

1. Šta je elektromagnetska interferencija (EMI)? Koji su njeni sastavni elementi potrebni da bi mogla da se ispolji? O čemu treba voditi računa da bi dizajn sistema bio dobar?

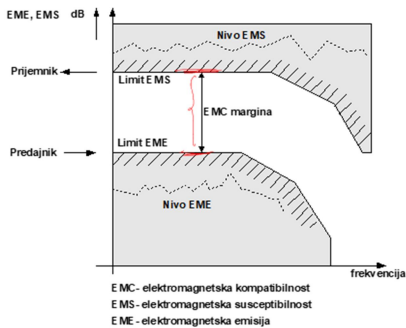
~EMI se definiše kao uticaj neželjenih signala na uređaje i sisteme, čineći rad uređaja otežanim ili nemogućim. Da bi se EMI ispoljila, mora imati **tri sastavna elementa**: izvor smetnje, put kojim se prenosi – put sprege i „žrtvu“, odnosno uređaj koji prima neželjenu energiju. **Dobar dizajn** sistema vodi računa o eliminaciji EMI iz sistema na tri načina: sprečavanjem emitovanja smetnji izvora, minimizacijom prenošenja smetnji kroz sprežni kanal i obezbeđivanjem elektromagnetske kompatibilnosti uređaja-žrtve.

2. Izvori EMI. Šta je EMC? Kada je sistem elektromagnetski (EM) kompatibilan?

~**Izvori smetnje**: *Prirodni* (grmljavina, ESD, kosmičko zračenje, peščane oluje), *tehnički* (PC i periferije, motori, generatori, prekidači, pojačavači, kompjuteri, predajnici svih vrsta (TV, radar, komunikacije)...).

~**EMC** je sposobnost uređaja da ispravno radi u nekom elektromagnetskom određenom okruženju.

~Elektronski sistem koji je u stanju da funkcioniše kompatibilno sa drugim elektronskim sistemima, i da istovremeno ne proizvodi i ne bude podložan smetnjama, je **elektromagnetski kompatibilan** sa svojom okolinom. Sistem je EMC sa svojim okruženjem ako zadovoljava tri kriterijuma: ne uzrokuje smetnje drugim sistemima, nije osetljiv na emisiju drugih sistema, ne uzrokuje smetnje samom sebi.



3. Elektromagnetska susceptibilnost (EMS). Ilustrovati granicu EMS i objasniti.

~**EMS** je sposobnost uređaja ili kola da odgovori na neželjeni signal (EM smetnju, odnosno emisiju iz okoline). **Granica EMS** je veličina smetnji okoline pri kojoj uređaj može ispravno da radi.

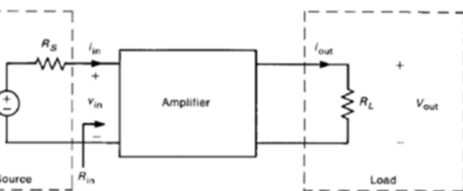
4. Šta određuje sposobnost strukture da zrači EM energiju?

~Pri određivanju sposobnosti strukture da zrači EM energiju treba istaći da nisu važne njene fizičke dimenzije, već isključivo njene električne dimenzije, koje se mere u talasnim dužinama. Talasna dužina je rastojanje koje treba da pređe EM talas sinusoidalnog oblika da bi se ostvarila promena faze od 360 stepeni. Maksvelove jednačine opisuju sve električne pojave, ali su veoma kompleksne za rešavanje, te se umesto njih koriste aproksimacije. Aproksimacije (modeli sa skoncentrisanim parametrima i Kirchofovi zakoni) mogu se koristiti samo ako je najveća dimenzija kola električno mala (mnogo manja od talasne dužine pobudne frekvencije izvora λ , tj. $1/10 \lambda$).

5. Odrediti brzinu propagacije talasa i talasne dužine na sledećim frekvencijama: a) na 3 GHz u vazduhu i b) na 600 MHz u staklo-epoksidu ($\epsilon_r = 4,7$, $\mu_r = 1$).

a) Ako nema ϵ_r onda se očitava iz tablice za materijale, za vazduh je $\epsilon_r = 1$. $v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$, $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{v_0}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$, $v_0 = 3 \cdot 10^8$. Ovde je frekvencija $3 \cdot 10^9$, ubaci sve u formulu i dobije se 0,1m tj 10cm.

b) Iste formule.



6. Kako se definišu standardne jedinice za prikazivanje napona dBμV i struja dBmA? Izraziti 15 mV i 650 mA u pomenutim jedinicama.

~Osnovne električne veličine koje se koriste u proučavanju EMC su: -za provodnu emisiju su napon u (V) i struja u (A), -za zračenu emisiju su električno polje (V/m) i magnetsko polje u (A/m). Pošto je opseg promena veličina veliki (npr. za el. polje od 1μV/m do 200V/m) koriste se decibeli.

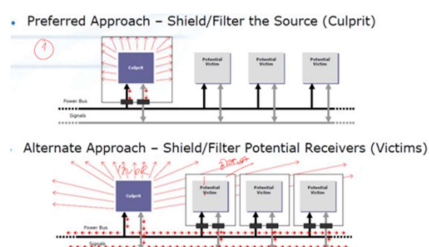
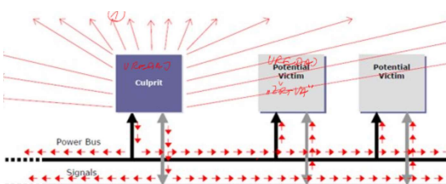
$A_p = P_{out}/P_{in} = v_{out}^2/v_{in}^2 \cdot R_{in}/R_L$, $P_{in} = v_{in}^2/R_{in}$, $P_{out} = v_{out}^2/R_L$.

$A_p [dB] = 10 \log(P_{out}/P_{in})$, $A_v [dB] = 20 \log|v_{out}/v_{in}|$, $A_i [dB] = 20 \log|i_{out}/i_{in}|$. U zadacima je out obično 2, in je 1.

Naponi i se često prikazuju u odnosu na referentnu vrednost: - 1 μV, kao dBμV, ili -1 mV, kao dBmV. Slično za struju i snagu.

