

Porovnanie konvenčného a nekonvenčného spôsobu chladenia tranzistorov

P. Nemeč¹, M. Smitka¹, M. Malcho¹, J. Jandačka¹

¹ Katedra energetickej techniky, Fakulta strojnícka, ŽU v Žiline,
Univerzitná 1, Žilina

E-mail : patrik.nemec@fstroj.uniza.sk, martin.smitka@fstroj.uniza.sk, milan.malcho@fstroj.uniza.sk,
jozef.jandacka@fstroj.uniza.sk

Anotace:

Pro zaručení správné funkčnosti zařízení složených z výkonových prvků, které při své činnosti produkují nadměrné teplo, je nutné toto teplo odvádět do okolí. Odvod tepla konvenčním způsobem použitím hliníkového chladiče za pomoci nucené konvekce již mnohokrát není dostačující, a proto se hledají nové alternativy, jak odvést teplo v dostatečné míře z výkonových prvků. Jednou z možností je použití nekonvenčního způsobu chlazení pomocí tepelné trubice s uzavřenou smyčkou (loop heat pipe). Loop heat pipe je jednoduché a účinné zařízení pro přenos velkého tepelného toku. Článek se zabývá chlazením výkonového prvku IGBT (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem) takovým zařízením. V článku je popsáno složení a konstrukce zařízení pro odvod tepla z elektronického prvku, měření závislostí jeho výkonových parametrů od vstupního elektrického výkonu a srovnání jeho chladicího výkonu s hliníkovým chladičem.

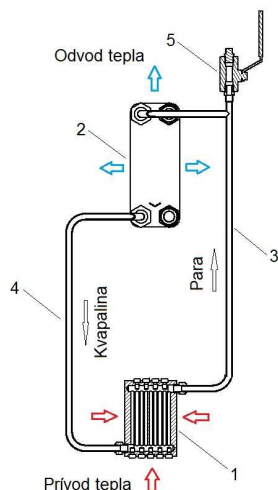
Annotation:

To ensure proper functioning of equipment consisting of power elements, which in their activities produce waste heat, this heat must be removed into the surrounding. Heat removal by conventional manner with using an alumina cooler using and with forced convection is in many times not sufficient and therefore is needed looking for new alternatives of sufficient heat remove from power components. One option is to use an unconventional method of cooling using closed loop heat pipe. Loop heat pipe is a simple and effective device for transferring large heat flux. The article deals with the cooling IGBT power components such equipment. The article describe the composition and construction of device for heat remove of electronic components, measuring the dependence of performance parameters on input electric power and compare its cooling performance with cooling performance of alumina cooler.

ÚVOD

Stály rozvoj elektrotechnických zariadení smeruje k zvyšovaniu ich výkonov, funkčnej využiteľnosti priestoru, znižovaniu hmotnosti, vysokej efektívnosti a spoľahlivosti ako aj k vyššej technologickej úrovni. Ďalším trendom vývoja elektrotechnických komponentov je miniaturizácia rozmerov, čo vedie k nárastu lokálneho tepelného zaťaženia vyvolaného tepelnými stratami jednotlivých elektronických prvkov. Väčší vývin tepla je často príčinou zhoršenia parametrov a porúch elektronických častí pri nedostatočnom chladení. V záujme udržania vhodných pracovných podmienok, sa musí prebytočné teplo odstrániť. Z mnohých metód chladenia používaných v elektronike sa tepelná trubica javí ako jedna z najviac efektívnych a spoľahlivých techník pre odvod tepla. Tepelná trubica s uzavretou slučkou pracuje na rovnakom princípe ako štandardná tepelná trubica, v ktorej k prenosu tepla dochádza v dôsledku prúdenia parnej a kvapalnej fázy pracovnej látky medzi výparnou a kondenzačnou časťou tepelnej trubice. Rozdiel medzi nimi je v spôsobe cirkulácie pracovnej látky. Kým v štandardnej tepelnej trubici prúdi pracovná

látka medzi výparnou a kondenzačnou časťou v tom istom priestore, v tepelnej trubici s uzavretou slučkou prúdi pracovná látka v uzavretej slučke medzi výparnou a kondenzačnou časťou [1]. Z dôvodu neprítomnosti interakcie a neprítomnosti protismerného toku parnej a kvapalnej fázy má tepelná trubica s uzavretou slučkou oproti štandardnej tepelnej trubici zvýšenú celkovú schopnosť prenosu tepla. Na obr. 1 je zobrazený schematický princíp tepelnej trubice s uzavretou slučkou.



