

POZICIONA KONTROLA U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA - ANALIZA
TIPIČNOG INDUSTRIJSKOG REŠENJA

MOTOR DRIVES POSITION CONTROL - ANALYSIS OF THE TYPICAL INDUSTRIAL
SOLUTION

Rade Jerkić, Dragan Milićević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu su analizirane karakteristike i mogućnosti pozicione kontrole primenom industrijskog rešenja baziranog na frekventnom pretvaraču serije Danfoss FC300 i specijalizovane MCO 305 kartice za kontrolu pokreta vratila asinhronne mašine. Posebna pažnja posvećena je analizi i praktičnoj realizaciji pozicione kontrole u laboratorijskim uslovima. U radu su realizovana dve eksperimentalne postavke kojima su testirani manje i više zahtevni algoritmi pozicione kontrole.

Ključne reči: Asinhroni motor, frekventni pretvarač, poziciona kontrola, Danfoss FC302, Danfoss MCO 305

Abstract – In this work, the characteristics and possibilities of position control are analyzed using an industrial solution based on a Danfoss FC 300 series frequency converter and specialized MCO 305 card for shaft position control of asynchronous machines. Special attention is dedicated to the analysis and practical realization of position control in laboratory conditions. For purpose of testing more or less demanding position control algorithms, two experimental setups were realized in this work.

Key words: Asynchronous motor, frequency converter, position control, Danfoss FC302, Danfoss MCO 305

1. UVOD

Široka lepeza primene asinhronih mašina u pogonu i industriji nametnula je potrebu za razvijanjem uređaja za kontrolu položaja njihovog vratila. Upravljanje pozicijom rotora otvara širok spektar pogodnosti u procesima industrijskih pogona. Kao posledica, nastaju uređaji za kontrolu rada asinhronih motora u oblasti pozicioniranja.

Tema ovog rada jeste princip funkcionisanja i primena uređaja pozicione kontrole u industrijskim elektromotornim pogonima. Jedno od najboljih rešenja pozicione kontrole na tržištu nudi Danfoss sa svojom MCO 305 programabilnom karticom. Glavna svrha MCO 305 kartice jeste da obezbedi tačnu, preciznu i efikasnu pozicionu kontrolu u raznim pogonima.

NAPOMENA:

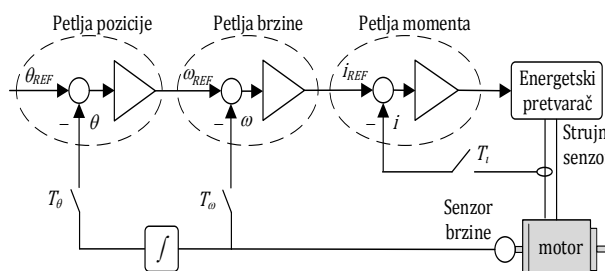
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Dragan Milićević, vanr. prof.

2. OSNOVE UPRAVLJANJA POZICIJOM

U cilju regulacije neke veličine u pogonu, u regulisanim elektromotornim pogonima regulator pogona dinamički menja parametre napajanja mašine. Njihovom promenom regulator menja mehaničku karakteristiku pogona i tako pogon ulazi u neku novu radnu tačku koja je u datom trenutku izabrana sa potrebama pogona i regulacije. U zavisnosti od toga za šta su regulisani elektromotorni pogoni namenjeni, potrebno je regulisati:

- elektromagnetni momenat,
- brzinu rotora,
- položaj rotora.

Na slici 1 prikazan je klasična kaskadna regulaciona struktura u jednom motornom pogonu.



