

ANALIZA I TUMAČENJE MODELA FARADEJEVOG KAVEZA ZA ISPITIVANJE ELEKTROMAGNETSKE KOMPATIBILNOSTI

Nenad V. Munić ^{a,b}, Aleksandar M. Kovačević ^b

^a Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu,

^b Vojska Srbije, Tehnički opitni centar, Beograd

DOI: 10.5937/vojtehg62-3980

OBLAST: telekomunikacije

VRSTA ČLANKA: originalni naučni članak

Sažetak:

Ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti sredstava i sistema naoružanja i vojne opreme za potrebe Vojske Srbije, prema vojnim standardima SORS 1029/89 i SORS 1762/89, obavljaju se u Faradejevom kavezu. Faradejev kavez, usled reflektujućih zidova, poda i plafona, ima niz parazitnih rezonancija. U cilju unapređenja ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti, izvršeno je numeričko modelovanje kompletnog Faradejevog kaveza. Upoređivanjem rezultata simulacija i eksperimenata, detektovane su razne nesavršenosti kaveza i uključene u model.

Ključne reči: elektromagnetska kompatibilnost; Faradejev kavez; ekranizovan prostor; simulacija; rezonantne šupljine.

Uvod

Ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti sredstava i sistema naoružanja i vojne opreme (sredstva i sistemi NVO) za potrebe Vojske Srbije, prema vojnim standardima SORS 1029/89 (Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989a) i SORS 1762/89 (Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989b), obavljaju se u Faradejevom kavezu (ekranizovan prostor). Faradejev kavez je prostorija sa zidovima, podom i plafonom od metalne mreže ili lima, namenjena za elektromagnetsko razdvajanje ispitnog prostora od okoline (Savezni zavod za standardizaciju, 1997). Pri tome, Faradejev kavez ne predstavlja idealan prostor za ispitivanje jer ima nesavršene spojeve. Naime, da bi se Faradejev kavez mogao koristiti, potrebno je da ima određen broj otvora, i to: za pristup radnog osoblja, za napajanje električnom energijom, za komunikacione priključke, za ventilaciju itd. Takođe, pri realizaciji Faradejevog kaveza veoma su bitni upotrebljeni materijali (Keiser, 2005). Tako, za statička i spo-

ropromenljiva magnetska polja primenjuju se materijali koji imaju veliku magnetsku permeabilnost, dok se za visoke frekvencije koriste materijali sa velikom specifičnom provodnošću.

Poznato je u literaturi (Bronaugh, Lambdin, 1988), (Camell, Koepke, Rakoski, Smith, 1996) da na rezultate ispitivanja u ekranizovanim prostorijama utiču refleksije od zidova, koje zavise od tipa, položaja i frekvencije izvora, kao i od provodnosti i permeabilnosti zidova kaveza, a ne zavisi od debljine zidova (Keiser, 2005). Refleksije od zidova dovode do rezonancija kaveza, koje značajno utiču na rezultate ispitivanja uređaja, jer značajno menjaju strukturu polja. Pri tome, rezonantne učestanosti su specifične za svaki kavez, ali zavise i od konkretnog sredstva koje se ispituje u kavezu.

U cilju unapređenja rada Laboratorije za elektromagnetsku kompatibilnost u Tehničkom opitnom centru (TOC-u) (<http://www.toc.vs.rs>), pristupilo se ispitivanjima uticaja Faradejevog kaveza na rezultate merenja (Đorđević, et al, 2011, pp.965-968) (Đorđević, et al, 2012, pp.1115-1118). Osnovni cilj ovih ispitivanja je simulacija polja u kavezu, posebno u okolini rezonantnih učestanosti, kako bi se mogli predvideti rezultati merenja sredstava NVO u elektromagnetski gluvoj sobi ili bilo u kom drugom okruženju. Simulacioni (računarski) modeli kaveza su razvijani u programu Wipl-D (<http://www.wipl-d.com>), u iteracijama, poredeći numeričke rezultate sa merenjima, s obzirom na to da se naišlo na niz teškoća zbog složene konstrukcije i nesavršenosti kaveza.

Predmet ovog rada je prikaz tih simulacionih modela, kao i odgovarajućih rezultata proračuna i merenja.

Konstrukcija kaveza

Kavez koji se koristi u TOC-u napravljen je pre oko tri decenije. Kavez je montažno-demontažnog tipa. Sastavljen je od sendvič-panela (drvenih ploča obloženih pocinkovanim limom), dimenzija 1,25 m x 2,5 m. Osnova kaveza je kvadratna. Unutrašnje dimenzije osnove su 3,76 m x 3,76 m, a visina kaveza je 2,5 m.

Plafon kaveza je spušten, kako bi se vizuelno sakrile instalacije za osvetljenje. Spušteni plafon se sastoji od plastificiranih aluminijumskih profila (lamperije), koji idu celom dužinom kaveza (slika 1a). Lamperija je labavo prikačena na horizontalne gvozdene nosače. Nosači su različitih dužina, a zavrtnjima su obešeni o plafon kaveza.

