

Smernice elektromagnetne združljivosti pri izvedbi opreme

Urban Metod Peterlin¹

¹Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, 1000 Ljubljana
urban.peterlin@eimv.si

Electromagnetic compatibility guidelines for equipment design

Abstract. *In order to ensure electromagnetic compatibility, the design of the equipment must comply with the EMC guidelines. In the documentation for the tender and execution of electrical installation work, the requirements for equipment representing any device or immovable assembly are stated too generally. The paper discusses guidelines that must be followed when designing equipment to ensure electromagnetic compatibility.*

1 Uvod

V dokumentaciji razpisa za dobavo opreme in izvedbo elektromontažnih del so za elektroenergetske objekte navedene zahteve, da mora vsa oprema, ki je v sklopu dobave, zagotavljati ustrezno stopnjo elektromagnetne združljivosti (EMC) ter, da morajo biti električne naprave načrtovane, grajene, postavljene in uporabljane tako, da elektromagnetne motnje, ki jih te naprave povzročajo, ne presegajo ravni, ki radijskim, telekomunikacijskim in drugim električnim napravam še omogoča delovati na način, za katerega so bile namenjene in, da imajo ustrezno stopnjo lastne odpornosti proti elektromagnetnim motnjam.

Navedeno je tudi, da je treba upoštevati slovenski Pravilnik o elektromagnetni združljivosti (EMC) [1]. Med zahtevami je navedeno tudi, da mora ponudnik opreme izpolnjevati zahtevane smernice o EMC in da mora biti oprema skladna s smernicami o EMC. Med zahtevami je tudi navedeno, da mora biti oprema učinkovito povezana v sistem izenačitve potencialov oziroma v ozemljitveni sistem s čim manjšimi impedancami.

Navedene zahteve so na mestu, vendar pa jim je treba nameniti več prostora v dokumentaciji za razpis in predstaviti, kako jih doseči, ker praksa kaže, da ponudniki oziroma dobavitelji opreme in izvajalci elektromontažnih del večinoma niso seznanjeni s smernicami o EMC.

2 Zasnova opreme

Zahteve za opremo elektroenergetskega objekta so obravnavane v članku [2], pri čemer je treba opozoriti, da Pravilnik o EMC pod izrazom „oprema“ obravnava katerikoli aparat ali nepremični sestav. Bistveni izrazi, ki jih obravnava Pravilnik o EMC v zvezi z opremo in elektromagnetno združljivostjo, in jih je dobro poznati, so [1]:

- „aparat“ je vsaka končna naprava ali kombinacija teh naprav, ki so kot samostojne funkcionalne enote dostopne na trgu za končnega uporabnika in lahko povzročajo elektromagnetne motnje ali pa take motnje lahko vplivajo na njihovo delovanje. Nahaja se v obliki:
 - „sestavni delov“ ali „podsklopov“, namenjenih temu, da jih v aparat vgradi končni uporabnik, in lahko povzročijo elektromagnetne motnje ali pa take motnje lahko vplivajo na njihovo delovanje;
 - „premični naprav“, opredeljenih kot kombinacija aparatov in, kadar je to ustrezno, drugih naprav, ki se lahko premeščajo in uporabljajo na različnih mestih;
- „nepremični sestav“ je določena kombinacija več vrst aparatov in, kjer je to ustrezno, drugih naprav, ki so sestavljene, nameščene in namenjene za stalno uporabo na vnaprej določenem mestu;
- „elektromagnetna združljivost“ je zmožnost opreme, da v svojem elektromagnetnem okolju zadovoljivo deluje, ne da bi pri tem proizvajala nesprejemljive elektromagnetne motnje za drugo opremo v tem okolju;
- „elektromagnetna motnja“ je vsak elektromagnetni pojav, ki lahko poslabša delovanje opreme; elektromagnetna motnja je lahko elektromagnetni šum, neželeni signal ali sprememba v samem mediju razširjanja;
- „odpornost“ je zmožnost opreme, da v navzočnosti elektromagnetnih motenj deluje, kot je predvideno, ne da bi se pri tem poslabšala kakovost njenega delovanja;
- „elektromagnetno okolje“ so vsi elektromagnetni pojavi, ki se lahko zaznajo na določenem mestu;
- „dobra inženirska praksa“ vsebuje dokazane in priznane metode, postopke in prakse, pri izdelavi, uporabi, obratovanju in vzdrževanju naprav in postrojev, ki zagotavljajo primerne, stroškovno učinkovite in dobro dokumentirane rešitve za izpolnitev uporabnikovih zahtev ter so skladne z ustreznimi predpisi in standardi.

