

DIZAJN I SIMULACIJA NOVIH FRAKTALNIH INTEGRISANIH TRANSFORMATORA

Goran Stojanović, Ljiljana Živanov, Vesna Crnojević-Bengin, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Sadržaj – U ovom radu je po prvi put u stručnoj literaturi predložena realizacija integrisanih transformatora uz pomoć fraktala. Izvršena je sistematska analiza integrisanih transformatora kod kojih su primarni i sekundarni namotaji formirani na bazi različitih fraktalnih struktura. Ponašanje ovih transformatora na silicijumskom supstratu ispitivano je korišćenjem 3D elektromagnetnog simulatora Ansoft HFSS. Takođe, u ovom radu je izvršeno poređenje nekih integrisanih transformatora za različite tipove i nivoe fraktalne strukture da bi se utvrdio njihov uticaj na performanse transformatora odnosno na induktivnosti primara i sekundara i na faktor dobrote (Q -faktor).

1. UVOD

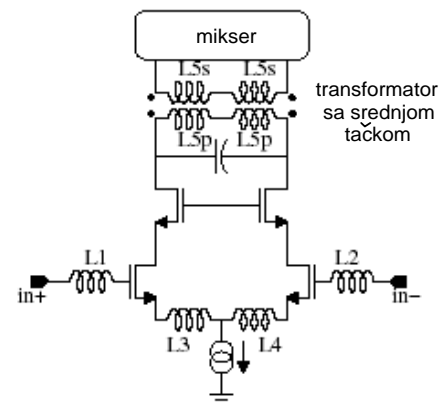
Zbog stalnog rasta mogućnosti primene bežičnih komunikacija u svakodnevnom životu, javlja se sve veća potreba za poboljšanjem kvaliteta mobilnih komunikacija i uređaja za mobilnu komunikaciju. Integrisane komponente na jednom silicijumskom čipu za rad na učestanostima radio-frekventnog područja (RFIC) se sve više upotrebljavaju u procesima prenosa podataka. Integrisani transformator je jedna od glavnih komponenti tih kola. On se sve više primenjuje u sistemima za mobilne komunikacije, niskošumnim pojačavačima (LNA – *Low Noise Amplifiers*), aktivnim mikserima, naponski kontrolisanim oscilatorima (VCO – *Voltage Controlled Oscillators*). Takođe, u kolima koja vrše slaganje signala, razdvajanje faze kao i konverziju diferencijalnog signala u onaj koji to nije, neophodno je postojanje transformatora. Transformatori su neizostavan deo minijaturnih senzora, aktuatora, filtara i konvertora snage, koji treba da budu integrisani na jedinstvenom čipu i ugrađeni u razne elektronske sisteme [1-3]. Na slici 1 je prikazana električna šema LNA kao primer najčešće primene integrisanih transformatora [3].

Najrasprostranjeniji način proizvodnje monolitnih transformatora je njihova izrada na silicijumskoj (Si) podlozi, a to u samom startu ograničava osobine tako dobijenih transformatora zbog podložnosti silicijuma na pojavu gubitaka. Zbog toga se očekuju manje vrednosti induktivnosti transformatora, Q -faktora i koeficijenta međusobne sprege, a veći gubici usled parazitnih efekata između transformatora i supstrata, nego što bi to bio slučaj da je kao osnova umesto Si upotrebljen galijum-arsenid (GaAs) ili kvarc.

Pored izbora supstrata na karakteristike transformatora značajno utiče i njegov oblik, odnosno njegov "layout" ili tlocrt. Spiralni namotaji integrisanog transformatora mogu biti postavljeni u međusobno paralelan, isprepletan ili koncentričan položaj i na taj način mogu da formiraju planarnu (*planar*) ili naslaganu (*stacked*) strukturu. Generalno govoreći, planarni transformatori imaju nižu vrednost sopstvene induktivnosti, parazitnih kapacitivnosti i koeficijenta međusobne sprege, ali zato veću rezonantnu učestanost u odnosu na naslagane transformatore, koji zauzimaju manje prostora na čipu, imaju veću vrednost

induktivnost i manji Q -faktor. Širina metalnih linija namotaja transformatora, njihov međusobni razmak i materijal od kojeg će se one izrađivati takođe predstavljaju parametre čiji se uticaj na karakteristike transformatora ne može zanemariti.

