

Načrtovanje, zasnova in izdelava večfaznega razsmernika z MOSFET stikali

Andraž Rihar, Peter Zajec, Mitja Nemec, Marko Petkovšek, Danjel Vončina

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: andraz.rihar@fe.uni-lj.si

Design and development of a multiphase high voltage MOSFET inverter

Abstract. *Drivetrain electrification has lately been gaining momentum. Multiphase machines and corresponding inverters promise interesting advantages over ordinary three phase configurations. As an alternative to well-established high-voltage IGBT and SiC MOSFET based inverters, this paper presents design and development of a medium voltage multiphase MOSFET inverter for 40 kW peak power. Each phase of the inverter comprises four parallel branches. The designed inverter offers a compact, yet modular design, having good potential for future research in the field of multiphase MOSFET inverters.*

1 Uvod

V zadnjem obdobju se stopnja elektrifikacije glavnih ali pomožnih pogonov osebnih in drugih vozil opazno povečuje [1, 2], bodisi v obliki hibridnih ali popolnoma električnih rešitev [3]. Poleg trifaznih motorjev se zaradi specifičnih prednosti, kot so manjša valovitost navora, večja zanesljivost, razporeditev moči po fazah in zmanjševanje izgubnih moči, kot vedno bolj primerni zdijo tudi pet, šest in večfazni pogoni [4, 5, 6].

Za napajanje takih motorjev so običajno uporabljeni večfazni dvo- ali večnivojski pretvorniki [7, 8, 9]. Prednosti slednjih so manjše harmonsko popačenje izhodne napetosti (THD, angl. total harmonic distortion), manjše sofazne napetosti (angl. common-mode voltages), manjše preklopne izgube zaradi nižjih strmin napetosti ob preklonih ter predvsem možnost uporabe stikal za nižje napetosti [10]. Do nedavnega se je razvoj razsmernikov v grobem delil na dve področji in sicer na visokonapetostne razsmernike (nad 400 V) z IGBT stikali [11], ki jih šele v zadnjem času počasi nadomeščajo visokonapetostni (nad 600 V) SiC MOSFETi [12, 13], ter nizkonapetostne razsmernike (do 100 V ali 150 V) z MOSFET polprevodniškimi stikali [14]. Razmeroma prosto ostaja področje med obema napetostma zaradi dosedanjih tehnoloških omejitev močnostnih stikal, predvsem omejenih tokovnih zmogljivosti srednjenapetostnih MOSFET-ov [15].

Potrebam po višji moči pogona je moč zadostiti z uporabo višjih napetosti in polprevodniških stikal novih tehnologij, kot sta SiC in GaN [13]. Tokovno zmogljivost je možno povečati z vzporedno vezavo stikal ali tranzistorov. Tako je predvidoma možno poenostaviti prepotrebno odvajanje izgubnih moči, zagotoviti primerno nizko tokovno obremenitev posameznega tranzistorja, izboljšati kompaktnost, nadalje pa tudi poenostaviti montažo razsmernika v

sklopu aplikacije. V primeru vzporedne vezave faz se ponuja tudi možnost prepletanja proženja posameznih vej razsmernika, kot je to že dobra uveljavljena praksa pri DC/DC pretvornikih [16]. Prepletanje vej bi morda lahko dodatno zmanjšalo tudi valovitost navora.

Raziskave v omenjenih smereh in pripadajoče testiranje vplivov posameznih ukrepov so seveda mogoče le s primerno namensko strojno opremo, v prvi vrsti torej primernim razsmernikom. Ta mora ustrezati osrednjim električno-mehanskim zahtevam, med katerimi sta pomembni predvsem primerna kompaktnost z namenom zmanjševanja vpliva parazitnih induktivnosti in kapacitivnosti, ter modularnost sistema, ki omogoča testiranja vpliva števila izbranih faz, različnih kombinacij proženja, profiliranja izkoristka in zmogljivosti različnih polprevodniških stikal.

V literaturi običajno zasledimo opise sistemov, ki so zasnovani namensko glede na specifično aplikacijo [14], optimizirani sistemi za širši spekter uporabe pa so redki. V tem članku so predstavljeni koraki načrtovanja, zasnove in izdelave laboratorijskega vzorca večfaznega razsmernika z MOSFET stikali, pri čemer pa razviti razsmernik predstavlja platformo za nadaljnje raziskave na področju razsmernikov s srednje-napetostnimi MOSFET stikali.