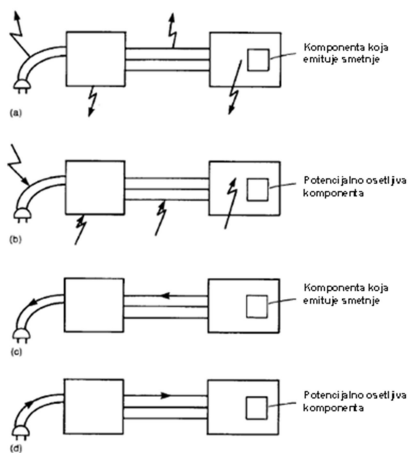
~15mV u dBμV: $A_v [dBμV] = 20 \log|v/v_{ref}| = 20 \log|15m/1μ|$

~650mA u dBmA: $A_v [dBmA] = 20 \log|i/i_{ref}| = 20 \log|650m/1m|$



7. Prokomentarisati koji su izvori smetnji prikazani na slici? Na koji način bi mogla da se eliminiše (smanji) smetnja?

~Provodne (signalne i linije napajanja) i zračene smetnje. Takođe i kola koja predstavljaju žrtve



moгу biti izvori EM smetnji.

~Za eliminaciju smetnji ima 3 načina: 1. Sprečavanje emitovanja smetnji izvora (ograding izvor, ukoliko su smetnje putem zračenja), 2. Minimizacija prenosa smetnji kroz kanal (ubace se filtri, ukoliko se smetnje šire vodovima tj konduktivno), 3. obezbeđivanje EMC uređaja – žrtve.

8. Četiri osnovne grupe EMI problema. Opisati svaku ukratko.

~emitovanje smetnji zračenjem (jedna komponenta remeti rad ostatka kola),

~postojanje komponenti osetljivih na zračenje (komponente su osetljive na smetnje u delovima kola), ~emitovanje smetnji provođenjem (od strane signalnih linija i linija napajanja se javlja superponiran signal), ~postojanje komponenti osetljivih na provodne smetnje .

9. EMI sprežne putanje. Na koje načine je moguće smanjiti EMI duž putanje, ako je nemoguće modifikovati izvor?

~Najekonomičniji način redukcije EMI je korišćenje odgovarajućih metoda još tokom faze dizajniranja sistema. Ove metode podrazumevaju: korišćenje odgovarajućih tehnika projektovanja kola, odgovarajući izbor komponenti, postizanje dobrog PCB leajuta (layout) i korišćenje ispravnog uzemljenja i oklapanja da bi se zadovoljili EMC standardi. Međutim, u većini slučajeva stvarni izvor i žrtva smetnji su ili van domašaja, ili se ne mogu modifikovati. Stoga preostaje da se EMI smanji na taj način što će se dovoljno oslabiti negde duž sprežnog kanala kojim se prenosi. U cilju sprečavanja interferencije, sprečavanje prenosa EM energije može da se klasifikuje u četiri grupe: smanjivanje zračenja EM emisije, povećanje susceptibilnosti na zračenu emisiju, smanjivanje provodnih smetnji i povećanje susceptibilnosti na provodne smetnje.

10. CE znak; šta mora sadržati. Ako pojedini uređaji imaju CE znak, da li je i sistem koji se sastoji od takvih uređaja automatski CE kompatibilan?

~CE predstavlja oznaku proizvođača da je proizvod u skladu sa smernicama EU i odgovarajućim evropskim normama na koje se pozivaju smernice. Tržište EU zahteva da proizvodi koji se plasiraju i stavljaju u promet moraju zadovoljiti suštinske zahteve za bezbednošću ili tehničke zahteve. CE znakom na proizvodima proizvođač potvrđuje da njegov proizvod ispunjava sve zahteve date u direktivama koje se odnose na taj proizvod, kao i da je obavljena procedura ocenjivanja usaglašenosti.

~CE znak **sadrži**: • referenca na EMC direktivu; • opis aparata na koji se odnosi; • ime i adresa proizvođača i, prema potrebi, ime i adresa njegovog ovlašćenog predstavnika; • datirana referenca na specifikacije pod kojima se izjavljuje usaglašenost; • datum izjave; • informacije o merama predostrožnosti; • naznake ograničenja; • info o omogućavanju upotrebe uređaja.

~**Sistem** neće biti CE kompatibilan jer ceo sistem mora da se testira, a ne samo pojedini delovi.

11. Procena kvaliteta proizvodnje. CISPR metoda uzorkovanja.

~Direktiva pokriva svaki pojedinačni, fizički postojeći gotov proizvod, ali bilo bi nepraktično testirati svaki proizvod u serijskoj proizvodnji u potpunosti na sve EMC karakteristike koje mora pokazivati.

~CISPR metoda uzorkovanja: Komitet za standarde CISPR prepoznao je potrebu za nekim oblikom ispitivanja kvaliteta proizvodnje i uključio šeme uzorkovanja u RF standarde emisije koji čine osnovu EN 55011, EN 55014 i EN 55022 (Evropskih direktiva za emisiju i imunost uređaja). Svrha je da se osigura da najmanje 80% serijske proizvodnje bude u skladu sa ograničenjima sa nivoom pouzdanosti od 80%, takozvanim pravilom 80/80. Praktično, da bi se u potpunosti pridržavao pravila 80/80, proizvođač mora težiti da oko 95% proizvoda bude u skladu sa navedenom granicom. Ova metoda

n (sample size)	7	14	20	26	32
c (no. of failures)	0	1	2	3	4

uzorkovanja može se primeniti samo na merenje emisije i ne može se koristiti za imunost. U tablici je prihvatljiv broj otkaza c u zavisnosti od veličine uzorka n.

12. Šta određuju generički standardi EN 61000, a šta bazni (npr. CISPR 22 / EN 55022?). Klasa A i klasa B.

~Generički standardi su za proizvode koji rade u određenim EMC okolinama (kućni, industrijski), kada ne postoji specifični EMC standard za taj proizvod ili porodicu proizvoda. Specificiraju određeni broj esencijalnih emisionih i testova imunosti, kao i minimalne nivoe testova. Propisi određuju granice nivoa elektromagnetske emisije (EME) koju sme da emituje oprema, kao i osetljivost opreme na dolazeću interferenciju. U EU regulisanje ove oblasti vrše direktive: **EN 61000-6-3/-4** za emisiju i **EN 61000-6-1/-2** za imunost, koje se odnose na sve električne i elektronske uređaje, ma koliko oni trivijalni bili.

