

## MODELOVANJE NELINEARNE ODVODNOSTI DŽOZEFSONOVOG SPOJA

Miona Andrejević, Stojan Stojilković, *Elektronski fakultet u Nišu*

**Sadržaj** - U ovom radu razmotreni su osnovni problemi koji omogućavaju implementaciju modela Džozefsonovog spoja u funkcionalni simulator. Prikazano je modelovanje nelinearne odvodnosti spoja, i to na dva načina: veštačkom neuronskom mrežom i segmentno-linearnom karakteristikom. Modeli su verifikovani implementiranjem u standardni model Džozefsonovog spoja.

### 1. UVOD

Od komponenata u električnim kolima se zahteva da rade brzo i troše malu energiju. Ovakvi zahtevi tržišta aktualizovali su proizvodnju i modelovanje Džozefsonovog spoja, kao komponente koja može da ima veliku primenu u računarskim i telekomunikacionim sistemima.

Džozefsonov spoj koristi pojavu superprovodnosti, sposobnost određenih materijala da provode električnu struju, praktično, bez gubitaka. Upravo zato, on radi kao skoro idealni prekidač i pogodan je za izradu logičkih kola. Prelaz između superprovodnog (S) i normalnog (N) stanja dešava se za samo nekoliko pikosekundi, i to sa utrošenom snagom od nekoliko mikrovati [1]. (Prema merenjima [2], vreme prelaza je 13ps, a disipacija snage  $2,6\mu\text{W}$ .) Logička kola zasnovana na Džozefsonovim spojevima, osim spojeva, sadrže i druge električne elemente kako bi se ulazni signal izolovao, ali i da se postigne pojačanje veće od onog koje se dobija samo korišćenjem spoja.

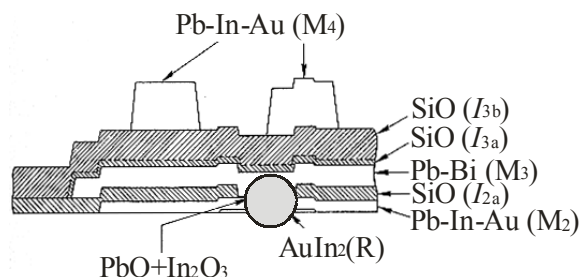
Džozefsonovi spojevi se koriste u određenim specijalizovanim instrumentima kao što su visoko-osetljivi mikrotalasni detektori i magnetometri. Ali, oni mogu i da detektuju magnetno polje u svojoj blizini, pa se tako koriste u uređajima koji mere izrazito slabo magnetno polje, kao što su, na primer, SQUID-ovi (Superconducting QUantum Interference Devices). Ali, Džozefsonov spoj se koristi i za mnoge druge primene, pa su zato i razvijene tehnike modelovanja spoja da bi se simulacijom olakšao proces projektovanja. U tu svrhu razvijeni su simulatori koji Džozefsonov spoj smatraju za ravnopravni element kola. Jedan od njih je SPICE2G5 (JSPICE) [3].

### 2. KARAKTERISTIKE DŽOZEFSONOVOG SPOJA

Jedan Džozefsonov spoj se sastoji od dva superprovodnika odvojena jednim izolacionim slojem, toliko tankim da elektroni mogu da tuneluju kroz sloj izolacije. Struja koja protiče između superprovodnika zove se Džozefsonova struja, a kretanje elektrona kroz spoj naziva se Džozefsonovo tunelovanje.