U ovom radu će po prvi put u naučnoj literaturi biti predložene različite konfiguracije fraktalnih integrisanih transformatora. Biće uveden pojam fraktala i biće dat kratak pregled fraktalnih struktura koje su korišćene za realizaciju primarnog i sekundarnog namotaja transformatora. Takođe, biće predočene neke od mogućih metoda za poboljšanje performansi transformatora (realizacijom primara i sekundara normalno na površinu supstrata) i biće prikazani rezultati simulacija raznih konfiguracija fraktalnih integrisanih transformatora dobijenih pomoću 3D elektromagnetnog simulatora Ansoft HFSS (*High Frequency Structure Simulator*) [4].



Sl.1. Primer primene integrisanog transformatora u LNA.

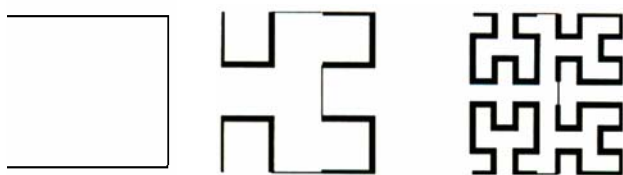
U sekciji 2 je dat kratak pregled fraktalnih struktura. Izgled modela fraktalnog integrisanog transformatora u simulatoru HFSS dat je u sekciji 3. U sekciji 4 su predstavljani najznačajniji rezultati simulacija dok su u sekciji 5 dati osnovni zaključci ovog rada.

2. KRATAK PREGLED FRAKTALNIH STRUKTURA

Fraktali su matematička apstrakcija. Fraktali se mogu dobiti odgovarajućim matematičkim formulama koje se ponavljaju u određenom algoritmu, po određenim pravilima. Najinteresantnija osobina fraktala je njihova ponovljivost. Ona ih čini interesantnim za primenu u integrisanim elektronskim kolima novije generacije.

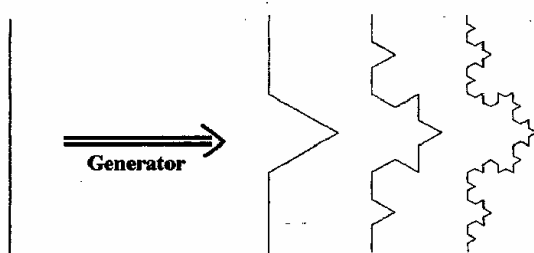
Hilbertov fraktal. Na slici 2 prikazane su Hilbertove krive prvog, drugog i trećeg nivoa. Da bi se kreirala Hilbertova kriva određenog nivoa potrebno je nacrtati Hilbertovu krivu jednog niže nivoa i povezati ih linijskim segmentima. Može se primetiti da je kriva drugog nivoa formirana od četiri krive prvog nivoa (deblja linija) i tri linijska segmenta (označenih tanjom linijom). Hilbertova kriva trećeg nivoa formira se od četiri Hilbertove krive drugog nivoa koje su povezane sa tri

linijska segmenta, itd. Manje krive od kojih nastaje kriva većeg nivoa su rotirane na tačno određen način.



Sl. 2. Hilbertove krive prvog, drugog i trećeg nivoa.

Zvezda fraktal. Zvezda fraktal ima inicijator u obliku jednakostraničnog trougla. Generator zvezda fraktala je linijski segment određene dužine. Prvi nivo fraktala ima četiri segmenata. Prvi i drugi segment, drugi i treći i treći i četvrti segment zaklapaju međusobni ugao od 60° , kao što se vidi na slici 3. Svaki naredni nivo nastaje od četiri segmenta jednog nižeg nivoa koji se spajaju na ovaj način.



