



**RAZVOJ VEKTORSKI UPRAVLJANOG POGONA ASINHRONOG MOTORA
PRIMENOM MATLAB/SIMULINK AUTOKODING PROCEDURA**

**INDUCTION MACHINE DRIVE IFOC ALGORITHM DEVELOPMENT USING
MATLAB/SIMULINK AUTOCODING PROCEDURES**

Zoran Davidović, Dragan Milićević, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu prikazana je mogućnost korišćenja naprednih softverskih alata primenljivih u oblasti elektromotornih pogona. Praktična verifikacija je izvršena na primeru vektorskog upravljanja i na razvijenom prototipu trofaznog invertora. Model je razvijen korišćenjem MATLAB/Simulink paketa tako da je istovremeno postojala mogućnost i softverskih analiza koje su korisne u fazi projektovanja i testiranja sistema uz zadržavanje jednostavnog prelaska na stvarni sistem korišćenjem autokoding podrške. Kao osnovni doprinos rada se mogu prepoznati detaljni eksperimentalni rezultati kojim je dokazana ispravnost usvojenog pristupa u razvoju kontrole.

Ključne reči: vektorsko upravljanje, asinhroni motor, DSP, autokoding.

Abstract – The use of advanced software tools in the field of electric motor drives is presented in this paper. Verification is performed on the example of vector control and on the developed prototype of three-phase inverter. The model is developed using Matlab Simulink software in the aspect that at the same time there is possibility of software analysis that is convenient in the design and testing phase of the system, while maintaining a simple transition to the actual system using autocoding support. Detailed experimental results which prove the credibility of the adopted approach in the development of control, can be recognized as a primary contribution of this paper.

Keywords: Vector control, Asynchronous motor, DSP, autocoding.

1. UVOD

Upotreba asinhronih motora napajanih iz uređaja energetske elektronike i kontrolisanih po principima vektorskog upravljanja je u pogonima srednjih i niskih performansi postao industrijski standard. Razlozi za ovo su višestruki a pre svega se mogu prepoznati kao posledica prednosti same asinhronne mašine, ali i pitanja dobre efikasnosti, te pitanja dugogodišnjeg usavršavanja [1,2].

NAPOMENA:

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

Pomoću vektorskog upravljanja moguće je razdvojiti upravljanje momentom i fluksom asinhronog motora i na ovaj način učiti dinamičke karakteristike asinhronog motora značajno boljim i po performansama ih približiti karakteristikama motora jednosmerne struje.

Sam koncept vektorskog upravljanja može da se realizuje samo na brzim mikroprocesorima ili digitalnih signalnih procesora (DSP) [3,4]. Potrebno je obezbediti i napajanje sa strujno regulisanim naponskim invertorom kojim će se regulisati statorske struje koje će kasnije biti zadužene za kontrolu pogonskog momenta, a posredno i kontrolu brzine odnosno pozicije. Klasične metode programiranje pomenutih mikroprocesora odnosno DSP-a podrazumevaju osmišljavanje koda korišćenjem programskih jezika po tačno određenoj semantici i sintaksi. Najčešće su u upotrebi jezici C ili C++.

Iako je programiranje kontrolnih sistema korišćenjem programskih jezika danas najčešće primenjivana mogućnost, povećanjem procesorske snage kontrolnih sistema, danas se sve češće u upotrebi nalaze i naprednije programske strukture često bazirane na funkcionalnim ili blok dijagramima. Jedan od takvih načina programiranja je i autokoding procedura koji nudi MATLAB/Simulink softversko rešenje [5].

Realizacija vektorskog upravljanja trofaznim kaveznim asinhronim motorom je krajnji cilj izlaganja koje se ovde obrazlaže. Kontrolni algoritam je formiran korišćenjem MATLAB/Simulink softverskog rešenja, a potom je autokoding procesom „spušan“ u kontrolni sistem baziran na TMS320F28335 digitalni signalni procesor proizvođača Texas Instruments

2. STRUKTURA MODELA VEKTORSKOG UPRAVLJANJA

Realizovani algoritam vektorskog upravljanja koji je korišćen u radu je klasičan. U nastavku će samo ukratko biti opisan i to posredno kroz opis blok dijagrama realizovanog u MATLAB/Simulink softveru. Algoritam vektorskog upravljanja za cilj ima aktivnu kontrolu momenta na vratilu napajane mašine jer se uspešnom kontrolom momenta mogu kontrolisati i ostale veličine koje se kao kontrolisane najčešće i koriste, a to su pre svega brzine, a potom i pozicija.

