

PREDIKCIJA VREMENSKIH SERIJA KORIŠĆENJEM MODIFIKOVANE ANFIS ARHITEKTURE

Branimir Jovanović, Irini Reljin, Branimir Reljin
Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Email: branimir.jovanovic@nbs.yu, ireljin@ptt.yu, reljinb@etf.bg.ac.yu

Sadržaj – U radu se opisuje modifikovana ANFIS arhitektura, nazvana MANFIS (Modified Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) i njena primena u predikciji vremenskih serija. Razmatrane su klasična i diferencijalna metoda predikcije. Efikasnost nove strukture je proveravana na standardnoj Mackey-Glass vremenskoj seriji. Dobijeni rezultati potvrđuju superiornost MANFIS arhitekture u odnosu na klasičnu ANFIS arhitekturu, a samim tim i u odnosu na ostale poznate neuralne i neuro-fuzzy sisteme za predikciju signala.

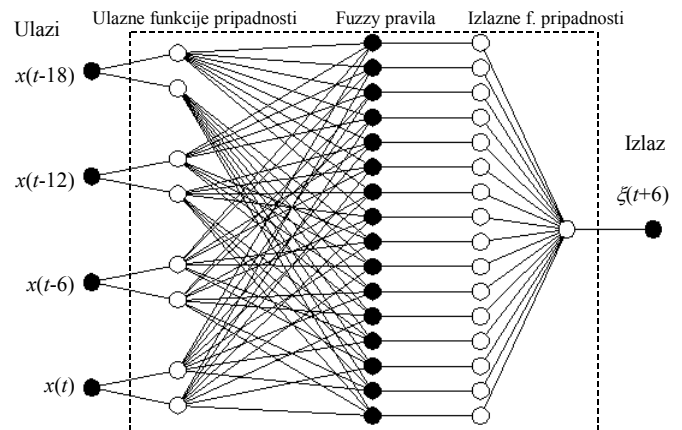
1. UVOD

Upotreba *neuro-fuzzy* arhitektura dobija na značaju u rešavanju niza problema koji su teški, nekada i nemogući, za analitičko opisivanje. Klasičan primer jeste predikcija vremenskih signala, gde termin „signal“ može da podrazumeva podatak o nekoj fizičkoj veličini (temperatura, pritisak, potrošnja energije u elektro-energetskom sistemu, kontrolni parametar u sistemu automatskog upravljanja), ali i neku drugu veličinu poput indeksa rasta kretanja na berzi, itd. Naravno, modelovanje sistema u ovakvim slučajevima je neizbežno i izuzetno značajno radi što bolje identifikacije varijabli od značaja za krajnji rezultat – izlaz sistema, i pravilnu, ili što bolju, postavku relacije ulaz-izlaz. Modelovanje sistema, koje može biti izuzetno kompleksno i veoma zavisno od vrste problema koji se rešava, nije tema ovoga rada. U ovom radu se prikazuje upotreba modifikovane ANFIS arhitekture, nazvane MANFIS (Modified Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) projektovane za predikciju vremenskih serija. Nova arhitektura je razvijena u nameri da se prevaziđu nedostaci klasične ANFIS arhitekture, pre svega sa stanovišta skalabilnosti i trajanja računarske obrade. Efikasnost nove strukture je testirana na standardnoj Mackey-Glass vremenskoj seriji, za slučaj standardne i diferencijalne tehnike predikcije. Dobijeni rezultati potvrđuju superiornost MANFIS arhitekture u odnosu na klasičnu ANFIS arhitekturu, a samim tim i u odnosu na ostale poznate neuralne i neuro-fuzzy sisteme za predikciju signala.

Rad je organizovan na sledeći način. U poglavlju 2 je, ukratko, opisana poznata ANFIS struktura koja se pokazala superiornom u odnosu na ostale sisteme u predikciji vremenskih serija. U trećem poglavlju je opisana MANFIS struktura koja otklanja neke nedostatke ANFIS arhitekture, a u četvrtom i petom poglavlju su izloženi rezultati predikcije Mackey-Glass vremenskih serija klasičnom i diferencijalnom metodom, respektivno. U poglavlju 6 su sumirani zaključci.