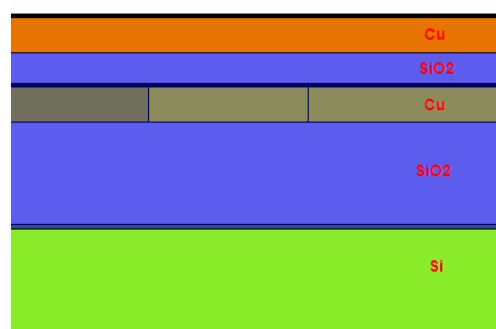
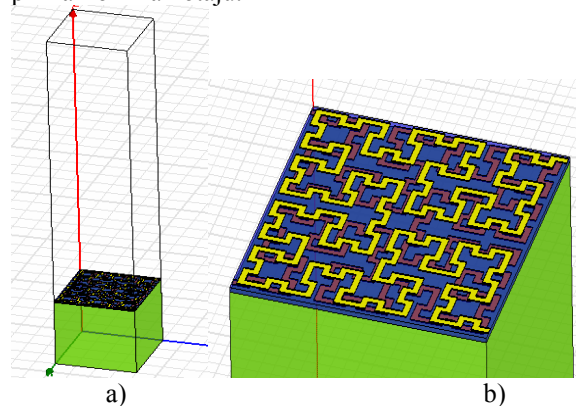
Sl. 3. Generator, prvi, drugi i treći nivo zvezda fraktala.

Druge vrste fraktala. Naravno postoje i druge vrste fraktala, koje nalaze svoju primenu u RF i mikrotalasnim integriranim kolima, kao što su: fraktali u obliku drveta, fraktali u obliku snežnih pahuljica, Peano fraktal, fraktali Sijerpinskog, Mek Vorter Pentigre fraktal, Gasketi Sijerpinskog, Minkovski fraktali, Sijerpinski karpeti, Mandelbrotov set ili Julija set. U ovom radu neće detaljnije biti reči o ovim fraktalima, a za detaljnije informacije čitaoca upućujemo na literaturu [5]-[7].

3. MODEL FRAKTALNOG TRANSFORMATORA U HFSS-U

U ovom radu opredelili smo se za realizaciju naslaganih transformatora (*stacked transformer*), pošto je neke druge oblike transformatora teško realizovati fraktalima (zbog složenosti fraktalnih krivih). Neophodno je koristiti više metalnih nivoa, da bi se postigla i vertikalna i bočna magnetna sprema i da bi se na taj način realizovali primarni i sekundarni namotaj transformatora. Na slici 4a prikazan je model transformatora za simulaciju u programu HFSS. Providan boks je vazdušni boks, koji je neophodan za definisanje portova. Uveličan model, bez vazdušnog boksa na kome se vide supstrat, silicijum-dioksid i provodni slojevi od bakra prikazan je na slici 4b. Vazdušni boks će biti izostavljen i na narednim modelima, zbog bolje preglednosti. Na slici 4c prikazan je uveličan deo poprečnog preseka u kome se vidi raspored slojeva. Provodni sloj na vrhu, je sloj bakra debljine $1\mu\text{m}$ i predstavlja primarni namotaj. Drugi provodni sloj od bakra (označen takođe sa Cu), debljine $1\mu\text{m}$, predstavlja sekundarni namotaj transformatora. On je praktično smešten u silicijum-dioksidu. Rastojanje između primarnog i sekundarnog namotaja je $1\mu\text{m}$ i biće konstantno za sve naredne primere. Primar i sekundar su smešteni na supstratu

silicijuma (Si) i od njega su odvojeni slojem silicijum-dioksida (SiO_2). Kako je sekundarni namotaj bliže supstratu za očekivati je da gubici u njemu budu veći od gubitaka u primarnom namotaju.



