

Karakterizacija feritnih EMI potiskivača i transformatora korišćenjem vektorskog analizatora mreža

LJILJANA ŽIVANOV^a, MIRJANA DAMNJANOVIC^a, ALEKSANDAR MENIĆANIN^b, GORAN STOJANOVIC^a, ANDREA MARIC^a, GORAN RADOSAVLJEVIĆ^a, ^aFakultet tehničkih nauka, Novi Sad, ^bInstitut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd *Originalni naučni rad*

Rezime – U ovom radu su prikazane metode za karakterizaciju feritnih EMI potiskivača i transformatora bazirane na merenju S-parametara, korišćenjem vektorskog analizatora mreža i specijalno razvijenih PCB prilagodnih stepena. Feritni EMI potiskivači i transformatori su realizovani sa komercijalno dostupnim feritnim komponentama. Pokazano je da je predloženi pristup efikasan u predviđanju i analiziranju performansi feritnih EMI potiskivača i transformatora, posebno u visokofrekventnom opsegu.

Ključne reči: elektromagnetska interferencija, feritne EMI potiskivači, feritni transformatori, vektorski analizator mreža, frekventna analiza

1. UVOD

Usled postojanja elektromagnetske interferencije (Electromagnetic Interference EMI) dolazi do značajne degradacije u performansama elektronskih sistema. Porastom broja elektronskih uređaja koji se koriste na malom rastojanju, tako da mogu uticati jedni na druge, verovatnoća da će se pojaviti EMI postaje veća.

Većina smetnji koje emituje elektronska oprema je na frekvencijama višim od korisnih signala. Stoga se kao EMI potiskivači generalno koriste nisko-propusni filtri, koji propuštaju samo signale na frekvencijama nižim od kritične, dok slabe signale na višim frekvencijama [1].

EMI potiskivači imaju široku primenu u potiskivanju smetnji u velikom broju savremenih električnih proizvoda, na primer, u telekomunikacijama (mobilni telefoni, ADSL, modemi, ISDN, GPS satelitski prijemnici...), u potrošačkoj elektronici (digitalne kamere, HDTV, projektori, DVD plejeri...) u računarima i periferijskoj opremi (matične ploče, CD-čitači, DVD-čitači, skeneri, hard diskovi, grafičke i zvučne kartice, LCD monitori, štampači ...), na mrežama (LAN kartice, hub, prekidači, ruteri), itd. [2].

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. Feritno jezgro ne utiče na signale na niskim radnim frekvencijama, dok blokira provodne EMI na visokim frekvencijama [3]. Feritne komponente predviđene za površinsku montažu (Surface Mount Devices SMD) izrađuju se u standardnim EIA (Electronic Industries Association) veličinama: 0402, 0603, 0805, 1206, 1210 i 1812 [2].

Feritne induktivne strukture imaju široku primenu u oblasti energetske elektronike. One su

ugrađene u mnogim savremenim uređajima, kao što su DC-DC konvertori [4]. Njihova karakterizacija je veoma važna, jer oni moraju da zadovolje standarde o elektromagnetskoj kompatibilnosti (tj. EMC standarde) [5]. Feritni transformatori se najčešće karakterišu kao pojedinačne komponente pomoću analizatora impedanse [6], [7]. Podaci prikazani u katalogima su obično dobijeni ovakvim načinom merenja.

U praktičnim primenama transformatori su postavljeni na štampanim pločama (printed circuit boards PCB). Usled interakcije transformatora sa štampanim pločama javlja se razlika u merenjima izvršenim različitom opremom i korišćenjem različitih lejauta. Zbog toga transformatori trebaju da budu karakterisani putem nezavisnih mrežnih parametara, kao što su parametri rasejanja (scattering parameters), tzv. S-parametri. U visokofrekventnom opsegu oni mogu da se lako i tačno izmere i uporede sa drugim parametrima. Strogo govoreći, induktori i transformatori su nelinearne komponente. Međutim, oni su aproksimativno linearni u režimu malih signala [8].

Cilj ovog rada je uvođenje metoda za karakterizaciju feritnih EMI potiskivača i feritnih transformatora korišćenjem vektorskog analizatora mreža (vector network analyzer VNA).

U 2. poglavlju prikazane su merne tehnike za karakterizaciju ovih komponenti, u 3. poglavlju je prikazano merenje S-parametara i ekstrakcija parametara, a u 4. poglavlju su predstavljene ekstrahovanje vrednosti parametara.

2. MERNJA TEHNIKA ZA KARAKTERIZACIJU KORIŠĆENJEM VNA

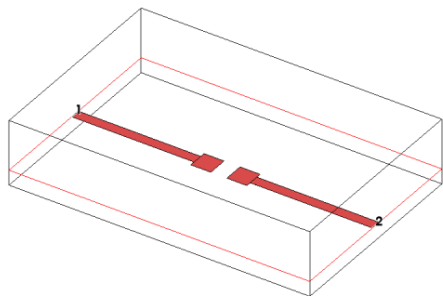
Analizatori impedanse se najčešće koriste za merenje induktivnosti i Q faktora induktivnih komponenti [3]. Međutim, oni daju samo unutrašnje parametre i karakteristike analizirane komponente;

prema tome, oni ne uključuju interakciju između PCB-a i komponente [9].

U cilju postizanja visoke tačnosti merenja, koriste se vektorski analizatori mreža. Prednost VNA merenja je da uključuju spoljašnje efekte (kao što su lejaut efekti). U ovom radu su prikazane dve merne metode za karakterizaciju feritnih EMI potiskivača korišćenjem VNA (u 2.1 je prikazana metoda sa prilagodnim stepenom i SMA konektorima, a u 2.2 metoda sa prilagodnim stepenom i GSG probama), kao i merne metode za karakterizaciju feritnih transformatora u 2.2.

