

# Četvrta vežba

## Eksperimentalna analiza rada regulisanog elektromotornog pogona sa vektorskim upravljanjem

---

### Uvod

Cilj vežbe je da se prouči način korišćenja i rada jednog industrijskog uređaja za upravljanje pogonom sa asinhronim motorom. Kroz ovu vežbu studenti stiču uvid u savremene pristupe profesionalne realizacije pogona različitih namena i stepena složenosti. U vežbi se koristi frekventni pretvarač *Siemens* serije *Sinamics S120*, koji ima sve odlike savremenih uređaja ove namene, ali se prevashodno koristi za vektorsko upravljanje pogonom sa asinhronim motorom. Studenti treba da se upoznaju sa radom pogona i načinom ponašanja u prelaznim stanjima pri ovom načinu upravljanja (puštanje u rad, opterećivanje i dr.). Za izvođenje vežbe koristi se *Siemens-ov* softver *Starter* koji je dostupan na sajtu proizvođača ([www.siemens.com](http://www.siemens.com)). U softveru se mogu podešavati svi parametri pretvarača i mogu se pratiti veličine od interesa u formi vremenskih dijagrama. Da bi se vežba mogla uraditi, moraju se predstaviti i neki detalji vezani za korišćenje ovog uređaja i navedenog softvera (dokumenti na Internet prezentaciji Laboratorije za elektromotorne pogone <http://www.pogoni.etf.bg.ac.rs>: Uputstvo.pdf, *Sinamics S120-catalog.pdf* i *Sinamics S120-manual.pdf*), međutim najbitnije je obratiti pažnju na suštinu pristupa jer je ona u osnovi ista i kod drugih proizvođača i sličnih uređaja.

### Opis vežbe

Na laboratorijskom modelu grupe koju čini jednosmerni motor sa nezavisnom pobudom i trofazni asinhroni motor sa kaveznom rotorom, potrebno je proučiti i statičke i dinamičke režime rada pogona pri definisanim zadacima. Proučavanje dinamičkih režima rada odnosi se na analizu vremenskih dijagrama karakterističnih veličina, koji se prikazuju na ekranu računara i na osciloskopu, a pomoću softvera *Starter*, koji služi za komunikaciju između frekventnog pretvarača i računara.

Frekventni pretvarač visokih performansi *SINAMICS S120* namenjen je za potrebe upravljanja i napajanja asinhronog motora. Odgovarajućim podešavanjem određenih parametara pretvarača može se ostvariti i skalarno upravljanje i vektorsko upravljanje momentom asinhronog motora. U vežbi se koristi vektorsko upravljanje implementirano u upravljačkom algoritmu pretvarača. Opterećivanje asinhronog motora vrši se pomoću mašine za jednosmernu struju sa nezavisnom pobudom, koja radi u režimu dinamičkog kočenja. Mašine su međusobno spojene kaišem.

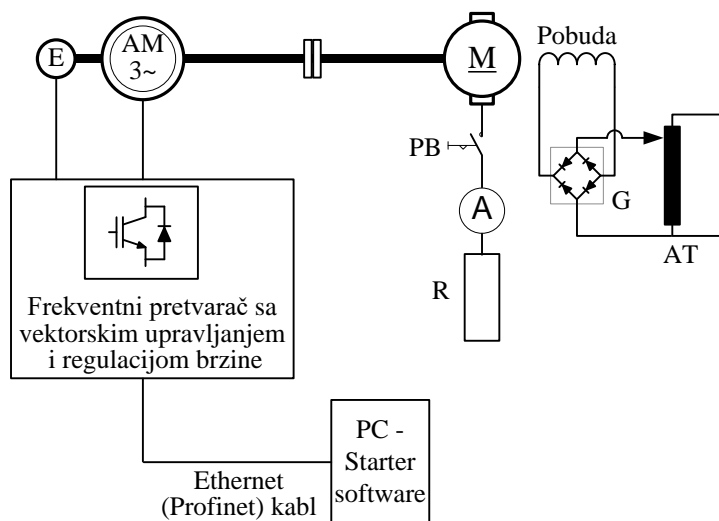
Osnovni podaci o asinhronom motoru:

$$P_n = 4 \text{ kW}, n_n = 1460 \text{ o/min}, \cos \varphi_n = 0,81$$
$$I_n = 8,2 \text{ A}, U_n = 400 \text{ V}, \text{ sprega statora u zvezdu}$$

