

MODEL POGONA ASINHRONI MOTOR - STRUJNI INVERTOR
 PRILAGODJEN ANALIZI UPRAVLJAČKIH ALGORITAMA

Dr Borislav I. Jeftenić

THE DRIVING MODEL INDUCTION MOTOR - CURRENT SOURCE
 INVERTER ADAPTED TO THE ANALYSIS OF CONTROLLING ALGORITHMS

Rezime Jedan od osnovnih problema kod projektovanja i primene regulisanih elektromotornih pogona sa trofaznim asinhronim motorom i strujnim invertorom je upravljanje. Da bi se u potpunosti iskoristile dobre osobine ovakvih pogona neophodno je rešiti dva zadatka, izabrati odgovarajuću strukturu i odrediti adekvatne parametre upravljačkog sistema.

U prvom delu rada izveden je matematički model ovoga pogona, koji je pogodan za simulaciju na računaru, a prilagodjen je rešavanju navedenih zadataka. Drugi deo rada prikazuje primenu modela u postupku strukturne i parametarske sinteze jednog složenog regulacionog sistema, uključujući i sintezu odgovarajućeg observera.

Synopsis One of fundamental problems in designing and applying regulated drives with a induction motor and a current inverter is the controll. In order to use in full good features of such drives it is indispensable to solve two tasks, select the corresponding structure and determine the adequate parametres of the controlling system.

In the first part of the paper the matematical model of this drive was executed, suitable for the simulation on the computer, and it is adapted to the solution of the mentioned tasks. The second part of the paper shows the application of the model in the structural and parametrical synthesis of a complex regulated system, including the synthesis of the coresponding observer.

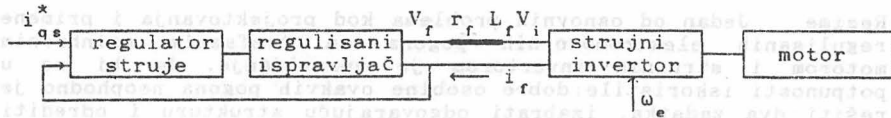
1. Uvod Značajne karakteristike regulisanog pogona sa asinhronim motorom i strujnim invertorom, koje ga čine interesantnim za primenu, su robusnost i mogućnost četvorokvadrantnog rada. Iskorišćenje navedenih osobina, uz ostvarivanje odgovarajućih dinamičkih karakteristika pogona i ekonomične eksploatacije motora, što je naročito značajno kod pogona većih snaga, moguće je samo uz primenu vrlo složenih sistema upravljanja, bilo da se radi o parametarskoj sinezi regulacionog sistema sa nekom od poznatih struktura, ili da se radi o strukturnoj i parametarskoj sintezi novog regulatora, mora se početi od složenog modela pogona. Složenost modela ogleda se pre svega u njegovom visokom redu i nelinearnosti.

Zbog rečenog, neophodno je u postupku sinteze regulacionog sistema raspolagati pogodnim modelom pogona za

Dr Borislav I. Jeftenić; ETF- Beograd, Bul Revolucije 73.

simulaciju u vremenu. Model koji će biti prikazan u ovome radu, prilagodjen je primeni na digitalnom računaru, a uz korišćenje nekog od standardnih simulacionih programa.

2. Model pogona Osnovna struktura pogona, objekta upravljanja koji se modeluje prikazana je na slici 1.



Slika 1.

S obzirom na namenu modela mogu se zanemariti viši harmonici struje invertora i gubitci u gvozdju motora. Takodje, usvojicemo kod modelovanja motora dq-sistem koji rotira sinhronom brzinom, pri čemu je struja statora u fazi sa q-osom ($i_{ds}=0$). Sada se mogu napisati poznate normalizovane jednačine koje opisuju posmatrani sistem [1,2,3]:

$$p \begin{bmatrix} x_s + x'_r & x_m & 0 \\ x_m & x'_r & 0 \\ 0 & 0 & x'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_s + r'_r) & 0 & -\omega_e x_m \\ 0 & -r'_r & -\omega_s x'_m \\ \omega_s x_m & \omega_s x'_m & -r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$m_e = x_m i'_{dr} i_{qs} \quad (2)$$

$$m_e = m + 2H\omega_b^2 p \omega_r \quad (3)$$

gde je, pri vezi motora u trougao:

$$i'_r = i_{qs} = 2i_f / \pi; \quad V'_f = \pi V_f / 3; \quad V'_f = V'_f + (r'_f + p x'_f) i_{qs}; \quad r'_f = \pi^2 r_f / 6;$$

$$x'_r = \pi^2 x_f / 6; \quad x_f = \omega_b L_f; \quad x_s = x_m + x_{ys}; \quad x'_r = x_m + x'_{yr}.$$

