Spektralna djelotvornost kućišta s otvorima

Alilović, Viktorija

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:394715

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

SPEKTRALNA DJELOTVORNOST KUĆIŠTA S OTVORIMA

Diplomski rad

Viktorija Alilović

Osijek, 2018.

Sadržaj

1. UVOD 1

2. TEORIJA OKLAPANJA OD ELEKTROMAGNETSKOG VALA 3

2.1. Elektromagnetski val 3

2.1.1. Diferencijalni oblik Maxwellovih jednadžbi 3

2.1.2. Jednadžbe elektromagnetskih valova 4

2.2. Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) i oklapanje 6

2.3. Djelotvornost oklapanja 10

2.3.1. Frekvencije rezonancija metalnih kućišta 12

2.3.2. Spektralna djelotvornost kućišta s otvorima 13

3. MJERENJA DJELOTVORNOSTI OKLAPANJA 20

3.1. Metalna kućišta – Model I, II, III i IV 20

3.2. Metoda I 24

3.3. Metoda II A 25

3.4. Metoda II B 26

3.5. Rezultati mjerenja 27

4. ZAKLJUČAK 33

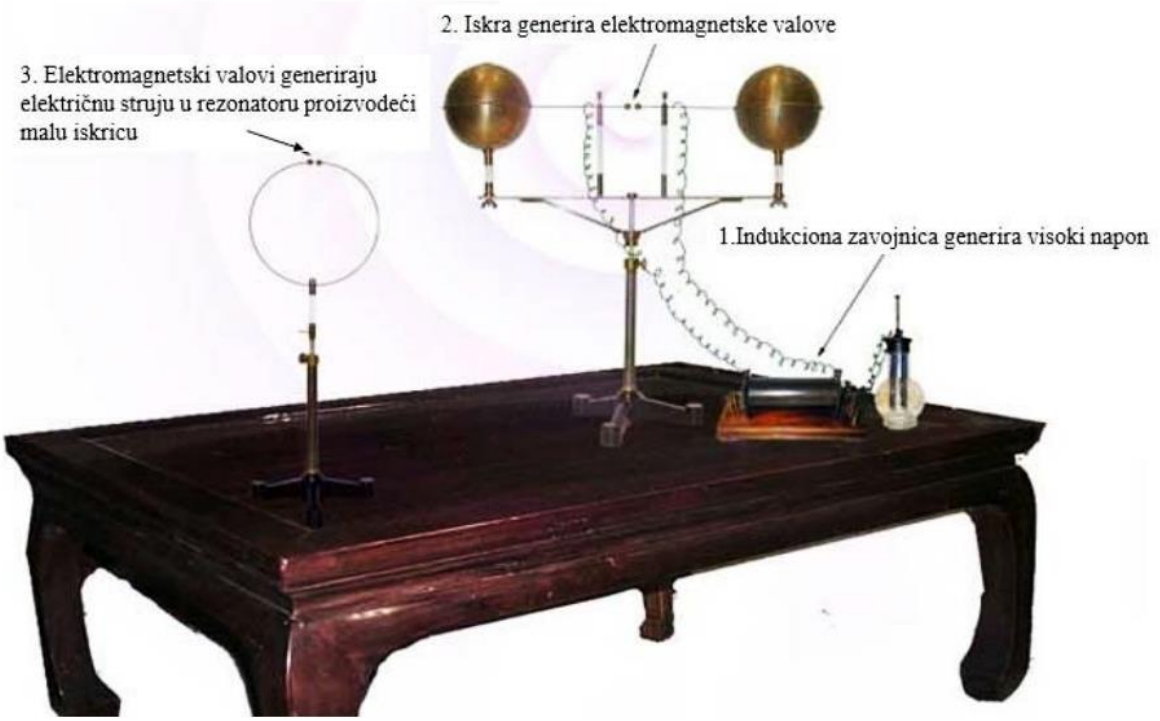
5. LITERATURA 34

SAŽETAK 35

ŽIVOTOPIS 37

1. UVOD

Električni naboj je svojstvo koje pokazuju neke elementarne čestice tvari. Električki nabijene čestice u mirovanju stvaraju električno polje, dok akcelerirano gibanje električnih naboja uzrokuje pojavu elektromagnetskih (EM) valova. Njemački fizičar Heinrich Rudolf Hertz. 1887. godine izradio je aparaturu koja je dokazala postojanje EM valova (slika 1.1). Ona se sastojala od zavojnice koja je služila kao generator visokog napona i metalnih šipki na čijim krajevima su bile pričvršćene metalne kuglice. Kada je napon dosegnuo vrijednost veću od kritičnog napona koji je različit za razne plinove, između dvije kuglice pojavila se iskra kao posljedica električnog proboja zraka. U iskrištu je jakost električne struja bila najveća, a na krajevima šipki jednaka nuli. Drugim riječima, u iskrištu su nastali maksimumi, a na krajevima čvorovi elektromagnetskog vala. Za prijem generiranih EM valova, Hertz je izradio tzv. rezonator, sastavljen od metalnih šipki s kuglicama. Kako bi ugodio rezonator na određenu frekvenciju generiranog vala, Hertz je mijenjao duljinu metalne šipke koja je imala ulogu kondenzatora. Kada su rezonator i oscilator bili u rezonanciji, pojavila se iskra između kuglica rezonatora što je dokazalo postojanje EM vala.



Slika 1.1. *Hertzova aparatura* [1]

Kroz povijest nastajali su razni izumi koji su omogućili prijenos informacije putem EM emisije. S obzirom na to da se EM valovi propagiraju slobodno prostorom, oni mogu također uzrokovati određene smetnje u elektroničkim uređajima kao što su radio prijemnici i telefonska oprema. Brojni drugi izvori elektromagnetskih emisija kao što su munje, električni motori, releji, fluorescentne lampe također stvaraju EM valove širokog frekvencijskog spektra. Primjer izvora EM valova u užem dijelu frekvencijskog spektra su visokonaponske linije za prijenos električne energije (50 i 60 Hz), radio odašiljači, radar pa čak i digitalna računala za čiji rad su potrebni oscilatori točno određene frekvencije. Svi navedeni izvori mogu negativno utjecati na rad električnih uređaja, stoga je potrebno dobro dizajnirati električnu opremu i sustave. Jedan od načina povećanja elekromagnetske kompatibilnosti između uređaja je njihovo oklapanje. Oklapanje elektroničkih uređaja osigurava ispravan rad uređaja uslijed EM polja koji se nalazi u njegovom okruženju, a ujedno i štiti ljude od EM zračenja samog uređaja.

U okviru diplomskog rada opisane su metode mjerenja spektralne djelotvornosti kućišta s otvorima u frekvencijskom području od 400 MHz do 4 GHz. Mjerenja djelotvornosti oklapanja izvedena su za četiri različita oklopa oblika kvadra s prorez otvorom na prednjoj stranici kvadra (Model I, Model II i Model IV) te otvorima u obliku kruga (Model III). Otvori na zaštitnom oklopu izvedeni su iz razloga što se na realnim zaštitnim oklopima pojavljuju otvori sličnog geometrijskog oblika i dimenzija kao: otvori za napojne i informacijske kabele, otvori za ventilaciju, otvori na spojevima oklopa i sl. Mjerenja su izvedena u prostoriji koja nije elektromagnetski izolirana, već samo djelomično korištenjem apsorbera za visoke frekvencije. Stoga, možemo očekivati pojavu refleksije vala od zidove i objekte u prostoriji što utječe na rezultate mjerenja. Rezultati dobiveni mjerenjima uspoređeni su s rezultatima simulacije u CST (**eng**. *Computer Simulation Technology*) računalnom programu.

2. TEORIJA OKLAPANJA OD ELEKTROMAGNETSKOG VALA

2.1. Elektromagnetski val

Osnovni zakoni elektromagnetske teorije utemeljeni su početkom 19. stoljeća. Godine 1862. škotski znanstvenik James Clerk Maxwell izrazio ih je u obliku skladno povezanih skupa jednadžbi. Maxwellove jednadžbe su temeljne jednadžbe klasične elektromagnetske teorije koje opisuju fizikalna svojstva elektromagnetskog polja i povezuju ih s nabojima i strujama, koje predstavljaju izvore.

Prve studije elektromagnetske teorije započinju razvojem pojma „sile“ koja djeluje na naboj ili strujni element. Engleski eksperimentalni fizičar Michael Faraday prvi je uveo pojam električnog polja koje postoji u svim točkama u mediju koji okružuje naboje kao izvore. Faraday je pojam polja uveo po antologiji s naprezanjima u elastičnom materijalu, a medij je nazivao eterom. Maxwell je kasnije uvođenjem pojma „struje pomaka“ upotpunio i matematički formulirao jedinstvenu teoriju elektromagnetskih polja napisavši svoje klasične jednadžbe. Maxwellove jednadžbe mogu se promatrati u diferencijalnom obliku koji se odnosi na bilo koju točku u prostoru i u integralnom obliku koji je primjenjiv na neki konačni volumen.

2.1.1. Diferencijalni oblik Maxwellovih jednadžbi

Vremenski promjenjiva elektromagnetska polja prikazuju se sljedećim veličinama:

E – jakost električnog polja

H – jakost magnetskog polja

B – gustoća magnetskog toka

D – gustoća električnog toka

J – gustoća struje

ρ – gustoća naboja

φ – skalarni električni potencijal

A – vektorski magnetski potencijal

Prva Maxwellova jednadžba je Faradayev zakon koji govori da je vremenski promjenjiva gustoća magnetskog toka B izvor vrtloga električnog polja E:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2\text{-}1)$$

Druga Maxwellova jednadžba je Amper-Maxwellov zakon koji kaže da su gustoća električne struje J i/ili vremenski promjenjiva gustoća električnog toka D izvori magnetskog polja H:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (2\text{-}2)$$

Član $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ predstavlja gustoću pomačne struje koju je Maxwell dodao u izvorni Amperov zakon s namjerom da se zakon održi konzistentnim u skladu sa zakonom očuvanja električnog naboja.

Treća Maxwellova jednadžba je Gaussov zakon za električno polje koji upućuje na postojanje električnih monopola:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (2\text{-}3)$$

gdje gustoća naboja ρ predstavlja izvore električnog polja.

Četvrta Maxwellova jednadžba je Gaussov zakon za magnetsko polje koji isključuje postojanje magnetskih monopola, što se matematički opisuje operatorom divergencije:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2\text{-}4)$$

što govori da je magnetsko polja uvijek solenoidalno, odnosno bezizvorno. [2]

2.1.2. Jednadžbe elektromagnetskih valova

Maxwellove jednadžbe u diferencijalnom obliku čine niz spregnutih prostorno-vremenskih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi prvog reda koje implicitno sadržavaju egzistenciju elektromagnetskih valova. Valne jednadžbe, koje su parcijalne diferencijalne jednadžbe drugog reda, izvode se iz Maxwellovih jednadžbi. Konačne forme valnih jednadžbi:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\frac{1}{\varepsilon}\nabla\rho \,, \qquad (2\text{-}5)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \qquad (2\text{-}6)$$

Ako se razmatra poseban slučaj Maxwellovih jednadžbi na točke u slobodnom prostoru (bez izvora) dobije se sustav od četiri jednadžbe, a njihovom kombinacijom jednadžbe gibanja elektromagnetskih polja u slobodnom prostoru:

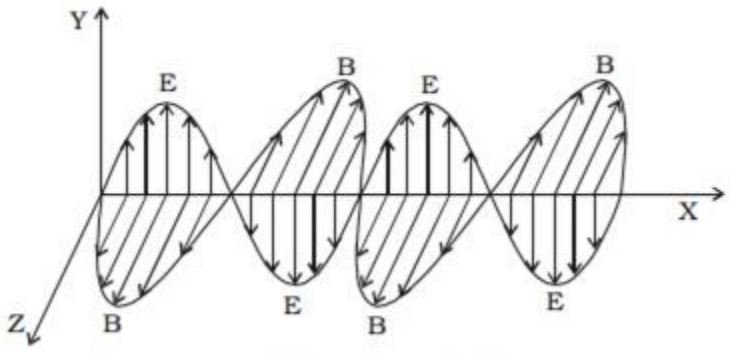
$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0, \qquad (2\text{-}7)$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \qquad (2\text{-}8)$$

Pri tome je brzina propagacije elektromagnetskog vala u vakuumu jednaka brzini svjetlosti i približno iznosi $c = 3 \cdot 10^8\, m/s$. Međutim, brzina vala u sredstvu (kristalu, tekućini, plinu) manja je i ovisi o svojstvima tvari:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\,, \qquad (2\text{-}9)$$

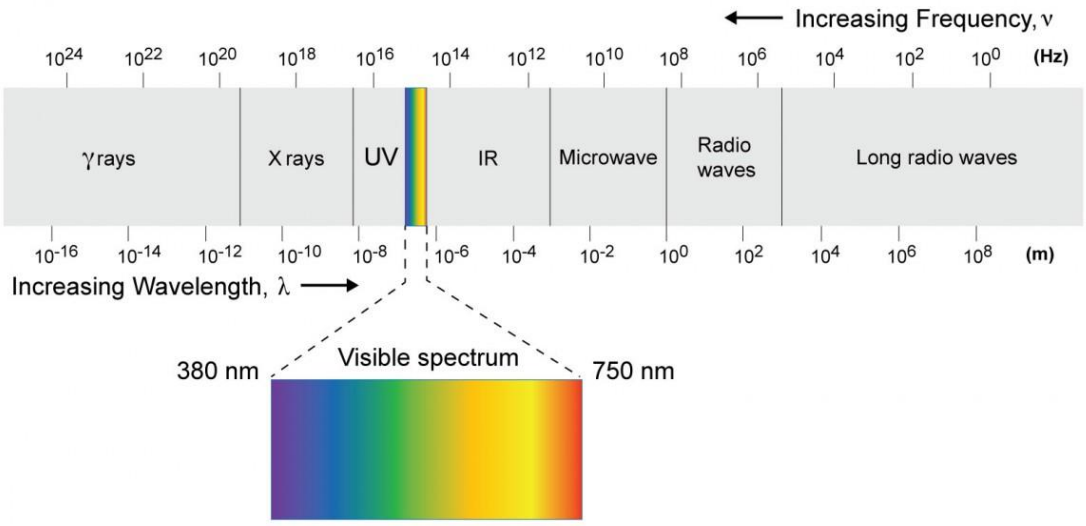
gdje ε predstavlja dielektričnost sredstva, a μ magnetsku permeabilnost sredstva. [2] Propagacija ravnog vala kroz sredinu bez gubitaka prikazana je na slici 2.1. Vidljivo je da vektori električnog i magnetskog polja leže u ravninama okomitim na smjer širenja vala.



