

UPOREDNA ANALIZA PROMENE IMPEDANSE VIŠESLOJNIH ČIP INDUKTORA I MALIH JEZGARA SA VIŠE OTVORA U EMI OPSEGU

Miloljub D. Luković, Maria V. Nikolić, Aleksandar B. Menićanin, Obrad S. Aleksić, *Institut za multidisciplinarna istraživanja, Kneza Višeslava 1, Beograd 11000, Srbija, lukovicmiloljub@yahoo.com; mariav@rcub.bg.ac.rs; aleksandar.menicinan@imsi.rs; obradal@yahoo.com;*

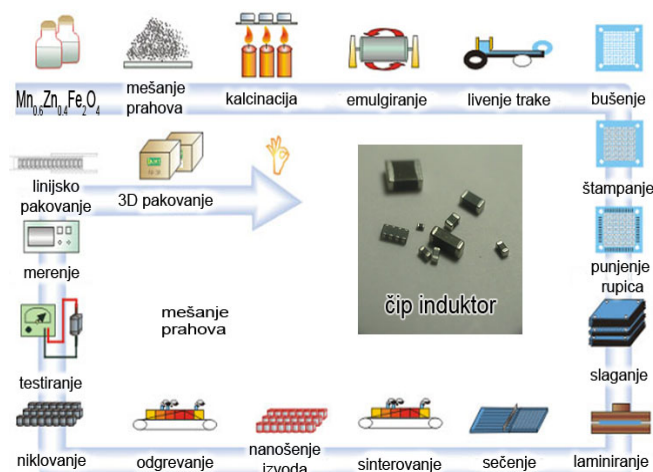
Nelu V. Blaž, Ljiljana D. Živanov, *Fakultet tehničkih nauka, Dositeja Obradovića 6-12, Novi Sad 21000, Srbija; nelu@uns.ac.rs; lilaziv@uns.ac.rs;*

Lazar S. Lukić, *Institut IRITEL, Batajnički put 23, Beograd 11 000, Srbija, lslazar@iritel.com;*

Sadržaj - Dobijanje čip induktora višeslojnom tehnologijom (spajanjem zelenih feritnih listova na kojima su naneti delovi namotaja štampanjem PdAg paste) opisano je u najkraćem. Svojstva MnZn ferita u EMI opsegu data su na osnovu merenja impedanse $Z(\omega)$ i proračuna relativne permeabilnosti μ_r i dielektrične konstante ϵ_r . Merenje impedanse čip induktora različitih dimenzija i konstrukcije vršeno je takođe u EMI opsegu. Paralelno su u istom frekventnom opsegu vršena merenja impedanse na malim jezgrima sa više otvora dobijenim presovanjem i sinterovanjem istog materijala. Za kvalitativno-kuantitativnu analizu kao model usvojeno je paralelno RLC kolo. Dobijeni rezultati upoređeni su međusobno i sa najboljim literaturnim rezultatima.

1. UVOD

Višeslojni feritni čip induktori namenjeni su za filtriranje naznačenih EMI smetnji u savremenim telekomunikacionom uređajima (mobilni telefoni, računari, radiotehnika, namenska elektronika). Posebno su prilagođeni po dimenzijama i lemnim izvodima za tehniku površinske montaže (SMT) na štampanim pločama (PCB). Tehnologija izrade čip induktora razvila se iz tehnologije višeslojnih keramičkih kondenzatora a opisana je sledećim dijagramom toka (slika 1).



