

# Model reguliranog pogona istosmjernog motora napajanog pomoću GTO tiristora

---

**Vuksanović, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:927003>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-11**

*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**

**Stručni studij**

**MODEL REGULIRANOG POGONA ISTOSMJERNOG  
MOTORA NAPAJANOG POMOĆU GTO TIRISTORA**

**Završni rad**

**Josip Vuksanović**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 18.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit  
na preddiplomskom stručnom studiju**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Josip Vuksanović
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	A 4514, 23.07.2018.
<b>OIB Pristupnika:</b>	08949671214
<b>Mentor:</b>	dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil
<b>Naslov završnog rada:</b>	Model reguliranog pogona istosmjernog motora napajanog pomoću GTO tiristora
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada</b>	Potrebno je izraditi model jedog reguliranog pogona koji se sastoji od nezavisnog DC motora, regulatora brzine, regulatora stuje i čopera. Modul je potrebno načiniti u Matlab programskom paketu uz korištenje modula SimPowerSystems. Potrebno je prikazati rezultate simulacije brzine, struje i napona za različite brzine vrtnje i opterećenja ovog reguliranog sustava kao i dati pojašnjenja rezultata te pojedinih modula izrađenog sustava.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):</b>	Dobar (3)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 1 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 1 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	18.09.2023.
<i>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</i>	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

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

Osijek, 02.10.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Josip Vuksanović

**Studij:**

Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

A 4514, 23.07.2018.

**Turnitin podudaranje [%]:**

10

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Model reguliranog pogona istosmjernog motora napajanog pomoću GTO tiristora**

izrađen pod vodstvom mentora dr. sc. Željko Špoljarić

i sumentora ,

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

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak.....</b>	<b>2</b>
<b>2. ISTOSMJERNI STROJEVI.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Istosmjerni motor .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Građa i princip rada istosmjernog motora.....</b>	<b>4</b>
2.2.1. Građa istosmjernog motora.....	4
2.2.2. Princip rada istosmjernih motora .....	5
<b>3. REGULACIJA BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Regulacija istosmjernih motora pomoću sklopova energetske elektronike.....</b>	<b>8</b>
<b>4. ENERGETSKI PRETVARAČI .....</b>	<b>10</b>
<b>4.1. Vrste energetske pretvarača .....</b>	<b>11</b>
<b>5. ISTOSMJERNI PRETVARAČI.....</b>	<b>12</b>
<b>5.1. Vrste istosmjernih pretvarača.....</b>	<b>12</b>
<b>5.2. Analiza rada istosmjernih pretvarača.....</b>	<b>13</b>
<b>6. MODEL REGULIRANOG POGONA NAPAJNOG POMOĆU ČOPERA.....</b>	<b>14</b>
<b>7. REZULTATI DOBIVENI SIMULACIJSKIM MODELOM .....</b>	<b>19</b>
<b>8. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>25</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>26</b>
<b>SAŽETAK .....</b>	<b>27</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>27</b>
<b>ŽIVOTOPIS .....</b>	<b>28</b>

## 1. UVOD

Dosadašnja analize pokazuju da se brzina istosmjernih motora može regulirati. Podešavanje se može izvršiti na tri neovisna načina: promjena napona armature, promjena uzbudnog polja i promjena ukupnog otpora u krugu armature. Pokazalo se da je upravljanje brzinom vrtnje, promjenom ukupnog otpora u armaturnom, energetski neučinkovito zbog rasipanja snage preko dodanih otpornika te da oslobođena toplina ne smije uzrokovati povećanje radne temperature elektromotornog pogona. Što implicira da se sva neiskoristiva temperatura mora ukloniti iz okoline stroja. Da bi se ostvarilo upravljanje promjenama u naponu armature i promjenama u naponu uzbude polja stroja (a samim time i uzbudnog polja) potrebno je dobiti promjenjivi istosmjerni napon. Zahvaljujući razvoju energetske elektronike u posljednjih 30-ak godina otkrivena su pouzdana rješenja u obliku poluvodičkih energetskih pretvarača čija je zadaća napajati istosmjerni stroj s promjenjivim istosmjernim naponom iz istosmjerne mreže (istosmjerni pretvarači, tzv. čoperi) i izmjeničnim naponom iz standardne, izmjenične mreže (usmjerivači). Svaki oblik upravljanja i regulacije pogona mora biti izveden s najvećom mogućom preciznošću, najmanjim mogućim gubicima, najvećom mogućom učinkovitošću i najnižom mogućom cijenom.

U ovome radu izrađen je model jednog reguliranog pogona koji se sastoji od nezavisnog DC motora, regulatora brzine, regulatora struje i čopera. Cijeli model napravljen je u Matlab programskom paketu uz korištenje modula SimPowerSystems. Cilj ovog zadatka je dobiti što manje oscilacije brzine vrtnje nezavisnog istosmjernog motora, pri različitim opterećenjima.

U drugom poglavlju ovog rada nalazi se opći opis istosmjernih motora, gdje se navode njihove osnovni dijelovi te objašnjava njihov princip rada

U trećem poglavlju govorit će se općenito o regulaciji brzine vrtnje istosmjernih motora, te o regulaciji istosmjernih motora pomoću sklopova energetske elektronike

U četvrtom poglavlju općenito su opisani energetski pretvarači, te navedene su vrste istih.

U petome poglavlju govorit će se o istosmjernim pretvaračima, o njihovim vrstama, te će se opisati njihov princip rada.

U šestome poglavlju opisać će se cijeli model gdje će se grafički prikazati pojedini moduli sustava, te će se dati njihovo objašnjenje

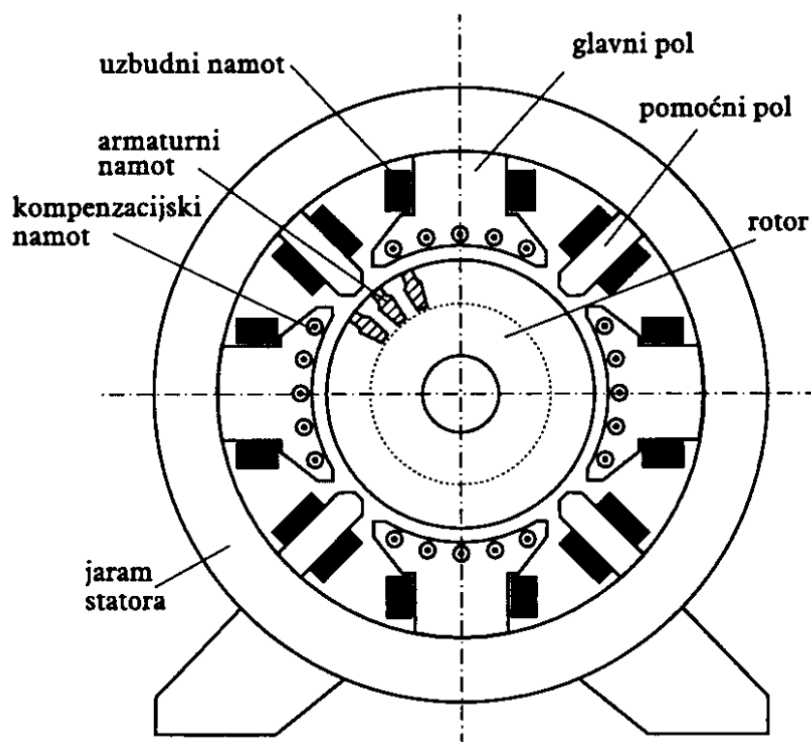
U sedmom poglavlju biti će prikazani rezultati simulacije te će se navesti njihova objašnjenja.

## **1.1. Zadatak**

Potrebno je izraditi određeni model regulirani pogona koji se sastoji od nezavisnog istosmjernog motora, regulatora brzine, regulatora struje i čopera. Model mora biti kreiran u paketu Matlab pomoću modula SimPowerSystems. Potrebno je prikazati rezultate simulacije brzine, struje i napona pri različitim brzinama i opterećenjima ovog regulacijskog sustava, te dati objašnjenje rezultata i pojedinih modula sustava.

## 2. ISTOSMJERNI STROJEVI

Električni rotacijski strojevi, kod kojih u vanjskom strujnom krugu teče istosmjerna struja, nazivaju se istosmjerni strojevi. Mogu raditi na dva načina: kao generatori i kao motori. Ako na svojim stezaljkama daju istosmjerni napon, tada rade kao generatori. Ako se na stezaljke dovodi istosmjerni napon, tada kažemo da rade kao motori. Istosmjerni strojevi su, prema vlastitoj konstrukciji, slični sinkronim strojevima. Razlikuju se po tome što se kod istosmjernih strojeva uzbudni dio nalazi na statoru, a armaturni na rotoru, dok je kod sinkronih strojeva obrnuto[1].



Sl. 2.1. Skica poprečnog presjeka istosmjernog stroja [2]

### 2.1. Istosmjerni motor

Michael Faraday izumio je, 1821. godine, najjednostavniji istosmjerni motor. Ovaj se motor sastojao od zavoja žice koji je slobodno plutao na sloju žive, s magnetom u sredini. Kada je istosmjerna struja prošla kroz zavoj žice, stvorilo se magnetsko polje oko zavoja, uzrokujući rotaciju žice oko magnetu. Motor na istosmjernu struju kakvog poznajemo danas otkrio je Zénobe Gramme 1873. godine. spojivši dinamo koji proizvodi električnu energiju na drugi dinamo koji je

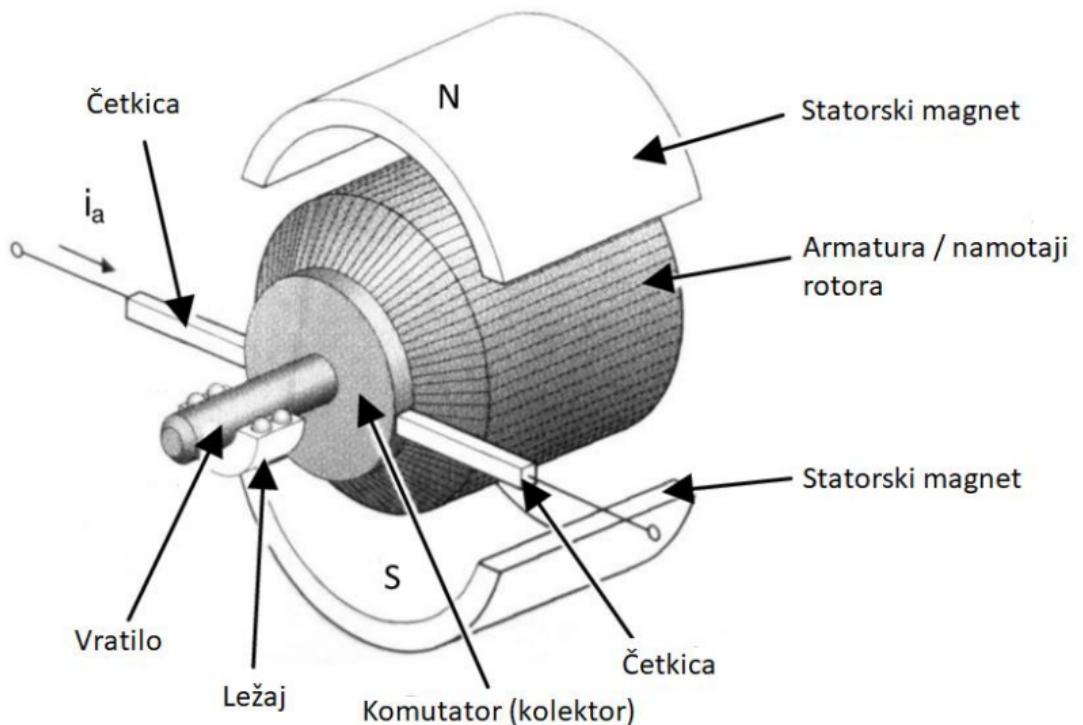


počeo rotirati poput motora. Najpoznatija podjela istosmjernih motora je podjela istosmjernih motora s četkicama te istosmjernim motorima bez četkica gdje su na rotoru smješteni stalni magneti i stator se sastoji od namota[3].

