

# Hopfield-ova neuralna mreža za paketsko rutiranje sa statičkim rutama

Nenad Kojić<sup>1</sup>, Irini Reljin<sup>2</sup>, *Member, IEEE*, Branimir Reljin<sup>3</sup>, *Senior Member, IEEE*

**Sadržaj** — U radu je predstavljena modifikovana Hopfield-ova neuralna mreža za dinamičko paketsko rutiranje. Na osnovu naših prethodnih radova, a imajući u vidu da u realnim mrežama neke putanje mogu biti predefinisane (fiksne), predložen je novi algoritam rutiranja, koji može da uključi statičke putanje. Nov algoritam ima mogućnost da pronade optimalnu putanju uz uključivanje ili isključivanje pojedinih linkova iz finalne putanje.

**Ključne reči** — Rutiranje, dinamičko i statičko rutiranje, optimizacija, Hopfield-ova neuralna mreža.

## I. UVOD

RUTIRANJE kao jedna od aktivnosti u komunikacionim mrežama postaje sve češće tema velikog broja naučnih radova [1-3]. Uzrok ovakvih delovanja je potreba za se sve sofisticiranijim alatima i implementacijom pokušaja pronaći najbolje rešenje u složenim mrežnim topologijama. Dodatni problem predstavlja stalna potreba korisnika a samim tim i mrežnih uređaja za prenosom sve većih količina podataka u realnom vremenu i sa garantovanim kvalitetom servisa [2,3]. Pored toga, neusklađenost medijuma za prenos u svim segmentima mreže, maksimalno vreme prenosa, prirode signala ili sadržaja koji se prenosi deluju dodatno restriktivno i usložnjavaju postupak pronalazjenja optimalnog rešenja [4].

Nagli razvoj multimedijalnih servisa, real-time aplikacija, video konferencijskih veza i više destinacijske distribucije sadržaja, u različitim mrežnim uslovima, zahteva stalno nadgledanje mrežnog saobraćaja i razvoj novih algoritama koji takvom saobraćaju mogu kvalitetno da odgovore [2-4]. Imajući u vidu mogućnosti implementacije veštačke inteligencije, kao i prirodu problema rutiranja, poslednjih godina publikovan je veliki broj radova koji pokušavaju da ovaj problem reše na drugačiji način od onog koji se najčešće koristi u komercijalnim uređajima.

Zahvaljujući paralelnom procesiranju signala, neuralne mreže nude velike mogućnosti kada je potrebno rešenje naći u kratkom vremenskom periodu ali i sa skupom

nepotpunih ulaznih podataka i velikim dinamikama promene u posmatranom okruženju [5]. Ovo ih čini dobrim kandidatima za potrebe rutiranja i optimizacije saobraćaja [6]. Hopfield-ova neuralna mreža (HNM) je svoje prednosti pokazala na rešavanju kompleksnog problema trgovačkog putnika, pa je model Hopfield-Tank vrlo često korišćen za potrebe različitih vrsta rutiranja u različitim mrežnim uslovima [7,8].

U našim prethodnim radovima HNM je korišćena za dinamičko rutiranje sa velikim brojem dodatnih parametara, koje je trebalo posmatrati kao multikriterijumsku optimizaciju [3,8,9]. Poredeći takva rešenja sa onima koja se koriste u hardverskim implementacijama uređaja za rutiranje, ili koja su našla svoje mesto u protokolima, ukazuje se potreba za korišćenjem statičkih putanja [4,10]. Ove putanje imaju svoje prednosti i mane, ali u svakom od rutera postoji mogućnost njihovog definisanja i njihove uloge u rutiranju ukupnog mrežnog saobraćaja [10,11].

Cilj ovog rada je da se ukaže na mogućnost da Hopfield-ova neuralna mreža, u rutiranju i izboru konačne putanje, uključi i statičke putanje. Statičke putanje predstavljaju fiksne i unapred određene deonice u ukupnoj putanji između izvorišnog i odredišnog rutera. Ovakve putanje se u realnim uslovima konfigurisu direktno na ruteru i umnogome skraćuju proceduru za izbor rutera u sledećem hop-u kao i resurse mreže jer se ne mora vršiti stalno ažuriranje ruting tabela [10,11]. Pored toga statičke rute imaju svoje prednosti i primenjuju se u mrežama sa manjim brojem rutera [4,10]. Kako su autori do sada razvili model Hopfield-ove neuralne mreže za dinamičko rutiranje [3,8,9], cilj ovog rada je da se ti algoritmi prošire i na mogućnost korišćenja statičkih ruta. Dodatno, predloženi model može da ponudi i dopunske mogućnosti da statička putanja bude uslovno obavezna, tako da u slučaju neželjenog događaja, koji može ugroziti efikasan rad mreže, predloženi algoritam nalazi adekvatno rešenje.