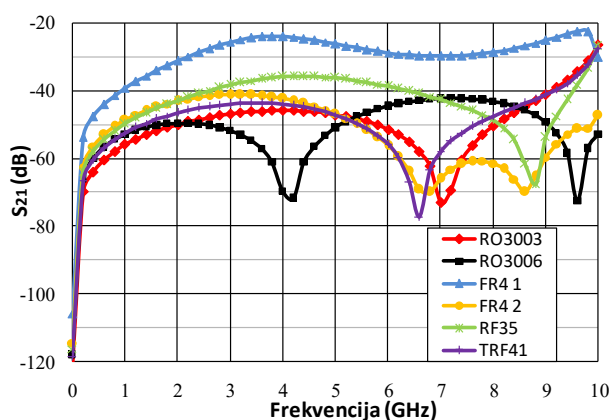
2.1. MERNJA TEHNIKA ZA KARAKTERIZACIJU FERITNOG EMI POTISKIVAČA KORIŠĆENJEM VNA

Na slici 1 je prikazan 3-dimenzionalni izgled mikrostrip prilagodnog test stepena, dobijen prilikom projektovanja u programskom paketu Microwave Office (proizvođač AWR Corp) [10].



Slika 1 – 3-dimenzionalni izgled mikrostrip prilagodnog test stepena za feritnu EMI komponentu u standardnom EIA 0805 kućištu

Na slici 2 su prikazana dobijena slabljenja, S_{21} parametri, za različite dielektrične materijale prilagodnog stepena na štampanoj ploči za SMD komponente, i to feritne EMI potiskivače.



Slika 2 - Rezultati simulacije različitih dielektričnih materijala prilagodnog stepena na štampanoj ploči za feritne EMI potiskivače

Prilagodni stepen treba da ima slabljenje veće od 50 dB u frekventnom opsegu od značaja (u praksi slabljenje od 40-50 dB zadovoljava potrebe nesmetanog merenja). Na osnovu dobijenih rezultata simulacija, odabran je materijal tipa RO3003, proizvođača Rogers Corporation [11]. Ova visokofrekventna podloga ima dobre karakteristike na visokim frekvencijama do 10 GHz, što su potvrdile i simulacije (slika 2).

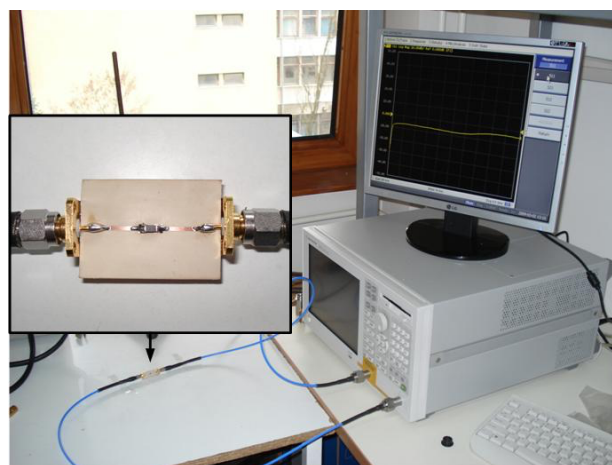
Dvopristupna merenja se vrše nad komponentama sa dva signalna pristupa (ulazni i izlazni). Vektorski analizator mreža se priključuje na krajnje izvode filterarskih mreža, odnosno, u ovom slučaju, SMD komponenti koje je potrebno okarakterisati.

Merenja su vršena korišćenjem VNA E5071B, proizvođača Agilent Technologies, u frekventnom opsegu od 300 kHz do 8.5 GHz. U zavisnosti od toga koja su merenja vršena (što je određeno vrstom i namenom same komponente), korišćeni su različiti frekventni opsezi. Za analizirane komponente, frekventni opseg je od 10 MHz do 1 GHz.

Pre početka procedure merenja S_{11} i S_{21} parametara, neophodno je uraditi kalibraciju mernog sistema. Standardna dvopristupna kalibracija je urađena sa elektronskim kalibracionim modulom (N4693-60003, opseg 10 MHz -50 GHz, proizvođač Agilent Technologies).

Prilagodni test stepen sa SMD komponentom i VNA 5071B su povezani koristeći VF SMA konektore. Prilagodni test stepen je napravljen u formi mikrostripa na PCB-u.

Na slici 3 prikazan je merni sistem i prilagodni test stepen na PCB-u sa postavljenom SMD komponentom (feritni EMI potiskivač) koja se karakteriše.



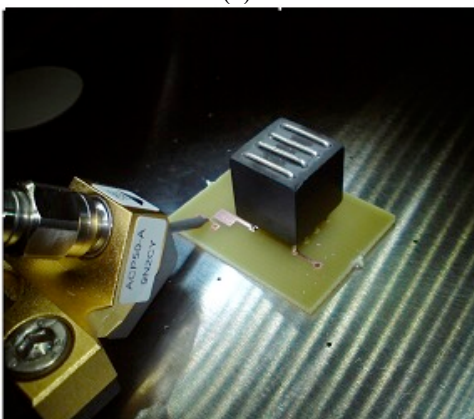
Slika 3 - Merni sistem sastavljen od VNA E5071B, Agilent Technologies i prilagodnog stepena na PCB-u (prikazan uvećan na manjoj slici)