Na kavezu postoje četiri ventilaciona otvora (dva otvora na plafonu i dva na jednom zidu). Ventilacioni otvori su urađeni u obliku talasovodnog saća (slika 1b). Kavez u jednom uglu ima jednokrillna vrata (slika 2), sa kontaktnim oprugama od feder-bronze.



a)



b)

Slika 1 – Elementi Faradejevog kaveza: a) lamperija, b) ventilacioni otvor
Figure 1 – Elements of a Faraday cage: a) strips, b) ventilation opening

Prilikom merenja, u kavezu se može nalaziti sto obložen uzemljenim limovima, antena, ispitivani uređaj i druga oprema. Međutim, u svim situacijama prikazanim u ovom radu, kavez je bio prazan, osim što se u njemu nalazila samo jedna monopol-antena (slika 2), priključena na konektorsko polje kaveza (priključno polje).



Slika 2 – Položaj horizontalne monopol-antene u Faradejevom kavezu
 Figure 2 – Position of a horizontal monopole antenna in a Faraday cage

Gubici ploča kaveza

Pri učestanostima reda veličine nekoliko desetina megaherca, u potpunosti je izražen površinski efekat u limovima od kojih je kavez sačinjen. Međutim, debljina sloja cinka je relativno mala (nekoliko mikrometara), tako da i u gvožđu postoje značajni gubici. Za modelovanje ovih gubitaka, usvojeno je da specifična provodnost zidova, podova i plafona kaveza bude $\sigma = 10 \text{ MS/m}$, kao i da je provodnik magnetski materijal, relativne permeabilnosti $\mu_r = 100$, što odgovara permeabilnosti gvožđa za male signale. Ti podaci su posredno provereni na sledeći način. Paralelno zidu kaveza postavljena je žica, koja sa zidom obrazuje vod. Vod je na jednom kraju vezan na analizator mreža, a otvoren na drugom kraju. Izmeren je ulazni koeficijent refleksije voda, pa su, simulacijama u programu Microwave Office (<http://www.awrcorp.com>), gubici podešavani tako da se dobije poklapanje proračuna sa rezultatima eksperimenta.

Gubici sastava ploča kaveza

Otkrivanje neispravnih sastava rađeno je pomoću uređaja za detekciju diskontinuiteta oklopa Faradejevog kaveza EATON-3500. Princip merenja je zasnovan na generisanju jake struje učestanosti od 106 kHz koja se, preko elektroda, injektuje u kavez sa spoljašnje strane (Eaton Corporation Electronic Instrumentation Division, 1988). Pomoću magnetske sonde, u

unutrašnjosti kaveza se detektuje magnetsko polje, koje je izrazito jako na mestima loših sastava. Dominantna mesta gubitaka nalaze se na sastavima poda i zida, kao i na sastavima ventilacionih otvora sa zidovima.

U programu Wipl-D, gubici na lošim spojevima modelovani su uzanim pločama (trakama), postavljenim duž spojeva. Pri tome, menjana je specifična provodnost materijala od koga su te trake sačinjene. Probanjem je ustanovljeno da se najbolje slaganje sa eksperimentom dobija ako se usvoji da je specifična provodnost tih traka veoma mala, reda veličine $\sigma = 1 \mu S/m$ i manja. To odgovara potpunom gubitku kontakta, odnosno situaciji kada su u modelu trake potpuno izbačene.

Rezonancije kaveza

Prazan kavez je, praktično, rezonantna šupljina nastala pregrađivanjem pravougaonog talasovoda. Ako se Dekartov koordinatni sistem postavi kao na slici 3, teorijske rezonantne učestanosti ove šupljine (Đorđević, Tošić, 2006), u opsegu frekvencija do 110 MHz, date su u tabeli 1.

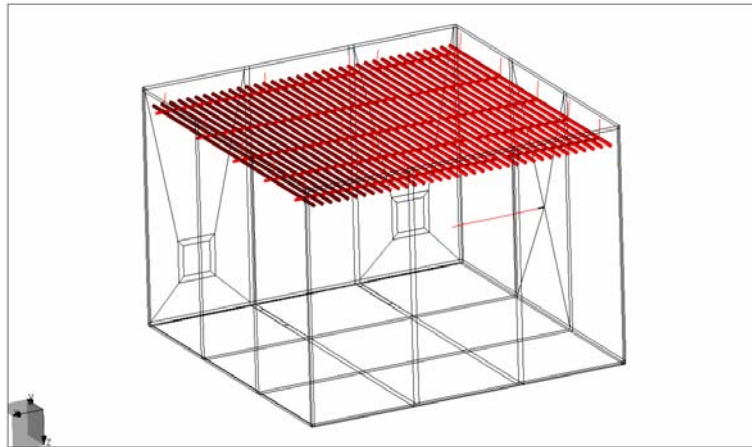
Tabela 1 – Teorijske rezonantne učestanosti kaveza
Table 1 – Theoretical resonant frequencies of a cage

Mod	f [MHz]
TE ₁₁₀	56,42
TE ₁₀₁ , TE ₀₁₁	72,05
TE ₁₁₁	82,35
TE ₂₁₀ , TE ₁₂₀	89,20
TE ₂₀₁ , TE ₀₂₁	99,82
TE ₁₂₁ , TE ₂₁₁	107,51

U okolini rezonancija, kavez svojim prisustvom znatno utiče na rezultate ispitivanja uređaja jer drastično menja strukturu polja i unosi gubitke.