Neophodno je uvesti i nelinearnu relaciju:

$$x_m = f(i_m) \quad (4)$$

$$i_m = \sqrt{(i_{qs} + i'_{qr})^2 + i'_{dr}{}^2} \quad (5)$$

Modelovanje pomoću datog sistema jednačina je moguće, međjutim, struktura diferencijalne jednačine (1) je nepovoljna za iterativni postupak integracije jer zahteva vrlo mali korak integracije, što znatno povećava potrebno računarsko vreme. Ako se kao promenljive stanja, umesto struja, koristi tzv. "fluks po sekundi" [4], može se uz korišćenje relacije (6) dobiti novi sistem diferencijalnih jednačina (7), koji je mnogo pogodniji za numeričko rešavanje od sistema (1). Za dalji rad potrebno je

izvršiti transformaciju jednačine (6) u jednačinu (8).

$$\begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{gr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s + x'_f & x_m & 0 \\ x_m & x'_r & 0 \\ 0 & 0 & x'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$p \begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{gr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\omega_e x_m / x'_r \\ 0 & 0 & -\omega_e s l \\ 0 & \omega_e s l & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{gr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_s + r'_f & 0 & 0 \\ 0 & r'_r & 0 \\ 0 & 0 & r'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V'_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} -x'_r & 0 & 0 \\ -x_m & x_s + x'_f & 0 \\ 0 & 0 & D/x'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{gr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

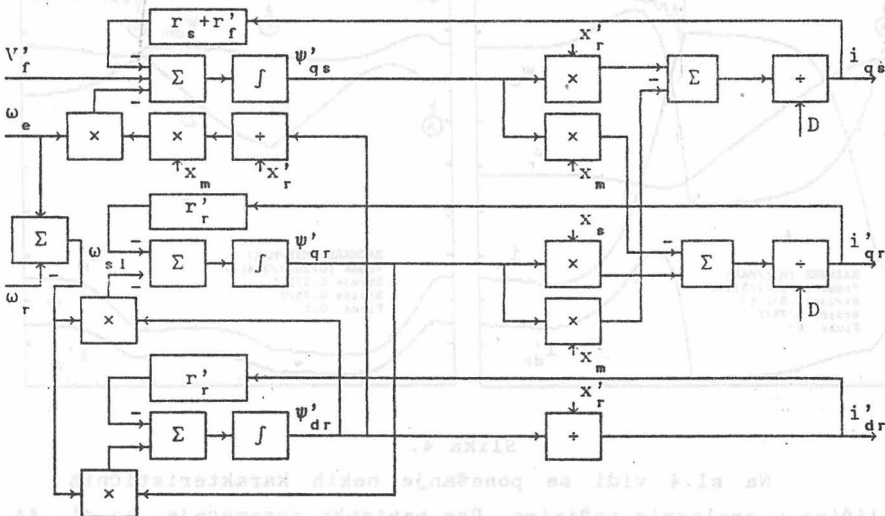
$$D = (x_s + x'_f)x'_r - x_m^2 \quad (9)$$

Da bi se model približio realnom objektu potrebno je sračunati napon statora motora, jer je u praksi to lako dostupna veličina. U tom cilju treba koristiti jednačnu (10) i (11)[4].