~Bazni standardi specificiraju uslove za EMC testiranje, definišu pravila neophodna za postizanje EMC, specificiraju metode testiranja (tehnikе, postavke, opremu i okruženje)...Ostali standardi se referenciraju na bazni. Dele se na osnovne, standarde okruženja, emisije, imunosti, instalacije. CISPR 22 / EN 55022 je standard EMC porodice proizvoda.

~ Uređaji klase A jesu uređaji pogodni za korišćenje u svim objektima koji nisu domaćinstva, kao i oni koji se ne priključuju direktno na niskonaponsku mrežu koja se koristi za napajanje domaćinstava. Dakle industrijski, komercijalni, poslovni. Uređaji klase A moraju da zadovolje granice za klasu A. Uređaji klase B jesu uređaji pogodni za korišćenje u stambenim objektima i objektima direktno priključenim na niskonaponsku mrežu kojom se napajaju domaćinstva, moraju zadovoljavati granice za klasu B, i imaju ograničenja emisije koja su za oko 10dB restriktivnija od onih za klasu A, jer je veća verovatnoća da će se nalaziti bliže radio i televizijskim prijemnicima.

13. Merna mesta (prostori) u kojima je moguće sprovesti EM testiranje. Ukratko opisati prednosti i manje svakog od njih

~EM merenja moraju da budu sprovedena pod specijalnim uslovima za testiranje emisije i imunosti. Bez obzira da li je svrha merenja sertifikacija po odgovarajućim standardima, po zahtevu korisnika ili u cilju otklanjanja EMI problema, testiranje emisije i imunosti mora da bude u izvršeno bez ikakvih smetnji koje može da uvede okruženje. Merni prostori:

~Najtačnija merenja se obavljaju **sobama bez refleksije (AC i SAC)**, koje su prostorije kompletno zaštićene metalnim zastorima od spoljašnjih smetnji. Unutrašnji zidovi su prekriveni apsorberima koji sprečavaju refleksiju RF zračenja od zidova, čime se postiže efekat sličan otvorenom prostoru. Razlika između SAC i AC je u tome što SAC nema apsorbere na podu, već metalnu provodnu ravan koja simulira efekat otvorenog prostora, čime se postiže ušteda u materijalu, i znatno niža cena, ali se znatno produžava trajanje merenja.

~**OATS ili otvoren prostor** ima kontrolisanu karakteristiku RF slabljenja između emitera i merne antene (poznatu kao „slabljenje lokacije“). Da bi se izbegao uticaj na merenje, u blizini lokacije ne sme biti predmeta koji mogu odražavati RF. Elipsa definiše područje koje mora biti ravno i bez reflektujućih predmeta, uključujući nadzemne žice. Prostorija u kojoj se nalaze instrumenti za kontrolu i ispitivanje mora biti udaljena od lokacije, ili direktno ispod ravni zemlje. Rajlijev kriterijum definiše max dimenziju neravnina koje neće značajno uticati na kvalitet merenja.

~**TEM ćelija (specijalizovana test ćelija)** se koristi za određivanje zračene emisije i imunosti. Preporučuje se za: 1.Brzo rešavanje problema sa emisijama zračenja poređenjem merenja zračenja za različite komponente da biste verifikovali poboljšanja PCB-a i/ili promena komponenti. 2. Poređenje emisije komponenti nekoliko proizvođača. Prednost TEM ćelije je što štedi vreme u labovima za ova testiranja, koji nisu jeftini. Ne obezbeđuje apsolutno tačna merenja kao OATS ili SAC.

14. Koji instrumenti se koriste za merenje emisije?

~**Merni prijemnik:** optimizovan za potrebe merenja EMC i pokriva opseg od 10 kHz do 1 GHz. Kke mernog prijemnika u poređenju sa analizatorom spektra (SA) su: •izlaz prijemnika se meri na svakoj frekvenciji, iako vršne vrednosti takođe mogu pružiti prikaz spektra; •mnogo bolja osetljivost, koja omogućava izdvajanje signala od smetnji na nivoima mnogo nižim od granica emisije; •robusnost ulaznih stepena i zaštita od preopterećenja;•namenjen posebno za merenje prema CISPR standardima, sa širinom opsega, detektorima i dinamičkim opsegom signalnog kola prilagođenim za ovu namenu; •tačnost frekvencije i amplitude bolja je od jeftinijih analizatora spektra; •mogu biti potrebna dva merna uređaja (SA), jedan koji pokriva opseg do 30 MHz, a drugi koji pokriva 30-1000 MHz ili više.

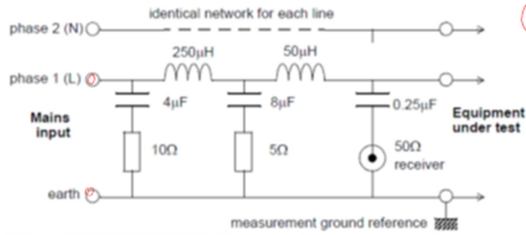
~**Analizator spektra:** Osnovni model analizatora spektra je jeftiniji od mernog prijemnika i ima široku primenu za preliminarno testiranje i dijagnostiku. Brzi prikaz spektra može biti izuzetno dragocen za određivanje opsega frekvencija i prirode štetnih emisija, kao i za mogućnost posmatranja uskog dela spektra. U kombinaciji sa generatorom signala, analizator spektra je koristan za proveru VF odziva mreže. Analizatori spektra nisu alternativa mernom prijemniku u kompletnoj analizi usklađenosti uređaja, zbog svoje ograničene osetljivosti i dinamičkog opsega, kao i podložnosti preopterećenju.

~**Treking generator:** Korišćenje treking generatora sa SA uveliko proširuje mogućnosti merenja, bez velikog povećanja njihove cene, što omogućava mnoga, frekvencijski-zavisna merenja, koja su neophodna za kompletnu karakterizaciju uređaja pri ispitivanju EMC. Naročito je pogodan za karakterizaciju komponenti. On je generator signala čija je izlazna frekvencija „zaključana“ na mernu frekvenciju analizatora i menjaju se na isti način. Izlazna amplituda treking generatora održava se konstantnom u vrlo malim granicama, obično manjom od ± 1 dB u opsegu od 100 kHz do 1 GHz. Daje ulazni signal mreži koja se testira, a čiji je izlaz se povezuje na ulaz analizatora spektra. Iako nema mogućnosti kao pravi vektorski analizator mreže (VNA), treking generator daje analizatoru spektra neke od istih funkcija, uz nisku cenu.

