

Študija primera prehajanja toplote pri IMS tiskanih vezjih

Jan Novak¹, Danjel Vončina¹, Andraž Rihar¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani
E-pošta: andraz.rihar@fe.uni-lj.si

Case study of heat transfer of an insulated metal substrate (IMS) printed circuit board

Poor heat transfer design is a common reason for failure of modern power converters. Where good heat transfer in printed circuit boards (PCBs) is crucial, flame retardant 4 (FR4) material stack is replaced by the insulated metal substrate (IMS) concept due to its heat transfer coefficient superiority. The paper presents a case study of heat transfer of an IMS PCB. Steady-state thermal simulation models of a transistor leg PCB with different levels of details were designed in Ansys program environment and were used to study the properties of different dielectric insulation materials, as well as their effects on the thermal conditions of the PCB. Furthermore, experimental measurements were performed with an in-house-built temperature-controlled chamber. Comparison of simulation and experimental results was performed and was used for improvement of the designed simulation models. Simulation results deviate from experimental ones up to 10 %, which is satisfactory when taking into account the implemented level of details.

1 Uvod

Osrednje smernice pri izdelavi novodobnih močnostnih pretvornikov predstavljajo visok izkoristek, visoka gostota moči, posledično pa potreba po kompaktnosti ter elektromagnetni kompatibilnosti. Zagotavljanje dobrega prenosa oziroma odvoda toplote je v takih napravah bistveno za doseganje nazivnih karakteristik. Ključen vir toplote so izgubne moči na močnostnih stikalih ter izgube v pasivnih komponentah, kot so dušilke in kondenzatorji [1]. Za hlajenje tovrstnih naprav načrtovalci izkoriščajo pasivno ali prisilno zračno hlajenje, kot tudi različne tehnike tekočinskega hlajenja (voda, glikol, itn.) pri sistemih z najvišjo želeno stopnjo kompaktnosti.

S pojavom površinsko nameščenih komponent (angl. SMD - surface-mount device) se je fokus izboljšanja zmogljivosti hlajenja pričel seliti od zunaj navznoter oziroma z optimizacije načrtovanja klasičnih hladilnih reber [1] proti optimizaciji prenosa in odvoda toplote po samem tiskanem vezju (angl. PCB - printed circuit board) [2] in vse do inovativnih rešitev, kot je vgradnja komponent v PCB (angl. PCB-embedding) [3]. V sklopu tega je izrednega pomena ustrezno načrtovanje odvoda toplote po posameznih slojih. Običajna tiskana vezja so večslojna

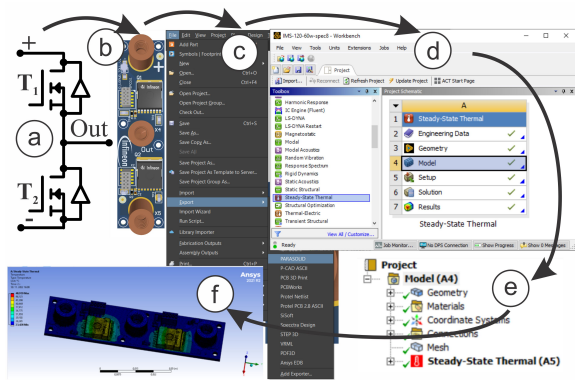
in vključujejo sitotisk (lak), spajkalno masko, sloj bakra in substrat. Kot substrat se najpogosteje uporablja steklena vlakna oziroma t.i. FR4 material. Izboljšanje odvoda toplote načrtovalci dosežejo z vgradnjo namenskih termičnih skoznjih lukenj (vij) [4]. Vedno pogosteje se pri močnostnih pretvornikih večjih moči uporablja koncept izoliranega metaliziranega substrata (angl. IMS - insulated metal substrate), ki sestoji iz sitotiska, sloja bakra, dielektrika in kovinskega substrata (na primer aluminij, baker, itn.). Slednji sloj lahko pomembno izboljša zmožnost odvoda toplote in tudi toplotno kapaciteto, so pa termične karakteristike takega tiskanega vezja neposredno pogojene predvsem s termičnimi lastnostmi sloja dielektrika, ki jih opisuje faktor toplotne prevodnosti [5].