2.1. MERNI TEHNIKA ZA KARAKTERIZACIJU FERITNIH TRANSFORMATORA KORIŠĆENJEM VNA

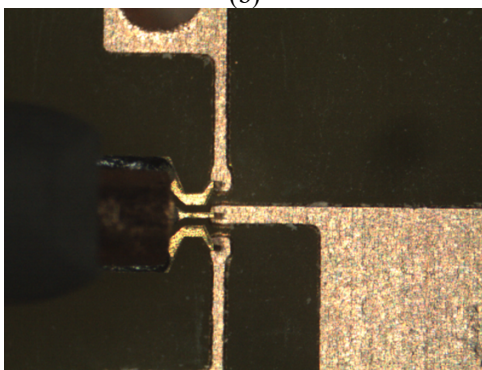
Za karakterizaciju feritnih transformatora korišćen je VNA E5071B, zajedno sa stanicom za ispitivanje vežera SUSS PM5 (slika 4a), i masa-signal-masa probe (ground-signal-ground, GSG probes). Merenje je izvršeno u opsegu frekvencija od 300 kHz do 1 GHz.



(a)



(b)



(c)

Slika 4 - (a) Merna postavka za karakterizaciju feritnih transformatora, (b) prilagodni stepen na PCB-u sa montiranom SMD komponentom, (c) pogled na GSG probe postavljene na PCB kontakte

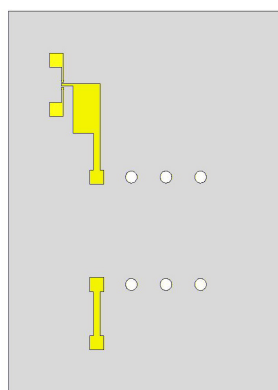
Ova merna metoda je verifikovana merenjem komercijalno dostupne feritne SMD komponente, proizvođača MMG Neosid, oznake 48-057-38 [12].

Merena komponenta je montirana na specijalno razvijenom PCB prilagodnom stepenu. Veza između komponente koja se testira (DUT) i VNA je ostvarena preko koplanarne masa-signal-masa probe (Cascade Microtech ACP50-GSG-250).

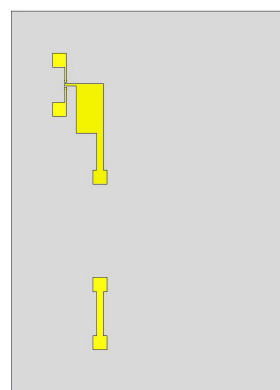
Prilagodni stepen na PCB-u sa montiranom SMD komponentom je prikazan na slici 4b. Uvećan detalj mesta gde su GSG probe postavljene na PCB ležaju je prikazan na slici 4c. Na slici se jasno uočava rastojanje od 250 μm između kontakata GSG proba.

Merni sistem je kalibrisan korišćenjem SOLT (Short-Open-Load-Thru) kalibracione tehnike. Uticaj parazitnih efekata (tzv. de-embedding) je eliminisan korišćenjem test struktura otvorene veze (open dummy feature).

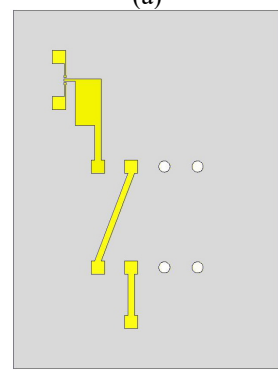
Za realizaciju prilagodnog stepena su korišćene dve komercijalno dostupne, standardne FR4 PCB podloge. Prva podloga ima provodni bakarni sloj debljine 17 μm , a druga 35 μm debljine. Dielektrični sloj obe PCB podloge je 1500 μm . U ovom radu su prikazani rezultati samo za PCB podlogu 35 μm debljine provodnog bakarnog sloja.



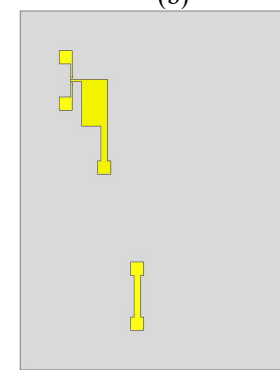
(a)



(b)



(c)



(d)

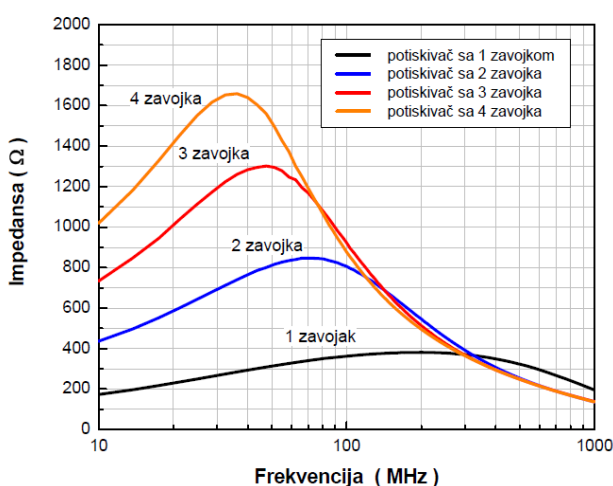
Slika 5 - PCB ležaj za povezivanje SMD komponente: (a) za merenje EMI potiskivača sa 1 zavojkom i (b) de-embedding, (c) za merenje EMI potiskivača sa 2 zavojka (d) de-embedding.

Pre početka postupka karakterizacije feritnog transformatora, analizirana SMD komponenta (oznaka 48-057-38) je testirana kao EMI potiskivač. Na ovaj način je izvršena verifikacija merne metode i poređenje rezultata merenja sa vrednostima datim u katalogu proizvođača [12]. Pri karakterizaciji EMI potiskivača koriste se GSG probe, za razliku od postupka merenja prikazanog u 2.1.

