

## POBOLJŠANJE NEURONSKIH MODELA ŠUMA MIKROTALASNIH TRANZISTORA ZA RAZIČITE TEMPERATURNE USLOVE

Zlatica Marinković, Vera Marković, *Elektronski fakultet u Nišu*

**Sadržaj** – Autori su u svojim ranijim radovima predložili primenu neuronskih mreža za modelovanje temperaturne zavisnosti elemenata modela malošumnih mikrotalasnih tranzistora koji uključuje šum. Pomoću predloženog modela moguće je odrediti parametre šuma komponente za bilo koju radnu temperaturu. U ovom radu prikazan je postupak povećanja tačnosti ranije predloženog neuronskog modela šuma, korišćenjem dodatne neuronske mreže pomoću koje se vrši korekcija vrednosti parametara šuma.

### 1. UVOD

U poslednjih desetak godina veštačke neuronske mreže su dosta primenjivane u oblasti mikrotalasa, [1]-[3]. Korišćene su za modelovanje kako pasivnih tako i aktivnih mikrotalasnih komponenta, za projektovanje i analizu mikrotalasnih kola, itd. S obzirom da neuronske mreže imaju sposobnost „učenja” zavisnosti između dva skupa podataka, posebno su pogodne kod nelineranih problema i problema koji nisu u potpunosti matematički opisani, odnosno koji se ne mogu predstaviti pomoću matematičkih izraza u zatvorenom obliku. Bitno je naglasiti i činjenicu da neuronske mreže bolje „fituju” nelinearne zavisnosti od polinoma. Neuronska mreža uči na osnovu skupa poznatih ulazno-izlaznih zavisnosti. Po obučavanju, mreža je sposobna da predvidi odziv ne samo za vrednosti ulaznih veličina koje su joj prezentovane u toku učenja (sposobnost memorisanja), već i za ostale vrednosti iz opsega (sposobnost generalizacije).

Pouzdati modeli mikrotalasnih tranzistora (MESFET, HEMT) su neophodni za postupke projektovanja aktivnih mikrotalasnih kola. Pri tome treba imati u vidu da karakteristike tranzistora, posebno u pogledu šuma, zavise od temperature na kojoj komponenta radi, a koja često odstupa od nominalne (sobne) temperature. Promene karakteristika tranzistora dalje utiču na ponašanje celog kola, što u nekim slučajevima može dovesti do degradacije performansi kompletnog sistema. Stoga je od velikog značaja da model adekvatno uključi temperaturne karakteristike komponente, pre svega šuma.

Najveći broj postojećih modela tranzistora za male signale važi samo za jednu određenu temperaturu. Za bilo koju drugu temperaturu potrebno je iznova ekstrahovati elemente modela. Proces ekstrakcije je u osnovi optimizacioni proces, u okviru simulatora mikrotalasnih kola, koji može biti vremenski veoma zahtevan. Pri tome je za ekstrakciju neohodno izvršiti merenje karakteristika tranzistora na datoj temperaturi za izvesni broj frekvencijskih tačaka, što dodatno otežava i usložnjava proces modelovanja.

Autori su ranije predložili model šuma mikrotalasnih tranzistora koji uključuje temperaturnu zavisnost karakteristika, a koji je baziran na primeni neuronskih mreža, [4]-[5]. Predloženi model predstavlja kombinaciju empirijskog modela Pospieszalski-og [6] i neuronskih mreža.

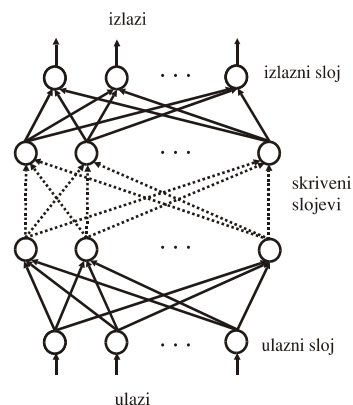
Naime, neuronskom mrežom se modeluje zavisnost elemenata ekvivalentnog kola i ekvivalentnih temperatura šuma mikrotalasnog tranzistora od temperature ambijenta, kao što je prikazano u [4]. Na taj način se može vršiti predikcija parametara šuma za proizvoljnu temperaturu iz radnog opsega komponente, [5].

