



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SIMULACE ODVODU TEPLA VÝKONOVÉHO PRVKU DO OKOLÍ

SIMULATION OF HEAT DISSIPATION FOR POWER COMPONENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Sedlář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Čožík

BRNO 2016



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Tomáš Sedlář

ID: 146950

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Simulace odvodu tepla výkonového prvku do okolí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Student v rámci diplomové práce nejprve nastuduje problematiku přenosu a odvodu tepla. Pomocí simulací v programu Ansys určí závislost teploty na povrchu měděné pájecí plošky, na které je umístěn výkonový prvek, v závislosti na celkové ploše měděného povrchu DPS. Tuto simulaci provede pro jednovrstvou a dvouvrstvou DPS. Dále pak vytvoří matematický popis odhadu velikosti 2V DPS pro efektivní odvod tepla na základě vstupních okrajových podmínek. Student následně navrhne nejvhodnější rozložení prokůvů pro odvod tepla ve vícevrstvých DPS pro 1W LED zdroj světla. Návrhy rozložení prokůvů a skladby desky plošných spojů odsimuluje v programu Ansys. Určí změny teplotních fyzikálních veličin oproti případu bez prokůvů. Pomocí simulací student odvodí teplotní závislost součinitele přestupu tepla pro daný model 1W LED zdroje světla. Výsledky simulací student porovná se skutečností na reálném vzorku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Čožík

Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Lukáš Fajcik, Ph.D., předseda oborové rady

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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá simulací odvodu tepla do okolí pro LED Seoul SZ5-P. Práce nejdříve pojednává o šíření tepla. Následně rozebírá problematiku teplotního managementu a jeho návrhu. Pomocí simulací v programu Ansys Icepak je určena teplotní závislost přechodu LED na celkové ploše jednovrstvé a dvouvrstvé desky plošných spojů. Navíc je simulací zkoumán vliv počtu a umístění prokůvů na desce plošných spojů a hliníkového substrátu desky plošných spojů. V neposlední řadě jsou v práci odvozeny vztahy udávající velikost plochy desky plošných spojů v závislosti na požadované teplotě polovodičového přechodu LED. Nakonec jsou zjištěny hodnoty součinitele přestupu tepla zahrnující konvekci a radiaci pro různé ztrátové výkony a teploty polovodičového přechodu.

Klíčová slova:

Teplotní management, LED, 1W, Seoul SZ5-P, Ansys, Icepak, Odvod tepla, Chladič, Teplotní simulace

Abstract:

The diploma thesis deals with the simulation of heat dissipation for LED Seoul SZ5-P. The heat transfer is discussed first. Further, the issue of thermal management and its design is analyzed. The dependence of LED junction temperature on area of single and double layer printed circuit board is simulated with Ansys Icepak. Additionally, influences of the number and placement of vias on the printed circuit board and aluminum substrate printed circuit board are simulated. Last but not least, the equations describing the dependence of printed circuit board area on desired LED junction temperature are derived. Finally, the values of heat transfer coefficient including convection and radiation are determined for various heat losses and junction temperatures.

Key words:

Thermal management, LED, 1W, Seoul SZ5-P, Ansys, Icepak, Heat dissipation, Cooler, Heat simulation

Bibliografická citace

Sedlář, T. *Simulace odvodu tepla výkonového prvku do okolí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2016. 67 s., 16 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ondřej Čožík.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulace odvodu tepla výkonového prvku do okolí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce Ing. Ondřeji Čožíkovi a konzultantům Ing. Zbyňku Makkimu a Ing. Tiboru Bachorcovi Ph.D. za účinnou odbornou pomoc, cenné rady a motivaci při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat celé mé rodině, ve které jsem měl během svého studia velikou podporu.

V Brně dne 13. května 2016

.....

podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

Úvod	9
1 Teplotní management	10
1.1 Teorie šíření tepla	10
1.1.1 Přenos tepla kondukcí.....	10
1.1.2 Přenos tepla konvekcí.....	11
1.1.3 Přenos tepla radiací.....	12
1.2 Teplotní management pro LED	12
1.3 Návrh teplotního managementu.....	13
2 Simulace	15
2.1 Model LED čipu v Icepaku.....	15
2.2 Nastavení simulací.....	17
2.3 1V DPS	18
2.4 2V DPS	21
2.5 Simulace s ECAD daty	23
2.5.1 2V DPS bez prokovů	24
2.5.2 2V DPS se 4 prokovy 0,25 mm	25
2.5.3 2V DPS se 4 prokovy 0,30 mm	28
2.5.4 2V DPS se 4 prokovy 0,50 mm	29
2.5.5 2V DPS se 4 prokovy 0,50 mm umístěných 1 mm od okraje mědi	31
2.5.6 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,25 mm.....	32
2.5.7 2V DPS se 2 řadami prokovů 0,25 mm	34
2.5.8 2V DPS se 3 řadami prokovů 0,25 mm	35
2.5.9 2V DPS se 4 řadami prokovů 0,25 mm	37
2.5.10 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,50 mm.....	38
2.5.11 2V DPS se 2 řadami prokovů 0,50 mm	39
2.5.12 2V DPS se 3 řadami prokovů 0,50 mm	41
2.5.13 2V DPS se 4 řadami prokovů 0,50 mm	42
2.5.14 IMS 1 mm.....	44
2.5.15 IMS 1,5 mm.....	46
3 Měření na reálném vzorku	48
3.1 Nastavení měření	48
3.2 Výsledky měření	50
4 Odhad velikosti DPS pro efektivní odvod tepla	51
Závěr.....	58
Seznam použitých zdrojů.....	60

Seznam použitých zkratek	62
Seznam obrázků.....	63
Seznam tabulek.....	65
Seznam příloh.....	66

Úvod

Současný trend v oblasti návrhu elektronických přístrojů klade důraz na kompaktnost a malé rozměry. Menší rozměry návrhů jsou umožněny zlepšujícími se technologickými procesy, a proto jsme schopni vyrábět integrované obvody s integrací v řádech desítek nanometrů. S touto zmenšující se tendencí elektronických obvodů však vzrůstá nárok na teplotní management, protože ne vždy lze při zmenšení rozměrů zmenšit i výkon dané komponenty. Typickým příkladem malých rozměrů a velkého výkonu jsou vysoce svítivé LED čipy. Jelikož není vždy výkon 100 % užitečný, ale vznikají zde Jouleovy ztráty, je potřeba vzniklé teplo odvést ze součástky do okolního prostředí[1].

Teplotní management je soubor procesů, služeb, technických i netechnických prostředků a podpůrných prostředků, používajících se v teplotních procesech, které slouží ke zvýšení spolehlivosti, zvýšení účinnosti a zpomalení procesu stárnutí zařízení[1].

Pro správný návrh teplotního managementu, je potřeba mít vstupní data, která jsou obvykle získávána z měření. Zmíněný postup má však nevýhodu v nutnosti realizovat zařízení bez potřebných vstupních dat pro návrh. Z ekonomického hlediska je díky tomu nevýhodný, jelikož se musí realizovat několik vývojových prototypů. Pro získání vstupních dat pro samotný návrh bez vývoje měřících prototypů se stále více používají počítačové simulace. Jedním z předních simulačních softwarů zabývajících se i teplotní problematikou je software Ansys. Ten většinou využívá metodu konečných prvků pro své 2D nebo 3D fyzikální úlohy. Využitím získaných počítačových dat je poté možné správně navrhnout zařízení bez drahých vývojových prototypů a tím snížit celkové náklady na teplotní management. Výhodou simulací je i zobrazení 3D simulovaných modelů v různých řezech. Tímto způsobem můžeme získat data, která nejsou mnohdy z důvodu konstrukce zařízení možné naměřit.

Diplomová práce se zabývá teplotním managementem výkonové LED, která v současnosti stále více nahrazuje dříve používané žárovky. Zvláště pak v automobilovém průmyslu, kde se využívá vysoká účinnost a životnost LED technologie, oproti jejím předchůdcům. Účinnost LED se pohybuje kolem 35%, v porovnání k tomu účinnost žárovky se pohybuje kolem 5%. Důsledkem toho je zmenšení příkonu světlometů při zvýšení světelného výkonu. Další výhodou použití LED technologie je větší životnost diod oproti žárovkám, tím se snižuje čas strávený údržbou světlometů. Nevýhodou LED světlometů je nemožnost výměny nefunkčního světla. Zmíněný fakt přispívá k většímu důrazu na správný teplotní management a docílení největší životnosti součástky[2].

1 Teplotní management

1.1 Teorie šíření tepla

Teplo se přenáší mezi soustavou a okolím nebo dvěma soustavami pomocí tří mechanismů[3]:

- tepelný tok vedením (kondukcí),
- tepelný tok prouděním (konvekcí),
- tepelný tok zářením (radiací).

Pro další zápis tepelného toku P , který má jednotku joule za sekundu [$J \cdot s^{-1}$] se v této práci bude uvažovat jednotka watt [W], která je zápisem v SI jednotkách totožná s joulem za sekundu tedy $kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$.

1.1.1 Přenos tepla kondukcí

Vedení tepelného toku převažuje v pevných látkách, ale také v tekutinách bez proudění. Tepelná konduktance vzniká díky předávání části kinetické energie při srážkách sousedních molekul. Vedení tepla zvyšují volné částice, jako jsou elektrony v kovech nebo ionty v tekutinách. Podle rychlosti přenosu tepla se látky dělí na tepelné vodiče a tepelné izolanty. Mezi tepelné vodiče patří především kovy, jako je měď, hliník aj. Mezi teplotní izolanty se řadí většinou tekutiny, jako je např. voda, vzduch nebo také sypké či pórovité látky, uvnitř kterých jsou tyto tepelné izolanty. Typickým příkladem je polystyren používající se ve stavebnictví[6]. Přenos tepla kondukcí je definován Fourierovým zákonem znázorněným ve vztahu (1.1).

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1.1)$$

Kde \vec{q} [$W \cdot m^{-2}$] je hustota tepelného toku, λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti a $\text{grad}T$ [K] je teplotní gradient.

Součinitel tepelné vodivosti je tabulková hodnota, závislá na teplotě, tlaku, struktuře, hmotnosti a vlhkosti. Pro pevné látky je nejkritičtější teplotní závislost pro daný vzorek. Pro tekutiny se součinitel tepelné vodivosti udává v klidovém stavu, tedy kdy nedochází k přenosu tepla prouděním. Za pokojových teplot se součinitel tepelné vodivosti pro plyny pohybuje mezi 0 až $0,1 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, u kapalin je jeho hodnota v rozmezí 0 až $1 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ a u pevných látek v rozmezí hodnot 0 až $400 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Měď má teplotní vodivost při $25^\circ C$ $386 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ a materiál FR-4 má teplotní vodivost v každém směru jinou. V objemu v ose Z pouze $0,29 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ [6].

Pro případ, že se teplo šíří pouze v jednom směru, je možno psát vztah pro tepelnou energii Q [J] zápisem zobrazeným v rovnici (1.2).

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{l} \cdot \tau \quad (1.2)$$

Kde S [m^2] je plocha, kterou teplo prostupuje, l [m] je hloubka, do které energie projde za čas τ [s] a ΔT [K] je rozdíl teplot v hloubce l od povrchu S .

Ze součinitele tepelné vodivosti se dá vyjádřit i tepelná vodivost G_{th} [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$], tedy schopnost látky o daných rozměrech propustit teplo. A z ní se dá vyjádřit tepelný odpor R_{th} [$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]. Vzájemné souvislosti těchto veličin zobrazuje rovnice (1.3).

$$G_{th} = \frac{1}{R_{th}} = \lambda \cdot \frac{S}{l} \quad (1.3)$$

Tepelný odpor se dá vyjádřit také jako změna teploty ΔT [K] vztažené na tepelný tok P [W] potřebný k této změně, jak popisuje vztah (1.4).

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad (1.4)$$

Tabulka 1: Analogie mezi teplotními a elektrickými veličinami

Teplovní veličina	Elektrická veličina
Teplo Q [J]	Náboj Q [C]
Rozdíl teplot ΔT [K]	Napětí U [V]
Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Konduktivita γ [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]
Tepelná vodivost G_{th} [$\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$]	Elektrická vodivost G [S]
Tepelný odpor R_{th} [$\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$]	Elektrický odpor R [Ω]
Hustota tepelného toku \vec{q} [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]	Proudová hustota \vec{j} [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]
Tepelný tok P [W]	Elektrický proud I [A]
Newtonův zákon ochlazování $\Delta T = P \cdot R_t$	Ohmův zákon $U = I \cdot R$

Díky popsané analogii v tabulce 1, se dají použít i elektronická schémata, pokud máme rovinnou stěnu, například desku FR-4 s pokovením, je možné ji zobrazit schematicky, jako tři odpory řazené do série odpor mědi – odpor FR-4 – odpor mědi[6].

1.1.2 Přenos tepla konvekcí

Proudění se uplatňuje v tekutinách. Jedná se o proudění hmoty o různé teplotě. Dělí se na přirozenou a nucenou. Přirozená konvekce je vyvozena z rozdílu hustot látky. Nucená je vyvozena rozdílem tlaku, například ventilátorem, kompresorem, čerpadlem, ale i větrem. Přirozená i nucená konvekce nastávají současně, avšak v různých poměrech. Pokud jsou složky nucené konvekce majoritní, je volná konvekce většinou zanedbána.[6]

Popis přenosu tepla konvekcí je složitější než přenos kondukcí, jelikož se klade větší důraz na popis pohybu částic látky a okrajové podmínky. Pro tepelný tok P_k [W] konvekce můžeme psát rovnici (1.5).

$$P_k = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \quad (1.5)$$

Kde ΔT [K] je rozdíl teplot mezi povrchem tělesa a teplotou okolí. Další veličinou je součinitel přestupu tepla α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$], který je závislý na rychlosti proudění

a termodynamických parametrech tekutiny. S [m^2] je plocha povrchu, ze které je konvekci odváděno teplo.

Pro výpočet konvekce se používají inženýrské korelace mezi bezrozměrnými veličinami, jedná se o Nusseltovo, Reynoldsovo a Prandlovo číslo. Pomocí těchto čísel vypočítává konvekci i program Ansys Icepak, který využívá řešič programu Fluent.

1.1.3 Přenos tepla radiací

Záření (sálání) tepla je fyzikální děj, při kterém látka emituje energii do prostoru ve formě elektromagnetického záření. Na rozdíl od konvekce a kondukce se radiace uplatňuje i ve vakuu, jelikož se energie šíří fotony. Radiace probíhá u každého objektu s nenulovou absolutní teplotou[4][5].

Vlastní zářivost E_0 [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] černého tělesa je popsána Stefan-Boltzmanovým zákonem, jehož zápis je v rovnici (1.6).

$$E_0 = \sigma \cdot T^4 \quad (1.6)$$

kde σ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$] je Stefan-Boltzmanova konstanta a T [K] je absolutní teplota. Vztah nám tedy říká, že intenzita záření vztažená na jednotkovou plochu je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teplotě tělesa. Stefan-Boltzmanův zákon platí za předpokladu, že se veškerý zářivý tok při dopadu na objekt přemění na tepelný tok. V reálu existují tzv. šedá tělesa, tedy nedokonalé zářiče, které mají tepelný tok menší. Do Stefan-Boltzmanova vztahu se zavádí tedy i emisivita [4][5]. Ve vztahu (1.7) je zobrazena závislost na emisivitě.

$$E = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (1.7)$$

kde ε [-] je emisivita neboli poměrná zářivost šedého tělesa. Nabývá hodnot od 0 do 1, kde 0 značí nezářící povrch, jako jsou lesklé povrchy, které veškeré záření odrazí např. zrcadlo a hodnota 1 značí černé těleso, povrch který pohltí téměř veškeré záření. U některých látek se emisivita s rostoucí teplotou povrchu mění[5].

1.2 Teplotní management pro LED

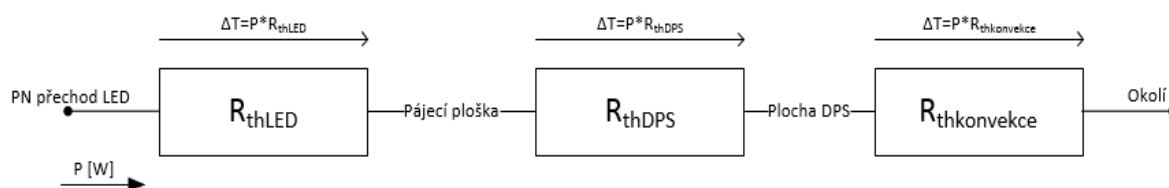
Pro správnou a dlouhotrvající funkci LED je potřeba, aby teplota na polovodičovém přechodu byla co nejmenší. Překročení maximálních povolených teplot může vést ke snížení účinnosti, zkrácení životnosti, případně k úplnému zničení diody[2][7].

