

Razvoj pogona in preverjanje njegove skladnosti za elektromagnetno združljivost

Žan Hedžet Kostajnshek¹, Domen Višnar¹, Matevž Stopar¹, Matej Možek²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za mikrosenzorske strukture in elektroniko (LMSE)

E-pošta: zanhkostajnshek@gmail.com

Development and validation for electromagnetic compatibility of a drive

Development process, initial measurements and validation of a motor control with an electrically commutated machine (BLDC) are presented. Presented drive setup consisted of a full bridge acting as a three-phase inverter, connected to a TLE9877QXW40 controller with an integrated logic core, LIN 2.2 transceiver, and a charge pump. A series of initial conducted and radiated noise measurements were initially performed to iteratively lower the emissions of the drive. Furthermore, electromagnetic compliance testing was conducted by the Slovenian Institute for Quality and Metrology. The results confirmed drive compliance with obtained EN55025:2017 standard for conductive electromagnetic noise (CISPR25 Class 2) in the frequency range from 150 kHz to 108 MHz, as well as with the VW81000:2018 and EN55025:2017 standards for transmitted electromagnetic noise (CISPR25 Class 4) in the frequency ranges from 9 kHz to 150 kHz and from 150 kHz to 245 MHz, respectively.

1 Uvod

Večanje količine aktivnih elektronskih elementov v sodobnih avtomobilih lahko vpliva na porast emisije radiofrekvenčnih motenj. Na drugi strani pa neimunost sistemov na uvedene motnje v njihovo delovanje uvede nedeterminističnost kar je posebej nezaželjeno pri varnostnih sistemih.

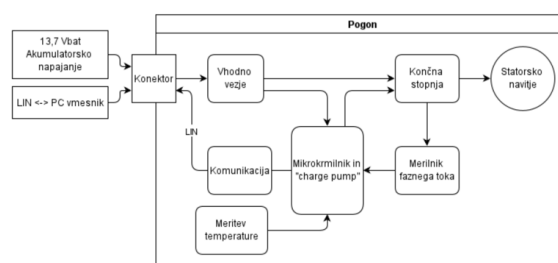
V članku sta predstavljena razvoj in validacija pogona za enosmerni trifazni brezkrtačni motor, ki je primeren za uporabo v avtomobilski industriji, kar iz vidika elektromagnetnih motenj predstavlja izziv zaradi nezveznih signalov za vodenje pogona, ki v sistem uvajajo višje harmonske komponente.

Validacija pogona obsega teste, ki preverjajo skladnost emisij sistema z avtomobilskim standardom za prevodne emisije CISPR25 Class 5 (EN55025:2017, dostopno na [8]) in standardoma za sevalne emisije CISPR25 Class 5 (EN55025:2017) ter VW81000:2018. Opis meritev in rezultati so zajeti v četrtem poglavju.

2 Načrtovanje sistema

Pogon sestoji iz vezja, konektorja, statorskega navitja in rotorja pri čemer smo razvili vezje, ki ustreza zahtevam

in arhitekturnim omejitvam (predstavljenih v dokumentu [3]) ter pri tem stremeli k skladnosti z avtomobilskimi standardi za sevalne in prevodne motnje omenjenih v uvodu.



Slika 1: Statična arhitektura vezja.

Glavni gradniki statične arhitekture vezja (kot so prikazani na sliki 1) so statorsko navitje elektronsko komutiranega stroja (ang. brushless alternating current drive ali BLAC) v vezavi delta z nazivno močjo 40 W in vrtilno hitrostjo 12000 /min, črpalka naboja kot DC-DC pretvornik za krmiljenje vrat MOSFET stikal, vhodno vezje in končna stopnja.

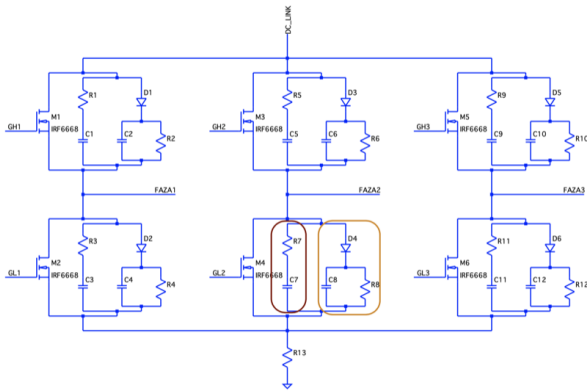
2.1 Osnovna stopnja

Osnovni del vezja sestavlja TLE9877QXW40, 32-bitni Arm[®] Cortex[®] - M3 krmilnik proizvajalca Infineon v ohišju VQFN-48-79. Integrirano vezje poleg logičnega jedra med drugim sestavljajo črpalka naboja, komunikacijski modul za oddajanje in sprejemanje LIN 2.2, operacijski ojačevalnik za merjenje bremenskega toka skozi upor in temperaturni senzor. Krmilnik omogoča delovanje med 5,5 V in 27 V ter med -40 °C in +150 °C ter je kvalificiran za uporabo v aplikacijah za avtomobilsko industrijo s certifikatom AEC-Q100/101 (dostopnim na spletni strani [6]).

Poleg povezav krmilnika z osnovnimi elementi, zahtevanimi za delovanje perifernih sklopov in črpalke naboja po priporočeni shemi ([3], str. 17), sta bila vhoda za baterijsko napajanje in baterijsko napajanje črpalke naboja ločena ter preko feritne dušilke povezana na hranilnik naboja.

2.2 Končna stopnja

Fazni priključki elektronsko komutiranega stroja so bili povezani s polnim mostičem v vlogi trifaznega razsmernika sestavljenega iz šestih NMOS in skupnim vozliščem za merjenje toka (upor R13) kot je to prikazano na sliki 2. Stroj je moduliran kot simetrično trifazno vezje s sinusno obliko gibalne inducirane napetosti [1]. Krmiljenje vrat tranzistorjev z vgrajeno črpalko naboja poteka pri frekvenci 13 kHz PWM signala trapezne oblike in mrtvim časom 600 ns.



