



# UTICAJ GEOMETRIJE PROVODNIH SLOJEVA NA IMPEDANSU FERITNIH EMI POTISKIVAČA

Mirjana Damjanović, Ljiljana Živanov, Goran Stojanović, Vladan Desnica  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija i Crna Gora

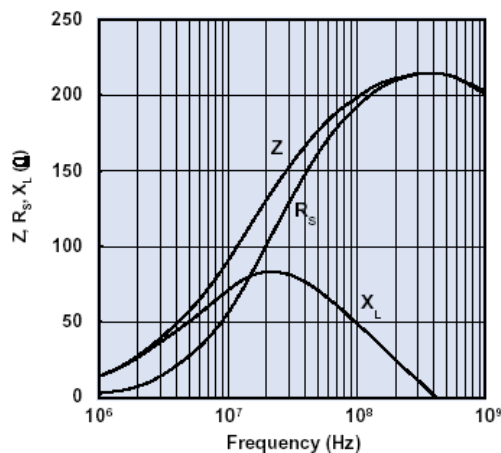
**Sadržaj:** U ovom radu biće prikazani rezultati simulacije impedanse za dve predložene strukture induktora. Induktori su u dva provodna sloja, koja se nalaze u feritnom materijalu. Poređenjem ovih induktora sa induktorima u jednom provodnom sloju, pokazano je da će impedansa predloženih struktura biti gotovo udvostručena.

**Ključne reči:** EMI potiskivanje, feritni EMI potiskivači, impedansa

## 1. UVOD

Minijaturni induktori koji su napravljeni od provodnog materijala u ferimagnetiku nalaze široku primenu u EMI potiskivačima na RF i mikrotalasnim učestanostima. Feritni potiskivači se veoma uspešno koriste za slabljenje EMI u računarima i sličnim proizvodima, za slabljenje smetnji nastalih pri uključivanju napajanja, u autonomnim i bežičnim uređajima itd.

Tokom proteklih decenija feritne komponente su bile veoma uspešno korišćene za smanjivanje ili potpunu eliminaciju EMI na štampanim pločama u žicama i kablovima. Provodne EMI mogu da se pojave u veoma širokom opsegu frekvencija, od najnižih reda MHz do nekoliko GHz. Kao što se može videti na slici 1, feritno jezgro ne utiče na signale na niskim radnim učestanostima, dok blokira provodne EMI na visokim učestanostima [1].



Sl. 1. Impedansa, reaktansa i otpornost u zavisnosti od učestanosti, za feritno jezgro materijala 43 [1]

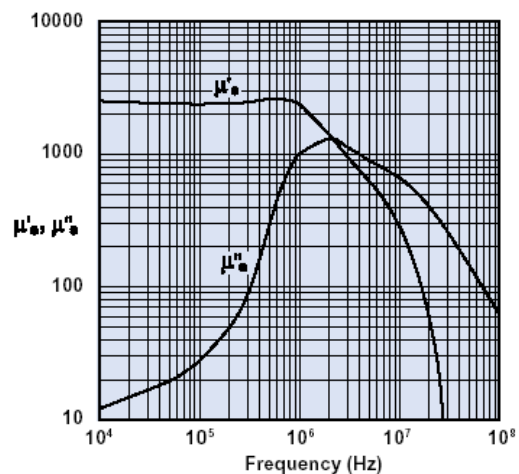
Induktor koji se koristi za potiskivanje šuma obično je napravljen od provodnog materijala kružnog ili pravougaonog poprečnog preseka, koji je na feritnom ili u feritnom materijalu. Feritno jezgro uvodi u kolo frekventno zavisnu impedansu (slika 1). Induktivnost takve komponente zavisi od geometrije provodnih linija i od permeabilnosti feritnog materijala  $\mu_r$  [2].

## 2. FERITI

Permeabilnost feritnog materijala  $\mu_r$  je kompleksan parametar sastavljen od realnog i imaginarnog dela,

$$\mu_r = \mu_r' - j \cdot \mu_r'' \quad (1)$$

Realna komponenta permeabilnosti  $\mu_r'$  reprezentuje reaktivni deo impedanse, dok imaginarni deo  $\mu_r''$  predstavlja gubitke. Oba dela permeabilnosti su frekventno zavisna, kao što se vidi na slici 2, na kojoj je prikazana njihova promena za odabrani materijal 73 [1].