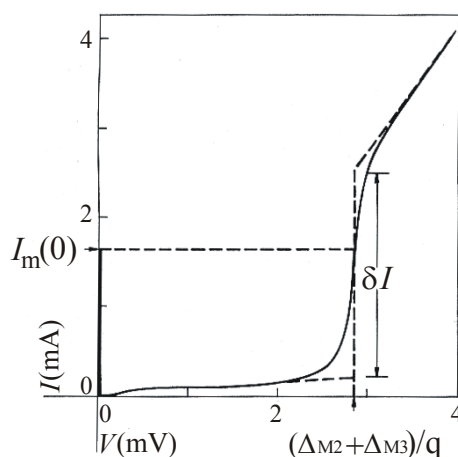
Jasniju predstavu o strukturi i fabrikaciji spoja možemo imati na osnovu šeme, Sl. 1, poprečnog preseka [4]. Slojevi

Pb-In-Au ( $M_2$ ) i Pb-Bi ( $M_3$ ) formiraju elektrode Džozefsonovog spoja. Oblasti spoja su definisane otvorima u SiO ( $I_{2a}$ ) sloju. Otpornici za prigušenje se formiraju od AuIn<sub>2</sub> (R) sloja koji je ispod spoja  $M_2$ , a veze koje prenose kontrolne signale su od Pb-In-Au ( $M_4$ ) sloja i izolovane su od elektroda koje leže ispod njih SiO slojem ( $I_{3a}$ -  $I_{3b}$ ). Označeni slojevi mogu imati i više funkcija u kolu.



Sl. 1. Poprečni presek logičkog interferometra

Statička I-V (strujno-naponska) karakteristika Džozefsonovog spoja prikazana je na Sl. 2. A parametri vezani za projektovanje kola su: Džozefsonova struja  $I_m(0)$ , gustina struje  $j_1$ , ili energijski procep  $\Delta_{M_2} + \Delta_{M_3}$ , mogu se odrediti sa I-V karakteristike. Gustina struje  $j_1$  izračunava se iz relacije  $j_1 A = k \delta I$ , gde je  $\delta I$  promena struje za  $(\Delta_{M_2} + \Delta_{M_3})/q$ , A površina spoja, a k konstanta koja zavisi od materijala elektrode.



Sl. 2. I-V karakteristika logičkog interferometra

### 3. MODELOVANJE DŽOZEFSONOVOG SPOJA

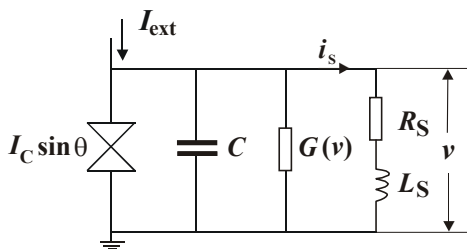
Džozefsonova kola rade na vrlo visokim frekvencijama, zato vremenski korak u simulaciji treba da bude manji od pikosekunde. Ovakvi uslovi dovode do vrlo komplikovanih izračunavanja u SPICE-u, pa je vreme simulacije vrlo veliko

[5]. Da bi se ovaj nedostatak uklonio, razvijen je simulator JSIM [5], koji koristi drugi metod rešavanja nelinearnih jednačina i skraćuje vreme izračunavanja. Ovim simulatorom može se simulirati samo određeni broj električnih kola, a među njima je i Džozefsonov spoj, jer su pored njega na raspolaganju samo još otpornici, kondenzatori, spregnuti kalemovi i segmentno-linearni strujni i naponski izvori.

Ovde je predloženo modelovanje nelinearne odvodnosti Džozefsonovog spoja pomoću veštačke neuronske mreže i iskorišćen je funkcionalni simulator, tako da je neuronska mreža ravnopravni element kola, ali moguće je istovremeno opisati i bilo koji drugi električni i neelektrični element i spregnuti ga sa neuronskom mrežom.

Elektronska komponenta može se modelovati korišćenjem fizičkog pristupa i pristupa crne kutije. Odvodnost Džozefsonovog spoja je u literaturi modelovana fizičkim pristupom, a ovde je primenjen pristup crne kutije. Jer, modelovanje pomoću crne kutije može biti zasnovano i na upotrebi veštačkih neuronskih mreža (VNM), što je i slučaj u ovom radu, kada se prostor kontrolisanih veličina (najčešće potencijala priključaka) preslikava u prostor kontrolisanih veličina (struja-komponente). Veštačka neuronska mreža je paralelna i distribuirana struktura za obradu podataka sa specifičnom topologijom koja sadrži algoritam za određivanje koeficijenata u operatorima.