2 Zasnova in izdelava podsklopov večfaznega razsmernika

Načrtovanje, zasnova in izdelava razsmernika so potekali v več zaporednih korakih. Glede na obratovalne zahteve je bilo potrebno definirati okvirne dimenzije razsmernika, izbrati ustrezne komponente, testirati ustreznost posameznih rešitev, nato pa zasnovati, izdelati in sestaviti celoten laboratorijski vzorec.

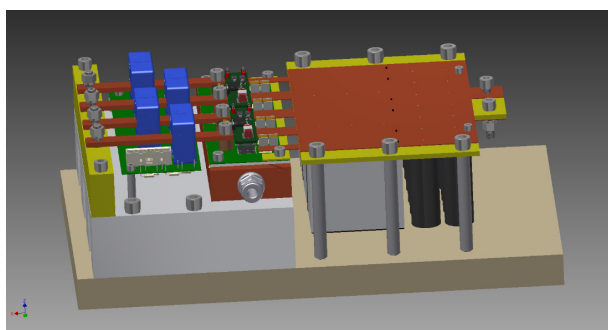
2.1 Obratovalne zahteve

Namen raziskave je zasnovati in izdelati večfazni razsmernik s srednjenapetostnimi MOSFET stikali, ki bo na primer lahko uporabljen za napajanje šestfaznega motorja s trajnimi magneti kratkotrajne moči 40 kW in trajne moči 20 kW. Nazivna napetost enosmernega vmesnega tokokroga je 135 V. Razsmernik naj bo kompakten in čim bolj simetrično zgrajen. Potrebno je kapljevinsko hlajenje za ustrezen odvod izgubnih moči. Stopnja kompaktnosti je lahko rahlo poenostavljena s ciljem zagotavljanja nemotenih laboratorijskih meritev, ki bodo omogočile nadaljnja testiranja vodenja, vpliva izbire polprevodniških elementov, gonilnikov, itn. Na podlagi obstoječih študij na temo ocene izgubnih moči, prednosti in slabosti dvo- in trinivojskih izvedb razsmernikov z MOSFETi [17, 18], je bila za podane električno-mehanske zahteve zaradi nižjih izgubnih

moči, manjše odvisnosti izgub od obremenitve in manjšega števila komponent izbrana 6 – fazna dvonivojska izvedba razsmernika z združenim enosmernim vmesnim tokokrogom. Zasnova posamezne faze iz več tranzistorskih vej bo lahko z namenskim krmiljenjem omogočila tudi več kot 6-fazno delovanje.

2.2 Izdelava in testiranje prototipa ene fazne veje

V prvem koraku je bila izvedena optimizacija prostorske postavitve močnostnih, krmilnih in zaščitnih komponent ter hladilnega sistema v programih Altium Designer in Autodesk Inventor (glej sliko 1) z osrednjim ciljem zmanjševanja razdalj med posameznimi podsklopi in minimizacije parazitnih parametrov sistema. Načrtovanju sistema je sledila izbira komponent, nato izdelava posameznih podsklopov in sestava prototipa ene fazne veje dvonivojskega pretvornika (glej sliko 1).



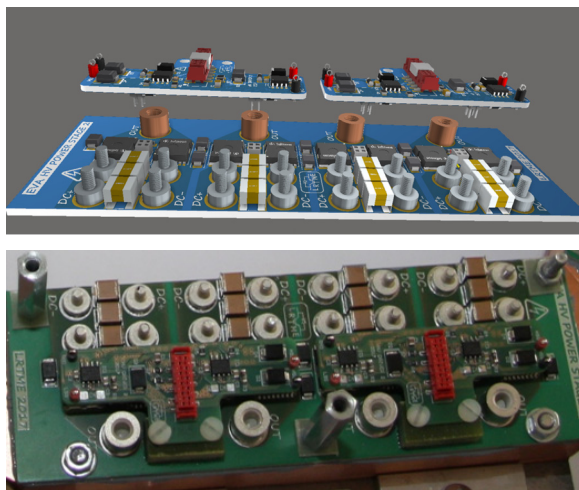
Slika 1. Grafični prikaz prototipa ene faze dvonivojskega pretvornika s štirimi paralelnimi vejami MOSFET stikal. Z leve proti desni so prikazani merilni del, močnostni del in kondenzatorski paket.

