
EXPERIMENTAL VERIFICATION OF TLM WIRE MODEL FOR DETERMINING SHIELDING EFFECTIVENESS OF METAL ENCLOSURE WITH RECTANGULAR APERTURE

Nataša Nešić

The Academy of Applied Technical and Preschool Studies, Niš, Serbia – Department of Information and Communication Technologies, Niš, Serbia, natasa.nesic@akademijanis.edu.rs

Abstract: In this paper, both experimental and numerical analysis of metal enclosure with rectangular aperture on frontal enclosure wall is obtained. The numerical technique for computational analysis is performed by creating an enclosure model with one slot-type aperture on frontal enclosure wall and for the same enclosure with a slightly wider rectangular aperture. The presence of an aperture or air-flow aperture arrays on the enclosure walls is very important and it has a dominant effect on the shielding function of the enclosure. Also, the influence of the other parameters such as magnetic permeability and electrical conductivity of material from which enclosure is made of, different wall thicknesses, shape and size of enclosure should be taken into consideration, in order to fully estimate the extent to which the shielding allows the system to function, in accordance with electromagnetic compatibility standards. Applying a computer method that uses transmission line matrices for spatial discretization of the electromagnetic field, so-called Transmission-Line Matrix method, TLM method. It is used for modelling conductive enclosure with slot aperture on front enclosure wall and with receiving monopole antenna inside. Furthermore, during practical engineering measurements, there is a receiving measuring antenna inside an equipment under test. Usually, a monopole or dipole antenna is employed for electrical field measurements while a loop antenna is used for magnetic fields. In order to faithfully simulate the enclosure on which tests are performed in terms of electromagnetic compatibility, the TLM wire model is used in order to reliably model the receiving antenna inside the enclosure. As an excitation source, the vertically polarized plane wave is used. In order to confirm the numerical results of the electromagnetic TLM solver, measurements are conducted in the Laboratory for high frequency measurements. Since the Laboratory does not have an anechoic room, the first step was to create a measuring place in order to carry out quality measurements, without significant influence of the environment. Therefore, electromagnetic absorbers for the frequency range of interest were installed. In places where electromagnetic interferences were observed, the necessary shielding with conductive plates was performed. Measuring configuration consists of spectrum analyzer, tracking generator, computer, coaxial cables, ultra-wideband dipole antenna, and enclosure under test. In order to perform measurements of shielding effectiveness, firstly, the signal level of the metal enclosure with the receiving antenna should be measured. Secondly, the signal level from the receiving antenna without the enclosure should be measured, under the same conditions. Therefore, the shielding effectiveness of enclosure can be found by determining the ratio between measurements. The measurements are carried out from the view point of the electromagnetic compatibility, in order to determine the shielding effectiveness of the enclosure at ultra-high and super high frequencies. Finally, the experimental results showed excellent agreement with the results obtained by the TLM method. According to that the measurements confirmed the results obtained by the TLM simulations; it can be noticed that computer modelling of metal structures is a very important. Above all, it is an effective tool in solving EMC problems even in the initial phase of designing an enclosure or some microwave structure.

Keywords: measurements, metal enclosure, rectangular aperture, TLM method, TLM wire model, shielding effectiveness.

EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA NUMERIČKOG TLM ŽIČANOG MODELA ZA ODREĐIVANJE EFIKASNOSTI OKLOPLJAVANJA METALNIM KUĆIŠTEM SA PRAVUGAONIM OTVORIMA

Nataša Nešić

Akademija tehničko-vaspitačkih strukovnih studija Niš, Katedra za Informaciono-komunikacione tehnologije - Odsek Niš, Srbija, natasa.nesic@akademijanis.edu.rs

Rezime: U ovom radu data je eksperimentalna i numerička analizira modela metalnog kućišta sa jednim otvorom na prednjem zidu. Analiza je izvršena pomoću numeričkih simulacija modela kućišta sa otvorom na prednjem zidu, i to za slučaj jednog pravougaonog otvora tipa prerez i slučaj istog kućišta sa nešto širim pravougaonim otvorom.