Ideja vektorskog upravljanja je raspredanje upravljanja komponentom statorske struje koja je zadužena za ostvarivanje pobuđenosti mašine – Id komponenta, od komponente struje koja je zadužena za ostvarivanje i

kontrolu momenta mašine – I_q komponenta. Na ovaj način se kontrola momenta asinhrona mašina svodi na kontrolu koja se ima za nezavisno pobuđenu mašinu jednosmerne struje.

2.1. Osnovna struktura modela vektorskog upravljanja

Osnovna struktura modela koji je korišćen za realizaciju vektorskog upravljanja, a kasnije i prilikom izvršavanja procedure autokodiranja, je prikazana na slici 1. Na slici su prikazana tri podbloka koji predstavljaju glavne delove ovog modela, neophodni za ostvarivanje ovog načina upravljanja. Blok pod imenom „PWM ISR” predstavlja deo modela u kome se nalaze glavni delovi potrebni za ostvarivanje vektorskog upravljanja. Pod pojmom „glavni delovi” podrazumevaju se „IFOC” blok, regulatori za obe struje (oba regulatora se sastoje od proporcionalnog i integralnog dejstva), te blokovi pomoću kojih se vrše odgovarajuće transformacije.

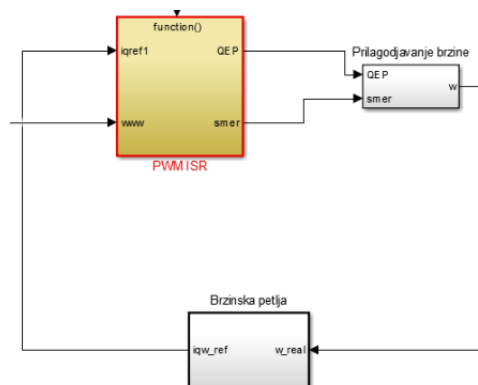
Podblok „Prilagođavanje brzine” služi kao što mu i ime kaže za prilagođavanje signala brzine odgovarajućoj petlji u kojoj se taj signal koristi. Blok radi sa dva signala koji se dobijaju iz prethodno pomenutog glavnog podbloka sa slike 1. Ovi signali se uzimaju iz bloka „eQEP” koji služi za povezivanje enkodera i rad sa signalima koje enkoder može da pruži. Sam podblok sadrži i filter prvog reda pomoću kojeg se filtrira signal na samom izlasku iz bloka. Upotrebom filtera smanjuje se propusni opseg modela, odnosno utiče se na brzina odziva samog modela pa se preporučuje da se upotreba istog izbegava kada je god to moguće.

Poslednji podblok na slici 1. je „Brzinska petlja” u kom se vrši regulacija brzine mašine, ali i zadaje željena vrednost brzine obrtanja motora. Pomenuta željena vrednost brzine obrtanja motora se upoređuje sa stvarnom brzinom motora, a potom se razlika ova dva signala dovodi u „PI” regulator brzine. Vrednost signala na izlazu regulatora se limitira na vrednost koje odgovaraju motoru sa kojim se upravlja. Ovaj blok generiše I_q struju kojom se uz I_d struju koja je postavljena na reprezentativne pobude mašine generiše obrtni moment potreban za kontrolu i održavanje željene brzine obrtanja. Postaje jasno da je mašina, u ovom slučaju kontrolisana u brzinskom režimu rada. Signal na izlazu ovog bloka se dalje šalje u blok „PWM ISR”.

2.2. Struktura podbloka „PWM ISR”

Glavni i najbitniji deo modela se nalazi u podbloku „PWM ISR” čija je struktura prikazana na slici 2. Blok se izvršava u odgovarajućim ekvidistantnim vremenskim intervalima definisanim prekidačkom frekvencijom impulsno širinske modulacije (eng. PWM- Pulse Width Modulation).

Struje napajane mašine se nakon merenja LEM strujnim sondama dodatno prilagođavaju, skaliraju i koriguju spram ustanovljenog ofseta. Signali struja se zatim odgovarajućim transformacijama transformišu u dq domen u kojem bivaju svedena na svoja dva jednosmerne reprezentata, već pominjane I_d i I_q komponente.