Izabrana SMD komponenta ima četiri provodnika (8 nožica) za montažu na PCB. Ona daje odlično slabljenje u opsegu frekvencija od 25 MHz do 100 MHz. Može da se koristi na 4 linije jednovremeno ili sa 2, 3 ili 4 namotaja na jednoj liniji. Komponenta je testirana na oba načina.

PCB lejauti korišćeni za različito povezivanje SMD komponente kao EMI potiskivača sa 1 ili 2 zavojka su prikazani na slici 5. Kontakti za postavljenje GSG proba pri merenju su prikazani u gornjem desnom uglu. (Ovaj uvećan detalj može da se vidi na slici 4c.) Svaka feritna komponenta je montirana na PCB podlogu koja ima metalizaciju sa donje strane.

Ekstrahovane vrednosti impedanse EMI potiskivača dobijene merenjima S-parametara su prikazane na slici 6. Sve analizirane impedanse EMI potiskivača imaju karakterističan nelinearni oblik, koji je specifičan za feritni materijal F19. Izmerene vrednosti su veće od vrednosti prikazanih u katalogu. Razlikuju se po maksimalnoj impedansi i frekvenciji na kojoj je ona postiže. Sličan frekvencijski pomeraj maksimalne impedanse ka nižim frekvencijama (usled parazitne kapacitivnosti prema ravni metalizacije) je diskutovan u [13]. Slična pojava je, takođe, primećena u [14].



Slika 6 - Ekstrahovane vrednosti impedanse EMI potiskivača dobijene merenjima S-parametara za veze sa 1, 2, 3 i 4 zavojka komponente 48-057-38

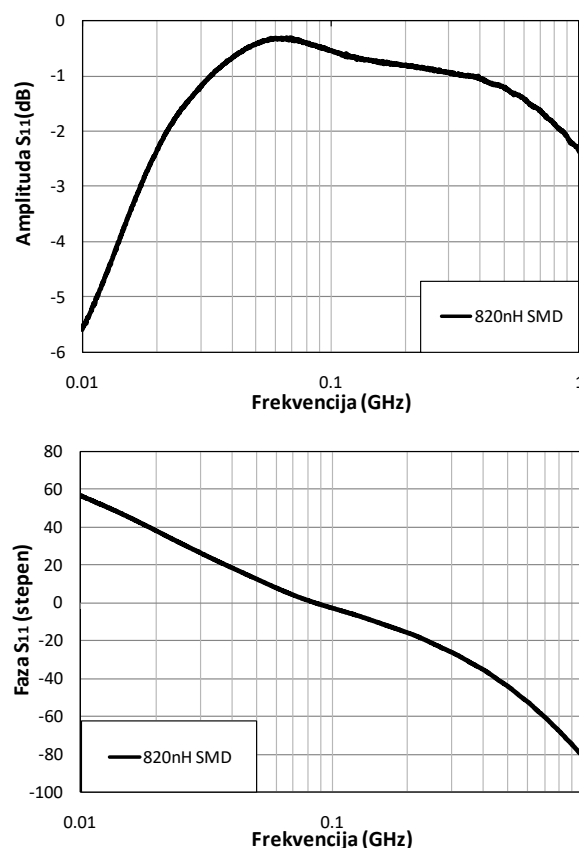
3. MERENJE S-PARAMETARA

Pri karakterizaciji SMD komponente u širokom frekventnom opsegu, do reda GHz, mogu se javiti brojni problemi, koji se mogu prevazići korišćenjem S-parametara. S-parametri se koriste za prikazivanje količine energije koja se reflektuje ili prenosi kroz komponentu.

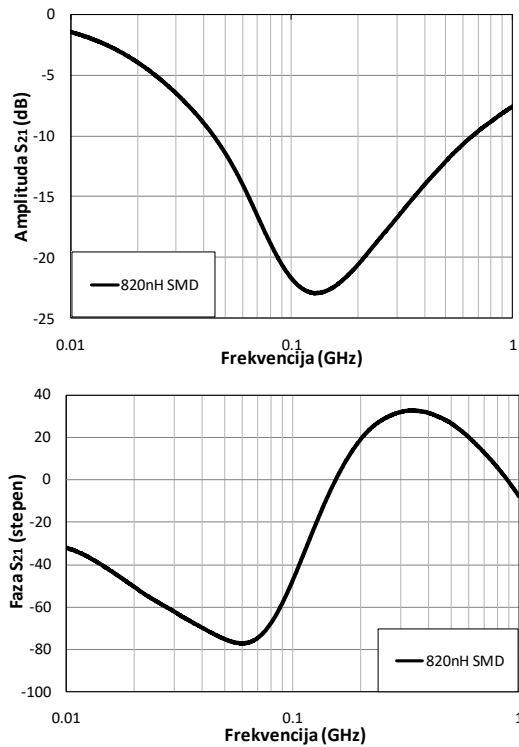
3.1. MERENJE S-PARAMETARA FERITNIH EMI POTISKIVAČA

Merenje S-parametara je predstavljeno na primeru komercijalno dostupne feritne EMI komponente, višeslojnog čip induktora (slike 7 i 8). Analiziran je EMI potiskivač u standardnom EIA kućištu, veličine 0805, i nominalne vrednosti induktivnosti od 820 nH (komponenta oznake 220805R82K7F [15]).