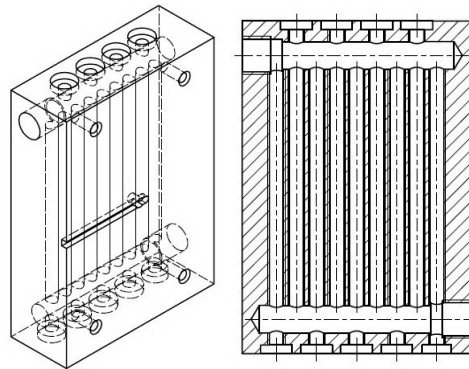
Obr. 1: Model tepelnej trubice s uzavretou slučkou (1 – výparník, 2 – kondenzátor, 3 a 4 – transportná časť parnej a kvapalnej fázy pracovnej látky, 5 – plniaci a uzatvárací ventil)

KONŠTRUKCIA TEPELNEJ TRUBICE S UZAVRETOU SLUČKOU

Hlavné časti tepelnej trubice s uzavretou slučkou tvoria:

- Výparník
- Kondenzátor
- Transportná časť pracovného média
- Plniaci a uzatvárací ventil

Funkciou výparníka je izolovať pracovné médium od okolitého prostredia. Musí byť odolný voči nechcenému unikaniu média, udržať tlakové rozdiely po celých stenách a umožňovať prenos tepla z pracovného média smerom von a naopak pohltiť tepla pracovnou látkou. Pri voľbe materiálu vhodného na konštrukciu výparníka sa musí dbať na jeho vlastnosti. Nato aby bol zabezpečený minimálny pokles teploty medzi zdrojom tepla výparníkom musí mať materiál výparníka vysokú tepelnú vodivosť. Aby zabránil úniku pár nemal by byť porézny. Mal by mať vysokú pevnosť, ale zároveň aj byť ľahko obrábatelný a musí byť kompatibilný s pracovnou kvapalinou. Na obr. 2 je výparník tepelnej trubice s uzavretou slučkou, ktorý bol navrhnutý vzhľadom na vyššie uvedené požiadavky z hliníka. Telo výparníka tvorí hliníková doska s rozmermi 116 x 80 x 30 mm. Na zabezpečenie cirkulácie pracovného média sú do dosky horizontálne v protismere vyvrtané dve diery o priemere 12 mm a sú spojené 9. vertikálnymi spojovacími kanálkami o priemere 6 mm, ktoré zabezpečujú transport ohrievaného média zo spodnej do vrchnej časti výparníka. Na vonkajšej stykovej ploche výparníka a elektronickej súčiastky je vyrezaná drážka do ktorej sa umiestni snímač teploty [2].



Obr. 2 : Navrhnutý výparník tepelnej trubice

Kondenzátor pre tepelnú trubicu s uzavretou slučkou, ktorý bol navrhnutý zo spájkovaného typu doskového výmenníka. Spájkované doskové výmenníky tepla sú tvorené súborom dosiek lisovaných z nerezového plechu. Zvlnenie dosiek zabezpečuje vysoký prestup tepla a zároveň zvyšuje ich tuhosť. Každá doska je obtekaná primárnym médiom z jednej strany a sekundárnym médiom zo strany druhej, pričom dochádza k prestupu tepla. Spájkované výmenníky tepla sú schopné odolať vysokým teplotám (až 225 °C) a tlakom (až 49 bar) a majú vysokú účinnosť prestupu tepla i pri nízkom strednom logaritmickej rozdiel teplot. Navrhnutím takého to typu kondenzátora bola snaha o vytvorenie konštrukcie kompaktného chladiča pre účel chladenia pracovného média v tepelnej trubici schopného odolávať vysokým tlakom a zabezpečiť čo najlepší prestup tepla pracovnej látky.