Međutim, nedostatak predloženog modela je to što njegova tačnost zavisi, između ostalog, od kvaliteta ekstrakcije elemenata ekvivalentnog kola koje su korišćene za obučavanje neuronske mreže, kao i od tačnosti originalnog empirijskog modela. Tačnost ovako koncipiranog neuronskog modela ne može biti veća od tačnosti originalnog empirijskog modela, u ovom slučaju modela Pospieszalski-og.

U ovom radu prikazan je postupak poboljšanja tačnosti ranije predloženih neuronskih modela šuma, korišćenjem dodatne neuronske mreže pomoću koje se vrši korekcija vrednosti parametara šuma.

### 2. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

Za predložene modele pogodno je koristiti slojevitu veštačku neuronsku mrežu (MLP - MultiLayer Perceptron network), SI.2, [1].



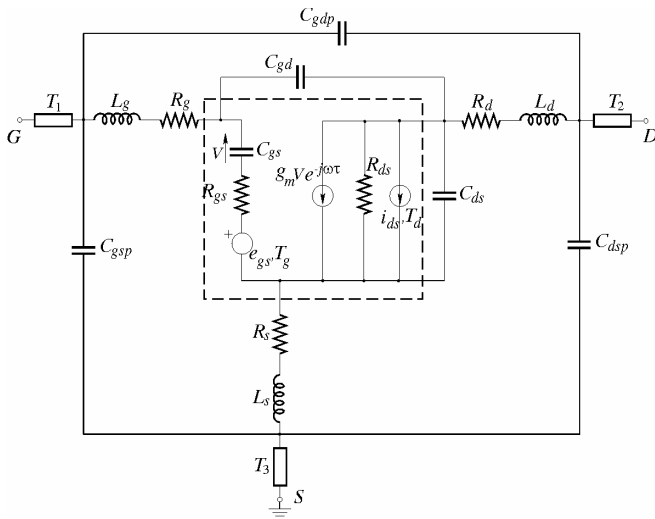
SI.1. MLP mreža

Ova mreža se sastoji od neurona (označenih kružićima) koji su grupisani u slojeve. Izlazi svih neurona iz jednog sloja se vode na ulaze neurona iz narednog sloja. Pobudni signali iz okruženja se dovode na ulaze neurona u prvom, ulaznom sloju. Izlazi neurona iz poslednjeg (izlaznog) sloja su izlazi cele mreže. Neuroni koji nisu u direktnom kontaktu sa okruženjem pripadaju tzv. skrivenim slojevima. Svakom neuronu je dodeljena aktivaciona funkcija  $F$ , a svakoj vezi težina. Pragovi aktivacionih funkcija i težine veza predstavljaju parametre neuronskog modela. Aktivaciona funkcija je linearna za neurone iz ulaznog i izlaznog sloja i sigmoidalna za neurone iz skrivenih slojeva. U postupku učenja mreže treba odrediti parametre mreže tako da razlika između željenog i stvarnog odziva mreže bude minimalna. Postupak učenja se vrši po *backpropagation* algoritmu ili

nekoj od njegovih modifikacija, kao što je *Levenberg-Marquardt-ov* algoritam, [1].

### 3. NEURONSKI MODEL ŠUMA

U ranije predloženom neuronskom modelu, tranzistor se predstavlja pomoću ekvivalentnog kola koje uključuje šum, a neuronskom mrežom se modeluje zavisnost elemenata modela tranzistora od temperature. Ovde se konkretno polazi od modela šuma MESFET/HEMT tranzistora koji je uveo Pospieszalski [6], Sl.2., gde ekvivalentno kolo za male signale sadrži dva izvora šuma, naponski  $e_{gs}$  na strani gejta i strujni  $i_{ds}$ , na strani drejna. Naponskom izvoru šuma  $e_{gs}$  pridružena je ekvivalentna temperatura šuma  $T_g$ , a strujnom izvoru šuma  $i_{ds}$  temperatura šuma  $T_d$ . Ove dve ekvivalentne temperature su empirijski parametri modela koji se određuju optimizacijom na osnovu eksperimentalnih podataka o karakteristikama šuma komponente.