Slika 1. Regulacione petlje u regulisanom elektromotornom pogonu [1]

Što se tiče rada ovako strukturisane regulacije, rad nadređene regulacione petlje direktno zavisi od rezultata regulacione petlje koja je njoj podređena. Primera radi, regulator brzine zavisi od njemu podređene regulacione petlje momenta, ako unutrašnja petlja ne ostvari željeni moment, regulator brzine ne može da vrši svoj posao jer praktično ne upravlja momentom koji motor razvija. Da bi se obezbedilo da unutrašnja petlja na vreme reguliše veličinu sa kojom spoljna petlja želi da upravlja, razdvajaju se dinamike tih petlji, tako što se razdvajaju propusni opsezi ovih struktura, tako da unutrašnja petlja bude barem 5 do 10 puta brža od njoj nadređene petlje [2,3].

Regulisanje brzine rotora proizilazi iz Njutnove jednačine mehaničkog podsistema, čije je rešenje za mehaničku brzinu:

$$[\omega_r](t) = \omega_r(0) + \frac{1}{J} \int ([m_{el}] - [m_{opt}]) dt = \omega_r(0) + \frac{1}{J} \int [m_d] dt \quad (1)$$

gde je:

$[\omega_r]$ – brzina rotora,
 $[m_{el}]$ – električni momenat,
 $[m_{opt}]$ – momenat opterećenja,
 $[m_d]$ – dinamički momenat ($m_d = m_{el} - m_{opt}$).

Stoga, brzinu je moguće regulisati samo kontrolom električnog momenta koji motor razvija. Promena brzine sa početne vrednosti na neku novu referentnu vrednost ostvaruje se promenim momenta motora u odnosu na dati momenat opterećenja, a kada je potrebno održavati zadatu vrednost brzine pri promeni opterećenja, kao poremećaja, opet je potrebno reagovati kontrolom momenta, kako bi se poništilo dejstvo poremećaja.

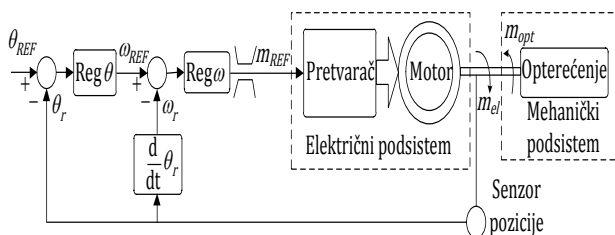
Položaj rotora, sa druge strane, se reguliše brzinom, što se jasno uočava iz:

$$[\vartheta_r](t) = \vartheta_r(0) + \int [\omega_r](t) dt \quad (2)$$

gde je:

$[\vartheta_r]$ – početni položaj,
 $[\omega_r]$ – brzina rotora.

Na slici 2 prikazana je blok šema pogona regulisanog po poziciji rotora. Referentna vrednost položaja se zadaje i poredi sa stvarnim položajem dobijenim integracijom brzine, te se tako generiše signal greške koji dolazi do regulatora položaja Reg θ . Dalje, regulator položaja zadaje referentnu vrednost brzine, pa stoga zaključujemo da optimalna regulacija pozicije moguća samo onda kada postoji unutrašnja regulaciona petlja po brzini [3].



Slika 2. Elektromotorni pogon sa regulisanim položajem vratila [1]

3. OPIS IZABRANOG REŠENJA

Za analizu industrijskog rešenja pozicione kontrole u ovom radu je korišćeno rešenje proizvođača Danfoss. Za praktičnu realizaciju pozicione kontrole izabrani proizvođač nudi modularnu koncepciju po kojoj se na klasičan pretvarač učestanosti dodaje specijalizovana dodatna kartica kojom se rad pretvarača proširuje i u domen pozicione kontrole.

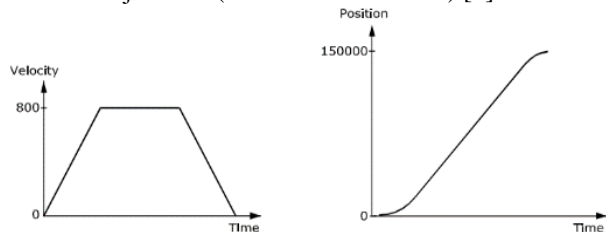
Konkretno, industrijsko rešenje frekventnog pretvarača serije FC300 sa unapređenim hardverskim karakteristikama i sa proširenim softverskim mogućnostima se proširuje karticom pozicione kontrole oznake MCO305 (eng. Motion Control Option 305).

