

Povećanje djelotvornosti oklapanja pozicioniranjem pasivnih reflektora unutar vodljivog kućišta

Palčok, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:991668>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-09**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I

INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA

Sveučilišni studij

**POVEĆANJE DJELOTVORNOSTI OKLAPANJA
POZICIONIRANJEM PASIVNIH REFLEKTORA
UNUTAR VODLJIVOG KUĆIŠTA**

Diplomski rad

Juraj Palčok

Osijek, 2019.

Sadržaj:

1. UVOD	1
1.1. Zadatak rada i ciljevi rada	2
2. ELEKTROMAGNETSKO OKLAPANJE	3
2.1. Elektromagnetski val.....	3
2.1.1. Maxwell-ove jednačbe	4
2.1.2. Valne jednačbe elektromagnetskog vala	6
2.2. Djelotvornost elektromagnetskog oklapanja.....	7
2.2.1. Elektromagnetsko oklapanje	10
2.2.2. Djelotvornost kućišta pravokutnog oblika sa pravokutnim otvorom	12
2.2.3. Povećanje efikasnosti povećanjem broja refleksija EM vala	14
3. SIMULACIJA I REZULTATI.....	17
3.1. Simulacija u računalnom programu HFSS.....	17
3.2. Prvi slučaj.....	20
3.3. Drugi slučaj	22
3.4. Treći slučaj	24
4. ZAKLJUČAK	26
5. LITERATURA.....	27
SAŽETAK.....	28
ŽIVOTOPIS	30

1. UVOD

Količina elektriciteta se naziva još i električni naboj (q ili Q) je fizikalna veličina pomoću koje se opisuje svojstvo čestica te način djelovanja električnih sila. Elektromagnetski valovi predstavljaju širenje elektromagnetskoga polja. Tijela koja su nabijena u svom okolišu proizvode električno polje, a električna struja koja teče kroz vodiče u okolini vodiča proizvodi magnetsko polje. Ukoliko postoji akcelerirano gibanje naboja on će proizvesti elektromagnetski val (EM val).

Kroz povijesti mnogi su fizičari proučavali pojavu EM vala. Škotski fizičar James Clerk Maxwell je postavljanjem svojih jednadžbi u kojima je izražen kontinuitet električnog i magnetskog polja pobliže svijetu pojasnio svojstva elektromagnetskih valova. Valjanost Maxwell-ove teorije je provođenjem svojih pokusa potvrdio njemački fizičar Heinrich Rudolf Hertz 1888. Hertz se pri testiranju služio aparatom koji proizvodi oscilacije (oscilator). Hertz-ov oscilator sastoji od dvije metaln šipke koje na svojim krajevima sanutarnje strane sadržavaju kuglice načinjene od metala. Kuglice na oscilatoru su spojene s induktorom koji na njih dovodi električni naboj. Kada dođe do pojave električne iskre između kuglica, nastaje električna oscilacija. Električna struja je na krajevima šipki jednaka nuli (čvorovi EM vala) dok je u prostoru između kuglica u trenutku pojave iskre najjača (trbusi EM vala).

Pomoću Hertz-ovih pokusa fizičari su uvidjeli prednosti elektromagnetskog vala te je to bio jedan od početaka prijenosa informacija putem elektromagnetskih valova kakve danas poznajemo. Međutim s obzirom da se EM valovi propagiraju slobodnim prostorom oni također mogu negativno utjecati u obliku šuma na električkim uređajima kao što su radio prijemnici i telefonska oprema. U našem okruženju postoje mnogi drugi izvori elektromagnetskih emisija kao što su atmosferska pražnjenja (udari groma) te bilo koji drugi elektronički uređaji kroz koji protječe električna struja stvaraju EM valove čiji je frekvencijski spektar širok. Jedan takav primjer izvora EM vala su visokonaponske linije za prijenos električne energije između trafostanica (50Hz). U blizini takvih linija postoji elektromagnetsko zračenje koje može negativno utjecati na rad odašiljača, radara pa čak i za uređaje za čiji rad se zahtjeva točno određena frekvencija. Radi toga je potrebno kvalitetno dizajnirati elektroničku opremu da bi utjecaj EM zračenja na uređaje bilo minimalno. Jedan od rješenja je oklapanje elektroničkih uređaja tj. postavljane elektroničke opreme u vodljivo kućište dizajnirano na način da osigurava nesmetan rad uređaja koji se nalazi u prostoru sa utjecajem elektromagnetskog zračenja, ali ujedno sprječava elektromagnetsko zračenje

samog uređaja u prostor. Efikasnost oklapanja uređaja možemo predočiti kao sumu gubitaka snage elektromagnetskog vala uslijed refleksije, apsorpcije i višestruke refleksije.

1.1. Zadatak rada i ciljevi rada

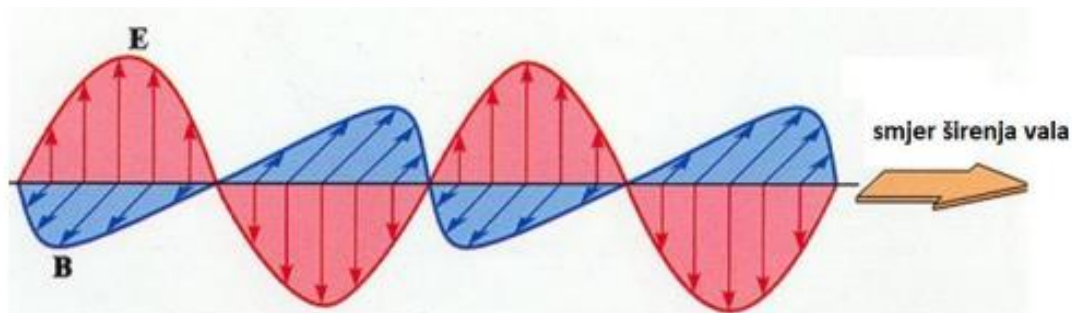
U okviru ovog diplomskog rada potrebno je računalnom simulacijom odrediti djelotvornosti kućišta s obzirom na povećavanje broja refleksija elektromagnetskog vala koji ulazi u zaštitno kućište. Proučavanje će se izvesti na kućištu sa većom i manjom pasivnom pregradom u frekvencijskom opsegu od 400MHz do 2GHz, te sa ograničenjem na maksimalno četiri korištene pregrade istovremeno. Mjerenje djelotvornosti oklapanja izvršeno je za jedno kućište sa jednim otvorom koji se nalazi na prednjoj strani kvadratnoga oblika oklopa. Kućište je takvog oblika zato što su u praksi na realnim zaštitnim oklopima postavljaju otvori takvog geometrijskog oblika i dimenzija, a to mogu biti otvori raznih primjena kao što su: otvori za napojne i informacijske kabele, otvori za ventilaciju i slično. Cilj ovoga rada je računalnom simulacijom odrediti kako prostorno pomicanje pregrada u vodljivom kućištu (oklopu) utječe na djelotvornost samog kućišta.

2. ELEKTROMAGNETSKO OKLAPANJE

Elektromagnetsko oklapanje (**eng.** *electromagnetic shielding*) obuhvaća mjere koje se poduzimaju da bi vanjsko elektromagnetsko polje unutar volumena oklopljenog kućištem bilo minimalno. Oklopi se proizvode od vodljivih materijala kojima djelotvornost samog oklapanja ovisi o konstrukciji oklopa i o samoj frekvenciji elektromagnetskog vala. Povećanje djelotvornosti oklapanja unutar kućišta može se postići dodavanjem pasivnih pregrada radi postizanja većeg broja refleksija unutar kućišta ili dodavanjem apsorbera radi smanjivanja snage elektromagnetskog vala.

2.1. Elektromagnetski val

Val općenito predstavlja širenje nekakvog događaja (poremećaja) kojim se prenosi energija kroz sredstvo, a da se to sredstvo gledano kao cjelina miruje. Mehaničkim valovima za širenje potrebna je kruta tvar (medij), dok u suprotnom EM valovi imaju sposobnost širenja i vakuumom ili zrakom. Ovisno o načinu rasprostiranja vala, valovi se mogu podijeliti na longitudinalne i transverzalne valove. Elektromagnetsko polje je nosilac EM valova. Promjenjivo električno i magnetsko polje proizvode EM val. EM valovi su svi oni valovi čije se širenje opisuje titranjem električnog i magnetskog polja. Električno i magnetsko polje imaju jednaku brzinu širenja u vakumu, a mogu se razlikovati po valnim duljinama i frekvencijama. Postoje različiti izvori EM valova, a to mogu biti: atomi, ioni, molekule, elektroni (LC-krugovi, antene). EM valovi se ubrajaju u transverzalne valove, a silnice koje opisuju električnog polja E su u odnosu na silnice magnetskog polja B uvijek okomite te su ravnine E i B okomite na smjer rasprostiranja EM vala (Slika 2.1.). EM valovi su svrstani u elektromagnetski spektar koji se proteže od valova najmanje frekvencije i najveće valne duljine do valova najveće frekvencije i najmanje valne duljine. EM valovi se šire brzinom svjetlosti c ($3 \cdot 10^8$ m/s), što znači da je umnožak valne duljine λ i frekvencije f uvijek stalan.



Slika 2.1. Elektromagnetski val.[1]

2.1.1. Maxwell-ove jednađbe

U 19. stoljeću, 1861. škotski znanstvenik James Clerk objavio je svoju teoriju u časopisu „Philosophical Magazine“. Maxwell-ova teorija se sastoji od skupa četiri skladno povezane jednađbe koje ujedinjuju električno i magnetsko polje. Maxwell-ove se jednađbe mogu prikazati u diferencijalnom i integralnom obliku. Ekvivalencija između ovih oblika zasniva se na Stokes-ovom i Gauss-ovom teoremu. Također postoji i četverodimenzionalni oblik koji se koristi u teoriji relativnosti i kvantnoj elektrodinamici. Univerzalni oblik Maxwell-ovih jednađbi opisuje elektromagnetske fenomene u vakumu. Diferencijalni oblik opisuje bilo koju točku u prostoru dok se integralni oblik odnosi na konačan volumen.

Oznake korištene u jednađbama drugog poglavlju prema SI sustavu glase:

ρ - gustoća električnoga naboja ili količina električnog naboja po jedinici volumena,

J - gustoća električne struje, tok električnog naboja po jedinici površine u jedinici vremena,

ϵ_0 - dielektrična konstanta vakuma,

μ_0 - permeabilnost vakuma, a jednaka je $\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 * c^2}$ gdje je c brzina svjetlosti,

E - jakost električnog polja,

H - jakost magnetskog polja,

B - gustoća magnetskog toka,

D - gustoća električnog toka,

A – vektorski magnetski potencijal.