Rad je organizovan kroz pet poglavlja. U II poglavlju date su osnovne napomene u vezi statičkih ruta. Princip rada Hopfield-ove neuralne mreže i predložene modifikacije su date u III poglavlju. U IV poglavlju su prikazani dobijeni rezultati, dok su zaključak i dalje smernice rada opisani u V poglavlju.

## II. RUTIRANJE UPOTREBOM STATIČKIH PUTANJA

Statičko rutiranje predstavlja jedan koncept rutiranja u komunikacionim mrežama [11,12]. Ovakav vid rutiranja

<sup>1</sup>Nenad S. Kojić, Visoka škola strukovnih studija za informacione i komunikacione tehnologije, Zdravka Čelara 16, 11000 Belgrade; E-mail: [nenad.kojic@ict.edu.rs](mailto:nenad.kojic@ict.edu.rs).

<sup>2</sup>Irini S. Reljin, <sup>3</sup>Branimir D. Reljin Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd; E-mail: [irinits@gmail.com](mailto:irinits@gmail.com), [reljinb@etf.rs](mailto:reljinb@etf.rs).

podrazumeva unapred definisane statičke deonice, više deonica ili cele putanje. Na ovaj način se izbor putanje ne zasniva na nekoj metrici nego je izbor putanje ili njene deonice unapred definisan [12]. U realnim uslovima ovakva putanja se definiše direktno na ruteru od strane administratora. Iz tog razloga, ovakvo rutiranje koje unapred definiše način i putanju prenosa paketa naziva se statičko rutiranje. Nasuprot njemu, postoji dinamičko koje na osnovu trenutnih parametara u mreži treba da pronađe optimalnu putanju između izvora i odredišta [12].

Statičke putanje se iz tog razloga ne koriste u svim vrstama i namenama mreža. Najčešća upotreba ovih putanja je kod komunikacije između različitih mreža, komunikaciji sa podmrežama, celokupnom rutiranju kod manjih mreža, za vojne i potrebe gde je sigurnost podataka vrlo bitna karakteristika prenosa [4,11]. Kako je ova putanja unapred definisana, tačno se zna koji saobraćaj i u kom obimu se prenosi kroz ovu deonicu. Na taj način ove rute su vrlo pogodne za monitoring, konfiguraciju i upravljanje. Kao takve, statističke putanje su podržane od strane svih rutera i uređaja za rutiranje [4].

Sa druge strane, statičke putanje, naspram dinamičkih imaju i mane. Kako se statičke putanje planiraju unapred i konfiguriraju na svakom ruteru u mreži, nisu pogodne za mreže sa većim brojem rutera. Promene u mrežnoj topologiji ostaju nepoznate za statičko rutiranje jer ne postoji dinamički protokol razmene informacija sa drugim ruterima o novonastalim promenama u mrežnoj topologiji [4,11,12].

Međutim, u velikim mrežama sa dinamičkim rutiranjem postoji stalna razmena informacija o mrežnoj topologiji (na primer svakih 30 sekundi po RIP (*Routing Information Protocol*) [10] specifikaciji. Na taj način, u velikim mrežama jedan deo korisnog propusnog opsega se koristi za prenos informacija koje nisu korisničke. Povećavanjem broja rutera jasno se nameće zaključak koliko se resursi mreže zauzimaju informacijama koje nisu korisničke.

Imajući u vidu prednosti i mane statičkog tj. dinamičkog rutiranja, u realnim mrežnim okruženjima oba tipa rutiranja imaju svoje mesto i oba se primenjuju. U zavisnosti od strukture mreže, zahteva u istoj i odluke administratora, pojedine deonice će biti definisane kao statičke uz mogućnost promene tog stanja.

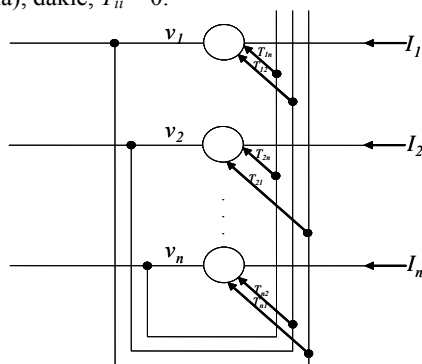
Kako u prethodnim radovima autora ovog rada nije razmatrana i mogućnost uvođenja statičkih ruta, a pokazuje se da postoji potreba za njima, u ovom radu će se predložiti algoritam koji treba da i ovu vrstu rutiranja uključi u potencijalni izbor.