Prisustvo otvora na zidovima kućišta ima posebno važan uticaj na karakteristiku oklopljavanja kućištem. Da bi se u potpunosti procenilo u kojoj meri oklopljavanje omogućava da kućište funkcioniše u skladu sa standardima elektromagnetske kompatibilnosti važno je uzeti u obzir uticaj drugih parametara kao što su: magnetska permeabilnost i električna provodnost materijala od koga je kućište napravljeno, različite debljine zidova, oblik i veličina kućišta i dr. Primenom računarskog metoda koji za prostornu diskretizaciju elektromagnetskog polja koristi matrice transmisionih linija, Transmission-Line Matrix Method, skraćeno TLM metod, kreiran je model provodnog kućišta sa otvorom na zidu i sa prijemnom monopol antenom unutra. Dalje, prilikom praktičnih inženjerskih merenja prisutna je prijemna merna antena unutar kućišta. Za potrebe snimanja električnog polja obično se koristi monopol ili dipol antena, dok se za magnetska polja koristi okrugla, petlja antena. Kako bi se što vernije simuliralo kućište nad kojim se vrše testiranja u smislu elektromagnetske kompatibilnosti i verodostojno modelovala prijemna antena unutar kućišta, korišćen je i TLM žičani model prilikom kreiranja modela kućišta. Kao izvor pobude korišćen je incidentan ravanski talas vertikalne polarizacije. Kako bi se potvrdili numerički rezultati elektromagnetskog TLM solvera, sprovedena su merenja u laboratoriji. Pošto laboratorija ne poseduje anehoičnu sobu, bilo je potrebno formirati merno mesto u cilju sprovođenja kvalitetnih merenja, bez značajnog uticaja elektromagnetskih smetnji iz okoline. Obezbeđeni su i postavljeni elektromagnetski apsorberi za frekvencijski opseg od interesa. Na mestima na kojima je uočena elektromagnetska smetnja izvršena je neophodna ekranizacija provodnim pločama. Mernu konfiguraciju čine analizator spektra, treking generator, računar, koaksijalni kablovi, predajna širokopojasna Vivaldi antena i kućište koje se testira. Prilikom merenja karakteristike efikasnosti oklopljavanja, potrebno je izmeriti nivo signala metalnog kućišta sa prijemnom antenom, a potom, pod istim uslovima, meri se samo nivo iz prijemne antene bez kućišta, zatim se nalazi njihov međusobni odnos. Merenja su sprovedena sa stanovišta elektromagnetske kompatibilnosti u cilju određivanja efikasnosti oklopljavanja kućištem na ultra visokim i super visokim frekvencijama. Eksperimentalni rezultati su pokazali odlično slaganje sa rezultatima dobijenim TLM metodom. Na ovaj način, merenjima su potvrđeni rezultati dobijeni TLM simulacijama i time je pokazano da je računarsko modelovanje metalnih sklopova veoma važno i izuzetno efikasno oruđe u rešavanju problema elektromagnetske kompatibilnosti još u fazi projektovanja nekog mikrotalasnog sklopa ili kućišta.

Ključne reči: efikasnost oklopljavanja, metalno kućište, merenja, pravougaoni otvor, TLM metod, TLM žičani model.

1. UVOD

Još u procesu projektovanja elektronskog uređaja ili sistema mnogo je važno da se elektromagnetsko (EM) zračenje usaglasi ali i da se EM smetnje eliminišu. Kako bi se elektronska kola zaštitila od spoljašnjih EM smetnji, uobičajeno je da se smeštaju u zaštitno metalno kućište (Christopoulos, 1995). Ova kućišta mogu biti različitih veličina i debljine zidova, mogu imati različit oblik i broj otvora i načinjena su od materijala koji imaju različita električna i magnetska svojstva, na primer električnu provodnost i magnetsku permeabilnost. Posebno su važne grupe otvora, pojedinačni otvori, spojevi, prerezi za šrafove i kablove itd., (Mendez, 1978). Svrha otvora je svakojaka, na primer, za odvođenje viška toplote, dovođenje napajanja, kontrolu i pristup uređaju i dr. Upravo otvori na zidovima kućišta mogu imati dominantan uticaj na karakteristiku oklopljavanja kućištem, mada i uticaj drugih parametara treba uzeti u obzir, kako bi se u potpunosti procenilo u kojoj meri oklopljavanje omogućuje da sistem funkcioniše u skladu sa standardima elektromagnetske kompatibilnosti (Electromagnetic compatibility, EMC), (Christopoulos, 2007), (Nešić, 2017). Upravo zbog toga, efikasnost oklopljavanja (Shielding Effectiveness – SE) je veoma važan parametar kod određivanja imuniteti elektronskog uređaja na EM smetnje. Na vrednosti karakteristike SE metalnim kućištem mogu uticati, pored geometrije i materijala zaštitnog kućišta, priroda uređaja i komponenti koje se nalaze unutar kućišta, mehanizmi sprege signala smetnji sa EM poljem unutar kućišta, itd., (Nešić, 2017). Važan je pobudni incidentni talas, njegov pravac i polarizacija takođe mogu uticati na SE karakteristiku oklopljavanja (Nešić, Dončov & Rupčić, 2016). Pored toga, na SE karakteristiku može uticati žičana struktura koja ima ulogu da detektuje nivo EM polja u kućištu, na primer dipol ili monopol prijemna antena (Nešić & Dončov, 2016), uz korišćenje kompaktnog TLM žičanog modela za njihovo efikasno modelovanje (Nešić & Dončov, 2016) i (Nešić, 2017).

