

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Matúš Soboňa



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

REDUKCE TEPLOTNÍ NEHOMOGENITY VE VÝKONOVÝCH MODULECH

REDUCTION OF TEMPERATURE INHOMOGENEITY IN POWER MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matúš Soboňa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Matuš Soboňa

ID: 203630

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Redukce teplotní nehomogenity ve výkonových modulech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s numerickou metodou konečných prvků. Popište faktory, které ovlivňují přestup tepla ve výkonových čipech. Vytvořte numerické modely daného IGBT výkonového čipu a modelujte přestup tepla tímto modulem. Proveďte porovnání výsledků simulace s reálným měřením. Zaměřte se na geometrické úpravy modelu a proveďte příslušné optimalizace. Na jejich základě navrhnete zlepšení termálních parametrů IGBT struktury čipu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca poukazuje na metódy pre redukciu teplotnej nehomogenity vo výkonových moduloch. Je tu vykonaná simulácia prestupu tepla založená na reálnom termografickom meraní, výsledky z nich sú následne porovnané. Metódy uvedené v práci sú analyzované a je pojednané o ich aplikácií do bežnej prevádzky výkonového modulu.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Teplo, výkonový modul, teplotný manažment, porucha, COMSOL, numerické metódy, MKP, simulácia prestupu tepla

ABSTRACT

This master thesis shows multiple methods for the reduction of temperature inhomogeneities in power modules. A heat transfer simulation on model power module is performed based on the settings of real world thermographic measurement, results are compared. The shown methods are analyzed and their real world applications are discussed.

KEYWORDS

Heat, power module, thermal management, failure, COMSOL, numerical methods, MKP, heat transfer simulation

SOBOŇA, Matúš. *Redukce teplotní nehomogenity ve výkonových modulech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, 2022, 82 s. Diplomová práce. Vedúci práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora:	Bc. Matúš Soboňa
VUT ID autora:	203630
Typ práce:	Diplomová práca
Akademický rok:	2021/22
Téma záverečnej práce:	Redukce teplotní nehomogenity ve výkonných modulech

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu semestrálnej/diplomovej práce pánovi doc. Ing. Petrovi Vyroubalovi Ph.D. a konzultantovi pánovi Ing. Karolovi Čičovi PhD. za odborné vedenie, trpezlivosť, konzultácie a návrhy k práci a taktiež môjmu dobrému kamarátovi Bc. Michalovi Odlerovi za vecné rady týkajúce sa matematickej časti práce.

Obsah

Úvod	14
1 Poruchy elektrických zariadení z dôvodu nesprávneho teplotného managementu	15
1.1 Teplotne závislé mechanické poruchy	15
1.1.1 Namáhanie vodičov a kontaktov	15
1.1.2 Praskliny v čípe/púzdre	16
1.2 Teplotne závislé elektrické poruchy	16
1.2.1 Kumulácia tepla	16
1.2.2 Elektrické preťaženie	17
1.2.3 Iónová kontaminácia	17
1.2.4 Elektromigrácia	17
2 Teória šírenia tepla	18
2.1 Generácia tepla v pevných látkach	18
2.1.1 Fonón	19
2.2 Teplo	19
2.2.1 Joulove teplo	20
2.3 Prestup tepla	20
2.3.1 Prestup tepla vedením	20
2.3.2 Prestup tepla prúdením	21
2.3.3 Prestup tepla radiáciou	22
3 Numerické metódy	27
3.1 Metóda konečných prvkov	27
3.1.1 Princíp MKP	27
3.2 Metóda konečných objemov	30
3.2.1 Princíp MKO	30
3.3 Zloženie výpočtovej siete	32
3.3.1 Dvojrozmerné tvary konečných prvkov	32
3.3.2 Trojrozmerné tvary konečných prvkov	33
3.3.3 Tvary konečných prvkov vyššieho rádu	33
4 Teplotný manažment	35
4.1 Chladenie pomocou vzduchu	35
4.1.1 Volné prúdenie	35
4.1.2 Nútené prúdenie	35
4.2 Chladenie pomocou kvapalín	36

4.2.1	Chladienie nárazovou tryskou	36
4.2.2	Chladienie rozprašovaním	36
4.2.3	Mikrokanálové chladienie	37
4.3	Chladienie pomocou tepelnej trubice	37
5	Ciele diplomovej práce	38
6	Prestup tepla a tepelný odpor	39
6.1	Prestup tepla štruktúrou výkonového modulu	40
7	Tranzistor s izolovaným hradlom - IGBT	42
7.1	Štruktúra IGBT	42
7.2	Zapojenie IGBT	43
8	Úprava geometrie	44
8.1	Nastavenie simulácie v prostredí COMSOL	45
8.1.1	Definícia materiálov	45
8.1.2	Nastavenie elektrickej simulácie	46
8.1.3	Nastavenie simulácie prestupu tepla	46
8.1.4	Rozhranie Multiphysics	47
8.2	Výpočtová sieť	47
9	Výsledky simulácie	50
9.1	Merná elektrická vodivosť čipov	50
9.2	Zhodnotenie výsledkov	50
10	Porovnanie výsledkov simulácie s meraním	55
10.1	Termografia	55
11	Redukcia teplotnej nehomogenity	60
11.1	Úprava hrúbky čipovej spájky	60
11.2	Náhrada keramiky	62
12	Aplikovateľnosť experimentov	64
12.1	Zanedbanie enkapsulácie výkonového modulu	64
12.1.1	Nastavenie simulácie	65
12.1.2	Výsledky testov so silikónom	65
12.2	Súčiniteľ tepelnej vodivosti nitridu hlinitého	66
12.2.1	Výsledky simulácie s konštantným súčiniteľom tepelnej vodivosti	66

13 Vyhodnotenie experimentov	68
13.1 Porovnanie hrúbky spájky	68
13.2 Porovnanie jednotlivých experimentov	70
Záver	72
Literatúra	75
Zoznam symbolov a skratiek	78
Zoznam príloh	82

Zoznam obrázkov

2.1	Závislosť intenzity vyžarovania absolútne čierneho telesa na vlnovej dĺžke a teplote.	24
3.1	Diskretizácia oblasti MKO.	28
3.2	Diskretizácia oblasti MKO.	31
3.3	Dvojmerné tvary konečných prvkov.	33
3.4	Trojmerné tvary konečných prvkov.	33
3.5	Tvary konečných prvkov vyššieho rádu.	34
3.6	Diagram numerických metód.	34
4.1	Princíp tepelnej trubice.	37
6.1	Princíp výkonového modulu.	39
6.2	Štruktúra výkonového modulu.	41
7.1	Štruktúra a schématická značka IGBT.	42
7.2	Schéma simulovaného výkonového modulu.	43
8.1	Odstránené časti geometrie.	44
8.2	Detail na doplnené časti.	44
8.3	Princíp simulácie prestupu tepla.	45
8.4	Fotka užívateľského prostredia rozhraní.	46
8.5	Okrajové podmienky na geometrii týkajúce sa koeficientu prestupu tepla.	47
8.6	Okrajová podmienka týkajúca sa teploty.	47
8.7	Pohľad na celú výpočtovú sieť.	48
8.8	Detail výpočtovej siete.	48
9.1	Detail na tranzistor T_4	51
9.2	Označenie tranzistorov a rozloženie teplôt pre $I_0 = 1050A$	52
9.3	Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu (výsledky simulácie).	53
9.4	Zobrazenie tepelného toku pre $I_0 = 1050A$	54
10.1	Snímka z termokamery.	56
10.2	Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu (výsledky z merania termokamerou).	57
10.3	Označenie tranzistorov a rozloženie teplôt pre $I_0 = 1050A$	58
10.4	Graf závislosti smerodajnej odchýlky na rôznych hodnotách prúdu.	59
11.1	Graf teplotnej závislosti súčiniteľa tepelnej vodivosti keramiky AlN.	62
11.2	Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu (výsledky simulácie v prípade AlN so súčiniteľom tepelnej vodivosti z grafu 11.1).	63
12.1	Zjednodušená konfigurácia geometrie.	64

12.2 Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu (výsledky simulácie v prípade AlN s $\lambda_c = 120\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).	67
13.1 Graf závislosti smerodajnej odchýlky na prúde pre rôzne hodnoty hrúbky čipovej spájky.	69
13.2 Graf závislosti smerodajnej odchýlky na rôznych hodnotách prúdu pre všetky experimenty.	71

Zoznam tabuliek

2.1	Tabuľka typických emisív povrchov materiálov, prevzaté z [11].	25
6.1	Tabuľka analógie tepelných a elektrických veličín [22].	40
6.2	Tabuľka tepelných materiálových konštánt pre materiály využívané vo výkonových moduloch.	41
8.1	Tabuľka použitých materiálov.	45
8.2	Počet buniek výpočtovej siete	48
9.1	Výsledky elektrickej simulácie.	50
9.2	Priemerné povrchové teploty jednotlivých čipov, odčítané zo simulácie.	53
10.1	Priemerné povrchové teploty jednotlivých čipov namerané termokamerou.	55
10.2	Relatívna odchýlka simulácie od merania termokamerou.	56
10.3	Porovnanie tepelnej nehomogenity simulácie a merania na základe smerodajnej odchýlky.	57
11.1	Závislosť teploty čipov na hrúbke spájky $d_{ch,s}$, pri prúde $I_0 = 900A$	61
11.2	Závislosť teploty čipov na hrúbke spájky $d_{ch,s}$, pri prúde $I_0 = 1200A$	61
11.3	Priemerné povrchové teploty čipov, v prípade AlN.	63
12.1	Materiálové vlastnosti silikónu nevyhnutné pre simuláciu prestupu tepla.	65
12.2	Porovnanie priemerných povrchových teplôt v prípade použitia/ne-použitia silikónu.	65
12.3	Priemerné povrchové teploty čipov, v prípade AlN s $\lambda_c = 120W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	66
13.1	Tabuľka závislosti smerodajnej odchýlky na hrúbke čipovej spájky a prúde.	68
13.2	Porovnanie teplotnej homogenity jednotlivých experimentov.	70

Zoznam výpisov

Úvod

Medzi hlavné faktory, ktoré prispievajú k spoľahlivosti akéhokoľvek elektrického zariadenia patrí jeho teplota, preto je dôležité ju vedieť efektívne kontrolovať a dané teplo prípadne odvádzať.

Zahrievanie súčiastok môže byť spôsobené vonkajšími a vnútornými činiteľmi. Medzi vonkajšie činitele môžeme zaradiť skladovanie zariadenia v nepriaznivom prostredí a medzi vnútorné nevhodný návrh obvodu alebo odpor súčiastok, ktorý spotrebúva elektrickú energiu a tá sa následne mení na teplo. Motiváciou pre rovnomerné rozloženie tepla v zariadení je aj miniaturizácia stále výkonnejších súčiastok, ktorá taktiež súvisí s teplotnou stabilitou zariadenia.

Téma záverečnej práce bola navrhnutá firmou SEMIKRON s.r.o., jedným z popredných svetových výrobcov výkonovej elektroniky, ktorej aplikácie siahajú od elektrických motorov cez obnoviteľné zdroje energie až po automobilový priemysel.

Cieľom semestrálnej práce je naštudovať a popísať problematiku šírenia elektrického prúdu a teda aj tepla vo výkonových polovodičových moduloch.

V teoretickej časti bude pojednané o možných poruchách elektrických zariadení vplyvom nesprávneho teplotného manažmentu. Ďalej bude popísaný prestup tepla a príčiny zahrievania pevných látok vplyvom elektrického prúdu. Z hľadiska simulácií bude diskutované o numerických metódach výpočtu parciálnych diferenciálnych rovníc a na záver teoretickej časti budú popísané spôsoby teplotného manažmentu.

Cieľom praktickej časti bude popísať zmeny vykonané na geometrii modulu z dôvodu zjednodušenia a urýchlenia výpočtov. Ďalej budú uvedené nastavenia simulácií vo výpočtovom programe COMSOL. Samotná simulácia bude potom porovnaná s termografickým meraním vykonaným na simulovanom výkonovom module.

Záverečné kapitoly diplomovej práce sa budú niest v zmysle návrhov na redukciiu teplotnej nehomogenity, zhodnotenia výsledkov a možnosti aplikácie týchto metód do bežnej prevádzky výkonového modulu.

1 Poruchy elektrických zariadení z dôvodu nesprávneho teplotného managementu

V tejto kapitole budú uvedené poruchy elektronických zariadení, ktoré sú závislé na teplote. V prípade, že teplo nie je zo zariadenia odvádzané jeho teplota bude postupne rásť, čo môže viesť k prehrievaniu zariadenia a v extrémnych prípadoch k spáleniu súčiastky alebo až k požiaru.

Samotné prehrievanie môže byť výsledkom priamych, nepriamych alebo vonkajších a vnútorných faktorov, vo väčšine prípadov ich kombináciou.

Medzi priame interné faktory sa zaraďuje návrh a výroba súčiastky, zariadenia, nepriame vonkajšie faktory sú reprezentované vplyvom prostredia (vlhkosť, teplota). Poruchy a teda zníženie spoľahlivosti zariadenia môžu nastať aj v prípadoch kedy je nárast teploty malý, toto sa odzrkadľuje aj v mnohých štúdiách, ktoré tento faktor potvrdzujú [1, 2].

1.1 Teplotne závislé mechanické poruchy

Mechanické poruchy sú klasifikované ako akékoľvek deformácie, praskliny, trhliny a zlomy v materiáli alebo oddelenie spájkovaného spoja medzi súčiastkou a doskou.

V prípade, že je mechanický tlak vytváraný silou pôsobiacou na povrch materiálu vyšší ako pevnosť tohto materiálu nastávajú jeho trvalé plastické deformácie a namáhanie. Dĺžka materiálu sa pôsobením teploty mení, tento jav je popísaný koeficientom teplotnej rozťažnosti α .

$$\alpha_{CTE}^1 = \frac{1}{L_{m,0}} \left(\frac{\partial L_m}{\partial T} \right) \quad [\text{ppm}/^\circ\text{C}]. \quad (1.1)$$

Teplotne závislé mechanické poruchy majú pôvod v rozdielnych koeficientoch teplotnej rozťažnosti spájaných materiálov, časovo závislých teplotných zmenách a v priestorovo teplotných gradientoch. Nižšie budú uvedené niektoré časté teplotne závislé mechanické poruchy [1, 3].

1.1.1 Namáhanie vodičov a kontaktov

Vodiče, ktoré spájajú čip so substrátom môžu byť z dôvodu pravidelného cyklovania teploty poškodené. Počas cyklovania sú vplyvom opakovaného zahrievania a ochladzovania zariadenia namáhané čo vytvára mechanické napätie z dôvodu rozdielneho koeficientu teplotnej rozťažnosti.

¹Z dôvodu identických označení jednotlivých veličín je nutné zaviesť ich indexovanie

Kontaktovanie je veľmi častou technikou pripájania čipov. V prípade, že je kontakt vystavený cyklovaniu teploty vzniká na spoji mechanické napätie v šmyku, ktoré síce nemusí byť pri prvotnom pôsobení dostatočne veľké na to aby spoj úplne porušilo ale opakované cyklovanie môže viesť k namáhaniu a teda k porušeniu spoja [1, 3].

1.1.2 Praskliny v čipe/púzdra

Vplyvom opakovaného teplotného cyklovania sa v strede a na hranách čipu vytvára mechanické napätie v ťahu resp. mechanické napätie v šmyku. Ak tieto napätia prekročia určitú medzu pevnosti čip v týchto miestach praskne.

Podobne počas zapúzdrovacieho procesu, je čip pripevňovaný do púzdra pomocou formovacej hmoty. V prípade opakovaného teplotného cyklovania je táto hmota vystavovaná mechanickému napätiu z dôvodu rozdielnych koeficientov dĺžkovej rozťažnosti.

Toto môže spôsobiť zlomy a trhliny vo formovacej hmote, ktoré umožnia priechod vlhkosti prípadne iných zlúčenín k čipu [1, 3].

1.2 Teplotne závislé elektrické poruchy

Jedná sa o poruchy, ktoré môžu dočasne alebo trvale ovplyvniť správnu funkčnosť zariadenia.

1.2.1 Kumulácia tepla

V sekcii 2.2.1 bude popísané správanie vodiča ako zdroju tepla v prípade, že ním prechádza elektrický prúd. Kombináciou rovníc 2.4 a 2.5 je možné získať vzťah, ktorý priamo popisuje závislosť spotrebovanej energie na odpore vodiča.

$$P = R \cdot I^2 \quad [\text{W}]. \quad (1.2)$$

Samotný odpor vodiča je definovaný vzťahom:

$$R = \rho_R \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega], \quad (1.3)$$

kde veličiny dĺžky a prierezu vodiča l resp. S sú rozmerové konštanty a ρ je merný elektrický odpor, rezistivita.

$$\rho_R = \rho_{R,0}(1 + \alpha_R \Delta T) \quad [\Omega \cdot \text{m}], \quad (1.4)$$

kde $\rho_{R,0}$ je počiatočná rezistivita, ΔT je rozdiel teplôt a α_R je teplotný súčiniteľ elektrického odporu. Z uvedených rovníc 1.3 a 1.4 je možné vyvodiť, že v prípade

nesprávneho alebo žiadneho odvodu tepla zo súčiastky dochádza k vytvoreniu spätnej väzby a teda ku kumulácií tepla, ktorá môže samotnú súčiastku úplne zničiť [1, 3].

1.2.2 Elektrické preťaženie

Jedná sa o jav kedy je zariadenie vystavené prúdom alebo napätiam, ktoré presahujú výrobcom stanovené pracovné hodnoty.

Poruchy spôsobene vplyvom elektrického preťaženia sú vo väčšine prípadov z dôvodu kumulácie tepla (vysoké hodnoty prúdu) alebo prierazu dielektrika (vysoké hodnoty napätia) [3, 4].

1.2.3 Iónová kontaminácia

Tok nabitých iónov, ktorý je závislý na teplote vytvára nekontrolovaný prúd zhoršujúci funkčnosť zariadenia. Kontaminácia môže nastať počas zapúzdrovania, montáže, testovania ale aj počas samotnej prevádzky [1, 3].

1.2.4 Elektromigrácia

Elektromigrácia je degradačný mechanizmus, ktorý je spôsobený nárazmi nosičov náboja vo forme elektrického prúdu do atómov kovu, ktoré sú vychýlené zo svojej pôvodnej polohy. Toto vedie k tvorbe dutín v mriežke kovu a teda k zníženiu vodivosti.

S vyššou teplotou sú atómy periodicky vychyľované zo svojich rovnovážnych polôh čo spôsobuje vyššiu pravdepodobnosť kolízie s nosičmi náboja a teda vyššiu pravdepodobnosť elektromigrácie [3].

2 Teória šírenia tepla

Na bližšie popísanie rozloženie tepla vo výkonovom module je nutné definovať základné zákonitosti tepla a jeho šírenia. Proces šírenia tepla je popísaný v druhom zákone termodynamiky a jedná sa o prenos energie z oblastí vyšších teplôt do oblastí nižších teplôt [5].

2.1 Generácia tepla v pevných látkach

S generáciou tepla súvisí samotná kryštalická štruktúra pevných látok, kde sú jednotlivé častice látky usporiadané do mriežky, ktorá sa opakuje v trojrozmerom priestore a tak tvorí pevnú hmotu.

Najzákladnejšie vysvetlenie všetkých makroskopických tepelných javov sa dá prísúdiť kmitom spomínanej kryštalickej mriežky, ktoré sú spôsobené dodaním energie do mriežky.

V závislosti od rozdielnych mechanizmov prenosu energie sa jednotlivé procesy generácie tepla delia na:

Joulove teplo - mikroskopický pohľad: V prípade pohybu nosičov náboja cez vodič alebo polovodič sú tieto nosiče pravidelne rozptylované fonónmi. Týmto spôsobom sa nosiče náboja presúvajú z vyššieho potenciálu na nižší pričom energetický rozdiel tohto procesu sa prejavuje ako kmity kryštalickej mriežky a teda výsledné zahrievanie materiálu. Toto teplo je úmerné elektrickému odporu daného materiálu.

Rekombinačné teplo: Počas procesu rekombinácie medzi elektrónom a dierou sa ich energia nemôže stratiť a teda prejavuje sa vo forme fotónu alebo fonónu. Teplo, ktoré je týmto procesom generované je úmerné rozdielu medzi kvazifermiho hladinami.

Thomsonove a Peltierove teplo: Pri prechode prúdu cez teplotný gradient dochádza k výmene energie medzi nosičmi náboja a kryštalickou mriežkou. Energetický rozdiel, ku ktorému dôjde sa nazýva Thomsonove teplo, závisí od teploty, hustoty stavov a taktiež od koncentrácie nosičov náboja.

Teplo spôsobené absorpciou svetla: Pri dopade svetelného žiarenia môže byť jeho energia čiastočne alebo úplne materiálom pohltená. Úroveň a mechanizmus pohltenia závisia od energie fotónu. V prípade veľmi nízkych energií dochádza k priamej absorpcii kryštálovou mriežkou. Ak sa ale jedná o typické energie fotónov tak je táto energia prevažne absorbovaná voľnými nosičmi náboja [6].

2.1.1 Fonón

V úvode kapitoly 2.1 bol uvedený pôvod makroskopických tepelných javov ako kmity kryštalickej mriežky. Keďže sú jednotlivé atómy v tejto mriežke viazane medziatomárnymi silami, je možné tieto kmity vnímať ako vlnenie mriežky samotnej, ktoré môže interagovať s elektrónmi, fotónmi a inými kvázičasticami.

Z tohto dôvodu je vhodné toto vlnenie taktiež vnímať ako kvázičasticu nazývanu fonón, ktorej hybnosť a energia sú definované ako:

$$p = h \cdot k \quad [\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.1)$$

$$Q = h \cdot f \quad [\text{J}] \quad (2.2)$$

Mimo samotného názvu a rovníc pre hybnosť a energiu 2.1 resp. 2.2 je možné analógiu pozorovať aj pri samotných tepelných javoch, kedy sú tepelné vibrácie kryštálu vnímané ako tepelne excitované fonóny podobne ako je žiarenie absolútne čierneho telesa vnímané vo forme tepelne excitovaných fotónov.

Existencia teórie fonónu poskytuje uspokojivé vysvetlenie mnohých fyzikálnych javov týkajúcich sa pevnej hmoty. Medzi tieto javy patria:

- Tepelná kapacita
- Tavenie
- Tepelná a elektrická vodivosť
- Supravodivosť
- Prenos zvuku
- Odrazivosť iónových kryštálov
- Interakcia fonónov s inými kvázičasticami [7, 8].

2.2 Teplo

S definíciou tepla súvisí veličina teploty a jej zmena, tá je spôsobená prenosom vnútornej energie medzi systémom a prostredím, ktorá je daná pohybom atómov, molekúl a iných častíc v danom materiáli [9].

Definícia 1 *Teplo je prenesená energia medzi systémom a okolím ako dôsledok teplotného rozdielu medzi nimi:*

$$Q = C \cdot \Delta\vartheta \quad [\text{J}], \quad (2.3)$$

kde C je tepelná kapacita definovaná ako konštanta úmernosti medzi množstvom dodaného tepla a ním spôsobenou zmenou teploty.

2.2.1 Joulove teplo

Pripojením vodiča k zdroju napätia, budú voľné elektróny v materiáli, z ktorého je vodič vyrobený uvedené do pohybu a vodičom začne tiecť elektrický prúd.

Hodnoty pripojeného napätia a prúdu, ktorý preteká vodičom sú si úmerné, ich závislosť je daná Ohmovým zákonom:

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega]. \quad (2.4)$$

Nosiče náboja, ktoré sú napätím U uvedené do pohybu narážajú do atómov v materiáli vodiča a tým mu predávajú časť svojej energie, čo spôsobuje zvýšenie vnútornej energie systému a teda aj teploty materiálu.