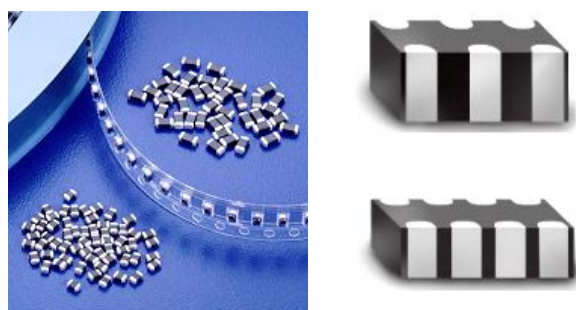
Sl. 1. Dijagram toka proizvodnje višeslojnih čip induktora

Polazni prahovi za dobijanje mangan-cink ferita su oksidi gvožđa Fe_2O_3 , mangana $MnCO_3$ i cinka ZnO koji se pomešaju i odgrevaју na $1050^\circ C$ nekoliko sati (reakcija u čvrstom stanju-

feritizacija), a zatim se briketi dobijenog MnZn-feritnog praha melju do veličine čestice od 1-2 mikrometara ili manje [1-4].

Dobijeni feritni prah se zatim meša sa organskim vezivom pa nastaje emulzija koja se izliva pod pritiskom u obliku trake – zeleni listovi debljine 100-200 mikrometara, koji se potom prosuše i iseку u obliku lista mikrometara papira A4. Na listovima se po grupnom formatu (objedinjeni likovi) buše rupice, štampaju namotaji PdAg provodnom pastom, pune rupice istom pastom radi prelaska iz sloja u sloj, a zatim se listovi ređaju u pakete i u toploj presi na $250^\circ C$ laminiraju (slepe se da formiraju 3D namotaje). Posle toga se laminati iseку u kockice-čipove pa se sinteruju na $1100^\circ C/1h$. Na isećenim površinama nanose se elektrode od PdAg paste pa se posle odgrevanja na $850^\circ C$ elektrohemijski nanosi sloj nikla i kalaja. Posle toga čip-induktori se električno testiraju obeležavaju i pakuju u plastične trake, koje se motaju na koturove (pogodno za mašine za automatsko postavljanje komponenti – tehnologija površinske montaže SMT).

Čip induktori se koriste za EMI filtre i potiskuju impulse naznačene na provodne linije u računarima, mobilnoj telefoniji, radio i TV uređajima, automatici, auto elektronicima i drugim oblastima primene. Proizvode se svuda u svetu (TDK, Murata, Samsung, Ceratech, Philips, Infineon, Steward) (slika 2) [5-8].



Sl. 2. Višeslojni čip induktori (levo) i mreže čip induktora (desno)

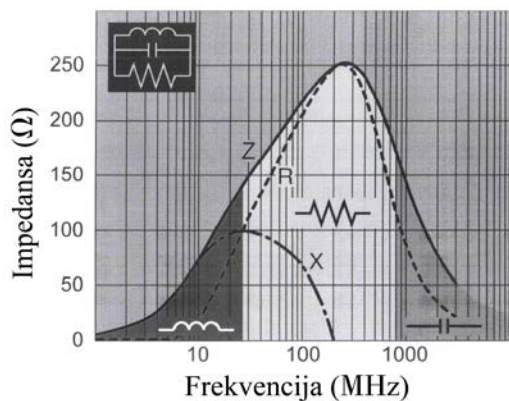
Za veće struje posebno na ulaznim kablovima za napajanje kao EMI filtri koriste se minijaturna feritna jezgra, jezgra sa više otvora kao širokopojasni EMI filtri. Ova jezgra se dobijaju presovanjem praha, izvlačenjem (ekstruzijom) i brizganjem (PIM-tehnologija), a zatim se sinteruju kao i višeslojni feritni induktori (slika 3).



Sl. 3. Mala feritna jezgra kao širokopojasni EMI filtri na konektorima i kablovima za napajanje

2. PRINCIP RADA FERITNIH EMI FILTARA U HF OPSEGU

Princip potiskivanja EMI smetnji zasniva se na povećanju impedanse induktora sa povećanjem frekvencije tj primene MnZn ferita do neke granice reda 100 MHz kada relativna magnetna permeabilnost naglo opadne sa vrednosti od 10^3 na vrednosti ispod 10. Za frekvencije veće od 100 MHz dominantan je skin efekat koji stalno raste sa frekvencijom jer se dubina prodiranja signala u metalni sloj stalno smanjuje sa frekvencijom. Međutim za frekvencije iznad 800 MHz pa do nekoliko GHz dominantni efekat postaje provođenje kapacitivnosti između namotaja što obara vrednost ukupne impedanse na male vrednosti od svega nekoliko oma (kao na slici 4). [9,10,11]



