

**ELEKTRONSKA KONTROLNA JEDINICA (ECU) ELEKTRIČNOG MOTORA  
AUTOMOBILA****ELECTRONIC CONTROL UNIT (ECU) OF THE CAR ELECTRIC MOTOR**Aleksa Stojković, Vlado Porobić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu predstavljeni su razvoj električnog motora automobila i trofaznog invertora na Typhoon HIL emulatore i faze testiranja upravljačkog algoritma indirektno vektorsko upravljanje implementiranog na elektronskoj kontrolnoj jedinici. Primijenjen je koncept Finite state machine radi prevođenja električnog motora iz jednog radnog režima u drugi.

**Ključne reči:** HIL emulator, DSP, električni motor

**Abstract** – In this paper the development of the car electric motor and three-phase inverter with Typhoon HIL emulator are represented with test phases of the IFOC algorithm which is implemented on ECU. Also, the Finite state machine modeling method is used to change the operational points of the electric motor.

**Keywords:** HIL emulator, DSP, electric motor

**1. UVOD**

Zadatak elektronske kontrolne jedinice električnog motora automobila jeste da obezbedi njegov optimalan rad. Potrebno je da u odgovarajućim vremenskim trenucima dobija analogne i digitalne merne signale neophodne za izvršavanje upravljačkog algoritma, da te signale na odgovarajući način procesira i da na svom izlazu generiše upravljačke signale ka energetskom pretvaraču zahvaljujući kojima će sve veličine od interesa imati željene vrednosti.

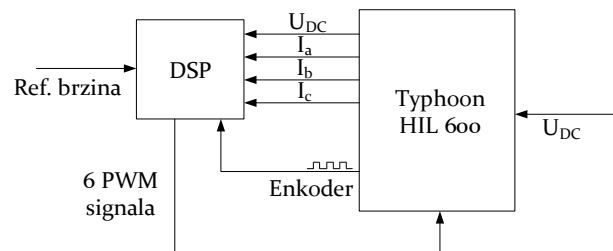
Ulogu električnog motora i energetskog pretvarača u ovom radu obavlja HIL emulator, dok ulogu ECU obavlja TI Docking stanica zajedno sa TI DSP kontrolnom karticom.

**2. HIL MODEL**

Typhoon HIL uređaj u ovom radu ima zadatak simulacije rada energetskog dela sistema, odnosno trofaznog kaveznog asinhronog motora i trofaznog invertora. TI Docking stanica je ploča uz pomoć koje se obezbeđuje razmena signala između HIL-a i DSP-a. Na njoj se nalazi i odgovarajuće mesto za postavljanje TI DSP kontrolne kartice, korišćena je TMDSCNCD28335 kartica. Slika 1. prikazuje koji se signali razmenjuju između HIL-a i DSP-a, na kojima se nalaze model energetskog dela i upravljački algoritam, respektivno. Takođe, može se videti za zadavanje kojih veličina je zadužen korisnik.

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor bio dr Vlado Porobić, vanr. prof.**

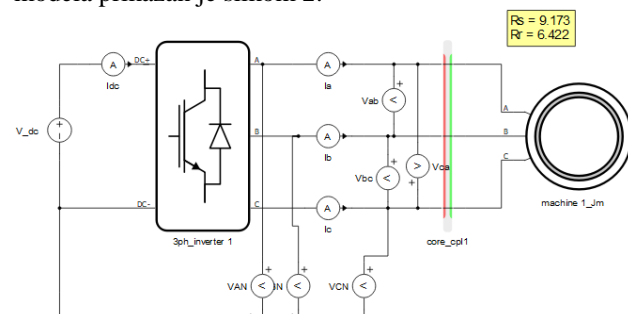


Slika 1. Prikaz razmene signala između DSP-a i HIL-a

Za pravljenje modela i posmatranje promena veličina od interesa upotrebljavan je softver Typhoon HIL Control Center V2020.2, najnovija verzija u trenutku izrade rada.

**2.1. Schematic Editor**

Schematic Editor prozor u okviru pomenutog softvera služi za pravljenje energetskog dela modela. Izgled modela prikazan je slikom 2.



