

Elektromagnetsko oklapanje

Gatara, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

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:200:969478>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni preddiplomski studij

ELEKTROMAGNETSKO OKLAPANJE

Završni rad

Dino Gatara

Osijek, 2017.

Sadržaj:

<u>1. UVOD</u>	1
<u>2. MAGNETSKO POLJE I ELEKTROMAGNETIZAM</u>	2
2.1. Elektromagnetske smetnje	6
2.2. Prijenos elektromagnetske smetnje	7
2.3. Osnovne mjere za rješavanje EMC problema	8
<u>3. ELEKTROMAGNETSKO OKLAPANJE</u>	9
3.1. Elektromagnetsko oklapanje	9
3.2. Efikasnost oklapanja	9
3.3. Zaštita od NF magnetskog polja	12
3.4. Uzemljenje oklopa signalnog kabela	12
3.5. Uzemljenje	13
3.6. Ekvipotencijalizacija	14
<u>4. MATERIJALI U ELEKTROMAGNETSKOM OKLAPANJU</u>	15
<u>5. MJERENJE DJELOTVORNOSTI ELEKTROMAGNETSKOG OKLAPANJA</u>	15
<u>6. ZAKLJUČAK</u>	22
<u>7. LITERATURA</u>	23
8. SAŽETAK/ SUMMARY	24
9. ŽIVOTOPIS	25



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 26.09.2017.

Ime i prezime studenta:

Dino Gatara

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

3441, 05.10.2015.

Ephorus podudaranje [%]:

32

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Elektromagnetsko oklapanje**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof.dr.sc. Slavko Rupčić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

1. UVOD

Elektromagnetska postrojenja u koja ulaze svi tipovi elektrana, trafostanice, centri za upravljanje, kao i ukupna električna mreža, postaju sve kompleksniji, pa su tako i standardi koji definiraju njihov rad sve zahtjevniji. Elektromagnetska kompatibilnost je relativno nova disciplina koja proučava interakciju izvora smetnji i primatelja, dakle smetnje na uređajima zbog međusobnih elektromagnetskih utjecaja.

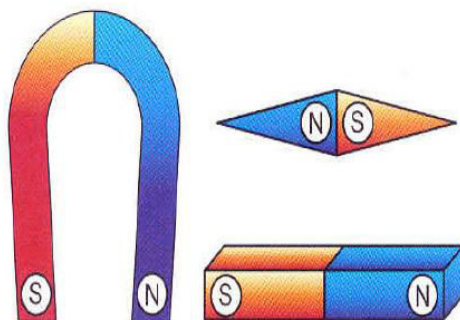
Elektromagnetska kompatibilnost (EMC) koju definiramo kao sposobnost uređaja, opreme ili sustava da djeluje na zadovoljavajući način u svom elektromagnetskom okruženju kao i da ne emitira nedozvoljene smetnje u okoliš, zahtijeva poznavanje mehanizma koji dovode do interakcije izvora i primatelja. Stoga će se u ovom završnom radu prikazivati osnovni pojmovi i zakonitosti koji dovode do međusobnih utjecaja kao i mjere za njihovo suzbijanje.

Završnim sam radom obradio teorijske i praktičke aspekte elektromagnetskog oklapanja (eng. electromagnetic shielding).

2. MAGNETSKO POLJE I ELEKTROMAGNETIZAM

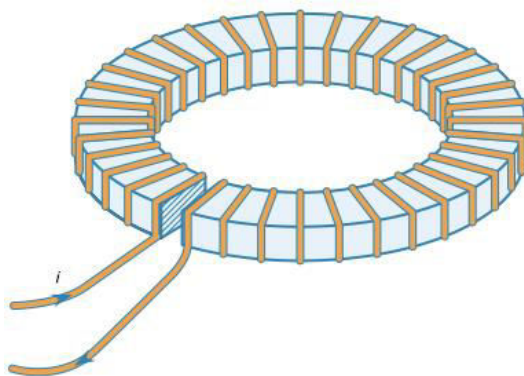
Magnet (lat. *magnes*, genitiv *magnetis* < grč. *Μαγνήτις λίθος*: kamen iz Magnezije) je svako tijelo koje posjeduje magnetsko polje u sebi i oko sebe, te može djelovati privlačnom silom na feromagnetske materijale (npr. željezo) i Lorentzovom silom na električki nabijene čestice u gibanju.

Trajni ili *permanentni magneti* to svojstvo ne mijenjaju tijekom vremena, osim ako se vanjskim djelovanjem ne demagnetiziraju. To su željezne rude (nikal, kobalt, i njihove legure). Na slici 2.1. prikazani su trajni magneti različitih oblika.



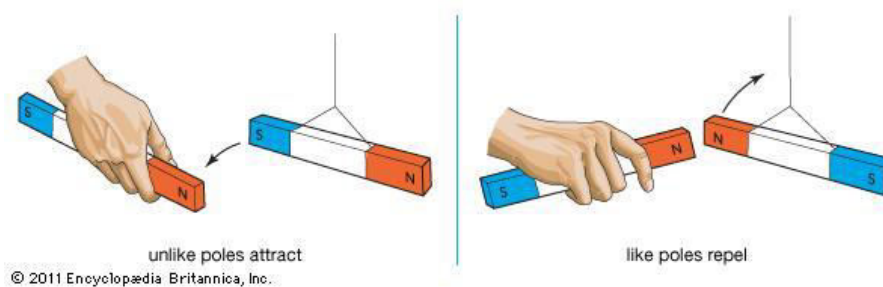
Slika 2.1. Trajni magneti različitih oblika [1]

Privremeni ili *promjenljivi magneti* dobivaju to svojstvo dok su izloženi utjecaju magnetskoga ili električnoga polja, električne struje, te nekih toplinskih i mehaničkih efekata. što ga stvara neki drugi magnet u okolini. Strujna petlja ili mnoštvo namotaja u obliku zavojnice ponaša se kao magnet. Na slici 2.2. je privremeni magnet, elektromagnet napravljen od toroidalnog namotaja oko željeznog prstena koji ima mali procjep.



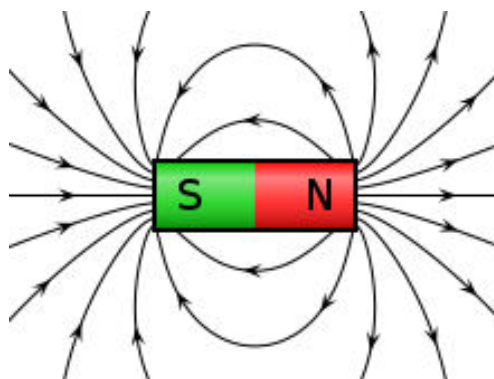
Slika 2.2. Privremeni magnet – elektromagnet [1]

Magnetski polovi imaju najjače magnetsko djelovanje. Magnet ima sjeverni pol (eng. north – N) i južni pol (eng. south – S). Raznoimeni magnetski polovi se međusobno privlače, a istoimeni magnetski polovi se međusobno odbijaju. Slika 2.3. prikazuje djelovanje raznoimenih magnetskih polova koji se privlače i istoimenih magnetskih polova koji se odbijaju.



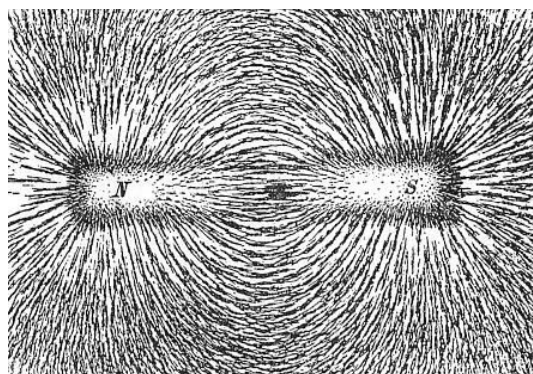
Slika 2.3. Privlačenje raznoimenih i odbijanje istoimenih polova magneta [1]

Magnetsko polje je prostor u kojemu djeluju magnetske sile oko i unutar magneta, odnosno u njemu se manifestiraju magnetski učinci. Djelovanje magnetskoga polja se obično može prikazati djelovanjem magnetskih silnica. Magnetske silnice izlaze iz sjevernoga magnetskoga pola i ulaze u južni magnetski pol, a unutar magneta silnice idu od južnoga magnetskoga pola prema sjevernom magnetskom polu tako da čine zatvorene linije. Na slici 2.4. strelice označavaju smjer magnetskih silnica koje prikazuju magnetno polje.