## 2.2. Građa i princip rada istosmjernog motora

### 2.2.1. Građa istosmjernog motora

Kao i kod svakog drugog motora, glavni dijelovi istosmjernog motora su rotor i stator. Za razliku od ostalih, ova vrsta motora također ima komutator s grafitnim četkicama. Klasični istosmjerni motor sastavljen je od rotirajuće armature i statora. Rotirajuća armatura je u obliku dvopolnog elektromagneta. Stator je načinjen od dva permanentna magnetna. Krajevi armaturnog namota povezani su s rotacijskim prekidačem, komutatorom. Komutator mijenja smjer struje kroz armaturni namot dva puta za svaki okretaj rotora, time stvara moment koji okreće rotor.



Sl. 2.2 Dijelovi istosmjernog motora[11]

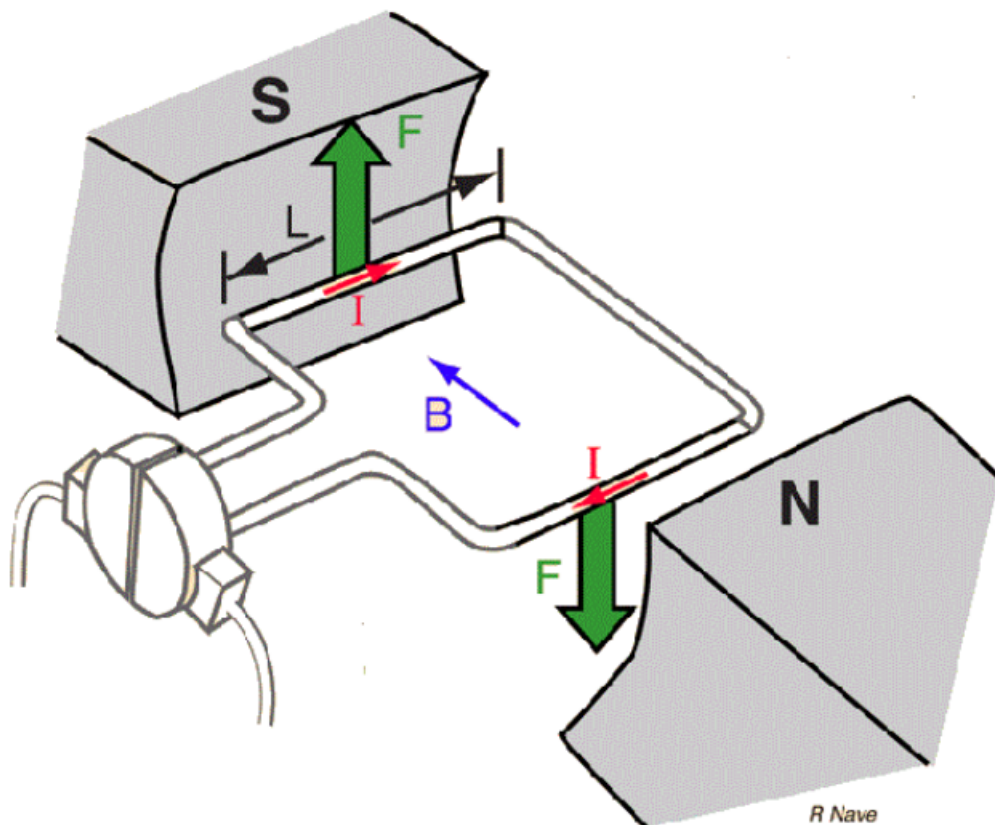
### 2.2.2. Princip rada istosmjernih motora

Istosmjerna struja koja teče kroz vodič smješten u magnetskom polju stvara silu. Ta sila zbog svog hvatišta, koje je izvan osi vrtnje rotora, proizvodi moment. Nastali moment uzrokuje okretanje rotora. Formula za izračunavanje sile[4]:

$$\vec{F} = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2-1)$$

Gdje je:

- $F$  – Sila na vodič u magnetskom polju [N]
- $B$  – magnetska indukcija [T]
- $Q$  – naboj [C]
- $v$  – brzina vodiča [m/s]



Sl. 2.3 Princip rada istosmjernog motora [8]

Za bilo koji položaj vodiča prema silnicama i za bilo koji smjer gibanja vodiča treba uzeti projekciju smjera vodiča u smjer okomit na ravninu u kojoj leže smjer brzine gibanja i smjer

silnica, a projekciju brzine u toj ravnini okomito na smjer silnica. S takvim međusobno okomitim komponentama, inducirani napon, može se izračunati kao za međusobno okomite smjerove. Matematički je to jednostavno i precizno formulirano na takav način da se smjer induciranog napona odmah definira kao vanjski umnožak vektora brzine  $v$  i vektora indukcije  $B$ , čiji, unutrašnji umnožak s vektorom dužine vodiča  $l$  daje inducirani napon, koji je skalar[14]:

$$E = (\vec{v} \times \vec{B})\vec{l} \quad (2-2)$$

Kada spojimo izvor istosmjerne struje na grafitne četkice koje klize po komutatoru dobijemo električnu vezu između rotora i izvora istosmjerne struje. Prilikom prelaska četkice s jedne lamele komutatora na drugu, dolazi do trenutka kada se izvor nalazi u kratkom spoju, uzrokujući da četkice iskre. Nastale iskre koje ispuštaju četkice uzrokuju sporo uništavanje grafitnih četkica i oksidaciju i trošenje komutatora. Ovo je ujedno i glavni nedostatak ovoga tipa motora. Iskrenje će se povećavati ukoliko poraste brzina vrtnje motora (broj okretaja), električni napon ili struja. To se događa zbog povećanog napona ili opterećenja. Iskre ne samo da uništavaju komutator i četkice, već također stvaraju zvučni i električni šum[4].

### 3. REGULACIJA BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNOG MOTORA

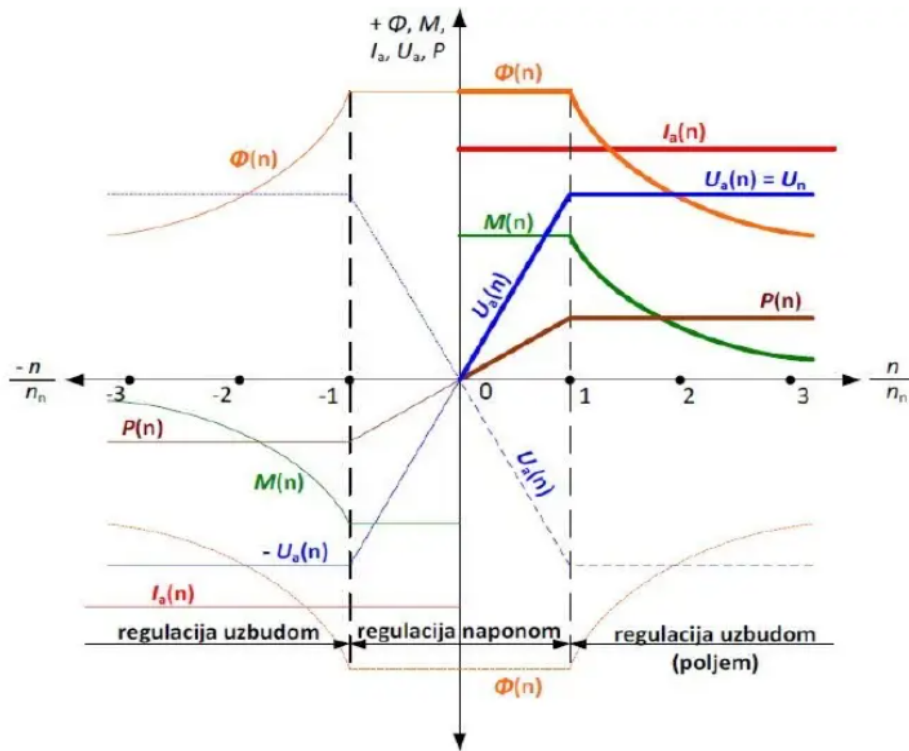
Osnovna prednost istosmjernih motora u odnosu na izmjenične je mogućnost finog podešavanja brzine vrtnje. Prema izrazu za brzinu vrtnje istosmjernog motora[12]:

$$n = \frac{U - I_a * R_a - \Delta U_{\check{c}}}{k_E * \Phi} \quad (3-1)$$

Gdje je:

- $n$  – brzina vrtnje [o/min]
- $U$  – narinuti napon [V]
- $I_a$  – struja armature [A]
- $R_a$  – otpor armature [Ohm]
- $\Delta U_{\check{c}}$  - pad napona na četkicama
- $k_e$  - konstanta
- $\Phi$  – uzbudni magnetski tok [Wb]