Slika 2. Model trofaznog invertora i trofaznog kaveznog asinhronog motora u Schematic Editor-u

U blok trofaznog kaveznog asinhronog motora su uneti odgovarajući električni i mehanički parametri [1]. U pitanju je motor nominalne snage 1,1 kW. Za merenje položaja rotora odabran je inkrementalni enkoder rezolucije 3600 impulsa/obrtaju.

Za trofazni inverter izabrano je upravljanje prekidačima preko digitalnih ulaza. U ovom bloku je pre svega bilo potrebno podesiti na koji digitalni ulaz HIL-a se dovode signali sa ePWM modula DSP-a. Njihov izbor nije proizvoljan i izvršen je spram [2]. Za logiku upravljanja određena je active high logika, koja podrazumeva da će prekidači biti u provodnom stanju u slučaju logičke jedinice, a otvoreni u slučaju logičke nule.

**2.2. HIL SCADA**

Nakon kompajliranja modela na HIL emulator otvara se prozor HIL SCADA u kojem je omogućeno zadavanje željenih ulaznih veličina, poput zadavanja napona DC kola ili momenta opterećenja. Takođe, u ovom prozoru se

određuje na koje analogne izlaze HIL-a će se dovoditi merene struje i napon DC kola, kao i na koje digitalne izlaze će se dovoditi signali A, B i INDEX sa inkrementalnog enkodera. Izbor analognih i digitalnih izlaza je takođe izvršen spram [2].

### 3. DSP MODULI

Za koncept upravljanja električnim motorom automobila izabrano je indirektno vektorsko upravljanje (IFOC). Koncept indirektnog vektorskog upravljanja i način njegovog razvoja u MATLAB-ovom alatu Simulink objašnjen je u [3], čime je programiranje DSP-a moguće realizovati automatskom generacijom koda (Automatic Code Generation) putem razvoja softvera baziranog na modelovanju (Model Based Development).

Moduli DSP-a koje je neophodno koristiti prilikom razvoja indirektnog vektorskog upravljanja su: ADC modul, ePWM (Enhanced Pulse Width Modulator) moduli i eQEP (Enhanced Quadrature Encoder Pulse) modul. Njihova uloga jeste prihvatanje i procesiranje signala koje ka DSP-u šalje HIL emulator, kao i generisanje željenih 6 PWM signala kojima se upravlja prekidačima trofaznog invertora prikazanog na slici 2. Njihova odgovarajuća inicijalizacija izvršena je preko blokova u Simulink modelu i to je urađeno uporedo čitanjem kako uputstva korišćenog DSP-a [4], tako i uputstva korišćenog HIL emulatora [2].

### 4. FAZE TESTIRANJA UPRAVLJAČKOG ALGORITMA

Testiranje upravljačkog algoritma je izvršeno tako što su u svakoj od faza uključivani odgovarajući blokovi i podsistemi Simulink modela [3] i proveravani dobijeni odzivi veličina od interesa. Za praćenje promena varijabli definisanih u C kodu, dobijenom nakon automatske generacije koda iz Simulink modela, korišćen je softver PERUN PowerDesk (PPD). Jednom istestiran softverski modul na odgovarajući način se podrazumeva da radi i njega u narednim fazama nije potrebno dalje testirati.

Razvoj i testiranje upravljačkog algoritma se može sastojati iz faza predloženih u [5], gde ih je predloženo pet. Međutim, u ovom radu su zbog načina implementacije upravljačkog algoritma, kao i razvoja modela na HIL emulatoru, primenjene četiri faze. Pored toga, uvedena je i faza 0 koja podrazumeva merenja analognih veličina, tri linijske struje i napona DC kola.

#### 4.1. Faza 0

Faza 0 ima zadatak da vrednosti linijskih struja i napona DC kola očitanih u PPD softveru odgovaraju očitanim vrednostima u HIL SCADA prozoru, odnosno njihovim stvarnim vrednostima. Za ispitivanje faze 0 dovoljno je upotrebljavati samo blok ADC modula u Simulink-u i logiku kojom se vrši korekcija izmerene veličine i njeno pretvaranje u sistem relativnih vrednosti.