Světlo na LED vzniká díky rekombinaci nosičů v jejím polovodičovém přechodu. I když se jedná na dnešní poměry o relativně efektivní zdroj světla, kolem 65% – 75% se stále spotřebuje na ztráty Jouleovým teplem[11].

Maximální teplota přechodu je dána teplotou okolí, teplotním odporem mezi LED přechodem a jeho okolím a výkonem odvedeným z čipu[7][9].

Teplotní závislosti parametrů LED jsou uváděny v katalogovém listu ve formě grafů či tabulek. Pro každou LED jsou parametry jiné z důvodu konstrukce a použitých materiálů[8].

Zjednodušené teplotní schéma je zobrazeno na obrázku 1, kde se jedná o teplotní obvod realizovaný z teplotního odporu pouzdra LED, teplotního odporu DPS a teplotního odporu charakterizujícího konvekci z desky plošných spojů.[7]



Obrázek 1: Teplotní schéma LED s DPS

Teplotní odpor pouzdra LED je dán rozměry a materiálem diody. Pokud se jedná o výkonovou diodu určenou k pájení má dioda kromě plošek pro anodu a katodu také plošku pro tzv. „thermal pad“ – chladicí plošku. Jedná se o pájecí plošku určenou pro odvod tepla do DPS. Její funkce není elektrická, ale teplotní. Teplotní odpor konvekce je závislý na teplotě okolí, rychlosti proudění a velikosti chladiče.

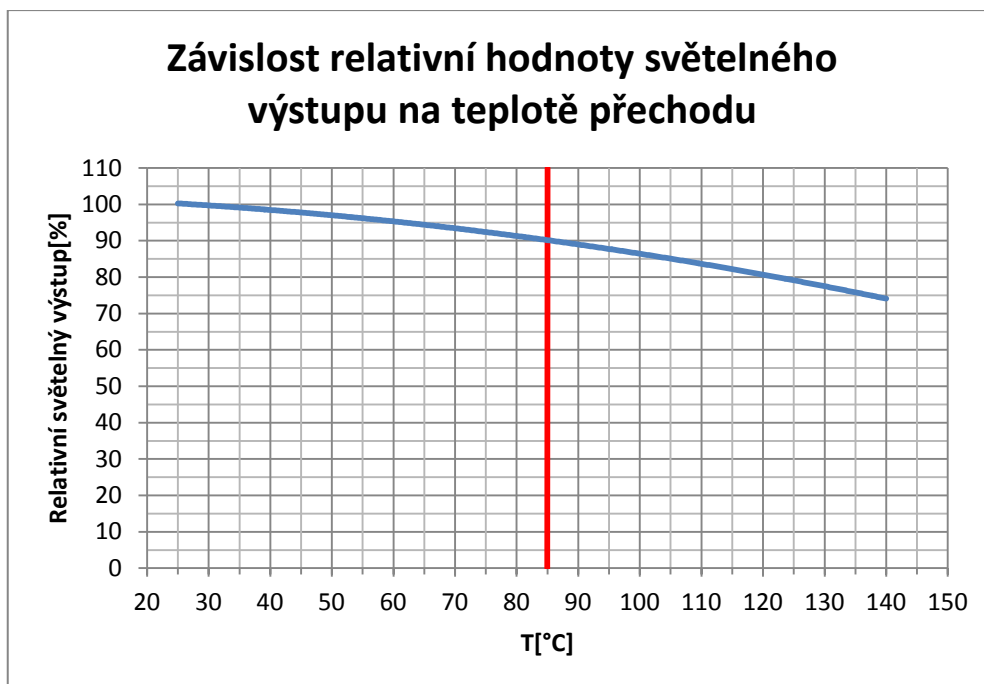
V neposlední řadě je v teplotním managementu brán zřetel na rozměry a cenu chladiče. Ten může být aktivní nebo pasivní, typickým představitelem aktivních chladičů je ventilátor, nejčastějším pasivním zástupcem jsou hliníkové chladiče. Pro LED management, zabývající se LED diodami o malých rozměrech a výkonech jsou výhodnější pasivní chladiče, které nevyžadují zdroj energie pro svoji funkci. Pro chlazení vysoce výkonových LED čipů je vhodné použít kombinovanou metodu chlazení[10].

1.3 Návrh teplotního managementu

Návrh teplotního managementu je individuální z pozice maximálních či minimálních dovolených limitů parametrů. Limity pro tuto práci jsou maximální pokles světelného výstupu na 90% a minimální rozměr DPS, fungující jako chladič. Další mezní hodnotou je maximální teplota na polovodičovém přechodu.

Pro zvolenou LED Seoul SZ5-P je 100% světelný výstup při 25 °C. Pokles na 90% světelného výstupu je při teplotě přechodu 85 °C. Průběh poklesu světelného výstupu je zachycen na obrázku 2, který odpovídá katalogovému listu[8]. Maximální teplota polovodičového přechodu je pro návrh teplotního managementu 85 °C, tímto je pokryta podmínka pro maximální možnou teplotu přechodu, která je $T_{jmax}=145$ °C. Pro zjednodušení je uvažován výkon měnící se v Jouleovo teplo 1W. Z katalogového listu[8] je možné zjistit teplotní odpor diody. Jeho velikost je $R_t = 5,5$ K·W⁻¹[8]. Materiál pro DPS je FR-4, se základním materiálem s tloušťkou 1,55 mm. Tloušťka mědi se řídí normou IPC-6012. Pro dvouvrstvou i jednovrstvou DPS je povolena minimální tloušťka 52,9 μm pro třídu montážních celků 3, tedy pro vysoce spolehlivou elektroniku. Tuto třídu vyžaduje lékařství, letectví, armádní technika, automotive, aj.

Pomocí simulací je možné zjistit nejvhodnější geometrické rozměry chladiče, který uchládí polovodičový čip na co nejnižší teplotu za současně co nejmenších rozměrů DPS.



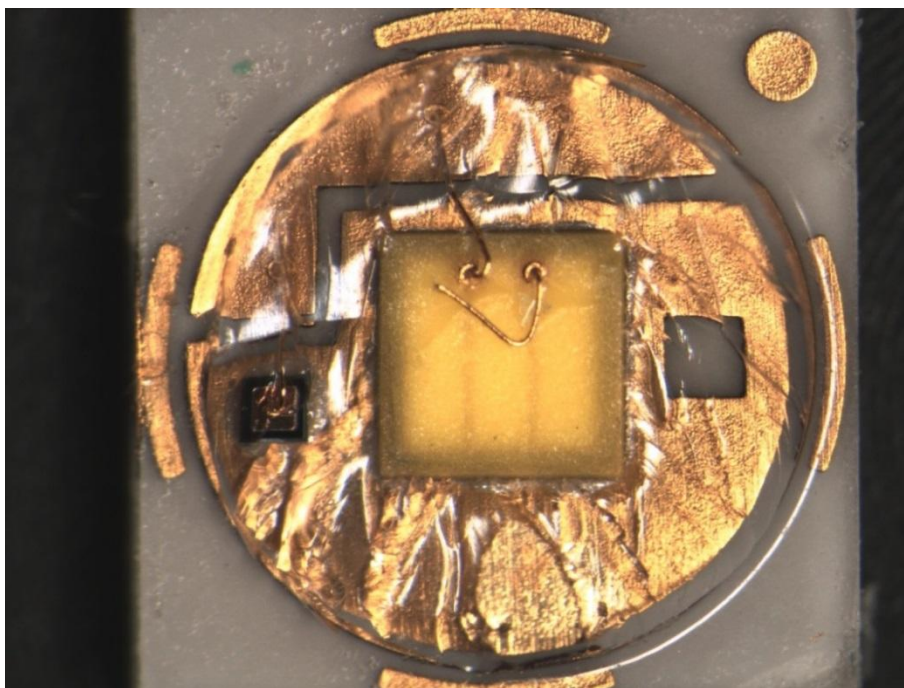
Obrázek 2: Graf závislosti relativního světelného výstupu na teplotě přechodu LED čipu

Pro simulace jsou uvažovány čtvercové desky plošných spojů. Desky jsou pro parametrickou simulaci realizovány Icepak modely s jádrem 1,55 mm FR-4 ve variantách jednovrstvé a dvojrvtvé DPS s tloušťkou mědi 53 μm . Pro simulace s ECAD daty se jedná o dvojrvtvé desky realizované v softwaru Allegro s různě umístěnými prokvy a desky plošných spojů s hliníkovým jádrem.

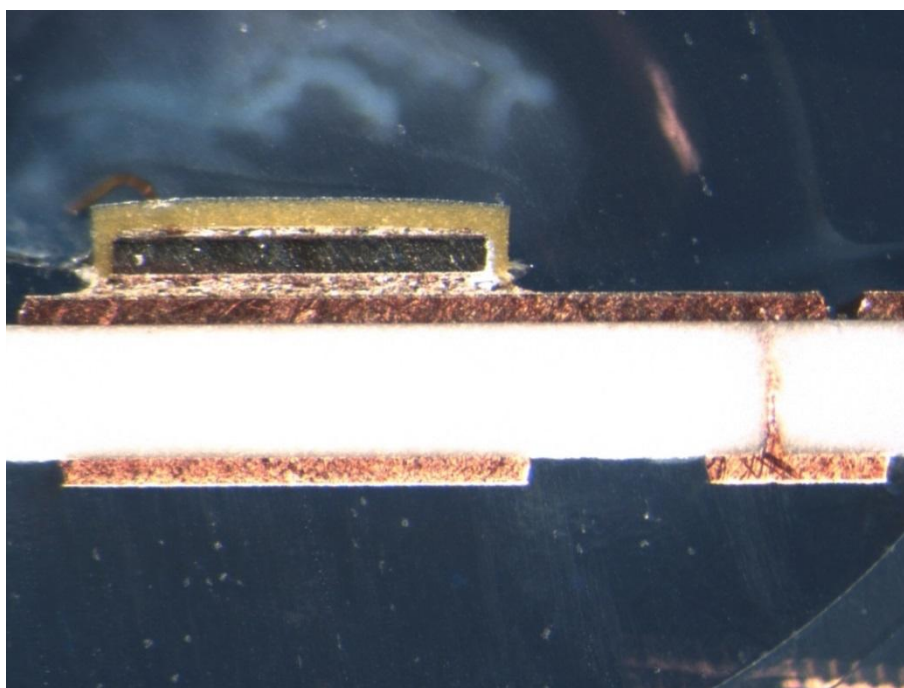
2 Simulace

2.1 Model LED čipu v Icepaku

Pro správné výsledky simulace je potřeba co nejvíce dodržet reálnou předlohu. Mikrovýbrusy reálné LED jsou na obrázku 3 a obrázku 4. Snahou je dodržet co nejvíce geometrii předlohy.



Obrázek 3: Půdorysný řez LED Seoul SZ5-P

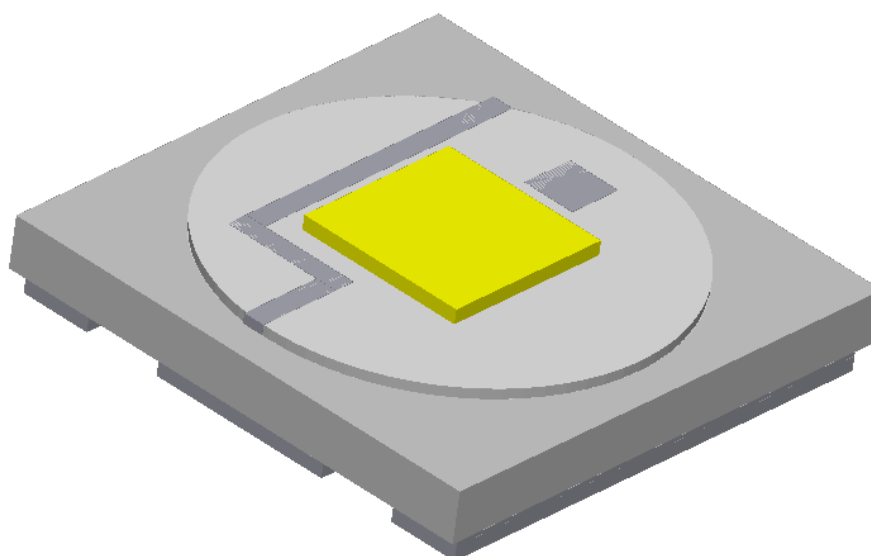


Obrázek 4: Bokorysný řez LED Seoul SZ5-P

Model je vytvořen přímo v programu Ansys Icepak pomocí jeho objektových nástrojů (blocks, plates, walls, openings). Jeho geometrie je vidět na obrázku 5 a obrázku 6. Materiálové vlastnosti jsou definovány podle katalogového listu.



Obrázek 5: Bokorys modelu LED



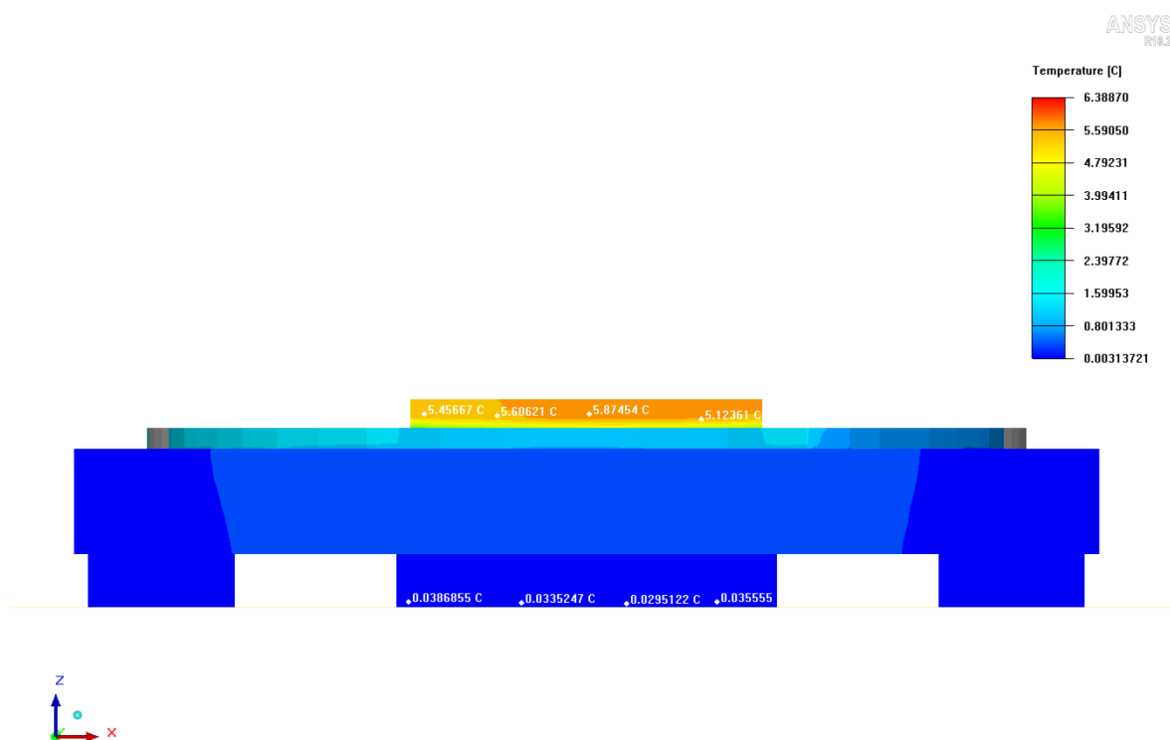
Obrázek 6: Geometrie Icepak modelu LED

Správné tepelné vlastnosti modelu jsou ověřeny statickou simulací, při které přechod generuje tepelný výkon o velikosti 1 W a spodní strana modelu s pájecími ploškami je připojena k okrajové podmínce 0 °C. Dále pak je teplota okolí nastavena na 0 °C, neuvažuje se radiace ani konvekce, jediné šíření tepla je kondukcí v čipu od nejteplejšího místa k nejchladnějšímu. Tímto je dosažen teplotní spád od přechodu čipu k jeho pájecím ploškám, jak je patrné z obrázku 7. Dosazením zprůměrovaných výsledků simulace do rovnice (1.4) je možné určit teplotní odpor této soustavy pomocí vztahu (2.1).

