

## SINTEZA HIJERARHIJSKOG DIJAGNOSTIČKOG SISTEMA ZA KOLA SA MEŠOVITIM SIGNALIMA

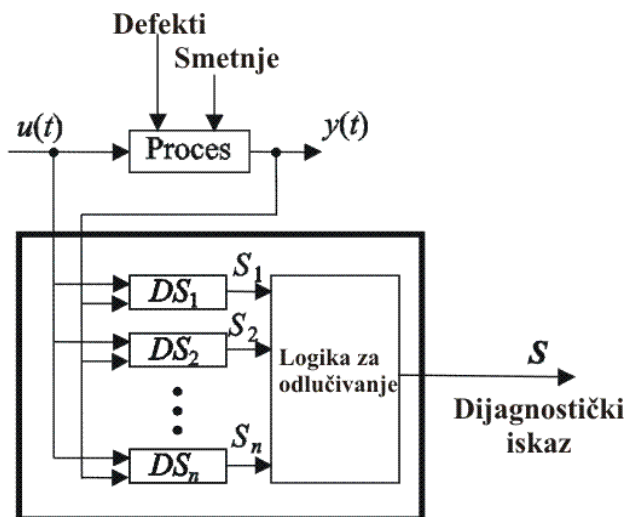
Miona Andrejević Stošović, Vančo Litovski

Elektronski fakultet u Nišu, (miona, vanco)@elfak.ni.ac.yu

**Sadržaj** – U ovom radu veštačke neuronske mreže (VNM) su primenjene na dijagnostiku hibridnog elektronskog kola. Implementiran je hijerarhijski pristup sa dva nivoa odlučivanja: odlučivanje na nivou sistema i odlučivanje na nivou kola. Za svaki nivo je najpre kreiran rečnik defekata koji sadrži podatke o kôdu defekta i odzivu kola za dati ulazni signal. VNM se koriste za modelovanje rečnika defekata. Na najvišem nivou, rečnik defekata je razložen na delove, na taj način pojednostavljajući implementaciju koncepta. Na tom nivou postoji i sistem odlučivanja koji određuje koji odziv VNM se prihvata kao konačni dijagnostički iskaz. Pristup je testiran na primeru sigma-delta modulatora, pri čemu se koriste različiti defekti kako u analognom, tako i u digitalnom delu sistema koji se dijagnosticira.

### 1. UVOD

Svaki put kada pomislimo na nešto što ne funkcioniše kako bi trebalo, započinjemo proces dijagnostike. Samim tim je dijagnostika uobičajena aktivnost u svakodnevnom životu [1]. Svaki složeni sistem podložan je defektima ili kvarovima. U najopštijem slučaju, defekt je svaka promena u električnom kolu ili sistemu koja ga sprečava da radi ispravno. Dijagnostika treba da omogući da se ustanovi priroda i mesto defekta u kolu. Na osnovu ispravne dijagnostike može se intervenisati u korekciji proizvodnog procesa, odnosno može se zameniti neispravna komponenta prilikom održavanja sistema koji je u pogonu.



Sl. 1. Uopšteni dijagnostički sistem

Opšta struktura dijagnostičkog sistema prikazana je na Slici 1. Signali  $u(t)$  i  $y(t)$  su ulaz u sistem i izlaz iz sistema, respektivno. Defekti i smetnje (u ovom slučaju su posledica greške merenja) takođe utiču na sistem koji se ispituje, ovde označen kao "Proces", ali ne postoji informacija o vrednostima ovih grešaka. Zadatak dijagnostičkog sistema je da generiše dijagnostički iskaz  $S$ , koji sadrži informaciju o prirodi greške koja može da objasni ponašanje Procesu, pri

čemu smatramo da je dijagnostički sistem pasivan, tj. ne može da utiče na sam Proces. Čitav dijagnostički sistem može da se podeli na manje delove koje ovde posmatramo kao testove. Ovi testovi su zapravo dijagnostički sistemi,  $DS_i$ . Takođe se smatra da svaki od njih generiše dijagnostički iskaz  $S_i$ . Funkcija logike za odlučivanje je da na osnovu ovih iskaza formira dijagnostički iskaz  $S$ .