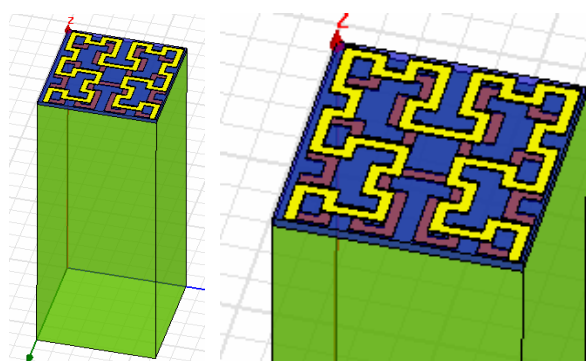
c)

Sl. 4. Fraktalni integrirani transformator a) model za simulaciju u Ansoft HFSS-u b) model bez vazdušnog boksa c) uveličan prikaz poprečnog preseka sa označenim slojevima.

U narednom delu ispitaćemo kako se menjaju performanse transformatora pri promeni različitih fraktalnih krivih i njihovog nivoa u primarnom i sekundarnom delu transformatora.

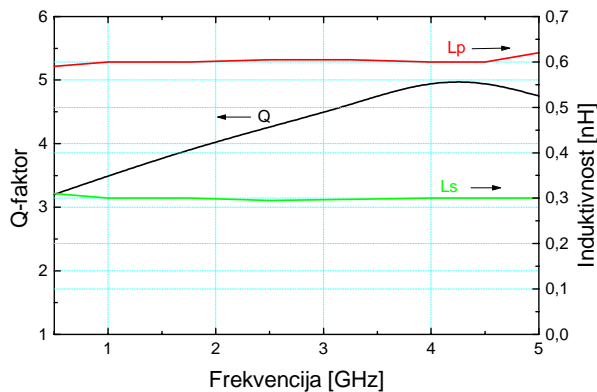
4. REZULTATI I DISKUSIJA

Kao prvi primer, primarni i sekundarni namotaj biće realizovani od bakra u vidu Hilbertovog fraktala trećeg nivoa ($N=3$). Širina sloja bakra za primarni i sekundarni namotaj je $6\mu\text{m}$, a njegova debljina $1\mu\text{m}$. Debljina silicijum-dioksida iznosiće $5\mu\text{m}$, a silicijuma $380\mu\text{m}$. Širina i dužinu sloja Si i SiO_2 za ovaj transformator iznosiće $125 \times 125\mu\text{m}$.



Sl. 5. Monolitni fraktalni transformator realizovan sa dve Hilbertove krive $N=3$ sa širinom provodnog sloja od $6\mu\text{m}$.

Na slici 5 prikazan je model ovog transformatora za simulaciju u HFSS-u, a na slici 6 rezultati simulacije u vidu Q-faktora i induktivnosti u zavisnosti od frekvencije.

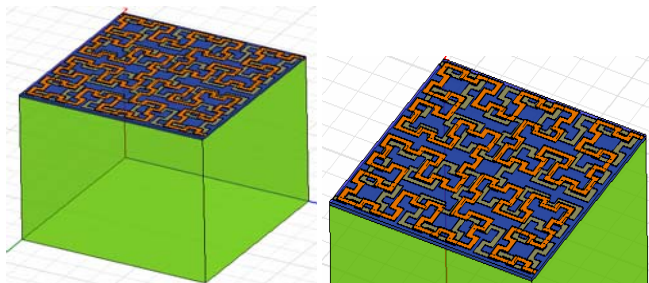


Sl. 6. Q-faktor i induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja u funkciji frekvencije za transformator realizovan sa dve Hilbertove krive N=3.