Sl.2. Ekvivalentno kolo tranzistora po Pospieszalski-om

Parametri šuma unutrašnjeg ekvivalentnog kola, koje je označeno isprekidanom linijom, (minimalni faktor šuma  $F_{min}$ , normalizovana ekvivalentna otpornost šuma  $r_n$  (u odnosu na normalizacionu impedansu  $Z_0 = 50\Omega$ ) i optimalni koeficijent refleksije  $\Gamma_{opt}$ ) izračunavaju se na osnovu poznatih vrednosti elementa ekvivalentnog kola i ekvivalentne temperature šuma, [6]. Zatim se na unutrašnje kolo nadovezuju svi preostali elementi, a parametri šuma cele pakovane komponente izračunavaju se tako što se za temperaturu svih otpornih elemenata na osnovu koje se određuju pojedinačni doprinosi u ukupnom šumu, uzima temperatura ambijenta.

Ekstrahovane vrednosti elemenata razmatranog modela važe samo za temperaturu pri kojoj su mereni S-parametri i parametri šuma. Da bi se izbeglo ponavljanje kompletnog postupka pribavljanja merenih podataka i ekstrakcije elemenata modela za svaku narednu temperaturu predloženo je korišćenje neuronske mreže za modelovanje temperaturne zavisnosti elemenata ekvivalentnog kola i ekvivalentnih temperatura šuma, [4]. Ova mreža (Nnet1 na Sl.3.) ima jedan neuron u ulaznom sloju na koji se dovode podaci o temperaturi ambijenta. Broj elemenata u izlaznom sloju

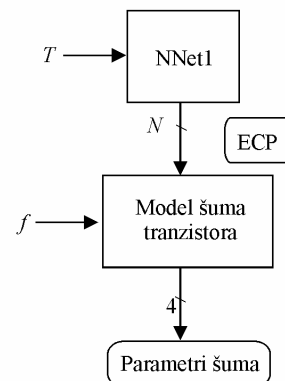
odgovara ukupnom broju parametara (ECP - *Equivalent Circuit Parameters*) čija se temperaturna zavisnost modeluje. Za izabrani model šuma, neuronska mreža ima 20 izlaza, od kojih 19 odgovara elementima ekvivalentnog kola i jedan ekvivalentnoj temperaturi drejna. Pri tome je ekvivalentna temperatura gejta izjednačena sa temperaturom ambijenta. Jedan skriveni sloj je dovoljan za ovakvu mrežu.

Obučavanje mreže se vrši pomoću vrednosti elemenata ekvivalentnog kola i ekvivalentnih temperatura šuma za određeni broj temperatura ambijenta, tzv. "training skup". Training podaci se dobijaju optimizacionim postupkom u okviru mikrotalasnog simulatora kola, a na bazi eksperimentalnih podataka. Pomoću datog training skupa obučavaju se mreže sa različitim brojem skrivenih neurona. Zatim se vrši evaluacija modela i bira mreža koja najbolje modeluje date zavisnosti.

Po završenom obučavanju neuronske mreže, za određivanje elemenata modela šuma tranzistora na proizvoljnoj temperaturi unutar radnog opsega dovoljno je odrediti odziv neuronske mreže za datu temperaturu. Time se eliminiše optimizacioni postupak određivanja ECP parametara, kao i potreba za merenim vrednostima za svaku konkretnu temperaturu.

Sledeći korak je implementacija modela u standardni mikrotalasni simulator, u konkretnom slučaju ADS, [7]. Najpre se u simulatoru definiše šema koja odgovara modelu sa Sl.2 sa pridruženim jednačinama računanje parametara šuma unutrašnjeg kola. U okruženju u kome je razvijena neuronska mreža, generiše se skup jednačina koji opisuje datu mrežu. Zatim se u simulatoru na osnovu tog skupa jednačina formira VAR blok, koji se dodaje na formiranu šemu. Vrednosti izlaznih promenljivih ovog VAR bloka pridružuju se odgovarajućim ECP parametrima modela šuma. Tako definisana šema može da se koristi kao korisnički-definisani bibliotečki element validan u radnom temperaturnom opsegu, sa temperaturom ambijenta kao ulaznim parametrom. Na taj način je moguće bez ikakvih dodatnih ekstrakcija ECP parametara vršiti temperaturnu analizu kola koje sadrži datu komponentu.

Princip određivanja parametara šuma korišćenjem ovog modela prikazan je na Sl. 3.



Sl. 3. Određivanje parametara šuma pomoću neuronskog modela

### 4. POBOLJŠANI NEURONSKI MODEL ŠUMA

Tačnost predloženog neuronskog modela šuma zavisi od toga koliko dobro je neuronska mreža „naučila” temperaturnu zavisnost ECP parametara, od kvaliteta

ekstrakcije ECP parametara koji su korišćeni za obučavanje neuronske mreže i, pre svega, zavisi od tačnosti originalnog empirijskog modela. Tačnost neuronskog modela ne može biti veća od tačnosti originalnog empirijskog modela, što je nedostatak predloženog modela.