Sam proizvođač frekventnih pretvarača u ponudi ima širok spektar snaga, pa se iz tog razloga izrađuju u nekoliko različitih veličina odnosno kućišta. Kao posledica toga, načini spajanja MCO 305 kartice se razlikuju. Za pretvarače najmanjih snaga tj. za veličine kućišta A2, A3, B3 ilustracija spajanja data je na slici ispod. Može se primetiti sistem povezivanja u stilu knjige, odnosno sa strane pretvarača [4].

Pozicioniranje, kao najvažnija funkcija MCO 305 uređaja, se može podeliti na nekoliko tipova:

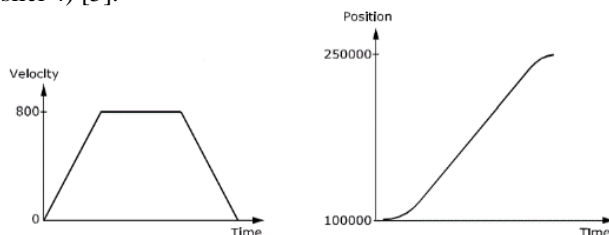
- Apsolutno pozicioniranje,
- Relativno pozicioniranje i
- Pozicioniranje pomoću dodirne sonde.

Apsolutno pozicioniranje se uvek odnosi na neku predefinisanu apsolutnu nultu pozicionu tačku koja po pravilu mora biti definisana pre sprovođenja postupka apsolutnog pozicioniranja. U slučaju korišćene kartice, ako se koriste inkrementalni enkoderi, nulta tačka se definiše upotrebom funkcije *Home*. Kod apsolutnih enkodera, nultu tačku daje sam enkoder. Na primer, ako je očitana pozicija 0 (nula) korisničkih jedinica, a zadata apsolutna vrednost 150000 istih, vratilo motora će otići na zadatu poziciju i prilikom toga će preći put od 150000 korisničkih jedinica (ilustrovano na slici 3) [5].



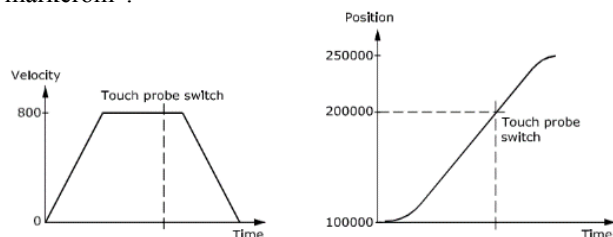
Slika 3. Apsolutno pozicioniranje [5]

Relativno pozicioniranje uvek je povezano sa stvarnom pozicijom. U tom smislu, moguće je izvršiti postupak pozicioniranja bez prethodnog definisanja nulte tačke. Na primer, ako je očitana trenutna pozicija 100000 korisničkih jedinica, a zadata relativna pozicija 150000 istih, vratilo pogonjenog motora će otići na poziciju 250000 tj. preći će put od 150000 jedinica (ilustrovano na slici 4) [5].



Slika 4. Relativno pozicioniranje [5]

Pozicioniranje pomoću dodirne sonde povezano je sa stvarnim položajem kada se aktivira ulaz sonde na dodir. To znači da je ciljani položaj definisan položajem sonde na dodir plus udaljenost pozicioniranja. Ovakvo pozicioniranje predstavlja relativno zadavanje položaja vratila u odnosu na aktivnost postojećeg senzora. Sonda je senzorski uređaj koji može biti mehanički, optički, senzor blizine ili nekog drugog tipa. Na primer, pozicioniranjem dodirne sonde u 50.000, pogon će raditi do aktivacije dodirne sonde na 200.000 i nastavlja do ciljanog položaja od 250.000 (ilustrovano na slici 5). Pozicioniranje sonde na dodir još se naziva i “pozicioniranje povezano sa markerom”.



