

Modelovanje i simulacija RF višeslojnih induktora u LTCC tehnologiji

Amer Čelić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Sadržaj — Cilj ovog rada je da se predstave modeli i karakteristike dva tipa induktora projektovanih u LTCC tehnologiji (*Low Temperature Co-fired Ceramic*). U ovom radu je prikazan fizički model 3D induktora tipa solenoid u ravni i rednog induktora tipa solenoid u ravni za rad u radiofrekventnom opsegu (RF). Radi verifikovanja rezultata dobijenih pomoću modela, oni su upoređeni sa rezultatima dobijenim pomoću *Ansoft HFSS* elektromagnetskog simulatora. Dobijeno je veoma dobro slaganje rezultata za efektivnu vrednost induktivnosti, dok efektivna vrednost Q -faktora ima nešto veće odstupanje nego induktivnost.

Ključne reči — Faktor dobrote, Fizički model induktora, Induktivnost, Planarni solenoidni induktor.

I. UVOD

Integrirani induktor je komponenta koja sve više nalazi primenu u niskošumnim pojačavačima, aktivnim mikserima, naponski kontrolisanim oscilatorima, konvertorima snage, minijaturnim sensorima, filtrima, itd [1]. Glavne osobine koje karakterišu svaki induktor su njegova induktivnost i faktor dobrote (Q -faktor).

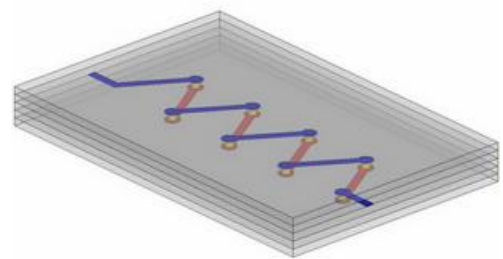
U zavisnosti od karakteristika i dimenzija koje je potrebno ostvariti kao i mesta primene komponente ili kola, koriste se različite tehnologije za njihovu izradu. Tehnologije koje se najčešće koriste za izradu mikro struktura su monolitna tehnologija [2], tehnologija debelog filma [3], LTCC (*Low Temperature Co-fired Ceramic*) tehnologija [4], [5]. Projektant mikroelektronskih struktura bi trebalo da poznaje što veći broj tehnologija kako bi mogao da odluči koja tehnologija daje optimalne karakteristike projektovane komponente. Pored poznavanja različitih tehnologija, radi uspešnog projektovanja induktorskih struktura potrebno je poznavati i električne karakteristike koje opisuju induktor.

Cilj ovog rada je da se napravi fizički model dva tipa solenoidnih induktora u ravni za rad u radiofrekventnom opsegu. Simulacijom induktorskih struktura pomoću elektromagnetskih simulatora mogu se dobiti podaci o efektivnoj vrednosti induktivnosti i Q -faktora kao i o rezonantnoj frekvenciji, ali se ne mogu dobiti informacije o pojedinim parametrima kao što su serijska otpornost, serijska kapacitivnost, parazitna kapacitivnost prema podlozi itd. Zbog toga, pravljenjem fizičkog modela za induktor može se tačno videti kako te vrednosti utiču na

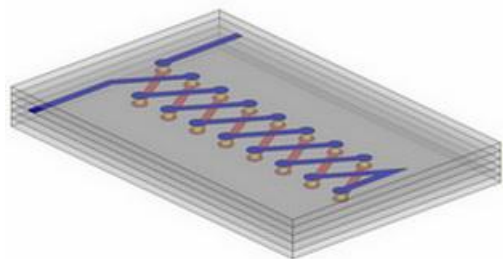
njegovu efektivnu vrednost induktivnosti i efektivnu vrednost Q -faktora. Provera rezultata dobijenih na osnovu fizičkog modela vršena je pomoću elektromagnetskog simulatora *Ansoft HFSS* [6].

II. IZVOĐENJE FIZIČKOG MODELA INDUKTORA PROJEKTOVANOG ZA LTCC TEHNOLOGIJU

Na slici 1 prikazan je izgled induktorskih struktura koje su projektovane za LTCC tehnologiju.



(a) 3D induktor



(b) Redni induktor

Sl. 1. 3D izgled induktorskih struktura.

