

# Analiza močnostnih modulov za učinkovito krmiljenje elektromotorjev

Aleksander Sešek, Tadej Skuber, Janez Trontelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana  
E-pošta: aleksander.sesek@fe.uni-lj.si

## Power module analysis for efficient electric motors driving

**Abstract.** *The paper presents power module analysis for efficient electric motor driving optimization. The optimization bases on correct choice of module substrate, type and number of power elements, their arrangement and thermally efficient design. The main differences in power losses in the case of different number of power transistors on ceramic substrate is presented in the paper, comparing simulation results and measurements on fabricated modules.*

## 1 Uvod

Elektromotorji so dandanes sestavni del vse več osebnih vozil, kmetijskih pripomočkov, gradbene mehanizacije, ipd [1]–[3]. Nepogrešljivi so tudi na področjih kjer veljajo višje zahteve za njihovo natančno delovanje, porabo in povzročanje EMC motenj [4]–[6]. V skladu z vedno višjimi zahtevami po nizki porabi, uporabi novih materialov in inovativnih tehnologij so učinkovitejši in konkurenčnejši elektromotorski pogoni ključni za spodbujanje okolju prijaznejših oblik prometa in industrije [7]–[9]. Učinkovitejši elektromotorji pa za učinkovito delovanje potrebujejo še dodatne komponente. Ena glavnih komponent pri uporabi električnih pogonov je njihov natančni nadzor in krmiljenje. To sestavljata krmilna enota z mikroprocesorjem [10], [11] in močnostni modul [12], ki elektromotorju ustrezno dovaja električno energijo in s tem skrbi za pravilno delovanje po zahtevah upravitelja motorja – bodisi je to industrijska aplikacija ali električni avtomobil.

Za pravilno krmiljenje elektromotorja torej poskrbi krmilna elektronika, ki temelji na mikroprocesorju kateri s pomočjo signalov zunanjih senzoričnih komponent (krmilna palica, stopalka, računalniški program, končno stikalo, ipd) krmili izhodno stopnjo krmilnega sistema, imenovano močnostni modul.

Pri izdelavi močnostnih modulov se srečamo z naprednimi proizvodnimi procesi z visokimi zahtevami glede čistosti, zahtevnega nadzora tehnološkega procesa, bondiranja, spajkanja, površinske obdelave namestitvenih površin za močnostne elemente ter zaščite elektronski modulov pred vplivi okolja.

Bistvo kontrole izdelave in izbire optimalne sestave močnostnega modula je izboljšanje zmogljivosti krmiljenja na več ravneh, kot so dvig izkoristka elektromotorja, zmanjšanje količine vgrajenih elementov, možnost večje preobremenitve tako

elektromotorja, kot tudi krmilne elektronike. Tako optimalna sestava močnostnega modula omogoča uporabo manjših elektromotorjev, kar zmanjša porabo električne energije, zavzame manj prostora in zniža ceno končnega izdelka, prav tako pa omogoča tudi boljšo detekcijo napak in preobremenitve.

V laboratoriju za mikroelektroniko, Fakultete za elektrotehniko UL (LMFE), smo v preteklosti razvili številne module, ki omogočajo učinkovito krmiljenje različnih, za določeno aplikacijo uporabljenih elektro motorjev [13], [14]. Ker so bili močnostni moduli načrtovani za različne nazivne tokove in napetosti, niso uporabni za vse motorske sisteme. Prav tako izkoristek modula in motorja za različne sisteme enakih napetostno/tokovnih parametrov ni optimalen.

