

Elektromagnetska interferencija

Postružin, Klara

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:925161>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-21**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek
Preddiplomski sveučilišni studij Brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa
(jednoprredmetni - izvanredni)



Klara Postružin

Elektromagnetska interferencija

Završni rad

Zadar, 2021.

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel - Brodostrojarški odsjek

Preddiplomski sveučilišni studij Brodostrojarstva i tehnologije pomorskog prometa
(jednopedmetni - izvanredni)

Elektromagnetska interferencija

Završni rad

Student/ica:

Klara Postružin

Mentor/ica:

Doc. dr. sc. Marijan Gržan

Zadar, 2021.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Klara Postružin**, ovime izjavljujem da je moj **završni** rad pod naslovom **Elektromagnetska interferencija** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 29. listopad 2021.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. ELEKTROMAGNETIZAM	2
3. ELEKTROMAGNETSKA INTERFERENCIJA.....	3
3.1. Načini prenošenja elektromagnetske interferencije	4
4. ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST	8
5. METODE MJERENJA ELEKTROMAGNETSKE INTERFERENCIJE.....	10
5.1 Ispitivanje zračenja (emisije)	10
5.1.1. Ispitivanje zračenih emisija.....	11
5.2. Ispitivanje imuniteta.....	13
5.2.2. Ispitivanje imuniteta na kontinuirane izvore elektromagnetske smetnje	13
6. METODE SMANJENJA UTJECAJA ELEKTROMAGNETSKE INTERFERENCIJE....	17
6.1. Elektromagnetsko oklapanje, uzemljivanje i ekvipotencijalizacija	17
6.2. Značajnije elektromagnetske strukture.....	20
7. PRIMJERI ŠTETNIH UTJECAJA ELEKTROMAGNETSKE INTERFERENCIJE U POMORSTVU	24
7.1. Elektromagnetska interferencija na brodu.....	25
7.2. HMS Sheffield.....	26
7.3. USS Forrestal	27
7.4. Ro-Ro brod Coastal Inspiration.....	28
8. ZAKLJUČAK	29
9. POPIS LITERATURE I IZVORA	30
10. POPIS SLIKA	31
Sažetak	32

1. UVOD

U ovom završnom radu opisan je pojam elektromagnetske interferencije kao i njezin utjecaj na elektronske sustave. Također u radu je izloženo nekoliko primjera iz pomorstva i štete koju može prouzročiti elektromagnetska interferencija.

Ovaj rad je podijeljen na šest poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno poglavlje u kojemu su spomenuti najčešći pojmovi na kojima će se temeljiti ovaj rad.

Drugo poglavlje detaljnije obuhvaća pojam elektromagnetske interferencije te načine prenošenja elektromagnetske interferencije kao i potencijalna rješenja u cilju postizanja elektromagnetske kompatibilnosti nekog uređaja/ sustava.

U trećem poglavlju se govori o elektromagnetskoj kompatibilnosti i važnosti iste pri dizajniranju tehničkog sustava.

Četvrto i peto poglavlje opisuje i razlikuje metode mjerenja i smanjenja utjecaja elektromagnetske interferencije (EMI).

U šestom poglavlju je izneseno nekoliko primjera iz pomorstva u kojima je elektromagnetska interferencija bila uzrok katastrofalnih nesreća. Zadnje poglavlje je zaključak.

2. ELEKTROMAGNETIZAM

Elektromagnetizam je pojava magnetskoga polja izazvana promjenama električnoga polja, točnije tokom električne struje. Navedenu pojavu je prvi uočio Michael Faraday, a matematički raščlanio James Clerk Maxwell.

Električno i magnetsko polje usko su povezani i promjena jednog polja utječe na drugo pa se shvaćaju kao elektromagnetsko polje. Otkriće da električna struja u svom okolišu stvara magnetsko polje, izraženo je Biot-Savortovim zakonom. Svi dijelovi, tj. duljine (ds) nekog električnog vodiča kojim teče električna struja (i) stvaraju u točki na udaljenosti (r) magnetsko polje jakosti (H), koje je određeno jednakošću:

$$\mathbf{H} = \frac{i}{c} \int \frac{ds \times \mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3}$$

gdje je c brzina prostiranja magnetskoga polja, odnosno brzina svjetlosti. Temeljem ove jednakosti može se izračunati jakost magnetskog polja u svakoj točki prostora bilo kojeg vodiča struje.

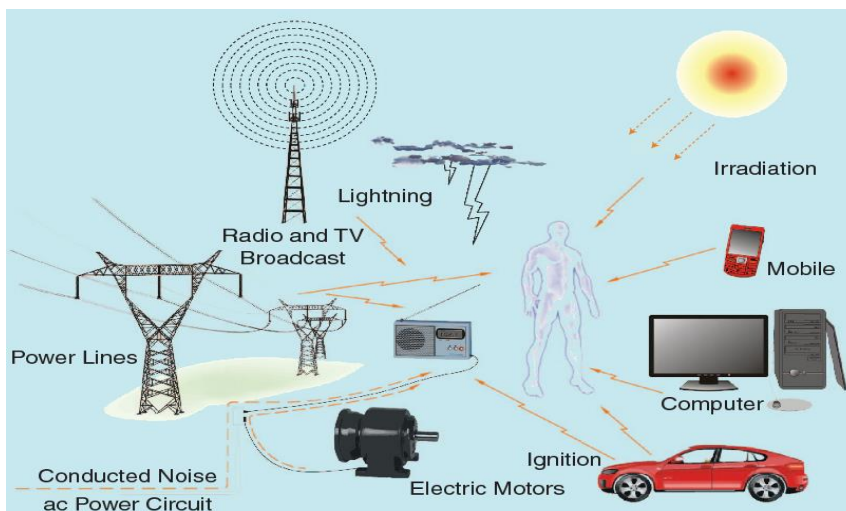
Uređaj/ sustav koji nije otporan na elektromagnetske smetnje može postati žrtvom istih. Otpornost na elektromagnetske smetnje definirana je izdržljivošću opreme te sposobnošću neometanog funkcioniranja u zadanom okruženju. Električni uređaji, sustavi ili oprema koji rade u elektromagnetskom okolišu izazivaju elektromagnetsku smetnju ili su žrtva elektromagnetskih smetnji.

Primjerice, ako se radio nalazi u neposrednoj blizini računala, može se pojaviti šum prilikom prijema radiosignala. Do pojave šuma je došlo uslijed pogoršanja karakteristika uređaja zbog elektromagnetske smetnje. Iz navedenog primjera možemo reći da računalo i radio nisu elektromagnetski kompatibilni. Digitalni krugovi u računalu predstavljaju izvor elektromagnetske smetnje, a radio je u ovom slučaju prijemnik, a zrakom se prenosi elektromagnetska energija.

3. ELEKTROMAGNETSKA INTERFERENCIJA

Elektromagnetsku interferenciju možemo definirati kao pojavu koja nastaje kada dođe do prijema korisnog elektromagnetskog signala oštećenog elektromagnetskim smetnjama. Ponekad se naziva i provodna emisija odnosno radijacijska emisija elektromagnetskih valova. Pitanje je zašto se to događa na žicama i koja je uloga magnetskog polja. Dakle, razlog je što bilo kakav protok struje posljedično stvara magnetsko polje i shodno tomu ti visokofrekventni neželjeni signali stvaraju magnetsko polje koja ometa opremu koja se nalazi u neposrednom okruženju.

Uslijed postojanja elektromagnetske interferencije (skraćeno EMI) dolazi do značajne degradacije u performansama elektronskih sustava. Porastom broja elektronskih uređaja koji se koriste na maloj udaljenosti, vjerojatnost da će se pojaviti EMI postaje veća.