Ako už bolo uvedené v predošlej sekcii pri zmene teploty sa z vodiča stáva zdroj tepla. Toto teplo sa v elektrotechnike nazýva Joulove teplo, ktoré je vyjadrené ako spotreba energie v podobe výkonu P [9].

$$P = I \cdot U \quad [\text{W}] \quad (2.5)$$

2.3 Prestup tepla

Šírenie tepla je popisované rýchlosťou prestupu tepla alebo tokom tepla Q , jedná sa o veličinu, ktorá je definovaná ako množstvo tepla prevedeného za jednotku času [10].

Tok tepla alebo rýchlosť prestupu tepla môže mať ustálený alebo neustálený charakter. Tie sú definované nasledovne:

Definícia 2 *Pri ustálenom toku tepla predpokladáme existujúci rozdiel teplôt kde je teplota funkciou priestorových troch súradníc ale nie je závislá na čase.*

$$\vartheta = f(x, y, z), \quad Q = \text{konšt.} \quad (2.6)$$

Neustálený tok tepla je dej závislý aj na čase, rovnicu 2.6 bude rozšírená na funkciu času:

$$\vartheta = f(x, y, z, \tau), \quad Q = f(\tau). \quad (2.7)$$

V prostredí sa teplo môže šíriť tromi spôsobmi, ktoré budú popísané v nasledujúcich sekciách.

2.3.1 Prestup tepla vedením

Prestup tepla vedením je definovaný pomocou prvého Fourierovho zákona nasledovne:

Definícia 3 Množstvo prevedeného tepla Q v smere normály n izotermickej plochy S je dané:

$$Q = \frac{dQ}{d\tau} = -\lambda_c \cdot S \cdot \frac{\partial\vartheta}{\partial n} = -\lambda_c \cdot S \cdot \text{grad}_n\vartheta \quad [\text{W}], \quad (2.8)$$

kde λ_c je súčiniteľ tepelnej vodivosti a $\text{grad}_n\vartheta$ je teplotný gradient, ktorý udáva zmenu teploty pripadajúcu na jednotkovú vzdialenosť kolmú na izotermickú plochu, ten je definovaný ako:

$$\text{grad}_n\vartheta = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} = \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \cdot i + \frac{\partial\vartheta}{\partial y} \cdot j + \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \cdot k \quad [\text{K} \cdot \text{m}^{-1}], \quad (2.9)$$

pričom i, j, k sú jednotkové vektory pravoúhlej súradnicovej sústavy [10].

Rovnicu 2.8 je možné upraviť na tvar, ktorý definuje rýchlosť prestupu tepla cez jednotkovú plochu q [5].

$$q = -\lambda_c \cdot \text{grad}_n\vartheta \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.10)$$

Prvý Fourierov zákon o vedení tepla platí len v prípade ustáleného toku tepla, teda pre rovnicu 2.6. Riešením rovnice 2.7 je druhý Fourierov zákon[5].

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial\tau} = a \cdot \nabla^2\vartheta + \frac{q_V}{c_p \cdot \rho} \quad [\text{K} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (2.11)$$

kde ∇^2 je Laplaceov operátor, a je súčiniteľ tepelnej vodivosti a c resp. ρ sú hmotnostná tepelná kapacita a hustota telesa.

Pri odvodzovaní rovnice 2.11 sa vychádza z nasledujúcich zjednodušení:

- tuhé teleso, ktoré vedie teplo je homogénne a izotropné,
- fyzikálne vlastnosti telesa sú konštantné,
- vnútorné objemové tepelné zdroje sú rozmiestnené rovnomerne,
- jedná sa o izobarický dej.

2.3.2 Prestup tepla prúdením

Prúdenie tepla nastáva pri styku tekutiny s predmetom rozdielnej teploty. V tomto prípade závisí rýchlosť prestupu tepla od fyzikálnych vlastností tekutiny a od hydrodynamických podmienok. Podľa nich sa prestup tepla prúdením delí do dvoch skupín.

- *Nútené prúdenie*, ktoré je vyvolané pôsobením vonkajšej mechanickej sily a tok tekutín môže mať turbulentný, laminárny alebo prechodný charakter.
- *Prírodné prúdenie* kde sa jedná o prestup tepla pod účinkom gravitačnej sily, prestup tepla vo vriacej kvapaline a prestup tepla pri voľnom prúdení, ktoré je vyvolané rozdielom hustoty tekutín pri ohrievacej ploche a vnútri tekutiny.

Fourierov zákon uvedený v sekcii 2.3.1 je vhodný na popis prestupu tepla cez nehybné prostredie, ktoré sa pri prúdení vyskytuje len zriedka. Na popis prestupu tepla v prúduciach tekutinách sa teda využíva Newtonov vzorec [10].

$$Q = \alpha_Q \cdot S \cdot (\vartheta_w - \vartheta_f) \quad [\text{W}], \quad (2.12)$$

kde S je plocha povrchu steny, ktorej sa tekutina dotýka, ϑ_w je teplota povrchu steny, ϑ_f je stredná teplota steny a α_Q je empirický súčiniteľ prestupu tepla prúdením. Hodnota súčiniteľa prestupu tepla prúdením závisí od niekoľkých premenných, túto závislosť je možné zapísať nasledovne:

$$\alpha_Q = f(w, \rho, \mu, c_p, \lambda, \beta, g, \tau, \vartheta_w, \vartheta_f, l_1, l_2) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}], \quad (2.13)$$

kde

- w je rýchlosť,
- ρ hustota,
- μ dynamická viskozita,
- β súčiniteľ objemovej rozťažnosti,
- $l_{1,2}$ sú charakteristické geometrické rozmery.

2.3.3 Prestup tepla radiáciou

Tepelná radiácia alebo žiarenie je emisia elektromagnetického vlnenia každým telesom, ktoré má teplotu vyššiu ako je absolútna nula.

Keďže sa jedná o elektromagnetické žiarenie, nie je k prenosu tepla potrebné hmotné prostredie a pre tepelné žiarenie platia tie isté zákony ako pre viditeľnú časť spektra (zákon lomu a odrazu). Pri dopade žiarenia na teleso je časť žiarenia pohltená, časť sa odrazí a časť prechádza telesom.

Pohltená časť žiarenia sprostredkúva zvýšenie vnútornej energie telesa teda zvýšenie jeho vonkajšej teploty. Množstvo tepla, ktoré sa preniesie závisí od energie žiarenia, to je popísané v kvantovej teórii, ktorú zaviedol Max Planck [9].

Definícia 4 *Energia elektromagnetického žiarenia je emitovaná alebo absorbovaná v množstvách, ktoré sú deliteľné diskretnými energetickými kvantami, ktoré sú úmerné frekvenciám žiarenia [9].*

$$Q = h \cdot f \quad [\text{J}], \quad (2.14)$$

V rovnici 2.14 je veličina h definovaná ako Planckova konštanta úmernosti. Ďalším faktorom, od ktorého závisí množstvo preneseného tepla je teplota telesa.

Teleso, ktoré pri danej teplote na každej vlnovej dĺžke emituje alebo absorbuje maximálne množstvo žiarivej energie sa nazýva čierne teleso. V prípade závislosti rovnováhy emisie a absorpcie žiarenia, závisí množstvo tepla len na teplote telesa

a nie na jeho chemickom zložení, takéto teleso sa nazýva absolútne čierne teleso. Množstvo energie, ktorú vyžiari teleso z jednotkovej plochy za jednotku času je definované ako intenzita vyžarovania [5].

$$E = \frac{dP}{dS} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.15)$$

Veličina P sa nazýva radiačný tok a je definovaná ako množstvo energie vyžiarenej do polpriestoru za jednotkový čas. Radiačný tok sa skladá z troch zložiek a to žiarenie pohltené (A - absorbed), žiarenie odrazené (R - reflected) a žiarenie prepustené (T - transmitted) [10].

$$P_F = P_A + P_R + P_T \quad [\text{W}]. \quad (2.16)$$

Planckov zákon

Intenzita vyžarovania E je pre každú vlnovú dĺžku λ odlišná, túto vlastnosť vyjadruje spektrálna mohutnosť E_λ :

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]. \quad (2.17)$$

Definícia 5 Planckov zákon vyjadruje závislosť intenzity vyžarovania absolútne čierneho telesa $E_{0,\lambda}$ na vlnovej dĺžke λ a teplote T .

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (2.18)$$

$$c_1 = 3,7412 \cdot 10^{-16} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2},$$

$$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \quad \text{m} \cdot \text{K}.$$

V rovnici 2.18 sa vyskytujú konštanty c_1 a c_2 , tie reprezentujú funkcie svetla vo vákuu. Z Planckovej rovnice plynú ďalšie dva zákony, ktoré ďalej popisujú žiarenie absolútne čierneho telesa.

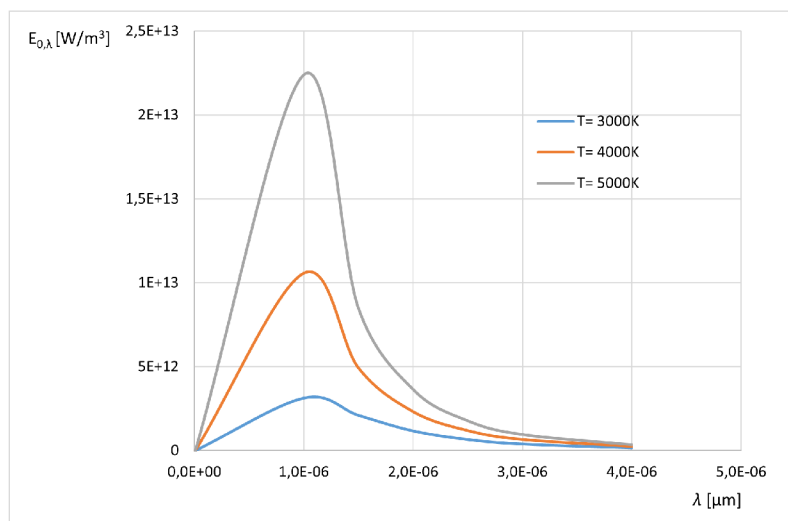
Definícia 6 Wienov posuvný zákon popisuje lokálne maximá kriviek vyžarovania absolútne čierneho telesa z grafu 2.1.

$$\frac{dE_{0,\lambda}}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{max} T = 2,898 \cdot 10^{-3} \quad \text{m} \cdot \text{K}. \quad (2.19)$$

Definícia 7 Intenzita vyžarovania absolútne čierneho telesa je definovaná integráciou rovnice 2.18, výsledkom je Stefan-Boltzmannov zákon.

$$E_0 = \int_0^\infty E_{0,\lambda} d\lambda = \sigma_{SB} \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}], \quad (2.20)$$

kde $\sigma_{SB} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ je Stefan-Boltzmannova konštanta.



Obr. 2.1: Závislosť intenzity vyžarovania absolútne čierneho telesa na vlnovej dĺžke a teplote.

Radiačné vlastnosti povrchov

Podľa zložiek radiačného toku uvedených v rovnici 2.16 sa telesá, na ktoré dopadá žiarenie delia na:

- priehľadné telesá
- polopriehľadné telesá
- nepriehľadné telesá.

Priehľadné telesá úplne prepúšťajú dopadajúce žiarenie, polopriehľadné telesá časť žiarenia prepustia a časť odrazia alebo absorbujú a nepriehľadné telesá dopadajúce žiarenie buď odrazia alebo absorbujú [1].

Absolútne čierne teleso je nepriehľadné teleso, ktoré absorbuje celkové množstvo dopadajúceho žiarenia, teda platí $P = P_A$. Jedná sa o ideálny model, ktorý poskytuje východzie vlastnosti pre porovnávanie reálnych objektov.

Na samotné porovnanie slúži veličina emisivita ε , ktorá je definovaná ako pomer intenzity vyžarovania objektu E a intenzity vyžarovania absolútne čierneho telesa E_0

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_0(T)} \quad [-]. \quad (2.21)$$

Je nutné poznamenať, že rovnica 2.21 sa vzťahuje na intenzitu vyžarovania objektu z celého spektra, v prípade vyžarovania len z určitej vlnovej dĺžky sa jedná o spektrálnu emisivitu ε_λ

$$\varepsilon_\lambda(\lambda, T) = \frac{E_\lambda(\lambda, T)}{E_{0,\lambda}(\lambda, T)} \quad [-]. \quad (2.22)$$

Ak nie je emisivita telesa ε závislá od vlnovej dĺžky λ jedná sa o šedé teleso, ktorého emisivita sa nachádza v intervale $\varepsilon \in (0, 1)$. Emisivita absolútne čierneho telesa je rovná jednej. Použitím vzťahu pre celkovú intenzitu vyžarovania

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.23)$$

a Steffan-Boltzmannového zákona $E_0 = \sigma \cdot T^4$ je možné dosadením do rovnice 2.21 vyjadriť vzťah pre výpočet celkovej emisivity:

$$\varepsilon(T) = \frac{1}{\sigma T^4} \int_0^{\infty} \left(\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) \cdot E_{0,\lambda}(\lambda, T) \right) d\lambda \quad [-]. \quad (2.24)$$

Tab. 2.1: Tabuľka typických emisívít povrchov materiálov, prevzaté z [11].

Materiál	ε
Hliník - vyleštený	0,039-0,057
Hliník - anodizovaný	0,77
Meď - vyleštená	0,023-0,052
Meď - oxidovaná	0,65
Molybdén	0,05-0,18
Oceľ - vyleštená	0,07
Olovo - čisté	0,057-0,075
SiO ₂	0,79
SiC	0,83-0,96
Sklo	0,92-0,94
Striebro - vyleštené	0,02-0,03
Zlato - neleštené	0,47
Zlato - vyleštené	0,025

Zložky radiačného toku

V prípade polopriehľadného telesa je jeho celková a spektrálna pohltivosť definovaná ako:

$$A = \frac{P_A}{P_F} \quad [-], \quad (2.25)$$

resp.

$$A_{\lambda}(\lambda) = \frac{P_{A,\lambda}(\lambda)}{P_{F,\lambda}(\lambda)} \quad [-]. \quad (2.26)$$

Ďalej jeho celková a spektrálna odrazivosť budú definované ako:

$$R = \frac{P_R}{P_F} \quad [-], \quad (2.27)$$

resp.

$$R_\lambda(\lambda) = \frac{P_{R,\lambda}(\lambda)}{P_{F,\lambda}(\lambda)} \quad [-]. \quad (2.28)$$

A podobne pre celkovú a spektrálnu transmisivitu platí:

$$T = \frac{P_T}{P_F} \quad [-], \quad (2.29)$$

resp.

$$T_\lambda(\lambda) = \frac{P_{T,\lambda}(\lambda)}{P_{F,\lambda}(\lambda)} \quad [-]. \quad (2.30)$$

Pre jednoduchšie popisovanie telies je možné úpravou rovnice 2.16, odvodiť vzťah:

$$A + R + T = 1 \quad (2.31)$$

Podľa vyššie uvedenej rovnice je nepriehľadné teleso charakterizované hodnotami $A = 0, R = 1, T = 0$. V prípade priehľadného telesa sú hodnoty koeficientov $A = 0, R = 0, T = 1$ a pre absolútne čierne teleso sú hodnoty uvedených koeficientov $A = 1, R = 0, T = 0$ [1, 5, 10].

Kirchhoffov zákon

Kirchhoffov zákon udáva vzťah medzi emisivitou ε a pohltivosťou A [1, 5, 10].

Definícia 8 *Pre telesá nachádzajúce sa v termodynamickej rovnováhe, ktoré vyžarujú a pohlcujú tepelné elektromagnetické žiarenie je hodnota emisivity a pohltivosti identická a závisí len na teplote tohto telesa.*

$$\varepsilon(T) = A(T). \quad (2.32)$$

Pre definíciu Kirchhoffovho zákona je veľmi intuitívne predpokladať, že sa jedná o ideálny stav a platí len pre absolútne čierne telesá. Napriek tomu je možné ho aplikovať s veľmi veľkou presnosťou v prípade, že rozdiel medzi povrchovou teplotou a teplotou zdroja žiarenia je rádovo menší ako stovky stupňov [1].

3 Numerické metódy

Význam pojmu simulácia alebo simulovanie je podľa slovníka definovaný ako predstierať, napodňovať. Vo vedeckých, priemyselných aplikáciach to znamená priblížiť sa výsledkom reálnych situácií pomocou numerických metód a výpočtovej techniky. Medzi tieto metódy patrí aj metóda konečných prvkov a metóda konečných objemov, ktoré sa snažia postupnou aproximáciou priblížiť riešeniu diferenciálnych rovníc, ktoré popisujú fyzikálne javy. V tejto kapitole budú tieto metódy principiálne popísané a porovnané.

3.1 Metóda konečných prvkov

Pôvod metódy konečných prvkov začal v 50. rokoch 20. storočia, kedy sa vedecká komunita snažila využívať metódu konečných diferencií na riešenie zložitých, geometricky nepravidelných problémov.

Pojem *konečný prvok* bol zavedený v roku 1960 hoci samotná metóda bola prvýkrát využitá v roku 1954 pre aplikácie v leteckom priemysle. V rannom období bola metóda využívaná prevažne na problémy týkajúce sa pružnosti, pevnosti a mechanických vlastností materiálov ale neskôr sa rozvinula a začala byť využívaná pre riešenie problematiky prestupu tepla a prúdenia tekutín.

Pôvodne bol matematický základ metódy postavený na variačnom počte a Rayleigh-Ritz spôsobe riešenia diferenciálnych rovníc s okrajovými podmienkami, ktorý pre problémy mechaniky tuhých telies ponúkal uspokojivé výsledky.

Využitie tejto techniky ale nebolo možné pre zložitejšie, nelineárne problémy (napr. prúdenie tekutín). Rozšírenie matematického aparátu bolo dosiahnuté využitím Garelkinovej techniky vážených reziduí, ktorá umožňuje univerzálne využitie metódy konečných prvkov a využíva sa vo väčšine aplikácií dodnes [12].

3.1.1 Princíp MKP

Metóda konečných prvkov spočíva v niekoľkých základných krokoch, ktoré budú popísané v sekciách nižšie. K popisu MKP je veľmi praktické zaviesť názornú diferenciálnu rovnicu:

$$-\frac{d^2u(x)}{dx^2} = 2 \quad 0 < x < L \quad (3.1)$$

a okrajové podmienky sú zadané ako:

$$u(0) = u(1) = 0$$

Diskretizácia

Diskretizácia je definovaná ako proces kedy je geometria modelu, rozdelená na konečný počet menších oblastí, pre ktoré budú riešené diferenciálne rovnice zodpovedajúce konkrétnemu fyzikálnemu javu.

Tieto oblasti sú prepojené v bodoch, ktoré sa nazývajú uzly a spolu tvoria tzv. výpočtovú sieť. Tá je tvorená podľa určitých pravidiel kedy sa susediace oblasti nesmú prekrývať a medzi prvkami nesmie byť žiadna medzera.

Matematický je možné túto definíciu zapísať nasledovne:

Definícia 9 Ak je diferenciálna rovnica reprezentujúca určitý fyzikálny zákon definovaná na doméne $0 \leq x \leq L$, potom je možné ju rozdeliť na konečný počet menších a neprekrývajúcich sa intervalov/prvkov, ktoré sú definované ako:

$$e_k = \{x : x_k \leq x \leq x_{k+1}\}$$

a sú ohraničené uzlami x_k .

Samotná hustota siete závisí na požadovanej presnosti riešenia, vo všeobecnosti je možné tvrdiť, že jemnejšia sieť ponúka presnejšie výsledky ale za cenu dlhšieho výpočtového času [12, 13].



Obr. 3.1: Princíp rozdelenia domény na konečný počet menších oblastí.

Aproximácia

Ako už bolo uvedené v sekcii 3.1.1, tak skúmané systémy sú popísané pomocou diferenciálnych rovníc, veľmi často sa jedná o rovnice, ktoré obsahujú viaceré premenné teda parciálne diferenciálne rovnice.

Je nutné poznamenať, že dospieť k výsledku analyticky je veľmi problematické a častokrát nemožné keďže ich riešenie nie je jeden diskretný bod ale spojitá funkcia.

Z tohto dôvodu sa využívajú numerické metódy, ktoré transformujú tieto diferenciálne rovnice na sústavu jednoduchších linearných rovníc, ktorých výsledkom je približné riešenie daného problému. Medzi tieto metódy patria:

- Galerkinova metóda,
- Rayleigh-Ritz metóda,
- kolokačná metóda,

- metóda najmenších štvorcov.

Tieto metódy sú založené na technike vážených reziduí, ktorej princíp bude popísaný nižšie [12, 13].

Galerkinova metóda vážených reziduí

Prvým krokom tejto metódy je diskretizácia popísaná v sekcii 3.1.1. Po diskretizácii bude cez jednotlivé prvky z definície 9 aproximované riešenie pomocou bázových funkcií $\phi_j(x)$ spolu s neznámym parametrom a_i .

V prípade, že sú parametre a_i známe a ich počet je identický s počtom bázových funkcií $\phi_j(x)$ platí tvrdenie, že na danom prvku e_k je známa aproximácia riešenia $U(x)$. Pre celý rozsah $0 \leq x \leq L$ domény potom platí:

$$U(x) \cong a_1\phi_1(x) + a_2\phi_2(x) + \dots + a_{n+1}\phi_{n+1}(x). \quad (3.2)$$

Tento výraz je možné zapísať nasledovne:

$$U(x) = \sum_{i=1}^{n+1} a_i\phi_i(x). \quad (3.3)$$

Funkcia $U(x)$ musí byť zvolená tak aby boli splnené okrajové podmienky danej diferenciálnej rovnice. Keďže bude rovnica vyriešená aproximáciou pomocou výrazu 3.3 je logické predpokladať, že počas tejto operácie vzniknú odchýlky od správneho riešenia.

Z tohto dôvodu je nutné zapísať aproximované riešenie pomocou tzv. reziduálnej funkcie, ktorá zodpovedá za chyby pri výpočte. S využitím rovnice 3.1 vyzerá tento zápis nasledovne:

$$R(U, x) \equiv -\frac{d^2u(x)}{dx^2} - 2, \quad (3.4)$$

kde U je aproximácia pravého riešenia U^* , pre ktoré platí

$$R(U^*, x) \equiv 0. \quad (3.5)$$

Výrazy 3.4 a 3.5 vyjadrujú, že pre akékoľvek $T \neq T^*$ bude riešenie rovnice zaťažené chybou, reziduom.

Preto sa využíva váženie reziduí, kedy sú jednotlivé odchýlky prenášobené váhovou funkciou a integrované cez celú doménu.

$$\int_0^L W(x)R(T, x)dx = 0. \quad (3.6)$$

V prípade Galerkinovej techniky sú váhové funkcie identické s bázovými funkciami a keďže je počet parametrov a_j rovný počtu bázových funkcií ϕ_j bude vytvorená sústava lineárnych rovníc, ktorej riešenie bude aproximáciou diferenciálnej rovnice daného problému [12, 13].

3.2 Metóda konečných objemov

Ďalšou numerickou metódou, ktorá je veľmi často využívaná vo výpočtových programoch je metóda konečných objemov. V tejto kapitole bude uvedený jej základných princíp a taktiež bude porovnaná s metódou konečných prvkou z kapitoly 3.1.

3.2.1 Princíp MKO

Metóda konečných objemov je principiálne veľmi podobná MKP t.j. zdieľajú rovnaké kroky (diskretizácia, aproximácia) potrebné k numerickému riešeniu diferenciálnych rovníc.

