



REGULACIJA BRZINE JEDNOSMERNOG MOTORA PRIMENOM VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA

Filip Kulić, Dragan Kukulj, Emil Levi*

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

**Liverpool John Moores University, Liverpool, England*

Sadržaj: U radu je ispitivana mogućnost primene veštačkih neuronskih mreža u projektovanju regulatora brzine jednosmernog motora. Projektovana je upravljačka struktura koja sadrži komponente za estimaciju i predikciju brzine motora, kao i estimaciju momenta opterećenja. Kao referentni sistem korišten je pogon sa optimalno podešenim konvencionalnim PI regulatorom. Navedeni pogoni su upoređivani kroz niz simulacija rada u različitim radnim režimima. Postignuti rezultati su pokazali da je moguće popraviti dinamičke performanse sistema uvođenjem upravljačkih struktura baziranih na primeni veštačkih neuronskih mreža.

Ključne reči: Jednosmerni motor, veštačke neuronske mreže, regulacija brzine

SPEED CONTROL OF THE DC MOTOR DRIVE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract: The paper investigates applicability of artificial neural networks in the design of a speed controller for DC motor drive. A sensorless drive system is analysed and a controller structure that includes a load torque observer, a speed estimator and a speed predictor is developed. These components as well as speed controller are based on feed-forward neural networks. A comparison is made with respect to the reference control structure with a conventional optimised PI controller. Detailed simulation study of a number of transients indicates that is possible to achieve high performances with neural networks based control structure.

Key words: Feed-forward Neural Network, Speed Controller, DC Motor Drive

1. UVOD

Konvencionalni regulatori bazirani na klasičnoj teoriji upravljanja su veoma pogodni za upravljanje linearnim procesima kod kojih su poznati tačni modeli. Većina fizičkih sistema sadrži u sebi nelinearne relacije veoma teške za modelovanje, a čak i u slučajevima kada je poznat dovoljno tačan model pojavljuje se problem određivanja tačnih vrednosti parametara sistema. U navedenim slučajevima kao pogodne se mogu pokazati upravljačke strukture bazirane na tehnikama veštačke inteligencije.

U poslednjoj deceniji veštačke neuronske mreže, kao jedna od tehnika veštačke inteligencije, privlače pažnju kao novi pristup u rešavanju različitih aspekata problema upravljanja dinamičkim sistemima kojim pripadaju i elektro-motori [1,2]. Najčešće korišteni tip neuronske mreže je višeslojni perceptron, odnosno, višeslojna statička neuronska mreža [3]. Za identifikaciju i upravljanje elektro-motorima je od posebnog značaja sposobnost višeslojnog perceptrona da vrši složena nelinearna preslikavanja i aproksimaciju široke klase nelinearnih funkcija [4]. Identifikacija i upravljanje elektromotorom pomoću višeslojnog perceptrona se ostvaruje putem postupka obuke sa nadzorom. Ovaj tip obuke se ostvaruje na osnovu parova ulazno/izlaznih uzoraka dobijenih merenjem ili simulacijom modela motora. Atraktivnost primene veštačkih neuronskih mreža (VNM) u problemima upravljanja se zasniva na: a) mogućnosti učenja, tj. podražavanja ponašanja dinamičkih karakteristika sistema bez prethodnog poznavanja njegove dinamike (dinamičkog modela i/ili pojedinih parametara); b) sposobnosti generalizacije koja im omogućava da uspešno emuliraju ponašanje motora i za nepoznate ulazne podatke.

Cilj ovog rada je projektovanje regulatora brzine jednosmernog motora baziranog na VNM. Osnovni zadatak ovog regulatora je da generiše upravljačke signale napona na način kojim se omogućava minimalno odstupanje brzine rotora od zadate trajektorije. Za obuku VNM je korišćena široko rasprostranjena i dobro poznata metoda prostiranja greške unazad (error back-propagation) [3,5]. Opisi razmatranih upravljačkih struktura dati su u drugom poglavlju rada. Treće poglavlje sadrži rezultate obuke usvojenih konfiguracija VNM, a četvrto uporedne testove PI regulatora i upravljačke strukture bazirane na VNM.

