

**UPRAVLJANJE SINHRONIM MOTOROM SA PERMANENTNIM MAGNETIMA NA ROTORU U ELEKTROMOTORNIM POGONIMA BEZ DAVAČA NA VRATILU**  
**SENSORLESS CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ELECTRIC DRIVES**

Nebojša Koledin, Vladimir Popović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Postoje mnogobrojni algoritmi za kontrolu SPMSM bez upotrebe davača brzine na vratilu baziranih na estimaciji EMS. Međutim, to nije slučaj i sa IPMSM jer se informacija o poziciji ne sadrži samo u EMS nego i u reluktanciji rotora. U ovom radu je predstavljen model IPMSM, a zatim predložena konfiguracija observera proširene elektromotorne sile. Za dobijanje informacije o poziciji i brzini rotora predložene su tri metode: PLL, direktna primena arctg funkcije i adaptivni zakon baziran na metodi Ljapunova. Numerička verifikacija algoritma je prvo izvršena u Matlab Simulink programskom okruženju, a zatim i na eksperimentalnoj postavci gde je kontrola napravljena u Typhoon HIL softverskom paketu.

**Abstract** – There are numerous sensorless algorithms for controlling SPMSM based on back EMF estimation. However, this is not the case with IPMSM, as position information is contained not only in the back EMF but also in the rotor reluctance. This paper presents a model of IPMSM and proposes a configuration for an extended back EMF. Three methods are proposed for obtaining rotor position and speed information: PLL, direct application of the arctg function, and an adaptive law based on the Lyapunov method. Numerical verification of the algorithm was first performed in the Matlab Simulink programming environment, and then on an experimental setup where control was implemented in the Typhoon HIL software package.

**Ključne reči:** IPMSM, observer proširene EMS, estimacije brzine i pozicije

## 1. UVOD

Sinhrona mašine sa stalnim magnetima na rotoru poslednjih decenija nalaze sve veću primenu čemu je veoma zaslužna i autoindustrija. U poređenju sa asinhronim motorima, sinhroni motori imaju veći stepen efikasnosti kao i manje dimenzije na čega se u današnje vreme, sa razvojem električnih vozila, sve više obraća pažnja. Delatnosti koje zahtevaju precizne radnje su sve brojnije, pa sa njima raste i broj pogona sa preciznom regulacijom pozicije vratila. Pogoni samo sa regulacijom brzine nisu više dovoljni.

## NAPOMENA:

Ovaj rad je proistekao iz master rada čiji je mentor bio dr Vladimir Popović, docent

Pri projektovanju pogona od velikog je značaja jednostavnost instalacije i podešavanja, jednostavno povezivanje, mali broj provodnika, kablova i senzora. Korišćenje manjeg broja temperaturno i mehanički osetljivih naprava i provodnika znatno uvećava pouzdanost i robusnost pogona, a ujedno smanjuje njegovu cenu. Umanjenje broja senzora u pogonu je omogućeno masovnom proizvodnjom savremenih mikrokontrolera. Računska moć kontrolera sa vremenom raste eksponencijalno, što je posledica veoma brzog tehnološkog razvoja. Postoji mnoštvo algoritama za procenu pozicije i brzine primenljivih samo na mašinama kod kojih su stalni magneti na površini rotora. Ideja na kojoj su bazirani ti algoritmi je procena fluksa stalnih magneta ili elektromotorne sile, jer se pomoću njih može izračunati pozicija rotora, a iz nje i njegova brzina. Uspešnom implementacijom tih algoritama moguće je izbaciti davač brzine iz pogona i time povećati njegovu pouzdanost i robusnost, kao i smanjiti cenu. Problem nastaje pri primeni algoritma na sinhronu mašinu sa magnetima utisnutim u rotor. Matematički model SPMSM je samo specijalan slučaj matematičkog modela IPMSM kod kog su podužna i poprečna induktivnost jednake. Za razliku od modela SPMSM koji je jednostavan, IPMSM model informaciju o poziciji sadrži ne samo u fluksu i elektromotornoj sili, nego i u reluktanciji prouzrokovanoj razlikom induktivnosti podužne i poprečne ose. U ovom radu matematički model IPMSM će biti izveden u nekonvencionalnom obliku koji uvodi novu veličinu – proširenu elektromotornu silu koja se sastoji od dve komponente koje obe sadrže informaciju o poziciji rotora. Prva je dobro poznata indukovana elektromotorna sila, a druga komponenta je proizvod reluktancije rotora. Pored algoritma procene proširene elektromotorne sile potrebno je razviti i algoritam koji će iz nje izvući informaciju o poziciji i brzini rotora. U ovom radu predložene su tri metode: PLL (*phase locked loop*), adaptivni zakon baziran na metodi Ljapunova i upotreba arctg funkcije [1]-[2].