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{5,59 - 0,03}{1} = \underline{\underline{5,56 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}} \quad (2.1)$$

Teplotní odpor odpovídá katalogové hodnotě, která udává jako typickou hodnotu $R_{th} = 5,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$ [8]. Vypočtený teplotní odpor odpovídá R_{thLED} z obrázku 1. Jedná se

o tepelný odpor mezi PN přechodem a pájecí ploškou určenou pro odvod tepla z pouzdra čipu.



Obrázek 7: Ověření teplotního odporu modelu

2.2 Nastavení simulací

Velikost desky plošných spojů ovlivňuje velikost tepelného výkonu odvedeného konvekcí a radiací. Závislost je přímo úměrná za předpokladu, že deska plošných spojů by měla na celém povrchu homogenní teplotu (1.5). Jelikož se teplo v desce šíří kondukcí, je možné očekávat, že vzdálenější části desky od zdroje budou chladnější než místa blíže ke zdroji díky tepelnému odporu mědi a materiálu FR-4. To způsobuje snížení tepelného toku konvekce na okraji DPS a tedy menší odvod tepla do okolí. Čtvercová DPS má po dvou protilehlých stranách substrátu čipu dva přívody pro anodu a katodu. Měděný povrch desky plošných spojů končí vždy 1 mm od okraje desky. Samotný substrát čipu má tvar čtverce s velikostí hrany 3,5 mm.

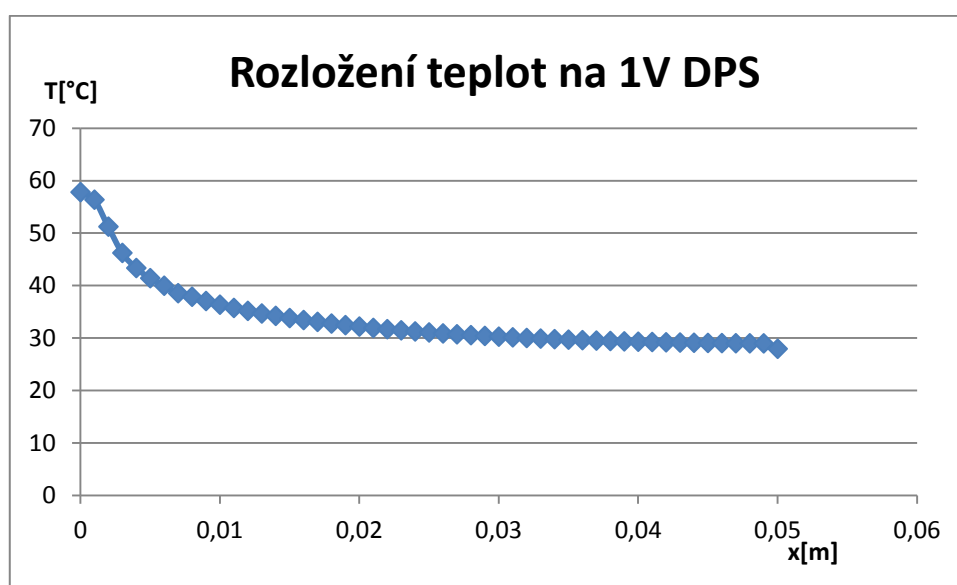
Simulace je nastavena s teplotou okolí na 25 °C, tato teplota platí pro konvekci i radiaci. Jak bylo zmíněno v úvodu návrhu teplotního managementu, hlavním cílem je zjistit velikosti desek plošných spojů ochlazující přechod polovodičového čipu pod teplotu 85 °C.

Globální síť má maximální velikost elementů ve všech směrech 8 mm. Minimální mezera v X a Y směru je 25 μm, v Z směru 10 μm. Minimální počet elementů v mezeře jsou 3 a minimální počet elementů na hraně jsou také 3. Celek diody má síť zjemněnou s maximální velikostí elementu 125 μm ve směru X a Y, ve směru Z je maximální velikost 75 μm. Velikost mezery je 15 μm v X a Y směru, v Z směru je 7 μm. Tato síť je rozšířena 3 mm v X směrech, 5 mm v Y směrech a 1 mm v Z směrech od celku diody. Celek DPS

má síť zjemněnou s elementy v X a Y směru o maximální velikosti 0,75 mm v Z směru je maximální povolená velikost elementu 0,5 mm. Velikost mezer v X a Y směru je 10 μm a 1 μm v Z směru. Tato síť je rozšířena 2 mm ve všech směrech od desky. 15 mm nad tímto celkem je zjemněná síť s maximální velikostí elementu ve všech směrech 2 mm pro zachycení komínového efektu.

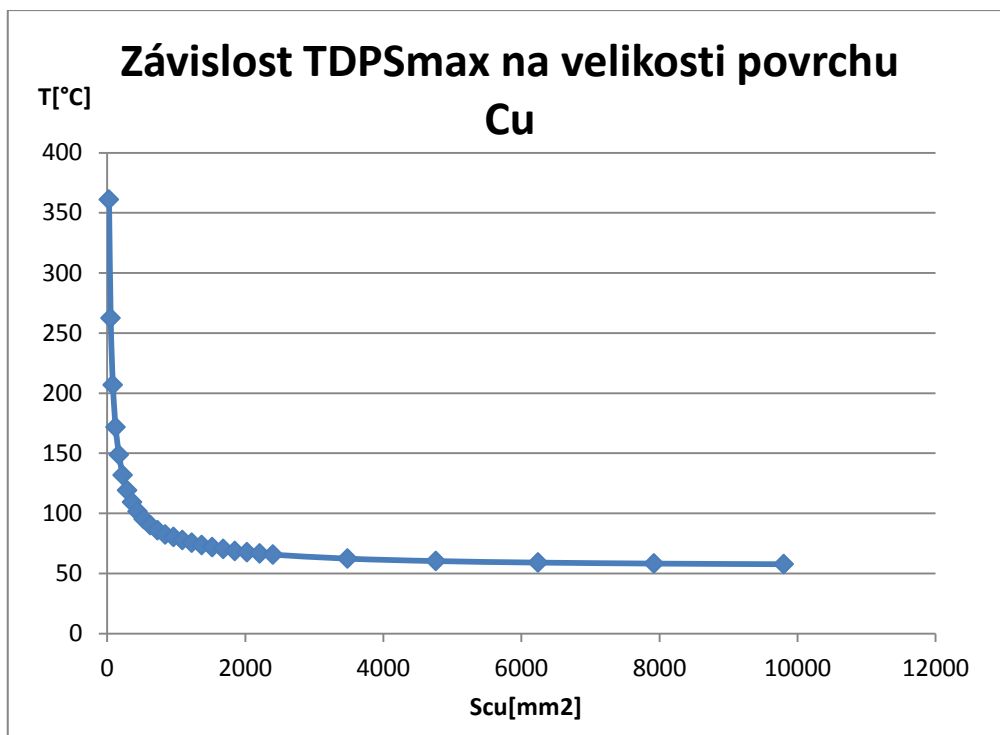
2.3 1V DPS

Jednovrstvá deska plošných spojů je realizována parametricky s 28 různými rozměry. Z grafu na obrázku 8 je vidět nerovnoměrné rozložení teplot na povrchu desky plošných spojů. Teplotní spád od středu desky k jejímu okraji je téměř 30 °C. Až od vzdálenosti 2 cm od pájecí plošky určené k odvodu tepla můžeme považovat teplotu za ustálenou. Graf na obrázku 8 je sestaven pro největší simulovanou 1V DPS s hranou 10 cm.



Obrázek 8: Graf rozložení teploty na 1V DPS s hranou 10 cm v závislosti na vzdálenosti od středu desky

Výsledky maximálních teplot na 1V DPS jsou zobrazeny v grafu na obrázku 9. Od hodnoty měděné plochy 20 cm² se maximální teplota příliš nemění a pro větší uchlazení LED čipu se musí 1V DPS již neekonomicky a neergonomicky zvětšovat.



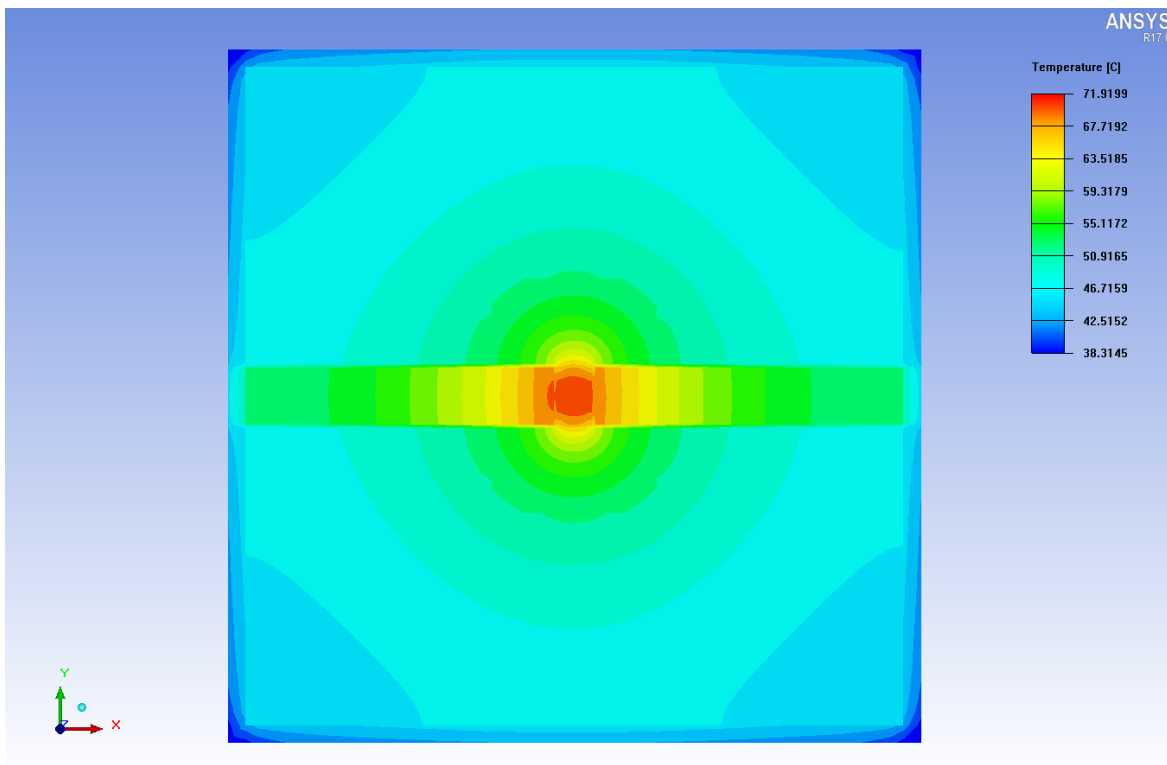
Obrázek 9: Graf závislosti teploty povrchu pájecí plošky určené k odvodu tepla na celkové ploše mědi 1V DPS

V tabulce 2 jsou zobrazeny hodnoty napočtené ze simulací. Parametrem simulací byla velikost hrany 1V DPS. Vypočteny jsou maximální teplota LED přechodu T_j , teplota na pájecí plošce určené pro odvod tepla z čipu T_{DPSmax} , minimální teplota DPS T_{DPSmin} , střední teplota $T_{DPSstredni}$ a střední hodnota teplotního součinitele přestupu tepla α .

Tabulka 2: Výsledky parametrické simulace 1V DPS

Hrana DPS [mm]	S _{Cu} [mm ²]	T _j [°C]	T _{DPSmax} [°C]	T _{DPSmin} [°C]	T _{DPSstredni} [°C]	α[W m ⁻² K ⁻¹]
6	25	366,1	361,1	179,1	264,8	26,6
8	49	267,7	262,5	139,1	209,4	22,9
10	81	212,1	206,9	117,5	169,5	19,0
12	121	177,0	171,8	99,4	143,3	17,8
14	169	154,0	148,8	83,5	123,4	16,5
16	225	137,1	131,9	75,6	108,9	16,2
18	289	124,5	119,2	67,8	97,1	15,9
20	361	114,6	109,4	61,9	87,7	15,5
22	441	106,8	101,6	57,2	80,1	15,1
24	529	100,6	95,3	53,4	73,8	14,8
26	625	95,5	90,2	50,2	68,6	14,4
28	729	91,2	86,0	47,5	64,2	14,1
30	841	87,7	82,4	45,3	60,5	13,8
32	961	85,6	80,4	44,0	58,2	13,1
34	1089	83,1	77,8	42,3	55,4	12,9
36	1225	80,8	75,6	40,8	53,0	12,6
38	1369	78,9	73,6	39,5	50,8	12,4
40	1521	77,2	71,9	42,9	48,9	12,2
42	1681	75,7	70,4	37,3	47,1	12,0
44	1849	73,9	68,7	36,4	45,6	11,8
46	2025	72,9	67,7	35,5	44,2	11,7
48	2209	71,9	66,7	34,8	42,9	11,6
50	2401	71,0	65,7	34,1	41,8	11,4
60	3481	67,6	62,4	31,4	37,4	10,9
70	4761	65,6	60,4	29,7	34,6	10,5
80	6241	64,4	59,1	28,5	32,6	10,2
90	7921	63,6	58,3	27,7	31,2	10,0
100	9801	63,0	57,8	27,1	30,1	9,6

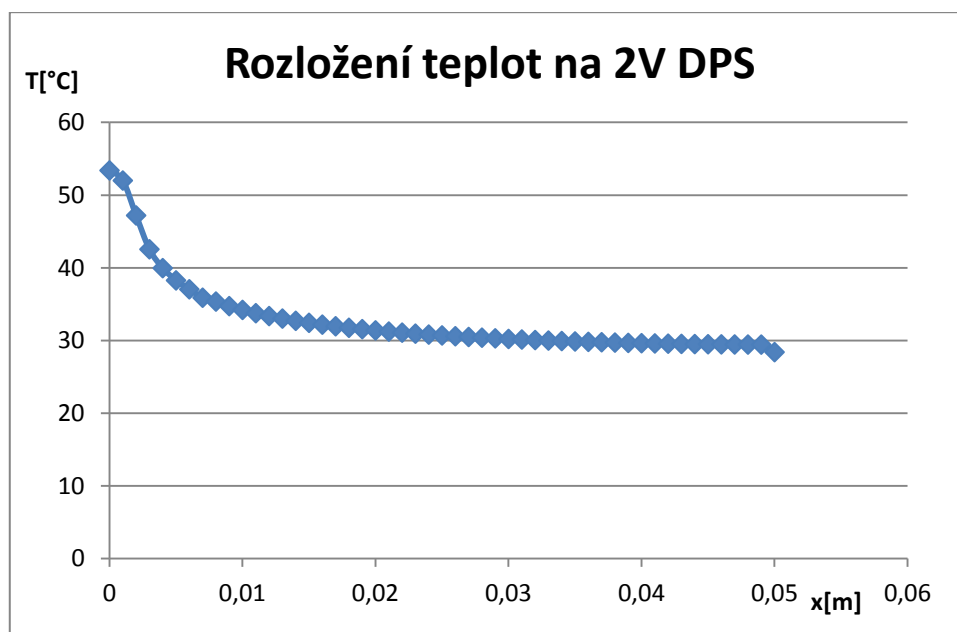
Na obrázku 10 je znázorněn grafický výstup simulace. Zobrazená 1V DPS má hranu 4 cm. Jedná se o zobrazení rozložení teplot na vrchní vrstvě DPS (strana s LED čipem). Výhodou tohoto zobrazení je zjištění rozložení tepla bezprostředně pod diodou, které v reálné situaci nemůžeme naměřit.