U Maxwell-ovim jednađbama pretpostavlja se da implicitno vrijedi jednađba kontinuiteta (2-1) koja glasi da za svaku zatvorenu plohu u prostoru vrijedi da je tok struje koja prolazi kroz tu zatvorenu plohu jednak negativnoj promjeni količine naboja u tom prostoru. To je zapravo zakon očuvanja naboja:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * J = 0. \quad (2-1)$$

Prva Maxwell-ova jednađba u diferencijalnom obliku zapravo je Gaussov zakon koji napominje da je izvor električnog polja električni naboj:

$$\nabla * E = \frac{\rho}{\epsilon_0} . \quad (2-2)$$

Ukoliko se na jednađbu (2-2) primjeni Gaussov teorem tada jednađba kazuje da je električni tok kroz plohu koja je zatvorena jednak sumi električnog naboja u njezinoj unutrašnjosti:

$$\oint_{\partial V} E * dA = \int_V \frac{\rho}{\epsilon_0} * dV . \quad (2-3)$$

Druga Maxwell-ova jednađba u diferencijalnom obliku kazuje da magnetsko polje nema izvora tj. da ne postoje magnetski monopoli:

$$\nabla * B = 0 . \quad (2-4)$$

Ukoliko se na jednađbu (2-4) primjeni Gaussov teorem ova se jednađba može zapisati u integralnom obliku tada kazuje da je magnetski tok kroz bilo koju zatvorenu plohu jednak nuli:

$$\oint_{\partial V} B * dA = 0 . \quad (2-5)$$

Treća Maxwell-ova jednađba u diferencijalnom obliku predstavlja Faradayev zakon indukcije koja ukazuje da svaka promjena magnetskog polja stvara električno polje:

$$\nabla \times B = - \frac{\partial B}{\partial t} . \quad (2-6)$$

Ukoliko se na jednađbu (2-6) primjeni Stokesov teorem jednađba poprima integralni oblik tada kazuje da je integral vektora električnog polja po zatvorenoj petlji je jednak negativnoj promjeni magnetskog toka po vremenu obuhvaćenog tom petljom te glasi:

$$\oint_{\partial A} \vec{E} * ds = - \frac{d}{dt} \int_A B * dA \quad (2-7)$$

Četvrta Maxwell-ova jednađba je prošireni Amper-ov zakon koji glasi da se oko svakog vodiča kojim teče električna struja inducira magnetsko polje, ali i svako promjenjivo električno polje inducirati će magnetsko polje:

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2-8)$$

Ukoliko se na ovaj zakon primjeni Stokesov teorem dobiva se integralni oblik koji glasi da je integral vektora jakosti magnetskog polja po zatvorenoj krivulji jednak zbroju struje i vremenski promjenjivog električnog toka obuhvaćenih tom krivuljom:

$$\oint_{\partial A} \vec{B} * ds = \int_A \mu_0 J * dA + \frac{d}{dt} \int_A \mu_0 \epsilon_0 E * dA \quad (2-9)$$

2.1.2. Valne jednačbe elektromagnetskog vala

Diferencijalni oblik Maxwell-ovih jednačbi čini niz povezanih parcijalnih jednačbi prvog reda. Valne jednačbe elektromagnetskog vala su izvedene iz Maxwell-ovih tu su one parcijalne diferencijalne jednačbe drugog reda. Nakon izvođenja valne jednačbe poprimaju slijedeću formu:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \rho, \quad (2-10)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (2-11)$$

Pri daljnjem razmatranju valnih jednačbi, na sve točke u prostoru s obzirom da se izuzme izvor EM vala dobiju se četiri povezane jednačbe. Njihovom kombinacijom mogu se dobiti jednačbe gibanja elektromagnetskog vala u slobodnom prostoru te one tada imaju slijedeći oblik:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (2-12)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (2-13)$$

Brzina širenja elektromagnetskih valova v u sredstvu s dielektričnošću ϵ i permeabilnošću μ je:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (2-13)$$

Dok je brzina širenja elektromagnetskog vala u vakumu (gdje vrijedi $\epsilon = \epsilon_0$, $\mu = \mu_0$) iznosi:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2.998 * 10^8 \frac{m}{s}. \quad (2-14)$$

Pri prijelazu elektromagnetskog vala iz sredstva u kojem se širi jednom brzinom u sredstvo u kojem se širi nekom drugom brzinom mijenja se valna duljina vala (λ), dok frekvencija (f) ostaje nepromijenjena. Amplitude električnog i magnetskog polja u svakom trenutku povezane su relacijom:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}, \quad E = B * c. \quad (2-15)$$

Elektromagnetski val prenosi energiju kroz prostor. Gustoća toka energije, tj. intenzitet elektromagnetskog vala, je energija koju ravni elektromagnetski val u jedinici vremena prenese kroz jedinicu površine. Vektorskom veličinom se smatra gustoća toka energije, a ima smjer identičan smjeru širenja vala i naziva se Poyntingov vektor:

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} = \frac{1}{\mu} (\vec{E} \times \vec{B}). \quad (2-16)$$

Gustoća toka energije mijenja se s vremenom, a njena srednja vrijednost iznosi:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} E_0 H_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} E_0^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} H_0^2. \quad (2-17)$$

2.2. Djelotvornost elektromagnetskog oklapanja

Djelotvornost elektromagnetskog oklapanja (SE) je važan parametar koji utječe na elektromagnetsku kompatibilnost opreme. Utvrđuje se SE praktičnih metalnih kućišta uglavnom s njihovim otvorima. Formula koja se često navodi je *Ottova* jednadžba koja glasi $SE = 20 \log_{10}(\lambda/2l)$, gdje je l najdulja dimenzija otvora i λ valna duljina u slobodnom prostoru. No međutim eksperimentalno je utvrđeno da iznos SE također ovisi o dimenzijama ograđenog prostora i točki mjerenja SE. Složeniji izračuni SE u literaturi se općenito oslanjaju na numeričke izračune za svaki ograđeni prostor ili se primjenjuju samo na ograničena frekvencijska područja[6]. Općenito faktor oklapanja SE, definira se kao omjer električnog ili magnetskog polja u odsutnosti (E_{ush}) i prisutnosti (E_{sh}) metalnog oklopa, tada izraz glasi:

$$SE_e = 20 \log \frac{E_{ush}}{E_{sh}}, [dB]. \quad (2-18)$$

Faktor oklapanja se također može definirati kao omjer snaga EM polja u odsutnosti (P_{ush}) i prisutnosti (P_{sh}) metalnog oklopa, ali se isto tako može definirati kao omjer S_{21} parametara mjerenih u odsutnosti i prisutnosti metalnog oklopa.

Gledajući fizikalne utjecaje koji povećavaju slabljenje EM vala koji je prošao kroz otvore metalnog oklopa mogu se zapisati kao:

- gubici uslijed apsorpcije (skin efekt) elektromagnetskog vala unutar metalnog oklopa (A_l - **eng.** *absorption losses*),
- gubici uslijed refleksije elektromagnetskog vala u metalnom oklopu (R_l - **eng.** *reflection losses*),
- gubici uslijed višestrukih refleksija unutar metala metalnog oklopa (MR_l - **eng.** *multiple reflection losses*).[3]

Uzevši sve u obzir efikasnost oklapanja (SE) se tada može zapisati kao:

$$SE_{dB} = A_l + R_l + MR_l, [dB]. \quad (2-19)$$

Faktor gubitaka uslijed apsorpcije (A_l) podjednak je za daleko i blisko polje EM vala, a dan je izrazom:

$$A_l = 8.7 * d * \sqrt{\pi * f * \mu * \sigma} = 8.7 * \frac{d}{\delta}, [dB]. \quad (2-20)$$

Gdje je:

d-debljina metala metalnog oklopa,

f -frekvencija EM polja,

μ -permeabilnost metalnog oklopa,

σ -vodljivost metalnog oklopa,

δ -dubina prodiranja EM polja u metalni oklop (**eng.** *skin depth*): $\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$.

Faktor gubitaka uslijed refleksije (R_l) ovisi o udaljenosti izvora EM polja od zaštitnog oklopa. U slučaju udaljenog izvora, faktor gubitaka uslijed refleksije približno opisuje izraz:

$$R_l \approx \log_{10} \frac{Z_0}{4Z_m}, [dB]. \quad (2-21)$$

Gdje je:

$Z_0=377\Omega$ -valna impedancija zraka,

Z_m – valna impedancija metala oklopa, te vrijedi $R_l \approx |Z_m| = \sqrt{2\rho f\mu/\sigma}$.

U slučaju bliskog izvora faktor gubitaka uslijed refleksije približno opisuje izraz:

$$R_l \approx 20\log_{10} \frac{(Z_{polje}+Z_m)^2}{4Z_{polje}Z_m}, [dB]. \quad (2-22)$$

Gdje je:

Z_{polje} -valna impedancija polja,

za električno glasi $Z_{polje} = Z_E = 1/(2\pi f\varepsilon \cdot r)$,

a za magnetsko $Z_{polje} = Z_H = 2\pi f\mu \cdot r$,

r - udaljenost izvora EM vala od oklopa.

Može se zaključiti da za niske frekvencije i materijale sa velikom vodljivošću faktor gubitaka oklopa uslijed refleksije biti velik dok će za visoke frekvencije i feromagnetski oklop faktor će biti mal. [7]

Faktor gubitaka uslijed višestruke refleksije (MR_l) unutar metala približno opisuje izraz:

$$MR_l \approx 20\log_{10} \left(1 - e^{-\frac{2d}{\delta}}\right), [dB]. \quad (2-23)$$

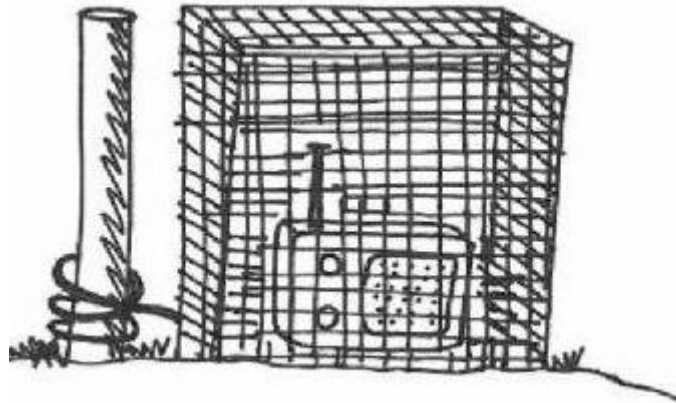
Faktor gubitaka uslijed višestruke refleksije (MR_l) u metalu se može zanemariti u slučaju da je dubina prodiranja EM vala puno manja od same debljine oklopa ($\delta \ll d$). [7]

Efikasnost oklapanja magnetskog polja se povećava porastom frekvencije bliskog izvora dok se učinak oklapanja električnog polja smanjuje. Debljina stijenke oklopa ne utječe na faktor gubitaka uslijed refleksije, ali njeno povećanje povećava faktor gubitaka uslijed višestruke refleksije i apsorpcije.

