

# Testiranje parametarskih defekata SC filtarske ćelije prigušnika opsega metodom oscilacija

Miljana Milić i Vančo Litovski

**Apstrakt**— U ovom radu analiziraju se mogućnosti primene metode oscilacija na testiranje bikvadratnih filtarskih ćelija prigušnika opsega frekvencija sa visokim faktorom dobrote, realizovanih tehnikom komutiranih kapacitivnosti odnosno SC tehnikom (Switching Capacitors). Razmatrani su svi uslovi okruženja koje treba zadovoljiti da bi se prilikom testiranja ispravnog kola dobile stabilne i održive oscilacije. Kreiran je rečnik defekata koji odražava preslikavanje parametarskih defekata u odziv kola. Simulacije u programu LTSpice pokazuju da je ovakav koncept testiranja moguć i prihvatljiv za datu klasu filtarskih ćelija, naročito kada se imaju u vidu sve prednosti metode oscilacija.

**Ključne reči**—SC filtri, Metod oscilacija, Testiranje analognih elektronskih kola.

## I. UVOD

Testiranje elektronskih kola jedna je od značajnijih faza projektovanja kola. Za njega treba izdvojiti znatno vreme, resurse i novac. Da bi se ustanovilo da je projekat ispravan, treba na određeni način proveriti da li se odziv kola uklapa u okvire definicije ispravnog rada kola [1]. U skladu sa tim, treba:

1. ustanoviti signal (talasni oblik) koji će prilikom merenja odziva neispravnog kola omogućiti da se odziv ispravnog i neispravnog kola razlikuju, i
2. među svim takvim signalima izabrati onaj koji će omogućiti testiranje u najkraćem vremenu odnosno, onaj koji je najjeftiniji.

Ispravan projekat je prvi uslov za ispravan proizvod. Veoma važan aspekt uticaja testiranja na projektovanje kola jeste primena koncepta projektovanja za testabilnost. U tom slučaju se arhitektura elektronskog kola kreira tako da omogućiti lako testiranje. Drugi i još važniji aspekt uticaja testiranja na projektovanje jeste sinteza testnog signala. Tu se pred projektanta postavlja zadatak da generiše signale koji će se dovoditi na ulaz kola koje se testira (DUT – Device Under Test), kao i signale željenog odziva koje će uređaj za testiranje da poredi sa izmerenim.

Sa druge problemi koji se javljaju prilikom testiranja analognih kola su mnogobrojni. Oni su posledica nedostatka pojedinih internih čvorova, nelinearnosti u kolu, prisustva šumova, varijacija vrednosti komponenata i drugog [2].

Jedan od najvažnijih alata kojim se rešavaju svi navedeni problemi i zadaci jeste simulator defekata. Da bi se uspešno pripremio test za jedan DUT, neophodno je definisati najverovatnije defekte, opisati njihove modele i ugraditi ih u kolo. Konačan rezultat ovakvog postupka treba da bude

rečnik defekata, koji se kasnije može koristiti ne samo za testiranje, već i za dijagnostiku [3], [4].

Jedno od najčešće korišćenih tipova elektronskih kola jesu filtri. Bez njih se ne može zamisliti ni jedan savremeni elektronski uređaj. Imajući u vidu zahteve za malom površinom, mogućnost integracije na čipu i cenu projektovanja, kao najbolji mogući izbor načina realizacije analognih integrisanih filtara, nameće se korišćenje SC tehnike.

Kola realizovana upotrebom kapacitivnosti, otpornosti i operacionih pojačavača za nedostatak imaju prevelike tolerancije, što mnogo utiče na tačnost funkcije koju kolo treba da obavlja. Sa druge strane tačnost funkcije realizovane SC kolima određena je tačnošću odnosa kapacitivnosti u njemu. SC tehnika predstavlja veoma pametno iskorišćenje uspostavljanja i prekidanja veza na malim vrednostima kapacitivnosti na čipu, radi realizacije veoma velikih vrednosti otpornosti u MOS integrisanom kolu, koji bi u normalnom slučaju zauzeli veliku površinu čipa [5], [6].