2. KLASIČNA ANFIS ARHITEKTURA

Neuro-fuzzy (NF) sistemi kombinuju sposobnost „učenja“ neuralnih mreža (kroz izmenu težinskih interkonekcija između slojeva neuralne mreže) i fleksibilnost *fuzzy* logike koja pruža efikasnu mogućnost formiranja baze „znanja“. Adaptivni *neuro-fuzzy* sistemi zaključivanja – ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) [1-3] predstavljaju poseban tip NF arhitektura iz kategorije tzv. potpuno integrisanih NF sistema [4,5]. Primer klasične ANFIS arhitekture – u konkretnom slučaju sa 4 ulaza, jednim izlazom i sa po 2 *fuzzy* skupa po ulazu, koja je pogodna za predikciju signala, dat je na slici 1.



Slika 1. Klasična ANFIS arhitektura sa 4 ulaza koja se koristi u predikciji signala: izlaz $\zeta(t+6)$ je prediktovana vrednost signala u trenutku $t+6$, $x(t+6)$, dobijena na osnovu poznatih vrednosti u prethodnim trenucima.

Ulazni signal $x(t)$, on se, najpre, klasifikuje u odnosu na dva *fuzzy* skupa, vrši se tzv. *fazifikacija* (u sloju 'Ulazne funkcije pripadnosti'), npr. na skupove A_1 i A_2 , koji se opisuju odgovarajućim funkcijama pripadnosti $\mu_{A_1}(x)$ i $\mu_{A_2}(x)$. Funkcija pripadnosti je, uobičajeno, parametarska funkcija koja svoj oblik menja u skladu sa promenom svojih parametara. Često korišćena funkcija pripadnosti je generalisana 'zvonasta' (bell) funkcija

$$Bell(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c}{a}\right)^{2b}}$$

koja je opisana sa $m=3$ parametra: a , b i c , koji određuju položaj, širinu i nagib 'zvona'.

Pravila zaključivanja su u obliku *if-then* odluka. Za slučaj kao na slici 1, sa $n=4$ ulaza i $p=2$ funkcije pripadnosti po ulazu, broj pravila odlučivanja je $p^n=16$:

Pravilo1: If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 and x_3 is C_1 and x_4 is D_1 then $f_1 = p_1 x_1 + q_1 x_2 + r_1 x_3 + s_1 x_4 + t_1$

Pravilo2: If x_1 is A_2 and x_2 is B_1 and x_3 is C_1 and x_4 is D_1
then $f_2 = p_2 x_1 + q_2 x_2 + r_2 x_3 + s_2 x_4 + t_2$

...

Pravilo16: If x_1 is A_2 and x_2 is B_2 and x_3 is C_2 and x_4 is D_2
then $f_{16} = p_{16} x_1 + q_{16} x_2 + r_{16} x_3 + s_{16} x_4 + t_{16}$

gde su, u odnosu na sliku 1,

$$x_1=x(t), x_2=x(t-6), x_3=x(t-12), x_4=x(t-18),$$

A_1, A_2 fuzzy skupovi pridruženi ulazu x_1

B_1, B_2 fuzzy skupovi pridruženi ulazu x_2

C_1, C_2 fuzzy skupovi pridruženi ulazu x_3

D_1, D_2 fuzzy skupovi pridruženi ulazu x_4 .

Izlazi funkcija pripadnosti ovog sloja se kombinuju u 'Sloju pravila' i formiraju normalizovanu težinu svakog pravila u obliku $\bar{w}_i = w_i / \sum_i w_i$, $i=1,2,\dots,16$, sa

$$w_i = \Omega(\mu_{A_{j_1}}(x), \mu_{B_{j_2}}(x), \mu_{C_{j_3}}(x), \mu_{D_{j_4}}(x)), \quad j_1, j_2, j_3, j_4 \in \{1,2\},$$

gde je Ω fuzzy operator – klasično množenje u većini slučajeva zadovoljava potrebe u predikciji signala. Izlaz za svako pravilo (sloj 'Izlazne funkcije pripadnosti') je oblika $\bar{w}_i f_i$, sa $f_i = (p_i x + q_i y + r_i)$, $i=1,2$, gde je $\{p_i, q_i, r_i\}$ skup parametara poznatih kao *konsekventni parametri*. Rezultujući izlaz sistema je suma ovih izlaza, $\sum_i \bar{w}_i f_i$.