Posle objavljivanja prvih rezultata [6], veštačke neuronske mreže bile su više puta upotrebljene za modelovanje u elektronici. Pri tom, modelovana su otporna svojstva komponente. A, prvi pokušaj primene VNM za modelovanje nelinearnih reaktivnih dvopola opisan je u [7]. Primena koncepta crne kutije, pa time i VNM, od posebnog je interesa za modelovanje senzora i aktuatora iz više razloga. Jer je situacija takva da nisu do detalja spoznati fizički fenomeni koji stoje u osnovi rada ovakvih dvopola, a istovremeno je brzina izlaska na tržište imperativ za opstanak komponente. Sve to zahteva metod modelovanja koji je primenljiv odmah, na bazi raspoloživih znanja. Još treba imati na umu da pri simulaciji integrisanih elektronskih sistema, pre nego što se pristupi fizičkom projektovanju, dakle, pri verifikaciji sintetizovanog rešenja, treba obaviti na funkcionalnom nivou simulaciju analognih i kola sa mešovitim signalima. A metod crne kutije je taj koji je najpogodniji za modelovanje na ovom nivou, dok je VNM onaj koncept koji otvara mogućnost za generisanje modela na efikasan način. Osim VNM modela nelinearne odvodnosti, u ovom radu je prikazana i aproksimacija odvodnosti segmentno-linearnom karakteristikom, radi poređenja rezultata implementacije ovih modela u standardni model spoja.



Sl. 3. Šema RCLSJ modela

Različiti autori su predlagali više modela kako bi ispitali i iskoristili njegova svojstva. Jedan od modela RCLSJ je i onaj koji je najpogodniji za visoke frekvencije (shunted nonlinear resistive-capacitive-inductance junction) [8]. On, pored dodatne otpornosti šanta  $R_S$ , ima i dodatnu induktivnost šanta  $L_S$ . Šema ovog modela data je na Sl. 3, gde je  $I_{ext}$  struja koja se priključuje spolja, i u opštem slučaju ona ima i jednosmernu i naizmeničnu komponentu:

$$I_{ext} = I_0 + I_1 \sin(\omega \cdot t). \quad (1)$$

$I_C$  je kritična struja spoja,  $\theta$  fazna razlika,  $G(v)$  nelinearna odvodnost, a  $C$  kapacitivnost spoja.

Jednačine koje karakterišu Džozefsonov spoj su:

$$i = I_C \sin \theta \quad (2a)$$

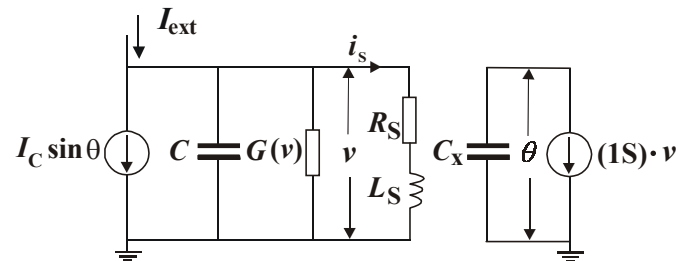
$$v = \frac{h}{2\pi q} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2b)$$

gde je  $v$  napon na spoju,  $h$  Plankova konstanta, a  $q$  elementarno naelektrisanje.

Sa stanovišta modelovanja, treba rešiti dva problema. Kao prvo, relaciju (2b) treba predstaviti tako da i  $\theta$  bude nezavisna promenljiva u kolu. Ako  $\theta$  smatramo za napon čvora u kolu, dobijamo novu verziju kola. Ona je prikazana na Sl. 4. Ali, sada je  $C_x$  novi kondenzator koji ima vrednost:

$$C_x = \frac{h}{2\pi q} \quad (3)$$

a (1S) je provodnost vrednosti 1 Siemens.