Prednosti SC tehnike su [7]:

- kompatibilnost sa standardnom CMOS tehnologijom
- velika tačnost vremenskih konstanti
- dobra linearnost
- dobre temperaturske karakteristike.

Sa druge strane, njeni nedostaci su:

- uticaj taktnog signala
- zahtev za nepreklapajućim taktnim signalima
- ograničenje u propusnom opsegu koje nameće korišćenje nepreklapajućih taktnih signala.

Kao jedno od mogućih rešenja problema testiranja SC filtara nameće se metod oscilacija. Primenom tog metoda, filter koji se testira pretvori se u oscilator uspostavljanjem pozitivne povratne sprege [2], [8]. Primenom ovog koncepta testiranja, nije potrebno raditi sintezu testnog signala, jer je za dobijanje stabilnih i održivih oscilacija dovoljno da aktivni element ima napajanje. Naime, pošto se radi sa filtarskom ćelijom bilo bi najpovoljnije da se ona testira u frekvencijskom domenu [1]. To bi, međutim, uvelo niz nedoumica o frekvenciji, amplitudi i fazi testnog signala. Slično, kada bi se testiranje obavljalo u vremenskom domenu, nastalo bi nebrojeno mnogo dilema o talasnom obliku testnog signala [1]. Ništa od toga nije potrebno kada se primenjuje OBT. Posebna odlika OBT je da obuhvata sve defekte u kolu. Naime, kod strukturnog testiranja neophodno je sintetizovati testni signal za svaki potencijalni defekt koji se testira. Kod OBT se očekuje da se efekti svih potencijalnih defekata preslikavaju na izlaz oscilatora. Time se dramatično smanjuje fizički rad testnog inženjera.

Kako se tokom testiranja posmatra samo jedan signal – izlazni signal filtra tj. oscilatora – opservabilnost je uvek prisutna. Izlaz filtra je uvek dostupan, i posmatranjem i analizom signala na izlazu može se doći do zaključka da li

Miljana Milić – Univerzitet u Nišu, Elektronski Fakultet, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: miljana.milic@elfak.ni.ac.rs).

Vančo Litovski – penzioner, Vojvode Mišića 60-18, 18000 Niš, Srbija (e-mail: vancolitovski@elfak.ni.ac.rs).

kolo osciluje i sa kojom frekvencijom.

Prilikom uvođenja metoda oscilacija [5], [6] i teorijskog dokazivanja njegove opravdanosti kao i pri njegovoj daljoj razradi i primeni na SC filtar [8], [9] sistematski je zanemarena činjenica da je radna frekvencija novonastalog oscilatora daleko iznad granične (3dB) frekvencije operacionih pojačavača koji se ugrađuju u njega. Naime, pretpostavljalo se da na frekvenciji oscilovanja operacioni pojačavači imaju beskonačno pojačanje i tako se zanemaruje pad apsolutne vrednosti pojačanja  $i$ , što je naročito važno, uneti fazni pomeraj od strane operacionog pojačavača. Ovi su fenomeni uzimani u račun u [10] i pokazano je da pomenuta zanemarivanja nisu opravdana. Uvođenje nesavršenosti operacionih pojačavača u OBT metod za SC filtre je nov rezultat koji se ovde po prvi put saopštava.