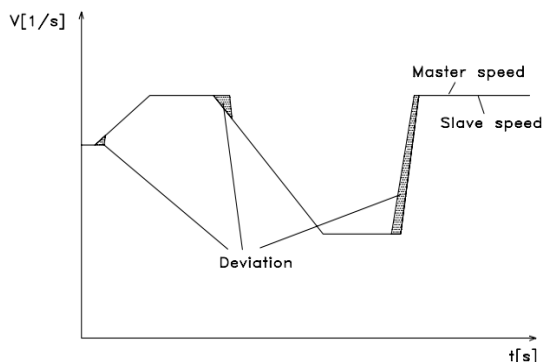
Slika 5. Pozicioniranje dodirnom sondom [5]

Takođe, izabrano rešenje nudi mogućnost i sinhronizacije i to one po brzini (SYNCV), po položaju (SYNCP) i po markerima (SYNCM).

Sinhronizacija po brzini predstavlja kontrolu brzine u zatvorenoj povratnoj sprezi. Brzina koja se prati (brzina *master* uređaja) pomnožena sa prenosnim odnosom čini zadatu vrednost za tzv. *slave* uređaj, uređaj koji ima ugrađenu MCO305 karticu.

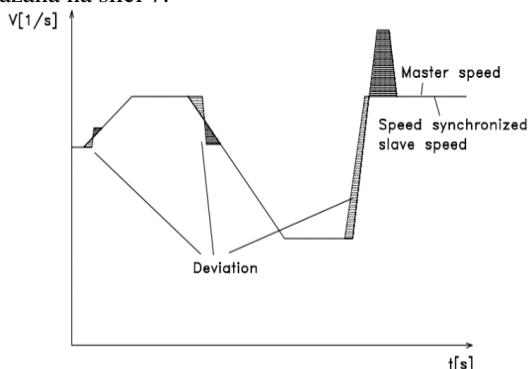
Ponašanje celokupnog sistema je takvo da pratilac, odnosno frekventni pretvarač sa integrisanom MCO305 karticom, sve vreme rada pokušava brzinu motora koji on kontroliše uskladiti sa brzinom nadređenog tj. *master* pretvarača.

Situacija ponašanja sistema u slučaju sinhronizacije po brzini je prikazana na slici 6.



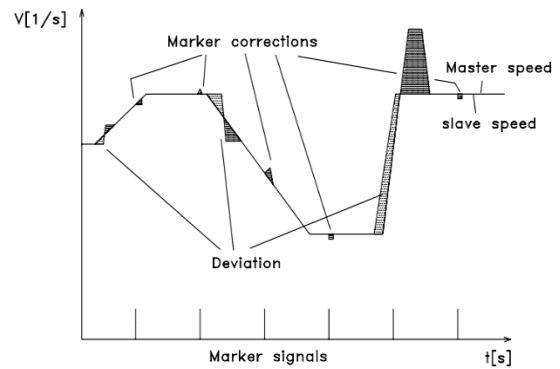
Slika 6. Sinhronizacija po brzini [5]

Sinhronizacija po položaju predstavlja kontrolu položaja u zatvorenoj povratnoj sprezi. U ovoj situaciji položaj nadređenog sistema pomnožen prenosnim odnosom predstavlja zadati položaj podređenog *slave* pretvarača. Kada se pozicija *master* sistema dostigne, podređeni *slave* sistem se dovodi u identičan položaj usklađen sa nadređenim sistemom. Poželjno je da *slave* jedinica bude brža i dinamičnija od *master* sistema kako bi sinhronizacija bila što tačnija na velikim brzinama, ubrzanjima i usporanjima. Situacija pozicione kontrole je prikazana na slici 7.