Obrázek 10: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 1V DPS s hranou 4 cm, pohled na vrchní vrstvu 1V DPS

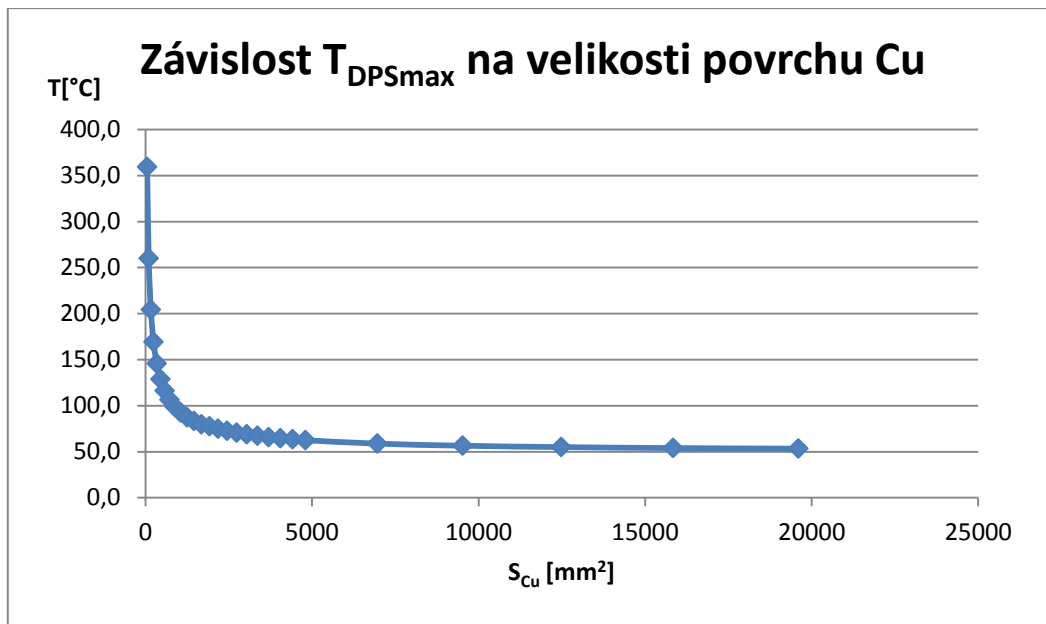
2.4 2V DPS

Dvouvrstvá deska plošných spojů je realizována opět parametricky s 28 různými rozměry. Jak je znázorněno na obrázku 11 teplota na DPS není homogenní. Na okraji DPS je teplota o více než 20 °C menší než přímo pod pájecí ploškou určenou k odvodu tepla. Největší teplotní spád je do vzdálenosti 1 cm od zmíněné plošky, dále je teplota téměř homogenní.



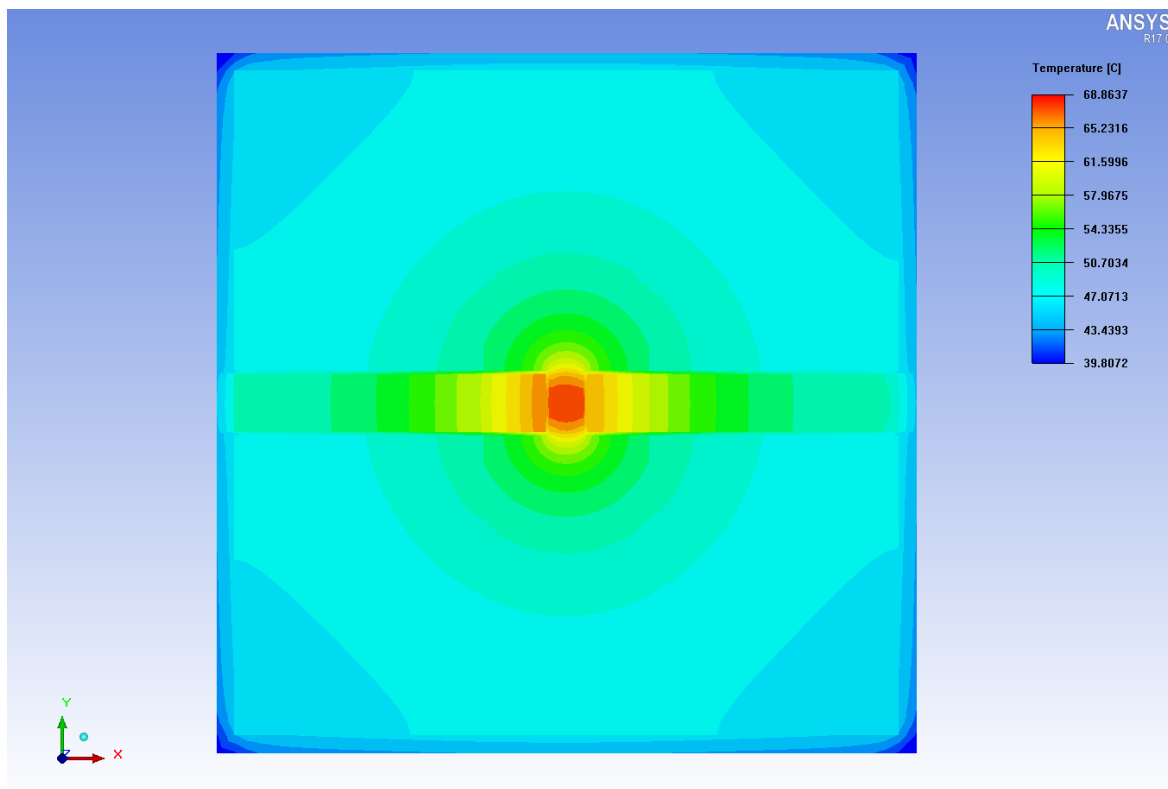
Obrázek 11: Graf rozložení teploty na 2V DPS s hranou 10 cm v závislosti na vzdálenosti od středu desky

Výstupem simulace je graf zobrazený na obrázku 12, který udává velikost maximální teploty na pájecí plošce určené pro odvod tepla v závislosti na velikosti povrchu měděné plochy na 2V DPS.



Obrázek 12: Graf závislosti teploty povrchu pájecí plošky určené k odvodu tepla na celkové ploše mědi 2V DPS

Obdobně jako v případě 1V DPS je na obrázku 13 zobrazeno rozložení teplot na vrchní vrstvě 2V DPS. Grafický výstup je pro DPS s hranou 4 cm.



Obrázek 13: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, pohled na vrchní vrstvu

Dalším výstupem simulace je tabulka 3, ve které jsou zapsány výsledky ze všech běhů parametrické simulace. Jako při simulaci 1V DPS jsou zjištěny teploty na přechodu LED, teploty na DPS a součinitel přestupu tepla α .

Tabulka 3: Výsledky parametrické simulace 2V DPS

Hrana DPS [mm]	S_{Cu} [mm ²]	T_j [°C]	T_{DPSmax} [°C]	T_{DPSmin} [°C]	$T_{DPSstredni}$ [°C]	α [W m ⁻² K ⁻¹]
6	50	364,6	359,4	182,6	263,3	26,6
8	98	265,2	260,0	143,8	207,7	22,8
10	162	209,5	204,3	122,6	168,2	18,9
12	242	174,5	169,3	103,8	141,5	17,7
14	338	151,0	145,8	88,1	121,3	16,5
16	450	134,0	128,8	76,3	106,6	16,2
18	578	121,4	116,2	71,5	95,0	15,8
20	722	111,6	106,4	65,5	85,9	15,5
22	882	103,9	98,7	60,6	78,5	15,1
24	1058	97,7	92,5	56,6	72,4	14,7
26	1250	92,6	87,3	53,2	67,3	14,4
28	1458	88,5	83,3	49,4	63,3	14,1
30	1682	84,9	79,7	47,0	59,7	13,8
32	1922	82,8	77,6	45,8	57,5	13,1
34	2178	80,2	75,0	44,0	54,7	12,8
36	2450	77,9	72,7	42,4	52,3	12,6
38	2738	75,9	70,6	41,0	50,2	12,4
40	3042	74,1	68,9	39,8	48,3	12,2
42	3362	72,5	67,3	38,7	46,6	12,0
44	3698	70,9	65,7	37,7	45,1	11,9
46	4050	69,8	64,6	36,8	43,7	11,7
48	4418	68,7	63,5	36,0	42,5	11,6
50	4802	67,7	62,5	35,3	41,4	11,4
60	6962	64,1	58,9	32,4	37,2	10,9
70	9522	61,8	56,6	30,6	34,7	10,5
80	12482	60,3	55,1	29,3	32,5	10,2
90	15842	59,3	54,0	28,4	31,1	10,0
100	19602	58,6	53,4	27,8	30,1	9,6

2.5 Simulace s ECAD daty

Pro simulace via prokovů je potřeba namodelovat DPS v prostředí pro PCB layout. Jediným softwarem, ze kterého je možno importovat výsledné DPS do programu Ansys Icepak, je program Allegro od firmy Cadence.

Jelikož model DPS je vytvářen v externím softwaru není možné parametricky simulovat více rozměrů DPS. Pro další simulace je zvolena čtvercová DPS s hranou 4 cm, tloušťkou FR-4 1,55 mm a výškou měděných vrstev 53 μ m.

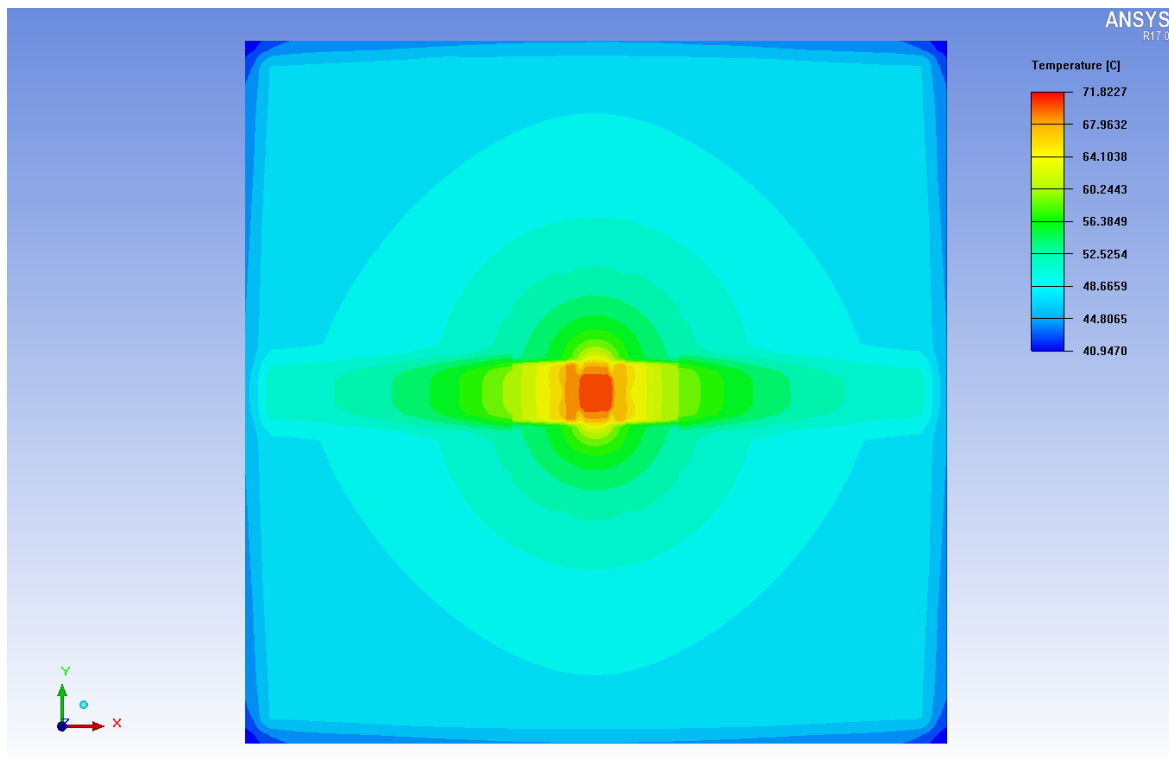
Konečnoprvková síť je pro simulace s ECAD daty nastavena jemněji. Globální síť má maximální velikost elementů ve všech směrech 2 mm. Minimální mezera v X a Y směru je nastavena na hodnotu 0,025 mm, v Z směru na hodnotu 0,01 mm. Celek diody nastavení sítě stejné. Celek DPS má síť více zjemněnou než v případě bez ECAD dat s maximální velikostí elementů v X a Y směru s hodnotou 0,5 mm v Z směru je maximální povolená velikost elementu 0,125 mm. Velikosti mezer jsou řízeny globálními pravidly. Síť celku DPS je protažena 2 mm ve všech směrech od DPS. Ve vzdálenosti 3 mm v X a Y směru, 2 mm v záporném Z a 10 mm v kladném Z směru od celku DPS je síť zjemněná velikostí elementu v Z směru s maximální hodnotou 1 mm.

Výsledky ze simulací jsou zapsány do jednotlivých tabulek. Tabulky obsahují maximální teplotu polovodičového přechodu, minimální teplotu celého celku DPS-LED, střední hodnotu teploty DPS, maximální teplotu na DPS (teplota chladicí plošky), vyzářený tepelný tok a součinitel přestupu tepla pro daný celek.

Typové rozložení prokůvů na DPS pro jednotlivé desky je zobrazeno v příloze A.

2.5.1 2V DPS bez prokůvů

Protože v simulaci s ECAD daty jsou materiálové vlastnosti a geometrie zadávány jiným způsobem, nemusí souhlasit výsledky simulací s výsledky získanými s nativními modely Icepaku. Jelikož hlavním cílem simulací s ECAD daty je zjištění vlivu via prokůvů na odvod tepla, je potřeba mít referenční výsledky. Pro tuto simulaci se využije 2V DPS bez prokůvů vytvořená v softwaru Allegro.



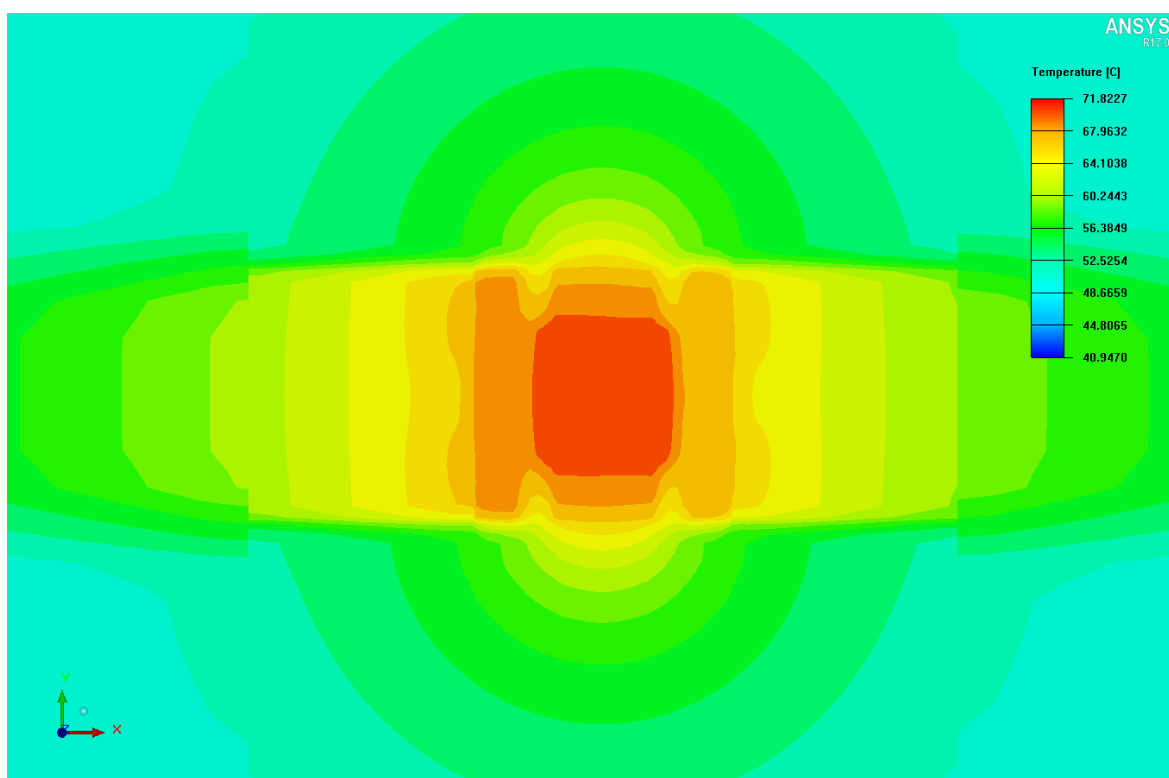
Obrázek 14: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm simulovanou s ECAD daty

Z obrázku 14 je vidět změna rozložení teplot oproti simulaci bez ECAD dat zobrazených na obrázku 13. Maximální teplota je oproti simulacím s modely Icepaku vyšší. Vyšší teploty simulací s ECAD daty dokazují i výsledky v tabulce 4.