Koristeći VNA, sopstvena rezonantna frekvencija f_0 može biti određena iz mernih rezultata S-parametara tako što se odredi gde faza parametra S_{21} prolazi kroz nultu vrednost. Zadovoljavajuća merenja moraju da odrede električne parametre i da imaju odgovarajuću tačnost i ponovljivost mernih rezultata u zadatom mernom opsegu frekvencija.



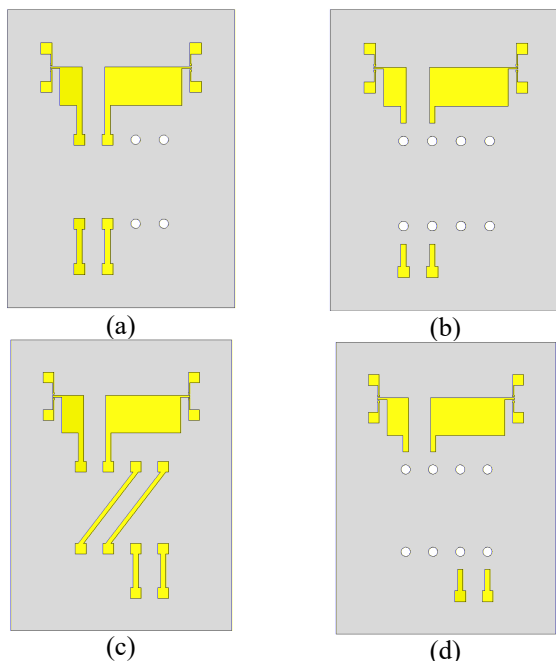
Slika 7 - Merene vrednosti amplitude i faze S_{11} parametra za feritni EMI potiskivač (komponenta 220805R82K7F)



Slika 8 - Merene vrednosti amplitude i faze S_{21} parametra za feritni EMI potiskivač (komponenta 220805R82K7F)

3.2. MERENJE S-PARAMETARA FERITNIH TRANSFORMATORA

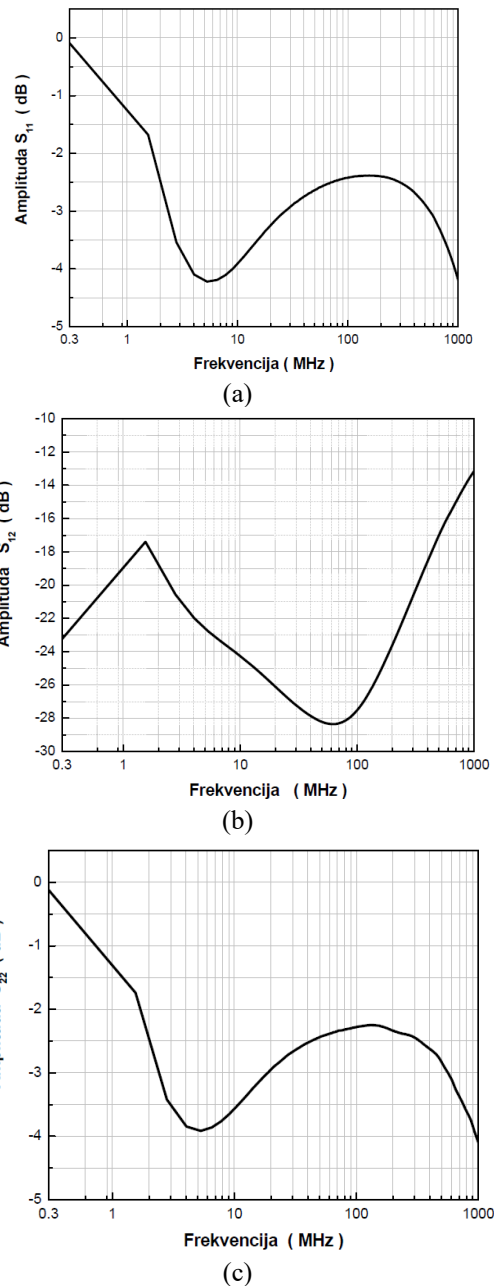
Feritni transformator je formiran odgovarajućom vezom feritne komponente sa provodnim linijama na



Slika 9-PCB leajut za povezivanje SMD komponente 48-057-38: (a) za merenje transformatora sa 1 zavojkom i (b) de-embedding, i (c) za merenje transformatora sa 2 zavojka and (d) de-embedding

PCB-u. Na slici 9 su prikazani PCB leajuti za povezivanje SMD komponente kao transformatora sa 1 zavojkom, i kao transformatora sa 2 zavojka. Kontakti za merenja sa GSG probama se nalaze u levom i desnom gornjem uglu.

Kao i u prethodno opisanom slučaju za EMI potiskivač (poglavlje 2.1), merenje parametara transformatora izvršeno je korišćenjem dvoprístupne stanice za merenje vejfera. Transformator je povezan na VNA preko koplanarnih APC GSG proba. Nakon SOLT kalibracije mernog sistema, izmereni su S-parametri transformatora. Merene vrednosti S-parametara za transformator sa jednim zavojkom su prikazane na slici 10.