15. Za šta se koriste antene? Koje oblike mogu da imaju? Faktor antene.

~Koriste se za merenje zračenog električnog ili magnetskog polja i povezivanje polja na ulaz mernog uređaja. U dalekom polju ($D > r = \lambda/2\pi$), ove komponente su ekvivalentne i povezane impedansom slobodnog prostora Z_0 , ali u bliskom polju njihov odnos je složen i uglavnom nepoznat. U oba slučaja potrebna je antena za povezivanje mernog polja sa mernim prijemnikom. Pošto je merena jačina električnog polja na određenoj udaljenosti od EUT-a izražena u V/m ili $\mu\text{V/m}$, dok su merni prijemnici kalibrisani da mere napon u voltima (ili mikrovoltima) gde je ulazna impedansa 50Ω , i antena mora biti

kalibrisana na 50Ω za datu jačinu polja za svaku frekvenciju; ova kalibracija je poznata kao **faktor antene**. Faktor antene AF je najvažniji parametar, a svaka kalibrisana širokopojasna antena isporučuje se sa tabelom faktora antene (u dB /m, za antene E-polja) u odnosu na frekvenciju. Oblici antena danas: •bikonična, •log, •loop, •horn.



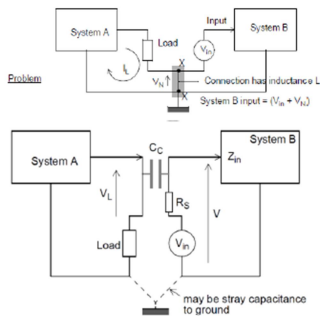
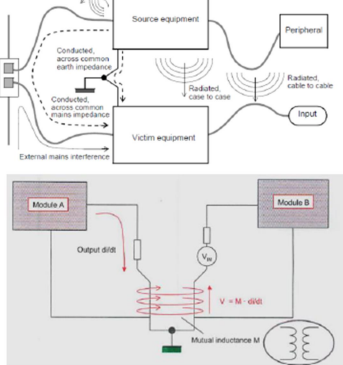
16. LISN (Line Impedance Stabilizing Network). Uloga, šema.

Da bi se izvršili testovi provodnih smetnji na linijama napajanja, koristi se veštačka mreža napajanja (Artificial Mains Network AMN) ili mreža za stabilizaciju impedanse na napajanju (LISN). Meri sprovodne smetnje na linijama napajanja. Služi da se merna tačka poveže sa mernom instrumentacijom i da se izoluje testno kolo od neželjenih

signala sa mrežog napajanja. Predstavlja impedansu ekvivalentnu 50 Ω u paraleli sa 50 µH + 5Ω. Induktivnost od 50 µH prestavlja veliku impedansu za spoljašnje RF smetnje, dok niže frekvencije propušta. Kondenzatori ka masi sa induktorom čine dvostepeni NF filtar. Uglavnom je namenjen simulaciji napajanja DC strujom, ali se takođe može koristiti za mrežne testove kada su potrebne veće struje, iznad 50A.

17. Merenje provodnih smetnji. Da li je i za njih neophodno imati odgovarajući prostor kao za zračene?

Nasuprot zračenim, za merenja potrebno malo dodatnih uređaja. Jedini zahtev: ravan mase najmanje 2m x 2m, i barem 0,5m od EUT-a. Pogodno je, ali nije neophodno, vršiti merenja u zaštićenom prostoru, jer će se na taj način smanjiti amplituda signala iz okoline, a kao masa može se koristiti ili jedan zid ili pod sobe. Opremu koja se ne nalazi na podu treba postaviti na izolacioni sto barem 40 cm od podloge. Ispitivanje snage smetnji kabla sa apsorbujućom stezaljkom, prema EN55014-1, zahteva da se stezaljka pomera duž kabla za najmanje pola talasne dužine, što je 5m na 30 MHz.



18. Prokomentarisati koje sprežne putanje su prikazane na slici.

Kako se rešava problem? (isti tekst za više primera).

~**Sprežne putanje između 2 uređaja:** slika gore levo. Prikazani su različiti mogući načini sprežanja između izvora i žrtve. Imamo različite oblike zračenja koji se prenose el. poljem, mag. poljem, ili nekom kombinacijom. Poznavanje sprege između izvora i žrtve veoma važno – često jedini način da se smanji EMI je smanjivanjem sprege. Dakle, postoje tri glavna mehanizma sprege: •provođenjem, kada postoji direktna putanja sprege između izvora i žrtve, na primer, putem signalnog ili kabla za napajanje; •indukovanim bliskim poljem, kada zbog blizine delova

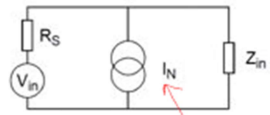
sistema (kablova ili kućišta) postoji značajna međusobna induktivnost ili kapacitivnost; •putem zračenja dalekog polja, pri čemu se svi delovi ponašaju kao antene. Većina hardvera sadrži elemente koji se ponašaju kao antena, kao što su kablovi, PCB linije, unutrašnje ožičavanje i mehaničke structure, koji mogu neplanirano prenositi energiju putem el, mag ili elmag polja koja su povezana sa električnim kolima. U praktičnim slučajevima, unutar systemska i spoljašnja sprega između opreme su modifikovane prisustvom oklapanja i dielektričnih materijala, i lejautom i blizinom uređaja koji zrači i uređaja koji je podložan tom zračenju, a naročito uticajem kablova koji povezuju tu opremu. Masa ili oklapanje uređaja mogu da ili pojačaju signal interferencije zbog refleksije, ili će ga oslabiti putem apsorpcije. Sprega između dva kablova može biti kapacitivna ili induktivna ili kombinovano, i zavisice od orijentacije, dužine i blizine kablova. Dielektrični materijali mogu takođe redukovati polje apsorpcijom.