Iz zgornjih izrazov lahko sklepamo, da elektroenergetski objekt oziroma njegovi sestavni deli (ozemljitveni sistem, sistem izenačitve potencialov, sistemi meritev, vodenja in zaščite, telekomunikacijski sistemi, sistemi lastne rabe, sistemi pomožnega napajanja) spadajo pod pojem nepremični sestav.

Pravilnik o EMC tudi določa omogočanje dostopnosti opreme na trgu ali dajanje v obratovanje: *Oprema je lahko dostopna na trgu ali dana v obratovanje le, če je v skladu s tem pravilnikom, je primerno vgrajena, vzdrževana in uporabljena za predvideni namen.*

V elektroenergetskem objektu elektromagnetne motnje nastajajo zaradi virov znotraj postroja (stikalni preklopi, kratki stiki, elektrostatične razelektritve) in virov zunaj postroja (atmosferske razelektritve, različni

oddajniki, namerno motenje). Motnje pa povzročajo tudi same naprave ali kombinacije naprav pri svojem delovanju. Naprave med delovanjem proizvajajo elektromagnetne motnje, ki prehajajo v druge naprave po napajalnih, signalnih in krmilnih vodnikih. Prenašajo se tudi po sistemu izenačitve potencialov oziroma ozemljitvenem sistemu oziroma galvanskih povezavah, induktivnih in kapacitivnih sklopih ter s sevanjem oziroma elektromagnetnim valovanjem.

Naloga zagotavljanja elektromagnetne združljivosti je iskanje ravnovesja med velikostjo elektromagnetnih motenj, ki jih proizvajajo ene naprave in odpornostjo drugih naprav nanje. Treba je zagotoviti ustrezno raven elektromagnetne združljivosti, ki se nahaja znotraj območja oziroma obrobja elektromagnetne združljivosti med mejo oddajanja motenj in mejo odpornosti [2].

Za dosego tega cilja imamo na razpolago različne ukrepe, s katerimi je možno preprečevati vdor motenj v občutljive tokokroge in naprave (sekundarne naprave) ali pa preprečevati oddajanje motenj iz primarnih naprav v sekundarne naprave. V elektroenergetskih objektih je bolj smiselno in učinkovito z različnimi ukrepi, ki pa morajo biti pravilno implementirani, preprečevati vdor motenj v sekundarne naprave.

Prvi korak pri zagotavljanju elektromagnetne združljivosti je ustrezna EMC zasnova opreme že v fazi načrtovanja oziroma razvoja, ki mora biti sestavni del katere koli elektronske naprave ali sistema. To je veliko bolj učinkovito in tudi stroškovno sprejemljivo, kot pa alternativa, ki temelji samo na poznejši vgradnji različnih ukrepov za preprečevanje oziroma blaženje prodora elektromagnetnih motenj do občutljive elektronske opreme.

Princip ustrezne EMC zasnove opreme lahko ponazorimo z obliko piramide (slika 1). Temelj dobre EMC zasnove opreme je uporaba dobrih električnih in mehanskih načel načrtovanja. Ta načela vključujejo vidike zanesljivosti in izpolnjevanje konstrukcijskih specifikacij v sprejemljivih tolerancah, kakovostno embalažo in celovito razvojno testiranje. To pomeni, da so naprave in posamezni sestavni deli (komponente) nameščeni v kovinska ohišja, ta pa v kovinske omare, ki so elektromagnetno zaslonjene. Med kovinskimi deli opreme mora biti vzpostavljena radialna povezava v sistem izenačitve potencialov in zagotovljena učinkovita večkratna povezava z ozemljitvenim sistemom. Dolžine tokokrogov znotraj naprav je treba zmanjšati na minimum in preprečiti tvorjenje zank. Motilni in občutljivi tokokrogi morajo biti med seboj fizično ločeni. Če ni možno zagotoviti ustrezne ločilne razdalje med tokokrogi, je treba vstaviti kovinske pregrade. Končni ukrep je vgradnja filtrov na vseh vodnikih vhodnih in izhodnih tokokrogov.