Hoci patrí MKP k najuniverzálnejším numerickým metódam, pre úlohy týkajúce sa zákonov zachovania fyzikálnych veličín (výpočty z oblasti prúdenia tekutín a prestupu tepla) je veľmi vhodná metóda konečných objemov. Podobne ako u MKP je vhodné zaviesť názornú diferenciálnu rovnicu, na ktorej bude následne popísaný princíp MKO.

$$\frac{d}{dx} \left[\Gamma \frac{du(x)}{dx} \right] = -s(u) \quad 0 < x < L \quad (3.7)$$

a okrajové podmienky sú zadané ako:

$$u(0) = u(1) = 0$$

kde u reprezentuje množstvo zachovanej skalárnej veličiny (napr. teplota), $s(u)$ reprezentuje zdrojovú funkciu (napr. množstvo generovaného tepla) a Γ je koeficient ktorý môže byť funkciou priestoru x ale taktiež aj závislej premennej u , teda $\Gamma(x, u)$. V prípade, že by boli miesto premenných $u(x)$, $s(u)$ a $\Gamma(x, u)$ dosadené konkrétne veličiny (teplota, množstvo generovaného tepla a súčiniteľ tepelnej vodivosti) reprezentovala by rovnica 3.7 prvý Fourierov zákon z definície 3 uvedenej v časti týkajúcej sa prestupu tepla [15].

Diskretizácia

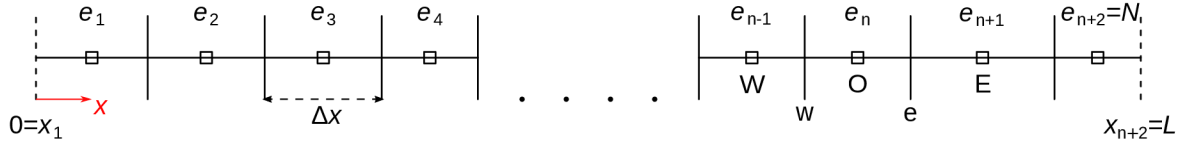
U MKO je geometria modelu rozdelená na konečný počet kontrolných objemov. Jej základnou výhodou je možnosť popisu neznámych v závislosti od ich umiestnenia v bunke teda kontrolnom objeme. Toto je možné dosiahnuť viacerými spôsobmi, z ktorých dva najhlavnejšie sú:

- Cell-centred prístup,
- Vertex-centred prístup.

V prípade *Cell-centred* prístupu, sú neznáme týkajúce sa veličín zachovania umiestnené v strede bunky výpočtovej siete. V druhom prípade t.j. *Vertex-centred* sú neznáme umiestnené na hranách bunky výpočtovej siete. Oba spôsoby majú svoje

výhody, Cell-centred prístup je vhodnejší pri výpočtoch rozdielnych rozhraní (napr. prestup tepla medzi pevnou látkou a tekutinou) pretože bunky pre tieto médiá sú tu lepšie definované. Na druhú stranu výhodou Vertex-centred prístupu je dobrá schopnosť definície okrajových problémov, pretože neznáme môžu byť presne definované na okraji geometrie.

V porovnaní s MKP bude v tomto prípade výpočtová doména rozdelená inak, tu je nutné zdefinovať označenie pre stredy konečných objemov (W,O,E) a taktiež steny buniek (w,e). Princíp je uvedený na obrázku nižšie [15, 16, 17].



Obr. 3.2: Princíp rozdelenia domény na konečné objemy.

Aproximácia

Proces aproximácie začína integráciou rovnice 3.7 cez konečný objem e_n .

$$\int_{e_n} \frac{d}{dx} \left[\Gamma \frac{du(x)}{dx} \right] dx = - \int_{e_n} s(u) dx \quad (3.8)$$

V ďalšom kroku bude rovnica 3.8 zjednodušená integráciou ľavej strany a aplikovaním Lagrangeovej vety o strednej hodnote pre pravú stranu rovnice.

$$\left[\Gamma \frac{du(x)}{dx} \right]_{e,n} - \left[\Gamma \frac{du(x)}{dx} \right]_{w,n} = -s_n \cdot e_n, \quad (3.9)$$

kde indexy e, n a w, n zodpovedajú za východnú a západnú stenu výpočtovej bunky n .

Pri pohľade na pravú stranu rovníc 3.8 a 3.9 môže byť veľmi ľahké inštinktívne spochybňovať toto zjednodušenie vzhľadom na tvar funkcie $f(u)$ cez interval e_n , tu je však nutné poznamenať, že ak bude vhodne zvolená veľkosť konečného objemu e_n je táto aproximácia postačujúca. V ďalšom kroku budú členy na ľavej strane rovnice nahradené výrazom pre tok:

$$J = -\Gamma \frac{du(x)}{d(x)} \quad (3.10)$$

Výsledkom dosadenia vzťahu 3.10 do rovnice 3.9 a jej následnou úpravou potom bude:

$$J_{e,n} - J_{w,n} = s_n \cdot x_n. \quad (3.11)$$

Rovnicu 3.11 je možné vyjadriť pre každú bunku e_n výpočtovej domény.

Kedže základná rovnica obsahuje deriváciu v člene toku, znamená to, že táto funkcia je spojitá a teda tok vstupujúci jednou stranou steny bunky musí byť identický s tokom, ktorý vystupuje z druhej strany steny bunky a teda $J_{e,n} = J_{w,n+1}$. Vďaka tomuto tvrdeniu je možné vyjadriť rovnicu 3.11 pre celú výpočtovú doménu nasledovne:

$$J_{e,L} - J_{w,1} = s_1 \cdot x_1 + s_2 \cdot x_2 + \dots + s_n \cdot x_n = \int_0^L s dx \quad (3.12)$$

Rovnice 3.11, 3.12 vyjadrujú veľmi dôležitú vlastnosť MKO a to lokálne a globálne zachovanie toku. Dôvodom prečo je táto vlastnosť tak významná je, že platnosť rovnice 3.12 nezávisí na veľkosti ani na tvare výpočtovej domény, pretože toky prechádzajúce vnútornými stenami sa vždy vyrušia.

Ďalej jej platnosť nezávisí ani na počte, tvare a veľkosti jednotlivých buniek. Toto zaručuje nezávislosť MKO na výpočtovej doméne a teda umožňuje riešiť problémy pre veľmi zložité geometrie [15, 16, 17].

3.3 Zloženie výpočtovej siete

Ako už bolo uvedené v predošlých sekciách týkajúcich sa numerických metód, zloženie siete je kritickým faktorom pre presnosť riešenia daného problému. Napríklad v prípade rovnice 3.1 je možné k aproximácii riešenia využiť lineárne funkcie. Presnosť tohto výsledku ale nemusí byť najlepšia, preto sa využívajú funkcie vyšších rádov, pomocou ktorých je možné dosiahnuť presnejšej aproximácie riešenia danej rovnice.

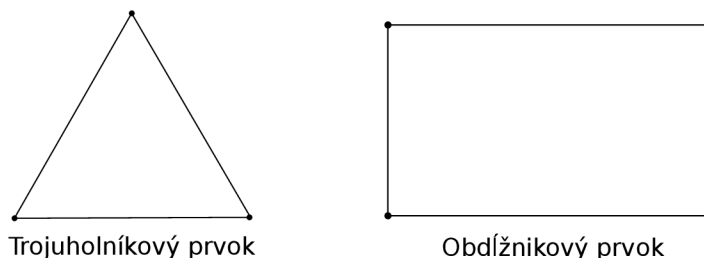
Spomínaná rovnica taktiež popisuje daný fyzikálny jav len v jednorozmernom priestore, čo je v reálnom svete pre väčšinu priemyselných a vedeckých aplikácií nemožné. Princíp MKP a MKO je však použiteľný aj pre viacrozmerné problémy [12, 13].

3.3.1 Dvojrozmerné tvary konečných prvkov

Použitie metódy konečných prvkov v dvojrozmernom priestore je možné aj pre aplikácie z reálneho sveta a to väčšinou v prípade, kedy je daný trojrozmerný problém symetrický v jednej z osí súradnicovej sústavy a teda je možné ho zjednodušiť.

V prípade dvojrozmerného problému (priestoru) sa používa viacero mnohoúhelníkových tvarov, napr. ak má samotná doména tvar obdĺžnika, je možné použiť ako konečný prvok obdĺžnik. Tento prvok ale nie je vhodný v prípade, že má doména nepravidelný tvar, z tohto dôvodu sa na diskretizáciu nepravidelných domén využíva trojuholník.

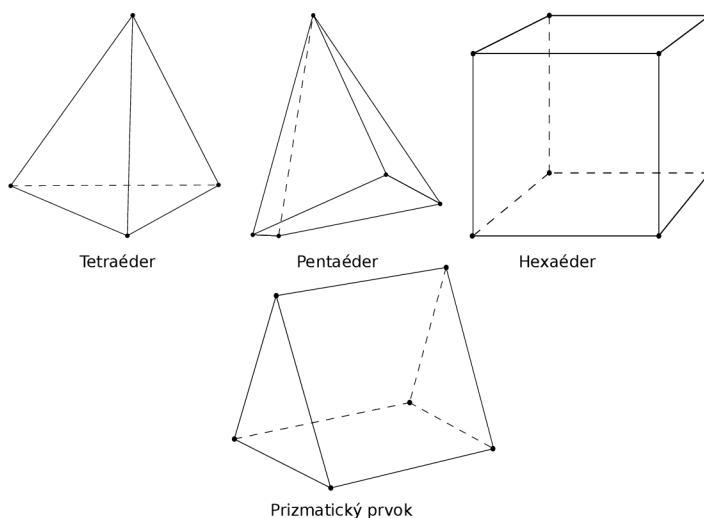
Odlišnosti medzi jedno a dvojrozmerným problémom nekončia len pri tvare konečných prvkov, zložitosť výslednej sústavy rovníc bude taktiež väčšia a to kvôli vyššiemu počtu uzlov. Ďalej, v prípade prudkých zmien danej premennej (reprezentujúcej riešený fyzikálny jav) je nutné v týchto oblastiach vykonať lokálne zjemnenie siete [12, 13, 14].



Obr. 3.3: Dvojrozmerné tvary konečných prvkov.

3.3.2 Trojrozmerné tvary konečných prvkov

Pre trojrozmerný priestor, je diskretizácia riešenej oblasti a následná tvorba siete podobná ako v dvojrozmernom priestore, tvary konečných prvkov sú mnohosteny (tetraéder, pentaéder, hexaéder ai.) a nároky na výpočet sú vyššie.



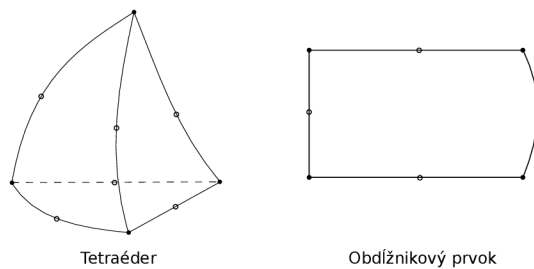
Obr. 3.4: Trojrozmerné tvary konečných prvkov.

3.3.3 Tvary konečných prvkov vyššieho rádu.

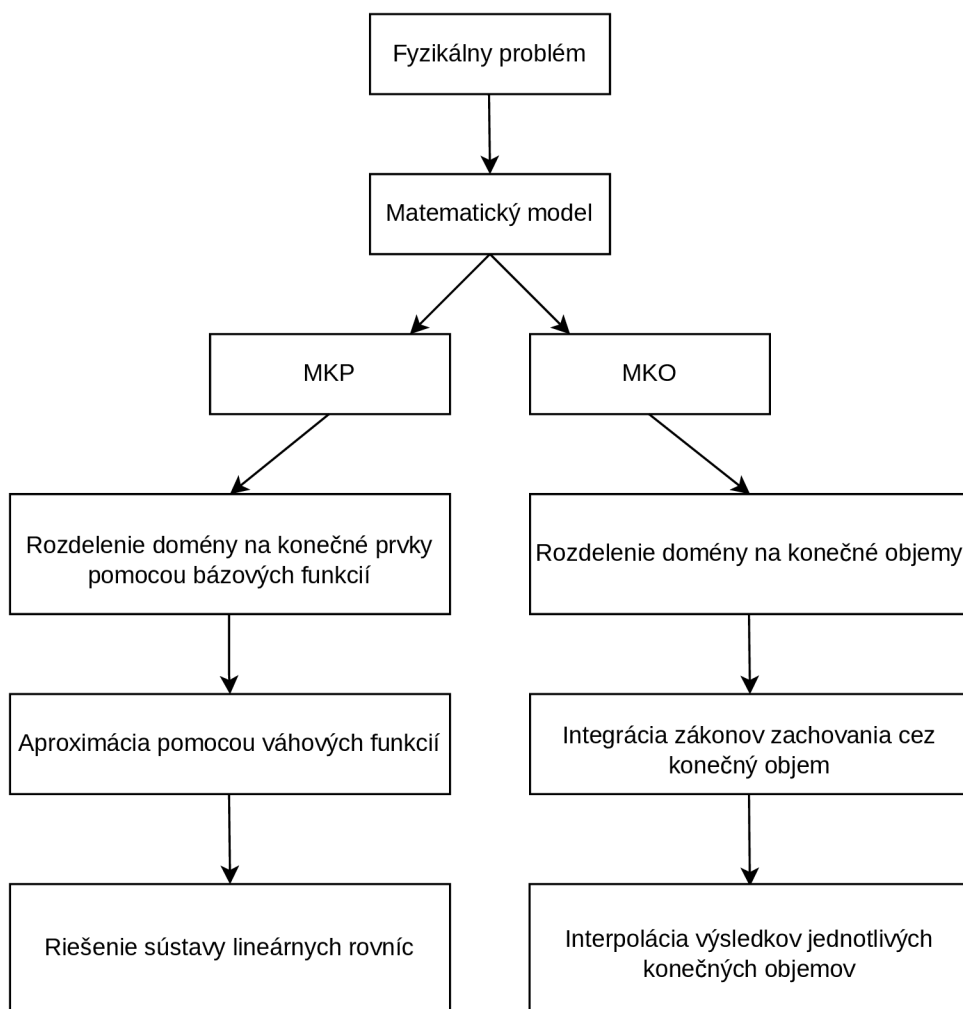
V úvode tejto sekcie bolo uvedené, že vyššiu presnosť výpočtu je taktiež možné dosiahnuť využitím prvkov vyšších rádov. Princíp vyšších rádov pre jednotlivé tvary

je uvedený na obrázku nižšie.

Tu je možné vidieť, že k dosiahnutiu zakrivenia je potrebných viac uzlov, ktoré sú vložené medzi uzly typických tvarov [12, 13, 14].



Obr. 3.5: Tvary konečných prvkov vyššieho rádu.



Obr. 3.6: Diagram numerických metód.

4 Teplotný manažment

Ako už bolo popísané v kapitole 1 porucha zariadenia v prípade nesprávneho alebo žiadneho teplotného manažmentu je takmer nevyhnutná. Vo všeobecnosti sa metódy chladenia delia na dva druhy:

Aktívne chladenie umožňuje pomocou rôznych techník dosiahnuť teploty nižšie ako je teplota okolia.

Pasívne chladenie, kde je odvod tepla dosiahnutý efektívnym rôzmiestnením tepelných zdrojov alebo chladičov.

Podľa rešerše [18] je ďalej možné metódy chladenia podrobnejšie kategorizovať na chladenie pomocou:

- vzduchu,
- kvapalín,
- tepelných trubíc,
- chladiacich boxov
- termoelektrických zariadení,
- fázovej zmeny materiálu.

Z uvedených metód budú popísané len tie, ktoré sú najčastejšie využívané pri chladení výkonových modulov.

4.1 Chladenie pomocou vzduchu

Vzdušné chladenie je jednou z najjednoduchších a najspoľahlivejších metód chladenia elektrických zariadení.

4.1.1 Voľné prúdenie

Voľné prúdenie funguje na princípe odvodu tepla z čipu na povrch zariadenia kde je toto teplo prúdením vzduchu odvádzané do prostredia. Využitie chladenia pomocou voľného prúdenia je možné vo väčšine nízkovýkonových aplikácií do 50 W, v prípade vysokovýkonových aplikácií je to možné za prítomnosti rozsiahlych chladiacich plôch. Najčastejšie sa pre tieto plochy využívajú materiály s vysokými hodnotami súčiniteľa tepelnej vodivosti (hliník, meď) [19, 21].

4.1.2 Nútené prúdenie

Nútené prúdenie sa využíva v prípade, že voľné prúdenie nie je pre chladenie daného zariadenia vhodné. Táto metóda je sprostredkovaná inštaláciou zariadení ako sú ventilátory, vzduchové pumpy alebo trysky [18, 21].

4.2 Chladienie pomocou kvapalín

Pre chladienie vysokovýkonových zariadení je veľmi atraktívnou metódou chladienie pomocou prúdenia kvapalín a to z dôvodu vysokej efektivity, ktorá je sprostredkovaná vysokými hodnotami súčiniteľa prestupu tepla α .

S použitím kvapalinového chladienia súvisia potenciálne problémy spôsobené prítomnosťou kvapaliny v blízkosti obvodových prvkov. Súčiastky, ktoré produkujú teplo sú v priamom alebo nepriamom kontakte s kvapalinou, ktorá toto teplo odvádza voľným alebo núteným prúdením.

Samotná tekutina, ktorá sprostredkúva prenos tepla môže zotrvať v kvapalnom stave alebo môže vplyvom tepla prejsť fázovou zmenou skupenstva. V závislosti od kontaktu chladiacej kvapaliny s komponentami obvodu sa chladienie pomocou kvapalín delí na *priame* a *nepriame*.

V prípade priameho chladienia sú obvodové prvky úplne ponorené v dielektrickej kvapaline, na chladienie výkonových zariadení sa využíva trichlórtrifluóretán. Nútené prúdenie je dosiahnuté pomocou čerpadla, kvapalina tak obmýva komponenty chladeného zariadenia a pôsobením vyprodukovaného tepla sa zahrieva. Následne kvapalina opustí zariadenie a vo výmenníku tepla sa ochladí a vracia sa späť. Existujú rôzne spôsoby priameho chladienia, ktoré budú uvedené nižšie.

U nepriameho chladienia nie sú obvodové prvky ponorené do chladiacej kvapaliny. Vo väčšine prípadov je medzi chladené zariadenie a chladiaci systém vložená doska z kovu, ktorý má vysoký súčiniteľ tepelnej vodivosti. Keďže sú obvodové prvky od kvapaliny izolované môže byť ako chladiace médium použitá akákoľvek kvapalina. Pre tieto účely býva využívaná voda, ktorá má taktiež vysoký koeficient tepelnej vodivosti. Hoci sú v tomto prípade obvodové prvky izolované od vody, vyskytuje sa tu problém korózie, z tohto dôvodu sa využíva deionizovaná voda alebo roztoky vody ako etylénglykol a propylénglykol [1, 18, 21].

4.2.1 Chladienie nárazovou tryskou

Jedná sa o priamu metódu chladienia kedy je na zdroj tepla namierená tryska kvapaliny, ktorej prúdením je dosiahnutý veľmi rýchly odvod tepla. Výhodou tejto metódy je veľmi účinné chladienie horúcich miest na čipe (tzv. hot spots) v prípade priameho zásahu tryskou.

4.2.2 Chladienie rozprašovaním

Pri tejto metóde chladienia je kvapalina rozprášená na chladený povrch, kde generované teplo úvádza chladiacu kvapalinu do varu a tá sa následne vyparuje. Výhodou je využitie spomínanej fázovej zmeny skupenstva kvapaliny pri rozprašení

čo umožňuje efektívny odvod tepla, ďalej priamy kontakt so zdrojom tepla, ktorým je odstránený tepelný odpor vrstvy šľužiacej na upevnenie k chladiču.

V porovnaní s nárazovou tryskou je pri rozprašovaní rýchlosť kvapaliny nižšia s čím súvisí aj väčšia šírka trubice a teda aj menší tlak. Ďalší rozdiel je v povrchovej teplote chladeného zariadenia, ktorá je pri rozprašovaní rovnomerne rozložená [18, 19, 20, 21].

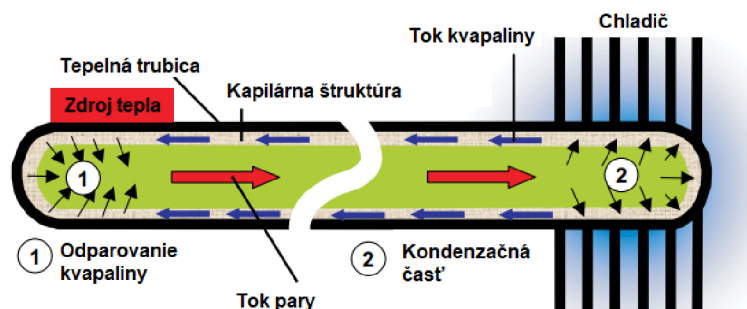
4.2.3 Mikrokanálové chladenie

Tento typ chladenia funguje na princípe chladiča, ktorý obsahuje mnoho kanálikov s mikroskopickými rozmermi medzi, ktorými prúdi chladiaca kvapalina. Týmto spôsobom je dosiahnutý vysoký súčiniteľ prestupu tepla a teda efektívne rozptýlenie tepla. Medzi výhody tejto metódy sa zaraďuje jej kompaktnosť a malé množstvo použitej chladiacej kvapaliny [19, 20, 21].

4.3 Chladenie pomocou tepelnej trubice

Tepelná trubica je zariadenie, ktoré slúži na prenos tepla zo zdroju na miesto kde je toto teplo následne rozptýlené. Jedná sa o vzduchotesnú trubicu, ktorá je pri zníženom tlaku naplnená kvapalinou a vnútorná stena trubice je obložená kapilárnou štruktúrou.

V odparovacej časti, ktorá sa nachádza pod zdrojom tepla sa kvapalina odparuje pričom absorbuje teplo zo zdroju, z dôvodu tlakového rozdielu para postupuje trubicou do kondenzačnej časti, kde kondenzuje a odvádza teplo do chladiča. Následne skondenzovaná kvapalina putuje cez kapilárnu štruktúru späť do odparovacej časti a cyklus sa opakuje [18, 21].



Obr. 4.1: Princíp tepelnej trubice, prevzaté z aplikačného manuálu firmy SEMIKRON [21].

5 Ciele diplomovej práce

V rámci zachovania prehľadnosti textu je diplomová práca rozdelená na teoretickú a praktickú časť. Účelom teoretickej časti je zoznámiť čitateľa so základnými poznatkami, ktoré sa týkajú zadania práce.

V praktickej časti diplomovej práce budú východzie numerické simulácie porovnané s termografickým meraním vykonaným na simulovanom výkonovom module.

Toto bude slúžiť k overeniu presnosti numerického modelu prestupu tepla, ktorý je uvedený v kapitole 9. Pre porovnanie budú využité štatistické veličiny určené na stanovanie chýb merania napr. relatívna odchýlka. V prípade zásadných odlišností budú nastavenia simulácie upravené spôsobom, ktorý dostatočne spresní výpočet (zjemnenie siete, úprava okrajových podmienok a pod.).

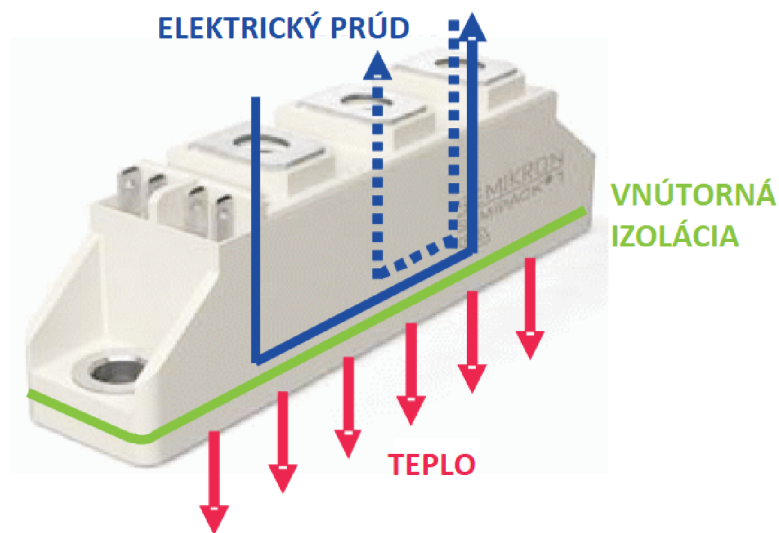
Ďalej budú vykonané experimenty s geometriou modulu, ktorých výsledkom by malo byť zlepšenie termálnych parametrov IGBT štruktúry čipu. Pre tieto pokusy budú využívané poznatky uvedené v teoretickej časti ale aj verejne publikovaná literatúra, ktorá sa týka tejto problematiky. Následne budú pomocou výsledkov navrhnuté metódy, ktoré budú slúžiť k vyrovnaniu, homogenizácii teploty čipov. Praktická časť bude značne experimentálna a bude obsahovať väčšie množstvo simulácií v závislosti od zmenených parametrov, medzi ktoré môžu patriť ďalšie úpravy geometrie alebo využitie iných materiálov pre konštrukciu výkonového modulu. Záverom práce bude vyhodnotenie testovaných úprav geometrie ale aj diskusia týkajúca sa vhodnosti vykonaných zmien z výrobného a ekonomického hľadiska.