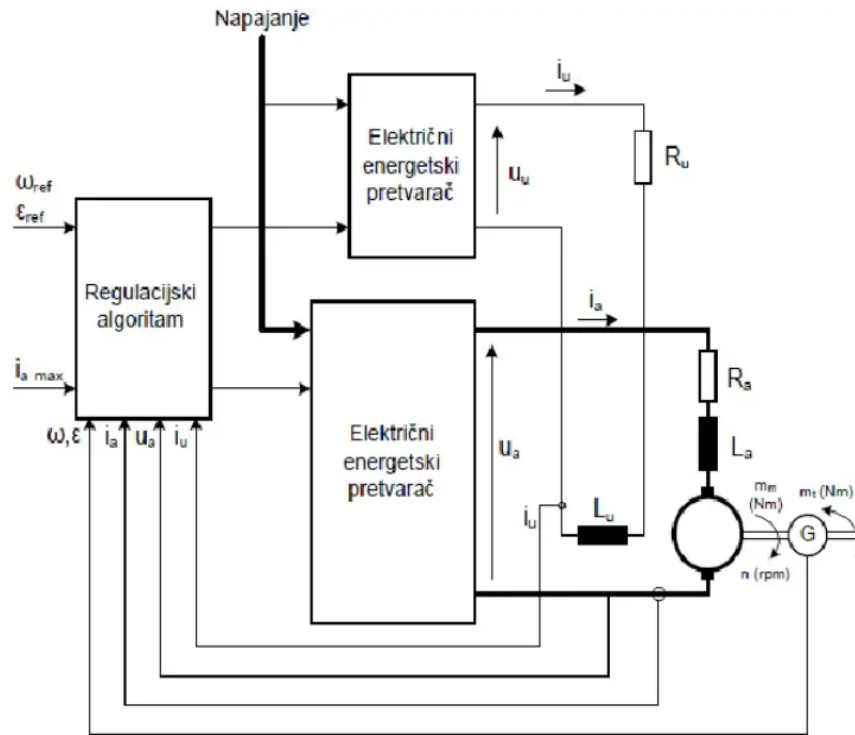
vidljivo je da brzina gotovo linearno raste s povećanjem napona, dok brzina opada s povećanjem magnetskog toka. U praksi se kombinira regulacija napona i regulacija polja. Regulacija napona se vrši za brzinu od 0 do brzine koju ima nazivni napon motora. Nakon toga brzina se regulira tako da se magnetsko polje smanji smanjenjem uzbudne struje. Raspon podešavanja raspona je obično 1:2 i do 1:3 na namjenski izgrađenim motorima. Na slici su prikazane promjene napona, struje, momenta i snage pri konstantnoj struji opterećenja u cijelom regulacijskom području brzine vrtnje vretena. Upravljanjem brzine vrtnje preko napona, snaga je proporcionalna porastu brzine, a moment motora ostaje konstantan. Upravljanjem brzine vrtnje kontrolom polja, snaga motora ostaje konstantna, a moment je obrnuto proporcionalan brzini vrtnje motora.



Sl. 3.1. Dijagram promjena veličina istosmjernog stroja [6]

### 3.1. Regulacija istosmjernih motora pomoću sklopova energetske elektronike

Mijenjanjem veličine struja spojenih na stezaljke armature mijenjaju se struja armature i brzina istosmjernog stroja nezavisne pobude. Za kontrolu struje armature i brzine motora korišten je predotpor. Ova vrsta regulacije je relativno učinkovita, u isto vrijeme je izuzetno neekonomična radi gubitaka koji nastaju u predotporima. Stvara se toplina koja nepotrebno zagrijava krug i ne može se koristiti. Promjena napona napajanja uspješno kontrolira struju armature i brzinu istosmjernog motora. Za pravilan rad istosmjernog stroja u raznim radnim uvjetima, pretvarači snage opskrbljuju napon i struju za taj stroj. Zadaća pretvarača snage je pouzdano, točno, učinkovito i brzo upravljati istosmjernim strojem. Energetskim sustavom je potrebno upravljati uz najniže moguće troškove. Istosmjerni stroj, sustav koji sadrži pretvarač energije, digitalni sustav i sustav za mjerenje i prikupljanje podataka o podesivim pogonskim veličinama elektromotora služe za postizanje podesivog elektromotornog pogona.

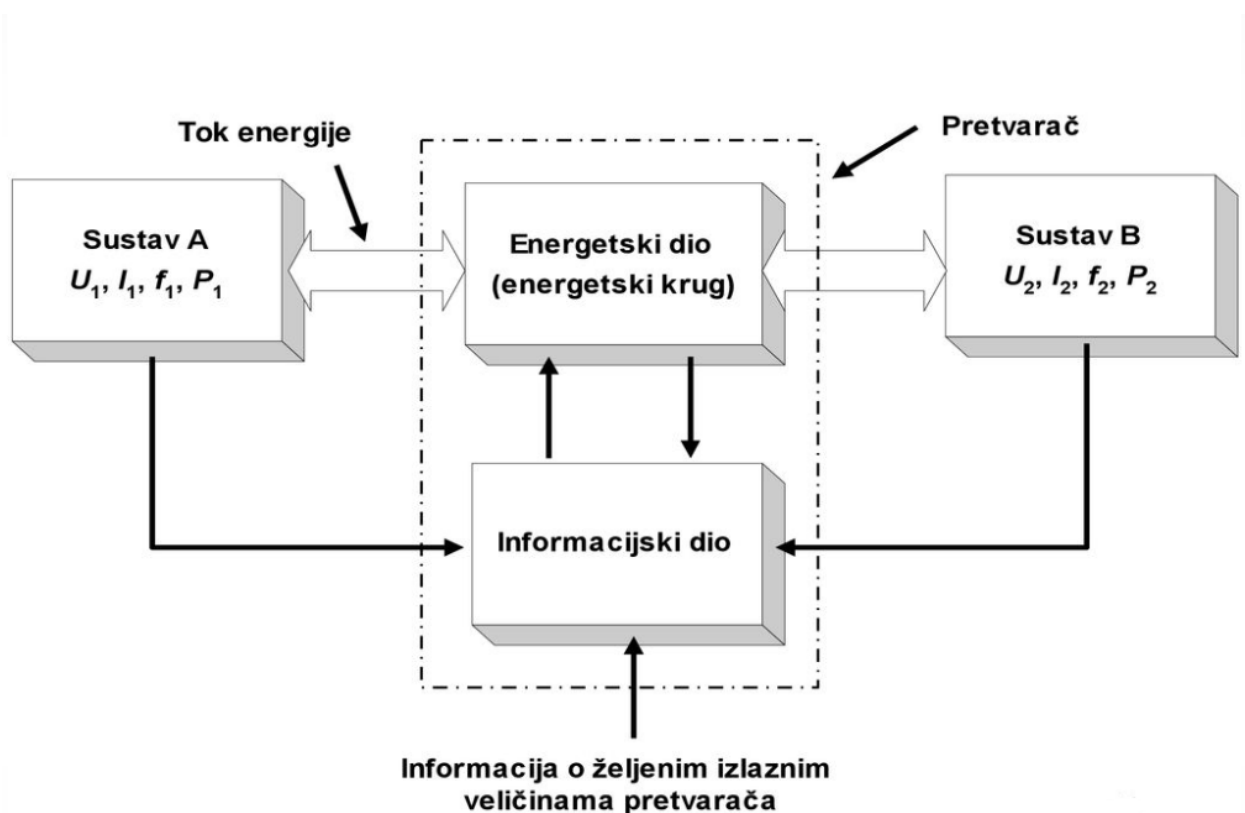


Sl. 3.2. Sustav regulacije armaturene struje i brzine istosmjernog stroja s nezavisnom uzбудom [7]

U uzbudni ili armaturni krug, može se postaviti energetski pretvarač. Prema slici, naponi  $u_u$  odnosno  $u_a$  ulazne su veličine u kontrolirani sustav U zatvorenom sustavu s (negativnom) povratnom vezom, ulazne vrijednosti su ujedno i referentne vrijednosti za struju armature, odnosno brzinu stroja. Negativna povratna sprega može poboljšati dinamička svojstva kontroliranog sustava i kompenzirati smetnje koje se mogu pojaviti u upravljanju sustavom (npr. povećan moment opterećenja). Za dobivanje povratne veze koriste se mjerni članovi. Na slici 3.1. mjerni članovi su  $i_a$ ,  $u_a$ ,  $u_u$ ,  $\omega$  te  $\varepsilon$ . Mjerni članovi su različiti, npr. Ampermetar za struju, voltmetar za napon, tahogenerator na vratilu stroja za brzinu itd. Postizanje željene vrijednosti na izlazu dobiva se odabirom pravog regulatora na ulazu i postavljanjem referentne vrijednosti. Slika 3.1. prikazuje dijagram iz kojeg se zaključuje da pretvarač mora imati mogućnost promjene parametara. Promjena parametara mora omogućiti promjenu napona. Pretvarači energije koji se koriste su: usmjerivači (AC/DC) i istosmjerni pretvarači, tzv. čoperi (DC/DC)[7].

## 4. ENERGETSKI PRETVARAČI

Energetski pretvarači povezuju dva ili više različitih električnih sustava. Služe za regulaciju protoka struje između izvora energije i potrošača. Energetski pretvarači također upravljaju i neelektričnim veličinama. Neelektrične veličine su temperatura, intenzitet svjetlosti, brzina motora, itd. Energija koja se dovodi u sustav snage  $P_{ul}$  i energija koju sustav daje na izlazu snage  $P_{iz}$ , mora ostvariti povoljan stupanj korisnosti  $\eta$ . Razliku između ulazne i izlazne energije sustav obično pretvara u toplinu u obliku gubitka energije, snage  $P_{gub}$ . Dobivena toplina mora se odvoditi iz postrojenja putem rashladnog sustava, što također određuje veličinu energetskog postrojenja. Sposobnošću da osiguraju potrebne ulazne i izlazne parametre u svim radnim uvjetima određena je funkcionalnost energetskih pretvarača. Složenost sustava, dizajn komponenti, tehnologija proizvodnje, učinkovitost hlađenja i pouzdanost komponenti koje se koriste u radu određuju pouzdanost energetskih pretvarača. Slika 4.1, prikazuje da energetski pretvarač može imati sklopove za pohranjivanje energije, kao što su kondenzatori i induktori te višestruke stupnjeve pretvorbe.