Kako je osnovna mana statičkih ruta gubitak saobraćaja koji se po istim odvija, ukoliko dođe do otkazivanja nekog od linkova statičkih ruta, predloženi algoritam treba da omogući i uslovno definisanje statičkih ruta. Ovo podrazumeva da se saobraćaj odvija kako je to definisano zahtevima mreža i statičkih ruta, ali da u slučaju otkazivanja ili nemogućnosti da se korisnička informacija, iz bilo kog razloga ne može preneti, automatski definiše nova alternativna putanja.

### III. PREDLOŽENI MOFEL HOPFIELD-OVE NEURALNE MREŽE

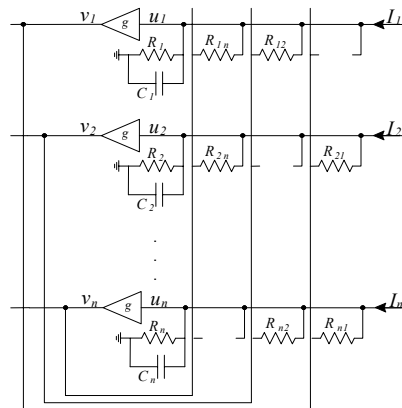
#### A. Osnove karakteristike Hopfield-ove neuralne mreže

Analogna Hopfield-ova neuralna mreža je dinamički sistem prostih elemenata (neurona) međusobno povezanih nelinearnim vezama koje simuliraju rad biološke neuralne mreže [5,6]. Svaki neuron ove neuralne mreže, na slici 1, predstavljen je krugom. Izlazi neurona su označeni sa  $v_i$ , i oni, preko sinaptičkih težina  $T_{ij}$  deluju na ulaze drugih neurona. Moguće je dovesti na ulaze i konstantne signale (struje)  $I_i$  kojima se može podesiti prag aktiviranja neurona, ili se dovodi neka druga spoljašnja informacija. Primitimo da u Hopfield-ovoj mreži nema samopobuđivanja (nema povratne veze sa izlaza na ulaz istog neurona), dakle,  $T_{ii} = 0$ .



Slika 1 - Model Hopfield-ove neuralne mreže.

Polazeći od funkcionalnog modela Hopfieldove mreže sa slike 1, dobija se moguće električno kolo za njenu realizaciju, slika 2. Težine  $T_{ij}$  su realizovane otpornostima  $R_{ij}$ , pri čemu je  $T_{ij} = 1/R_{ij}$ .



Slika 2 – Moguća realizacija Hopfield-ove neuralne mreže

Jedna od često korišćenih pretpostavki za funkciju prenosa (ili *aktivacionu funkciju*, u žargonu neuralnih mreža) nelinearnog pojačavača je da je diferencijabilna na celom intervalu i monotonno rastuća. Jedna od mogućih aktivacionih funkcija [6] je sigmoidalna, data sa

$$v = g(u) = \frac{1}{1 + e^{-au}} \quad (1)$$

gde pozitivan parametar  $a$  definiše nagib funkcije. Jednačina stanja za  $i$ -ti pojačavač napona sa slike 2 (smatrajući da je ulazna otpornost pojačavača beskonačna) je data sa

$$C_i \frac{du}{dt} + \frac{u_i}{R_i} = \frac{v_1 - u_i}{R_{i1}} + \frac{v_2 - u_i}{R_{i2}} + \dots + \frac{v_n - u_i}{R_{in}} + I_i \quad (2)$$

sa  $i=1,2,\dots,n$ . Uvodeći transkonduktanse umesto otpornosti pa dalje njihovim grupisanjem kao

$$T_{ij} = \frac{1}{R_{ij}}, \quad \frac{1}{r_i} = \sum_{j=1}^n T_{ij} + \frac{1}{R_i}, \quad (3)$$

dobija se relacija

$$C_i \frac{du_i}{dt} + \frac{u_i}{r_i} = \sum_{j=1}^n T_{ij} v_j + I_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Hopfield-ova mreža se može primeniti za rešavanje različitih vrsta optimizacionih problema pa, stoga, i za problema rutiranja. Minimiziranjem energijske funkcije Hopfieldove mreže [5,6], koja uspostavlja vezu između ulaza i izlaza, i odgovarajućim izborom težina  $T_{ij}$ , može se postići optimalno ili željeno stabilno stanje mreže. U radu [13] je HNM primenjena za nalaženje najkraćeg puta između datog para izvor-destinacija, pri čemu se putevi opisuju cenom linka,  $C_{ij}$ , od čvora  $i$  do čvora  $j$ . Međutim, dobijeno rešenje nije optimalno jer je broj čvorova u odabranoj putanji fiksiran.