6 Prestup tepla a tepelný odpor

Zložitosť obvodov vo výkonovej elektronike môže siahať od jednej polovodičovej súčiastky až po niekoľko desiatok komponentov. Obvody veľmi často obsahujú mnoho polovodičových súčiastok (usmerňovacie diódy, tyristory, MOSFET alebo IGBT tranzistory) spolu s príslušnými chladičmi, ktoré musia byť s obvodovými prvkami prepojené tak aby plnili svoju funkciu, teda odvádzali teplo.

Jednotlivé komponenty ale musia byť vodivo prepojené a zároveň od seba elektricky odizolované. Riešením tejto problematiky je výkonový modul, ktorý kombinuje obvodové prvky do jednej zostavy pričom oddeľuje toky prúdu a tepla.

Moduly obsahujú vnútornú izoláciu, ktorá zabezpečuje elektrické oddelenie kovovej konštrukcie od obvodu a umožňuje prechod tepla k spoločnému chladiacemu zariadeniu [21].



Obr. 6.1: Princíp výkonového modulu, prevzaté z [21].

K tomu aby bolo zariadenie schopné viesť čo najvyšší možný prúd je nutné efektívne odvádzat teplo cez jednotlivé vrstvy až k chladiču. Schopnosť rozptýliť generované stratové teplo počas spínania je vyjadrené pomocou teplotného rozdielu medzi čipom a chladičom.

$$\Delta T_{j-s} = T_j - T_s \quad (6.1)$$

Kvôli prítomnosti viacerých vrstiev, ktoré ovplyvňujú prestup tepla vo výkonovom module je vhodné definovať veličiny analogické k veličinám, ktoré popisujú elektrický obvod. Týmto spôsobom je potom možné veľmi elegantne identifikovať, ktorá časť

zariadenia ovplyvňuje schopnosť odvádzať stratové teplo.

$$R_{th(j-s)} = \frac{T_j - T_s}{Q_v}, \quad (6.2)$$

kde $R_{th(j-s)}$ je veličina tepelného odporu a Q_v je teplo, ktoré prestupuje daným systémom.

Meranie teploty medzi vrstvami výkonového modulu môže byť problematické, keďže sa vrstvy kvôli ich blízkosti teplotne ovplyvňujú a teda získať presný údaj o teplote nie je jednoduchá úloha. Pre výpočet tepelného odporu je teda možné využiť druhý vzťah:

$$R_{th} = \frac{d}{\lambda_c \cdot S}. \quad (6.3)$$

Spolu s tepelným odporom sa na popis prestupu tepla viacerými vrstvami využíva tepelná kapacitancia C_{th} :

$$C_{th} = c \cdot \rho = s \cdot V, \quad (6.4)$$

kde s je objemová tepelná kapacita a V je objem telesa [21].

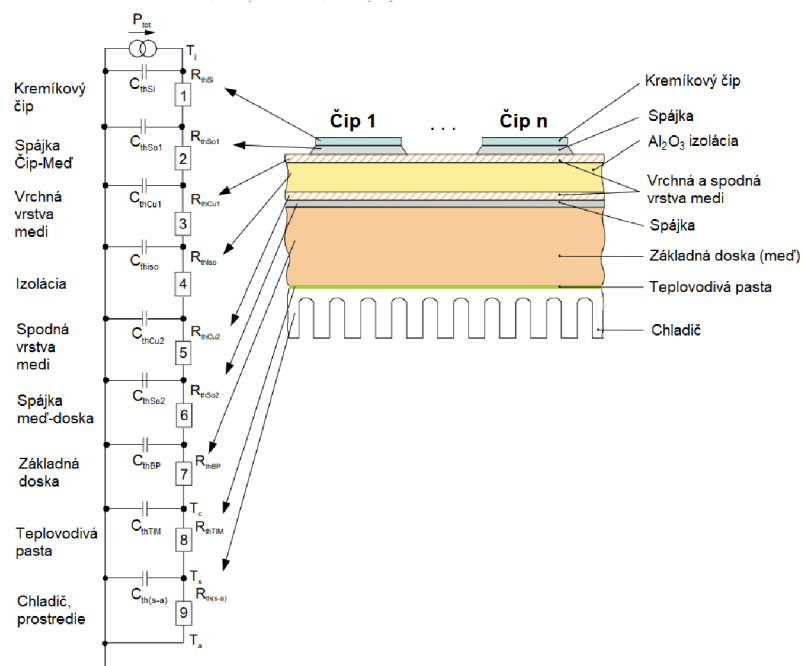
Tab. 6.1: Tabuľka analógie tepelných a elektrických veličín [22].

Tepelné	Elektrické
Teplo Q [J]	Náboj q [C]
Teplota T [K]	Napätie U [V]
Tepelný tok Q_f [W]	Prúd I [A]
Tepelný odpor R_{th} [K · W ⁻¹]	Elektrický odpor R [Ω]
Tepelná kapacitancia C_{th} [J · K ⁻¹]	Elektrická kapacita C_q [F]
Tepelná vodivosť λ_c [W · K ⁻¹ · m ⁻¹]	Elektrická vodivosť G [S]

6.1 Prestup tepla štruktúrou výkonového modulu

Ako už bolo uvedené vyššie, výkonový modul obsahuje niekoľko vrstiev, z ktorých každá výrazne vplýva na odvod stratového tepla. Základné vrstvy, ktoré tvoria výkonový modul a ich zaradenie do náhradného tepelného obvodu sú zobrazené na obrázku 6.2 a medzi faktory, ktoré ovplyvňujú odvod tepla patrí:

- *Čip*: plocha, hrúbka, geometria, rozloženie
- *Dizajn DBC štruktúry*: materiál, hrúbka
- *Materiál, kvalita spojenia čipu a DBC*: spájka, adhezívum
- *Prítomnosť základnej dosky*: materiál, geometria
- *Spájkovanie DBC k základnej doske*: materiál, kvalita
- *Zloženie modulu*: tepelný kontakt k chladiču, hrúbka a kvalita tepelnej pasty.



Obr. 6.2: Názorná štruktúra výkonového modulu spolu s náhradným obvodom pre prestup tepla, prevzaté z aplikačného manuálu firmy SEMIKRON [21].

Tab. 6.2: Tabuľka tepelných materiálových konštánt pre materiály využívané vo výkonových modulloch.

Materiál	λ_c [$\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]	s [$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$]	α_{CTE} [ppm/K]
Kremík	148	1650	4,1
Meď	394	3400	17,5
Hliník	230	2480	22,5
Striebro	407	2450	19
Molybdén	145	2575	5
Spájky	70	1670	15-30
Al_2O_3	24	3025	8,3
AlN	180	2435	5,7
AlSiC	180	2223	7

7 Tranzistor s izolovaným hradlom - IGBT

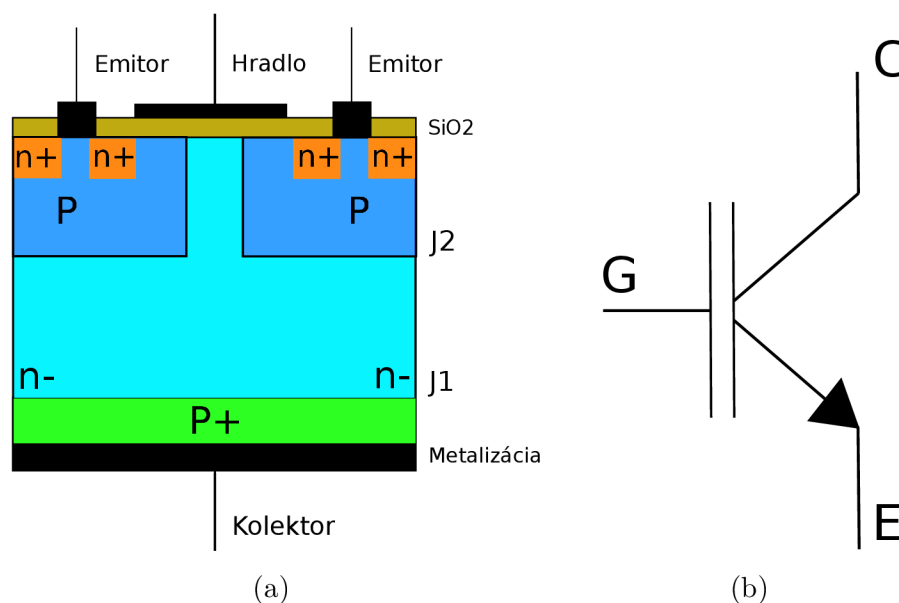
Výkonový modul použitý k simulácii prestupu tepla obsahuje polovodičové súčiastky, ktoré majú spínaciu funkciu. Na spínanie vysokých hodnôt prúdov a napätí však nie je možné použiť klasické súčiastky ako sú bipolárne tranzistory, diódy a MOSFETy. Z tohto dôvodu boli vyvinuté výkonové súčiastky t.j. tyristory, Power MOSFETy a IGBT.

Cieľom tejto kapitoly bude popísať základnú funkciu IGBT keďže simulovaný modul obsahujú práve túto výkonovú súčiastku.

7.1 Štruktúra IGBT

IGBT súčiastka kombinuje vlastnosti MOSFET a bipolárneho tranzistoru čo sa odráža aj na pomenovaní terminálov a teda:

- G: Hradlo,
- C: Kolektor,
- E: Emitor.



Obr. 7.1: Štruktúra a schématická značka IGBT.

Z obrázku 7.1a je očividných niekoľko skutočností a to, že sa jedná o štvorvrstvý (NPNP) polovodičovú súčiastku a hradlo nie je spojené s vnútornou štruktúrou polovodiča a teda spolu s vrstvou SiO_2 je možné ho vnímať ako kondenzátor.

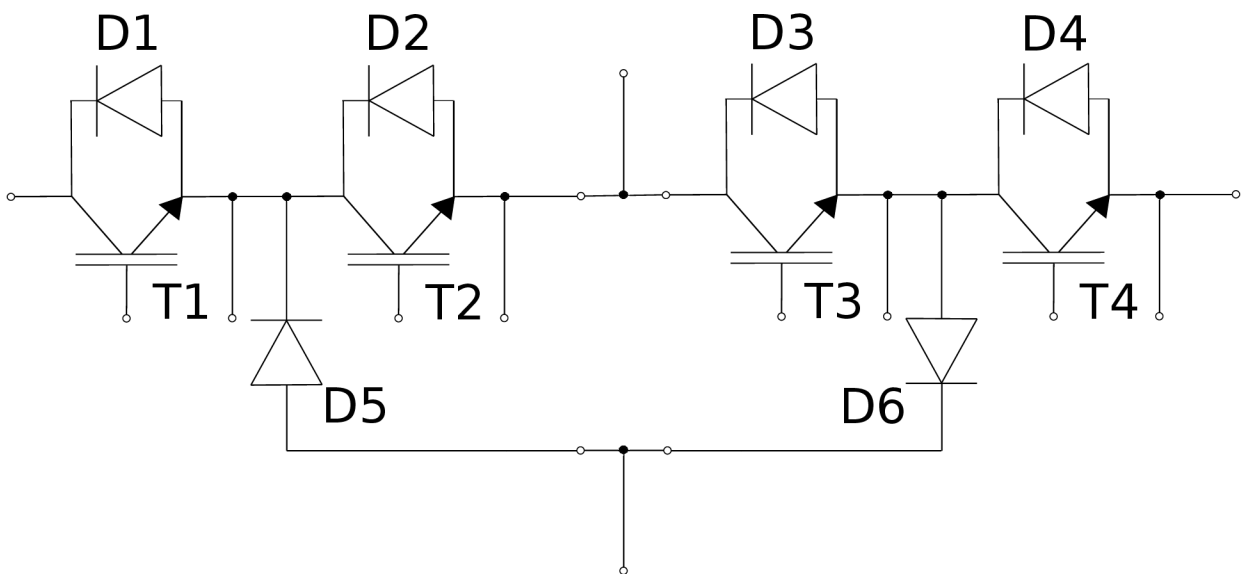
V prípade, že bude napätie $U_{CE} > 0$ a $U_{GE} = 0$ bude rozhranie $J1$ v priepustnom smere a $J2$ v závernom smere, teda štruktúrou nebude pretekať žiadny prúd.

Ak bude ale napätie $U_{GE} > 0$ začnú sa vo vrstve SiO_2 na strane hradla hromadiť elektróny a na strane polovodiča diery.

V momente kedy napätie U_{GE} dosiahne hodnoty prahového napätia U_{th} sa medzi vrstvami $n+$ a $n-$ vytvorí oblasť záporných nosičov náboja, ktorá umožní prechod elektrickému prúdu I_{CE} .

7.2 Zapojenie IGBT

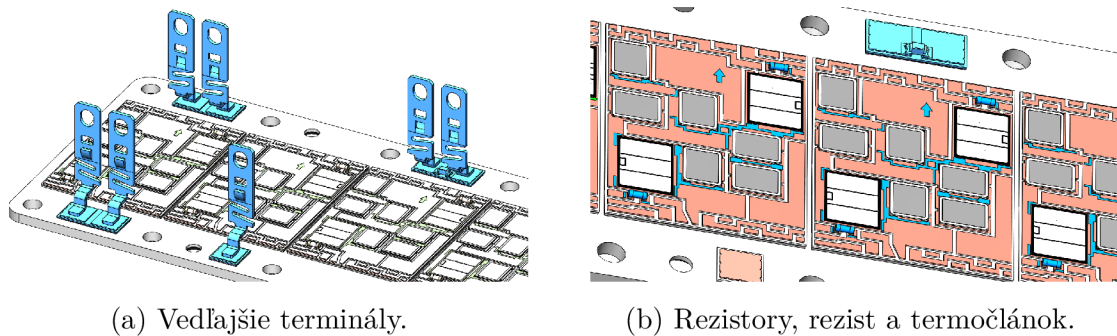
Na obrázku je uvedené zapojenie IGBT vo výkonovom module SEMITRANS®10 spolu s diódami, ktoré slúžia k eliminácii napätových špičiek v prípade náhleho odpojenia potenciálnej indukčnej záťaže a na limitáciu, vyrovnanie napätia medzi príslušnými tranzistormi (toto sa týka diód D5 a D6). Tento fakt je kľúčový pre správne nastavenie simulácie, pretože diódy D1-D4 sú zapojené antiparalelne, tzn. že ak sú príslušné tranzistory otvorené tak diódami nepreteká žiadny prúd a teda zahrievanie vplyvom Jouloveho tepla je zanedbateľné [21, 23, 24].



Obr. 7.2: Schéma simulovaného výkonového modulu.

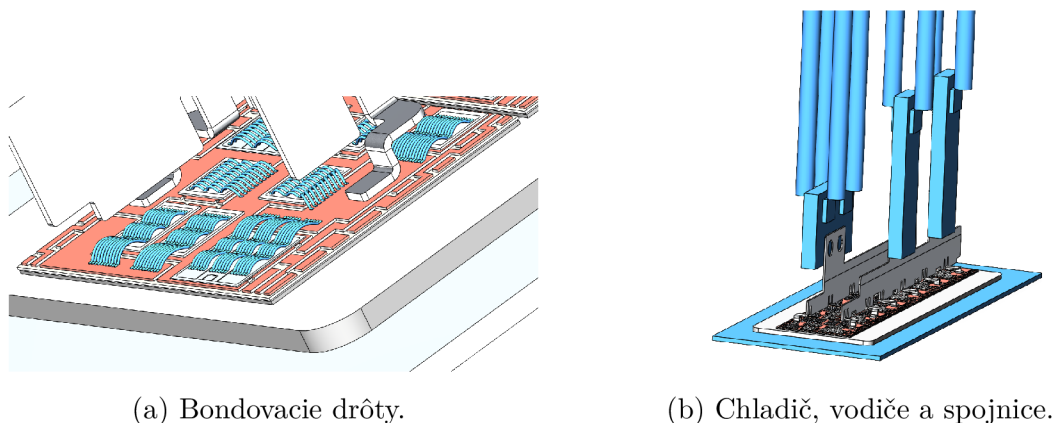
8 Úprava geometrie

Pôvodná geometria simulovaného výkonového modulu je vernou replikou hmotnej súčiastky a teda musí obsahovať každý detail, ktorý je k výrobe modulu potrebný. Pre účely simulácie prestupu tepla však takéto množstvo detailov nie je potrebné a preto bude model zjednodušený. Dôvodom tejto úpravy je hlavne možnosť urýchlenia výpočtu. Pochopiteľne, nie je možné odstrániť väčšinu prvkov geometrie, keďže tento krok by skresľoval presnosť výpočtu, preto budú odstránené len časti, ktoré nie sú potrebné k dosiahnutiu správneho výsledku.



Obr. 8.1: Odstránené časti geometrie.

Pri pohľade na obrázky 8.1a, 8.1b nemôže pozornému čitateľovi uniknúť fakt, že čipy neobsahujú bondovacie drôty, ktoré sú pre simuláciu prestupu tepla esenciálne, keďže mimo iné zabezpečujú aj prechod prúdu čipom, ktorý spôsobuje ich zahrievanie. Pre vernú reprezentáciu merania, ktoré na module počas termografického mapovania čipov prebiehalo bolo taktiež nutné doplniť chladič, vodiče a spojnice pripevnené na hlavné terminály.



Obr. 8.2: Detail na doplnené časti.

8.1 Nastavenie simulácie v prostredí COMSOL

Ďalším krokom k úspešnému numerickému modelu je nastavenie typu a podmienok simulácie.

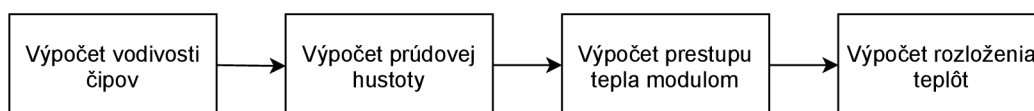
V sekcii 1.2 týkajúcej sa teplotne závislých elektrických porúch bolo pomocou rovníc 1.2 -1.4 bližšie pojednané o vzťahu elektrického prúdu, teploty a rezistivity. Tieto veličiny potom boli uvedené do súvislosti s Joulovým teplom v sekcii 2.2.1, kde bola popísaná generácia tepla prúdom pri jeho prechode vodičom s určitým odporom.

Spomínané javy musia byť pri simulácii zohľadnené, preto bude jej nastavenie pozostávať z dvoch častí a to:

Nastavenie elektrickej simulácie, kde bude najprv pomocou hodnôt z datasheetu určená konduktivita čipov a následne bude vypočítaná prúdová hustota, ktorá bude vstupom pre simuláciu Jouloveho tepla.

Nastavenie simulácie prestupu tepla, v ktorej budú nastavené okrajové podmienky teploty a koeficientov prestupu tepla.

Na vývojovom diagrame 8.3 je zobrazený princíp simulácie.



Obr. 8.3: Princíp simulácie prestupu tepla.

8.1.1 Definícia materiálov

Pred samotným nastavením simulácie je nutné definovať materiály, z ktorých výkonový modul pozostáva.

Tab. 8.1: Tabuľka použitých materiálov.

Materiál	Časť geometrie
Meď	Východzí materiál ¹
Al ₂ O ₃	Izolácia
Kremík	IGBT, Diódy
Hliník	Bondovacie drôty, metalizácia
SnCu3In0,5	DBC spájka
SnAg3,5	Čipová spájka

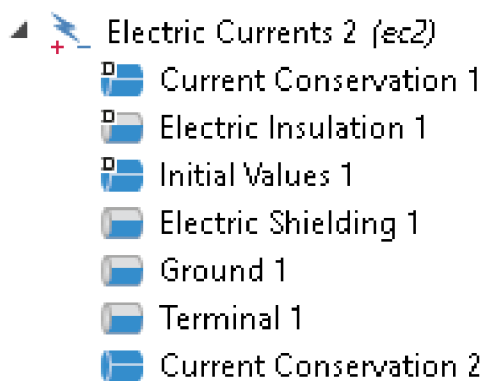
V tabuľke 8.1 sú uvedené využívané materiály. Materiálové vlastnosti sú kľúčové pre presnosť numerického modelu a boli zvolené z knižnice programu COMSOL.

8.1.2 Nastavenie elektrickej simulácie

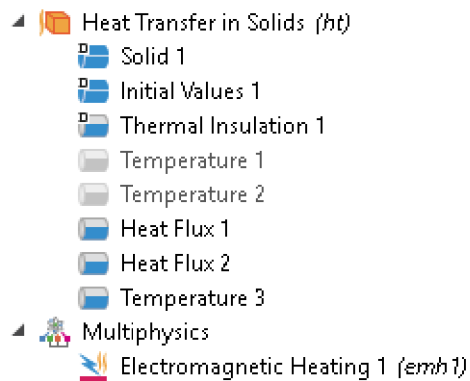
Na výpočet intenzity elektrického poľa, prúdu a rozloženia potenciálu sa využíva rozhranie *Electric Currents (ec)*, to sa skladá z východzích komponentov (*Current Conservation, Electric Insulation, Initial Values*), ktoré sa využívajú k základnej definícii okrajových podmienok.

Pre účely simulácie boli ďalej využité dodatočné komponenty:

- *Terminal*: Nastavenie vstupného prúdu podľa datasheetu $I_0 = 1400A$
- *Ground*: Nastavenie zemného potenciálu $U = 0V$.
- *Electric Shielding*: Definícia tenkej vrstvy, reprezentuje metalizáciu čipu $d_s = 8\mu m$.



(a) *Electric Currents*.



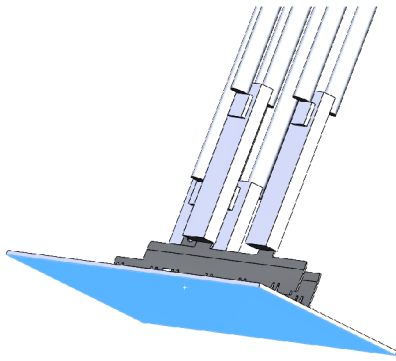
(b) *Heat Transfer In Solids a Electromagnetic Heating*.

Obr. 8.4: Fotka užívateľského prostredia rozhraní.

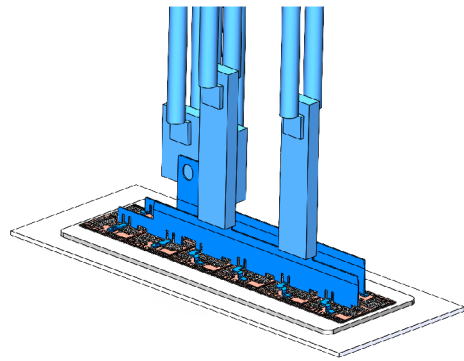
8.1.3 Nastavenie simulácie prestupu tepla

Na modelovanie prestupu tepla bolo využité rozhranie *Heat Transfer in Solids (ht)*, ktoré reprezentuje prestup tepla vedením. Tu boli pomocou príslušných komponentov (*Temperature, Heat Flux*) nastavené okrajové podmienky týkajúce sa teploty a súčiniteľa prestupu tepla. Uvedené hodnoty na obrázku 8.5 boli volené tak aby čo najvernejšie reprezentovali vplyv núteného vodného chladenia pre chladič modulu na obrázku 8.5a a vplyv prirodzenej konvekcie vzduchu pre terminály a spojnice na obrázku 8.5b.