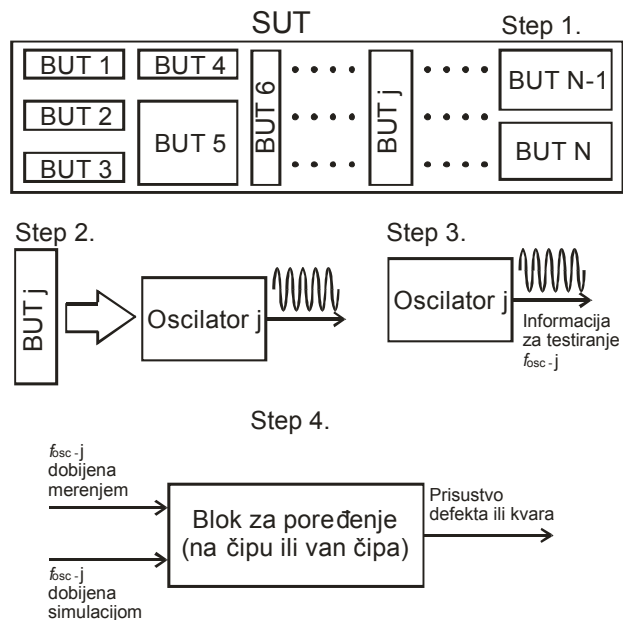
U narednim odeljcima biće prvo opisani principi metode oscilacija. Nakon toga biće detaljnije objašnjen način rada i realizacije aktivnog SC filtra prigušnika opsega frekvencija sa visokim faktorom dobrote (Q faktor). Potom će detaljnije biti analiziran princip testiranja filtra. Primena metoda oscilacija verifikovana je simulacijama u LTspice okruženju. Cilj istraživanja je kreiranje okruženja koje će omogućiti uspostavljanje metode oscilacija. Kao rezultat toga, dobijene su stabilne oscilacije izlaznog signala oscilatora, a zatim je kolo testirano na prisustvo parametarskih defekata kapacitivnosti. Simulacijama je dobijen rečnik defekata, što je prikazano u poslednjim poglavljima gde su navedeni eksperimentalni rezultati i zaključak.

## II. TESTIRANJE ELEKTRONSKIH KOLA METODOM OSCILACIJA

Ideja o korišćenju sklonosti ka astabilnom ponašanju kola u prisustvu pozitivne povratne sprege za testiranje, relativno je novog datuma [8]. OBT odnosno, testiranje zasnovano na oscilacijama sastoji se u tome da se kolo koje se testira modifikuje u oscilator. Merenjem frekvencije oscilacija se potvrđuje prisustvo ili odsustvo defekata u kolu. Na Sl. 1, prikazani su osnovni gradivni blokovi kola kod koga je potrebno implementirati OBT tehniku.

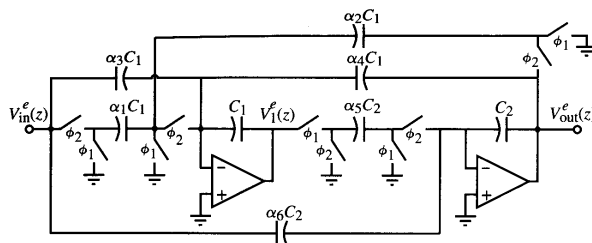
Dakle, DUT se pretvara u generator signala. Najveća prednost primene ovog metoda ogleda se u tome što nije potrebno sastavljati testni signal, već je dovoljno posmatrati nekoliko perioda oscilacija i odrediti njihovo trajanje. Generalno, ovaj metod se može primeniti na analogna i hibridna kola i u svojoj prvoj fazi se svodi na podelu kompleksnog sistema koji se testira (SUT) na jednostavnije funkcionalne blokove koji se zasebno testiraju [9]. Tokom testnog moda, u drugoj fazi, pojedini DUT-ovi konvertuju se u oscilatore. Merenje frekvencije oscilacija svakog od blokova pojedinačno odgovara trećoj fazi implementacije OBT metoda, dok njihovo poređenje sa nominalnom frekvencijom oscilovanja koja odgovara topologiji bez defekata, odgovara poslednjoj, četvrtoj fazi.

Dobijene talasne oblike treba analizirati, što se najčešće svodi na merenje frekvencije, ali se oni mogu i posmatrati i sa stanovišta veličine jednosmerne komponente ili prisustva harmonijskih izobličenja. Pri tome, s obzirom da se radi o signalu koji je univerzalan (sinusoida ili povorka impulsa), analiza dobijenih signala može se standardizovati nezavisno od bloka koji se testira [2].