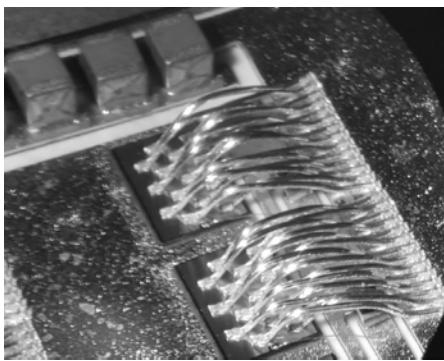
Razvoj močnostne elektronike temelji na substratu, ki je največkrat keramičen [15] in se uporablja pri kompaktnih in visokotemperaturnih aplikacijah. Substrati temeljijo na enoplastni tehnologiji DCB (ang. »direct copper bonding«). Na substratu, na katerem je nanešen baker, srebro ali zlato, se glede na tokovne zahteve namesti polprevodniške krmilne elemente – tranzistorje različnih materialov in tehnologij. Novejši tranzistorji so iz galijevega nitrida (GaN) [16] in silicijevega karbida (SiC) [17], ki prenesejo višje temperature in napetostne obremenitve, vendar zahtevajo kompleksno krmiljenje, tehnologija njihove izdelave pa je kompleksnejša. Zato se v osnovnih razvojnih sistemih uporabljajo najbolj dostopni tranzistorji MOSFET, ki imajo nizke izgube, tehnologija njihovega krmiljenja pa je enostavnejša in že zelo razvita [18].

V LMFE smo izvedli simulacije z uporabo različnega števila močnostnih elementov in ugotavljali optimalno izbiro za določen električni motor. Načrtali in izdelali smo tudi prototipni močnostni modul z močnostnimi tranzistorji, na katerem smo izvedli osnovne meritve segrevanja. V članku so najprej predstavljeni rezultati simulacij za module, pri katerih so bili uporabljeni 1, 2, 3 in 4 močnostni tranzistorji in uporabljen vodni hladilni sistem. Predstavljeni so tudi simulacijski rezultati segrevanja teh modulov, ki je posledica trošenja moči zaradi izgub. V ločenem podglavju so predstavljene tudi meritve modula z močnostnimi tranzistorji, kjer je poudarek na slabem odvajanju toplote zaradi nekvalitetnega hladilnega sistema.

## 2 Močnostni modul in izgube

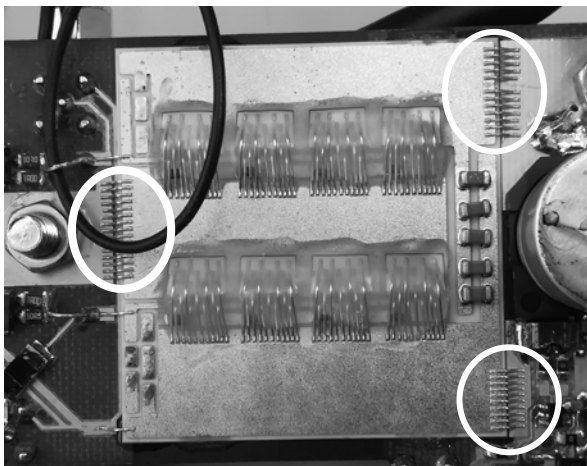
Poudarek pri predstavljenih simulacijah je na prikazu spremembe velikosti izgub pri uporabi različnega števila močnostnih elementov. Izbira števila močnostnih

elementov je nekakšen kompromis med nazivno vrednostjo toka, ki jo močnostni element lahko prenese, velikostjo termičnih izgub na elementu (ki je posledica treh parametrov, ki bodo prestavljeni v nadaljevanju) ter seveda cene modula. Velikost in oblika modula je v prvi vrsti prilagojena razpoložljivemu prostoru ob motorju, hladilniku ter načinu priklopa, ter seveda številu tranzistorjev na fazo pogona. To število se giblje od 1 pa tja do 12 močnostnih tranzistorjev – 6 za vsako smer toka. V LMFE razvijamo module, ki delujejo na principu mostiča torej smer toka razumemo kot prevodno pot od pozitivnega napajanja do motorske faze ter od faze pa do negativnega napajanja oziroma ozemljitve.