¹Častiam geometrie, ktoré neboli jednoznačne definované je priradený východzí materiál.

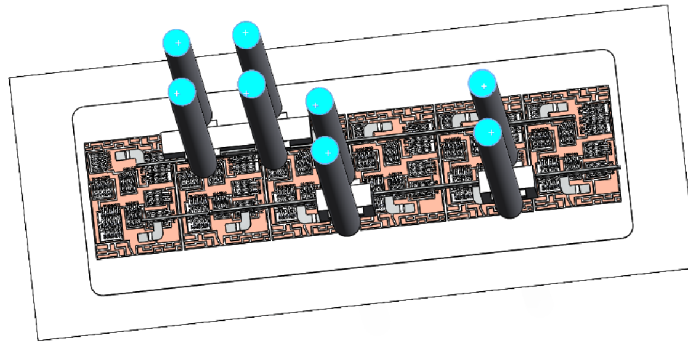


(a) $\alpha_Q = 1500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$



(b) $\alpha_Q = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Obr. 8.5: Okrajové podmienky na geometrií týkajúce sa koeficientu prestupu tepla.



Obr. 8.6: Okrajová podmienka týkajúca sa teploty $\vartheta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

8.1.4 Rozhranie Multiphysics

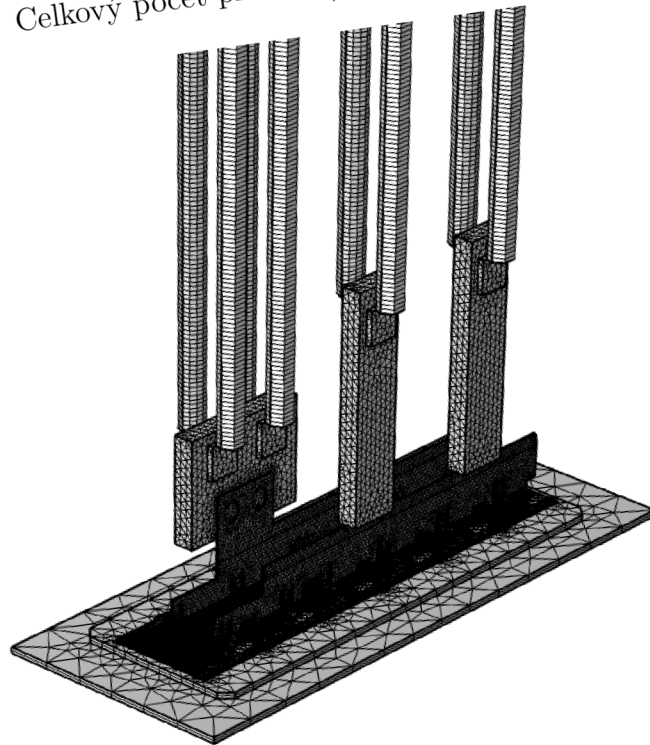
Toto rozhranie slúži pre nastavenie generácie Joulového tepla. Pomocou komponentu *Electromagnetic Heating (emh)* sú vybrané rozhrania, ktoré majú byť skombinované, pre účely simulácie sú to *Electric Currents (ec)* a *Heat Transfer in Solids (ht)*.

8.2 Výpočtová sieť

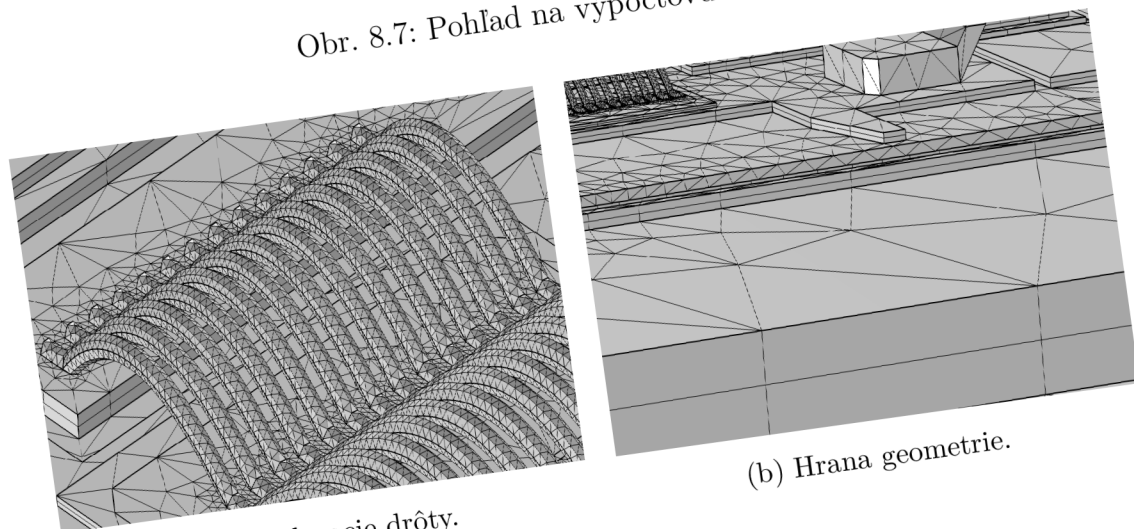
Ako už bolo uvedené v teoretickej časti, výpočtová sieť je kľúčovým parametrom simulácie, od ktorého sa odvíja presnosť riešenia. V prípade, že nie je hustota siete dostatočná budú výsledky skreslené.

Tab. 8.2: Počet buniek výpočtovej siete

Typ prvku	Počet
Štvorsten	2337274
Prizmatický prvok	1365192
Celkový počet prvkov	3702466



Obr. 8.7: Pohľad na výpočtovú sieť.



(a) Bondovacie drôty.

(b) Hrana geometrie.

Obr. 8.8: Detail výpočtovej siete.

Na druhú stranu ale nie je optimálne sa pokúšať o mimoriadne jemnú sieť a to z dôvodu predlžovania výpočtového času. Tento fakt je navyše umocnený aj tým, že proces zhustovania siete sa v určitom bode stane „nasýtený” kedy sa už s ďalším zhustovaním výsledky menia len minimálne.

Pri tvorbe siete je vhodné pre časti geometrie, v ktorých dochádza k prudkým zmenám pozorovaných veličín využívať jemnejšiu sieť alebo prvky vyššieho rádu. Pre prípad geometrie výkonového modulu to boli drôty zobrazené na obrázku 8.8a, kde boli využité štvorsteny. Rovinné prvky geometrie akými sú čipy alebo základná doska modulu boli zasieťované pomocou prizmatických prvkov, obrázok 8.8b. Výpočtová sieť, ktorá je tvorená týmto prístupom (zjemnenie dôležitých časti geometrie, využitie rôznych prvkov siete) sa nazýva neštruktúrovaná sieť.

9 Výsledky simulácie

V tejto kapitole budú zobrazené výsledky simulácií a pomocou teplotných máp, tabuliek a grafov bude pojednané o prestupe tepla celým modulom.

9.1 Merná elektrická vodivosť čipov

V tabuľke nižšie je uvedená závislosť konduktivity IGBT čipu na napätí medzi metalizáciou a čipovou spájkou.

Tab. 9.1: Výsledky elektrickej simulácie.

Konduktivita σ_{igbt} [$S \cdot m^{-1}$]	Napätie U_{ms} [V]
90,00	2,34
95,00	2,22
100,00	2,11
105,00	2,01
110,00	1,92
115,00	1,83
120,00	1,76

Vyhodnotenie výsledkov prebiehalo pomocou funkcie *Boundary Probe*, ktorá sledovala potenciál na metalizácií a na čipovej spájke. Rozdielom týchto potenciálov je napätie uvedené v tabuľke 9.1. Po porovnaní výsledkov s datasheetom¹ simulovaného výkonového modulu bola zvolená konduktivita $\sigma_{igbt} = 115,00 S \cdot m^{-1}$. Podobným spôsobom bola vyhodnotená konduktivita diódy, teda $\sigma_d = 190,00 S \cdot m^{-1}$.

9.2 Zhodnotenie výsledkov

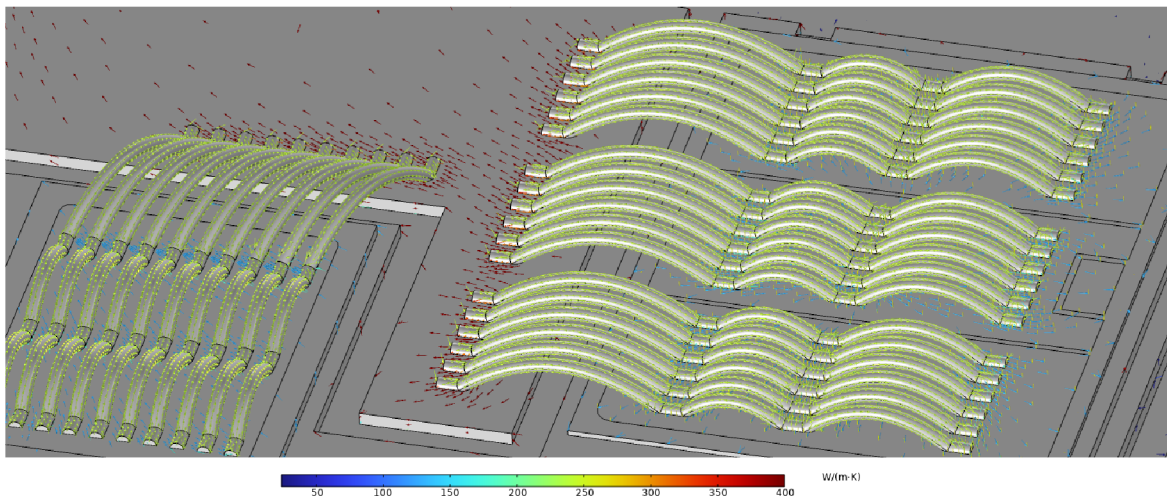
Na obrázku 9.2 je uvedená teplotná mapa pre $I_0 = 1050A$. Pre lepšiu viditeľnosť boli terminály modulu skryté. Je očividné, že so stúpajúcim prúdom sa teplota čipov a teda aj celého modulu postupne zväčšuje. Tento jav je logický a vyplýva z teoretického základu uvedeného v sekcii 2.2.1. Dôvodom je, že s vyšším prúdom sa zvyšuje koncentrácia nosičov náboja, teda pravdepodobnosť zrážok s kryštalickou mriežkou materiálu je vyššia a teda kmitanie mriežky samotnej je vyššie čo zapríčiňuje zvýšenú teplotu. Z tabuľky 9.2 a grafu 9.2 je tiež zjavné, že čím hlbšie v geometrii sa čip (T_6-T_9) nachádza tým je jeho teplota vyššia. Podobne ako v prvom prípade je tento

¹Datasheet modulu, nie je v čase písania diplomovej práce voľne dostupný, autorovi bola táto literatúra poskytnutá firmou SEMIKRON s.r.o.

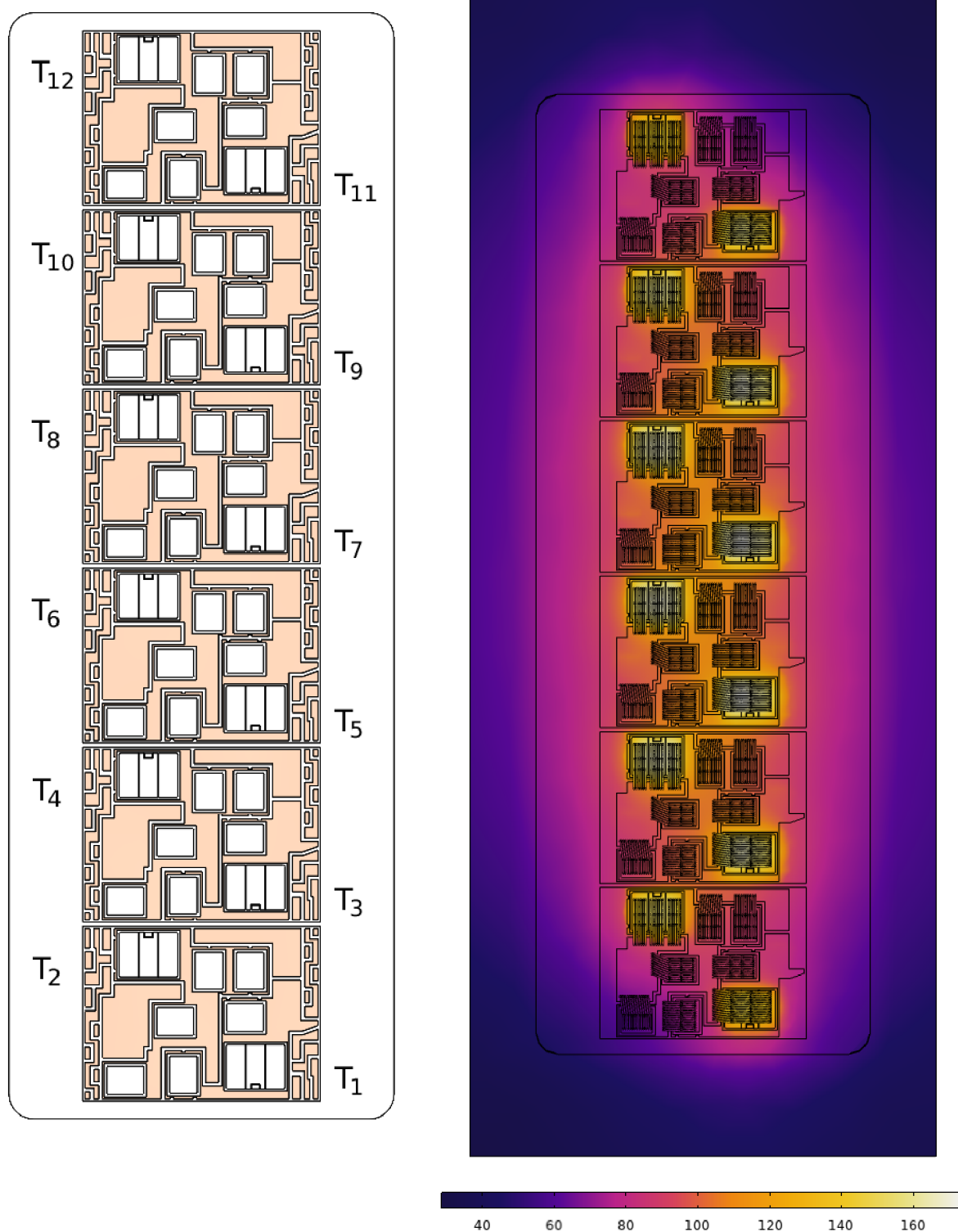
jav taktiež logický, keďže v týchto miestach sú teploty čipov v porovnaní s hranami geometrie viac vzájomne ovplyvňované.

Pri pohľade na obrázok 9.4 je badateľné, že pri čipoch s vyššou teplotou, ktoré sú zasadené hlbšie v geometrii, nemá teplo v porovnaní s hranami schopnosť unikať. Tento jav je viac pozorovateľný pri pohľade na spodnú stranu geometrie, kde tepelný tok kopíruje obrys modulu a v rohoch a na hranách je viditeľné akým spôsobom je teplo vedené.

Na obrázku 9.1 je zobrazený detail na čip T_4 , kde je zreteľne vidieť smer tepelného toku pri rôznych hodnotách tepelnej vodivosti, ktorá taktiež patrí medzi hlavné faktory ovplyvňujúce teplotu celého modulu. Pre overenie je možné tieto výsledky porovnať s tabuľkou 6.2, kde sú uvedené tepelné vodivosti daných materiálov.



Obr. 9.1: Pohľad na koncentráciu tepelného toku pre rôznu tepelnú vodivosť, tranzistor T_4 , $I_0 = 1050\text{A}$.

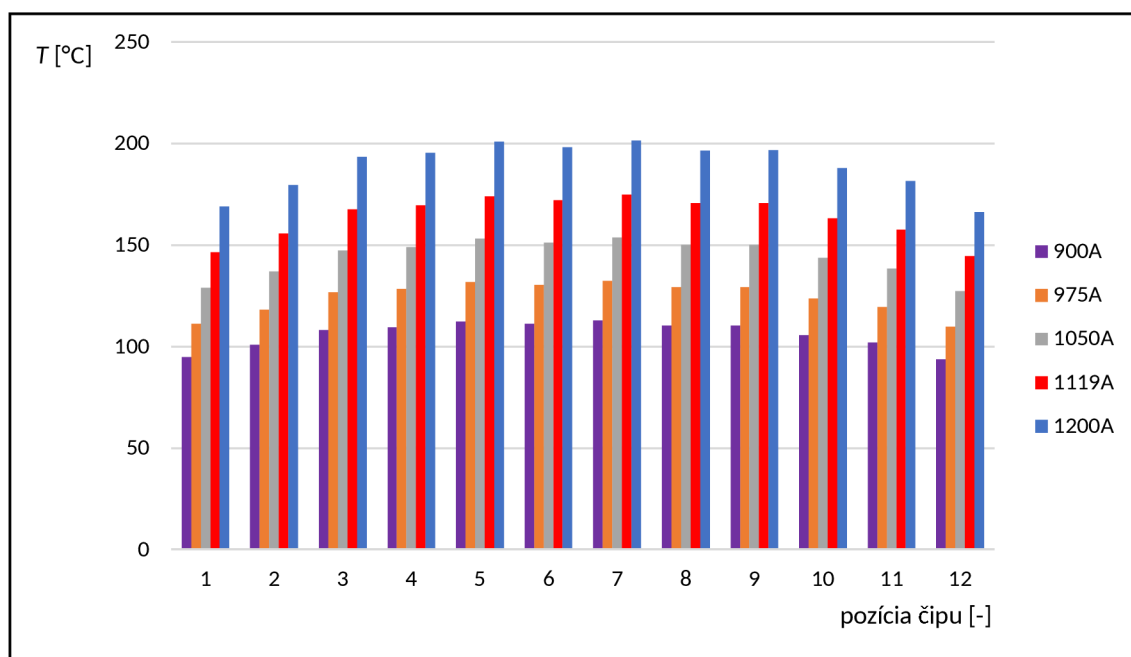


Obr. 9.2: Rozloženie teplôt pre $I_0 = 1050A$.

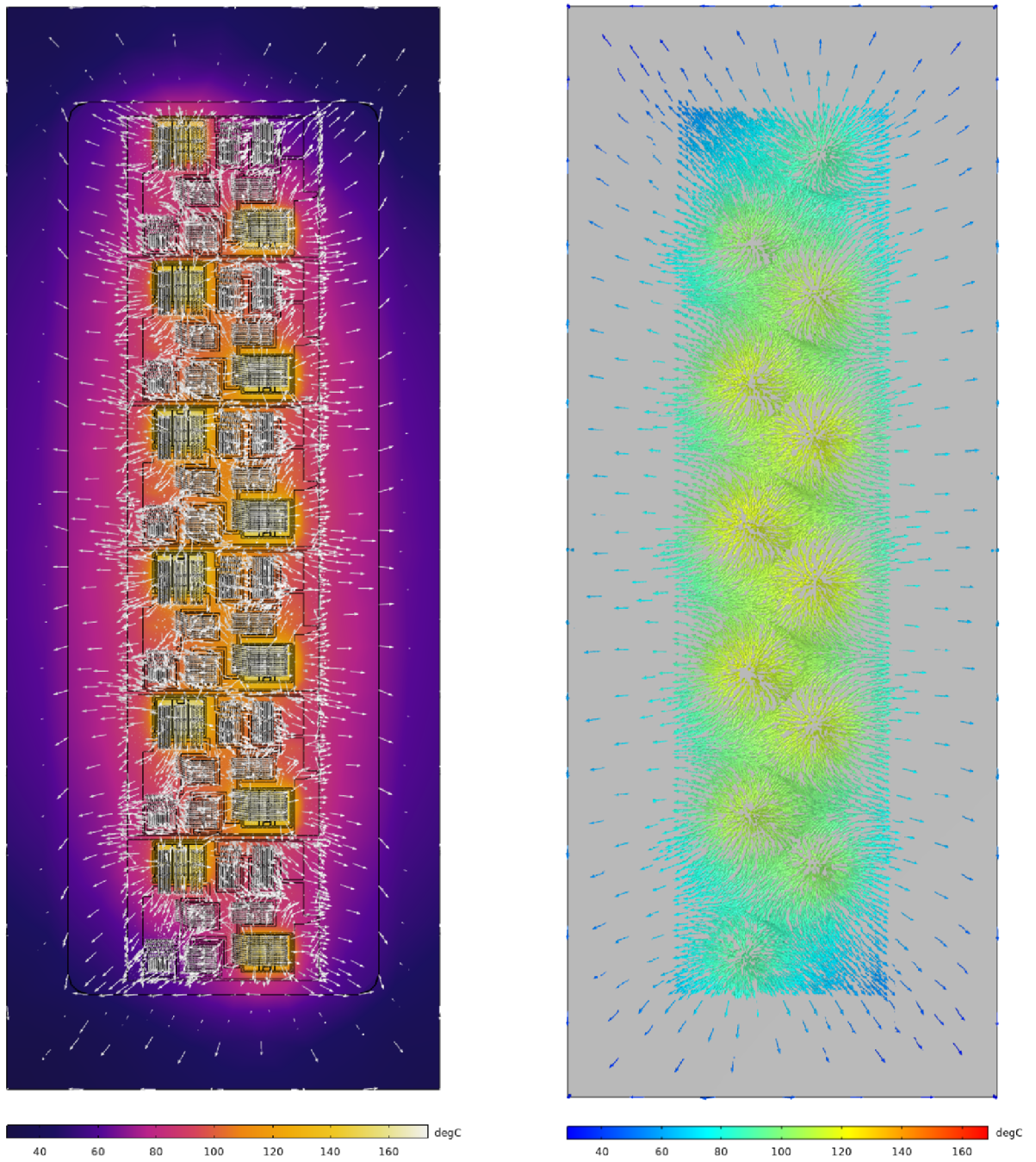
Tab. 9.2: Priemerné povrchové teploty jednotlivých čipov, odčítané zo simulácie.

I_0 [A]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]
900	94,94	100,63	110,44	112,04	114,64	114,00
975	111,29	117,97	129,60	131,43	134,51	133,71
1050	129,10	136,86	150,47	152,56	156,15	155,17
1119	146,80	155,62	171,25	173,57	177,68	176,49
1200	169,24	179,41	197,63	200,22	204,99	203,51

I_0 [A]	T_7 [°C]	T_8 [°C]	T_9 [°C]	T_{10} [°C]	T_{11} [°C]	T_{12} [°C]
900	115,08	112,99	112,51	108,34	102,06	94,04
975	135,00	132,49	131,94	126,98	119,63	110,15
1050	156,69	153,70	153,08	147,25	138,75	127,65
1119	178,24	174,76	174,08	167,36	157,73	145,09
1200	205,56	201,43	200,66	192,80	185,75	166,95



Obr. 9.3: Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu I_0 (výsledky z východzej simulácie).



Obr. 9.4: Zobrazenie tepelného toku pre $I_0 = 1050\text{A}$.

10 Porovnanie výsledkov simulácie s meraním

V tejto kapitole bude popísaný spôsob merania teploty čipov pomocou termokamery a jeho výsledky.

Termografické meranie využíva firma SEMIKRON s.r.o. predovšetkým pri analýze chýb jednotlivých výkonových modulov. V prípade poškodeného tranzistora môže byť termokamera využitá ako veľmi dobrý nástroj slúžiaci k identifikácii pôvodu daného defektu.

10.1 Termografia

Konfigurácia merania teploty pomocou infračervenej kamery bola nasledovná. Meraný výkonový modul bol v rámci správnych upevňovacích inštrukcií prísrôbovaný k hliníkovému chladiču, na ktorý bolo pred meraním nanesených 75 μ m teplovodivej pasty. Zariadenie bolo do obvodu pripojené pomocou ôsmich medených vodičov prierezu 120mm, ktoré boli k príslušným terminálom prísrôbované prostredníctvom troch spojnic.

