

ANALIZA SPEKTRA STRUJE STATORA KAVEZNE ASINHRONE MAŠINE PRI DEFEKTU ŠTAPA ROTORA

Jakša Riger, Gojko Joksimović***

Ključne riječi: kavezna asinhrona mašina, model mnogostruko spregnutih kola, analiza spektra struje statora

Sažetak: U radu je opisan model asinhronog motora sa kaveznim rotorom, pogodan za simulaciju normalnog radnog režima i režima kvara pri defektu štapa rotora, kao i dijagnostikovanje kvara analizom spektra struje statora. Na izlazu iz modela moguće je dobiti vremenske promjene struja statora i ostalih električnih i mehaničkih veličina, koje su od važnosti za rad motora. Analizom u frekvencijskom domenu može se analizirati stanje mašine, tj. detektovati postojanje nepravilnosti u slučaju loma štapa rotora i drugih kvarova koji mogu nastati prilikom rada mašine. Induktivnosti namotaja statora i petlji rotora, kao i njihove međusobne induktivnosti, izračunate su korišćenjem koncepta funkcije namotaja. Izvedena je i analiza talasa magnetne indukcije u vazдушnom procjepu mašine. Rezultati numeričkog modela u saglasnosti su sa onim koji su predviđeni korišćenjem analitičkog postupka.

1. UVOD

Asinhrona mašine predstavljaju najčešće upotrebljavane mašine u industriji danas. To su najčešće mašine malih i srednjih snaga, koje se obično prave u velikim serijama. Asinhrona mašine imaju brojne prednosti u odnosu na ostale mašine, a najznačajnije su: niža cijena, jednostavnost konstrukcije, niži moment inercije, pouzdanost, sigurnost u radu, lako održavanje, robusnost. Nedostaci asinhronih mašina vezani su za mogućnosti njihovog pokretanja i regulacije brzine u širokim opsezima, ali se i oni prevazilaze razvojem energetske elektronike i kompjuterskog upravljanja, te se danas asinhrona mašine koriste i u vrlo zahtjevnim pogonima.

Tokom vremena rada, asinhrona mašina je izložena različitim uticajima, koji neumitno, prije ili kasnije, dovode do pojave kvara, [1]. Najčešći uzroci kvarova asinhronih mašina su izloženost različitim uticajima iz okruženja, nepravilna upotreba, intermitentni režimi, kao i defekti pri izradi same mašine, [1,2]. Problem dijagnostikovanja kvarova u suštini je

* Spec. sci Jakša Riger

** Prof. dr Gojko Joksimović, Elektrotehnički fakultet Podgorica, Džordža Vašingtona b.b. 81000 Podgorica.

povezan sa održavanjem, te su stoga preventivno održavanje, održavanje na osnovu praćenja parametara, permanentno praćenje podataka tokom pogona i sistemi za detekciju kvarova pitanja od rastućeg značaja u tehničkoj praksi, [3]. Rana detekcija kvarova, koja se obezbeđuje adekvatnim monitoring sistemom i kvalitetnim šemama za otkrivanje kvarova, omogućava sprečavanje kaskadnih ispada, smanjuje cijenu remonta, a utiče i na povećanje vremena raspoloživosti same mašine, [1]. U posljednje vrijeme razvijeno je dosta tehnika za praćenje rada mašina i otkrivanje kvarova. Jedna od njih, koja će biti prezentovana u ovom radu, je analiza spektra struje statora (Motor Current Signature Analysis - MCSA). Ova neinvazivna dijagnostička tehnika bazira se na pojavi određenih komponenti u spektru struje statora, koje nedvosmisleno ukazuju na postojanje, vrstu i intenzitet kvara u mašini, [4]. Spektar struje statora, u neku ruku, predstavlja elektrokardiogram električne mašine. Da bi se izveli korektni zaključci o promjenama spektra tokom režima kvara potrebno je poznavati spektar zdrave mašine. To je omogućeno moćnim matematičkim modelom, koji omogućava numeričko modelovanje procesa uzimajući u obzir egzaktnu geometrijsku prezentaciju same mašine, [5].

