

PROJEKTOVANJE I ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA EMI FILTARA U OKVIRU PREDMETA EMI I EMC U ELEKTRONICI

Mirjana Damjanović¹, Milica Kisić², Miroslav Katanić³,
Tatjana Grbić⁴, Dragomir Nikolić⁵

^{1,2,3,4} Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

¹mirad@uns.ac.rs, ²mkisic@uns.ac.rs, ³miroslavkatanic@uns.ac.rs,

⁴tatjana@uns.ac.rs, ⁵nikolicd@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Elektromagnetska interferencija i elektromagnetska kompatibilnost u elektronici je predmet u okviru modula Mikro i nano elektronika, master akademskih studija Energetika, elektronika i telekomunikacije, na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Cilj predmeta je da studenti steknu teorijska i praktična znanja iz oblasti elektromagnetske kompatibilnosti. Zato studenti uče da dizajniraju elektronska kola i sisteme otporne na EMI, da implementiraju, testiraju i primenjuju komponente za zaštitu od EMI (kao što su razni filtri, feritne komponente, CM potiskivači, itd.), da projektuju dobar PCB ležaj i koriste pravilno uzemljenje i oklopanje u skladu sa standardima EMC (standardi elektromagnetne kompatibilnosti). U ovom radu je prikazana struktura predmeta. Pored toga, prikazano je kako studenti na računarskim vežbama koriste simulacioni softver za analizu rada električnih kola.

Ključne reči: elektromagnetska kompatibilnost, konduktivne smetnje, filter, laboratorijske vežbe

EMI FILTER DESIGN AND INSERTION LOSS CALCULATION WITHIN THE SUBJECTS OF EMI AND EMC IN ELECTRONICS

Abstract: Electromagnetic interference and electromagnetic compatibility in electronics is a subject within the Micro and Nano Electronics module, Master of Academic Studies in Power, Electronics and Telecommunication Engineering, at the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad. The course aims to provide students with theoretical and practical knowledge in the field of electromagnetic compatibility. Therefore, students learn to design electronic circuits and systems immune to EMI, to implement, test and apply EMI shielding components (such as filters, ferrite components, Common-mode chokes, etc.), to design a good PCB layout and use proper grounding and shielding according to EMC standards (electromagnetic compatibility standards). This paper presents the structure of the subject. In addition, it is presented how students during computer exercises use simulation software to analyze the electrical circuit operation.

Key Words: electromagnetic compatibility, conductive noise, filter, laboratory practice

1. UVOD

Sve bržim razvojem tehnologije i poboljšanom proizvodnjom elektronskih kola, javlja se i sve veći broj problema usled povećane gustine pakovanja, veće brzine rada, bržeg prenosa i obrade podataka. Da bi uređaj ispravno radio i zadovoljio propisane standarde/protokole za elektromagnetsku kompatibilnost (EMC), neophodno je voditi računa o određenim pravilima i tokom projektovanja kola [1].

Postoji veliki broj kurseva koji pokrivaju teme elektromagnetske kompatibilnosti. Deo kurseva je namenjen studentima osnovnih ili master akademskih studija, u zavisnosti od sadržaja i težine, dok su drugi namenjeni diplomiranim inženjerima koji žele da unaprede svoje veštine [2]-[7]. Postoji i mnogo onlajn kurseva koji pokrivaju osnove pojmove iz EMC [8], EMC standarde [9], EMC testiranje [10] ili naprednije teme, kao što su elektromagnetna polja i energija [11]. Dodatno, postoje i specijalizovani kursevi koji se bave temama kao što su preporuke za projektovanje PCB kola [7], [12], integritetom signala i napajanja [13], [14] ili dizajnom napajanja [15]. Svi ovi kursevi pomažu kompanijama da obezbede internu ekspertizu koja im je potrebna kako bi osigurali da njihovi proizvodi ispunjavaju EMC zahteve [10]. Od suštinskog je značaja za dizajnere elektronskih kola da obrate pažnju na EMC tokom svih faza razvoja proizvoda. Simulacije su veoma koristan alat tokom svih faza projektovanja kola, dajući inženjerima detaljan uvid u sve aspekte uređaja koji su relevantni za EMC i pomažu im da identifikuju i reše većinu potencijalnih problema pre testiranja [16]. Zbog toga studenti Fakulteta tehničkih nauka (FTN) Univerziteta u Novom Sadu (UNS) mogu da steknu teorijska i praktična znanja o problemima elektromagnetske kompatibilnosti slušanjem predmeta EMI i EMC u elektronici [17].