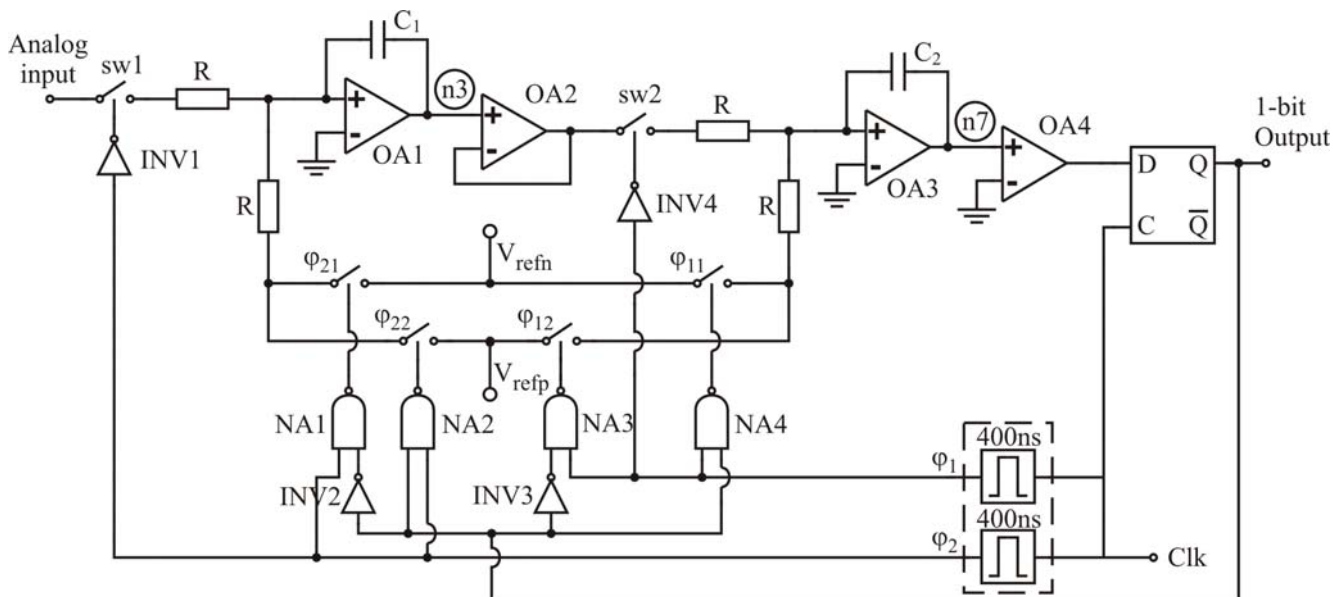
Broj mogućih defekta u elektronskom sistemu može biti veoma veliki i defekti se mogu nalaziti svuda u sistemu. Da bi se obavila dijagnostika pod ovakvim uslovima, često se koristi hijerarhijski pristup, kada se sukcesivno generišu dijagnostički iskazi na svakom nivou, tako da je nivo opisa sistema sve niži sa približavanjem samom defektu [2], [3]. Ovo omogućava da se istovremeno razmatraju manji skupovi efekata defekata za određeni hijerarhijski nivo.

### 2. DIJAGNOSTIKA HIBRIDNOG KOLA

Brz razvoj tehnologije integrisanih kola doneo je sa sobom neke teškoće pri testiranju. Porast broja hibridnih kola u poslednje vreme još više komplikuje problem testiranja. Postaje sve složenije odrediti skup ulaznih signala i izlaznih merenja koja bi obezbedila visok stepen pokrivenosti defekata. Postoji takođe i vremenski problem pri testiranju čak i kada se koristi najbrža automatizovana oprema.