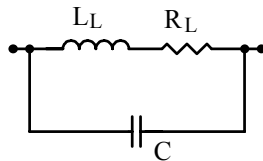
Sl.2. Zavisnost kompleksne permeabilnosti od frekvencije merena za materijal 73 [1]

Na nižim učestanostima bitno je da feritno jezgro ima visoku vrednost permeabilnosti  $\mu_r$ , koja obezbeđuje visoku induktivnost komponente i za manji broj zavojaka induktora. Iznad nekoliko desetina MHz vrednost  $\mu_r$  opada, u feritu počinju da se javljaju gubici i materijal se ponaša kao frekventno zavisni otpornik, što je veoma značajno u eliminaciji provodnih EMI [3].

Korišćenjem feritnog materijala u induktoru se, osim uvođenja željenih gubitaka, javljaju se i neželjeni efekti kao što su parazitarne kapacitivnosti između navojaka, kao i između navojaka i mase, zatim, sopstvena rezonancija, dielektrični i magnetski gubici u feritnom jezgru itd. o kojima treba voditi računa pri dizajniranju induktora [4].

### 3. MODEL INDUKTORA

Kod idealnog induktora se povećanjem frekvencije i impedansa linearno povećava. U stvarnosti, međutim, postoji ekvivalentna redna otpornost sa induktivnošću, kao i parazitarne kapacitivnosti [2]. Ekvivalentno kolo modela induktora prikazano je na slici 3.



Sl. 3. Model ekvivalentnog kola induktora [2]

Redna otpornost  $R_L$  nastaje usled gubitaka u provodniku (kombinovani uticaj skin efekta i efekta blizine) i gubitaka usled uticaja feritnog jezgra. Svakako, dominantan uticaj na visokim učestanostima imaju gubici usled prisustva ferita

$$R_L = \omega \mu_r'' L_0, \quad (2)$$

gde je  $L_0$  induktivnost strukture bez prisustva feritnog materijala (tj. u vakuumu) [5,6].

Ekvivalentna redna induktivnost induktora  $L_L$  je, takođe, direktno zavisna od induktivnosti  $L_0$

$$L_L = \mu_r' L_0. \quad (3)$$

Parazitarne kapacitivnosti u kalemu induktora  $C$  se može opisati kao koncentrisan kondenzator koji je u paralelnoj vezi sa induktorom.

Korišćenjem modela induktora prikazanog na slici 3, ukupna impedansa  $Z$  se može izraziti kao

$$Z(j\omega) = \frac{R_L + j \cdot (\omega L_L (1 - \omega^2 L_L C) - \omega R_L^2 C)}{(1 - \omega^2 L_L C)^2 + \omega^2 R_L^2 C^2}. \quad (4)$$

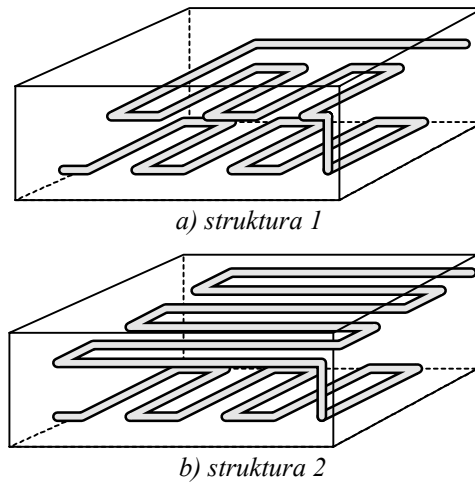
Pošto je parazitarne kapacitivnosti  $C$  koja opisuje rasipne kapacitivnosti između provodnih segmenata induktora, konstantna u celom opsegu radnih učestanosti i može se zanemariti, izraz (4) se svodi na

$$Z = R_L + j\omega L_L = j\omega L_0 \cdot (\mu_r' - j\mu_r''). \quad (5)$$

Dakle, ukupna impedansa induktora  $Z$  može biti povećana ili povećanjem  $L_0$  (tj. odgovarajućim izborom geometrije provodnih linija induktora), ili pogodnim izborom feritnog materijala. Zbog toga je izvršena analiza uticaja promene dužine provodnih linija na impedansu induktora.

### 4. PREDLOŽENE STRUKTURE INDUKTORA

Konstrukcija dve predložene strukture induktora prikazana je na slici 4. Dimenzije induktora za koji su vršene simulacije su 1210 (širina čipa je  $W_{CH}=2.54$  mm, dužina  $L_{CH}=3.2$  mm, a debljina  $T_{CH}=1.1$  mm). Provodne linije su izrađene od platine, u tri različite širine  $w$  100  $\mu$ m i 150  $\mu$ m, debljine  $t=10$   $\mu$ m.