Sledilo je testiranje posameznih podsklopov ene fazne veje z naslednjimi osrednjimi cilji: a) ovrednotenje ustreznosti uporabe topologije več paralelnih vej za izbran nivo napetosti in moči, b) ocena uspešnosti minimizacije prenapetosti z izbranimi koncepti optimizacije postavitve komponent in c) evalvacija primernosti izbranega koncepta vodnega hlajenja.

Na podlagi analize omenjenih točk so bili izvedeni popravki nekaterih podsklopov, temu pa je sledilo načrtovanje in izdelava podsklopov večfaznega razsmernika, torej močnostne stopnje z gonilniškim delom, hladilnega sistema, enosmernega vmesnega tokokroga ter krmilne plošče.

2.2.1 Močnostna stopnja z gonilniškim delom

Močnostni del je nameščen na izoliranem metaliziranem substratu (IMS, angl. insulated metal substrate) na aluminijasti osnovi s 105 μm nanosom bakra in je izveden s štirimi vzporednimi vejami s skupno osmimi MOSFET stikali podjetja Infineon (IPT210N25NFD), nazivne napetosti do 250 V (glej sliko 2). Na močnostni del je z zgornje strani možno neposredno namestiti dve gonilniški plošči s skupno 4 gonilniki AU1RS21811S. Pri načrtovanju močnostnega dela je bila posebna pozornost posvečena doseganju majhnih razdalj med elementi in posledično zmanjševanju parazitnih induktivnosti in pripadajočih efektov.

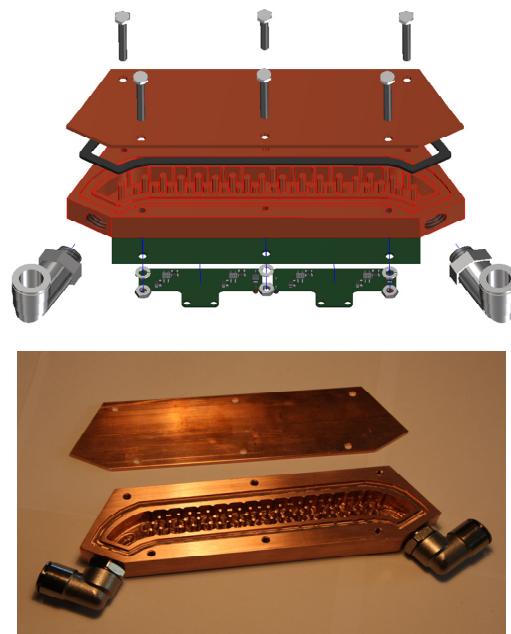


Slika 2. Grafični prikaz (zgoraj) in fotografija (spodaj) močnostnega dela s po dvema gonilniškima ploščama.

Pri načrtovanju gonilniškega dela je bila posebna pozornost posvečena doseganju ustrezne simetrije povezav od priklopa do posameznih gonilnikov, s čimer je zagotovljena čim večja enakost vklopnih trenutkov in posledično delovanja oziroma simetrije vzporedno obratujočih tranzistorskih vej.

2.2.2 Hladilni sistem

Izhajajoč iz podatkov simulacij in termičnih testiranj je bila izvedena posodobitev hladilnih blokov, namenjenih vodnemu hlajenju razsmernika. Načrtani so bili novi hladilni bloki, ki jih je možno simetrično zložiti v heksagon.



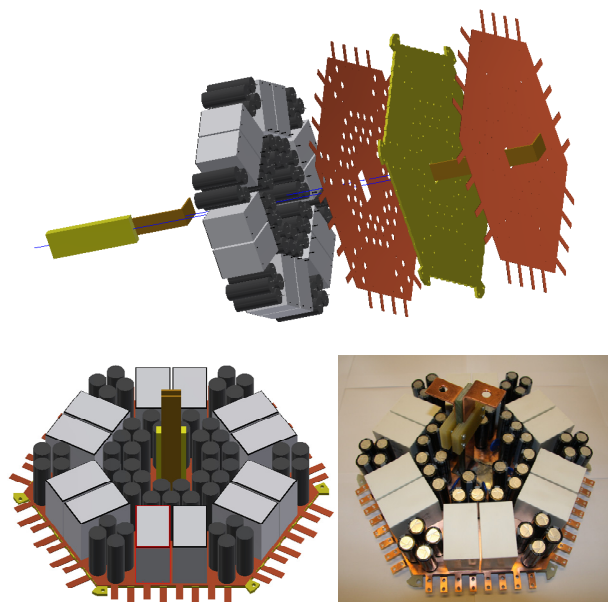
Slika 3. Tridimenzionalni model (zgoraj) in končna izvedba (spodaj) hladilnega bloka z namenskim izrezkanim kanalom za izboljššan odvod toplote.