Slika 2.4. Magnetsko polje [2]

Magnetske silnice u svakoj točki magnetskog polja određuju njegov smjer i mogu se vidjeti kad se na staklenu ploču iznad magneta posipa željezna strugotina što je prikazano na slici 2.5. Gustoća magnetskog polja prikazuje se međusobnom blizinom silnica magnetskog polja i najveća je u blizini polova.



Slika 2.5. Magnetske silnice posute željeznom strugotinom [2]

Magnetski tok Φ je ukupni broj magnetskih silnica koje izlaze iz magnetskog pola magneta.

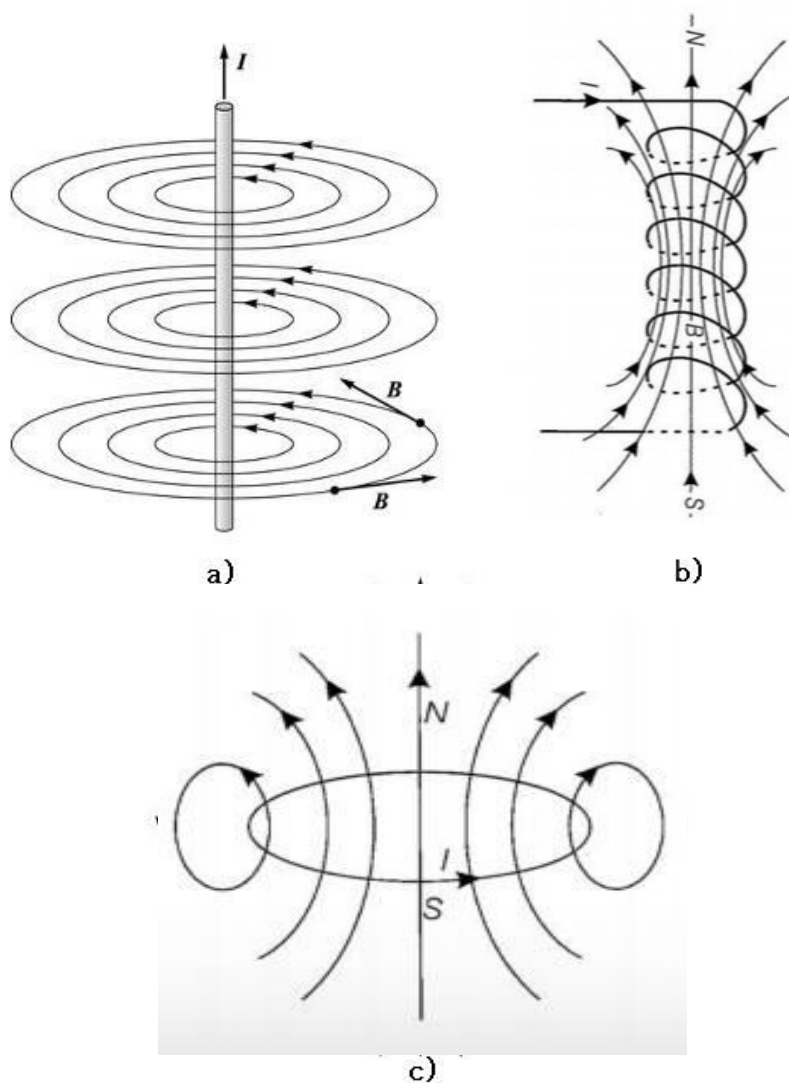
$$\Phi = B \cdot S \text{ [Wb]} \quad (2-1)$$

Jedinica za magnetski tok je *veber* [Wb], $\text{Wb} = \text{Vs}$.

Magnetska indukcija B kao gustoća magnetskog toka označava učinak magnetskog polja na određenom mjestu.

$$B = \frac{\Phi}{S} \text{ [T]} \quad (2-2)$$

Jedinica za magnetsku indukciju je *tesla* [T], $\text{T} = \text{Wb/m}^2$.



Slika 2.6. Magnetsko polje: a) I – struja, B – magnetska indukcija; polje oko ravnoga vodiča; b) polje zavojnice; c) polje oko kružnoga vodiča [3]

Magnetsko polje postoji također u prostoru oko toka električne struje, pa se najčešće obrađuje kao elektromagnetsko polje. Razlikuju se *magnetostatičko polje*, npr. u okolini stalnoga magneta, i *magnetodinamičko polje*, npr. kod asinkronog električnoga motora. Magnetsko je polje analogno električnom polju s obzirom na matematičku obradbu, ali je razlika bitna što ne postoje slobodni magnetski naboji kao što postoje slobodni elektroni. Maxwellove

jednadžbe za magnetsko polje proizvedeno stacionarnom raspodjelom struja $\mathbf{J}$ u linearnome, homogenom, izotropnome materijalu poprimaju oblik:

$$\mathbf{rot} \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad (2-3)$$

$$\mathbf{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2-4)$$

gdje je $\mathbf{B}$ vektor magnetske indukcije, a μ magnetska permeabilnost materijala. Dakle, magnetostatičko polje ima obilježja vrtložnoga solenoidnog polja i može se kao i svako statičko polje prikazati silnicama.

Poissonova i Laplaceova jednadžba za to polje glase:

$$\Delta \mathbf{B} = -\mathbf{rot} (\mu \mathbf{J}) \quad (2-5)$$

$$\Delta \mathbf{B} = 0 \quad (2-6)$$

Sukcesivno za prostor sa zadanom raspodjelom neovisnih struja gustoće $\mathbf{J}$ i za prostor bez struja ($\mathbf{J} = 0$). Magnetsko polje je i relativistički efekt koji se opaža u sustavu u kojem se neki naboj Q giba. Magnetsko polje $\mathbf{B}$ očituje se u nekoj točki prostora oko dotičnoga naboja Q na taj način da proizvodi magnetski dio Lorentzove sile $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ na probni naboj q koji prolazi danom točkom brzinom $\mathbf{v}$. Magnetsko polje zato nastaje oko niza naboja u gibanju, tj. oko vodiča kojim teče električna struja. Magnetsko polje stvaraju i elementarne čestice koje posjeduju magnetski moment.

Elektromagnetizam je pojava magnetskoga polja izazvana promjenama električnoga polja, odnosno tokom električne struje. Tu je pojavu prvi uočio Michael Faraday, a teoretski razjasnio James Clerk Maxwell. Električno i magnetsko polje usko su povezani i svaka promjena jednog od polja izaziva promjenu drugoga, pa se shvaćaju kao jedinstveno elektromagnetsko polje (elektrodinamika). Ta su dva polja u svakoj točki prostora međusobno okomita. Prema Biot-Savartovu zakonu svi djelići (duljine ds) nekog električnog vodiča kojim teče električna struja (i) stvaraju u točki na udaljenosti (r) magnetsko polje jakosti (H), koje je određeno jednakošću:

$$\mathbf{H} = \frac{i}{c} \int \frac{d\mathbf{s} \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} \quad (2-7)$$

gdje je c brzina prostiranja magnetskoga polja, to jest brzina svjetlosti. S pomoću te jednakosti može se izračunati jakost magnetskoga polja u svakoj točki prostora bilo kako oblikovanoga vodiča struje (elektrodinamičko djelovanje).

2.1. Elektromagnetske smetnje

Bilo koji dio opreme, sustav ili uređaj koji nije otporan na elektromagnetske smetnje može stradati od elektromagnetskih smetnji. Otpornost na elektromagnetske smetnje definirana je izdržljivošću opreme i sposobnošću funkcioniranja u danim okolnostima.



Slika 2.7. Fotografija udara munja - prirodno pražnjenje [4].

Električni uređaji, oprema ili sustav koji radi u elektromagnetskom (EM) okruženju izaziva nedopuštenu elektromagnetsku smetnju ili je stradalnik elektromagnetskih smetnji koje su prisutne u njegovom okruženju. Ako se radioaparat nalazi u blizini računala, može se pojaviti šum prilikom prijema radiosignala. Kažemo da dolazi do elektromagnetske interferencije (EMI), a zapravo mislimo da je došlo do degradacije osobina uređaja, opreme ili sustava zbog elektromagnetske smetnje. U navedenom slučaju kažemo da radioaparat i računalo nisu kompatibilni elektromagnetski. Elektromagnetska kompatibilnosti (EMC) ima dva stajališta, tj. opisuje sposobnost uređaja, opreme ili sustava da ne izaziva nedopuštene interferencije s drugim sustavima i da neometano radi u danom okruženju.