~**Sprega putem zajedničke impedanse:** gore desno. Nastaje kada izvor A i žrtva B imaju zajednički provodnik, koji je obično linija napajanja ili mase (X-X), tada sva struja sa izlaza A teče kroz zajedničku impedansu X-X i stvara serijski napon na ulazu B. Visokofrekvencijske ili brzo promenljive di/dt komponente na ulazu B će se superponirati veoma efikasno zbog induktivne prirode impedanse provodnika. Napon interferencije je $V_N = L \cdot di/dt$. Što je provodnik X-X duži, to je L veće, a ako raste poprečni presek tada L opada. Rešenje je razdvajanje sistema tako da ne postoji zajednička putanja, a samim time ni impedansa, ali je mana dodatno ožičavanje.



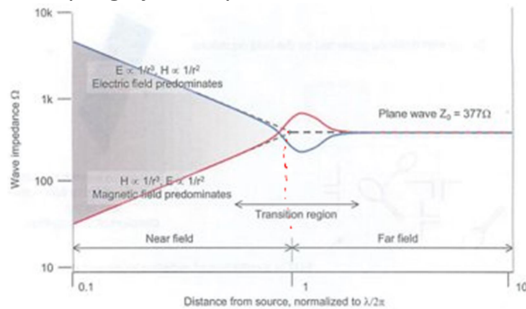
~**Sprega putem mag polja:** dole levo. Promenljiva struja koja teče kroz provodnik će stvoriti magnetsko polje koje je u sprezi sa susednim provodnikom i indukuje napon na njemu. Indukovani napon na provodniku žrtvi je: $V_N = M \cdot di/dt$, gde je M međusobna induktivnost u henrijima. M zavisi od površine strujne petlje izvora i žrtve, njihove orijentacije i rastojanja, i prisustva bilo kakvog magnetnog oklapanja, ako raste dužina voda ili opada poprečni presek onda raste i M, te vodovi ne smeju biti na malom rastojanju niti paralelno. Ukoliko su

pod 90 stepeni, tada između njih nema M. Ekvivalentno kolo za magnetsku spregu je naponski generator na red vezan sa kolom žrtve. Na spregu ne utiče prisustvo, odnosno, odsustvo direktne veze između dva kola; indukovani napon će biti isti ako su kola izolovana ili priključena na masu.



~**Sprega putem el polja:** Promenom napona na jednom provodniku (sistem A) stvara se električno polje koje može u susednom provodniku (sistem B) indukovati napon $V_N = C_c \cdot dV/dt \cdot Z_{in} / R_S$, gde je C_c sprežna

kapacitivnost i Z_{in} / R_S impedansa ka masi kola žrtve. Ovaj izraz se dobija pod pretpostavkom da je impedansa kapacitivne sprege mnogo veća od impedanse kola. Superponirana smetnja može biti modelovana u obliku strujnog izvora, čija je struja $i_N = C_c \cdot dV/dt$. Kapacitivnost CC je funkcija rastojanja između provodnika, njihovih efektivnih površina i prisustva bilo kakvog električnog oklapanja materijala, parazitna kapacitivnost koja opisuje spregu i promenu napona iz sistema A prenosi kao promenu struje u sistem B. Sprega će postojati i ako se oba sistema priključe na odvojene mase. Ako bilo koje kolo nije priključeno na masu, to ne znači da ne postoji sprega (lebdeće kolo će imati parazitnu kapacitivnost ka masi). Magnetska sprega je veći problem u kolima sa malom impedansom, dok je električna dominantnija kod kola sa velikim impedansama.



19. Karakteristična impedansa. Rejljev kriterijum.

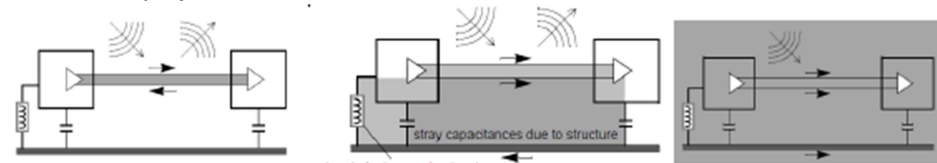
Odnos snage električnog i magnetnog polja (E/H) se naziva "talasna impedansa", i ona je ključni parametar za svaki dati talas jer određuje uspešnost sprežanja sa drugom provodnom strukturom, a takođe i efektivnost bilo kog porvodnog zaklona koji se koristi da je blokira.

U dalekom polju, gde važi $d > \lambda/2\pi$, talas je poznat kao ravanski talas i E i H polja opadaju sa rastojanjem u istom odnosu. Zbog toga je njegova impedansa konstantna, i jednaka impedansi vakuuma: $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi = 377\Omega$.

U bliskom polju, gde važi $d < \lambda/2\pi$, talasna impedansa je određena karakteristikama izvora. Izvor talasa sa malom strujom i visokim naponom će stvarati uglavnom električno polje visoke impedanse, dok će izvor sa velikom strujom i niskim naponom stvarati uglavnom magnetno polje male impedanse.

U specijalnom slučaju, ako struktura koja zrači ima impedansu oko 377Ω , tada ravanski talas može nastati i u polju za koje važi $d < \lambda/2\pi$, u zavisnosti od geometrije. Regija od oko $\lambda/2\pi$, ili otprilike jedna šestina talasne dužine, je prelazna regija između bliskog i dalekog polja. Ovo nije precizan kriterijum, pre ukazuje na regiju u kojoj se struktura polja menja iz kompleksne u jednostavnu. Uvek se pretpostavlja da ravanski talasi postoje u dalekom polju, dok je u bliskom polju neophodno odvojeno posmatrati električno ili magnetno polje.

Da bi se održala pretpostavka dalekog polja, fazna razlika između komponenti polja koje zrače delovi antene mora biti mala, i zato razlika u putanjama do ovih delova takođe mora biti mala u poređenju sa talasnom dužinom. Koristeći Rejljev kriterijum, rastojanje dalekog polja je: $d > 2D^2/\lambda$, gde je D maksimalna dimenzija antene. Maksvelov uslov za prelazak u daleko polje: $d > \lambda/2\pi$.



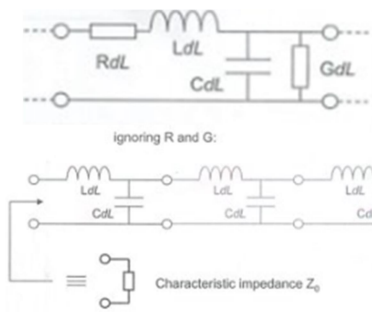
20. Oblici sprežanja usled emisije. Opisati oblik sprege prikazan na slici i označiti od čega zavisi? (isti tekst za više primera).