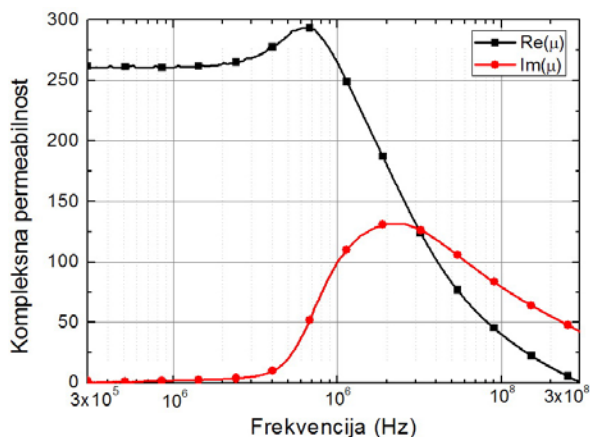
Sl. 4. Modelovanje impedanse feritnih EMI čip filtara pomoću paralelnog RLC kola

Praktično feritni EMI filter se ponaša kao paralelno RLC kolo i za njegovo modelovanje treba odrediti $Z(\omega)$ i svojstva materijala $\mu_r(\omega)$ i $\epsilon_r(\omega)$ dok se vrednosti R_{max} , L_{max} , C_{max} mogu dobiti usaglašavanjem sa eksperimentalnom krivom tj. fitovanjem.

3. EKSPERIMENTALNI DEO

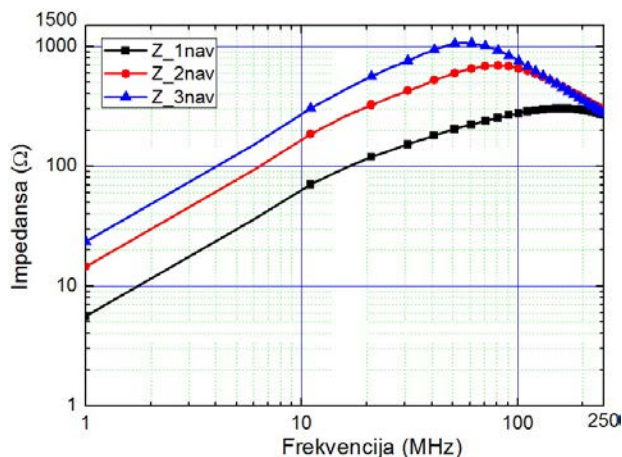
Napred opisanom metodom sintetizovan je mangan cink feritni prah sastava $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ (IHIS-Feriti Beograd), a zatim je posle mlevenja u brzom planetarnom mlinu od 60 minuta dobijen prah srednje veličine čestice 0.2 mikrometara koji je aglomerirao u klastere reda 2 mikrometara. Od tog praha presovan je valjak $R=8$ mm i $h=5$ mm i sinterovan na

1250°C/2h. Merenje kompleksne magnetne i permeabilnosti $\mu'_r(\omega)$ i $\mu''_r(\omega)$ vršeno je pomoću analizatora mreže Agilent E5071B u EMI opsegu. Rezultati merenja i proračuna su dati na slici 5.



Sl. 5. Merenje realnog i imaginarnog dela permeabilnosti $\mu'_r(\omega)$ i $\mu''_r(\omega)$ u EMI opsegu za feritni valjak od $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ sinterovan na 1250 °C/2h.

Od istog feritnog praha ispresovana su i sinterovana jezgra sa 6 otvora dimenzije $R=6.5$ mm i $h=5.8$ mm kao na slici 3. Promena impedanse jezgra sa više otvora u EMI opsegu u funkciji od broja navojaka data je na slici 6. Ta promena na frekvenciji od 50 MHz iznosila je 800 Ω.

