagira kao i prilikom pritiska na tipku „Brake“, odnosno ostaje u stanju u kojem je bio uslijed kočenja. Reakcija kočenja jednaka je u drugom i trećem eksperimentu.



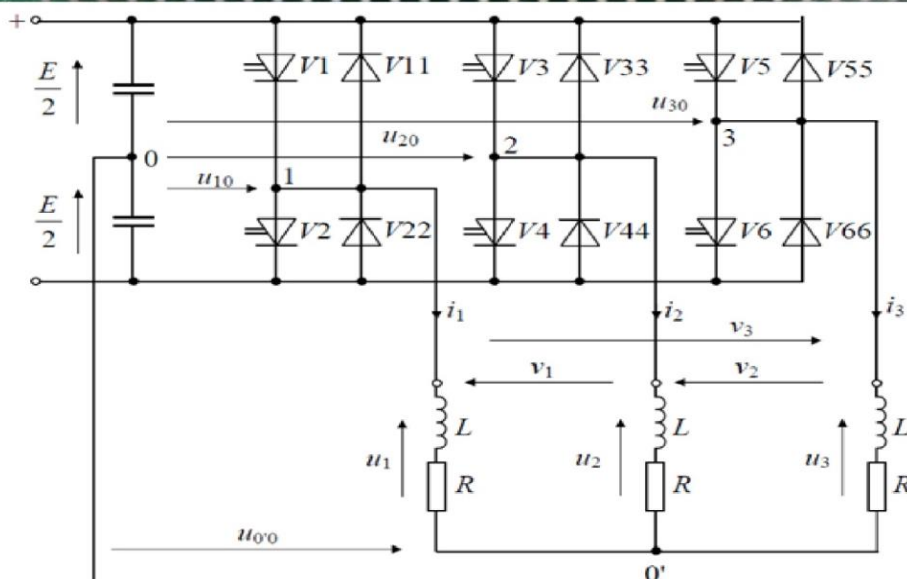
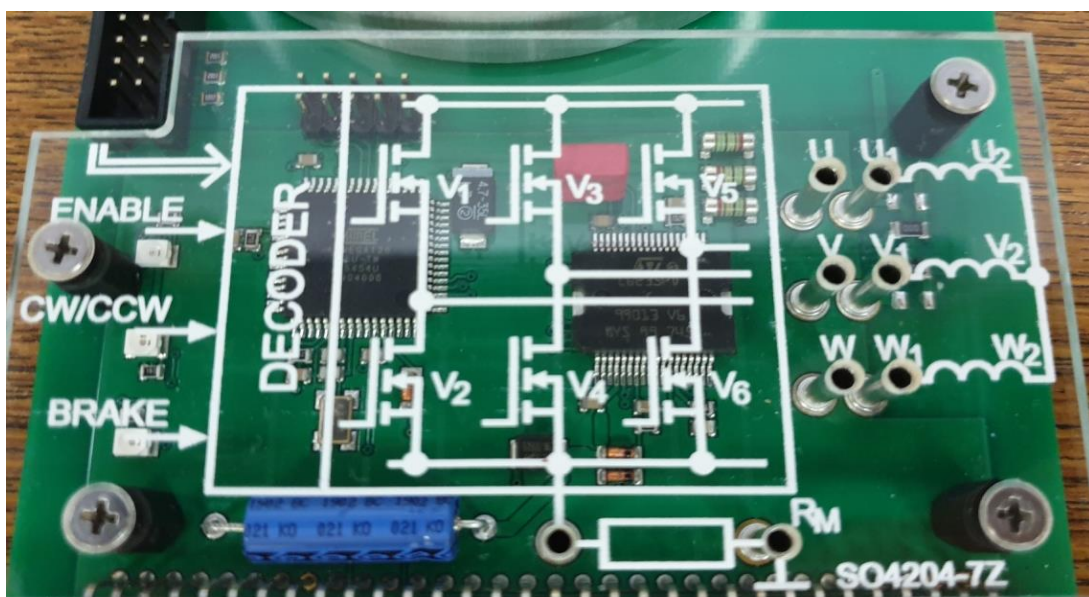
Slika 6.19. Shema za spajanje motora u zakočeno stanje

Sva tri načina koče motor uslijed vrtnje, ali ne blokiraju motor kada je u stacionarnom stanju. Odnosno, ne djeluju poput parkirne kočnice kod automobila već se rotor može ručno zavrtjeti. Razlog je da se prilikom kočenja iskorištava indukcija rotorskih magneta, a kada motor u stanju mirovanja tada nema ni indukcije koja se koristi za kočenje motora.