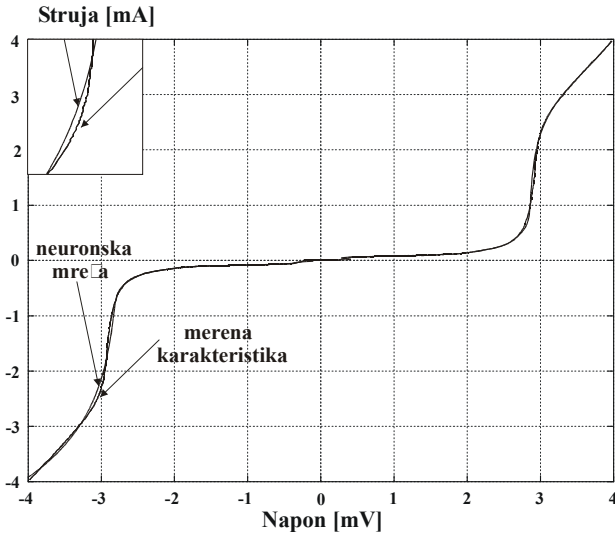


Sl. 4. Nova šema RCLSJ modela

Još uvek u kolu, Sl. 4, imamo nelinearni kontrolisani izvor, ali sada njegova vrednost zavisi od promenljive u kolu. Otuda je moguće izraz (2) formulisati automatski u okviru HDL-a, kao jednačinu za običan kondenzator. Ali, napomenimo da u standardnom simulatoru, kao što je SPICE, na primer, ne možemo primeniti nelinearni sinusni kontrolisani izvor, pa nam je za modelovanje, u ovom slučaju, neophodan funkcionalni simulator. A kao drugi problem u modelovanju javlja se modelovanje nelinearne odvodnosti  $G(v)$ . Merena karakteristika ove odvodnosti data je na Sl. 2. Ova karakteristika je modelovana kao odvodnost beskonačne i nulte vrednosti [8].

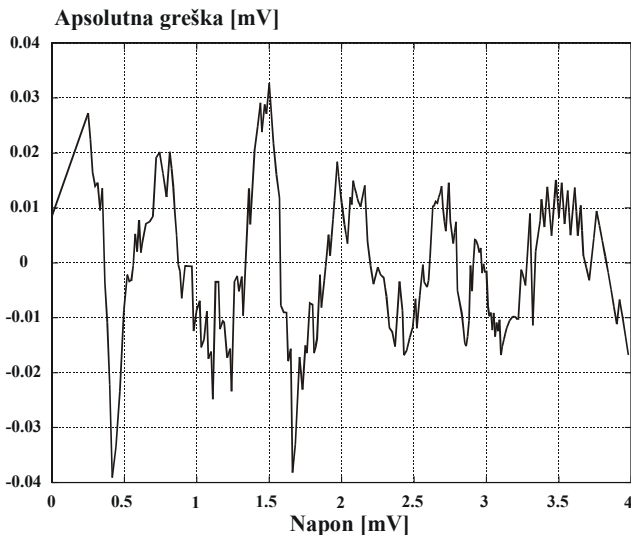
Odvodnost je u ovom radu modelovana veštačkom neuronskom mrežom, a zatim je pokazana i električna šema kola koje segmentno-linearnom karakteristikom aproksimira datu zavisnost. Jer je funkcija sa Sl. 2 vrlo pogodna za aproksimaciju neuronskom mrežom. Ona predstavlja merenu

karakteristiku spoja, tako da već imamo parove merenih veličina struja-napon na osnovu kojih obučavamo neuronsku mrežu. Ovom funkcijom aproksimiramo otpornost, i koristimo nerecurrentnu neuronsku mrežu sa jednim skrivenim slojem, koja ima jedan neuron u ulaznom sloju, trinaest u skrivenom i jedan u izlaznom sloju. Parametri te mreže, težine i pragovi, dobijeni su programom *Learnnet* [9].