U našem prethodnom radu [18], opisano je kako se realizuju laboratorijske vežbe. U ovom radu, naglasak će biti na računarskim vežbama, kojima studenti uče da koriste simulacije u cilju određivanja karakteristika EMI filtara, neophodnih za smanjivanje uticaja neželenih signala (smetnji) na rad kola.

2. PLAN PREDMETA EMI I EMC U ELEKTRONICI

Elektromagnetne smetnje i elektromagnetska kompatibilnost u elektronici je predmet koji je uveden u nastavni plan i program master akademskih studija Energetika, elektronika i telekomunikacije na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu od 2009. godine. Po akreditaciji od 2020. godine, predmet je obavezan za studijske grupe Mikro i nano elektronika i Primenjena elektronika, a izborni na studijskoj grupi Embedded sistemi i algoritmi smeru Mikroročunarska elektronika, zbog aktuelnosti oblasti.

Cilj kursa je da nauči studente kako da projektuju elektronska kola i sisteme koji su imuni na EMI. To obuhvata primenu odgovarajućih metoda još tokom faze projektovanja sistema, jer je to najefikasniji pristup za smanjenje EMI.

Pored toga, studenti stiču znanje o tome kako da projektuju, testiraju i koriste komponente za zaštitu od elektromagnetskih smetnji, kao što su različiti filtri, feritne komponente ili TVS (prigušivači prolaznog napona). Oni takođe treba da razumeju značaj pravilnog dizajniranja PCB-a i upotrebe odgovarajućih tehnika uzemljenja i zaštite kako bi se ispunili EMC standardi [17].

Fond časova aktivne nastave nedeljno je: 2 časa predavanja, 1 čas auditornih vežbi i 1 čas laboratorijskih vežbi. U okviru 7 laboratorijskih vežbi, studenti na praktičnim primerima imaju priliku da se upoznaju sa negativnim efektima koji mogu da se jave u elektronskim kolima ukoliko nije obezbeđena elektromagnetska kompatibilnost i da nauče kako da koriste softverske alate za simulaciju rada kola i određivanje njegovih karakteristika.

3. IZRAČUNAVANJE I SIMULACIJA RADA KOLA

U prvoj polovini semestra studenti uče o signalima u elektronskim kolima, njihovim talasnim oblicima i spektrima. Takođe, upoznaju se sa putanjama kroz koje se neželjene smetnje mogu superponirati na korisne signale. Koristeći analogno/digitalni simulator za elektronska kola, MicroCAP [19], studenti uče da simuliraju i analiziraju rad kola. Takođe, uče kako je moguće poboljšati rad kola dodavanjem odgovarajućih filtara za suzbijanje EMI.

Koristeći simulator, student uče kako da odrede i druge karakteristike filtara, kao što su propusni opseg, granična frekvencija itd. Studenti dobijaju da analiziraju jedan od pasivnih filtara: niskopropusni (NF), visokopropusni (VF) filter, propusnik opsega ili nepropusnik opsega.

Osim prenosne funkcije, najvažnije svojstvo filtra su gubici koje unosi IL_{dB} (insertion loss) [20],

$$IL_{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{L,F}}{V_L} \right), \quad (1)$$

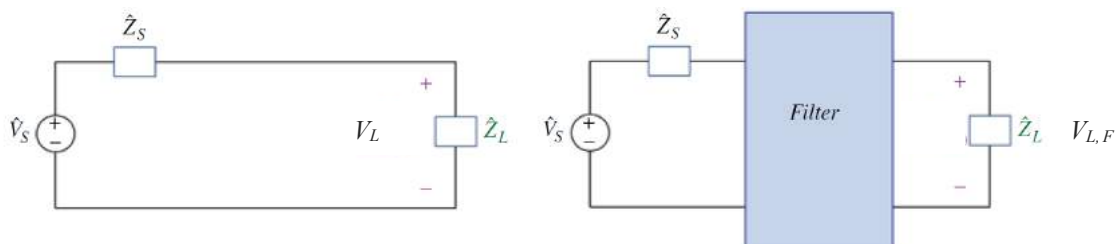
gde je $V_{L,F}$ napon na izlazu sa filtrom, a V_L izlazna napon bez filtra (slika 1). Važni parametri su i ulazna Z_{IN} i izlazna impedansa Z_{OUT} ,