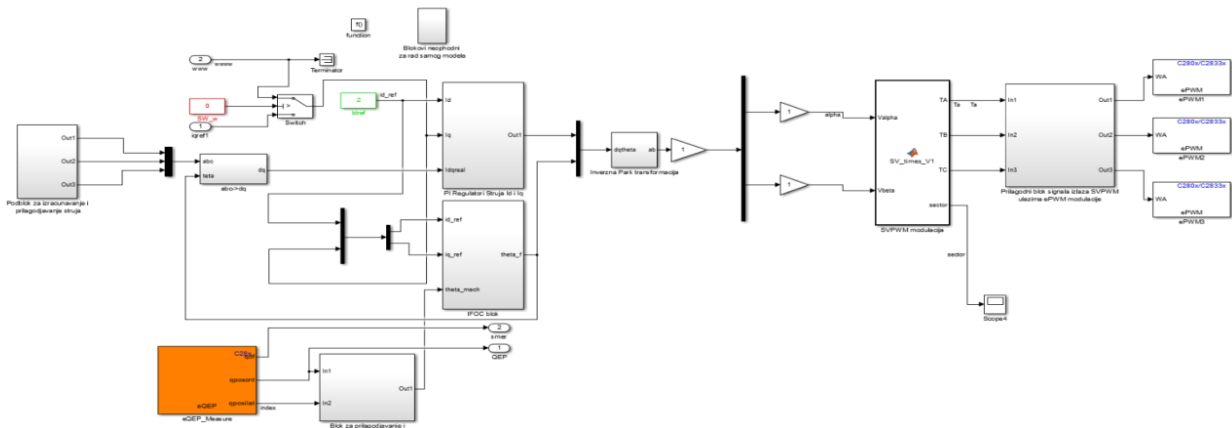


Slika 1 Osnovna struktura modela vektorskog upravljanja.

Regulacija struja se ostvaruje klasičnim PI regulatorima i sastoje se od proporcionalnog i integralnog dejstva i dela koji sprečava efekat „namotavanja” regulatora (eng. anti wind-up). Problem namotavanja se rešava jednostavnom logikom ostvarenom u modelu koja prepoznaje rad regulatora u limitu pri čemu isključuje integralno dejstvo kako bi sprečilo namotavanje. Već je pomenuto da se strujom I_d reguliše fluks motora, a kako je izabrano da se vektorsko upravljanje realizuje samo u prvoj zoni regulacije vrednost I_d struje se drži na konstantnoj, nominalnoj vrednosti koja obezbeđuje nominalnu pobudu kontrolisane mašine. Dakle, struja I_d se zadaje preko „Constant” bloka. Za razliku od nje struja I_q se dobija iz brzinske petlje na izlazu samog regulatora brzine što je informacija koja kazuje da je primenjen tzv. princip kaskadne kontrole. Ova vrednost struje definiše moment koji ostvaruje motor kojim se upravlja, a samim tim pomoću nje se ukoliko se vrednost I_d struje drži na konstantnoj vrednosti relativno lako može kontrolisati brzina motora.

Kako bi se ostvarila vektorska kontrola i kako bi se moglo upravljati fluksom motora i momentom koji motor razvija odvojeno potrebno je vektor struje postaviti u tačno određen položaj. Potrebno je pronaći tačan položaj rotorskog fluksa motora. Do te informacije se može doći na dva načina: direktno i indirektno. Model koji se ovde pojašnjava ima implementiran indirektni način (IFOC - eng. Indirect Field Oriented Control). Blok „IFOC blok” može se smatrati „srcem” modela jer on daje informaciju koja omogućava da se fluksom i momentom motora upravlja odvojeno odnosno raspregnuto. Blok koristi signale željene komponente struje i informaciju o stvarnoj poziciji vratila motora koja se dobija iz „eQEP” bloka. Potreban parametar za uspešnu realizaciju je vremenska konstanta rotora „ T_r ” čija vrednost je upisana u skripti i koja mora biti što preciznije izračunata odnosno izmerena (naravno na mašini koja se koristi u eksperimentu ili u svrhu simulacija) radi uspešnog rada modela.

Na osnovu informacija o vremenskoj konstanti i željenim strujama vrši se procena učestanosti klizanja i na osnovu nje se vrši proračun novog ugla klizanja. Dobijena vrednost ugla klizanja se sabira sa uglom rotora i dobija se vrednost ugla potrebna za pozicioniranje vektora struje. Informacija o ovom uglu se šalje u blokove u kojima se vrši Parkova, kao i inverzna Parkova transformacija.