Pri obuci – treniranju ANFIS sistema za predikciju nekog signala, na njegove ulaze i izlaz dovode se odgovarajući uzorci posmatranog signala pri čemu se menjaju parametri premise i konsekvence – neuro deo ANFIS arhitekture. Proces 'učenja' ima dve faze: u prvom koraku za odgovarajuće uzorke signala na ulazima i izlazu ANFIS sistema parametri premise su fiksirani, a menjaju se parametri konsekvence iterativnom srednjekvadratnom estimacijom; u drugom koraku fiksirani su parametri konsekvence, a parametri premise se menjaju metodom prostiranja unazad (*backpropagation*).

3. MODIFIKOVANA ANFIS ARHITEKTURA

Analizirajući ukupan broj internih parametara klasične ANFIS arhitekture sa n ulaza, sa po p fuzzy skupova po svakom ulazu i m parametara u funkciji pripadnosti svakog od fuzzy skupova, dolazimo do zaključka da je ukupan broj internih parametara klasične ANFIS arhitekture određen sa

$$F(n,p,m) = n \cdot p \cdot m + p^n \cdot (n+1) \quad (1)$$

gde je $n \cdot p \cdot m$ ukupan broj tzv. parametara premise koji reprezentuje sve parametre funkcija pripadnosti, dok je $p^n \cdot (n+1)$ ukupan broj tzv. parametara konsekvence koji reprezentuju sve parametre koji figurišu u definisanim pravilima zaključivanja. Za klasičnu ANFIS arhitekturu, slika 1, sa $n=4$ ulaza, $p=2$ fuzzy skupa po ulazu i $m=3$ parametra u funkciji pripadnosti svakog od fuzzy skupova, ukupan broj internih parametara je: $F(4,2,3) = 4 \cdot 2 \cdot 3 + 2^4 \cdot (4+1) = 104$.

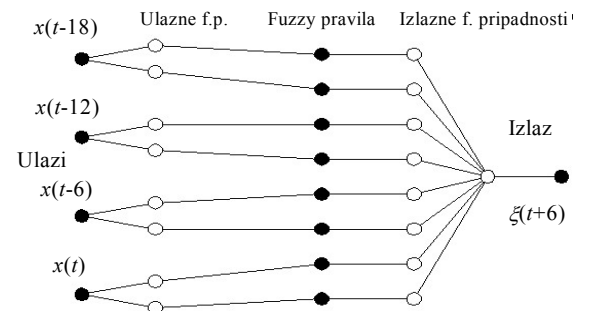
Vreme obuke direktno zavisi od broja internih parametara arhitekture. Povećanje broja internih parametara povećava potrebno vreme za računarsku obradu ne samo zbog većeg broja parametara već i zbog neizbežnog povećanja broja trening uzoraka. Naime, validna obuka zahteva da broj trening uzoraka bude nekoliko puta veći od broja internih parametara (preporuka je barem 4 puta). Sa druge strane, radi ostvarivanja boljih rezultata predikcije potrebno je uzeti veći broj uzoraka (ulaza) [6]. U klasičnoj ANFIS strukturi to,

međutim, vodi drastičnom povećanju broja internih parametara, s obzirom na eksponencijalnu zavisnost od broja ulaza, a time i drastičnom povećanju računarskog vremena. Jedno od rešenja ovog problema dato je u lit. [6], što je, kasnije, primenjeno za projektovanje modifikovane ANFIS arhitekture [7], kod koje se vrši aproksimacija pravila odlučivanja tako da se eliminiše eksponencijalna zavisnost od broja ulaza.