2.2.1. Elektromagnetsko oklapanje

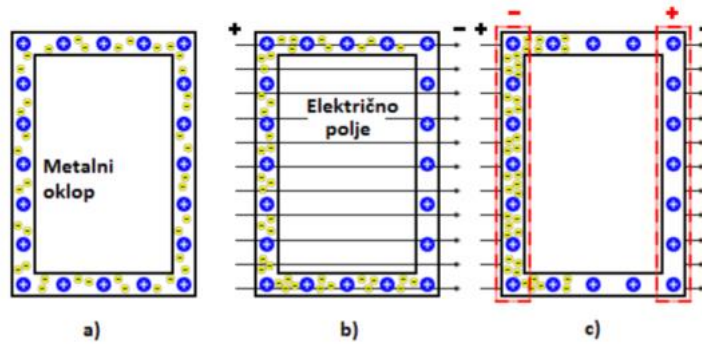
Oklapanje (**eng.** *Shielding*), je skup postupaka smještanja elektroničkih sklopova ili cijelih sustava unutar pomno konstruiranog vodljivog kućišta (oklopa). Cilj oklapanja je zaštita od vanjskog EM polja koje bi moglo negativno utjecati na rad uređaja. Pristup oklapanja uređaja je različit za različite frekvencije. Frekvencije do 100 kHz predstavljaju sporo promjenjiva polja, u tome slučaju električno i magnetsko polje se mogu odvojeno analizirati pa razlikujemo električno oklapanje i magnetsko oklapanje. Kod frekvencija većih od 100 kHz električno i magnetsko polje se moraju promatrati kao cjelina jer je riječ o elektromagnetskom valu te imamo EM oklapanje uređaja.

Koaksijalni kabel je jedan primjer elektromagnetskog oklapanja. Oplet od vodljivog materijala oko vodiča koji prenosi informaciju kod koaksijalnog kabela predstavlja elektromagnetski oklop koji radi na principu takozvanog Faradayevog kaveza (Slika 2.2)[4]. Faradayev kavez ima zadatak da štiti elektroničke uređaje od elektromagnetskih zračenja on predstavlja prostor ograničen nekim vodljivim (npr. bakar, aluminij) materijalom. Dimenzije oklopa ovise o frekvencijskom prostoru i vrsti polja od kojeg se želi zaštititi elektronička oprema. Ako je oklop pravilno dimenzioniran neželjeno polje unutar oklopa može oslabiti za čak 120 dB. Primjenu pronalazi pri zaštiti elektroničke opreme od EM smetnji, ali i za zaštitu ljudi od EM zračenja.



Slika 2.2. Ilustracija Faradayevog kaveza.[2]

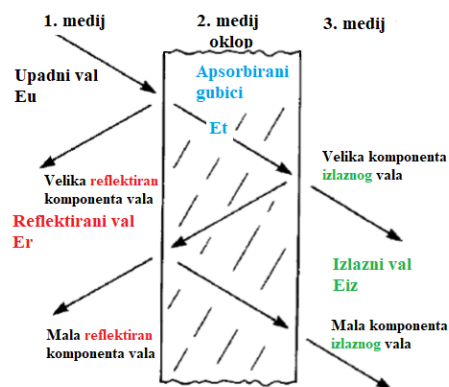
Prilikom djelovanja električnog polja na Faradayev kavez, električni naboj se preraspodjeli na vanjskim stranicama vidi sliku 2.3. na takav način da električno polje unutar kaveza izjednači sa nulom. Magnetsko polje planeta Zemlje je sporo promjenjivo što bi značilo da će se takvo polje osjećati unutar kaveza (igla u kompasu će pravilno pokazivati sjeverni i južni pol).



Slika 2.3. Princip rada Faradayevog kaveza.[3]

Elektromagnetsko oklapanje ne služi samo da bi vanjske smetnje i zračenja zadržalo van oklopa već da bi i unutarnje zračenje ostalo unutar oklopa. Oklopi sadržavaju razne otvore za kablove i ventilaciju te je iz toga razloga nemoguće u potpunosti spriječiti ometanje koje prouzročava vanjsko zračenje. Permeabilnost materijala od kojeg je oklop načinjen utječe na zaštitu od EM polja što je značajnije na niskim frekvencijama, dok su na višim frekvencijama kućišta mnogo efikasnija, ako je oklop izrađen od materijala visoke električne vodljivosti.

Schelkunoff-ovom model opisuje teoriju na kojoj se zasniva oklapanje od EM zračenja. Model je razvijen i opisan 1938. te se temelji na impedanciji EM vala. Upadni val E_u prolazi iz jednog medija u drugi te se prilikom prolaska vala jedan dio vala se reflektira nazad u prvi medij dok se ostatak vala translata u drugi medij E_t . Val koji je prošao u drugi medij je oslabljen faktorom $e^{-d/\delta}$, u kojem d predstavlja debljinu stijenke oklopa, a δ predstavlja dubinu prodiranja (**eng. skin depth**). Prolaskom vala kroz drugu stijenku drugog medija, jedan dio vala se također reflektira nazad u drugi medij dok dio prolazi u treći medij E_{iz} . U drugom mediju (oklopu) val se višestruko reflektira pod utjecajem faktora slabljenja kroz medij (Slika 2.4.).



Slika 2.4. Schelkunoff-ov model.[3]

2.2.2. Djelotvornost kućišta pravokutnog oblika sa pravokutnim otvorom

Proračun dimenzija se vrši analitički formulama za pravokutni otvor u pravokutnom kućištu. Ukoliko se kutija promatra kao kratki pravokutni valovod s otvorom kao duljinom prijenosne linije. [5]

Slika 2.5. prikazuje kućište s otvorom koji je „osvijetljen“ ravnim valom i njegov ekvivalentni krug, gdje je $Z_0 \approx 377\Omega$ i $k_0 = 2\pi/\lambda$, valovod ima karakterističnu impedanciju :

$$Z_g = Z_0 / \sqrt{(1 - (\lambda/2a)^2)}. \quad (2-24)$$

Nadalje konstanta širenja iznosi:

$$k_g = k_0 \sqrt{(1 - (\lambda/2a)^2)}. \quad (2-25)$$

Prijelaz između slobodnog prostora i valovoda prikazan je razmatranjem otvora kao duljine prijenosnog voda koplanarne trake, ukupne širina b i širine razdvajanja w . Njegova karakteristična impedancija dana je kao: $Z_{0s} = 120 \pi K(k_e)/K'(k_e)$ gdje je: $k_e = w_e/b$. Efektivna širina w_e dana je izrazom:

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left(1 + \ln \frac{4\pi\omega}{t}\right). \quad (2-26)$$

Gdje je t debljina stijenke oklopa, ako vrijedi $0 < k_e < 1/\sqrt{2}$ (što vrijedi za većinu praktičnih otvora) tada vrijedi sljedeće:

$$\frac{K(k_e)}{K'(k_e)} = \pi \left[\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt[4]{1 - k_e^2}}{1 - \sqrt[4]{1 - k_e^2}} \right) \right]^{-1}. \quad (2-27)$$

Da bi se izračunala efikasnost oklapanja (SE), prvo se kratki spojevi na krajevima otvora trebaju transformirati u impedanciju Z_{ap} u točkama A vidi sliku 2.5.. Potrebno je uključiti faktor l/a koji se odnosi na povezivanje između otvora i kućišta tada se impedancija može zapisati kao:

$$\dot{Z}_{ap} = \frac{1l}{2a} j Z_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2}. \quad (2-28)$$

Kombinirajući Z_0 , v_0 i \dot{Z}_{ap} dobiva se: $v_0 = v_0 \dot{Z}_{ap} / (Z_0 + \dot{Z}_{ap})$ s impedancijom izvora $Z_1 = Z_0 \dot{Z}_{ap} / (Z_0 + \dot{Z}_{ap})$. Transformacijom v_1 , Z_1 i kratkog spoja na kraju valovoda do točke p vidi sliku 2.5., daje napon \dot{v}_2 impedanciju izvora \dot{Z}_2 i impedanciju opterećenja \dot{Z}_3 :

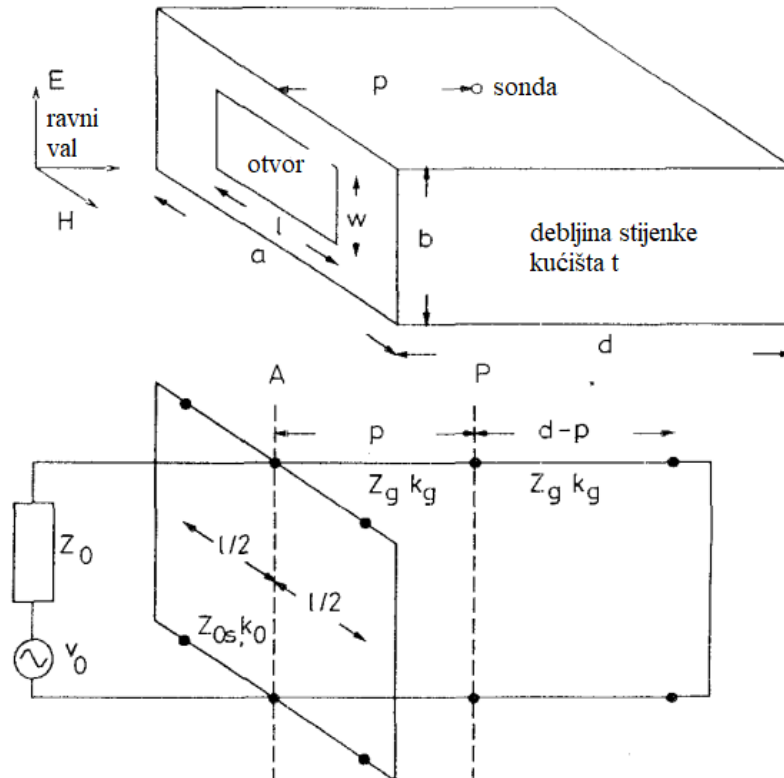
$$\dot{v}_2 = \frac{v_1}{\cos k_g p + j(Z_1/Z_g) \sin k_g p} \quad (2-29)$$