Slika 1. Močnostni tranzistorji na modulu povezani z aluminijasto bondirno žico - bondom

Na sliki 1 vidimo spodnji del modula in sicer je ponor tranzistorjev prispajkan [19] na bakreni fazni vodnik na keramičnem modulu in povezan na bakreni vodnik negativnega napajanja z aluminijastimi bondirnimi žicami. Posebej je povezan tudi krmilni priključek tranzistorja, vendar s tanjšo bondirno žico. Tak sistem – baker-spajka-tranzistor-bond-baker predstavlja osnovo za izračun izgub na modulu. Poleg predstavljene tokovne poti pa moramo povezati tudi modul na glavni napajalni priključek, kar prav tako storimo z močnostnimi bondi, kot je prikazano na sliki 2.

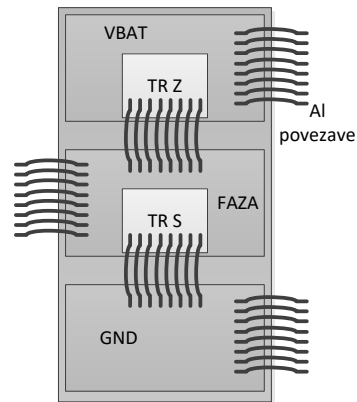


Slika 2. Močnostne povezave na napajalne priključke in fazni vodnik (označeno s krogi)

Na sliki 2 lahko vidimo zaščitno plast na močnostnih modulih, ki preprečuje korodiranje, oksidacijo in vnos delcev med povezave, hkrati pa poslabša hlajenje elementa.

## 2.1 Simulacije modulov

Simulacije za oceno izgub so bile narejene z uporabo 24V tranzistorjev, z maksimalnim dovoljenim tokom 100A ter zelo učinkovitim vodnim hladilnim sistemom. Sistem smo razdelili na 5 skupin in sicer zgornja bakrena povezava VBAT, srednja fazna povezava FAZA, spodnja povezava GND ter dva tranzistorja, TR Z ter TR S. Sistem je prikazan v blok diagramu na sliki 3.



Slika 3. Blok diagram uporabljen za oceno izgub

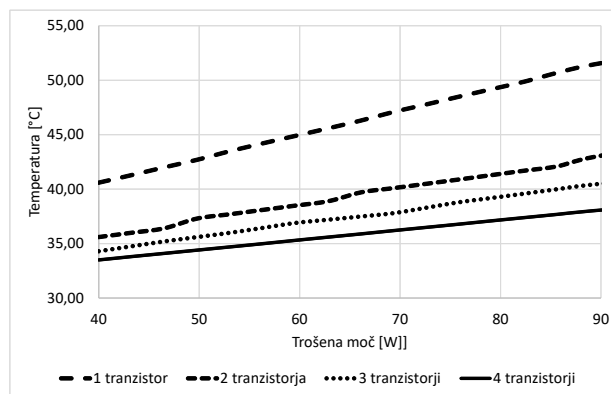
Za izgube VBAT štejejo izgube na bakreni povezavi VBAT, vključno z izgubami na bondih za dovod baterijskega napajanja. Za izgube na priključku FAZA se upoštevajo izgube na bakreni povezavi, bondih na motorni priključek ter na tranzistorjskih TR Z bondih. Izgube na GND vključujejo bakreno povezavo GND ter dve seriji bondov na negativni priključek baterije ter na tranzistor TR S. Rezultati simulacij s tokom 100A po fazi so zbrani v tabeli 1.