1. **Diferencijalna sprega:** zračenje će biti

„uhvaćeno“ u paru žica ili u vodu i povratnoj liniji. U površinu DM petlje nije uključena lokalna masa. Indukovani napon se javlja između priključaka kola žrtve. Usled velike blizine ta dva provodnika, ovaj mehanizam sprege je obično mali i lako se može redukovati upređanjem para provodnika. Vod prenosi signalne struje u diferencijalnom modu (napred i nazad) kroz dve žice na bliskom rastojanju. Radijaciono polje može biti u sprezi sa ovim sistemom i indukovati diferencijalnu spregu između dve žice; diferencijalne struje će indukovati sopstveno radijaciono polje. Referentna masa ne učestvuje u sprezi.

2. Zajednička sprega: Zajednička smetnja je sprega koja se ostvaruje putem električnog i magnetnog polja. Izvor zračenja indukuje CM napon u petlji koju formiraju kola žrtve sa zajedničkom masom. Ako je polje dominantno magnetsko, napon koji će se javiti redno vezan na masu je $V_{CM} = -(\Delta B/\Delta t) \cdot A$, gde je ΔB promena magnetske indukcije (u T), A površina petlje (u m²). Ukoliko je polje električno, poznate jačine E (u V/m) i frekvencije f (u MHz), onda je napon smetnje $V_{CM} = A \cdot f \cdot E/48$. Kabl takođe može da prenosi CM struje. CM smetnja na kablovima se javlja usled proticanja zajedničke struje u kablovima koja nema veze sa korisnim signalima. Može biti i posledica loše projektovane mase ili poklapanja.

3. Antenska sprega: prenosi se u istom pravcu kablom i referentnom ravni mase. Ona ne bi trebalo da nastane kao rezultat unutrašnje generisanog šuma, ali će se javiti kada je ceo sistem, uključujući i ravan mase, izložen spoljašnjem polju. Struje antenske sprege postaju problem za nezavisne sisteme podložne radijacionom polju samo onda kada se konvertuju u diferencijalnu ili zajedničku spregu menjanjem impedansi u različitim strujnim putanjama.



21. Transmisiona linija. Impedansa i uparivanje.

Bilo koji par provodnika može formirati transmisivnu liniju. TL se može napraviti od provodnika koji imaju konstantan poprečni presek na celoj dužini, a time i konstantne podužne električne parametre, a to su redna induktivnost L , paralelna kapacitivnost C , redna otpornost R i paralelna konduktansa G . TL se može posmatrati kao niz električno malih segmenata dužine dL , sa raspodeljenim parametrima $L dL$, $C dL$, $R dL$ i $G dL$. Proračun odziva se može pojednostaviti ako se R i G mogu zanemariti. Podužna L i C provodnika zavise od njegovih dimenzija i međuskobnog rastojanja. Stoga je geometrija transmisivne linije ima direktan uticaj na električne parametre.

~**Impedansa:** ako se zanemare R i G , ekvivalentna šema TL se svodi na kolo levo. Podužni parametri određuju karakterističnu impedansu TL $Z_0 = \sqrt{L/C}$. Z_0 je funkcija samo geometrije provodnika (poprečnog preseka) a ne njegove dužine. Velika podužna kapacitivnost, u slučaju da se provodnici velikog poprečnog preseka nalaze na malom rastojanju, će dati malu impedansu Z_0 , kao što se može videti iz izraza.

~**Uparivanje:** Ukupan napon i struja u određenoj tački z u transmisivnoj liniji se sastoji od sume direktnog i odbijenog talasa. Odnos napona i struje definiše koeficijent refleksije koji zavisi od opterećenja, gde je L pozicija opterećenja. β je

$$Z_{in}(z) = Z_0 \cdot (1 + \Gamma(z)) / (1 - \Gamma(z)); \quad \Gamma(z) = \Gamma_{load} \cdot e^{j2\beta(z-L)}$$

$$\Gamma_{load} = (Z_L - Z_0) / (Z_L + Z_0)$$

fazna konstanta $\beta = \lambda/2\pi$, $\Gamma(z)$ je naponski koeficijent refleksije, koji predstavlja odnos napona direktnog i reflektujućeg talasa.

22. Uticaj posmatranog sistema na okolne uređaje. Vrste zračenih emisija. Konduktivna emisija.

U standardima koji potiču od CISPR, emisije su podeljene na: radijaciona zračenja celokupnog sistema, provodna zračenja prisutna na interfejsu i kablovima za napajanje.

~**Zračena emisija sa PCB-a:** U većini opreme, primarni izvori su struje koje teku u kolima koji se nalaze na štampanim pločama. Deo energije se zrači direktno sa PCB-a, koji u najjednostavnijem primeru može da se modeluje kao mala antena - petlja koja nosi interferenciju, čije su dimenzije su manje od $\lambda/4$ talasne dužine na posmatranoj frekvenciji. Max snaga el polja na rastojanju od 10m je $E = 263 \cdot 10^{-12} \cdot f^2 \cdot A \cdot I_s$, gde je A površina u cm^2 , f je u MHz, I_s je struja izvora u mA, E se dobija u V/m. Ako su frekvencija i struja konstantne, i petlja ne može da se redukuje, oklapanje je neophodno.

~**Zračena emisija sa kablova:** Model za zračenje voda na niskim frekvencijama je kratka ($L \ll \lambda/4$) jednopolna antena iznad mase. Maksimalna snaga polja, uz +6dB refleksije od mase na 10m je $E = 1.26 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot L \cdot I_{CM}$, gde je L dužina kabla u metrima, I_{CM} struja zajedničke sprege u mA na frekvenciji f u MHz u kablovima.

~**Konduktivna emisija:** Sprega preko kabela za napajanje ili među kablovima. Interferencija se može pojaviti: kao diferencijalna usled NF smetnje sa napajanja, kao zajednička sprega usled VF prekidačkih komponenti, unutrašnjih izvora u kolu ili inter-kabel sprežavanja ili kao kombinacija obe.