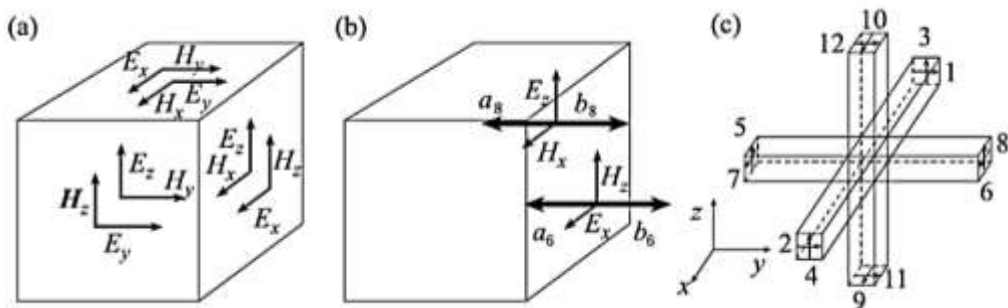
Razvijeno je više numeričkih metoda za modelovanje električnih sklopova i struktura. Metod koji se koristi u ovom radu je metod modelovanja pomoću matrica prenosnih vodova (Transmission-Line Matrix – TLM) ili TLM metod (Christopoulos, 1995).

2. TLM METOD

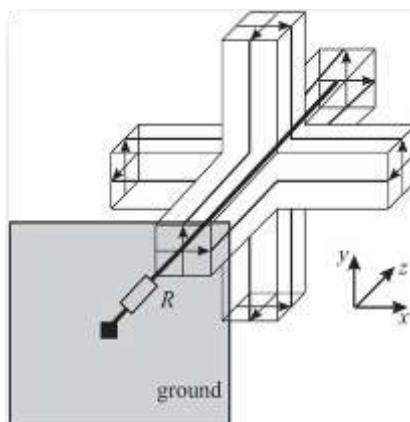
Numerički TLM metod je vrlo moćan za računarsko modelovanje elektromagnetskih polja. To je mrežni metod zasnovan na prostornoj diskretizaciji EM polja. TLM metod ima izvanrednu numeričku stabilnost a takođe je pogodan za modelovanje medija sa gubicima, disperzivnih i nelinearnih. TLM metod je zasnovan na mapiranju EM

polja u problem mreža. EM polje se modeluje talasnim impulsima koji se prostiru kroz mrežu transmisionih linija i rasejavaju se u čvorovima mreže. Električna polja su ekvivalentna naponima, dok su magnetska ekvivalentna strujama na mreži. Proces simulacije započinje pobuđivanjem TLM mreže naponskim impulsima u karakterističnim tačkama. Prostiranje ovih impulsa kroz mrežu dovodi do njihovog rasejavanja u čvorovima i granicama modela (Christopoulos, 1995), (Hofer, 1985).

Slika 1. (a) TLM ćelija, (b) amplitude EM talasa, (c) kondenzovani simetrični čvor (Nešić, 2017).



Slika 2. Žičani SCN čvor na koji je vezan otpornikom R u pravcu z -ose (Nešić, 2017).