Tabela 1: Izgube po sklopih

Št. tranzistorjev	1	2	3	4	
VBAT izgube [W]	0,71	0,76	0,75	0,80	
FAZA izgube [W]	2,51	1,64	1,53	1,30	
GND izgube [W]	2,24	1,61	1,32	1,26	
TR Z izgube [W]	diodne	6,56	3,82	2,64	2,2
	stikalne	1,90	1,28	1,5	1,28
	kanal	6,36	3,18	2,07	1,6
	<b>skupaj</b>	<b>14,83</b>	<b>8,28</b>	<b>6,24</b>	<b>5,08</b>
TR S izgube	diodne	6,51	3,92	2,58	2,16
	stikalne	1,90	1,5	1,62	1,44
	kanal	6,29	3,12	2,04	1,64
	<b>skupaj</b>	<b>14,70</b>	<b>8,54</b>	<b>6,24</b>	<b>5,28</b>

V tabeli 1 so izgube po sklopih definirane za različno število tranzistorjev, kjer so tranzistorske izgube nadalje razdeljene na izgube zaradi preklpov (stikalne), izgube zaradi upornosti kanala (kanal) ter zaradi toka preko diode, kadar je tranzistor zaprt – induktivno breme (diodne). Iz tabel je razvidno, da se z uporabo več tranzistorjev izgube manjšajo, ker se tok porazdeli po tranzistorjih in bondih. Raziskave, ki smo jih opravili v preteklosti, pa so pokazale, da je uporaba petih tranzistorjev ali več nesmiselna, ker je cenovno in prostorsko neugodna, prav tako pa ne doprinese več veliko k skupnem zmanjšanju izgub.

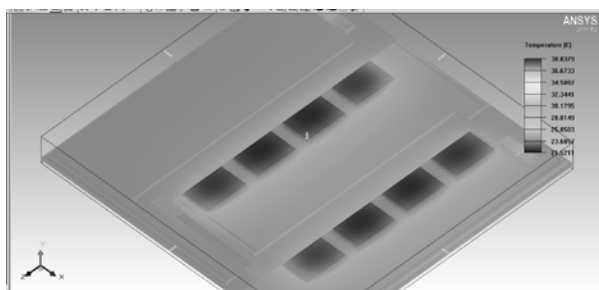
Predstavljene izgube se seveda odražajo kot gretje modula. Zato je ena od pomembnejših nalog načrtovalca sistema poskrbeti za odvajanje toplote z ustreznim hladilnim sistemom. Za predstavljene rezultate smo uporabili zelo učinkovit hladilnik z vodnim hlajenjem. Na sliki 4 so prikazane krivulje gretja modula ob uporabi različnega števila tranzistorjev.



Slika 4. Temperaturne krivulje različnih modulov

Kot vidimo, se moduli pri istem vhodnem toku segrejejo precej bolj če uporabljamo en tranzistor ali pa štiri. Razmerje izgub se ujema s prejšnjimi simulacijami. Z uporabo štirih tranzistorjev dosežemo zmanjšanje temperature za 19 stopinj, še vedno pa je pomembno dobro odvajanje toplote preko hladilnika.

Simulacije so bile opravljene v programskem okolju Ansys. Na sliki 5 je predstavljena termična slika modula v podprogramu Icepack.



Slika 5. Simulacija segrevanja modula s štirimi tranzistorji v okolju Ansys Icepack

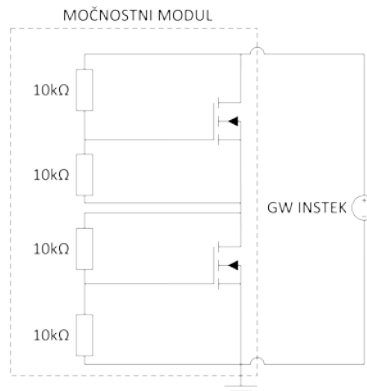
V simulaciji smo modul obremenili z 200A. Pričakovana moč, ki naj bi se trošila na hladilniku, je bila 100W. Hladilno telo, na katero je modul nameščen, je bilo ohlajeno na 30°C. Kot vidimo, se močnostni

tranzistorji segrejejo na 39°C. Prav tako smo pri simulacijah ugotovili, da se kvocient razmerja temperatur 1:1,3 ohranja. Torej bi se v primeru, da ne uspemo ohranjati 30°C na hladilniku, ampak 50°C, kar je bolj realno, temperatura močnostnih elementov dvignila na 65°C. Nizka razlika v temperaturi je posledica dobrega odvajanja toplote.