#### 4.2. Faza 1

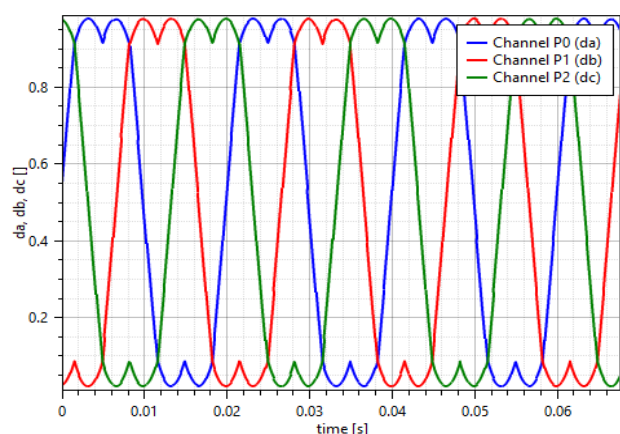
Zadatak prve faze razvoja i testiranja upravljačkog algoritma ogleda se pre svega u testiranju ispravnosti rada SVPWM generatora čija je uloga da izračuna vremena vođenja prekidača trofaznog invertora, odnosno faktore is pune, gde se kao rezultat dobija generisanje željenog vektora napona na motoru [6]. Takođe, u okviru ove faze

testiran je i rad IPARK i ePWM modula. U fazi 1, kao i fazi 2, koriste se i moduli RAMPCTRL i RAMPGEN koji služe da se za zadatu referencu brzine omogući menjanje po rampi ugla dq koordinatnog sistema.

U ovoj fazi se kao reference zadaju tri varijable: napon po d osi ( $V_{dtesting}$ ), napon po q osi ( $V_{qtesting}$ ) i referentna brzina (SpeedRef), odnosno frekvencija (Freq). Takođe, u ovako koncipiranom sistemu zadaje se i napon DC kola iz opcije Sources u HIL SCADA prozoru. U ovom radu je ta vrednost konstantna i iznosi  $U_{dc} = 563 V$  i ova vrednost se kao i sve ostale merene veličine pretvara u relativne vrednosti.

Ispravnost rada SVGEN\_AB modula potvrđena je slikom 3., sa koje se može videti da su faktori is pune međusobno fazno pomereni za  $120^\circ$  i da je perioda svakog signala 20ms. Prikazani odzivi faktora is pune za sve tri grane invertora dobijeni su za sledeći set varijabli:

- $V_{dtesting} = 0,41396 r.j.$
- $V_{qtesting} = 0 r.j.$
- $SpeedRef = 1500 o/min (Freq = 50 Hz)$



Slika 3. Faktori is pune tri grane trofaznog invertora

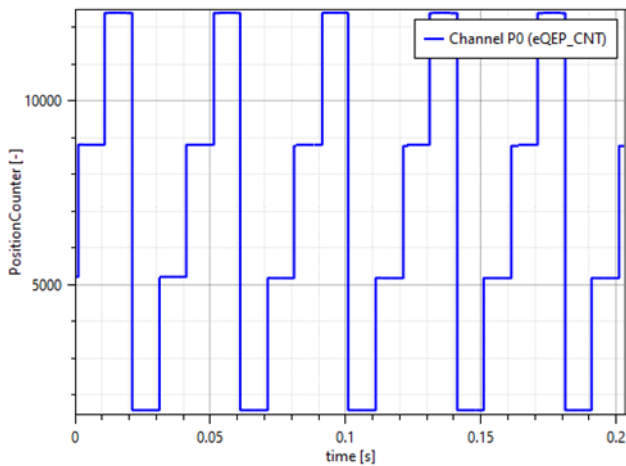
Pravilan rad IPARK modula potvrđen je pravilnim radom SVGEN\_AB modula, s obzirom da su ulazne veličine za ovaj modul izlazne veličine modula inverzne Park transformacije. Dobra podešenost blokova ePWM modula potvrđena je dobijenim faznim naponima sinusnog talasnog oblika odgovarajuće amplitude i međusobne fazne pomerenosti.