Sl. 4.1. Struktura elektroničkog energetskog pretvarača [7]

## 4.1. Vrste energetskih pretvarača

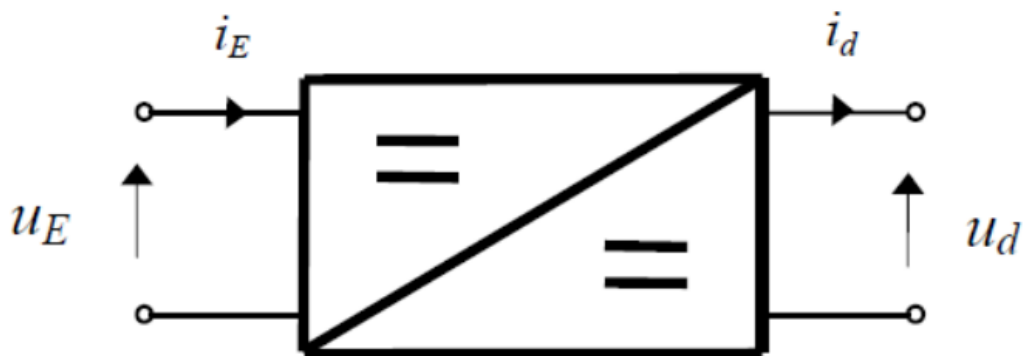
Energetski pretvarači mogu se podijeliti u nekoliko kategorija na temelju ulaznog/izlaznog valnog oblika:

- **istosmjerno-izmjenični pretvarači** (izmjenjivači) – pretvaraju istosmjerni oblik signala u izmjenični promjenjive veličine i frekvencije, povezuju istosmjernu mrežu s izmjeničnim trošilom
- **istosmjerno-istosmjerni pretvarači** (istosmjerni pretvarači) – pretvaraju ulazni istosmjerni signal u istosmjerni više ili niže razine te tako povezuju dvije istosmjerne mreže
- **izmjenično-istosmjerni pretvarači** (ispravljači) – ispravljaju ulazni, izmjenični oblik u istosmjerni oblik signala te tako povezuju izmjeničnu mrežu i istosmjerno trošilo
- **izmjenično-izmjenični pretvarači** (izmjenični pretvarači) - pretvaraju ulazni izmjenični signal u izmjenični različite veličine i frekvencije te tako povezuju dvije izmjenične mreže[9].



## 5. ISTOSMJERNI PRETVARAČI

Energetski pretvarači koji povezuju istosmjernu mrežu i istosmjerno trošilo nazivaju se istosmjerni pretvarači. Njihov zadatak je povećati ili smanjiti istosmjerni napon. To je također njihova svrha u kontroli brzine i struje armature nezavisno pobuđenog istosmjernog stroja. Razlika između istosmjernog pretvarača i usmjerivača je ta što istosmjerni pretvarači koriste istosmjernu struju, usmjerivači koriste izmjeničnu struju (AC/DC) za napajanje stroja. [7]



Sl. 5.1. Simbol istosmjernog pretvarača[13]

Istosmjerni se pretvarač može promatrati kao dvoprilaz. Na ulaz dvoprilaza priključen je izvor napona  $u_E$  i struje  $i_E$ , a na izlaz dvoprilaza priključeno je istosmjerno trošilo napona  $u_d$  i struje  $i_d$ .

### 5.1. Vrste istosmjernih pretvarača

U upotrebi je nekoliko topologija istosmjernih pretvarača, koje se mogu kategorizirati na sljedeći način:

Klasifikacija prema iznosu stvorene izmjenične snage:

- Izravni pretvarač (*forward converter*)
- Neizravni pretvarač (*fly-back converter*)

Klasifikacija prema broju kvadranta izlazne u-i karakteristike:

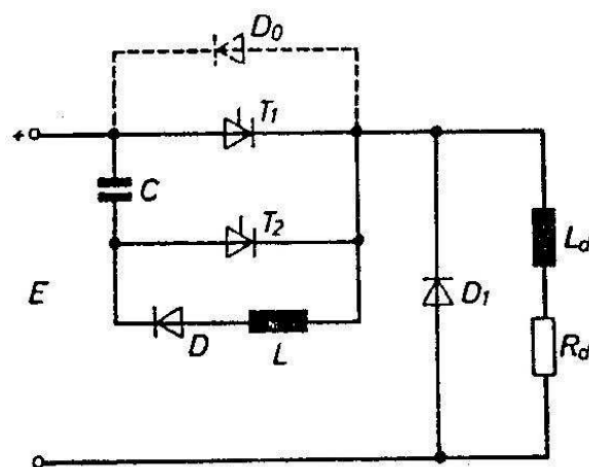
- Jednokvadrantni
- Dvokvadrantni
- Višekvadrantni

Klasifikacija prema načinu rada:

- Kontinuirani
- Diskontinuirani

## 5.2. Analiza rada istosmjernih pretvarača

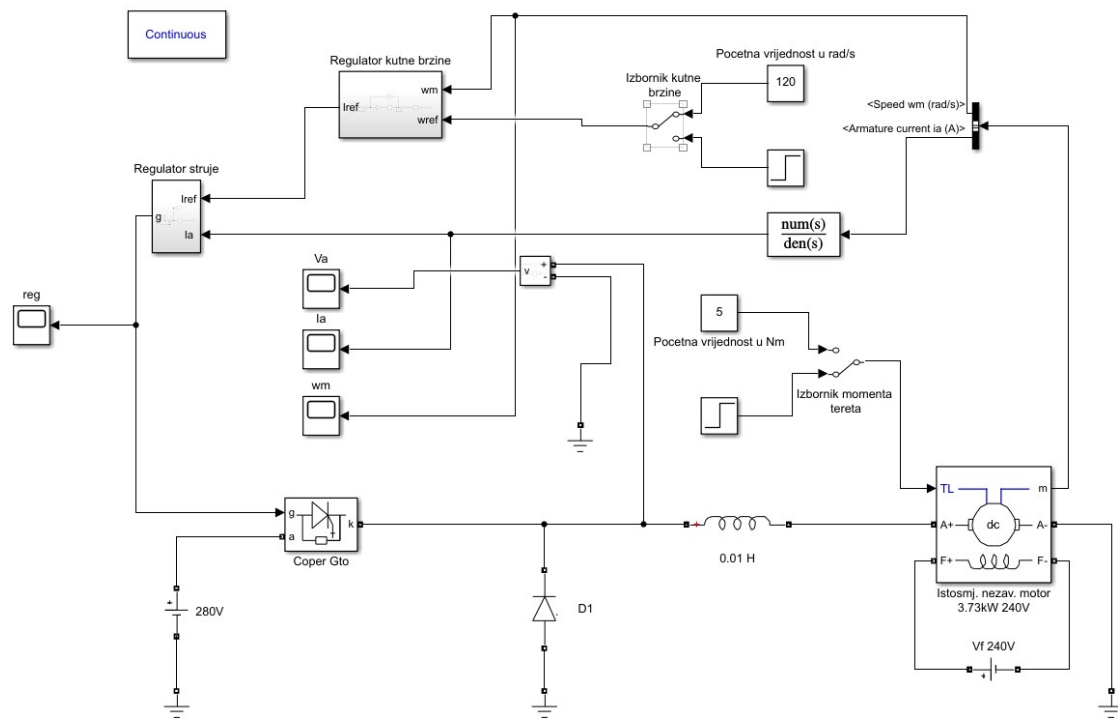
Načelo rada istosmjernih pretvarača može se opisati na sljedeći način. Za početak, uzmimo pretpostavku da niti jedan od tiristora ne provodi struju od promatranog trenutka  $t_0$ . U slučaju da želimo uključiti sklopku, odnosno tiristor, onda je u trenutku  $t_0$  potrebno dovesti okidajući impuls na ulaz (*gejt*) tiristora  $T_1$ , koji je zapravo master tiristor, i nalazi se u stanju blokiranja. Navedeni tiristor u promatranom trenutku prelazi u stanje vođenja, te preko sebe provodi struju od izvora  $E$ , do trošila, te nazad do izvora. Važno je za napomenuti da dioda s oznakom  $D_1$  ne vodi. Nakon što tiristor  $T_1$  provede, sinusna struja titrajnog kruga  $D, L, C$  poteče. U isto vrijeme, kondenzator  $C$  se nabija na napon izvora  $E$ . Nakon pola periode sinusne struje kroz titrajni krug, kondenzator se nabije na napon  $E$ , stoga je njegov  $+$  sada na donjoj elektrodi. Spomenuto stanje traje do trenutka  $t_1$ , do dolaska impulsa na ulaz (*gejt*) tiristora  $T_2$ . Uloga tiristora  $T_2$  je u ovom slučaju samo za isključenje glavnog (master) tiristora  $T_1$ . Kada se tiristor  $T_2$  uključi, na glavni (master) tiristor  $T_1$  dolazi reverzni napon koji njegovu struju smanji na nulu u periodu od  $t_1$  sve do  $t_2$ . Glavni (master) tiristor  $T_1$  je isključen u trenutku  $t_2$ , te od spomenutog trenutka sve do trenutka  $t_3$  struja ne teče kroz trošilo, a napon na izlazu iz čopera je nula. Opisano traje do trenutka  $t_3$  kada se sam proces ponavlja. Treba primijetiti kako se s promjenom vremena dovođenja impulsa na tiristore  $T_1$  i  $T_2$  mogu promijeniti vremena pauze  $p_i$  i vremena provođenja  $v_i$ . Na taj se način može regulirati srednja vrijednost izlaznog napona čopera.



Sl. 5.2. Shema spoja tiristorskog istosmjernog pretvarača[15]

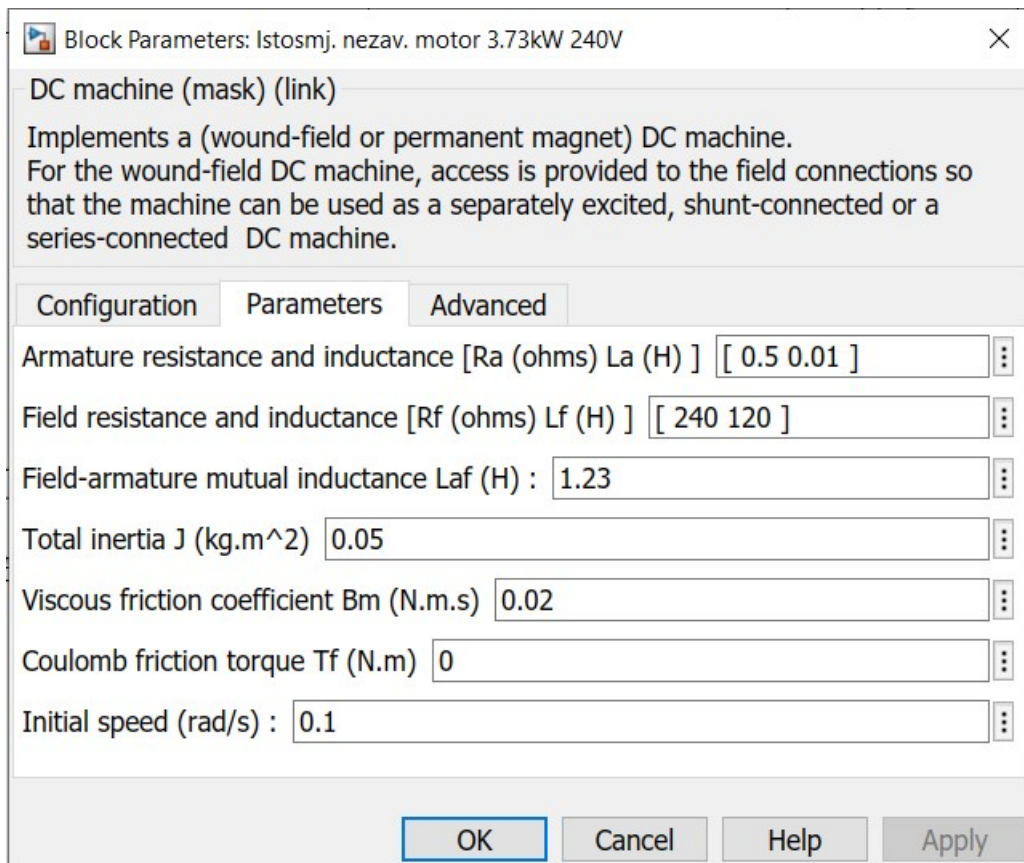
## 6. MODEL REGULIRANOG POGONA NAPAJNOG POMOĆU ČOPERA

Ovaj primjer odnosi se na kontrolirani pogon nezavisno pobuđenog istosmjernog motora napajanog iz istosmjernog izvora preko sklopke koja se sastoji od GTO tiristora i diode. Ovim pogonom se može postići i održati bilo koji željeni broj okretaja motora bez obzira na opterećenje.