Proučavanje EMC-a veoma je složeno i možemo ga podijeliti u tri osnovne cjeline: generiranje smetnje (izvor smetnji), način prijenosa smetnje od izvora do žrtve (mehanizam sprege i primanje smetnji (prijemnik ili stradalnik).

Pri stvaranju šuma u radioaparatu blizu uključenog računala, izvor smetnji su digitalni krugovi u računalu, radio je prijemnik (FM antena), a zrakom se prenosi elektromagnetska. Izvori elektromagnetskih smetnji mogu se podijeliti na prirodne, one koje je stvorio čovjek, i umjetne. Munja je najvažniji prirodni izvor elektromagnetskih smetnji. Umjetni izvori elektromagnetskih smetnji mogu biti elektroenergetska postrojenja, elektroenergetski vodovi, električni i elektronički uređaji, radarske stanice, radiostanice, elektromotori itd.

2.2. Prijenos elektromagnetske smetnje

Od izvora do stradalnika prijenos elektromagnetske smetnje uključuje jedan ili više osnovnih mehanizama sprege, a to su:

- konduktivna sprega (električna struja)

- kapacitivna sprega (električno polje)
- induktivna sprega (magnetsko polje)
- elektromagnetska sprega (elektromagnetsko polje, zračenje).

Stradalnik elektromagnetskih smetnji može biti bilo koji dio opreme, uređaj ili sustav koji nije otporan na elektromagnetske smetnje. Stradalnici mogu biti i živa bića. Stupanj otpornosti definiran je prema izdržljivosti opreme i sposobnosti funkcioniranja u određenim uvjetima. Za svaku je vrstu opreme potrebno odrediti koje su sve perturbacije opasne za pouzdan rad i poduzeti sve potrebne mjere zaštite.

Problemi EMC-a mogu se riješiti odstranjivanjem ili smanjivanjem elektromagnetske smetnje, i to smanjivanjem smetnje na samom izvoru, smanjivanjem stupnja sprege ili povećavanjem stupnja otpornosti stradalnika na smetnju. Prva je linija obrane od elektromagnetskih smetnji djelovanje na izvor. U mnogim slučajevima, Jedina je mogućnost kojom raspolažemo, u mnogim slučajevima, smanjenje stupnja sprege. Nizom konstruktivnih zahvata može se povećati stupanj otpornosti stradalnika. Ti zahvati ne iziskuju velika materijalna sredstva, a mogu u pogledu zaštite biti veoma učinkoviti.

2.3. Osnovne mjere za rješavanje EMC problema

Da bi se riješili EMC problemi osnovne su mjere: elektromagnetsko (EM) oklapanje, uzemljenje, ekvipotencijalizacija, izrada vanjskog sustava za zaštitu od udara munje (vanjskog LPS-a), izrada prednaponske zaštite i filtriranje.

Izbor jedne ili više mjera ovisi o koncepciji zaštite od EM smetnje, a ovisi i o cijeni potrebnih zahvata. Stoga je potrebno već u fazi idejnog projekta definirati koje će se mjere poduzeti kako ne bi došlo do povećanih troškova tijekom realizacije projekta.

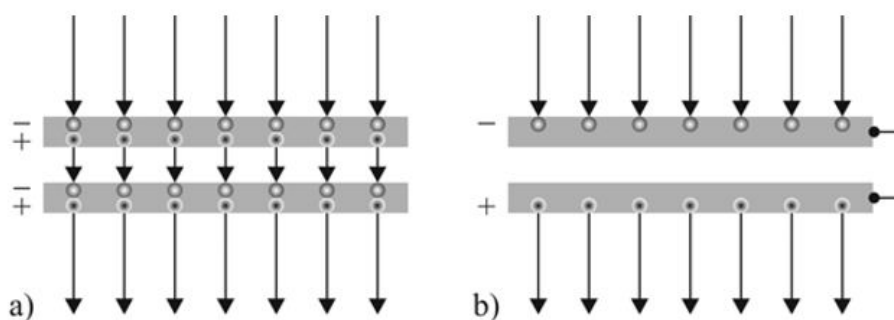


Slika 2.8. Fotografija udara munja – laboratorijski generirano pražnjenje [5].

3. ELEKTROMAGNETSKO OKLAPANJE

3.1. Elektromagnetsko oklapanje

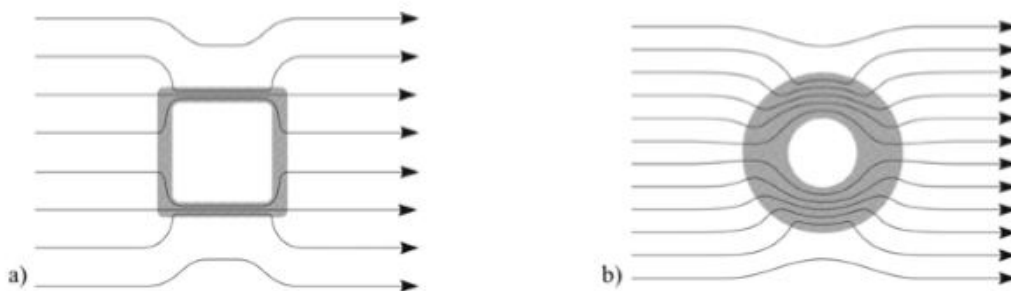
Elektromagnetsko oklapanje (eng. electromagnetic shielding) obuhvaća mjere koje ograničavaju električno, magnetsko kao i elektromagnetsko polje na područje (volumen) određen oklopom. Zaštitni oklopi se izvode od metalnih barijera, kojima djelotvornost ovisi o vrsti polja, konstrukciji, otvorima i frekvencijskom opsegu. Zaštita oklapanjem od statičkih električnih polja može se postići korištenjem vodljivih (Cu ili Al) folija. Zaštita od statičkih magnetskih polja provodi se korištenjem debelih ploha izvedenih od materijala visoke permeabilnosti. Za niske frekvencije magnetsko oklapanje izvodi se debelim vodljivim materijalima. Kod visokih frekvencija, materijal ne određuje u bitnome učinkovitost oklapanja, a treba izbjegavati otvore. Kvaliteta oklopa kabela ovisi o prijenosnoj impedanciji.



Slika 3.1. Zaštitno oklapanje - protiv statičkih električnih polja a) influenciranje naboja b) metalni oklop - nema statičkog električnog polja [6]

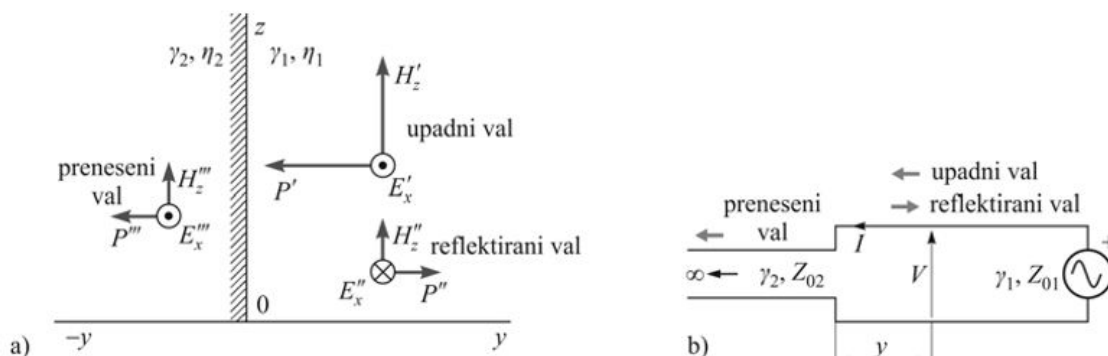
Oklapanje protiv statičkih električnih polja temelji se na tome što unutar vodiča u statičkim uvjetima nema električnog polja. Zbog slobodnih elektrona postojanje stalnog električnog polja u vodiču uvjetovalo bi njihovo neprestano gibanje. Isto tako i ukoliko nema gibanja slobodnih naboja unutar vodiča nema niti električnog polja. Jasno je da ovo vrijedi i za puna metalna kao i šuplja metalna tijela (Faradayev kavez). Oklapanje od statičkih električnih polja provodi se stoga zatvaranjem područja koje želimo zaštititi u metalni oklop (Slika 3.1.)