Defekt štapova rotora je jedan od učestalijih kvarova u periodu eksploatacije asinhrono mašine. Ovaj kvar može nastati uslijed termalnih, dinamičkih, magnetskih ili mehaničkih naprezanja, kao posljedica intermitentnih režima rada ili nesavršenosti u izradi same mašine. Režim rada sa defektom štapova rotora ne izaziva značajnije probleme u industrijskom okruženju, jer mašina može da nastavi da radi, uz neznajno narušavanje njenih performansi. Nepovoljnost ovog režima je u činjenici da dovodi do preraspodjele struja unutar kaveza, što uzrokuje povećana strujna, a samim tim i termička naprezanja, čime se povećava mogućnost multiplikacije kvara, [2].

U ovom radu je opisan model asinhrono mašine sa kaveznom rotorom, pogodan za modelovanje rada zdrave mašine, kao i mašine sa defektom štapova rotora. Na izlazu iz ovog modela moguće je dobiti vremenske promjene struja statora i ostalih električnih i mehaničkih veličina bitnih za rad mašine. Struja statora se zatim brzom Furijeovom transformacijom (FFT) prevodi u frekventni domen. Analizom spektra mogu se izvesti zaključci o stanju same mašine, tj. o postojanju defektnih štapova rotora, ali i ostalih mogućih kvarova u radu mašine.

2. MATEMATIČKI MODEL I NJEGOVO RJEŠAVANJE

Asinhrona mašina sa kaveznom rotorom može se opisati sledećim sistemom jednačina u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} [U_s] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_s] & [0] \\ [0] & [R_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} [\Psi_s] \\ [\Psi_r] \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} [\Psi_s] \\ [\Psi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (2)$$

pri čemu je $[U_s]$ vektor napona na statoru, $[R_s]$ i $[R_r]$ matrice otpornosti namotaja statora i kaveza rotora, $[I_s]$ i $[I_r]$ vektori struja statora i rotora, a $[\Psi_s]$ i $[\Psi_r]$ fluksevi magnetskog obuhvatanja statora i rotora.

Jednačina koja opisuje mehaničko kretanje rotora data je izrazom:

$$M_{em} - M_{opt} = J \frac{\partial w_r}{\partial t} \quad (3)$$

gdje su M_{em} i M_{opt} razvijeni elektromagnetski i moment opterećenja mašine, J ukupni moment inercije mašine, a w_r ugaona brzina rotora. Ugaona brzina se može izračunati kao:

$$w_r = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4)$$

pri čemu je θ mehanički ugao koji opisuje položaj rotora u koordinatnom sistemu vezanom za stator.

Razvijeni elektromagnetski moment se može odrediti kao:

$$M_{em} = [I_s]^T \frac{\partial [L_{sr}]}{\partial \theta} [I_r] \quad (5)$$

Osnovni parametri svakog modela asinhronne mašine su induktivnosti. One će biti određene korišćenjem pojma funkcije namotaja. Prvo, potrebno je definisati funkciju broja navojaka (turns funkciju). Ona se, u matematičkom smislu, definiše na sljedeći način:

$$n(\theta) = \begin{cases} N_n, & \text{za } \theta_1 < \theta < \theta_2 \\ 0, & \text{za ostalo } \theta \end{cases} \quad (6)$$

pri čemu je N_n broj navojaka u navojnoj grupi, a θ_1 i θ_2 mehanički uglovi koji definišu položaj navojne grupe. Na osnovu funkcije broja navojaka određuje se funkcija namotaja (winding funkcija), koja se u matematičkom smislu može prikazati kao:

$$N(\theta) = n(\theta) - \langle n(\theta) \rangle \quad (7)$$

pri čemu je $n(\theta)$ funkcija broja navojaka, a $\langle n(\theta) \rangle$ njena srednja vrijednost.

Na osnovu prethodno definisanih funkcija namotaja, induktivnosti faza statora, petlji rotora, kao i međusobne induktivnosti između faznih namotaja statora i petlji rotora računaju se kao:

$$L_{AB} = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_a(\theta) N_b(\theta) d\theta \quad (8)$$

pri čemu su $N_a(\theta)$ i $N_b(\theta)$ funkcije namotaja faza statora ili petlji rotora, μ_0 je magnetska permeabilnost vazdušnog procjepa, r predstavlja srednji poluprečnik vazdušnog procjepa, l efektivnu dužinu paketa statora, a g efektivna dužina vazdušnog procjepa.