2. OPIS RAZMATRANIH UPRAVLJAČKIH STRUKTURA

Matematički model mašine jednosmerne struje je dat u sledećem obliku [6]:

$$L_f \frac{di_f}{dt} = u_f - R_f i_f \quad (1)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = u_a - R_a i_a - \omega_m M_{af} i_f \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = m_c - m_m - k_\omega \omega_m \quad (3)$$

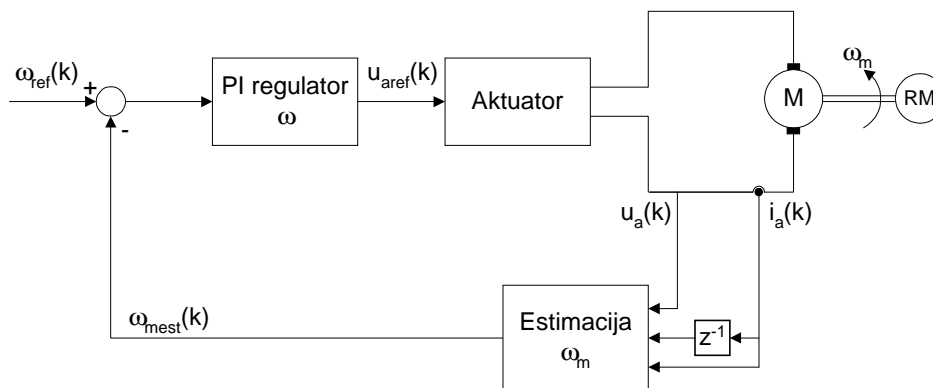
$$m_c = M_{af} i_f i_a \quad (4)$$

gde je: u_f -napon statora; i_f -struja statora; L_f -induktivnost namota statora; R_f -otpor namota statora; u_a -napon rotora; i_a -struja rotora; L_a -induktivnost namota rotora; R_a -otpor namota rotora; M_{af} -međusobna induktivnost namota statora i rotora; ω_m -mehanička brzina; J -momenat inercije pogona sveden na vratilo mašine; m_c -momenat konverzije mašine; m_m -momenat opterećenja; k_ω -koeficijent frikcije rotacije.

Podaci o motoru su: nominalna snaga $3.9kW$, nominalni napon $260V$, nominalna struja $17.6A$, nominalna brzina $3370o/min$, otpornost rotora 0.75Ω , induktivnost rotora $3.32mH$. Perioda diskretizacije sistema je $10ms$.

Projektovane su dve upravljačke strukture. Osnovna struktura sadrži regulator baziran na VNM, uz prisustvo odgovarajućih komponenti observera stanja. Druga,