Osnovni podaci o mašini za jednosmernu struju:

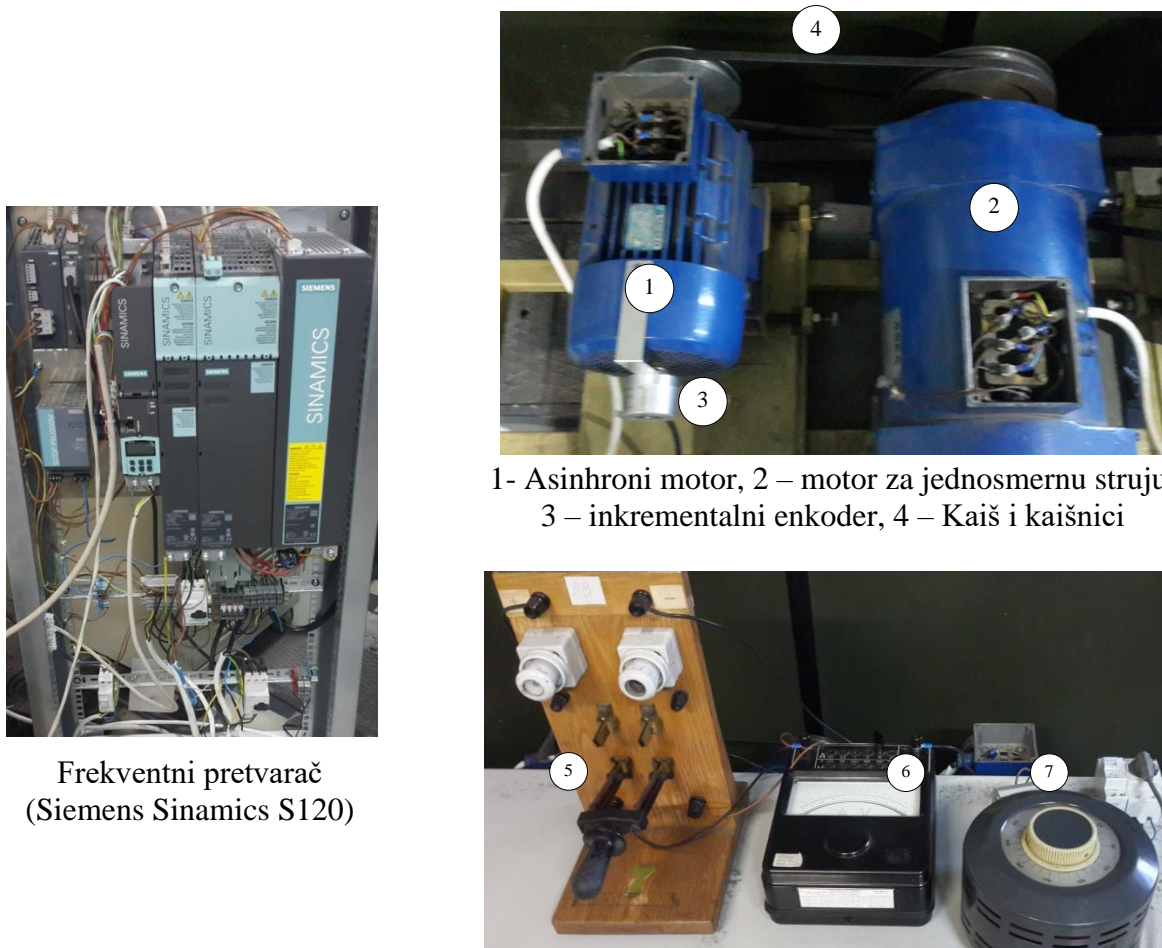
$$P_n = 8,5 \text{ kW}, n_n = 2000 \text{ o/min}$$
$$\text{indukt: } U_{an} = 410\text{V}, I_{an} = 23,9 \text{ A}$$
$$\text{pobuda: } U_{fn} = 220\text{V}, I_{fn} = 1,3 \text{ A}$$

Na slici 1. prikazana je principijelna šema regulisanog pogona koji se koristi u vežbi.