## 2. MATEMATIČKI MODEL IPMSM BAZIRAN NA PROŠIRENOJ ELEKTROMOTORNOJ SILI

Glavni problem kod konvencionalnih modela sinhrona mašine je zavisnost matrice induktivnosti od pozicije rotora, kod opšteg ( $\gamma\delta$ ) modela, i potreba preciznog poznavanja položaja rotora, kod vektorski orijentisanog ( $dq$ ) modela. Model koji navedene probleme nema je baziran na proširenoj elektromotornoj sili. Razlika ovog modela u odnosu na prethodne je ta što se on definiše u stacionatnom  $\alpha\beta$  koordinatnom sistemu čime se postiže

jednostavnost matrice induktivnosti i oslobađa potrebe za poznavanjem položaja rotora.

### 2.1. Matematički model IPMSM baziran na proširenoj elektromotornoj sili

Jednačina naponske ravnoteže statora u dq domenu data je u (1), a jednačina u  $\alpha\beta$  domenu data je u (2).

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi_{PM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_\alpha & pL_{\alpha\beta} \\ pL_{\alpha\beta} & R + pL_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \omega\psi_{PM} \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

gde su  $L_d$  i  $L_q$  podužna i poprečna induktivnost i:

$$\begin{aligned} L_0 &= (L_d + L_q)/2, & L_1 &= (L_d - L_q)/2 \\ L_\alpha &= L_0 + L_1 \cos 2\theta, & L_\beta &= L_0 - L_1 \cos 2\theta \\ L_{\alpha\beta} &= L_1 \sin 2\theta \end{aligned}$$

U (2) se jasno vidi da je informacija o poziciji rotora sadržana ne samo u EMS nego i u induktivnostima. Zavisnost induktivnosti od  $2\theta$  posledica je reluktancije motora. Jednostavnim matematičkim manipulacijama moguće je eliminisati zavisnost induktivnosti od položaja rotora. Za razliku od matrice induktivnosti kod *SPMSM*, kod *IPMSM* je ona nesimetrična. Ako se (1) preuredi tako da matrica induktivnosti bude simetrična, a ostatak pridružio članu koji modeluje EMS, dobija se (3).

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_q & R + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ (L_d - L_q)(\omega i_d - \dot{i}_q) + \omega\psi_{PM} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Prelaskom u  $\alpha\beta$  domen pomoću inverzne Parkove transformacije jednačina naponske ravnoteže (3) dobija sledeći oblik:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & \omega(L_d - L_q) \\ -\omega(L_d - L_q) & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \{(L_d - L_q)(\omega i_d - \dot{i}_q) + \omega\psi_{PM}\} \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Drugi član sa desne strane jednačine (4) se definiše kao proširena EMS prikazana u (5). Ona se sastoji od konvencionalne EMS indukovane stalnim magnetima i neke vrste napona koji nastaje usled reluktancije rotora. U njoj je sadržana informacija o poziciji rotora koja potiče od EMS, kao i iz matrice induktivnosti. S tim u vezi, ukoliko se proširena EMS može proceniti, onda se iz nje može izvući informacija o položaju rotora [2].

$$e = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \{(L_d - L_q)(\omega i_d - \dot{i}_q) + \omega\psi_{PM}\} \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

## 3. OBSERVER PROŠIRNE ELEKTROMOTORNE SILE

U ovom poglavlju će biti opisana struktura adaptivnog observera proširene elektromotorne sile. On se bazira na linearnom matematičkom modelu IPMSM u prostoru stanja.

### 3.1. Linearni matematički model IPMSM u prostoru stanja

Matematički model sinhronne mašine sa stalnim magnetima utisnutim u rotor može da se predstavi kao linearni model u prostoru stanja (6). Promenljive stanja su struje statora  $i$  i proširene elektromotorne sile  $e$ . Ulazi u sistem su naponi statora  $u$ , a njegovi izlazi su struje statora  $i$ . Napon  $u$  i  $W$  su poremećaji sistema. Brzina rotora  $\omega$  može da se posmatra kao konstantna ako se

uzme u obzir da je električna vremenska konstanta mnogo manja od mehaničke [2].

