

# Primena veštačkih neuronskih mreža u modelovanju šuma mikrotalasnih FET tranzistora za različite struje napajanja

Zlatica Marinković, *Member, IEEE*, Olivera Pronić-Rančić, *Member, IEEE*,  
and Vera Marković, *Member, IEEE*

**Sadržaj** — U radu je predstavljen postupak modelovanja šuma MESFET / HEMT tranzistora za različite struje napajanja komponente zasnovan na primeni veštačkih neuronskih mreža. Korišćeni model šuma predstavlja modifikaciju modela Pospieszalskog. Postupak modelovanja parametara šuma tranzistora za različite struje napajanja automatizovan je primenom veštačke neuronske mreže kojom su modelovane zavisnosti parametara modela šuma tranzistora od struje napajanja. Na ovaj način izbegnuti su postupci merenja  $S$  parametara i parametara šuma, kao i ekstrakcije elemenata modela za svaku novu kombinaciju uslova napajanja, jer jednom razvijena neuronska mreža omogućava predikciju parametara šuma za proizvoljnu kombinaciju uslova napajanja iz radnog opsega komponente bez ikakvih promena u strukturi modela.

**Ključne reči** — veštačke neuronske mreže, MESFET, napajanje, parametri šuma

## I. UVOD

PRILIKOM projektovanju savremenih mikrotalasnih komunikacionih sistema teži se da prijemi deo sistema unosi sto manji sopstveni šum, obzirom da nivo šuma određuje donju granicu jačine signala koji se može detektovati u prisustvu šuma. Zbog toga se velika pažnja posvećuje analizi šuma i predikciji karakteristika šuma aktivnih komponenata. U oblasti mikrotalasa najčešće korišćene malošumne komponente su MESFET i HEMT tranzistori. Problem karakterizacije šuma ovih komponenata aktuelan je već duži niz godina. Za neposredno merenje parametara šuma tranzistora neophodna je dosta složena i skupa oprema, pa se iz tih razloga teži primeni što pouzdanijih modela mikrotalasnih tranzistora, koji bi omogućili simulaciju u širokom frekvencijskom opsegu, kako  $S$  parametara, tako i parametara šuma.

Obzirom da je za primenu fizičkih modela šuma tranzistora neophodno poznavanje brojnih parametara vezanih za geometriju, tehnološki proces izrade komponente i slično, što je retko kad poznato za komercijalno raspoložive komponente, to se za primenu u okviru standardnih softverskih paketa za simulaciju i

projektovanje mikrotalasnih kola najčešće koriste empirijski modeli šuma, [1]-[3]. Za ove modele je, pored elemenata ekvivalentnog kola, neophodno odrediti (optimizacijom ili na neki drugi način) i jedan broj empirijskih parametara kojima se reprezentuje šum tranzistora.

Empirijski model šuma MESFET / HEMT tranzistora koji je uveo Pospieszalski, [3], pokazao se kao najpouzdaniji i najjednostavniji za implementaciju u okviru standardnih simulatora mikrotalasnih kola. Model se bazira na jednostavnim jednačinama za određivanje parametara šuma unutrašnjeg ekvivalentnog kola tranzistora u funkciji elemenata unutrašnjeg kola i dva empirijska, frekvencijski nezavisna parametra, nazvana - ekvivalentne temperature gejta i drejna.

U radovima [4] i [5] autori su predstavili jednostavan metod za predikciju parametara šuma tranzistora za različite radne uslove komponente, koji se zasniva na uvođenju frekvencijski zavisnih funkcija korekcije greške.

Model Pospieszalskog, kao i najveći broj postojećih modela šuma tranzistora, važi samo za jednu kombinaciju radnih uslova (temperature i/ili uslova napajanja), a za sve ostale je potrebno iznova ekstrahovati elemente modela.