Slika 7. Sinhronizacija po položaju [5]

Sinhronizacija markerima predstavlja proširenu sinhronizaciju položaja gde se radi poravnanja *slave* markera sa *master* markerom vrši dodatna korekcija položaja. Signali glavnog i njemu podređenog markera mogu da budu i nulti impulsi enkodera ili neki spoljni senzori (povezani na digitalne ulaze). Pored toga što se mogu podesiti funkcije kao kod sinhronizacije položaja, može se podesiti i opseg markera.



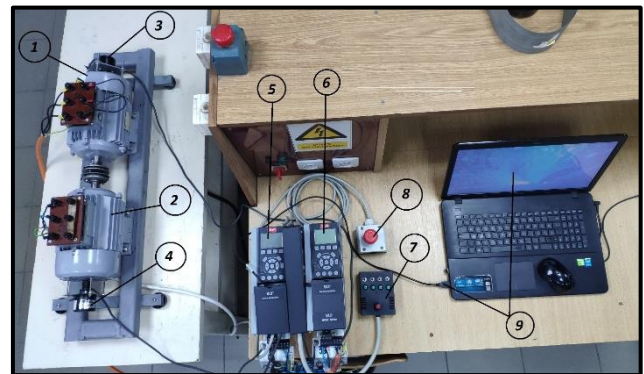
Slika 8. Sinhronizacija markerima [5]

4. LABORATORIJSKA IZVEDBA EKSPERIMENTATA

4.1 Opis eksperimentalne postavke

Eksperimentalna postavka na kome je izvršeno ispitivanje mogućnosti pozicione kontrole ispitivanog rešenja je prikazana na slici 9 gde je redom označeno [6]:

1. Četvoropolna kavezna asinhrona mašina nazivne snage 0,75 kW – Master mašina,
2. Četvoropolna kavezna asinhrona mašina nazivne snage 0,75 kW – Slave mašina,
3. Master inkrementalni enkoder 3600 imp/obr,
4. Slave inkrementalni enkoder 3600 imp/obr,
5. Frekventni pretvarač Danfoss FC-302 – Slave,
6. Frekventni pretvarač 2 Danfoss FC-302 – Master,
7. Komandni tasteri i preklopke,
8. Sigurnosni taster,
9. Računar sa instalisanim MCT10 softverom [8].



Slika 9. Eksperimentalna postavka

4.2. Primer 1 – Horizontalno klatno

Na slici 10 je prikazana eksperimentalna postavka kojom je realizovan ovaj eksperiment. Eksperimentom se proverava održavanje položaja vratila pri različitim opterećenjima.

Zamisao je da se za definisani položaj vratila koju kontroliše master mašina bude praćen po pozicionom mehanizmu od strane slave mašine. Poremećaj u ovom slučaju nastaje povećanjem opterećenja na vratilu slave mašine. Kako bi se ponašanje vratila moglo vizuelno bolje uočiti, na vratilo je pričvršćena poluga koja se usled ponašanja regulacionih mehanizama kontrole položaja ponašala na sličan način kako se ponaša klatno (otuda je vežba i dobila naziv).