Prvotna preprosta izvrtina je bila nadomeščena z izrezkanim kanalom z namenski pini, ki povečajo neposredno stično površino vode in bakrenega profila, s tem pa dodatno izboljšajo odvod toplote (glej sliko 3). Za tesnjenje bakrenega profila in pripadajočega bakrenega pokrova so uporabljeni namenski O-ringi

podjetja DIHTA, za priklop vode pa namenski prikloniki (angl. fittingi) podjetja FESTO.

2.2.3 Združeni enosmerni vmesni tokokrog

Ker ima vsaka tranzistorska veja svoj gonilnik je z namenskim krmiljenjem predvidoma mogoče vplivati na valovitost toka enosmernega vmesnega tokokroga. V ta namen je bil izdelan združen enosmerni vmesni tokokrog, ki vključuje vzporedno vezane folijske (KEMET, 60 μF) in elektrolitske kondenzatorje (Rubycon, 560 μF) za nazivne napetosti do 220 V in namenske varistorje za zaščito pred morebitnimi prenapetostmi. Uporabljena je tako imenovana sendvič konstrukcija, s katero zmanjšamo parazitne efekte (glej sliko 4). Skupna kapacitivnost paketa je malo manj kot 30 mF. Folijski kondenzatorji so postavljeni bližje priklonim sponkam razsmernika zaradi večje obremenljivosti in boljšega dušenja povratnih elektromagnetnih motenj. Kondenzatorji so razporejeni v smislu zagotavljanja simetrije posameznih faz. Priklonni priključki so pripravljeni za vijačenje na stebričke močnostnega dela.

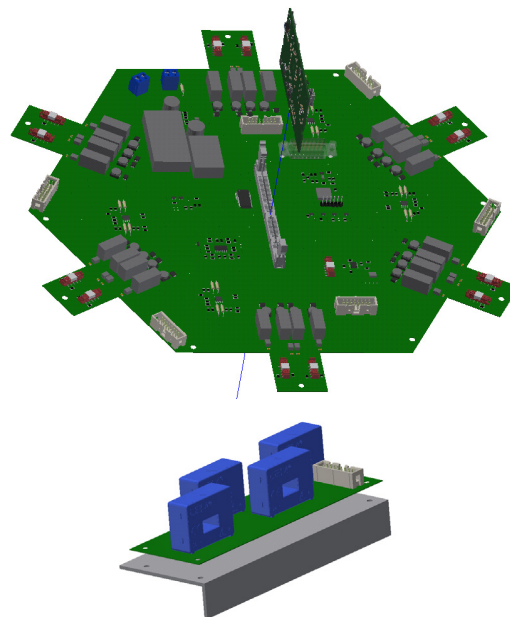


Slika 4. Eksploziran prikaz (zgoraj) tridimenzionalnega modela (spodaj levo) združenega enosmernega vmesnega tokokroga. Končni vzorec kombinacije sivo-belih folijskih in črnih elektrolitskih kondenzatorjev je prikazan spodaj desno.

2.2.4 Krmilna plošča in merilniki toka

Izdelana je bila namenska krmilna plošča z mikrokrmilnikom serije Delfino podjetja Texas Instruments, ki skrbi za napajanje gonilniških plošč in ustrezno krmiljenje sistema (glej sliko 5). Posebna pozornost pri načrtovanju je bila namenjena zagotavljanju dovolj velikega števila signalov za ustrezno krmiljenje posamičnih parov tranzistorskih vej in seveda primerni tokovni zmogljivosti napajalnih povezav ob večji obremenitvi gonilniških vezij. Dodatno je bila upoštevana ločena razporeditev napajalnih in logičnih linij v izogib morebitnim elektromagnetnim motnjam. Pripravljene so bile plošče s po štirimi merilniki toka LEM, ki so namenjene za

merjenje izhodnega toka posameznih vej vsake faze (glej sliko 5). Poglavitni namen je možnost analize ustreznosti vzporedne vezave vej in razporeditve obremenitve razsmernika.