Slika 2.1. *Elektromagnetski val* [3]

Valne duljine elektromagnetskih valova protežu se u rasponu od kilometarskih valnih duljina do submilimetarskih (< 1 mm). Tim valnim duljinama odgovaraju frekvencije u rasponu od 100 kHz do iznad 300 GHz (slika 2.2). Ravni valovi su dobra aproksimacija za stvarne valove u mnogim praktičnim situacijama. Radio valovi, primjerice, na velikim

udaljenostima od odašiljača imaju zanemarivu zakrivljenost i mogu se dobro opisati ravnim valom. Međutim, složeni valni oblici promatraju se kao superpozicija ravnih valova. U situacijama u kojima se ne može razmatrati koncept ravnog vala, osnovne ideje propagacije, refleksije i refrakcije koje se susreću u analizi ravnih valova pomažu u razumijevanju mnogo složenijih valnih problema.



Slika 2.2. *Elektromagnetski spektar* [4]

2.2. Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) i oklapanje

Svaki električni uređaj ili sustav svojim radom može izazvati elektromagnetsko okruženje nepogodno za ostale električne uređaje ili sustave unutar takvog okruženja i izazvati neželjene elektromagnetske smetnje. Npr. prilikom prijema signala u radio prijemniku može se pojaviti šum koji je posljedica rada nekog drugog uređaja u blizini. Tada kažemo da je došlo do elektromagnetske interferencije (EMI) koja ujedno uzrokuje i degradaciju karakteristika uređaja ili sustava.

Pojam elektromagnetske kompatibilnosti (EMC) obuhvaća sposobnost uređaja ili sustava da ne izaziva nedopuštene interferencije s drugim sustavima te da nesmetano radi u danom elektromagnetskom okruženju. Izvori elektromagnetskih smetnji mogu biti prirodni (munja) i umjetni (elektromagnetski vodovi, postrojenja, električni uređaji, elektromotori, radio stanice, radarske stanice itd.). [5]

Način prijenosa smetnje od izvora do „žrtve“ (uređaja ili sustava na koji smetnje djeluju) su:

- Konduktivna sprega (električna struja)
- Induktivna sprega (magnetsko polje)
- Kapacitivna sprega (električno polje)
- Elektromagnetska sprega (elektromagnetsko zračenje)

„Žrtva“ elektromagnetskih smetnji može biti bilo koji dio opreme, uređaj ili sustav koji je neotporan na elektromagnetske smetnje. Također, „žrtve“ mogu biti i živa bića.

Osnovne mjere za rješavanje EMC problema su:

- Elektromagnetsko (EM) oklapanje
- Uzemljenje
- Izvedba vanjskog sustava za zaštitu od udara od munje
- Izvedba prenaponske zaštite
- Filtriranje

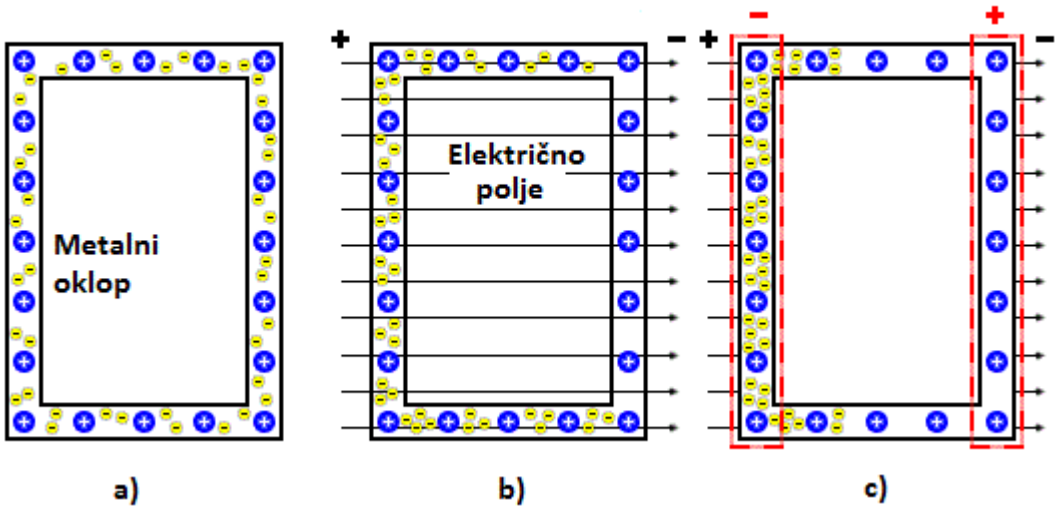
Oklapanje (***eng.*** *Shielding*), je smještanje nekog elektroničkog sklopa, naprave ili cijelog sustava unutar posebno konstruiranog kućišta (oklopa), radi zaštite od vanjskog elektromagnetskog polja koje bi moglo prouzročiti neispravan rad. Za vremenski nepromjenjiva ili sporo promjenjiva polja (frekvencija do 100 kHz), utjecaji električnog i magnetskog polja mogu se odvojeno analizirati pa razlikujemo električno i magnetsko oklapanje. Za frekvencije veće od 100 kHz utjecaji električnog i magnetskog polja ne mogu se promatrati odvojeno (riječ je o elektromagnetskom valu) pa se obavlja elektromagnetsko oklapanje. [6]

Tipičan primjer oklopa je izolacija koaksijalnog kabela ili kućište električnog uređaja. Elektromagnetski oklop najčešće je načinjen od metala i samo oklapanje zasniva se na principu tzv. Faradayevog kaveza. Faradayev kavez je prostor zaštićen elektromagnetskim oklopom (slika 2.3). Oblik oklopa ovisi o potrebnom prostoru frekvencija i vrsti polja od kojega se štiti, a izrađuje se od materijala visoke električne ili magnetske vodljivosti (mreže ili limovi od bakra, aluminija, željeza ili drugog feromagnetskog materijala). Neželjeno elektromagnetsko polje unutar Faradayevog kaveza može oslabiti za 60 dB do 120 dB. Primjenjuje se za zaštitu ljudi i električne opreme od elektromagnetskih smetnji, a posebice za otklanjanje nepoželjnog utjecaja elektromagnetskog polja na rad osjetljivih mjernih instrumenata i uređaja te telekomunikacijskih uređaja i vodova. [6]



Slika 2.3. *Faradayev kavez* [7]

Djelovanjem elekričnog polja na Faradayev kavez, dolazi do preraspodjele električnog naboja na vanjskim stranicama kaveza na način da jakost električnog polja unutar kaveza bude jednaka nuli (slika 2.4). Faradayev kavez ne može blokirati sporo promjenjivo magnetsko polje Zemlje, što znači da će kompas unutar kaveza ispravno raditi.

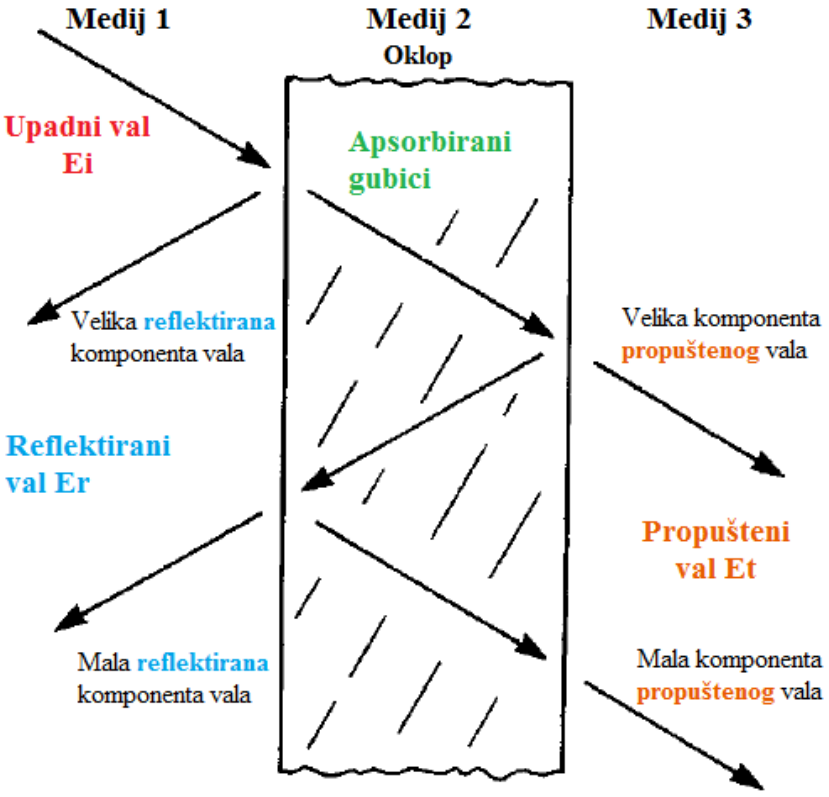


Slika 2.4. *Princip rada Faradayevog kaveza* [8]

Elektromagnetski oklop može biti metalni plašt, metalna mreža, ionizirani plin, plazma, aluminijska folija i sl. Stupanj ograničenja EM smetnje ovisi o vrsti rabljenog materijala, o načinu povezivanja dijelova oklopa, o načinu uzemljenja oklopa i o frekvenciji

EM smetnje. Oklapanjem se vanjske smetnje zadržavaju izvan oklopa, a unutarnji signali unutar njega. Uobičajeno je da zaštitna kućišta imaju otvore, proreze i spojeve koji uzrokuju prodor EM zračenja unutra. Električno i magnetsko polje koncentrirano je u materijalima visoke dielektrične vodljivosti i magnetske permeabilnosti. Na zaštitu oklopa od magnetskog polja utječe magnetska permeabilnost materijala od kojeg je izrađeno kućište, što je izraženo na niskim frekvencijama. Na visokim frekvencijama oklopi sa visokom električnom vodljivošću su mnogo efikasniji.

Teorija oklapanja od EM zračenja prvi put je opisana u *Schelkunoff*-ovom modelu, koji je razvijen 1938. godine iz koncepta impedancije elektromagnetskog vala (slika 2.5). Pri prolasku upadnog vala *Ei* iz medija 1 u medij 2, dio vala se reflektira ovisno o koeficijentu refleksije od površinu medija 2. Preostali dio upadnog vala prolazi kroz medij 2 i oslabljen je faktorom $e^{-d/\delta}$, gdje je d debljina, a δ dubina prodiranja (***eng***. *skin depth*) medija 2. Nailaskom vala na drugu stranu medija 2, jedan dio vala se ponovno reflektira, dok drugi prolazi u medij 3 (*Et*). U materijalu (oklopu) se javljaju višestruke refleksije čiji je utjecaj značajno umanjen faktorom slabljenja vala kroz materijal.