Poznato je da je analogna elektronska kola, koja klasifikujemo kao nelinearna dinamička kola sa nelinearnim dinamičkim elementima, teško dijagnosticirati. Osim velikog broja mogućih defekata, ovo je i posledica nelinearnosti ovih kola. Čak i linearna kola (koja imaju linearnu zavisnost ulaz-izlaz) imaju nelinearnu vezu parametara kola i izlaznog odziva. Aktivne mreže su nelinearne sa nelinearnim reaktivnim elementima, ali mogu da se linearizuju i razmatraju kao takve u situacijama kad su promene signala i vrednosti parametara male u odnosu na nominalne vrednosti. Kada su u pitanju defekti, u kolu su prisutne velike promene parametara, ili čak katastrofalni defekti. Postojeći teorijski koncepti za dijagnostiku obuhvataju ograničene potklase kola (linearna pasivna ili linearna aktivna), ograničene tipove defekata (uglavnom parametarske), i signala.

Specifičan aspekt dijagnostike je broj i položaj testnih tačaka. Jednostavno, možemo reći da treba izbegavati testne tačke koje se nalaze unutar kola, tj. preporučuje se da se merenja obavljaju na ulazima i izlazima kola ili sistema koji se dijagnosticira. Razlog nije samo to što im je lako pristupiti, već je vezan i za samu prirodu dijagnostičkog procesa. Naime, neispravan rad sistema se uočava na osnovu prestanka funkcije, a funkcija kola se vidi na njegovom izlazu. Naravno, da bi se kompenzovao eventualno mali broj testnih tačaka, treba obaviti više merenja sa različitim tipovima signala, kako bi se dobila kompletna informacija o ponašanju sistema. Za kompleksne analogne sisteme se, međutim, primenjuju hijerarhijski pristupi zasnovani na dekompoziciji [2], [3], [4], [5], [6], pri čemu se mora voditi računa da se ne javi kašnjenje efekta defekta između delova sistema, što nije lako postići.



Sl 2. Struktura sigma-delta modulatora

Naravno, postoje kola koja se mogu podeliti na funkcionalne celine, što je *a priori* poznato iz procesa projektovanja. U [7] hijerarhijski pristup uvodi i novi postupak za izbor minimalnog broja testnih tačaka, pomoću kojih je moguće testirati sve testne kombinacije u novoformiranim testnim celinama. Metod dekompozicije koristi se u [8] da bi se rešio problem složenosti kola, ali u ovom pristupu kolo može da se razloži i na nepristupačnim čvorovima i da se računaju naponi tih čvorova u kolima sa defektom. Ovaj metod je pogodan jer kolo ne mora da ima veliki broj pristupnih čvorova, a i povećana je fleksibilnost dekompozicije, tako da je metod koristan za velike mreže.

U ovom radu opisani su rezultati primene nerekurzivnih VNM na dijagnostiku nelinearnih dinamičkih elektronskih kola spregnutih sa digitalnim kolima bez ograničenja na broj i tip defekata. Metod se zasniva na kreiranju rečnika defekata i korišćenju VNM za kompresiju podataka pamćenjem tabele koja predstavlja rečnik defekata. VNM koja je kreirana na ovaj način se zatim koristi za dijagnostiku tako što se pobuđuje signalima dobijenim merenjem neispravne mreže. Ovaj proces se može posmatrati kao pretraživanje defekta u rečniku defekata. VNM pronalazi najverovatniji kôd defekta koji odgovara merenim signalima. Ovaj postupak je primenjen na analogna kola u [7].

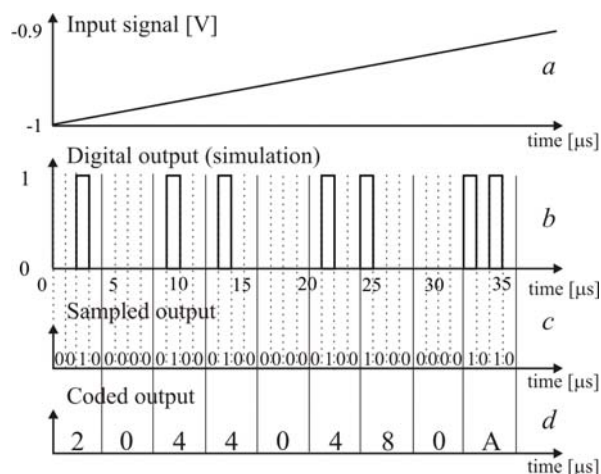
Veštačke neuronske mreže koje se koriste u ovom primeru su nerekurzivne mreže koje imaju tri sloja. Imaju samo jedan skriveni sloj, koji je dovoljan za ovu vrstu problema [9]. Neuron u skrivenom sloju su aktivirani sigmoidnom, a neuron u izlaznom sloju linearnom aktivacionom funkcijom. Algoritam koji se koristi za obučavanje ove mreže je verzija algoritma minimizacije najstrijemijeg spusta [10].