Magnetski materijali (vode i usmjeravaju magnetski tok) koriste se kod statičkih magnetskih polja te polja industrijskih ili nižih frekvencija. (slika 3.1). Magnetski tok se zakreće oko područja koje se štiti, te što je veća permeabilnost, veća je učinkovitost. Isto tako, što je deblji materijal, veća je učinkovitost [6].



Slika 3.2. Magnetski materijal visoke permeabilnosti oblikuje magnetski oklop kod stratičkoga polja a) pravokutni ljuska b) sferna ljuska [6].

Kod visokofrekvencijskih polja zaštita se zasniva na refleksiji i apsorpciji elektromagnetskog vala. Ako je valna impedancija medija ispred oklopa (vakuum ili zrak) η_v , a metalnog oklopa η_m , zbog neprilagođenja valnih impedancija doći će do refleksije upadnog vala. Isto tako unutar oklopar dolazi do višestrukih refleksija budući da se neprilagođenje nalazi i na drugoj plohi oklopa (Slika 3.3).



Slika 4.4. a) refleksija i prijenos ravnog elektromagnetskog vala kroz granicu sredstava b) analogija s prijenosnom linijom

Slika 3.3. a) dolazak ravnog vala na granicu zrak-metal; b) shema analogije sa prijenosnom linijom – neprilagođenje [6].

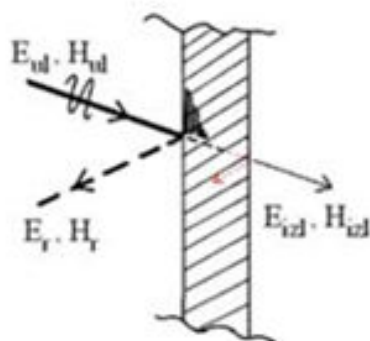
3.2. Efikasnost oklapanja

Vanjske poremećaje oklapanjem držimo izvan oklopa, a unutarnje signale unutar njega. To ćemo postići tako da prigušujemo neželjena električna i magnetska polja i osiguramo male promjene u impedanciji za neželjena strujanja. Omjer jakosti polja u tom volumenu s postavljenim oklopom i bez njega je mjera efikasnosti oklapanja šticećenog volumena. Za velike strukture (npr. oklopljene kabinete) ta mjera (učinka oklapanja) opisana je izrazom (3 – 1).

$$S = \frac{\text{Jakost polja na strani oklopa do izvora}}{\text{Jakost polja na strani oklopa do stradalnika}} \quad (3 - 1)$$

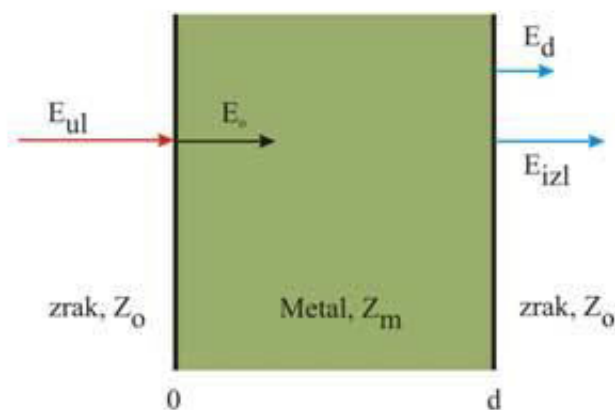
Rješavanjem Maxwellovih jednadžbi možemo proučavati problematiku oklapanja

uvrštavanjem odgovarajućih rubnih uvjeta. Analitička su rješenja moguća samo za nekoliko jednostavnih oblika oklopa koji su načinjeni od homogenog materijala, a nalaze se pod utjecajem jasno definiranog polja. Proučavanjem ovakvih slučajeva pridonosi se razumijevanju funkcioniranja oklopa i na taj nam način omogućava projektiranje EM oklopa. Na slici 3.4. prikazan je upad elektromagnetskog polja na metalni oklop. Elektromagnetsko se polje pri nailasku na takav oklop prigušuje.



Slika 3.4. Upad EM polja na metalni oklop [5]

Na slici 3.5. prikazan je upad EM polja na metalnu ploču. EM polje se pri nailasku na takav oklop prigušuje.



Slika 3.5. Upad EM polja na metalnu ploču [5]

Elektromagnetsko polje prigušujemo:

- apsorpcijom uslijed skin efekta
- refleksijom na granici zrak-metal i na granici metal-zrak
- višestrukom refleksijom unutar metala.

Iz ovih razloga, ukupni faktor oklapanja možemo izraziti pomoću izraza:

$$S = S_A \cdot S_R \cdot S_{MR} \quad (3-3)$$

gdje je:

S_A – faktor oklapanja uslijed apsorpcije,

S_R – faktor oklapanja uslijed refleksije,

S_{MR} – faktor oklapanja uslijed višestruke refleksije unutar metala

ili pak u decibelima:

$$S(\text{dB}) = S_A(\text{dB}) + S_R(\text{dB}) + S_{MR}(\text{dB}) \quad (3-4)$$

Faktor oklapanja uslijed apsorpcije S_A približno je isti za polje bliskog izvora i za polje dalekog izvora, a njegov modul je opisan izrazom:

$$S_A(\text{dB}) = 8.7 \cdot d \cdot \sqrt{z \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} = 8.7 \frac{d}{\delta} \quad (3-5)$$

Tzv. dubina prodiranja EM polja u metal:

$$\delta = \frac{1}{f_x \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (3-6)$$

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

Za bliski izvor, faktor oklapanja uslijed refleksije može se približno opisati izrazom:

$$S_R(\text{dB}) \approx 20 \cdot \log_{10} \frac{(Z_{polja} + Z_m)^2}{4 \cdot Z_{polja} \cdot Z_m} \quad (3-7)$$

gdje je valna impedancija električnog polja:

$$Z_{polja} = Z_E = \frac{1}{2 \cdot z \cdot f \cdot \epsilon \cdot r} \quad (3-8)$$

dok je valna impedancija magnetskog polja:

$$Z_{polja} = Z_H = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot r \quad (3-9)$$

U izrazu (3-7) i (3-8) r predstavlja udaljenost izvora od oklopa. Faktor oklapanja uslijed refleksije je veći na niskim frekvencijama i za visoko vodljive materijale. Kod visokih frekvencija i feromagnetskog oklopa imamo relativno mali faktor oklapanja.

Faktor oklapanja S_R izražen u dB jednak je nuli ili je manji od nule. Ako je debljina oklopa mnogo veća od dubine prodiranja vala u metal oklopa ($d \gg \delta$).

$$S_R(\text{dB}) \approx 20 \cdot \log_{10} \frac{Z_0}{4 \cdot Z_m} \quad (3-10)$$

U izrazu (3-19) je $Z_0 = 377 \Omega$ valna impedancija zraka, dok je Z_m valna impedancija oklopa.

Za metal vrijedi da je:

$$Z_m \approx |Z_m| = \sqrt{\frac{2 \cdot z \cdot f \cdot \mu}{\sigma}} \quad (3-11)$$

Faktor oklapanja S_R izražava se u dB. Ako je debljina oklopa mnogo veća od dubine prodiranja (eng. skin depth) debljine kože) vala u metal oklopa ($d \gg \delta$) tada oklop ima veliku djelotvornost.

Može se pokazati da se s porastom frekvencije povećava djelotvornost oklapanja električnog polja bliskog izvora na osnovi izvedenih izraza, a smanjuje se učinak oklapanja električnog polja bliskog izvora. Razlog tome je povećanje apsorpcije EM vala s povećanjem frekvencije (S_A).

Povećanje debljine oklopa nema utjecaja na faktor oklapanja uslijed refleksije, a pozitivno utječe na dva preostala faktora.

Primjer: Zaštitni oklop je izrađeno aluminijskog lima debljine $d = 0.5$ mm, vodljivosti $\sigma = 3.48 \cdot 10^7$ S/m, relativne permeabilnosti $\mu_r = 1$, relativne dielektričnosti $\epsilon_r = 1$. Frekvencija polja kojeg dolazi na oklop je $f = 1$ kHz.