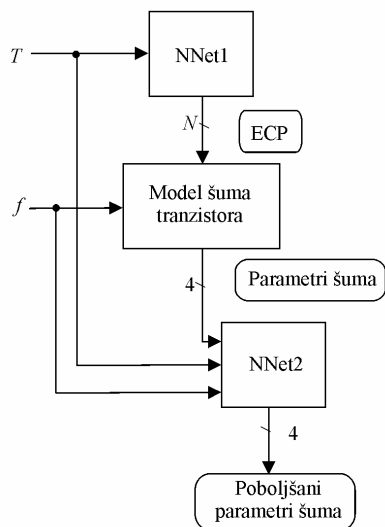
U cilju povećanja tačnosti modela i prevazilaženja prethodno pomenutih nedostataka predlaže se korišćenje dodatne neuronske mreže pomoću koje se vrši korekcija vrednosti parametara šuma.

Ideja je da se izvrši obučavanje neuronske mreže sa 6 ulaza i 4 izlaza (NNet2 na Sl.4.). Na ulazne neurone se dovode: temperatura, frekvencija i vrednosti parametara šuma dobijene pomoću polaznog neuronskog modela šuma, dok se na izlaznim neuronima dobijaju parametri šuma sa povećanom tačnošću. Obučavanje mreže se vrši pomoću skupa podataka čiji se svaki uzorak sastoji od temperature, frekvencije, parametara šuma dobijenih pomoću polaznog neuronskog modela i merenih vrednosti parametara šuma za datu temperaturu i frekvenciju. I u ovom slučaju jedan skriveni sloj je dovoljan.

Po obučavanju mreža sa različitim brojem neurona u skrivenom sloju, vrši se njihova evaluacija i bira se mreža koja će predstavljati korekcionu mrežu neuronskog modela šuma date komponente.

Korekciona neuronska mreža se dodaje na prethodno definisanu šemu neuronskog modela date komponente u mikrotalasnom simulatoru, tako što se jednačine koje je opisuju stavljaju u dodatni VAR blok čiji su ulazi temperatura, frekvencija i parametri šuma dobijeni pomoću polaznog neuronskog modela. Izlazi ovog VAR bloka predstavljaju vrednosti parametara šuma sa povećanom tačnošću i pridružuju se posmatranoj komponenti.

Princip određivanja parametara šuma korišćenjem poboljšanog neuronskog modela prikazan je na Sl. 4.



Sl. 4. Određivanje parametara šuma pomoću poboljšanog neuronskog modela

## 5. REZULTATI MODELOVANJA

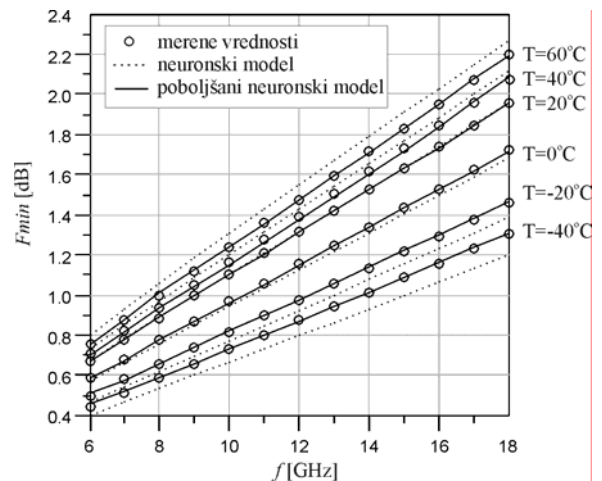
Za pakovani HEMT tranzistor NE20283A kompanije NEC razvijeni su predloženi osnovni i poboljšani neuronski model. Za potrebe razvijanja modela ovog tranzistora korišćeni su podaci o S-parametrima i parametrima šuma dobijeni merenjima u opsegu od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  sa korakom

od  $20^{\circ}\text{C}$ , koja su obavljena ranije na Univerzitetu u Palermu, Italija, [8]. Za svaku od temperatura najpre je izvršena ekstrakcija elemenata modela za male signale, sa reprezentacijom šuma po Pospieszalski-om, pri čemu je ekvivalentna temperatura gejta izjednačena sa temperaturom ambijenta. Na osnovu dobijenih vrednosti elemenata modela izvršeno je obučavanje odgovarajućih neuronskih mreža za modelovanje njihove zavisnosti od temperature. Kao najbolji model izabrana je mreža koja ima jedan skriveni sloj sa 5 neurona.