### 3. REČNIK DEFEKATA NA NIVOU SISTEMA

Da bismo pokazali na koji način se formira rečnik defekata, koristimo kolo sigma-delta modulatora sa slike 2. Ovo je hibridno kolo, koje sadrži analogne, digitalne i prekidačke elemente. Prekidači u kolu su modelovani kao pravi idealni prekidači, koji imaju otpornost nula kada su zatvoreni i beskonačnu otpornost kada su otvoreni.

Vreme punjenja kondenzatora je nepromenljivo u odnosu na takt, da bi se pojačanje održalo konstantnim. Ovo znači da analogni prekidač mora da bude zatvoren u nekom fiksnom vremenskom intervalu bez obzira na signal takta. Taj efekat se postiže korišćenjem monostabilnog multivibratora kao generatora impulsa fiksne širine u kolu. Monostabilni multivibrator se u kolu nalazi između ulaza za takt i bloka sa kontrolnim prekidačima i ima zadatak da generiše kontrolne signale fiksne trajanja.

U ovom radu razmatraju se defekti u celom kolu, što znači, u analognom, digitalnom i prekidačkom delu kola. Nećemo razmatrati višestruke defekte.



Sl. 3 Formiranje rečnika defekata

U digitalnom delu sistema razmatraju se dva tipa defekata: katastrofalni (stuck-at) i defekti kašnjenja (kašnjenja rastuće i opadajuće ivice digitalnog signala) [11]. Imajući u vidu da je perioda takta sistema 1.2  $\mu$ s (poluperioda je 600ns), ispitivali smo efekte kašnjenja manjih od 400ns. Zapravo, efekti kašnjenja rastuće ivice su simulirani za vrednosti kašnjenja: 100 ns, 250 ns, 400 ns, dok se za opadajuću ivicu koriste

manje vrednosti: 50ns, 100ns, 150ns. Rečnici defekata za analogni i digitalni deo sistema formirani su korišćenjem odziva kola na ulazni linearno rastući signal (Slika 3a). Izlazna vrednost sistema se registruje posle svake periode takta (Slika 3b), pa ove izlazne digitalne vrednosti formiraju izlaznu signaturu (Slika 3c). Ove binarne vrednosti se zatim predstavljaju u kompaktnijoj heksadecimalnoj notaciji (Slika 3d). Deo rečnika defekata za digitalni deo sistema dat je u Tabeli 1.

Tabela 1. Deo rečnika defekata za digitalni deo sistema

Kôd defekta	Tip defekta	Signatura
0	FF	20440480A
2	inv1(tr=150ns)	000010010
5	na1(tf=100ns)	008000010
8	na3(tf=50ns)	104108210
15	inv3(tr=100ns)	202404410
22	$\phi_{11}$ OFF	001C00038
24	sw2ON	018018030
27	na3(tr=250ns)	021041084
33	sw2OFF	996696699
36	inv1(tr=50ns)	040810108
42	$\phi_{12}$ OFF	300038003
45	na4(tf=150ns)	802408811

Kodiranje tipa defekta u Tabeli 1 odnosi se na notaciju datu na Sl. 2. Na primer, *na1(tf=100ns)* označava kašnjenje opadajuće ivice gejta NAND1 koje ima vrednost 100ns,  *$\phi_{12}$ OFF* je oznaka za prekidač  $\phi_{12}$  u stanju OFF, FF označava sistem bez defekata (fault-free system).

U analognom delu sistema smo razmatrali i parametarske i katastrofalne defekte [12], [13]. Menjane su kapacitivnosti oba kondenzatora. Prvi stepen modulatora je osetljiviji na promene parametara, dok promene u drugom stepenu imaju vrlo mali uticaj, zbog uobličavanja šuma. Katastrofalni defekti u analognom delu sistema menjaju topologiju kola. Posmatrali smo situaciju kada je kondenzator u povratnoj petlji operacionog pojačavača otkaćen, i kada postoji prekid na izlazu operacionog pojačavača (izlaz operacionog pojačavača *OAS* je otkaćen, Sl. 2).