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & \omega_e x_m / x'_r \\ -\omega_e & p x_m / x'_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_s \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} \quad (10)$$

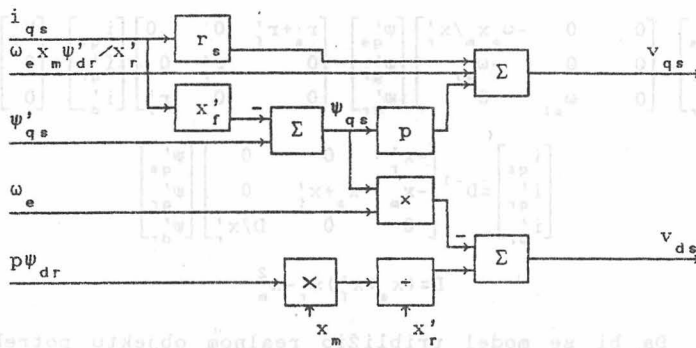
$$\psi_{qs} = \psi'_{qs} - x'_f i_{qs} \quad (11)$$

3. Blok-dijagram modela pogona Ovde će biti prikazani blok - dijagrami karakterističnih delova modela, prilagodjeni postavljanju na računaru. Opšte poznati delovi modela, jednačine



Slika 2.

(2), (3), (4) i (5) i regulator struje (sl.1.), neće biti posebno razmatrani. Na slici 2 prikazan je blok dijagram modela opisan jednačinama (7) i (8). Jednačine (10) i (11) mogu se grafički predstaviti dijagramom na slici 3.

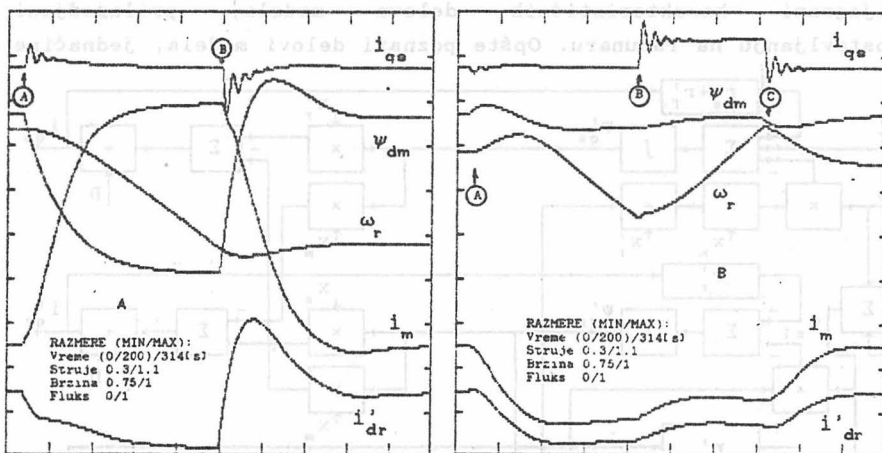


Slika 3.

4. Rezultati simulacije Podaci o pogonu čiji je rad simuliran dati su na kraju rada. Prilikom simulacije uvedena je pozitivna povratna sprega po brzini, tako da se dobija:

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl}^* \quad (12)$$

Upravljački ulazi u sistem su sada struja $i_d^* = i_{qs}^*$ i kružna učestanost klizanja (rotora) ω_{sl}^* .



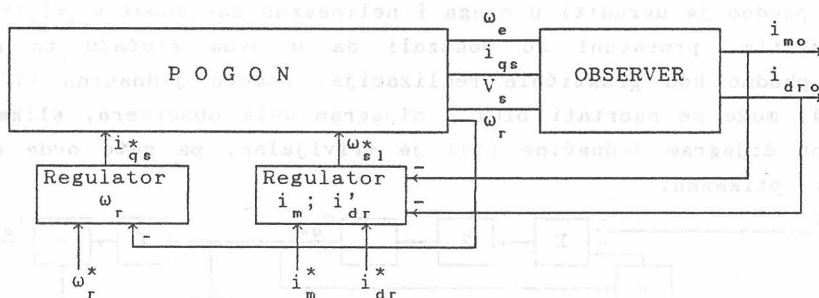
Slika 4.