Proces ekstrakcije elemenata modela šuma tranzistora je u osnovi optimizacioni proces u okviru simulatora mikrotalasnih kola, koji može biti vremenski veoma zahtevan. Pored toga, za ekstrakciju je neophodno izvršiti merenje  $S$  parametara i parametara šuma tranzistora za svaku radnu tačku komponente u odgovarajućem frekvencijskom opsegu, što dodatno otežava i usložnjava proces modelovanja.

Primenom veštačkih neuronskih mreža u postojeće empirijske modele šuma mikrotalasnih tranzistora moguće je prevazići ove probleme, odnosno, uključiti zavisnost od temperature i/ili uslova napajanja u modelu šuma tranzistora. Neuronske mreže se uspešno primenjuju u procesima modelovanja, optimizacije i simulacije mikrotalasnih kola i sistema, [6-11]. Jednom obučeni neuronski modeli daju praktično trenutni odziv. Važna osobina neuronskih modela je sposobnost generalizacije, odnosno mogućnost generisanja korektnih odziva i za vrednosti ulaznih parametara koje im nisu bile predstavljene tokom učenja.

U ovom radu su veštačke neuronske mreže primenjene za modelovanje zavisnosti elemenata ekvivalentnog kola empirijskog modela i ekvivalentnih temperatura šuma mikrotalasnog tranzistora (ECP - *Equivalent Circuit*

Z. Marinković, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529303; faks: 381-18-588399; e-mail: zlatica.marinkovic@elfak.ni.ac.rs).

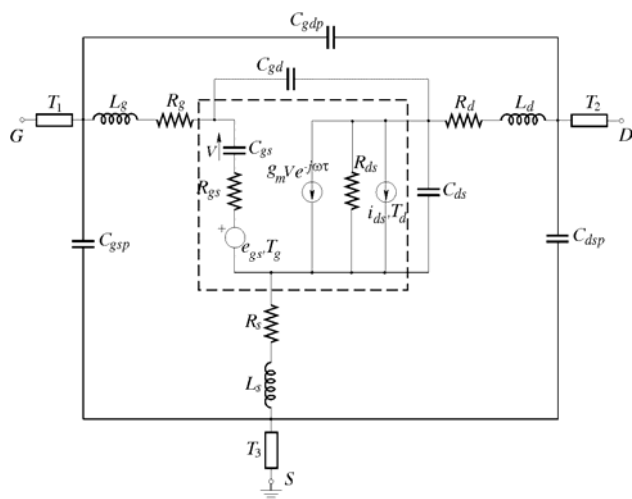
O. Pronić-Rančić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (e-mail: olivera.pronic@elfak.ni.ac.rs).

V. Marković, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (e-mail: vera.markovic@elfak.ni.ac.rs)

Parameters) od struje napajanja. Na taj način omogućena je predikcija parametara šuma za proizvoljne uslove napajanja iz radnog opsega komponente. U radu su dati i numerički rezultati modelovanja pakovanog GaAs FET tranzistora ATF21186 i izvedeni odgovarajući zaključci.

## II. EMPIRIJSKI MODEL ŠUMA TRANZISTORA

Ekvivalentno kolo MESFET / HEMT tranzistora koje uključuje i parazitne efekte pakovanja, prikazano je na Sl.1. Standardno unutrašnje ekvivalentno kolo, koje je zajedničko za većinu modela mikrotalasnih FET tranzistora, označeno je isprekidanom linijom.