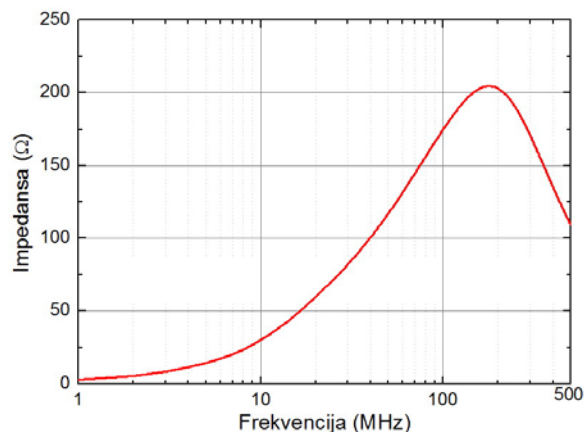


Sl. 6. Promena impedanse $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ feritnog jezgra sa 6 otvora sinterovanog na 1250 °C/2h u EMI opsegu: sa 1 navojkom, 2 navojka i 3 navojka od tanke bakarne žice izolovane teflonom.

Višeslojni feritni čip induktori proizvedeni su takođe od MnZn-feritnog praha istog sastava tehnologijom koja je opisana na početku rada. Frekventne karakteristike merene su u EMI opsegu analizatorom impedanse HP 4191A za čip induktor dimenzije 3 mm x 2mm sa tri trakasta štampana navojka LI1206H151R-00 (Steward) (slika 7).

Dielektrična permitivnost materijala ϵ_r merena je na diskovima $R=9,1$, $h=1$ mm koristeći fikturu kao za pločast

kondenzator i RLC-metre HP4276A i HP 4262A i isnosi $\epsilon_r = 1350$ na 10 KHz a na 1 MHz iznosi $\epsilon_r = 29$.



Sl. 7. Promena impedanse u EMI opsegu za čip induktor LI1206H151R-00 dobijen višeslojnom tehnologijom od zelenih listova $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ ferita.

3. DISKUSIJA

Danas se za feritna jezgra u EMI opsegu najviše koristi $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ prah dobijen reakcijom u čvrstom stanju. Nanokristalni feritni prahovi se dobijaju iz pogodnih čvrstih rastvora ili modifikovanom mehanohemijskom metodom i još uvek se ne koriste u proizvodnji induktivnih komponenti [12-16]. Za potrebe eksperimenta novo dobijeni feritni prah (IHIS-feriti) je dodatno usitnjen do submikronske veličine.

Efikasnost filtera u EMI opsegu zavisi od: konstrukcije induktora, broja namotaja, sastava i strukture feritnog materijala za jezgro. Prema merenjima prikazanim na slici 5 do 1 MHz relativna magnetna permeabilnost $\mu'_r(\omega)$ dostiže 250 i konstantna je, dok su gubici $\mu''_r(\omega)$ minimalni. Iznad te frekvencije $\mu'_r(\omega)$ nešto malo poraste, ali gubici $\mu''_r(\omega)$ porastu znatno više da bi iznad 10 MHz $\mu'_r(\omega)$ opadalo naglo a iznad 20 MHz i $\mu''_r(\omega)$ opadao prema nuli (oko 300MHz), kao posledica kapacitivnog efekta shodno modelu prikazanom na slici 4.

Merenje $\mu'_r(\omega)$ i $\mu''_r(\omega)$ vršeno je pomoću adaptera koji poput jednog namotaja zatvara strujno polje oko celog uzorka, dok su merenja impedanse u EMI opsegu na jezgrima rađena sa 1, 2, 3 namotaja tankom žicom što povećava skin efekat (srednji deo krive na slici 4). Osim toga ni uzorci nisu bili istih dimenzija niti je raspored namotaja bio ekvivalentan. Zbog toga su rezultati merenja na slikama 6 i 7 za jezgro sa više otvora i višeslojni čip induktori po maksimumu impedanse pomereni za celu frekventnu dekadu ulevo. Razlika u postignutim maksimalnim impedansama za jezgro sa više otvora i višeslojni čip induktor nije velika, a poklapa se i frekventni opseg gde impedansa dostiže maksimum. Iako je čip induktor manji po dimenzijama do dva puta on dostiže približno istu vrednost impedanse u istom frekventnom opsegu.