Sumirajući eksperimente koji su predviđeni ovom eksperimentalnom kraticom s BLDC motorom dolazi se do zaključka kako obuhvaćaju više područja. Poput eksperimenta koji spadaju u područja elektrostrojarstva poput pokusa 3, 4 i 5. Nakon toga eksperiment koji obuhvaća regulaciju i upravljački krug motora poput pokusa 6. I konačno eksperimenti koji obuhvaćaju područje energetske elektronike poput pokusa 1 i 2. Za ovaj diplomski rad, u kojemu je fokus primarno bio na energetskej elektronici, nedostatak je to što eksperimenti obuhvaćaju širi spektar područja. Stoga, potrebno je provesti samostalna mjerenja koja će vrednovati eksperimentalnu karticu s BLDC motorom s obzirom na rad elektroničkog energetskog pretvarača.

## 7. TESTIRANJE PRETVARAČA S EKSPERIMENTALNE KARTICE

U prethodnom poglavlju primjetilo se da eksperimenti koje je proizvođač namjenio za provedbu nisu primarno fokusirani na energetska elektronika, već se eksperimenti baziraju na više područja. Odnosno, upoznavaju korisnika multidisciplinarno sa svojstvima motora. Iz tog razloga potrebno je osmisliti novi set mjerenja kojima bi se više omogućila veća povezanost sa energetskom elektronikom. Na taj način u fokus dolazi sam pretvarač. Pretvarač koji se nalazi na eksperimentalnoj kartici je, već ranije spomenut, trofazni neupravljivi mosni spoj. Ulazni napon je 40 V, a frekvencija ovisi o brzini vrtnje motora. Dakle, svako stanje traje  $1/6$  periode  $T$ , odnosno ovisno o brzini, mijenja se frekvencija, a samim time i period.



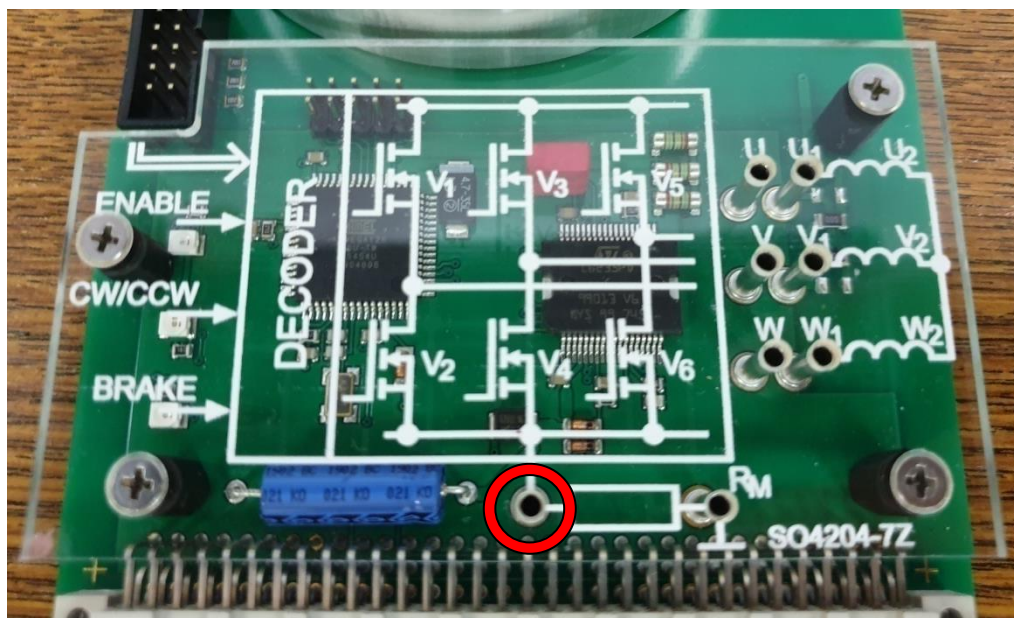
Slika 7.1. Usporedba prikaza izmjenjivača na motoru i sheme mreže modela