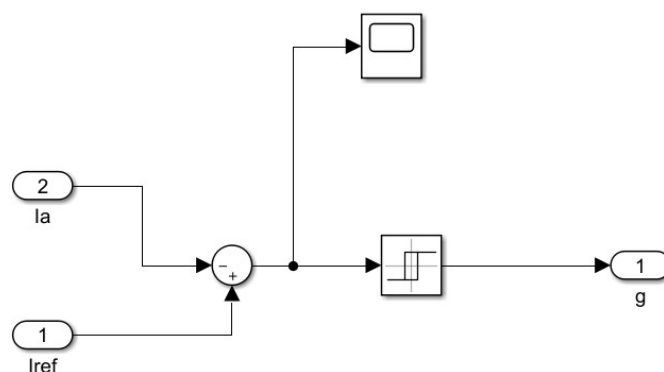
Sl. 6.1. Simulacijski model

Model se sastoji od nezavisnog DC motora, regulatora kutne brzine, regulatora struje i čopera. Na slici 6.2. prikazuje se parametriranje motora. Niti jedan od pretpodešenih motora nije korišten.

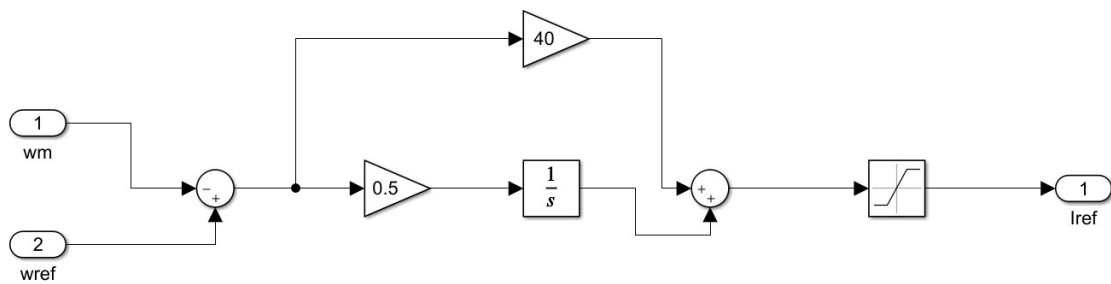


Sl. 6.2. Parametriranje motora 3,73 kW, 240 V

Blokovi obaju regulatora dobiveni su modificiranjem bloka PI regulatora pod nazivom "Discrete PI Controller", kojemu se može pristupiti iz Matlaba naredbom "powerlib", a zatim slijedom naredbi u otvorenim izbornicima "Extras/Discrete Control Blocks /Discrete PI Controller". Svaki od blokova predstavlja zaseban podsustav, a njegov sadržaj prikazan je na slikama 6.3. i 6.4.

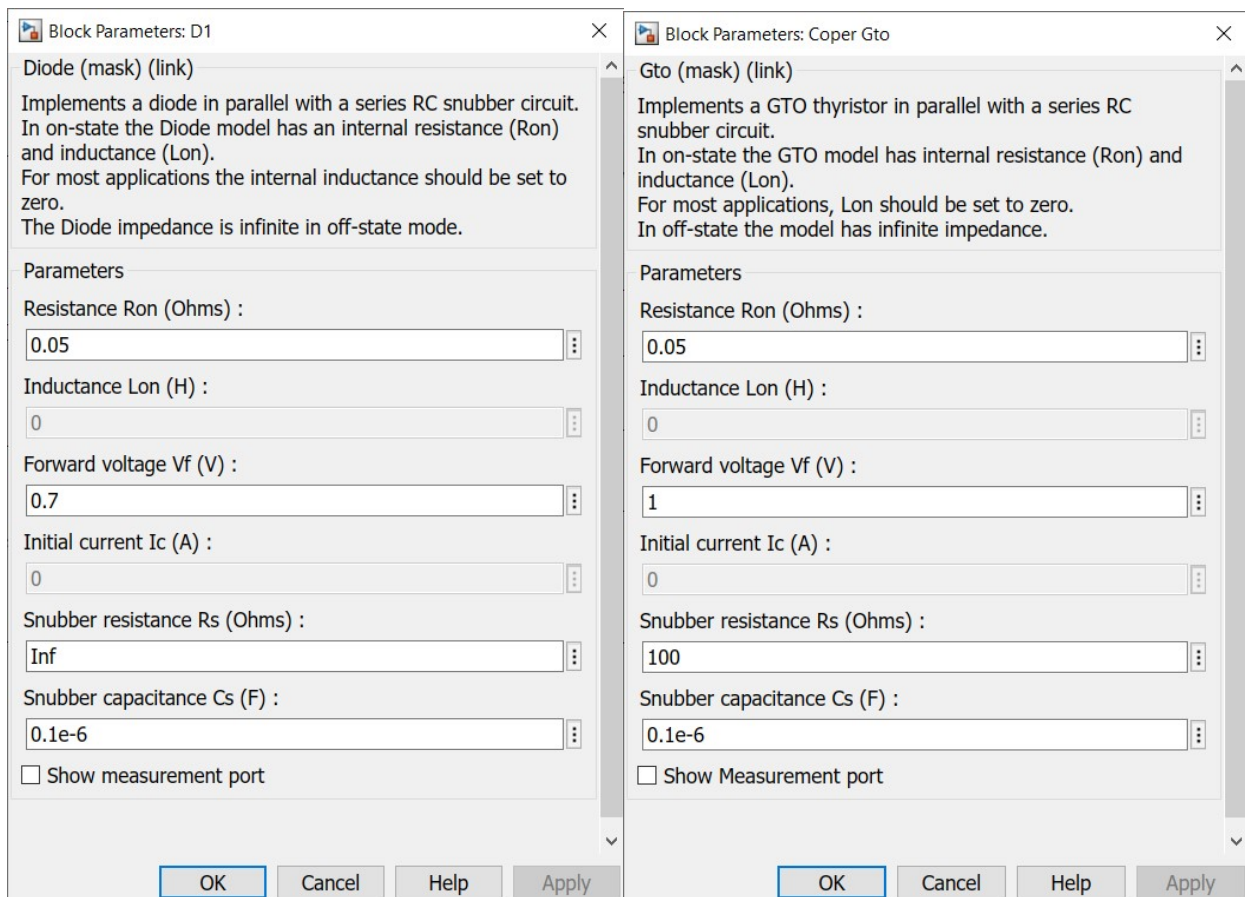


Sl. 6.3. Regulator struje



Sl. 6.4. Regulator kutne brzine

Desnim klikom na blok odgovarajućeg regulatora i u otvorenom izborniku naredbom Look Under Mask dolazi se do izbornika bloka kutne brzine i izbornik momenta opterećenja sa slike 6.1. Koriste se za postavljanje zadanih vrijednosti regulatora, razvijeni su za ovu primjenu i identični su po sadržaju. Motor se napaja iz istosmjernog izvora preko čopera, sastavljenog od blokova Chopper Gto i D1, preko prigušnice od 0,01 H. Prigušnica se sastoji od bloka Parallel RLC Branch. Motor pogoni teret karakteriziran momentom tromosti  $J$ , koeficijentom trenja  $B$  i momentom tereta  $T_L$ . Na slici 6.5. prikazane su kartice za parametrisiranje blokova Chopper Gto i D1.

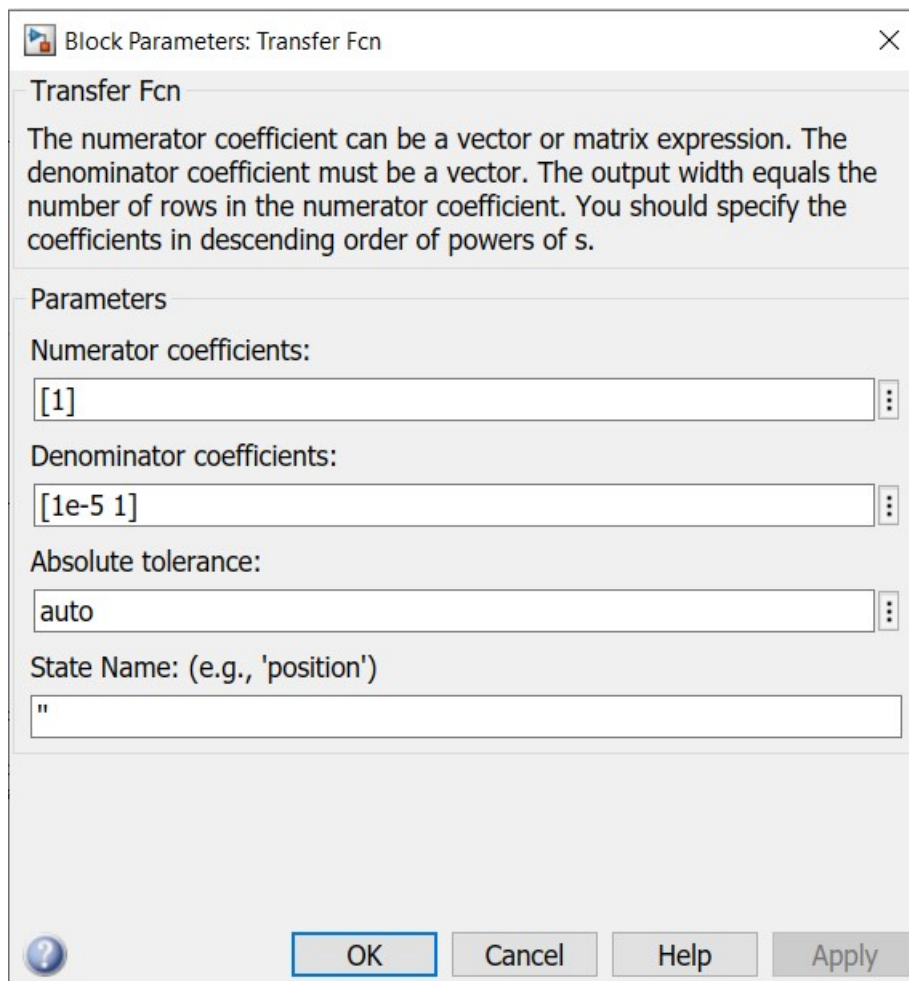


A)

B)

Sl. 6.5. Kartica za parametrisanje blokova D1 (A) i Chopper GTO (B)

Regulator struje ima histerezni dizajn. Uspoređuje struju armature motora sa postavljenom referentnom vrijednošću i generira okidni signal za GTO tiristor tako da struja kroz motor slijedi zadanu odnosno referentnu vrijednost. Regulacijski krug brzine vrtnje sadrži PI regulator koji generira referentnu vrijednost za regulacijski krug struje. Mjerni vektor, dobiven preko izlaza motora  $m$ , dovodi se do demultipleksera i tamo rastavlja na signal struje armature i signal kutne brzine. Mjerni signali za struju  $I_a$  i napona armature  $V_a$  dovode se do bloka Scope. Signal struje armature prolazi kroz blok Filter, kako bi se uklonili viši harmonici. Blok Filter dio je Simulink biblioteke i može mu se pristupiti slijedom naredbi `simulink3/Continuous/ Transfer Fcn`. Njegova kartica za parametrisanje prikazana je u slici 6.7.