Slika 10 - Merene vrednosti S_{21} parametara za feritni transformator sa 1 zavojkom: (a) S_{11} , (b) S_{12} (c) S_{22}

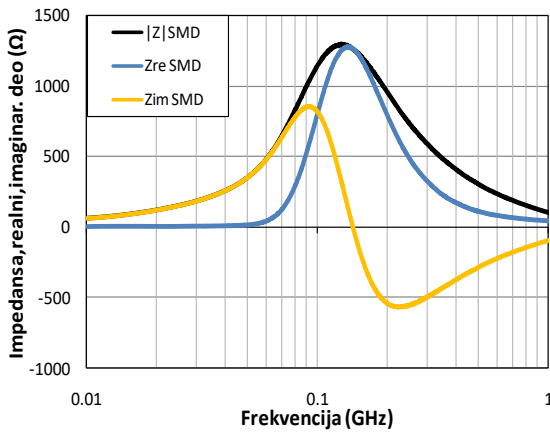
Pošto je karakterizacija vršena u opsegu frekvencija do 1 GHz, za postupak uklanjanja parazitnih parametara okoline dovoljno je koristiti samo pomoćnu strukturu otvorene veze (slike 9b i 9d).

4. EKSTRAHOVANE VREDNOSTI PARAMETARA

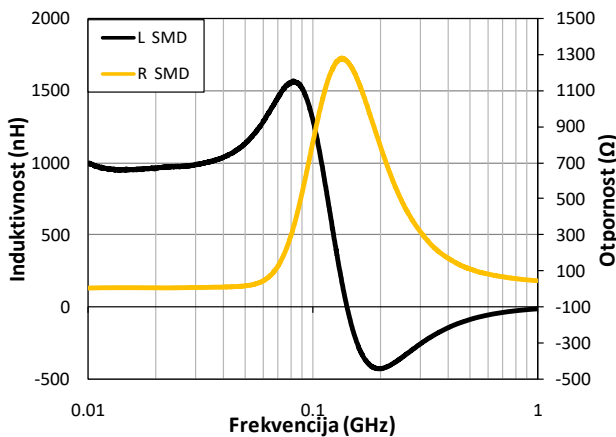
Na osnovu izmerenih vrednosti S-parametara, postupkom ekstrakcije električnih parametara se određuju potrebni parametri feritnih EMI potiskivača i feritnih transformatora.

4.1. EKSTRAHOVANE VREDNOSTI PARAMETARA FERITNIH EMI POTISKIVAČA

Ekstrahovane vrednosti amplitude $|Z|$, kao i realni i imaginarni deo impedanse za feritni EMI potiskivač 220805R82K7F su prikazani na slici 11.



Slika 11 - Izračunate vrednosti amplitude, realnog i imaginarnog dela impedanse EMI potiskivača 220805R82K7F iz merenih S-parametara

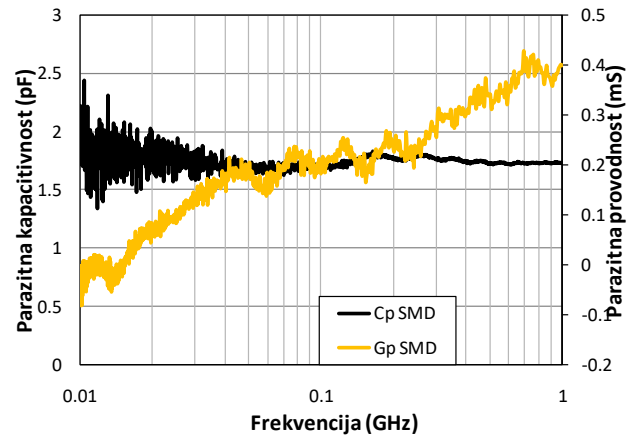


Slika 12 - Izračunate vrednosti parametara ekvivalentnog kola EMI potiskivača 220805R82K7F

EMI potiskivač može biti predstavljen kao prosto ekvivalentno kolo sastavljeno od redne veze ekvivalentne induktivnosti L i redne otpornosti R , u paraleli sa rasipnom kapacitivnošću C . Na visokim frekvencijama u model su uključeni i parazitni efekti, koji se modeluju kapacitivnošću C_P i provodnošću G_P , koje su jednim svojim krajem vezane na masu. Električni model EMI potiskivača i postupak ekstrakcije parametara prikazani su detaljno u [16].

Iz izračunate vrednosti impedanse EMI potiskivača, i njene realne i imaginarne vrednosti, određene su vrednosti serijske otpornosti R i induktivnosti L u funkciji od frekvencije (slika 12).

Vrednosti parazitnih efekata EMI potiskivača na PCB-u, C_P i G_P , prikazane su na slici 13. Kao što se može videti, provodnost G_P raste porastom frekvencije. Kapacitivnost C_P je relativno mala za ovu SMD komponentu, i približno je konstantna (svega nekoliko pF).



Slika 13 - Izračunate vrednosti parazitne provodnosti i kapacitivnosti EMI potiskivača 220805R82K7F

4.2. EKSTRAHOVANE VREDNOSTI PARAMETARA FERITNIH TRANSFORMATORA

Izmereni S-parametri transformatora i test strukture sa otvorenim krajevima (open structures) se konvertuju u odgovarajuće Y-parametre.

Eliminacija parazitnih ulaznih karakteristika (de-embedding) oba porta dobija se korišćenjem sledećih izraza:

$$Y_{11 \text{ deembedding}} = Y_{11 \text{ transformator}} - Y_{11 \text{ open}}, \quad (1)$$

$$Y_{22 \text{ deembedding}} = Y_{22 \text{ transformator}} - Y_{22 \text{ open}}. \quad (2)$$