Slika 2.5. *Schelkunoff-ov model oklapanja*

2.3.Djelotvornost oklapanja

Efikasnost oklapanja (***eng***. *shielding effectiveness*) od elektromagnetskog zračenja može se definirati faktorom oklapanja koji se računa kao omjer jakosti električnog (ili magnetskog) polja mjerenog bez oklopa (E_{ush}) i jakosti električnog (ili magnetskog) polja s metalnim oklopom i otvorima (E_{sh}):

$$SE_e = 20log\frac{E_{ush}}{E_{sh}}, dB \quad (2\text{-}10)$$

Faktor oklapanja može se definirati također kao omjer snage elektromagnetskog polja mjerenog bez oklopa (P_{ush}) i snage EM polja mjerenog s oklopom (P_{sh}):

$$SE_p = 10log\frac{P_{ush}}{P_{sh}}, dB \quad (2\text{-}11)$$

Također, faktor oklapanja se definira kao omjer S_{21} parametra mjerenog bez oklopa i S_{21} parametra dobivenog mjerenjem s oklopom:

$$SE_{S21} = 20log\frac{S_{21ush}}{S_{21sh}}, dB \quad (2\text{-}12)$$

Nadalje, fizikalni utjecaju koji povećavaju atenuaciju incidentog vala koji prolazi kroz otvore metalnog oklopa su:

- Gubici uslijed apsorpcije EM vala unutar metalnog zaštitnog oklopa (A_l - **eng**. *absorption losses*);
- Gubici uslijed refleksije EM vala od metalni zaštitni oklop (R_l - **eng**. *reflection losses*);
- Gubici uslijed višestrukih refleksija unutar metalnog zaštitnog oklopa (MR_l - **eng**. *multiple reflection losses*); [10]

Efikasnost oklapanja je tada suma gubitaka snage uslijed refleksije, apsorpcije i višestruke refleksije:

$$SE_{dB} = A_l + R_l + MR_l, dB \quad (2\text{-}13)$$

Faktor oklapanja uslijed apsorpcije (A_l) približno je jednak za polje bliskog izvora i za polje dalekog izvora, a opisan je izrazom:

$$Al = 8.7 \cdot d \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} = 8.7 \cdot \frac{d}{\delta}, dB \quad (2\text{-}14)$$

gdje je *d* debljina oklopa, *f* frekvencija EM polja, μ permeabilnost metala od kojeg je načinjen oklop, σ vodljivost metala, a δ dubina prodiranja EM polja u metal:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2\text{-}15)$$

Faktor oklapanja uslijed refleksije (R_l) ovisi o tome je li izvor polja u blizini oklopa ili je udaljen. Za udaljeni izvor, faktor oklapanja uslijed refleksije može se približno opisati izrazom:

$$R_l \approx \log_{10} \frac{Z_0}{4 \cdot Z_m}, dB \quad (2\text{-}16)$$

gdje je $Z_0 = 377\Omega$ valna impedancija zraka, dok je Z_m valna impedancija metala od kojeg je izrađen oklop. Za metale vrijedi:

$$Z_m \approx |Z_m| = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}{\sigma}} \quad (2\text{-}17)$$

Faktor oklapanja uslijed refleksije za bliski izvor može se približno izraziti kao:

$$R_l \approx 20 \cdot \log_{10} \frac{\left(Z_{polje} + Z_m\right)^2}{4 \cdot Z_{polje} \cdot Z_m}, dB \quad (2\text{-}18)$$

gdje je valna impedancija električnog polja:

$$Z_{polje} = Z_E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot r} \quad (2\text{-}19)$$

dok je valna impedancija magnetskog polje:

$$Z_{polje} = Z_H = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot r \quad (2\text{-}20)$$

gdje r predstavlja udaljenost izvora od oklopa.

Iz navedenih izraza može se zaključiti da će faktor oklapanja uslijed refleksije biti veći na niskim frekvencijama i za visoko vodljive materijale. Kod visokih frekvencija i feromagnetskog oklopa faktor oklapanja je relativno mali. [5]

Faktor oklapanja uslijed višestruke refleksije (MR_l) unutar metala opisan je izrazom:

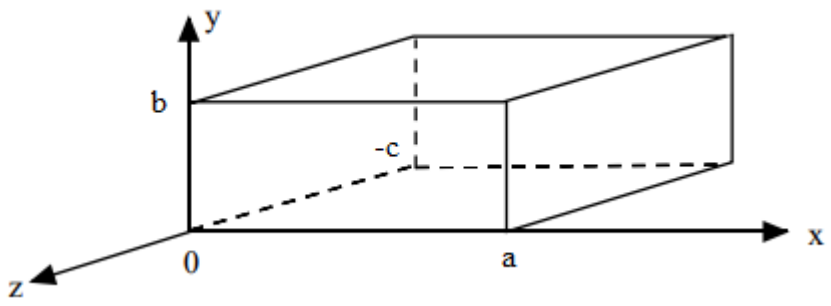
$$MR_l \approx 20 \cdot \log_{10} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot d}{\delta}}\right), dB \quad (2\text{-}21)$$

Faktor oklapanja MR_l izražen u dB jednak je nuli ili je manji od nule. On se može zanemariti ako je debljina oklopa mnogo veća od dubine prodiranja vala u metal oklopa (d>>δ). [5]

Na temelju prethodnih izraza može se zaključiti da se s porastom frekvencije povećava efikasnost oklapanja magnetskog polja bliskog izvora, a smanjuje učinak oklapanja električnog polja bliskog izvora. Povećanje debljine oklopa nema utjecaja na faktor oklapanja uslijed refleksije, ali pozitivno utječe na faktor oklapanja uslijed apsorpcije i faktor oklapanja uslijed višestruke refleksije. [5]

2.3.1. Frekvencije rezonancija metalnih kućišta

Analizu metalnog kućišta u frekvencijskoj domeni moguće je napraviti putem klasičnih Maxwellovih jednadžbi ukoliko se unutar kućišta nalazi homogeni dielektrik. U slučaju kada je kućište ispunjeno nesavršenim dielektrikom ili se unutar njega nalazi dodatna struktura, raspodjela EM se mijenja, a time i karakteristike kućišta. U analizi metalnog kućišta pravokutnog poprečnog presjeka, kućište se modelira pravokutnim valovodom kojemu su zadnja i prednja stranica zatvorene vodljivim materijalom (slika 2.6).



Slika 2.6. *Geometrija valovodnog rezonatora*

Frekvencija rezonancije pravokutnog kućišta računa se prema izrazu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}}\left[\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{c}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad (2\text{-}22)$$

Na osnovu dimenzija *a* i *b*, određuje se treća dimenzija *c* koja ovisi o izabranim brojevima *n*, *m* i *l*. U valovodu se pojavljuju različiti načini rasprostiranja EM vala, tzv. modovi (TE – transverse electric, TM – transverse magnetic i TEM – transverse electromagnetic). U valovodnom rezonatoru mogu istovremeno pobuditi TE_{nml} i TM_{nml} modovi uz uvjet da samo jedan od brojeva n, m i l bude 0, a svi ostali različiti od 0. Izraz (2-22) vrijedi za oba tipa vala.

Kada se u valovodnu šupljinu ubaci neki predmet, u našem slučaju monopol antena, dolazi do poremećaja elektromagnetskog polja, a samim time i do promjene rezonantne frekvencije kućišta. Te pojave se nazivaju perturbacije.

Izraz (2-23) pokazuje ovisnost promjene rezonantne frekvencije o promjeni uskladištene magnetne i električne energije u rezonatoru:

$$\frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}=\frac{\Delta W_m-\Delta W_e}{W_m+W_e} \qquad (2\text{-}23)$$

gdje ΔW_m i ΔW_e označavaju promjene u uskladištenoj magnetnoj i električnoj energiji nakon izazvane perturbacije, a $W_m + W_e$ ukupnu uskladištenu energiju u rezonatoru. Iz toga proizlazi da se rezonantna frekvencija mijenja ovisno o lokaciju perturbacije i promjeni zapremine rezonatora. [9]

Za slučaj postavljanja metalnog štapa polumjera r_0 i dužine l u pravokutnu rezonatorsku šupljinu u kojoj je pobuđen TE_{101} mod, pod uvjetom da je rezonator ispunjen zrakom dobiva se izraz za promjenu rezonantne frekvencije:

$$\frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}=\frac{-2l\pi r_0^2}{abd}=\frac{-2\Delta V}{V_0} \qquad (2\text{-}24)$$

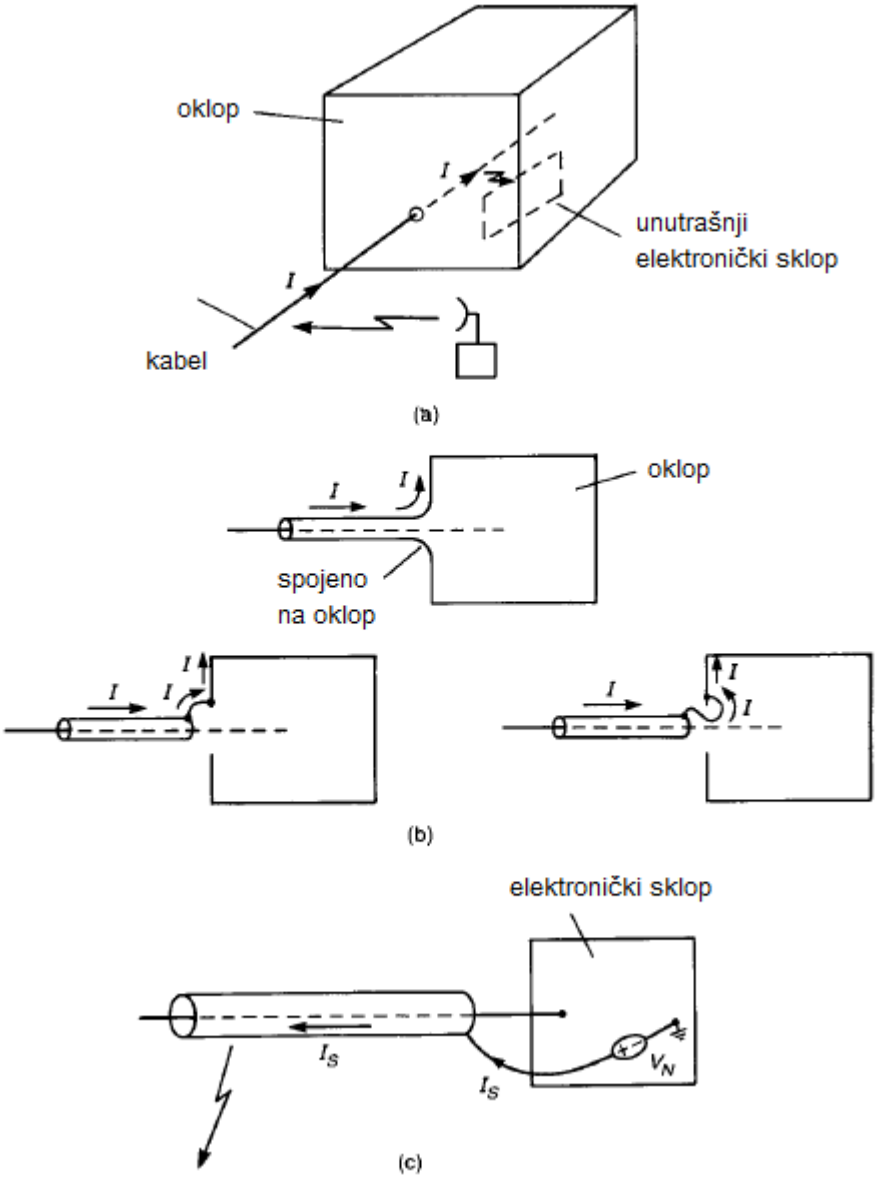
- $V_0 = abd$ je zapremnina rezonatora prije perturbacije
- ω_0 je frekvencija rezonantne šupljine prije perturbacije
- $\omega = 2\pi f$ je frekvencija poslije perturbacije
- ΔV je zapremina unešenog tijela u rezonantnu šupljinu
- a = duljina, d = širina, b = visina rezonatora

Dobiveni izraz pokazuje da se smanjenjem zapremine unešenog tijela u šupljinu rezonantna frekvencija valovodne šupljine smanjuje. [9]

2.3.2. Spektralna djelotvornost kućišta s otvorima

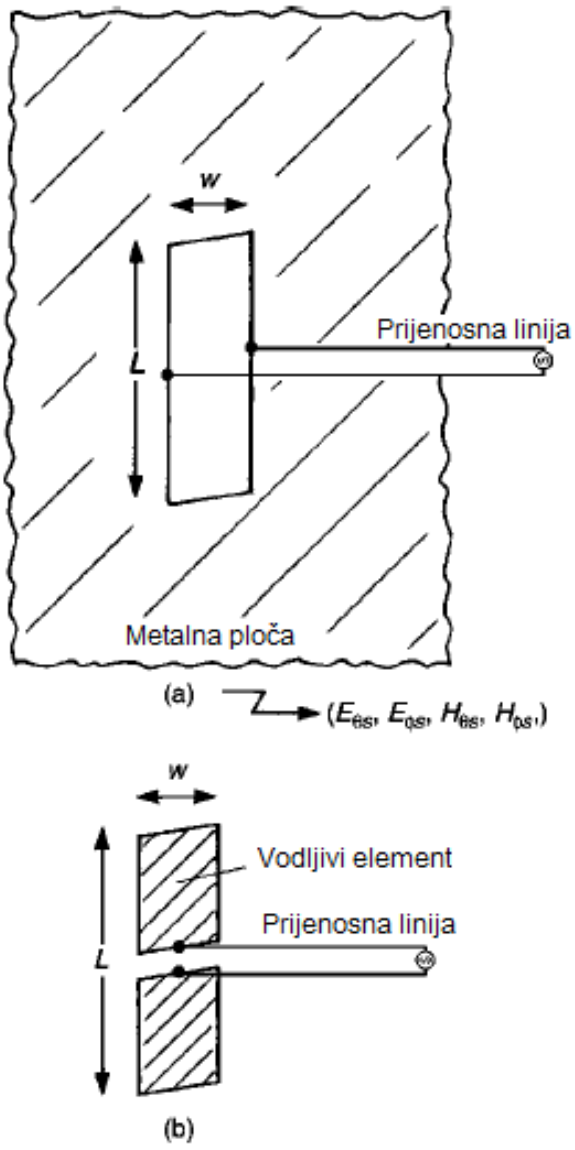
Idealan oklop za zaštitu od EM zračenja bio bi oklop bez otvora, proreza, zavarenih rubova i kabela koji prolaze kroz oklop. Svako prodiranje u oklop može znatno smanjiti djelotvornost oklapanja. Npr. razmotrimo metalni oklop s vodičem, kao na slici 2.7a. Pretpostavimo da je unutar oklopa elektronički uređaj, a izvan oklopa u blizini izvor zračenja poput antene koja zrači EM poljem. Ovo polje će inducirati električnu struju u vodiču koja će nesmetano teći unutar oklopa i stvoriti smetnje u radu uređaja. Isto tako, zračenje kao proizvod rada električnog uređaja može inducirati električnu struju u vodiču što će uzrokovati zračenje van oklopa, a time i smanjiti djelotvornost oklapanja. Umetanje kabela u oklop mora biti ispravno tretirano kako bi se očuvala djelotvornost oklopa. Neke uobičajene metode su postavljanje

filtra na ulazu/izlazu od kabela i spajanje zaštitnog oklopa/folije kabela direktno na površinu oklopa. U slučaju spajanja zaštitne folije kabela direkno na površinu oklopa ili pomoću dodatnog vodiča, inducirana električna struja nastala kao posljedica vanjskog EM polja, poteći će unutrašnjim stranicama oklopa i na taj način smanjiti djelotvornost oklapanja (slika 2.7b). Ukoliko oklop/folija kabela nije pravilno uzemljena, kabel se može ponašati kao monopol antena (slika 2.7c). Ako je duljina zaštitnog oklopa kabela reda veličine λ/4, oklop postaje efektivni radijator i proizvodi EM polje. Npr. kabel dužine 1.5m stvorit će EM zračenje na frekvenciji od 50 MHz. [11]