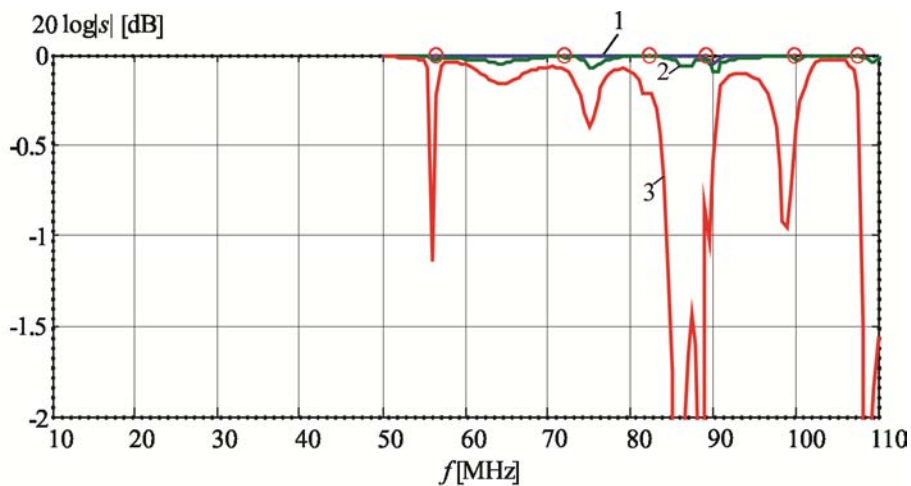
Na zidu kaveza nalazi se koso postavljena monopol-antena dužine 1,014 m. Na slici 4 prikazani su rezultati simulacije za koeficijent refleksije tog monopola. Procenjeni gubici su sukcesivno uključivani u model kaveza. Pretpostavljeno je da su zidovi kaveza sačinjeni od homogenog materijala.

Kada se u modelu zanemare gubici, ulazna impedansa antene je čisto reaktivna (kriva 1), pa je $|s_{11}| = 1$ (0 dB). Kada postoje gubici usled površinskog efekta, tada je $|s_{11}| < 1$, pa se u dijagramu na slici 4 vide jasno izražene rezonancije (kriva 2), čiji se položaji relativno dobro poklapaju sa rezonantnim učestanostima iz tabele 1 (koje su označene tačkama na apscisi).



Slika 3 – Početni model Faradejevog kaveza i horizontalne monopol-antene (u programu Wipl-D)
 Figure 3 – Initial model of a Faraday cage and a horizontal monopole antenna (in the Wipl-D program)

Modelovanjem procepa, rezonancije (koje se vide u modulu koeficijenta refleksije monopola) postaju izraženije (kriva 3 na slici 4). Osim toga, dolazi do izvesnog pomeranja rezonantnih učestanosti, što znači da procepi utiču i na gubitke, i na strukturu rezonantnog polja.



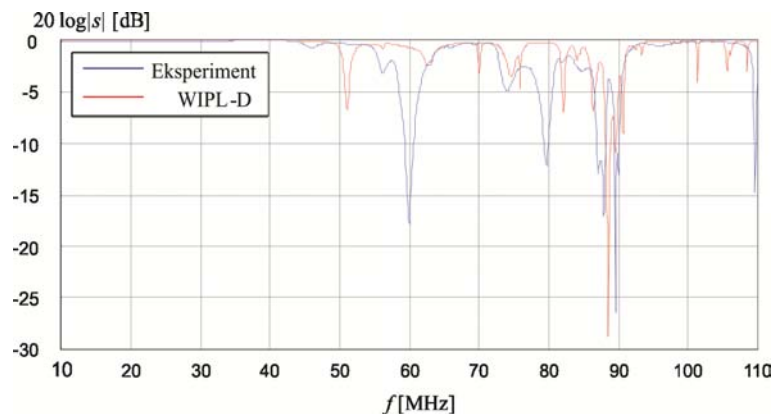
Slika 4 – Modul koeficijenta refleksije monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez bez gubitaka (kriva 1), sa gubicima usled površinskog efekta (kriva 2) i sa gubicima usled površinskog efekta i procepima (kriva 3)
 Figure 4 – Module of the reflection coefficient of the monopole antenna in the cage, as a function of frequency, for a cage without losses (curve 1), with losses due to the skin effect (curve 2) and with losses due to the skin effect and gaps (curve 3)