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \mathbf{0} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ W \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$i = C \cdot \begin{bmatrix} i \\ e \end{bmatrix}$$

где су:

$$A_{11} = -\frac{R}{L_d} I + \omega \frac{L_d - L_q}{L_d} J$$

$$A_{12} = -\frac{1}{L_d} I = a_{12} I$$

$$A_{22} = \omega J = a_{22} J$$

$$B = \frac{1}{L_d} I = -a_{12} I, \quad C = [I \quad \mathbf{0}]$$

$$W = (L_d - L_q)(\omega \dot{i}_d - \ddot{i}_q) \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix}$$

### 3.2. Observer proširene EMS

Član  $W$  u jednačini (6) je greška pri linearizaciji. On je prisutan samo kada se struje  $i_d$  i  $i_q$  menjaju. Međutim, pri brzinskoj kontroli to kratko traje zbog postojanja regulatora struje koji ubrzava njihov odziv, pa tranzijentni periodi traju veoma kratko. Sa argumentima koji su navedeni lako se može zaključiti da se član  $W$  može zanemariti u projektovanju observera. Zanemarenje neće uticati na stacionarno stanje sistema i njime se veoma pojednostavljuje observer, ali cena zanemarenja je da estimacija u tranzijentnim periodima neće biti precizna. U (7) je prikazan observer proširene elektromotorne sile.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{i}} &= \tilde{A}_{11} \hat{i} + \tilde{A}_{12} \hat{e} + \tilde{B} u \\ \dot{\hat{e}} &= \tilde{A}_{22} \hat{e} + G(\dot{\hat{i}} - \dot{i}) \\ &= G\tilde{A}_{11} \hat{i} + G(\tilde{A}_{12} + \tilde{A}_{22}) \hat{e} + G\tilde{B} u + G\dot{i} \end{aligned} \quad (7)$$

gde je  $G$  korektivno pojačanje definisano kao:

$$G = g_1 I + g_2 J$$

Kako bi se izbeglo računanje izvoda struje  $i$  uvodi se nova promenljiva  $\xi$  [2].

$$\begin{aligned} \xi &= \hat{e} + G\dot{i} \\ \dot{\xi} &= \dot{\hat{e}} + G\ddot{i} \end{aligned} \quad (8)$$

Uvrštavanjem (8) u (7) dobija se ekvivalentan observer u kom ne postoji izvod struje  $i$  (9).

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= (G\tilde{A}_{12} + A_{22})\xi + G\tilde{B}u + (G\tilde{A}_{11} - G\tilde{A}_{12}G - \tilde{A}_{22}G)\hat{i} \\ \hat{e} &= \xi - G\dot{i} \end{aligned} \quad (9)$$

Ovako konstruisanom observeru može da se pridruži funkcija prenosa  $S(j\omega)$  koja matematički određuje brzinu odziva observera, tj. brzinu uspostavljanja procenjene proširene elektromotorne sile:

$$S(j\omega) = (\alpha I + (\omega - \beta)J) \frac{(j\omega + \alpha)I + \beta J}{(j\omega + \alpha)^2 + \beta^2} \quad (10)$$

gde  $\alpha$  i  $\beta$  predstavljaju polove observera i u vezi su sa pojačanjem observera  $G$  na sledeći način:

$$\alpha = -g_1 a_{12} \quad \beta = a_{22} + g_2 a_{12}$$

Primenom postupka koji je izložen u [2] dobijaju se vrednosti polova observera:

$$\alpha = \omega \cdot v, \quad \beta = \omega$$

gde je  $v$  parametar čija je preporučena vrednost 2.

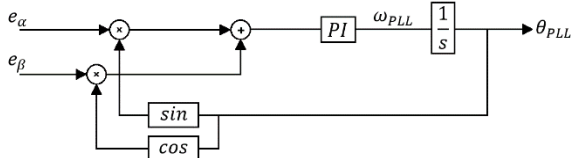
## 4. METODE ZA PROCENU POZICIJE I BRZINE IPMSM

Informacije o brzini i poziciji rotora su neophodne za vektorsku kontrolu električnih mašina. Pošto se ovaj rad bavi kontrolom sinhronne mašine sa stalnim magnetima bez upotrebe senzora brzine, u ovom poglavlju će biti opisane tri metode za procenu pozicije i brzine:

- arctg i difirenciranje;
- PLL petlja;
- Adaptivni mehanizam.