Na področju izboljšanja odvoda toplote srečujemo več principov analize prenosa toplote in sicer: i) analitični pristop, ii) numerični pristop, ter iii) eksperimentalni pristop. V luči želje po hitrem prototipiranju in izboljšanjem nadzoru nad napravo prek zasnove digitalnih dvojčkov, pogostost uporabe analitičnega ter numeričnega pristopa v zadnjem času drastično narašča.

Zhang *et al.* tako opisujejo analitičen način za oceno porazdelitve toplote po 4-slojnem PCB-ju preko izračuna nadomestnih termičnih upornosti s pomočjo nadomestnih modificiranih Besslovih funkcij prvega in drugega reda, pri čemer rezultate validirajo eksperimentalno s FLIR termovizijsko kamero [6]. Postopek izračuna se zdi ustrezen za manjša vezja z enim ali nekaj integriranimi vezji, medtem ko je za kompleksnejša tiskana vezja predolg in premalo natančen.

Primerov numerične analize je v literaturi več. Andonova *et al.* za analizo termične prevodnosti 2- in 4-slojnega PCB-ja uporabijo program Flotherm, rezultate pa validirajo eksperimentalno z infrardečo termografijo [7]. Pogosto uporabljan program za numerično oceno termične slike je programsko okolje Ansys. Sedlář *et al.* opišejo zmogljivosti Ansys orodij za analizo FR-4 PCB-ja [8], Xun *et al.* ocenijo termične upornosti MOSFET-a [9], Thepsut *et al.* pa predstavijo rezultate numeričnih simulacij za oceno porazdelitve toplote po več PCB-jih znotraj enega ohišja [10] in se pri tem osredotočajo na vpliv postavitve PCB-jev.

Pregled literature pokaže, da je uporabnost orodij Ansys za analizo termične slike FR-4 PCB-jev ustrezna, raziskav na temo numeričnih simulacij prehajanja toplote v



Slika 1: Delovni proces od električne sheme (a) do 3D modela PCB-ja (b), ki je izvožen iz programa Altium (c) v Ansys Workbench (d), kjer je v okviru Steady-State Thermal analize (d in e) izračunana termična slika IMS PCB-ja (f).

IMS PCB-jih pa je razen analize LED struktur [11] malo.

Pričujoči članek se zato osredotoča na oceno prenosa toplote na vzorčnem tiskanem vezju z IMS tehnologijo z več različnimi dielektriki. Z namenom zapolnitve vrzeli na omenjenem področju je v sklopu predstavljene študije pripravljen simulacijski model IMS PCBja, validacija rezultatov pa je predvidena s pomočjo eksperimentalnih meritev.