Kodiranje defekata (kolona 1 u Tabeli 1) je od velikog značaja zato što neki defekti imaju veoma slične efekte na izlazu kola. Zbog toga signature mogu imati veoma bliske numeričke vrednosti. Kada bi i kôdovi defekata bili takode slični, javile bi se poteškoće prilikom obučavanja mreže. Defekti su zato kodirani slučajno, pa je mala verovatnoća da defekti sa sličnim efektima imaju slične kôdove. Druga kolona u Tabeli 1 opisuje tip defekta, a treća sadrži izlaznu signaturu.

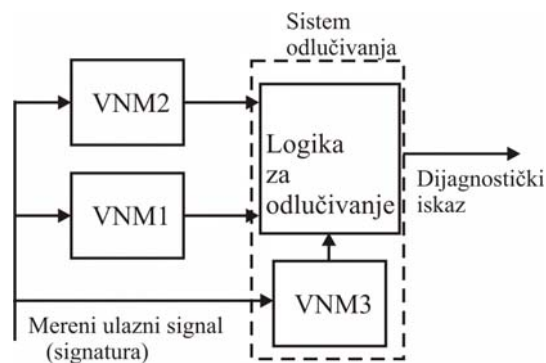
#### 4. SINTEZA HIJERARHIJSKOG DIJAGNOSTIČKOG SISTEMA

Na nivou sistema, obučavane su dve VNM, jedna za dijagnostiku u digitalnom, a druga u analognom delu sistema. Obe mreže su nerekurventne sa jednim skrivenim slojem. Signature su ulazi u VNM, a kôd defekta je izlaz mreže koji ona treba da nauči. To znači da obe neuronske mreže imaju 9 ulaza (jedan ulaz za svaku heksadecimalnu cifru) i jedan izlaz.

Kao što je već rečeno u radu, razmatrane su dve grupe defekata kako bi se smanjio broj defekata koje treba da dijagnosticira jedna VNM, a samim tim se pojednostavljuje proces obučavanja mreža i smanjuje se njihova složenost.

Sledeći zadatak je obaviti kompletnu dijagnostiku na nivou sistema koja bi uzela u obzir svaku signaturu. Praktična implementacija koncepta sa Sl. 1 prikazana je na Sl. 4.

*VNMI* dijagnosticira defekte u digitalnom delu sistema i kôdovi defekata su u opsegu od 0 do 45. *VNM2* dijagnosticira defekte u analognom delu sistema i kôdovi defekata su u opsegu od 0 do 12. Možemo primetiti da se u oba slučaja koriste brojevi počev od 0 za označavanje kôdova defekata. Kada se koristi takva notacija i kada obe VNM rade istovremeno, ne može se odrediti da li se kôd defekta odnositi na analogni ili digitalni defekt. Zbog toga se uvodi *VNM3* koja treba da odredi da li je defekt analogni ili digitalni. *VNM3* ima takode 9 ulaza koji su isti kao i ulazi mreža *VNMI* i *VNM2*. *VNM3* se obučava tako da kôdovi izlaza uzimaju vrednosti iz skupa  $\{-1, 0, 1\}$ . Naime, ako je defekt iz digitalnog dela kola, kôd izlaza je 1, a ako je iz analognog dela kola, njegov kôd je -1. U posebnim slučajevima kada se pojavi *ambiguity*, odnosno kada defekat iz analognog dela i defekat iz digitalnog kola imaju istu signaturu, izlazu *VNM3* se pridružuje vrednost 0. Sada ćemo dati nekoliko primera da bismo ilustrovali prethodno objašnjenje.



Sl. 4 Hijerarhijski dijagnostički sistem zasnovan na VNM

Pretpostavimo da pobuđujemo naše tri mreže ulaznom signaturom:  $\{0\ 8\ 2\ 2\ 0\ 2\ 2\ 0\ 8\}$ . Odzivi tri mreže su:

Odziv *VNMI*: 30, Odziv *VNM2*: -0.0800663, Odziv *VNM3*: 0.99934.