Ovi parametri se koriste za dalje određivanje parametara transformatora preko Z-parametara:

$$Z_{11 \text{ deembedding}} = 1/Y_{11 \text{ deembedding}}, \quad (3)$$

$$Z_{22 \text{ deembedding}} = 1/Y_{22 \text{ deembedding}} \cdot \quad (4)$$

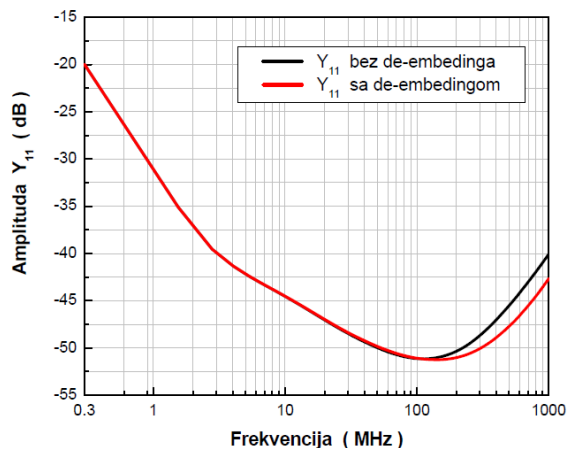
Konačno, induktivnost primara L_P i induktivnost sekundara L_S su određuju kao

$$L_P = \{\text{Im}(Z_{11 \text{ deembedding}})\} / (2 \cdot \pi \cdot f), \quad (5)$$

$$L_S = \{\text{Im}(Z_{22 \text{ deembedding}})\} / (2 \cdot \pi \cdot f), \quad (6)$$

gde je f frekvencija.

Ekstrahovane vrednosti Y_{11} parametara sa i bez de-embeddinga su prikazane na slici 14. Kao što se vidi sa ove slike, eliminacija parazitnih efekata je potrebna samo za frekvencije iznad 100 MHz.



Slika 14 – Ekstrahovane vrednosti Y_{11} parametara sa i bez de-embeddinga za transformator sa 1 zavojkom

Korišćenjem ekstrahovanih Y-parametara i jednačina (1)-(6), parametri feritnog transformatora (induktivnosti L_P i L_S , međusobna induktivnost M i koeficijent sprege k) mogu da budu dobijeni, kao što je prikazano na slikama 15 do 17.

Izvedene induktivnosti transformatora sa jednim zavojkom su prikazane na slici 15, u frekventnom opsegu do 1 GHz. Uočava se razlika između induktivnosti primara i sekundara, jer je primarni kalem na spoljašnjoj strani, dok je sekundarni kalem u sredini feritne komponente.

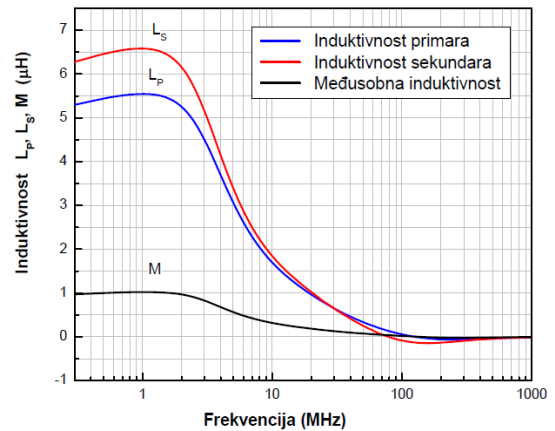
Transformator sa 2 zavojka je simetrična struktura (primarni i sekundarni kalem imaju isti oblik i ukupnu dužinu), i zbog toga induktivnost primara i sekundara su gotovo identične (slika 15).

U oba slučaja međusobna induktivnost je relativno niska (slike 15 i 16). Ovo je sasvim očekivano, pošto je ova feritna komponenta prvenstveno namenjena za potiskivanje, a ne za primenu u transformatorima. Zbog toga je koeficijent sprege k

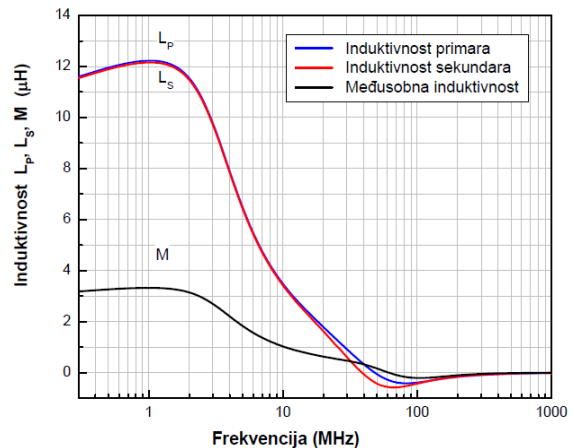
$$k = M / \sqrt{L_P \cdot L_S}, \quad (7)$$

relativno mali, kao što se vidi na slici 17.

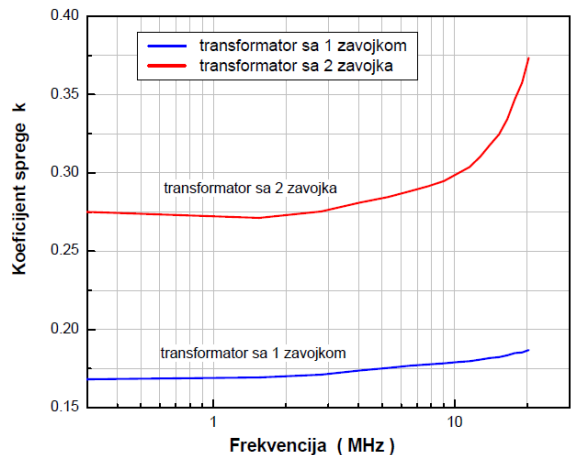
Pored toga, transformator sa po dva zavojka ima naizmenično postavljene zavojke primarnog i sekundarnog kalema. Zbog toga je sprega znatno bolja nego kod transformatora sa jednim zavojkom.