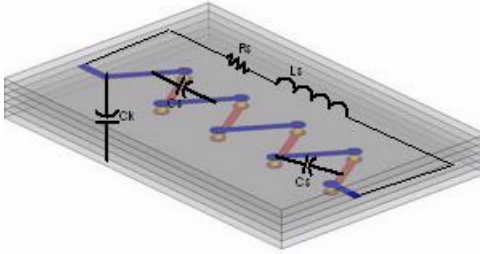
Kao što može da se vidi sa slike 1 za projektovanje induktorskih struktura korišćeno je pet dielektričnih traka. Korišćene trake su proizvedene od kompanije DuPont – DuPont 951PT [7]. Za provodne linije su korišćene srebrne paste takođe firme DuPont – DuPont 6142D [7]. Induktori su projektovani tako da imaju istu širinu provodne linije ($100\mu\text{m}$), istu debljinu provodne linije ($9\mu\text{m}$) i da zauzimaju istu površinu na čipu. Prečnik vie iznosi $100\mu\text{m}$. Dimenzije za oba tipa induktora su iste ($5.4 \times 2.2 \times 0.5$)mm.

Poznavanje fizičkog modela induktora je veoma značajno za njegovu primenu, jer se na taj način mogu sagledati svi karakteristični parametri koji na njega utiču. Precizno modelovanje induktora je prilično zahtevno zbog pojave mnogih parazitnih efekata koji se javljaju na visokim frekvencijama [8].

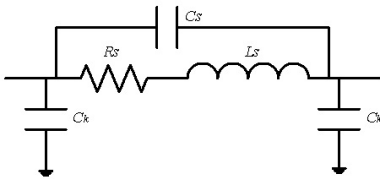
Na slici 2 prikazana je fizička struktura 3D induktora sa

Amer Čelić, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Srbija (e-mail: celicamer@yahoo.com).

karakterističnim parametrima koji opisuju induktor na visokim frekvencijama (serijska induktivnost L_S , serijska otpornost R_S , serijska kapacitivnost C_S , parazitna kapacitivnost prema podlozi C_K), a na slici 3 njegova ekvivalentna π -šema. Fizička struktura i ekvivalentna π -šema rednog induktora su identične kao za 3D induktor.



Sl. 2. Fizička struktura 3D induktora.



Sl. 3. Ekvivalentna π -šema 3D induktora.

Serijska induktivnost L_S predstavlja zbir samoinduktivnosti pojedinačnih segmenata induktora (L_O) i međusobnih induktivnosti između paralelnih i kosih linijskih segmenata induktora ($L_{M1} + L_{M2}$),

$$L_S = L_{OU} + L_{M1U} + L_{M2U}. \quad (1)$$

Samoinduktivnost jednog linijskog segmenta dobija se korišćenjem jednačine (2) dok se ukupna samoinduktivnost (L_{OU}) dobija sumiranjem samoinduktivnosti svakog pojedinačnog segmenta i samoinduktivnosti koju unose vie (L_{via}), jednačina (3),

$$L_O = \frac{\mu_0 l_l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l_l}{w_l + t_l} + 0,50049 + \frac{w_l + t_l}{3l_l} \right], \quad (2)$$

$$L_{via} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left[t_{via} \sinh^{-1} \left(\frac{t_{via}}{w_{via}} \right) - \sqrt{t_{via}^2 + w_{via}^2} + w_{via} \right], \quad (3)$$

gde su l_b , w_l , t_l , dužina, širina i debljina pojedinačnog linijskog segmenta, respektivno, w_{via} i t_{via} prečnik i dužina vie, $\mu_r = 0.99998$ relativna permeabilnost provodne linije.

Međuiduktivnost između dva paralelna segmenta induktora se dobija korišćenjem jednačine (4), dok se ukupna međuiduktivnost (L_{M1U}) dobija sabiranjem pojedinačnih međuiduktivnosti između paralelnih segmenata [9],

$$L_{M1} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} l_l \left[\ln \left(\frac{l_l}{G} + \sqrt{1 + \frac{l_l^2}{G^2}} \right) - \sqrt{1 + \frac{G^2}{l_l^2} + \frac{G}{l_l}} \right], \quad (4)$$

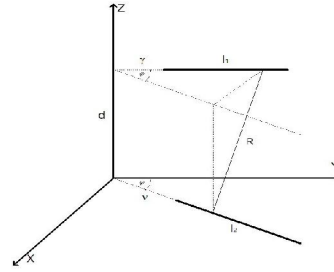
gde je parametar G dat jednačinom (5),

$$\ln G = \ln d - \left[\left(\frac{1}{12(d/w_l)^2} \right) + \left(\frac{1}{60(d/w_l)^4} \right) + \left(\frac{1}{164(d/w_l)^6} \right) \right], \quad (5)$$

a d je rastojanje između paralelnih segmenata.