Da bi potrdili termične izgube na spoju substrat-spajka-tranzistor, smo izdelali prototip modula, ki je predstavljen v naslednjem poglavju.

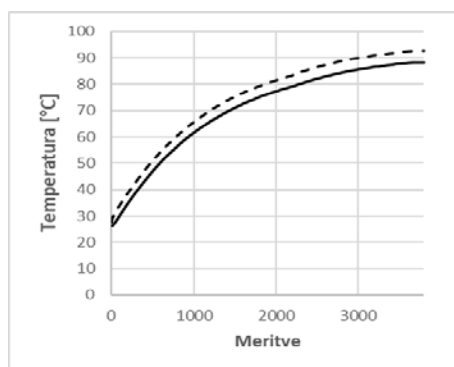
## 2.2 Meritve modula

Za meritve termičnih izgub smo tranzistorje priključili, kot kaže shema na sliki 6.



Slika 6. Shema testne priključitve modula

Modul je bil nameščen na majhno hladilno telo brez prisilnega vpihovanja, zato smo pričakovali močno segrevanje, prav tako pa so tranzistorji na sliki 6 vedno odprti in predstavljajo le ohmsko breme (stikalnih in diodnih izgub tu ni). Modulu smo dovajali dovolj toka, da se je na njem trošilo 20W moči. Krivulja segrevanja je prikazana na sliki 7.



Slika 7. Temperaturni krivulji za tranzistor in za hladilnik

Meritve, prikazane na sliki 7, so bile opravljene vsako sekundo, v času ene ure. Kot vidimo, se tako modul kot hladilnik segrevata in na koncu dosežeta stacionarno stanje, in sicer je tranzistor segret na 92,7°C, hladilnik pa na 88,3°C. Razlika 4,4°C nam pove, da se toplota preko substrata in spajke slabše odvaža, kot bi želeli, predvsem je problem v stiku substrat - hladilnik, kjer se toplota prevaja preko tankega sloja termične paste, ki ni idealna, prav tako se površini popolnoma ne prilegata. Hladilnik uporabljen v tem primeru, je premajhen in nima dodatnega hlajenja.

### 3 Povzetek

Članek je povzel rezultate simulacij močnostnih modulov, kjer smo želeli predstaviti termične razmere pri uporabi različnega števila močnostnih elementov ter uporabe učinkovitega hlajenja. Meritve na prototipnem modulu s slabim hlajenjem so pokazale, da se temperatura zlahka dvigne čez 90°C že pri izgubah 20W, medtem ko se po simulacijah sodeč lahko temperaturo z učinkovitim hlajenjem zadrži precej nižje. Naslednji korak je testiranje modula z enakim hladilnikom kot je simulirani, da se potrdi simulacijske rezultate. Prispevek je del večjega projekta izdelave ekspertnega sistema, ki bo omogočal izbiro idealnega sestava za krmiljenje električnih motorjev.

### 4 Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo Ministrstvu za izobraževanje, znanost in šport za sofinanciranje projekta: »Učinkovitejši elektromotorji z razvojem ekspertnega sistema in novih tehnologij (MOTZART)«, v okviru operativnega programa za izvajanja evropske kohezijske politike v obdobju 2014-2020.