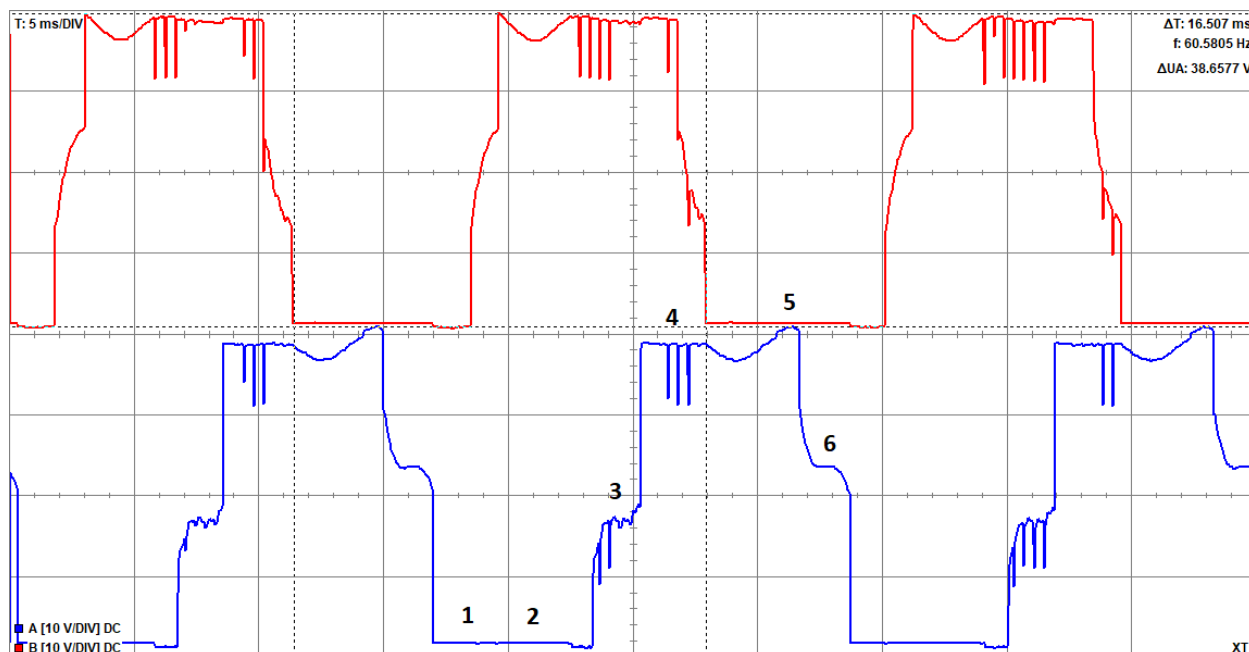
Valni oblici dobiveni pomoću virtualnog osciloskopa u Labsoft programu usporedit će se s karakterističnim oblicima neupravljivog trofaznog mosnog spoja dobivenih analizom. Slika 7.1. prikazuje, na gornjoj polovici, uvećani dio eksperimentalne kartice na kojoj su izvedene točke za mjerenje, dok se na donjoj polovici slike vidi shema modela trofaznog neupravljivog mosnog spoja. Na slici se vidi da gornja ventilna grana obuhvaća V1, V3 i V5 dok donja ventilna grana obuhvaća MOSFET-e V2, V4 i V6.

Na slici 7.1., također, se vidi da postoji 8 mjernih točaka koje su izvedene za ovu karticu. 3 točke koje predstavljaju faze izmjenjivača, 3 točke koje predstavljaju faze motora, 1 točka koja je zajednička točka donjoj ventilnoj grani MOSFET-a i 1 točka koja se nalazi na poznatom otporu koji služi za mjerenje vrijednosti struje. Nije izvedena mjerna točka na mjestu zvjezdišta motora što onemogućava mjerenje faznih napona motora.

Slika 7.3. prikazuje napone na MOSFET-ima donje ventilne grane, odnosno na shemi na slici 7.1. to su već ranije spomenuti ventili V2, V4 i V6. Pristup upravljačkim signalima gornje grane nije bilo moguće snimiti jer na eksperimentalnoj kartici nisu izvedene mjerne točke. Na slici 7.2. je crveno zaokružena mjerna točka koja je izvedena od proizvođača koja se koristila za mjerenje napona na MOSFET-ima donje ventilne grane.