Model kaveza

Početni model kaveza

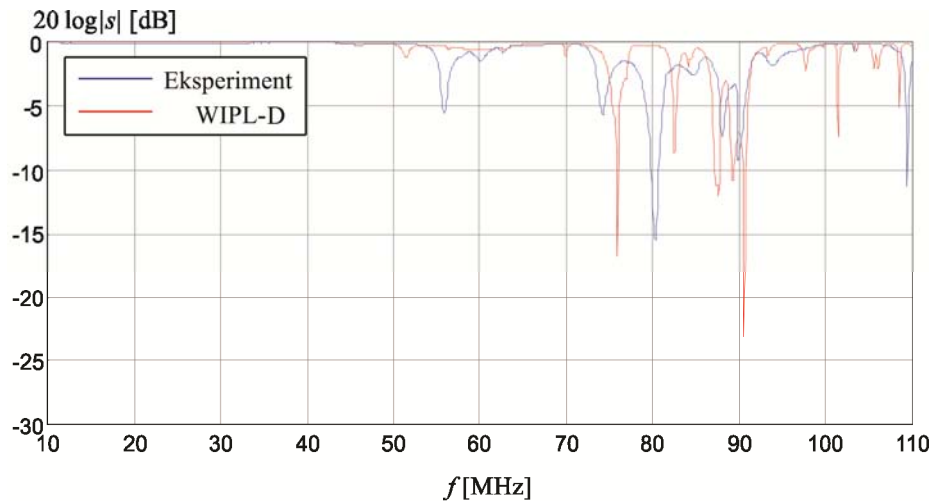
Na osnovu obavljenih ispitivanja (Đorđević, et al, 2011, pp.965-968), početni simulacioni model kaveza u programu Wipl-D sastoji se od ploča sa gubicima (slika 3). U model su uključeni ventilacioni otvori na zidu, kao i gubici zbog loših sastava ploča (modelovanjem sastava uzanim trakama specifične provodnosti $1 \mu\text{S/m}$). Aluminijski profili (lamperija), nosači i zavrtnji modelovani su žičanim provodnicima.

Na slikama 5 i 6 prikazani su rezultati simulacija i merenja koeficijenta refleksije koso i horizontalno postavljenog monopola, respektivno (Đorđević, et al, 2011, pp.965-968). Na slikama se može videti da se eksperimentalni rezultati kvalitativno poklapaju sa rezultatima simulacije u programu Wipl-D, ali da kvantitativno slaganje nije svuda najbolje. Naime, eksperimentalni rezultati pokazuju izraženije rezonancije, kao da su gubici drastično veći, a veći je i broj rezonantnih učestanosti. Glavni uzrok povećanih gubitaka i dodatnih rezonancija je lamperija koja u simulacionim modelima nije adekvatno predstavljena. U realnosti, aluminijski profili su u obliku ploča koje su na krajevima povijene ka unutrašnjosti. U početnom modelu takvi profili su aproksimirani žičanim provodnicima. Detaljnije modelovanje lamperije zahtevalo bi upotrebu velikog broja spojeva žica i ploča (veza nosača lamperije i lamperije), što bi usložnjavalo model i drastično povećalo broj upotrebljenih nepoznatih, kao i vreme potrebno za izvršenje simulacije. Osim toga, za svaki nosač bilo bi potrebno eksperimentalno proveriti kvalitet kontakta sa kavezom, a za svaku aluminijsku ploču proveriti da li, eventualno, postoji galvanski kontakt sa nosačima i gde je kontakt lociran, što bi zahtevalo obimna ispitivanja.



Slika 5 – Modul koeficijenta refleksije kose monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez sa lamperijom

Figure 5 – Module of the reflection coefficient of the inclined monopole antenna in the cage, as a function of frequency for the cage with strips



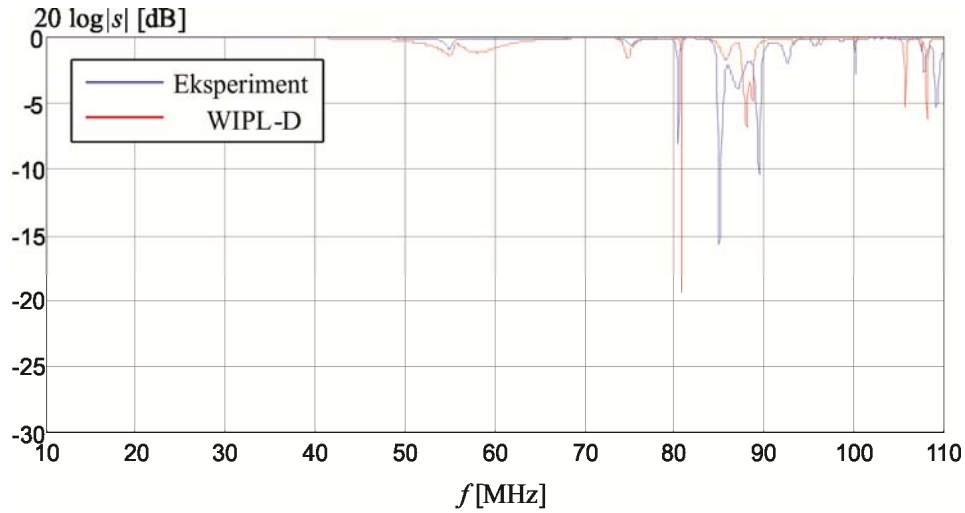
Slika 6 – Modul koeficijenta refleksije horizontalne monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez sa lamperijom