Sl. 1. Ekvivalentno kolo pakovanog MESFET-a / HEMT-a sa uključenim izvorima šuma

Prema pristupu predloženom u [3], parametri šuma unutrašnjeg ekvivalentnog kola tranzistora - minimalni faktor šuma,  $F_{min}$ , normalizovana ekvivalentna otpornost šuma,  $r_n$ , i optimalni koeficijent refleksije,  $\Gamma_{opt}$ , izračunavaju se u funkciji elemenata ekvivalentnog kola i ekvivalentnih temperatura šuma. Ovako određeni parametri šuma u određenoj meri odstupaju od referentnih (merjenih) vrednosti parametara šuma. Da bi se minimiziralo odstupanje koje postoji između merjenih i modelovanih vrednosti parametara šuma, u radovima [4] i [5] je predložen novi model koji uvodi funkcije korekcije greške. Najpre se, za frekvencije za koje postoje mereni parametri šuma, određuje količnik vrednosti merjenog i odgovarajućeg modelovanog parametara šuma. Dobijene vrednosti zatim se fituju pogodnim frekvencijski zavisnim krivama. Funkcije korekcije greške, koje predstavljaju matematičku prezentaciju dobijenih krivih, određuju se posebno za svaki od parametara šuma. Tako određenim funkcijama korekcije greške množi set jednačina dat u [3] i na taj način dobijaju nove jednačine kojima za proračun parametara šuma unutrašnjeg kola tranzistora. Jednom određene funkcije korekcije greške važe za celi temperaturni i/ili opseg napajanja komponente.

## III. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

Postupak modelovanja šuma koji je predložen u ovom radu podrazumeva ekstrakciju parametara modela šuma tranzistora za svaku novu kombinaciju uslova napajanja. Kako to zahteva kompletan postupak pribavljanja merjenih podataka, a zatim i optimizaciju, u cilju povećanja efikasnosti ovog pristupa predloženo je korišćenje veštačkih neuronskih mreža za ekstrakciju parametara modela. U tu svrhu se može iskoristiti standardna slojevita veštačka neuronska mreža (MLP – *Multilayer Perceptron Network*), [5].

Ova mreža se sastoji od neurona grupisanih 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, a svakoj vezi težina. Pragovi aktivacionih funkcija i težine veza predstavljaju parametre neuronskog modela. 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, koji je korišćen za obučavanje modela prikazanih u ovom radu.

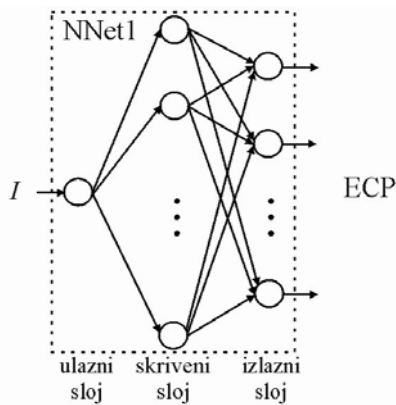
U ovom radu je, u cilju modelovanja zavisnosti parametara modela šuma tranzistora (ECP) u funkciji uslova napajanja, predložena neuronska mreža prikazana na Sl. 2. Obzirom da smo modelovali tranzistor kod koga je jednosmerni napon između drejna i sorsa  $V_{ds} = \text{const}$ , to neuronska mreža ima jedan neuron na ulazu koji odgovara struji između drejna i sorsa,  $I$ . Broj izlaznih neurona jednak je broju parametara modela šuma, *ECP*. Mreža može imati jedan ili dva skrivena sloja.

Neuroni iz ulaznog i izlaznog sloja imaju linearnu, a neuroni iz skrivenih slojeva sigmoidalnu aktivacionu funkciju ( $F(u) = 1/(1 + e^{-u})$ ), pa se vrednosti *ECP* određuju na osnovu izraza

$$\text{ECP} = \mathbf{W}_2 * F(\mathbf{W}_1 * I + \mathbf{B}_1) + \mathbf{B}_2, \quad (1)$$

gde su  $\mathbf{W}_1$  i  $\mathbf{W}_2$  - težinske matrice između ulaznog i skrivenog, odnosno, između skrivenog i izlaznog sloja, a  $\mathbf{B}_1$  i  $\mathbf{B}_2$  - matrice biasa za skriveni i izlazni sloj, respektivno.

Predložena neuronska mreža je obučavana na osnovu ekstrahovanih vrednosti *ECP*-a za nekoliko različitih struja napajanja iz radnog opsega komponente. Nakon obučavanja se vrednosti *ECP*-a za proizvoljne struje napajanja tranzistora određuju jednostavnim nalaženjem odziva mreže, čime je izbegnuta potreba za pribavljanjem merjenih podataka, kao i optimizacija u okviru simulatora mikrotalasnih kola.