Slika 2: Konfiguracija polnega mostiča.

Kot stikalni element (tranzistorji od M1 do M6 na sliki 2) je bil izbran MOSFET iz Infineon-ove družine elementov močnih tranzistorjev. Tranzistor IRF6668-TRPBF združuje tehnologijo MOS z induciranim kanalom HEXFET[®] z ohišjem DirectFET[™] s čimer dosega nizko upornost ob vklopu in nizko termalno upornost zaradi zmožnosti obojestranskega hlajenja ([4], [7]). Element je posebej primeren za mostične topologije DC-DC vezij in omogoča visoko učinkovitost in nizke temperature delovanja. Njegove nizke parazitne kapacitivnosti pripomorejo k zmanjšanju vpliva na preklopni čas, odvisen od napetostno pogojenih parazitnih kapacitivnosti. Povezave polprevodniške tabletko z ohišjem za kontakte vrat (ang. gate) in izvora (ang. source) niso izvedene z bondirno žičko (ang. wire bonding), temveč so direktno dostopne na spodnji strani ohišja, kar pripomore k zmanjšani parazitni induktivnosti. Slednje pa pripomore k zmanjševanju visokofrekvenčnih oscilacij v preklopnih točkah mostiča (označenih s FAZA1, FAZA2 in FAZA3 na sliki 2), kar zmanjšuje možnost spontanega vklopa MOSFET.

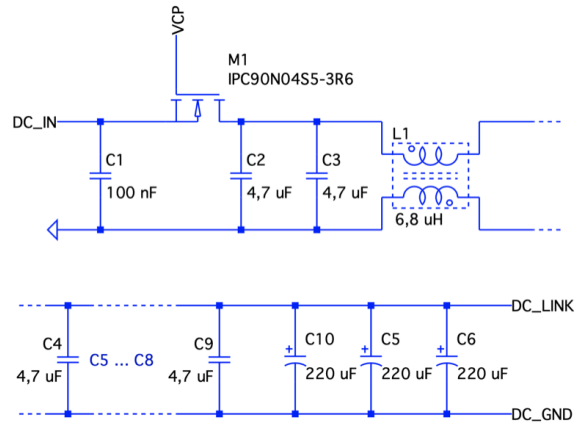
Za dodatno dušenje visokofrekvenčnih oscilacij in možnost sprostitvenega naboja diode (ang. relaxation diode charge), sta bili ob vsakemu tranzistorju načrtani dve vezji, ki omogočata dodatno dušenje preklopne točke. RC dušilno vezje (na sliki 2 označeno z rdečim okvirjem) omogoča povečano dušenje RLC vezja, med tem ko RCD dušilka (ki je podobno prejšnjemu na sliki 2 označeno z oranžnim okvirjem) omejuje prenapetost. Odločitve glede naseljevanja omenjenih vezij so podrobneje opisane v razdelku 3.2.

Povezava vrat tranzistorjev (ki so na sliki 2 prikazane z označbami "GH" in "GL" ter pridruženo zapore-

dno številko faznega priključka oz. veje mostiča) s krmilnikom je bila izvedena preko nizkoohmskih uporov, saj bi v nasprotnem primeru le-ta skupaj s parazitnimi kapacitivnostmi tvoril nizkoprepustno sito prvega reda oz. RC člen in vplival na povišan dvižni čas mostiča.

2.3 Vhodna stopnja

Vhodno vezje združuje zaščito pred napačno polariteto napajalne napetosti, filter prevodnih motenj in hranilnik naboja (podrobneje prikazano na sliki 3).



Slika 3: Vezje vhodne stopnje.

Zaščita pred napačno polariteto napajalne napetosti je bila izvedena z Infineon-ovim n-kanalnim MOSFET z induciranim kanalom IPC90N04S5-3R6 iz družine močnih MOSFET OptiMOS[®], ki je s certifikatom AEC-Q101 kvalificiran za uporabo v aplikacijah za avtomobilsko industrijo. MOSFET (označen z M1 na sliki 3) omogoča visoko napetost U_{DS} (do 40 V) in nizko maksimalno upornost kanala $R_{DS(on),max}$ (3,6 mΩ). Vrata tranzistorja so skupaj s kondenzatorjem za črpalko naboja (ta na sliki 3 ni prikazan) priključena na vhod krmilnika VCP, ki skrbi za izklop MOSFET tranzistorja ob prisotnosti nasprotne polaritete napajalne napetosti.

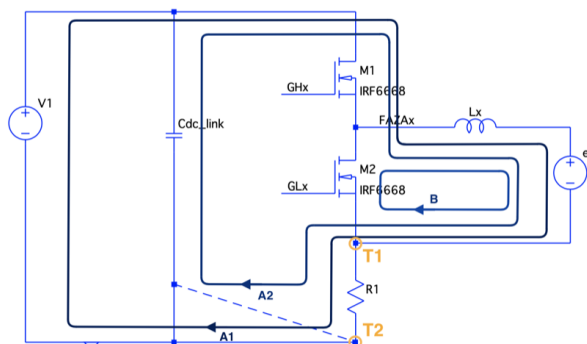
Za filter prevodnih motenj je bil izbran filter diferencialnih prevodnih motenj v topologiji π . Filter je bil načrtan s pomočjo programske opreme LTspice (izdaja za operacijski sistem MacOS, različica 17.1.4 [5]).

Uporabljena je bila nizkocenovna sklopljena močnostna dušilka z dvojnimi navitjem (na sliki 3 označena z L1), 50 V večplastni keramični kondenzatorji (v nadaljevanju MLCC) tipa X5R in velikosti 1206 s kapacitivnostjo 4,7 μF (z označbami od C1 do C9 na sliki 3) ter kondenzator, ki gradi hranilnik naboja. Za slednjega so bila načrtana tri mesta namenjena SMD aluminijastim elektrolitskim kondenzatorjem (v nadaljevanju ELKO) s kapacitivnostjo 220 μF (na sliki 3 označeni z C10, C11 in C12).