Slika 1. Principijelni blok dijagram regulisanog pogona

Na slici 2. prikazana je postavka laboratorijske vežbe sa označenim osnovnim elementima.



Frekventni pretvarač  
(Siemens Sinamics S120)

1- Asinhroni motor, 2 – motor za jednosmernu struju,  
3 – inkrementalni enkoder, 4 – Kaiš i kaišnici

5 – Prekidač u kolu indukta, 6 – ampermetar, 7 – auto-  
transformator za podešavanje napona pobude

Slika 2. Osnovni delovi laboratorijske postavke.

## Priprema za vežbu

Ponoviti gradivo iz Elektromotornih pogona koje se tiče vektorskog upravljanja asinhronim motorom i aktuatora za pogone sa asinhronim motorom.

Proučiti uputstvo za izradu vežbe i uputstvo za rad sa frekventnim pretvaračem *Sinamics S120*.


## Zadatak

- 1) **Unošenje osnovnih podataka o pogonu**  
Uneti podatke o elektromotornom pogonu (motoru i pretvaraču).
- 2) **Adaptacija parametara**  
Izvršiti adaptaciju parametara pretvarača (upoznavanje upravljačkog sistema pretvarača sa povezanim motorom).
- 3) **Parametri pogona sa regulacijom brzine**  
Podesiti ili proveriti parametre soft-starta, limita zadate i ostvarene brzine, limita momenta, limita struje po  $d$ - i  $q$ -osi. Na koji način je određena vrednost referentne struje po  $d$ -osi? Koje su vrednosti parametara regulatora brzine? Da li postoji filter u povratnoj sprezi po brzini?
- 4) **Rad u režimu brzinske regulacije**  
Pustiti motor u režimu brzinske regulacije sa povratnom spregom sa davača na vratilu motora (enkodera). Zadati referentnu brzinu: 300 o/min, 500 o/min, 750 o/min i 1000 o/min. Posmatrati promene na vremenskom dijagramu:  $\omega(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $i_d(t)$ .
- 5) **Revers pogona**  
Uraditi revers, promenu smera obrtanja motora, zadavanjem referentne brzine sa +750 o/min na -750 o/min. Posmatrati  $\omega(t)$ ,  $i_q(t)$ ,  $i_d(t)$  i  $i_{sa}(t)$ . Uočiti zavisnost amplitude (efektivne vrednosti) fazne struje motora pri promeni  $i_q$  i pri promeni brzine.
- 6) **Opterećivanje motora**  
Korišćenjem jednosmernog motora koji se napaja iz regulisanog ispravljača i radi u režimu strujne regulacije izvršiti opterećivanje motora. Opterećenje izvršiti nakon procesa zaletanja, sa referentnom brzinom od 1000 o/min. Posmatrati promene na vremenskom dijagramu:  $\omega(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $i_d(t)$ . Da li postoji greška brzine u ustaljenom stanju? Šta se može reći za prelazni proces (na osnovu vremenskih dijagrama brzine i struje po  $q$ -osi)?
- 7) **Upravljanje bez davača na vratilu motora**  
Podesiti upravljački sistem frekventnog pretvarača tako da radi u režimu regulacije brzine bez davača na vratilu motora (*sensorless*). Ponoviti zadatke 4, 5 i 6. Uočiti sličnosti i razlike u ponašanju pogona. Koje su prednosti ovakvog načina upravljanja, a koje su mane?


## **Postupak**

### **1) Unošenje osnovnih podataka o pogonu**


Upotrebom programskog paketa *Starter* potrebno je uneti podatke o elektromotornom pogonu (motoru i pretvaraču).