Sl. 5. Merena karakteristika odvodnosti i karakteristika modela

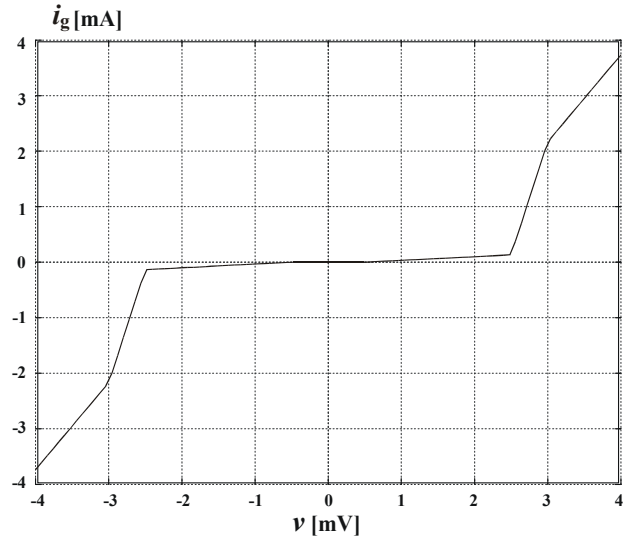
Poređenje merene i aproksimirane karakteristike dato je na Sl. 5. Jasno se vidi sa Sl. 5 da je aproksimacija dobra, a greška vrlo mala. Apsolutna greška, kao razlika merenih napona i napona koji se dobijaju kao odziv VNM prikazana je na Sl. 6. Treba imati u vidu da je pobuda strujna. Greška je računata samo za pozitivne vrednosti napona.



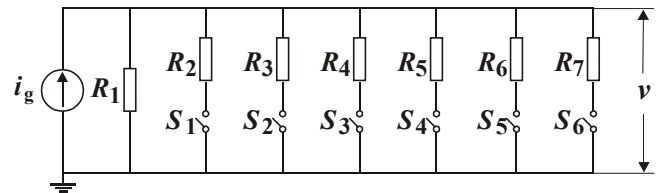
Sl. 6. Apsolutna greška aproksimacije

Zavisnost I-V, može se aproksimirati i linearno-segmentnom karakteristikom, Sl. 7, na osnovu električnog kola sa Sl. 8. Ekvivalentna otpornost se menja u zavisnosti od napona  $v$ , koji kontroliše otvaranje i zatvaranje prekidača, pa

se tako menja i nagib karakteristike. Struja  $i_g$  je linearno rastuća u opsegu od interesa. Ovakvom strukturom može se aproksimirati bilo koja segmentno-linearna karakteristika jednostavnom promenom parametara kola. Vrednosti otpornika u kolu sa Sl. 8 su:  $R_1=25\text{M}\Omega$ ;  $R_2=R_5=15\Omega$ ;  $R_3=R_6=0,25\Omega$ ;  $R_4=R_7=0,45\Omega$ . Prekidač  $S_1$  se zatvara kada je napon  $v=0,5\text{mV}$ ,  $S_2$  za  $v=2,5\text{mV}$ ,  $S_3$  za  $v=3\text{mV}$ ,  $S_4$  za  $v=-0,5\text{mV}$ ,  $S_5$  za  $v=-2,5\text{mV}$ ,  $S_6$  za  $v=-3\text{mV}$ .