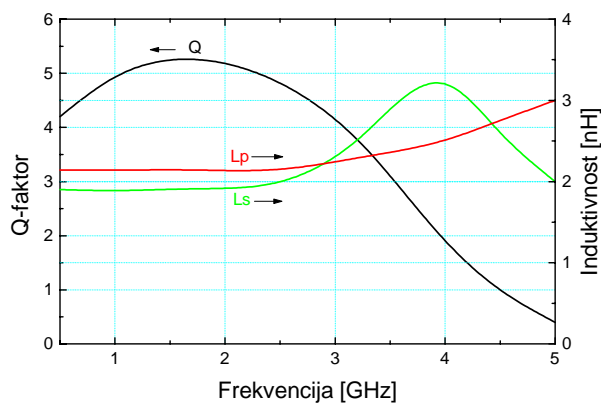
Na osnovu rezultata simulacije možemo videti da je induktivnost primara $L_p=0.6\text{nH}$, a induktivnost sekundara

$$L_s=0.3\text{nH}. \text{ Prenosni odnos transformacije } n = \frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{L_p}{L_s}} \text{ je}$$

oko 1.41. Možemo zapaziti da se induktivnost jako malo menja sa promenom frekvencije, u frekventnom opsegu od interesa (od 0.5GHz do 5GHz). Maksimalna vrednost Q-faktora dostiže se na učestanosti od 4.2GHz i iznosi oko 5.



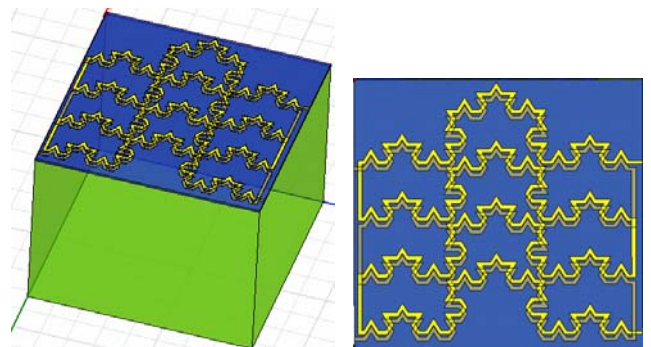
Sl. 7. Fraktalni integrisani transformator realizovan sa dve Hilbertove krive N=4.



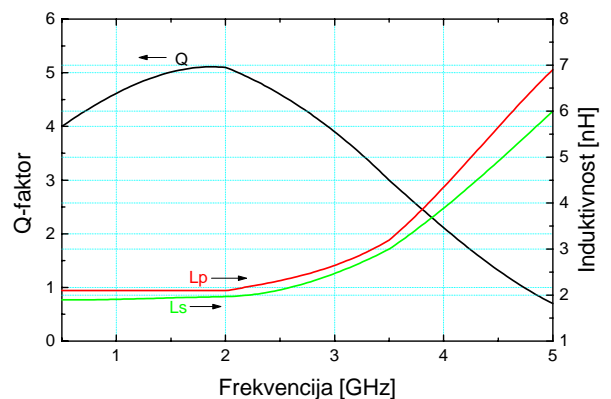
Sl. 8. Q-faktor i induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja u funkciji frekvencije za transformator realizovan sa dve Hilbertove krive N=4 širine sloja bakra od $10\mu\text{m}$.

U narednoj simulaciji povećan je nivo fraktalne krive. Primarni i sekundarni namotaj realizovan je pomoću Hilbertovog fraktala četvrtog nivoa (N=4). Tehnološki parametri su: debljina sloja Si je $380\mu\text{m}$, SiO_2 je $5\mu\text{m}$, a bakra $1\mu\text{m}$. Širina i dužina sloja Si i SiO_2 je $400\times 400\mu\text{m}$. Širina sloja bakra od kojeg su napravljani primarni i sekundarni namotaj transformatora je $10\mu\text{m}$. Model transformatora prikazan je na slici 7, a rezultati simulacije u vidu Q-faktora i induktivnosti na slici 8. Na osnovu rezultata simulacije vidimo da se sa povećanjem nivoa fraktalne krive kojom su realizovani primarni i sekundarni namotaji transformatora povećava i njihova induktivnost. Induktivnost primarnog namotaja je oko 2.1nH , a sekundarnog oko 1.8nH . Prenosni odnos transformacije n je oko 1.08. Maksimalna vrednost Q-faktora se pomerila ka nižim učestanostima nalazi se na 1.75GHz i iznosi 5.3. Na višim učestanosti dolazi do promene induktivnosti sa promenom frekvencije.