- Otvoriti novi projekat u *Starter*-u pomoću uputstva za korišćenje softvera (Uputstvo.pdf, dokument na Internet prezentaciji Laboratorije za elektromotorne pogone <http://www.pogoni.etf.bg.ac.rs>).
- Uneti parametre sa natpisne pločice motora i invertora (upravljačka jedinica i energetska jedinica).
- Kada je završeno unošenje svih potrebnih parametara otvoriće se prozor sa sažetom strukturom pogona. Za uspešan završetak podešavanja potrebno je odabrati *Finish*. Potom je potrebno uspostaviti komunikaciju između računara i pretvarača (*online* režim rada, izborom ikonice  u *Toolbar*-u) i prebaciti formirani projekat u pretvarač.

### **2) Adaptacija parametara**

Posle kreiranja projekta, uspostavljanja komunikacije i učitavanja projekta u upravljačku jedinicu frekventnog pretvarača, upravljačka jedinica je spremna za pogon, što je moguće ostvariti sa upravljačkog panela (*Control panel*). U projektnom navigatoru potrebno je ići na: *Drive\_1*→*Commissioning*→*Control panel*. Za upotrebu upravljačkog panela potrebno je preuzeti prioritet upravljanja odabirom *Assume control priority* i uneti aplikacijsko nadzorno vreme ( npr. 1000 ms). Za prikaz opcija za pokretanje motora, potrebno je kliknuti na *Enables*. Pri prvom puštanju u pogon, odabirom opcije *Drive on*, klikom na ikonicu: , aktiviraće se automatska identifikacija parametra motora, pa je potrebno pričekati i ništa ne raditi dok se ista ne obavi i dok se pogon ne isključi. Zatim treba kliknuti na ikonicu motora (M) u *Toolbar*-u. Tada će se na radnoj površini otvoriti ekran sa izračunatim parametrima motora, koje treba uneti u tabelu u izveštaju.

### **3) Parametri pogona sa regulacijom brzine**

U projektnom navigatoru ići na: *Drive\_1*→*Setpoint channel*→*Ramp-function generator* i kliknuti na ikonicu na radnoj površini: . Proveriti i prepisati parametre soft-starta u tabelu u izveštaju.






U projektnom navigatoru ići na: *Drive\_1*→*Setpoint channel*→*Speed limit*. Na radnoj površini izabrati ikonicu *Minimum limit* i *Maximum limit*. Proveriti i prepisati limite zadate brzine u tabelu u izveštaju.


U projektnom navigatoru ići na: *Drive\_1*→*Open-loop/closed loop control*→*Torque limitation*. Na radnoj površini izabrati ikonicu: *Torque limits*. Proveriti i prepisati limite momenta u tabelu u izveštaju.

U projektnom navigatoru ići na *Drive\_1*→*Expert*→*Expert list*. Na radnoj površini će se pojaviti ekran sa parametrima motora. U prikazanoj listi treba pronaći parametre koji se odnose na struje po *d*- i *q*- osi i prepisati njihove vrednosti u tabelu u izveštaju.


U projektnom navigatoru ići na *Drive navigator*. Na radnoj površini će se pojaviti ekran sa upravljačkom strukturom pogona. Klikom na ikonicu sa oznakom *Controller*, otvara se ekran sa strukturom PI regulatora brzine. Prepisati tražene vrednosti u izveštaj.

**4) Rad u režimu brzinske regulacije**

U projektnom navigatoru ići na: *Drive\_1*→*Setpoint channel*→*Ramp-function generator* i kliknuti na ikonicu  na radnoj površini. Promeniti *ramp-up time* na 3s i *ramp-down time* na 3s. Pustiti motor u režimu brzinske regulacije sa povratnom spregom sa davača na vratilu motora (enkodera). U projektnom navigatoru ići na: *Drive\_1*→*Open-loop/closed loop control*→*Speed controller* i na radnoj površini izabrati [21] *Speed control (with encoder)*. U upravljačkoj jedinici zadati referentnu brzinu od 300 o/min i kliknuti na ikonicu za pokretanje motora: . Istovremeno je potrebno početi i snimanje traženih veličina  $i_d(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $\omega(t)$ , pa je potrebno ići na: *Drive\_1*→*Commissioning*→*Device trace*. Na radnoj površini treba izabrati ikonicu  koja označava katalog u koji su već uneti traženi signali i u kome treba kliknuti na UPE\_REGULACIJA\_W, pa na *Load*. Zatim treba izabrati opciju *Endless trace* i pokrenuti snimanje klikom na ikonicu *play* , koja se nalazi na radnoj površini. Dok je snimanje je u toku, potrebno je zadavati različite vrednosti za referentnu brzinu: 300 o/min, 500 o/min, 750 o/min i 1000 o/min. Kada se snimanje završi, potrebno je na radnoj površini ići na *Time diagram* gde će biti prikazan vremenski dijagram za:  $\omega(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $i_d(t)$ . Motor se zaustavlja u upravljačkom panelu klikom na ikonicu . Uneti dati vremenski dijagram u izveštaj.