Zhang i Thomopoulos [14] su otklonili ovaj nedostatak i predložili model neuralne mreže koja koristi isti oblik energijske funkcije kao u originalnom radu [6]. Međutim, i u ovom rešenju su pozicije izvora i destinacije fiksirane, tako da se mora menjati konfiguracija mreže za drugi par krajnjih čvorova. Dalje poboljšanje algoritma predlažu Ali i Kamoun [7]. Oni posmatraju neuralnu mrežu sa  $n(n-1)$  neurona – neuroni na glavnoj dijagonali kvadratne matrice  $n$ -tog reda nisu potrebni – i traže najkraći put iz finalnih stabilnih stanja neurona. Energijska funkcija Hopfield-ove neuralne mreže koju predlažu Ali i Kamoun za rešavanje problema rutiranja,  $E^{AK}$ , je oblika

$$E^{AK} = \frac{\mu_1}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} C_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_2}{2} \sum_X \sum_{i \neq X} \rho_{Xi} v_{Xi} + \frac{\mu_5}{2} (1 - v_{ds}) + \frac{\mu_3}{2} \sum_X \left( \sum_{i \neq X} v_{Xi} - \sum_{i \neq X} v_{iX} \right)^2 + \frac{\mu_4}{2} \sum_i \sum_{X \neq i} v_{Xi} (1 - v_{Xi}) \quad (5)$$

Za neurone koji odgovaraju izabranom (najkraćem) putu izlazno stanje  $v_{Xi}$  je jednako jedinici, a ostali imaju stanje jednako nuli. Koefficienti  $C_{Xi}$  predstavljaju cenu linka od  $X$  ka  $i$  a članovi  $\rho_{Xi}$  iskazuju povezanost čvorova: vrednost je 1 ako nisu povezani a 0 ako su vezani. Značajna prednost mreže Ali i Kamoun-a [7] je da su sinaptičke konduktanse fiksnog oblika

$$T^{AK}_{Xi,Yj} = \mu_4 \delta_{XY} \delta_{ij} - \mu_3 (\delta_{XY} + \delta_{ij} - \delta_{jX} - \delta_{iY}) \quad (6)$$

a cena linka se računa preko strujnih izvora, kao

$$I^{AK}_{Xi} = -\frac{\mu_1}{2} C_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_2}{2} \rho_{Xi} (1 - \delta_{Xd} \delta_{is}) - \frac{\mu_4}{2} + \frac{\mu_5}{2} \delta_{Xd} \delta_{is} \quad (7)$$

Sada je cena linka,  $C_{Xi}$ , sadržana u polarizacionim strujama a ne u konduktansama, pa je topologija mreže ISTA bez obzira na promenu uslova rada mreže, što je velika prednost ovakve modifikacije za rad u realnom vremenu, kada su, uobičajeno, uslovi rada promenljivi.

## B. Modifikacija Ali-Kamoun-ovog modela

Imajući u vidu potrebu da se statičke putanje uvrste u dosadašnja istraživanja autora, a polazeći od relacija (5-7), ovde predlažemo dalju modifikaciju energijske funkcije

$$E^{new} = E^{AK} + \sum_{\substack{m,n \in (X) \\ m \neq n}} \frac{\mu_6}{2} (1 - v_{mn}) + \sum_{\substack{p,q \in (X) \\ p \neq q}} \frac{\mu_7}{2} v_{pq} \quad (8)$$