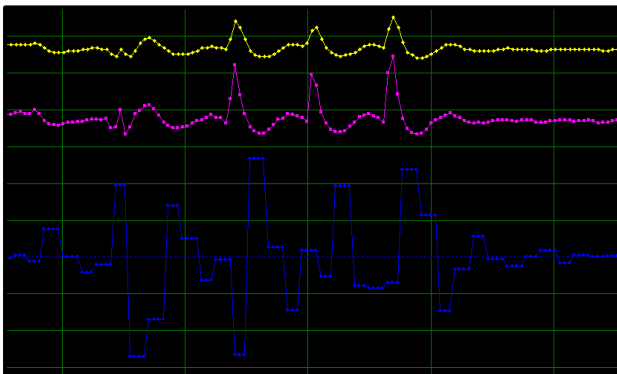


Slika 10. Izgled postavke ocilarnog klatna

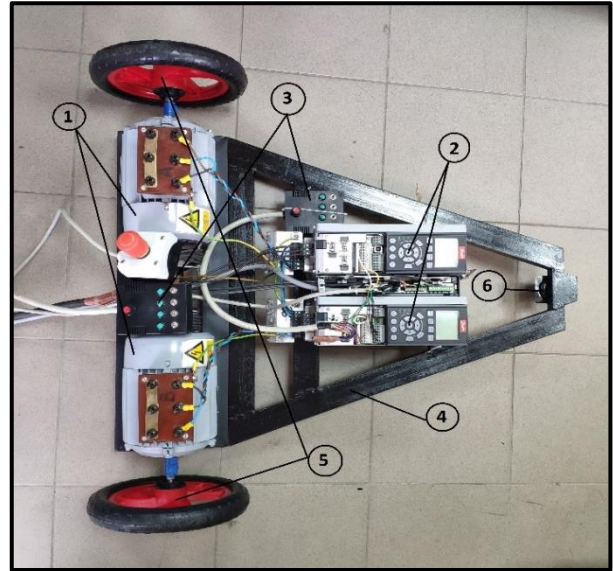
Na slici 11 je prikazan tipičan uočeni odziv sistema. Na slici su efektivna vrednost napona i efektivna vrednost struje prikazani ljubičastom u žutom bojom respektivno, dok je plavom bojom prikazana pozicija *slave* mašine. Slika daje situaciju ponašanja snimanih parametara u trenutku naglog opterećenja klatna. Uočava se ponašanja *slave* mašine koja pokušava mehanizmima automatske kontrole da se pozicionira i poravna svoju poziciju sa vratilom *master* mašine. Vidljivo je očekivano ponašanje celokupnog sistema koji nakon dovođenja poremećaja u vidu povećanja opterećenja klatna reaguje korekcionim merama kojima pokušava svesti grešku pozicije na nulu. Fizički, pozicija *slave* vratila se nekoliko puta pokreće gore – dole sve dok se ponovo ne uspostavi nulta greška odnosno dok se pozicija vratila *slave* mašine ne poravna sa pozicijom vratila *master* mašine. Na osnovu kretanja pozicije vratila *slave* mašine da se zaključiti da je odziv prigušeno oscilatoran. Treba napomenuti da prilikom izvođenja eksperimenta vratilo *master* jedinice nije pomerano ni u jednom smeru. Korišćeni regulator je PI tipa.

4.3. Primer 2 – Električna trokolica

Za realizaciju drugog eksperimenta je izabran sistem kod koga se vršilo pokretanje obe mašine, i *slave* i *master* jedinice. U tom smislu je osmišljena i realizovana postavka koja je prikazana na slici 12. Sadržina postavke je identična onoj iz eksperimenta 1.



Slika 11. Odzivi sistema – struja, napon i pozicija



Slika 12. Izgled postavke autića

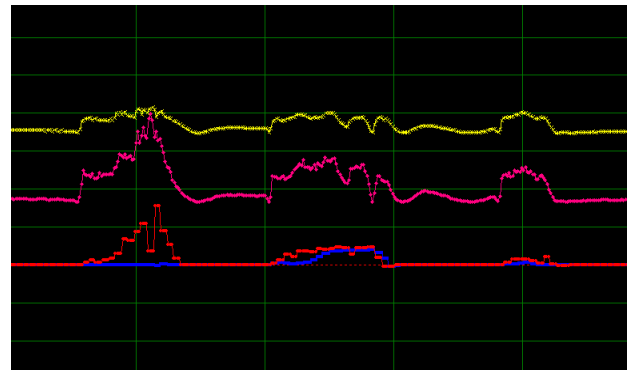
U ovom slučaju je iskorišćena kontrolni mehanizam praćenja brzine. Sistem se u praksi često naziva i imenom električno vratilo.