Slika 1 Djelovanje elektromagnetske interferencije

Na slici 1 je ilustriran prikaz djelovanja EMI smetnji na neki uređaj. Prilikom utjecaja elektromagnetskih smetnji može doći do nepravilnog i nekontinuiranog rada. Izvori poremećaja su predstavljeni kao električni motori, radio i TV prijammnici, visokonaponski vodovi i dr.

Na višim frekvencijama korisnih signala pojaviti će se glavina smetnji koje emitira uređaj/oprema. U cilju sprečavanja elektromagnetske interferencije, svaki signal koji nije korista mora biti otklonjen.

3.1. Načini prenošenja elektromagnetske interferencije

Put prijenosa elektromagnetske interferencije se sastoji od jednog ili više mehanizama spoja a to su:

1) Konduktivan (galvanski) spoj

Kod ovog spoja signal šuma se prenosi električnim spojevima. Odnosno izvor i žrtva imaju zajednički vodič, koji je obično linija napajanja ili uzemljenja. Zajednička impedancija može se klasificirati kao galvanska spojka.

2) Induktivan spoj

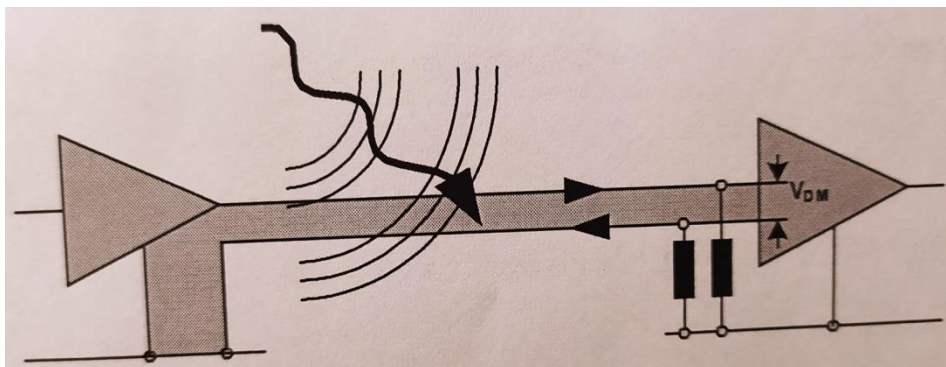
Ovaj način prijenosa je uobičajen u izvorima napajanja s komutiranim načinom rada jer visokofrekventne struje u induktorima mogu uzrokovati jaka magnetska polja na višim frekvencijama, gdje čimbenici sprezanja mogu biti veći. Magnetsko oklopljavanje je manje učinkovito od električnog jer je dubina upijanja manja i zahtijeva deblje materijale. Induktivnu spregu je najbolje riješiti na izvoru.

3) Elektromagnetski spoj

Spojni kanal između izvora i žrtve elektromagnetske smetnje ne mora uvijek biti provodni medij već može biti i izolator. Elektromagnetska sprega se općenito smatra šumom u podacima inducirane polarizacije.

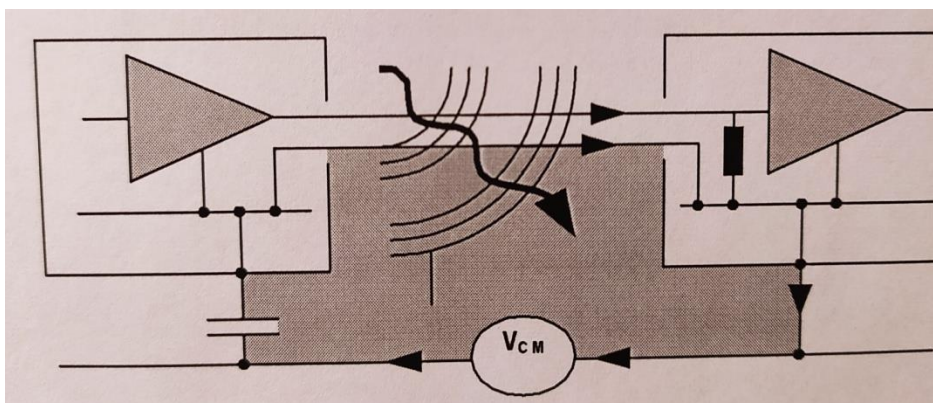
Prilikom identificiranja i kontroliranja elektromagnetskih smetnji također se moraju spomenuti i zajedničke te diferencijalne smetnje signala.

Interferencija diferencijalnog načina (eng. differential mode; DM) je signal koji se pojavljuje na dvije linije zatvorene petlje, ali struja teče u suprotnim smjerovima (prikaz na slici 2). Ova vrsta smetnje u biti se pojavljuje u seriji sa željenim signalom. Ovakva vrsta interferencije signala se lako može smanjiti uprezanjem vodiča.



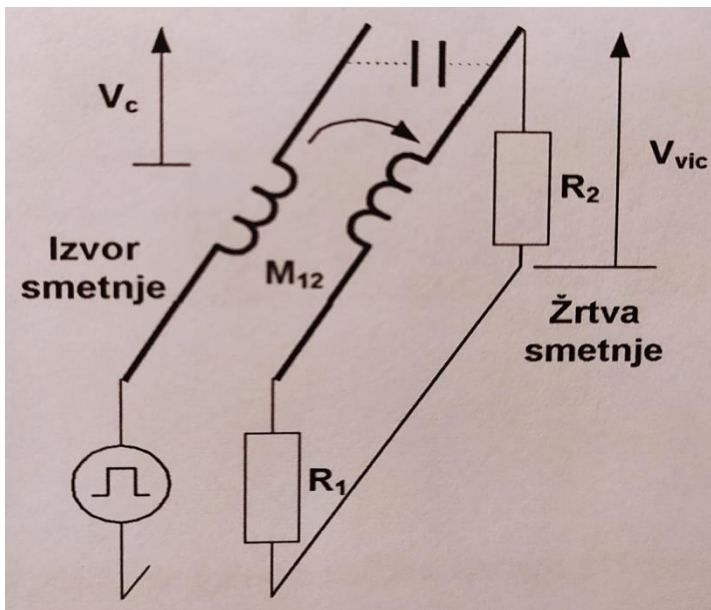
Slika 2 Diferencijalna smetnja

Interferencijski signal zajedničke smetnje (eng. common mode- CM) se istovremeno pojavljuje na dvije signalne linije u istom smjeru i fazi; tj. smetnja se ostvaruje putem magnetskog i električnog polja (slika 3). U zajedničkoj smetnji struja može biti inducirana vanjskim poljem.



Slika 3 Zajednička smetnja

Preslušavanje (eng. Crosstalk) je izraz koji se obično koristi za opisivanje nenamjerne elektromagnetske veze između dva kruga ili sustava u neposrednoj blizini. Iako ne postoji prihvaćeni standard za kvantificiranje preslušavanja, isti se često izražava kao omjer spojenog napona u krugu žrtve i napona signala u krugu izvora. Preslušavanje se može javiti i u CM i DM sprezi ukoliko je krug izvor CM smetnje (slika 4).