Slika 2. Struktura podbloka „PWM ISR“.

Vrednosti signala koje se dobijaju na izlazu iz podbloka u kojem se nalaze regulatori struje, a koji predstavljaju potrebne vrednosti I_d i I_q struje potrebne da se ostvari željeni režim rada se dalje transformišu inverznom Parkovom transformacijom kako bi se dobile vrednosti upravljačkih signala odnosno faktora ispunje grana invertora koji napaja mašinu.

Pre uvođenja u blok „ePWM“ upravljački signali se dodatno skaliraju kako bi bili prilagođeni vrednostima koje zahteva konkretan PWM modul.

3. EKSPERIMENT

3.1 Ekperimentalna postavka

Za realizaciju eksperimenta je korišćena postavka prikazana na slici 3.

Ekperimentalna postavka je prototip invertora koji je realizovan na Katedri za energetsku elektroniku i pretvarače. Sastoji se od trofaznog IGBT invertora namenjenog za napone do 1200 V i struje do 25 A. U slučaju ovog eksperimenta inverter je napajan iz jednokvadrantnog stabilizovanog izvora jednosmernog napona 116 V i maksimalne izlazne struje 3 A.

Algoritam kontrole koji je razvijen u Matlab/Simulink okruženju „spušan“ je autokodirajućom procedurom u razvojni sistem baziran na TMS320F28335 digitalnom signalnom procesoru proizvođača Texas Instruments.



Slika 3. Ekperimentalna postavka

3.2 Rezultati

U nastavku rada će biti dati rezultati sprovedenih ogleda. Svi rezultati se odnose na situaciju koja je usledila nakon usklađivanja svih neophodnih parametara vektorskog upravljanja počevši od usklađivanja merenja struja, merenja brzine, preko merenja parametara vremenske konstante T_r , kao i samih regulatora, kako strujnih tako i brzinskih.

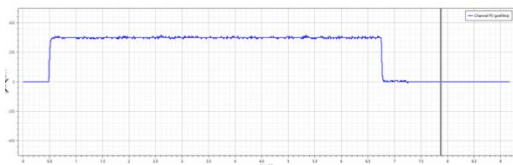
Prikazivanje će započeti odzivom mašine na zadatu referencu od 300 obr/min. Ovaj slučaj prikazan je na slici 4. Uvidom u sliku 4 primećuje se da se na vratilu vektorski upravljane mašine brzina uspostavlja gotovo trenutno (vreme je manje 0,05 s), da nema preskoka što govori o dobroj podešenosti regulatora i opštoj ispravnosti algoritma kontrole. U signalu brzine se primećuje šum što je posledica izostavljanja filtera na ovom signalu. Upravo ovim se postigao ovako veliki propusni opseg sistema. Prilikom vraćanja referentne vrednosti na nulu, odziv je takođe gotovo momentalan i nulta brzina se postiže istom brzinom kao i prilikom zaleta motora. Zaključeno je i to da je šum koji se javlja u signalu brzine direktna posledica male rezolucije korišćenog enkodera.

Kao dokaz raspregnutog upravljanja, slikom 5 se daje prikaz promene I_d i I_q komponente za razmatrani slučaj. Vidljivo je da ne postoji nikakav uticaj jedne komponente na drugu. Čak i u trenucima kada dolazi do nagle promene I_q komponente kao reakciju na izmenu vrednosti koju diktira brzinski regulator, I_d komponenta ostaje nepromenjena. Kada je referentna brzina na vrednosti 0 obr/min, q komponenta struje je bliska nula, dok d komponenta je i dalje na istoj vrednosti potrebnoj za održavanje nominalnog fluksa motora.

Ukoliko bi se vratilo pomerilo iz ravnotežnog položaja pri nultoj brzini za relativno mali ugao primetilo bi se da će kontrola, nakon prestanka opterećenja, vratiti vratilo u početni položaj.