Transportná časť tepelnej trubice s uzavretou slučkou slúži na zabezpečenie kolobehu transportu parnej a kvapalnej fázy medzi výparníkom a kondenzátorom tepelnej trubice. Celá transportná časť je zložená z medených spájkovacích komponentov s priemerom 10 mm. Za účelom vizuálnej kontroly prúdenia pracovného média boli na výparnej a kondenzačnej strane transportnej časti tepelnej trubice vsadené sklenené rúrky. Na vrchole výparnej strany transportnej časti je umiestnený plniaci a uzatvárací ventil. Keďže v tepelnej trubici dochádza k zintenzívneniu transportu tepla prúdením parnej a kvapalnej fázy jednej látky v prostredí s nízkym tlakom musia byť všetky spojovacie prechody celej sústavy tepelnej trubice vákuovo utesnené.

PRACOVNÉ MÉDIUM

Prvou úvahou pri identifikácii vhodného pracovného média je jeho rozsah prevádzkovej teploty. V oblasti vhodných prevádzkových teplôt sa môže nachádzať viacero vhodných pracovných médií a preto za účelom identifikovania najvhodnejšej pracovnej kvapaliny je potrebné ďalej sledovať a porovnávať ich termofyzikálne vlastnosti. Hlavnými požiadavkami na vlastnosti pracovnej kvapaliny sú znášateľnosť s materiálom tepelnej trubice, dobrá

teplotná stabilita, vyhovujúci tlak pár, veľké latentné teplo vyparovania, vysoká tepelná vodivosť, nízka viskozita kvapaliny i pary, prijateľný bod mrznutia a tuhnutia z hľadiska používania. Ďalej výber pracovného média musí byť tiež založený na základe termodynamických úvah, ktoré sa zaoberajú rôznymi obmedzeniami prenosu tepla vzniknutými v tepelných trubiciach (viskózne, zvukové, kapilárne a úroveň bublinkového varu). Tlak pary v rozsahu prevádzkových teplôt musí byť dostatočne veľký, aby sa zabránilo vysokej rýchlosti pár, ktoré majú tendenciu vysokého teplotného spádu a spôsobí tak nestabilitu tokov. Pracovná látka musí mať vysoké latentné teplo vyparovania, aby tepelnou trubicou bolo možné preniesť čo najväčšie množstvo tepla pri čo najmenšom prúde látky a za podmienky udržania nízkeho rozdielu tlaku v tepelnej trubici. Tepelná vodivosť pracovnej kvapaliny by mala byť pokiaľ možno vysoká, kvôli minimalizovaniu radiálneho teplotného spádu a zníženiu možnosti bublinkového varu na stenách povrchu. Odpor proti prúdeniu kvapaliny je minimalizovaný voľbou tekutiny s nízkymi hodnotami viskozity kvapaliny a pary [3]. Podľa vyššie uvedených podmienok bol ako pracovné médium pre experimentálny pokus tepelnej trubice vybraný Fluorinert FC 72, kvôli jeho kompatibilitate s väčšinou kovov, nízkou teplotou varu (56 °C) a tuhnutia (-90 °C) a predovšetkým kvôli výborným dielektrickým vlastnostiam. Fyzikálne vlastnosti Fluorinertu FC 72 sú uvedené v tab. č 1.

Tab. 1: Fyzikálne vlastnosti pracovnej látky Fluorinert FC 72 pri teplote 20 °C [4].

VLASTNOSTI FC 72	
Priemerná molekulová hmotnosť	338
Odhadovaná kritická teplota	449 K
Odhadovaná kritický tlak	1,83 x 10 ⁶ Pa
Tlak pár	30,9 x 10 ³ Pa
Latentné teplo vyparovania (pri	88 J / g
Hustota kvapaliny	1680 kg/m ³
Kinematická viskozita	0,38 .10 ⁻⁶ m ² /s
Merné teplo kvapaliny	1100 J kg ⁻¹ K ⁻¹
Tepelná vodivosť kvapaliny	0,057 W m ⁻¹
Koeficient rozťažnosti	0,00156 ° C ⁻¹
Povrchové napätie	10 ⁻² N/m
Dielektrická pevnosť	38 kV
Dielektrická konštanta	1,75

NEKONVENČNÉ CHLADENIA IGBT TRANZISTORA

Pre určenie chladiaceho účinku tepelnej trubice s uzavretou slučkou bolo navrhnuté meracie zariadenie, ktoré je na obr. 3. Vzhľadom na možné aplikácie systému s tepelnou trubicou slúžiacemu na