Slika 4 Preslušavanje

3.2. Načini rješavanja EMI problema

Ako želimo ispitati da li je uređaj žrtva elektromagnetske interferencije, prvo moramo utvrditi kojim se mehanizmom prenosi energija od izvora smetnje do uređaja kojeg želimo ispitati. U cilju smanjenja utjecaja elektromagnetskih smetnji potrebno je učiniti nešto od sljedećeg:

- ukloniti ili smanjiti smetnje duž spojnog kanala
- osigurati svojstvo imuniteta žrtvi odnosno uređaju/sustavu na razini na kojoj može zadovoljavajuće funkcionirati u elektromagnetskom okolišu
- ukloniti ili smanjiti smetnje na ulazu izvora

Slabljenje elektromagnetskih smetnji duž spojnog kanala se uvodi radi smanjenja iste. Nekoliko je načina za smanjivanje utjecaja elektromagnetske smetnje, a to su:

1. putem međusobne induktivnosti do određenog stupnja neutralizirati EMI struju
2. preusmjeravanje EMI struje povratnom vodiču ili masi; dodajući malu impedanciju paralelno sa vodičem
3. ubacivanjem EMI struje velike impedancije koja ide paralelno s vodičem
4. otvoriti kanal galvanski izoliranog uređaja i blokirati EMI struju

Ovisno o prirodi EMI problema, raspoloživosti prostora, konstrukcijskih rješenja uređaja, cijene i dr. treba odabrati odgovarajući način za rješavanje EMI problema. Vrlo je važno uzeti u obzir i frekvencijski opseg u kojem moramo eliminirati elektromagnetsku interferenciju. S obzirom na frekvencijski opseg u kojemu moramo ukloniti elektromagnetsku interferenciju; treba znati da je galvanska izolacija dobro rješenje na nižim frekvencijama (do reda MHz) dok filtriranje treba koristiti na višim frekvencijama.

U slučaju filtriranja koristiti ćemo induktore, kondenzatore ili kombinaciju pri čemu se odabir kruga za filtriranje određuje pravilom maksimalnog neslaganja. Impedancije izvora i žrtve smetnji se promatraju u filterskom krugu i pri tome dodaje određeni broj elemenata koji filtrira, tj. slabi za 20 dB po elementu.

Ukoliko je impedancija izvora žrtve blizu 50 Ohma tada se izbor kruga za filtriranje bira na temelju drugih kriterija, npr. cijene, eksploatacijskog vijeka itd. Razni su načini rješavanja problema elektromagnetske interferencije na vodiču. Najčešći su oklapanjem i apsorpcijom.

Tehnička svojstva materijala su izuzetno bitna pri izboru EMI filtera. U slučaju oklapanja i uklanjanja elektromagnetskih smetnji izvana treba koristiti materijal velike električne vodljivosti koji reflektira elektromagnetsko zračenje. U slučaju apsorpcije je prikladniji vrlo permeabilan materijal jer isti apsorbira elektromagnetsko zračenje i uklanja smetnje iznutra.

4. ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST

Elektromagnetska kompatibilnost (eng. EMC) je svojstvo električnog uređaja, opreme ili sustava da u danom elektromagnetskom okruženju zadovoljavajuće funkcionira, a da pri tome ne izaziva nedopustive neželjene posljedice na drugim uređajima u svom okruženju. Poremećaj (smetnja) je elektromagnetska veličina koja može u nekom uređaju, opremi ili sustavu izazvati neželjene posljedice odnosno degradirati njegov rad.

Otpornost na poremećaj je sposobnost električnog uređaja, opreme ili sustava da poremećajne veličine točno određenog intenziteta podnosi bez greške u radu. Elektromagnetski utjecaj je djelovanje elektromagnetskih veličina na strujne krugove, uređaje, sustave ili žive organizme.

Elektromagnetske smetnje uzrokuju elektromagnetsku interferenciju koja degradira radne karakteristike uređaja, prijenosnog kanala ili sustava. Izvore elektromagnetskih smetnji možemo podijeliti na prirodne i umjetne.

1. Prirodni izvori elektromagnetskih smetnji

- Atmosferska pražnjenja
- Geomagnetske oluje
- Sunčeve pjege

2. Umjetni izvori elektromagnetskih smetnji

- Elektroenergetska postrojenja
- Uređaji i strojevi
- Odašiljači
- Industrijski i medicinski uređaji

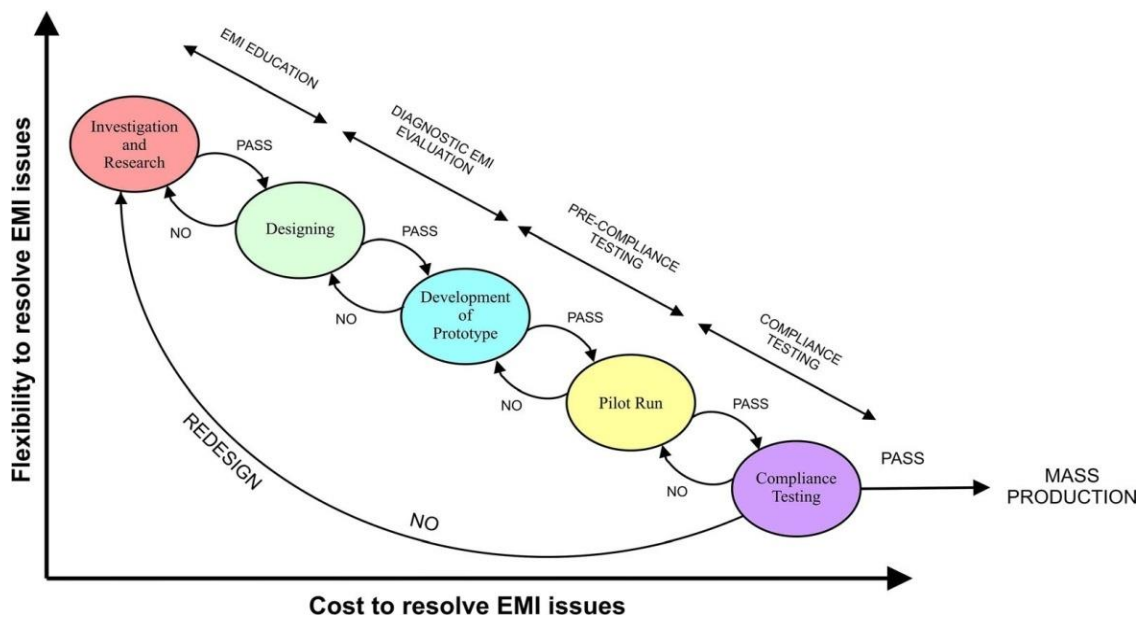
4.1 Elektromagnetska kompatibilnost i dizajn sustava

Prilikom projektiranja i same izrade elektrokompatibilnog tehničkog sustava moramo uzeti u obzir tri glavne karakteristike izdržljivosti sustava koji se odnose na:

- Emisiju koja se bavi poremećajima emitiranih iz jednog sustava u drugi
- Elektromagnetski okoliš koji se odnosi na proračun veličine poremećaja na mjestu funkcioniranja sustava
- Poremećajne veličine koje sustav može podnijeti

Prema tome elektrokompatibilan tehnički sustav će zadovoljavati tri kriterija:

- 1) Promatrani sustav ne ometa rad drugih sustava
- 2) Sustav je otporan na zračenja drugih sustava
- 3) Sustav ne ometa rad samog sebe



Slika 5 Dijagram toka razvoja elektroničkih proizvoda

5. METODE MJERENJA ELEKTROMAGNETSKE INTERFERENCIJE

Ispitivanje elektromagnetske interferencije može se ispitati kao testiranje usklađenosti ili kao ispitivanje prije usklađenosti. Ispitni prostori svih postavki za usklađenost moraju što je moguće bliže oponašati postavljanje testa usklađenosti s obzirom na strojnu/računalnu opremu, programsku podršku i ostalu tehniku. Tri su glavne komponente koje pomažu u pojavi izvora elektromagnetske interferencije koji djeluje kao izvor smetnji i spojni kanal koji prenosi smetnje od izvora do prijemnika.

Ukoliko se spojni kanal nalazi u prirodi, tada se EMI dogodio zbog provedenog zračenja odnosno emisije. Ako je spojni kanal zračecog tipa, dolazi do zračenja.

Navedene komponente mogu biti različiti sustavi koji vode do međusustavne elektromagnetske interferencije ili mogu biti različiti podsustavi većeg sustava koji vodi do unutarustavne elektromagnetske interferencije.