2.4 Topologija tiskanine

Izbrani elementi so bili postavljeni na štiri plastno tiskalno pri čemer so bile upoštewane zahteve glede pozicije konektorja in statorja ter velikosti vezja in njegove oblike.

Pri naseljevanju tiskanine so bila najprej določena mesta za krmilnik in elemente polnega mostiča. MOSFET tranzistorji končne stopnje so bili zaradi zmanjševanja upornosti umeščeni blizu priključkom statorskega navitja, ob njih pa so bila dodana mesta za dodatne pasivne in aktivne filtre za dušenje.



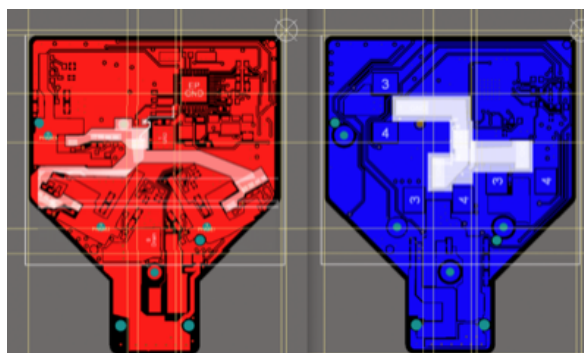
Slika 4: Pomembne zanke.

Posebna pozornost je bila namenjena zmanjševanju površine visokofrekvenčnih zank, saj te predstavljajo vir motenj. Gledano s stališča treh faz, sta bili najpomembnejši zanki, ki sta vsebovani v vsaki od faz. Na sliki 4 je prikazana postavitev ene fazne veje polnega mostiča, ki vključuje dva MOSFET označena z M1 in M2, pripadajočo statorsko navitje Lx in napetostni vir e, ki simbolizira inducirano napetost. Merilni upor R1, hranilnik naboja Cdc_link in napetostni vir V1 pa so elementi, ki se v vsaki od faz ne podvajajo. Iz sheme so zaradi preglednosti izvzeti dušilni elementi RC in RCD.

Zanka A1 (z istoimensko označbo na sliki 4) obsega napetostni napajalnik V1, zgornje (ang. high-side) fazno stikalo mostiča M1, fazno statorsko navitje Lx in e ter merilni upor R1. Zanka B pa obsega spodnje (ang. low-side) fazno stikalo mostiča M2 in fazno statorsko navitje Lx ter e.

Zmanjševanje fazne zanke A1 je bilo izvedeno z dodajanjem hranilnika naboja v obliki elektrolitskega kondenzatorja (na sliki 4 označen s Cdc_link). Pripravljena je bila topologija, ki vključuje tri elektrolitske kondenzatorje (predhodno omenjene v razdelku 2.3) katerih pozitivni priključki so bili nameščeni tem bližje baterijskim priključkom mostiča vsake od faznih zank. Omenjena redukcija zanke A1 je na sliki 4 označena z zanko A2.

Na zmanjšanje zanke B vpliva predvsem odločitev glede povezovanja elementov vsake od faz v eni točki. Podrobneje gre za povezovanje negativnih sponk elektrolitskih kondenzatorjev (Cdc_link), izvornih kontaktov spodnjih faznih stikala polnega mostiča in ozemljitvene sponke bremena. Točka T1 (na sliki 4) simbolizira spojišče v katerem se združijo po en izvorni kontakt spodnjega faznega stikala vsake od vej mostiča, ozemljitev bremena in sponka merilnega upora. Na sliki 5 je to označeno z osvetljenim območjem zgornje strani tiskanine (levi del slike). Povezava negativne sponke Cdc_link s prekinjeno črto simbolizira združitev treh negativnih sponk kondenzatorjev v točki T2 (prikazani na sliki 4) oz. na nasprotni



Slika 5: Topologija tiskanine (levo - zgornja plast, desno - spodnja plast).

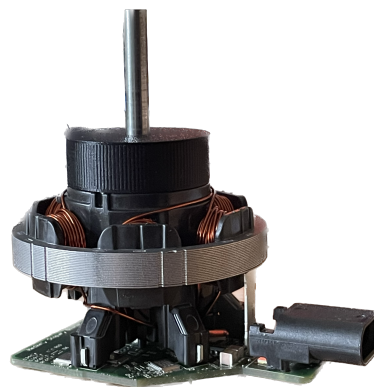
strani merilnega upora. Omenjena povezava je na sliki 5 označena z osvetljenim delom spodnje plasti tiskanine.

Združevanje omenjenih povezav v točkah T1 in T2 prav tako zmanjšuje tokovno generacijo sofaznih motenj, ki bi sicer nastala zaradi induktivnosti med negativnimi sponkami elektrolitov in izvornimi sponkami spodnjih mostičnih stikal [2]. Doprinos k zmanjševanju zank tipa A in B pa predstavlja tudi odločitev postavitve stikal blizu faznih priključkov statorja.

Odvečna področja zgornje in spodnje plasti tiskanine ter večina površine vmesnih plasti so bile zalite z bakrom pri čemer je bila zgornja plast priključena na ozemljitev, prva vmesna plast na napetost hranilnika naboja, druga vmesna plast ponovno na ozemljitev in spodnja plast na napetost hranilnika naboja. To omogoča zmanjševanje zank in v vezje dodaja dodaten razklopni kondenzator.

2.5 Izdelava pogona

Izdelane so bile štiri plošče (ang. panel), ki so vsebovale vsaka po eno tiskanino. Prvi del polaganja elementov na tiskanino je potekal v čistih prostorih, kjer so bili na tiskanino s strojem za polaganje elementov nameščeni krmilniki in konektorji. Za tem so bile plošče najprej strojno prispajkane, temu pa je sledil postopek strojnega lomljenja tiskanin iz plošč.