Slika 2.7. *Važni praktični primjeri koji degradiraju djelotvornost oklapanja: a) prodiranje vanjskog polja u oklop kroz otvor za kabel; b) spajanje zaštitnog oklopa kabela na oklop uređaja; c) nepravino uzemljenje zaštitnog oklopa kabela (kabel zrači EM polje)* [11]

Drugi način prodiranja vanjskog polja u prostor unutar oklopa je kroz otvor ili prorez na stranicama oklopa. Širenje EM polja kroz otvor opisuje tzv. *Babinetov teorem*, nazvan po francuskom fizičaru Jacquesu Babinetu. Kako bi objasnili navedeni teorem, uzmimo za primjer tanku metalnu ploču s prorezom kao na slici 2.8a. Pretpostavimo da je prijenosna linija izmjeničnog izvora spojena između dvije točke na prorezu. Daleko polje kojim prorez antena zrači označeno je s $E_{\theta s}, E_{\Phi s}, H_{\theta s}$ i $H_{\Phi s}$. Zatim, promotrimo komplementarnu strukturu na slici 2.8b, gdje je prorez s prethodne slike zamijenjen savršeno vodljivim elementom, a metalna ploča slobodnim prostorom. Antena je ponovno napajana prijenosnom linijom koja je spojena na dvije jednake polovice vodljivog elementa. Daleko polje kojim zrači komplementarna struktura označeno je s $E_{\theta c}, E_{\Phi c}, H_{\theta c}$ i $H_{\Phi c}$.



Slika 2.8. *Ilustracija Babinetova teorema* [11]

Babinetov teorem povezuje daleka polja izračena od strukture s prorezom i njene komplementarne strukture:

$$E_{\theta s} = H_{\theta c} \quad (2\text{-}25)$$

$$E_{\Phi s} = H_{\Phi c} \quad (2\text{-}26)$$

$$H_{\theta s} = -\frac{E_{\theta c}}{\eta_0^2} \quad (2\text{-}27)$$

$$H_{\Phi s} = -\frac{E_{\Phi s}}{\eta_0^2} \quad (2\text{-}28)$$

Iz prethodnih izraza može se zaključiti da prorez na vodljivom elementu može biti efektivni radijator isto kao antena čije su dimenzije vodljivog elementa jednake dimenzijama proreza. To pruža značajan uvid u efekte proreza na oklopu koji uzrokuju smanjenje djelotvornosti oklapanja. Na primjer, pretpostavimo da prorez sa slike 2.8a ima linearne dimenzije koje su jednake polovici valne duljine, $L = \lambda_0/2$. Ako upotrijebimo Babinetov teorem, svojstva zračenja proreza bit će ista kao svojstva zračenja dipol antene jednake duljine. Što je širina proreza *w* manja, to je prorez (i komplementarni dipol) efektivniji radijator. Na kućištima za oklapanje često se nalaze prorezi jako malih dimenzija što izrazito degradira spektralnu djelotvornost oklapanja. [11]

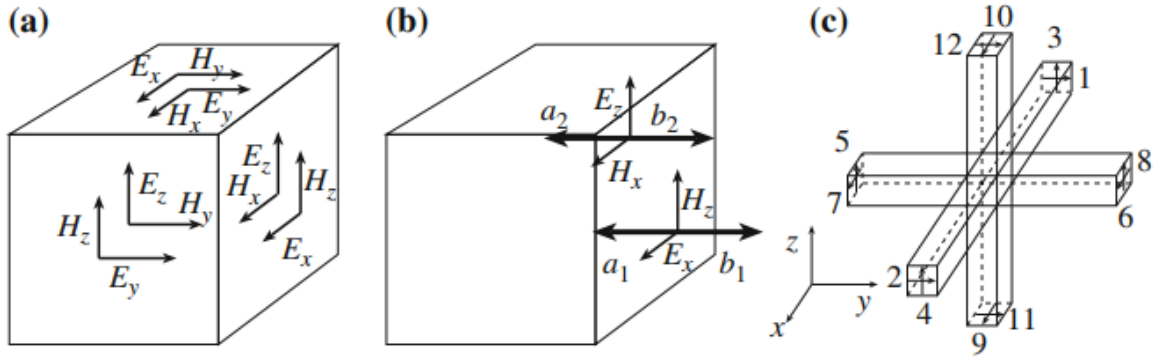
2.3.3. Metode za određivanje efikasnosti oklapanja kućišta

Metode za određivanje SE metalnog oklopa mogu biti analitičke, numeričke i eksperimentalne. Analitičke metode temelje se na pojednostavljenju problema. Npr. zaštitno kućište s jednim otvorom može se predstaviti ekvivalentnim žičanim modelom valovoda. Numeričke metode koje se mogu primjeniti su: metoda momenata (MoM – *Method of Moments*), metoda konačnih razlika u vremenskoj domeni (FDTD – *Finite Difference Time Domain*) i metoda modeliranja pomoću prijenosnih linija (TLM – *Transmission Line – Matrix*). U eksperimentalnim metodama, antena se postavlja u kućište kako bi se odredila njegova efikasnost.

2.3.4. TLM metoda

TLM metoda zasniva se na prostornoj diskretizaciji EM polja. Ova metoda pogodna je za modeliranje medija s gubicima te disperzivnih i nelinearnih medija. Zasniva se na mapiranju elektromagnetskih polja u problem mreža. U ovoj metodi EM polje se modelira valnim

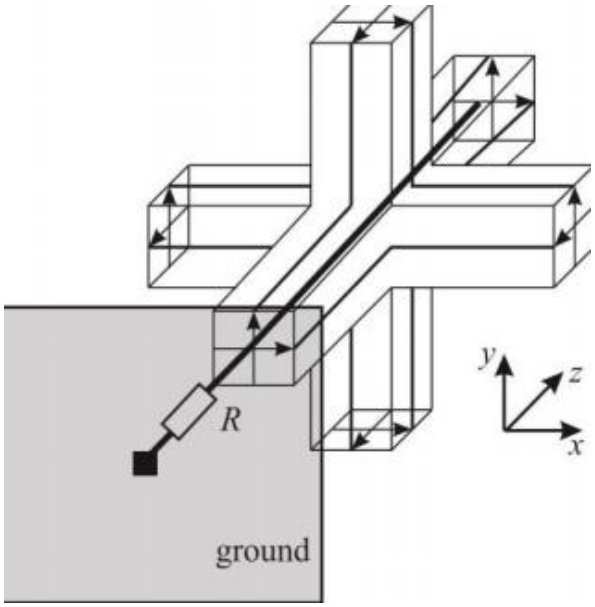
impulsima koji se rasprostiru kroz mrežu prijenosnih linija i bivaju raspršeni u čvorovima mreže. Principi raspršenja EM vala kod TLM metode bazirani su na *Huygens-ovom* principu propagacije vala. Propagacijski prostor modeliran je kao mreža prijenosnih linija, a naponi i struje na vodovima analogni su komponentama EM polja u prostoru. Simulacija započinje pobuđivanjem mreže naponskim impulsima u karakterističnim točkama prateći prostiranje impulsa kroz mrežu pri čemu se oni raspršuju u čvorovima. [9]



Slika 2.9. *Shematski prikaz TLM ćelije: a) ćelija s tangencijalnim električnim i magnetskim poljem, b) amplitude vala, c) TLM čvor* [12]

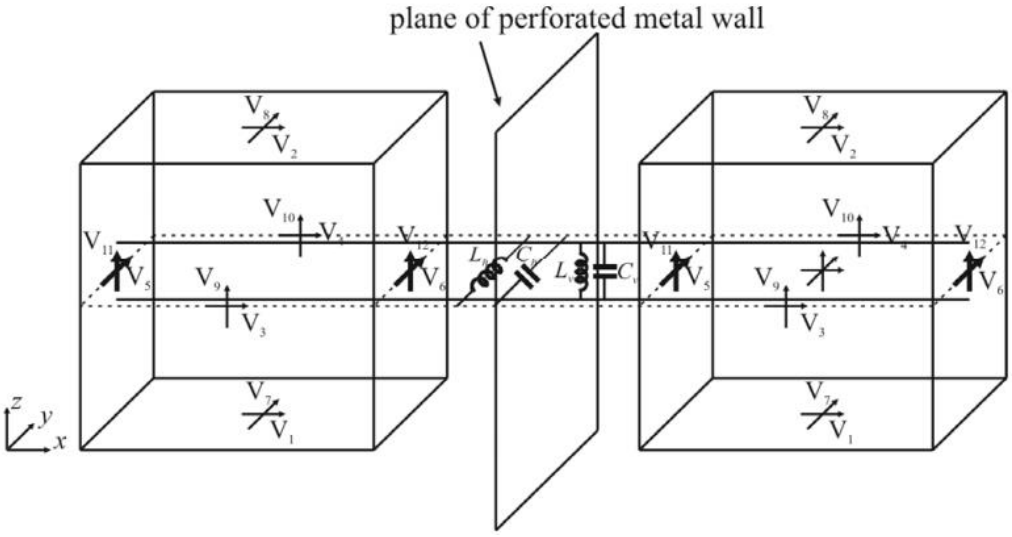
Na slici 2.9 dan je princip TLM metode. U prvom koraku vrši se diskretizacija u kubične TLM ćelije. Na svakoj površini TLM ćelije dano je tangencijalno električno i magnetsko polje (slika 2.9.a). Amplitude električnih i magnetskih polja predstavljene su incidentnim i raspršenim valovima (slika 2.9.b). Svaka TLM ćelija može komunicirati sa svojih 6 susjednih ćelija. Budući da se incidentni valovi promatraju sa 6 strana i u dvije polarizacije, TLM ćelija predstavlja čvor s 12 portova, poznat pod nazivom kondenzirani simetrični čvor (Symetrical Condensed Node – SCN), kao što je prikazano na slici 2.9.c. [12]

SCN čvorovi se koriste za modeliranje EM osobina materijala koji se nalaze unutar kućišta. Za modeliranje žičanih struktura unutar kućišta pogodan je tzv. TLM žičani model. Kako bi se simulirao slučaj monopol antene unutar kućišta u svrhu mjerenja jakosti EM polja, u modelu se na žičanu strukturu veže otpornik R koji je uzemljen i čija otpornost odgovara ulaznoj impedanciji mreže (slika 2.10). Izračunom struje kroz žičani segment može se odrediti napon na otporniku monopol antene. Kako bi se odredila efikasnost kućišta, numeričko simuliranje modela izvršava se dva puta. U prvom slučaju, modelira se žičana struktura bez kućišta, dok je u drugom slučaju uključen model kućišta.