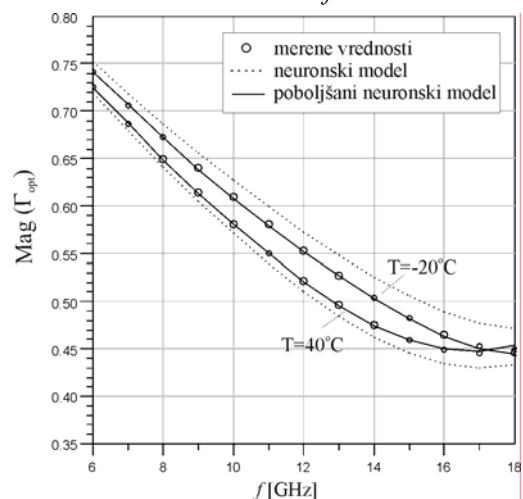
Zatim je izvršeno obučavanje neuronskih mreža za korekciju vrednosti parametara šuma. Kao trening podaci korišćeni su mereni parametri šuma na temperaturama  $\{-40^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C} \text{ i } 60^{\circ}\text{C}\}$ , kao i odgovarajuće vrednosti parametara šuma dobijene pomoću osnovnog neuronskog modela. Kao najbolja izabrana je mreža koja ima deset neurona u skrivenom sloju.

Razvijeni neuronski modeli su implementirani u mikrotalasni simulator ADS, na način opisan u prethodnim poglavljima.

Na sledećim slikama prikazani su rezultati predikcije parametara šuma pomoću dobijenih modela.



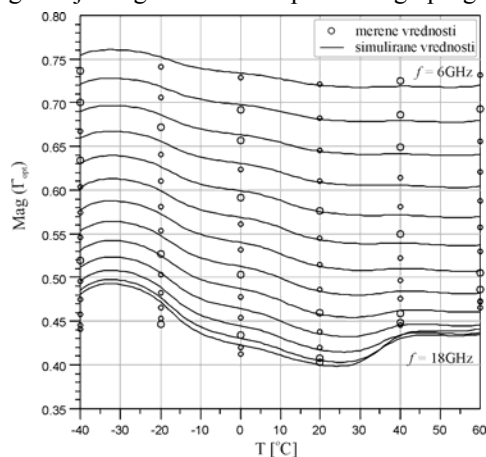
Sl.5. Minimalni faktor šuma



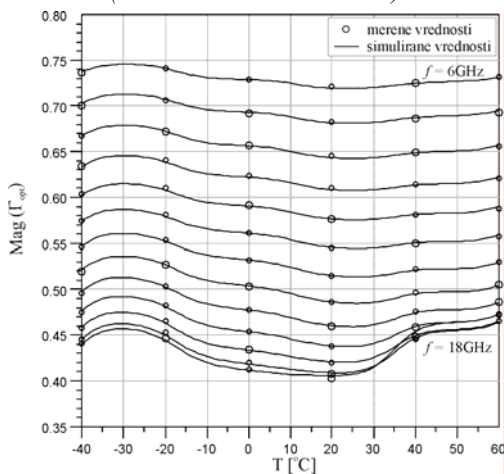
Sl.6. Moduo optimalnog koeficijenta refleksije

Na Sl. 5. prikazana je frekvencijska zavisnost minimalnog faktora šuma. Očigledno je da su vrednosti dobijene pomoću poboljšanog neuronskog modela (puna linija) mnogo bliže merenim vrednostima (kružići) od vrednosti dobijenih pomoću osnovnog neuronskog modela (isprekidana linija). Poboljšanje u modelovanju se uočava

kako u slučaju trening temperatura  $\{-40^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}, 20^{\circ}\text{C} \text{ i } 60^{\circ}\text{C}\}$ , tako i u slučaju temperatura  $\{-20^{\circ}\text{C} \text{ i } 40^{\circ}\text{C}\}$  koje nisu korišćene za obučavanje korekzione neuronske mreže. Efekti poboljšanja za temperature koje nisu korišćene za obučavanje korekzione neuronske mreže su još uočljiviji na primeru predikcije frekvencijske zavisnosti modula optimalnog koeficijenta refleksije, Sl.6. Na Sl. 7 i Sl. 8 prikazana je temperaturna zavisnost (korak  $1^{\circ}\text{C}$ ) modula optimalnog koeficijenta refleksije generisana pomoću osnovnog i poboljšanog neuronskog modela, respektivno. Poređenjem ovih rezultata takođe se uočava poboljšanje modelovanja, što je najočiglednije na granicama temperaturnog opsega.