U relaciji (8) poslednja dva (nova) člana definišu delove energijske funkcije koji su 'zaduženi' za uključivanje odnosno isključivanje određene deonice(a) iz konačne putanje. Pripadajuće konstante  $\mu_6$  i  $\mu_7$  treba dodatno da utiču na težinsku zastupljenost ova dva člana u celokupnoj energijskoj funkciji. Oznaka  $\Sigma$  ispred novih sabiraka ukazuje na mogućnost da se definiše veći broj linkova koji će biti uvršćen ili isključen iz konačne putanje. Indeksi  $m$ ,  $n$ ,  $p$  i  $q$  se odnose na čvorove mreže na koje se pripadajući linkovi mogu uključiti kao statičke putanje ili se zabraniti. Isključivanje deonice na ovaj način je, u osnovi, drugačije nego što je u prethodnim radovima autora rađeno. Naime, do sada je to rađeno kroz matricu povezanosti  $\rho$ , a sada se to vrši preko energijske funkcije. Na taj način se isključivanje vrši samo za potrebe jednog rutiranja, a ne sa aspekta cele mreže. Uz to, parametrom  $\mu_7$  se utiče na verovatnoću isključivanja, dakle, isključivanje nije bezuslovno, a celokupno rešenje je zasnovano na tome da konačna putanja bude optimalna.

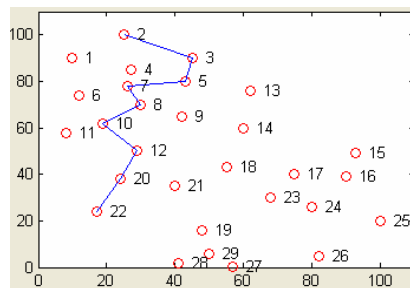
Kako dodati članovi nemaju kvadratnu zavisnost od  $v_i$ , matrica sinaptičkih konduktansi ostaje nepromenjena, kao i u relaciji (6), a novi članovi deluju na polarizacione struje:

$$I^{new}_{Xi} = I^{AK}_{Xi} + \frac{\mu_6}{2} \delta_{Xm} \delta_{im} - \frac{\mu_7}{2} \delta_{Xp} \delta_{iq} \quad (9)$$

Dobijene relacije (6), (8) i (9) su osnova predloženog modela, i kao takve su pogodne za računarsku simulaciju.

## IV. REZULTATI

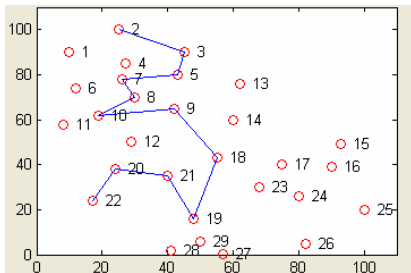
Za potrebe vizualizacije dobijenih rezultata kreiran je kod u Matlab-u 7.0 koji ima prateći GUI. Vrednosti svih parametara vezanih za neuralnu mrežu su preuzeti iz [9], dok su novim konstantama dodeljene vrednosti  $\mu_6=2500$  i  $\mu_7=2500$ . Topologija korišćene mreže je preuzeta iz [15], s tim što se kao jedini ulazni parametar koristi matrica međusobnih rastojanja čvorova. Na taj način predloženi algoritam treba da ima istu ulogu kao i Dijkstra algoritam [4,12] koji se koristi u savremenim mrežnim uređajima.



Slika 3. Optimalna putanja od S=2 do D=22 bazirana samo na rastojanju

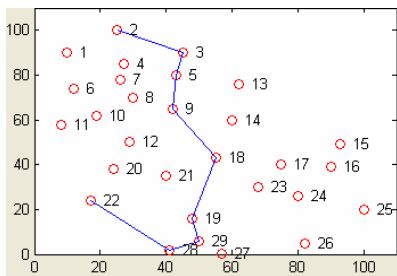
Ruteri sa oznakama 2 i 22 su izabrani za izvorišnu (S) i odredišnu (D) poziciju. Stavljajući  $\mu_6=0$  i  $\mu_7=0$  (nema uračunavanja statičkih ruta) dobija se optimalna putanja od S=2 do D=22 kao na slici 3.

Stavljajući da je  $\mu_6=2500$  i  $\mu_7=0$ , i definišući jednu deonicu kao statičku (npr, vezu 18-19) dobija se optimalna putanja od S=2 do D=22 kao na slici 4.



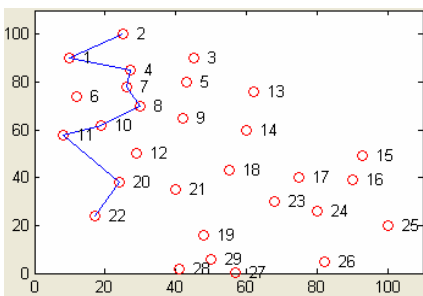
Slika 4. Optimalna putanja od S=2 do D=22 ako je kao statička ruta definisana putanja 18-19.