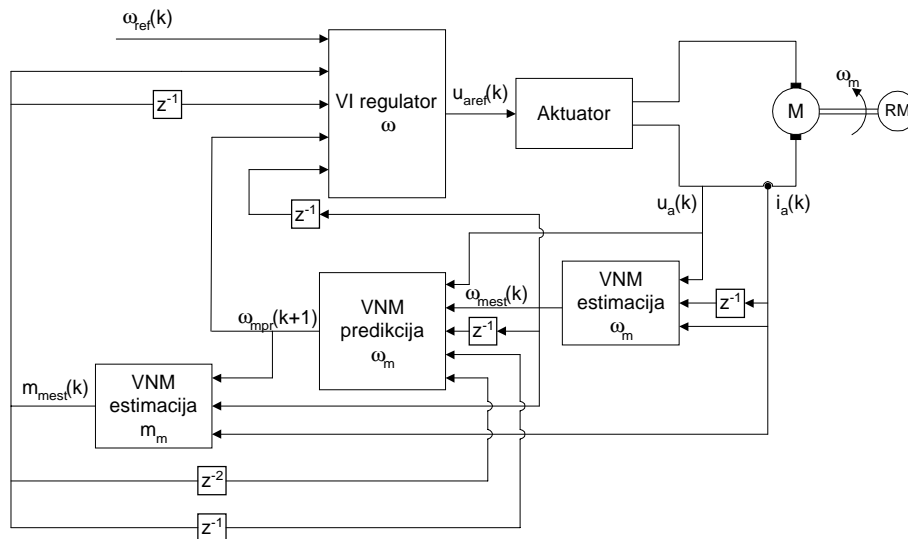
referentna upravljačka struktura je uvedena u cilju vršenja kompetentnije komparativne analize. Referentna upravljačka struktura koja je prikazana na slici 1, koristi konvencionalni PI regulator brzine (pogon P_{PI}). PI regulator je projektovan metodom simetričnog optimuma [7]. U okviru PI regulatora brzine je primenjena povratna sprega protiv izletanja integratora [7], što smanjuje kašnjenje u radu regulacionog sistema. Pri vršenju simulacija, postavljeno je ograničenje, u skladu sa ograničenjem realnog sistema. Maksimalna vrednost napona je ograničena na 120% nominalnog napona ($u_{amax}=1.2u_{an}$). Interesantno je uočiti na slici 1 postojanje estimatora brzine, koji je uveden u pogon u cilju izostavljanja senzora brzine.



Sl. 1. Blok dijagram referentnog sistema - pogon sa konvencionalnim PI regulatorom brzine i estimatorom brzine (pogon P_{PI}).

Upravljačka struktura razmatranog pogona sa regulatorom baziranom na VNM je prikazana na slici 2 (pogon P_{VNM}). Regulator bazirana na VNM ima pet ulaza: referentna brzina u k -tom trenutku ($w_{ref}(k)$), predviđena brzina u trenutku $k+1$ ($w_{mpr}(k+1)$), estimirana brzina u trenutku $k-1$ ($w_{mest}(k-1)$) i estimirane vrednosti momenta opterećenja u trenucima k i $k-1$ ($m_{mest}(k)$, $m_{mest}(k-1)$). Regulator ima jedan izlaz koji predstavlja vrednost upravljačkog signala u k -tom trenutku ($U_a(k)$).

Pored regulatora u strukturu na slici 2 su uključene još i odgovarajuće komponente observera stanja. Moguće je razlikovati tri komponente observera stanja u predloženoj strukturi [8]: estimator i prediktor brzine, i estimator momenta. Prediktor brzine predstavlja direktni model objekta upravljanja sa zadatkom da vrši predikciju brzine motora. Uloga estimatora momenta je estimacija momenta opterećenja u stacionarnom i prelaznom režimu rada pogona. Izlazi iz ova dva elementa, zajedno sa izlazom iz estimatora brzine čine ulaze u regulator, na osnovu kojih se određuje upravljačka akcija. Predložena upravljačka struktura je mogla biti realizovana i bez estimatora brzine uvođenjem odgovarajućeg senzora. Međutim, na ovaj način je smanjen broj senzora, te je dovoljno vršiti merenja samo dve veličine: napon i struju motora.



Sl. 2. Blok dijagram razmatrane upravljačke struktura bazirane na VNM (pogon P_{VNM}).

3.1 Izbor VNM za estimaciju brzine motora

Veštačka neuronska mreža za estimaciju brzine motora ima tri ulaza i jedan izlaz (Sl. 2). Ulazne veličine su: struja rotora motora u trenutku k i $k-1$ ($i_a(k), i_a(k-1)$) i napon u k -tom trenutku ($u_a(k)$). Izlaz iz neuronske mreže je vrednost estimirane brzine u k -tom trenutku ($\omega_{mesti}(k)$). Za estimatora brzine je usvojena neuronska mreža sa tri ulaza, tri neurona na skrivenom sloju i jednim izlazom (osenačena vrsta u tabeli 1).

Tabela 1. Podaci o obuci i testiranju VNM kao estimatora brzine motora.