To se može protumačiti efektom debeloslojnog provodnika štampanog od PdAg paste koji ima veći skin efekat i manju

provodnost od bakarnih namotaja, jer u sebi sadrži vezivno staklo i dosta Pd koji je znatno slabiji provodnik od Ag.

Za temperaturu sinterovanja čip induktora reda 1100°C potrebno je da udeo Pd u PdAg bude i do 30 %.

Veličina $\mu''_r(\omega)$ predstavlja gubitke i raste posle 1 MHz naglo što govori upravo da X zavisi na još višim učestanostima i od ωC – kapacitivne reaktanse.

Iz merenog podatka da ϵ_r sa 1350 na 10 kHz opada na 29 na 1 MHz može se pretpostaviti da je dielektrična permitivnost stalno opadajuća i da na 300 MHz ona iznosi 10-12 što je granična vrednost za ferite u tom opsegu.

4. ZAKLJUČAK

EMI filteri sa malim jezgrima od MnZn ferita dostižu impedansu vrednosti 500-1000Ω na učestanostima 10-100 MHz, imaju malu jednosmernu otpornost pa propuštaju jednosmerne struje do 1A i više [17,18]. Potiskivanje smetnji u radnog opsegu iznosi 10-20 dB u radnom opsegu sa 1-3 namotaja. U kombinaciji čip induktora sa čip keramičkim kondenzatorima dubina potiskivanja smetnji se povećava i dostiže 40 dB u radnom opsegu. Izabrani feritni prah $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ sa submikronskim česticama od koga su proizvedena mala jezgra za EMI filtre dao je rezultate koji zadovoljavaju traženi nivo potiskivanja u EMI opsegu. Mala jezgra sa više otvora dobijena od dodatno mlevenog ferita istog sastava sa tri namotaja prelaze vrednost impedanse od 1000 Ω, dok sa 2 namotaja imaju slične karakteristike kao višeslojni čip induktori. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se predvideti istraživanja u dva pravca: 1. dobijanje nanometričkog praha, dodavanje malog procenta vezivnog stakla, snižavanje temperature sinterovanja, kontrola mikrostrukture i 2. modelovanje EMI feritnih filtera 3D simulatorom (Microwave Office - MWO) - semiempirijskim pristupom gde bi karakteristike materijala bile unete kao funkcije od frekvencije a ne kao konstante. U tom cilju ovo istraživanje je započeto kao multidisciplinarno u oba predložena smera i uz međunarodnu saradnju.

LITERATURA

- [1] T. Verdier, V. Nivoix, M. Jean, B. Hanoyer, "Characterization of nanocrystalline Mn-Zn ferrites obtained by mechanochemical synthesis", *J. Mater. Sci.*, vol.39, pp. 5151-5154, 2004
- [2] T. Sun, A. Borrasso, B. Liu, V. Dravid, "Synthesis and characterization of nanocrystalline zinc manganese ferrite", *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 94 (5), pp.1490-1495, 2011.
- [3] A. Angermann, J. Toepfer, "Synthesis of nanocrystalline Mn-Zn powders through thermolysis of mixed oxalates", *Ceram. Int.*, vol. 37 (3), pp. 995-1002, 2010.
- [4] J. Moulin, Y. Champion, J.M. Greneche, F. Mazaleyrat, "Magnetic properties of Mn-Zn ferrite with ultra fine grain structure", *J. Magn. Magn. Mater.*, vol.254-255, pp. 538-540, 2003.