Matematički model prezentovan relacijama (1) i (2) u potpunosti opisuje rad simetrične asinhrono mašine. Kako to predstavlja idealni slučaj, potrebno je uvesti određene modifikacije datih relacija. Potrebno je uvesti linijske napone kao promjenljive sistema umjesto faznih, jer su fazni naponi u praksi najčešće nepoznati. Takođe, potrebno je eksplicitno obezbjediti uslov da je zbir struja statora i rotora jednak nuli. Navedene činjenice prikazane su sljedećim relacijama:

$$[U_{smod}] = [R_{smod}][I_s] + \frac{\partial[\Psi_{smod}]}{\partial t} \quad (9)$$

$$[\Psi_{smod}] = [L_{ssmod}][I_s] + [L_{srmod}][I_r] \quad (10)$$

Modifikovane matrice sistema prikazane su sljedećim relacijama:

$$[U_{smod}] = [U_{sl}] = \begin{bmatrix} U_a - U_b \\ U_b - U_c \\ U_c - U_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$[R_{smod}] = \begin{bmatrix} R_a & -R_b & 0 \\ 0 & R_b & -R_c \\ -R_a & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[L_{ssmod}] = \begin{bmatrix} L_{aa} - L_{ba} & L_{ab} - L_{bb} & L_{ac} - L_{bc} \\ L_{ba} - L_{ca} & L_{bb} - L_{cb} & L_{bc} - L_{cc} \\ L_{ca} - L_{aa} & L_{cb} - L_{ab} & L_{cc} - L_{ac} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[L_{srmod}] = \begin{bmatrix} L_{1r} \\ L_{2r} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Modelovanje defekta štapa rotora biće uzeto u obzir povećanjem vrijednosti otpornosti određenih štapova rotora, kao što je slučaj i u realnoj mašini.

Nakon uvažavanja navedenih modifikacija, prezentirani model se može rješavati numeričkim tehnikama. Algoritam kojim se riješava sistem je iterativan i ponavlja se u nekoliko koraka:

- 1) Određivanje konstantnih i vremenski nezavisnih parametara mašine. Takvi su matrice otpornosti statora i rotora $[R_s]$ i $[R_r]$, kao i matrice induktivnosti $[L_{ss}]$ i $[L_{rr}]$, jer se radi o mašini sa konstantni vazdušnim procjepom;
- 2) Određivanje međusobne induktivnosti faza statora i petlji rotora $[L_{sr}(\theta)]$, kao i matrice prvih izvoda ove zavisnosti;

- 3) Definisanje početnih uslova: $[\Psi_s(0)], [\Psi_r(0)], w(0), [I_r(0)], [I_s(0)]$;
- 4) Definisanje koraka integracije i postavljanje brojača na jedinicu;
- 5) Definisanje linijskih napona i učitavanje njihovih vrijednosti;
- 6) Izračunavanje flukseva magnetnih obuhvatanja, struja statora i rotora, momenta, ugaone brzine i ostvarenog mehaničkog ugla, koristeći odgovarajuću iterativnu proceduru;
- 7) Ponavljanje koraka 2) i 6) do isteka vremena simulacije;

3. ANALIZA TALASA MAGNETSKE INDUKCIJE U VAZDUŠNOM PROCJEPU

Simetrično izveden i postavljen trofazni namotaj napajan trofaznim sistemom simetričnih napona prouzrokuje simetrično magnetsko polje. Uslijed postavljanja namotaja u žljebove, magnetomotorna sila duž obima statora je stepeničastog oblika, te se pored osnovnog harmonika magnetomotorne sile javljaju i viši harmonični članovi. Ovi članovi su reda:

$$v = 6g + 1, \quad g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (15)$$

pri čemu je v red višeg harmonika. Pored petog i sedmog harmonika koji najbolje popunjavaju razliku između stvarnog i trapezoidnog oblika magnetomotorne sile, javljaju se i viši harmonici reda $S/p \pm 1$ poznati kao statorovi žljebni harmonici.