Određuje se faktor oklapanja:

a) za udaljeni izvor

b) za bliski izvor udaljen $r = 10$ cm, za električno polje kao i za magnetsko polje.

Rješenje:

$$S_R(dB) \approx 20 \cdot \log_{10} \left(1 - e^{-\frac{2 \cdot d}{\delta}} \right) \quad (3-12)$$

a) Rezultati za udaljeni se izvor prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Faktori oklapanja za izabrani primjer u slučaju udaljenog izvora [5].

Faktor oklapanja	Iznos [dB]
S_A (dB)	1.61
S_R (dB)	135.9
S_{MR} (dB)	-10.19
S (dB)	127.32

b) Rezultati za bliski se izvor prikazani su u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Faktori oklapanja za izabrani primjer u slučaju bliskog izvora [5].

Faktor oklapanja	Iznos [dB]	
	El. Polje	Mag. Polje

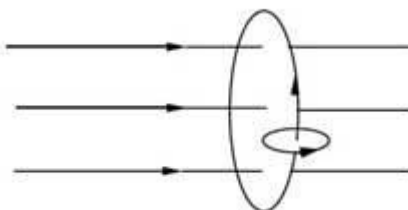
$S_A(dB)$	1.61	1.61
$S_R(dB)$	249.49	22.66
$S_{MR}(dB)$	-10.19	-10.19
$S(dB)$	240.91	14.08

3.3. Zaštita od niskofrekvencijskog (NF) magnetskog polja

Apsorpcija uslijed skin efekta predstavlja glavni mehanizam zaštite od visokofrekvencijskog (VF) magnetskog polja bliskog izvora. Apsorpcijski i refleksijski gubici vrlo su maleni za niskofrekvencijske (NF) izvore magnetskog polja.

Faktor oklapanja uslijed apsorpcije može se povećati na tri različita načina:

- korištenjem supravodljivih materijala
- korištenjem magnetskih materijala relativno visoke permeabilnosti (μ) i vodljivosti σ
- korištenjem kratkospojnih petlji u kojima teku inducirane struje koje se suprotstavljaju promjeni glavnog magnetskog toka (slika 3.6.).

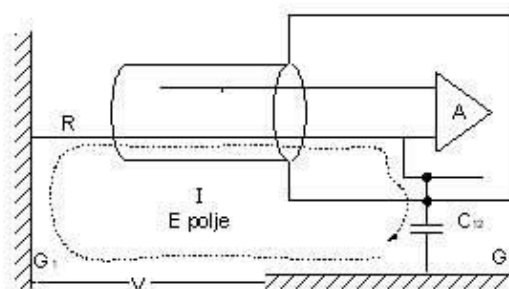


Slika 3.6. Proces stvaranje suprotnog magnetskog toka [5]

3.4. Uzemljenje oklopa signalnog kabela

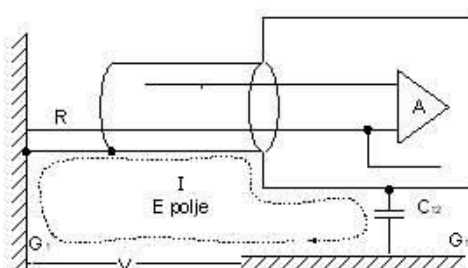
Geometrija oklapanja sve više dobiva na važnosti s porastom frekvencije. Struktura strujnog kruga i oklopa mora biti takva da eventualna parazitna struja teče oklopom, a ne signalnim vodičem.

Uzemljenje oklopa uvijek treba biti na mjestu gdje je uzemljen signalni vodič. Primjer pogrešnog uzemljenja prikazan je na slici 3.4.1. Parazitna struja teče u ovom slučaju signalnim vodičem i na taj način proizvodi šum.



Slika 3.7. NEISPRAVNO uzemljenje oklopa [5]

Na slici 3.4.2. prikazano je ispravno uzemljenje oklopa. Parazitna struja teče oklopom i kućištem ne remeteći prijenos signala unutar oklopa.



Slika 3.8. ISPRAVNO uzemljenje oklopa [5]

3.5. Uzemljenje

Uzemljenje je važno za dijelove elektroenergetskog sustava, za niskonaponske električne instalacije, za elektroničke sustave i za sustave informacijske tehnologije. Nema ni dobrog sustava za zaštitu objekta od udara munje bez dobrog uzemljivača.

Svrha uzemljivačkog sustava može biti:

- zaštita objekata i živih bića od udara munje
- zaštita živih bića od električnog udara
- zaštita električnih i elektroničkih uređaja od električnog udara
- zadovoljenje zahtijevanih EMC svojstava.

Uzemljivački sustav se projektira i izvodi s ciljem da se u zemlju odvedu struje kvara, struja munje ili VF struje elektroničkih uređaja i sustava. Idealni uzemljivač ima impedanciju jednaku nuli.

Isti se uzemljivač pri odvođenju NF struja i impulsne struje ponaša potpuno različito.

Za uzemljivač je važno istaknuti sljedeće sa stajališta EMC-a :

a) Dominantna je konduktivna komponenta impedancije uzemljivača kod vrlo niskih frekvencija, dok je na visokim frekvencijama (reda veličine MHz) dominantna induktivna komponenta. Kod visokih frekvencija struja se može zatvoriti neželjenim putem i na taj način izazvati EM smetnju. 'Dugi' uzemljivači nisu prikladni za odvođenje VF struja.

b) Pitanje je je li bolje cjelokupni sustav uzemljiti u jednoj ili pak u više točaka. Kad je sustav uzemljen u jednoj točki, onda se kroz zemlju ne mogu zatvoriti nulte struje. Ali taj sustav ima i mane. Jedna je da u distribuiranim sustavima spojni vodiči koji pojedini podsustav povezuju na uzemljivač mogu biti relativno dugi, a to znači da imaju veliku impedanciju ili se ponašaju kao kratki prijenosni vod što može uzrokovati mnoge probleme. Uzemljenje sustava u jednoj točki nije u svim situacijama najbolje rješenje, ali to je relativno dobro rješenje za LF podsustave. Tipični primjer primjene uzemljenja u više točaka je uzemljenje digitalnih podsustava.

c) Za odvajanjem uzemljivačkih sustava ponekad postoji potreba. Npr. prilikom uvođenja telekomunikacijskih (TK) linija u elektroenergetska postrojenja poželjno je da TK sustav i elektroenergetski sustav imaju odvojene uzemljivače kako bi se spriječilo da struja kvara na sabirnicama elektroenergetskog postrojenja uđe u TK sustav.

3.6. Ekvipotencijalizacija

Ekvipotencijalizacija je povezivanje svih metalnih masa u jednoj zgradi ili električnom postrojenju na sabirnice za izjednačavanje potencijala koje su povezane na uzemljivač. Osnovna svrha ekvipotencijalizacije je zaštita živih bića i elektroničkih krugova koji su veoma osjetljivi na moguće razlike potencijala. Zato je potrebno pozorno razraditi koncepciju ožičenja i povezivanja svih metalnih masa u jednom prostoru.

4. MATERIJALI U ELEKTROMAGNETSKOM OKLAPANJU

Magnetski oklop mora biti izveden od materijala s visokom permeabilnošću.

Amumetal postiže veliko gušenje s malom debljinom (50 μ m do 3mm).

Za manje prigušenje ekonomičnije je koristiti UCLS.

Tablica prikazuje najčešće elektromagnetske materijale i njihovu permeabilnost.

