

Elektromagnetna združljivost in funkcionalna varnost

Urban Metod Peterlin¹

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

Electromagnetic compatibility and functional safety

Abstract. Electrical and electronic devices are increasingly used in applications where reliable functionality is required. Electromagnetic compatibility and functional safety are becoming increasingly important. Just immunity testing are inadequate on their own. Existing safety and electromagnetic compatibility regulations and standards do not correctly address the issue of electromagnetic interference from the viewpoint of lifecycle safety. However, expertise from both disciplines - electromagnetic compatibility and functional safety have to be brought together.

1 Uvod

Elektronske naprave se vse pogosteje uporabljajo na različnih področjih in pri procesih, pri katerih sta zahtevani njihova zanesljiva funkcionalnost in varnost. Nepogrešljive so v različnih varnostnih sistemih, prevoznih sredstvih, transportnih sistemih, pri nadzoru in avtomatizaciji tehnoloških procesov v industriji, upravljanju robotov, sistemih vodenja in zaščite pri proizvodnji, prenosu in distribuciji električne energije, obrambnih sistemih, medicini in zdravstveni negi.

V izogib težavam, ki jih predstavljajo elektromagnetne motnje kot vzrok in elektromagnetno motenje kot posledica, je treba stremeti k zagotavljanju elektromagnetne združljivosti in zanesljive funkcionalnosti in varnosti naprav v okolju, v katerem delujejo skozi njihovo celotno življenjsko dobo, kar predstavlja poseben izziv.

Namen zagotavljanja elektromagnetne združljivosti je zagotoviti zanesljivost in varnost vseh naprav oziroma sistemov, kjer koli se uporabljajo in so izpostavljeni različnim elektromagnetnim okoljem. Elektromagnetna združljivost je tesno povezana s celotnim področjem elektrotehnike od načrtovanja do preskušanja naprav in sistemov. Po definiciji [1] je elektromagnetna združljivost (ang. ElectroMagnetic Compatibility - EMC) zmožnost opreme ali sistemov, da v svojem elektromagnetnem okolju delujejo zadovoljivo in ne vnašajo nedopustnih elektromagnetnih motenj ničemur v tem okolju. Vsaka električna ali elektronska naprava med delovanjem ustvarja svoje elektromagnetno okolje. Po definiciji [1] sestavljajo elektromagnetno okolje (ang. electromagnetic environment) vsi elektromagnetni pojavi, ki obstajajo na danem kraju. V splošnem velja, da je elektromagnetno okolje časovno odvisno. Elektromagnetna motnja (ang. electromagnetic disturbance) je po definiciji [1]

katerikoli elektromagnetni pojav, ki lahko poslabša delovanje naprav, opreme ali sistemov ali neugodno vpliva na živo ali neživo snov. Učinek, ki ga povzroči elektromagnetna motnja, je elektromagnetno motenje [1] (ang. ElectroMagnetic Interference - EMI), kar pomeni poslabšanje delovanja opreme, prenosnih kanalov ali sistemov.

Za varno delovanje opreme pa ni dovolj samo zagotavljanje elektromagnetne združljivosti, ampak je treba zagotoviti tudi funkcionalno varnost, katere namen je zagotoviti zanesljivo in varno delovanje električnih oziroma elektronskih naprav.

Funkcionalna varnost (ang. Functional Safety - FS) je opredeljena kot del splošne varnosti sistema ali posamezne opreme, ki je odvisna od varnega delovanja električne ali elektronske opreme pri odzivu na njene vhodne signale. Funkcionalna varnost zagotavlja, da napake oziroma nepravilno delovanje sistema ali posamezne naprave ne povzročijo nesprejemljivega varnostnega tveganja za ljudi ali okolico [2]. Oprema mora biti zasnovana tako, da naprave delujejo varno oziroma, da v primeru človeške napake ali odpovedi kakšne komponente, ali v primeru prevelikega elektromagnetnega motenja, odpovejo varno, brez posledic za ljudi in okolico. Pristop pri doseganju funkcionalne varnosti je skrbno ovrednotiti zasnovo izdelka za primere poslabšanja funkcionalne varnosti ob prisotnosti elektromagnetnega motenja. Za primere, ko bi elektromagnetne motnje lahko povzročile nevarno delovanje opreme ali sistemov, je treba uporabiti posebne postopke načrtovanja in preskušanja. Treba je upoštevati raven varnosti opreme (ang. Safety Integrity Level - SIL) [3]. Poleg tega je treba razmisliti tudi o načrtovanju življenjskega cikla delovanja opreme in preskusiti izdelek, da zagotovimo, da deluje varno ali varno odpove. Pomembno je tudi dokazati, da sistem organizacije lahko zagotovi ustrezne kompetence človekovih virov za razvoj funkcionalne varnosti.