S obzirom na navedeno, mjerenja / ispitivanja elektromagnetske interferencije podijeljena su kako slijedi.

5.1 Ispitivanje zračenja (emisije)

Elektromagnetski zagađivač je gotovo svaki elektronički uređaj zbog svojih namjernih i/ili nenamjernih provedenih ili zračenih emisija koje iz njega proizlaze. Takve neželjene emisije koje potječu od energetskih kabela, žica, otpornika, kondenzatora, pumpi itd. mogu se kretati do GHz raspona i mogu se provesti kroz sustave izmjeničnog napajanja (u slučaju provedene emisije) ili putem antena (u slučaju zračenih emisija).

Stoga svaki elektronički instrument mora proći mjerenja emisije kako bi elektromagnetsko okruženje bilo čisto i prikladno za rad. Odašiljač u ovim vrstama ispitivanje emisije može se provesti za zračene ili provedene emisije.

5.1.1. Ispitivanje zračenih emisija

Ispitivanje zračenja vrlo čestih sustava tzv. više ulazno-izlaznih sustava (eng. multiple input multiple output; MIMO) se neizravno može provesti pomoću mjerenja po zraku (eng. over-the-air; OTA).

Primarni cilj OTA testova je procijeniti stupanj zračenja MIMO sustava. Također rezultat toga mjerenja se može koristiti i za određivanje osjetljivosti prijemnika uzrokovanog lažnim šumnim signalima generiranim unutar MIMO sustava.

Jedna od najisplativijih i točnih metoda za provođenje mjerenja po zraku poznata je kao dvostupanjska metoda. U prvoj fazi, svi mogući trodimenzionalni uzorci zračenja dobivaju se u standardnoj anehogenoj komori za sve polarizacije. U drugoj fazi svi se dobiveni uzorci na odgovarajući način kombiniraju pomoću emulatora željene bazne stanice i modela kanala 19.

Rezultirajuća matrica se tada koristi za određivanje zračenja elektromagnetske interferencije unutar promatranog sustava.

Za manje prototipe, ovakva mjerenja se provode u posebnim komorama kao što su: gigahercna elektromagnetska ćelija, komora odjeka ili anehogena komora.

5.1.2. Ispitivanje provedenih emisija

Ispitivanje provedenih emisija provodi se kako bi se procijenila tj. odredila buka nastala uslijed nagle promjene napona ili struje u strujnom krugu opreme koja se emitira kroz kabel za napajanje u periferne/opterećene uređaje. Neželjena buka mogla bi imati poguban učinak na povezane uređaje i dovesti do kvara opreme. Neke od popularnih metoda koje se koriste za ispitivanje provedene emisije su:

- 1) Mreža za stabilizaciju impedancije voda (eng. Line Impedance Stabilization Network-LISN)

Ova metoda može dati točne rezultate do 100 MHz; stoga se ne može koristiti u visokofrekventnim krugovima.



Slika 6 Mjerenje impedancije voda

2) 1 Ohmova metoda

Mjerenje buke od jednog Ohma; točnost ove metode je unutar gigahercnog raspona. Međutim, ova metoda nije izvodljiva ako testirana oprema ima veliki broj pinova.

3) Sonde

a) Sonda za struju

b) Sonda za napon

Sonde pružaju izravniju metodu za izračunavanje provedene emisije iz testirane opreme. Sonde za struju rade na principu strujnog transformatora s naponskim kablom testirane opreme koji djeluje kao primarna zavojnica, a sama sonda djeluje kao sekundar. Sonde napona također se koriste za mjerenje buke zbog provedenih emisija. Na naponsku sondu i osciloskop visoke osjetljivosti spojen je mali otpor. Napon na otporniku se utvrđuje, a zatim se pomoću FFT-a pretvara u trenutni spektar.

4) Transverzalna elektromagnetska ćelija (eng. Transverse-ElectroMagnetic Mode cell)

Transverzalnu elektromagnetsku ćeliju prvi je razvio Crawford 1974. godine. To je glavni objekt koji se koristi za ispitivanje emisije. Zapravo to je vrsta GTEM (eng. Gigahertz Transverse Electromagnetic *cell*) ćelije koja radi na frekvencijama od 0 do nekoliko MHz.



Slika 7 GTEM ćelija

5.2. Ispitivanje imuniteta

Ispitivanje imuniteta je potpuno suprotno od ispitivanja zračenja. Načelo ispitivanja imuniteta se odnosi na proces izlaganja testirane opreme elektromagnetski neprijateljskom okolišu, te se zatim procjenjuje prisutnost ili odsutnost promjena u radnim karakteristikama testirane opreme. Ukoliko se uoči bilo kakva promjena u funkcioniranju testirane opreme, ona se kvantificira i uspoređuje s međunarodnim ili nacionalnim standardima prema zahtjevu.

Ako oprema/uređaj ne uspije proći ove testove, biti će nesposoban za učinkovitu izvedbu u stvarnom svijetu.

Daljnja potpoglavlja se bave ispitivanjima imuniteta ali s obzirom na kontinuiranost izvora elektromagnetske smetnje.

5.2.2. Ispitivanje imuniteta na kontinuirane izvore elektromagnetske smetnje

Kontinuirano ispitivanje imuniteta ima za cilj utvrditi hoće li testirana oprema funkcionirati kako je predviđeno kada je izložena kontinuiranim izvorima buke, kao što su npr. magnetsko polje, sunčevo zračenje itd.

Ovakvo ispitivanje traje nekoliko minuta i može se nadalje kategorizirati na imunitet magnetskog polja, zračni imunitet te provedeni imunitet.

1) Imunitet magnetskog polja

Kablovi i žice električnog instrumenta stvaraju magnetska polja koja mogu ugroziti magnetski osjetljive komponente, poput releja i monitora matičnog kruga te uređaja koji se nalaze u neposrednoj blizini.

Stoga je postalo iznimno važno ispitati može li uređaj izdržati ometanja magnetskog polja. IEC/EN61000-4-8¹ je standard koji se najčešće koristi za provođenje ispitivanja imuniteta na magnetsko polje.

2) Zračeni imunitet

Ispitivanje zračenog imuniteta provodi se radi procjene tolerancije uređaja prema elektromagnetskoj energiji prisutnoj u njegovom slobodnom prostoru. Ispitivanja imuniteta na zračenje obično se provode u testnom mjestu na otvorenom mjestu (eng. Open Area Test Site-OATS), anehogenim komorama, GTEM ćelijama i komorama odjeka.

3) Provedeni imunitet

Ovo ispitivanje se provodi u frekvencijskom rasponu od 150 kHz do 80MHz.

¹ Međunarodni standard Međunarodne elektrotehničke komisije za ispitivanje otpornosti na magnetsko polje s frekvencijom napajanja.

5.2.2. Ispitivanje imuniteta na nekontinuirane izvore elektromagnetske smetnje

Nekontinuirani izvori elektromagnetskih smetnji, kao što su rasvjeta, elektromagnetski impulsi, elektrostatičko pražnjenje, fluktacije napona, itd. traju vrlo kratko ali mogu imati poguban učinak na rdne karakteristike promatranog uređaja/sustava. Budući da nekontinuirani izvori oslobađaju veliku količinu elektromagnetske energije u kratkom vremenskom razdoblju (ne više od nekoliko milisekundi), ovo ispitivanje se provodi u vremenskoj domeni.

Ispitivanje imuniteta na nekontinuirani izvor možemo razmatrati kako slijedi:

a) Elektrostatičko pražnjenje

Elektrostatičko pražnjenje odnosi se na nagli prijenos velike količine naboja s jednog potencijala na drugi u vrlo kratkom vremenu (nekoliko nanosekundi), uzrokujući stvaranje intenzivnog električnog polja. Ovo električno polje može uzrokovati privremeno ili trajno oštećenje obližnjih elektroničkih sustava.