Slika 6: Pogon z nadomestnim rotorjem.

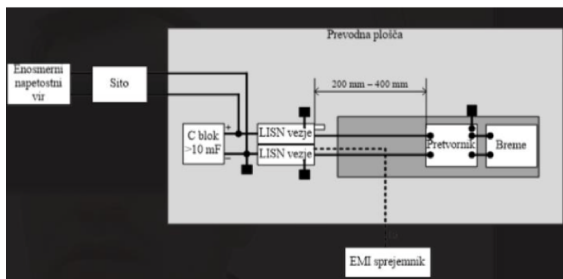
Primestitev ostalih elementov je bila izvedena za eno tiskanino. Zaradi zahtevnosti DirectFET™ ohišja, ki ima

povezave izvora in vrat na dnu tabletke, je bil uporabljen postopek spajkanja v peči. Na laserskem rezalniku je bila pripravljena nalepka, ki koristi kot šablona za nanašanje paste za spajkanje. Po nanosu paste smo nalepko odstranili, na vezje položili vse preostale komponente razen elektrolitskih kondenzatorjev in tiskanino namestili v peč za spajkanje z ustreznim temperaturnim modelom. Sledila je namestitvev elektrolitskih kondenzatorjev.

Vezje je bilo nato za namene prenosa kode priključeno na vmesnik za LIN komunikacijo. Na delujočo tiskanino je bil stator najprej primeščen na dodatne vodnike, ki so omogočali naknadne popravke na tiskanini. Pogon je bil nazadnje primeščen na breme. Pogon s statorjem nameščenim direktno na tiskanino in rotorjem za namene testiranja je prikazan na sliki 6.

3 Merjenje in verifikacija

Za namene prilagajanja vezja so bile izvedene preliminarnе meritve sevalnih in prevodnih motenj.



Slika 7: Postavitev za merjenje prevodnih emisij.

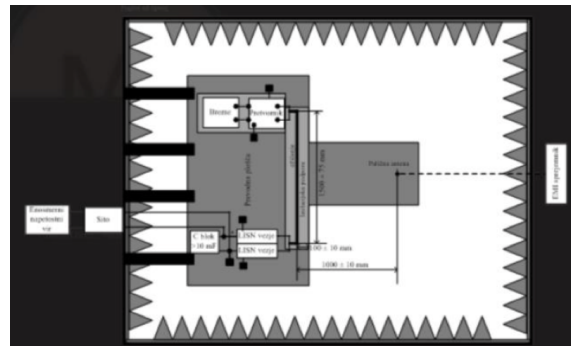
Konfiguracijo prevodnih meritev (na sliki 7) sestavljata dve LISN vezji (namenjeni za pozitiven in negativen napajalni priključek), akumulator, EMI sprejemnik in napajalni vir, ki se nahajajo v Faradayevi kletki. Merjenje sevalnih motenj (postavitev prikazuje slika 8) pa sestavljajo prej naštetih elementi z izjemo daljših napajalnih vodnikov, ki se po robu mize raztezajo 1500 mm in dodano anteno, ki je od mize oddaljena 1000 mm. Vse skupaj se nahaja v Faradayevi kletki opremljeni z absorberji elektromagnetnega valovanja.

Izvajale so se meritve povprečja (ang. average), maksimalnih vrhov (ang. peak) in kvazivrhov (ang. quasi-peak).

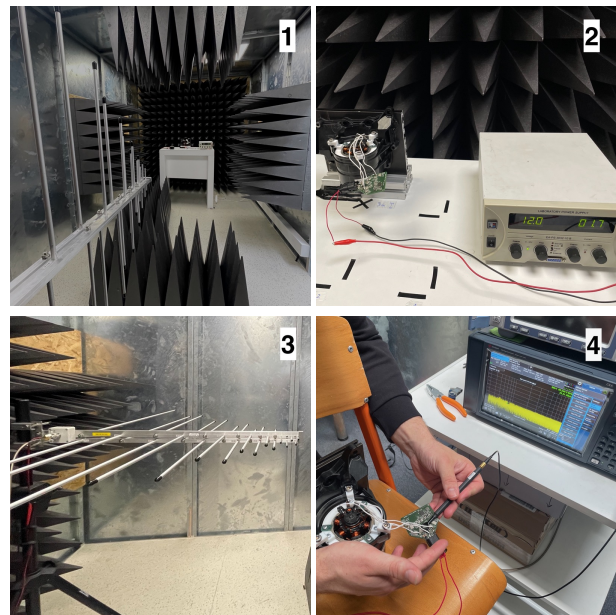
3.1 Testiranje skladnosti za sevalne motnje

Preliminarne meritve sevalnih motenj pogona obsegajo meritev z anteno v horizontalni (razdelek 3, slika 9) in vertikalni poziciji (razdelek 1, slika 9). Antena je bila priključena na signalni analizator CXA N9000B proizvajalca Keysight s frekvenčnim območjem od 9 kHz do 75 GHz (prikazan v desnem kotu razdelka 4 slike 9). Merilna komora je na sliki 9 prikazana v razdelku 1. Skupaj so bile izvedene tri meritve, dve s horizontalno in ena z vertikalno usmeritvijo antene pri čemer je bila ena od prvo omenjenih meritev določena kot neveljavna.

Posnetka zaslona signalnega analizatorja sta prikazana na slikah 10 in 11 pri čemer prikazuje tanjša rumena črta

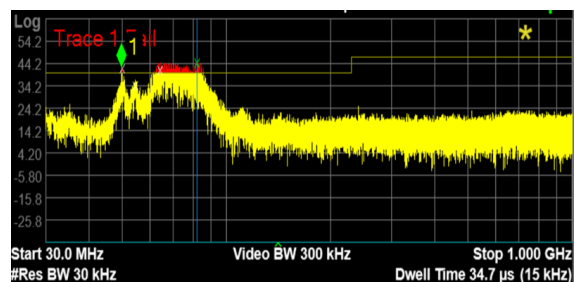


Slika 8: Postavitev za merjenje sevalnih emisij.