Slika 15 – Izračunate vrednosti induktivnosti primara L_P , sekundara L_S i međusobne induktivnosti M za transformator sa 1 zavojkom



Slika 16 – Izračunate vrednosti induktivnosti primara L_P , sekundara L_S i međusobne induktivnosti M za transformator sa 2 zavojka



Slika 17 – Izračunate vrednosti koeficijenta sprege k oba transformatora

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su predložene metode za karakterizaciju feritnih EMI potiskivača i feritnih transformatora korišćenjem vektorskog analizatora mreža.

U frekventnom opsegu koji se standardno koristi u energetskej elektronici, karakterizacija korišćenjem analizatora impedanse će obezbediti rezultate dovoljne tačnosti. Međutim, moderni induktori i transformatori, koji su namenjeni za primene u potpuno integrisanim, ultra-minijaturnim napajanjima, kao što su moderni baterijski napajani uređaji [17], rade u frekventnom opsegu od 100 MHz do 500 MHz. Da bi se postigla visoka tačnost merenja ovih komponenti, neophodno je koristiti karakterizaciju vektorskim analizatorom mreža, koja uključuje i uticaj spoljašnjih efekata (kao što su lejaut efekti).

Za razliku od tradicionalnih metoda karakterizacije pomoću analizatora impedanse, prikazani metod se bazira na merenju S-parametara korišćenjem vektorskog analizatora mreže i specijalno razvijenih PCB test postavki koje su kompatibilne sa koplanarnim GSG probama za transformatore, odnosno, sa SMA konektorima za karakterizaciju feritnih EMI potiskivača. Predloženi merni postupci uključuju i za postupak uklanjanja parazitnih parametara okoline. Zbog toga, oni mogu biti korišćeni, kako u nižem frekventnom opsegu do 100 MHz, tako i na višim frekvencijama do 1 GHz.

Dobra tačnost i širok frekventni opseg (čak do 1 GHz) su osnovne prednosti opisanih metoda za karakterizaciju.

LITERATURA

- [1] Tehnička informacija "Basics of EMI filters", Murata Manufacturing Co. Ltd. Dostupna na: www.murata.com
- [2] Tehnička informacija Ferroxcube Products Corp., "Multilayer Suppressors and Inductors". Dostupna na: www.ferroxcube.com.
- [3] K. Naishadham, "A rigorous experimental characterization of ferrite inductors for RF noise suppression", Proc. of IEEE RAWCON 99. 1999, Dayton, OH, pp. 271 - 274.
- [4] Tehnička informacija Traco Power, "DC/DC Converters", 2009, Dostupna na: www.tracopower.com
- [5] L.McCormack, "Introduction to EMC Standards", *Forum of laboratories implementing EU EMC Directive*, University of York, UK.
- [6] D. Zhang, D. Y. Chen, D. Sable, "A New Method to Characterized EMI Filter", *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA*, pp. 929 -933, 15-19 February 1998.
- [7] M. Milutinov, N. Pekaric-Nadj, N. Blaz, G. Radosavljevic, "Dependence of ferrite based inductance on the geometry and type of ferrite", *Proc. 53rd ETRAN Conference, Vrnjačka Banja, Serbia*, EL 3.5 1-4, June 15-18, 2009.
- [8] S. Wang, F.C. Lee, W.G. Odendaal, "Using Scattering Parameters to Characterize EMI Filters", *35th IEEE PESC, Aachen, Germany*, pp. 297-303, 2004.
- [9] K. Naishadham, "Experimental equivalent-circuit Modeling of SMD inductors for printed circuit applications," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, pp. 557-565, Nov 2001.
- [10] Tehnička informacija AWR Corporation, Dostupna na: <http://web.awrcorp.com/>
- [11] Tehnička informacija Rogers Corporation, USA, "Advanced Circuit Materials". Dostupna na: <http://www.rogerscorp.com/acm/>.
- [12] Tehnička informacija MMG Neosid Ltd, "Soft ferrite materials", 2001, Dostupna na: www.mmg-neosid.com.
- [13] S. Wang, F.C. Lee, D.Y. Chen, W.G. Odendaal, "Effects of Parasitic Parameters on EMI Filter Performance", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol 19, no 3, pp. 869-877, May 2004.
- [14] M. Damnjanovic, Lj. Zivanov, G. Stojanovic, A. Menicanin, "Influence of Conductive Layer Geometry on Maximal Impedance Frequency Shift of Zig-zag Ferrite EMI Suppressor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.42 No 2.
- [15] Tehnička informacija Fair-Rite Products Corp., "14th Edition Catalogue", Dostupna na: www.fair-rite.com, 2008.
- [16] A. Menicanin, M. Damnjanović, L. Živanov: "RF Equivalent Circuit Modeling of Surface Mounted Components for PCB Applications", *Microelectronic international*, Vol 27/2, 2010.
- [17] C. Meyer, S. Bedair, B. Morgan, D. Arnold: "High inductance-density air-core power inductors and transformers designed for operation at 100-500 MHz", *11th Joint MMM-Intermag Conference 2010*, Washington, USA, January 18-22, 2010.

SUMMARY

CHARACTERIZATION OF THE FERRITE EMI SUPPRESSORS AND TRANSFORMERS

In this paper, a characterization of ferrite EMI suppressors and transformers based on S-parameters measurement, using vector network analyzer and specially developed PCB test fixtures, are presented. Ferrite EMI suppressors and transformers are realized with commercially available ferrite components. It is shown that proposed approach is efficient in predicting and analyzing the EMI suppressor and transformer performances, even in high frequency range.

Key words: *Electromagnetic interference (EMI), ferrite devices, frequency-domain analysis*