Elektrostatičko pražnjenje može se pojaviti kao rezultat nepravilne izolacije ili neispravnog uzemljenja u krugu instrumenta.

b) Električni brzi prijelazni/rafalni udar

Kada se induktivno opterećenje; poput motora, releja ili solenoida, prebaci iz jednog stanja u drugo tada se stvara kratki impuls ili niz kratkih impulsa struja i napona koji je poznat kao električni brzi prijelazni/rafalni udar.

Ti impulsi imaju najniže vrijeme porasta, u rasponu od nanosekundi do milisekundi, u usporedbi s drugim impulsnim EMI smetnjama. Štoviše, imaju visoku učestalost ponavljanja uz nisku energiju te mogu uzrokovati trajna oštećenja komponenti kruga.

S obzirom da se većina modernih električnih instrumenata sastoji od digitalnih sklopova koji obično sadrže prekidače i releje, ovaj test je jedan od najvažnijih koje bi testirani uređaj/oprema trebao zadovoljiti.

c) Nalet

Lažni prenaponi i struje koji nastaju uslijed raspodjele kapacitivnog opterećenja i osvjetljenja stvaraju smetnje prenapona. Ove smetnje mogu se pokazati kobnim za elektronički sustav.

Prenaponi su relativno niskofrekventni i visokoenergetski prolazni šumovi s vremenom porasta od nekoliko mikrosekundi i trajanjem od nekoliko desetaka mikrosekundi. Standard IEC 61000-4-5 ² definira uvjete ispitivanja i metode za mjerenje imuniteta elektroničkog sustava na te prijelazne pojave.

d) Padovi napona, prekidi i varijacije

Standard IEC 61000-4-11 ³ je standard pod kojim se ispituju tolerancije elektroničkog sustava na padove napona, prekide i varijacije koje mogu nastati zbog nedostataka u distribucijskim sustavima.

² Međunarodni standard Međunarodne elektrotehničke komisije o imunitetu protiv prenapona.

³ Međunarodni standard Međunarodne elektrotehničke komisije za ispitivanja imuniteta na padove napona, kratkotrajne prekide i varijacije napona.

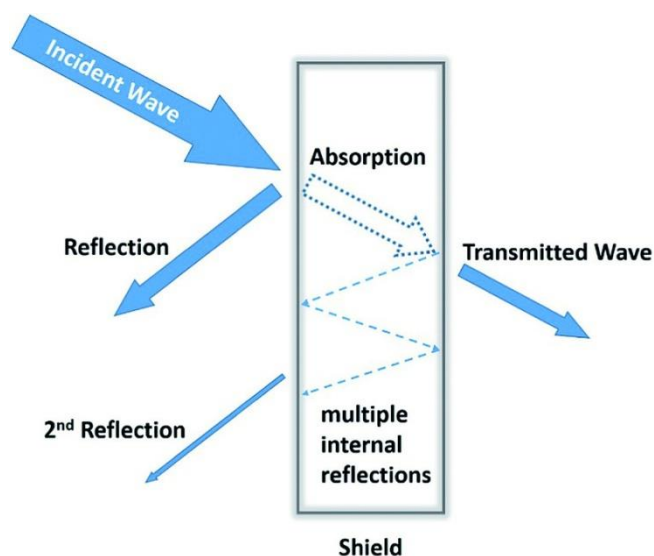
6. METODE SMANJENJA UTJECAJA ELEKTROMAGNETSKE INTERFERENCIJE

Ako uređaj/sustav koji ispituje ne uspije proći prethodno nabrojane testove na elektromagnetsku interferenciju; tada treba primijeniti jedan od brojnih načina za smanjenje utjecaja elektromagnetske interferencije do razine na kojoj je taj uređaj/sustav kompatibilan s elektromagnetskim okruženjem u stvarnom svijetu.

U ovom poglavlju su nabrojane i opisane metode za smanjivanje utjecaja elektromagnetske interferencije s posebnim naglaskom na elektromagnetsko oklopljivanje i EMI filtre kao najčešće upotrebljavane metode.

6.1. Elektromagnetsko oklapanje, uzemljivanje i ekvipotencijalizacija

Elektromagnetsko oklapanje (eng. Electromagnetic Shielding) se sastoji od niza zaštita koje ograničavaju magnetsko, električno i elektromagnetsko polje na području obuhvaćeno oklopom. Takvi elektromagnetski oklopi (štitovi) se izrađuju vodljivih materijala kao što su metamaterijali, feriti, metali. Efikasnost ovih materijala ovisi o nizu karakteristika kao što su: frekvencijski opseg, izvedba konstrukcije itd. Osnovne mjere za rješavanje problema elektromagnetske kompatibilnosti su uzemljenje, elektromagnetsko oklapanje i ekvipotencijalizacija.



Slika 8 Djelovanje zaštitnog oklapanja

Što se tiče uzemljivačkog sustava, isti se projektira i izvodi s ciljem da se u zemlju odvedu struja munje, struja kvara ili visokofrekventne struje elektroničkih uređaja i sustava. Također treba spomenuti da se isti uzemljivač različito ponaša pri odvođenju impulsne struje i pri odvođenju niskofrekventnih (NF) struja. Impedanciju vrijednosti nula bi imao idealni uzemljivač.

Ekvipotencijalizacija je postupak povezivanja svih metalnih masa u nekom elektroenergetskom postrojenju ili inom sustavu putem sabirnica koje su povezane na uzemljivač čime se izjednačava potencijal.

Vodljive bakrene ili aluminijske folije služe za zaštitno oklapanje od statičkih električnih polja. Međutim za zaštitu od statičkih magnetskih polja koriste se ploče koje su debljeg presjeka i od materijala visoke permeabilnosti⁴.

Zaključno, pri izboru materijala za zaštitno oklapanje mora se uzeti u obzir frekvencijski opseg uređaja/sustava kojeg želimo oklopiti u njegovom elektromagnetskom okolišu.

Načelo efikasnosti oklapanja se postiže držanjem vanjskih poremećaja izvan oklopa, a unutarnje signale unutar njega. Neželjena strujanja električnih i magnetskih polja postizemo prigušivanjem i malim promjenama u impedanciji. Elektromagnetsko polje prigušujemo: apsorpcijom uslijed skin efekta, refleksijom na granici zrak-metal i na granici metal-zrak te višestrukom refleksijom unutar metala.

Kada elektromagnetsko polje udari u štit, tada se veliki dio ovog polja ili se reflektira ili apsorbira, a vrlo mali dio se prenese. Kombinirani učinak cijelog ovog fenomena adresira se kao EMI zaštita strukture, što je omjer elektromagnetske snage prije efekta oklopa i elektromagnetske snage nakon efekta oklopa u decibelima:

$$SE = 10 \log (Prx/Prx')$$

Jednadžba 6.1 Efektivnost zaštite strukture

Gdje je Prx snaga koju prijemnik presreće u odsutnosti, a Prx' je snaga koju prijemnik presreće kada je štit postavljen između prijarnika i odašiljača (izvor šuma).

⁴ Magnetska permeabilnost je fizikalna veličina koja opisuje magnetsku propusnost tvari. Magnetska permeabilnost je umožak relativne magnetske permeabilnosti i magnetske permeabilnosti vakuuma.

Postoje brojne tehnike za mjerenje EMI zaštite određenog EMI zaštitnog sustava, od kojih su neke: metoda koaksijalnog dalekovoda, metoda s dvostrukom TEM ćelijom, metoda pravokutnog valovoda, metoda ugniježdene reverberacijske komore, metoda s oklopljenom kutijom, metoda zaštićene prostorije itd.