Tablica 4.1. Najčešći elektromagnetski materijali i njihova permeabilnost

Materijal	Zasićenje (Gauss)	Permeabilnost, μ
Amumetal	8000	400000
Amunickel	15000	150000
ULCS	22000	4000
L8	2550	1500
J70	2500	620
M7	2505	160
S1	1625	120

5. MJERENJE DJELOTVORNOSTI ELEKTROMAGNETSKOG OKLAPANJA

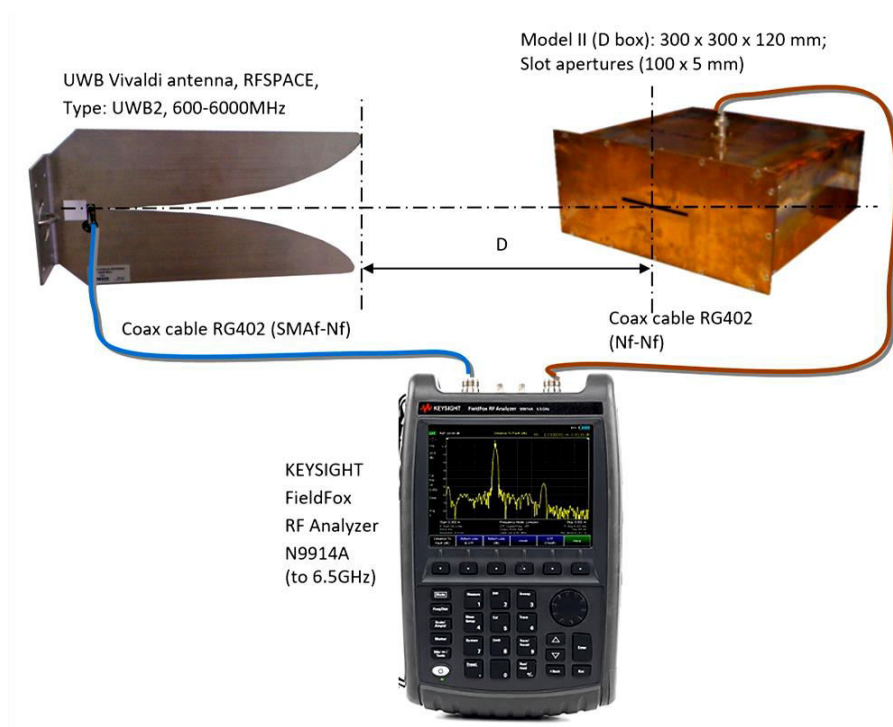
5.1. Metode mjerenja EM oklapanja

A. Mjerna metoda koja se zasniva na S 21 parametrima- metoda I

Za mjerenje SE, monopolna antena promjera 0,2 mm montirana je u kućištu. Spojena je s kabelom koaksijalnog (RG402) na 2. priključak analizatora frekvencije. UWB antena (Vivaldi antenna) je povezana pomoću koaksijalnog kabela (RG402) na 1. priključak analizatora frekvencije. Analizator mjeri parametar S21 kada je monopol antena unutar kućišta, a zatim isti parametar S21 kada nema kućišta. SE se određuje kao razlika tih izmjerenih vrijednosti ($S21_{bk}-S21_{sak}$) (značenje indeksa parametra S21: bk - bez kućišta; sak – sa kućištem) Slika 5.1. prikazuje skicu sheme mjerenja ovom metodom.

Mjerna oprema (slika.5.1.):

- KEYSIGHT, FieldFox RF Analyzer N9914A, max. Frequency 6.5 GHz;
- RFSPACE, UWB Vivaldi antena, type: UWB 2, 600 – 6000 MHz;
- Coax kabel: RG402 (SMAf-Mf konektori) 2 m; RG402 (Nf-Nf konektori) 5m.



Slika 5.1. Skica mjernog sustva za mjerenja djelotvornosti oklapanja zasnovana na mjerenju S21 parametar – metoda I [7].

UWB Vivaldi antena šalje elektromagnetski val prema oklopu dio te energije uđe u kućište i taj signal se dovodi do uređaja. Uređaj je Keysight FieldFox RF Analyzer N9914A.. Na osnovu toga, RF analizator prikazuje parametre S21 – sprega antene i unutarne antene, što znači predstavlja iznos energije koji je prošao kroz oklop.

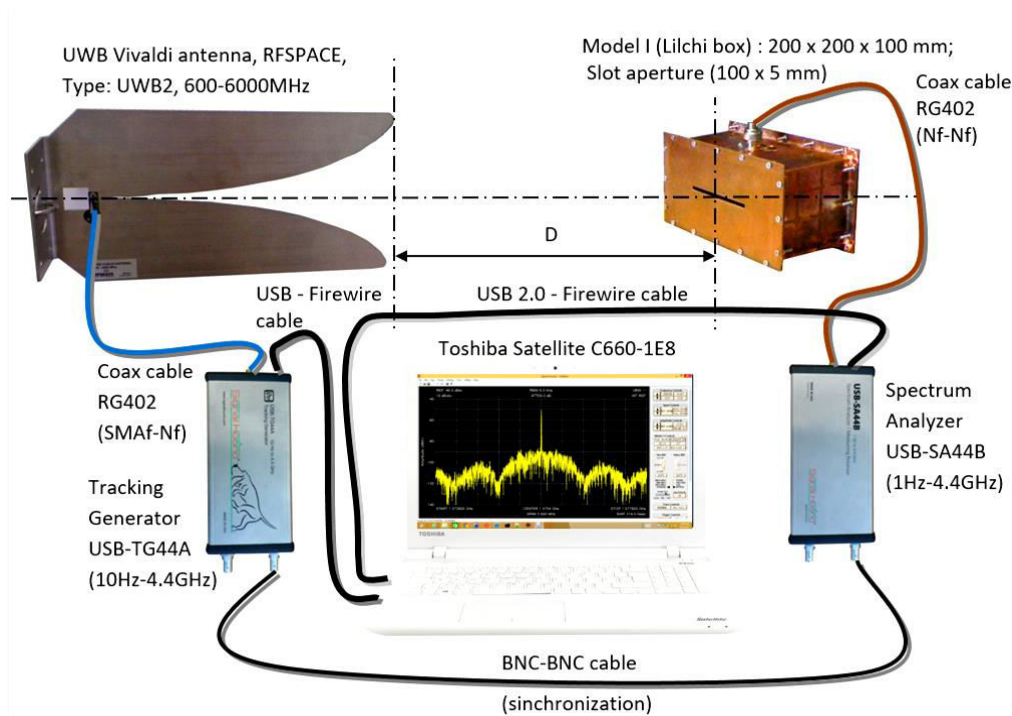
B. Mjerna metoda koja se zasniva na mjerenju jakosti električnog polja - metoda IIA ($E_{ush}-E_{sh}$)

Izvor signala (UWB antena + trigger generator), mjerna oprema (RF analizator) i raspored moraju biti u skladu sa slikom 5.2. Oba su instrumenta međusobno povezana sa laptopom. Kabeli za spajanje instrumenata s antenama (monopol i UWB antene) identični su u metodi I. Generator (Tracking generator) stvara EM val u danom frekvencijskom području i šalje ga na UWB antenu. Analizator spektra prima signal iz monopol antene koja se nalazi unutar kućišta (prvo mjerenje), dok se drugo mjerenje izvodi sa monopol antenom izvan metalnog kućišta. Učinkovitost zaštite se određuje (izračunava) kao razlika izmjerenog polja kada nema kućišta i one vrijednosti polja kad ima kućišta. Slika 5.2. prikazuje skicu mjernog sustava metode II.

Mjerna oprema (slika 5.2.):

- SIGNAL HOUND, Spektralni analizator USB SA 44B, 1 HZ - 4.4 GHz;
- SIGNAL HOUND, Tracking generator USB TG 44A, 10 HZ - 4.4 GHz;
- RFSPACE, UWB Vivaldi antena, type: UWB 2, 600 – 6000 MHz;
- TOSHIBA, Satellite C 660-1E8; OS Windows 7;
- SIGNAL HOUND, Softw za spektralni analizator - Spike 64 BIT;

- Coax kabeli: RG402 (SMAf-Nf konektori) 2 m; RG402 (Nf-Nf konektori) 5m;
- Coax kabeli: RG58 (BNCm-BNCm konektori) 1.5 m;
- USB 2.0 firewire kabel 2 kom;
- Adapter: Nm-SMAf.