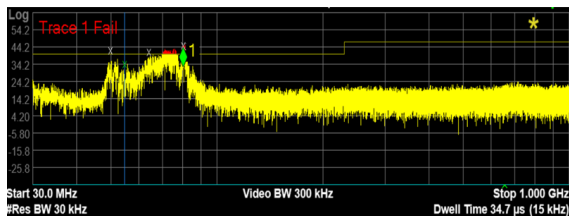
Slika 9: Preliminarno merjenje sevalnih emisij.

mejo standarda EN 55022:2010 (standard za sevalne motnje, Class B, od 30 MHz do 1 GHz pri oddaljenosti antene 3000 mm [9]). Iz prvega posnetka, ki je rezultat meritev sevalnih motenj pri horizontalni usmeritvi antene, je bilo z meritvijo kvazivrhov določeno, da pogon s 25,756 dB največ presega standard pri frekvenci 54,555 MHz. Pri tej frekvenci so bile izmerjene amplitude kvazivrha, vrha in povprečja, ki si sledijo: 14,244 dBμV, 19,582 dBμV in 7,2084 dBμV.



Slika 10: Horizontalna usmeritev antene.

Rezultat meritev sevalnih motenj z anteno v vertikalni poziciji prikazan na sliki 11 prav tako določa največje preseganje pri meritvi kvazivirha pri 54,555 MHz. Kvazi vrh z amplitudo 7,9035 dB μ V standard pri tej frekvenci presega z 32,097 dB. Meritvi amplitude vrha in povprečja si sledita: 12,822 dB μ V in -0,42097 dB μ V.



Slika 11: Vertikalna usmeritev antene.

Izvedene so bile dodatne meritve s sondo (razdelek 4, slika 9) pri čemer je bilo določeno, da motnja s frekvenco 54,555 MHz izvira iz območja v bližini krmilnika.

3.2 Testiranje skladnosti za prevodne motnje

Serijsko prelinarnih meritev prevodnih motenj je avtorjem omogočila iterativno dopolnjevanje pogona, ki je vodilo k znatnim izboljšavam rezultatov.

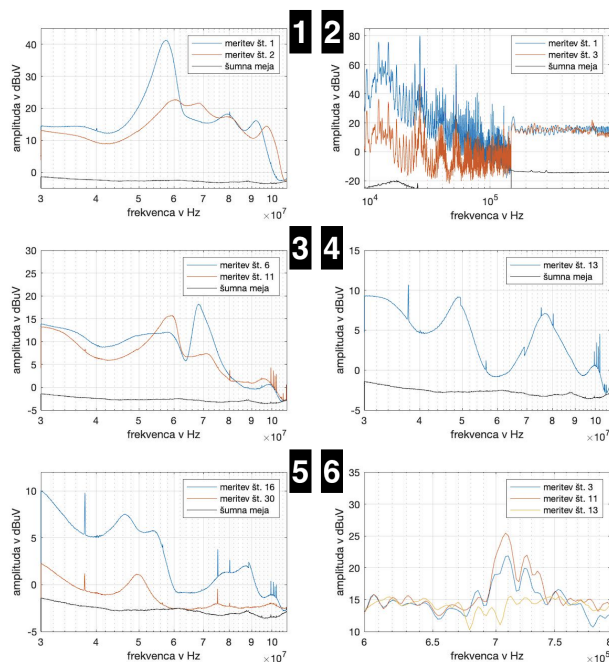


Slika 12: Preliminarno merjenje prevodnih emisij.

Posebnosti merilne postavitve so obsegale merilno komoro TEM transmission cell TC3020 proizvajalca Amplifier Research z maksimalno zmogljivostjo 500 W, impedanco 50 Ω in frekvenčnim območjem od 0 do 375 MHz (razdelek 1, slika 12), LISN vezje, ki se je pri višjih frekvencah izkazalo kot nemerodajno in ESRP - EMI Test receiver, spektralni analizator proizvajalca Rohde & Schwarz s frekvenčnim območjem od 9 kHz do 7 GHz (prikazano pod TEM celico v razdelku 1). LISN vezje, akumulator in breme v notranjosti TEM celice so prikazani v razdelku 2 slike 12.

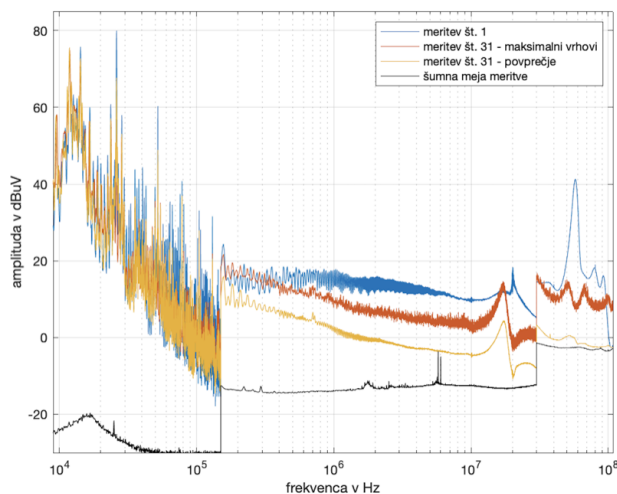
Slika 14 obsega celotno frekvenčno območje meritve in prikazuje prvo meritev povprečja, zadnjo izvedeno meritev (meritev št. 31) povprečja in maksimalnih vrhov ter izmerjeno šumno mejo meritve. Slika 13 vsebuje približana območja izbranih meritev in utemeljuje spremembe, ki so bile na pogonu med posameznimi meritvami izvedene.