$$Z_{IN}(s) = \frac{V_{IN}(s)}{I_{IN}(s)}, \quad (2)$$

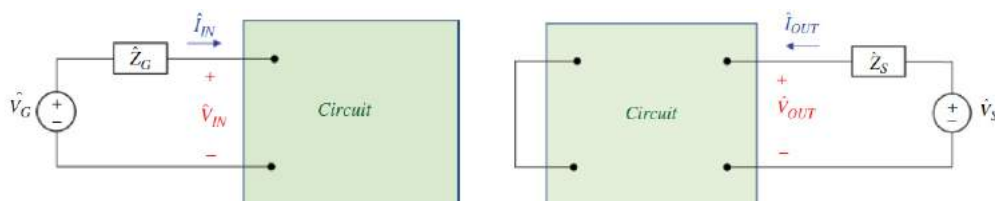
$$Z_{OUT}(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{I_{OUT}(s)}, \quad (3)$$

koje određuju da li filter dobro prilagođen ulaznom, odnosno izlaznom delu kola, vodeći računa o preporuci za maksimalno neslaganje impedansi. Ekvivalentno kolo za određivanje ulazne, odnosno izlazne impedanse je prikazano na slici 2 [20].

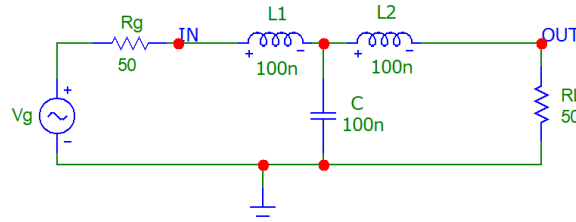
Kao primer, posmatrajmo jednu od računarskih vežbi u okviru koje se radi analiza pasivnog filtra. Na primer, T-filtar je pasivni niskopropusni filter pogodan za suzbijanje EMI, ako su i impedanse izvora signala i opterećenja niske. Šema T-filtara je prikazana na slici 3, dok su rezultati njegove AC analize dati na slikama 4 i 5.



Slika 1. Izračunavanje slabljenja signala koje unosi filter: (a) električno kolo bez filtra i (b) sa filtrom [20]



Slika 2. Ekvivalentno kolo za određivanje: (a) ulazne i (b) izlazne impedanse [20]



Slika 3. Ekvivalentno kolo za simulaciju rada T-filtra (koga čine L_1 - C - L_2), gde je izvor v_g i opterećenje R_L

Korišćenjem ekvivalentnog kola prikazanog na slici 2, ulazna impedansa se može izraziti kao:

$$Z_{IN}(s) = \frac{V_{IN}(s)}{I_{IN}(s)} = sL_1 + \frac{1}{sC} = \frac{1+s^2L_1C}{sC}, \quad (4)$$

gde je $s = j\omega$, a $\omega = 2\pi f$, f frekvencija. Na sličan način se može odrediti i izlazna impedansa,

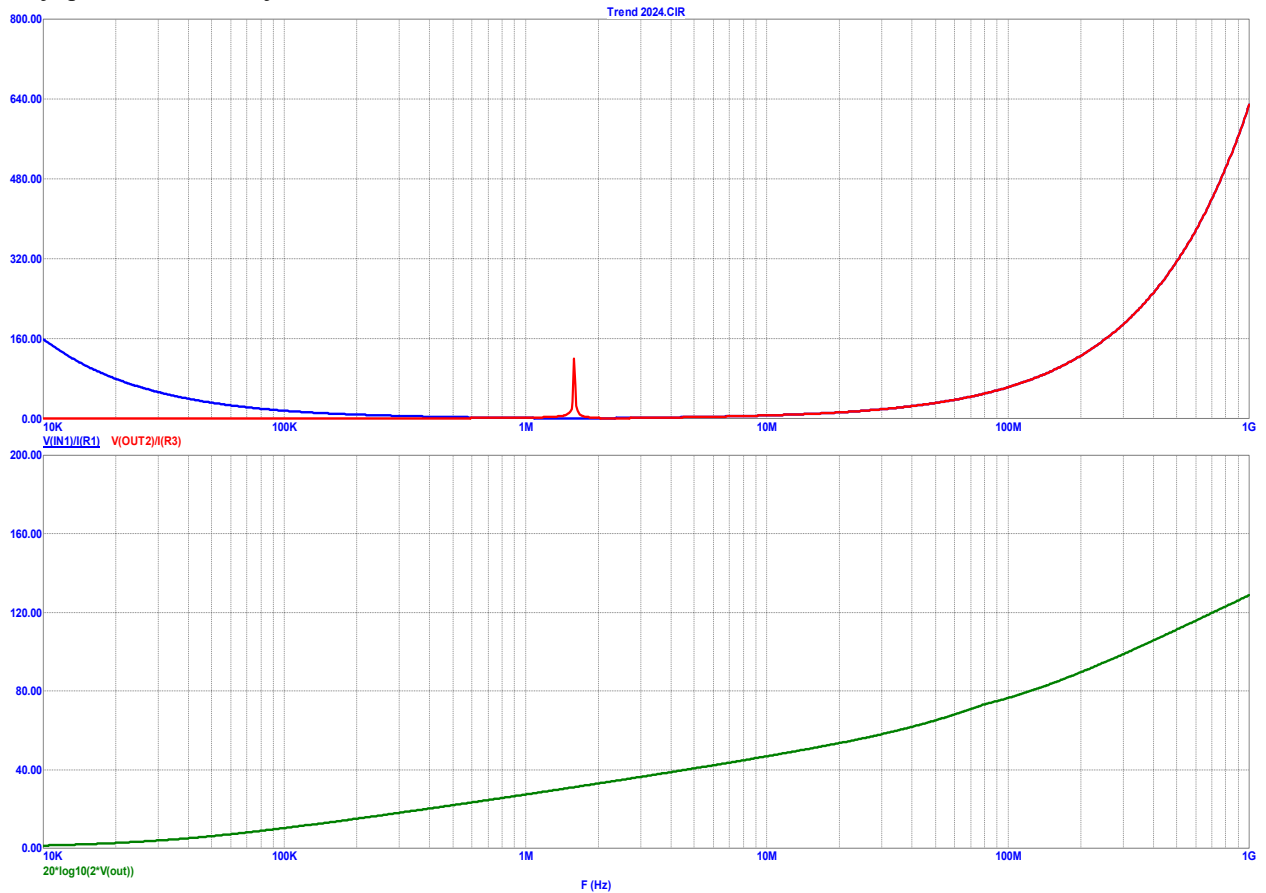
$$Z_{OUT}(s) = \frac{V_{OUT}(s)}{I_{OUT}(s)} = sL_2 + \frac{1}{sC} || sL_1 = sL_2 + \frac{sL_1}{1+s^2L_1C}. \quad (5)$$