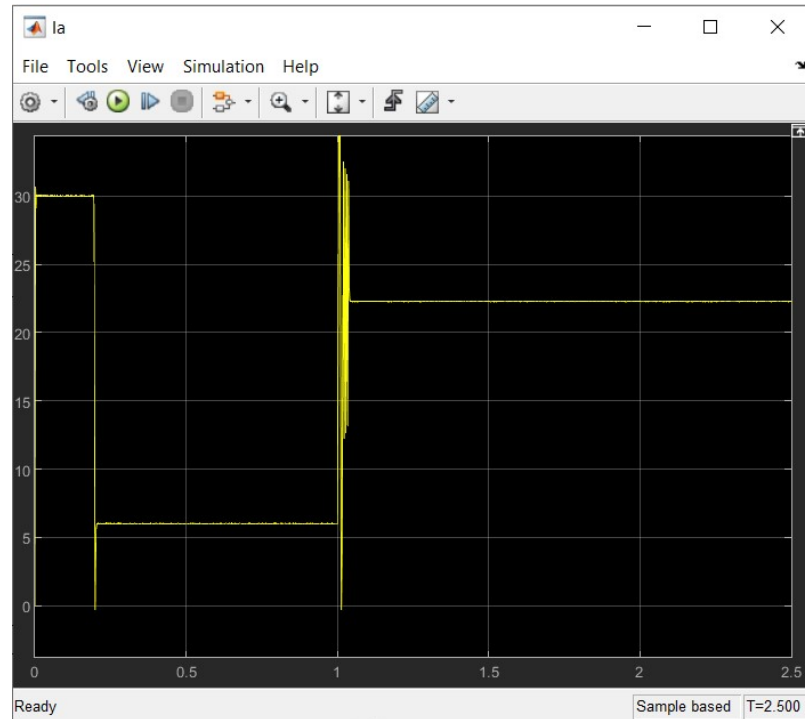


Sl. 6.6. Parametriranje bloka Filter

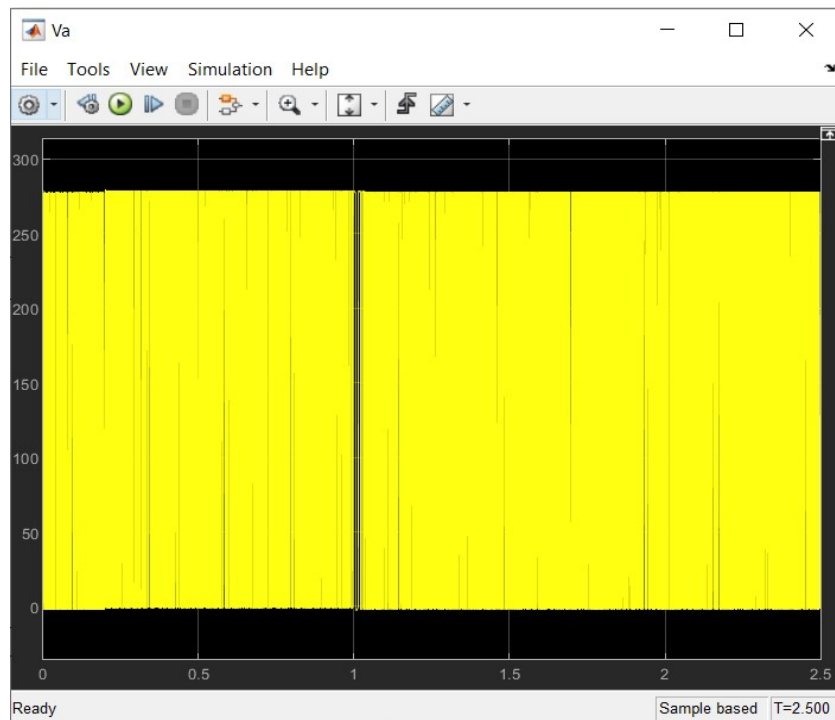
Na početku simulacije, referentne vrijednosti oba regulatora definirane su kao konstante. Nakon otprilike 1 sekunde, dvostrukim klikom na blok izbornik kutne brzine on preklapa i kutna brzina skoči sa 120 na 160 rad/s, a kod isteka oko 1,5 sekunde, dvostrukim klikom na blok izbornik momenta tereta, moment tereta skače s 5 Nm na 25 Nm.

## 7. REZULTATI DOBIVENI SIMULACIJSKIM MODELOM

U nastavku slijede rezultati simulacije. Na slikama 7.1. do 7.4. prikazuju se rezultati simulacije za parametre regulatora brzine  $K_i=0.5$  (integralni član) i  $K_p=40$  (proporcionalni član)