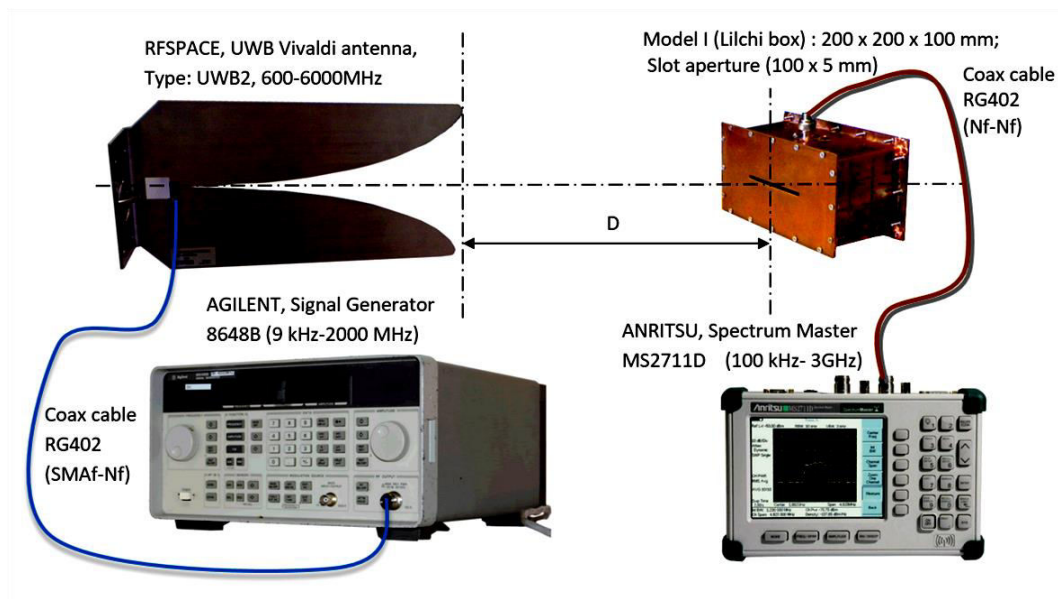


Slika 5.2. Skica mjernog sustva za mjerenja djelotvornosti oklapanja zasnovana na mjerenju jakosti električnog polja –metoda IIA [7].

Na slici 5.2. vidimo da oprema radi potpuno ista mjerenja, samo što to nije u istom uređaju nego Tracking GeneratorUSB-TG44A daje vanjskoj anteni signal, a iz ove u oklopu monopol antena prima te predaje spektralnom analizatoru, a zatim se podaci obrađuju u računalu. Rezultat obrade je ponovo razlika energije koju je poslala vanjska antena i primila unutarnja antena. Na taj se način ponovo dolazi do podataka koliko oklop štiti od elektromagnetskog zračenja. Ovaj sustav je djelomično softverski, a djelomično hardverski (dvije vanjske jedinice).

c. Mjerna metoda koja se zasniva na mjerenju jakosti električnog polja - metoda IIB ($E_{ush}-E_{sh}$)

Ova metoda identična je kao i metoda IIA samo je mjerenje izvedeno sa diskretnim mjernim uređajima. Izvor signala je generator signala i UWB antena, mjerna oprema (Signal master) je spojena na monopol antenu u kućištu prema shemi spoja u skladu sa slikom 5.3.



Slika 5.3. Skica mjernog sustava za mjerenja djelotvornosti oklapanja zasnovana na mjerenju jakosti električnog polja – metoda IIB [7].

Mjerna oprema (slika 5.3.):

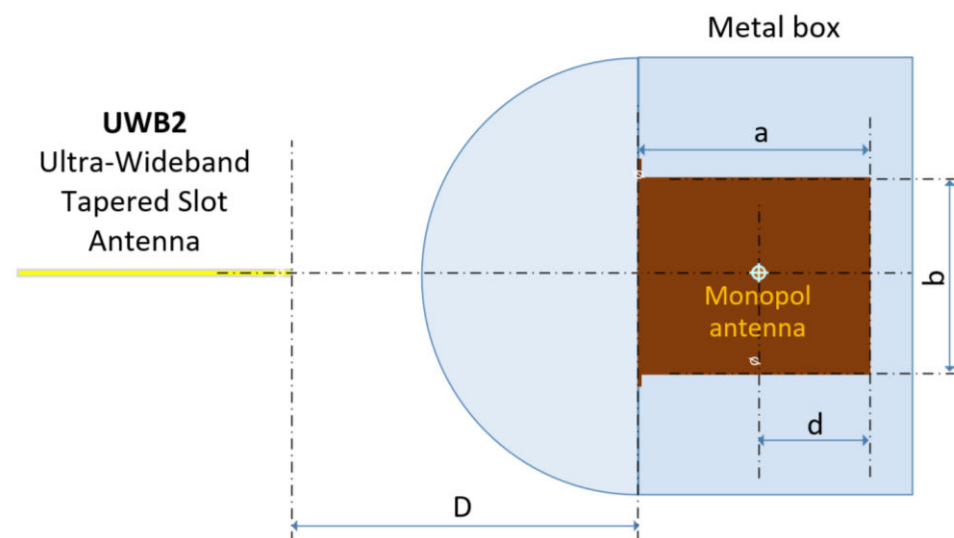
- ANRITSU, Spektralni analizator MS2711D, 100 kHz – 3 GHz;
- AGILENT, Signal generator 8648B, 9 kHz - 2 GHz;
- RFSPACE, UWB Vivaldi antena, type: UWB 2, 600 – 6000 MHz;
- Coax cables: RG402 (SMAf-Nf konektori) 2 m;
- RG402 (Nf-Nf konektori) 5m.

Mjerenje (metoda IIB) ograničeno je najvećom vrijednošću frekvencije izvora signala (generator signala 8648B) do maksimalne vrijednosti od 2 GHz.

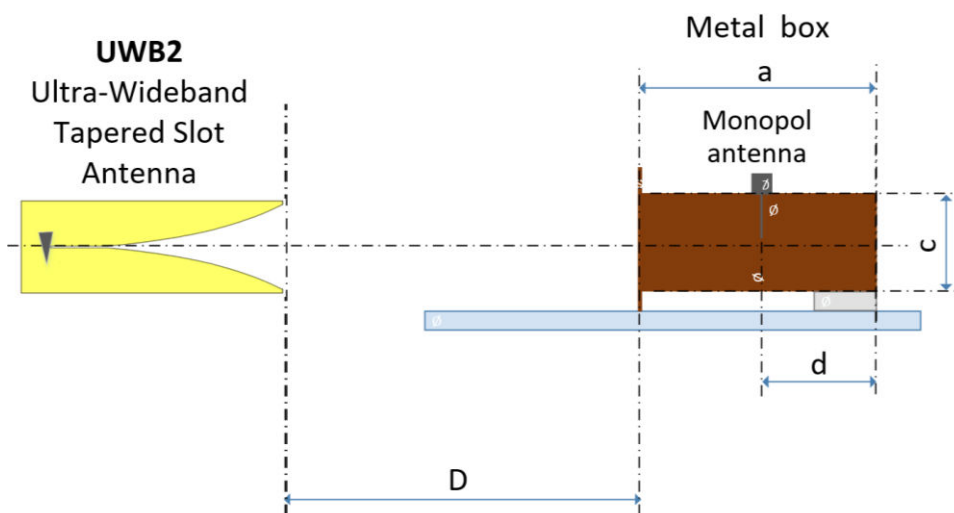
Ovaj mjerni sustav radi potpuno isto samo je sve hardverski sustav.

5.2. Rezultati mjerenja EM oklapanja

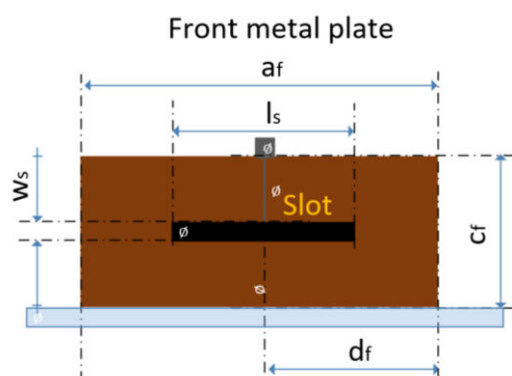
Metode mjerenja (prema [5.4.]) primjenjuju se na kućište koje ima najmanju linearnu dimenziju koja je jednaka 5 mm (širina otvora). Kućište je izrađeno od bakrenog lima debljine 1,5 mm mm. Sve strane i gornje stranice su zalemljeni zajedno (osim prednje ploče), a prednja ploča okropa je izvedena sa izmjenjivim pločama koje sadrže otvor (100 x 5 mm). Dakle, otvor je na prednjoj strani kućišta. Ovo je prikazano na slici 5.2.1. (gornji, bočni i prednji pogled na kućišta). Tablica I. prikazuje geometrijske parametre modela.



a)



b)



c)