Simulacijama su potvrđeni izrazi za ulaznu i izlaznu impedansu (4) i (5). Ulazna impedansa na nižim frekvencijama je određena kapacitivnošću kondenzatora. Kako frekvencija raste, uticaj kondenzatora se smanjuje i impedansa je dominantno određena induktivnošću L_1 . Izlazna impedansa je zanemarljiva do $f = 2\pi\sqrt{L_1C} = 1,6\text{MHz}$, kada ima lokalni maksimum. Nakon toga, impedansa je dominantno određena induktivnošću L_2 (slika 4).

Slabljenje koje unosi T-filtar se može odrediti

$$IL_{dB} = 20 \log\left(\frac{V_{LF}}{V_L}\right) = 20 \log\left(\frac{\frac{1}{sC} || (sL_2 + R_L)}{R_g + sL_1 + \frac{1}{sC} || (sL_2 + R_L)} \cdot \frac{R_L}{sL_2 + R_L}\right). \quad (6)$$

Dakle, T-filtar propušta signale na niskim frekvencijama, do prve granične frekvencije $f_1 = 63\text{ kHz}$. Nakon toga filter unosi slabljenje od 20 dB/dec. Nakon druge granične frekvencije $f_2 = 70\text{ MHz}$, slabljenje još brže raste, 60 dB/dec, što je posledica korišćenja filtra sa više akumulacionih elemenata.



Slika 3. Simulacijom određeni parametri T-filtra: a) ulazna (crvena linija) i izlazna impedansa (plava linija), b) uneto slabljenje IL_{dB} za induktore $L_1 = L_2 = 100\text{ nH}$, i kondenzator $C = 100\text{ nF}$ (zelena linija)

4. ZAKLJUČAK

EMC je oblast koja je veoma važna u oblasti elektronike. Cilj kursa iz elektromagnetske kompatibilnosti je da studenti nauče da primene svoja znanja u projektovanju kola koja će ispunjavati EMC direktive. Trenutno, naša laboratorija je opremljena instrumentima koji omogućavaju karakterizaciju komponenti merenje konduktivnih smetnji. Kombinacijom predavanja, projektovanja korišćenjem softverskih alata i učenjem osnovnih mernih metoda, studenti mogu da se upoznaju sa problemima elektromagnetske interferencije i sa osnovnim principima na kojima počiva dobar EMC dizajn. Dodatno, studentima se demonstriraju raspoložive metode za smanjenje smetnji ispod prihvatljivih nivoa. Jedan od efikasnih načina da studenti nauče da analiziraju i poboljšaju rad elektronskih kola je korišćenjem simulacionih softvera. Naš dalji cilj je da laboratoriju proširimo dodatnom opremom i uređajima koji će omogućiti demonstraciju mnogih drugih aspekata konduktivnih i zračenih emisija.