Slika 2.10. *Žičani SCN čvor na koji je vezan otpornik R*

TLM air-vent model pogodan je za opisivanje struktura kao što su žičane antene, prorezi, grupe otvora određene geometrije i žičani spojevi koji su često prisutni u električnim sustavima radi odvođenja viška topline iz oklopljenog sustava ili napajanja. Za potrebe numeričke analize utjecaja grupe otvora koristi se tzv. kompaktni TLM air-vent model. Da bi se modelirala horizontalna i vertikalna polarizacija EM polja potrebna su dva reaktivna žičana elementa LC, $L_h C_h$ krug za horizontalnu i $L_v C_v$ krug za vertikalnu polarizaciju (slika 2.11). [9]



Slika 2.11. *Kompaktni TLM air-vent model s metalnim zidom* [13]

Paralelna veza induktiviteta potrebna je za modeliranje struje koja prolazi rubom otvora, dok se paralelnom kapacitivnošću modelira prostiranje EM polja unutar otvora. Ekvivalentna reaktancija ovisi o kružnoj frekvenciji, obliku poprečnog presjeka otvora, graničnoj frekvenciji (**eng**. *cut-off frequency*) otvora, pokrivenosti (**eng**. *coverage* – površina zida pokrivenog otvorima u postocima) i debljini zida. [9]

Prednost TLM air-vent modela u odnosu na TLM model fine mreže je ta što TLM air-vent model koristi mrežu za modeliranje sa čvorovima koji mogu biti veći od otvora na zidovima kućišta. Stoga je ovaj model puno efikasniji što se tiče procesa numeričkog proračuna. Nedostatak TLM air-vent modela je u tome što je pogodan samo za frekvencije ispod granične frekvencije otvora. [9]

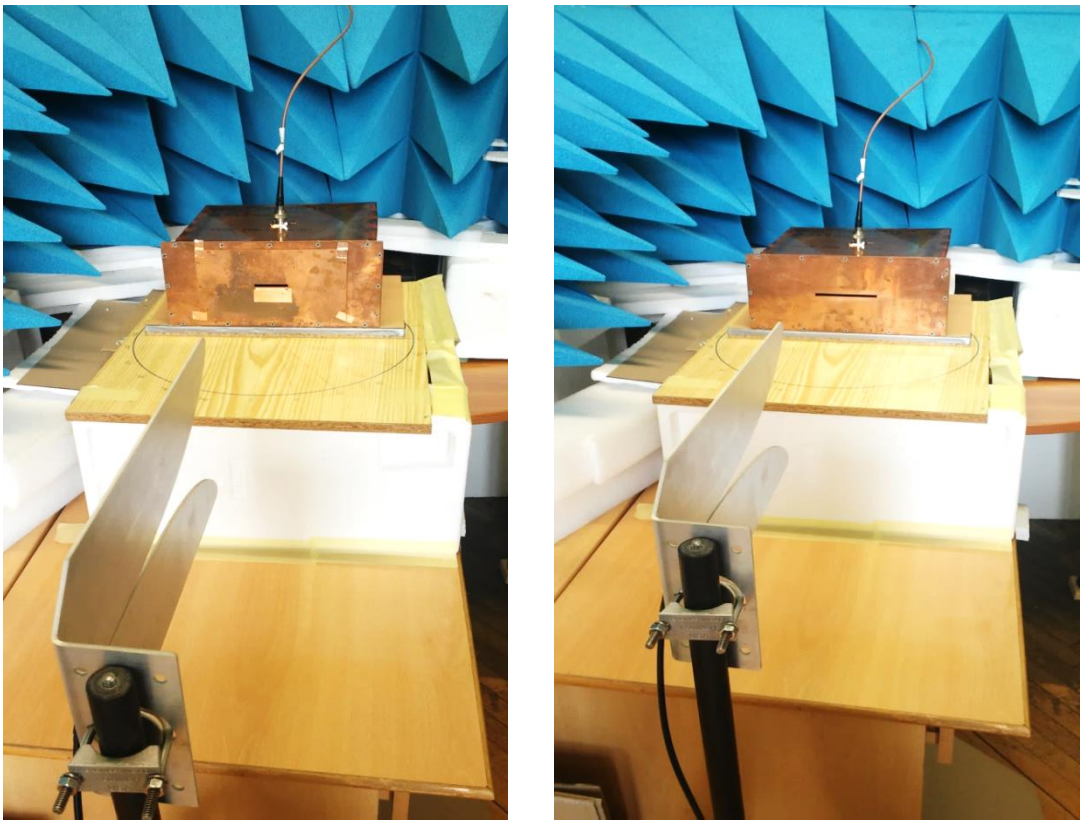
3. MJERENJA DJELOTVORNOSTI OKLAPANJA

Mjerenja djelotvornosti oklapanja kućišta izvedena su pomoću dvije metode:

1. **Metoda I.** mjerenjem koeficijenta sprege S_{21} sa i bez oklopa te
2. **Metoda II** mjerenjem jakosti E-polja sa i bez oklopa s dva različita seta mjerne opreme (Metoda IIA i Metoda IIB).

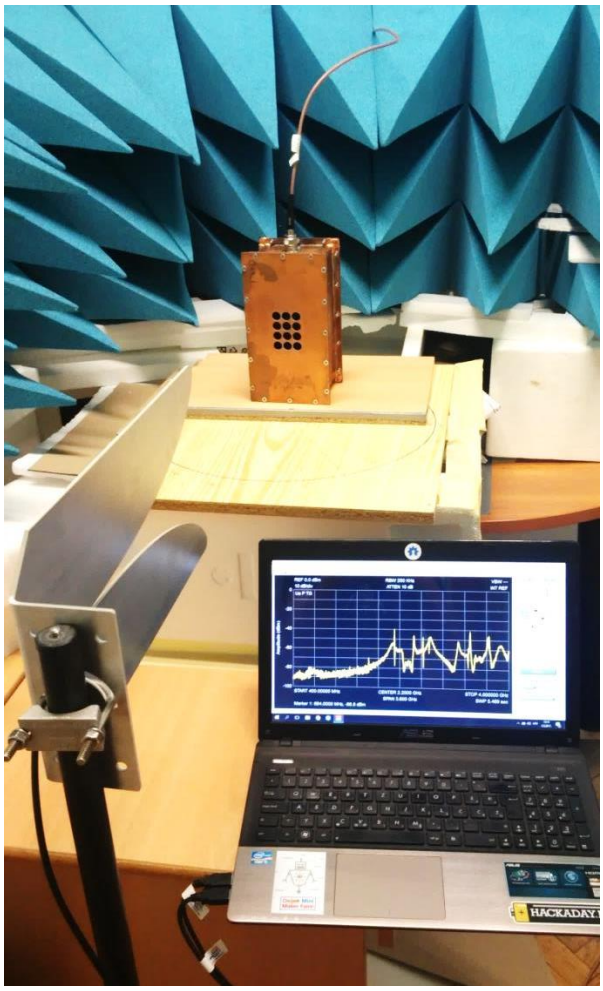
3.1. Metalna kućišta – Model I, II, III i IV

Za mjerenja su korišteni metalni oklopi s malim linearnim prorezom na prednjoj plohi širine 5 mm. Stranice zaštitnog oklopa izrađene su od bakrenog lima debljine 1.5 mm. Sve stranice kućišta su međusobno zavarene osim prednje plohe. Prednje ploha zaštitnih oklopa izrađene su s prorez otvorima dimenzija 50x5 mm i 100x5mm te ih je moguće pričvrstiti za kućište vijcima. Fotografije mjerne opreme i metalnog oklopa prikazane su slikom 3.1. (Model I – (a) i Model II – (b)), slikom 3.2. (Model III) i slikom 3.3. (Model IV).

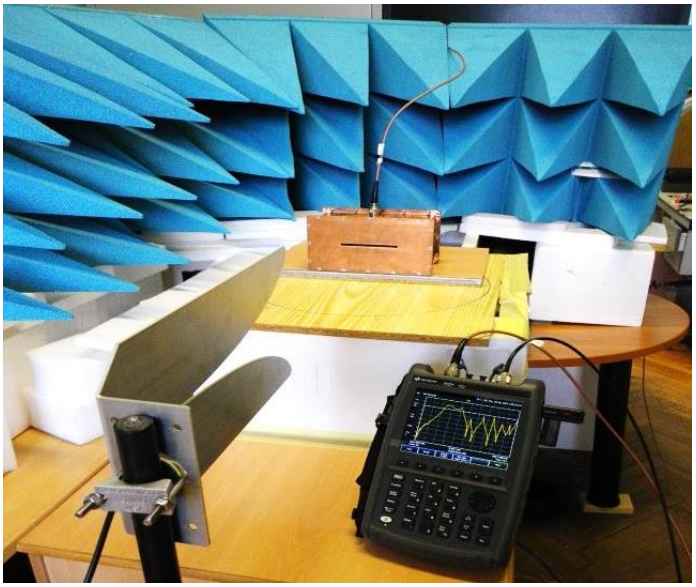


a) b)

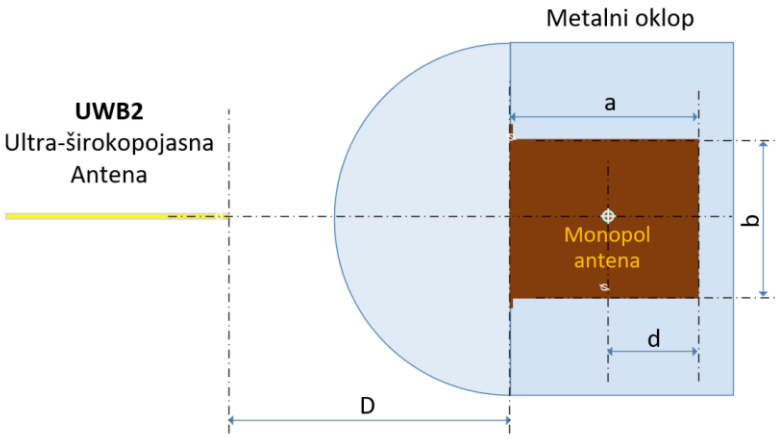
Slika 3.1. *Metalna kućišta u djelomično izoliranoj prostoriji: a) Model I "D kućište" (300x300x120mm) s otvorom dimenzija 50x5 mm; b) Model II "D kućište" (300x300x120mm) s otvorom dimenzija 100x5mm*



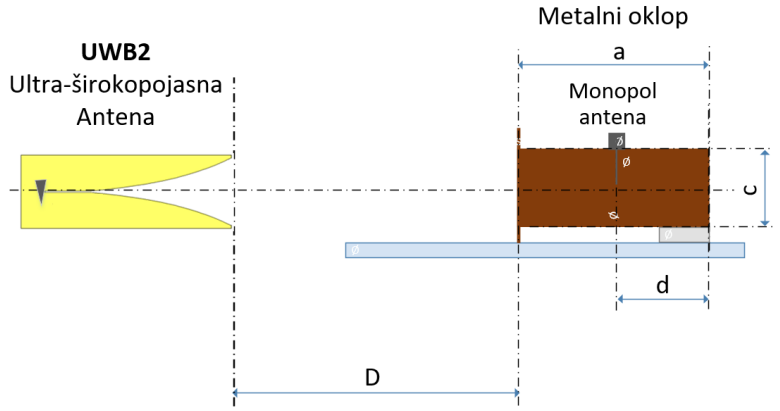
Slika 3.2. *Mjerna oprema i metalno kućište Model III „Lilchi“ (200x100x100mm) s okruglim otvorima u djelomično izoliranoj prostoriji*



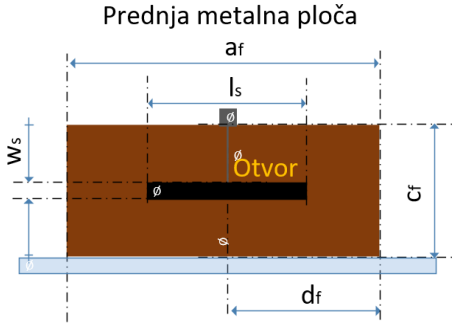
Slika 3.3. *Mjerna oprema i metalno kućište Model IV „Lilchi“ (200x100x100mm) s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm* [10]



a)



b)



c)

Slika 3.4. *Zaštitni metalni oklop s prorez otvorom na prednjoj ploči i Vivaldi antena: a) pogled odozgo; b) pogled sa strane; c) pogled od naprijed* [10]

Frekvencijsko područje ograničeno je dimenzijama pravokutnog oklopa od 2 GHz za „D kućište“ i 4 GHz za „Lilchi“ kućište. Signal emitiran UWB Vivaldi antenom izmjeren je pomoću prijemne monopol antene promjera 0.2 mm, u prvom slučaju bez zaštitnog oklopa i u drugom slučaju sa zaštitnim metalnim oklopom. Prijemna monopol antena smještena je unutar

metalnog oklopa na sredini gornje plohe. Metalni oklop smješten je na dielektričnom materijalu označen plavom bojom na slici 3.4c. Udaljenost između predajne UWB antene i metalnog oklopa iznosi 0.57 λ_{max} i 5.7 λ_{min} (tablica 3.1). [10]

Veličina	**Tip oklopa**			
	Model I (D)	Model II (D)	Model III (Lilchi)	Model IV (Lilchi)
a (mm)	300	300	200	200
b (mm)	300	300	100	100
c (mm)	120	120	100	100
d (mm)	150	150	50	50
af (mm)	302	302	202	202
cf (mm)	122	122	102	102
df (mm)	151	151	101	101
ls (mm)	50	100	-	100
ws (mm)	5	5	-	5
D (mm)	$0.57\lambda_{max}$ do $5.7\lambda_{min}$	$0.57\lambda_{max}$ do $5.7\lambda_{min}$	$0.57\lambda_{max}$ do $5.7\lambda_{min}$	$0.57\lambda_{max}$ do $5.7\lambda_{min}$
Duljina antene (mm)	60	60	100	60
t (mm) debljina	1.5	1.5	1.5	1.5
Polumjer monopola (mm)	0.1	0.1	0.1	0.1
Promjer okruglih otvora (mm)	-	-	12.5	-
Udaljenost između okruglih otvora (mm)	-	-	2	-