### 4.1. PLL algoritam za procenu pozicije i brzine

*PLL* (engl. *Phase locked loop*) se često koristi za procenu brzine i pozicije rotora. Svojom konfiguracijom petlja prirodno filtrira sve nepravilnosti i poremećaje u ulaznim signalima. To za posledicu ima eliminaciju direktne zavisnosti ulaznih i izlaznih signala, gde se pri bilo kom poremećaju u ulaznim signalima to direktno odražava i na izlaze. *PLL* je zatvorena petlja koja preko *PI* regulatora eliminiše grešku u proceni pozicije rotora. Izlaz iz regulatora je brzina rotora koja se integriše da bi se dobila pozicija po kojoj je zatvorena sprega. Konfiguracija *PLL*-a je prikazana na Slici 1. [3].



Slika 1. Konfiguracija *PLL*-a

Iz definicije proširene elektromotorne sile (5) očigledno je da ona direktno zavisi od pozicije rotora, pa se  $\alpha$  i  $\beta$  komponenta proširene elektromotorne sile mogu napisati na sledeći način:

$$e_\alpha = -E \cdot \sin\theta \quad e_\beta = E \cdot \cos\theta$$

Pretpostavimo da imamo procenjen ugao iz *PLL*-a čiji su ulazi  $e_\alpha$  i  $e_\beta$ . Ako se  $\alpha$  komponenta pomnoži sa  $\cos\theta_{PLL}$ , a  $\beta$  sa  $\sin\theta_{PLL}$  i saberu, za male greške pozicije dobija se:

$$e_{PLL} = -E \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta_{PLL} + E \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta_{PLL} = E \cdot \sin(\theta_{PLL} - \theta) \approx E \cdot (\theta_{PLL} - \theta) \quad (11)$$

### 4.2. Arctg i diferenciranje

Procena pozicije rotora može i da se izračuna primenom arctg funkcije na komponente proširene elektromotorne sile, (12), jer ona u sebi nosi informaciju o poziciji rotora.

$$\theta_{arctg} = \arctg(-e_\alpha/e_\beta) \quad (12)$$

Brzinu rotora, kada je poznata informacija o poziciji, jednostavno je proceniti njenim diferenciranjem (13).

$$\omega_{arctg} = \frac{d}{dt}(\theta_{arctg}) \quad (13)$$

Ovaj pristup je dobar jer ne unosi kašnjenje u sistem, tj. informacija o poziciji i brzini rotora se dobija trenutno. Cena koju je potrebno platiti za trenutnu procenu je ta da se svi poremećaji (šumovi, harmonici, itd.) direktno prenose i na poziciju. Ukoliko su ti poremećaji značajni može doći do veoma loše kontrole, pa i do ispada pogona iz rada zbog greške u proceni ugla.

### 4.3. Adaptivni mehanizam baziran na metodi

#### Ljapunova

Treći način za procenu pozicije i brzine rotora je pomoću adaptivnog mehanizma zasnovanom na *Model reference adaptive system (MRAS)*. Forma referentnog modela (15) se dobija iz (6), gledajući samo jednačinu proširene elektromotorne sile, ali se koristi procenjena elektromotorna sila dobijena iz observera, koja je potom

normalizovana (14); brzina rotora se posmatra kao konstantna.

$$\hat{e}_n = \left(1/\sqrt{\hat{e}_\alpha^2 + \hat{e}_\beta^2}\right) \cdot \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\dot{\hat{e}}_n = \omega J \hat{e}_n \quad (15)$$

Adaptivni model (16) ima istu formu kao i referentni sa razlikom člana koji ima funkciju popravke estimirane proširene elektromotorne sile.

$$\dot{\hat{e}}_n = \hat{\omega} J \hat{e}_n + G_1(\hat{e}_n - \hat{e}_n) \quad (16)$$

gde su:

$\hat{\omega}$  – procenjena brzina,

$G_1 = g_1 I = -100 \cdot I$  – korekciona matrica.