Slika 7.2. Mjerne točke eksperimentalne kartice

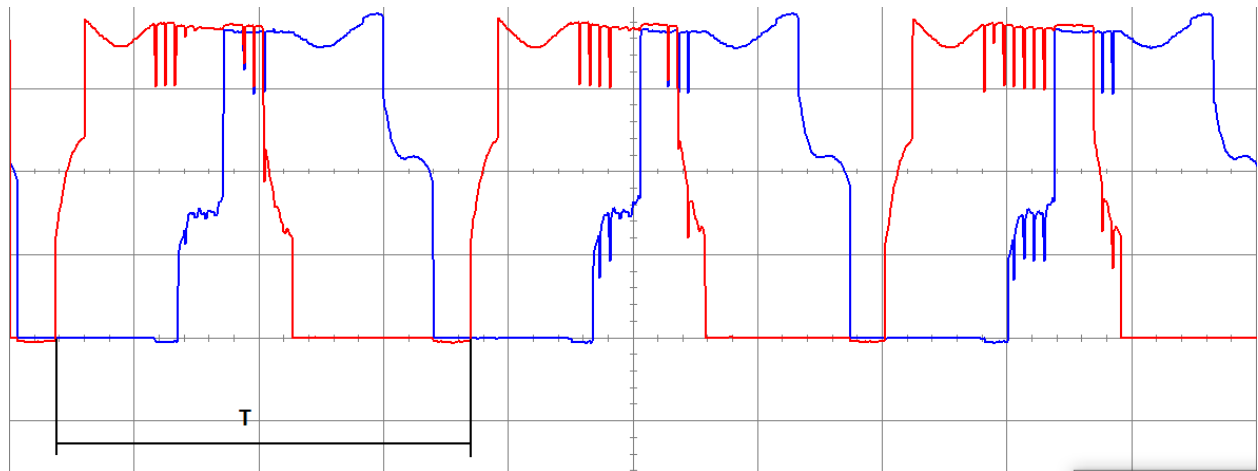


Slika 7.3. Naponi na MOSFET-ima V2 i V6 s pomakom jednog po y-osi

Za razliku od eksperimenta koji se nalazi pod poglavljem 6.2., u ovom eksperimentu motor se vrti brzinom od 1207 okr/min. Prilikom mjerenja promatrani su prvo naponi MOSFET-a V2 i V6 radi bolje preglednosti. Također, valni oblici su prikazani jedan ispod drugoga da bi se bolje identificirala sklopna stanja. Na slici 7.3. očitaju se vrijednosti poput periode  $T$ , koja iznosi  $T = 16,507$  ms. Frekvencija je sukladno tome  $f = 60,58$  Hz. Potom se očita vršna vrijednost napona koji iznosi 38,65 V. Vrijednost y-osi po podioku iznosi 10 V/DIV, a x-os 5 ms/DIV. Uspoređujući sliku 6.4. i sliku 7.3. identificiraju se sklopna stanja. Na slici 7.3. naznačeni su brojevi na plavom grafu koji omogućuju povezivanje 6 stanja sa stanjima na slici 6.4. Grafovi sa obje slike imaju 3 stanja: 0 V, 38 V i vrijednost između 3 i 10 V. Naravno, na slici 6.4. graf nije isti kao i na slici 7.3. jer su se za crtanje grafa koristile samo 3 vrijednosti odnosno 1, 0 i -1 ovisno u kojem se rasponu nalazila vrijednost očitano napona.

Na slici 7.4. prikazani su naponi MOSFET-a, V2 i V4, ali ovaj puta bez pomaka po y-osi. Ovaj puta slika je stavljena iz razloga da se valni oblik poveže s tablicom vođenja ventila. Također, kao i na slici 7.3. nisu stavljena sva tri ventila zbog bolje preglednosti i lakše analize slike. Period  $T$  označen je na slici 7.4. i preko perioda se vidi da ventil pola periode vodi, a pola ne vodi. Također uspoređujući oba valna oblika vidi se da se trenutak kada oba ventila vode traje šestinu periode, odnosno trećinu vremena vođenja jednog ventila. Sukladno tome, ukoliko se zamislilo i treći ventil on bi također provodio trećinu vremena vođenja. Dakle, svaki ventil vodi pola periode, od tog vremena u kojem vodi trećinu vremena vodi kao jedini ventil u donjoj grani,

trećinu vremena vođenja vodi s jednim ventilom i zadnju trećinu vodi s preostalim ventilom iz donje grane. Stoga se izrađuje tablica vođenja ventila za donju ventilsku granu.