- [5] TDK-EPC Corporation, "Multilayer Chip Inductors for High-frequency Circuits and Modules", *MLG series 0603*, (Catalogue) EO3 ED2, pp. 3-21, 2010.
- [6] MuRata, Centenary Materials, Multilayer Chip Inductors, *ILQG15HS3N3S02D* (Catalogue), pp. 1-15, 2005.
- [7] Ceratech Co., *CTC Products, Passive components EMI/EMC: Chip ferrite inductor*", pp. 1-9, 2006.
- [8] Samsung Electromechanics Co. Ltd., *Products, Chip inductors*, pp. 1-3, 2011.
- [9] Steward Co., "The Use of ferrites in EMI suppression", *Catalogue*, pp. 110-18, 2000. (www.steward.com).
- [10] H. Li, Z. Li, B. Zhang, W. K. S. Tang, W.A. Halang, "Suppressing electromagnetic interference in direct current converters", *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 9 (4), pp. 10-28, 2009.
- [11] University of York, "Link PCP - EMC Aspects of Mobile Telecommunications Systems", *Appendix G - Coupling Of EMI To Cables: Theory And Models* (Final Report), pp. 1-44, 2011.
- [12] L. Nalbandian, A. Delimitis, V.T. Zaspalis, E.A. Deliyanni, D.N. Bakoyannakis, E.N. Peleka, "Hydrothermally prepared nanocrystalline Mn-Zn ferrites: Synthesis and characterization", *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 114, pp. 465-473, September 2008.
- [13] L. Yong-Sheng, Z. Yun-Bo, Z. Jin-Cang, G. Min-An, Y. Zheng-Long, R. Zhong-Ming, "Crystalline and Magnetic Enhancement of Nanocrystalline MnZn Ferrites Fabricated under a High Magnetic Field", *Chinese Physics Letters*, vol. 26, pp. 1-3, 2009.
- [14] D. Arcos, R. Valenzuela, M. Vazquez, M. Vallet-Regi, "Chemical Homogeneity of Nanocrystalline Zn-Mn Spinel Ferrites Obtained by High-Energy Ball Milling", *J. Solid State Chem.*, vol. 141, pp. 10-16, 1998.
- [15] K.G. Kanade, D.P. Amalnerkar, H.S. Potdar, B.B. Kalebe, "Nanocrystalline Mn-Zn-ferrite by novel oxalato-hydrazinated complex method", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 117, pp. 187-191, 2009.
- [16] K. Praveena, K. Sadhana, S.Bharadwaj, S.R. Murthy, "Development of nanocrystalline Mn-Zn ferrites for forward type DC-DC converter for switching mode power supplies", *Materials Research Innovations*, vol. 14, pp. 56-61, February 2010.
- [17] F. Z. Peng, H. Li, G. J. Su, J. S. Lawler, "A new ZVS bidirectional dc-dc converter for fuel cell and battery application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, pp. 54-65, 2004.
- [18] H. Li, Z. Li, W. A. Halang, B. Zhang, and G. Chen, "Analyzing chaotic spectra of dc-dc converters using the prony method," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 54, pp. 61-65, 2007.

Abstract: Production of chip inductors by a multilayer technique (co-firing of green ferrite sheets with turns printed on the sheet surface by PdAg paste) is described in brief. Properties of MnZn ferrite in the EMI range (1MHz-1GHz) were determined by measuring of the impedance $Z(\omega)$ and calculating relative magnetic permeability μ_r and dielectric constant ϵ_r . Measuring of the impedance of chip inductors of different constructions is done in the same range. Measuring of impedances in the EMI range was also done on powder pressed and sintered in small ferrite multi-aperture cores. Measured data was analyzed using the parallel RLC circuit as a model. Finally the results obtained were compared mutually and with the best literature data.

PARALLEL ANALYSIS OF IMPEDANCE CHANGE OF FERRITE MULTILAYER CHIP INDUCTORS AND SMALL MULTI-APERTURE CORES IN THE EMI RANGE

Miloljub D. Luković, Nelu V. Blaž, Maria V. Nikolić, Aleksandar B. Menićanin, Lazar S. Lukić, Ljiljana D. Živanov, Obrad S. Aleksić