Sl. 7. Segmentno-linearna aproksimacija k-ke sa Sl. 2



Sl. 8. Električna šema sa naponom kontrolisanim prekidačima koja generiše zavisnost sa Sl. 7

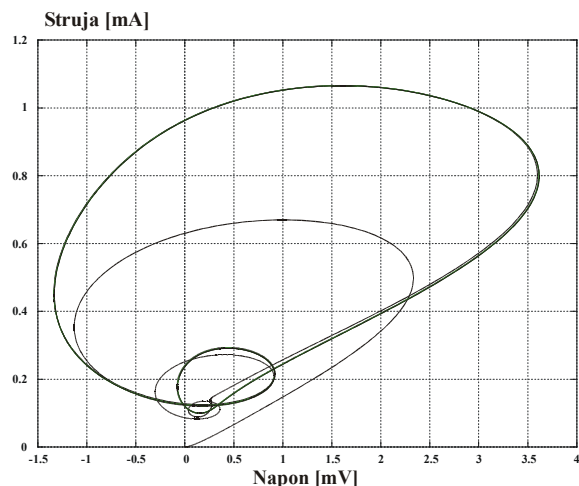
#### 4. VERIFIKACIJA MODELA

Da bismo verifikovali modele, aproksimacije karakteristika nelinearne odvodnosti sa Sl. 5. i Sl. 7. treba implementirati u kolo sa Sl. 4. (Parametri kola su:  $C=180.37\text{fF}$ ;  $R_S=1,5\Omega$ ;  $L_S=2,52\text{pH}$ ;  $C_X=0,658\text{fF}$ ;  $I_C=0,6792\text{mA}$ ;  $I_{\text{ext}}=0,815\text{mA}$ .) RCLSJ model je pogodan, jer nije potrebna sinusna pobuda  $I_{\text{ext}}$  da bi se dobile haotične oscilacije, već je dovoljna samo jednosmerna struja [10].

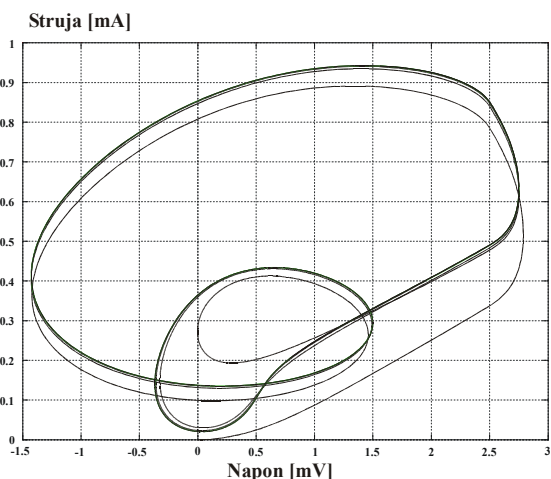
Strujno-naponska zavisnost u kolu, Sl. 4, kada je implementirana nelinearna odvodnost modelovana neuronskom mrežom prikazana je na Sl. 9, dok je na Sl. 11 data vremenska zavisnost napona, gde se jasno vide oscilacije u vremenskom domenu.

A strujno-naponska zavisnost u kolu sa Sl. 4, kada je implementirana nelinearna odvodnost modelovana segmentno-linearnom karakteristikom, prikazana je na Sl. 10. Rezultati simulacija pokazuju da haotične oscilacije postoje u

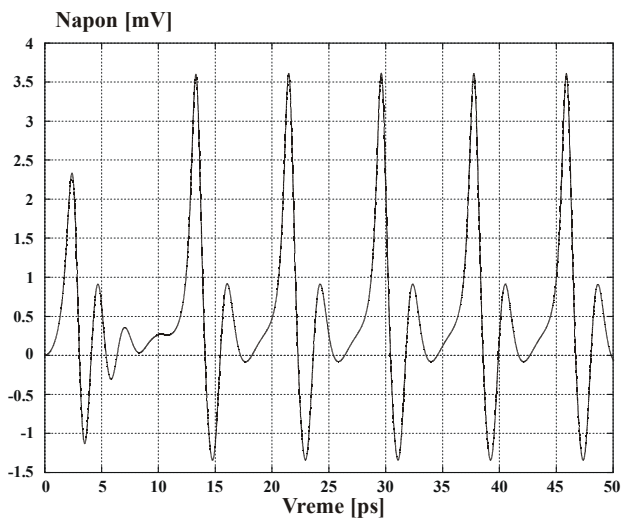
kolu kada se implementiraju novodobijeni modeli. A to je i trebalo očekivati za date topologije kola [10].