Slika 1. Princip EMC zasnove opreme [3]

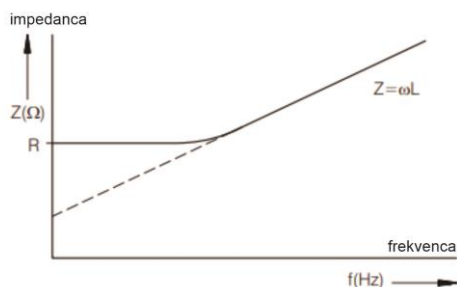
3 Smernice EMC

Bistven ukrep pri zagotavljanju elektromagnetne združljivosti v objektu je vzpostavitev kakovostnega sistema izenačitve potencialov, na katerega bodo s čim manjšimi impedancami povezani vsi kovinski konstrukcijski deli, oprema, armatura objekta, kabelski kanali in police. Dodatni ukrepi so zaslanjanje občutljive opreme s kovinskimi ohišji oziroma omarami in polaganje občutljivih tokokrogov v pokrite kovinske kabelske kanale ali kovinske cevi ter vgradnja filtrov na vseh vodnikih vhodnih in izhodnih tokokrogov občutljivih naprav.

Tokokroge, ki so občutljivi na motnje (inštrumentni in podatkovni), je treba polagati ločeno od tistih, ki povzročajo motnje (krmilno signalni in napajalni). To je možno doseči s polaganjem tokokrogov vsake zvrsti v svoj kabelski kanal ali vzpostavitev določene razdalje med različnimi tokokrogi v istem kanalu ali pa z uporabo kanalov s kovinskimi pregradami.

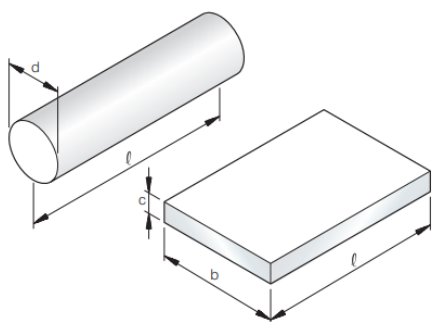
Pri izbiri kablov za občutljive tokokroge je treba izbrati takšne, ki imajo bakren oplet, ki pokrije obod kabla več kot 90 %. Oplet mora biti na obeh koncih spojen kakovostno - to je 360° na ozemljeno kovinsko ohišje omarice [4]. Izvedbe spajanja opletov kablov v sistem izenačitve potencialov s tako imenovanimi svinjskimi repki povečujejo impedanco zaradi induktivnosti.

Impedanca vodnikov je v območju nizkih frekvenc sestavljena pretežno iz omske upornosti in deloma iz induktivne reaktance, ker ima vsak vodnik tudi svojo lastno induktivnost. Pri višjih frekvencah pa induktivna reaktanca postane prevladujoča v primerjavi z omsko upornostjo (slika 2). Pri visokih frekvencah se impedanca vodnika povečuje z naraščajočo frekvenco.



Slika 2. Impedanca vodnika v odvisnosti od frekvence [5]

Z vidika doseganja čim manjše impedance vodnikov za povezave v sistemu izenačitve potencialov ima prednost uporaba ploščatih vodnikov pred okroglimi, ker imajo manjšo lastno induktivnost (slika 3) pri isti dolžini in istem prerezu.



Slika 3. Prikaz okroglega in ploščatega vodnika [5]

Lastna induktivnost vodnika je odvisna od oblike in njegove dolžine. Lastna induktivnost L ploščatega vodnika dolžine l , širine b in debeline c (1):

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2l}{b+c} \quad (1)$$

Lastna induktivnost L okroglega vodnika dolžine l in premera d (2):

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{2l}{d/2} \quad (2)$$

S primerjavo formul za lastno induktivnost ploščatega in okroglega vodnika ugotovimo, da širši kot je vodnik, manjša je njegova lastna induktivnost, debelina vodnika pa pri tem nima odločilne vloge. Debelina vodnika je pomembna samo z vidika zagotavljanja mehanske trdnosti. Lastne induktivnosti povezav za okrogli, ploščati, dva okrogla vodnika pri isti dolžini in prerezu vodnika ilustrativno prikazuje slika 4 [4]. Impedanco povezave lahko zmanjšamo z več vzporednimi povezavami.