#### 4.3. Faza 2

Faza 2 testira rad CLARKE; PARK i eQEP modula. Referentne veličine koje se zadaju u ovoj fazi su iste kao i u prethodnoj fazi.

Podsistem u kojem je implementirana Clarke transformacija je potvrđen odgovarajućim odzivima  $i_\alpha$  i  $i_\beta$ , dok je zaključak o pravilnom radu podsistema Park transformacije izveden na osnovu odgovarajućih odziva svih ulaznih veličina u ovaj podsistem.

Ispravna podešenost eQEP modula prikazana je slikom 4. To je situacija kada je trofazni kavezni asinhroni motor u praznom hodu. Smer obrtanja je u obrnutom smeru od kazaljke na časovniku, pozitivno definisan smer, što se vidi na osnovu inkrementovanja vrednosti brojačkog registra. Pravilan rad je potvrđen i za obrtanje u suprotnom smeru, kada se vrednost upisana u brojački registar dekrementuje.



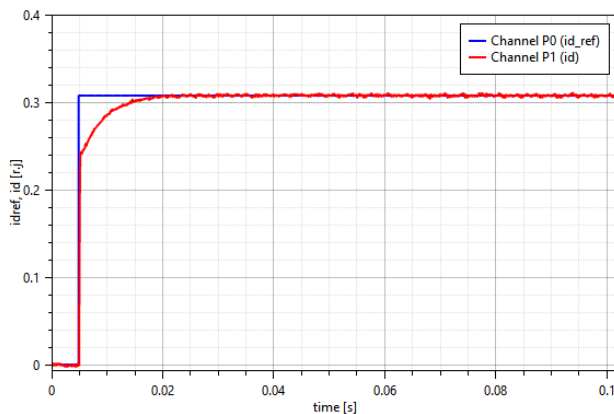
Slika 4. Brojački registar eQEP periferije

#### 4.4. Faza 3

Ova faza obuhvata testiranje strujnih regulatora po d i q osi, kao i podsistema u kojem je realizovan algoritam za indirektnu procenu položaja vektora fluksa rotora (CUR\_MOD). Reference koje se zadaju u fazi 3 jesu  $I_dRef$  i  $I_qRef$ .

U cilju je pre svega podesiti parametre PI regulatora koji su identični za oba strujna regulatora. Oni se određuju po Dahlin-ovom postupku s obzirom da se želi aperiodičan odziv struje. Dahlinov postupak za određivanje parametara regulatora objašnjen je u [7], te su oni spram toga i podešeni.

Slika 5. prikazuje odziv struje  $i_d$  na zadatu odskočnu referencu. Može se videti da struja ima aperiodičan odziv i željenu dinamiku dostizanja zadate referentne vrednosti.



Slika 5. Odziv struje  $i_d$  na zadatu odskočnu referencu

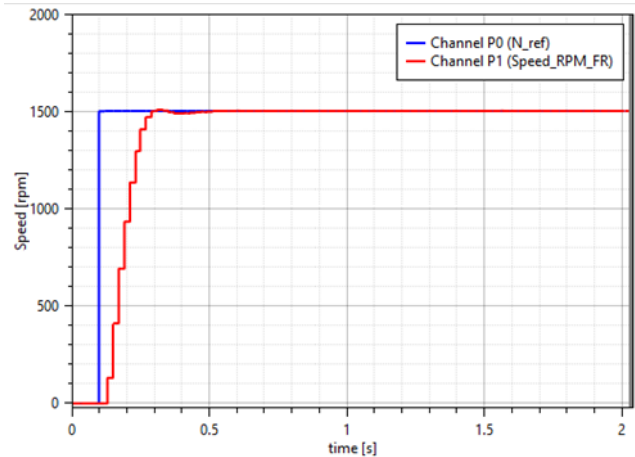
Potvrđen je i željeni odziv struje  $i_q$ , čime je zaključeno da su parametri strujnih regulatora dobro podešeni. Ispravnost CUR\_MOD potvrđena je očekivanom promenom ugla dq koordinatnog sistema.