Na sl.4 vidi se ponašanje nekih karakterističnih veličina u prelaznim režimima. Pre nastanka poremećaja, na sl. 4A

motor je radio u nominalnom radnom režimu, zatim je smanjena vrednost upravljačke veličine ω_{s1}^* , trenutak A. U trenutku B upravljačka veličina ω_{s1}^* vraćena je na nominalnu vrednost. Uočava se da je struja i_{qs} približno stalna, što je posledica delovanja regulatora struje. Međutim, očigledan je veliki porast struje magnećenja i_m , što dovodi motor u režim dubokog zasićenja. Takodje, može se uočiti značajno smanjenje zajedničkog fluksa po d-osi ($\psi_{dm} = x_m i'_{dr}$), što ima za posledicu smanjenje momenta motora, jednačina (2), a time i brzine. Na slici 4B prikazan je prelazni režim koji nastaje kada se u nominalnom radnom režimu poveća kružna učestanost klizanja - trenutak A. U trenutku B povećana je referentna vrednost i_{qs}^* , a u trenutku C vrednosti upravljačkih veličina vraćene su na nominalne vrednosti.

5. Sinteza regulacionog sistema sa održanjem stalnog fluksa ψ_{dm} Na osnovu rezultata simulacija iz predhodnog odeljka može se zaključiti da bi se pogonom sa asinhronim motorom i strujnim inverterom moglo upravljati preko struje i_{qs} , odnosno i_r , ako bi se pri tome fluks ψ_{dm} održavao na približno stalnoj vrednosti. Slična ideja primenjuje se kod sistema "vektorskog upravljanja".

U cilju ekonomične eksploatacije motora, a s obzirom da je $\psi_{dm} = x_m i'_{dr}$, moraju se održavati i_m i i'_{dr} na približno nominalnim vrednostima. Kako ni jedna ni druga veličina nisu pristupačne za merenje, mora se koristiti observer u sklopu regulacionog sistema. Blok dijagram ovakvog sistema prikazan je na slici 5.



Slika 5.

6. Observer Lako merljive veličine u pogonu su, struja jednosmernog medjukola $i'_r = i_{qs}$, kružna učestanost invertora ω_e , i napon statora motora, odnosno njegove komponente v_{qs} i v_{ds} . Polazeći od jednačine (10) i zamenjujući $\psi'_{dr} = x'_r \psi_{dm} / x_m$, dobijaju

se jednačine stanja observera (13), (14) i (15).

$$p \begin{bmatrix} \psi_{qso} \\ \psi_{dro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qso} \\ \psi_{dro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_s & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qro} \\ V_{ds}^{qs} \\ V_{ds}^{qs} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qro} \\ i_{dro} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/x_m & \\ 0 & 1/x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qso} \\ \psi_{dro} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -x_s/x_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ V_{ds}^{qs} \\ V_{ds}^{qs} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$i_{mo} = \sqrt{(i_{qs} + i_{qro})^2 + i_{dro}^2} \quad (15)$$

Očigledno je da su sopstvene vrednosti observera $\lambda_{0,2} = \pm j\omega_e$, što ga čini praktično neupotrebljivim. Međutim, ako izaberemo sopstvene vrednosti observera tako da im je moduo zanatno veći nego kod sopstvenih vrednosti sistem ($\lambda_{01} = -2\omega_e$; $\lambda_{02} = -3\omega_e$), naravno uz obaveznu stabilnost, može se odrediti diferencijalna jednačina stanja novog observera, polazeći od uslova da su u stacionarnom stanju jednake vrednosti promenljivih stanja oba observera, tj.:

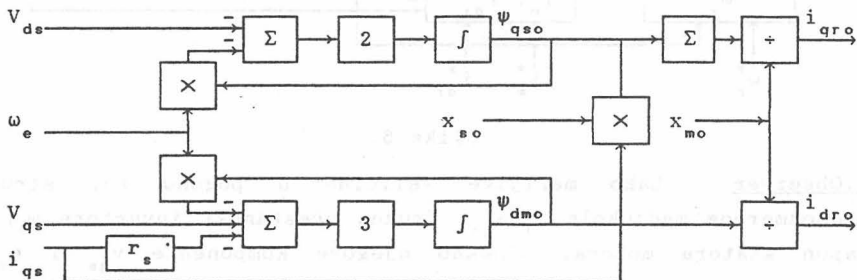
$$B_{on} = A_{on} A_o^{-1} B_o \quad (16)$$

Sada se dobija za novi observer:

$$A_{on} = \begin{bmatrix} -2\omega_e & 0 \\ 0 & -3\omega_e \end{bmatrix} \quad B_{on} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -2 \\ -3r_s & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

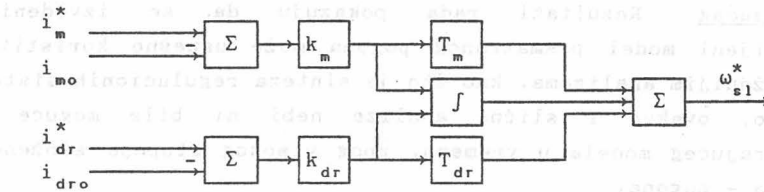
Takodje, važe i jednačine (14) i (15).