Prednost TLM metoda ogleda se u modelovanju složenih struktura proizvoljne geometrije, u cilju izračunavanja i prikazivanja vremenske zavisnosti EM polja. Izveden iz Maksvelovih jednačina korišćenjem metode momenata i konačne integracije (Felsen, Mongiardo & Russer, 2009). Princip TLM metoda prikazan je na slici 1. U prvom koraku vrši se diskretizacija u kubične TLM ćelije u mreži. Slika 1. (a) predstavlja tangencijalno električno i magnetsko polje na površini svake TLM ćelije u mreži. Na slici 1. (b) predstavljene su amplitude električnih i magnetskih polja incidentnim i rasejanim talasima. Zatim, na slici 1. (c), TLM ćelija je predstavljena kao 12-to portni čvor poznat pod nazivom kondenzovani simetrični čvor (Symmetrical Condensed Node – SCN). Preko SCN čvorova mreža je povezana sa rasipnim i nedisperzivnim transmisionim linijama spojenim na svaki port (pristup) (Russer & Russer, 2014), (Nešić, 2017).

3. TLM ŽIČANI MODEL

Za opisivanje malih ali u električnom smislu veoma važnih geometrijskih struktura, veoma je pogodan TLM žičani model. Žičane antene, tipa monopol ili dipol, se kao male prijemne antene često koriste u kućištima u procesima merenja. Naime, njihovo prisustvo, dimenzije poluprečnika i dužine mogu uticati na karakteristiku oklopljavanja, posebno na pomeraj vrednosti frekvencija rezonancija kućišta (Nešić & Dončov, 2016). Ovo se može objasniti perturbacionom teorijom koja kaže da uneta zapremina u rezonatorsko kućište unosi određeni frekvencijski pomeraj (Pozar, 2021), što u ovom slučaju dovodi do pomeranja prve rezonantne frekvencije ka nižim frekvencijama (Nešić & Dončov, 2016). Za tanke žice čiji je prečnik manji ili jednak do 40% poprečnog preseka ćelije koja obuhvata žicu, TLM žičani model ima odličnu primenu (Trenkić, Włodarczyk & Scarammuza, 1999). Kada se izračuna struja kroz žičani segment, može se odrediti napon na otporniku monopol antene, slika 2. U cilju određivanja SE karakteristike,

TLM simulacije modela sa žičanom strukturom se izvršavaju dva puta. Prvo se simulira model kućišta sa žičanom strukturom, drugi put se modeluje žičana struktura bez kućišta (Nešić & Dončov, 2016).

Za numeričku TLM simulaciju modela kućišta sa pravougaonim otvorom korišćena je fina mreža za modelovanje otvora i kompaktni žičani TLM metod za opis modela prijemne monopol antene. Pobuda je ravanski talas vertikalno polarizovan koji se prostire u smeru y-ose, sa komponentom električnog polja u smeru z-ose.

4. FIZIČKI MODEL KUĆIŠTA

Kako bi se praktično proverili rezultati dobijeni računarskim modelovanjem primenom TLM metoda, napravljeno je metalno kućište istih dimenzija. Unutrašnje dimenzije kućišta su $(100 \times 100 \times 200) \text{ mm}^3$. Kućište je napravljeno tako da je prednja strana izmenjiva. Kućište je od bakra i zidovi su debljine $t = 2 \text{ mm}$. Napravljene su dve prednje ploče sa otvorom. Obe imaju pravougaoni otvor koji se nalazi na sredini ploče. Prva ima pravougaoni otvor tipa prorez, dimenzija $(100 \times 5) \text{ mm}^2$. Druga izmenljiva ploča ima dimenzije otvora $(50 \times 10) \text{ mm}^2$. Kućište je sa gornje strane izbušeno kako bi se u centru postavila tanka prijemna monopol antena dužine $l = 50 \text{ mm}$ i poluprečnika $r = 0,1 \text{ mm}$. Slika 3. (a) prikazuje merno mesto na kome je testirano kućište u laboratoriji gde su vršena merenja efikasnosti oklopljavanja kućištem.

5. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

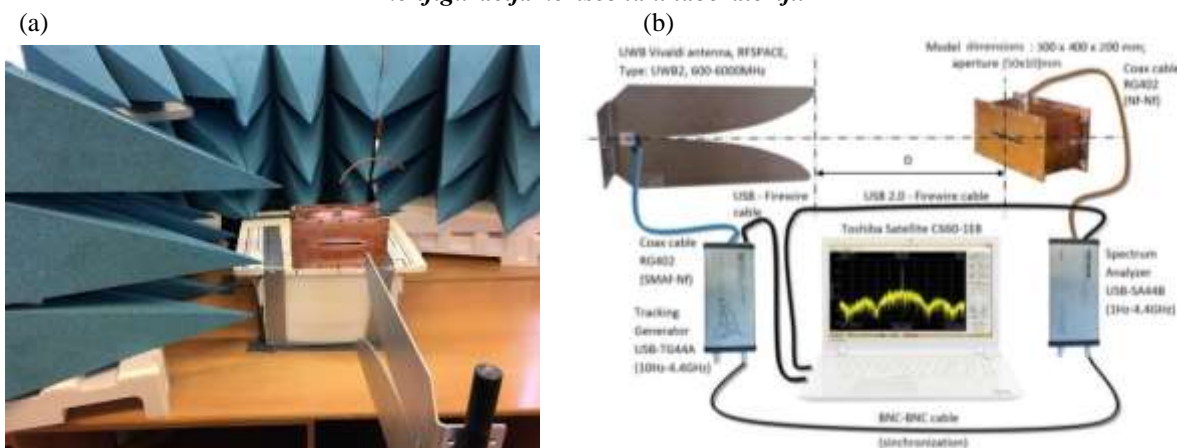
Za merenje EM zračenja elektronske opreme, kao i za testiranje otpornosti na spoljno zračenje koriste se gluve ili anehoične sobe tako što se uređaj/kućište koje se testira ozračuje kontrolisanim ravanskim talasom. Kada je prostor obložen radio-frekvencijskim (RF) apsorpcionim materijalom, minimiziraju se unutrašnje refleksije i uređaj koji se testira je izložen tačno određenom EM polju (Christopoulos, 1995), (Nuebel et al., 2000).

Merenja koja su predstavljena u ovom radu, sprovedena su za vreme trajanja studentskog boravka u Laboratoriji za VF merenja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacionih tehnologija u Osijeku u Hrvatskoj. Za potrebe mernog postupka kućište je postavljeno horizontalno, po široj strani je oslonjeno na merno mesto, kao na slici 3. (a). Kao izvor pobude korišćena je Vivaldi dipol antena koja je postavljena vertikalno i nalazi se u dalekom polju. Predajna antena Vivaldi je UWB2 sa mernim opsegom od 600 MHz do 6000 MHz, proizvođača *RFSPACE*.

Na slici 3. (b), prikazana je postavka merne konfiguracije koja je korišćena pri eksperimentalnoj proveri rezultata dobijenih TLM metodom. Od merne opreme korišćen je analizator spektra USB-SA44B sa opsegom od 1 Hz - 4.4 GHz i treking generator USB-TG44A sa radnim opsegom od 1 Hz - 4.4 GHz (Signal Hound). Oni su povezani međusobno, ali i sa računarom. Treking generator je povezan sa Vivaldi antenom dok je analizator spektra povezan putem kablova do antene u kućištu.

Izvršena su merenja karakteristike oklopljavanja prvo za slučaj kada kućište ima prorez. Zatim je promenjena prednja strana i postavljena ona druga sa otvorom dimenzija $(50 \times 10) \text{ mm}^2$. Ponovljen je merni postupak.

Slika 3. (a) Testirano kućište sa pravougaonim prorezom $(100 \times 5) \text{ mm}^2$ na mernom mestu; (b) merna konfiguracija korišćena u laboratoriji.