Sl. 1. Ilustracija OBT principa.

Iako na prvi pogled, implementacija ovog metoda deluje jednostavno, ona je pre svega ograničena mogućnošću da se izvorno kolo pretvori u oscilator kod koga se efekt defekta preslikava u frekvenciju oscilovanja. Ovakav postupak se teško može sistematizovati, i isključivo zavisi od iskustva i kreativnosti projektanta. Principi projektovanja oscilatora ne mogu se jednostavno primeniti za implementaciju OBT metoda. Cilj projektovanja OBT oscilatora nije stabilna frekvencija i amplituda generisanog sinusoidnog signala, već se oni kreiraju tako da amplituda i frekvencija oscilacija (ne obavezno pravilne sinusoide) budu što osetljivije na prisustvo defekata u kolu, koje god oni prirode bili.



Sl. 2. Bikvadratni SC filtar sa visokim Q faktorom.

Da bi se ostvarila stopostotna pokrivenost defekata testom, najčešće je potrebno uključiti još neko merenje (npr. struju napajanja kod CMOS kola), ili je potrebno posmatrati još neki od parametara odziva.

## III. AKTIVNI SC FILTAR PRIGUŠNIK OPSEGA FREKVENCIJA SA VISOKIM Q FAKTOROM

Na Sl. 2 prikazana je topologija univerzalne SC filterske ćelije drugog reda. Ovakva topologija pruža mogućnost modifikacije koeficijentata odnosno kapacitivnosti kondenzatora radi realizacije sva četiri tipa filtriranja; HP, LP, BP i BS.



TABELA II. FFT ANALIZA POJEDINIH ODZIVA

Tip defekta	Amp. [mV]	Pha. [°]	Amp. [mV]	Pha. [°]	Amp. [mV]	Pha. [°]	K [%]
	1.Har	1.Har	2.Har	2.Har	3.Har	3.Har	
FF	334	-74.97	2.97	42.96	8.91	-40.99	2.893
1.2·C <sub>2</sub>	334.5	-78.84	2.94	39.01	8.92	-51.68	2.892
1.2·(α <sub>4</sub> ·C <sub>1</sub> )	334	8.01	3.22	-133.6	8.61	-150.4	2.846
0.8·(α <sub>4</sub> ·C <sub>1</sub> )	332	75	2.02	24.71	7.9	45.99	2.58
1.2·(α <sub>2</sub> ·C <sub>1</sub> )	335	-71.86	2.96	69.19	9	-32.16	2.93

nakon toga dovesti na ulaz filtra. Pojačanje dodatnog pojačavača u konkretnom slučaju iznosi 6, a naponski nivoi oscilacija koji su ovako dobijeni iznose  $\pm 600\text{mV}$ . Dobijeni oscilator prikazan je na Sl. 3. Kada je filter ispravan i bez defekata, oscilator će oscilovati sa frekvencijom od 640Hz. Ovde uočavamo uticaj nesavršenosti operacionih pojačavača na frekvencijsku karakteristiku. Naime, u slučaju idealnih pojačavača, oscilacije bi nastale na notch frekvenciji odnosno na 1kHz [10]. U prisustvu defekata mogu nastati 3 situacije: oscilovanje na frekvenciji koja odgovara ispravnom kolu, oscilovanje na promenjenoj frekvenciji, i neoscilovanje. U prvom slučaju nije moguće prepoznati prisustvo defekata posmatranjem samo frekvencije oscilovanja, pa je potrebno ili uvesti dodatno merenje (nova tačka u kolu ili neka druga električna veličina – npr. struja napajanja), ili posmatrati još neki od parametara odziva kola (npr. faktor izobličenja, harmonike, fazu itd.). U drugom i trećem slučaju, moguće je jasno utvrditi prisustvo defekta u kolu.