Međuiduktivnost između dva segmenta induktora koji su postavljeni pod uglom φ , slika 4, se dobija korišćenjem

jednačine (6), dok se ukupna međuiduktivnost (L_{M2U}), dobija sabiranjem pojedinačnih međuiduktivnosti između ovih segmenata [9],



Sl. 4. Mimoilazni segmenti pod uglom φ .

$$L_{M2} = \frac{\mu_0 \cos \varphi}{4\pi} \left[2 \left[(\gamma + l_1) \operatorname{arth} \left(\frac{l_2}{R_1 + R_2} \right) + (\nu + l_2) \operatorname{arth} \left(\frac{l_1}{R_3 + R_4} \right) - \mu \operatorname{arth} \left(\frac{l_2}{R_3 + R_4} \right) - \nu \operatorname{arth} \left(\frac{l_1}{R_2 + R_3} \right) \right] - \frac{\Omega d}{\sin \varphi} \right], \quad (6)$$

gde je parametar Ω dat jednačinom (7)

$$\Omega = \operatorname{arctg} \left(\frac{d^2 \cos \varphi + (\gamma + l_1)(\nu + l_2) \sin^2 \varphi}{dR_1 \sin \varphi} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{d^2 \cos \varphi + (\gamma + l_1)\nu \sin^2 \varphi}{dR_2 \sin \varphi} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{d^2 \cos \varphi + \gamma \nu \sin^2 \varphi}{dR_3 \sin \varphi} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{d^2 \cos \varphi + \gamma(\nu + l_2) \sin^2 \varphi}{dR_4 \sin \varphi} \right), \quad (7)$$

a pomoćni parametri R_1, R_2, R_3, R_4 jednačinom (8),

$$\begin{aligned} R_1^2 &= d^2 + (\gamma + l_1)^2 + (\nu + l_2)^2 - 2(\gamma + l_1)(\nu + l_2) \cos \varphi, \\ R_2^2 &= d^2 + (\gamma + l_1)^2 + \nu^2 - 2(\gamma + l_1)\nu \cos \varphi, \\ R_3^2 &= d^2 + \gamma^2 + \nu^2 - 2\gamma\nu \cos \varphi, \\ R_4^2 &= d^2 + \gamma^2 + (\nu + l_2)^2 - 2\gamma(\nu + l_2) \cos \varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Serijska otpornost 3D induktora data je jednačinom (9)

$$\begin{aligned} R_S &= \frac{N\rho_l l_l}{2\delta(w_l + t_l)} + \frac{2\rho_l l_K}{2\delta(w_l + t_l)} \\ &+ \frac{N\rho_l t_{via}}{\delta 2\pi w_{via} / 2} + \frac{2N\rho_l t_l}{\pi(w_{pad})^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

gde je $N=8$, ukupan broj kosih segmenata 3D induktora, $\rho_l = 2.97 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ specifična otpornost provodne linije, l_K dužina priključnih segmenata, w_{pad} prečnik proširenja na kraju linije (ped). Parametar koji opisuje zavisnost otpornosti od frekvencije naziva se dubina prodiranja struje kroz provodnu liniju δ i dat je jednačinom (10)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_l}{\pi \mu_0 \mu_r f}}. \quad (10)$$

Serijska kapacitivnost 3D induktora data je jednačinom (11) i obuhvata kapacitivnost između paralelnih segmenata, kosih segmenata, i kapacitivnost između proširenja na kraju provodne linije (via pedova)

$$\begin{aligned} C_S &= \varepsilon_0 \varepsilon_{rk} \frac{(N-2)(l_l - t_{kor} \sin(\varphi/2))t_l}{t_{kor} \cos(\varphi/2) - w_l} + \varepsilon_0 \varepsilon_{rk} \frac{(N-1)t_l t_l}{\sqrt{t_{via}^2 + (p/2)^2}} \\ &+ \varepsilon_0 \varepsilon_{rk} \frac{N\pi \left[(w_{pad}/2)^2 - (w_{via}/2)^2 \right]}{T_{ker}}, \end{aligned} \quad (11)$$

gde je $\epsilon_{rk} = 7.8$ relativna permitivnost keramičke podloge, $T_{ker} = 100\mu\text{m}$ debljina keramičke trake. Parazitna kapacitivnost prema podlozi se izračunava pomoću jednačine (12) i postoji između samog induktora i metalnog sloja koji se nanosi sa donje strane komponente

$$C_K = \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{N}{2T_{ker}} w_l l + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{N}{3T_{ker}} w_l l + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{2w_l l_K}{3T_{ker}} + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{N\pi(w_{pad}/2)^2}{2T_{ker}} \quad (12)$$