Figure 6 – Module the reflection coefficient of the horizontal monopole antenna in the cage, as a function of frequency for the cage with strips

Uprošćeni model kaveza

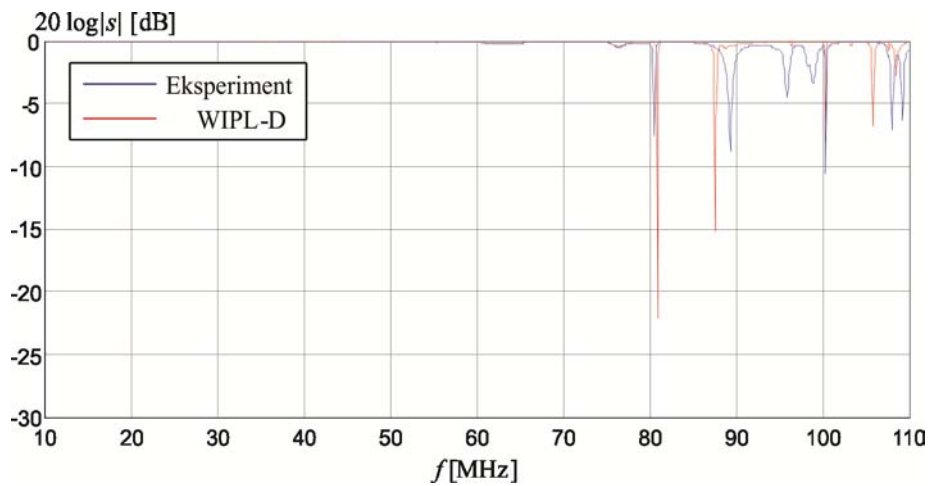
U cilju dobijanja jednostavnijeg, ali pouzdanijeg simulacionog modela, odnosno da bi se ostvarilo bolje predviđanje osobina kaveza, aluminijski profili su skinuti sa nosača. U kavezu su ostali samo nosači lamperije i zavrtnji kojima su oni obešeni o plafon.

Rezultati merenja i odgovarajućeg simulacionog modela su dati na slikama 7 i 8. Na tim slikama se može uočiti izostanak većine parazitnih rezonancija koje postoje na slikama 5 i 6. Takođe, gubici kaveza su znatno manji, posebno na rezonantnim učestanostima kaveza. Na pojedinim frekvencijama, na primer u opsegu od 90 MHz do 100 MHz, u merenjima se javljaju parazitne rezonancije, koje u rezultatima simulacije ne postoje. Analizirajući model kaveza, primećuje se da, slično početnom modelu, aproksimacija nosača lamperije odgovarajućim žičanim provodnicima ne odgovara realnom obliku profila nosača, koji liči na ćirilično slovo „П“. Preciznije modelovanje nosača lamperije provodnim pločama značajno bi usložnjavalo model usled velikog broja spojeva provodnih ploča (spojevi nosača lamperije i zavrtanja kojima su oni obešeni o plafon), što bi povećalo vreme potrebno za izvršenje simulacije. Osim toga, i dalje ostaje otvoreno pitanje kvaliteta kontakata između nosača i plafona kaveza.



Slika 7 – Modul koeficijenta refleksije kose monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez bez lamperije

Figure 7 – Module of the reflection coefficient of the inclined monopole antenna in the cage as a function of frequency for the cage without strips



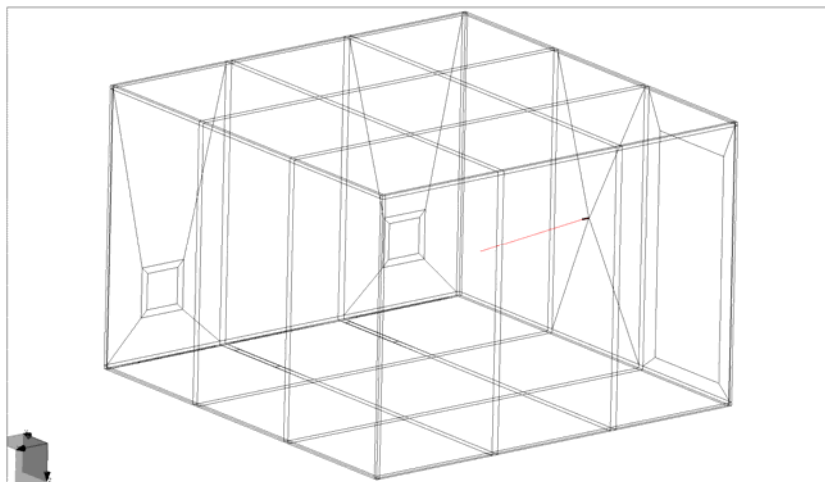
Slika 8 – Modul koeficijenta refleksije horizontalne monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez bez lamperije

Figure 8 – Module of the reflection coefficient of the horizontal monopole antenna in the cage as a function of frequency for the cage without strips

Konačni model kaveza

Da bi se izbegla neodređenost koju unose nosači lamperije, iz kaveza su uklonjeni i ti nosači, kao i zavrtnji. Takav kavez praktično ima oblik paralelopipeda čije rezonantne učestanosti možemo teorijski proračunati (Đorđević, Tošić, 2006). Konačni model kaveza realizovan u programu Wipl-D je prikazan na slici 9.