Simulacija defekata ima ključni značaj pri razvoju testa. Za simulaciju Notch SC BS filtra treba koristiti neki od simulatora analognih kola. Nažalost, veliki broj Pspice simulatora prilikom rešavanja diferencijalnih jednačina koristi stabilna pravila izračunavanja (aproksimacije) izvoda, kao što je to Euler-ovo pravilo sa razlikom unazad ili grupu pravila višeg reda kao što su Gear-ove formule [10], [12]. Stabilnim aproksimacionim pravilom ne može se simulirati nestabilno kolo tj. oscilator [13], [14]. Zbog toga što nudi mogućnost izbora trapeznog i modifikovanog trapeznog pravila za aproksimaciju izvoda, odabran je LTSpice simulator.

#### A. Simulacija defekata

U analognim kolima defekti se dele u dve grupe: tvrdi tj. katastrofalni kojima se menja topologija kola, i parametarski tj. meki koji utiču samo na pojedine parametra kola ili njegovog odziva. Prilikom testiranja i simulacije OBT oscilatora proveravani su efekti parametarskih defekata kapacitivnosti. Cilj istraživanja je bilo kreiranje oscilatora i njegovog okruženja koje će omogućiti stabilne oscilacije. Simulacijom parametarskih defekata samo su potvrđene teorijske pretpostavke o uticaju efekta defekta na frekvenciju oscilovanja OBT filtra i na dodatne parametre odziva kola.

Pre početka simulacije defekata, da bi se pokrenule oscilacije bilo je neophodno definisati određene početne uslove koji bi inicirali oscilovanje izlaznog napona.

Tabela I. prikazuje rezultate simulacije parametarskih defekata kola. U njoj su date frekvencije oscilovanja kola u odsustvu i prisustvu defekata. Kao što se iz nje vidi, za pojedine parametarske defekte kapacitivnosti, frekvencija oscilovanja je identična onoj bez defekata. Posmatranjem

samo frekvencije oscilacija, dolazi se do zaključka da su ovi defekti neprepoznatljivi. Tako nije moguće doneti zaključak o prisustvu defekta u kolu. Potrebno je zbog toga posmatrati još neki od parametara odziva kola.

U Tabeli 2. prikazani su najznačajniji rezultati FFT analize dobijenog odziva za slučaj kola bez, kao i za slučajeve kola sa defektima pod rednim brojevima 8, 10, 11 i 12 iz Tabele I.

Dodatni dobijeni rezultati ukazuju da se pojedini parametri odziva mogu iskoristiti kako prilikom testiranja, za odbacivanje loših kola, tako i za dijagnostiku u cilju prepoznavanja prisutnih defekata [15], [16]. Tako na primer faza drugog harmonika može jednoznačno da ukaže na prisustvo jednog od četiri defekta koji imaju frekvenciju oscilovanja identičnu onoj iz ispravnog kola.

#### V. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazano je na koji način se metod oscilacija efikasno može primeniti kod testiranja aktivnih SC Notch bikvadratnih filtera. Meranjem frekvencije oscilacija, kao i posmatranjem npr. faze drugog harmonika izlaznog signala oscilatora nastalog modifikacijom SC filtra, može se postići stopostotna pokrivenost parametarskih defekata. Pri tome se mora uzeti u obzir ogroman uticaj realnih parametara modela operacionog pojačavača. Primenjeni testni metod ne zahteva razvoj posebnih pobudnih signala, a sva merenja se obavljaju posmatranjem i analizom samo jednog i to izlaznog signala, što ne zahteva pristup unutrašnjim čvorovima kola. Ugradnjom jednostavne dodatne logike ovakav način testiranja predstavlja pogodno BIST, Analog Scan ili DFD rešenje. Dalje istraživanje biće usmereno na primenu metode u testiranju katastrofalnih defekata kapacitivnosti, kao i ispitivanje efekata defekata prekidača (idealnih ili realnih).

#### ZAHVALNICA

Ova istraživanja su bila delimično finansirana od strane Ministarstva Prosvete Nauke i Tehnološkog Razvoja Republike Srbije u okviru ugovora TR32004.