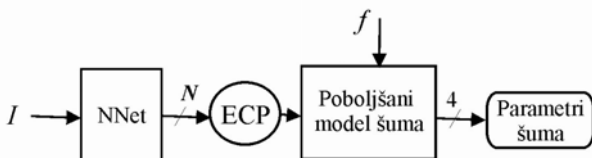


Sl. 2 MLP neuronska mreža za određivanje parametara ekvivalentnog kola u zavisnosti od struje napajanja

#### IV. IMPLEMENTACIJA PREDLOŽENOG MODELA U MIKROTALASNI SIMULATOR

Predloženi postupak za određivanje parametara šuma tranzistora ilustrovan je na Sl. 3.

Najpre je razvijena neuronska mreža pridružena modifikovanom empirijskom modelu šuma tranzistora. Predloženi model šuma tranzistora se implementira u mikrotalasni simulator pridruživanjem matematičkih izraza koji predstavljaju ekvivalent obučene neuronske mreže ranije razvijenom poboljšanom modelu tranzistora. Naime, izrazi kojima se opisuju parametri modela šuma tranzistora (ECP) smeštaju se u Variable and Equation (VAR) blok mikrotalasnog simulatora. Vrednosti izlaznih promenljivih ovog VAR bloka pridružuju se odgovarajućim parametrima modela šuma tranzistora.



Sl. 3 Predloženi model šuma tranzistora

#### V. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Eksperimentalni rezultati predstavljeni u ovom radu odnose se na modelovanje pakovanog mikrotalasnog GaAs FET tranzistora, proizvođača Agilent (HP), oznake ATF21186, [12]. Za razvoj modela korišćene su merene vrednosti S parametara i parametara šuma za sledeće uslove napajanja: (2V, 10mA), (2V, 15mA) i (2V, 20mA), u frekvijskom opsegu (0.5 – 8) GHz. Sve simulacije izvršene su u programskom paketu ADS (Advanced Design Sistem), [13].

Da bi se izvršila predikcija parametara šuma mikrotalasnih tranzistora primenom predloženog modela potrebno je najpre odrediti elemente ekvivalentnog kola i temperature šuma modela Pospieszalskog. ECP parametri modela Pospieszalskog ekstrahovani su za uslove napajanja  $V_{ds}=2V$ ,  $I_{ds}=20mA$  i na osnovu njih su proračunate vrednosti parametara šuma. Da bi se

minimiziralo odstupanje koje postoji između merenih i modelovanih parametara šuma sproveden je postupak korekcije krivih parametara šuma pomoću funkcija korekcije greške na način opisan u Sekciji II. Za modelovanje minimalnog faktora šuma najpodesnija je eksponencijalna funkcija korekcije greške, a za modelovanje amplitude i ugla optimalnog koeficijenta refleksije, kao i normalizovane otpornosti šuma funkcije korekcije greške su oblika polinoma, [5].

Na osnovu ekstrahovanih vrednosti parametara modela šuma tranzistora (ECP) izvršeno je obučavanje odgovarajućih neuronskih mreža za modelovanje njihove zavisnosti od struje napajanja tranzistora. U ovom slučaju, neuronska mreža ima 1 ulazni neuron (odgovara struji napajanja), 26 izlaznih neurona (24 neurona odgovara elementima ekvivalentnog kola i 2 ekvivalentnim temperaturama gejta i drejna). Izvršeno je obučavanje većeg broja neuronskih mreža sa različitim brojem neurona u skrivenim slojevima. Kao najbolji model izabrana je mreža koja ima jedan skriveni sloj sa 3 neurona. Matematički izrazi koji predstavljaju ekvivalent ove neuronske mreže dodate su u model u mikrotalasnom simulatoru, čime je razvijanje modela kompletirano.