U cilju obezbedjenja visoke tačnosti observera neophodno je ugraditi u njega i nelinearnu zavisnost $x_{mo} = f(i_{mo})$. Međutim, proračuni su pokazali da u ovom slučaju to nije neophodno kod praktičnih realizacija. Pomoću jednačina (17) i (14) može se nacrtati blok - dijagram dela observera, slika 6. Blok dijagram jednačine (15) je trivijalan, pa zato ovde neće biti prikazan.



Slika 6.

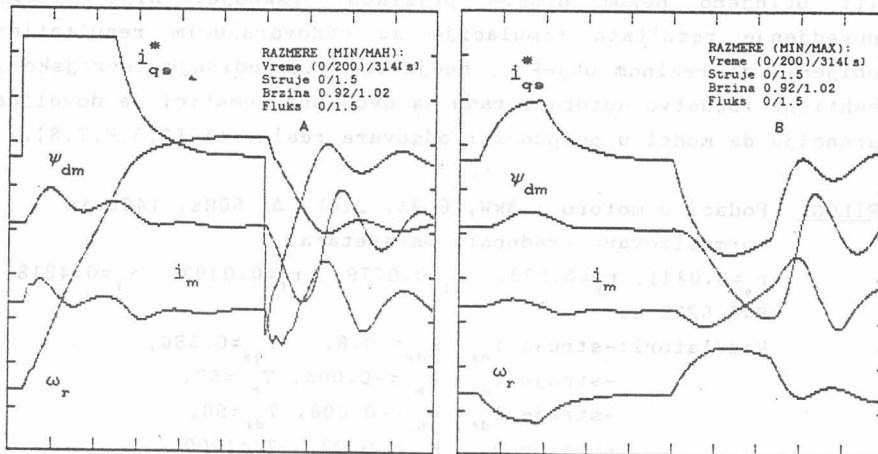
7.Regulatori Regulator brzine sa slike 5 je klasičan PI - regulator. Medjutim, za regulator struja i_m i i'_{dr} mora se upotrebiti "dvostruki" PI - regulator. Ako su pojačanje i vremenska konstanta regulatora struje i_m k_{im} i T_{im} , a regulatora struje i'_{dr} k_{dr} i T_{dr} , onda se blok dijagram ovoga regulatora može predstaviti slikom 7.



Slika 7.

Parametarska sinteza regulatora, u prvoj iteraciji, izvedena je metodom "root locus", uz korišćenje linearizovanog modela pogona, a zatim su vršene korekcije uz korišćenje modela kompletnog sistema.

8.Rezultati simulacije Na slici 8A prikazane su karakteristične veličine u pogonu pri promeni referentne vrednosti brzine, pri povećanju i smanjenju. Dok su na slici 8B prikazani prelazni režimi pri kratkotrajnom povećanju, a zatim kratkotrajnom smanjenju opterećenja pogona.



Slika 8.

Na slici 8 se vidi da fluks ψ_{dm} zadržava stalnu vrednost, osim u prelaznim režimima, gde su neminovna manja odstupanja. Takodje, uočava se ulaz referentne struje i_{qs}^* u limit, koji mora da postoji kod svih pogona, naročito većih snaga. Medjutim, zahvaljujući pozitivnoj povratnoj sprezi po brzini pogon uspešno radi u ovakvim režimima [3].

9. Zaključak Rezultati rada pokazuju da se izvedeni i postavljeni model posmatranog pogona može uspešno koristiti u najslabijim analizama, kao što je sinteza regulacionih sistema. Zapravo, ovakve i slične analize nebi ni bile moguće bez odgovarajućeg modela u vremenu, zbog visokog stupnja složenosti objekta - pogona.