Struktura VNM	Broj epoha	Tr. SKG	Ts. SKG
3-3-1	4622	1.2497e-08	1.1323e-08
3-5-1	4117	1.2484e-08	1.1312e-08
3-7-1	3592	1.2489e-08	1.1315e-08
3-9-1	3233	1.2485e-08	1.1315e-08
3-5-2-1	11969	1.2496e-08	1.1423e-08
3-5-3-1	6421	1.2880e-08	1.1534e-08
3-7-2-1	3915	1.2494e-08	1.1346e-08
3-7-3-1	6122	1.2497e-08	1.1367e-08

3.2 Izbor VNM za predikciju brzine motora

Veštačka neuronska mreža za predikciju brzine ima pet ulaza i jedan izlaz (Sl. 2.). Ulazne veličine su: estimirana brzina u trenutku k i $k-1$ ($\omega_{mesti}(k), \omega_{mesti}(k-1)$), estimirani momenat trenutku $k-1$ i $k-2$ ($m_{mesti}(k-1), m_{mesti}(k-2)$) i napon rotora motora u k -tom trenutku ($u_a(k)$). Izlaz iz neuronske mreže je vrednost predviđene brzine u trenutku $k+1$ ($\omega_{mpr}(k+1)$). Rezultati obuke i testa su predstavljeni u tabeli 2. Za identifikator brzine je usvojena neuronska mreža sa tri ulaza, sedam neurona na skrivenom sloju i jednim izlazom (osenačena vrsta u tabeli 2).

Tabela 2. Podaci o obuci i testiranju VNM kao prediktora brzine motora.

Struktura VNM	Broj epoha	Tr. SKG	Ts. SKG
5-2-1	100000	9.4176e-05	9.7908e-05
5-3-1	100000	8.8479e-05	9.1954e-05
5-5-1	100000	1.0937e-06	1.1044e-06
5-7-1	100000	1.9912e-07	2.2165e-07
5-9-1	100000	1.2515e-06	1.3919e-06
5-7-2-1	100000	1.3167e-05	1.3836e-05
5-7-3-1	100000	8.0370e-04	8.1071e-04

3.3 Izbor VNM za estimaciju momenta motora

Veštačka neuronska mreža za estimaciju momenta ima tri ulaza i jedan izlaz (Sl. 2.). Ulazne veličine su: predviđena brzina u trenutku $k+1$ ($\omega_{mpr}(k+1)$), estimirana brzina u k -tom trenutku ($\omega_{mest}(k)$) i struja rotora motora u k -tom trenutku ($i_a(k)$). Izlaz iz neuronske mreže je vrednost estimiranog momenta u k -tom trenutku ($m_{mest}(k)$). Rezultati obuke i testa su predstavljeni u tabeli 3. Za estimator momenta je usvojena neuronska mreža sa tri ulaza, dva neurona na skrivenom sloju i jednim izlazom (osenačena vrsta u tabeli 3).

Tabela 3. Podaci o obuci i testiranju VNM kao estimatora momenta opterećenja motora.

Struktura VNM	Broj epoha	Tr. SKG	Ts. SKG
3-2-1	4125	1.2438e-08	1.1520e-08
3-3-1	4573	1.2454e-08	1.1414e-08
3-5-1	3829	1.2373e-08	1.1408e-08
3-7-1	3574	1.2492e-08	1.1511e-08
3-9-1	3131	1.2417e-08	1.1398e-08
3-5-2-1	12199	1.2495e-08	1.1532e-08
3-5-3-1	4066	1.2388e-08	1.1524e-08
3-7-2-1	3813	1.2350e-08	1.1410e-08
3-7-3-1	5170	1.2318e-08	1.1401e-08

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 4, za regulator brzine je usvojena neuronska mreža sa pet ulaza, tri neurona na skrivenom sloju i jednim izlazom (osenačena vrsta u tabeli). Aktivacione funkcije na skrivenom i izlaznom sloju su čisto linearne.

Tabela 4. Podaci o obuci i testiranju VNM kao regulatora brzine motora.