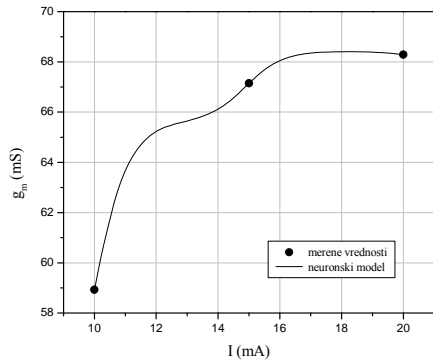
Kao primer modelovanja zavisnosti ECP-a od struje napajanja tranzistora, na Sl. 4 prikazana je zavisnost modula transkonduktanse,  $g_m$ , od struje napajanja, koja se dobija pomoću date neuronske mreže.

U cilju dodatne ilustracije tačnosti razvijene neuronske mreže, na Sl. 5 prikazan je dijagram korelacije modelovanih i referentnih vrednosti za minimalni faktor šuma. U slučaju idealnog modelovanja sve tačke na dijagramu korelacije bi se našle na dijagonali  $y=x$ . Veoma malo rasejanje tačaka od ove linije potvrđuje da je mreža dobro naučila podatke koji su joj predstavljeni tokom učenja.

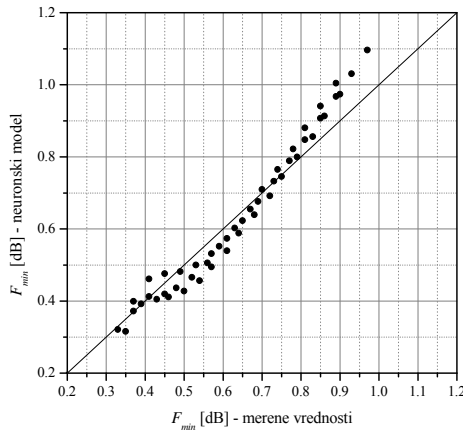
Na Sl. 6 i Sl. 7 dato je poređenje referentnih (merenih) podataka, prikazanih tačkama, i modelovanih vrednosti dobijenih predloženim postupkom, prikazanih punom linijom. Prikazana je zavisnost  $Mag(\Gamma_{opt})$  od frekvencije i od struje napajanja, respektivno. Može se uočiti da je ostvareno dobro slaganje između modelovanih i referentnih vrednosti. Slični rezultati dobijeni su i za ostale parametre šuma.

#### VI. ZAKLJUČAK

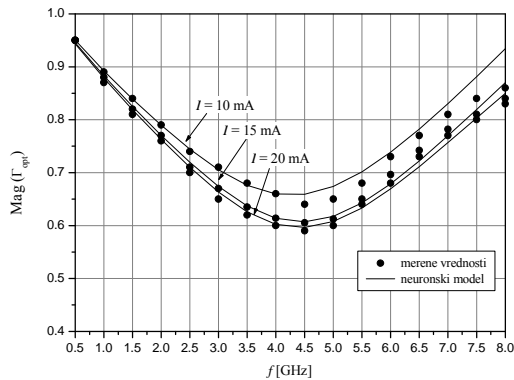
U radu je predstavljen postupak modelovanja šuma MESFET / HEMT tranzistora za različite struje napajanja komponente. Pri razvoju modela korišćen je modifikovani model šuma Pospieszalskog, čija je tačnost povećana korišćenjem funkcija korekcije greške. Za modelovanje zavisnosti parametara modela od struje napajanja primenjene su veštalke neuronske mreže, čime je omogućena efikasna predikcija parametara šuma komponente za proizvoljne uslove napajanja. Tačnost predloženog pristupa ilustrovana je na primeru modelovanja konkretnog pakovanog mikrotalasnog GaAs FET tranzistora.