Modifikovana ANFIS arhitektura prikazana je na slici 2. Broj parametara konsekvence svodi se na broj fuzzy skupova po svakom ulazu i iznosi $n \cdot p \cdot (n+1)$, tako da je ukupan broj internih parametara sada jednak

$$G(n,p,m) = n \cdot p \cdot m + n \cdot p \cdot (n+1) = n \cdot p \cdot (n+m+1) \quad (2)$$

Konkretno, za MANFIS arhitekturu sa $n=4$ ulaza, $p=2$ fuzzy skupa po ulazu i $m=3$ parametra u funkciji pripadnosti svakog od fuzzy skupova, kao u razmatranoj klasičnoj ANFIS strukturi, ukupan broj internih parametara se redukuje na $G(4,2,3)=64$. Sa druge strane, u poređenju sa primerom iz prethodnog odeljka, brzina obuke MANFIS sistema se izrazito povećava, doduše, uz očekivano povećanje greške predikcije, jer je smanjen broj odlučivanja. Međutim, skalabilnost MANFIS arhitekture dozvoljava da se povećanjem broja ulaza efikasno smanji greška u predikciji bez značajnijeg povećanja vremena računarske obrade. Ovaj *trade-off* je ilustrovan kroz rezultate iznesene u narednim odeljcima.



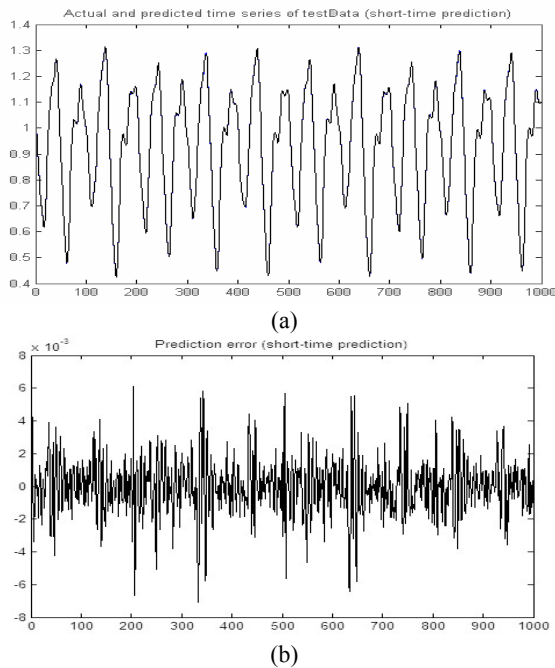
Slika 2. Modifikovana ANFIS (MANFIS) arhitektura.

4. KLASIČNA METODA PREDIKCIJE MACKEY-GLASS SERIJA

Numeričko rešavanje nelinearne diferencijalne jednačine

$$\frac{d}{dt} x(t) = \frac{0.2x(t-\tau)}{1+x^{10}(t-\tau)} - 0.1x(t) \quad (3)$$

za početne uslove $\tau=17$, $x(0) = 1.2$, $x(t) = 0$ za $t < 0$ dovodi do vremenske serije Mackey-Glass (MG) tipa [8], slika 3a, koja se standardno koristi za testiranje i poređenje različitih neuro- i neuro-fuzzy arhitekture [2,4,5,7]. Klasična metoda predikcije estimira vrednost u budućnosti, $x(t+P)$, na osnovu n prethodnih uzoraka, $\{x(t-(n-1)\Delta), \dots, x(t-\Delta), x(t)\}$, uzetih na međusobnom rastojanju Δ po vremenskoj osi. Na slici 3 su prikazani rezultati predikcije klasičnom metodom, sa ANFIS strukturom sa 4 ulaza kao na slici 1, za $\Delta=P=6$ i $n=4$.



Slika 3. a) Mackey-Glass (MG) serija (puna linija) i njena kratkotrajna predikcija (crtkano) klasičnom metodom sa ANFIS strukturom sa 4 ulaza, i b) greška predikcije.

U predikciji, prikazanoj crtkanom linijom na slici 3a (što se, praktično, ne vidi na slici, s obzirom na grešku koja je manja od 1%), izlazna vrednost, $\zeta(t+6)$, je estimacija ulazne vrednosti u trenutku $t+6$, $x(t+6)$, dobijena na osnovu predhodnih vrednosti: $x(t), \dots, x(t-18)$. Ovakav vid testa, tzv. kratkotrajna (*short-time*) predikcija, daje mogućnost da se uspešnost oceni srednjekvadratnom greškom (RMSE) ili, efikasnije, pomoću NDEI (*Non-Dimensional Error Index*). Veličina NDEI predstavlja količnik srednjekvadratne greške i standardne devijacije posmatranog signala. Konkretno, za navedeni slučaj je RMSE=0.0017 i NDEI=0.0071. Obuka sistema je vršena sa 500 uzoraka i 500 uzoraka provere. Testiranje je vršeno sa 1000 uzoraka.