Prvotna meritev povprečja (prikazana kot meritev št. 1 na sliki 14) je bila izvedena pri pogonu kakršna je leta opisan v drugem poglavju z izjemo uporabe le enega



Slika 13: Izbrane preliminarne meritve.

220 μ F elektrolitskega kondenzatorja. Prenihaj povprečja pri frekvenci 57,570 GHz je bil najprej znižan za 18,568 dB z golj s krajšanjem vodnikov, ki sator povezujejo s tiskanino (za krajšanjem je bila izvedena meritev št. 2). To je nazorneje vidno v prvem razdelku slike 13, kjer sta prikazani meritvi povprečja št. 1 in 2 ter šumna meja meritve.



Slika 14: Graf preliminarne meritve prevodnih emisij.

Območje visokih amplitud meritve št. 1 pri nižjih frekvencah (do 200 kHz) vidno na sliki 14, je bilo dušeno z dodajanjem elektrolitskih kondenzatorjev vzporedno z MLCC filtrskim kondenzatorjem tako za kot tudi pred filtrsko tuljavo (tuljava L1 iz slike 3, ki prikazuje vezje vhodne stopnje). Za meritev št. 3 sta bila na kontakta kondenzatorjev C3 in C4 (iz slike 3) prispajkana dva 100 μ F

ELKO, pri čemer je bilo doseženo dušenje do 40,128 dB. Vpliv je opazen v razdelku 2 slike 13 kjer sta prikazani meritvi povprečja št. 1 in 2 ter del šumne meje meritve.

Dodatno dušenje območja pri višjih frekvencah je bilo nato doseženo z dodajanjem RC dušilnega člena pri vsakem od stikalnih elementov polnega mostiča. Sprva sta bila izbrana upor z vrednostjo 2 Ω in MLCC kondenzator z vrednostjo 680 pF. Pripadajoča meritev povprečja (meritev št. 6) je v razdelku 3 slike 13 prikazana skupaj z meritvijo povprečja št. 11 in šumno mejo meritve. Meritev št. 6 dosega v prikazanem območju slabljenje (glede na meritev št. 2) za 4,461 dB. Kasneje sta bila (v sklopu meritve št. 11) za RC člen namesto enega MLCC, uporabljena po dva 680 pF MLCC. Kot je razvidno iz razdelka 3, se je pojavil zamaknjen prenehaj, ki ima od prejšnjega amplitudo nižjo za 2,420 dB.

Z dodajanjem treh 4,7 μF MLCC umeščenih za sklopljeno tuljavo (torej vzporedno s kondenzatorjema C4 in C5 iz slike 3), je bilo doseženo dodatno slabljenje povprečja prej omenjenega visokofrekvenčnega območja. Pri novonastalih pogojih je bila izvedena meritev št. 13 prikazana v 4. razdelku slike 13. Pri tem so se pojavili prenehaji pri 37,740 MHz, 48,630 MHz in 75,450 MHz z amplitudami, ki so (glede na meritev št. 11 v tem frekvenčnem območju) nižje za vsaj 5,586 dB.

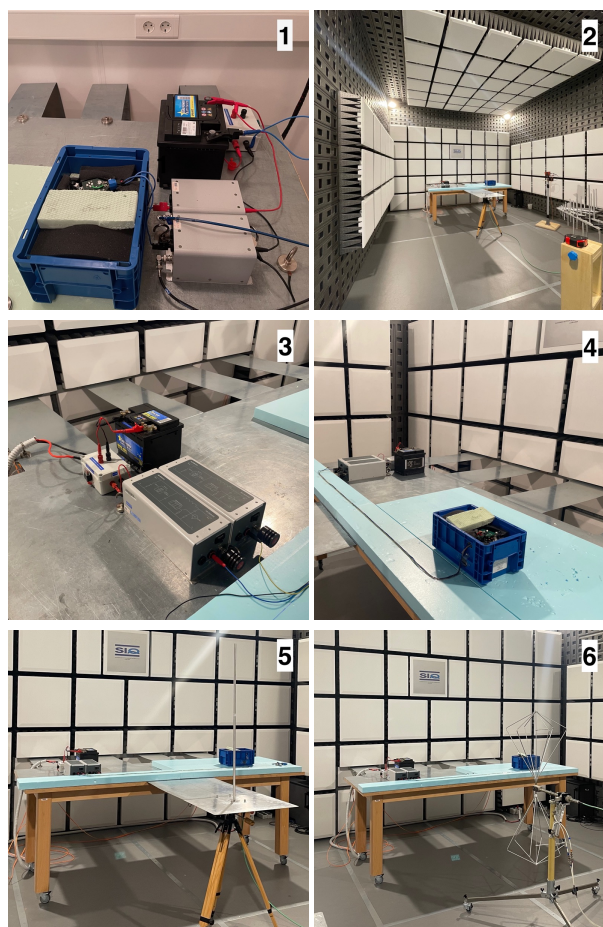
Dodajanje MLCC prav tako vpliva na prenehaj, ki se z dodajanjem ELKO pred in za filterno tuljavo (meritev št. 3), z amplitudo 21,771 dBμV pojavil pri frekvenci 708,000 kHz (frekvenčno območje je prikazano v razdelku 6 slike 13). Prenehaj je bil dodatno ojačan pri dodajanju RC dušilnih vezij. Iz razdelka 6 je možno razbrati, da znaša ojačanje pri meritvi povprečja št. 11 3,563 dB. Dodani MLCC prenehaj dušijo z 9,907 dB. Slabjenje prenehaja je pomembno zaradi strogosti standarda v tem frekvenčnem območju.

Nazadnje so bili kondenzatorji dušilnega RC člena zamenjani s po dvema 1 nF MLCC, kar prikazuje meritev št. 16 v razdelku 5 slike 13. Sprememba dosega slabljenje povprečja za najmanj 0,6234 dB in za 4,086 dB v območju nad 70 MHz, kjer je standard EN55025:2017 strožji.