Ove jednačine odgovaraju fizičkom modelu 3D induktora. Za izračunavanje vrednosti elemenata ekvivalentne π -šeme rednog induktora koriste se sledeće jednačine. Serijska otpornost rednog induktora se izračunava na osnovu jednačine (13),

$$R_s = (N_g + N_d) \frac{\rho_l l_i}{2\delta(w_i + t_i)} + \frac{\rho_l l_k}{2\delta(w_i + t_i)} + \frac{2\rho_l l_p}{2\delta(w_i + t_i)} + \frac{(N_g + N_d)\rho_l t_{via}}{2\pi\delta(w_{via}/2)} + \frac{\rho_l t_i 2(N_g + N_d)}{\pi(w_{pad}/2)^2}, \quad (13)$$

gde je $N_g = 8$, ukupan broj kosih segmenata na gornjem provodnom sloju, $N_d = 8$ ukupan broj kosih segmenata na donjem provodnom sloju, l_p je krajnji segment koji spaja segmente gornjeg provodnog i donjeg provodnog sloja.

Serijska kapacitivnost rednog induktora se dobija na osnovu jednačine (14) i obuhvata kapacitivnost između paralelnih srgmenata, kosih segmenata, kapacitivnost između proširenja na kraju provodne linije (via pedova) i kapacitivnost između delova segmenata gornjeg i donjeg provodnog sloja koji se preklapaju,

$$C_s = \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{((N_g + N_d) - 2)(l_i - t_{kor} \sin(\varphi/2))l_i + \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{((N_g + N_d) - 2)t_i}{\sqrt{t_{via}^2 + t_{kor}^2}}}{t_{kor} \cos(\varphi/2)} + \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{N_g w_l^2}{T_{ker}} + \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{(N_g + N_d)\pi(w_{pad}/2)^2 - (w_{via}/2)^2}{T_{ker}}, \quad (14)$$

gde je t_{kor} rastojanje između dva paralelna segmenta rednog induktora.

Parazitna kapacitivnost prema podlozi rednog induktora se izračunava na osnovu jednačine (15)

$$C_K = \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{N_d w_l l}{2T_{ker}} + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{N_g w_l l}{3T_{ker}} + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{2w_l l_K}{3T_{ker}} + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{w_l l_p}{3T_{ker}} + \frac{1}{2} \epsilon_o \epsilon_{rk} \frac{(N_g + N_d)\pi(w_{pad}/2)^2}{2T_{ker}} \quad (15)$$

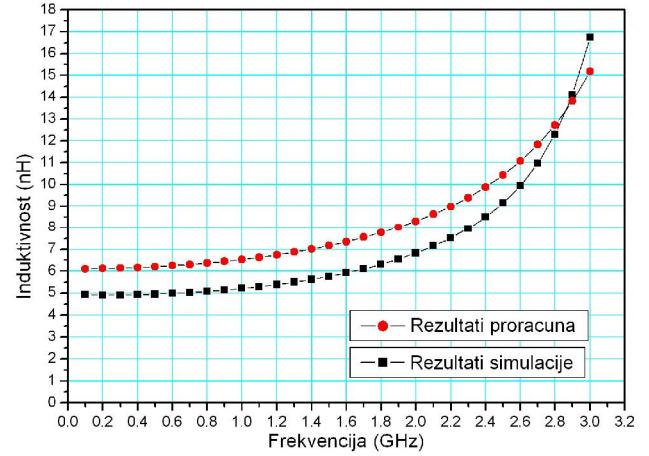
Efektivne vrednosti induktivnosti i Q -faktora 3D i rednog induktora se računaju na osnovu jednačina (16) i (17),

$$L = \frac{\left(L_s - R_s^2 \left(1 + \frac{w^2 L_s^2}{R_s^2} \right) (C_s + C_K) \right) \left(1 + \frac{w^2 L_s^2}{R_s^2} \right)}{\left(\frac{w}{R_s} \right)^2 \left[L_s - R_s^2 \left(1 + \frac{w^2 L_s^2}{R_s^2} \right) (C_s + C_K) \right]^2}, \quad (16)$$

$$Q = \frac{wL_s}{R_s} \left[1 - \frac{R_s^2 (C_s + C_K)}{L_s} - w^2 L_s (C_s + C_K) \right]. \quad (17)$$