V širši javnosti obstaja napačno splošno prepričanje, da je vse, kar je potrebno za uspešno spopadanje z elektromagnetnimi motnjami vgradnja oziroma nakup naprav, ki imajo oznako CE in so razglašene za skladne z Direktivo 2014/30/EU Evropskega parlamenta in Sveta. Nekateri razlogi, zakaj je takšno prepričanje napačno, so navedeni v članku [4], poleg njih pa so še dodatni razlogi povezani z zagotavljanjem funkcionalne varnosti, ki v omenjeni direktivi ni obravnavana [5]:

- Direktiva o elektromagnetni združljivosti v besedilu nikjer ne uporablja besede "varnost".
- Direktiva o elektromagnetni združljivosti zajema le normalno delovanje in ne zajema predvidljivih napak, ekstremov v okolju, napak upravljavca,

situacij vzdrževanja ali zlorabe - dejavnikov, ki so bistveni za funkcionalno varnost.

- Standardi, ki pokrivajo elektromagnetno združljivost in so usklajeni z direktivo o elektromagnetni združljivosti bodisi izrecno bodisi implicitno izključujejo varnostne vidike.
- Standardi, ki pokrivajo elektromagnetno združljivost in so usklajeni z direktivo o elektromagnetni združljivosti, pokrivajo omejeno število elektromagnetnih motenj.

2 Obvladovanje tveganj zaradi elektromagnetnega motenja

V prihodnosti je pričakovati pospešeno uporabo elektronskih naprav in sistemov na področjih, kjer sta ključni visoka zanesljivost in varnost [6]:

- Razvoj avtonomnih vozil za povečanje udobja med vožnjo in zmanjšanja porabe goriva in izpustov emisij.
- Uveljavitev 4. industrijske revolucije (ang. Industry 4.0) in družbe 5.0 (ang. Society 5.0), ki temelji na hitrem, fleksibilnem in dinamičnem proizvodnem procesu ob učinkoviti rabi surovin in energije.
- Avtomatizirana medicinska diagnostika za izboljšanje zdravja in dobrega počutja.
- Razvoj robotov za strežbo starejšim in invalidnim osebam.
- Razvoj pametnega omrežja in malih enot za proizvodnjo energije iz alternativnih virov za zmanjšanje porabe in učinkovitejšo rabo energije v domovih, poslovnih prostorih in industriji.

Elektronske naprave so zelo občutljive na elektromagnetne motnje zaradi [2]:

- Zahtev po napravah, ki porabijo malo energije, in nenehna tehnološkega napredka pri proizvodnji se posamezne komponente elektronskih naprav zmanjšujejo - postajajo kompaktnjše in cenejše ter delujejo pri zelo nizkih napetostih, kar posledično pomeni, da komunicirajo med sabo s šibkimi signali.
- Povečane rabe brezžičnega prenosa podatkov, močnostnih naprav s hitrimi vklopi, elektromotornih pogonov s spremenljivo hitrostjo je okolje, v katerem elektronske naprave delujejo onesnaženo z elektromagnetnimi motnjami različnega izvora in frekvenčnega razpona od kHz do GHz.

Naprave so zaradi tega nagnjene k nepravilnemu delovanju ali celo trajnim okvaram. Zagotoviti v elektromagnetnem okolju zadostno zanesljivost in varnost sistemov oziroma naprav v celotni življenjski dobi predstavlja zahtevno nalogo oziroma izziv.