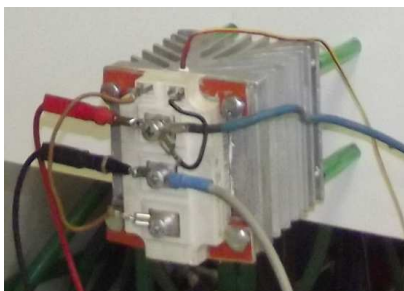
prenos tepla, boli vykonané merania so vstupnou teplotou chladiacej vody do kondenzátora 20, 30 a 40 °C. Meranie bolo vykonané pri postupnom zaťažovaní prvku IGBT el. výkonom od 20 do 370 W zo zdroja jednosmerného prúdu HEWLET PACKARD 6575A, DC POWER SUPPLY 0-120 V/ 0-18,5 A tak aby na styčnej ploche IGBT a výparnej časti tepelnej trubice nebola prekročená najväčšia prípustná teplota 100 °C. Dodaním potrebného tepla výparnej časti tepelnej trubice, sa ohreje pracovná látka na teplotu varu a začne sa odparovať. Pary pracovnej látky prejdú potrubím výparnej časti tepelnej trubice do kondenzačnej časti tepelnej trubice, ktorú tvorí doskový výmenník tepla. Na studenej ploche výmenníka tepla napojeného na chladiaci obeh a termostat, ktorým sa reguluje teplota chladiacej vody privádzanej do výmenníka tepla, skondenzujú pary pracovnej látky a odtiaľ vplyvom gravitácie kvapalná fáza skondenzovanej pracovnej látky steká naspäť do výparníka tepelnej trubice [5]. Výkon elektronickej súčiastky bol postupne zvyšovaný v 5 minútových intervaloch o 40 W. Na spúšťanie merania od 40 W bol vymedzený dlhší časový interval 31 minút. Časové úseky neboli zvolené náhodne, ale boli určené z predošlého experimentálneho pozorovania časového intervalu ustálenia meraného zariadenia s tepelnou trubicou.



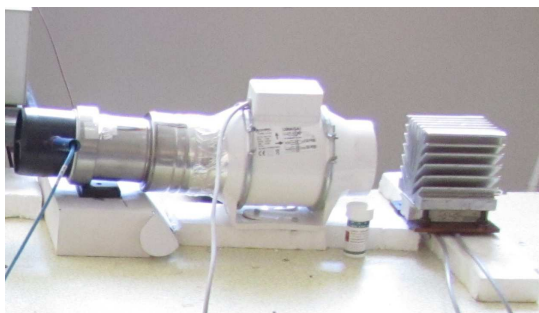
Obr. 3 Schéma zapojenia meracieho zariadenia

KONVENČNÉ CHLADENIA IGBT TRANZISTORA

Pre porovnanie získaných výsledkov z merania výkonových parametrov tepelnej trubice, bolo vykonané aj meranie priebehu teplôt v závislosti od zaťaženia el. výkonom prvku IGBT chladeného normalizovaným hliníkovým chladičom na chladienie elektronickej súčiastky. Na obr. 4 je zobrazené pasívne chladienie prvku IGBT pri ktorom dochádza k odvodu tepla z prvku do hliníkového chladiča a prirodzenou konvekciou do okolia. Na obr. 5 je zobrazené aktívne chladienie prvku IGBT pri ktorom dochádza k odvodu tepla z prvku do hliníkového chladiča a nútenou konvekciou do okolia. Rýchlosť prúdenia vzduchu od ventilátora bola 5 ms⁻¹.



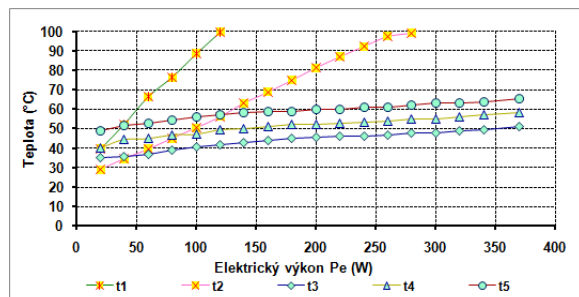
Obr. 4: Chladienie hliníkovým chladičom prirodzenou konvekciou



Obr. 5: Chladienie hliníkovým chladičom nútenou konvekciou

POROVNANIE VÝSLEDKOV

Na obr. 6 je porovnanie závislosti priebehu teplôt od vstupného elektrického výkonu prvku IGBT chladieného hliníkovým chladičom, hliníkovým chladičom s ventilátorom a tepelnou trubicou.