U sledećem primeru primarni i sekundarni namotaj transformatora realizovani su uz pomoć zvezda fraktala. Debljina sloja bakra iznosi $1\mu\text{m}$, njegova širina $6\mu\text{m}$. Debljina sloja Si je $380\mu\text{m}$, a SiO_2 je $5\mu\text{m}$. Širina i dužina sloja Si i SiO_2 je $400\times 400\mu\text{m}$. Transformator je napravljen tako da su primarni i sekundarni namotaj paralelni. Da bi površina pločice bila što više iskorišćena vezaćemo četiri zvezda fraktala na red, kao što je prikazano na slici 9. Na slici 10 prikazani su rezultati simulacije u vidu Q-faktora i induktivnosti u zavisnosti od frekvencije.



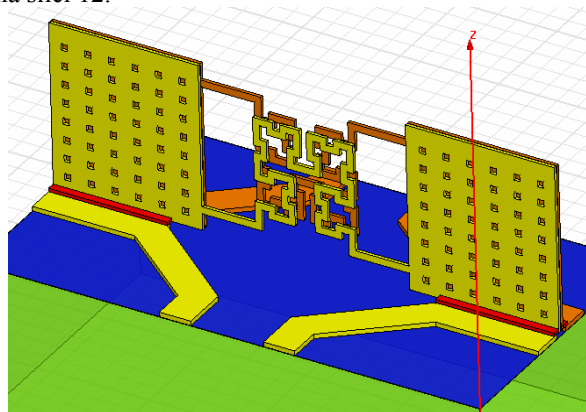
Sl. 9. Integrisani transformator realizovan sa četiri redno vezana zvezda fraktala N=3 u primarnom i sekundarnom namotaju širine sloja od $6\mu\text{m}$.



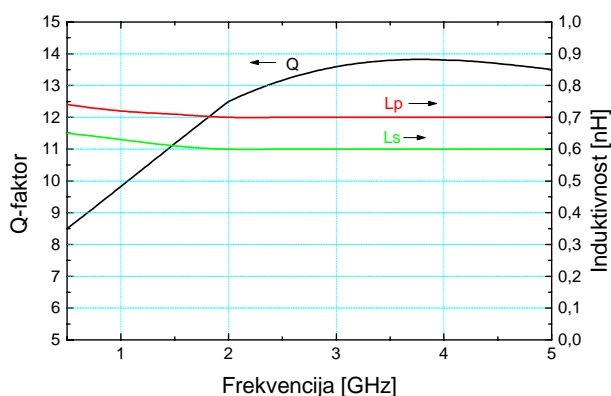
Sl. 10. Q-faktor i induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja transformatora u funkciji frekvencije, za slučaj četiri redno vezana zvezda fraktala.

Na osnovu analize rezultata simulacije može se uočiti da rednim vezivanjem fraktalnih struktura postizemo induktivnosti primarnog i sekundarnog namotaja oko 1nH. Međutim prenosni odnos transformacije je mali. Maksimalna vrednost Q-faktora 5.1 se postiže na frekvenciji od 1.75GHz.

U narednom delu uvedena je još jedna inovacija u konstrukciji integrisanih transformatora. MEMS tehnologijom moguće je namotaje transformatora realizovati tako da budu postavljeni normalno u odnosu na površinu supstrata [8], [9]. Na taj način smanjila bi se parazitna kapacitivnost namotaja prema supstratu, a istovremeno namotaji bi bili udaljeniji od supstrata sa gubicima, što dovodi do povećanja Q-faktora transformatora. Korišćenjem Hilbertovog fraktala, zajedno sa bočnim nosačima i otvorima na njima realizovaćemo dva namotaja transformatora. Na slici 11 prikazan je model transformatora kod kog je izvršeno podizanje primarnog i sekundarnog namotaja tako da oni stoje normalno u odnosu na supstrat. Paralelno rastojanje između njih je 1 μ m. Širina sloja bakra je 17 μ m, a njegova debljina je 1 μ m i za primarni i za sekundarni namotaj. Širina i dužina sloja Si i SiO₂ je 1467x1267 μ m. Ostali tehnološki parametri su kao u prethodnim simulacijama. Rezultati ove simulacije prikazani su na slici 12.