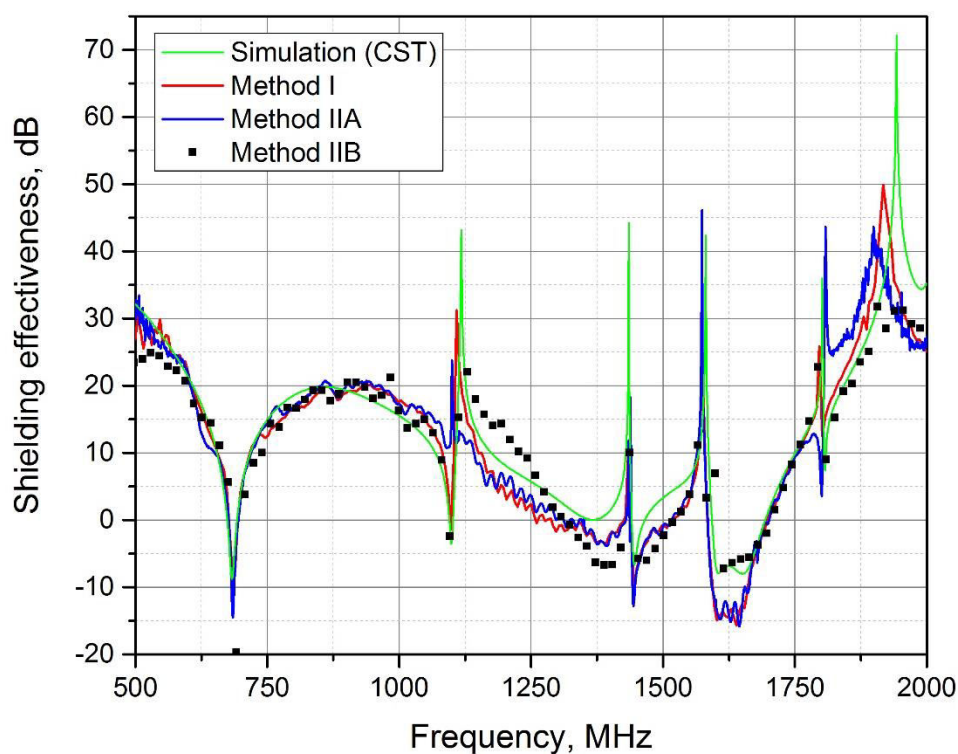
Slika 5.4. Kućište sa otvorom 100 x 5 mm na prednjoj metalnoj ploči: a) pogled odozgo; b) pogled sa strane; c) pogled sprijeda [7].

Tablica 5.1. Dimenzije kućišta koje se koristilo pri mjerenju djelotvornosti oklapanja (prema Slici 5.4.) [7].

Veličine	Kućište
	<i>Model II (D box)</i>
a (mm)	300
b (mm)	300
c (mm)	120
d (mm)	150
af (mm)	302
cf (mm)	122
df (mm)	151
ls (mm)	100
ws (mm)	5
D (mm)	$0.57\lambda_{\max}$ to $5.7\lambda_{\min}$
lant (mm)	60
t (mm) thickness	1.5
Monopol radius (mm)	0.1

Mjerenja djelotvornosti oklapanja izvedena su za frekvencijski opseg od 500 do 2000 MHz sa dvije metode pri čemu je druga metoda izvedena sa dva seta mjerenja IIA i IIB.

Izvedeno metalno kućište je ispitni laboratorijski model zaštitnog oklopa.



Slika 5.5. Rezultati mjerenja i simulacije djelotvornosti oklapanja modela II (D box) s otvorom dimenzija 100 x 5 mm [7].

Slika 5.5. prikazuje rezultate mjerenja i simulacije (korištenjem CST softvera zasnovanog na TLM – transmission line method). Mjerenja pokazuju da djelotvornost oklapanja ima na nekoliko frekvencija (minimalne vršne vrijednosti prema dolje) ima minime. Te frekvencije su frekvencije rezonancija kućišta. Isto tako na slici 5.5. je vidljivo da se vrijednosti dobijene simulacijom i mjerenjima dobro poklapaju.

Sve tri metode mjerenja prikazuju djelotvornost mjerenja. Više vrijednosti pokazuju da je oklapanje dobro (na tim vršnim frekvencijama), a niske vrijednosti pokazuju da oklop ne štiti ili vrlo slabo štiti posebno na negativnim niskim vrijednostima.

6. ZAKLJUČAK

Elektromagnetsku kompatibilnost (EMC) je vrlo važno područje za rješavanje u inženjerskoj praksi. Svaki uređaj bi trebao neometano raditi u svom okolišu. Elektromagnetske smetnje uglavnom stvara elektroenergetski sustav i električni uređaji priključeni na njega, a visokofrekvencijske poremećaje stvara elektronička oprema.

U ovom završnom radu se obrađivalo elektromagnetsko oklapanje teoretski i kroz mjerenja djelotvornosti oklapanja iz dostupne literature. U radu su prikazane metode mjerenja djelotvornosti oklapanja u dvije varijante: korištenjem mjerenja S21 parametara te mjerenja jakosti električnog polja. Obje metoda daju vrlo bliske rezultate. Rezultati mjerenja pokazuju da učinkovitost oklapanja uveliko ovisi o parametrima i obliku kućišta kao i otvora koji na kućištu postoje.

Vidljivo je da djelotvornost oklapanja ovisi i o frekvencijskom opsegu u kojem se to kućište koristi.

Elektromagnetsko oklapanje, uzemljenje i ekvipotencijalizacija su osnovne mjere za rješavanje EMC problema.

7. LITERATURA

[1] Elektromagnetizam

<https://www.britannica.com/science/electromagnetism>

[2] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Magnet>

[3] https://issuu.com/damir_pavlovic/docs/magnetske_i_elektromagnetske_pojave_intro

[4] J. Markov, Kako se zaštititi od udara munje

<http://www.crometeo.hr/kako-se-zastititi-od-udara-groma/>

[5] S. Vujević, I. Milanović, Elektromagnetsko oklapanje i uzemljenje,

<http://www.gradimo.hr/clanak/elektromagnetsko-oklapanje-i-uzemljenje/25408>, 2008

[6] M. Dadić, Numerički proračuni elektromagnetske kompatibilnosti, Creative Commons Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 3.0 Hrvatska,

https://www.fer.unizg.hr/download/repository/dadic_numericki_proracuni.pdf

[7] V. Mandrić Radivojević, N.Nešić, S.Rupčić, V.Alilović, The shielding effectiveness measurements of a rectangular enclosure perforated with slot aperture, SST 2017 međunarodna konferencija, Osijek , 2017.

8. SAŽETAK

Završni rad obrađuje područje elektromagnetskog oklapanja u energetske postrojenjima i zaštitu od elektromagnetskog zračenja. U praktičnom dijelu izvedena su mjerenja djelotvornosti elektromagnetskog oklapanja.

Izvršena su mjerenja koja se zasnivaju na: a) mjernoj metodi koja se zasniva na S 21 parametrima- metoda I, b) mjernoj metodi koja se zasniva na mjerenju jakosti električnog polja - metoda IIA ($E_{ush}-E_{sh}$) i c) mjernoj metodi koja se zasniva na mjerenju jakosti električnog polja - metoda IIB ($E_{ush}-E_{sh}$).

Obavljenim mjerenjima je utvrđeno da se elektromagnetskim oklapanjem elektromagnetsko zračenje može smanjiti i dovesti u zadovoljavajuće granice.

Ključne riječi: elektromagnetsko zračenje, elektromagnetsko oklapanje

SUMMARY

The final paper deals with the area of electromagnetic shielding in power plants and protection from electromagnetic radiation. In the practical part, measurements of the efficiency of electromagnetic shielding were performed. Measurements were made based on: a) a measurement method based on S 21 parameters - method I, b) a measurement method based on the measurement of the electric field strength - method IIA ($E_{ush}-E_{sh}$) c) a measurement method based for measuring electrical field strength - method IIB ($E_{ush}-E_{sh}$). Measurements have shown that by electromagnetic shielding the electromagnetic radiation can be reduced and brought to a satisfactory level.

Keywords: electromagnetic radiation, electromagnetic shielding

9. ŽIVOTOPIS

Dino Gatra rođen je 26. rujna 1992. godine u Osijeku. Osnovnu školu Frana Krste Frankopana u Osijeku završava 2006. godine nakon čega upisuje Opću gimnaziju u Osijeku. 2010. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer Preddiplomski studij elektrotehnike u Osijeku.