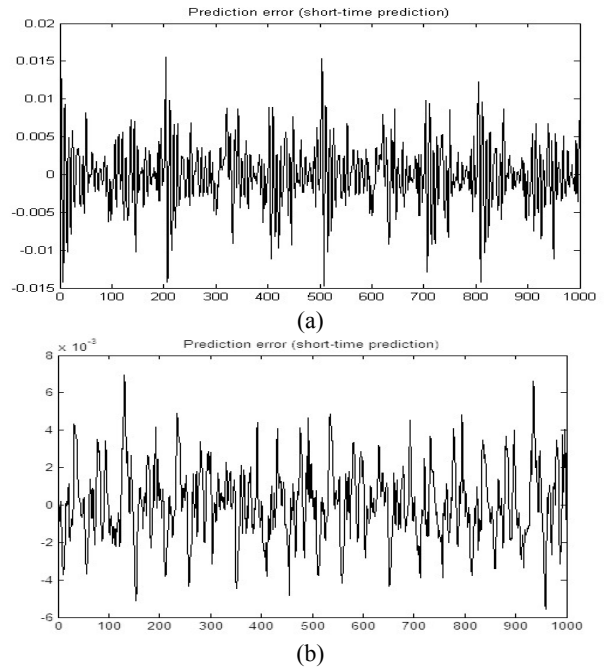
TABELA 1. KOMPARATIVNA ANALIZA EFIKASNOSTI I SKALABILNOSTI MANFIS ARHITEKTURE

Broj ulaza n	Br. internih parametara $G(n,2,3)$	Broj epoha	RMSE	NDEI
4	64	25	0.0040	0.0177
4	64	100	0.0039	0.0170
5	90	100	0.0018	0.0078
5	90	200	0.0017	0.0076
6	120	50	0.0009	0.0040
6	120	100	0.0008	0.0034

Za iste uslove kao u slučaju ANFIS arhitekture, na slici 4 su prikazani rezultati greške predikcije sa MANFIS arhitekturom u slučaju sistema sa 4 i 6 ulaza. Komparativna analiza efikasnosti i skalabilnosti MANFIS arhitekture prikazana je u tabeli 1. Poređenje u odnosu na klasičnu ANFIS arhitekturu dato je u tabeli 2.

TABELA 2. POREĐENJE EFIKASNOSTI ANFIS I MANFIS ARHITEKTURE PRI KLASIČNOJ METODI PREDIKCIJE

Metoda	Br. trening uzoraka	RMSE	NDEI
ANFIS sa 4 ulaza	500	$17 \cdot 10^{-4}$	0.0071
MANFIS sa 4 ulaza	500	$40 \cdot 10^{-4}$	0.0177
MANFIS sa 6 ulaza	500	$9 \cdot 10^{-4}$	0.0040



Slika 4. Greška predikcije MG serije klasičnom metodom sa MANFIS arhitekturom: a) za sistem sa 4 ulaza, b) za sistem sa 6 ulaza.