Struktura VNM	Aktivaciona funkcija sloja		Broj epoha	Tr. SKG	Ts. SKG
	Skriveni sloj	Izlazni sloj			
5-3-1	logistic	linear	100000	2.0625e-05	2.0250e-05
5-3-1	linear	linear	37414	1.2500e-08	1.1505e-08
5-3-1	tg hyperbolic	linear	100000	4.1406e-07	3.0967e-07
5-5-1	logistic	linear	100000	3.2500e-06	4.0861e-06
5-5-1	linear	linear	26379	1.2500e-08	1.1439e-08
5-5-1	tg hyperbolic	linear	100000	2.7209e-07	2.6652e-07
5-7-1	logistic	linear	100000	6.1250e-06	5.4830e-06
5-7-1	linear	linear	15387	1.2500e-08	1.1519e-08
5-7-1	tg hyperbolic	linear	100000	2.9954e-07	2.4033e-07
5-9-1	logistic	linear	100000	7.2500e-06	6.7121e-06
5-9-1	linear	linear	35078	1.2499e-08	1.1457e-08
5-9-1	tg hyperbolic	linear	100000	4.1050e-07	3.9137e-07
5-11-1	logistic	linear	100000	1.7125e-05	2.2111e-05
5-11-1	linear	linear	25808	1.2500e-08	1.1425e-08
5-11-1	tg hyperbolic	linear	100000	1.1584e-06	1.2064e-06

4. REZULTATI SIMULACIJA RADA POGONA SA KONVENCIONALNIM PI I REGULATOROM BAZIRANOM NA VEŠTAČKOJ NEURONSKOJ MREŽI

U cilju što kompetentnijeg upoređivanja rada pogona P_{PI} i P_{VNM} posmatran je njihov rad kroz više različitih radnih režima. Ukupno su razmatrana četiri radna režima čiji je opis dat u tabeli 5.

Tabela 5. Opis razmatranih radnih režima.

Redni broj	ω_{ref} [r.j.]	m_m [r.j.]
1.	1	1
2.	$0.75+0.10\sin(2\pi t/4)+0.16\sin(2\pi t/7)$	1
3.	$0.75+0.10\sin(2\pi t/4)+0.16\sin(2\pi t/7)$	$0.7\text{sign}(\omega_m(t))\omega_m^2(t)$
4.	$0.75+0.10\sin(2\pi t/4)+0.16\sin(2\pi t/7)$	$0.7+0.3\sin(0.375t)$

Izvršene su simulacije rada gore opisanih pogona u svim navedenim radnim režimima. Radi boljeg upoređivanja performansi pogona P_{VNM} sa referentnim, izvršena je optimizacija parametara konvencionalnog PI regulatora pogona P_{PI} za svaki pojedinačni radni režim. Pri optimizaciji je korištena metoda statičke optimizacije Nelder-Mead (Simplex) [9]. Između više korišćenih kriterijuma optimalnosti rada pogona odabran je kriterijum dat sledecim izrazom:

$$I = \sum_{i=1}^T e_i^2 + 20 \sum_{i=1}^{\infty} e_i^2 \quad (5)$$

gde je T - vremenski trenutak definisan tačkom preseka referentne i stvarne brzine nakon prvog preskoka, a e_i je odstupanje stvarne brzine motora od reference. Odabrani indeks performanse se pokazao kao dobra mera za smanjenje trajanja prelaznog režima i smanjenje preskoka odziva.

Indeksi performanse označeni sa (*), u tabeli 5, su računati prema sledećem izrazu:

$$I = \sum_{i=1}^{\infty} e_i^2 \quad (6)$$

Ovaj način izračunavanja indeksa performanse je primenjen za radne režime 2, 3 i 4. U tim režimima se ω_{ref} konstantno menja i "preskok" nastaje u trenutku promene znaka gradijenta ω_{ref} . Tako postignuti "preskok" je posledica promene ω_{ref} , a ne dovoljno velikog porasta ω_m . U ovim radnim režimima stalno postoji kašnjenje ω_m za ω_{ref} , tako da je kao indeks performanse pogodnije usvojiti izraz (6).