Ako se pored ove statičke rute konfiguriše statička putanja na linku 28-22 dobija se putanja kao na slici 5.



Slika 5. Optimalna putanja od S=2 do D=22 kada su statičke rute definisane na 18-19 i 28-22.

Pored „stimulacije“ pojedinih linkova, ovaj algoritam pruža i mogućnost zabrane korišćenja istih. Ukoliko se link 2-3 koji je najviše korišćen u prethodnim primerima „zabrani“, stavljanjem  $\mu_7=2500$ , a statičkim linkom proglasi 11-20 dobija se putanja prikazana na slici 6.



Slika 6. Optimalna putanja od S=2 do D=22 kada je statička ruta definisana na 11-20 a link 2-3 je „zabranjen“.

## V. ZAKLJUČAK

U radu je predložen model Hopfield-ove neuralne mreže za potrebe rutiranja u mrežama sa paketskom

komutacijom. Ovaj model metriku bazira na rastojanju, a u sebe uključuje i mogućnost dodavanja statičkih putanja i putanja koje ne mogu učestvovati u konačnoj putanji. Rezultati su pokazali da HNM može da bude dobar alat za potrebe simuliranja realnih uslova rada. Dalja istraživanja će biti usmerena na proširenje ovog modela u smislu uključivanja dinamičkog rutiranja i većeg broja parametara na osnovu kojih se donosi konačna odluka u putanji.

## LITERATURA

- [1] E.P.C. Jones, L. Li, J.K. Schmidtke, "Practical routing in delay-tolerant networks", *Mobile Computing*, Vol. 6, Issue 8, pp. 943-959, 2007.
- [2] S.Chen, K.Nahrstedt, "An overview of quality of service routing for next-generation high-speed networks: problems and solutions", *Network, IEEE*, Vol. 12, Issue:6, pp. 64-79, 1998.
- [3] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Dinamičko multicast rutiranje primenom Hopfield-ove neuralne mreže", *Telekomunikacije*, Broj 1, pp. 76-85, 2008.
- [4] J. Doyle, J. Carroll, *CCIE Professional Development Routing TCP/IP*, Volume 1, Second Edition by Cisco Press Pub, 2005.
- [5] S. Haykin, *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*, MacMillan College Publishing Company, Inc., 1994.
- [6] J. J. Hopfield, D. W. Tank, "Neural' computations of decision in optimization problems", *Biol. Cybern.*, Vol. 52, pp. 141-152, 1985.
- [7] M. Ali, F. Kamoun, "Neural networks for shortest path computation and routing in computer networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 4, No. 6, pp. 941-953, 1993.
- [8] N.Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Neural network for optimization of routing in communication networks", *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics*, Vol. 19, No. 2, pp. 317-329, August 2006.
- [9] N. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Optimal routing in packet switching network by using neural network", in *Proc. EUROCON-2005*, Vol. 2, pp. 1750-1753, Belgrade, 21-24 Nov., 2005.
- [10] S. M. Ballew, "Managing IP networks with Cisco routers", O'Reilly, 1997.
- [11] A. Rodriguez, J. Gattrell, J. Karas, R. Peschke, "TCP/IP Tutorial and Technical Overview", Prentice Hall, 7th Edition, 2001.
- [12] D. Medhi, K. Ramasamy, *Network Routing: Algorithms, Protocols, and Architectures*, Morgan Kaufmann, 2007.
- [13] H. Rauch, T. Winarske, "Neural networks for routing communication traffic", *IEEE Contr. Syst. Mag.*, pp. 26-30, April 1988.
- [14] L. Zhang, S. Thomopoulos, "Neural network implementation of the shortest path algorithm for traffic routing in communication networks", in *Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks*, p. II. 591, June 1989.
- [15] N. Kojić, R. Kojić, I. Reljin, B. Reljin, "Planiranje i izbor putne trase auto puta primenom neuralne mreže", *Conf. TELFOR*, November 20-22, 2007.

## ABSTRACT

In this paper a modified Hopfield-like neural network for dynamic routing in packet switching network, is presented. Started from our previous work and having in mind that in real networks static routes may be predefined (fixed), we suggested a new routing algorithm, capable to include static routes. Our algorithm has the possibility to find optimal path with inclusion or exclusion some link(s) from the final route.

## HOPFIELD NEURAL NETWORK IN PACKET ROUTING WITH STATIC ROUTES

Nenad Kojić, Irini Reljin and Branimir Reljin