Logika za odlučivanje (Sl. 4) odlučuje da je u pitanju digitalni defekt, jer je izlaz *VNM3* približno 1, i da je kôd defekta 30 (jer je odziv *VNMI* 30). Odziv *VNM2* se ignoriše.

U sledećem primeru pretpostavljamo da pobuđujemo dijagnostički sistem ulaznom signaturom:  $\{8\ 0\ 4\ 4\ 1\ 0\ 4\ 2\ 1\}$ . Odzivi tri mreže su:

Odziv *VNMI*: 29.0138, Odziv *VNM2*: 4.00001, Odziv *VNM3*: -1.00066.

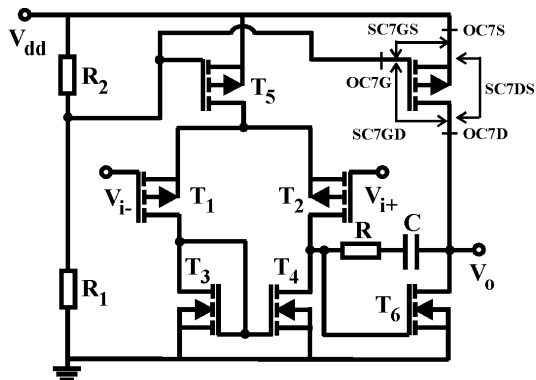
Zaključak je da je u pitanju analogni defekt i da je kôd defekta 4. Odziv *VNMI* se ignoriše.

Najzad, tri mreže se pobuđuju ulaznom signaturom:  $\{1\ 0\ 4\ 1\ 0\ 8\ 2\ 1\ 0\}$ . Odzivi tri mreže su:

Odziv *VNMI*: 7.99998, Odziv *VNM2*: 11, Odziv *VNM3*: -0.00172622.

Sada se razmatraju odzivi obe mreže *VNMI* i *VNM2* jer je odziv *VNM3* približno 0, što ukazuje na *ambiguity*. Zaključujemo da je u pitanju analogni defekt sa kôdom 11 ili digitalni defekt sa kôdom 8. Ne možemo odlučiti koji od defekata se zaista dogodio u sistemu jer imaju potpuno isti odziv, ali rešavanje tog problema nije tema ovog rada.

Dijagnostički iskaz koji smo dobili na nivou sistema može se spustiti na nivo komponente, na kome se i donosi konačan dijagnostički zaključak. Da bi se došlo do tog zaključka, potrebno je obaviti dijagnostiku u podsistemima. U sigma-delta modulatoru sa Sl. 2, ulogu podsistema mogu da imaju digitalni gejtovi i operacioni pojačavači. Da bi se izvela dijagnostika na nižem nivou, treba obaviti identičan postupak formiranja rečnika defekata i sinteze VNM za svaki podsistem. Primer ovakvog rešenja za operacioni pojačavač dat je u [7] i iskoristićemo ga ovde za ilustraciju celokupnog dijagnostičkog procesa.



Sl. 5. Struktura operacionog pojačavača

Ranije u ovom radu razmatrali smo defekt u okviru operacionog pojačavača OA3, koji je dijagnosticirala VNM2. To je defekt sa kôdom 12. Pretpostavimo da je to rezultat dijagnostike na nivou sistema. Struktura ovog operacionog pojačavača prikazana je na Sl. 5.

Posle pretraživanja rečnika defekata za OA3, na nižem nivou, koji je posebno kreiran za ovaj podsistem [5], dolazimo do konačnog zaključka da je defekt koji utiče na izlaz čitavog sistema zapravo- drejn tranzistora T6 je otkaćen.