Rezultati simulacije u programu Wipl-D i eksperimentalni rezultati prikazani su na slikama 10 i 11. Na osnovu slika se može uočiti veoma dobro poklapanje rezultata simulacije i eksperimenta, ne samo kvalitativno, već i kvantitativno.



Slika 9 – Konačni model kaveza sa horizontalnom monopol-antonom u kavezu (u programu Wipl-D)

Figure 9 – Final model of the cage with the horizontal monopole antenna in the cage (in the Wipl-D program)

U tabelama 1 i 2 date su teorijske rezonantne učestanosti kaveza, kao i rezonantne učestanosti dobijene merenjem (eksperimentalno) i simulacijom. U rezultatima merenja i simulacija se ne vidi rezonancija TE_{111} kada je antena horizontalna, jer je sprega između antene i rezonantnog polja slaba. U tabelama su date i relativne razlike između frekvencija. Vidi se da je relativna razlika u odnosu na teorijske učestanosti manja od 1 % za sve modove osim za TE_{101} i TE_{011} , za koje je razlika manja od 5 %. Relativna razlika između rezultata merenja i simulacija je manja od 1 %. Bolje slaganje između rezultata merenja i simulacija nego slaganje sa teorijskim rezonantnim učestanostima može se objasniti lošim kontaktima između ploča. Ti kontakti su modelovani u programu Wipl-D, ali teorijski rezultati važe samo za idealnu rezonantnu šupljinu.

Tabela 2 – Relativna greška rezonantne učestanosti kose monopol-antene za kavez bez lamperije, nosača lamperije i zavrtnja

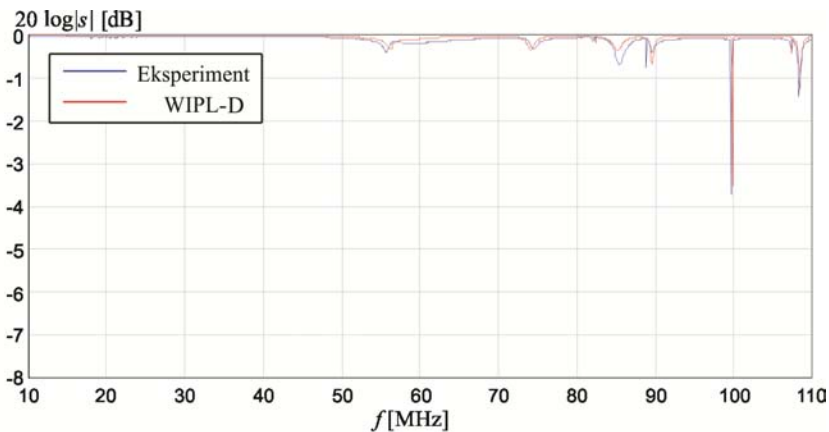
Table 2 – Relative error of resonant frequencies of the inclined monopole antenna for the cage without strips, strip carriers and screws

<i>Mod</i>	<i>f [MHz] Teor.</i>	<i>f [MHz] Eksper.</i>	<i>f [MHz] Wipl-d</i>	δ [%] <i>Teor. / Eksper.</i>	δ [%] <i>Teor. / Wipl-d</i>	δ [%] <i>Eksper. / Wipl-d</i>
TE ₁₁₀	56,42	55,6	56,1	0,57	0,57	0,90
TE ₁₀₁ , TE ₀₁₁	72,05	74,3	74,1	3,12	2,85	0,27
TE ₁₁₁	82,35	82	82,3	0,43	0,06	0,37
TE ₂₁₀ , TE ₁₂₀	89,20	89,6	89,6	0,45	0,45	0,00
TE ₂₀₁ , TE ₀₂₁	99,82	99,6	99,8	0,22	0,02	0,20
TE ₁₂₁ , TE ₂₁₁	107,51	107,3	107,4	0,20	0,10	0,09