Sl.7. Moduo optimalnog koeficijenta refleksije (osnovni neuronski model)



Sl.8. Moduo optimalnog koeficijenta refleksije (poboljšani neuronski model)

## 6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan postupak poboljšanja ranije predloženog neuronskog modela šuma mikrotalasnih tranzistora. Ranijim modelom, tranzistor se predstavlja pomoću ekvivalentnog kola koje uključuje šum, a neuronskom mrežom se modeluje zavisnost elemenata ekvivalentnog kola tranzistora od temperature. Međutim kako tačnost predloženog neuronskog modela šuma ne može biti veća od tačnosti originalnog empirijskog modela, predloženo je uvođenje jedne dodatne neuronske mreže kojom se vrši korekcija vrednosti parametara šuma. Za obučavanje date korekzione neuronske mreže koriste se pored vrednosti dobijenih pomoću polaznog neuronskog modela i merene vrednosti parametara šuma.

Analizom rezultata modelovanja šuma konkretne komponente, potvrđuje se da se pomoću predložene korekcije ranijeg neuronskog modela postiže poboljšanje modelovanja parametrara šuma. Pri tome poboljšanje važi, ne samo za temperature za koje je vršeno obučavanje korekzione neuronske mreže, već i za ostale temperature iz opsega.

Na ovoj način dobija se model koji omogućava određivanje parametara šuma sa velikom tačnošću u celom radnom temperaturnom opsegu bez potrebe za ponovnim merenjem S-parametara i parametara šuma i dodatnim optimizacijama za svaku željenu temperaturu. Kako je korekciona mreža obučavana pomoću merenih vrednosti, ovim modelom obuhvaćeni su svi efekti generisanja šuma koji u principu ne moraju biti obuhvaćeni originalnim empirijskim modelom.

## LITERATURA

- [1] Q. J. Zhang, K. C. Gupta, *Neural Networks for RF and Microwave Design*, Artech House, 2000
- [2] K.C.Gupta, "EM-ANN models for microwave and millimeter-wave components," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Workshop*, Denver, CO, June 1997, pp. 17-47.
- [3] P.M. Watson, M. Weatherspoon, L. Dunleavy; G.L. Creech "Accurate and efficient small-signal modeling of active devices using artificial neural networks" *Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium, Technical Digest*, November 1998, pp. 95-98
- [4] Z. Marinković, V. Marković, "Temperaturna zavisnost elemenata modela šuma mikrotalasnih tranzistora", *Zbornik radova XLVII konferencije ETRAN-a*, Herceg Novi, Jun 2003, pp. 341-344
- [5] Z. Marinković, V. Marković, "Neuronskih modeli šuma mikrotalasnih tranzistora za različite temperaturne uslove", *Zbornik radova XLVIII konferencije ETRAN-a*, Čačak, Jun 2004, pp. 303-306
- [6] M .W. Pospieszalski, Modeling of Noise Parameters of MESFET's and MODFET's and Their Frequency and Temperature Dependence", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 37, 1989, pp.1340-1350.
- [7] "Advanced Design Systems-version 1.5", Agilent EEsof EDA, 2000
- [8] *NE20283A\_temp.xls file*, interna komunikacija sa A. Caddemi, University of Messina, Italija

Zahvalnica: Rezultati prikazani u ovom radu dobijeni su tokom istraživanja u okviru projekta MNTR br. 101351.

**Abstract** - In the previous work, authors have proposed neural network application in modeling of temperature dependencies of low-noise microwave transistor noise model elements. Using the proposed model, the device noise parameters can be obtained for any operating temperature. The improvement of the earlier proposed transistor noise model accuracy by using an additional neural network for correcting of the values of the noise parameters is proposed in this paper.

## IMPROVED NEURAL NOISE MODELS OF MICROWAVE TRANSISTORS UNDER VARIOUS TEMPERATURE CONDITIONS

Zlatica Marinković, Vera Marković