23. Elektrostatičko pražnjenje (ESD). Opisati kako nastaje, kako se manifestuje, od čega zavisi?

~ Elektrostatičko pražnjenje (ESD) je izvor prolaznih poremećaja koji se najčešće javljaju kada osoba ili drugo telo koje se, pri kretanju preko izolacione površine, naelektrisa na visok potencijal, a zatim dodirnuo uzemljeni deo opreme, čime se prazni kroz opremu i dolazi do procesa izjednačavanja naelektrisanja i javlja se proticanje velikog strujnog impulsa. Struja reda desetina ampera može da protekne tokom kratkog perioda, sa vrlo kratkim vremenom porasta. ESD se može desiti i kada oprema nije uzemljena, jer se zasniva na izjednačavanju naelektrisanja i može nastati kroz sopstvenu kapacitivnost uređaja. Struja pražnjenja zapravo ne mora da teče kroz opremu (koja je žrtva) da bi izazvala njen poremećaj u radu. Na primer, ako se pražnjenje desilo na drugom provodnom objektu koji je u njenoj okolini, moguće je da se generiše kratkotrajno jako polje, koje će stvoriti sprege sa kolom žrtve. Veliki di/dt i/ili dv/dt impulsi mogu više ili manje negativno uticati i na rad digitalnih ivično-okidanih i mikroprocesorskih kola. Ako se tranzicija dogodi tokom kritičnog perioda pri promeni stanja logičkih kola, može doći do nepravilnog rada i mogućeg otkaza. Kada dva neprovodna materijala (izolatora) dođu u kontakt jedan s drugim i razdvoje, elektroni sa jednog prelaze na drugi; inicijalno neutralni, materijali postaju naelektrisani, praktično se dobija kondenzator. Količina naelektrisanja koja se razdvaja zavisi od materijala (što su materijali udaljeniji na triboelektričnoj listi, više se razdvaja Q i nastaje veći napon). ESD koje nastaje udaljavanjem materijala zavisi od: vrste materijala, njihove blizine i kontaktne površine, kao i od brzine razdvajanja.

24. Triboelektrični materijali. Od čega zavisi količina akumulisanog naelektrisanja? Ako se razdvajaju dva pozitivna triboelektrična materijala (ili dva negativna, ili pozitivan i negativan), da li nastaje pražnjenje?

~Elektrostatički potencijal se generiše tako što približimo dva inicijalno neutralna izolaciona materijala, nakon kontakta ih razdvojimo, nakon preraspodele naelektrisanja jedan ima više + a drugi više - naelektrisanja i praktično dobijamo

kondenzator sa el poljem između materijala i razlikom napona. $C=Q/V=\epsilon \cdot S/d$. Ako d raste, C opada, $Q=CU=\text{const}$, što znači da napon raste, i javlja se ES pražnjenje. Kolika je preraspodela naelektrisanja zavisi od materijala. Pamuk je triboelektrično neutralan element, ukoliko materijal ima veću tendenciju da odaje elektrone (postane pozitivan), on se na triboel listi nalazi iznad pamuka i on je triboel pozitivan, slično važi za primanje elektrona, nalazi se ispod pamuka i oni su negativni. Što su dva materijala udaljenija jedan od drugog na listi (jedan pozitivan, drugi negativan), veća količina naelektrisanja Q će se razdvojiti nakon njihovog kontakta, što će rezultovati u većem naponu V . Kada ovaj napon dostigne dovoljno visok nivo, javiće se električni proboj u vazduhu koji razdvaja ova dva materijala. Proboj se manifestuje u obliku varnice i/ili intenzivne struje; ovaj pojava se naziva elektrostatičko pražnjenje (electrostatic discharge -ESD). ESD koje nastaje udaljavanjem materijala zavisi od: vrste materijala, njihove blizine i kontaktne površine, kao i od brzine razdvajanja. Ako su materijali istog pola, razdvajanjem dolazi do smanjenja a ne povećanja razlike potencijala, nema ESD.

25. Da li dolazi do dolazi do akumuliranja triboelektričnog naelektrisanja na površini provodnog materijala? A na površini ljudskog tela? Navesti nekoliko generatora naelektrisanja.

~Kada se dva neprovodna materijala trljaju jedan o drugi ili razdvoje, elektroni sa jednog materijala prelaze na drugi. Usled toga dolazi do akumuliranja triboelektričnog naelektrisanja na površini materijala. U provodnicima se ovo naelektrisanje neutrališe trenutno rekombinacijom elektrona i šupljina, dok se to u izolatoru dešava polako, osim ako napon nije dovoljno visok da izazove varnicu.

~Ljudsko telo je, budući da je mobilno, najvažniji izvor elektrostatičkog potencijala, ali nikako i jedini. Treba imati na umu da telo samo po sebi nije generator naelektrisanja, već kontaktom sa izolacionim površinama može steći visok potencijal.

~Drugi izvori elektrostatičkog potencijala mogu biti: • automobili, invalidska kolica i nameštaj na točkiće, • gumene ili tekstilne trake i transporter, • papir ili drugi papirni materijal u štampačima ili kopirnim mašinama, • brzi protok vazduha, gasa, granula ili tečnosti preko izolacione površine.

26. Uticaj vlažnosti vazduha i otpornosti materijala na ESD.

~Stepen do kog će naelektrisanje da se emituje u spoljašnju okolinu, gde će se neutralizovati, zavisi od otpornosti površine tela i njegovog okruženja. To je funkcija relativne vlažnosti: ukoliko više vlažnosti ima u vazduhu, manja je površinska otpornost izolatora i stoga se naelektrisanje brže emituje ka spoljašnosti i dolazi do manje ESD problema. Vлага u vazduhu indukuje delimično provodljiv vlažni površinski film na podnim oblogama, oblogama stolova, odeći i kućištima opreme. Ovo smanjuje inače visoku površinsku otpornost i omogućava da indukovano naelektrisanje brže iscure. Suv vazduh doprinosi elektrostatičkoj indukciji kad god se kreće pored izolovane površine. Što je vazduh topliji, to je manji njegov kapacitet da zadrži vlagu; stoga, za istu količinu vode, što je vazduh topliji, to je njegova relativna vlažnost niža.

27. Metode ESD testiranja. Model ljudskog tela kao osnova za ESD testiranje.

~• *Contact discharge method* – metoda gde je elektroda test generatora drži u kontaktu sa EUT (equipment under test), i gde se pražnjenje odvija preko adaptera puštanjem varnice. • *Direct application* – metoda gde je pražnjenje direktno na EUT. • *Indirect application* – primena pražnjenja na vertikalnu sprežnu ravan u blizini EUT.