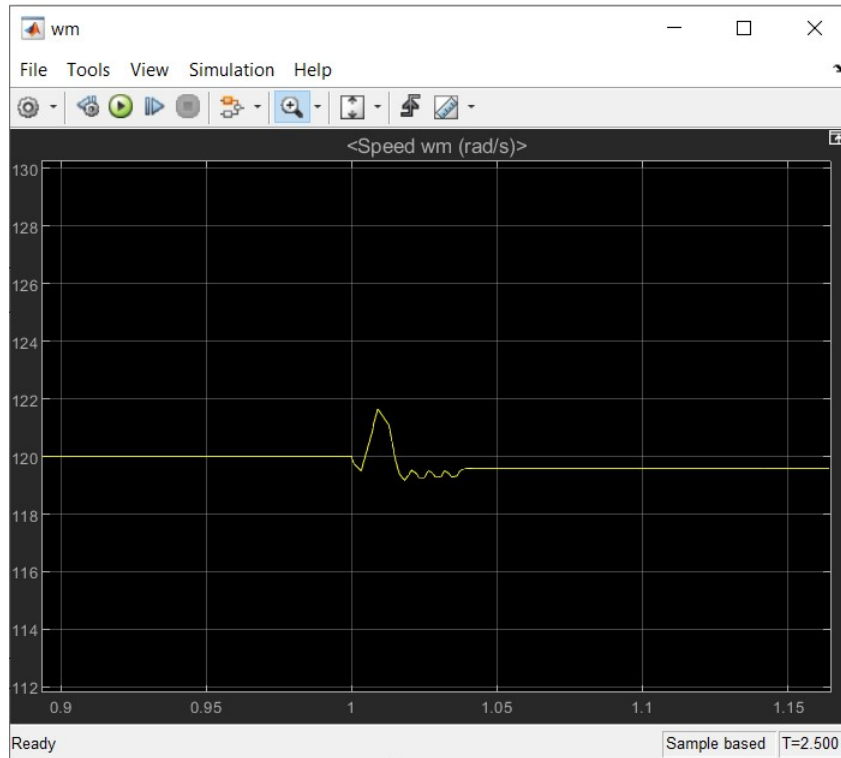


Sl. 7.1. Struja armature Ia

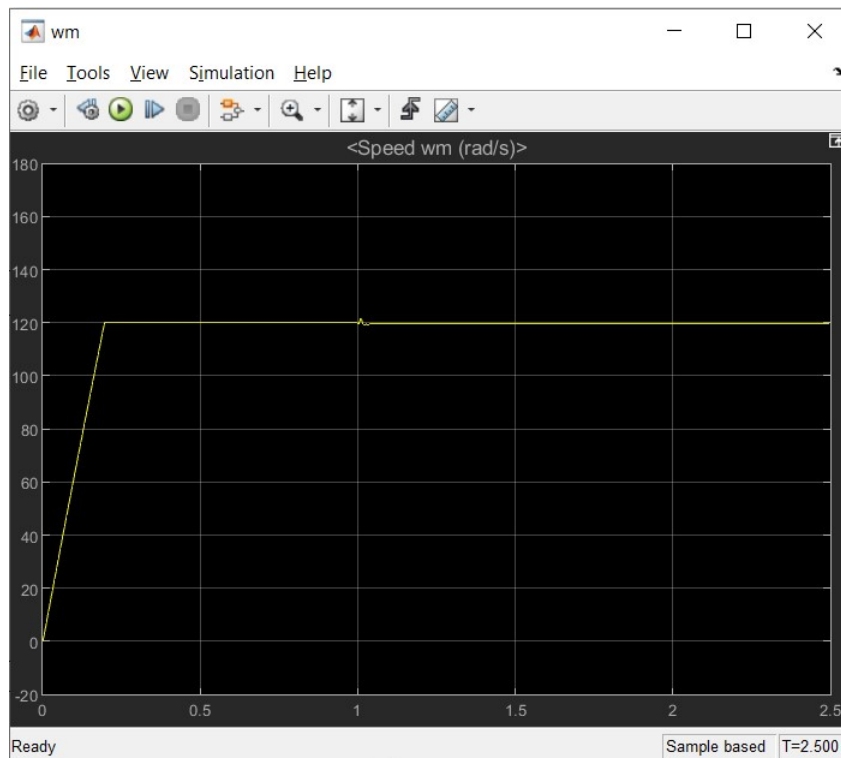


Sl. 7.2. Napon armature Va



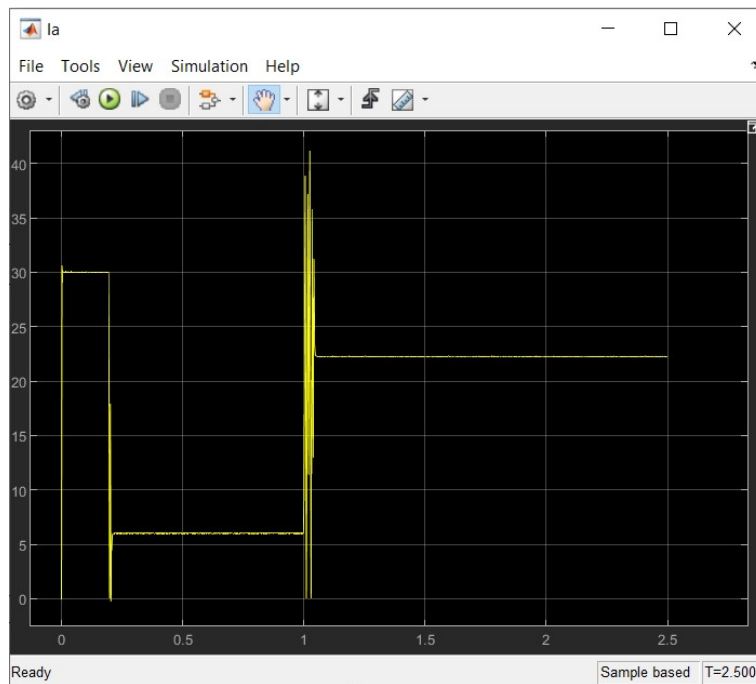


Sl. 7.3. Kutna brzina wm, uvećano

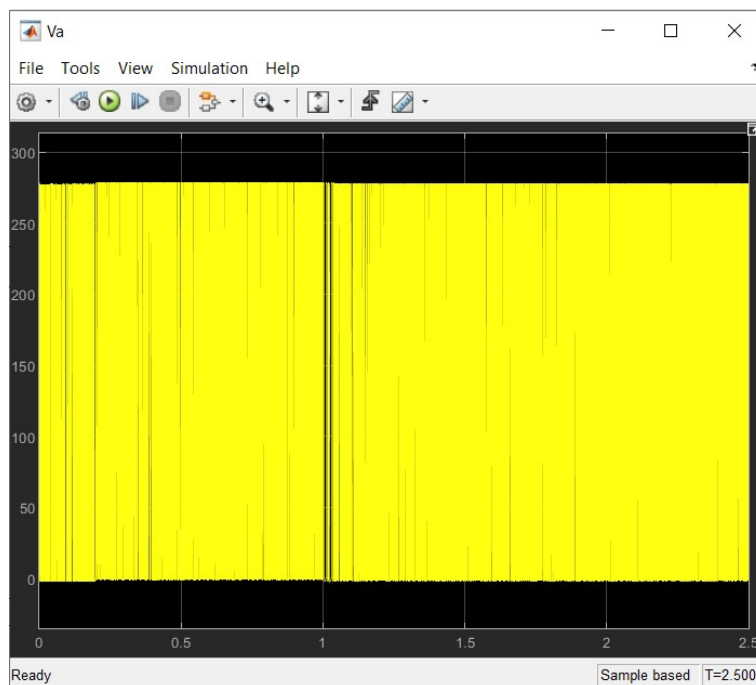


Sl. 7.4. Kutna brzina wm

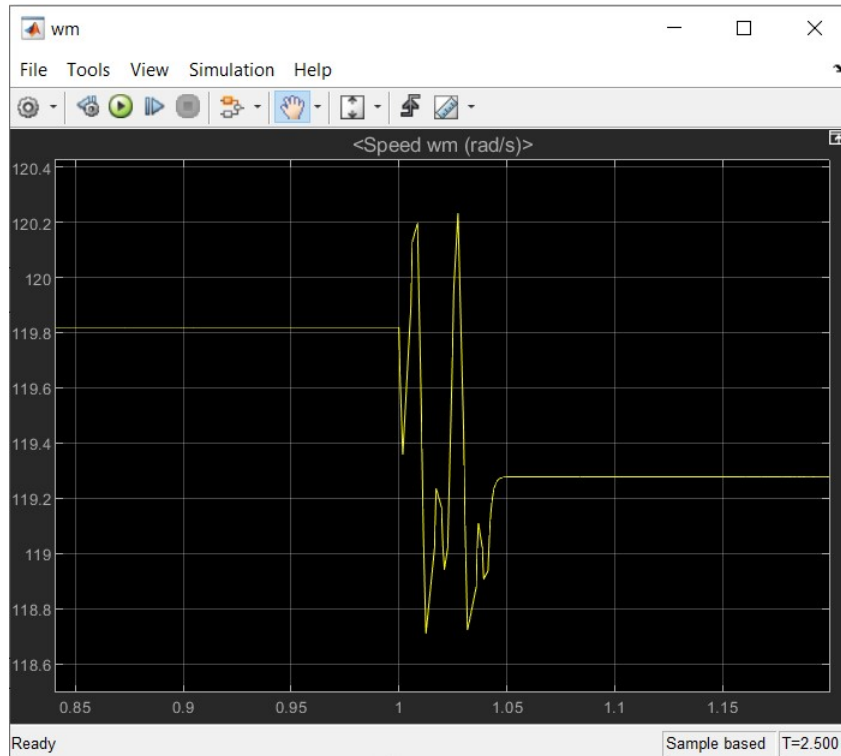
U nastavku su promijenjeni parametri regulatora kutne brzine. Na slikama 7.5. do 7.8. prikazuju se rezultati simulacije za parametre regulatora brzine  $K_i=0.05$  (integralni član) i  $K_p=30$  (proporcionalni član)