2 Metodologija

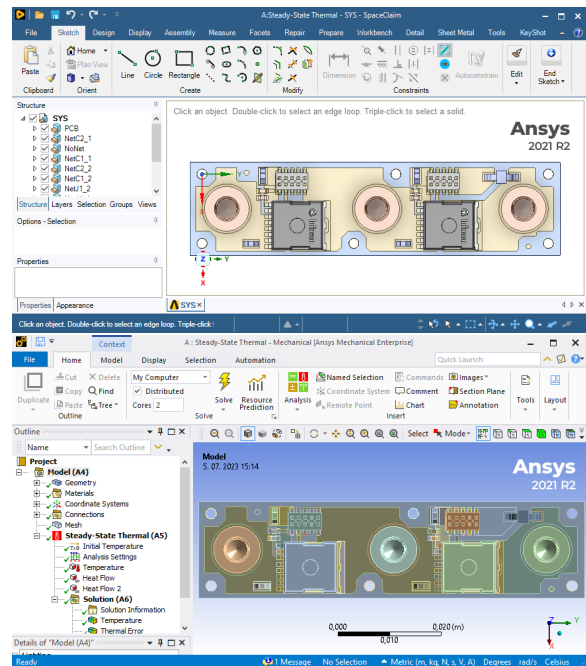
2.1 Programski paket Ansys

Za izdelavo simulacij smo uporabili programski paket ANSYS Workbench (sklop Mechanical) 2021 R2 (slika 1), ki je v industriji in akademskem svetu eden vodilnih in najrazvitejših simulatorjev z metodo končnih elementov. Ta omogoča vrsto različnih mehanskih in termičnih simulacij tako v ustaljenem stanju, kot z vidika prehodnih pojavov. Glede na to, da nas je zanimalo predvsem prehajanje toplote v vezju v stacionarnem stanju, smo v Ansys-u izbrali možnost Steady-State Thermal analize.

Izbiri vrste simulacije sledi vnos glavnih nastavitvev. Program ponudi nov meni (slika 1), v katerem lahko intuitivno sledimo posameznim zavihkom in nastavitvam:

i) Engineering Data - nastavimo povezave do že shranjenih knjižnic materialov programskega paketa Ansys. Dodamo in uredimo lahko lastne knjižnice materialov.

ii) Geometry - omogoča izris lastne strukture poenostavljenega tiskanega vezja (sklop SpaceClaim - slika 2) ali uvoz geometrije iz drugih urejevalnikov (Autodesk Inventor, Altium Designer, itn.). V sklopu študije je bil 3D model tiskanine pripravljen v Altium-u, zato smo geometrijo izvozili v formatu .x_t (Parasolid - slika 1), ki omogoči prenos vseh podrobnosti in v sestavu obdrži posamezne komponente kot lastna telesa. To je ključno za nadaljnjo obravnavo modela v simulaciji, saj lahko tako model v programu SpaceClaim naknadno popravimo. V sklopu študije smo izvoženi model rahlo prilagodili (nastavitvev ustrezne debeline izolatorja, aluminija in bakra) za posamične IMS variante.



Slika 2: Posnetek zaslona orodij SpaceClaim (a) in Mechanical (b). V sklopu menija so prikazani koraki nastavitve analize (Model, Mesh, Solution, itn.).

iii) Model - program odpre sklop Mechanical (slika 2), kjer pregledamo geometrijo, nastavimo materiale, koordinatne sisteme in mrežo končnih elementov (angl. Mesh). Možna je avtomatska ali ročna priprava mreže.

iv) Setup - sledi nastavitvev Steady-State Thermal analize, kjer izberemo začetne pogoje, podrobnosti analize in principe temperaturnih vplivov (Heat Flow, Radiation, itn.). Začetna temperatura komponent (angl. Initial Temperature) in temperatura spodnje plošče aluminija, ki predstavlja trden potencial oz. ki se ne spreminja s segrevanjem (angl. Temperature) sta nastavljeni na 25 °C.

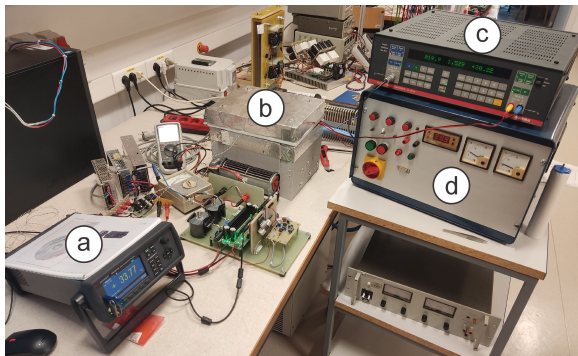
v) Solution - analizo požemo s Solve, v zavihku Solution pa lahko dodajamo parametre, ki jih bomo opazovali, na primer razporeditev temperature v stacionarnem stanju kot izris modela z barvnim kodiranjem (Temperature), vrednost temperature na površini s temperaturnimi sondami (Probe), itn. Sondo smo postavili na zgornjo vdolbino tranzistorja.

vi) Results - tu si lahko ogledamo izbrane rezultate.