Na slici 13. je dat prikaz relevantnih veličina koje su praćenih tokom izvođenja jednog od eksperimenata.

Crvenim i plavim signalima su prikazane brzine *slave* i *master* mašine, respektivno. Signal roze boje predstavlja promenu efektivne vrednosti napona, dok žuta boja predstavlja signal efektivne vrednosti struje master jedinice.

Na slici se uočavaju tri segmenta.

Prvi segment na grafiku prikazuje situaciju u kojoj slave jedinici nije data komanda za praćenje brzine. Vidljivo je da i pored promene brzine master jedinice izostaje reakcija slave mašine. u sačinjavaju Slave i Master brzine koje su očevidno jednake, nakon čega sledi skretanje u jednu stranu. Drugi i treći segment prikazuju rezultate ponašanja sistema u slučaju kada je uključen mehanizam sinhronizacije po brzini. Vidljivo je očekivano ponašanje sistema po kome slave jedinica nakon nekog vremena dostiže brzinu master mašine što za rezultat ima pravolinijsko kretanje eksperimentalne postavke. Logično, povećanjem brzine dolazi do povećanja vrednosti kontra elektromotorne sile, a samim tim i vrednosti napona. Zapaža se i usklađena promena odziva struje što je posledica dinamične promene zahteva za momentom na vratilu mašine u toku kretanja.



Slika 13. Odzivi sistema – napon, struja, brzine

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je jedan od mogućih načina kako se danas u industriji rešavaju najkompleksniji zahtevi i to zahtevi regulisanja položaja pogonskog vratila. Prikazano je rešenje eminentnog i svetski priznatog proizvođača Danfoss.

Sprovedenim eksperimentima su pokazane dobre strane korišćenog rešenja ali su i uočene pojedini problemi koji mogu uneti probleme prilikom korišćenja ovakvih uređaja. Kao osnovni problem, tokom rada su prepoznata podešavanja korišćenih regulatora. Sprovedeni eksperimenti i realizovane eksperimentalne postavke predstavljaju dobru polaznu tačku za nastavljanje istraživanja u oblasti pozicione kontrole.

6. LITERATURA

- [1] Darko Marčetić: „Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2014.
- [2] Veran Vasić, Đura Oros, „Energetska elektronika u pogonu i industriji“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2012.
- [3] S. Vukosavić: „Digitalno upravljanje električnim pogonima“, Akademska Misao, Beograd, 2003.
- [4] „Design Guide FC 302 Automation Drive“, dostupno na: <https://www.galco.com> (pristupljeno u septembru 2020.)
- [5] „VLT MCO 305 Design Guide“, dostupno na: <http://files.danfoss.com> (pristupljeno u septembru 2020.)
- [6] D. Milićević, N. Vukajlović: „Energetska energetika u pogonu i industriji praktikum“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2019.
- [7] „Programing Guide Automation Drive FC 301/302“ dostupno na: <https://files.danfoss.com/download/Drives/MG33M02.pdf> (pristupljeno u septembru 2020.)
- [8] “VLT Motion Control MCO 305”, dostupno na: http://files.danfoss.com/download/Drives/doc_MG33K302.pdf (pristupljeno u septembru 2020.)

Kratka biografija:



Rade Jerkić rođen je u Zvorniku 1996. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2019.god.
kontakt: rade.jerkic@hotmail.com



Dragan Milićević rođen je u Tuzli 1977. god. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2014. god., a od 2019. god. je zvanju vanredni. Oblast interesovanja je energetska elektronika, regulisani elektromotorni pogoni i obnovljivi izvori električne energije.
Kontakt: draganmilicevicftn@gmail.com