Slika 5. Tridimenzionalna modela krmilne plošče z mikrokrmilnikom Delfino (zgoraj) in plošče z merilniki izhodnega toka LEM (spodaj).

2.2.5 Programska oprema in uporabniški vmesnik

Vzporedno z zadnjo točko je potekala preliminarne priprava regulacijskih algoritmov vodenja omenjenega sistema, ki omogoča neodvisno proženje posameznih parov paralelnih vej. Pripravljen je bil namenski grafični uporabniški vmesnik za preliminarno testiranje različnih načinov obratovanja razsmernika. Ta tematika presega namen članka, zato bralca vljudno vabimo k ogledu podrobnejšega opisa v [19].

3 Sestava in zagon večfaznega razsmernika

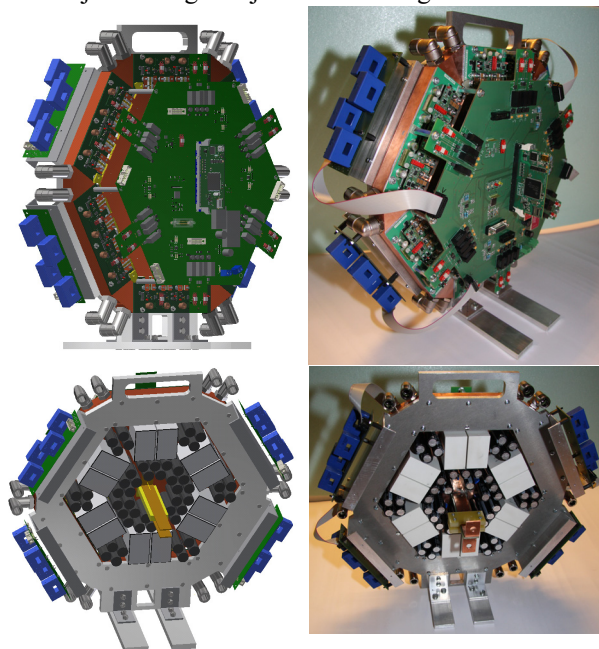
Izdelavi sestavnih podsklopov je sledilo testiranje ustreznosti delovanja posameznih podsklopov, nato pa sestava razsmernika in postopni zagon sistema kot celote (glej sliko 6). Najprej so bili na nosilno ogrodje montirani hladilni bloki s pripadajočimi močnostnimi in gonilniškimi stopnjami. Temu je sledila namestitev enosmernega vmesnega tokokroga, ki je na priključne stebričke vijačen z medeninastimi vijaki. Zatem so bile sistemu dodane še plošče z LEM sondami in končno še krmilna plošča z ustreznimi distančniki.

V prvem koraku je bilo izvedeno testiranje delovanja mikrokrmilnika, preverjena pravilnost vseh krmilnih signalov, nato pa pri nizki napajalni napetosti še pravilnost delovanja tranzistorskih stikal. Sledila je lažja obremenitev in preliminarne meritve napetosti in tokov.

4 Sklepne ugotovitve

Upoštevajoč električno-mehanske zahteve je bil zasnovan in izdelan laboratorijski vzorec 6 – faznega razsmernika z MOSFET stikali. Razsmernik je izdelan kompaktno in razmeroma optimizirano, kljub temu pa omogoča modularnost, nemoteno izvajanje meritev v

laboratorijskem okolju, s čimer predstavlja odlično izhodišče za nadaljnja testiranja in raziskave. Predvideno je nadaljnje delo v sklopu vključitve v postroj z namenskim večfaznim, večsistemskim strojem, kar bo omogočilo oceno ustreznosti različnih principov vodenja, primerjavo uporabe prepletanja vej, različnih močnostnih stikal, itn. Razsmernik lahko namreč zaradi štirih vzporedno vezanih vej v vsaki fazi omogoča delovanje v konfiguraciji do 24 – faznega sistema.