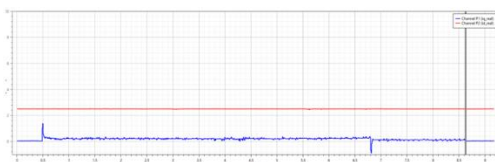
Ovo se javlja kao posledica integralnog dejstva brzinskog regulatora. Naime kako je referentna brzina na nultoj vrednosti, a opterećenjem vratila se postiže vrednost koja nije nula, signal greške sa kojim radi regulator brzine, a koji je razlika ova dva signala više nije nula, pa integralno dejstvo regulatora počinje sabirati grešku i kada se

prestane delovati silom na vratilo zbog greške koja je nagomilana do tog momenta vratilo se obrće u suprotnom smeru dok se sabrana vrednost u integralnom dejstvu ne oduzme. Ovaj efekat je moguć u opsegu koji dozvoljava limiter na izlazu regulatora.



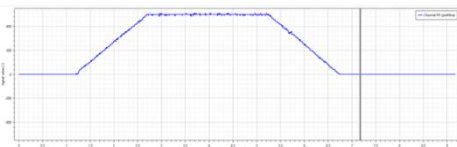
Slika 4 Prikaz brzine prilikom zaleta i zaustavljanja.

Sa slike 5 je takođe vidljiva izražena promena struje I_q u trenutku promene referentne vrednosti brzine. U obliku struje je primetan značajan impuls kao rezultat rada regulatora ali i podešenih limita, kao i mogućnosti koje pruža izvor i inverter. Kada nenulta vrednost reference brzine iščezne, struja I_q pada na vrednost dosta blisku nuli usled činjenice da sam motor nije opterećen u vršenom ogledu. Prilikom zaustavljanja javlja se negativan impuls ove struje i nakon toga vrednost ove struje će postati bliska nula.



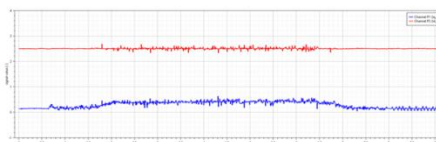
Slika 5 Izgled I_d i I_q komponente struje prilikom zaleta i zaustavljanja motora.

U narednom eksperimentu je izvršeno testiranje realnije situacije u kojoj kontrolni sistem zadaje željenu referentnu vrednost brzine po rampi, a ne trenutno. Ovim je ispitana i ispravnost rada bloka „SOFT START”. Podešavanjem parametara u samom bloku moguće je ostvariti porast brzine po rampi određenog nagiba. Takav zalet je prikazan na slici 6. Na grafiku se vidi da se željena brzina dostiže za 1.4 s. Zaustavljanje se takođe izvršava po rampi koja ima isti nagib kao i ona koja se ostvaruje prilikom zaleta.



Slika 6 Zalet i zaustavljanje motora po rampi.

Kao i u prethodnom slučaju tako i ovde I_d komponenta struje ne menja svoju vrednost. Za razliku od nje komponenta struje I_q se menja tokom procesa zaletanja i zaustavljanja. Grafik na slici 7 prikazuje ove dve struje i na njemu se jasno vidi promena I_q struje. Može se uočiti lagani rast I_q struje prilikom samog zaleta, a kada se zalet završi ova struja dobija vrednost koja je potrebna da se razvije momenat koji će savladati gubitke u motoru. Prilikom zaustavljanja motora primećuje se takođe smanjenje struje I_q . Smanjivanjem ove struje opada i razvijeni momenat i samim tim i brzina motora opada.



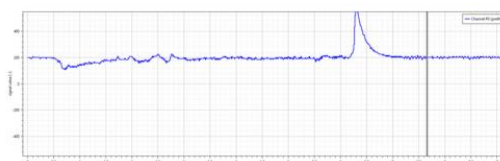
Slika 7 Prikaz I_d i I_q struje prilikom zaleta i zaustavljanja po rampi.

Ukoliko se motoru zada brzina obrtanja od 200 obr/min i zatim se na vratilo motora počne delovati silom određenog intenziteta primetiće se kako regulacija implementirana u model pokušava da održi brzinu na zadatoj vrednosti. Vrednost struje I_q će porasti kako bi porastao momenat koji razvija motor i kako bi isti bio u mogućnosti da savlada opterećenje koje mu je nametnuto i pri tome održi zadatu brzinu. Slika 8 prikazuje brzinu prilikom opterećivanja motora i nakon prestanka delovanja opterećenja na motor. Opterećenje na samom motoru se pojavljuje u trenutku kada se primećuje propad u brzini.