#### 4.5. Faza 4

Poslednja faza razvoja upravljačkog algoritma ogleda se u zatvaranju povratne sprege po brzini. U ovoj fazi se uvodi brzinski regulator (PI  $\omega$ ) čiji je zadatak da otkloni grešku između zadate i stvarne brzine obrtanja motora. Kao referentne veličine u ovoj fazi se zadaju  $I_dRef$  i  $SpeedRef$ .

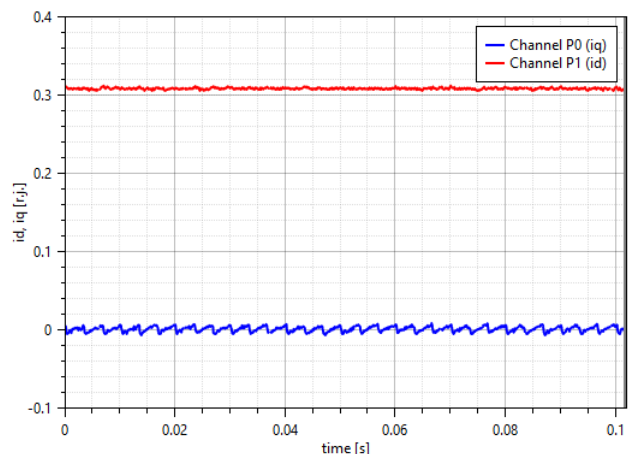
Kao i u slučaju odziva struja i kod odziva brzine želi se aperiodičan odziv. Parametri brzinskog regulatora su podešeni na način kojim se dolazi do optimalnih vrednosti parametara objašnjen u [3]. Međutim, nizom eksperimenata je utvrđeno da se najbolji odziv brzine dobija za korigovane vrednosti parametara koje iznose:  $K_{pw} = 9,023$  i  $K_{iw} = 1,012$ , te su ove vrednosti parametara regulatora i usvojene.

Slika 6. prikazuje odziv brzine prilikom zadavanja  $SpeedRef = 1500 \text{ o/min}$ , ali pre toga je zadata struja  $I_dRef$  sa istom vrednošću kao u prethodnoj fazi, čime je obezbeđeno magnetno pobuđivanje mašine.



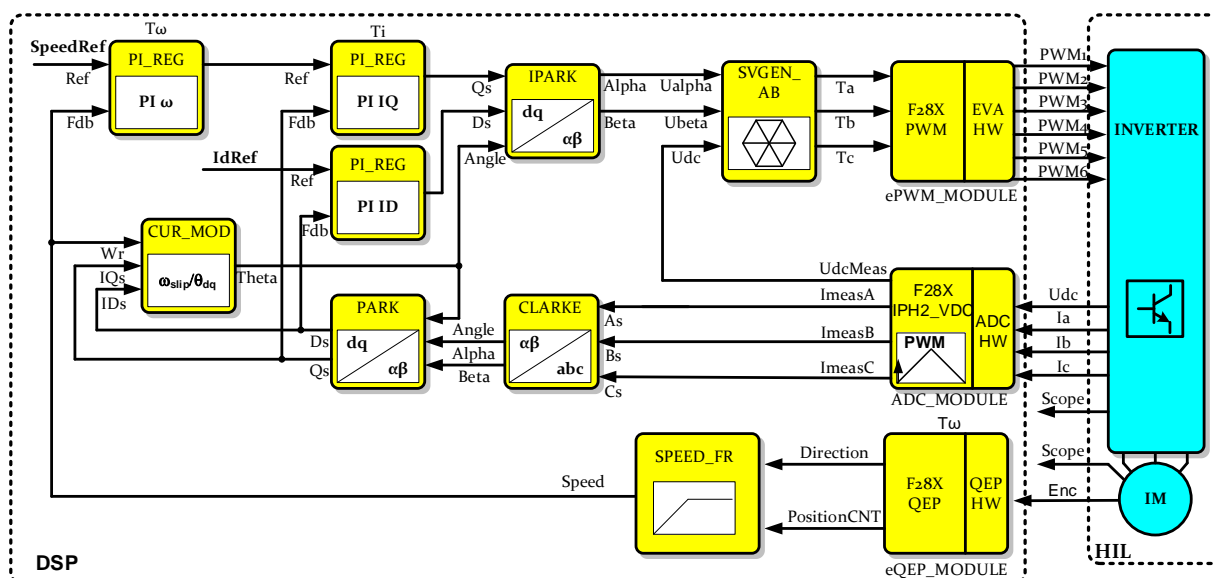
Slika 6. Odziv brzine na zadatu odskočnu referencu