Osim gore navedenih tehnika mjerenja elektromagnetne zaštite, učinkovitost zaštite materijala ovisi o njegovoj strukturi i načinu na koji se koristi za zaštitu opreme od EMI zračenja. Materijal je zaštićen ako je površina materijala dovoljno električno vodljiva da ga zaštiti od utjecaja vanjskih polja. Obično se to odnosi samo na električna polja, dok magnetska polja zahtijevaju potpuno različite mjere zaštite poput debljeg materijala.

Relativna magnetska permeabilnost nekih materijala

Dijamagnetici	μ_r
grafit	0,999895
živa	0,999975
srebro	0,999981
cink	0,999989
bakar	0,999991
Paramagnetici	μ_r
zrak	1,00000036
olovo	1,000004
aluminij	1,000023
platina	1,000364
iridij	1,000063
paladij	1,00069

Slika 9 Neki od elektromagnetskih materijala i njihova permeabilnost

6.2. Značajnije elektromagnetske strukture

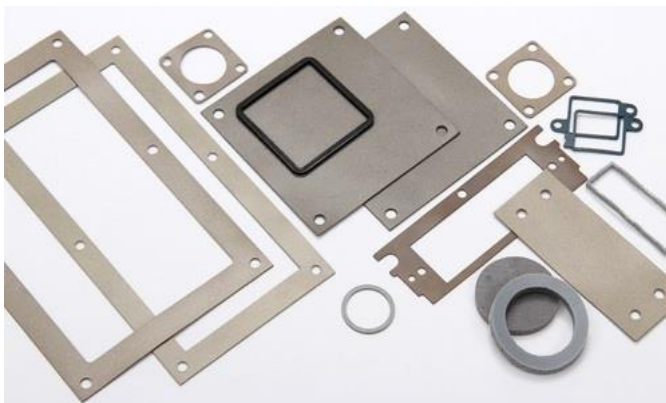
Neke od najpopularnijih elektromagnetskih zaštitnih struktura navedene su sljedećim redoslijedom:

1. Faradayev kavez jedan je od prvih elektromagnetskih štitova. Iako je ovaj uređaj 1836. godine izumio Michael Faraday, on je i danas ostao relevantan u aplikacijama zaštite od elektromagnetskih parametara. Jedan od najvećih nedostataka korištenja Faradayevih kaveza za smanjenje EMI -a je to što te strukture pružaju manju učinkovitost zaštite.



Slika 10 Faradejev kavez

2. EMI zaštitne brtve. U aplikacijama gdje se koriste sklopivi štitovi, razmak između svake ploče oklopa može djelovati kao prednji dio za EMI zračenje. U takvim uvjetima spojeve i šarke treba pravilno pričvrstiti kako bi se spriječila potencijalna emisija.



Slika 11 EMI zaštitne brtve

3. Elektromagnetski upijači

Elektromagnetski upijači (apsorberi) korišteni su za brojne primjene, uključujući sustave za nadzor zdravlja, obranu, smanjenje radarskog poprečnog presjeka itd. Također se široko koriste u EMI/EMC tehnologiji. One su jedna od glavnih komponenti u EMI mjernim postavkama, uključujući anehogene komore i GTEM ćelije.

Najvažniji parametar koji se uzima u obzir pri projektiranju i analiziranju ovih apsorbera je koeficijent refleksije. Jednostavno rečeno, gubitak refleksije nije ništa drugo nego omjer jakosti polja reflektiranog od štita prema jakosti polja koja na njega pada. Materijali kao što su metamaterijali, feriti i ugljično nano cijevi često se koriste za razvoj EM apsorbera.

4. EMI zaštitni tekstil

Širenjem elektroničkih uređaja za biomedicinske primjene, poput srčanih stimulatora i implantabilnog kardioverterskog defibrilatora (eng. ICD), potreba za zaštitom od vanjskih EMI u okolišu također je stekla značajnu pozornost znanstvene zajednice. EMI zaštitni tekstil se pokazao kao najbolja metoda za zaštitu ovih uređaja od neželjenih smetnji.

5. EMI filteri

Buka provedene emisije općenito se sastoji od dvije komponente buke, diferencijalnog načina rada (eng. Differential Mode-DM) i zajedničkog načina rada (eng. Common Mode-CM). DM šum nastaje uslijed normalnog protoka struje u petljama koje čine različite komponente u krugu.

Ove bi se petlje mogle početi ponašati kao male antene koje emitiraju EMI buku. CM šum nastaje zbog parazitskih impedancija induciranih u krugu zbog neželjenih padova napona. To se događa kada struja procuri preko zalutalog kapaciteta ili induktivnosti i vrati se natrag u napajanje.

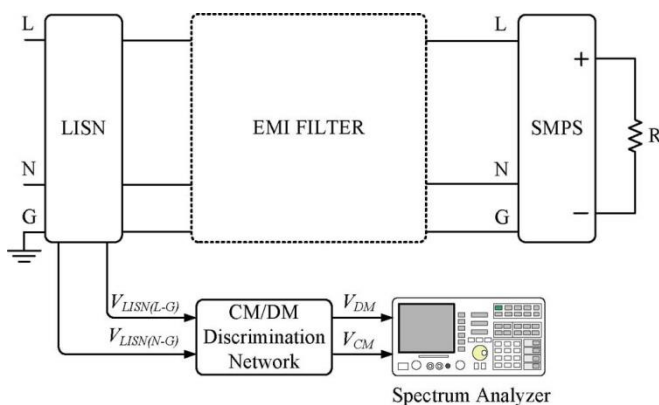
Ako ti signali šuma dopiru do izlaznog terminala kruga, oni se emitiraju u svoju okolinu predstavljajući prijetnju za obližnju opremu.

Uobičajen način suzbijanja generiranih CM i DM šuma je njihovo filtriranje iz sustava pomoću EMI filtera.

CM i DM signali šuma zahtijevaju filtriranje različitih tehnika; stoga se obično za odvajanje ova dva neželjena signala koristi separator šuma. Nakon njihovog razdvajanja, u krug se uvode filtri.

Glavna prednost korištenja filtera za smanjenje EMI -a je to što su jednostavni za projektiranje, ekonomičniji za manje sustave i lakši za implementaciju. Najveći nedostatak korištenja filtera je taj što otkrivaju i uklanjaju smetnje čije se karakteristike razlikuju od karakteristika sustava. Međutim, u slučaju da smetnje imaju sličnu prirodu sa signalima koji teku u krug, eventualno bi se moglo dogoditi da u tom slučaju se smetnje ne filtriraju i nastave projicirati elektromagnetsku interferenciju.

EMI filteri se vrlo često upotrebljavaju u suvremenoj elektronici s obzirom da smanjuju EMI smetnje u određenim propusnim opsezima ili širokopropusnim opsezima prema potrebi.



Slika 12 Provedena emisija i shema mjerenja s CM/DM mrežom

6. Prošireni spektar

U proširenom spektru, energija akumulirana u uskopojasnom pojasu širi se po širem pojasu korištenjem frekvencijske modulacije. Prijenos signala raširenog spektra s niskim omjerom signala i šuma može povećati nedostižan korisni signal i smanjiti mogućnost presretanja.

Glavne karakteristike proširenog spektra su: visoka otpornost na prislušivanje, visoka otpornost na smetnje, mogućnost višestrukih pristupa i visoka otpornost na blijeđenje.

Sposobnost komuniciranja s raširenim spektrom komunikacije protiv smetnji jača je nego za konvencionalne komunikacijske sustave.

Glavne tehnologije širenja spektra su izravni niz (DSSS) i rasprostranjeni spektar skakanja frekvencije.