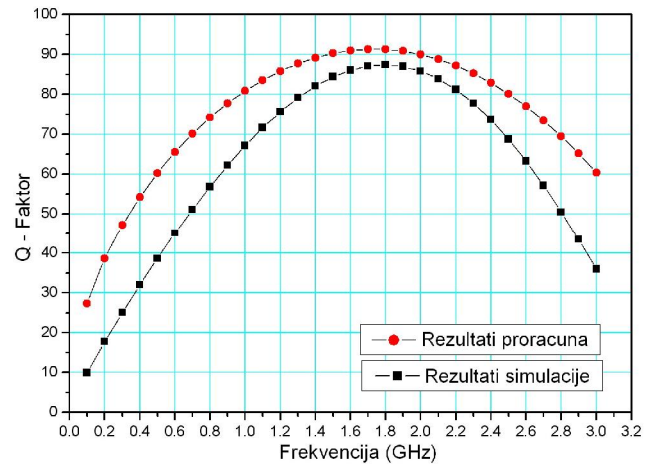
III. POREĐENJE REZULTATA PRORACUNA DOBIJENIH POMOĆU MODELA INDUKTORA SA REZULTATIMA SIMULACIJE

Na slikama 5 i 6 predstavljeni su rezultati efektivne vrednosti induktivnosti i Q -faktora 3D induktora dobijeni na osnovu proračuna parametara fizičkog modela induktora upoređeni sa rezultatima simulacije. Prilikom simulacije korišćen je isti mešing za oba tipa induktora.



Sl. 5. Induktivnost 3D induktora.

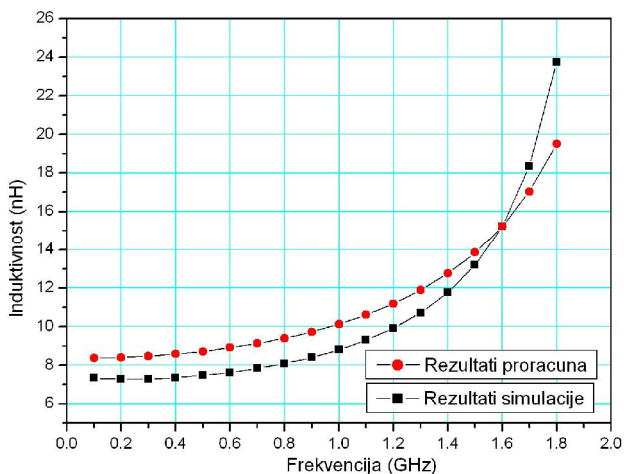
Kao što se može primetiti sa grafika, u slučaju 3D induktora dobijena je neznatno veća vrednost induktivnosti prilikom proračuna u odnosu na simuliranu vrednost. Proračunata vrednost induktivnosti 3D induktora na frekvenciji 1GHz iznosi 6.53nH. Simulirana vrednost induktivnosti 3D induktora na frekvenciji 1GHz iznosi 5.21nH. Sa porastom frekvencije raste i induktivnost.



Sl. 6. Q-faktor 3D induktora.

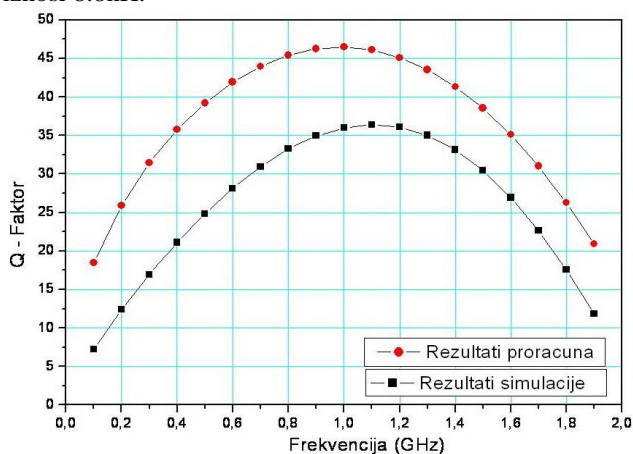
Maksimalna proračunata vrednost Q -faktora 3D induktora dobijena je na frekvenciji 1.7GHz i iznosi 91.33. Maksimalna vrednost Q -faktora 3D induktora dobijena simulacijom je na frekvenciji 1.8GHz i iznosi 87.42. Može se primetiti da postoji jako malo odstupanje. To je zbog toga što se kod proračuna uzimaju u obzir mnogi paraziti efekti.