Za uspešno spopadanje z elektromagnetnim motenjem je treba vključiti posebno področje inženirske stroke oziroma obvladovanje tveganj zaradi elektromagnetnega motenja, ki mora upoštevati dognanja s področja funkcionalne varnosti in področja elektromagnetne združljivosti.

Ti dve področji sta se v preteklosti razvijali povsem ločeno, zato nimata skupne konceptualizacije in

izrazoslovja. Med njima obstaja neusklajenost, kajti nobeno ne pokriva elektromagnetnega motenja z vidika celotne predvidene življenjske dobe opreme oziroma sistema.

Elektromagnetna združljivost je področje elektrotehnike, ki zaradi množične uporabe različnih elektronskih naprav na različnih področjih postaja vedno bolj pomembno in nepogrešljivo. Pri zagotavljanju elektromagnetne združljivosti se preverja skladnost nove opreme oziroma sistemov z direktivo o elektromagnetni združljivosti. Skladnost se potrjuje s standardiziranimi postopki testiranja odpornosti opreme na posamezno določeno elektromagnetno motenje v kontroliranem okolju laboratorija. Standardi, po katerih se testira, ne določajo nobenega vidika pri zasnovi opreme. Obseg testiranja opreme temelji na ekonomsko tehničnem kompromisu in pokrije približno 90 % motenja, ki se običajno pojavi v določenem elektromagnetnem okolju [6].

Z vidika funkcionalne varnosti je takšen način neustrezen, kajti večina pravil in standardov, ki so harmonizirani z direktivo, ne obravnava v zadostni meri varnostne problematike, pri kateri je treba predvideti vse relativno predvidljive dogodke in situacije:

- napake, ki se lahko pojavijo pri normalnem delovanju ali ob okvarah,
- ekstremne parametre okolja,
- človeške napake in napačno uporabo,
- staranje opreme oziroma materialov,

za celotno predvideno življenjsko dobo opreme oziroma sistema, da se ne bodo pojavila nesprejemljiva varnostna tveganja za varno in zanesljivo delovanje opreme in nevarnosti za ljudi in okolico. Postopki za zagotavljanje funkcionalne varnosti morajo vzeti v obzir vsako elektromagnetno motenje, ki se lahko pojavi v določenem okolju. Opredeliti je treba vsa možna tveganja za odpoved, ki se potem klasificirajo po kritičnosti, pogostosti in zmožnosti detekcije.

Osnovni standard na področju zagotavljanja funkcionalne varnosti električnih, elektronskih in elektronsko programirljivih varnostnih sistemov je IEC 61508 zasnovan na osnovi analize tveganj, ki se lahko pojavijo zaradi elektromagnetnega motenja. Na tej podlagi so bili oblikovani številni produktni standardi.

Standardi predvidevajo, da je treba za doseganje ustrezne ravni funkcionalne varnosti kontrolirati elektromagnetno motenje, vendar ne vsebujejo jasnih navodil, kako to izvesti.

Iz navedenega sledi, da je treba za varno in zanesljivo delovanje opreme združiti izsledke obeh področij, kajti zgolj testiranje odpornosti opreme po standardiziranih postopkih tega ne zagotavlja.

3 Testiranje odpornosti opreme ne zagotavlja funkcionalne varnosti

Testiranje odpornosti električnih in elektronskih naprav temelji na IEC/EN 61000-6-1 in 61000-6-2 oziroma testnih metodah, ki jih predpisuje serija standardov

IEC/EN 61000-4-x. Razlogi, da je takšno ugotavljanje odpornosti na elektromagnetno motenje z vidika zagotavljanja funkcionalne varnosti neustrezno, so [7, 8]:

- Hkrati se testira odpornost samo na eno določeno elektromagnetno motnjo. Kljub temu, da naprava pri testiranju uspešno prestane odpornost na določeno motnjo, je pri obratovanju izpostavljena več različnim motnjam hkrati in ima zaradi tega lahko zelo slabo odpornost.
- Testiranje naprav je izvedeno v specializiranem laboratoriju ob simuliranju določenega elektromagnetnega okolja tako, da je zagotovljena določena točnost in ponovljivost testiranja, kar pa pogosto ne predstavlja predvidenega dejanskega okolja, v katerem bo naprava delovala. Testi se izvajajo s simuliranjem določenih oblik motenj, ki pogosto ne odražajo dejanskih.
- Testi odpornosti so preveč enostavni oziroma splošni. Naprave se testirajo za določeno frekvenco motnje, kar ne pove dosti o dejanski odpornosti oziroma občutljivosti pri drugih frekvencah. V običajnem okolju je pogosto hkratno motenje z različnimi frekvencami. Upoštevati je treba tudi namerno povzročeno motenje.
- Običajno se ne opravi analize tveganja, ki ga lahko povzroči elektromagnetno motenje. Z običajnimi testi odpornosti se simulira normalno oziroma pričakovano elektromagnetno okolje, niso pa upoštevani drugi vplivi (npr. bližina oddajnikov mobilne telefonije, elektromagnetne motnje manjše od 150 kHz in višje od 1 GHz, prenapetosti ob nevihtah). Dobra praksa pri zagotavljanju varnosti predvideva, da se opravi ocenjevanje nevarnosti in analiza tveganja, ki vključuje ocenjevanje elektromagnetnega okolja in možne posledice na opremo.
- Pri običajnem testiranju odpornosti se ne upošteva varnosti delovanja opreme zaradi posamezne napake. Pri napravah se ocenjuje odpornost proti elektromagnetnim motnjam s tremi kriteriji, in sicer A (nemoteno delovanje med in po preskusu), B (dopuščeno moteno delovanje, ki pa se po prenehanju motenja samo popravi), C (moteno delovanje mora popraviti človek). Testiranje odpornosti naprave na posamezno napako (npr. slaba ozemljitvena povezava pri filtru, kratek stik, prekinitvev tokokroga, vgradnja neoriginalne komponente v napravo, slabo spojeni opleti, poškodba elektromagnetnega zaslona) se ne izvede, če ni izrecno zahtevano.
- Pri testiranju v laboratoriju niso upoštevani parametri, ki so prisotni v dejanskem okolju namestitve ter med transportom in skladiščenjem (npr. vibracije, vlaga, prah, ultravijolična svetloba, temperaturni ekstremi, temperaturno nihanje, korozija, nihanje napetosti), kar ima lahko velik vpliv na odpornost naprave (npr. slab električni kontakt, poslabšanje učinkovitosti zaslanjanja, poslabšanje filtriranja).
- Testiranje se izvaja na novi opremi v kontroliranem okolju. Staranje posameznih komponent oziroma materialov ni upoštevano pri testiranju odpornosti. Slaba zasnova okolja, v katerem bo oprema delovala, lahko sčasoma privede do korozije, kar posledično lahko zmanjša učinkovitost zaslanjanja in zmanjšuje odpornost opreme.