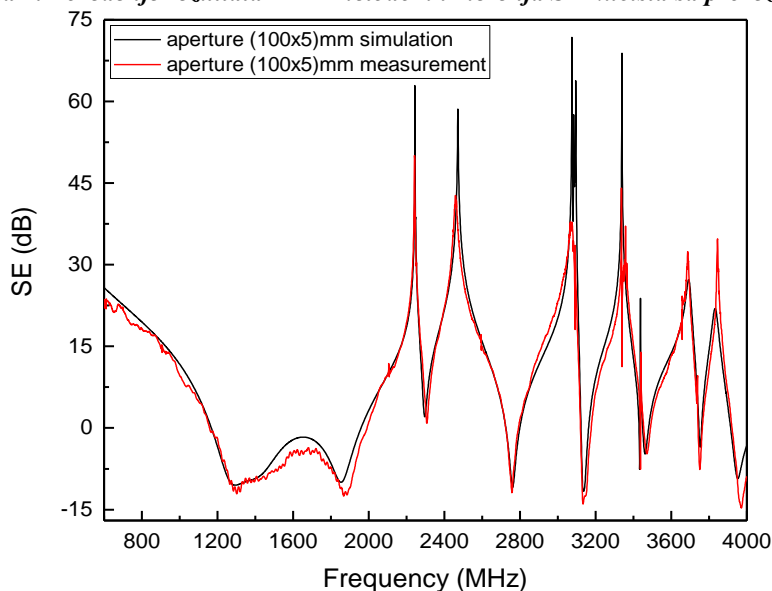


6. DISKUSIJA REZULTATA

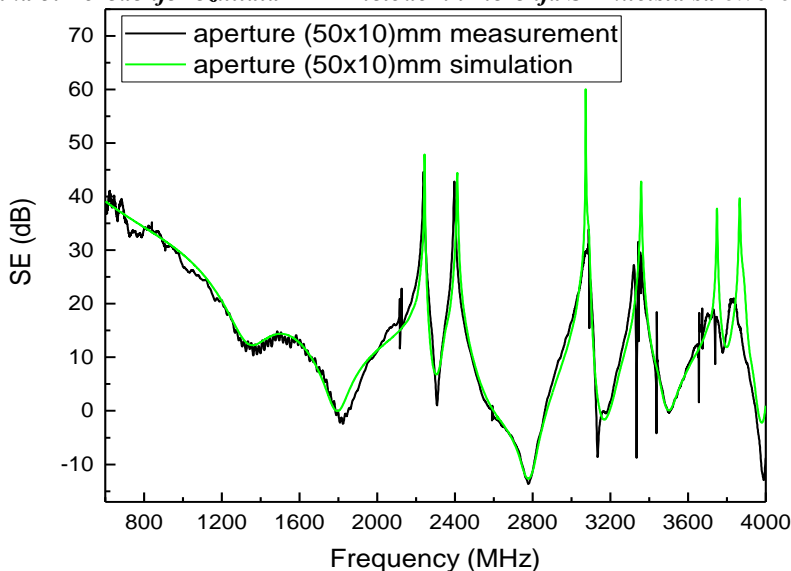
Prikazani se uporedni rezultati fine TLM mreže za modelovanje otvora i prijemne antene unutar kućišta i rezultati dobijeni merenjima. Na slikama 4 i 5 prikazani su upoređeni SE rezultati dobijeni TLM simulacijom i oni dobijeni merenjima. Uočava se odlično slaganje SE rezultata TLM simulacija i onih dobijenih merenjima datog kućišta.

Takođe, može se videti vrlo dobro slaganje SE karakteristika, sem po amplitudi nekih pikova dobijenih simulacijama koji imaju visoke vrednosti, jer dinamički opseg mernog sistema to nije mogao da isprati. Na slici 4 uočava se da se prva frekvencija rezonancije javila oko 1300 MHz, druga oko 1900 MHz, treća oko 2300 MHz itd. Vrednost SE na prvoj frekvenciji rezonancije, fr_1 , je negativna i ima vrednost oko -10 dB. Na negativnim vrednostima SE funkcija oklopljavanja nije zaštitna već, suprotno tome, pojačava jačinu EM smetnji od spolja umesto da unutrašnjost kućišta štiti od njih. Ovo je posebno izraženo na frekvencijama rezonancija kućišta. Može se uočiti da su i na višim i na nižim modovima koji se uspostavljaju unutar testiranog kućišta vrednosti karakteristike oklopljavanja negativne.

Slika 4. Poređenje rezultata TLM metodom i merenja SE kućišta sa prorezom.



Slika 5. Poređenje rezultata TLM metodom i merenja SE kućišta sa otvorom.



U drugom slučaju, kada kućište na prednjoj strani ima otvor dimenzija $(50 \times 10) \text{ mm}^2$, videti sliku 5, iako deluje da je SE karakteristika slična onoj na slici 4, uočavaju se izvesne razlike. Na slici 5, može se uočiti da prva frekvencija rezonancije ima pozitivnu vrednost SE, oko 12 dB. Druga frekvencija rezonancije koja je oko 1800 MHz ima vrednost SE oko 0 dB. Tek na višim rezonantnim modovima koji se uspostavljaju u kućištu ima negativnih SE vrednosti.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljeni su rezultati efikasnosti oklopljavanja kućištem u funkciji od frekvencije. Analizirano je kako veličina i različite dimenzije otvora na prednjem zidu kućišta utiču na SE karakteristiku, posebno sa stanovišta prve i druge frekvencije rezonancije. Zaključuje da kućište koje ima otvor dimenzija (50 x 10) mm² ima bolju zaštitnu funkciju sve do frekvencije 1,8 GHz, u poređenju sa istim koje ima prorez.