Tabulka 4: Výsledky simulace s ECAD daty čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm bez prokovů

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
76,94	40,95	49,04	71,82	0,45	11,69

Na obrázku 15 je zobrazen detail pájecí plošky pro LED diodu. Je vidět dobrý odvod tepla od pájecí plošky určené k odvodu tepla a mnohem horší odvod tepla přívodních cest pro elektrické napětí.



Obrázek 15: Detail nejteplejšího místa 2V DPS bez prokovů

Barevné kontury zobrazující rozložení teplot na spodní vrstvě DPS bez prokovů jsou zobrazeny na obrázku v příloze B.1. Jak je z obrázku vidět, rozložení teplot pod LED čipem je rovnoměrné s teplotou pohybující se pod hodnotu 51 °C.

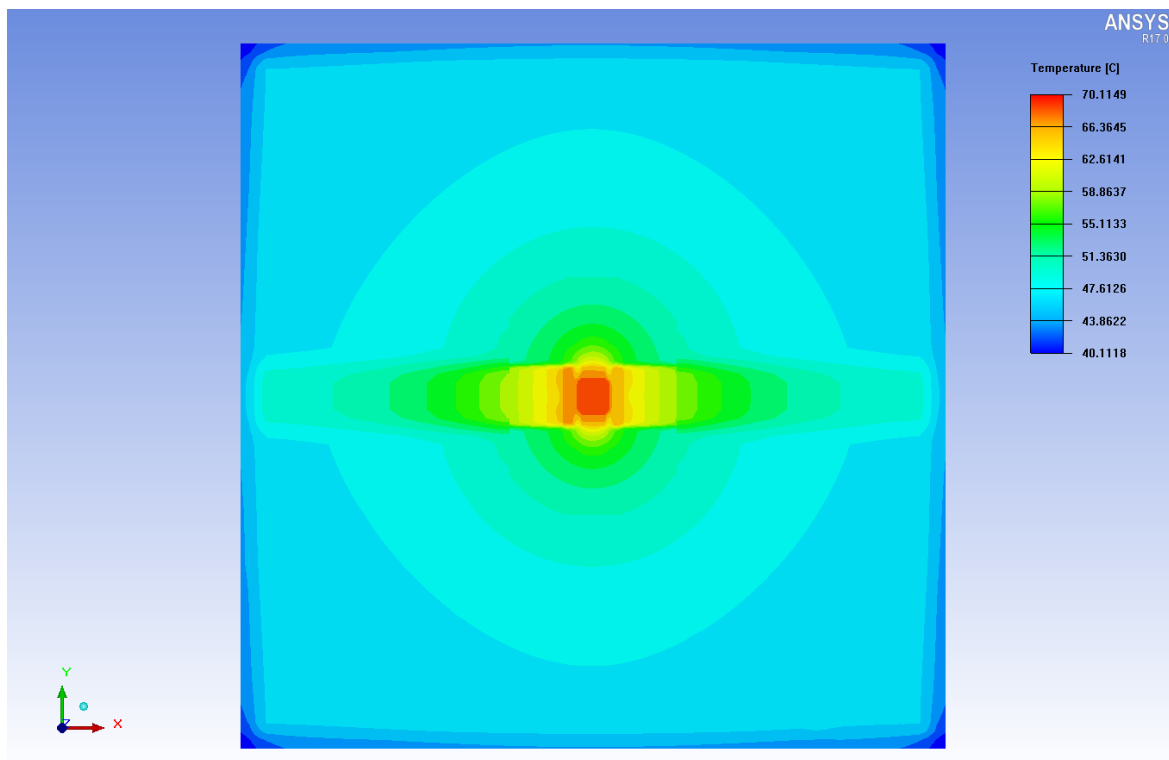
2.5.2 2V DPS se 4 prokovy 0,25 mm

Simulace je provedena s DPS obsahující 4 prokovy skrze všechny vrstvy (through hole) s velikostí průměru díry 0,25 mm. Jedná se o nejmenší počet simulovaných prokovů. Dále jsou tyto prokovy nejmenší simulované. I přes tato fakta je rozdíl teplot na DPS oproti desce bez prokovů patrný.

Tabulka 5: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,25 mm

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
75,24	40,11	47,77	70,11	0,48	12,24

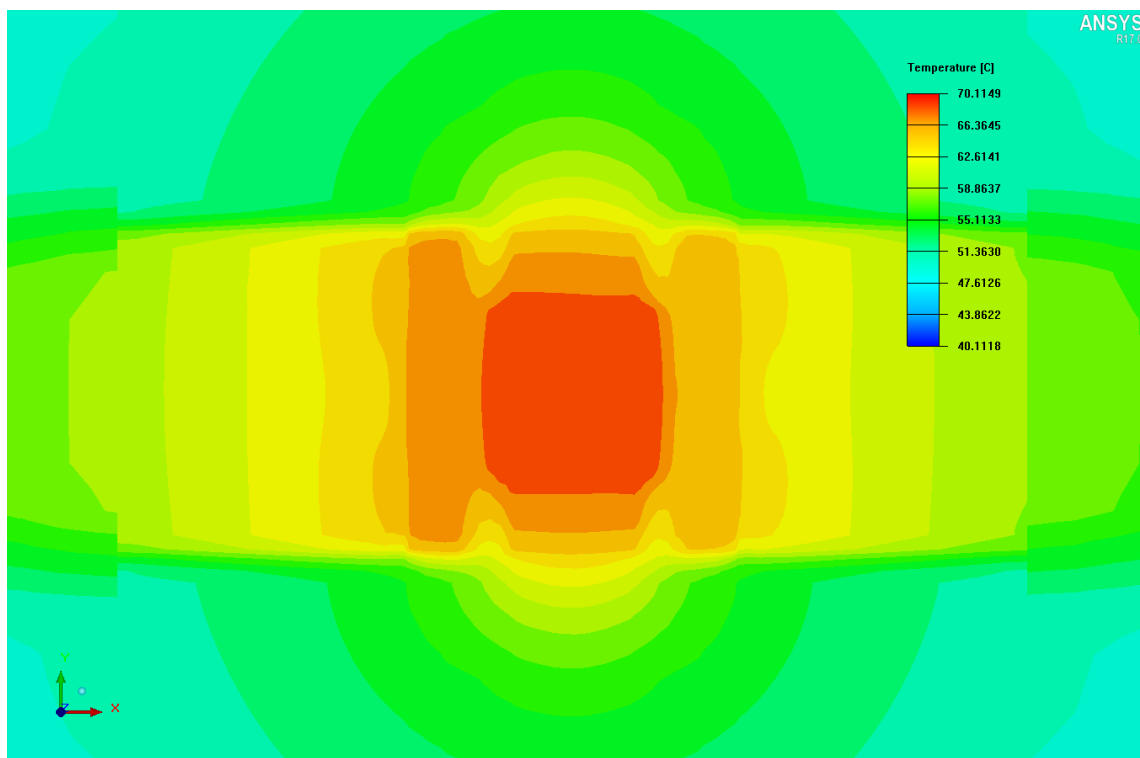
Jak je patrné z výsledků v tabulce 5 a obrázku 16 čtyři prokovy s velikostí díry 0,25 mm pomohou snížit maximální teplotu o více než 1 °C.



Obrázek 16: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm se 4 prokovy 0,25 mm

Oproti desce plošných spojů bez prokovů se zmenšila minimální teplota desky plošných spojů o hodnotě 0,84 °C, v porovnání k tomu se maximální teplota zmenšila o hodnotu 1,35 °C. Díky prokovům je teplota na DPS více vyrovnaná a tepelný tok z ní je větší, to se projevuje právě lepším uchlazením LED čipu.

Detailní pohled na pájecí plošku pro LED čip, která je zároveň nejteplejším místem desky plošných spojů, je na obrázku 17. Oproti DPS bez prokovů jsou teploty menší, nicméně jejich rozložení se zásadně nemění.



Obrázek 17: Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokvy 0,25 mm

Na detailu teplotních kontur spodní vrstvy zachyceném na obrázku 18 je již vidět větší teplota na spodní vrstvě, která je zde distribuována díky prokovům. V porovnání s modelem bez prokovů je zde pod pájecí ploškou a kolem prokovů žlutozelená barva, značící vyšší teploty.



Obrázek 18: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2VDPS se 4 prokvy 0,25

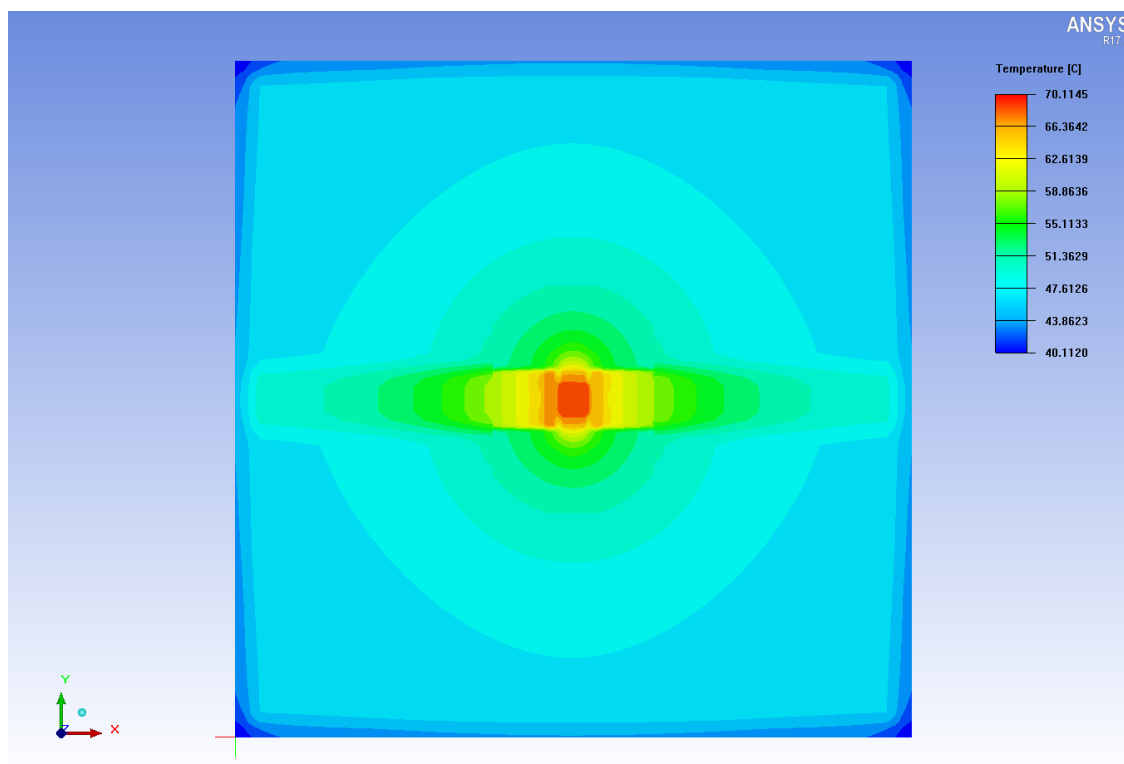
2.5.3 2V DPS se 4 prokovy 0,30 mm

Simulace je provedena s modelem čtvercové 2V DPS se 4 prokovy umístěnými na stejném místě jako v předchozím případě. Jediným rozdílem je velikost díry prokovu, ta má průměr 0,30 mm.

Z výsledků simulace znázorněných na obrázku 19 a v tabulce 6 je vidět minimální změna oproti předchozímu případu s prokovy 0,25 mm. Maximální teploty jsou téměř totožné. Změna je ve střední hodnotě teplot na desce plošných spojů.

Tabulka 6: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,30 mm

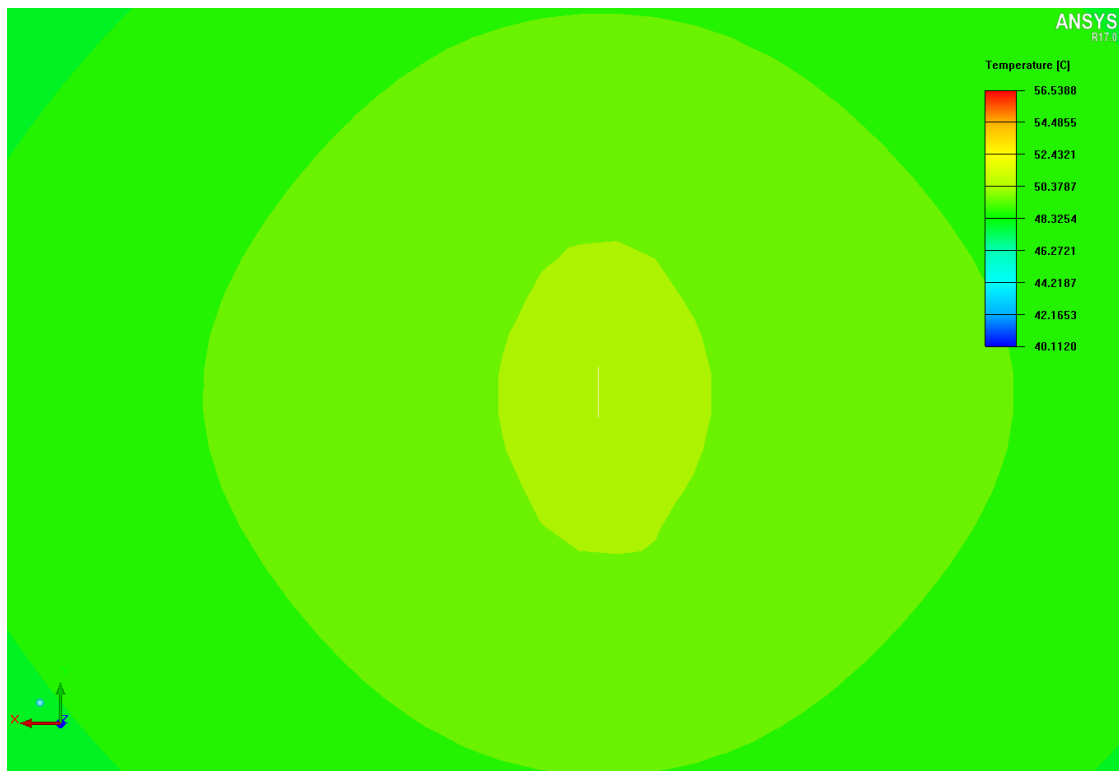
T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
75,24	40,11	48,22	70,11	0,48	12,24



Obrázek 19: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm se 4 prokovy 0,30 mm

Detail nejteplejšího místa na DPS je zobrazen na obrázku v příloze B.2. Teplota na vrchní vrstvě je rozložena podobně jako v modelu s menšími prokovy.

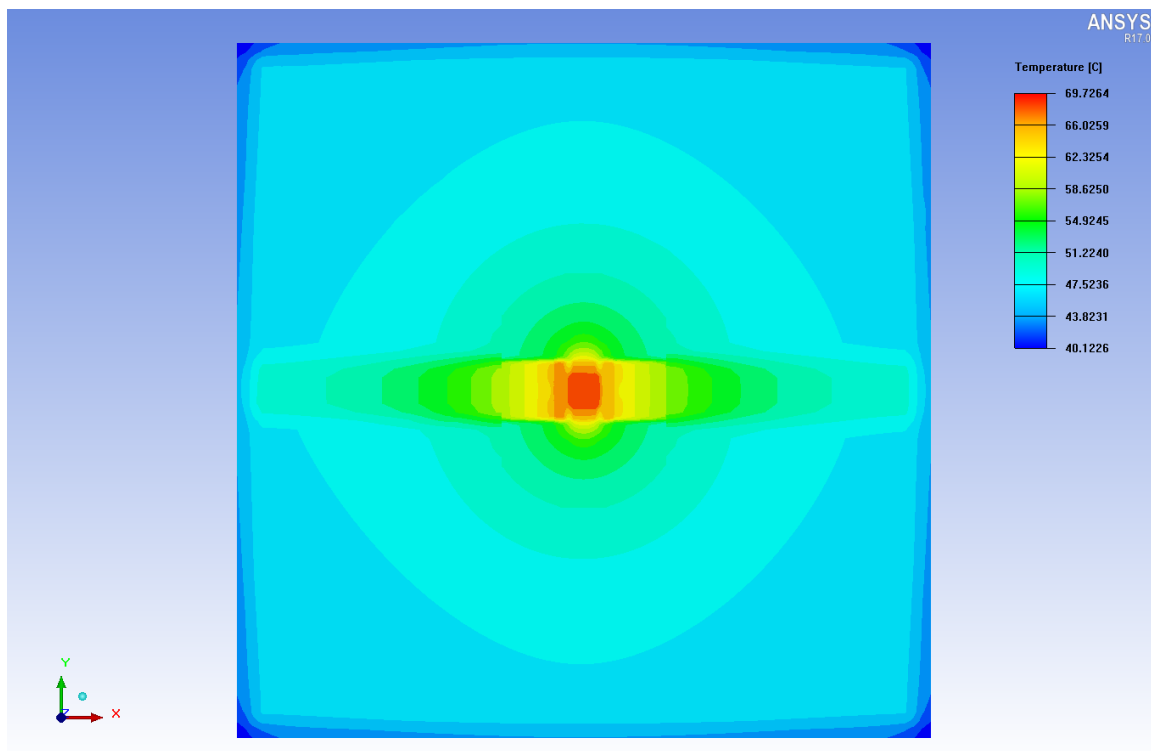
Na obrázku 20 je vidět změna proti předchozí simulaci s menšími prokovy. Teplo z vrchní strany DPS je lépe odváděno na spodní vrstvu. Tento jev je zachycen sytější žlutou barvou teplotních kontur na spodní vrstvě pod pájecí ploškou.