$$\dot{Z}_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p} \quad (2-30)$$

$$\dot{Z}_3 = jZ_g \tan k_g * (d - p). \quad (2-31)$$

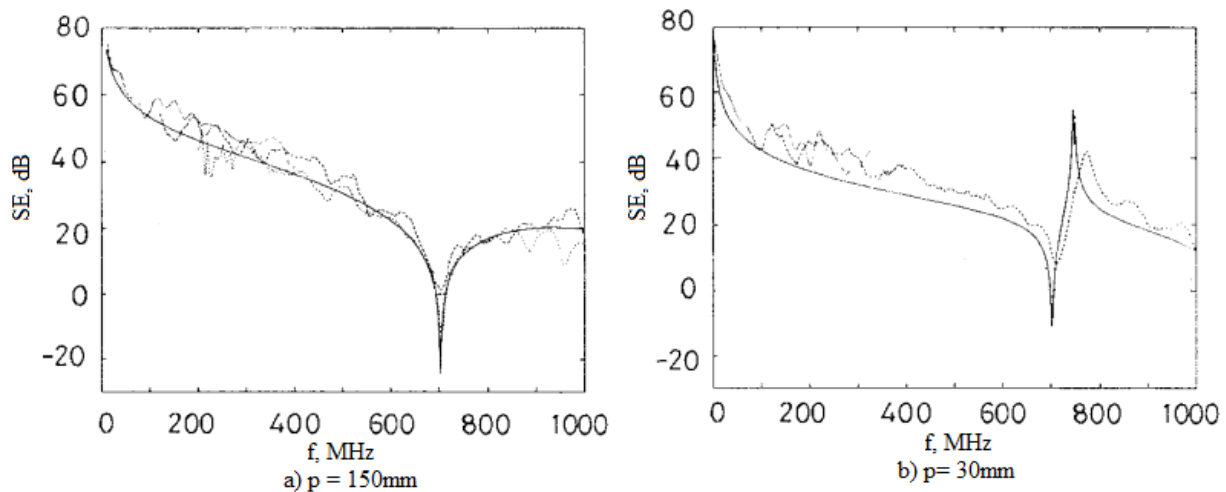
Napon u točki p iznosi: $\dot{v}_p = \dot{v}_2 \dot{Z}_3 / (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3)$. Budući da je do put do točke mjerenja p slobodan prostor bez pregrade, impedancija opterećenja kod p je jednostavno \dot{Z}_0 , tako da napon u točki p iznosi: $\dot{v}_p' = \dot{v}_0 / 2$, a učinkovitost zaštite oklapanje (SE) u tom slučaju iznosi:

$$SE = -20 \log_{10} |v_p / v_p'| = -20 \log_{10} |2v_p / v_0|. \quad (2-31)$$



Slika 2.5. Skica oklopa sa ekvivalentnom nadomjesnom shemom (TLM metoda).[5]

Ova analitička metoda predviđa rezonancije kućišta. Slika 2.5. prikazuje kutiju s dimenzijama $a = 300\text{mm}$, $b = 120\text{mm}$, $d = 300\text{mm}$, $t = 1.5\text{mm}$ i sa otvorom dimenzija $l=100\text{mm}$, $w = 50\text{mm}$. Slika 2.6. prikazuje proračun SE (mjesto na kojem je sonda postavljena) u sredini kutije ($p = 150\text{mm}$) i blizu otvora ($p= 30\text{mm}$).



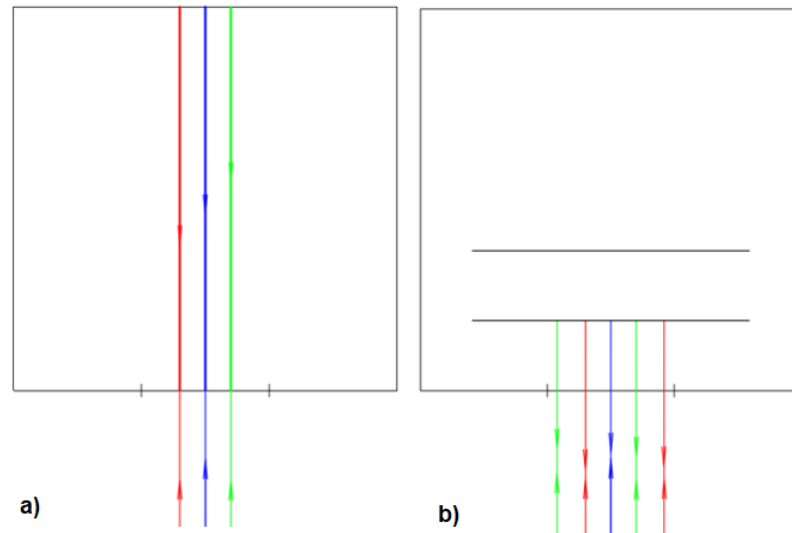
Slika 2.6. Rezultat SE dobiven proračunom.[5]

Proračun pomoću ove metode je dobar i iznad i ispod valne duljine granične frekvencije, koja za ovo kućište iznosi 500MHz. Ova analiza ne daje samo učinkovitost zaštite u širokom frekvencijskom rasponu kao funkciju dimenzija kućišta i otvora, već i predviđa varijacije SE s položajem na kojem se računa u kućištu. To je značajno poboljšanje *Ottove* jednadžbe.

2.2.3. Povećanje efikasnosti povećanjem broja refleksija EM vala

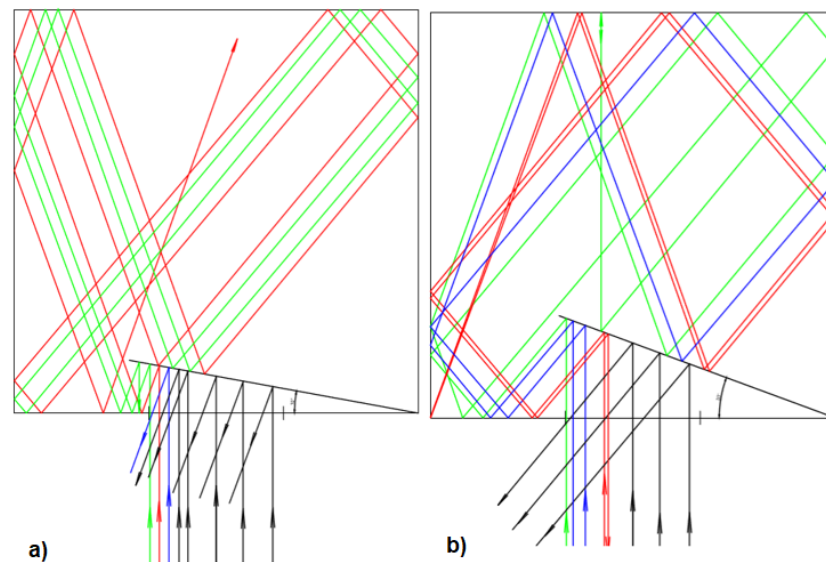
Zraka elektromagnetskog vala koja se nalazi nekoj ravnini reflektira se na način da je kut upada α jednak reflektiranom kutu β , a upadna zraka i reflektirana zraka rasprostiru se u istoj ravnini [9]. Zraka koja se reflektira od površinu je uvijek manje snage (intenziteta) nego upadna zraka, jer se dio energije zrake predaje drugom sredstvu (apsorpcija). Ukoliko je ploha o koju su upadna traka reflektira glatka, što bi značilo da si neravnine na plohi u odnosu na valnu duljinu λ zrake jako male (zanemarive), dolazi do regularne refleksije, ali ukoliko ploha nije glatka dolazi do difuzne refleksije tj. dolazi do raspršenja reflektirane zrake. Kod regularne refleksije vrijedi da su kutovi α i β identični. Koeficijent refleksije dobiven je kao omjer energije koju prenosi reflektirana zraka i energije zrake upada. Ukoliko taj koeficijent ovisi o valnoj duljini valova koji upadaju doći će do selektivne refleksije. Prijelazom vala iz gušćeg u rjeđe sredstvo val koji se reflektirao bit će u fazi sa upadnim, dok će u suprotnom slučaju reflektirani je val biti pomaknut

za $\pi/2$ ($\lambda/4$) u fazi u odnosu na upadni val. Stojni val se dobiva interferencijom upadnog i reflektiranog vala. Radi lakšeg shvaćanja događanja u oklopu elektromagnetski val u ovome poglavlju na slikama interpretiran je pravicima crvene, plave, zelene i crne boje.



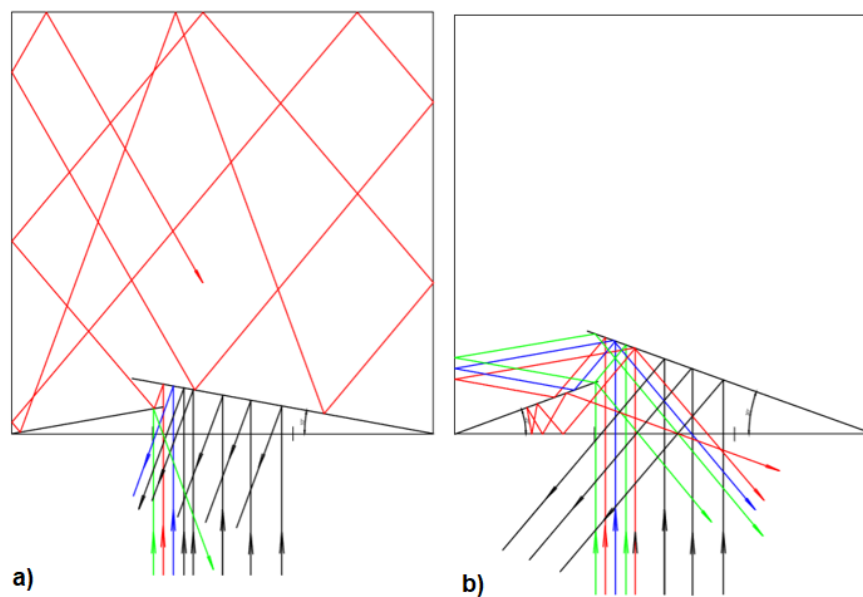
Slika 2.7. a) oklop bez pregrade, b) oklop sa velikim pregradama u središtu oklopa

Na slici 2.7. uočavamo da elektromagnetski val prolazi kroz cijelo kućište te samo nakon jedne refleksije od stjenku kućišta izlazi iz kućišta, dok u slučaju b) postoji pregrada sa kojom se val reflektira prije nego što prođe kroz cijelo kućište. Dužina pregrade koja se postavlja iznosi $\lambda/2$ prve rezonantne frekvencije kućišta ovih dimenzija.



Slika 2.8. a) oklop sa velikom pregradom 10° , b) oklop sa velikom pregradom 20°

Na slici 2.8. a) uočava se da je pregrada postavljena pod kutom od 10° te manji dio aproksimiranog vala ulazi u zaštitno kućište. Sa beskonačno mnogo refleksija elektromagnetski val slabi te biva izgubljena u kućištu, dok je u slučaju b) takva pregrada $\lambda/2$ prve rezonantne frekvencije kućišta ovih dimenzija postavljena pod kutom od 20° , te se uočava da u zaštitno kućište ulazi više energije elektromagnetskog vala nego u prethodnom slučaju pri 10° . U ovom slučaju ulazi više energije elektromagnetskog vala koji nakon određenog broja refleksija u kućištu izlazi van. Iz slike 2.8. uočava se da je slučaj a) efikasniji te tako postavljena pregrada propušta manje energije elektromagnetskog vala u samo kućište.