Izraz za magnetomotornu silu namotaja statora u vazдушnom procjepu je:

$$F(t, \theta_s) = F_{vmax} \cos(\omega t - v p \theta_s) \quad (16)$$

te uslijed konstantne permeanse vazdušnog procjepa talasi magnetne indukcije u vazдушnom procjepu poprimaju oblik:

$$B(t, \theta_s) = B_{vmax} \cos(\omega t - v p \theta_s) \quad (17)$$

Kavezni rotor reaguje na talase magnetomotorne sile statora serijom talasa magnetomotorne sile datih sljedećim izrazima:

$$M_1 = M_{1m} \cos(s_v \omega t - v p \theta_r) \quad (18)$$

$$M_2 = M_{2m} \cos\left(s_v \omega t + \left(\frac{\lambda R}{p} - v\right) p \theta_r\right) \quad (19)$$

$$M_3 = M_{3m} \cos\left(s_v \omega t - \left(\frac{\lambda R}{p} + v\right) p \theta_r\right) \quad (20)$$

pri čemu je:

$$s_v = 1 - v(1 - s) \quad (21)$$

Prvi talas predstavlja reakciju armature, dok se druga dva talasa pripisuju pojavi rotorovih žljebnih harmonika. Oni zavise od klizanja asinhronne mašine i javljaju se na frekvencijama:

$$\text{viši rotorski žljebni harmonik: } f_{Rv} = \left(1 + \frac{\lambda R}{p}(1-s)\right) f_1 \quad (22)$$

$$\text{niži rotorski žljebni harmonik: } f_{Rn} = \left(1 - \frac{\lambda R}{p}(1-s)\right) f_1 \quad (23)$$

Usljed defekta štapa rotora, pored navedenih komponenti spektra, mogu se javiti i harmonični članovi na frekvencijama određenim sljedećom relacijom, [2]:

$$f_d = \left(s - \frac{\mu}{p}(1-s)\right) f_1 \quad (24)$$

pri čemu je:

$$\mu = (6k + 1)p, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (25)$$

Uvrštavajući različite vrijednosti koeficijenta μ u relaciju (24) dobija se da su frekvencije na kojima se mogu javiti harmonične komponente u spektru struje statora sljedeće:

$$f_{d1} = (1 - 2s)f_1 \quad (26)$$

$$f_{d2} = (5 - 4s)f_1 \quad (27)$$

$$f_{d3} = (5 - 6s)f_1 \quad (28)$$

$$f_{d4} = (7 - 6s)f_1 \quad (29)$$

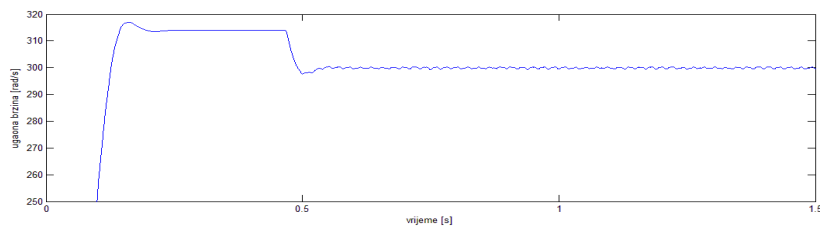
$$f_{d5} = (7 - 8s)f_1 \quad (30)$$

itd.

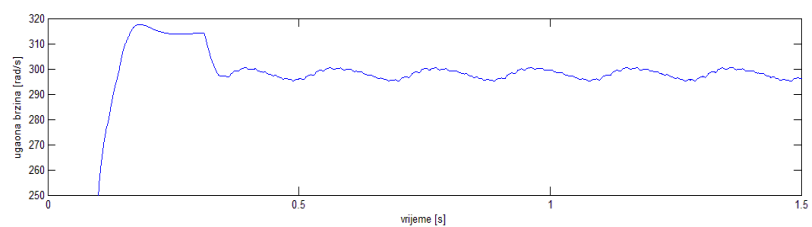
Takođe, u spektru struje statora, može se javiti i komponenta na frekvenciji $f_2 = (1 + 2s)f_1$, koja je posljedica pulsacija brzine u režimu rada sa defektom štapa rotora.