Slika 7.4. Naponi na MOSFET-ima V2 i V6

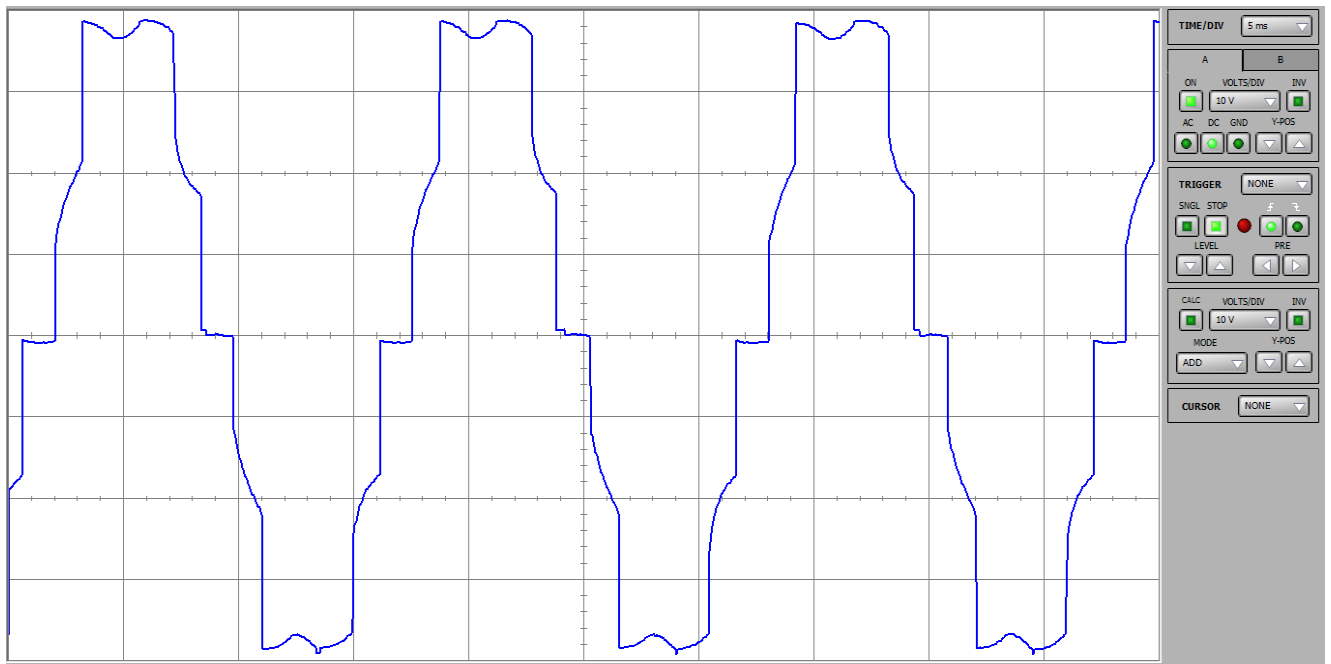
Tablica 7.1. se dobije s obzirom na razinu napona odnosno provodi li u tome trenutku ventil ili ne. Potom se napravljena tablica usporedi sa tablicom 5.1. iz poglavlja 5., te zaključi se da se stanja ventila za donju granu poklapaju.

Tablica 7.1. Mjerenjem dobivena sklopna stanja donje ventilske grane

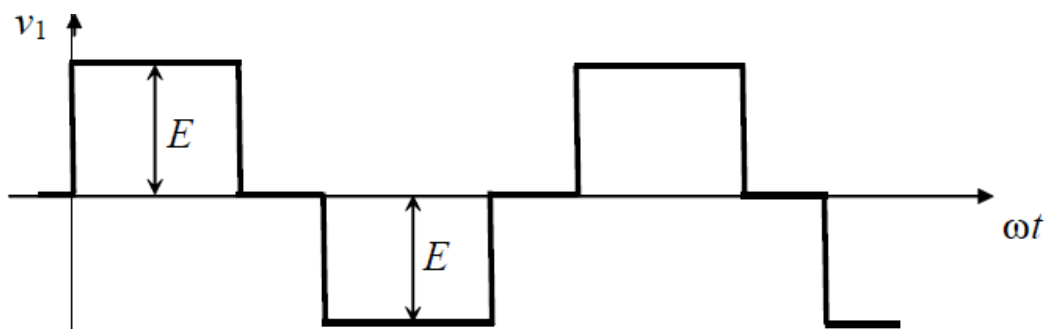
MOSFET-i	Stanja donje grane ventila					
	1	2	3	4	5	6
V2	0	0	0	1	1	1
V4	1	1	0	0	0	1
V6	0	1	1	1	0	0

Poznato je da su gornja i donja grana ventila kontrataktne pa je zaključak da se stanja ventila mjerenja poklapaju sa stanjima teorijske analize rada.

Međufazni naponi, za razliku od faznih napona, mogli su se snimiti te se rezultat snimljenog međufaznog napona nalazi na slici 7.5. Vršna vrijednost napona dobije se pomoću očitavanja grafa s obzirom na vrijednost po podioku koja iznosi 10 V/DIV. Odnosno, vršna vrijednost napona iznosi 38 V. Sukladno naponu, vrijednost periode dobijemo na isti način. Vrijednost vremenske osi po podioku iznosi 5 ms/DIV, odnosno vrijednost jedne periode je trajanja 15,5 ms.