*Slika 2.9. a) oklop sa velikom i malom pregradom 10° ,
b) oklop sa velikom i malom pregradom 20°*

Slika 2.9. slučaj a) prikazuje malu pregradu dimenzija $\lambda/4$ i veliku pregradu $\lambda/2$ prve rezonantne frekvencije kućišta ovih dimenzija u oklopu pod kutom od 10° , dok b) prikazuje malu pregradu dimenzija $\lambda/4$ i veliku pregradu $\lambda/2$ prve rezonantne frekvencije kućišta ovih dimenzija u oklopu pod kutom od 20° . Uočava se da u zaštitno kućište ulazi više energije elektromagnetskog vala kada su pregrade postavljene pod kutom od 20° , te val nakon određenog broja refleksija u kućištu izlazi van, dok u slučaju pod kutom od 10° ulazi manje energije elektromagnetskog vala te sa beskonačno mnogo refleksija elektromagnetski val slabi te biva izgubljena u kućištu. Iz slike 2.9. uočava se da je slučaj a) efikasniji te tako postavljena pregrada propušta manje energije elektromagnetskog vala u samo kućište.

3. SIMULACIJA I REZULTATI

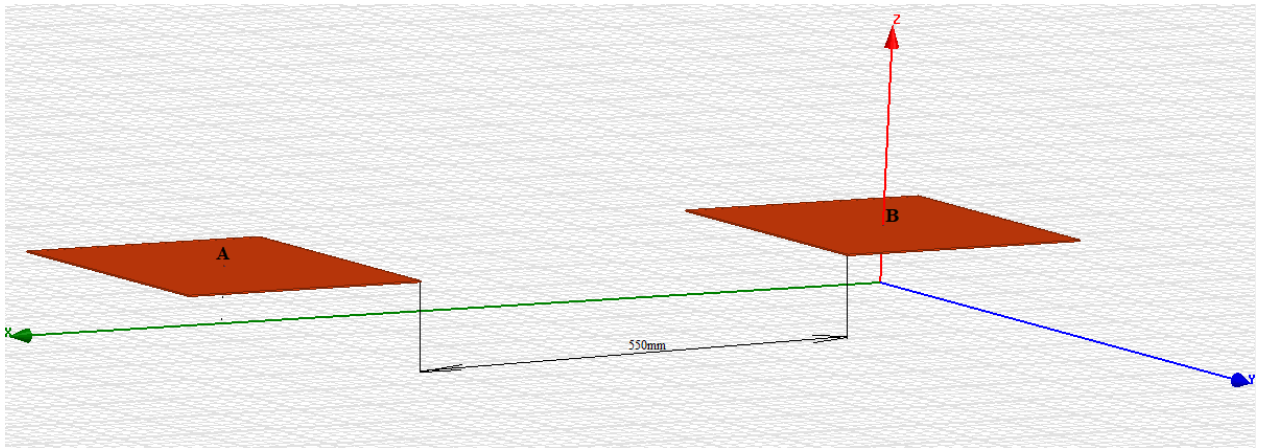
Zadatak diplomskog rada simuliran je u HFSS-u. HFSS[8] (**eng.** *high-frequency structure simulator*) je komercijalni računalni programa za rješavanje konačnih sustava za elektromagnetske strukture tvrtke Ansys. HFSS je jedan od nekoliko komercijalnih alata koji se koriste za dizajn antena i dizajn složenih radio frekvencijskih elemenata elektroničkog kruga, uključujući filtre i dalekovode. Izvorno su ga razvili profesor Zoltan Cendes i njegovi studenti sa Sveučilišta Carnegie Mellon. HFSS pri simulaciji koristi metodu konačnih elemenata (**eng.** *finite element method*), to je numerička metoda za rješavanje problema inženjerske i matematičke fizike. Tipična problematična područja uključuju strukturnu analizu, prijenos topline, protok tekućine, transport mase i elektromagnetski potencijal. Analitičko rješenje ovih problema uglavnom zahtijeva rješenje graničnih problema za djelomične diferencijalne jednačbe. Formulacija metode konačnih elemenata rezultira sustavom algebarskih jednačbi. Metoda se približava nepoznatoj funkciji nad domenom. Da bi se riješio problem, on dijeli veliki sustav na manje, jednostavnije dijelove koji se nazivaju konačni elementi. Jednostavne jednačbe koje modeliraju te konačne elemente sastavljaju se u veći sustav jednačbi koji modelira čitav problem. FEM tada koristi numeričke metode za proračun varijacija kako bi približio rješenje minimiziranjem pridružene funkcije pogreške. Proučavanje ili analiza problema s FEM-om često se naziva i analiza konačnih elemenata. Ovaj računalni program je vlasništvo američke javne tvrtke Ansys Inc. Ansys-ov program koristi se za dizajn proizvoda i poluvodiča, kao i za izradu simulacija koje testiraju izdržljivost proizvoda, raspodjelu temperature, kretanja tekućine i elektromagnetska svojstva.

3.1. Simulacija u računalnom programu HFSS

U diplomskome radu faktor djelotvornosti oklapanja (SE) dobiven je omjerom parametara S_{21} bez oklopa (S_{21ush}) i sa oklopom (S_{21sh}).

$$SE_{S_{21}} = 20 \log \frac{S_{21ush}}{S_{21sh}}, [dB]. \quad (2-32)$$

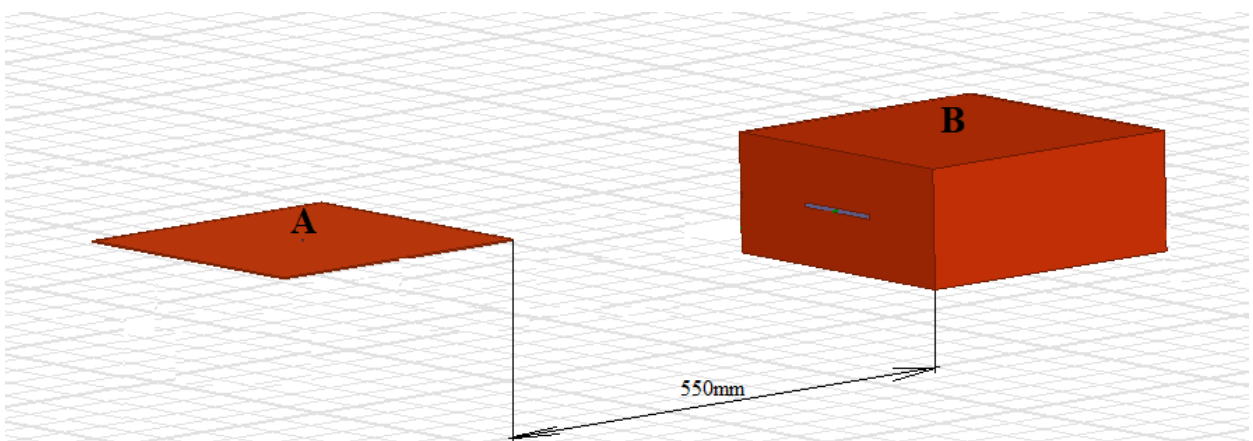
Frekvencijski opseg koji se promatra u simulacijama je od 400 do 2000 MHz, u tome rasponu ima četiri kritične frekvencije (rezonancije) i one iznose 688,1099,1444 i 1625 MHz.



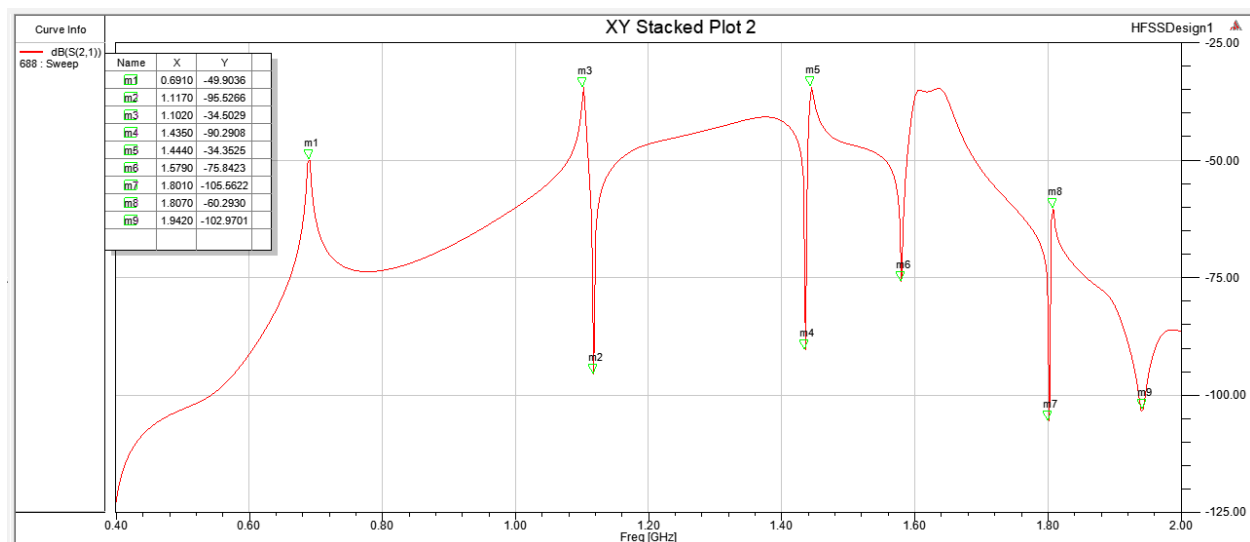
Slika 3.1. Simulacija u računalnom programu HFSS bez oklopa.

Slika 3.1. prikazuje odnos tj. udaljenost prijemne te odašiljačke strane. Na obje strane nalaze se odašiljačke/prijemne antene koje imaju iste dimenzije (monopol antena, duljine antene 60mm te debljine bakrene žice 1mm) . Imenovanjem ulaza/izlaza dodijeljeni su strani A naziv 2 dok strana B posjeduje naziv 1.

Slika 3.2. prikazuje kao prethodna slika 3.1. ali u ovome slučaju na B strani postavljen je oklop dimenzija 300x300x120mm te debljine stijenke 1.5mm. Ovako postavljena simulacija dat će rezultat koji je prikazan na slici 3.3. te predstavlja S_{21} sa oklopom. Slika 3.4. prikazuje dobiveni rezultat mjerenja faktora S_{21} bez oklopa te je rezultat uzet kao referentna vrijednost pri računanju vrijednosti u diplomskome radu.