2.2 Pripravljeni simulacijski modeli

V sklopu študije je bilo sosedno pripravljenih več simulacijskih modelov. V prvem koraku (model #1) je bil z avtomatsko pripravo mreže izdelan osnovni simulacijski model, ki je vključeval osnovni 3D model PCB-ja, izvožen iz programa Altium. Vira toplote (angl. Heat Flow) smo postavili na spajkalni očesci (vir in ponor) MOSFET tranzistorjev IPT210N25NFD v TOLL ohišju ter vsako spajkalno očesci obeh tranzistorjev greti z močjo 15 W (skupno 60 W).

Avtomatsko generirana mreža je dala pregrobo rezultate, zato smo nadalje mrežo končnih elementov ročno zgoščili z manjšanjem velikosti elementov (model #2).



Slika 3: Eksperimentalna postavitve prikazuje napravo za zajem podatkov (a), temperaturno regulirano komoro (b), analizator moči (c) in enosmerni napajalnik (d).

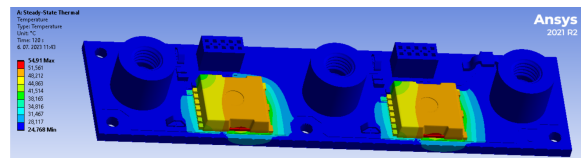
Predhodne raziskave [12] ugotavljajo, da v staljeni spajki debelin reda velikosti $100\ \mu\text{m}$ nastajajo mehurčki (angl. voids), ki občutno zmanjšajo toplotno prevodnost kontakta, zato smo v naslednjem koraku v model na spajkalna očesca dodali $100\ \mu\text{m}$ plast spajke (model #3).

Ob preučitvi rezultatov prenosa toplote po modelu tranzistorja smo ugotovili, da model tranzistorja s preprostim ohišjem in ploščatimi spajkalnimi očesci ni povsem realen. Na podlagi mikroskopskih posnetkov prerezanega fizičnega tranzistorja smo s pomočjo kljunastega merila izdelali nadgrajen model tranzistorja (model #4), ki je vključeval tudi bondirane povezave med pini ponora in silicijevo rezino. Pripravljenih je bilo več kopij simulacijskega modela, po ena za vsako izvedbo PCB-ja z dielektriki s sledečimi faktorji toplotne prevodnosti λ (podano s strani proizvajalca: spec1 - $2\ \text{W/mK}$ in debelina dielektrika $100\ \mu\text{m}$, spec6 - $4\ \text{W/mK}$ in $120\ \mu\text{m}$, spec7 - $11,1\ \text{W/mK}$ in $120\ \mu\text{m}$, spec8 - $5,7\ \text{W/mK}$ in $120\ \mu\text{m}$).

2.3 Eksperimentalni del

Osrednji cilj eksperimentalnega dela študije je validacija rezultatov simulacij na podlagi toplotne slike pri dejanskem vezju. V ta namen smo izvedli meritve temperature tiskanega vezja v dveh točkah med toplotno obremenitvijo. Za nastavljanje delovne točke in elegantno izvedbo meritev z ustrežno ponovljivostjo in točnostjo smo uporabili namensko zgrajeno temperaturno regulirano komoro [13] (slika 3). Ta s pomočjo kompresorskega sistema za odvajanje večjih toplotnih moči, toplotno izolirane komore in regulirano napajanih Peltierjevih elementov vzdržuje konstantno temperaturo referenčne plošče z možnostjo finega nastavljanja delovnih točk.

MOSFET tranzistorja smo električno oziroma posredno prek izgubnih moči ob prevajanju vgrajene diode toplotno obremenili tako, da smo v električno vezje pošiljali skupno toplotno oz. električno moč $60\ \text{W}$. Moč, tok in napetost smo merili z analizatorjem moči AC/DC Power Analyzer D 5235. Meritev in zajem temperatur smo izvedli s tremi termočleni tipa T in sistemom Data Acquisition System DAQ970A podjetja National Instruments. Uporabljena je bila avtomatska meritev s sprožitvijo na $2\ \text{s}$ in 60 izmerjenimi vzorci. Termočlene smo pritrdili



Slika 4: Toplotna slika simulacijskega modela IMS PCB-ja (spec1) ob obremenitvi z močjo $60\ \text{W}$ v ustaljenem stanju.