4.REZULTATI I DISKUSIJA

Na mašini čiji su podaci dati u dodatku izvršen je numerički eksperiment. Nakon realizacije opisanog iterativnog postupka u programskom paketu MATLAB, dobijene su vremenske zavisnosti ugaone brzine, elektromagnetskog momenta, struja rotora i statora mašine sa zdravim rotorom i defektom štapa rotora, prikazane na sljedećim slikama.

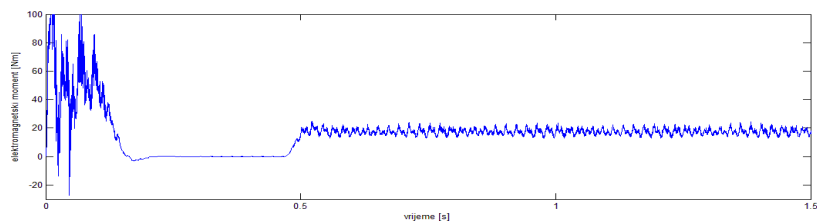


a)

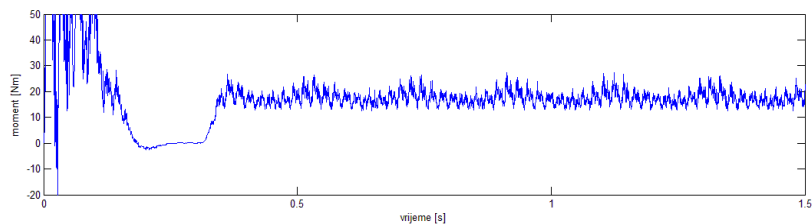


b)

Slika 1. Ugaona brzina modelirane mašine: a) zdrav rotor b) sa defektom štapa rotora

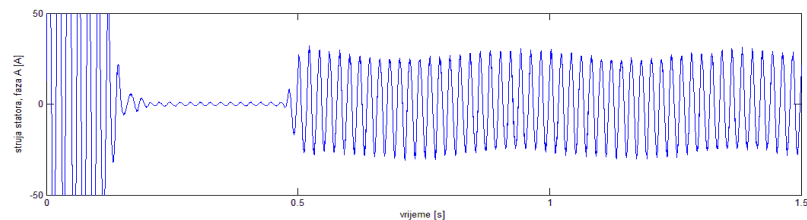


a)

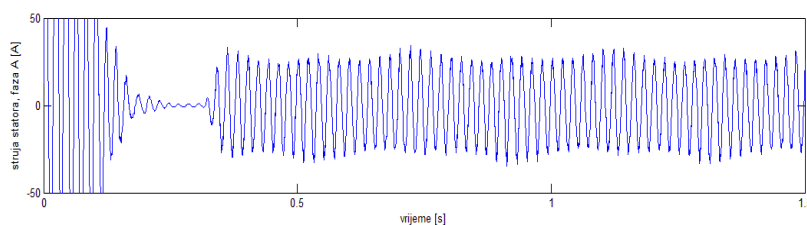


b)

Slika 2. Ostvareni moment modelirane mašine: a) zdrav rotor b) sa defektom štapa rotora



a)

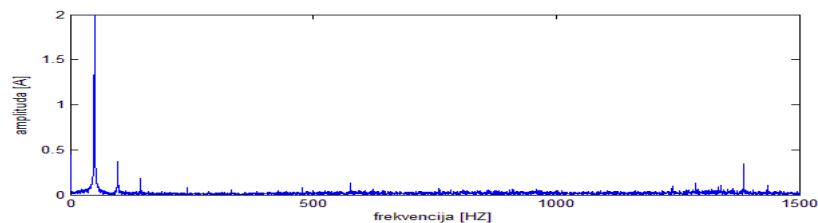


b)

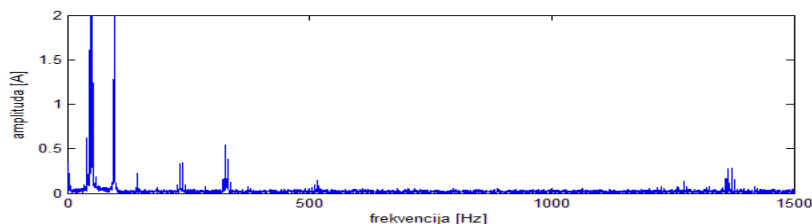
Slika 3. Struja statora modelirane mašine, faza A: a) zdrav rotor b) sa defektom štapa rotora

Prethodne slike jasno oslikavaju pretpostavljena stanja o ponašanju mašine pri defektu štapa rotora. Jasno se vidi da dolazi do blagih odstupanja u mehaničkim veličinama modelirane mašine (ugaona brzina i ostvareni elektromagnetni moment), dok se struja statora blago mijenja, što je posebno uočljivo u toku prelaznog procesa.