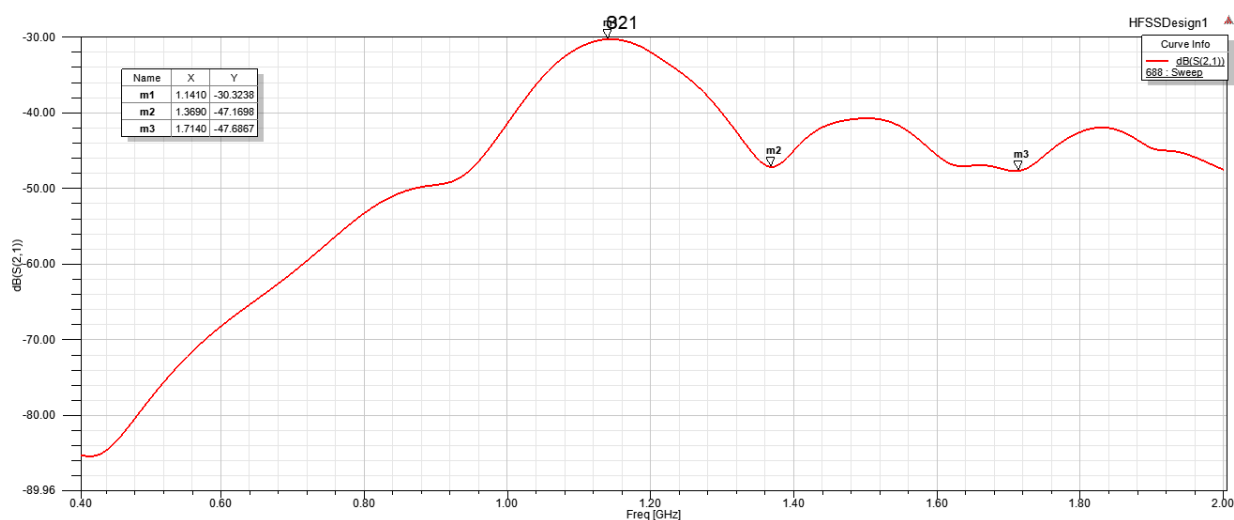


Slika 3.2. Simulacija u računalnom programu HFSS sa oklopom.



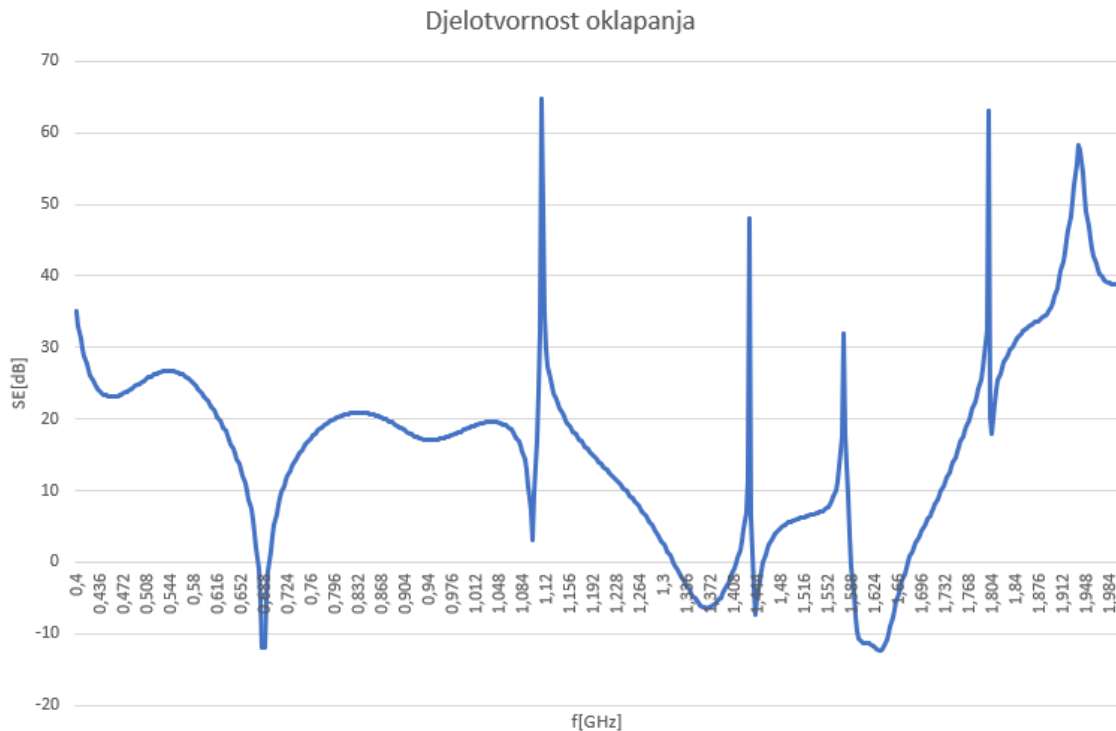
Slika 3.3. Rezultati simulacije S_{21sh} .

Na slici 3.3. vidi se graf dobiven simulacijom te se na njemu uočavaju vrhovi koji se pojavljuju na kritičnim frekvencijama kućišta.



Slika 3.4. Rezultati simulacije S_{21ush} .

Uzimanjem rezultata simulacija i uzimanjem u obzir jednadžbe (2-31) dobiva se djelotvornost oklapanja SE koja je prikazana na slici 3.5.



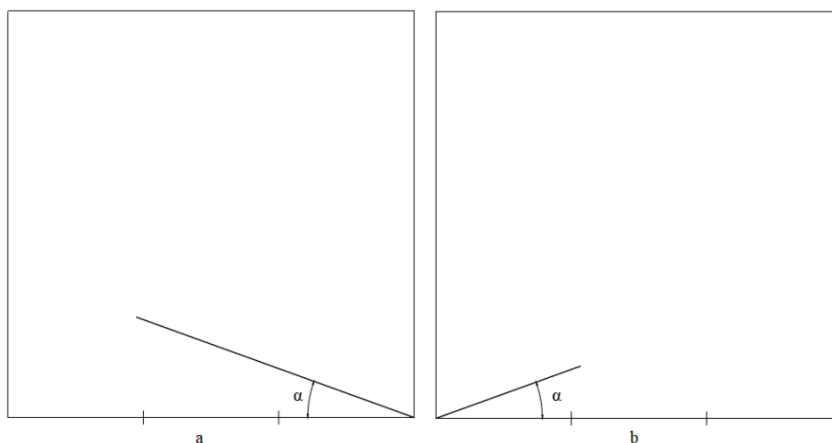
Slika 3.5. Djelotvornost oklapanja kućišta dimenzija 300x300x120mm.

Vrhovi na grafu koji prikazuje slika 3.5. pojavljuju se na rezonantnim frekvencijama kućišta tih dimenzija. Najznačajniji minimum na grafu nalazi se na prvoj rezonantnoj frekvenciji 688MHz te je iz toga razloga ta frekvencija uzeta pri računanju dimenzija i položaja pregrada koje će biti postavljene u kućište radi povećanja/smanjenja djelotvornosti oklapanja.

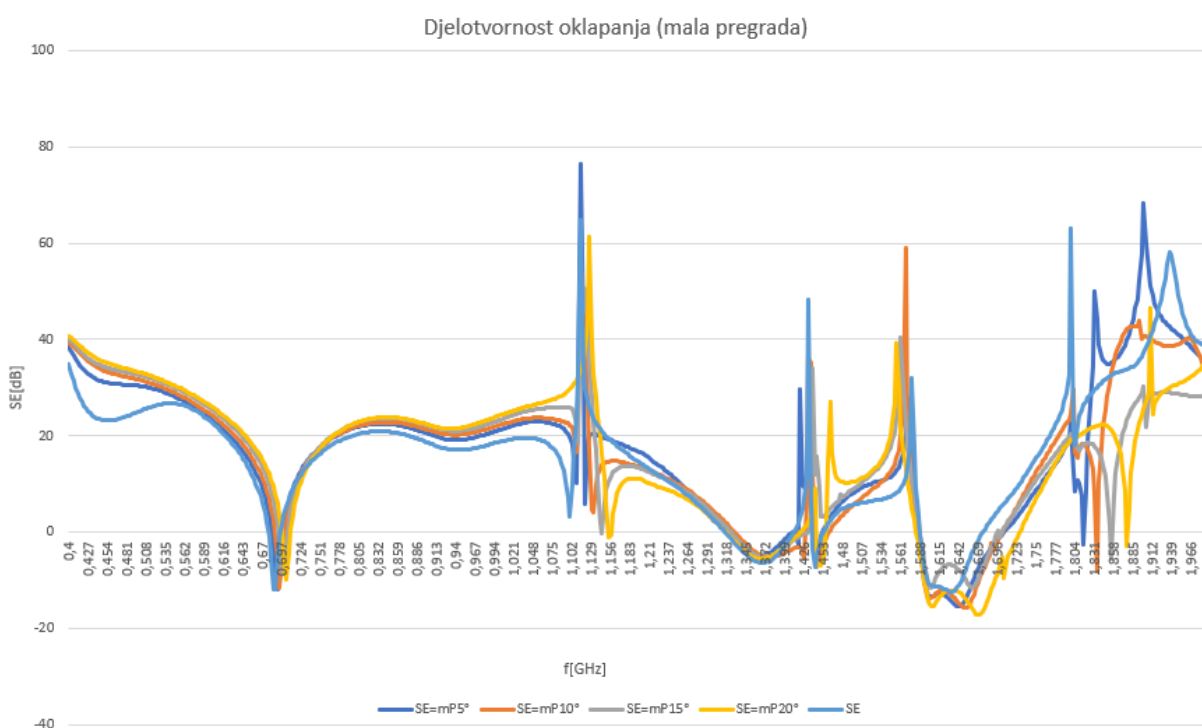
3.2. Prvi slučaj

U prvome slučaju proučavat će se kako dimenzija i kut pomaka pregrade utječe na djelotvornost oklapanja kućišta. Promatrat će se mala pregrada dimenzije $\lambda/4$ (109mm) i velika pregrada dimenzije $\lambda/2$ (218mm), obje pregrade su visoke kao oklop. Frekvencija korištena u računanju dimenzija pregrada iznosi 688MHz iz već prije navedenog razloga, a za brzinu širenja vala uzeta je brzina svjetlosti $c = 3 \cdot 10^8$.

Slika 3.6. prikazuje položaj pregrada, slučaj a) sa velikom i slučaj b) sa malom pregradom. U simulacijama će se pojedinačno promatrati velika i mala pregrada za kutove α od 5,10,15 i 20°.