Obrázek 20: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 prokovy 0,30 mm

2.5.4 2V DPS se 4 prokovy 0,50 mm

Prokovy pro tuto simulaci jsou opět umístěny na stejném místě jako v předchozích případech. Rozdílem je jejich velikost díry s hodnotou 0,50 mm. LED čip je uchlazen ze všech velikostí prokovů na nejnižší teplotu.



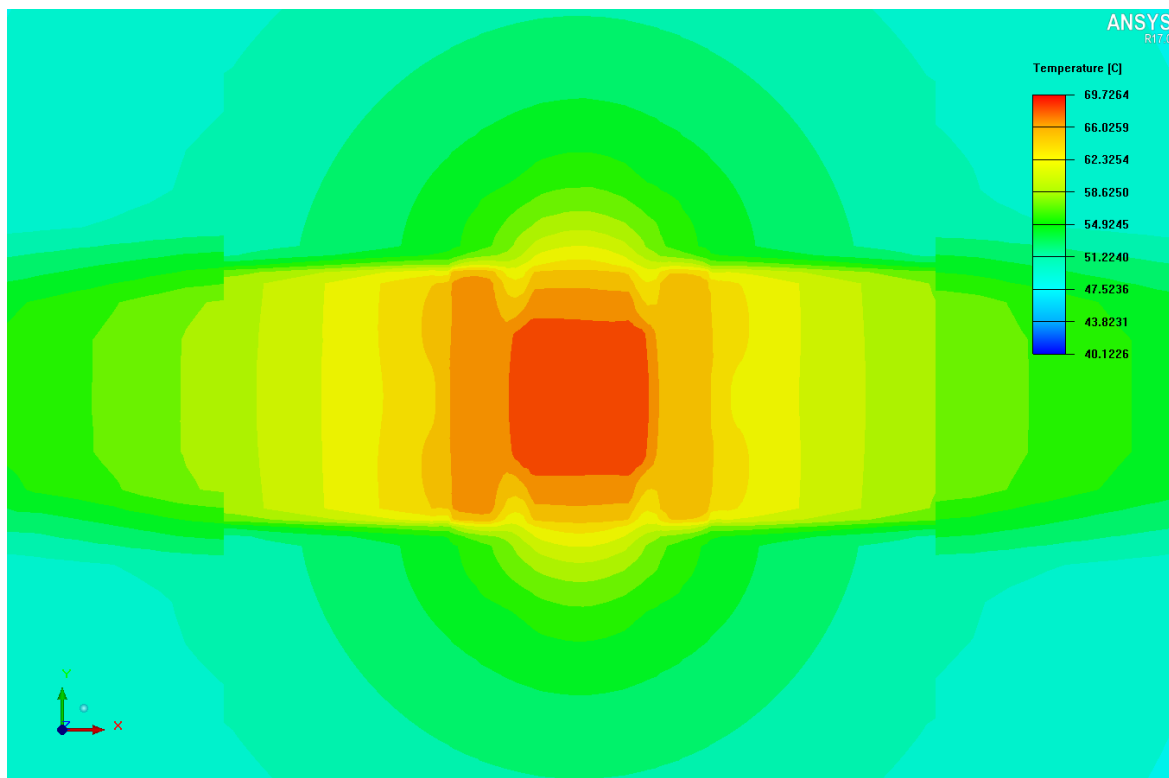
Obrázek 21: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm se 4 prokovy 0,50 mm

Jak je vidět z obrázku 21 největší teplota DPS dosahuje téměř 69,73 °C. Zbylé výsledky simulace jsou zobrazeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,50 mm

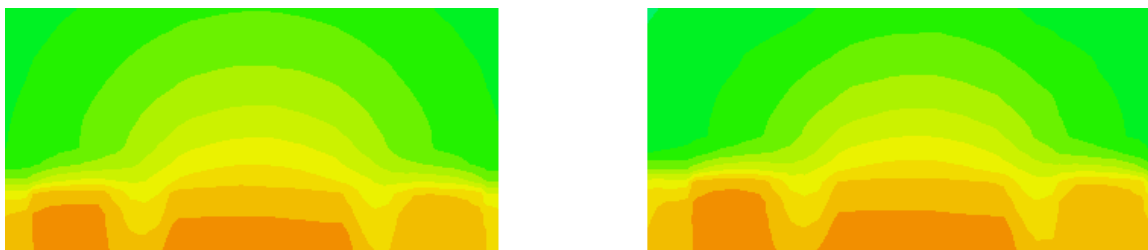
T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
74,87	40,12	48,61	69,73	0,48	12,23

Výsledky poukazují na fakt, že již 4 prokovy s velikostí díry 0,50 mm pomohou zlepšit rozložení teplot na DPS do takové míry, že se teplota sníží o více než 2 °C oproti DPS bez prokovů.



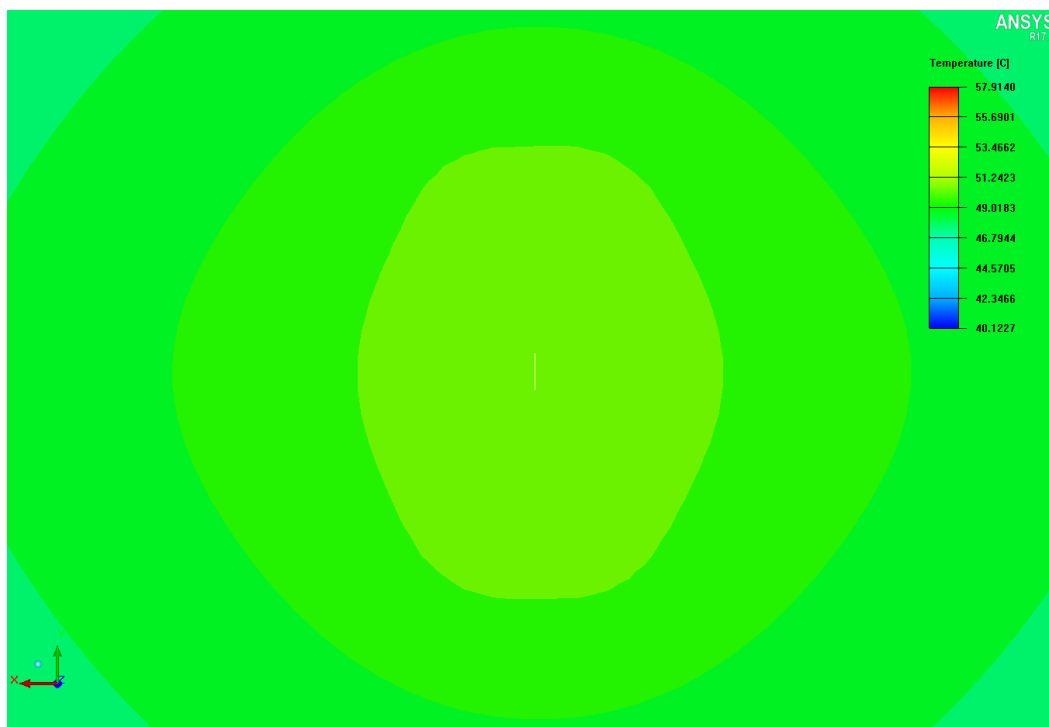
Obrázek 22: Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokovy 0,50 mm

Na obrázku 22 je již vidět změna rozložení teplot oproti desce bez prokovů. Názorné umístění 4 prokovů je zobrazeno v příloze A.3 a A.4. Z obrázku 22 je patrné, že místa s prokovy snížila lokální teplotu. Žluté kontury ve směru nahoru a dolů od pájecí plošky jsou užší než v případě bez prokovů. Tento jev je zřetelný na obrázku 23. Barevné kontury DPS s prokovy mají kromě lepšího rozložení navíc menší hodnoty teplot.



Obrázek 23: Porovnání rozložení teplot DPS bez prokovů (vlevo) a DPS s 4 prokovy 0,50 mm (vpravo)

Rozložení teplot na spodní vrstvě pod pájecí ploškou pro čip zobrazené na obrázku 24 ukazuje vyrovnanou distribuci tepla od prokovů. S většími prokovy je dle očekávání lepší rozložení tepla na spodní vrstvu DPS.



Obrázek 24: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 prokovy 0,50

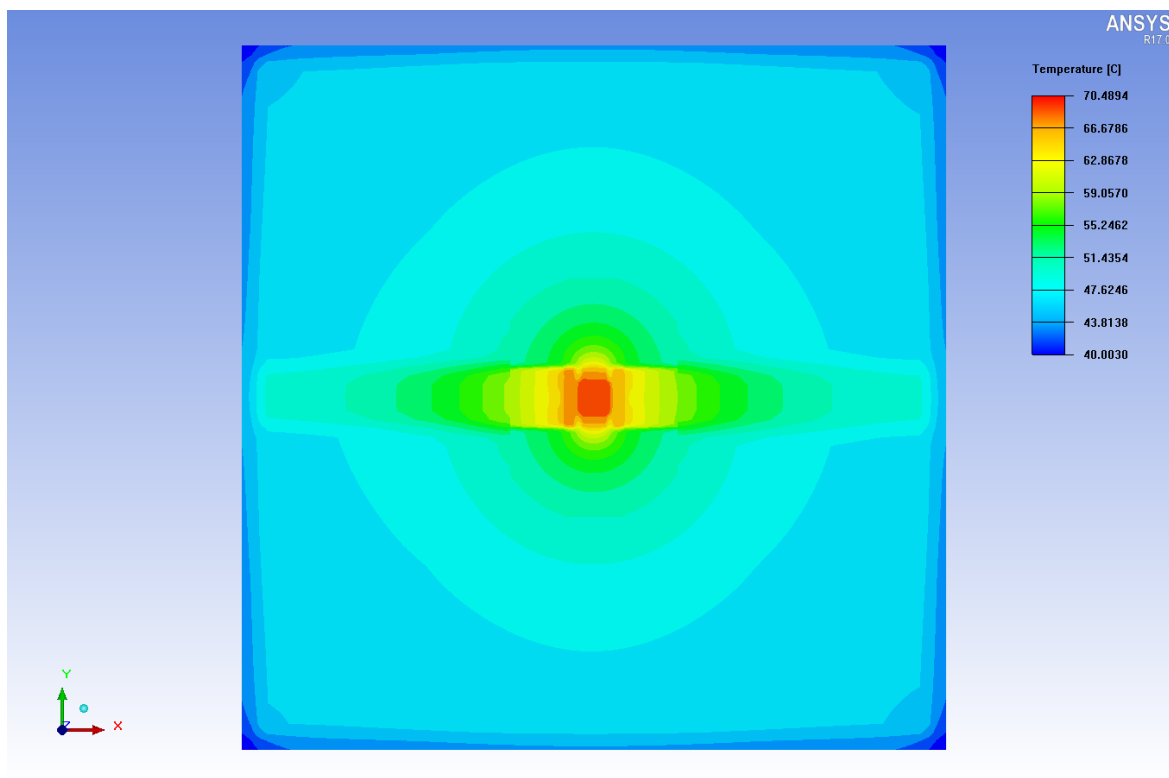
2.5.5 2V DPS se 4 prokovy 0,50 mm umístěných 1 mm od okraje mědi

V této simulaci jsou 4 prokovy umístěny v rozích DPS. Vždy ve vzdálenosti 1 mm od okraje měděné části (2 mm od okraje DPS). Toto umístění potvrzuje vliv vzdálenosti umístění prokovů od zdroje tepla.

Tabulka 8: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,50 mm 1 mm od okraje mědi

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
75,61	40,00	47,72	70,49	0,47	12,35

Výsledky ze simulace zobrazené v tabulce 8 a na obrázku 25 ukazují horší přenos tepla než v případě 4 prokovů umístěných u pájecí plošky. LED čip je o 0,74 °C teplejší než v případě, kdy tyto prokovy byly v bezprostřední vzdálenosti u pájecí plošky. Zároveň je ale maximální teplota čipu oproti DPS bez prokovů menší o 1,33 °C. Z hlediska teplotního managementu špatně umístěné prokovy tak mají stále vliv na konečnou teplotu chlazené součástky.



Obrázek 25: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 4 prokovy 0,50 mm umístěných 1 mm od okraje měděného povrchu

2.5.6 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,25 mm

V modelu s jednou řadou prokovů je celkem 10 prokovů. V blízkosti horní a spodní strany pájecí plošky pro LED je umístěno 5 prokovů v řadě. Na každé straně je právě jedna řada prokovů. Rozložení je zobrazeno v příloze A.5 a A.6.

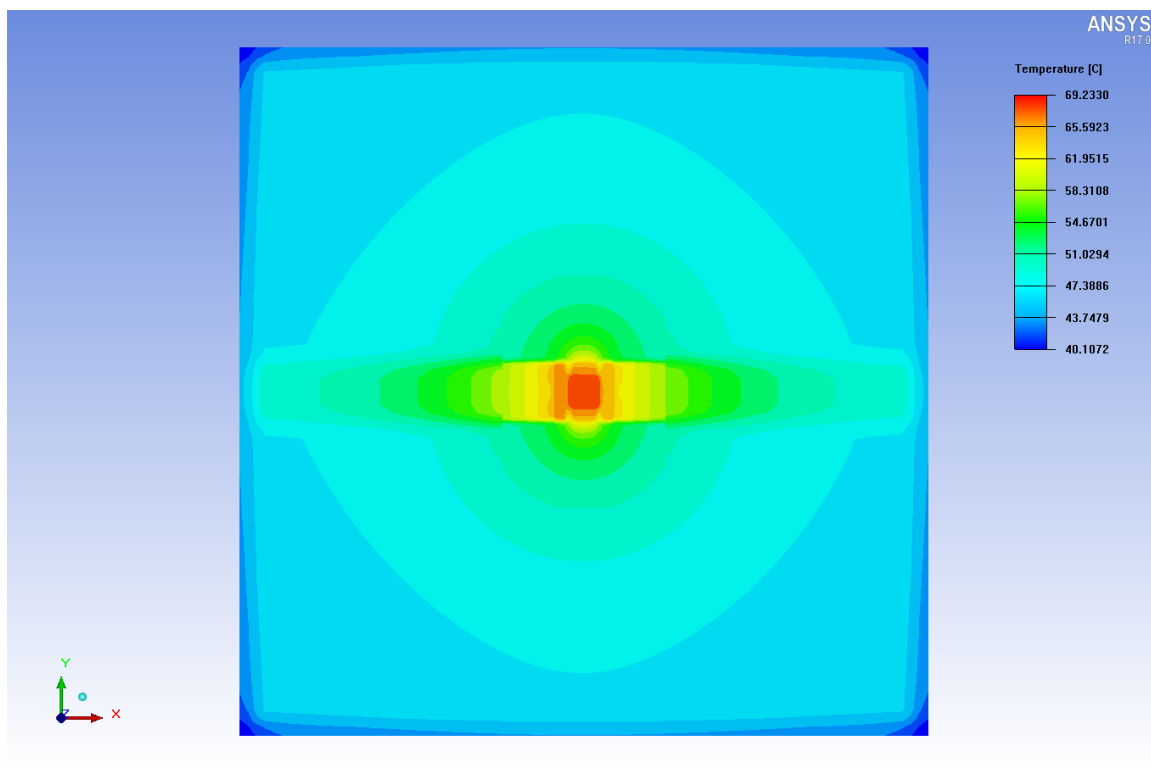
Výsledky simulace s jednou řadou prokovů jsou zobrazeny na obrázku 26 a v tabulce 9. Z nich je patrné, že rozdíl maximální teploty oproti 4 prokovům s velikostí díry 0,25 mm je necelý 1 °C, kdežto minimální teploty jsou stejné.