Tablica 3.1. *Dimenzije eksperimentalnih modela*

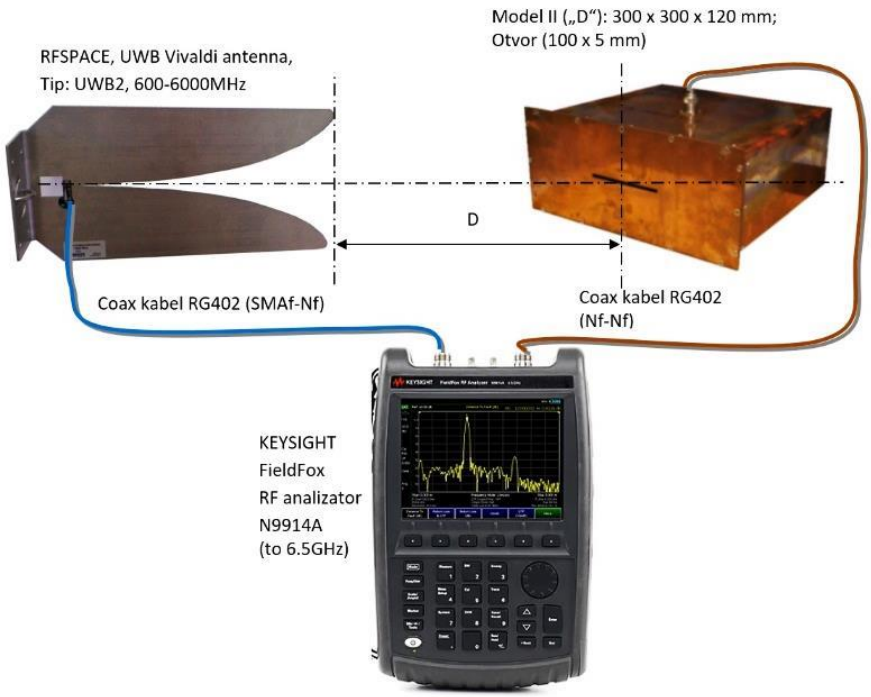
3.2. Metoda I

Metoda I uključuje mjerenje koeficijenta sprege S_{21} između predajne i prijemne antene sa i bez oklopa. S_{21} parametar govori kolika je prenešena snaga s predajne antene (oznaka 1) na prijemnu (oznaka 2). Npr., vrijednost S_{21} = 0 dB govori da je snaga na prijemnoj anteni jednaka ukupnoj snazi dovedenoj predajnoj anteni. U slučaju gdje je S_{21} = -10 dB, za snagu od 1W (0 dB) dovedenu predajnoj anteni, snaga na prijemnoj anteni bit će -10 dB (0.1 W).

U svrhu mjerenja spektralne efikasnosti, monopol antena promjera 0.2 mm postavljena je na gornju plohu metalnog oklopa. Na prvi ulaz spektralnog analizatora pomoću koaksijalnog kabela (RG402) priključena je UWB antena. Isto tako, monopol antena priključena je na drugi ulaz spektralnog analizatora pomoću koaksijalnog kabela (RG402). Pomoću analizatora izmjereni su S_{21} parametri bez metalnog oklopa i s metalnim oklopom. Spektralna efikasnost SE dobivena je izrazom (2-12).

Mjerna oprema (slika 3.5):

- KEYSIGHT, FieldFox RF analizator N9914A, max. frekvencija 6.5 GHz;
- RFSPACE, UWB Vivaldi antena, tip: UWB 2, 600 – 6000 MHz;
- Koaksijalni kabeli: RG402 (SMAf-Mf konektori) 2 m; RG402 (Nf-Nf konektori) 5m.



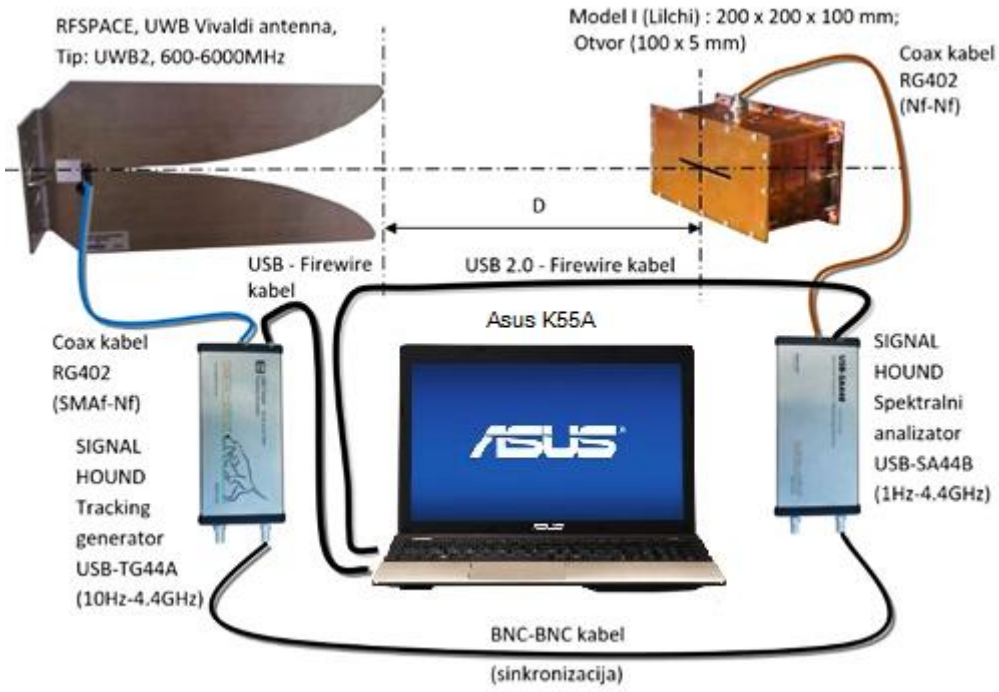
Slika 3.5. *Mjerna oprema korištena u metodi I: RF analizator, Vivaldi antena i "D kućište" s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm* [10]

3.3. Metoda II A

U metodi IIA kao izvor signala korišten je Signal Hound generator signala na kojeg je priključena UWB antena. Generator signala generira signal određene frekvencije koji pristiže na UWB antenu. Spektralni analizator prima signal preko monopol antene. Kabeli pomoću kojih su antene spojene na instrumente su isti kao u metodi I. Spektralna efikasnost računa se pomoću izraza (2-10).

Mjerna oprema (slika 3.6):

- SIGNAL HOUND, Spektralni analizator USB SA 44B, 1 HZ - 4.4 GHz;
- SIGNAL HOUND, Generator signala USB TG 44A, 10 HZ - 4.4 GHz;
- RFSPACE, UWB Vivaldi antena, tip: UWB 2, 600 – 6000 MHz;
- ASUS, K55A; OS Windows 10;
- SIGNAL HOUND, Spectrum Analyzer Software Spike 64 BIT;
- Koaksijalni kabeli: RG402 (SMAf-Nf konektori) 2 m; RG402 (Nf-Nf konektori) 5m;
- Koaksijalni kabeli: RG58 (BNCm-BNCm konektori) 1.5 m;
- USB 2.0 firewire kabel 2 pcs;
- Adapter: Nm-SMAf.



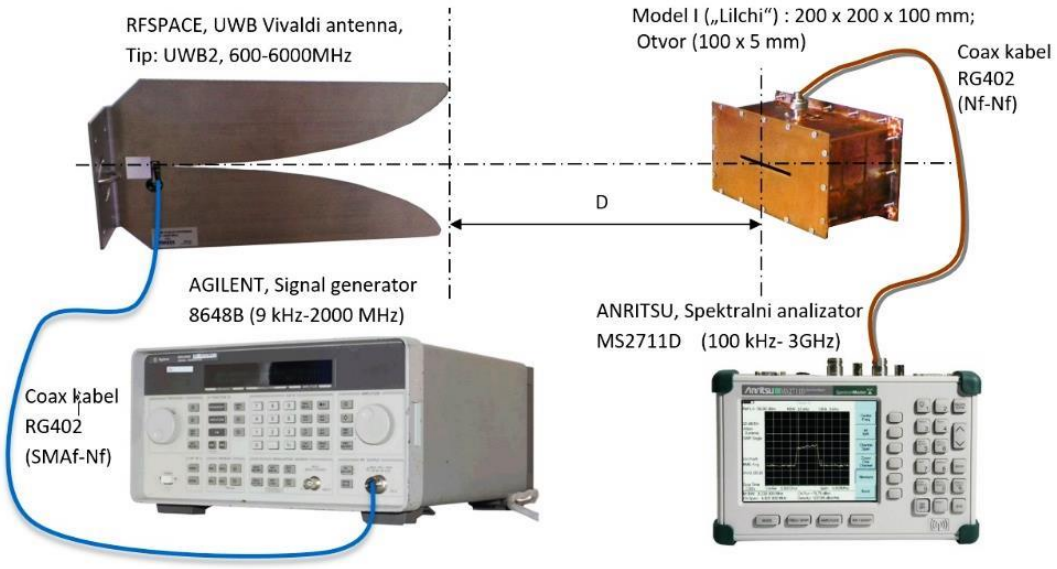
Slika 3.6. *Mjerna oprema korištena u metodi II A: laptop, generator signala, spektralni analizator, Vivaldi antena i „Lilchi kućište" s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm* [10]

3.4. Metoda II B

Izvor signala (UWB antena i generator signala) i mjerna oprema (Spectrum master) korišteni u metodi II B prikazani su slikom 3.7.

Mjerna oprema:

- ANRITSU, Spectrum Master MS2711D, 100 kHZ – 3 GHz;
- AGILENT, Generator signala 8648B, 9 kHZ - 2 GHz;
- RFSPACE, UWB Vivaldi antena, tip: UWB 2, 600 – 6000 MHz;
- Koaksijalni kabeli: RG402 (SMAf-Nf konektori) 2 m;
- RG402 (Nf-Nf konektori) 5m.

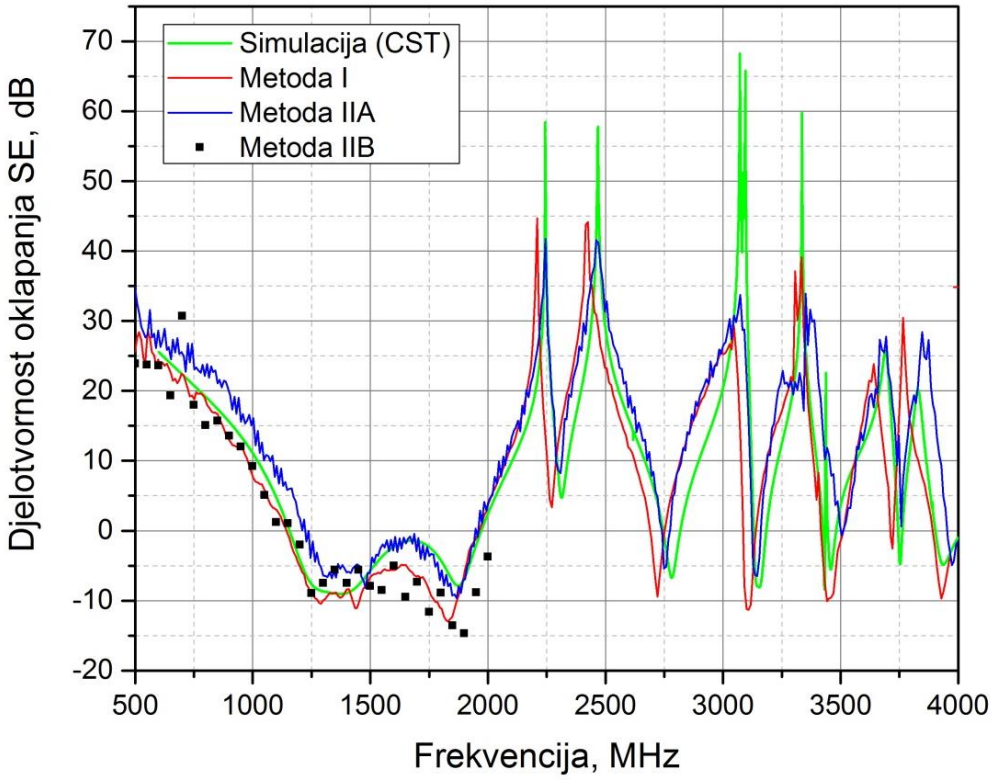


Slika 3.7. *Mjerna oprema korištena u metodi II B: generator signala, Vivaldi antena, spectrum master i "Lilchi kućište" s prorez otvorom 100x5 mm* [10]

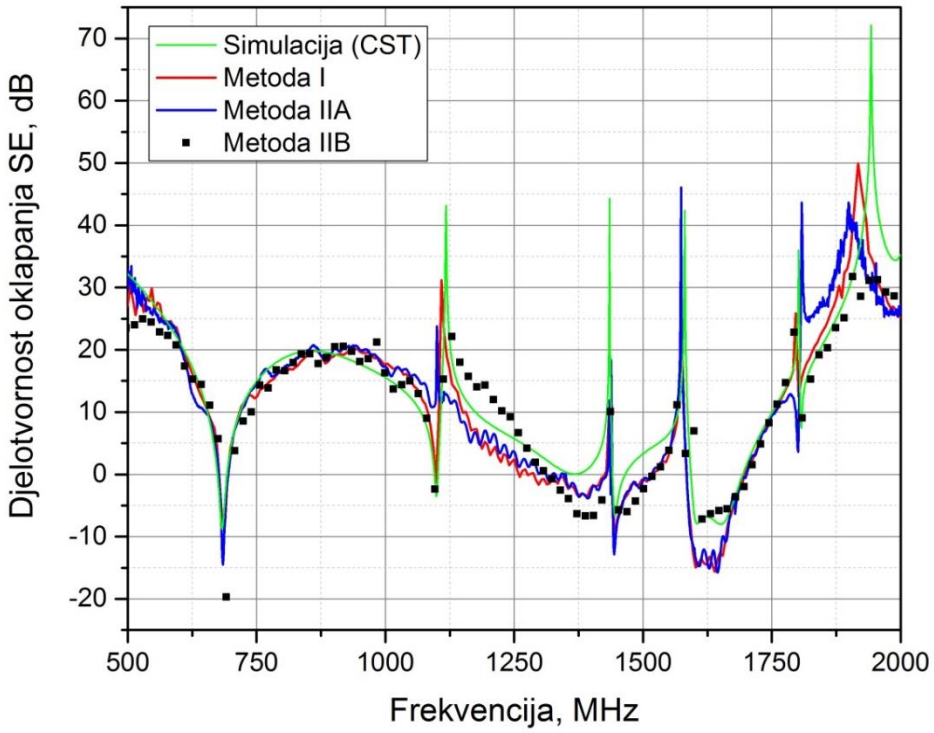
3.5. Rezultati mjerenja

Na slici 3.8. prikazan je graf djelotvornosti oklapanja dobiven metodama I, IIA, IIB i simulacijom u CST računalnom programu za „Lilchi“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm (Model IV iz tablice 3.1). CST računalni program koristi numeričku TLM metodu za određivanje djelotvornosti oklapanja (poglavlje 2.3.4). Djelotvornost oklapanja promatrana je za frekvencijski opseg 500 – 4000 MHz što je određeno dimenzijama kućišta. Na grafu je vidljivo dobro poklapanje rezultata sve tri metode sa simulacijskim rezultatom.