Slika 7.5. Snimljeni valni oblik međufaznog napona  $v_l$

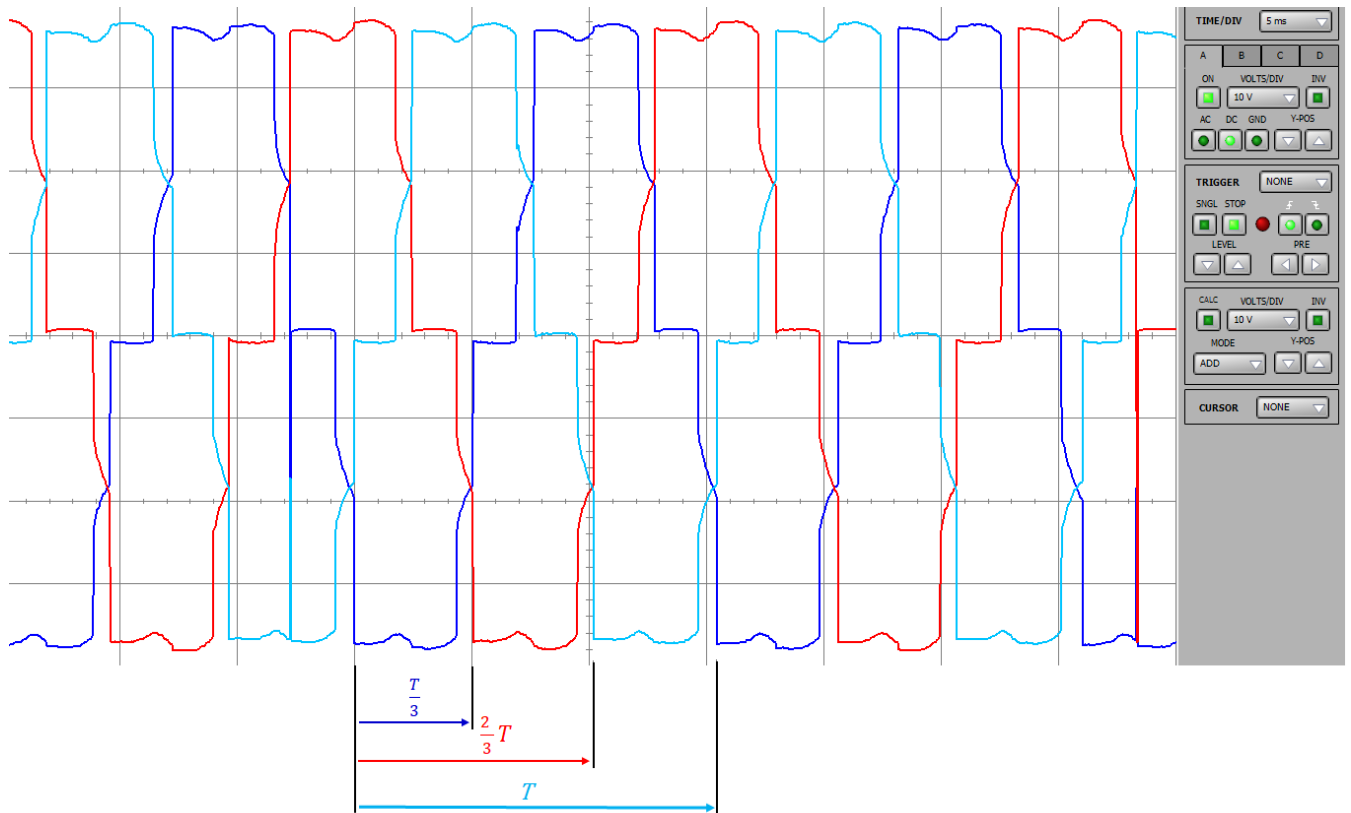


Slika 7.6. Karakteristični oblik međufaznog  $v_l$  napona dobivenog analizom

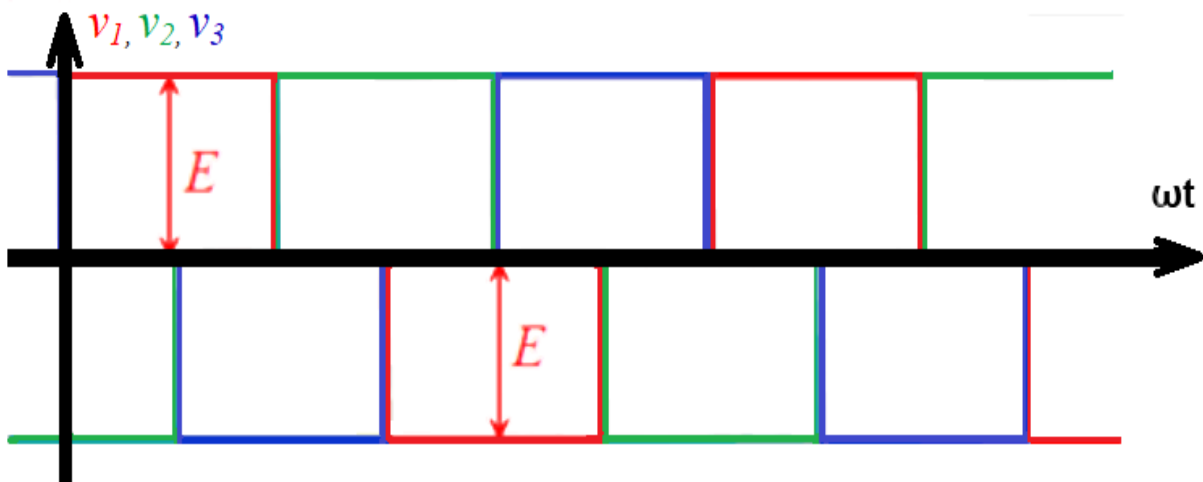
Na slici 7.6. nalazi se valni oblik međufaznog napona  $v_l$ . Usporedbom slike 7.5. i slike 7.6., vidi se da se trofazinski valni oblici nisu potpuno isti, ali imaju veliku sličnost. To odstupanje valnih oblika razlog je konstrukcije motora. Naravno, treba uzeti u obzir idealnu situaciju koja je u analizi rada, dok je prilikom mjerenja situacija drugačija zbog različitih utjecaja na rezultat mjerenja.

Na slici 7.7. su prikazani svi međufazni naponi dobiveni mjerenjem, a na slici 7.8. prikazani su svi karakteristični međufazni naponi prema analitičkom proračunu. Na slici 7.7. je pokazan međusobni pomak između napona od  $120^\circ$ , odnosno za trećinu periode. Za referentni napon uzet je napon označen svijetlo plavom bojom te su označene točke između jedne periode. Odnosno,

točka koja predstavlja početak periode i točka koja predstavlja kraj referentne periode. Također, naznačen je pomak između druga dva međufazna napona.



Slika 7.7. Snimljeni valni oblici međufaznih napona  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$



Slika 7.8. Valni oblici međufaznih napona  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$  dobiveni analizom

Fazni pomak moguće je dobiti pomoću izraza:

$$\varphi = \frac{t \cdot 360}{T} \quad (7-1)$$

gdje  $\varphi$  predstavlja fazni pomak,  $T$  period, a  $t$  vrijeme koje prođe između početka referentnog signala do početka prvog idućeg signala. U ovom slučaju  $t$  je procjenjen da iznosi  $t = 5$  ms, a jedna perioda traje  $T = 15,5$  ms. Kada se uvrsti u izraz (7-1) dobije se:

$$\varphi = \frac{5 \cdot 360}{15,5} = 116,13^\circ$$

Naravno, zbog nepreciznosti procjene i nemogućnosti očitavanja pomoću preciznih instrumenata rezultat ne ispadne točno  $120^\circ$  već postoji apsolutna pogreška iznosa  $3,87^\circ$  i postotna pogreška iznosa  $3,225\%$ .

Vršna vrijednost međufaznih napona iznosa  $38$  V, kao i trajanje periode  $T = 15,5$  ms ispadne isto kao prilikom očitavanja samo jednog međufaznog napona. U prethodnim poglavljima je spomenuto da je ulazni napon izmjenjivača  $40$  V, a očitanjem grafa dobije se  $38$  V. Time je apsolutna pogreška iznosa  $2$  V, a postotna  $5\%$ . Također, kao i kod faznog pomaka dobije se približno isti rezultat. Sukladno tome razlika u rezultatima pripisuje se nepreciznosti točnog očitavanja s grafa odnosno procjeni vrijednosti, te utjecaju ostalih veličina na mjereni rezultat. Kao što je bio slučaj i za jedan međufazni napon tako je i za sve, odnosno snimljeni valni oblici na eksperimentalnoj pločici poklapaju se na isti način sa karakterističnim valnim oblicima koji su dobiveni teorijskom analizom.