Može se zaključiti da se rezultati dobijeni merenjima i oni dobijeni numeričkim TLM modelom odlično slažu. Time je pokazano da je računarsko modelovanje metalnih sklopova veoma važno i izuzetno efikasno oruđe u rešavanju EMC problema još u fazi projektovanja nekog kućišta ili sklopa u mikrotalasnom opsegu frekvencija.

ZAHVALNICA

Merenja u ovom radu podržana su od strane EUROWEB+ projekta i od strane COST IC 1407.

LITERATURA

- Christopoulos, C. (1995). *The Transmission-Line Modelling (TLM) Method*. New Jersey: IEEE Press in assoc. with Oxford University Press. Piscataway.
- Christopoulos, C. (2007). *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*, 2nd ed., London, New York: CRS Press.
- Felsen, L.B., Mongiardo, M., & Russer, P. (2009). *Electromagnetic Field Computation by Network Methods*.
- Hofer W. J. R. (1985). *The Transmission-Line Matrix Method – Theory and Applications*. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 33(10), 882-893.
- Hound, S. USB-SA44B. Available: <https://signalhound.com/products/usb-sa44b/>.
- Hound, S. USB-TG44A. Available: <https://signalhound.com/products/usb-tg44a/>.
- Hound, S. Signal Hound Spike. Available: <https://signalhound.com/spike/>.
- Mendez, H. A. (1978). *Shielding theory of enclosures with apertures*. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, 20(2). 296–305.
- Nešić, N. (2017). *Numerical and experimental analysis of aperture arrays impact on the shielding effectiveness of metal enclosures in microwave frequency range*. Doctoral thesis, in Serbian. Singidunum University. Belgrade.
- Nešić, N. J., & Dončov, N. S. (2016). *Shielding Effectiveness Estimation by using Monopole-receiving Antenna and Comparison with Dipole Antenna*. *Frequenz DeGruyter*, no.5-6, 1-11.
- Nešić, N., Milovanović, B., Dončov, N., Mandrić-Radivojević, V., & Rupčić, S. (2017). *Improving Shielding Effectiveness of a Rectangular Metallic Enclosure with Aperture by Using Printed Dog-bone Dipole Structure*. *52nd Int. Scien. Conf. ICEST*. Niš, Serbia. 97-100.
- Nešić, N., Milovanović, B., Dončov, N., Rupčić, S. & Mandrić-Radivojević, V. (2017). *Improving Shielding Effectiveness of a Metallic Enclosure at Resonant Frequencies*. *13th TELSIKS*. Niš. 42-45.
- Nešić, N. J., Dončov, N.S., & Rupčić, S. M. (2016). *Analysis of Hexagonal and Square TLM Air-vent Models against Incident Plane Wave*. *Proceedings of the 1st International conference of Smart Systems and Technologies 2016*, Osijek, Croatia. 27-33. DOI: 10.1109/SST.2016.7765627
- Nešić, N. J., Dončov, N.S., & Rupčić, S. M. (2016). *Analysis of Incident Plane Wave Position on Shielding Effectiveness Using TLM Air-vent Model*. *3th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN*. Zlatibor, Serbia. 1-5. ISBN 978-86-7466-618-0.
- Nuebel, M. Li, J., Drewniak, J. L., DuBroff, R. E., Hubing, T. H., & Van Doren, T. P. (2000). *EMI from Airflow Aperture Arrays in Shielding Enclosures—Experiments, FDTD, and MoM Modelling*. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 42(3), 265-275.
- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*, 4th ed. Wiley. 48–162.
- Russer, P., & Russer, J. (2014). *Some Remarks on the Transmission Line Matrix (TLM) Method and Its Application to Transient EM Fields and to EMC Problems*. *Computational Electromagnetics - Retrospective and Outlook*. Singapore, Springer Science + Business Media.
- RFSPACE. Vivaldi UWB2. Available: <http://www.rfspace.com/RFSPACE/Antennas.html>.
- Trenkić, V., Wlodarczyk, A. J., & Scaramuzza, R. (1999). *A Modelling of Coupling between Transient Electromagnetic Field and Complex Wire Structures*. *Int. Journal of Num. Modelling*, 12(4).257-273.