Sl. 9. Naponsko-strujna zavisnost u kolu sa Sl. 4 kada je implementiran VNM model



Sl. 10. Naponsko-strujna zavisnost u kolu sa Sl. 4 kada je implementiran segmentno-linearni model



Sl. 11. Vremenska zavisnost napona u kolu sa Sl. 4 kada je implementiran VNM model

## 5. ZAKLJUČAK

Ostvaren je postupak modelovanja Džozefsonovog spoja i rešeni su osnovni problemi čija rešenja omogućavaju da se model implementira u funkcionalni simulator, koji nije napravljen posebno za tu namenu. Osim toga, modifikovan je standardni model spoja da bi parametri kola zavisili od promenljivih u kolu. A zatim je modelovana nelinearna odvodnost veštačkom neuronskom mrežom na osnovu merenih karakteristika, a pri tom je prikazana i njena segmentno-linearna aproksimacija. Ovako dobijeni novi modeli su verifikovani simulacijom Džozefsonovog spoja sa šantom.

## LITERATURA

- [1] Gheewala, T.: "Josephson-Logic Devices and Circuits", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. Ed-27, No. 10, pp. 1857-1869, October 1980.
- [2] Gheewala, T.: "30-picosecond Josephson current injection logic (CIL)", *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. SC-14, No. 5, pp. 787-793, Oct. 1979.
- [3] Jewett, R. E.: "Josephson junction in SPICE 2G5", *Electronics Research Laboratory internal report*, University of California, Berkeley, December 1982.
- [4] Greiner, J.H. et al.: "Fabrication Process for Josephson Integrated Circuits", *IBM J. Res. Develop.*, Vol. 24, No. 2, pp. 2333-2343, March 1980.
- [5] Fang, E. S., Van Duzer, T.: "A Josephson Integrated Circuit Simulator (JSIM) for Superconductive Electronics Application", *Extended Abstracts of ISEC'89*, Tokyo, Japan, pp. 407-410, 1989.
- [6] Litovski, V., Radenović, J., Mrčarica, Ž., Milenković, S.: "MOS transistor modeling using neural networks", *Electr. Letters*, Vol. 28, No. 18, pp. 1766-1768, 1992.
- [7] Litovski, V., Mrčarica, Ž., Ilić, T.: "Simulation of non-linear magnetic circuits modeled using artificial neural network", *Simulation Practice and Theory*, Elsevier, No. 5, pp. 553-570, 1997.
- [8] Cawthorne, A., Whan, C., Lobb, C.: "Complex dynamics of resistively and inductively shunted Josephson junctions", *J. Appl. Ph.*, Vol. 84, No. 2, 1998.
- [9] Zografski Z.: "A novel machine learning algorithm and its use in modeling and simulation of dynamical systems", *Proc. of the 5th Ann. Eur. Comp. Conference, COMPEURO'91*, pp. 860-864, Bologna, May 1991.
- [10] Dana, S. K., Sengupta, D. C.: "Chaotic Dynamics in Josephson junction", *IEEE Trans. on Circuits and Systems -I: Fundamental Theory and Applications*, Vol. 48, No. 8, pp. 991-996, August 2001.

**Abstract** - In this paper modeling of Josephson junction is discussed. The basic problems considering modeling are solved that enable implementation of the model in behavioral simulator. Nonlinear conductance is modeled in two ways, using artificial neural network and piecewise-linear characteristics. Models are verified by implementing in the standard junction model.

## MODELING OF NONLINEAR CONDUCTANCE IN JOSEPHSON JUNCTION

Miona Andrejević, Stojan Stojilković