Tokom simulacija rada svih razmatranih pogona u pojedinim radnim režimima vršeno je izračunavanje indeksa performanse (5) i (6) kao kvantitativnog pokazatelja kvaliteta rada pogona. Apsolutne i relativne vrednosti indeksa performanse za navedene radne režime i elektromotorne pogone prikazane su u tabeli 6.

Tabela 6. Vrednosti indeksa performanse za simulacije rada elektromotornih pogona u različitim radnim režimima.

Radni režim	Indeks performanse	
	P_{PI}	P_{VNM}
1.	6.0833e+00 (100%)	6.1060e+00 (100.37%)
2.	7.8228e+01 (100%) 3.9362e+00* (100%)*	4.4756e+01 (57.21%) 2.2378e+00* (56.85%)*
3.	3.0552e+01 (100%) 1.5674e+00* (100%)*	1.8880e+01 (61.80%) 9.4398e-01* (59.88%)*
4.	5.4999e+01 (100%) 2.7797e+00* (100%)*	3.1382e+01 (57.06%) 1.5691e+00* (56.45%)*

Kao ilustracija dobijenih rezultata na slici 3. su prikazane referentna i stvarna brzina motora za pogone P_{PI} i P_{VNM} u slučaju prvog i trećeg razmatranog režima. Na osnovu slika i vrednosti indeksa performanse iz tabele 6 može se zaključiti da u režimu sa konstantnom ω_{ref} i m_m kvalitet rada pogona P_{PI} i P_{VNM} podjednak, dok je u radnim režimima sa promenljivim ω_{ref} i m_m prednost na strani pogona P_{VNM} .

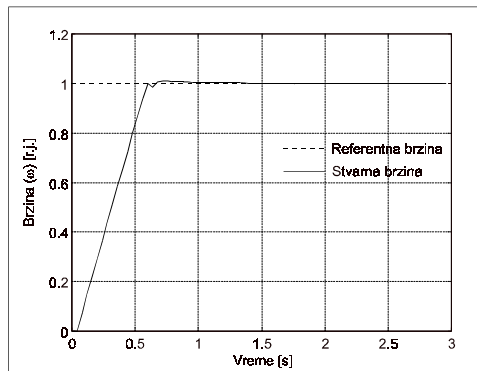
5. ZAKLJUČAK

U radu je opisana upravljačka struktura koja sadrži regulator baziran na veštačkoj neuronskoj mreži. Korišćeni tip veštačke neuronske mreže je višeslojni perceptron. Kompletna upravljačka struktura je projektovana i testirana na pogonu sa motorom jednosmerne struje. U cilju realizacije navedenog regulatora bilo je potrebno projektovati još i sledeće komponente upravljačke strukture: estimator i prediktor brzine motora i estimator momenta opterećenja. Izlazi iz ovih komponenti projektovanih pomoću veštačke neuronske mreže, dovođeni su na ulaz regulatora brzine.

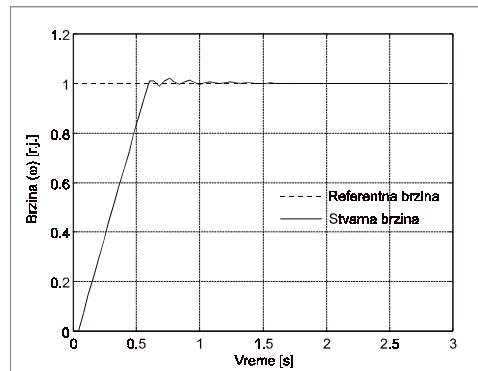
Radi kvalitetnije komparativne analize, projektovana je i upravljačka struktura sa konvencionalnim PI regulatorom čiji su parametri optimizovani za svaki pojedinačni radni režim. Na osnovu rezultata simulacija rada oba pogona u različitim radnim režimima može se zaključiti sledeće. Oba pogona rade podjednako dobro za radni režim sa konstantnom vrednošću referentne brzine i konstantnim poremećajem (momenat

opterećenja). U situacijama kada je referentna vrednost brzine sporo promenljiv signal, a poremećaj ima konstantnu ili promenljivu vrednost (zavisnu ili nezavisnu od brzine) bolje rezultate je pokazao sistem sa regulatorom brzine baziranom na veštačkoj neuronskoj mreži.