Tabulka 9: Výsledky simulace 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

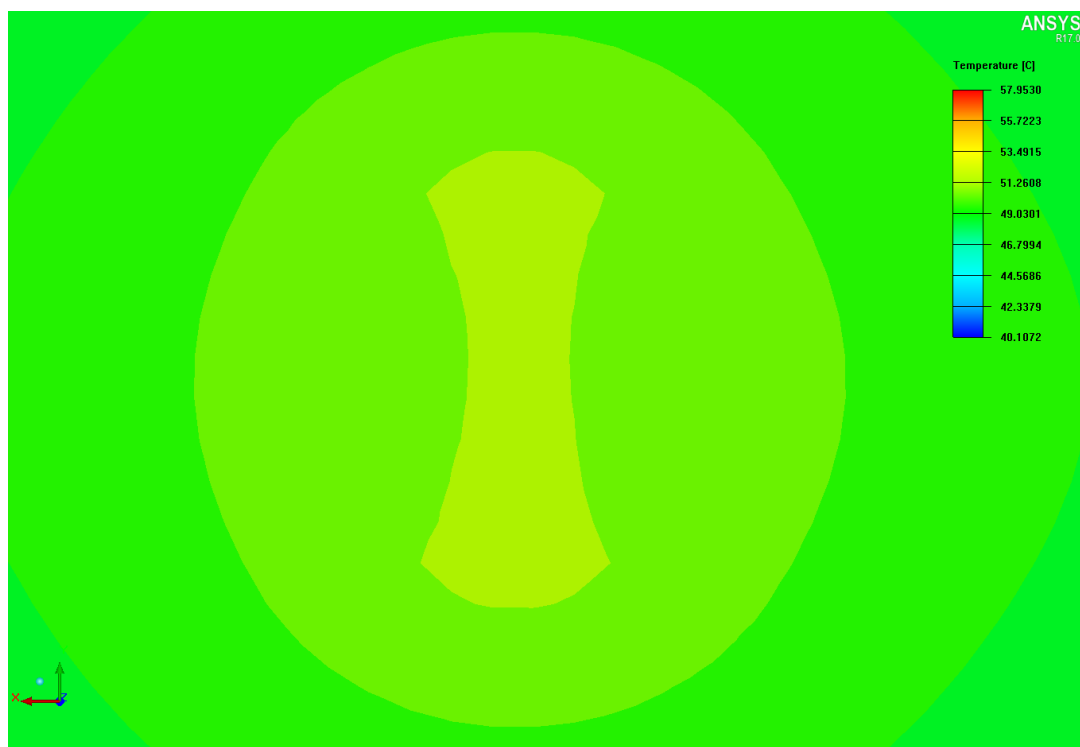
T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
74,37	40,11	47,93	69,23	0,48	12,24

Na obrázku v příloze B.4 je vidět mírné potlačení žlutých kontur díky řadám prokovů z vrchní a spodní strany pájecí plošky. Díky těmto řadám prokovů je teplota na DPS více vyrovnána.

Obrázek 27 zobrazuje teplotní kontury na spodní vrstvě pod pájecí ploškou LED diody. Maximální teploty se zde pohybují nad 51 °C. U modelu bez prokovů byla maximální teplota DPS 76,94 °C a teploty na spodní vrstvě pod pájecí ploškou byly pod 51 °C. Jednou řadou prokovů z obou volných stran kolem chladicí pájecí plošky se snížila maximální teplota o více než 2,5 °C a zároveň se teplota spodní vrstvy DPS zvýšila pro lepší odvod tepla z DPS do okolí.



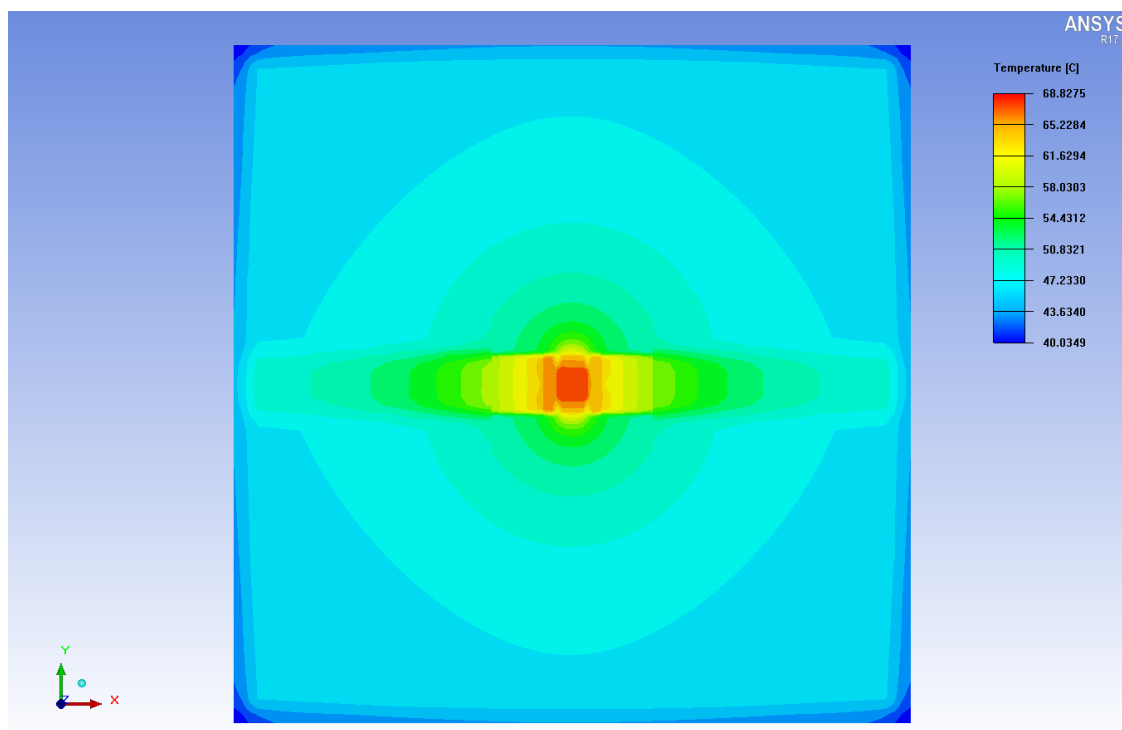
Obrázek 26: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, s 1 řadou proků 0,25 mm na obou stranách chladičí pájecí plošky



Obrázek 27: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS s 1 řadou 0,25 mm proků na obou stranách

2.5.7 2V DPS se 2 řadami prokůvů 0,25 mm

Prokovy v simulaci s dvěma řadami prokůvů s velikostí díry 0,25 mm na obou stranách pájecí plošky určené k odvodu tepla je celkem 18 prokůvů. Prokovy jsou umístěny podle zobrazení v příloze A.7 a A.8.



Obrázek 28: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 2 řadami prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladící pájecí plošky

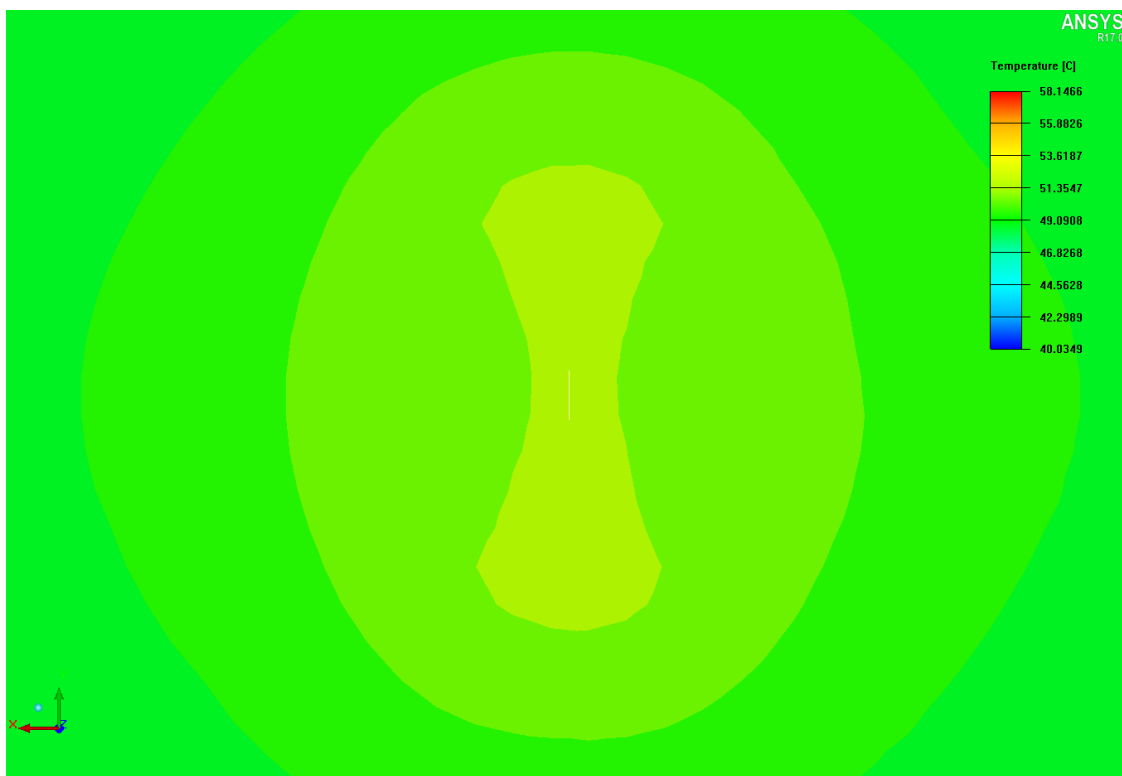
Z obrázku 28 je patrné, že rozložení teplot je obdobné jako v předchozím případě. Kontury představují menší hodnoty teplot než v předchozím případě, nicméně jejich průběh je obdobný.

Tabulka 10: Výsledky simulace 2V DPS se 2 řadami prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladící pájecí plošky

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
73,97	40,04	47,77	68,83	0,47	12,32

Z výsledků simulace zapsaných v tabulce 10 je vidět že oproti případu s pouze jednou řadou prokůvů jsou maximální teploty menší o 0,4 °C. Z obrázku 28 je patrné, že rozložení teplot je obdobné jako v předchozím případě, kontury však představují menší hodnoty teplot než v předchozím případě.

Na detailním přiblížení nejteplejšího místa DPS zachyceném na obrázku v příloze B.5 je vidět obdobné rozložení teplot jako v předchozím případě s jednou řadou.



Obrázek 29: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 2 řadami 0,25 mm prokůvů na obou stranách

Na obrázku 29 zobrazujícím teplotní kontury na spodní vrstvě DPS je vidět obdobné rozložení teplot jako v případě s 1 řadou prokůvů.

2.5.8 2V DPS se 3 řadami prokůvů 0,25 mm

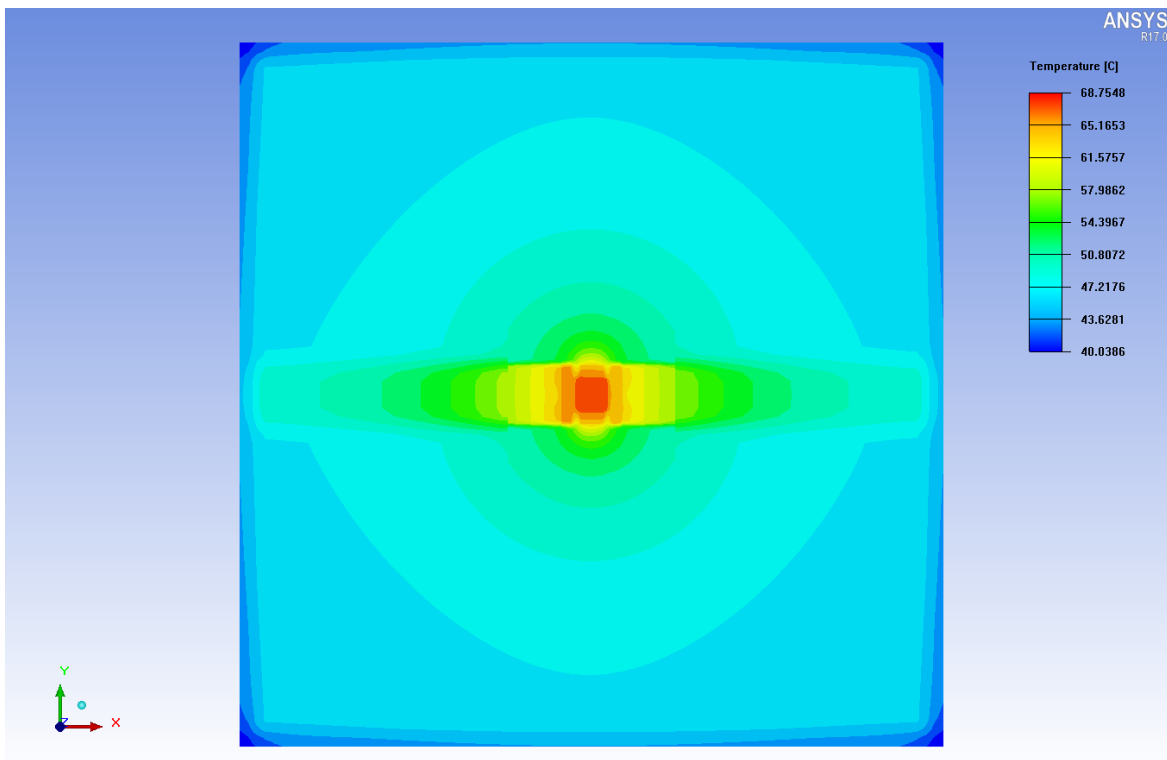
Tři řady prokůvů z vrchní a spodní strany pájecí plošky určené k odvodu tepla jsou realizovány podle obrázku v příloze A.9 a A.10. Celkový počet prokůvů s dírou 0,25 mm je 28.

Na obrázku 30 je vidět obdobné rozložení teplot jako v předchozích případech. Hodnoty jsou menší než v předchozím případě, nicméně vliv prokůvů je již menší. Menší vliv na snížení teploty je dokázán i výsledky ze simulace zapsanými v tabulce 11. Rozdíl maximálních teplot je pod 0,1 °C a minimální teploty DPS jsou stejné.