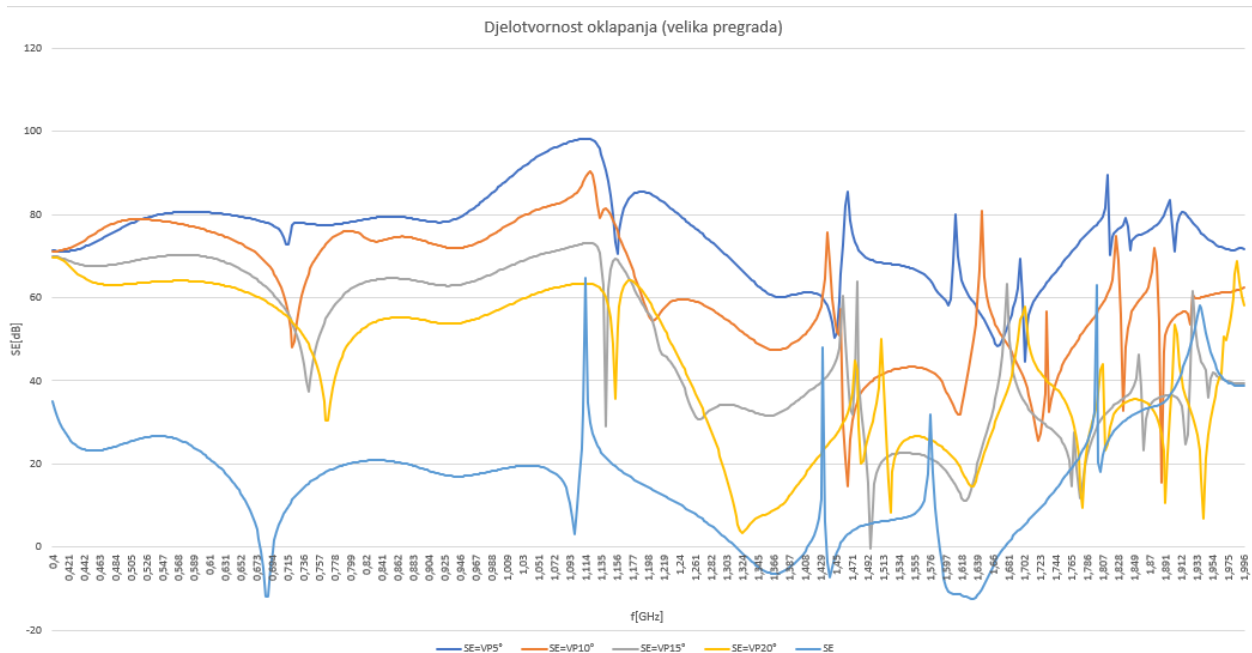


Slika 3.6. Prikaz fizičkog položaja pregrade u oklopu.



Slika 3.7. Rezultati simulacije sa malom pregradom.

Slika 3.7. prikazuje rezultate simulacije sa postavljenom malom pregradom. Tamnoplavom bojom je označen rezultat simulacije kada je pregrada postavljena pod kutom od 5°, narančasta prikazuje rezultat pod kutom od 10°, siva 15°, žuta 20° i svijetloplavom rezultat dobiven bez pregrade (referentni SE okopa). Nakon usporedbe referentnog i grafova dobivenih postavljanjem male pregrade može se zaključiti da mala pregrada ne utječe značajno na djelotvornost oklapanja. Pri nižim frekvencijama grafovi su gotovo identični dok pri višim postoje manja odstupanja.

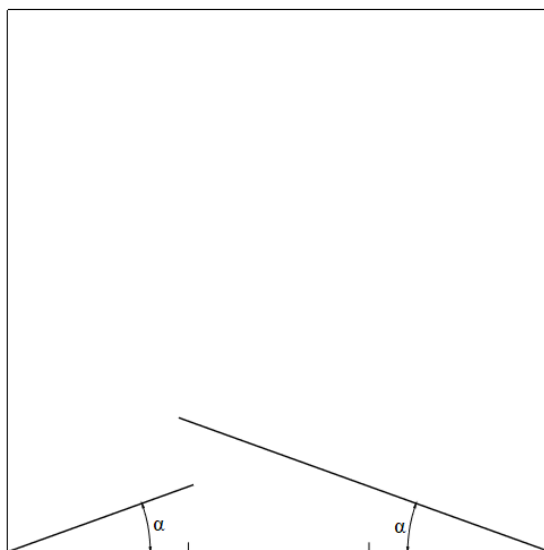


Slika 3.8. Rezultati simulacije sa velikom pregradom.

Slika 3.8. prikazuje rezultate simulacije sa postavljenom velikom pregradom. Tamnoplavom bojom je označen rezultat simulacije kada je pregrada postavljena pod kutom od 5° , narančasta prikazuje rezultat pod kutom od 10° , siva 15° , žuta 20° i svijetloplavom rezultat dobiven bez pregrade (referentni SE okopa). Nakon usporedbe referentnog grafa sa grafova dobivenih postavljanjem velike pregrade može se zaključiti da velika pregrada utječe na spektralnu djelotvornost oklapanja. Na prvoj rezonantnoj frekvenciji od 688MHz uočava se povećanje spektralne djelotvornosti od čak 80 dB u slučaju kada je pregrada postavljena pod kutom od 5° te nešto manje poboljšanje kada su pregrade postavljene pod kutovima $10^\circ, 15^\circ$ i 20° . Uočava se također da su se kritične frekvencije (rezonantne) kućišta pomaknula u slučaju kada je pregrada postavljena pod kutom od 20° i na prvoj kritičnoj frekvenciji za čak 81MHz.

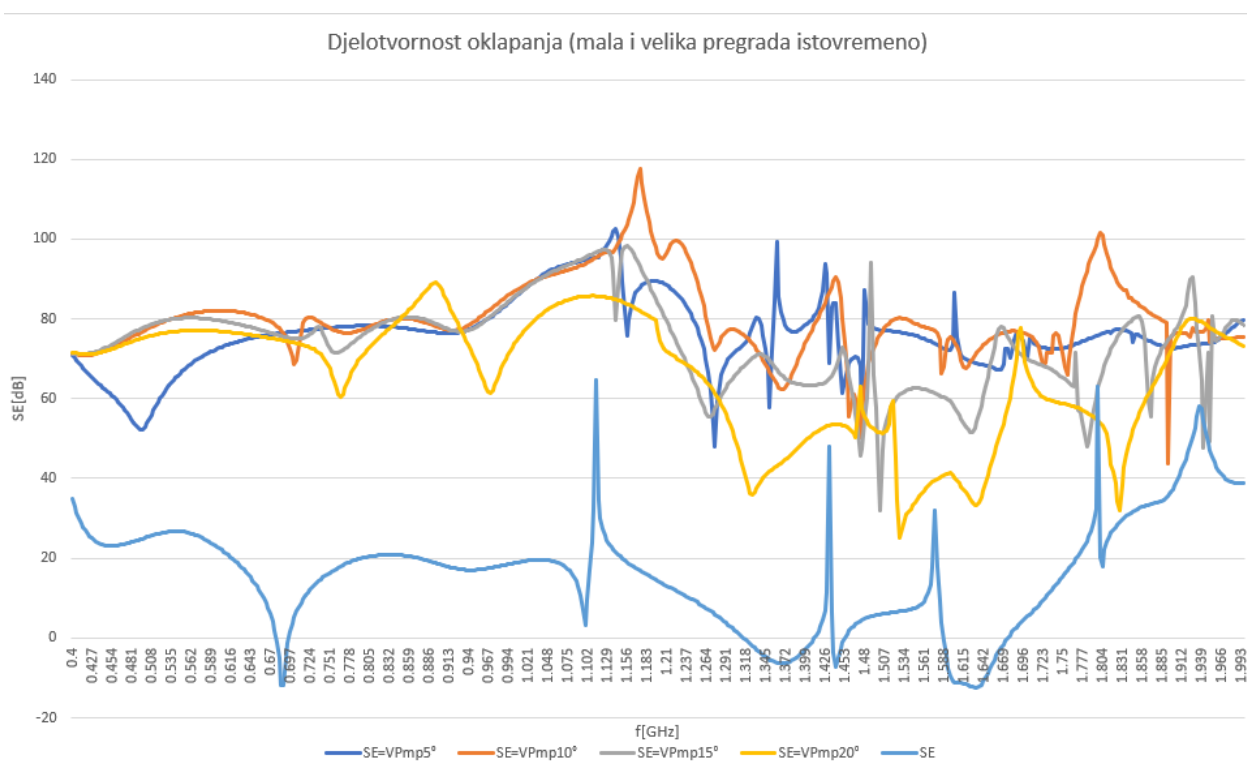
3.3. Drugi slučaj

U drugome slučaju proučavat će se kako dimenzija i kut pomaka pregrade utječe na djelotvornost oklapanja kućišta. Promatrat će se istodobno mala pregrada dimenzije $\lambda/4$ (109mm) i velika pregrada dimenzije $\lambda/2$ (218mm), obje pregrade su visoke kao oklop. Frekvencija korištena u računanju dimenzija pregrada iznosi 688MHz iz već prije navedenog razloga, a za brzinu širenja vala uzeta je brzina svjetlosti $c = 3 \cdot 10^8$.



Slika 3.9. Prikaz fizičkog položaja pregrada u oklopu.

Slika 3.9. prikazuje položaj pregrada, slučaj sa velikom i malom pregradom istovremeno. U simulacijama će se promatrati velika i mala pregrada za kutove α od 5,10,15 i 20°.



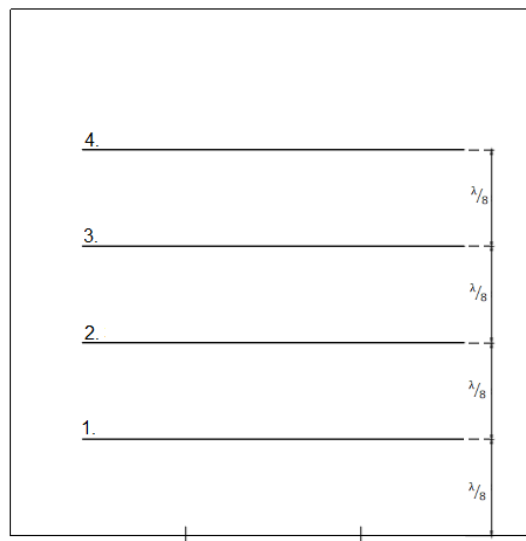
Slika 3.10. Rezultati simulacije sa malom i velikom pregradom.

Slika 3.10. prikazuje rezultate simulacije sa postavljenom malom i velikom pregradom. Tamnoplavom bojom je označen rezultat simulacije kada su pregrade postavljene pod kutom od

5°, narančasta prikazuje rezultat pod kutom od 10°, siva 15°, žuta 20° i svijetloplavom rezultat dobiven bez pregrada (referentni SE okopa). Nakon usporedbe referentnog grafa grafova dobivenih postavljanjem male i velike pregrade može se zaključiti da mala i velika pregrada utječu na spektralnu djelotvornost. Uočava se da su se vrhovi na kritičnim frekvencijama smanjili (izgladili). Uočava se da je na prvoj rezonantnoj frekvenciji od 688MHz poboljšana spektralna djelotvornosti oko 80 dB, te postoji pomak u kritičnim frekvencijama kućišta kao u prvom slučaju kada je korištena samo velika pregrada.