Sl. 11. Integrisani transformator realizovan sa dva namotaja u obliku Hilbertovog fraktala normalna na supstrat.



Sl. 12. Q-faktor i induktivnost u funkciji frekvencije za podignuti Hilbertov fraktal sa slike 11.

Na osnovu prethodnih rezultata možemo zaključiti da se postavljanjem namotaja transformatora normalno na površinu supstrata i performanse transformatora znatno poboljšavaju. Induktivnost primara i sekundara je veća, a sa njom i prenosni odnos transformacije. Q-faktor je najveći u odnosu na ostale primere predstavljene u ovom radu i iznosi oko 14.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljeno je nekoliko novih struktura fraktalnih integrisanih transformatora. Integrisani naslagani transformatori čiji su primar i sekundar u obliku fraktala Hilberta ili zvezda fraktala simulirani su u programu HFSS. Menjan je nivo fraktala upotrebljenog u njima, širina provodnog sloja namotaja i pomeran je položaj namotaja. Praćena je frekventna promena Q-faktora i induktivnosti primara i sekundara sa promenom ovih parametara. Na kraju su predložena nova rešenja za realizaciju namotaja transformatora normalno na silicijumski supstrat. Na osnovu rezultata simulacija izvršena je analiza i poređenje različitih konfiguracija fraktalnih transformatora.

LITERATURA

- [1] Y. K. Koutsoyannopoulos and Y. Papananos, "Systematic analysis and modeling of integrated inductors and transformers in RF IC design," *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 47, no. 8, pp. 699-713, Aug. 2000.
- [2] J. Y. Park and J. U. Bu, "Packaging compatible microtransformers on a silicon substrate," *IEEE Trans. on Adv. Packaging*, vol. 26, no. 2, pp. 160-164, May 2003.
- [3] A. Zolfaghari, A. Chan, and B. Razavi, "Stacked inductors and transformers in CMOS technology," *IEEE J. of Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 4, pp. 620-628, April 2001.
- [4] HFSS (*High Frequency Structure Simulator*), Ansoft Inc.
- [5] P. Emp, S. Jan, S. Cugat del Valles, "Fractal miniaturization in RF and microwave networks," *Fractus Barcelona*, Spain, 2001.
- [6] Rod Stephens, "Visual Basic-programiranje grafike," *Kompijuterska biblioteka, Publikum Beograd*, 1998.
- [7] Larry Riddle, "Sierpinski gasket," Copyright, *Agnes Scott College*, 1998.
- [8] G. Dahlmann, E. Yeatman, "Microwave characteristics of meander inductors fabricated by 3D self-assembly," *IEEE Int. Symp. on High Performance Electron Devices for Microwave and Opto. App.*, 2000, pp. 128-133.
- [9] G. W. Dahlmann, E. M. Yeatman, "High Q microwave inductors on silicon by surface tension self-assembly," *Electronic Letters*, vol. 36, no. 20, Sept. 2000.

Abstract – In this paper, for the first time in open literature, realization of integrated transformer using fractals is presented. Systematic analysis of integrated transformer in which primary and secondary coils are formed by different fractal structures, is performed. Behavior of these transformers on the silicon substrate is investigated by means of 3D electromagnetic simulator Ansoft HFSS. In this paper comparison of some integrated transformer for different type and level of fractal structure is performed, also, in order to identified their influence on transformer performance or primary and secondary inductance and quality factor (Q-factor).

DESIGN AND SIMULATION OF NOVEL FRACTAL INTEGRATED TRANSFORMERS

G. Stojanović, Lj. Živanov, V. Crnojević-Bengin