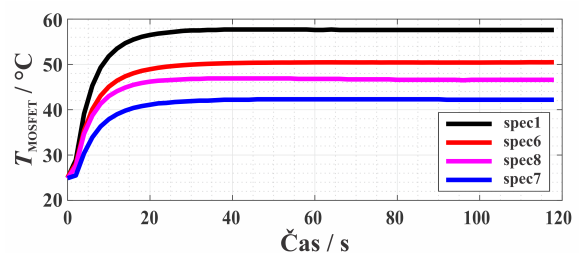
na tranzistor in testno točko s pomočjo termo paste, ki je poleg boljšega toplotnega stika zagotovila tudi mehan-ski sklop termočlena in merjenca. Tretji termočlen se je nahajal na referenčni, temperaturno regulirani plošči.

3 Rezultati in razprava

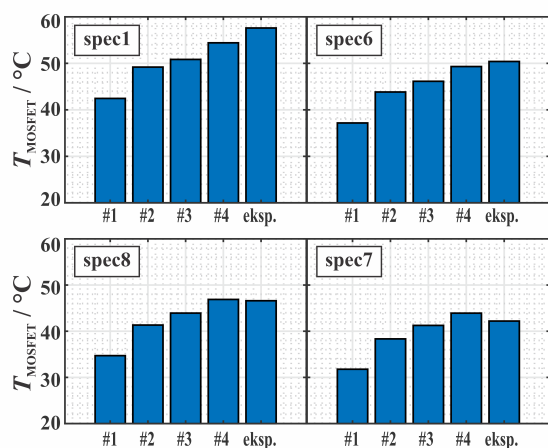
Rezultati simulacij so bili v prvi fazi analizirani v sklopu programskega orodja Ansys in kažejo, da se zaradi superiorne toplotne prevodnosti PCB-ja v primerjavi z zrakom iz okolice toplota širi od vira (silicijeve rezine in bondirane povezave znotraj tranzistorjev) delno po ohišju tranzistorja, večinsko pa navzdol proti spajki in po tiskanini (glej sliko 4). Del toplote se širi po bakru, večina pa navzdol skozi dielektrik proti aluminijevemu substratu.

Rezultati zajema temperatur tekem eksperimentalnih meritev so bili izvoženi v programsko okolje MATLAB, kjer je bil v prvi fazi pripravljen izris časovnih potekov temperatur površine tranzistorjev za vse 4 izmerjene PCB-je (slika 5). Rezultati lepo pokažejo karakter prehodnega pojava segrevanja PCB-ja, kot tudi situacijo v stacionarnem stanju. Izvrstno se vidi inverzno sorazmerna povezava med faktorjem toplotne prevodnosti dielektrika λ in končno temperaturo površine tranzistorjev T_{MOSFET} .

Izvedeni so bili simulacijski teki za 4 izvedbe PCB-ja s toplotno obremenitvijo $60\ \text{W}$. Relevantne temperature simulacijskih tekov so bile izvožene v MATLAB, kjer je bila izvedena primerjava z rezultati meritev. Rezultati pokažejo, da se vrednosti temperature površine tranzistorja z vsako iteracijo simulacijskega modela bolj približajo eksperimentalno izmerjenim temperaturam. Že z nekaj dodanimi podrobnostmi lahko tako rezultate simulacijskega modela približamo eksperimentalno določenim vrednostim na manj kot $10\ \%$, kar se zdi zelo zanimivo predvsem z vidika hitrega prototipiranja in pripadajočih analiz.



Slika 5: Časovni poteki temperatur površine MOSFET-a za 4 vzorce PCB-jev pri toplotni obremenitvi $60\ \text{W}$.



Slika 6: Primerjava temperatur površine MOSFET-a za različne iteracije simulacijskih tekov (#1–#4) in eksperiment za 4 vzorce PCB-jev pri toplotni obremenitvi 60 W.