Počas samotného merania bola do chladiča dodávaná chladiaca kvapalina (voda), ktorej teplota bola 3°C a jej tlak v chladiacom okruhu dosahoval hodnotu 3bar. Pre odčítanie čo najpresnejšej hodnoty z termokamery bolo nutné vyčkať 300s na to aby sa teplota čipov stabilizovala.

Tab. 10.1: Priemerné povrchové teploty jednotlivých čipov namerané termokamerou.

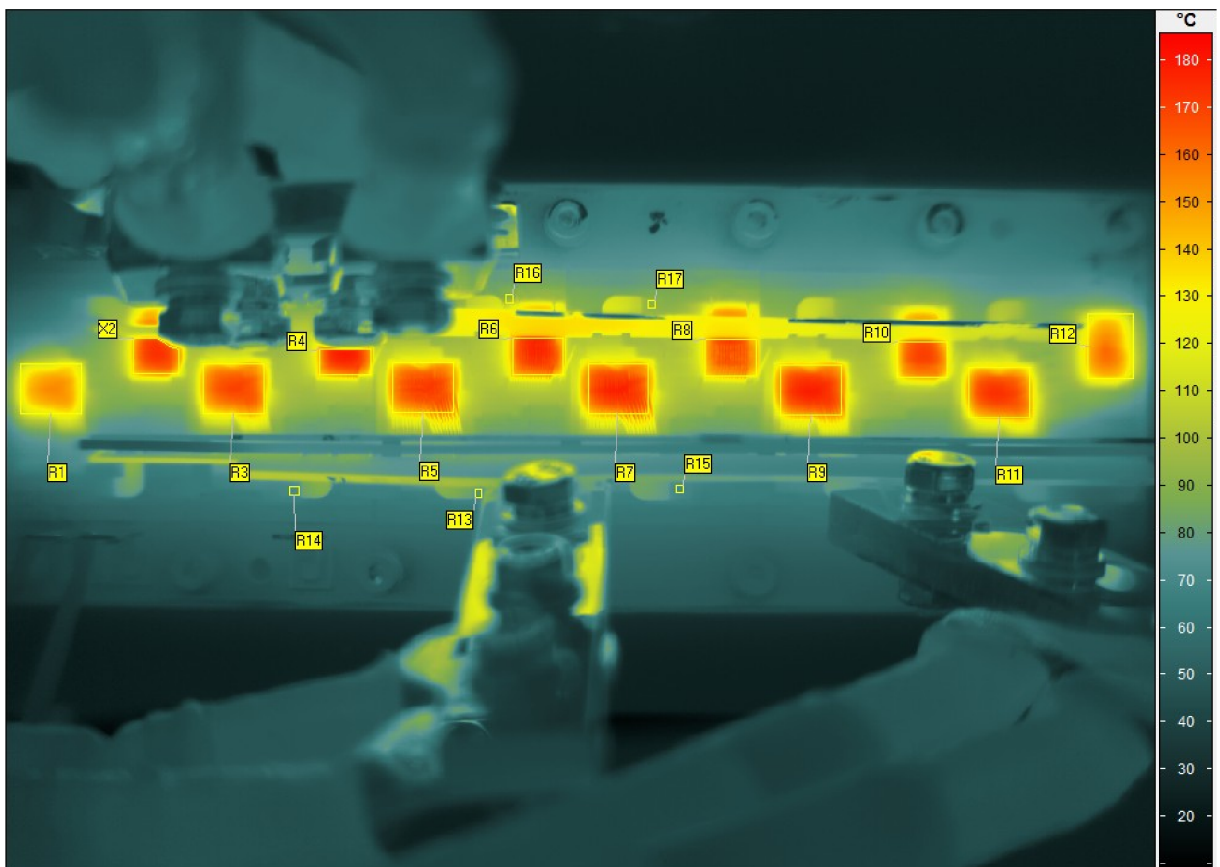
I_0 [A]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]
900	106,91	124,68	120,87	126,54	124,17	126,95
975	121,22	141,60	136,72	143,52	140,14	143,86
1050	137,33	161,00	154,55	163,05	158,00	163,18
1199	154,79	181,86	173,72	183,70	177,24	183,66
1200	176,36	208,47	197,88	215,34	202,10	211,44

I_0 [A]	T_7 [°C]	T_8 [°C]	T_9 [°C]	T_{10} [°C]	T_{11} [°C]	T_{12} [°C]
900	127,21	122,37	127,39	121,33	122,49	108,52
975	143,77	138,33	144,14	137,36	138,64	122,85
1050	162,31	156,47	162,92	155,35	156,92	139,29
1199	182,11	176,04	182,96	174,81	176,49	157,51
1200	209,57	204,15	208,76	198,51	201,77	186,68

Tab. 10.2: Relatívna odchýlka simulácie od merania termokamerou.

I_0 [A]	δ_{T1} [%]	δ_{T2} [%]	δ_{T3} [%]	δ_{T4} [%]	δ_{T5} [%]	δ_{T6} [%]
900	-11,20	-19,29	-8,63	-11,46	-7,68	-10,20
975	-8,19	-16,69	-5,21	-8,42	-4,02	-7,05
1050	-6,00	-15,00	-2,64	-6,44	-1,17	-4,91
1119	-5,16	-14,43	-1,42	-5,52	0,25	-3,91
1200	-4,04	-13,94	-0,13	-7,02	1,43	-3,75

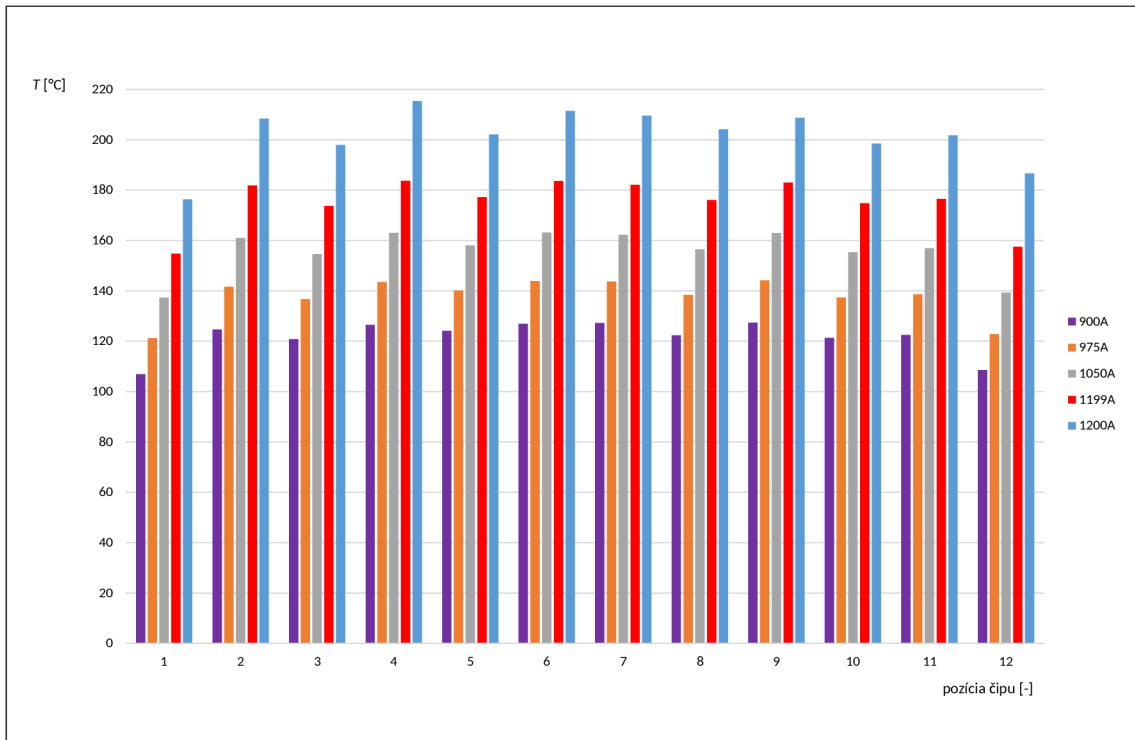
I_0 [A]	δ_{T7} [%]	δ_{T8} [%]	δ_{T9} [%]	δ_{T10} [%]	δ_{T11} [%]	δ_{T12} [%]
900	-9,53	-7,67	-11,68	-10,71	-16,68	-13,34
975	-6,10	-4,22	-8,46	-7,55	-13,71	-10,34
1050	-3,46	-1,77	-6,04	-5,21	-11,58	-8,36
1119	-2,12	-0,73	-4,85	-4,26	-10,63	-7,89
1200	-1,91	-1,33	-3,88	-2,88	-9,92	-10,57



Obr. 10.1: Snímka z merania termokamerou, $I_0 = 1050$ A.

V rámci presnosti bol na výkonový modul pomocou spreju taktiež nanosený roztok, ktorý zabezpečoval rovnakú emisivitu po celom povrchu meraného zariadenia.

Tabuľka 10.2 zobrazuje porovnanie výsledkov simulácie a merania pomocou relatívnej odchýlky. Najväčšie rozdiely nastali prevažne v prípadoch kedy je povrch snímaných čipov prekrytý terminálmi a zaznamená oblasť nezahŕňa okraj tranzistoru, kde by mala byť teplota menšia. Prekrytie čipov terminálmi je zobrazené na snímke z termokamery

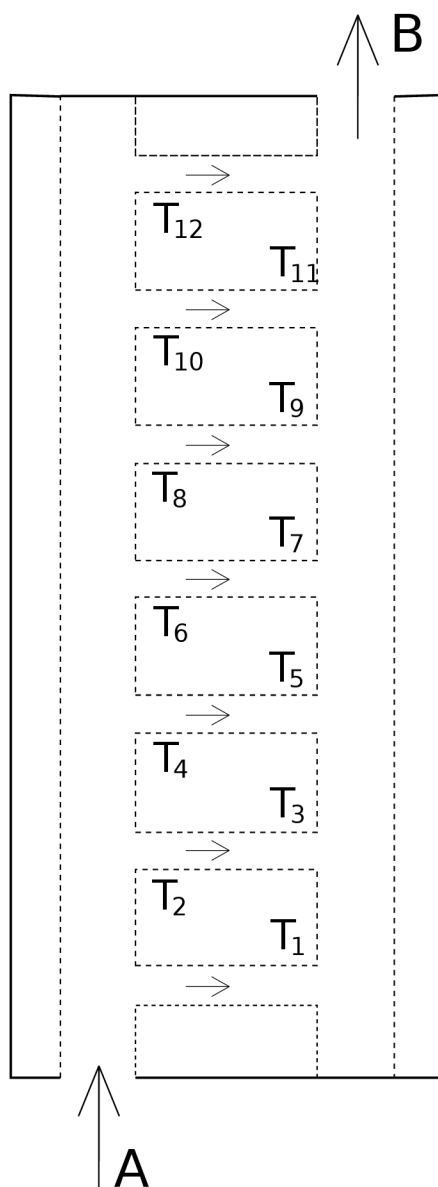


Obr. 10.2: Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu I_0 (výsledky z merania termokamerou).

Tab. 10.3: Porovnanie tepelnej nehomogenity simulácie a merania na základe smerodajnej odchýlky.

I_0 [A]	σ_{sim} [°C]	σ_{term} [°C]
900	7,696	6,895
975	9,075	7,780
1050	10,582	8,876
1119	12,073	9,695
1200	14,006	11,025

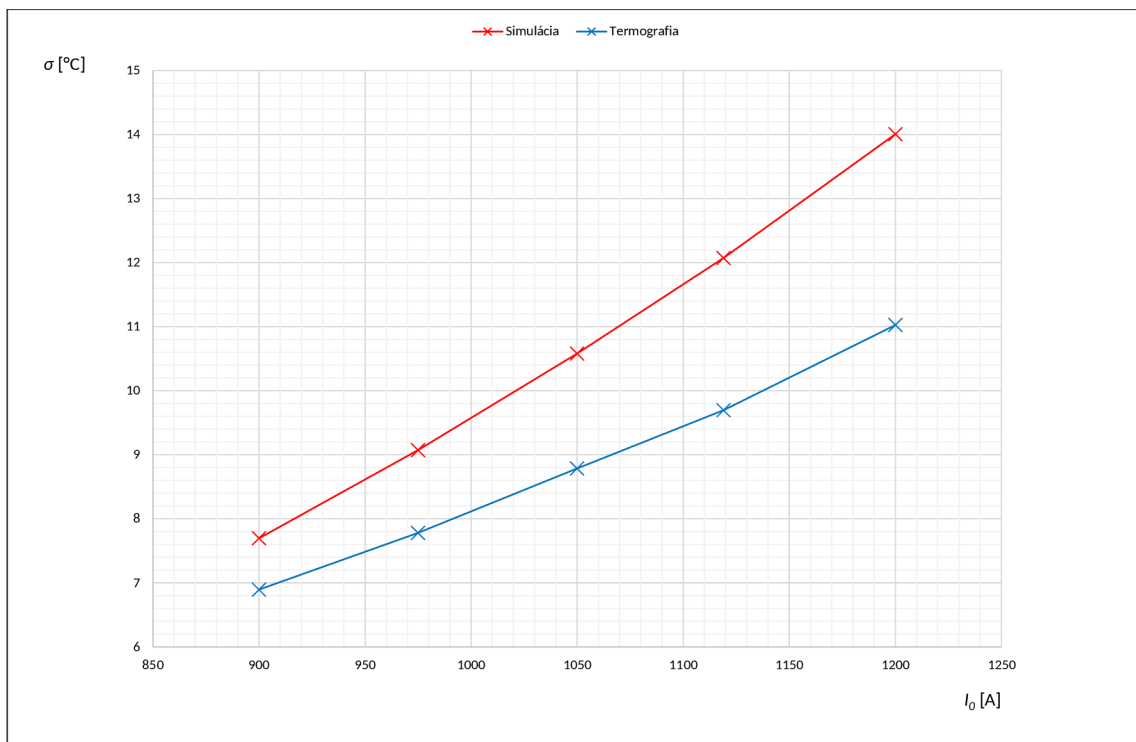
Z pohľadu homogenity/nehomogenity výkonového modulu sa medzi simuláciou a termografiou vyskytuje určité rozdiely, toto je badateľné v tabuľke 10.3 a grafe 10.4. Tieto výsledky boli dosiahnuté meraním ktoré bolo žatažené chybou (prekrytie čipov terminálom) a je teda veľmi pravdepodobné, že ak by bolo možné meranie vykonať bez tejto chyby bola by podobnosť termografie a simulácie ešte lepšia. Ďalej sa tu taktiež vyskytuje faktor koeficientu prestupu tepla, ktorý by mal v simulácii reprezentovať prúdiacu vodu o teplote $T = 3^{\circ}\text{C}$. Toto môže mať vplyv na teplotnú homogenitu simulácie keďže koeficient prestupu tepla neodráža ohrev vody počas prúdenia chladiacim okruhom. Na obrázku 10.3 je zobrazený prietok kvapaliny chladičom, bod **A** je miesto vstupu vody do chladiča a **B** je miesto výstupu.



Obr. 10.3: Znáznornenie prúdenia vody chladičom počas merania ¹

Teoreticky by bolo možné dosiahnuť lepšie výsledky s využitím simulácie prúdenia kvapalín (CFD) avšak z dôvodu náročnosti výpočtu to v práci nie je realizované.

Posledný faktor, ktorý mal vplyv na odlišnosti medzi simuláciou a meraním je tepelná závislosť mernej elektrickej vodivosti IGBT čipov. Charakteristickou vlastnosťou polovodičových materiálov je zmena ich mernej elektrickej vodivosti s teplotou, ktorá je v simulácií uvedená ako konštanta. Dôvodom pre toto zjednodušenie je náročnosť modelovania konkrétnej závislosti, ktorá závisí od materiálu tranzistora a môže byť medzi čipmi odlišná pričom by nemusela vyhovovať hodnotám napätia z datasheetu.



Obr. 10.4: Graf závislosti smerodajnej odchýlky na rôznych hodnotách prúdu.

¹Obrázok len ilustruje prúdenie vody chladičom, nejedná sa o reálne správanie kvapaliny.

11 Redukcia teplotnej nehomogenity

V tejto kapitole bude pojednané o redukcii teplotnej nehomogenity úpravou geometrie výkonového modulu. Výstupom budú výsledky simulácií jednotlivých experimentov vo forme tepelných máp, tabuliek a grafov. Diskusia týkajúca sa vyhodnotenia výsledkov bude uvedená v nasledujúcej kapitole.

Základným spôsobom, ktorým je tieto parametre možné zlepšiť je zmena tepelného odporu R_{th} .

V rovnici 6.3 uvedenej v kapitole 6 vystupujú tri veličiny a to hrúbka materiálu d , súčiniteľ tepelnej vodivosti λ_c a plocha materiálu S . Na základe úprav v geometrii bude menená hodnota týchto veličín čím bude znížený celkový tepelný odpor $R_{th(j-s)}$.

Graf 9.2 poukazuje na fakt, že najväčšia teplotná nerovnomernosť nastáva v časti modulu, kde sú čipy obklopené ďalšími susediacimi čipmi, preto budú úpravy geometrie vykonávané v zmysle priblíženia teplôt čipov $T_3 - T_{10}$ k teplotám T_1, T_2, T_{11}, T_{12} (množina týchto tranzistorov bude ďalej v práci označovaná ako okrajové čipy).

11.1 Úprava hrúbky čipovej spájky

V prvom prípade bude testovaná závislosť teploty čipov na hrúbke ich spájky. Pre tento experiment bola v programe COMSOL využitá funkcia *Thin Layer* z modulu *Heat Transfer in Solids (ht)*, ktorá umožňuje veľmi elegantne parametrizovať hrúbku tenkej vrstvy materiálu. Ak by táto funkcia neexistovala bolo by nutné domodelovať vrstvu spájky v CAD programe akým je napríklad SolidWorks.

Závislosť teploty čipov bola testovaná pre hrubkú spájky v rozsahu 300 – 25 μ m, toto rozhodnutie bolo uskutočnené na základe používanej hrúbky spájky v priemysle výkonových modulov.

V tabuľkách nižšie sú uvedené teploty čipov $T_3 - T_{10}$, na ktorých bol testovaný vplyv hrúbky spájky. Výsledky pre okrajové čipy nie sú uvádzané pretože na nich tento experiment vykonávaný nebol.

Pre účel zachovania prehľadnosti textu sú uvedené len tabuľky pre prúdy $I_0 = 900A$ a $I_0 = 1200A$, dôvodom tohto výberu je taktiež porovnanie vplyvu hrúbky čipovej spájky na teploty čipov pri nižších a vyšších hodnotách prúdu.

Tab. 11.1: Závislost teploty čipov na hrúbke spájky d_{chs} , pri prúde $I_0 = 900\text{A}$.

$d_{chs}[\mu\text{m}]$	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]
300	114,35	116,27	118,52	118,21
200	112,46	114,22	116,64	116,17
100	110,44	112,04	114,64	114,00
50	109,57	111,09	113,77	113,06
25	108,98	110,45	113,18	112,43

$d_{chs}[\mu\text{m}]$	T_7 [°C]	T_8 [°C]	T_9 [°C]	T_{10} [°C]
300	118,95	117,19	116,37	112,53
200	117,08	115,15	114,50	110,49
100	115,08	112,99	112,51	108,34
50	114,22	112,05	111,65	107,40
25	113,63	111,42	111,07	106,78

Tab. 11.2: Závislost teploty čipov na hrúbke spájky d_{chs} , pri prúde $I_0 = 1200\text{A}$.

$d_{chs}[\mu\text{m}]$	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]
300	204,72	207,85	212,02	211,08
200	201,29	204,15	208,61	207,40
100	197,63	200,22	204,99	203,51
50	195,68	198,14	203,05	201,45
25	194,87	197,28	202,26	200,59

$d_{chs}[\mu\text{m}]$	T_7 [°C]	T_8 [°C]	T_9 [°C]	T_{10} [°C]
300	212,57	208,98	207,64	200,31
200	209,17	205,31	204,25	196,66
100	205,56	201,43	200,66	192,80
50	203,63	199,38	198,75	190,75
25	202,84	198,52	197,98	189,91

11.2 Náhrada keramiky

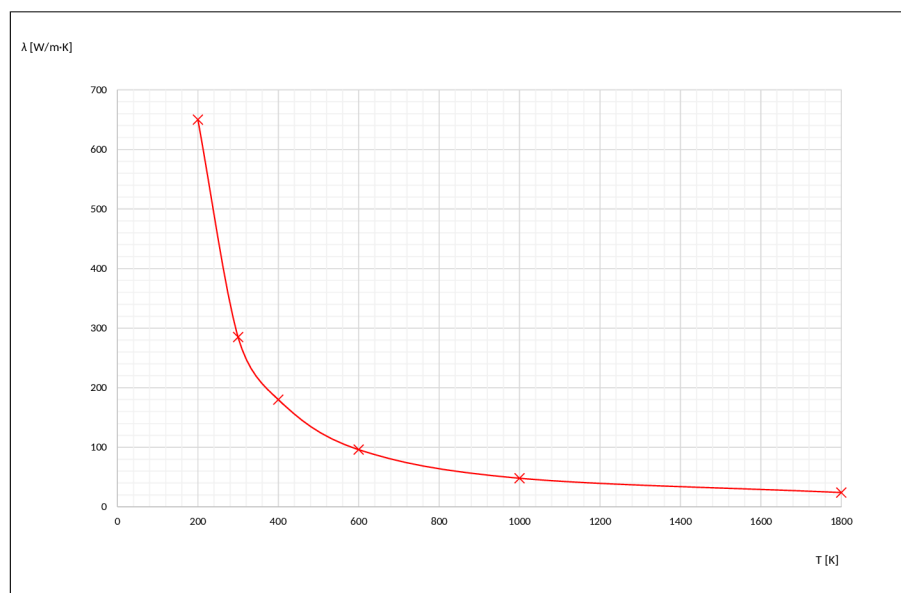
Hoci hlavnou funkciou oxidu hlinitého Al_2O_3 vo výkonovom module nie je odvod tepla jeho vplyv na tepelné vlastnosti čipov by nebolo vhodné zanedbať. Pri pohľade na tabuľku 6.2 je súčiniteľ tepelnej vodivosti Al_2O_3 v porovnaní s nitridom hlinitým AlN veľmi nízky.

V prípade AlN sa taktiež jedná o druh keramiky, ktorej tepelná vodivosť môže dosahovať až $\lambda_c = 260\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pri teplote okolia $T = 25^\circ\text{C}$, táto hodnota je uvedená na webovej stránke výrobcu [25]. Na tomto odkaze je taktiež možné nájsť odlišné hodnoty súčiniteľa tepelnej vodivosti pre AlN , ktorého hodnota závisí na pomere samotnej zlúčeniny a jej nečistôt ale aj na defektoch kryštálovej mriežky.

Rozsah súčiniteľa tepelnej vodivosti nitridu hlinitého potvrdzuje aj literatúra, kde sú uvádzané namerané hodnoty pre polykryštalický AlN od $\lambda_c = 17\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ až po $\lambda_c = 285\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Predpokladanú hodnotu súčiniteľa tepelnej vodivosti pre rôzne teploty AlN vyčíslili Slack et. al v článku [26] z roku 1987, kde bola pre výpočet použitá priemerná veľkosť zŕn keramiky 10^{-4}cm .

Aplikačný manuál firmy SEMIKRON s.r.o. uvádza hodnotu súčiniteľa tepelnej vodivosti pre AlN ako $\lambda_c = 180\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, čo je pravdepodobne hodnota pri izbovej teplote $T = 25^\circ\text{C}$, keďže je ale modul pri normálnej prevádzke zahrievaný až na teploty presahujúce $T = 200^\circ\text{C}$ bola pre účely simulácie využitá teplotná závislosť súčiniteľa tepelnej vodivosti uvedená v článku [26], ktorá je viditeľná v grafe nižšie [21], [27], [28].