Slika 3.9. prikazuje rezultate djelotvornosti oklapanja dobivene metodama I, IIA i IIB te simulacijom u CST računalnom programu za „D“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm (Model II iz tablice 3.1). U ovom slučaju promatrana je djelotvornost oklapanja unutar frekvencijskog područja 500 – 2000 MHz. Također, rezultati sve tri metode se dobro poklapaju s rezultatima simulacije.

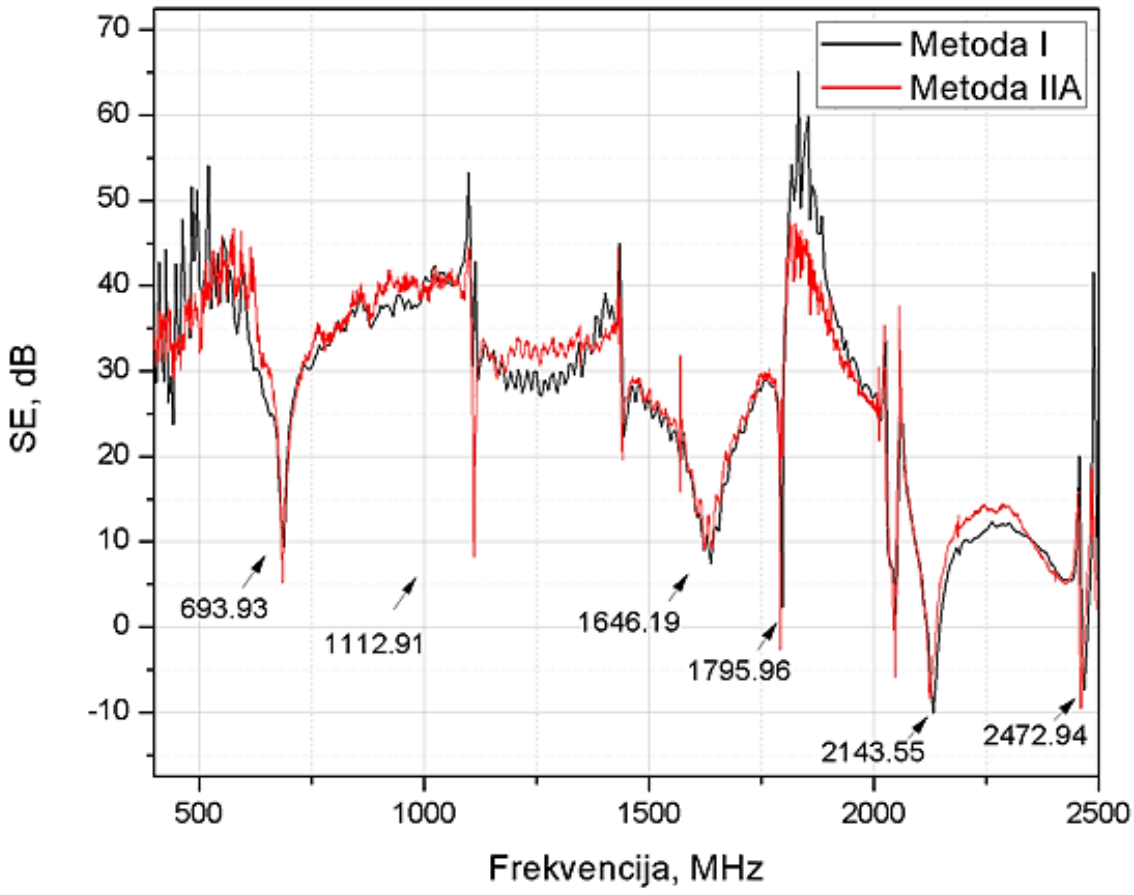


Slika 3.8. *Mjerenja i simulacijski rezultati – djelotvornost oklapanja za „Lilchi“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5mm (Model IV)* [10]



Slika 3.9. *Mjerenja i simulacijski rezultati – djelotvornost oklapanja za „D“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5mm (Model II)* [10]

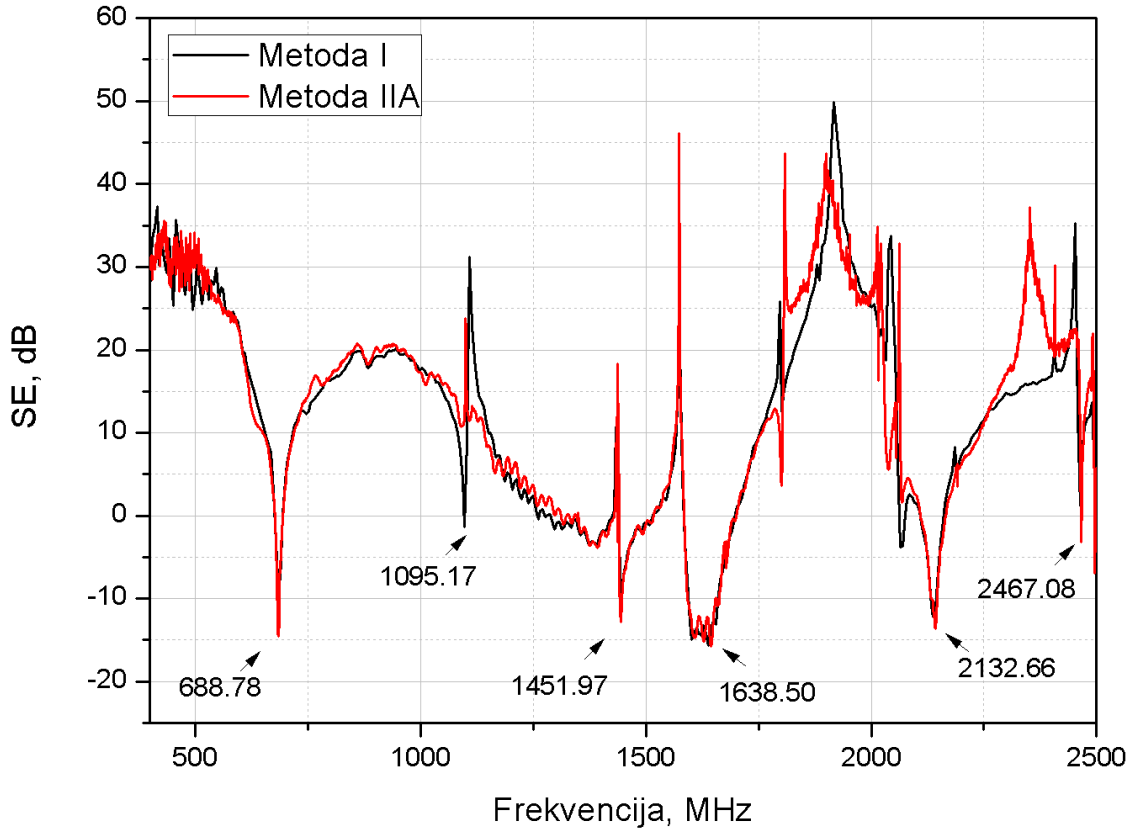
Na slici 3.10. prikazani su rezultati djelotvornosti oklapanja dobiveni metodama I i IIA za „D“ kućište s prorez otvorom dimanzija 50x5 mm (Model I iz tablice 3.1). Djelotvornost oklapanja je promatrana za frekvencijsko područje 400 – 2500 MHz. Na grafu su označene vrijednosti frekvencija rezonantnih modova TE i TM vala koji su pobuđeni unutar kućišta. Izrazom (2-22) moguće je izračunati frekvencije rezonantnih modova koje ovise o dimenzijama kućišta. Može se primjetiti da su *SE* vrijednosti na ovim rezonancijama niske ili čak negativne što znači da je EM polje na njima pojačano. Drugim riječima, za frekvencije rezonancije metalni oklop nema zaštitnu ulogu prema EM smetnjama, već pojačava EM polje. Također, na grafu je vidljivo dobro poklapanje rezultata dobivenih metodom I s rezultatima dobivenih metodom IIA.



Slika 3.10. *Djelotvornost oklapanja za „D“ kućište s prorez otvorom dimenzija 50x5mm (Model I)*

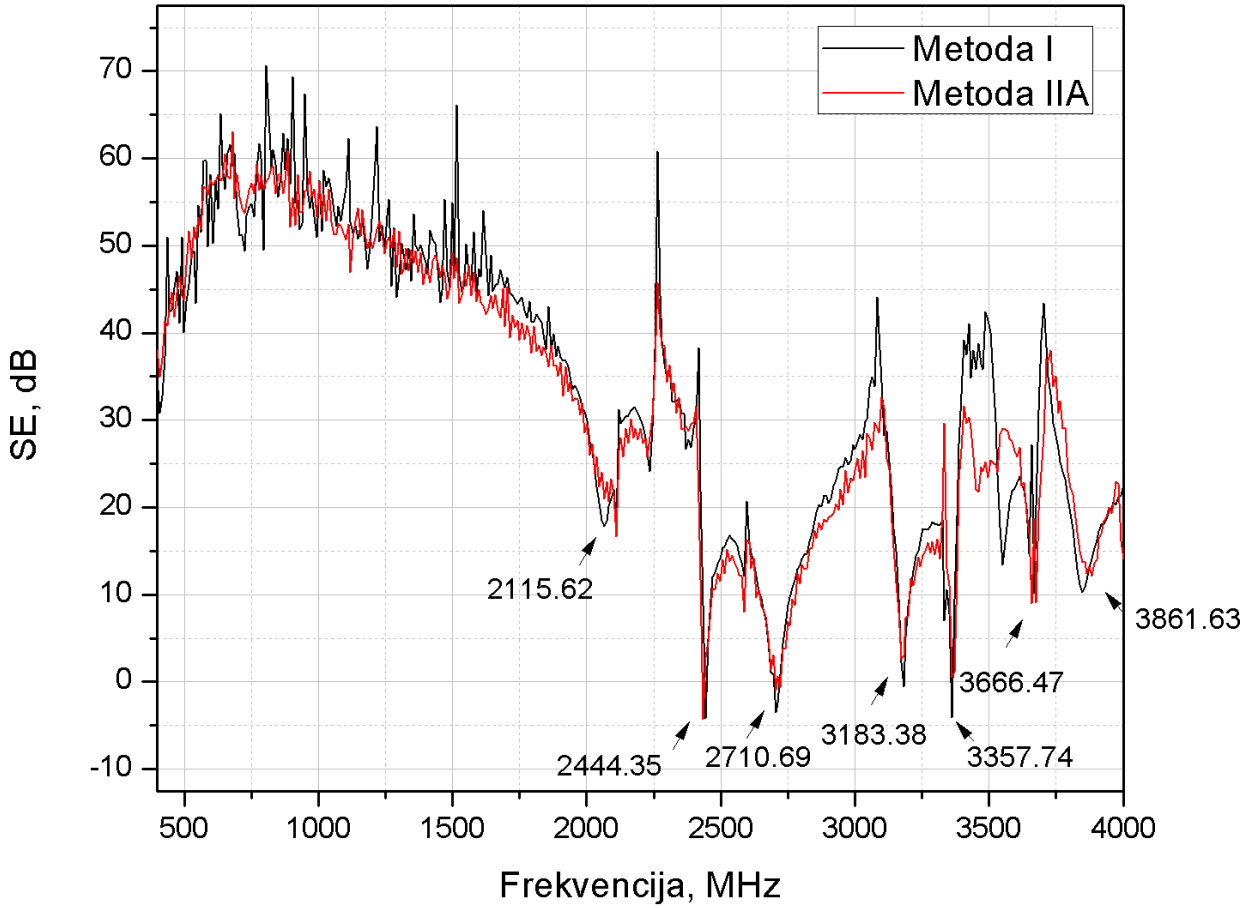
Djelotvornost oklapanja za „D“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm (Model II iz tablice 3.1) dobivena metodama I i IIA prikazana je na slici 3.11. Na grafu su označene frekvencije rezonantnih modova na kojima je djelotvornost oklapanja najmanja. Rezultati metode I se podudaraju s rezultatima metode IIA. Uspoređujući rezultate dobivene za model I

i model II može se zaključiti da kućište s otvorom manjih dimenzija (50x5mm) postiže veće vrijednosti djelotvornosti oklapanja (maksimalna vrijednost 65 dB) od kućišta s otvorom većih dimenzija (100x5mm) gdje je maksimalna vrijednost 50 dB.