5. DIFERENCIJALNA METODA PREDIKCIJE MACKEY-GLASS SERIJA

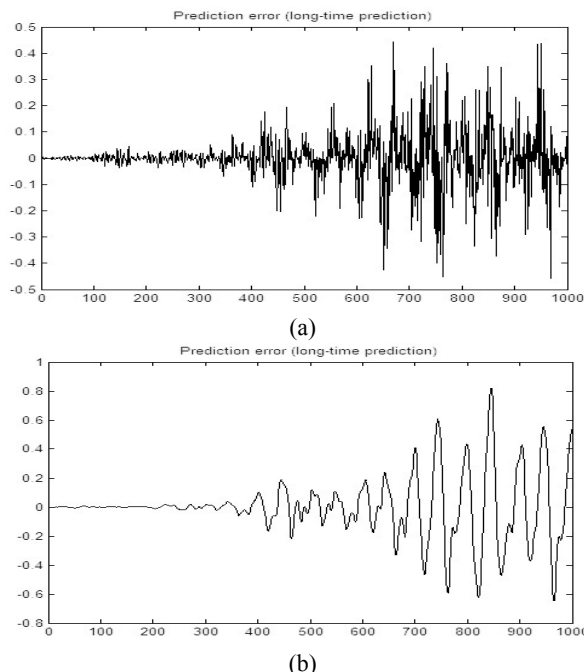
Diferencijalna metoda predikcije, za razliku od klasične, vrši predikciju razlike susednih uzoraka, $x(t+P)-x(t+P-1)$, na osnovu n uzoraka iz prošlosti $\{x(t-(n-1)\Delta), \dots, x(t-\Delta), x(t)\}$ uzetih na međusobnom vremenskom rastojanju Δ . Ovom metodom se ostvaruju značajno bolji rezultati predikcije signala sa stanovišta kratkotrajne predikcije. To je ilustrovano rezultatima iznetim u tabeli 3, za ANFIS i za MANFIS arhitekturu [7]. Doduše, treba naglasiti da diferencijalna metoda pokazuje veću osetljivost na propagaciju greške. Ova pojava nije uočljiva kod kratkotrajne predikcije, obzirom na njen koncept. Međutim, na testovima u kojima se predikcija vrši u odnosu na već estimirane uzorke, tj. estimacija $\zeta(t+P)$ se dobija na osnovu estimacija $\{\zeta(t-(n-1)\Delta), \dots, \zeta(t-\Delta), \zeta(t)\}$, uočljiv je porast greške sa vremenom usled akumulacije. Ovaj vid testiranja predikcije, tzv. dugotrajna (*long-time*) predikcija, pokazuje, zapravo, koliko daleko možemo ići u 'predviđanju budućnosti' signala.

TABELA 3. POREĐENJE EFIKASNOSTI ANFIS I MANFIS ARHITEKTURE PRI DIFERENCIJALNOJ METODI PREDIKCIJE

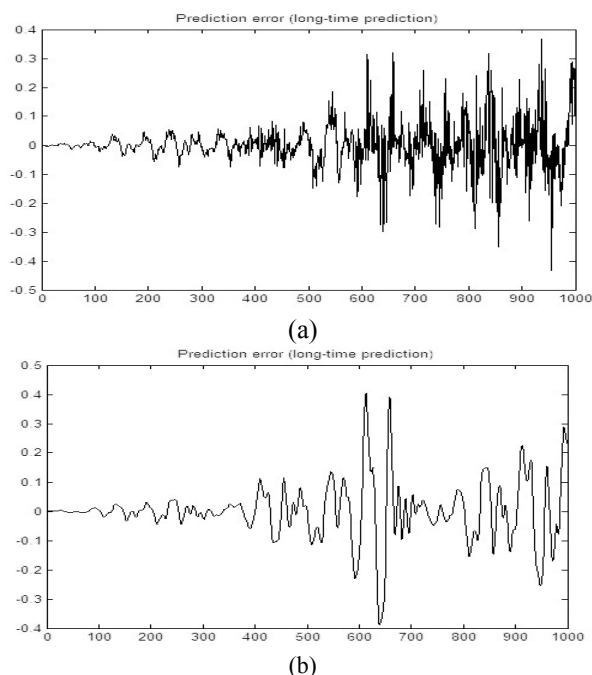
Metoda	Br. trening uzoraka	RMSE	NDEI
ANFIS sa 4 ulaza	500	$3.4 \cdot 10^{-4}$	0.0015
MANFIS sa 4 ulaza	500	$7.75 \cdot 10^{-4}$	0.0034
MANFIS sa 6 ulaza	500	$1.93 \cdot 10^{-4}$	0.0008

Poređenje klasične i diferencijalne metode dugotrajne predikcije signala, sa ilustracijom akumulacije greške, za slučaj korišćenja standardne ANFIS arhitekture sa 4 ulaza prikazano je na slici 5, a za slučaj korišćenja MANFIS arhitekture sa 6 ulaza, na slici 6. U oba slučaja nakon prvih 300-400 prediktovanih uzoraka, akumulacija greške je izraženija za diferencijalnu metodu. Međutim, MANFIS arhitektura sa 6 ulaza, koja ima približno isti broj internih

parametara (120) kao klasičan ANFIS sa 4 ulaza (104) demonstrira veću preciznost na duži vremenski rok. Ujedno, vreme obuke MANFIS arhitekture može biti znatno kraće (svega 25-50 epoha u odnosu na 200-500 epoha kod ANFIS strukture) bez veće degradacije predikcije [7].