Slika 4. Induktivnosti pri različnih izvedbah povezav [4]

Ploščati vodniki imajo prednost tudi zaradi kožnega pojava (ang. skin effect), ki je zelo izrazit pri visokih frekvencah. Kožni pojav je elektromagnetni pojav, zaradi katerega se v vodniku, ki prevaja izmenični električni tok, pojavi izriv toka proti zunanosti vodnika. Tokovna gostota je na površini vodnika večja kot v

notranjosti. Pri visokih frekvencah praktično ves tok teče po površini vodnika. Debelina plasti, pri kateri se gostota toka zmanjša na $1/e$ (e - osnova naravnega logaritma) vrednosti na površini vodnika, imenujemo kožna debelina. Za izračune lahko predpostavimo, da je gostota toka na razdalji treh kožnih plasti proti notranjosti vodnika zanemarljivo majhna (slika 5).

Formula za izračun debeline kožne plasti δ (3) [5]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (3)$$

δ – debelina kožne plasti [m]

f – frekvenca [Hz]

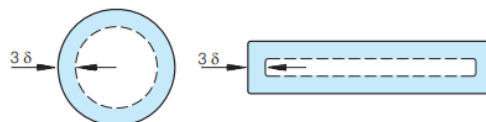
σ – specifična prevodnost vodnika [S/m]; $\sigma = 1/\rho$

ρ – specifična upornost vodnika [Ωm]

μ_0 – permeabilnost $4\pi \cdot 10^{-7}$ [Vs/Am]

μ_r – relativna permeabilnost vodnika

Iz formule za debelino kožne plasti ugotovimo, da višja, kot je frekvenca, tanjša je kožna plast. Prav tako je tanjša kožna plast pri vodnikih z večjo prevodnostjo. Materiali z magnetnimi lastnostmi (jeklo, železo), ki imajo relativno permeabilnost večjo od 1, imajo prav tako tanjšo kožno plast.



Slika 5. Prikaz kožnega pojava - okrogli in ploščati vodnik [5]

Za zmanjšanje vpliva kožnega pojava pri prevajanju izmeničnega toka po vodnikih je priporočljivo uporabiti ploščate vodnike namesto okroglih. Pri istem prerezu vodnika ima ploščati vodnik večjo prevodno površino (senčeno območje na sliki 5) in posledično manjšo impedanco kot okrogli.

Kožni pojav je možno zmanjšati z uporabo pramenastih vodnikov - pletenic, ki imajo vzporedno sukane žičke, ki so med sabo izolirane.

Ob upoštevanju formule za izračun kožnega pojava so za ilustracijo v tabeli 1 prikazane debeline trikratnika kožne plasti za različne materiale in frekvenco 1 MHz.

Tabela 1. Debelina kožne plasti za različne materiale [5]

material	specifična upornost 10^{-9} [Ωm]	relativna permeabilnost	$f = 1$ MHz 3δ [mm]
baker	18	1	0,20
aluminij	28	1	0,25
jeklo	110	750	0,02
inox	760	1	1,3

Pomembno vlogo na področju EMC smernic pri izvedbi opreme imajo kabelski kanali in police. Z ustrežno izbiro oblike (najboljši so neperforirani, če pa so perforirani, naj bodo luknje podolgovate in orientirane vzdolž kanala), njihovo razporeditvijo po prostoru in neprekinjenostjo (kakovostno medsebojno povezavo po celotni dolžini poteka) ter večkratno

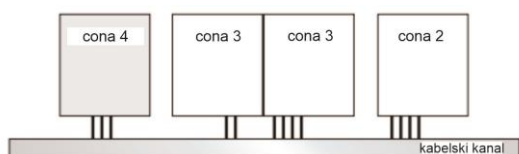
povezavo v sistem izenačitve potencialov lahko zmanjšamo impedanco med posameznimi točkami.

Globoki, še boljše pokriti kovinski kabelski kanali, preprečujejo oziroma otežujejo sevanim elektromagnetnim motnjam prodor do občutljivih tokokrogov hkrati pa tudi preprečujejo prodor elektromagnetnih motenj iz enega kabelskega kanala v drugega.

Relativno nizke impedance v sistemu izenačitve potencialov je možno vzpostaviti s kratkimi povezavami s ploščatimi vodniki in večkratno povezavo kabelskih kanalov in polic v sistem izenačitve potencialov.