Sl. 4. Predložene dvoslojne strukture induktora: a) struktura 1 i b) struktura 2

Struktura 1 se sastoji od dva kalema tipa meandar, koja se nalaze na rastojanju od 18  $\mu$ m. Rastojanje između dva susedna provodnika kalema je jednako širini provodnih linija. Da bi parazitarne kapacitivnosti induktora bila što manja, kalemovi se ne nalaze tačno jedan iznad drugog, već su međusobno pomereni za  $w$ , kako bi međusobno preklapanje provodnih linija bilo minimalno. Da bi se obezbedila što veća induktivnost strukture, na osnovu prethodno izvršenih analiza [7] zaključeno je da broj zavojaka kaleмова mora da bude maksimalan (vodeći računa o dimenzijama čipa). Broj zavojaka kaleмова strukture 1 je  $N = 30$  i 18, za širine provodnih linija od 100  $\mu$ m i 150  $\mu$ m, respektivno.

Struktura 2 se sastoji od dva kalema tipa meandar, kod kojih je gornji meandar rotiran u odnosu na donji za 90°, da bi se time se još više smanjila rasipna kapacitivnost.

Tabela 1. Karakteristike strukture 2

	Širina $w$	Broj zavojaka $N$
Donji meandar	100 $\mu$ m	30
Gornji meandar	150 $\mu$ m	19
	100 $\mu$ m	19
	150 $\mu$ m	11

Na osnovu prethodno analiziranih struktura izrađenih u jednom sloju [7], procenjujemo da će impedansa predloženih struktura biti gotovo udvostručena.

### 5. SIMULACIJA IMPEDANSE INDUKTORA

Proračun impedanse predloženih induktora je izuzetno složen zbog malog rastojanja između provodnih linija kaleмова. Impedansa takve složene strukture je određena tako što je izvršena podela strukture na prave segmente pravougaonih poprečnih preseka. Kao što se vidi iz izraza (5), potrebno je odrediti induktivnost strukture u vakuumu  $L_0$  da bi se mogla izračunati ukupna impedansa induktora. Samoinduktivnost i međusobna induktivnost su određivane korišćenjem Groverove metode parcijalne induktivnosti [8].

Posmatrajmo prav provodnik dužine  $l$  pravougaonog poprečnog preseka, širine  $w$  i debljine  $t$ . Njegova samoinduktivnost se može izračunati kao

$$L_i = 2 \cdot l \cdot \left( \ln \frac{2l}{w+t} + 0.25049 + \frac{w+t}{3l} + \frac{\mu}{4} T \right) [\text{nH}], \quad (6)$$

gde je  $\mu$  permeabilnost provodnika,  $T$  parametar za korekciju frekvencije, a dimenzije  $l$ ,  $w$  i  $t$  su date u cm [9].

Međusobna induktivnost dva paralelna prava provodnika pravougaonog poprečnog preseka može biti izračunata kao

$$L_{ij} = 2l \left[ \ln \left( \frac{l}{GMD} + \sqrt{1 + \left( \frac{l}{GMD} \right)^2} \right) - \sqrt{1 + \left( \frac{GMD}{l} \right)^2} + \frac{GMD}{l} \right], \quad (7)$$

gde je  $l$  dužina provodnika (u cm), a  $GMD$  je srednje geometrijsko rastojanje [8]

$$\ln GMD = \ln d - \left( \frac{1}{12} \left( \frac{d}{w} \right)^2 + \frac{1}{60} \left( \frac{d}{w} \right)^4 + \frac{1}{168} \left( \frac{d}{w} \right)^6 + \frac{1}{360} \left( \frac{d}{w} \right)^8 \dots \right) \quad (8)$$

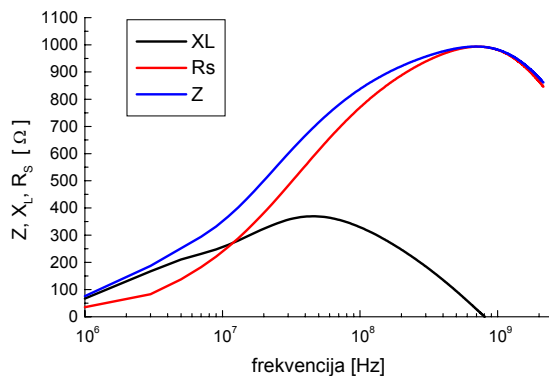
Ako pretpostavimo da je induktor podeljen na  $n$  elementarnih pravih provodnika, onda se ukupna induktivnost strukture se izračunava kao zbir parcijalnih samoinduktivnosti  $L_i$  i parcijalnih međusobnih induktivnosti elementarnih provodnika  $L_{ij}$

$$L = \sum_{i=1}^n L_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{ij}, \quad \text{gde je } i \neq j. \quad (9)$$

Da bi se analizirale dve predložene strukture induktora napravljen je program u *fortranu*.