- Opravi se samo tipski preskus opreme, kar pa ne zagotavlja, da bodo tudi vsi drugi kosi opreme uspešno prestali testiranje, čeprav so izdelani v istem podjetju. Proizvajalci pri testiranju opreme običajno sami snujejo testne postopke. Če oprema ne prestane testiranja uspešno, spreminjajo zasnovo, dokler test ni uspešen. Takšen način testiranja ni pravi pokazatelj odpornosti opreme, kajti oprema je lahko prestala testiranje zaradi dobre zasnove ali pa zgolj ugodnega spleta okoliščin. Tipski preskus opreme ne zagotavlja, da bo uspešno prestala testiranje tudi oprema z manjšimi spremembami posameznih komponent (npr. različen potek kablov) ali majhne spremembe v strojni in programski opremi.
- Napake pri proizvodnji opreme niso upoštevane. Standardi na področju zagotavljanja varnosti za razliko od standardov na področju elektromagnetne združljivosti vsebujejo zahteve za rutinsko testiranje vsakega proizvedenega kosa opreme za preveritev ali morebitne napake pri proizvodnji izdelka ne vplivajo na njegovo varnost.
- Poslabšanje delovanja posameznega kosa opreme, ki je pri testiranju odpornosti na podlagi standardov s področja elektromagnetne združljivosti sprejemljivo, na področju zagotavljanja varnosti celotnega sistema lahko povzroči varnostno tveganje. Običajno se pri testiranju opreme testirajo posamezni sestavni deli in ne celotnega sistema. Za posamezen sestavni del opreme je lahko kratkotrajno sprejemljiva nezadostna odpornost na določeno motenje, ni pa sprejemljiva za varnost sistema.
- Oprema se običajno testira na določeno maksimalno raven odpornosti. Elektronske naprave so nelinearne sestavljene iz kompleksnih tokokrogov in programske opreme, zato lahko uspešno prestanejo testiranje na neko maksimalno vrednost, hkrati pa lahko delujejo moteno ali celo odpovejo pri testiranju na nižjo raven odpornosti. Nekateri standardi predvidevajo testiranje odpornosti opreme od nižjih ravni do maksimalne. Na splošno so bolj verjetne nižje ravni elektromagnetnih motenj kot pa maksimalne, zato se lahko pojavi situacija, da je oprema odporna na motnje, ki se pojavijo redko in občutljiva pri tistih, ki so bolj verjetne.
- Postavljene so neustrezne ravni združljivosti. Pri napravah za splošno rabo velja, da je dosežena ustrezna raven združljivosti pri tistih napravah, ki v 95 % prestanejo teste odpornosti. Pri sistemih, kjer je treba upoštevati tudi varnostni vidik, je treba z vsaj 99,9 % verjetnostjo zagotoviti, da motnje ne bodo povzročile okvar.
- Testiranje na podlagi standardov s področja zagotavljanja elektromagnetne združljivosti ne upošteva vzdrževanja, popravila, obnove in nadgradnje opreme. V praksi je treba opremo v času njene življenjske dobe čistiti, vzdrževati, popravljati, obnavljati in nadgrajevati. Nekateri od teh