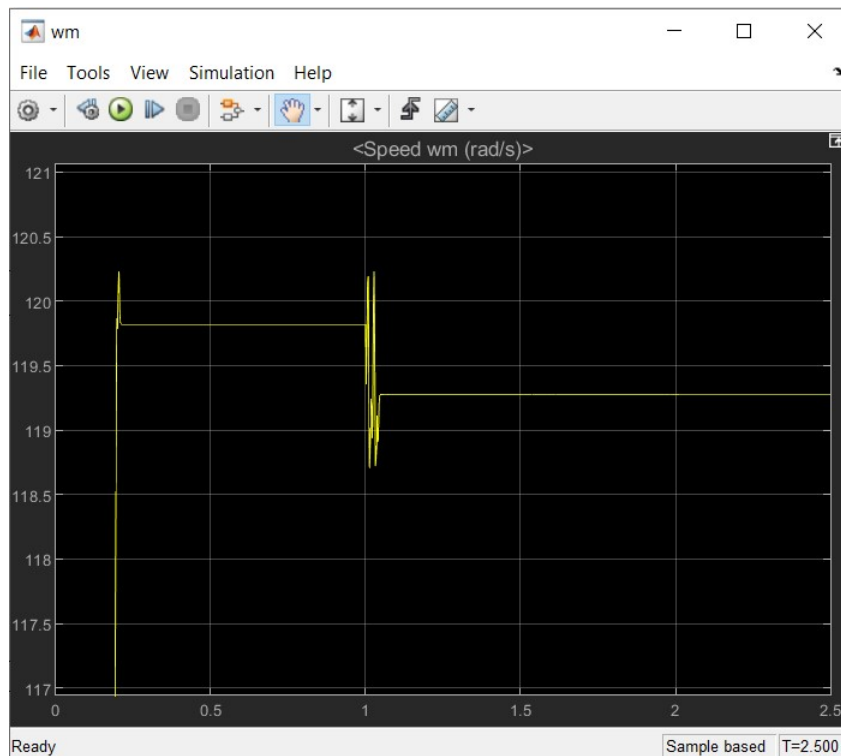
Sl. 7.5. Struja armature Ia



Sl. 7.6. Napon armature Va

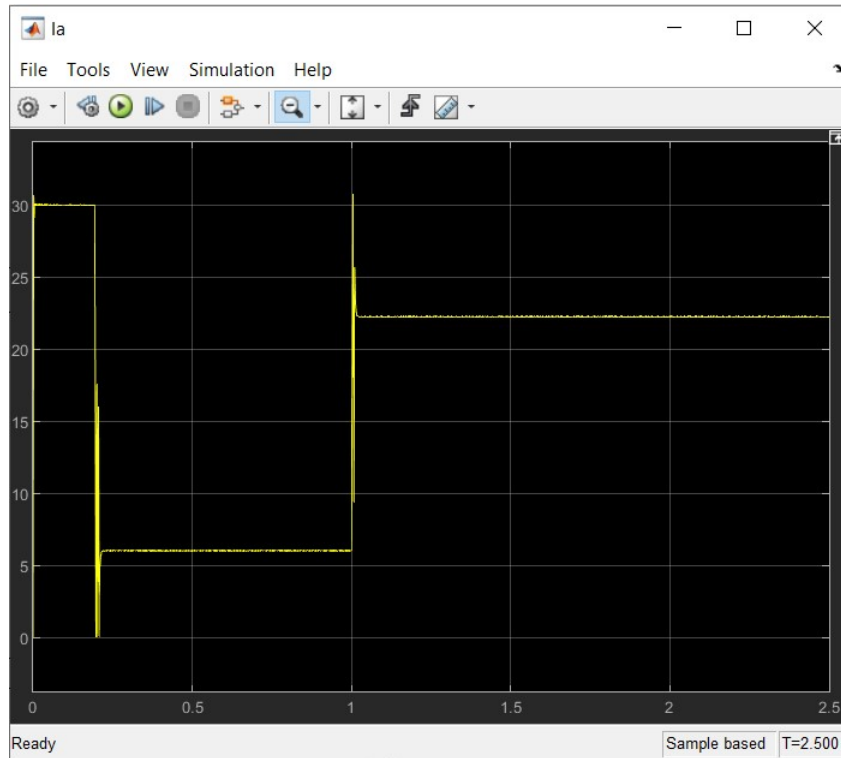


Sl. 7.7. Kutna brzina wm, uvećano

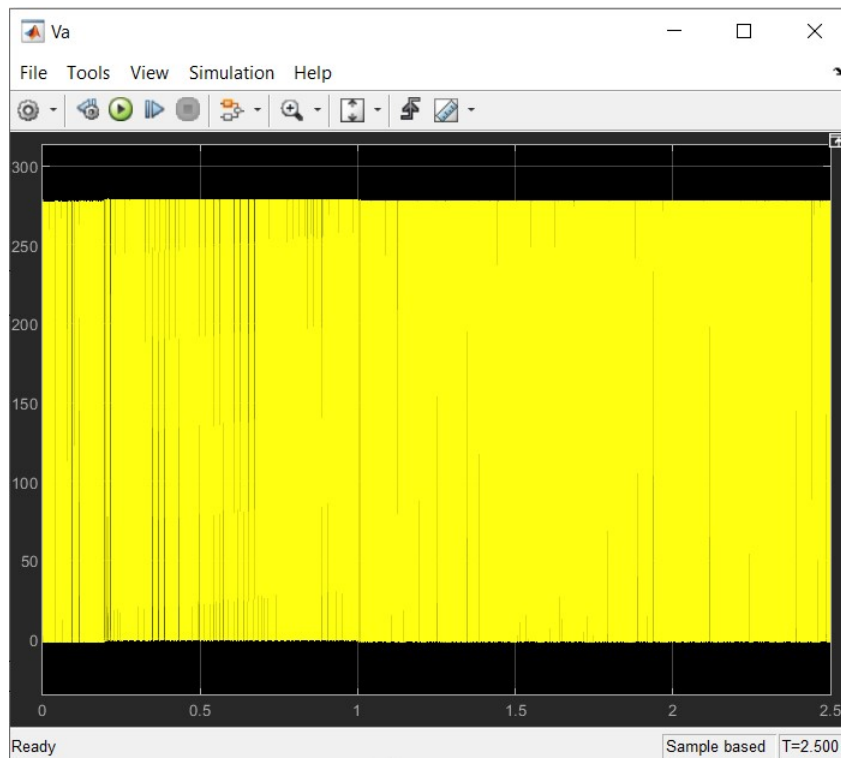


Sl. 7.8. Kutna brzina wm

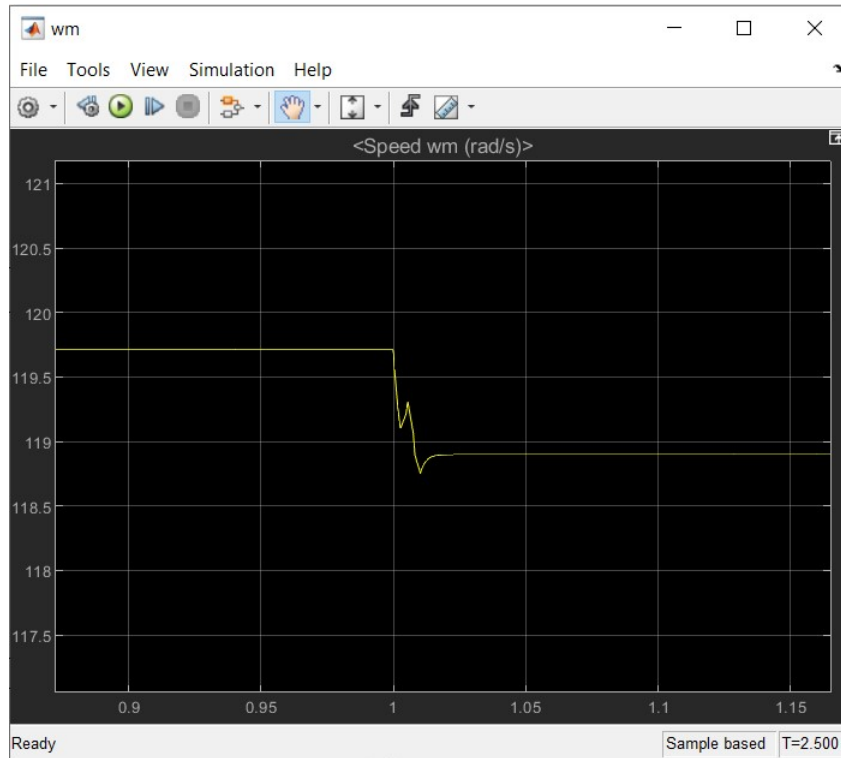
U trećem setu mjerenja također su promijenjeni parametri regulatora kutne brzine te oni sada iznose:  $K_i=0.02$  i  $K_p=20$ , što je vidljivo na slikama 7.9. do 7.12.



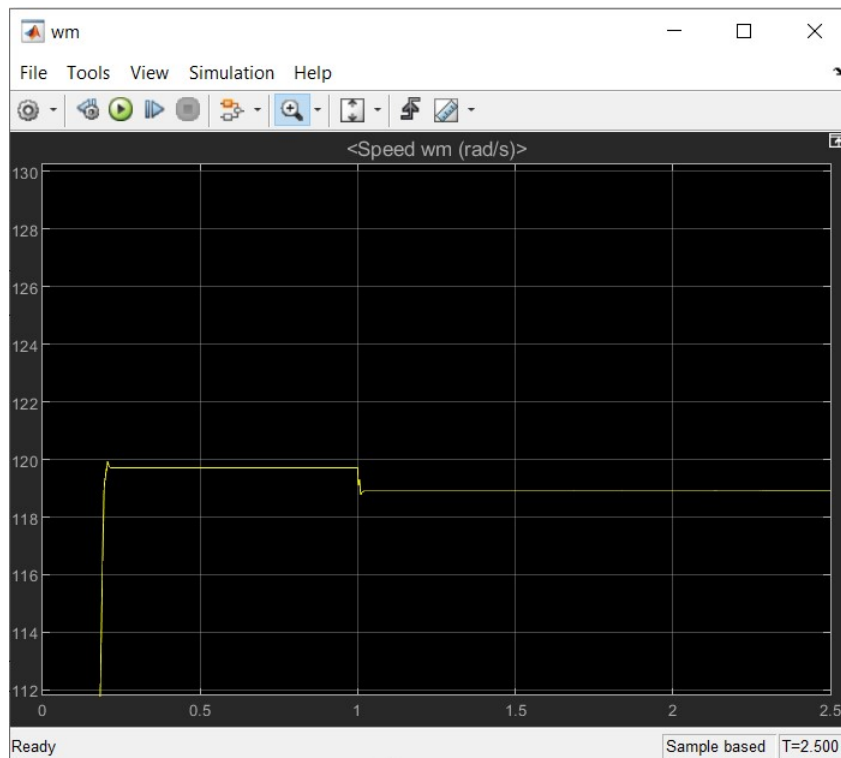
Sl. 7.9. Struja armature Ia



Sl. 7.10. Napon armature Va



Sl. 7.11. Kutna brzina wm, uvećano



Sl. 7.12. Kutna brzina wm

## 8. ZAKLJUČAK

U ovome je radu objašnjen i tehnički prikazan jedan od tri spomenuta načina reguliranja brzine istosmjernih motora, a to je pomoću poluvodičkih energetske pretvarača. Kao što je ranije opisano, njihova je zadaća napajanje istosmjernog stroja s promjenjivim istosmjernim naponom iz istosmjerne mreže, te izmjeničnim naponom iz standardne, izmjenične mreže. U svrhu izrade završnog rada, korišten je programski alat Matlab, odnosno Simulink u kojem je sastavljen model. Model se sastoji od nezavisnog DC motora, regulatora kutne brzine, regulatora struje i čopera. Sami rezultati simulacija prikazani su u poglavlju broj 7. Cilj simulacija bio je usporediti očekivane rezultate, s onima u kojima su promijenjeni proporcionalni član ( $K_p$ ) i integralni član ( $K_i$ ) unutar regulatora kutne brzine.

## LITERATURA

- [1] <https://www.scribd.com/doc/287260127/istosmjerni-strojevi>
- [2] Z. Maljković, „Električni strojevi“
- [3] "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), 2017.
- [4] Velimir Kruz: "Tehnička fizika za tehničke škole", "Školska knjiga" Zagreb, 1969.
- [5] Š. Mašić, S. Smaka, Elektromotorni pogoni, Sarajevo, Elektrotehnički fakultet, 2011.
- [6] B. Tomičić, Električni strojevi, Visokoelektrotehnička škola, Varaždin
- [7] <https://www.scribd.com/doc/151717885/Tiristorski-usbjermiva%C4%8D-i-%C4%8Doper>
- [8] <https://studyelectrical.com/2014/12/working-principle-of-dc-motor.html>
- [9] <https://element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-12083.pdf>
- [10] [https://www.otsog.hr/wp-content/uploads/2014/03/Energetska\\_elektronika\\_predavanja-ozujak\\_2014.pdf](https://www.otsog.hr/wp-content/uploads/2014/03/Energetska_elektronika_predavanja-ozujak_2014.pdf)
- [11] Antolić, Z.: Završni rad: Projektiranje sustava za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora zasnovanog na magnetskom enkoderu, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2020.
- [12] B. Skalicki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005
- [13] D. Pelin, K. Miličević, D. Vulin: „Priručnik za praktikum iz osnova energetske elektronike“, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2013.
- [14] Radenko Wolf: „Osnove električnih strojeva“, “Školska knjiga“ Zagreb, 1989.
- [15] [https://www.otsog.hr/wp-content/uploads/2014/03/Energetska\\_elektronika\\_predavanja-ozujak\\_2014.pdf](https://www.otsog.hr/wp-content/uploads/2014/03/Energetska_elektronika_predavanja-ozujak_2014.pdf)

## SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada bio je kreirati model u programskom alatu Simulink. Svrha kreiranog modela bila je analiza dobivenih rezultata, onih očekivanih, ali i rezultata koji su dobiveni promjenom vrijednosti proporcionalnog člana ( $K_p$ ) i integralnog člana ( $K_i$ ) unutar regulatora kutne brzine. Ovo je posebno korisno ukoliko trebamo provjeriti ponašanje strojeva i izlazne vrijednosti prije njihove upotrebe u stvarnom svijetu. Pogreške u simulaciji su prihvatljive, ali ne i u stvarnom svijetu, stoga je korištenje programskih alata Matlab i Simulink izuzetno korisno, ali i općeprihvaćeno u struci.

**Ključne riječi:** kutna brzina, matlab, model, regulator, simulink

## Model of a regulated DC motor powered by a GTO thyristor

### ABSTRACT

The purpose of this final paper was to create a model in the Simulink software tool. The purpose of the created model was to analyze the obtained results, the expected ones, but also the results obtained by changing the values of the proportional term ( $K_p$ ) and the integral term ( $K_i$ ) within the angular velocity regulator. This is especially useful if we need to check machine behavior and output values before using them in the real world. Errors in simulation are acceptable, but not in the real world, so the use of Matlab and Simulink software tools is extremely useful, but also widely accepted in the profession.

**Keywords:** angular velocity, matlab, model, regulator, simulink



## ŽIVOTOPIS

Josip Vuksanović rođen je u Slavonskom Brodu 29.04.1999. Trenutno živi u Slavonskom Šamcu gdje je i pohađao „Osnovnu školu Josip Kozarac Slavonski Šamac“. Nakon završene osnovne škole 2014. godine upisuje „Klasičnu gimnaziju fra Marijana Lanosovića s pravom javnosti“ u Slavonskom Brodu. Po završetku srednje škole 2018. godine upisuje preddiplomski stručni studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Govori dva strana jezika: njemački i engleski. Informatički je pismen. Služi se programima AutoCAD i MS Office-a te poznaje sintaksu tri programska. Stručnu praksu, u trajanju od 200 sati, obavio je u Elektro Čop d.o.o. u Cerni. Po završetku preddiplomskog studija nada se nastavku studiranja ili pronalasku posla u struci.

---

Potpis autora