Za Ljapunovovu funkciju izabrana je (17) i može se videti da je ona pozitivna definitna funkcije. Kako bi njen izvod (18) bio negativan semidefinitan, potrebno je brzinu računati po zavisnosti (19) koja ujedno predstavlja i adaptivni zakon za estimaciju brzine rotora. Sa tim je Ljapunovov kriterijum stabilnosti zadovoljen i ostvarena je nulta greška između proširene elektromotorne sile referentnog  $\hat{e}_n$  i adaptivnog  $\hat{e}_n$  modela kao i konvergencija procenjene brzine  $\hat{\omega}$  ka stvarnoj [4].

$$V(t) = \mathbf{\epsilon}^T \cdot \mathbf{\epsilon} + (\hat{\omega} - \omega)^2/\lambda \quad (17)$$

$$\dot{V}(t) = \mathbf{\dot{\epsilon}}^T \cdot \mathbf{\epsilon} + \mathbf{\epsilon}^T \cdot \mathbf{\dot{\epsilon}} + 2\Delta\omega/\lambda \cdot \Delta\dot{\omega} \quad (18)$$

$$\hat{\omega} = (k_p + k_i/s) \mathbf{\epsilon}^T J \hat{e}_n \quad (19)$$

Estimacija brzine primenom adaptivnog zakona baziranog na metodi Ljapunova je veoma dobra jer filtrira sve poremećaje u ulazima, bolje nego *PLL*, pa se procenjena i stvarna brzina neznatno razlikuju. Loša strana je što postojanje *PI* regulatora u adaptivnom zakonu unosi kašnjenje u estimaciji, kao i *PLL*, pa se informacija ne dobija trenutno kao kod arctg. Iako se pozicija rotora može proceniti kao integral procenjene brzine, ne treba je tako procenjivati jer ne postoji povratna sprega po poziciji. U slučaju da se u bilo kom, ma koliko kratkom, trenutku pojavi greška pri estimaciji brzine, to će se direktno oslikati i na grešku u poziciji.

Na kraju, zaključak je da za procenu pozicije i brzine rotora treba koristiti *PLL* ili kombinovati procenu pozicije preko arctg i procenu brzine pomoću adaptivnog zakona.

## 5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

### 5.1. Konfiguracija eksperimentalne postavke

Model je testiran na postavci koja se sastoji od: jednosmernog naponskog izvora od 60V, trofaznog invertora i H-mosta koji dele jednosmerno međukolo, *HIL 402* emulatora u kome se implementira model iz *Typhoon HIL Schematic*-a i ima ulogu kontrolera, sinhronne mašine sa stalnim magnetima i mašine jednosmerne struje (ima ulogu da nameće opterećenje sinhronoj mašini) čiji su rotori kruto spregnuti.

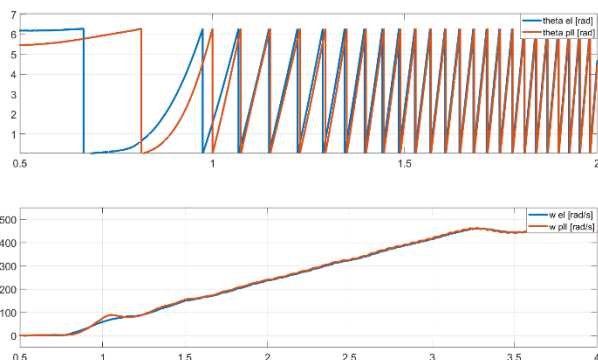
Nakon podešavanja parametara *PLL*-a i adaptivnog zakona, snimljeni su rezultati u offline radu observera i estimacije brzine i pozicije rotora pri zaletanju mašine do mehaničke brzine od 150 rad/s. Eksperiment je spoveden dva puta, jednom koristeći *PLL*, a drugi put koristeći arctg i adaptivni zakon za estimaciju. Parametri sinhronne mašine su dati u Tabeli I.