Slika 6. Sprednji (zgoraj) in zadnji (spodaj) pogled na tridimenzionalni model (levo) in končno izvedbo (desno) laboratorijskega vzorca 2 x 3 – faznega razsmernika.

Možnost testiranja bo pomemben korak v smeri spoznavanja in uveljavitve večfaznih pogonov, ki bodo zaradi specifičnih prednosti v prihodnosti lahko imeli velik potencial za uspešno elektrifikacijo glavnih pogonskih sklopov vozil.

Zahvala

Delo sta sofinancirali Republika Slovenija ter Evropska unija v sklopu projekta EVA4green (OP20.00362).

Literatura

- [1] <https://www.greentechmedia.com/articles/read/how-vehicle-electrification-will-evolve-in-2018#gs.oKSpb2o>, dostopano dne 8.6.2018.
- [2] A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mäkeläinen, K. Tammi: Overview of Powertrain Electrification and Future Scenarios for Non-Road Mobile Machinery. *Energies*, 11(5), str. 1184, 2018.
- [3] Y. Yang, K. Arshad-Ali, J. Roeleveld, A. Emadi: State-of-the-art electrified powertrains-hybrid, plug-in, and electric vehicles. *International Journal of Powertrains*, 5(1), str. 1-29, 2016.
- [4] F. Barrero, M. J. Duran: Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—Part I. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 449-458, 2016.
- [5] E. Levi: Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for

multiphase machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 433-448, 2016.

- [6] N. K. Nguyen, F. Meinguet, E. Semail, X. Kestelyn: Fault-tolerant operation of an open-end winding five-phase PMSM drive with short-circuit inverter fault. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1), str. 595-605, 2016.
- [7] S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joós, J. M. Cyr, J. Xu: A dual three-level T-NPC inverter for high-power traction applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(2), str. 668-678, 2016.
- [8] R. Teichmann, S. Bernet: A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(3), str. 855-865, 2005.
- [9] M. Schweizer, T. Friedli, J. W. Kolar: Comparative evaluation of advanced three-phase three-level inverter/converter topologies against two-level systems. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 60(12), str. 5515-5527, 2013.
- [10] L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M. A. Prats: The age of multilevel converters arrives. *IEEE industrial electronics magazine*, 2(2), 2008.
- [11] J. Zhang: High performance control of a three-level IGBT inverter fed ac drive. In *Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95*, vol. 1, str. 22-28, Okt. 1995, IEEE.
- [12] H. Kim, H. Chen, J. Zhu, D. Maksimović, R. Erickson: Impact of 1.2 kv sic-mosfet EV traction inverter on urban driving. In *Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2016 IEEE 4th Workshop on*, str. 78-83, Nov. 2016, IEEE.
- [13] E. Gurpinar, A. Castellazzi: Single-phase T-type inverter performance benchmark using Si IGBTs, SiC MOSFETs, and GaN HEMTs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(10), str. 7148-7160, 2016.
- [14] B. A. Welchko, M. B. de Rossiter Correa, T. A. Lipo: A three-level MOSFET inverter for low-power drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(3), str. 669-674, 2004.
- [15] H. Kernstock, B. Plassnegger: High efficiency soft switched 3-level MOSFET Inverter for an Electric Vehicle PMSM Drive. In *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 15th International*, str. DS1b-9, Sep. 2012, IEEE.
- [16] O. García, P. Zumel, A. De Castro, A. Cobos: Automotive DC-DC bidirectional converter made with many interleaved buck stages. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(3), str. 578-586, 2006.
- [17] A. Rihar, D. Vončina, R. Fišer, H. Lavrič: Primerjava analitičnega in numeričnega izračuna izgubnih moči pri trifaznem razsmerniku z MOSFETi. V: *Proceedings of the Twenty-sixth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2017*, str. 295-298, Sep. 2017, IEEE.
- [18] B. Prah, A. Rihar, D. Vončina: Simulacije in konceptualna zasnova trinivojskega pretvornika. V: *Proceedings of the Twenty-sixth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2017*, str. 291-294, Sep. 2017, IEEE.
- [19] M. Nemec, A. Rihar: Načrtovanje programske opreme za vodenje večfaznega pogona. *ERK 2018*, poslano v objavo, 2018.