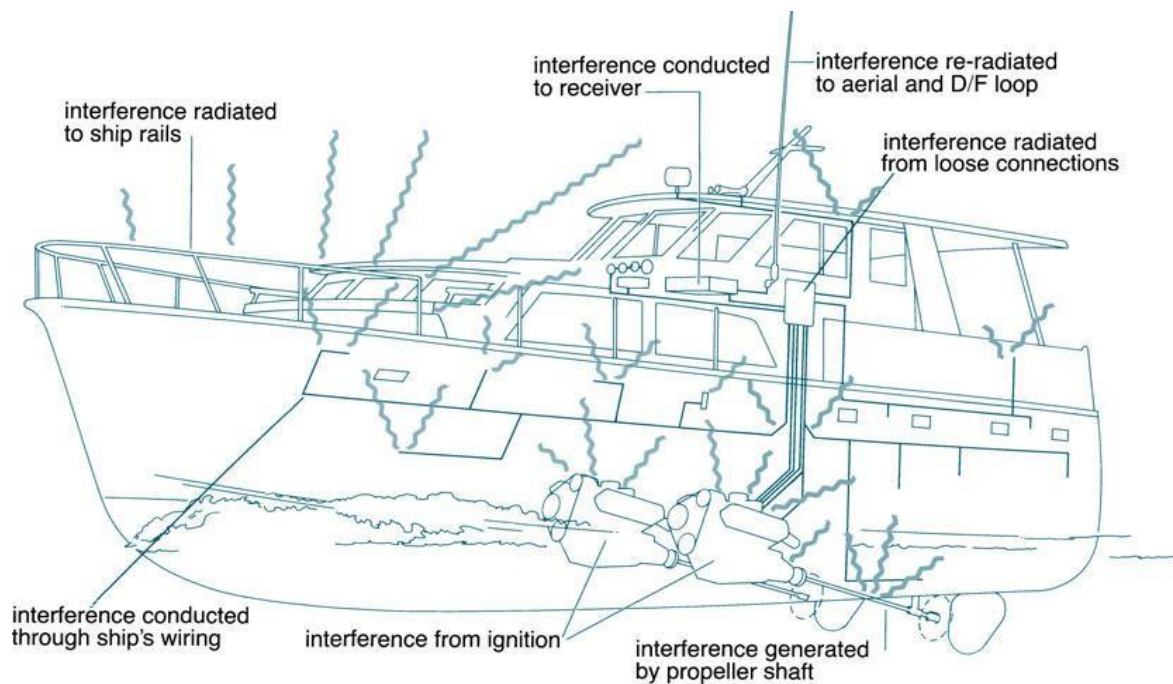
Prošireni spektar je glavna tehnologija za suzbijanje EMI učinaka, a kodiranje kanala može učinkovito poboljšati performanse sustava.

7. Topologija kruga

Ako komponente kruga nisu optimalno raspoređene, tada se mogu generirati induktivnosti petlje, parazitski kapaciteti itd. što dovodi do lažnih signala šuma. Stoga je iznimno važno dodijeliti odgovarajuće mjesto svakoj komponenti unutar elektroničkog sustava

7. PRIMJERI ŠTETNIH UTJECAJA ELEKTROMAGNETSKE INTERFERENCIJE U POMORSTVU

Sve se više elektroničkih sustava dodaje brodovima. Mnogi od tih sustava zrače ili primaju elektromagnetsku energiju. Svi su vitalni dijelovi broda i važno je da svaki sustav pravilno funkcionira ako želimo da brod ispunjava zadaće koje su mu namijenjene. Međutim, postaje sve teže postaviti razne sustave na brod s puno elektroničkih sastavnica bez da se njihovo elektromagnetsko zračenje međusobno ne ometa.



Slika 13 Izvori elektromagnetske interferencije na brodu

7.1. Elektromagnetska interferencija na brodu

Elektromagnetska interferencija nastaje zbog neželjenog zračenja u radiofrekventnom području te se ta neželjena zračenja primaju na antenske sustave broda i na ožičenje na brodu. Zbog gore navedenog prijemnici na brodu ne razlikuju RF signal od EMI zračenja, odnosno dolazi do smetnji u radu.

Na brodovima postoji niz elektromagnetskih izvora koji pokrivaju širok raspon frekvencija od 0 do 20 GHz, a sastoje se od DC/AC pretvarača, fluorescentne rasvjete, podizača sidra, AC generatora, punjača baterija, dubinomjera, tahometra na motoru, radio sustava itd. Uređaji koji su najizloženiji utjecaju elektromagnetskog zračenja na brodu su: AM/FM radio, senzori satelitske antene za smjer, VHF radio, LORAN-C prijemnici, magnetski kompasi, mikroračunalni sklopovi za upravljanje motorom itd.

Primjeri u nastavku rada zorno ilustriraju složenost elektromagnetskih smetnji na brodu kao posljedicu gustoće te raznolikosti i velike snage razne električne i elektroničke opreme. Odnosno kako nekontrolirani/nepredviđeni signal u elektromagnetskom okolišu može pokrenuti lančanu reakciju s katastrofalnim posljedicama.

7.2. HMS Sheffield

Godine 1982. britanski razarač, HMS Sheffield, bio je raspoređen kod Falklandskih otoka tijekom sukoba s Argentinom. Emisije iz brodskog proturaketnog sustava stvarale su smetnje u komunikacijskom sustavu. Kako bi se jasno komuniciralo s Velikom Britanijom, proturaketni sustav bio bi ugašen u određenim periodima. Tijekom jednog takvog perioda, raketa Exocet koju je ispalio neprijateljski zrakoplov pogodila je brod. Dobivene eksplozije i požari uništili su brod, ubivši dvadeset mornara.

Bio je to prvi britanski brod koji je izgubljen u neprijateljskim akcijama od Drugog svjetskog rata. Kako su požari i dalje nekontrolirano gorjeli, zapaljeno plovilo napušteno je nakon pet sati zbog opasnosti od daljnjih eksplozija. No, nedostatak oštećenja ispod vodene linije znači da HMS Sheffield nije odmah potonuo i još je gorio dva dana. Pokušaj tegljenja nije uspio i nakon par dana HMS Sheffield je potonuo.



Slika 14 Požar na brodu HMS Sheffield

7.3. USS Forrestal

USS Forrestal je bio američki nosač zrakoplova u sastavu Američke ratne mornarice; naziva se i prvim super nosačem zbog svoje veličine i deplasmana. Dana 29. srpnja 1967. kod obale Vijetnama, u jutarnjim satima USS Forrestal je pretrpio katastrofalan požar koji je rezultirao smrću 134 mornara, potpunim uništenjem 21 zrakoplova te ostalom materijalnom štetom u iznosu od sedamdeset milijuna dolara.

Američka mornarica je u svom završnom istražnom izvješću zaključila da je zalutali električni signal zapalio motor rakete Zuni koju je nosio borbeni zrakoplov tipa F-4B Phantom i koji se nalazio na desnoj strani palube nosača; raketa se aktivirala i pogodila vanjski spremnik goriva potpuno naoružanog A-4E Skyhawk također tipa borbenog zrakoplova.

Događaj je pokrenuo lančanu reakciju eksplozija i požara koji je stavljen pod kontrolu tek oko 4 sata sljedećeg jutra. Unatoč brojnim i značajnim oštećenjima, USS Forrestal nije potonuo te je bio u službi do 11. rujna 1993. godine.