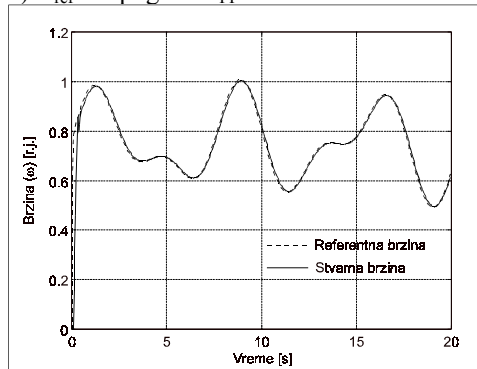
Konačno se može zaključiti da su rezultati pokazali opravdanost primene veštačkih neuronskih mreža u upravljanju sistemima, kao što su elektromotorni pogoni, kod kojih je moguća pojava značajnih nelinearnih fenomena. Ovo se posebno odnosi na situacije kadaa potrebno obezbediti visoke performanse pogona u širokom spektru radnih režima.



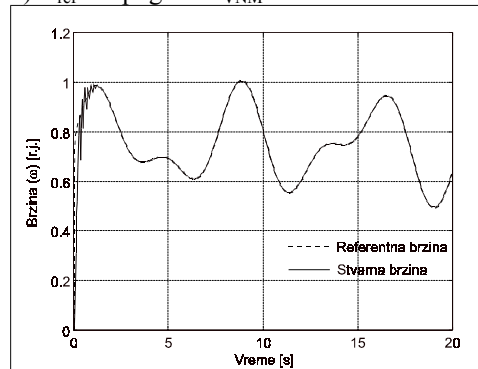
a) ω_{ref} i ω pogona P_{PI} za radni režim 1.



b) ω_{ref} i ω pogona P_{VNM} za radni režim 1.



c) ω_{ref} i ω pogona P_{PI} za radni režim 3.



d) ω_{ref} i ω pogona P_{VNM} za radni režim 3.

Sl. 3. Referentna i stvarna brzina analiziranih pogona za radne režime 1 i 3.

6. LITERATURA

- [1] S. Weerasooriya and M.A. El-Sharkawi, "Laboratory Implementation of a Neural Network Trajectory Controller for a DC Motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, pp 107-113, 1992.
- [2] S. Weerasooriya and M.A. El-Sharkawi, "Identification and Control of a DC Motor Using Back-Propagation Neural Networks", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp 663-669, 1991
- [3] S. Haykin, *Neural Networks*, Macmillan Publ. Co, N.Y., USA, 1994.

- [4] S.K. Narendra and K. Parthasarathy, "*Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks*", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol.1, No.1, pp. 4-27, March, 1990.
- [5] B. Widrow and M. Lehr, "*30 Years of Adaptive Neural Networks: Perceptron, Madaline and Backpropagation*", Proc. of the IEEE, Vol. 78, No.9, pp. 1415-1442, 1990.
- [6] E. Levi, V. Vučković i V. Strezoski, *Osnovi elektroenergetike - elektromehanički pretvarači*, FTN, Novi Sad, 1992.
- [7] W.S. Levine, *The Control Handbook*, CRC and IEEE Press, USA, 1996.
- [8] T. Orłowska-Kowalska and P. Migas, "*Neural Network Estimator for the Induction Motor Drive*", Proc. of PEMC '98, Vol.8, Prague, 1998, pp.89-94.
- [9] J.A. Nelder and R. Mead, "*A Simplex method for function minimisation*", Computer Journal, vol.7., pp.308-313.