Prikazani algoritam upravljanja pogodan je za primenu kod pogona većih snaga, u teškim radnim režimima. Pomoću njega moguće je obezbediti ekonomičan radni režim motora kontrolom fluksa, a postignuta dinamika može se smatrati dobrom za ovu klasu pogona. Takodje, značajno je naglasiti da ovaj pogon dobro podnosi preopterećenja, odnosno, rad na definisanoj granici mogućeg opterećenja. Osnovni nedostatak ovoga regulacionog sistema je velika složenost, zbog toga je njegova primena opravdana samo, u slučajevima gde se realizacija regulatora vrši pomoću procesora, odnosno računara, naprimer 32-bitnih uz korišćenje programskih jezika višeg nivoa.

U radu nisu razmatrani generatorski režimi rada, što će biti učinjeno nekom drugom prilikom. Takodje, nije vršeno uporedjenje rezultata simulacije sa odgovarajućim rezultatima dobijenim na realnom objektu, medjutim, višegodišnje teorijsko i praktično iskustvo autora u radu na ovoj problematici je dovoljna garancija da model u potpunosti odgovara realnosti [3,5,6,7,8].

PRILOG: Podaci o motoru : 3kW, 6,3A, 220V, Δ , 50Hz, 1400min⁻¹.

Normalizovane vrednosti parametara:

$r_s=0.0441$, $r_r'=0.073$, $x_l=0.0779$, $r_f=0.0493$, $x_f=0.4218$,
 $H=0.6229$ s.

Regulatori:-struje i_{qs} $k_{qs} = 0.8$, $T_{qs}=0.386$,
 -struje i_m $k_m = -0.006$, $T_m = 50$,
 -struje i_{dr} $k_{dr} = -0.006$, $T_{dr} = 50$,
 -brzine ω_r $k_r = 0.03$, $T_r = 1000$.

Bazne vrednosti : $I_b=8.77A$, $V_b=311V$, $Z_b=35.5\Omega$, $\omega_b=314s$.

NAPOMENA: Koristi se vreme $t_{relativno} = 314 \cdot t_{stvarno}$.

KORIŠĆENE OZNAKE:

V, v	-napon	I, i	-struja
x	-reaktansa	r	-otpor
ω	-ugaona brzina	T	-vremenska konstanta
H	-vrem. kon. inercije	p	-operator (d/dt)
k	-pojaćanje	A, B	-matrice prenosa i ulaza

Indeksi:

q, d	-ose q i d	m	-magnećenja
s, r	-statora, rotora	b	-bazno
sl	-klizanja	e	-električna
f	-u jednosmernom kolu	i	-invertora
o	-observera	γ	-rasipanje

LITERATURA:

[1] E.P.Cornell, T.A.Lipo: "Modeling and Design of Controlled Current Induction Motor Drive Systems", IEEE Trans. on Ind. App. Vol. 13, No. 4, 1977.

[2] B.K.Bose: "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, New Jersey, 1986.

[3] B.I.Jeftenić: "Elektromotorni pogon sa trofaznim asinhronim motorom napajanim iz realnog strujnog izvora promenljive učestanosti sa istovremenom kontrolom napona i klizanja", Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1987.

[4] P.C.Krause: "Analysis of Electrical Machinery", McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.

[5] B.I.Jeftenić: "Regulisanje brzine obrtanja trofaznog asinhronog motora napajano iz strujnog pretvarača učestanosti kontrolisanjem klizanja", V Savetovanje Energetska elektronika, Ljubljana, 1984.

[6] B.I.Jeftenić: "The Simultaneous Control of Stator Voltage and Slip in Current Source Inverter Induction Motor Drive", Proc. of ICEM'86, Munchen, 1986, Part 3, pp.876.

[7] B.I.Jeftenić, M.D.Gvozdenović, Z.D.Nešić: "One Approach to the Selection of Parameters of the Speed Regulator in Current Source Inverter Induction Motor Drive", Electrical Drive Symposium "1987", Cagliari, Sep. 1987.

[8] B.I.Jeftenić, Z.M.Lazarević, "A Procedure for Decreasing the Order of the Model of Current Source Inverter Induction Motor Drive", Proc. of ICEM'88, Pisa, Italy, 1988.