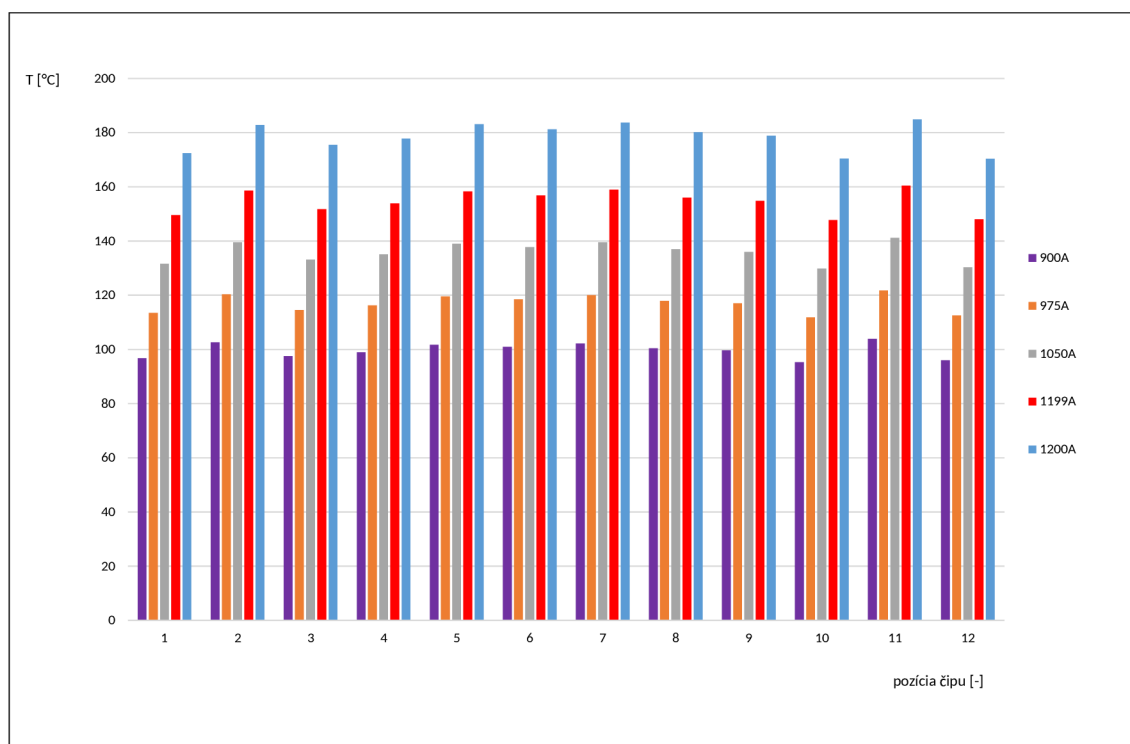


Obr. 11.1: Graf teplotnej závislosti súčiniteľa tepelnej vodivosti keramiky AlN .

Tab. 11.3: Priemerné povrchové teploty čipov, v prípade AlN.

I_0 [A]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_3 [°C]	T_4 [°C]	T_5 [°C]	T_6 [°C]
900	96,80	102,62	97,50	98,96	101,73	100,94
975	113,47	120,29	114,56	116,25	119,53	118,54
1050	131,60	139,51	133,19	135,09	138,97	137,74
1119	149,61	158,61	151,79	153,89	158,36	156,86
1200	172,46	182,81	175,51	177,84	183,09	181,22

I_0 [A]	T_7 [°C]	T_8 [°C]	T_9 [°C]	T_{10} [°C]	T_{11} [°C]	T_{12} [°C]
900	102,18	100,42	99,65	95,29	103,86	96,04
975	120,04	117,92	117,03	111,82	121,73	112,48
1050	139,53	137,00	135,97	129,83	141,17	130,33
1119	158,96	156,01	154,85	147,73	160,46	148,02
1200	183,71	180,19	178,86	170,48	184,88	170,39



Obr. 11.2: Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu (výsledky simulácie v prípade AlN so súčiniteľom tepelnej vodivosti z grafu 11.1).

12 Aplikovateľnosť experimentov

Kapitoly 9 a 10 popísali simuláciu prestupu tepla výkonovým modulom na základe termografického merania, kde sú v oboch prípadoch na geometrii modulu vykonané zmeny, ktoré v bežnej prevádzke nie sú možné. Ďalej bola v rámci návrhu pre redukciu teplotnej nehomogenity v sekcii 11.2 popísaná teplotná závislosť AlN, ktorá výrazne súvisí s kvalitou a čistotou keramiky.

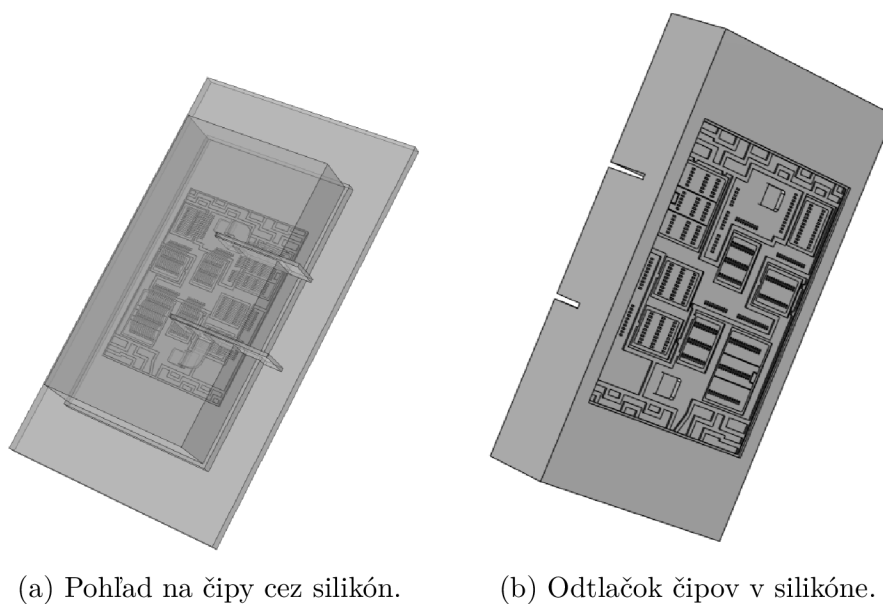
Cieľom tejto kapitoly bude adresovať limitácie experimentov pri normálnom použití výkonového modulu.

12.1 Zanedbanie enkapsulácie výkonového modulu

Výkonové moduly vo svojej normálnej prevádzke nezodpovedajú termografickému meraniu a teda ani východzej simulácii, ktorá sa mu mala priblížiť. V oboch prípadoch nie je uvažovaný silikón, ktorým je modul vyplnený.

Hlavnou funkciou silikónu je zabrániť korózií a mechanickým poškodeniam čipov, jeho pridaním do modulu sa však mení už spomínaná hodnota tepelného odporu R_{th} . Z tohto dôvodu boli vykonané dve modelové simulácie kedy v prvom prípade boli čipy prekryté vrstvou silikónu, ktorý bol v druhom prípade odstránený. Cieľom týchto simulácií bolo overiť vplyv silikónu na tepelné parametre zariadenia.

Je nutné poznamenať, že simulácia výkonového modulu so silikónom je výpočtovo veľmi náročná a preto bol modul zjednodušený len na 2 čipy, táto konfigurácia je zobrazená na obrázkoch nižšie.



Obr. 12.1: Zjednodušená konfigurácia geometrie.

12.1.1 Nastavenie simulácie

Samotné nastavenie simulácie bolo takmer identické s krokmi uvedenými v sekcii 8.1. V rozhraní *Electric Currents (ec)* bolo nutné vhodne upraviť hodnotu vstupného prúdu I_0 , keďže sa pôvodný modul skladá z 12 čipov, ktoré sú v dvojiciach zapojené paralelne tak bol prúd v tomto prípade šesťkrát nižší. Ostatné rozhrania *Heat Transfer in Solids (ht)* a *Multiphysics* ostali zachované, toto taktiež platí aj pre definície konduktivity a koeficientu prestupu tepla.

Výraznou zmenou bola definícia silikónu v materiálovom rozhraní programu COMSOL. Pre simuláciu prestupu tepla boli nevyhnutné tri fyzikálne veličiny a to hustota, hmotnostná tepelná kapacita a súčiniteľ tepelnej vodivosti, konkrétne hodnoty sú uvedené v tabuľke nižšie.

Tab. 12.1: Materiálové vlastnosti silikónu nevyhnutné pre simuláciu prestupu tepla.

Materiál	ρ [kg · m ⁻³]	c [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	λ_c [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]
Silikón	975	0,85	0,2

12.1.2 Výsledky testov so silikónom

Závislosť priemernej povrchovej teploty čipov je uvedená v tabuľke 12.2. Simulácie boli vykonané len pre tri rôzne hodnoty prúdov, pretože v tomto prípade to je postačujúce na získanie informácií o teplotnom charaktere čipov.

Tab. 12.2: Porovnanie priemerných povrchových teplôt v prípade použitia/nepoužitia silikónu.

So silikónom			Bez silikónu	
I_0 [A]	T_1 [°C]	T_2 [°C]	T_1 [°C]	T_2 [°C]
100	79,69	79,26	79,86	79,39
175	107,45	106,86	107,68	107,05
200	139,44	138,68	139,72	138,90

Z výsledkov v tabuľke je zjavné, že vrstva silikónu má zanedbateľne malý vplyv na tepelné parametre čipov, rozdiely teplôt sú v desatinách stupňov Celzia. Tento fakt je spôsobený veľmi nízkou hodnotou súčiniteľa tepelnej vodivosti (uvedený v tabuľke 12.1), ktorá je veľmi blízka nule a teda výsledok nie je výrazne odlišný od simulácie, kde silikón prítomný nebol.

Týmto jednoduchým experimentom bolo potvrdené, že zmeny v geometrii, materiáloch modulu budú mať zmysel aj pri normálnej prevádzke zariadenia.

12.2 Súčiniteľ tepelnej vodivosti nitridu hlinitého

V sekcii 11.2 bol uvedený spôsob zlepšenia teplotnej nehomogenity modulu náhradou Al_2O_3 nitridom hlinitým AlN . Tu bolo taktiež pojednané o teplotnej závislosti súčiniteľa tepelnej vodivosti tohto materiálu, ktorá je uvedená v grafe 11.1. V tomto prípade sa ale jedná o teoreticky dopočítané hodnoty, ktoré veľmi pravdepodobne nezodpovedajú reálnym hodnotám súčiniteľa tepelnej vodivosti.

Z tohto dôvodu bola vykonaná simulácia, kde bola použitá konštantná veľkosť súčiniteľa tepelnej vodivosti $\lambda_c = 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Toto je najmenšia hodnota, ktorú uvádza výrobca a je pri teplote $T = 300^\circ\text{C}$, preto bude uvažovaná ako najhorší možný prípad pri využití tohto materiálu [25].

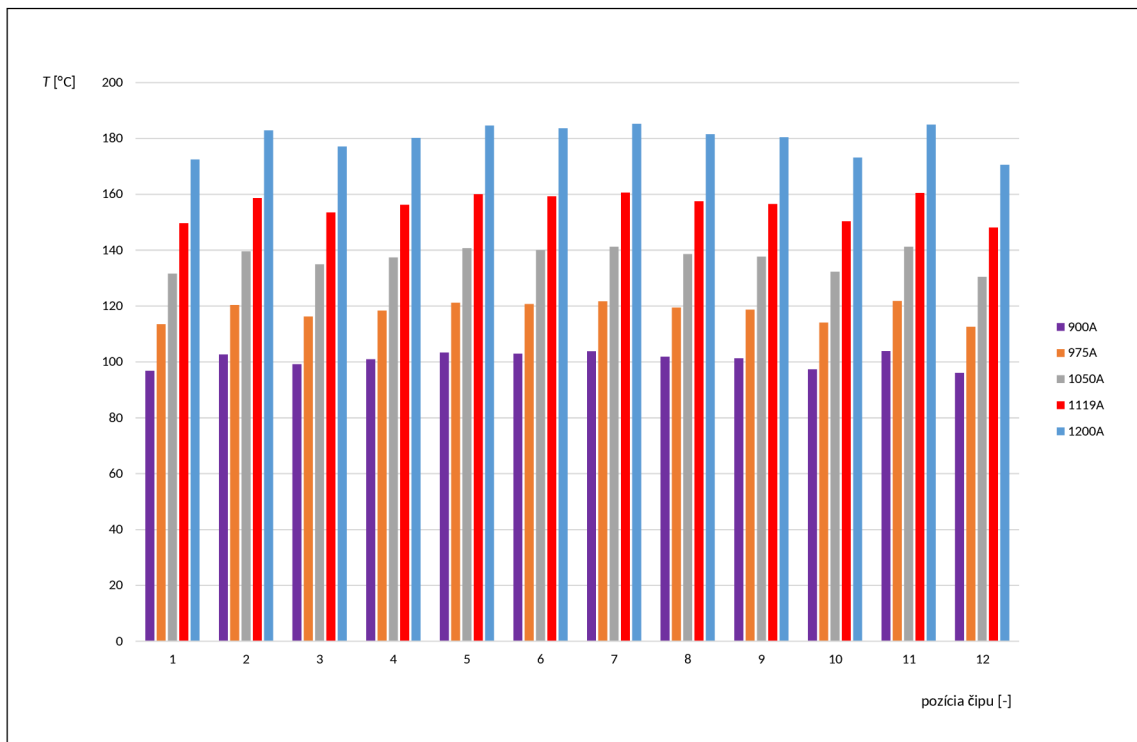
12.2.1 Výsledky simulácie s konštantným súčiniteľom tepelnej vodivosti

Výsledky zo simulácie sú uvedené v tabuľke 12.3 a grafe 12.2, ktoré budú detailnejšie popísané a porovnané v ďalšej kapitole. Porovnaním výsledkov s tabuľkou 11.3 a grafom 11.2 je zjavný fakt, že samotné hodnoty teplôt jednotlivých čipov sa líšia približne o $\Delta T = 2^\circ\text{C}$, teploty sú vyššie v prípade konštantnej výšky súčiniteľa tepelnej vodivosti $\lambda_c = 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Keďže sa jedná o simuláciu s využitím nitridu hlinitého, ktorý má z rady týchto keramik najhorší súčiniteľ tepelnej vodivosti je možné predpokladať, že pri normálnej prevádzke budú teploty čipov nižšie.

Tab. 12.3: Priemerné povrchové teploty čipov, v prípade AlN s $\lambda_c = 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

$I_0[\text{A}]$	$T_1 [^\circ\text{C}]$	$T_2 [^\circ\text{C}]$	$T_3 [^\circ\text{C}]$	$T_4 [^\circ\text{C}]$	$T_5 [^\circ\text{C}]$	$T_6 [^\circ\text{C}]$
900	96,82	102,67	99,14	100,94	103,35	102,95
975	113,49	120,36	116,28	118,37	121,22	120,71
1050	131,62	139,59	134,94	137,35	140,67	140,04
1119	149,64	158,70	153,52	156,23	160,02	159,25
1200	172,49	182,92	177,12	180,21	184,59	183,64

$I_0[\text{A}]$	$T_7 [^\circ\text{C}]$	$T_8 [^\circ\text{C}]$	$T_9 [^\circ\text{C}]$	$T_{10} [^\circ\text{C}]$	$T_{11} [^\circ\text{C}]$	$T_{12} [^\circ\text{C}]$
900	103,80	101,91	101,29	97,40	103,89	96,13
975	121,73	119,46	118,74	114,12	121,77	112,58
1050	141,23	138,54	137,71	132,29	141,21	130,45
1119	160,61	157,50	156,55	150,33	160,50	148,16
1200	185,20	181,53	181,43	173,16	184,93	170,55



Obr. 12.2: Graf závislosti teploty na pozícií čipu pre rôzne hodnoty prúdu (výsledky simulácie v prípade AlN s $\lambda_c = 120\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

13 Vyhodnotenie experimentov

Podobne ako v kapitole 10 budú výsledky vyhodnocované pomocou smerodajnej odchýlky pre jednotlivé hodnoty prúdu, ktoré sú úsporiadané do tabuľky zodpovedajúcej príslušnému experimentu. Smerodajná odchýlka bude v tomto prípade slúžiť ako miera pre porovnanie experimentov z hľadiska teplotnej homogenity/nehomogenity.

Porovnaním východzej simulácie s termografiou z kapitoly 10 sa ukázalo, že rozdiely v teplotnom charaktere čipov sú až zanedbateľne malé, čo bolo názorne potvrdené v tabuľke 10.3 a grafe 10.4. Z tohto dôvodu budú vykonané experimenty porovnávané s východzou simuláciou.

13.1 Porovnanie hrúbky spájky

V sekcii 11.1 bol otestovaný vplyv hrúbky čipovej spájky na tepelné parametre čipov. V simulácii bola uvažovaná tepelná závislosť na piatich hodnotách hrúbky spájky a na prúde, tieto závislosti sú uvedené v tabuľkách 11.1 a 11.2.

Doposiaľ o týchto výsledkoch ale nebolo pojednané z hľadiska teplotnej homogenity/nehomogenity. Zobrazenia výsledkov¹, ktoré sa tohto parametra týkajú sú uvedené v zmysle smerodajnej odchýlky v tabuľke 13.1.

Tab. 13.1: Tabuľka závislosti smerodajnej odchýlky na hrúbke čipovej spájky a prúde.

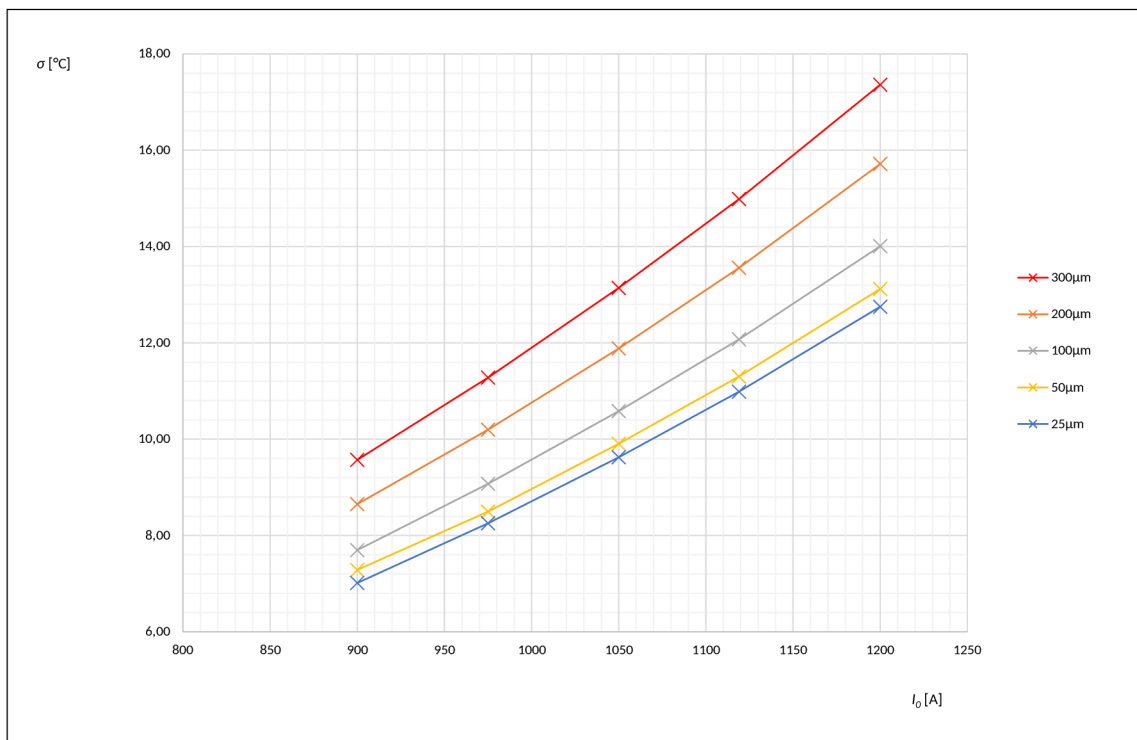
Hrúbka d_{chs}	Prúd I_0				
	900A	975A	1050A	1119A	1200A
300 μ m	9,57	11,28	13,14	14,98	17,36
200 μ m	8,65	10,20	11,88	13,56	15,71
100 μ m	7,70	9,07	10,58	12,07	14,01
50 μ m	7,29	8,50	9,91	11,30	13,12
25 μ m	7,01	8,25	9,63	10,98	12,75

V tomto experimente bola overená závislosť tepelných parametrov na hrúbke čipovej spájky z pohľadu teploty čo potvrdzujú aj tabuľky 11.1 a 11.2. Vyskytuje sa tu závislosť plynu z rovnice 6.3, ktorá sa taktiež prejavuje aj na teplotnej homogenite čo je možné vidieť v tabuľke 13.1 a grafe 13.1.

¹Z dôvodu prehľadnosti nie je v tabuľke uvádzaná jednotka pre hodnoty smerodajnej odchýlky, ktorá je v tomto prípade [°C], platí aj pre ostatné tabuľky týkajúce sa smerodajnej odchýlky

Pri výrobe simulovaného výkonového modulu sa používa hrúbka čipovej spájky $d_{chs} = 100\mu\text{m}$, ktorá z hľadiska teploty a homogenity ponúka optimálne východisko. Zavedením tenšej čipovej spájky do výroby ($50\mu\text{m}$ alebo $25\mu\text{m}$) by mohli byť dosiahnuté ešte lepšie tepelné parametre. Tento fakt by mohla považovať za priaznivý aj firma samotná, keďže redukcia množstva spájky by mohla viesť k významnému šetreniu z ekonomického hľadiska.

Tu sa ale naskytá otázka či je technologicky možné zmenšiť hrúbku čipovej spájky na tak nízke hodnoty, z tohto dôvodu budú ostatné experimenty porovnávané s prípadom hrúbky $d_{chs} = 50\mu\text{m}$.



Obr. 13.1: Graf závislosti smerodajnej odchýlky na prúde pre rôzne hodnoty hrúbky čipovej spájky.

13.2 Porovnanie jednotlivých experimentov

V tejto sekcii budú experimenty navzájom porovnané na základe smerodajnej odchýlky, ktorá reprezentuje stav teplotnej homogenity/nehomogenity danej metódy. Indexovanie gréckeho písmena σ označuje konkrétny experiment podľa:

- σ_{vs} - východzia simulácia,
- σ_{chs} - simulácia zmeny hrúbky čipovej spájky,
- σ_{AlN} - simulácia s využitím AlN,
- σ_{AlN120} - simulácia s využitím AlN s konštantnou hodnotou súčiniteľa tepelnej vodivosti.

Pri pohľade na tabuľku 13.2 je očividné, ktorá metóda spôsobuje najlepšiu homogenizáciu teplôt čipov, jedná sa o prípad kedy bola využitá keramika nitridu hlinitého. Dôvodov prečo tomu tak je je hned niekoľko. V prvom rade je významná hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti AlN, ktorá je v porovnaní s Al_2O_3 niekoľko násobne vyššia. Tento faktor sa výrazne podieľa na znížení tepelného odporu R_{th} keďže sa v rovnici 6.3 nachádza v menovateli. Ďalším faktorom je plocha na geometrii, ktorá je touto zmenou ovplyvnená. V porovnaní s experimentom čipovej spájky sa tu jedná o markantný rozdiel z pohľadu veľkosti plochy, ktorá bola zmenou zasiahnutá.

Tab. 13.2: Porovnanie teplotnej homogenity jednotlivých experimentov.