### Literatura

- [1] 'Electric Motors for Electric Vehicles 2013-2023: Forecasts, Technologies, Players: IDTechEx', Mar. 04, 2013. <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-2013-2023-forecasts-technologies-players/344> (accessed Sep. 03, 2020).
- [2] M. Bloom, 'The Brushless DC Motor and Its Use in Electric Cars'. <http://buildipedia.com/aec-pros/design-news/the-brushless-dc-motor-and-its-use-in-electric-cars> (accessed Sep. 03, 2020).
- [3] E. Adams, 'The Secrets of Electric Cars and Their Motors: It's Not All About the Battery, Folks', *The Drive*. <https://www.thedrive.com/tech/17505/the-secrets-of-electric-cars-and-their-motors-its-not-all-about-the-battery-folks> (accessed Sep. 03, 2020).
- [4] 'Brushless dc Motors in Medical Applications', *Machine Design*, Jun. 02, 2009. <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21829410/brushless-dc-motors-in-medical-applications> (accessed Sep. 03, 2020).
- [5] 'Motors and Drives for Advanced Prosthetics'. <https://www.electrocrafter.com/motors-for/medical/advanced-prosthetics/#product-cats> (accessed Sep. 03, 2020).
- [6] 'Motors and Drives for Surgical Robots - ElectroCraft'. <https://www.electrocrafter.com/motors-for/medical/surgical-robots/#product-cats> (accessed Sep. 03, 2020).
- [7] 'Advantages of DC motors in industrial applications', *Control Global*. <https://www.controlglobal.com/blogs/guest-blogs/advantages-of-dc-motors-in-industrial-applications/> (accessed Sep. 03, 2020).
- [8] J. A. Tudor and D. M. Platt, 'The application of electric motors in the pulp and paper industry', *Electrical*

- Engineering*, vol. 71, no. 1, pp. 31-35, Jan. 1952, doi: 10.1109/EE.1952.6437885.
- [9] B. R. Shover, 'The industrial application of the electric motor, as illustrated in the gary plant of the Indiana steel company', *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 28, no. 3, pp. 185-230, Mar. 1909, doi: 10.1109/PAIEE.1909.6660243.
- [10] J. Podržaj, A. Sešek, and J. Trontelj, 'Intelligent power MOSFET driver ASIC', in *2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO*, May 2012, pp. 107-111.
- [11] R. Vrtovec and J. Trontelj, 'Advanced gate control system for power MOSFET switching losses reduction with complete switching sequence control', *Informacije MIDEEM*, vol. 46, no. 4, p. 12, 2016.
- [12] J. Podržaj and J. Trontelj, 'Optimized selection of materials and components for power module realization', *Informacije MIDEEM*, vol. 40, no. 3, pp. 178-182, 2010.
- [13] I.-I. informacijskih znanosti Maribor, 'Motor driver power stage/module simulation; Elektronski vir'. <https://plus.si.cobiss.net/opac7/bib/12217940> (accessed Aug. 26, 2020).
- [14] 'Design consideration for power modules of electro-motor drives'. <http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-847E8821> (accessed Sep. 03, 2020).
- [15] 'Optimized selection of materials and components for power module realization'. <http://www.dlib.si/details/URN:NBN:SI:doc-RBD3NT0D> (accessed Sep. 03, 2020).
- [16] I. T. AG, 'GaN - HEMT, Gallium Nitride Transistor - Infineon Technologies'. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/gan-hemt-gallium-nitride-transistor/> (accessed Aug. 27, 2020).
- [17] I. T. AG, 'Silicon Carbide, MOSFET Discretes - Infineon Technologies'. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/discretes/> (accessed Aug. 27, 2020).
- [18] I. T. AG, 'OptiMOS and IRFET - Latest Family Selection Guide - Infineon Technologies'. <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/12v-300v-n-channel-power-mosfet/optimos-and-strongirfet-latest-family-selection-guide/> (accessed Aug. 27, 2020).
- [19] A. Seseek, O. Chambers, and J. Trontelj, 'Study on the Die-Attach Voids Distribution With X-Ray and Image Processing Techniques', *J. Electron. Packag.*, vol. 141, no. 2, Jun. 2019, doi: 10.1115/1.4042804.