Slika 15 USS Forrestal u plamenu

7.4. Ro-Ro brod Coastal Inspiration

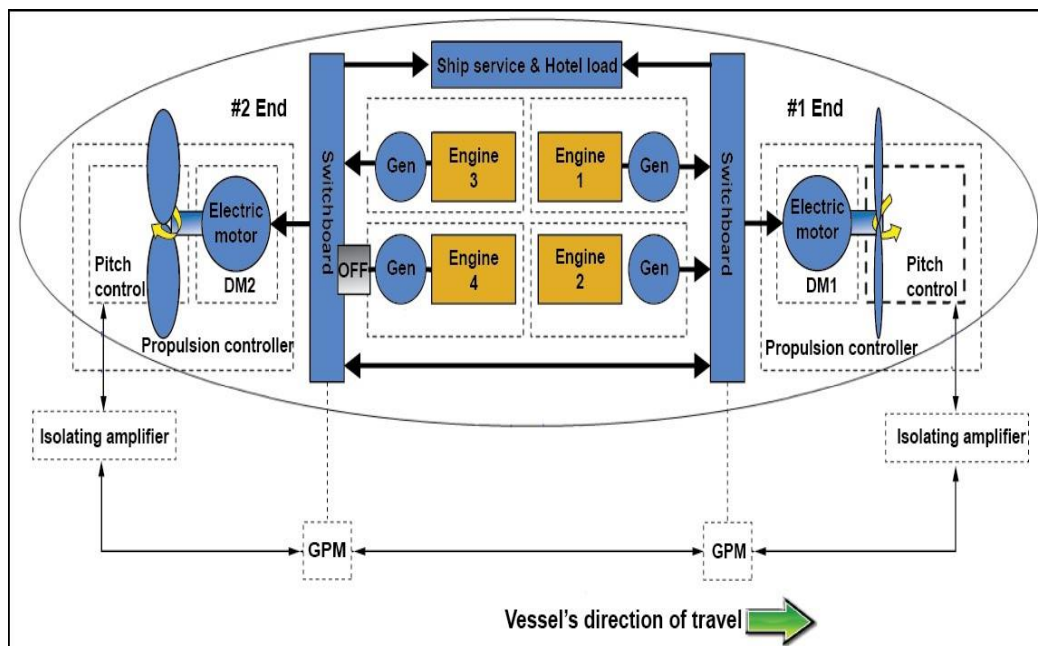
Dana 20. prosinca 2011. oko 14:50 (lokalno vrijeme), sustav za upravljanje nagiba pramčanog pogona (kontrolni sustav) nije uspio reagirati dok se trajekt približavao terminalu Duke Point u Nanaimu, Britanska Kolumbija. Kao rezultat toga, trajekt je udario u vez približnom brzinom od 5,6 čvorova.

Trajekt i terminal pretrpjeli su velika oštećenja, a brojni putnici i članovi posade zadobili su ozljede.

Sustav upravljanja nagibom pramčanog pogona nije reagirao zbog kvara izolacijskog pojačala ventilatora u upravljačkom sustavu.

Izolacijsko pojačalo nije bilo ispravno i dovoljno zaštićeno od elektromagnetskih smetnji, što je imalo negativan učinak na njegov rad. Prikaz izolacijskog pojačala nalazi se na slici 16.

Također nije bilo jasnog upozorenja ili zvučnog alarma posadi na mostu koji bi ukazivao na grešku u upravljačkom sustavu, bez obzira na njegovu ulogu kritičnog sigurnosnog sustava.



Slika 16 Pogonski sustav Ro-Ro broda Coastal Inspiration

8. ZAKLJUČAK

Elektromagnetska interferencija je izuzetno važno ali podcijenjeno područje za proučavanje i rješavanje u inženjerskoj praksi. Tehnološkim napretkom sve je više elektronski vrlo sofisticiranih uređaja/sustava ali i samim tim su razine interferencije sve veće.

Stoga je neophodno ispravno ispitati stupanj elektromagnetske kompatibilnosti promatranog uređaja/sustava. Ukoliko ispitivani uređaj/oprema ne zadovolje postavljene standarde u pogledu elektromagnetske interferencije tada takvu opremu ne možemo koristiti u stvarnom elektromagnetskom okolišu.

Uzrok interferentnih signala mora biti otkriven prije nego se pristupi smanjenju elektromagnetske interferencije. Ne postoji jedinstveni pristup niti rješenje za problematiku elektromagnetske interferencije.

Zaključno, cilj smanjenja elektromagnetske interferencije je smanjiti utjecaj interferencije do razine na kojoj promatrani sustav može neometano funkcionirati u zadanom elektromagnetskom okolišu.

9. POPIS LITERATURE I IZVORA

1. Canada, T. T. (2011). Dohvaćeno iz <https://bst-tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/2011/M11W0211/m11w0211.html>
2. Chen, Z. N., Liu, D., Nakano, H., Qing, X., & Zwick, T. (1994). *A Handbook for EMC Testing and Measurement*. London: IET.
3. Horvat, D. (2011). *Fizika II: Titranje, valovi, elektromagnetizam, optika i uvod u modernu fiziku*. Zagreb: Neodidacta.
4. Kulišić, P., & Lopac, V. (2003). *Elektromagnetske pojave i struktura tvari*. Zagreb: Školska knjiga.
5. Morgan, D. (1994.). *A Handbook for EMC Testing and Measurement*. London: IET.
6. Navy, D. o. (1969). Dohvaćeno iz <https://www.jag.navy.mil/library/investigations/USS%20FORRESTAL%20FIRE%2012%20AUG%2069%20PT%201.pdf>

10. POPIS SLIKA

Slika 1 Djelovanje elektromagnetske interferencije

Slika 2 Diferencijalna smetnja

Slika 3 Zajednička smetnja

Slika 4 Preslušavanje

Slika 5 Dijagram toka razvoja elektroničkih proizvoda

Slika 6 Mjerenje impedancije voda

Slika 7 GTEM ćelija

Slika 8 Djelovanje zaštitnog oklapanja

Slika 9 Neki od elektromagnetskih materijala i njihova permeabilnost

Slika 10 Faradejev kavez

Slika 11 EMI zaštitne brtve

Slika 12 Provedena emisija i shema mjerenja s CM/DM mrežom

Slika 13 Izvori elektromagnetske interferencije na brodu

Slika 14 Požar na brodu HMS Sheffield

Slika 16 Pogonski sustav Ro-Ro broda Coastal Inspiration

Sažetak

Ovaj rad se bavi pojavom elektromagnetske interferencije i utjecajem iste na promatrane uređaje/sustave. Obuhvaćeni su osnovni pojmovi iz elektromagnetizma kako bi se razumjeli načini prenošenja elektromagnetske interferencije. S obzirom da pojava elektromagnetske interferencije negativno utječe na rad elektroničkih i električnih uređaja moraju se otkriti izvori elektromagnetskih smetnji.

Osim toga promatrani uređaj/sustav mora imati svojstvo elektromagnetske kompatibilnosti odnosno zadovoljavati određene standarde kako bi mogao funkcionirati u zadanom elektromagnetskom okolišu. Povrh svakodnevnih, izloženo je i nekoliko primjera iz pomorstva gdje je elektromagnetska interferencija bila uzrokom katastrofalnih pomorskih nesreća.

Ključne riječi: elektromagnetska interferencija, elektromagnetizam, uređaj, sustav, elektromagnetska kompatibilnost, elektromagnetski okoliš, pomorske nesreće

Abstract

Elektromagnetic interference

This paper deals with the occurrence of electromagnetic interference and its influence on the observed devices / systems. Basic concepts from electromagnetism are covered in order to understand the ways of transmitting electromagnetic interference. Since the occurrence of electromagnetic interference negatively affects the operation of electronic and electrical devices, the sources of electromagnetic interference must be detected.

Also, the observed device / system must have the property of electromagnetic compatibility, respectively meet certain standards in order to be able to function in a given electromagnetic environment. In addition to everyday examples of electromagnetic interference, there are several examples from the marine industry where electromagnetic interference was the cause of catastrophic marine accidents.

Keywords: electromagnetic interference, electromagnetism, device, system, electromagnetic compatibility, electromagnetic environment, marine accidents