Da bi se izvršila demonstracija vektorskog načina upravljanja asinhronim motorom, treba kliknuti na ikonicu  u *Toolbar*-u i podesiti vrednost za *Bypass ramp-function generator* na 1. Zatim izvršiti promenu brzine sa 500 na 1000 o/min. Pratiti promenu veličina i zapisati zapažanja. Uočiti zavisnost amplitude (efektivne vrednosti) fazne struje motora pri promeni  $i_q$  i pri promeni brzine.

**5) Revers pogona**

U *Device trace*-u, otvoriti katalog UPE\_REGULACIJA\_W i ići na *Load*. Na radnoj površini će biti uneto:  $i_d(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $\omega(t)$ . Pokreće se snimanje klikom na ikonicu: . Pokrenuti motor zadavanjem referentne brzine od +750 o/min, i posle nekoliko sekundi izvršiti revers zadavanjem referentne brzine od -750 o/min. Kada se snimanje završi, isključuje se motor, a u *Time diagram*-u na radnoj površini će biti prikazan vremenski dijagram za:  $i_d(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $\omega(t)$ . Koristeći osciloskop, uočiti zavisnost amplitude (efektivne vrednosti) fazne struje motora  $i_{sd}(t)$  pri promeni  $i_q$  i pri promeni brzine i nacrtati odgovarajuće vremenske dijagrame u izveštaju.

Posmatrati promenu fazne struje u toku prelaznog procesa. Da li je došlo do promene amplitude fazne struje? Uočiti naglu promenu faznog ugla fazne struje. Uočiti promenu učestanosti fazne struje. Kolika je učestanost struje kada je brzina jednaka nuli? Zaustaviti prikazivanje i isključiti prekidač. Snimiti vremenske dijagrame na računaru. Komentarisati

**6) Opterećivanje motora**

U *Device trace*-u, otvoriti katalog UPE\_OPTERECENJE i ići na *Load*, na radnoj površini će biti uneto:  $\omega(t)$ ,  $m_e(t)$ ,  $i_q(t)$ ,  $u_q(t)$  i  $u_d(t)$ . Pokreće se snimanje klikom na ikonicu: . Pokrenuti motor zadavanjem referentne brzine od +500 o/min, i posle nekoliko sekundi izvršiti opterećenje asinhronog motora zadavanjem referentne struje jednosmernom motoru u iznosu od 5,5 A. Nakon toga, zadati brzinu od +1000 o/min, i posle nekoliko sekundi, isključiti opterećenje. Kada se snimanje završi, isključiti asinhroni motor, a u *Time diagram*-u na radnoj površini će biti prikazan vremenski dijagram za:  $i_d(t)$ ,  $i_q(t)$  i  $\omega(t)$ . Nacrtati vremenski dijagram u izveštaju.

U stacionarnim stanjima pri brzinama od 500 o/min i 1000 o/min odrediti i zapisati vrednosti napona po d i q osi, struja po d i q osi, brzine, učestanosti, rotorske učestanosti. Izračunati

rotorsku učestanost na osnovu zadatih ili merenih struja po d i q osi. Uporediti izračunatu vrednost momenta pomoću struja po d i q osi sa zadatom vrednošću. Nacrtati prostorne vektore

struje i napona u d-q koordinatnom sistemu za najmanje dve izabrane vrednosti momenta (u ustaljenom stanju). Komentarisati.