Obr. 6: Graf závislosti priebehu teplôt od elektrického výkonu prvku IGBT, t1 – odvod tepla do hliníkového chladiča, t2 – odvod tepla do hliníkového chladiča ofukovaného ventilátorom, odvod tepla s LHP do 20 °C, odvod tepla s LHP do 30 °C, odvod tepla s LHP do 40 °C

Porovnaním získaných výsledkov v grafickom zobrazení chladienia IGBT tranzistora tepelnou trubicou a hliníkovým chladičom vyplýva, že pri vyššom zaťažení prvku IGBT elektrickým výkonom ako 150 W je odvod tepla zariadením s tepelnou trubicou omnoho efektívnejší ako odvod tepla s hliníkovým chladičom či už samostatným, alebo ofukovaným ventilátorom. V tab. č. 2 je uvedené porovnanie výhod a nevýhod porovnávaných spôsobov chladienia.

Tab. 2: Výhody a nevýhody vybraných spôsobov chladienia

Typ chladienia	Výhody	Nevýhody
Chladienie núteným obehom	jednoduché	hluk
		použitie elektriny
		pohyblivé časti
Chladienie prirodzenou konvekciou	nepohyblivé časti	veľké rozmery
	jednoduchá inštalácia	veľká váha
	bez použitia elektriny	
Chladienie tepelnou trubicou	nepohyblivé časti	
	jednoduchá inštalácia	
	bez použitia elektriny	
	intenzívny prenos tepla	

ZÁVER

Cieľom experimentu bolo navrhnúť zariadenie pracujúce ako tepelná trubica s uzatvorenou slučkou a porovnať jeho chladiaci účinok pri odvode tepla z prvku IGBT s hliníkovým chladičom v reálnych aplikáciách, ktorého najvyššia prípustná teplota na stykovej ploche s chladičom je 100 °C. Podľa experimentálnych meraní chladienie tepelnou trubicou s uzatvorenou slučkou dokázalo svoj dobrý účinok, kde je vidieť, že aj pri zaťažení o výkone nad 350 W a aj pri teplote chladiaceho obehu 40 °C na ochladenie vyparovaného pracovného média v kondenzátore, bola teplota na stykovej ploche prvku IGBT s výparníkom tepelnej trubice nižšia ako 70 °C. Tento experiment dokazuje kvalitu chladienia tepelnou trubicou s uzavretou slučkou a opodstatnenosť jej použitia pre chladienie vysokovýkonných elektronických prvkov a systémov s generovaním veľkých tepelných tokov stratového tepla. Aplikovanie tepelných trubíc na chladienie výkonovej elektroniky, obzvlášť elektronických polovodičových prvkov, ponúka pri výhode zredukovania nárokov na množstvo konštrukčného materiálu a ušetreného priestoru, lepšiu chladiacu výkon a zlepšenie chladienia v oblasti vyšších stratových tepelných výkonov nad 150 W.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola riešená v rámci projektu 064ŽU-4/2012

LITERATÚRA

- [1] P. Nemeč, A. Čaja, M. Malcho, "Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe"

Mathematical and Computer Modelling, Vol. 57, Iss. 1-2, pp. 126-136, Elsevier, 2013.

- [2] P. Nemeč, M. Malcho, M. Smitka, J. Matušov, "Performance parameters of closed loop thermosyphon" Communications, scientific letters of the University of Žilina, Vol. 14, No. 4a, pp. 53-57, EDIS, 2012.
- [3] M. Malcho, et al. "Transfer of low-potential heat from a deep borehole by means of heat pipe and heat pump" Communications, scientific letters of the University of Žilina, Vol. 14, No. 4a, pp. 18-22, EDIS, 2012.
- [4] 3M Fluorinert™ Electronic Liquid FC-72 (Product information), dostupné z <http://multimedia.3m.com/mws/mediawebservr?66666UuZjcFSLXTtnxTE5XF6EVuQEcuZgVs6EVs6E666666-->>
- [5] R. Lenhard, "Numerical simulation device for the transport of geothermal heat with forced circulation of media" in Power control and optimization in proceeding of fourth global conference (Kuching), pp. 7 – 7, American Institute of Physic, 2010