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su veštačke neuronske mreže uspešno primenjene na dijagnostiku elektronskog kola koje sadrži analogne i digitalne elemente i interno kontrolisane prekidače. Uveden je hijerarhijski pristup sa dva nivoa odlučivanja: odlučivanje na nivou sistema i odlučivanje na nivou kola. Implementiran je pristup simulacije-pre-testa, a rezultati simulacije nalaze se u okviru rečnika defekata. Da bi se izbegle teškoće u odlučivanju na najvišem nivou sistema, rečnik je podeljen na dva dela. Jedan deo se odnosi na defekte u analognom delu sistema, a drugi na ostatak sistema. U opštem slučaju ne bi trebalo da bude ograničenja u broju delova sistema koji se koriste za dijagnostiku, a može se uvesti i onoliko nivoa dijagnostike koliko je to potrebno. Sa posebnom pažnjom razmatrane su A/D i D/A sprege u kolu.

## LITERATURA

[1] Benjamins, R., and Jansweijer, W., "Toward a competence theory of diagnosis", *IEEE Expert*, Vol. 9, No. 5, October 1994, pp. 43-52.

[2] Ho, C. K., Eberhardt, F., and Tenten, W., "Hierarchical fault diagnosis of analog integrated circuits", *IEEE Trans. On CAS – II: Analog and Digital Signal Processing*, Vol. 48, No. 8, August 2001, pp. 921-9.

[3] Sheu, H. -T., and Chang, Y.-H., "Robust fault diagnosis for large-scale analog circuits with measurement noises", *IEEE Trans. CAS-I*, 1997, Vol. 44, pp. 198-209.

[4] Bandler, J., and Salama, A., "Fault diagnosis of analog circuits", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 73, No. 8, August 1985, pp. 1279-1325.

[5] Scarselli, F., and Tsoi, A. C., "Universal approximation using feed-forward neural networks: A survey of some existing methods and some new results", *Neural Networks*, Elsevier, Vol. 11, 1998, pp. 15-37.

[6] Liu, D., and Starzyk, A., "A generalized fault diagnosis method in dynamic analogue circuits", *Int. J. of Circuit Theory and Applications*, Vol. 30, 2002, pp. 487-510.

[7] Litovski, V., Andrejević, M., Zwolinski, M. "Analogue Electronic Circuit Diagnosis Based on ANNs", *Microelectronics Reliability*, August 2006, pp. 1382-1391.

[8] Starzyk, J. A. and Liu, D.: "A Decomposition Method for Analog Fault Location", *IEEE Int. Symposium on Circuits and Systems*, May 26-29, Scottsdale, Arizona, 2002, pp. III-157-160.

[9] Masters, T., "Practical Neural Network Recipes in C++", Academic Press, San Diego, 1993.

[10] Zografski, Z., "A Novel Machine Learning Algorithm and Its Use in Modeling and Simulation of Dynamical Systems", *Proceedings of 5<sup>th</sup> Annual European Computer Conference, COMPEURO'91*, Bologna, Italy 1991, pp. 860-4.

[11] Andrejević, M., Litovski, V., Zwolinski, M., "Fault Diagnosis in Digital Part of Mixed-Mode Circuit", *Proc. of IEEE 24<sup>th</sup> Int. Conference on Microelectronics (MIEL2006)*, Niš, May 2006, pp. 437-440.

[12] Andrejević, M., Litovski, V., "Fault Dignosis in Analog Part of Mixed-mode Circuit", *VI simpozijum industrijska elektronika - INDEL 2006*, Banja Luka, November 2006, pp. 117-120.

[13] Andrejević, M., Litovski, V., "Fault Diagnosis in Digital Part of Sigma-Delta Converter", *Proceedings of Neurel 2006 Conference*, Beograd, ISBN 1-4244-0432-0, September 2006, pp. 177-180.

**Abstract** – In this paper feed-forward artificial neural networks (ANNs) have been applied to the diagnosis of mixed-mode electronic circuit. Hierarchical approach was implemented with two levels of decision: the system level and the circuit level. For every level, fault dictionary was created first, containing data relating the fault code and the circuit response for a given input signal. ANNs were used to model the fault dictionaries. At the topmost level, the fault dictionary was spitted into parts simplifying the implementation of the concept. A voting system was created at the topmost level in order to distinguish which ANN's output is to be accepted as the final diagnostic statement. The approach was tested on an example of a sigma-delta modulator circuit.

## HIERARCHICAL DIAGNOSTIC SYSTEM SYNTHESIS FOR MIXED-MODE CIRCUITS

Miona Andrejević Stošović, Vančo Litovski