Regulacija uočava tu promenu tako što signal greške više nije nula. Reakcija sistema upravljanja je takva da se vrednost I_q komponente struje povećava kako bi se nadomestio propad brzine. Sa svakom promenom opterećenja koja se pojavljuje na vratilu desiće se i relativna promena brzine koju će regulator nastojati da kompenzuje odnosno da zadrži jednakost stvarne i zadate brzine.

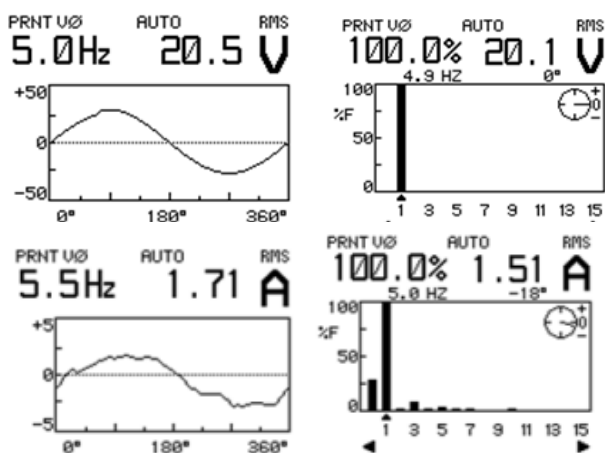
Kada se na vratilo deluje konstantnim opterećenjem, što se dešava na grafiku posle treće sekunde brzina je konstantna i ima željenu vrednost. Motor se u jednom trenutku naglo rasterećuje i kao posledica takvog dejstva, u prvom trenutku brzina naglo raste. Sada regulator brzine radi sa negativnom greškom i na svom izlazu će dati vrednost I_q komponente struje koja je manja od one koja se trenutno razvija.

Motor će takođe naglo usporiti i prilagoditi brzinu onoj koja se želi. Ovaj grafik jasno pokazuje da je regulacija optimalno podešena.



Slika 8 Prikaz brzine prilikom opterećenja motora.

Slika 9 prikazuje izgled napona i struje kao i njihov harmonijski spektar u trenutku kada se mašina obrtala približno desetinom nazivne brzine. Primećuje se da je napon čak i na ovako niskim frekvencijama sinusnog oblika, dok harmonijski spektar ne očitava postojanje niti jednog višeg harmonika. Kod signala struje se primećuje postojanje viših harmonika što se delimično objašnjava neusklađenošću strujnog opsega sonde korišćenog uređaja i veličine struje koje su merene.



Slika 9 Izgled napona i struje i njihov harmonijski spektar pri malim frekvencijama.

4. ZAKLJUČAK

Rad prikazuje mogućnosti korišćenja naprednih sistema kontrole i upravljanja u oblasti elektromotornih pogona. Na principima autokoding programiranja i na primeru vektorski upravljano elektromotornog pogona baziranog na asinhronom trofaznom kaveznom motoru pokazano je kako se uz pomoć rešenja koje pruža MATLAB/Simulink na relativno jednostavan način mogu realizovati čak i kompleksni sistemi kontrole i upravljanja.

Prikazanim rezultatima su dati najznačajniji rezultati do kojih se došlo. Kao poseban značaj rada ističe se da je kontrola urađena na prototipu sistema koji je u celosti realizovan na Katedri za energetska elektroniku i pretvarače Fakulteta tehničkih nauka.

5. LITERATURA

- [1] Darko P. Marčetić, „Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima“, FTN izdavaštvo, Novi Sad 2014.
- [2] Veran Vasić, Đura Oros, „Energetska elektronika u pogonu i industriji“, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2012.
- [3] „TMS320x280x, 2801x, 2804x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module – Reference guide“, internet sajt <https://www.ti.com>, pristupljeno u februaru 2021.
- [4] Andrzej M. Trzynadlowski, “The field orientation principle in control of induction motors”, University of Nevada, Reno, 1993.
- [5] Tiffany Liang, „Automatic Code Generation for Embedded Control Systems“, www.mathworks.com pristupljeno u martu 2021.

Kratka biografija:



Zoran Davidović rođen je u Novom Sadu 1994. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine, odbranio je 2019.



Dragan Milićević rođen je 1977. god. u Tuzli. U zvanje vanrednog profesora je izabran 2019. god. Oblast interesovanja su višefazne mašine, elektromotorni pogoni i obnovljivi izvori električne energije.