Zaradi nižanja cene pogona, RCD dušilka ni bila implementirana, prav tako pa so bili izvedeni tudi dodatni ukrepi za nižanje cene. Sprva sta bila odstranjena oba 100 μF ELKO nameščena vzporedno z vhodnimi filter-skimi kondenzatorji. Stanje pri višjih frekvencah je pri teh pogojih prikazano v petem razdelku slike 13 (meritev št. 30) pri čemer je bilo v tem koraku statorsko navitje na tiskanino pritrjeno direktno (dodatni vodniki so bili odstranjeni). To omogoča doseganje slabljenja povprečja za 8,932 dB pri 37,710 MHz in za 4,244 dB v območju nad 70 MHz.

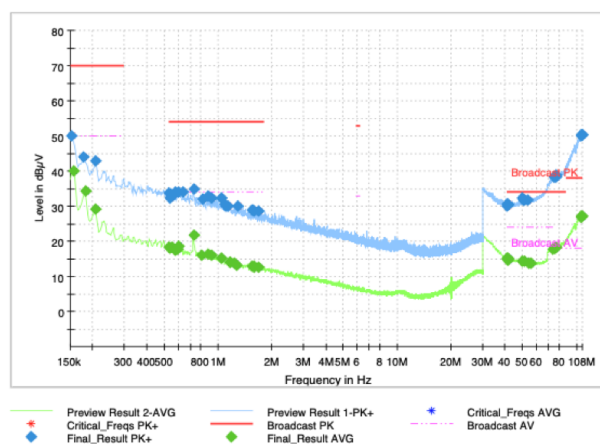
Zaradi nižanja cene pogona je bil na zadnje 220 μF ELKO zamenjan z ugodnejšim 100 μF ELKO. Zadnje meritve sestavljata dve črti grafa na sliki 14. V sklopu meritve št. 31 je bilo izmerjeno tako povprečje kot tudi maksimalni vrhovi. Izboljšave dosežene v tem poglavju je na sliki moč opaziti s primerjavo meritve št. 1 in meritve povprečja št. 31.

3.3 Validacija



Slika 15: Validacija pogona.

Grafi v nadaljevanju so rezultati ugotavljanja elektromagnetne združljivosti (EMC) izdani s strani Slovenskega inštituta za kakovost in meroslovje (SIQ).

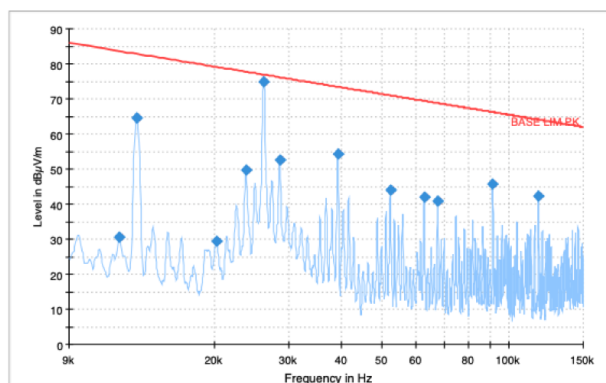


Slika 16: Združljivost s standardom EN55025:2017.

Ugotavljanje združljivosti za prevodne motnje (slika 16) je bilo izvedeno z SIQ LISN vezjema, v frekvenčnem območju od 150 kHz do 108 MHz na fazi in ničli. Slika LISN vezij, akumulatorja in pogona (v modrem predal-

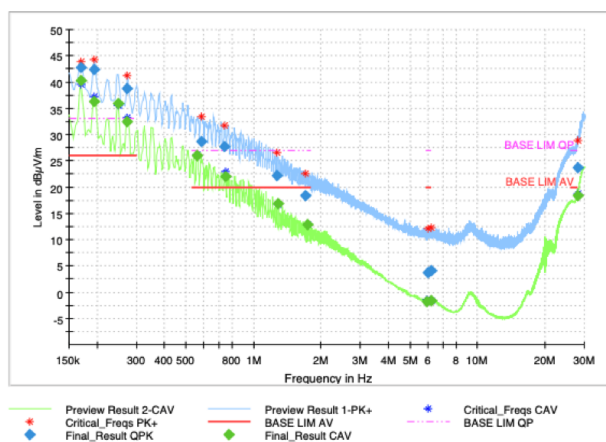
niku) postavljenih na ozemljeni mizi v komori za merjenje prevodnih motenj, je v prvem razdelku slike 15. Pogon v območju od 76 MHz do 108 MHz presega meje CISPR25 Class 5 maksimalnega vrha za 12,37 dB s čemer dosega Class 2.

Pri ugotavljanju združljivosti za sevalne motenje so bile izvedene tri meritve, izvedene v komori prikazani v razdelku 2 slike 15. Postavitev je pri vseh meritvah obsegala ozemljeno merilno mizo po robu katere se 1500 mm raztezajo vodnika za napajanje priključena na LISN vezji in nepriključen vodnik za LIN komunikacijo. LISN vezji in akumulator postavljeni na levi rob mize, so prikazani na sliki 15 v razdelku 3. Vodniki za napajanje in komunikacijo ter breme so od ozemljene mize distancirani z dielektrikom, kot je to vidno v razdelku 4 slike 15.



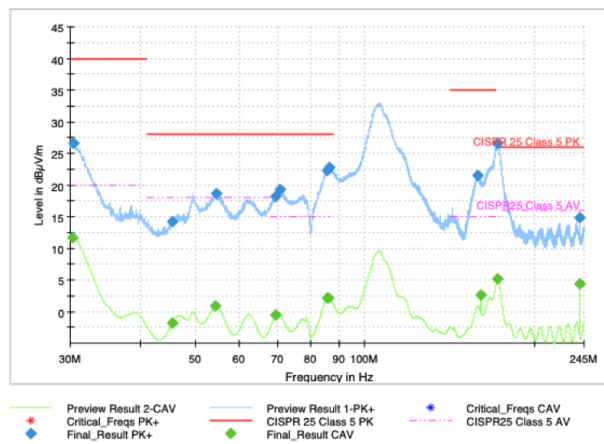
Slika 17: Zdržljivost s standardom VW81000:2018.