4 Sklepne ugotovitve

Rezultati potrjujejo ustreznost pripravljenih simulacijskih modelov in še posebej smiselnost vpeljave razmeroma preprostih nadgradenj v 3D model PCB-ja, izvožen iz programskega okolja Altium. Potrdijo tudi pričakovane povezave faktorja toplotne prevodnosti dielektrika in temperatur površine tranzistorjev in osvetljuje osrednje principe porazdelitve in prenosa toplote v IMS PCB-ju.

Tekom študije se je kot bistvena omejitev izkazala velikost pomnilnika računalnika, saj le-ta lahko omejuje nastavljanje velikosti gradnikov mreže. Na točnost simulacijskih in eksperimentalnih rezultatov ima vpliv tudi uporabljena termalna pasta, ki v modelih ni upoštevana. Dodatno je bilo nekaj lastnosti materialov (na primer toplotna prevodnost ohišja tranzistorja in spajke) le strokovno ocenjenih.

V sklopu nadaljnjega dela predvidevamo natančnejše modeliranje posameznih materialov in dodatno povečanje gostote mreže. Predvidena je uporaba zasnovanega modela v kosimulaciji z električnim vezjem, s čimer bi lahko točneje napovedovali izgube vezja pri napovedanih temperaturah v določeni delovni točki.

Zahvala

Delo sofinancira ARIS (programska skupina P2-0258).

Literatura

- [1] S. Jones-Jackson, R. Rodriguez, Y. Yang, L. Lopera, in A. Emadi, "Overview of current thermal management of automotive power electronics for traction purposes and future directions," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, let. 8, št. 2, str. 2412–2428, 2022.
- [2] S. Mohan, "Thermal Comparison of FR-4 and Insulated Metal Substrate PCB for GaN Inverter," *Application Report, Texas Instruments: Dallas, TX, USA*, str. 1–11, 2019.

- [3] K. Wang, Z. Qi, F. Li, L. Wang, in X. Yang, "Review of state-of-the-art integration technologies in power electronic systems," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, let. 2, št. 4, str. 292–305, 2017.
- [4] S. Dusmez, Y. Xie, M. Beheshti, in P. Brohlin, "Thermal Considerations for Designing a GaN Power Stage," *Application Report, Texas Instruments: Dallas, Tx, USA*, str. 1–13, 2018.
- [5] D. Zhao, X. Qian, X. Gu, S. A. Jajja, in R. Yang, "Measurement techniques for thermal conductivity and interfacial thermal conductance of bulk and thin film materials," *Journal of Electronic Packaging*, let. 138, št. 4, str. 1–64, 2016.
- [6] W. Zhang in G. Feng, "A quick PCB thermal calculation for power electronic devices with exposed pad packages," v *PCIM Asia 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*. VDE, 2019, str. 1–8.
- [7] A. Andonova, N. Kafadarova, V. Videkov, in S. Andreev, "Investigation of thermal conductivity of PCB," v *2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology*. IEEE, 2009, str. 1–5.
- [8] T. Sedlár in T. Bachorec, "Multiphysical simulations help to ensure assembled printed circuit board and power components reliability," *Transactions on Electrical Engineering*, let. 8, št. 1, str. 1–3, 2019.
- [9] B. Xun, W. Tian, Q. Xun, G. Zhang, Y. Chen, in L. Pang, "Thermal resistance analysis of power mosfets using creo/ansys software versus physical measurements," v *2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE, 2022, str. 1–6.
- [10] W. Thepsut in N. Pratinthong, "Numerical and experimental investigation on heat transfer of multi-heat sources mounted on an array of printed circuit boards in a rectangular case," *Applied Thermal Engineering*, let. 156, str. 156–167, 2019.
- [11] K. C. Yung, H. Liem, in H. Choy, "Heat transfer analysis of a high-brightness LED array on PCB under different placement configurations," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, let. 53, str. 79–86, 2014.
- [12] M. Sobolewski in B. Dziurdzia, "Experimental approach to thermal conductivity of macro solder joints with voids," *Soldering & Surface Mount Technology*, let. 31, št. 3, str. 181–191, 2019.
- [13] R. Ahlin, "Temperaturno regulirana komora s termoelektričnimi elementi," Magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, UL, 2021.