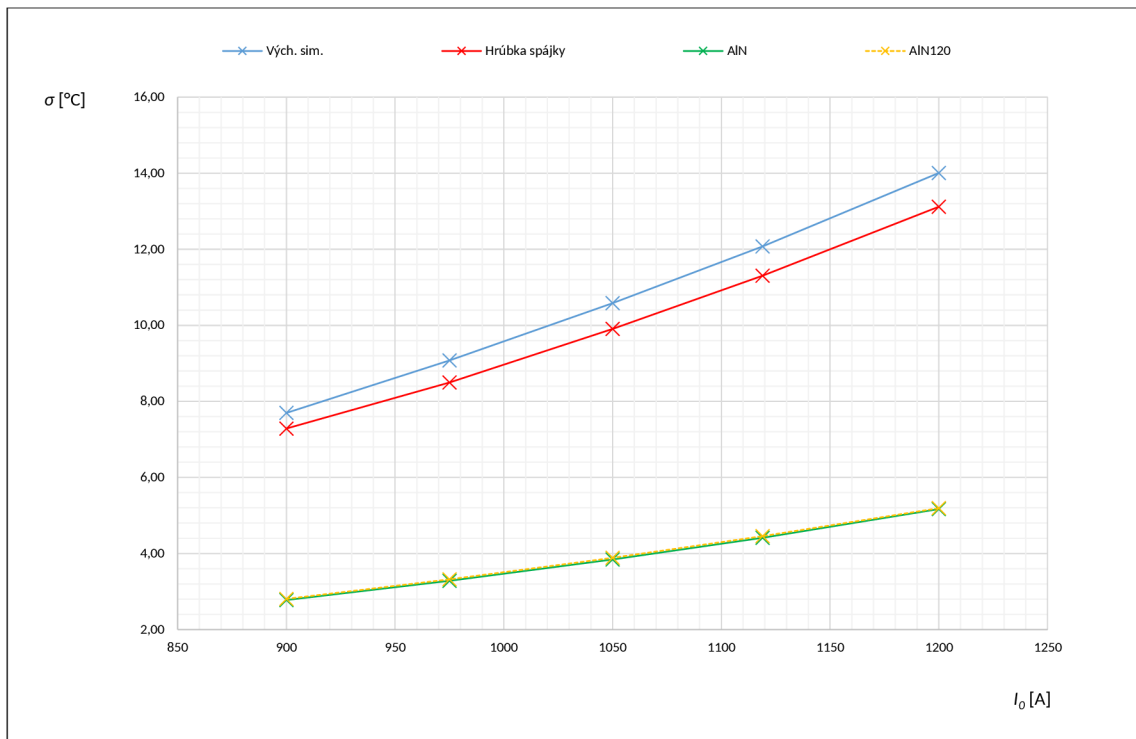
I_0	σ_{vs}	σ_{chs}	σ_{AlN}	σ_{AlN120}
900A	7,70	7,29	2,78	2,81
975A	9,07	8,50	3,28	3,32
1050A	10,58	9,91	3,84	3,89
1119A	12,07	11,30	4,41	4,46
1200A	14,01	13,12	5,17	5,19

Pri pohľade na hodnoty σ_{chs} , ktoré sa týkajú experimentu s hrúbkou čipovej spájky sa z hľadiska homogenity nejedná o veľmi zásadný rozdiel v porovnaní s východzou simuláciou. V prípade čipovej spájky sa v pôvodnom stave jedná o tenkú vrstvu ($d_{chs} = 100\mu m$), ktorej dopad na celkovú hodnotu tepelného odporu je veľmi nízky a teda zmenou hrúbky v ráde mikrometrov nedošlo k výraznému ovplyvneniu hodnoty R_{th} .

Zaujímavé boli výsledky experimentu s konštantnou hodnotou súčiniteľa tepelnej vodivosti AlN ($\lambda_c = 120W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Porovnaním hodnôt medzi σ_{AlN} a σ_{AlN120} je zjavné, že v prípade σ_{AlN120} nastalo zhoršenie v homogenite len o stotiny stupňov Celzia. V prípade AlN120 sa jedná o menej čistú (obsahuje nežiadúce prísady) verziu keramiky, ktorá by mala mať na trhu lepšiu dostupnosť aj cenu a teda z pohľadu

firmy to môže byť veľmi priaznivá kombinácia keďže v porovnaní s čistejšou keramikou sa jedná o zanedbateľné malý rozdiel v rámci teplotnej homogenity. Tento fakt je vhodne znázornený v grafe 13.2.

Na základe dosiahnutých výsledkov sa z technického hľadiska javí náhrada keramiky ako ideálny prostriedok pre zlepšenie teplotnej homogenity vo výkonových moduloch. Zmena hrúbky spájky síce na homogenitu vplyv mala no jej dopad nebol v porovnaní s keramikou nitridu hlinitého tak výrazný. Svoju rolu tu taktiež má aj možnosť implementácie daného riešenia do výrobného procesu kde nemusí byť zmena hrúbky spájky na tak nízku hodnotu technologicky možná aj napriek jej ekonomickej výhodnosti.



Obr. 13.2: Graf závislosti smerodajnej odchýlky na rôznych hodnotách prúdu pre všetky experimenty.

Záver

Cielom diplomovej práce bolo v prvom rade overiť presnosť numerického modelu s reálnym meraním. Pre správne riešenie tohto problému je nutné naštudovať rôzne oblasti fyziky, elektrotechniky a matematiky, ktoré boli popísané v teoretickej časti práce.

V prvej kapitole boli uvedené poruchy spôsobené nesprávnym teplotným manažmentom elektrických zariadení, kde bolo pojednané o mechanických poruchách týkajúcich sa namáhania a prasklín v zariadení a o elektrických poruchách, ktoré sú zapríčinené vplyvom tepla.

Ďalej nasledovala kapitola o teórii šírenia tepla kde bolo detailnejšie popísané šírenie tepla prúdením, vedením a žiarením. K definícií tepelných účinkov elektrického prúdu bolo nutné okomentovať pôvod tepla ako kmitanie kryštalickej mriežky vplyvom dodanej energie, ktoré sa prejavuje ako kvázičastica s názvom fonón. V tejto kapitole bolo taktiež pojednané o radiačných vlastnostiach povrchov, táto teória je aplikovaná pri snímaní termokamerou, ktoré bolo v praktickej časti porovnávané so simuláciou.

Po definovaní tepelných vlastností pevných látok nasledovala kapitola týkajúca teoretického základu numerických metód, ktorá bola nutná pre správne pochopenie výpočtového softvéru využitého pre simuláciu prestupu tepla. Čitateľ je tu zoznamovaný s históriou dvoch výpočtových schém, metóda konečných prvkov, ktorá je vhodná na výpočty týkajúce sa prestupu tepla a metóda konečných objemov slúžiaca prevažne na riešenie problémov prúdenia tekutín. Tieto dve metódy sú následne vysvetlené na modelových jednorozmerných diferenciálnych rovniciach. Na záver táto kapitola uvádza výpočtovú sieť, ktorá je pri riešení týchto problémov esenciálnym faktorom pre presnosť výpočtu.

Posledná kapitola teoretickej časti bola o možných riešeniach teplotného manažmentu využitím aktívneho alebo pasívneho chladenia. V závislosti od pracovných prúdov počas bežnej prevádzky výkonového modulu je možné použiť pasívne chladenie pre nižšie prúdy a aktívne chladenie pre vysoké výkony. Vo väčšine prípadov je však vhodná pracovná teplota udržiava kombináciou týchto dvoch techník.

Úvodom praktickej časti bol popis veličiny tepelného odporu a jeho vplyv na prestup tepla. Bola tu definovaná štruktúra a zloženie výkonového modulu, ktoré bolo nutné poznať pre správne nastavenie simulácie. Ďalej bola popísaná funkcia tranzistora s izolovaným hradlom, z ktorého sa simulovaný výkonový modul skladá a k nastaveniu simulácie bolo taktiež nutné prediskutovať zapojenie IGBT.

Úprava geometrie bola nutná z dôvodu urýchlenia výpočtu simulácie ale aj pre vhodné nastavenie siete. Z pôvodnej geometrie modulu boli odstránené vedľajšie terminály, rezistory, rezist a termočlánky. Naopak pre správny výpočet boli nutné

prvky ako bondovacie drôty, chladič, vodiče a spojnice. Samotná simulácia prebiehala v prostredí výpočtového programu COMSOL, ktorý pre riešenie problémov využíva metódu konečných prvkov. Po importovaní geometrie a definícií materiálov bolo nutné nastaviť elektrickú simuláciu kde bola určená merná elektrická vodivosť, z ktorej bola vypočítaná prúdová hustota. Tieto kroky boli potrebné k definícií vstupu pre simuláciu prestupu tepla. Oba typy simulácií bolo nutné prinútiť k spolupráci, k tomu slúžilo rozhranie Multiphysics. Po nastavení simulácie bolo ďalším krokom vytvorenie siete. Vypočtová sieť nemohla byť z dôvodu zložitosti geometrie príliš jemná ale zároveň musela byť dostatočne hustá aby neboli výsledky skreslené.

Výstupy z východzej simulácie boli zhodnotené v kapitole 9, boli tu uvedené merné elektrické vodivosti pre diódy, IGBT a tepelné mapy pre geometriu celého modulu. Výsledky boli zobrazené v grafe a popísané v tabuľke. Ukázal sa logický fakt a to, že s rastúcim prúdom stúpa teplota výkonového modulu, príčinou ktorého je zvýšenie pravdepodobnosti zrážok nosičov náboja s kryštalickou mriežkou materiálu. Teplotu čipov samotných ovplyvňuje aj ich pozícia, teda čím hlbšie v geometrii sú čipy umiestnené tým je ich teplota vyššia.

Nasledujúca kapitola porovnávala výsledky z termografického merania. Tu sa ukázal veľmi podobný charakter tepelných parametrov ako v simulácií, samotné teploty ale boli číselne väčšie. Pravdepodobnou príčinou mohlo byť prekrytie čipov terminálmi, ktoré nemohli byť z dôvodu funkčnosti zariadenia odstránené. Druhou potenciálnou príčinou mohol byť konštantný koeficient prestupu tepla v simulácií, ktorý mal reprezentovať chladiacu kvapalinu teploty $T = 3^{\circ}\text{C}$. Táto kvapalina sa počas prúdenia v chladiacom okruhu zahrieva a teda jej teplota nebola konštantná. Tento jav by mohol byť presnejšie modelovaný využitím simulácie prúdenia kvapalín ale z dôvodu náročnosti výpočtu to v práci nie je realizované. Nasledujúcim činiteľom, ktorý mal vplyv na odchýlky medzi simuláciou a meraním je zanedbanie prestupu tepla žiarením. Príspevok infračerveného žiarenia je zjavný z funkcie termokamery, ktorá funguje na princípe záznamu a vyhodnocovania práve tohto žiarenia. Posledným faktorom vplývajúcim na odchýlky bola konštantná merná elektrická vodivosť simulovaných IGBT čipov. Vyjadrenie tepelnej závislosti tejto veličiny sa však odvíja od mnohých premenných a jej funkcia môže byť medzi jednotlivými tranzistormi odlišná a preto bola v práci odvodená pomocou katalógových hodnôt modulu.

Návrh na redukciiu teplotnej nehomogenity sa odohráva v kapitole 11. Ten spočíva v znížení hodnoty tepelného odporu úpravou hrúbky a plochy danej vrstvy alebo súčiniteľa tepelnej vodivosti. V práci sú prezentované dva spôsoby a to zníženie hrúbky čipovej spájky a náhrada oxidu hlinitého nitridom hlinitým. Na posúdenie kvality redukcie nehomogenity je využívaná smerodajná odchýlka. V prípade hrúbky čipovej spájky nie sú rozdiely medzi východzou simuláciou príliš výrazné a to z

toho dôvodu, že čipová spájka je veľmi tenká vrstva materiálu, ktorá nemá zásadný vplyv na celkovú hodnotu tepelného odporu. Je ale nutné poznamenať, že zlepšenie oproti pôvodnému stavu nastalo. Druhý experiment, v ktorom bol využitý nitrid hlinitý dosiahol priaznivejšie výsledky kde v niektorých prípadoch bolo priemerné rozloženie teplôt čipov až trikrát menšie, čo je možné pozorovať v tabuľke 13.2. Toto je spôsobené vysokou hodnotou súčiniteľa tepelnej vodivosti nitridu hlinitého, plochou a hrúbkou samotného materiálu v geometrii. Z toho vyplýva, že váha na celkový tepelný odpor je v porovnaní so spájkou väčšia.

V predposlednej kapitole bolo pojednané o možnostiach aplikácie vykonaných experimentov do normálnej prevádzky výkonového modulu. Bola tu vykonaná modelová simulácia, ktorá mala posúdiť vplyv silikónovej výplne na tepelné parametre modulu. Táto simulácia bola z dôvodu zložitosti výpočtu značne zjednodušená a sú tu uvažované len dva čipy z modulu. Ukázalo sa, že silikón má na teplotný charakter čipov minimálny vplyv. Dôvodom, je veľmi nízka hodnota súčiniteľa tepelnej vodivosti, ktorá je blízka nule. Ďalej bolo v tejto kapitole experimentované s konštantnou hodnotou súčiniteľa tepelnej vodivosti nitridu hlinitého. Cieľom tejto simulácie bolo zistiť či je možné sa priblížiť k simulácií uvedenej v sekcii 11.2. Tieto výsledky boli veľmi podobné čo je badateľné aj v grafe 13.2 a teda v prípade potreby je možné využiť nitrid hlinitý, ktorý je z ekonomického hľadiska výhodnejší.

V diplomovej práci bolo poukázané na spôsoby redukcie teplotnej nehomogenity vo výkonových moduloch a ich limitácie pre aplikáciu do bežnej prevádzky. Pri výbere metód je nutné zväžiť ekonomické, technologické a výrobné faktory, ktoré môžu mať vplyv na výsledkú kvalitu a spoľahlivosť výrobku ale aj na zisk.

Literatúra

- [1] SHABANY, Younes. *Heat Transfer: Thermal Management of Electronics*. Londýn: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4398-1468-0.
- [2] ALMUBARAK, Adel Ahmed. *The Effects of Heat on Electronic Components*. International Journal of Engineering Research and Applications [online]. 2017, 07(05), 52-57 [cit. 2021-04-18]. ISSN 22489622. Dostupné z: doi:10.9790/9622-0705055257
- [3] LAKSHMINARAYANAN, V. a N. SRIRAAM. *The effect of temperature on the reliability of electronic components*. 2014 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT) [online]. IEEE, 2014, 2014, , 1-6 [cit. 2021-04-18]. ISBN 978-1-4799-2317-5. Dostupné z: doi:10.1109/CONECCT.2014.6740182
- [4] LAKSHMINARAYANAN, V. *What causes semiconductor devices to fail ?* EDN.com [online]. 1999, 1 November 1999 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <http://edn.com/what-causes-semiconductor-devices-to-fail>
- [5] VYROUBAL, Petr a Jiří MAXA. *Trojrozměrné modelování a simulace* [online]. In: . Brno: VUT FEKT, 2015, 2015, s. 204 [cit. 2021-03-14].
- [6] EL BOUKILI, Abderrazzak. *Physical Modeling and Simulation of Thermal Heating in Vertical Integrated Circuits* [online]. 2013, 4(2), 1-15 [cit. 2021-9-21]. ISSN 09763252. Dostupné z: doi:10.5121/ijcses.2013.4201
- [7] KITTEL, Charles. *Introduction to Solid State Physics*. 7th ed. New York: John Wiley, 1996, 673 s. ISBN 0-471-11181-3.
- [8] MATHEW, Alex. *Lattice Vibrations - Phonons in Solid State*. [online]. [cit. 2021-9-21]. Dostupné z: shorturl.at/ffIJW
- [9] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1869-9.
- [10] KOSSACZKÝ, Elemír a Július SUROVÝ. Prestup tepla. KOSSACZKÝ, Elemír a Július JÚLIUS. *Chemické inžinierstvo I*. 3. nezm. vyd. Bratislava: Alfa, 1972, s. 238-327. ISBN viaz.
- [11] Engineering ToolBox, (2003). *Emissivity Coefficient Materials*. [online] Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447 [cit. 2021-10-19].

- [12] PEPPER, Darrel W. a Juan C. HEINRICH. *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with MATLAB®, MAPLE, and COMSOL* [online]. 3rd ed. Boca Ranton: CRC press, 2017 [cit. 2021-10-19]. ISBN 9781315395104. Dostupné z: <https://doi-org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1201/9781315395104>
- [13] WHITELEY, Jonathan. *Finite Element Methods: A Practical Guide*. 1. Cham: Springer International Publishing, 2017. Mathematical Engineering. ISBN 978-3-319-49971-0.
- [14] *Detailed Explanation of Finite Element Method (FEM): The Finite Element Method (FEM)*. COMSOL - Software For Multiphysics Simulation [online]. Burlington: COMSOL, 2015, 15 marec, 2015 [cit. 2021-10-19]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>
- [15] MAZUMDER, Sandip. *The Finite Volume Method (FVM). Numerical Methods for Partial Differential Equations* [online]. Elsevier, 2016, 2016, , 277-338 [cit. 2021-12-06]. ISBN 9780128498941. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-849894-1.00006-8
- [16] HAIDER, Jibrán. *An upwind cell centred Finite Volume Method for large strain explicit solid dynamics in OpenFOAM*. Barcelona, 2017. Dizertačná práca. Polytechnic University of Catalonia.
- [17] MAZUMDER, Sandip. *Introduction to Numerical Methods for Solving Differential Equations. Numerical Methods for Partial Differential Equations* [online]. Elsevier, 2016, 2016, , 1-49 [cit. 2021-12-06]. ISBN 9780128498941. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-849894-1.00001-9
- [18] ANANDAN, Sundaram a Velraj RAMALINGAM. *Thermal management of electronics: A review of literature Thermal Science* [online]. 2008, 12(2), 5-26 [cit. 2021-4-26]. ISSN 0354-9836. Dostupné z: doi:10.2298/TSCI0802005A
- [19] QIAN, Cheng, Amir Mirza GHEITAGHY, Jiajie FAN, Hongyu TANG, Bo SUN, Huaiyu YE a Guoqi ZHANG. *Thermal Management on IGBT Power Electronic Devices and Modules*. IEEE Access [online]. 2018, 6, 12868-12884 [cit. 2021-4-27]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2793300
- [20] YEH, L. T. *Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment*. Journal of Electronic Packaging [online]. 1995, 117(4), 333-339 [cit. 2021-4-28]. ISSN 1043-7398. Dostupné z: doi:10.1115/1.2792113
- [21] WINTRICH, Arendt, Ulrich NICOLAI, Tursky WERNER a Tobias REIMANN. *Application manual power semiconductors* [online]. 2. dopl. vyd.

- Werner-von-Siemens-Strasse 16, 98693 Ilmenau, Nemecko: Ilmenau : ISLE-Verl., 2015 [cit. 2021-03-13]. ISBN 978-3-938843-83-3. Dostupné z URL: <<https://www.semikron.com/service-support/application-manual.html>>.
- [22] ROBERTSON, A.F. a D. GROSS. *An electrical-analog method for transient heat-flow analysis*. Journal of Research of the National Bureau of Standards [online]. 1958, 61(2), 107 [cit. 2021-10-19]. ISSN 0091-0635. Dostupné z: doi:10.6028/jres.061.016
- [23] PABBEWAR, Akash S. a M. KOWSALYA. *Three Level Neutral Point Clamped Inverter Using Space Vector Modulation with Proportional Resonant Controller*. Energy Procedia [online]. 2016, 103, 286-291 [cit. 2021-12-12]. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2016.11.287
- [24] CHOKKALINGHAM, Bharatiraja, Sanjeevikumar PADMANABAN a Frede BLAABJERG. *Investigation and Comparative Analysis of Advanced PWM Techniques for Three-Phase Three-Level NPC-MLI Drives*. Electric Power Components and Systems [online]. 2018, 46(3), 258-269 [cit. 2021-12-12]. ISSN 1532-5008. Dostupné z: doi:10.1080/15325008.2018.1445142
- [25] *Aluminum Nitride (AlN) Substrates*. MARUWA [online]. 2019 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.maruwa-g.com/e/products/ceramic/000314.html>
- [26] SLACK, Glen A., R.A. TANZILLI, R.O. POHL a J.W. VANDERSANDE. *intrinsic thermal conductivity of AlN*. Journal of Physics and Chemistry of Solids [online]. 1987, 48(7), 641-647 [cit. 2022-03-23]. ISSN 00223697. Dostupné z: doi:10.1016/0022-3697(87)90153-3
- [27] ELSHABINI, A.A., F. BARLOW a P.J. WANG. *Electronic Packaging: Semiconductor Packages*. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering [online]. Elsevier, 2017, 2017 [cit. 2022-03-15]. ISBN 9780128035818. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.02048-8
- [28] FRANCO JÚNIOR, A. a D. J SHANAFIELD. *Thermal conductivity of polycrystalline aluminum nitride (AlN) ceramics*. [online]. 2004, 50(315), 247-253 [cit. 2022-03-15]. ISSN 0366-6913. Dostupné z: doi:10.1590/S0366-69132004000300012

Zoznam symbolov a skratiek

a	súčiniteľ teplotnej vodivosti
A	pohltivosť telesa
$c_{1,2}$	konštanty svetla vo vákuu
c_p	hmotnostná tepelná kapacita
C	tepelná kapacita
C_q	elektrická kapacita
C_{th}	tepelná kapacitancia
C	kolektor tranzistora
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celzia
d	hrúbka materiálu
d_{chs}	hrúbka čipovej spájky
d_s	hrúbka tenkej vrstvy
D	označenie diód
e_k	prvok výpočtovej domény
e_n	konečný objem
e, n	východná stena konečného objemu
E	intenzita vyžarovania
E	emitor tranzistora
f	frekvencia
G	elektrická vodivosť
G	hradlo tranzistora
h	Planckova konštanta
I	elektrický prúd
I_0	vstupný prúd

I_{CE}	prud rozhraním kolektor-emitor
IGBT	tranzistor s izolovaným hradlom
J	označenie toku
J	rozhranie PN prechodu
K	Kelvin
l	dĺžka vodiča
L	dĺžka výpočtovej siete
L_m	dĺžka materiálu
MKO	metóda konečných objemov
MKP	metóda konečných prvkov
P	výkon
P_F	radiačný tok
q	rýchlosť prestupu tepla cez jednotkovú plochu
Q	teplo
Q_f	tepelný tok
Q_v	teplo prestupujúce systémom
R	elektrický odpor
R	odrazivosť telesa
R_{th}	tepelný odpor
$R(U, x)$	reziduálna funkcia
s	objemová tepelná kapacita
$s(u)$	zdrojová funkcia
S	plocha
T	teplota v K
T	transmisivita telesa

T_j	teplota čipu
T_s	teplota chladiča
T	označenie tranzistorov
$u(x)$	premenná reprezentujúca fyzikálnu veličinu
U	elektrické napätie
U_{CE}	napätie medzi kolektorom a emitorom
U_{GE}	napätie medzi hradlom a emitorom
$U(x)$	aproximácia riešenia diferenciálnej rovnice
V_{th}	prahové napätie
w, n	západná stena konečného objemu
$W(x)$	váhová funkcia
x_k	uzol výpočtovej domény
α_{CTE}	koeficient teplotnej rozťažnosti
α_Q	súčiniteľ prestupu tepla prúdením
Γ	názorný koeficient v diferenciálnej rovnici
$\Delta \mathbf{x}$	rozdiel veličín \mathbf{x}
∇	Laplaceov operátor
ε	emisivita
ϑ	teplota v °C
λ	vlnová dĺžka
λ_c	súčiniteľ tepelnej vodivosti
ρ	hustota
ρ_R	merný elektrický odpor, rezistivita
σ	smerodajná odchýlka
σ_d	konduktivita, merná elektrická vodivosť diódy

σ_{igbt}	konduktivita, merná elektrická vodivosť IGBT
σ_{SB}	Stefan-Boltzmannova konštanta
τ	označenie časovej závislosti
$\phi_j(x)$	bázová funkcia

Zoznam príloh