Da je postignut željeni cilj da se AM ponaša kao linerani konvertor momenta, gde se u stacionarnom stanju očekuje vremenska nepromenljivost komponenti vektora struje statora  $i_d$  i  $i_q$  [6], prikazuje slika 7. S obzirom da je u ovom slučaju električni motor neopterećen, očekivana vrednost q komponente struje statora je  $i_q = 0$ , dok d komponenta struje statora ima istu vrednost kao na slici 5.



Slika 7. Odzivi struja  $i_d$  i  $i_q$  u stacionarnom stanju

Završetkom poslednje faze testiranja dobija se upravljački algoritam indirektno vektorsko upravljanje implementiran na DSP. Prikaz svih softverskih modula korišćenih za adekvatno upravljanje nalazi se na slici 8.



Slika 8. Prikaz softverskih modula u sklopu upravljačkog algoritma (DSP) i energetskeg dela (HIL)

## 5. FINITE STATE MACHINE (MAŠINA SA KONAČNIM BROJEM STANJA)

Finite state machine predstavlja metod modelovanja ponašanja, odnosno stanja u kojima se može naći neki fizički sistem. Na osnovu definisanih radnih režima u kojima se može naći električni motor definisane su vrednosti referentnih ulaznih veličina sa slike 8. Prelazak iz jednog stanja u drugo definisano je na osnovu komandi koje zadaje korisnik. Jedan od postignutih radnih režima jeste rad trofaznog kaveznog asinhronog motora u praznom hodu prikazan slikom 6. Moguća stanja u kojima se može naći električni motor i uslovi za prelazak iz jednog stanja u drugo definisani su putem Stateflow dijagrama u Simulink-u.

## 6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada jeste bio da pokaže postupak razvoja modela objekta upravljanja i energetskeg pretvarača, kao i simulaciju njihovog rada pomoću Typhoon HIL uređaja. Napravljen je osvrt na podešavanje svih DSP modula neophodnih za realizaciju indirektnog vektorskog upravljanja. Prikazane su faze testiranja upravljačkog algoritma i priloženi su odzivi od interesa, uz komentarisane najznačajnije karakteristike svakog. Na kraju je predložena metoda pomoću koje se vrši prevođenje mašine iz jednog radnog stanja u drugo.

## 7. LITERATURA

- [1] Evgenije Adžić, "Regulisani pogon asinhronog motora sa minimalnim brojem senzora", doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2013.
- [2] Typhoon HIL Control Center V2020.2
- [3] Nikola Diklić, Evgenije Adžić, Marko Vekić, "Realizacija vektorskog upravljanja asinhronog motora, upotrebom alata za automatsko generisanje koda.", master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2019.

- [4] [https://www.ti.com/lit/ug/sprui07/sprui07.pdf?ts=1597851689910&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTMS320F28335%253Fqgn%253Dtms320f28335](https://www.ti.com/lit/ug/sprui07/sprui07.pdf?ts=1597851689910&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTMS320F28335%253Fqgn%253Dtms320f28335) (pristupljeno u julu 2020.)
- [5] Bilal Akin, Manish Bhardwaj, "Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors", Application Report, SPRABP8 – July 2013
- [6] Darko P. Marčetić, "Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima", FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2014.
- [7] Stevan Grabić, "Upravljanje energetskim pretvaračima", Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2016.

## Kratka biografija



**Aleksa Stojković** rođen je 20.09.1996. godine u Vršcu. Diplomirao je u septembru 2019. godine, nakon čega se u oktobru iste godine zaposlio na Fakultetu tehničkih nauka kao saradnik u nastavi na Katedri za energetske elektrone i pretvarače.



**Prof. dr. Vlado Porobić**, zaposlen je na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, u zvanju vanrednog profesora. Predmet interesovanja su mu upravljanje pretvaračima energetske elektrone i automotive oblasti.