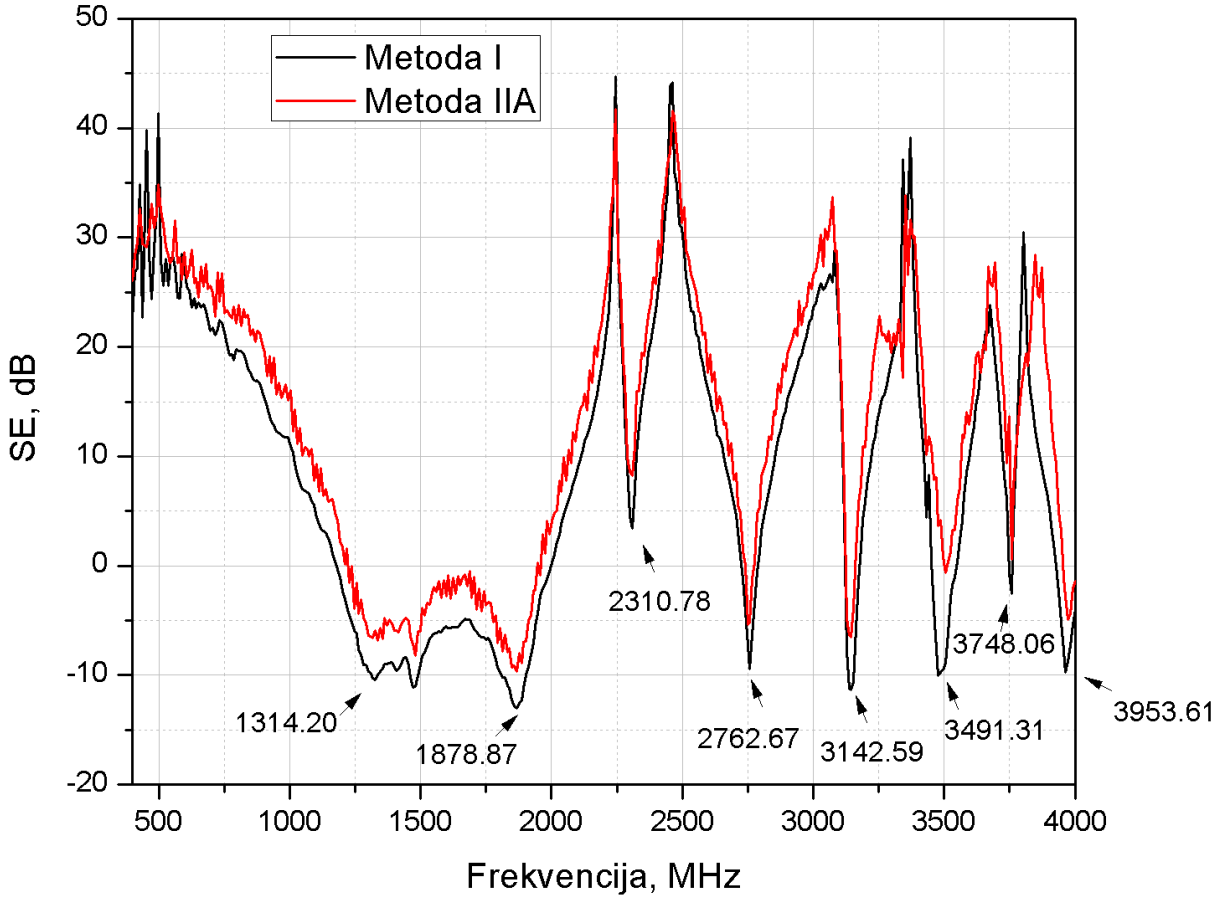
Slika 3.11. *Djelotvornost oklapanja za „D“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5mm (Model II)*

Slika 3.12. prikazuje graf djelotvornosti oklapanja za „Lilchi“ kućište s okruglim otvorima (Model III iz tablice 3.1). Na grafu su prikazani rezultati dobiveni metodama I i IIA. Za navedeno kućište promatrana je djelotvornost oklapanja unutar frekvencijskog opsega 400 – 4000 MHz. Na grafu se može vidjeti kako je djelotvornost oklapanja relativno velika na frekvencijama do 2000 MHz, gdje postiže maksimalnu vrijednost od 70 dB, dok na frekvencijama iznad 2000 MHz postiže puno manje vrijednosti. Također, na grafu su označene frekvencije pobuđenih rezonantnih modova.



Slika 3.12. *Djelotvornost oklapanja za „Lilchi“ kućište s okruglim otvorima (Model III)*

Slika 3.13 prikazuje djelotvornost oklapanja za „Lilchi“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5 mm (Model IV). Prikazani su rezultati dobiveni metodama I i IIA za frekvencijsko područje 400 – 4000 MHz. Djelotvornost oklapanja je najveća na frekvenciji 2250 MHz i postiže vrijednost od 45 dB. Najmanje vrijednosti djelotvornosti oklapanja su na rezonantnim frekvencijama kućišta čije su vrijednosti označene na grafu. Rezultati dobiveni metodama I i IIA se međusobno podudaraju.



Slika 3.13. *Djelotvornost oklapanja za „Lilchi“ kućište s prorez otvorom dimenzija 100x5mm (Model IV)*

4. ZAKLJUČAK

U okviru diplomskog rada primjenjene su dvije metode mjerenja djelotvornosti oklapanja (SE): mjerenjem koeficijenta sprege S_{21} (Metoda I) i mjerenjem jakosti E-polja (Metoda II) s dva seta potpuno različite opreme. Sva mjerenja izvedena su u prostoriji koja nije u potpunosti elektromagnetski izolirana iako to zahtjevaju norme za mjerenje, ali rezultati pokazuju izvrsno poklapanje rezultata mjerenja (obje metode) sa simulacijski dobivenim rezultatima. Simulacija je izvedena korištenjem računalnog programa CST. Dobiveni rezultati ostvareni su primjenom sljedećih mjera za sprječavanje refleksije i drugih smetnji u prostoru u kojem se mjerenje izvodilo:

- Apsorberi za VF korišteni su u dijelu prostora u kojem se mjerenje izvodilo;
- Svi mobiteli, i elektronički uređaji u prostoru bili su ugašeni;
- Predajna antene se locirala na minimalnoj udaljenosti od mjerenog oklopa, ali uz osiguranje uvjeta dalekog polja;
- Mjerenja su izvedena sa maksimalnom snagom mrežnog analizatora, tracking i signal generatora;
- Očitanja rezultata su izvedena sa kašnjenjem od 5-10 sekundi da bi mjerni sustav došao u stabilno stanje.

Analiziran je utjecaj različite grupe otvora – prorez i okruglih otvora na djelotvornost oklapanja. Veće vrijednosti SE daje kućište s okruglim otvorima. Uspoređujući dva kućišta istih dimenzija s različitim prorez otvorima, možemo zaključiti da je veća djelotvornost oklapanja za kućište s prorezom manjih dimenzija (u našem slučaju 50x5 mm).

Također, na grafovima djelotvornosti oklapanja može se vidjeti pojava rezonantnih modova TE i TM vala koji su pobuđeni unutar kućišta i njihove frekvencije ovise o dimenzijama samog kućišta. Na frekvencijama rezonantnih modova vrijednosti SE često su niske, čak i negativne. U ovom slučaju, metalni oklop nema zaštitnu ulogu prema EM smetnjama, već pojačava EM polje.

Rad je pokazao da se mjerenje djelotvornosti oklapanja može izvesti i izvan normi koje su propisane, pri čemu se rezultati mjerenja izvrsno poklapaju s referentnim simulacijski dobivenim rezultatima.

5. LITERATURA

[1] Zubović Janja, Dvojna priroda svjetlosti, završni rad, Odjel za fiziku Osijek, 2016., dostupno na: https://repozitorij.fizika.unios.hr/islandora/object/fizos%3A37/datastream/PDF/view

[2] Poljak, Dragan. Teorija elektromagnetskih polja s primjenama u inženjerstvu. Zagreb : Školska knjiga, 2014 - sign. 537(075.8) /POLJ/ t

[3] http://www.brainkart.com/article/Characteristics-of-electromagnetic-waves_12120/

[4] https://online.science.psu.edu/chem101_sp1/node/11822

[5] Vujević, Slavko; Milanović, Igor. Elektromagnetsko oklapanje i uzemljenje. // Elektro. 9 (2005), 6 ; str. 22-24

[6] Tehnički leksikon : A-Ž. Zagreb : Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2007 - sign. 62(03) /TEH/

[7] https://www.tech-worm.com/faraday-kafesi-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir/

[8] https://nationalmaglab.org/about/around-the-lab/what-the/faraday-cage

[9] Nataša J. Nešić, „Numerička i eksperimentalna analiza utjecaja grupe otvora na karakteristike oklapanja metalnih kućišta u mikrovalnom frekvencijskom opsegu“, doktorska disertacija, Beograd, 2017.

[10] V. Mandrić Radivojević, N.Nešić, S.Rupčić, V.Alilović, „The shielding effectiveness measurement of a rectangular enclosure perforated with slot aperture“, International Conference Smart System and Technology 2017., Osijek, Oct.2017.

[11] Clayton R. Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley & Sons, 2006.

[12] Russer Peter, Russer Johannes A., „Some Remarks on the Transmission Line Matrix (TLM) Method and Its Application to Transient EM Field and to EMC Problems, 2015.

[13] Nataša J. Nešić, Nebojša S. Dončov, „Analysis of TLM Air-vent Model Applicability to EMC Problems for Normal Incident Plane Wave“, Telfor Journal, Vol. 8, No. 2, 2016.

SAŽETAK

Oklapanje elektroničkih (električkih) uređaja jedan je od najraširenijih postupaka zaštite ljudi od elektromagnetskog zračenja. Također, oklapanje osigurava siguran rad uređaja uslijed elektromagnetskog polja koja se nalaze u njegovom okruženju. Djelotvornost oklapanja (**eng**. *shielding effectiveness - SE*) definirana je odnosom signala na prijemniku sa i bez oklopa oko njega. Postupci mjerenja djelotvornosti oklapanja na visokim frekvencijama u dalekom području normirani su normom IEEE Std 299-1997.

U okviru diplomskog rada opisane su dvije metode mjerenja djelotvornosti oklapanja: 1. mjerenjem koeficijenta sprege S_{21} sa i bez oklopa te 2. mjerenjem jakosti E polja sa i bez oklopa s dva različita seta mjerne opreme. Mjerenja djelotvornosti oklapanja izvedena su za dva različita oklopa u obliku kvadra. Oklopi su izrađeni od bakrenog lima, a na prednjoj stranici oklopa izvedeni su prorez i okrugli otvori. Otvori na zaštitnom oklopu izvedeni su iz razloga što se na realnim zaštitnim oklopima pojavljuju otvori za napojne i informacijske kabele, otvori za ventilaciju, otvori pri izvedbi spojeva oklopa i dr. U zaključnom dijelu rada mjereni rezultati SE uspoređeni su sa simulacijski dobivenim rezultatima.

Ključne riječi: oklapanje električnih uređaja, elektromagnetska kompatibilnost, djelotvornost oklapanja, koeficijent sprege S_{21}, prigušenje EM vala

ABSTRACT

Electromagnetic shielding is one of the most widely used methods of protecting people from electromagnetic radiation. Also, shielding ensures safe operation of the device due to the electromagnetic field in its environment. Shielding effectiveness (SE) is defined by the ratio of signal on the receiver with and without the shield around it. High frequency shielding effectiveness measurements in a far field area are standardized by IEEE Std 299-1997.

Within the scope of the thesis, two methods of measuring the effectiveness of shielding are described: 1. by measuring the coefficient of the S_{21} with and without the shield; and 2. by measuring the strength of the E-field with and without the shield with two different sets of measuring equipment. Shielding effectiveness measurements were made for two different shapes of rectangular enclosure. The enclosures are made of copper sheets, and on the front of the enclosure are slit and round apertures. The apertures on the protective enclosure are

derived from the fact that in the real protective enclosures there are openings for information and supply cables, ventilation openings, openings for shield joints etc. In the final part of the work, the measured results are compared with the simulation results obtained.

Keywords: electromagnetic shielding, electromagnetic compability, shielding effectiveness, S_{21} transmission coefficient, attenuation of electromagnetic waves

ŽIVOTOPIS

Viktorija Alilović rođena je 30.1.1992. Nakon završene Opće gimnazije u Županji, 2012. godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike, smjer komunikacije i informatika na FERIT-u u Osijeku. Tijekom studija sudjeluje na festivalima znanosti s temama iz područja radioastronomije i elektronike. 2015. godine završava preddiplomski studij elektrotehnike i upisuje diplomski studij Komunikacije i informatika, izborni blok Komunikacijske tehnologije. U veljači 2017. godine odrađuje praksu u tvrtki Rimac automobili u Svetoj Nedelji. U studenom 2017. godine postaje stipendist Instituta RT-RK u Osijeku.