Na slikama 7 i 8 predstavljeni su rezultati efektivne vrednosti induktivnosti i Q -faktora rednog induktora dobijeni na osnovu proračuna parametara fizičkog modela induktora upoređeni sa rezultatima simulacije.



Sl. 7. Induktivnost rednog induktora.

I u slučaju rednog induktora dobijeno je dobro slaganje proračunate i simulirane vrednosti induktivnosti. Dobijena je neznatno veća proračunata vrednost induktivnosti u odnosu na simuliranu vrednost. Proračunata vrednost induktivnosti na frekvenciji 1GHz iznosi 10.13nH. Simulirana vrednost induktivnosti na frekvenciji 1GHz iznosi 8.8nH.



Sl. 8. Q-faktor rednog induktora.

Maksimalna vrednost Q-faktora dobijena na osnovu proračuna parametara ekvivalentne π -šeme rednog induktora je na frekvenciji 1GHz i iznosi 46.47. Maksimalna vrednost Q-faktora dobijena na osnovu simulacije je na frekvenciji 1.1GHz i iznosi 36.43. Može se primetiti da kod rednog induktora postoji veće odstupanje proračunate i simulirane vrednosti Q-faktora u odnosu na 3D induktor. To je zato što postoji veći broj segmenata pa su samim tim i veće parazitne kapacitivnosti i serijska otpornost.

IV. ZAKLJUČAK

U ovom radu su predstavljene fizički modeli i karakteristike dva tipa induktora. Upoređene su vrednosti proračuna i simulacije za efektivnu vrednost induktivnosti i Q-faktora.

Induktivnost rednog induktora je veća nego induktivnost 3D induktora. Ovu razliku unosi veći broj segmenata rednog induktora, veći broj via kao i veći broj

proširenja na kraju provodne linije (pedovi). Q-faktor rednog induktora je manji od Q-faktora 3D induktora. To je zbog toga što se kod rednog induktora dobijaju veće vrednosti elemenata ekvivalentne π -šeme nego kod 3D induktora.

Dakle, ako je za primenu induktora odlučujući kriterijum vrednost induktivnosti onda je potrebno realizovati ga kao redni, ali ako je odlučujući kriterijum vrednost Q-faktora onda ga treba realizovati kao 3D induktor [9].

ZAHVALNOST

Ovaj rad predstavlja sastavni deo diplomskog-master rada i nastao je pod rukovodstvom prof. dr. Ljiljane Živanov i mr. Gorana Radosavljevića sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. Istraživanja i rezultati predstavljeni u ovom radu su delom finansirani od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije u okviru projekta pod evidencionim brojem 11023.

LITERATURA

- [1] Ch. M. Tai, Ch. N. Liao, "A Physical Model of Solenoid Inductors on Silicon Substrates," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 12, December 2007.
- [2] A. M. Niknejad, R. G. Mayer, "Analysis, design, and optimization of spiral inductors and transformers for Si RF IC's," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol.3, no. 10, pp. 1470-1481, October 1998.
- [3] V. Desnica, Lj. Živanov, O. Aleksić, S. Jenei, "Modeling and optimization of thick film solenoid-bar type inductors and transformers," *COMPEL (Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering)*, vol. 19, no. 2, pp. 615-622, 2000.
- [4] L. J. Golonka, "New application of LTCC technology," *28th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, pp. 148-152, 2005.
- [5] L. J. Golonka, "Technology and application of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 54, no. 2, pp. 221-331, 2006.
- [6] Ansoft Inc. HFSS (High Frequency Structure Simulator). Pittsburg: Ansoft Corporation, 2002.
- [7] <http://www.dupont.com/mcm>
- [8] Đ. Vladislavljević, G. Radosavljević, A. Marić, G. Stojanović, Lj. Živanov, "Fizički model planarnog i 3D induktora projektovanih za LTCC tehnologiju," *ETRA, Subotica, Jun 2008*.
- [9] V. Desnica, "Modelovanje i optimizacija planarnih debeloslojnih induktora solenoidnog tipa," Magistarski rad, Novi Sad, Novembar 1999.

ABSTRACT

The main goal of this paper is to introduce a physical model for two inductors designed for the LTCC technology. In this paper are presented a physical model for 3D and serial inductor solenoid type for RF frequency range. In order to verify the accuracy of the presented model, obtained results are compared with simulation results.

MODELING AND SIMULATION RF MULTILAYER INDUCTORS IN LTCC TECHNOLOGY

Amer Čelić