### 7) Upravljanje bez davača na vratilu motora

Podesiti upravljački sistem frekventnog pretvarača tako da radi u režimu regulacije brzine bez davača na vratilu motora (*sensorless*). U projektnom navigatoru ići na: *Drive\_1* → *Open-loop/closed loop control* → *Speed controller* i izabrati [20] *Speed control (sensorless)*. Ponoviti zadatke 4, 5 i 6. Uočiti sličnosti i razlike u ponašanju pogona i uneti dobijene dijagrame u izveštaj.

## Izveštaj

### 1) Unošenje osnovnih podataka o pogonu

Nominalni napon (indukta) motora	p304(0)	
Nominalna struja (indukta) motora	p305(0)	
Nominalna snaga motora	p307(0)	
Faktor snage motora	p308(0)	
Učestanost napajanja motora	p310(0)	
Brzina obrtanja motora	p311(0)	
Tip hlađenja motora	p335(0)	

### 2) Adaptacija parametara

Nominalni napon (indukta) motora	p304(0)	
Nominalna struja (indukta) motora	p305(0)	
Nominalna snaga motora	p307(0)	
Faktor snage motora	p308(0)	
Učestanost napajanja motora	p310(0)	
Brzina obrtanja motora	p311(0)	
Tip hlađenja motora	p335(0)	

Otpornost statora u hladnom stanju	p350(0)	
Otpornost rotora u hladnom stanju	p354(0)	
Reaktansa rasipanja statora	p356(0)	
Reaktansa rasipanja rotora	p358(0)	
Induktivnost u grani magnećenja motora	p360(0)	

Struja magnetizacije motora	p320(0)	
Moment inercije motora	p341(0)	
Odnos između ukupne inercije pogona i momenta inercije motora	p342(0)	
Težina motora	p344(0)	
Otpornost kabla	p352(0)	
Redna induktivnost	p353(0)	

**3) Parametri pogona sa regulacijom brzine**

Vreme zaletanja	p1120(0)	
Vreme usporenja	p1121(0)	

Gornja granična vrednost momenta	p1520(0)	
Donja granična vrednost momenta	p1521(0)	

Sruja statora po $d$ -osi, $i_d$	r76	
Sruja statora po $q$ -osi, $i_q$	r78	

Na koji način je određena vrednost referentne struje po  $d$ -osi?

Koje su vrednosti parametra regulatora brzine?

Da li postoji filter u povratnoj sprezi po brzini?

**4) Rad u režimu brzinske regulacije**

Uneti zapažanja u vezi vežbe:

**5) Revers pogona**



**6) Opterećivanje motora**

Da li postoji greška brzine u ustaljenom stanju?

Šta se može reći za prelazni proces na osnovu vremenskih dijagrama brzine i struje po  $q$ -osi?

Merene veličine:

$U_d$ [V]	$U_q$ [V]	$I_d$ [A]	$I_q$ [A]	$n$ [o/min]	$f$ [Hz]	$M_e$ [Nm]
R1732[0]	R1733[0]	R29	R30	R21	R24	R31

Izračunate veličine

$$T_r = \frac{L'_r}{R'_r} = \frac{M + \lambda'_r}{R'_r} = \text{_____} \text{ [s]}$$

$$\frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M^2}{L'_r} = \text{_____} \text{ [H]}$$

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \frac{M^2}{L'_r} \cdot I_{qs} \cdot I_{ds} \text{ [Nm]} \quad (1)$$

$$\text{I način: } \omega_r = \frac{1}{T_r} \cdot \frac{I_{qs}}{I_{ds}} \text{ [rad/s]} \quad (2)$$

$$\text{II način: } \omega_r = 2 \cdot \pi \cdot f - P \cdot n \cdot \frac{\pi}{30} \text{ [rad/s]} \quad (3)$$

Izračunato			
$M_{eref}$ [Nm]	$M_e$ [Nm]	$\omega_r$ [rad/s]	$\omega_r$ [rad/s]
R79	(1)	(2)	(3)

Komentar:

**7) Upravljanje bez davača na vratilu motora**

Koje su prednosti ovakvog načina upravljanja, a koje su mane?