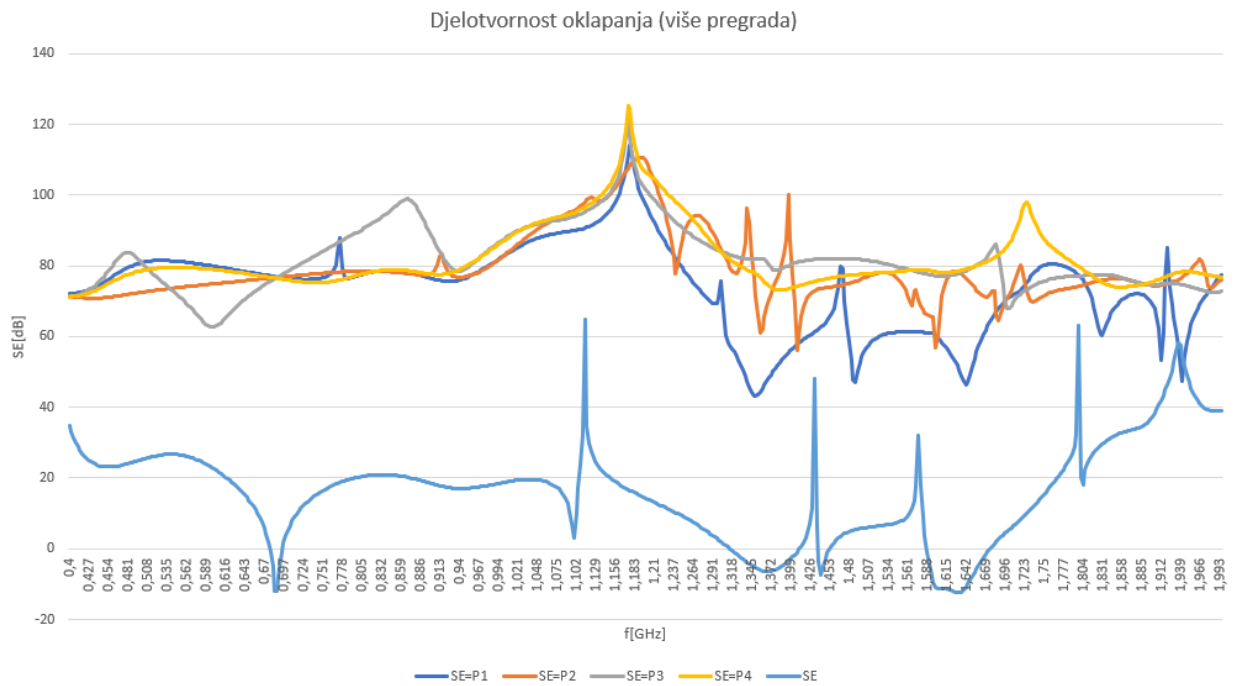
3.4. Treći slučaj

U trećem slučaju proučavat će se kako broj i položaj pregrada utječe na djelotvornost oklapanja kućišta. Promatrat će se velika pregrada dimenzije $\lambda/2$ (218mm) te će se ona postaviti na udaljenost $\lambda/8$ (55mm) od ulaza u kućište te međusobna udaljenost pregrada. Frekvencija korištena u računanju dimenzija pregrada iznosi 688MHz iz već prije navedenog razloga, a za brzinu širenja vala uzeta je brzina svjetlosti $c = 3 \cdot 10^8$.



Slika 3.11. Prikaz fizičkog položaja pregrada u oklopu.

Slika 3.11. prikazuje položaj pregrada u oklopu. Simulirati će se slučajevi sa jednom, dvije, tri i četiri velike pregrade.



Slika 3.12. Rezultati simulacije sa većim brojem identičnih pregrada.

Slika 3.12. prikazuje rezultate simulacije sa postavljenim velikim pregradama. Tamnoplavom bojom je označen rezultat simulacije kada je postavljena jedna velika pregrada, narančasta prikazuje rezultat kada su postavljene dvije, siva tri pregrade, žuta četiri pregrade i svijetloplavom rezultat dobiven bez pregrada (referentni SE okopa). Nakon usporedbe referentnog grafa sa grafova dobivenih postavljanjem velike pregrade može se zaključiti da ovakav način postavljanja pregrada utječe na spektralnu djelotvornost oklapanja. Na prvoj rezonantnoj frekvenciji od 688MHz uočava se povećanje spektralne djelotvornosti od oko 80 dB. Ovakav način postavljanja pregrada u zaštitni oklop daje za rezultat pri nižim frekvencijama gotovo graf bez kritičnih vrhova, a pri višim daje više malih vrhova koji nisu značajno veliki.

4. ZAKLJUČAK

U ovome diplomskome radu računalnim putem (simulacijom) određena je spektralna djelotvornost oklapanja. Simulacija je izvedena korištenjem računalnog programa HFSS. Zadatak je podijeljen u tri slučaja, prvi slučaj bila je simulacija sa malom pregradom ($\lambda/4$) i velikom pregradom ($\lambda/2$) odvojeno, drugi slučaj je bila simulacija sa obje pregrade istovremeno i treći slučaj bila je simulacija sa prostornim pomakom više velikih pregrada u kućištu. Prvi slučaj sa malom pregradom i različitim kutovima postavljanja dokazao je da takva pregrada ne utječe značajno na spektralnu djelotvornost kućišta, dok velika pregrada simulacijom dokazano utječe. Velika pregrada je dimenzije pola valne duljine prve rezonancije kućišta i zasjenjuje jednim dijelom otvor oklopa te samim time i utječe na spektralnu djelotvornost. U teoriji ukoliko je razlika faza dva vala pola valne duljine doći će do destruktivne interferencije, što znači da će se amplituda vala smanjiti. Simulacijom svih dijelova zadatka dokazano je da se položajem i dimenzijama pregrada može utjecati na energiju elektromagnetskog vala koja ulazi ili izlazi iz zaštitnog oklopa. Samim time se može pregradama utjecati i na broj refleksija elektromagnetskog vala u oklopu. Simulacije dokazuju da se povećanjem refleksija elektromagnetskog vala unutar zaštitnog kućišta može smanjiti utjecaj elektromagnetske okoline, tj. može se povećati spektralna djelotvornost oklapanja samog zaštitnog kućišta.

Dobiveno je poboljšanje djelotvornosti od oko 80dB, a bolji rezultat bi se vjerojatno mogao postići kada bi se simulacija odradila sa dvije velike pregrade. Te dvije pregrade potrebno je postaviti pod različitim kutovima kako bi prostor između njih bio dostatan za prolazak potrebnih kablova ili ulaz zraka za hlađenje uređaja koji se nalazu u zaštitnom oklopu.

5. LITERATURA

[1] https://ldap.zvu.hr/~msusak/Elektromagnetsko%20zracenje_web.pdf

[2] <https://hr.puntomarinero.com/faraday-cage-do-it-yourself/>

[3] 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.

[4] https://www.syl.ru/article/215590/new_kletka-faradeya-svoimi-rukami

[5] Shielding effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture - Electronics Letters No: 19961030, IEE 1996 11 June 1996, M.P. Robinson, J.D. Turner, D.W.P. Thomas, J.F. Dawson, M.D. Ganley, A.C. Marvin, S.J. Porter, T.M. Benson and C. Christopoulos

[6] MENDEZ, H.A.: ‘Shielding theory of enclosures with apertures’, IEEE Trans., 1978, EMC-20, (2), pp. 296-305

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

[8] <https://en.wikipedia.org/wiki/HFSS>

[9] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Refleksija>

SAŽETAK

Elektromagnetsko oklapanje (**eng.** *electromagnetic shielding*) obuhvaća mjere koje se poduzimaju da bi utjecaj vanjskog elektromagnetskog polja unutar volumena oklopljenog kućištem bilo minimalno. Djelotvornost oklapanja (**eng.** *shielding effectiveness - SE*) je važan parametar koji utječe na elektromagnetsku kompatibilnost opreme. Utvrđuje se SE praktičnih metalnih kućišta uglavnom s njihovim otvorima. Fizikalna djelovanja koja djeluju na slabljenje elektromagnetskog vala mogu se interpretirati na tri dijela: gubici uslijed apsorpcije, gubici uslijed refleksije elektromagnetskog vala u metalnom oklopu (**eng.** *reflection losses*), i gubici uslijed višestrukih refleksija unutar metala metalnog oklopa.

U ovome diplomskom radu su opisani i promatrani gubici uslijed višestrukih refleksija elektromagnetskog vala u zaštitnom oklopu. Djelotvornost oklapanja promatrana je u tri slučaja na kućištu izrađenom od bakra, dimenzija 300x300x120mm te debljine stjenke 1.5mm. Načinjena je analiza pozicioniranja vodljivih pregrada radi povećanja broja refleksija unutar definiranog kućišta. Broj pregrada je ograničen na maksimalno četiri pregrade. Izrađena je računalna simulacija u HFSS-u (**eng.** *high-frequency structure simulator*) sa različitim pozicijama i brojem pregrada. Faktor djelotvornosti oklapanja (SE) dobiven je omjerom parametara S_{21} bez metalnog oklopa i sa metalnim oklopom. Provedena je analiza rezultata te su predložena moguća poboljšanja faktora SE.

Ključne riječi: elektromagnetsko oklapanje, djelotvornost oklapanja, faktor djelotvornosti S_{21} , gubici uslijed refleksije, računalni program HFSS, elektromagnetski val

ABSTRACT

Electromagnetic shielding includes measures taken to minimize the impact of an external electromagnetic field within a shielded case. Shielding effectiveness (SE) is an important parameter that affects the electromagnetic compatibility of devices. Shielding effectiveness of usual metal housings is mainly determined on their apertures. The physical effects of electromagnetic wave attenuation can be interpreted in three parts: absorption losses, reflection losses in metal shielding, and losses due to multiple reflections within metal housing.

This thesis describes and observes losses due to multiple reflections of an electromagnetic wave in a shielding case. Shielding effectiveness was observed in three cases on a copper made housing with size of 300x300x120mm and a wall thickness of 1.5mm. An analysis of the positioning of conductive barriers was performed to increase the number of reflections within the defined housing. The number of barriers is limited to a maximum of four barriers. A computer simulation is made using HFSS (high-frequency structure simulator) with different positions and number of barriers. Shielding effectiveness factor (SE) is obtained by the ratio of parameters S21 with no metal housing and with metal housing. Analysis of the results was performed and possible improvements to the SE factor were suggested.

Keywords: electromagnetic shielding, shielding effectiveness, efficiency factor S21, reflection losses, HFSS computer program, electromagnetic wave

ŽIVOTOPIS

Juraj Palčok rođen je 05.07.1995. u Osijeku. U Marijancima završava „Osnovnu školu Matije Gubca“, nakon čega upisuje i 2014. godine završava elektrotehničku školu u Valpovu. Za visokoškolsko obrazovanje odabire preddiplomski studij elektrotehnike smjer komunikacije i informatika na fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Po završetku preddiplomskog studija upisuje diplomski studij Komunikacije i informatika, izborni blok Komunikacijske tehnologije na istome fakultetu. Trenutno je student 2. godine diplomskog studija FERIT-a.