## 8. ZAKLJUČAK

Uz Lucas Nuelle opremu dolazi LabSoft program preko kojega korisnici prate zadane upute od strane proizvođača. Također, u sklopu odrađivanja pokusa dolazi i kviz koji korisnike navodi na zaključivanje o provedenim pokusima što je prednost ove opreme. Jedan od nedostataka eksperimentalne pločice je nemogućnost mjerenja faznog napona zbog nedostatka mjerne točke na zvjezdištu.

Fokus ovog diplomskog rada bio je povezati rad BLDC motora sa znanjima iz energetske elektronike. Eksperimentalna kartica s BLDC motorom svojim je pokusima obuhvaćala više područja. Od područja elektrostrojarstva i elektronike pa do područja iz kontrole i regulacije. Eksperimenti koje je predložio proizvođač više su namjenjeni upoznavanju motora i njegove šire primjene. Novi set mjerenja, koji je proveden, uspoređivao je vrijednosti dobivene na kartici s teorijskom analizom i karakterističnim oblicima grafova. Tako u novi set mjerenja spada mjerenje međufaznih napona, očitavanje njihovih vrijednosti te pokazivanja njihovog međusobnog pomaka od  $120^\circ$ . Mjereni iznos napona kao i fazni pomak između napona imali su odstupanja od vrijednosti dobivenih teorijskom analizom, ali se to pripisuje preciznosti provedenih postupaka, korištenih virtualnih instrumenata i različitim utjecajnim veličinama. Iznos napona dobiven mjerenjem je 38 V što je 5 % odstupanja od iznosa dobivenog teorijskom analizom. Fazni pomak, također dobiven mjerenjem, iznosa je  $116,13^\circ$  što je 3,225 % odstupanja od iznosa dobivenog teorijskom analizom. U novi set mjerenja, također, spada i mjerenje napona na MOSFET-ima donje ventilске grane. Pomoću tog mjerenja su se potvrdila poklapanja sklopniha stanja MOSFET-a sa stanjima teorijske analize.

## LITERATURA

- [1] V. Ambrožić, P. Zajec, Električni servo pogoni, Zagreb, 2019.
- [2] R. Krishnan, Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives, Virginia, 2010.
- [3] C. L. Xia, Permanent magnet brushless DC motor drives and controls autora, China, 2012.
- [4] I. Flegar, Elektronički energetska pretvarači, Zagreb, 2010.
- [5] V. Barišić, Primjena električnog pogona u prometu osobnih vozila, Završni rad, Osijek, 2020.
- [6] <https://www.lucas-nuelle.us>, pristup ostvaren 8.7.2021.
- [7] <https://electromotors.ie/repairs/dc-motor-overhaul>, pristup ostvaren 11.7.2021.



## **SAŽETAK**

Ovaj diplomski rad sadrži opis opreme Lucas Nuelle. Opisan je BLDC motor i uspoređen je s istosmjernim motorom. Napravljena je analiza naponskog trofaznog izmjenjivača, koji se koristi u sklopu ove opreme. Provedeni su eksperimenti koji su dani od strane proizvođača. Predložen je novi set mjerenja koji se više fokusira znanjima iz elektroničkih energetske pretvarača.

Ključne riječi: BLDC, trofazni izmjenjivač, neupravljivi trofazni mosni spoj, Lucas Nuelle

**TITLE:** Features of didactic-multimedia equipment based on operation with DC motor with permanent magnets

## **ABSTRACT**

This thesis contains a description of Lucas Nuelle's equipment. A BLDC motor is described and compared to a DC motor. An analysis of the three phase inverter, which is used as part of this equipment, was made. Experiments given by the manufacturer were performed. A new set of experiments has been performed that focuses more on knowledge from electronic power converters.

Keywords: BLDC, 3-phase inverter, three phase bridge inverter, Lucas Nuelle

## ŽIVOTOPIS

Marin Gregić rođen je 26.siječnja 1998.godine u Osijeku. Pohađao je Osnovnu školu Dobriše Cesarića u Osijeku. Nakon toga upisuje srednju školu I.gimanzija Osijeku. Nakon što je maturirao upisuje Preddiplomski studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na drugoj godini preddiplomskog studija odlučuje se za smjer Elektroenergetike. Završetkom preddiplomskog studija odmah upisuje Diplomski studij izbornog bloka Industrijske elektroenergetike. Na kraju diplomskog studija dobiva nagradu fakulteta za uspješnost u studiranju. Kroz svoje učenje i rad u sklopu fakultetskog obrazovanja postao je, napredan korisnik MS Office-a. Upoznao se sa brojnim alatima i programima, među kojima su MATLAB i Ansys u kojima je stekao dobro znanje.

---

Potpis autora