Vremenske promjene struje statora u ustaljenom stanju transformisane u frekventni domen korišćenjem brze Furijeove transformacije (FFT) rezultiraju sljedećim graficima:



a)



b)

Slika 4. Spektar struje statora modelirane mašine, faza A: a) zdrav rotor b) sa defektom štapa rotora

U spektru struje statora zdrave mašine, pri klizanju $s=4.5\%$, javlja se, pored komponente struje osnovne učestanosti 50Hz i amplitude 26.3A, i viši rotorski žljebni harmonik, na frekvenciji 1375Hz, amplitude 0.4A. Spektar mašine sa defektom štapa rotora, pri klizanju $s=5.1\%$, posjeduje komponente pretpostavljene relacijama (26)-(30), na frekvencijama: 45Hz, 240Hz, 235Hz, 335Hz, 330Hz, respektivno. Komponenta koja se javlja uslijed pulsacija brzine, nalazi se na 55Hz.

5.ZAKLJUČAK

U radu je prezentiran model mnogostruko spregnutih kola kavezne asinhronne mašine. Induktivnosti mašine proračunate su korišćenjem koncepta funkcije namotaja. Osnovna namjena modela je simulacija rada asinhronne mašine pri defektu štapa rotora, i dobijanje struje statora u vremenskom domenu, kako bi se ona mogla prevesti u frekventni domen korišćenjem brze Furijeove transformacije i izvršiti analiza dobijenog spektra. Analiziran je spektar struje ispravne mašine, kao i mašine sa defektom štapa rotora, i potvrđeno je postojanje analitički pretpostavljenih komponenti.

Dodatak

Podaci o mašini:

$$P_n=5.5\text{kW}, U_n=187\text{V}, f=50\text{Hz}, p=1, r=0.062\text{m}, l=0.125\text{m}, g=0.0004\text{m}.$$

Stator: $S=36$, 12 navojnih grupa po fazi, 6 navojnih grupa po paru polova, broj navojaka po navojnoj grupi $N_n=10$.

Rotor: $R=28$, otpornost štapa rotora $R_s=44.1 \cdot 10^{-6}\Omega$, otpornost defektnog štapa rotora $R_{sd}=500 \cdot 10^{-6}\Omega$ otpornost segmenta spojnog polja $R_s=0.255 \cdot 10^{-6}\Omega$, ugao iskošenja štapova rotora $2\pi/36$ rad.

Namotaj statora izveden je prema sljedećoj šemi:

$$A: 1-15'-2-16'-3-17'-4-18'-5-19'-6-20'-X$$

LITERATURA

- [1] T. Aroui, Y. Koubaa, A. Toumi: “*Magnetic coupled circuit modeling of induction machines oriented to diagnostics*”, Leonardo Journal of Sciences, vol.7, No. 13, pp 103-121, 2008.godine.
- [2] G. Joksimović: “*Analiza kvarova kaveznog indukcionog motora*”, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2001. godine.
- [3] A. Menacer, M.S. Nait – Said, H. Benakcha, S. Drid: “*Stator current analysis of incipient fault into asynchronous motor rotor bar using Fourier fast transform*”, Journal of Electrical Engineering, vol.55, No. 5-6, pp 122-130, 2004. godine.
- [4] M. Ammar, L. Abdesselam, B. Ahcen: “*On-line monitoring and diagnosis of broken rotor bars in induction motor*”, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, 2009. godine.
- [5] G. Joksimović, J. Riger, T. Wolbank, N. Perić, M. Vašak: “*Stator line current spectrum content of a healthy cage rotor induction machine*”, rad prihvaćen za prezentaciju na konferenciji SDEMPED 2011, Bolonja, 5.-8. Septembar.