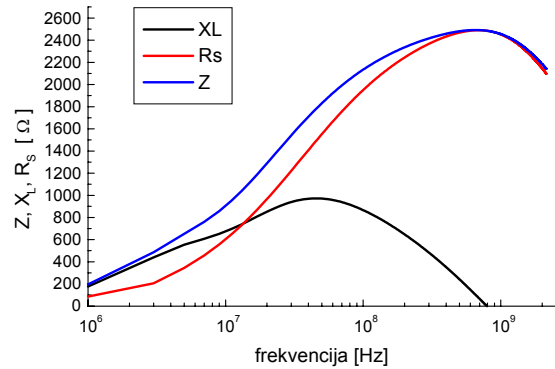
## 6. REZULTATI SIMULACIJA

Na slici 5, 6, 7 i 8 su prikazani rezultati simulacija impedanse  $Z$ , otpornosti  $R$  i reaktanse  $X_L$  predloženih struktura induktora. Kao što se vidi sa slike 5, na nižim frekvencijama ukupna impedansa  $Z$  ima malu vrednost koja na višim frekvencijama naglo raste i približno je jednaka reaktansi  $X_L$ . Maksimalna impedansa je približno 1 k $\Omega$  na frekvencijama oko 1 GHz.



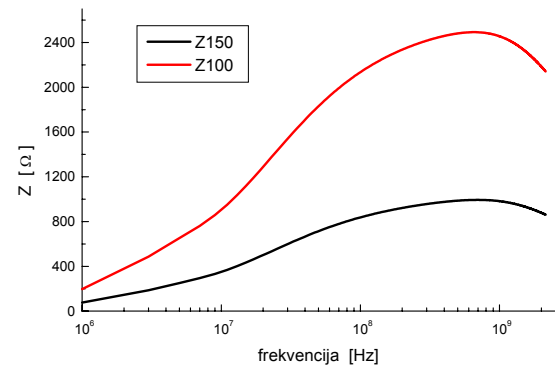
Sl. 5. Impedansa, reaktansa i otpornost strukture 1 u zavisnosti od učestanosti, za  $w=150\mu\text{m}$

Smanjivanjem širine provodnih linija  $w$  povećava se induktivnost strukture  $L_0$ , usled čega se povećava i ukupna impedansa induktora (izraz (5)), kao što se može videti na slici 6. Za  $w=100\mu\text{m}$  maksimalna vrednost impedanse induktora strukture 1 je oko 2.5 k $\Omega$ , dok je za  $w=100\mu\text{m}$  oko 1 k $\Omega$ . Pri tome oblici zavisnosti otpornosti, reaktanse i ukupne impedanse za sve tri različite širine provodnika ostaje isti.



Sl. 6. Impedansa, reaktansa i otpornost strukture 1 u zavisnosti od učestanosti, za  $w=100\mu\text{m}$

Isti zaključci se mogu izvesti i za strukturu 2; smanjivanjem širine provodne linije  $w$  značajno se povećava impedansa induktora. Poređenje ukupne impedanse za strukturu 2, za različite širine provodnih linija je dato na slici 7.



Sl. 7. Poređenje impedanse strukture 2 za dve različite širine provodnika  $w=100\mu\text{m}$  i  $150\mu\text{m}$

U tabeli 2 predstavljeni su rezultati dobijeni simulacijama za jednoslojni induktor, kao i za induktore struktura 1 i 2, za maksimalnu impedansu induktora  $Z_{max}$ , otpornost u dc režimu  $R_{DC}$  i parazitnu kapacitivnost  $C$ . Kao što se može videti iz tabele 2, javlja se značajan porast impedanse kod predloženih struktura 1 i 2 u odnosu na jednostojni induktor. Povećava se i otpornost u dc režimu, što je direktna posledica veće dužine provodnih linija kod struktura 1 i 2 u odnosu na jednostojni induktor. U svim slučajevima parazitna kapacitivnost  $C$  je mala i može se zanemariti.