#### LITERATURA

- [1] V. B. Litovski, *Osnovi testiranja elektronskih kola*, 1<sup>st</sup> ed. Niš, Srbija: Univ. u Nišu, Elektronski fakultet, 2009.
- [2] M. Lj. Milić, V. B. Litovski, "Primena metoda oscilacija za testiranje aktivnog filtra nepropusnika opsega frekvencija," Zbornik radova VIII simpozijuma Industrijska elektronika, Banja Luka, Bosna i Hercegovina, pp. 100-104, 4-6. Novembar, 2010.

- [3] M. A. Stošović, M. Lj. Milić, M. Zvolinski, V. B. Litovski, "Oscillation-based diagnosis using artificial neural networks based inference mechanism," *Computers and electrical engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 190-201, Decembar, 2012.
- [4] M. A. Stošović, M. Lj. Milić, V. B. Litovski, "Analog Filter Diagnosis Using the Oscillation Based Method" *Journal of Electrical Engineering - Elektrotehnicki*, vol. 63, no. 6, pp. 349-356, 2012.
- [5] U. Kač, F. Novak "Oscillation Test Scheme of SC Biquad Filters Based on Internal Reconfiguration," *J. Electron Test*, vol. 23, no. 6, pp. 485-495, Decembar, 2007.
- [6] U. Kač, F. Novak "Reconfiguration Schemes of SC Biquad Filters for Oscillation Based Test," *Information Technology and Control*, vol. 42, no. 1, pp. 38-47, Februar, 2013.
- [7] P. E. Allen, D. R. Holberg, *CMOS Analog Circuit Design*, 2nd ed. New York, USA: Oxford University Press, 2002.
- [8] K. Arabi, B. Kaminska, "Testing analog and mixed-signal integrated circuits using oscillation-test method," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 16, no. 7, pp. 745-753, 1997.
- [9] G. H. Sanchez, D. V. Vega, A. R. Rueda, J. L. Dias, *Oscillation-Based Test in Mixed-Signal Circuits*, 1st ed. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2006.
- [10] M. Lj. Milić, M. A. Stošović, V. B. Litovski, "Oscillation based analog testing – a case study," Proc. 34<sup>th</sup> International Conference on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics MIPRO 2011, Opatija, Hrvatska, vol. 1, pp. 118-123, 23-27. Maj, 2011.
- [11] [www.linear.com](http://www.linear.com)
- [12] V. B. Litovski, *Projektovanje elektronskih kola, simulacija, optimizacija, testiranje i fizičko projektovanje*, 1st ed. Vranje, Srbija: Nova Jugoslavija, 2000.
- [13] V. Litovski, and M., Zvolinski, *VLSI Circuit Simulation and Optimization*. Chapman and Hall, London, 1997.
- [14] C. Thompson, "A study of numerical integration techniques for use in the companion circuit method of transient circuit analysis" ECE Technical reports, Purdue University School of Electrical Engineering, 1992.
- [15] V. B. Litovski, M. Stošović, M. Zvolinski, "Analogue Electronic Circuit Diagnosis Based on ANNs," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, no. 8, pp. 1382-1391, Avgust, 2006.
- [16] M. A. Stošović, D. Milovanović, V. B. Litovski, "Hierarchical Approach to Diagnosis of Mixed-mode Circuits using Artificial Neural Networks," *Neural Network World*, vol. 21, no. 2, pp. 153-168, 2011.

#### ABSTRACT

The capabilities for applying the oscillation method for testing Switched Capacitor biquad Notch filter cells with high Quality factor are analyzed in this paper. Many surrounding conditions should be met in order to properly test the circuit and to obtain a sustainable and stable oscillations. We have created a fault dictionary that reflects the mapping of soft defects into the circuit response. Simulations in LTspice program show that this testing concept is possible and acceptable for the chosen class of filter cells, especially when we bear in mind advantages of the oscillations method.

#### **Soft defects testing in Notch SC filters using the oscillation method**

Miljana Milić, Vančo Litovski