postopkov so vključeni kot dobra inženirska praksa na področju zagotavljanja varnosti v standardih, ki obravnavajo varnostne vidike.

4 Postopki na področju elektromagnetne združljivosti, potrebni za zagotavljanje funkcionalne varnosti

Dodatno pozornost je treba nameniti zasnovi in sestavljanju posameznih komponent, temeljiti proučitvi razumne življenjske dobe in elektromagnetnega okolja, ker se ne moremo opreti samo na testiranje odpornosti. Zadostna varnost v delovanju opreme mora biti zagotovljena skozi celotno življenjsko dobo delovanja opreme, zaradi tega je treba upoštevati, da se bodo med življenjsko dobo opreme v elektromagnetnem okolju pojavili različni mehanski, klimatski, kemijski in biološki pogoji, poleg tega pa še predvidljive napake, okvare in staranje opreme [7].

Odpornost posameznega sestavnega dela opreme na elektromagnetno motenje je odvisna od zasnove tokokrogov in dejanske sestave posameznih komponent v celoto ter od uporabljene programske opreme. Varnost in zanesljivost pri delovanju opreme oziroma sistema zagotovimo z [7]:

- Konstrukcijsko zasnovo in ukrepi za blažitev motenja (npr. vgradnja filtrov, zaslanjanje, prenapetostna zaščita). Pri vgradnji filtrov je treba zagotoviti zanesljivo ozemljitveno povezavo, ki se zaradi vibracij ne bo razrahljala oziroma prekinila. Zaslanjanje mora biti izvedeno zanesljivo tako, da nanj ne vplivajo naključni tresljaji in vibracije. Izbrani materiali morajo biti odporni proti koroziji in procesom staranja med predvideno življenjsko dobo.
- Testiranjem občutljivosti opreme tako, da se odstrani vgrajene ukrepe za blažitev motenja. Na ta način se ugotovi, pri katerih frekvencah motenj je oprema še posebej občutljiva ter se na podlagi takšnega ciljanega pristopa zasnujejo dodatni ukrepi za blažitev motenj ter večjo zanesljivost in varnost delovanja opreme.
- Vgradnjo ustrezne zaščite, ki spremlja oziroma nadzira delovanje in v primeru, ko zabeleži preveliko elektromagnetno motenje, zagotovi varen izklop ali pa preklop v varen način.
- Večplastnim pristopom oziroma izvedeno redundanco pri snovanju ukrepov za blaženje motenj (npr. več različnih virov napajanja, več ozemljitvenih povezav, večplastno zaslanjanje).
- Izdelavo elektronskih naprav, ki imajo vgrajene komponente z več redundantnimi kanali, ki so izdelani na podlagi različnih tehnologij. Posamezna motnja namreč lahko povzroči nepravilno delovanje na določenem kanalu, na drugem drugačne tehnologije pa ne.
- Zamenjavo klasičnih vodnikov z optičnimi.
- Zunanjo presojo razvoja izdelka in organizacije.

5 Zaključek

Skladnost z direktivo o elektromagnetni združljivosti ni zagotovilo, da posamezne elektromagnetne motnje ne povzročajo motenja pri delovanju določene električne ali elektronske opreme ali da ni varnostnih tveganj zaradi nezadostne zagotovitve elektromagnetne združljivosti.

Za zagotovitev zadostne ravni elektromagnetne združljivosti tudi z vidika funkcionalne varnosti je treba temeljito proučiti elektromagnetno okolje, v katerega bo oprema vgrajena, ter na podlagi analize okolja izbrati oziroma ustrezno zasnovati opremo in postopke testiranja tako, da bo varno in zanesljivo delovala skozi celotno predvideno življenjsko dobo.

Med proizvodnim procesom mora potekati ustrezen nadzor, ki mora biti skrbno zasnovan in preiščen, kajti že manjše na prvi pogled nebitvene spremembe v proizvodnem procesu posamezne komponente imajo lahko znatne posledice na odpornost opreme.

Sestavljanje posameznih komponent v celoto in montaža opreme oziroma sistema v predvideno okolje morata biti izvedena pod nadzorom in v skladu z dobro - moderno inženirsko prakso. Med življenjsko dobo opreme je treba opravljati kontrolo - monitoring.

Literatura

- [1] SIST IEC 60050(161):1999 - Mednarodni elektrotehniški slovar – Poglavje 161: Elektromagnetna združljivost International Electrotechnical Vocabulary - Chapter 161: Electromagnetic Compatibility
- [2] D. Pissoort, K. Armstrong: Techniques and Measures to Manage Risks with Regard to Electromagnetic Disturbances, Proceedings EMC+SIPI 2018, 30. July - 3. Avgust 2018, Long Beach, California, USA
- [3] K. Armstrong: Including EMC in Risk Assessments, Proceedings IEEE 2010 International Symposium on EMC, 25.-30. July, 2010, Fort Lauderdale, Florida, USA
- [4] U. M. Peterlin: Zagotavljanje elektromagnetne združljivosti v elektroenergetskem objektu, Zbornik osemindvajsete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2019, 23. - 24. September 2019, Portorož, Slovenija
- [5] Spletna stran EMC for Functional Safety, Najdeno dne, 3. maja 2021 na spletnem naslovu: <https://croydonservice.com/railway-emi-emc/emc-for-functional-safety/>
- [6] D. Pissoort, A. Degraeve, K. Armstrong: EMI Risk Management: a Necessity for Safe and Reliable Electronic Systems!, IEEE 2015 5th International conference on Consumer Electronics, 6. – 9. September 2015, Berlin, Germany
- [7] K. Armstrong: Why EMC Testing is Inadequate for Functional Safety – and What Should be Done Instead, Proceedings 1st IET International Conference on System Safety, 6. - 8. June 2006, London, UK
- [8] K. Armstrong: Introduction to EMC for Functional Safety, EMC-UK 2004 Conference, 12. - 13. October 2004, Newbury, UK