Tabela I. Parametri sinhronne mašine

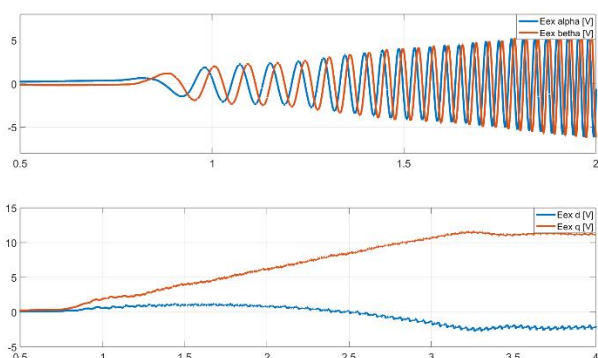
Parametar	Vrednost[veličina]
$R_s$	0.07[Ω]
$L_d = L_q$	0.2[mH]
$\psi_{PM}$	12.3[mWb]
$p$	3
$J$	0.0001kgm <sup>2</sup>

## 5.2. Eksperimentalna analiza

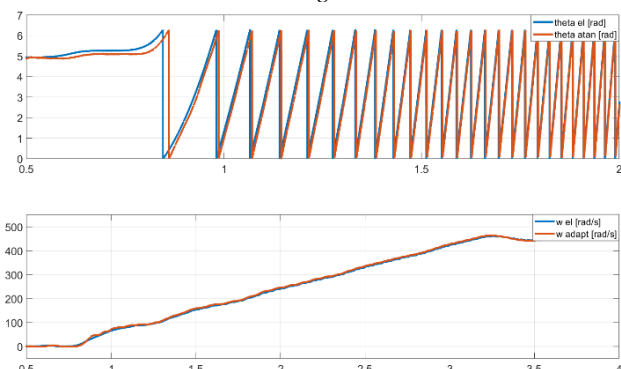
Na Slikama 2.-5. jasno se vidi da se sve veličine estimiraju veoma dobro u oba eksperimenta. Primetna je mala razlika u brzini sinhronizacije na položaj rotora gde je PLL sporiji u odnosu na adaptivni mehanizam.



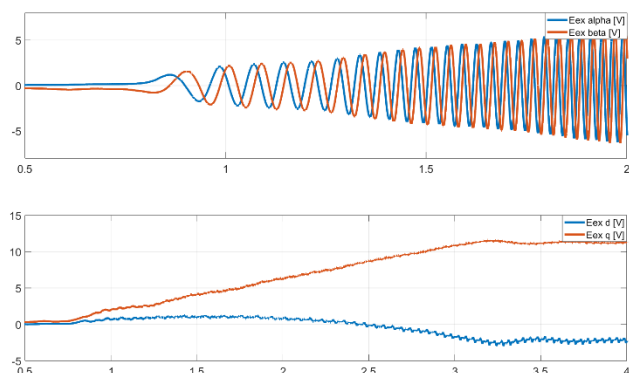
Slika 2. Stvarna i procenjena električna brzina i pozicija rotora – PLL kontrolni algoritam



Slika 3. Komponente proširene elektromotorne sile – PLL kontrolni algoritam



Slika 4. Stvarna i procenjena električna brzina i pozicija rotora – adaptivni mehanizam



Slika 5. Komponente proširene elektromotorne sile – adaptivni mehanizam

## 6. ZAKLJUČAK

Observer proširene elektromotorne sile se pokazao kao dobra opcija za kontrolu IPMSM bez davača na vratilu. Rezultati dva predložena načina za procenu brzine i pozicije rotora su pokazali da su slični, uz malu razliku u dinamičkom odzivu pri sinhronizaciji na ugao rotora.

## 7. LITERATURA

- [1] Slobodan N. Vukosavić, „Upravljanje električnim pogonima“, Akademska misao, Beograd, 2003.
- [2] Zhiqian Chen, Mutuwo Tomita, Shinji Doki, and Shigeru Okuma, „An Extended BEMF Model for Sensorless Control of IPMSM“, IEEE Trans. on Ind. Electr., vol. 50, no. 2, April 2003.
- [3] Darko P. Marčetić, „Mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima“, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2020.
- [4] Jean-Jacques E. Slotine, Weiping LI, „Applied nonlinear control“, Prentice Hall, New Jersey, 1991.

### Kratka biografija:

**Nebojša Koledin** rođen je u Novom Sadu 2000. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetska elektronika i električne mašine odbranio je 2023. god.

**Vladimir Popović** rođen je u Somboru 1990. god. Doktorsku disertaciju na Fakultetu tehničkih nauka iz naučne oblasti Elektrotehnike i računarstva – odbranio je 2020. god, i u zvanju je docenta na Fakultetu tehničkih nauka. Oblast interesovanja su regulacija elektromotornih pogona i digitalna kontrola upravljačkih sistema.