~Model ljudskog tela: služi kao osnova za testiranje ESD u EMC. Ljudsko telo Posmatrajmo sferni kondenzator sastavljen od dve koncentrične provodne sfere odvojene dielektrikom $C=4\pi\epsilon/(1/a-1/b)$. Ako je spoljašnja sfera beskonačno daleko, tad je $C=4\pi\epsilon a$, ako je sredina vazduh tad je $\epsilon=\epsilon_0=10^{-9}/36\pi$, $C=111\cdot 10^{-12}a$. Ako na ovaj način modelujemo ljudsko telo, kao sferu prečnika 0.5m, kapacitivnost je $55\text{ pF}\approx 50\text{ pF}$. Uz 50 pF, treba dodati i uticaj okoline, pa ukupna kapacitivnost varira 50–250 pF. Otpornost tela je 500 Ω - 10 k Ω .

28. Zaštita od ESD-a. Projektovanje za sprečavanje pražnjenja. Komponente za zaštitu od ESD-a.

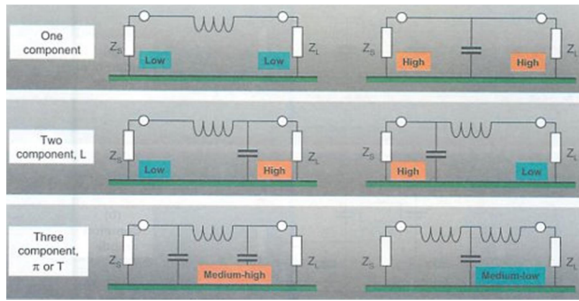
~ESD zaštita se nastoji da spreči struju pražnjenja da teče kroz električno kolo. To se postiže time što joj se omogućava oticanje putem sa nižom impedanskom do uzemljenja. Od najveće važnosti je dobro isprojektovano kućište koje ne bi trebalo da ima ikakve otvore ili prekide gde se može očekivati ESD. Višestruko uzemljenje kola i filtriranje će obezbediti da ne dođe do visoke razlike potencijala.

~Projektovanje: treba kreirati kućište tako da ne može doći do pražnjenja kroz njega. Prvi način je korišćenjem skroz plastičnog kućišta, bez ikakvih pristupčnih metalnih delova. Do problema može doći na spojevima kućišta, displejima, tastaturama, konektorima i slično, te je poželjno dodatno zaštititi pomenute delove.

~Komponente za zaštitu od ESD: ograničavaju višak prelaznog napona usmeravanjem ESD struje kroz nelinearnu impedansu. Obično se koriste na I/O portovima gde je velika opasnost od ESD. U ovu svrhu se koriste cener ili lavinske TVS diode, višeslojni varistori, polimeri, nizovi *steering* dioda.

29. Filtriranje. Kako se bira odgovarajući filter imaju u vidu impedansu predajnika i prijemnika? Nacrtati filtre.

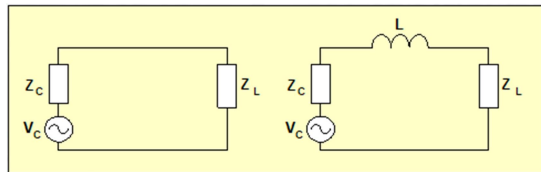
~Za eliminisanje EMI na višim frekvencijama potrebno je koristiti filtriranje. Svrha filtriranja na interfejsima je da priguši takve smetnje do nivoa na kojem sistem zadovoljava potrebnu specifikaciju (za odlazni šum) ili na kome ne dolazi do kvara sistema, zbog dolazne smetnje. Ako filter sadrži elemente koji imaju gubitke, tada će energija smetnje biti apsorbirana i disipiraće unutar filtra. Ako se to ne dogodi, energija se reflektuje i mora disipirati na nekom drugom mestu u sistemu, ili se manifestuje kao ponovno zračenje na kablovima. Dakle, filteri koji apsorbiraju energiju su uglavnom pogodniji za EMC



primene. Ukoliko se EMI problem rešava filtriranjem, potrebno je koristiti kondenzatore, induktore ili neku njihovu kombinaciju. Levo su prikazani neki filteri. Z_s i Z_L su impedanse izvora i žrtve smetnje. Svaki L ili C element koji se koristi za filtriranje unosi slabljenje od 20 dB / dec. Impedansa izvora ili žrtve se smatra malom ukoliko je znatno manja od 50Ω, odnosno, velikom ukoliko je znatno veća od 50Ω. Ako je vrednost Z_C ili Z_L približno 50Ω ($\pm 50\%$), izbor kola za filtriranje se vrši na osnovu drugih kriterijuma, kao što su veličine kola za filtriranje ili cena. Broj L i C u kolu (označen sa n) mora biti neparan (1 ili 3) za male impedanse žrtve,

odnosno paran (2 ili 4) za velike. Kod filtera L uvek ide redno (u horizontalnoj grani), C paralelno (u uspravnoj). Za male impedanse izvora se koriste L (n=1), L-C (n=2), T filteri (n=3), ili dva L-C vezana na red (n=4, ne znam naziv ovog kurca), tj filteri koji počinju sa kalemom. Za velike impedanse se koriste C, C-L, Π filteri, ili dva C-L na red, tj koji počinju sa C.

30. Na kom principu rade feritne EMI komponente? Kako se priključuju u kolo?



$$A_{dB} = 20 \cdot \log \left(1 + \frac{Z_X}{Z_C + Z_L} \right)$$
$$A_{dB} \approx 20 \cdot \log \frac{Z_X}{Z_C + Z_L}$$

~Feritne komponente se vezuju redno u kolo radi sprečavanja smetnji koje se prenose provođenjem uvođenjem dodatnog slabljenja negde duž sprežne putanje. Feriti moraju da provode funkcionalnu struju bez pregrevanja ili neprihvatljivog pada napona i ne smeju da

dostignu zasićenje feritnog materijala. Dakle, feritno jezgro ne treba da utiče na signale na niskim radnim frekvencijama, dok na višim frekvencijama, materijal počinje da se ponaša kao frekvencijski-zavisan otpornik i pretvara smetnje u toplotu.