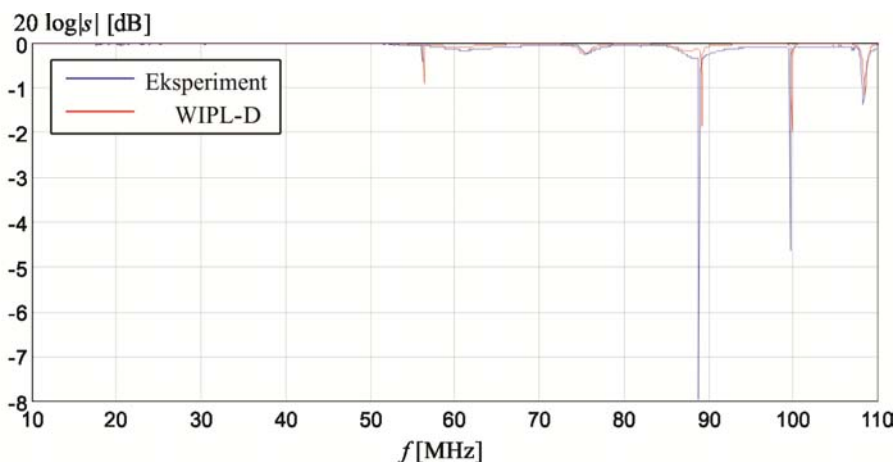
Tabela 3 – Relativna greška rezonantne učestanosti horizontalne monopol-antene za kavez bez lamperije, nosača lamperije i zavrtnja.

Table 3 – Relative error of resonant frequencies of the horizontal monopole antenna for the cage without strips, strip carriers and screws

<i>Mod</i>	<i>f [MHz] Teor.</i>	<i>f [MHz] Eksper.</i>	<i>f [MHz] Wipl-d</i>	δ [%] <i>Teor. / Eksper.</i>	δ [%] <i>Teor. / Wipl-d</i>	δ [%] <i>Eksper. / Wipl-d</i>
TE ₁₁₀	56,42	56,1	56,4	0,04	0,04	0,53
TE ₁₀₁ , TE ₀₁₁	72,05	75,7	75,3	5,07	4,51	0,53
TE ₁₁₁	82,35	/	/	/	/	/
TE ₂₁₀ , TE ₁₂₀	89,20	88,8	89,2	0,45	0,00	0,45
TE ₂₀₁ , TE ₀₂₁	99,82	99,6	99,9	0,22	0,08	0,30
TE ₁₂₁ , TE ₂₁₁	107,51	108,3	108,5	0,73	0,92	0,18



Slika 10 – Modul koeficijenta refleksije kose monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez bez lamperije, nosača lamperije i zavrtnja
Figure 10 – Module of the reflection coefficient of the inclined monopole antenna in the cage as a function of frequency for the cage without strips, strip carriers and screws



Slika 11 – Modul koeficijenta refleksije horizontalne monopol-antene u kavezu, u funkciji učestanosti, za kavez bez lamperije, nosača lamperije i zavrtnja
 Figure 11 – Module of the reflection coefficient of the horizontal monopole antenna in the cage as a function of frequency for the cage without strips, strip carriers and screws

Zaključak

U radu je prikazan razvoj simulacionih modela Faradejevog kaveza. Poboljšanja modela dobijana su poredeći rezultate simulacija i merenja, detektujući, pri tome, uzročnike povećanih gubitaka i parazitnih rezonancija. Uzročnici su uklanjani, jedan po jedan. Konačan model je obuhvatio gubitke usled površinskog efekta u pločama, od kojih je kavez napravljen. Gubici su dobijeni merenjem, a eksperimentalno su detektovana i mesta curenja na sastavima ploča, oko ventilacionih otvora i ulaznih vrata.

Za finalne modele, rezultati simulacija i merenja se dobro slažu kvalitativno i kvantitativno. Naime, rezonancije u rezultatima simulacija imaju iste položaje i iste dubine kao i u rezultatima merenja. Pri tome, relativna razlika između rezultata merenja i simulacija je manja od 1%.

U daljem radu može se očekivati da će biti ostvarljivo da se, na osnovu merenja i simulacija, identifikuju ekvivalentni izvori koji opisuju ispitivani uređaj. To bi omogućilo karakterizaciju ispitivanog uređaja u proizvoljnom elektromagnetskom okruženju, a time obezbedilo i poređenje rezultata dobijenih u različitim laboratorijama.

Literatura

Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989, *Elektromagnetske smetnje, MERENJA, SORS 1762/89*, Beograd, Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA.

Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989, *Elektromagnetske smetnje, ZAHTEVI, SORS 1029/89*, Beograd, Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA.

Bronaugh, E., Lambdin, W., 1988, *Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility: Electromagnetic Interference Test Methodology and Procedures*, Gainesville, VA, Interference Control Technologies, Inc.

Camell, D., Koepke, G., Rakoski, B., Smith, R., 1996, *A standard source method for reducing antenna factor errors in shielded room measurements*, NIST. Tech. Note 1382.

Đorđević, A., Kovačević, A., Munić, N., 2011, Modelovanje Faradejevog kaveza za ispitivanje elektromagnetske kompatibilnosti, pp.965-968, *Zbornik radova 19. konferencije TELFOR*, Beograd.

Đorđević, A., Kovačević, A., Munić, N., Stevanović, M., 2012, Poboljšano modelovanje Faradejevog kaveza za ispitivanje elektromagnetske kompatibilnosti, pp.1115-1118, *Zbornik radova 20. konferencije TELFOR*, Beograd.