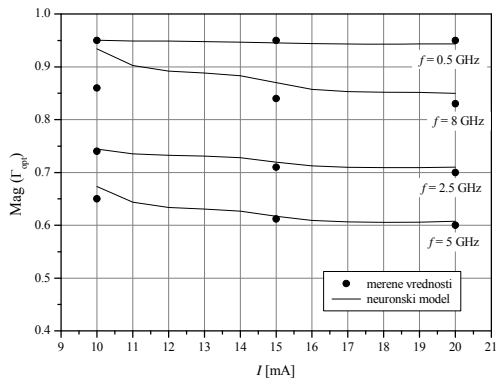
Sl. 4 Moduo transkonduktanse u funkciji struje napajanja



Sl. 5. Dijagram korelacije za minimalni faktor šuma



Sl. 6  $\text{Mag}(\Gamma_{opt})$  u funkciji frekvencije



Sl. 7.  $\text{Mag}(\Gamma_{opt})$  u funkciji struje napajanja

## LITERATURA

- [1] M. S. Gupta, O.Pitzalis, S.E.Rosenbaum, P.T.Greiling, "Microwave Noise Characterization of GaAs MESFETs: Evaluation by On-Wafer Low-Frequency Output Noise Current Measurement", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, pp. 1208-1218, December 1987.
- [2] H. Fukui, "Design of Microwave GaAs MESFET's for Broadband Low-Noise Amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp. 643-650, July 1979.
- [3] M. W. Pospieszalski, "Modeling of noise parameters of MESFET and MODFET and their frequency and temperature dependence", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MMT-37, pp.1340-1350, Sept. 1989.
- [4] O. Pronić, G. Mitić, J. Randelović, V. Marković, "New procedure for accurate noise modelling of microwave FETs versus temperature", *Electronics Letters*, Vol.40, No.24, pp.1551-1553, 2004.
- [5] Z. Marinković, O. Pronić, J. Randelović, V. Marković, "Automatizovani postupak za modelovanje šuma MESFET-a/HEMT-a u funkciji temperature", *XII Telekomunikacioni forum TELFOR 2004*, Beograd, zbornik radova na CD-u, novembar 2004.
- [6] Q. J. Zhang, K. C. Gupta, *Neural Networks for RF and Microwave Design*, Artech House, 2000
- [7] G. L. Creech, B. J. Paul C. D. Lesniak, T. J. Jenkins, and M. C. Calcaterra, "Artificial neural networks for fast and accurate EM-CAD of microwave circuits", *IEEE Trans., Microwave Theory Tech.*, Vol. 45, No. 5 pp. 794-802, 1997.
- [8] M. Vai, S. Prasad, "Neural networks in microwave circuit design – beyond black box models", *Int. J. RF and Microwave Computer-Aided Eng.*, Special issue on Applications of Artificial Neural networks to RF and Microwave Design, pp. 187-197, 1999.
- [9] N. Türker, F. Güneş, T. Yildirim, "Artificial neural design of the microstrip antennas", *Microwave Review* Vol, 12, No. 1, pp. 10-14, 2006.
- [10] Z. Marinković, O. Pronić, J. Randelović, V. Marković, "Artificial Neural Networks for Temperature Dependent Noise Modelling of Microwave Transistors", *International Journal of Electronics*, Vol. 94, No. 8, pp. 759-767, August 2007.
- [11] Z. Marinković, O. Pronić-Rančić, V. Marković, "ANN Applications in Improved Noise Wave Modeling of Microwave FETs", *Microwave and Optical Technology Letters*, Volume 50, Issue 10, pp. 2512-2516, 2008.
- [12] <http://www.downeastmicrowave.com/PDF/atf21186.pdf>
- [13] Advanced Desing System-version 1.5, Agilent Eesof EDA, 2000.

## ABSTRACT

An efficient procedure for noise parameter prediction of microwave FETs for various bias conditions is proposed in this paper. The bias dependences of the noise model elements of Pospieszalski's noise model are modeled by an artificial neural network. Applying this approach, it is necessary to acquire the measured data and extract the equivalent circuit parameters only for several operating biases used for the network training. Once the neural network is trained and assigned to the considered noise model, the device noise parameters are easily obtained for each bias from the device operating range. The proposed approach is exemplified by modeling of a particular MESFET in a package form.

## NEURAL NETWORK APPLICATIONS IN BIAS CURRENT DEPENDANT NOISE MODELING OF MICROWAVE FETS

Z. Marinković, O. Pronić- Rančić, V. Marković