Za ugotavljanje združljivosti s standardom VW8100-0:2018 je bila uporabljena monopolna antena, ki je bila od ozemljene mize oddaljena 1000 mm. Podlaga antene je bila ozemljena s povezavo na ozemljitev mize. Slika postavitve je v razdelku 5 slike 15. Dosežena je bila združljivost (slika 17) z najmanjšim odstopanjem maksimalnega vrha 1,98 dB.



Slika 18: Zdržljivost s standardom EN55025:2017.

Ugotavljanje združljivosti za sevalne motnje standarda EN55025:2017 je potekala v dveh delih v frekvenčnih območjih od 150 kHz do 30 MHz in od 30 MHz do 245 MHz ter pri dveh orientacijah bikonične antene. Ta je bila prav tako postavljena 1000 mm od merilne mize. Antena se je med meritvijo iz vertikalne pnevmatsko rotirala v horizontalno orientacijo. Slika merilne postavitve z orientacijo antene v vertikalni poziciji je v razdelku 6 slike 15.



Slika 19: Zdržljivost s standardom EN55025:2017.

Z 9,67 dB preseganjem največjega vrha v območju od 0,15 MHz do 0,3 MHz in 1,67 dB v območju od 0,53 MHz do 1,8 MHz je pogon v prvem delu meritve združljiv s CISPR25 Class 4 (slika 18). Preseganje največjega vrha za 0,55 dB pri 172,17 MHz pri zgornjem frekvenčnem delu meritve, pogon prav tako uvršča v CISPR25 Class 4 (slika 19).

4 Zaključek

Sodelovanje na EMC izzivu nam je pripomoglo pri pridobivanju znanja in izkušenj na področju elektromagnetne združljivosti in bo koristilo predvsem pri nadaljnjem delu.

Avtorji so na podlagi znanja pridobljenega tekom izziva razvili pogon, ki obsega elektronsko komutiran stroj povezan na polni mostič v vlogi tri-faznega razsmernika. Vplivi nekaterih filtrskih elementov, ki so bili dodani k vhodni in končni stopnji ter odločitev sprejetih pri razvoju topologije tiskanine, so bili opaženi v sklopu preliminarnih meritev.

Nazadnje je bilo na SIQ izvedeno preverjanje skladnosti za elektromagnetno združljivost. Pogon je dosegel združljivost z EN55025:2017 standardom za prevodne elektromagnetne motnje (CISPR25 Class 2) v frekvenčnem območju od 150 kHz do 108 MHz, kot tudi s VW81000:2018 in EN55025:2017, standardoma za sevalne elektromagnetne motnje (CISPR25 Class 4) v frekvenčnih območjih od 9 kHz do 150 kHz in od 150 kHz do 245 MHz.

5 Zahvala

Razvoj pogona sloni na pogojih EMC izziva 2023, ki ga je na Fakulteti za elektrotehniko prof. dr. Marko Jankovec letos organiziral v sodelovanju s Kolektorjem.

Izdelavo tiskanin je sponzoriralo podjetje Intectiv. Strojni procesi pri izdelavi vezij pa so bili izvedeni na Kolektorju v Idriji. Proces spajkanja v peči je bil izveden v prostorih LPVO (Laboratorij za fotovoltaike in optoelektroniko na FE) s pomočjo prof. dr. Marka Jankovca.

Vmesnik LIN, statorsko navitje, nadomestni rotor, bremenja, krmilnik TLE9877QXW40 in konektor so priskrbeli na Kolektorju.

Prav tako so bile v LPVO izvedene preliminarne meritve prevodnih motenj med tem ko so bile preliminarne meritve sevalnih motenj izvedene na podjetju Instrumentation Technologies na Tržaški cesti v Ljubljani.

Meritve izvedene na Slovenskem inštitutu za kakovost in metrologijo je sponzorirala omenjena institucija.

Za vso pomoč se zahvaljujemo tudi mentorju, prof. dr. Mateju Možku in mlademu raziskovalcu Žigi Šmelcerju.

Literatura

- [1] P. Zajec, "Močnostna stopnja BLAC pogona - razsmerniki" LPVO, http://lpvo.fe.uni-lj.si/fileadmin/files/Ostalo/Delavnice/Delavnica EMC 2023/EMC_delavnica_2023__razsmernik__prozenje_final_P.Zajec.pdf (dostopano 20. julija 2023).
- [2] M. Jankovec, "Osnove EMC" LPVO, http://lpvo.fe.uni-lj.si/fileadmin/files/Ostalo/Delavnice/Delavnica_EMC_2023/Osnove_EMC.pdf (dostopano 20. julija 2023).
- [3] J. Ivančič, "Načrtovanje elektronike za EMC", http://lpvo.fe.uni-lj.si/fileadmin/files/Ostalo/Delavnice/Delavnica EMC 2023/Nacrtovanje_elektronike_za EMC_v1_6.pdf (dostopano 20. julija 2023).
- [4] "IRF6668", <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/n-channel/irf6668/> (dostopano 20. julija 2023).
- [5] "LTspice", <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> (dostopano 20. julija 2023).
- [6] "AEC", <http://www.aecouncil.com/AECDocuments.html> (dostopano Jul. 2023)
- [7] "HEXFET vs MOSFET", <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/HEXFET-vs-MOSFET.html> (dostopano 20. julija 2023).
- [8] "Radio disturbance characteristics", <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/cc54831c-f8f0-45aa-847a-0fa1a4b36b53/en-55025-2017> (dostopano 20. julija 2023).
- [9] "EN 55022:2010", <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/4191e0c1-62a6-415e-b9ea-927a58de4344/en-55022-2010> (dostopano 20. julija 2023).