Slika 5. Dugotrajna predikcija MG serija sa ANFIS arhitekturom sa 4 ulaza: a) klasična, b) diferencijalna metoda predikcije.



Slika 6. Dugotrajna predikcija MG serija sa MANFIS arhitekturom sa 6 ulaza: a) klasična, b) diferencijalna metoda predikcije.

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana modifikovana ANFIS (u radu nazvana MANFIS) struktura [7] i njeni rezultati u predikciji standardnog Mackey-Glass test signala [8]. Zahvaljujući smanjenju potrebnog broja internih parametara sistema, koji je u novoj arhitekturi linearno srazmeran broju ulaza, a ne eksponencijalno kao kod ANFIS arhitekture, moguće je

povećati broj ulaza (a time i broj veličina koje određuju tačnost predikcije) bez znatnijeg povećanja ukupnog broja podešavajućih parametara. Rezultati predikcije demonstriraju superiornost MANFIS arhitekture u odnosu na klasičnu ANFIS strukturu [1-3], sa stanovišta potrebnog vremena računarske obrade i skalabilnosti, u cilju povećanja preciznosti predikcije. Nadalje, s obzirom da je pokazano [4,5] da je klasična ANFIS arhitektura znatno efikasnija od drugih neuro-struktura sa stanovišta preciznosti, a da je najveća zamerka bila njena izrazita računarska zahtevnost, primenom MANFIS arhitekture mogu se očekivati značajna poboljšanja u sistemima za predikciju signala.

LITERATURA

- [1] J. S. Jang, *Neuro-fuzzy modeling architectures, analysis and applications*, PhD Thesis, University of California, Berkley, July 1992.
- [2] J. S. Jang, "Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation", *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 3, No. 5, pp. 714-723, Sept. 1992.
- [3] J. S. Jang, "ANFIS: Adaptive-network based fuzzy inference systems", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, May 1993.
- [4] A. Abraham, "Neuro-fuzzy systems: State-of-the-art modeling techniques", in *Proc. Int. Work Conference on Artificial and Natural Neural Networks*, IWANN 2001, Granada, Springer-Verlag, Germany, June 2001.
- [5] A. Abraham, B. Nath, "Designing optimal neuro-fuzzy systems for intelligent control", in *Proc. Int. Conf. on Control, Automation, Robotics, Computer Vision*, ICARCV 2000, Singapore, December 2000.
- [6] L. P. Maguire, B. Roche, T. M. McGinnity, L. P. Mc Daid, "Predicting chaotic time series using a fuzzy neural network", *Information Sciences: An International Journal*, Elsevier, 112, pp. 125-136, 1998
- [7] B. Jovanović, I. Reljin, B. Reljin, "Modified ANFIS structure – Improving efficiency of ANFIS technique", in *Proc. 7th Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering, NEUREL-2004*, pp. 215-220, Belgrade, Serbia, 23-25 September, 2004.
- [8] M. C. Mackey, L. Glass, "Oscillation and chaos in physiological control systems", *Science*, pp. 287-289, Vol. 197, 1977.

Abstract – The paper describes the modified ANFIS architecture, called MANFIS (*Modified Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), and its application in time series prediction. The classical and differential prediction methods are considered. The efficiency of the new structure is tested over standard Mackey-Glass time series. The results obtained confirm the superiority of MANFIS architecture against classical ANFIS architecture and thus over other known neural and neuro-fuzzy systems for signal prediction.

TIME SERIES PREDICTION USING MODIFIED ANFIS ARCHITECTURE

Branimir Jovanović, Irini Reljin, Branimir Reljin