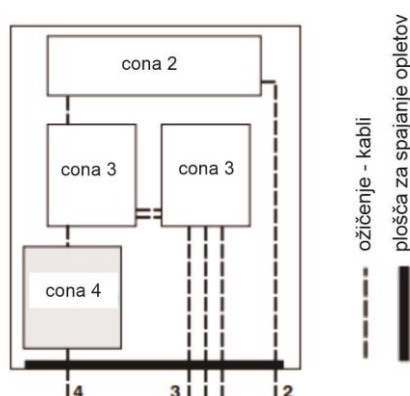
4 Razporeditev opreme

Podobno, kot pri razvrščanju občutljivih tokokrogov ločeno od tistih, ki povzročajo motenje, je tudi pri nameščanju naprav potreben enak pristop. Slika 6 prikazuje razporeditev ohišij oziroma omar z napravami v cone glede na občutljivost in velikost motenj, ki jih povzročajo. V coni 2 so nameščene občutljive naprave, v coni 3 so naprave, ki so neobčutljive na motnje in jih tudi ne povzročajo (nevtralne), v coni 4 pa so naprave, ki so glavni viri motenj. Med conami je potrebno vzpostaviti določeno razdaljo. Razvrstitev objekta in opreme v cone predvideva tudi standard [6].



Slika 6. Razporeditev omar z napravami v cone [5]

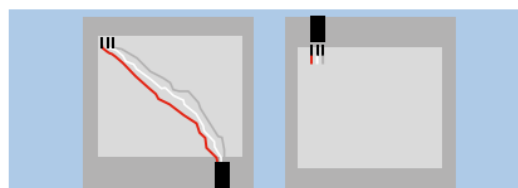
Na sliki 7 je prikazana razporeditev v primeru, ko so v omari nameščene vse (občutljive, nevtralne in motilne) naprave.



Slika 7. Razporeditev opreme znotraj omare [5]

Eden od ukrepov za preprečevanje oziroma zmanjševanje prodora motenj do občutljivih tokokrogov in naprav je tudi vgradnja filtrov. Lokacija filtra mora biti izbrana tako, da je nameščen čim bližje izvora

motenj. Slika 8 - levo prikazuje lokacijo filtra v spodnjem desnem vogalu vezja, od tu pa potekajo vodniki diagonalno po celotnem vezju do mesta, kjer bi praviloma moral biti vgrajen. Na poteku vodnikov skozi vezje vanje prodrejo motilni signali, ki jih generira vezje in sevajo motnje v okolico. Pravilno namestitev filtra prikazuje slika 8 - desno. Poleg lokacije namestitve je pomembna tudi kakovostna povezava filtra v sistem izenačitve potencialov – kratka široka ploščata pletenica [7].



Slika 8. Lokacija namestitve filtra [7]

5 Zaključek

Načrtovanje in vgradnja ukrepov za zagotovitev elektromagnetne združljivosti opreme mora potekati kontinuirano od osnovne komponente do končnega sestava.

Pri zagotavljanju elektromagnetne združljivosti opreme je za pravilno zasnovo in razporeditev potrebnih ukrepov bistveno poznavanje fizikalnih ozadij in lastnosti materialov pri različnih frekvencah.

Literatura

- [1] Pravilnik o elektromagnetni združljivosti (EMC), Uradni list RS, št. 39/2016
- [2] U. M. Peterlin: Zagotavljanje elektromagnetne združljivosti v elektroenergetskem objektu, Zbornik osemindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2019, 23. - 24. September 2019, Portorož, Slovenija
- [3] Spletna stran Electromagnetic Compatibility Design Guide, Tecknit, Najdeno dne 28. junija 2023 na spletnem naslovu: <https://www.kamk.fi/loader.aspx?id=afc84622-a0c7-45f3-9c6a-bb54e9f0015c>
- [4] SIST IEC/TR 61000-5-2:1998 Electromagnetic compatibility (EMC), Part 5: Generic standards – Section 2: Earthing and cabling
- [5] Spletna stran EMC and cable ducts, GoudaHolland, Najdeno dne 28. junija 2023 na spletnem naslovu: <https://www.goudaholland.nl/media/o53h2u1b/emc-and-cable-ducts.pdf>
- [6] SIST-TP IEC/TR 61000-5-6:2004 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5-6: Installation and mitigation guidelines - Mitigation of external EM influences
- [7] Spletna stran Basics in EMC and Power Quality, Schaffner, Najdeno dne 28. junija 2023 na spletnem naslovu: https://www.cael.it/index_htm_files/Schaffner_Brochure_Basics_in EMC_and_power_quality.pdf