ZAHVALNICA

Rad je finansiran u okviru projekta „Unapređenje nastavnih i istraživačkih procesa primenom savremenih tehnoloških rešenja i metoda u energetici, elektronici i telekomunikacijama”.

5. LITERATURA

- [1] Academy of EMC, “*EMC Standards*”, <https://www.academyofemc.com/emc-standards>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [2] G. Apaydin, N. Arij, “*EMC Education at the University of Technology Zurich*”, Turk J. Elec. Eng. & Comp. Sci., vol. 17, no. 3, 2009, pp: 261-272.
- [3] Undergraduate curriculum, “*Electromagnetic Compatibility*,” Michigan State University, Collage of Engineering, <https://ece.msu.edu/ece-courses>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [4] Undergraduate course, “*Electromagnetic Compatibility Undergraduate Badge*,” Grand Valley State University, www.gvsu.edu/acad/electromagnetic-compatibility-undergraduate-badge.htm. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [5] Graduate course, “*Electromagnetic Interference and Compatibility (EMI/EMC) Techniques*,” Indian Institute of Technology, Kanpur, http://www.iitk.ac.in/mimt_lab/EMIworkshop/course.html Pristupljeno: 16.01.2024.
- [6] Online course, “*Applying Practical EMI Design and Troubleshooting Techniques*”, Department for Continuing Education, University of Oxford. Internet stranica: <https://www.conted.ox.ac.uk/courses/applying-practical-emi-design-and-troubleshooting-techniques>, Pristupljeno: 16.01.2024.
- [7] Online course, “*Applying Practical EMI Design and Troubleshooting Techniques*”, Department for Continuing Education, University of Oxford. Internet stranica: <https://www.conted.ox.ac.uk/courses/applying-practical-emi-design-and-troubleshooting-techniques>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [8] Online Master’s Degree, “*Introduction to Electromagnetic Interference and Compatibility*,” University of Wisconsin–Madison, Internet stranica: <https://interpro.wisc.edu/online-degrees/>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [9] Electronics courses, “*Electromagnetic Compatibility Essentials*,” TU Graz, Internet stranica: <https://www.edx.org/course/electromagnetic-compatibility-essentials>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [10] Online course, “*The Physics of Electromagnetic Compatibility Measurements*”, Learn EMC, Internet stranica: <https://learnemc.com/>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [11] MIT Open courseware, “*Electromagnetic Fields and Energy*”, Massachusetts Institute of Technology, <https://ocw.mit.edu/courses/res-6-001-electromagnetic-fields-and-energy-spring-2008/>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [12] Online course, “*EMI/EMC Compatibility Design and Signal Integrity*,” UCLA Extension, Internet stranica: <https://www.uclaextension.edu/engineering/engineering-short-courses/course/emiemc-compatibility-design-and-signal-integrity-ec>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [13] Online course, “*Signal and Power Integrity Training Courses*,” CommTech Academy. Internet stranica: <https://commtech.academy/signal-integrity/>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [14] M. Zhang, “*Structure Resonances: Ways to Identify, Locate, and Fix EMI Issues*,” Signal Integrity Journal, April 21, 2022. Internet stranica: <https://www.signalintegrityjournal.com/articles/2420-structure-resonances-ways-to-identify-locate-and-fix-emi-issues>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [15] S. Sandler, “*Power Electronics vs. Power Integrity*,” Signal Integrity Journal, January 18, 2019.
- [16] Technical Article, “*Electromagnetic Compatibility Simulation*,” Simulia. Internet stranica: www.3ds.com
- [17] Master’s course, “*EMI and EMC in Electronics*,” Fakultet tehničkih nauka, UNS. Internet stranica: <http://ftn.uns.ac.rs/n1407517625/power--electronic-and-telecommunication-engineering> Pristupljeno: 16.01.2024.
- [18] M. Damnjanović, K. Babković, M. Kisić, D. Nikolić, D. Krstić, “*EMI i EMC u elektronici na master akademskim studijama smera Mikroracunarska elektronika*”, XXVI Skup **TRENDOVI RAZVOJA: “INOVIACIJE U MODERNOM OBRAZOVANJU”**, Kopaonik, 16-19. 02. 2020.
- [19] Technical information, “*MicroCAP 12*,” Spectrum Software. Internet stranica: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtm>. Pristupljeno: 16.01.2024.
- [20] B. Adamczyk, “*Foundations of Electromagnetic Compatibility with practical applications*,” John Wiley and Sons Ltd, New Jersey, USA, 2017, Ch. 11.