Tabela 2. Poređenje  $Z_{max}$ ,  $R_{DC}$  i  $C$  za jednoslojni induktor i induktore struktura 1 i 2

Induktor	$w$ [ $\mu\text{m}$ ]	$Z_{max}$ [ $\Omega$ ]	$R_{DC}$ [ $\Omega$ ]	$C$ [ $10^{-15}\text{F}$ ]
Jednoslojni	100	530.2	3.90	19.70
	150	439.1	1.56	29.49
Struktura 1	100	2491.7	7.17	36.01
	150	993.1	2.71	51.44
Struktura 2	100	2586.4	6.94	34.07
	150	937.4	2.94	53.80

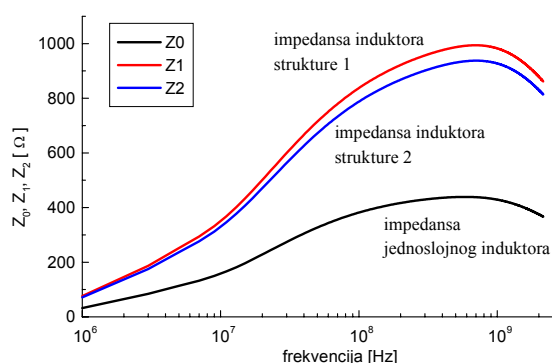
## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršeno je poređenje karakteristika jednoslojnog induktora tipa meandar i predloženih dvoslojnih struktura induktora, za dve različite širine provodnih linija  $w = 100 \mu\text{m}$  i  $150 \mu\text{m}$ .

Na ukupnu impedansu induktora utiče permeabilnost feritnog materijala i geometrija provodnih linija induktora. Dakle, ukupna impedansa induktora  $Z$  može biti povećana:

- povećanjem  $L_0$  (tj. odgovarajućim izborom geometrije provodnih linija induktora), ili
- pogodnim izborom feritnog materijala.

Zbog toga je izvršena analiza uticaja promene dužine provodnih linija na impedansu induktora.



Sl. 8. Poređenje impedanse jednoslojnog induktora i induktora strukture 1 i 2, za  $w=150\mu\text{m}$

Predložene su dve dvoslojne strukture induktora, kod kojih je povećanjem ukupne dužine provodnih linija značajno povećana impedansa induktora, tj. poboljšava se EMI potiskivanje. Poređenje karakteristika jednoslojnog induktora i induktora strukture 1 i 2 je dato na slici 8, za  $w=150 \mu\text{m}$ . Ukupna impedansa je time povećana za više od 2 puta.

Podaci dobijeni pri ovoj simulaciji će korisno poslužiti pri konstrukciji feritnog EMI potiskivača.

## 8. LITERATURA

- [1] Technical Information from [www.fair-rite.com](http://www.fair-rite.com), Fair-Rite Products Corp.

- [2] Q. Yu, T. W. Holmes, "RF circuit modeling of ferrite-core inductors and characterization of core materials", IEEE Trans. on EMC, vol. 44, No. 1, pp. 258-263, February 2002.
- [3] M. Mardiguian, "EMI troubleshooting techniques", McGraw Hill, New York, 2000.
- [4] K. Naishadham, "A rigorous experimental characterization of ferrite inductors for RF noise suppression", IEEE Trans. on Mag., pp. 271-273, 1999.
- [5] U. Reggiani, G. Grandi, G. Sancineto, M. K. Kazimierczuk, A. Massarini, "High-frequency behavior of laminated iron-core inductors for filtering applications", IEEE Trans. on Mag., pp. 654-660, 2000.
- [6] M. Bartoli, A. Reatti, M. K. Kazimierczuk, "High frequency models of ferrite core inductors", IEEE Trans. on Mag., pp. 1670-1675, 1994.
- [7] M. Damjanović, L. Nađ, Lj. Živanov, "Displacement Inductive Sensor in the Plane with Correction of Disagreement", 11<sup>th</sup> Int. Symp. on POWER ELECTRONICS, 2001, pp. 421-425, Novi Sad
- [8] F.W. Grover, "Inductance calculations", D. Van Nostrand Company, New York, 1946.
- [9] H.M. Greenhouse: "Design of Planar Rectangular Microelectronic Inductors", IEEE Trans. on parts, hyb., and pack., Vol. PHP10, June 1974, pp. 101-109.

## ZAHVALNOST

Realizacija ovog rada je finansijski pomognuta od strane Ministarstva za nauku, tehnologiju i razvoj, Vlade Republike Srbije, u okviru projekta ETR.6.04.32023.B

## INFLUENCE OF GEOMETRY OF CONDUCTIVE LAYERS ON IMPEDANCE OF FERRITE EMI SUPPRESSOR

**Abstract:** In this paper it will be presented results of simulation of impedance for two proposed structures of inductors. These inductors have two conductive layers in ferrite material. Comparison of proposed inductors and one-layer inductors has shown that the impedance of proposed inductors will be more than twice greater.

**Key Words:** EMI suppression, ferrite EMI suppressors, impedance