Đorđević, A., Tošić, D., 2006, *Mikrotalasna tehnika*, Beograd, Akademska misao.

Eaton Corporation Electronic Instrumentation Division, 1988, *Eaton 3500 Shielded Enclosure Leak Detection System Operation and Maintenance Manual, Preliminary*, Los Angeles, CA, USA.

Keiser, B., 2005, *Principles of electromagnetic compatibility*, Dedham, MA, USA, Artech House.

Microwave Office 8.00, Applied Wave Research (2008) Preuzeto sa www.awrcorp.com

Savezni zavod za standardizaciju, 1997, *Međunarodni elektrotehnički IEC rečnik sa terminima na srpskom jeziku – elektroenergetika, elektronika i telekomunikacije*, Beograd, Savezni zavod za standardizaciju.

<http://www.toc.vs.rs>

<http://www.wipl-d.com>

ANALYSIS AND INTERPRETATION OF THE MODEL OF A FARADAY CAGE FOR ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY TESTING

FIELD: Telecommunications

ARTICLE TYPE: Original Scientific Paper

Summary:

In accordance with SORS 1029/89 and SORS 1762/89 military standards, electromagnetic compatibility tests of equipment and weapon systems and military equipment of the Serbian Army are carried out in a Faraday cage. A Faraday cage has many parasitic resonances due to the reflective walls, floor, and ceiling. In order to improve electromagnetic compatibility tests, a complete Faraday cage was modeled. Various imperfections of the cage were detected by comparing the results of simulations and experiments, and they were included into the model.

Introduction

In order to improve the work of the Laboratory for Electromagnetic Compatibility Testing in the Technical Test Center (TTC), we investi-

gated the influence of the Faraday cage on measurement results. The primary goal of this study is the simulation of the fields in the cage, especially around resonant frequencies, in order to be able to predict results of measurements of devices under test in the anechoic chamber or in any other environment. We developed simulation (computer) models of the cage step by step, by using the Wipl-D program and by comparing the numerical results with measurements as well as by resolving difficulties due to the complex structure and imperfections of the cage.

The subject of this paper is to present these simulation models and the corresponding results of the computations and measurements.

Construction of the cage

The cage is made of steel plates with the dimensions 1.25 m x 2.5 m. The base of the cage is a square; the footprint interior dimensions are 3.76 m x 3.76 m, and the height is 2.5 m. The cage ceiling is lowered by plasticized aluminum strips. The strips are loosely attached to the carriers which are screwed to the ceiling. The cage has four ventilation openings (two on the ceiling and two on one wall), made of honeycomb waveguide holes. In one corner of the cage, there is a single door with springs made of beryllium bronze.

For frequencies of a few tens of MHz, the skin effect is fully developed in the cage walls. By measuring the input impedance of the wire line parallel to a wall of the cage, we calculated the surface losses of the cage plates.

In addition, we used a magnetic probe to detect shield discontinuities. We generated a strong current at a frequency of 106 kHz outside the cage and measured the magnetic field inside the cage at the places of cage shield discontinuities. In this paper, we showed the influence of these places on the measurement results, especially on the qualitative and quantitative changes of the cage resonant frequencies.

Model of the cage

On the basis of the testing, the initial simulation model of the cage in the Wipl-D program consists of plates with losses, including losses at plate junctions, wall ventilation openings, aluminum profiles, profile carriers, and screws. The analysis showed that this model is not satisfactory.

To obtain a more accurate model of the cage, we need the additional and more precise model of the lowered ceiling. That would complicate the model and require a lot of additional testing.

For obtaining a simpler, but more reliable simulation model, we dismounted the aluminum profiles from the carriers. Thereafter, the agreement between the simulation and the experimental results was better than for the initial model, but still is not good enough, due to the uncertainties caused by the strips carriers and the screws.

Final model of the cage

To avoid the uncertainty due to the strips carriers, we removed the carriers and the screws from the cage. A very good matching of the

simulation and the experimental results was achieved. We showed that the relative difference of the resonant frequencies between simulation and measurement is less than 1%. However, the relative difference of resonant frequency between simulation or measurement and theoretical results is also less than 1%, except for TE_{101} and TE_{011} modes, for which the relative difference is under 5%. We explained the exception by the influence of the places of the cage shield discontinuities on the measurement results.

Conclusion

The results of the simulations and the measurements for the final model show good agreement, both qualitatively and quantitatively. We showed that the resonant frequencies in the simulations and the measurement results have same positions and depths. Also, the relative differences of the resonant frequencies are less than 1 %.

As future work, we will provide a technique for the identification of equivalent sources that represent the device under test. This would enable a characterization of the tested device in an arbitrary electromagnetic environment and allow a comparison of results obtained in different laboratories.

Key words: electromagnetic compatibility; Faraday cage; shielded enclosures; simulation; resonant cavities.

Datum prijema članka/Paper received on: 04. 06. 2013.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa/Manuscript corrections submitted on: 10. 10.2013.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje/ Paper accepted for publishing on: 12. 10. 2013.