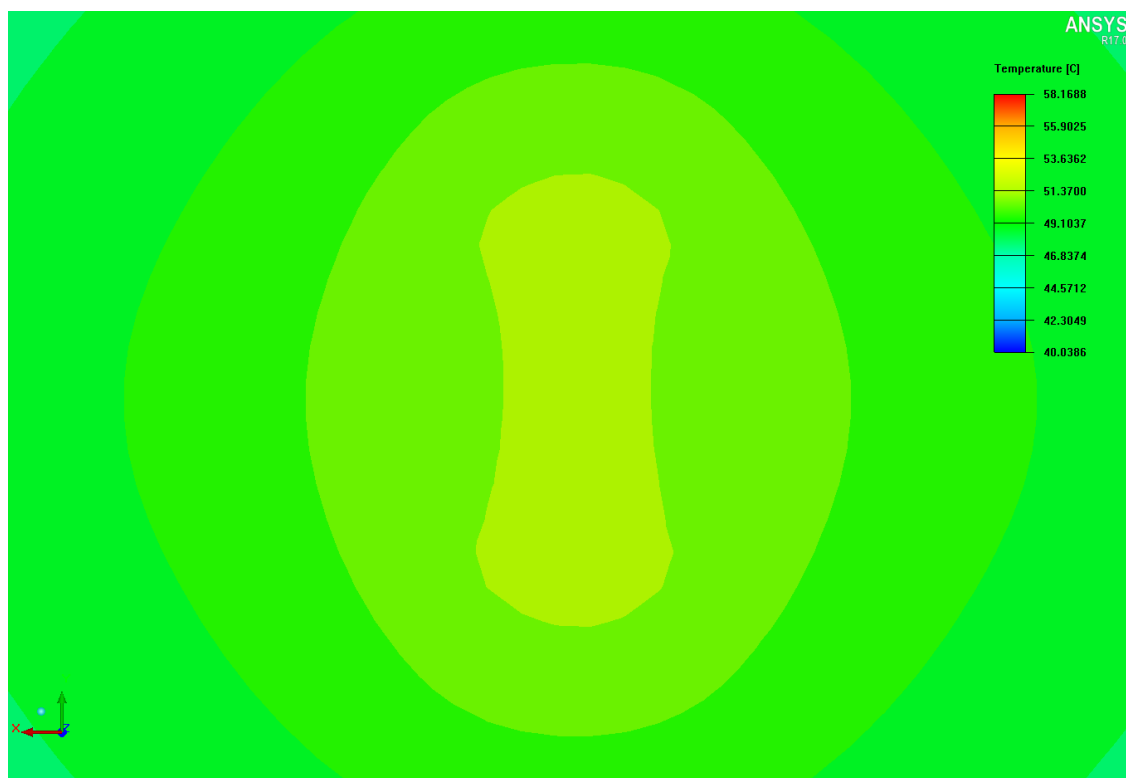
Tabulka 11: Výsledky simulace 2V DPS se 3 řadami prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladičí pájecí plošky

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
73,90	40,04	47,78	68,75	0,47	12,32

Téměř žádný rozdíl není také v rozložení teplot v detailním pohledu na pájecí plošku zachyceném na obrázku v příloze B.6.



Obrázek 30: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 3 řadami prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

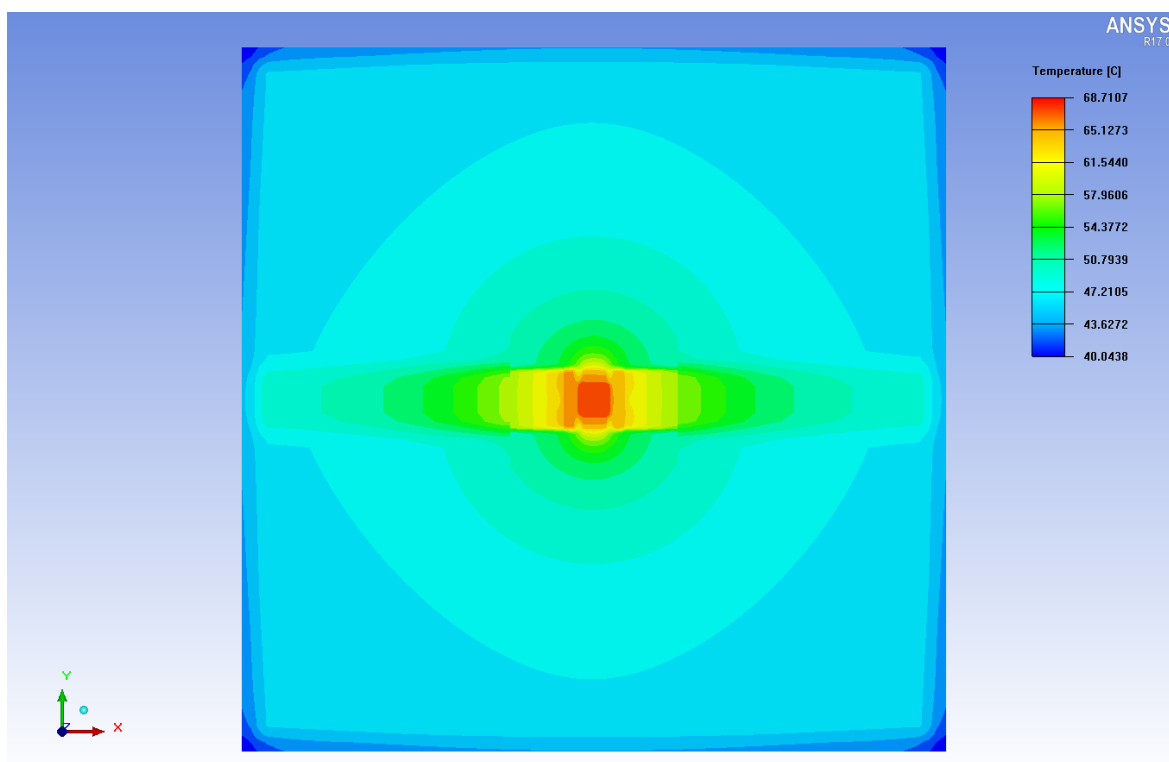


Obrázek 31: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 3 řadami 0,25 mm prokůvů na obou stranách

Zobrazení teplotních kontur spodní vrstvy na obrázku 31 poukazuje na lepší distribuci tepla do spodní vrstvy než v předchozích případech.

2.5.9 2V DPS se 4 řadami prokůvů 0,25 mm

Model s celkem osmi řadami prokůvů je realizován podle obrázku v příloze A.11 a A.12. DPS má celkem 38 prokůvů ve čtyřech řadách po horní a dolní straně chladicí plošky.



Obrázek 32: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 4 řadami prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

Z výsledků zapsaných v tabulce 12 je vidět neúčinnost dalších řad prokůvů. V porovnání případu se třemi řadami je změna maximálních teplot v řádech setin stupňů Celsia. Oproti případu se dvěma řadami prokůvů jsou maximální teploty menší o 0,11 °C.

Tabulka 12: Výsledky simulace 2V DPS se 4 řadami prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
73,86	40,04	47,95	68,72	0,47	12,32

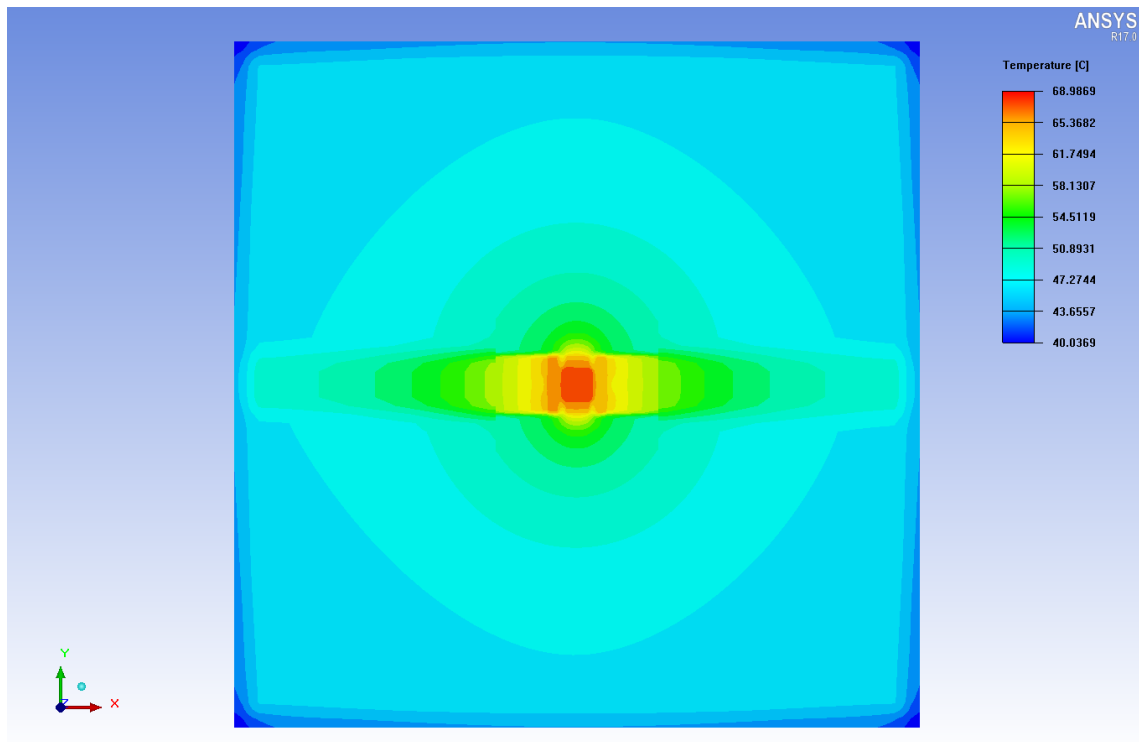
Pro velikost prokůvu s dírou 0,25 mm se od dvou řad prokůvů umístěných z obou dvou volných stran chladicí pájecí plošky nevyplatí umisťovat další řady prokůvů. Jediné zlepšení je v distribuci tepla do spodní vrstvy DPS. Teplotní kontury spodní vrstvy zachycené na obrázku 33 ukazují dobrý odvod tepla z vrchní vrstvy do spodní.



Obrázek 33: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 řadami 0,25 mm prokůvů na obou stranách

2.5.10 2V DPS s 1 řadou prokůvů 0,50 mm

Simulace je obdobná jako v případě s menším prokovem. V modelu je celkem 10 prokůvů ve dvou řadách. Každá řada je umístěna na volných stranách pájecí plošky určené pro odvod tepla. Velikost díry prokovu je 0,5 mm.

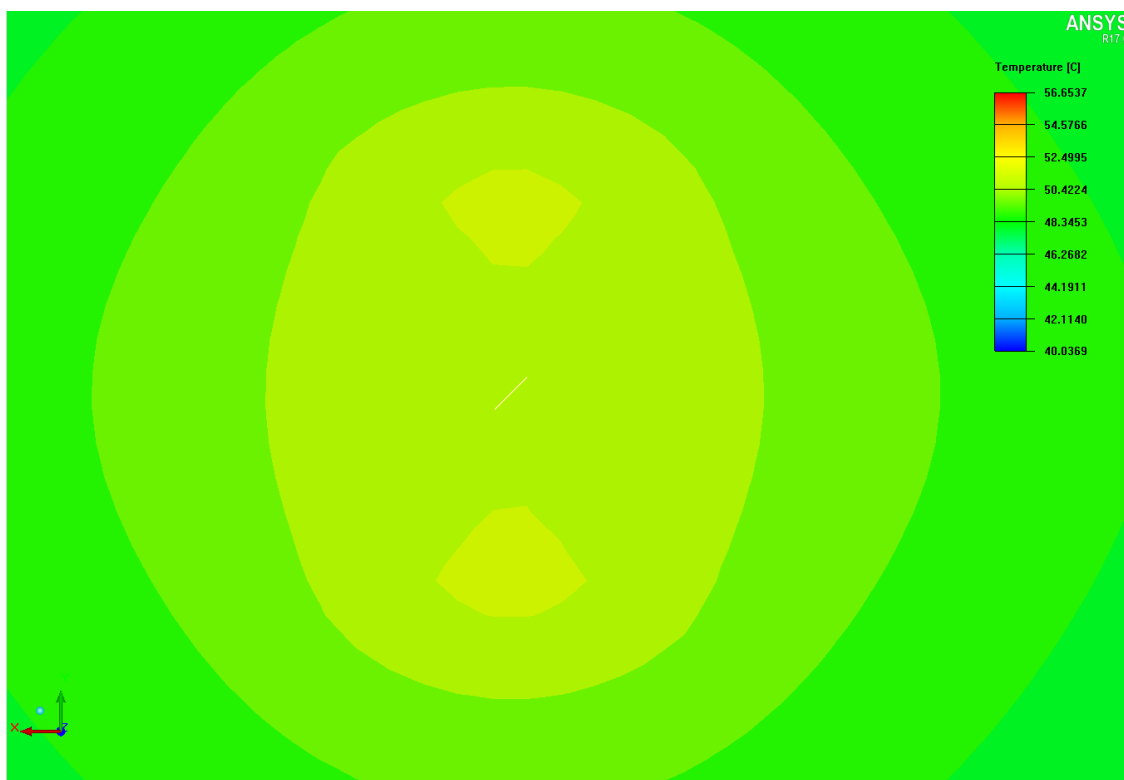


Obrázek 34: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, s 1 řadou prokůvů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

Tabulka 13: Výsledky simulace 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
74,13	40,04	48,32	68,99	0,47	12,32

Výsledky získané ze simulace jsou zapsány v tabulce 13 a graficky zobrazeny na obrázku 34. Oproti simulaci bez prokovů je polovodičový přechod diody uchlazen o 2,81 °C více. Rozdíl maximálních teplot v porovnání s modelem s 1 řadou menších prokovů je 0,24 °C.



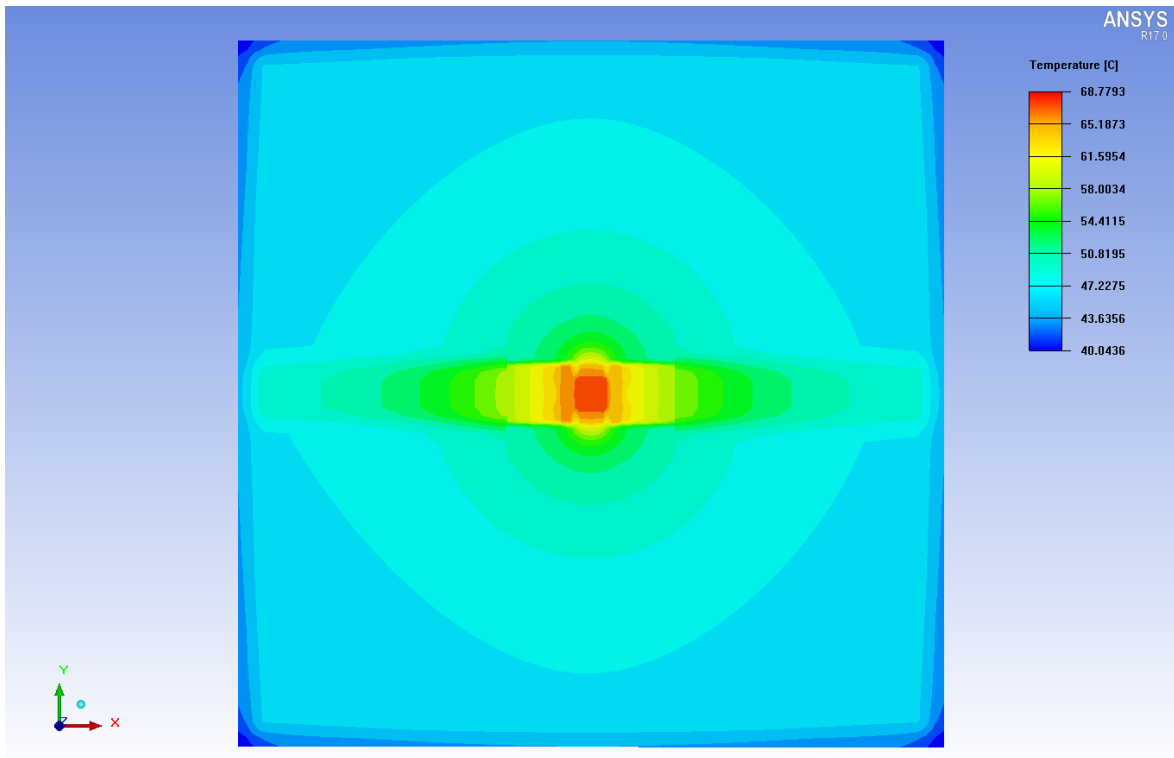
Obrázek 35: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS s 4 řadou 0,50 mm prokovů na obou stranách

Rozložení teplot na spodní vrstvě pod pájecí ploškou je vidět na obrázku 35. Teplo je do spodní vrstvy DPS lépe distribuováno než s dírou 0,25 mm.

2.5.11 2V DPS se 2 řadami prokovů 0,50 mm

Model obsahuje 18 prokovů umístěných do čtyř řad. Po obou volných stranách pájecí plošky určené k chlazení jsou dvě řady prokovů. Názorné umístění prokovů je zachyceno obrázky v příloze A.7 a A.8. Řady v bližší vzdálenosti čipu mají 5 prokovů, řady ve větší vzdálenosti od čipu mají 4 prokovy.

Na obrázku 36 jsou zachyceny teplotní kontury vrchní vrstvy DPS. Z výsledků v tabulce 14 je zřejmé, že dvě řady prokovů s dírou 0,5 mm uchladí oproti případu s jednou řadou prokovů LED čip lépe pouze o 0,21 °C.



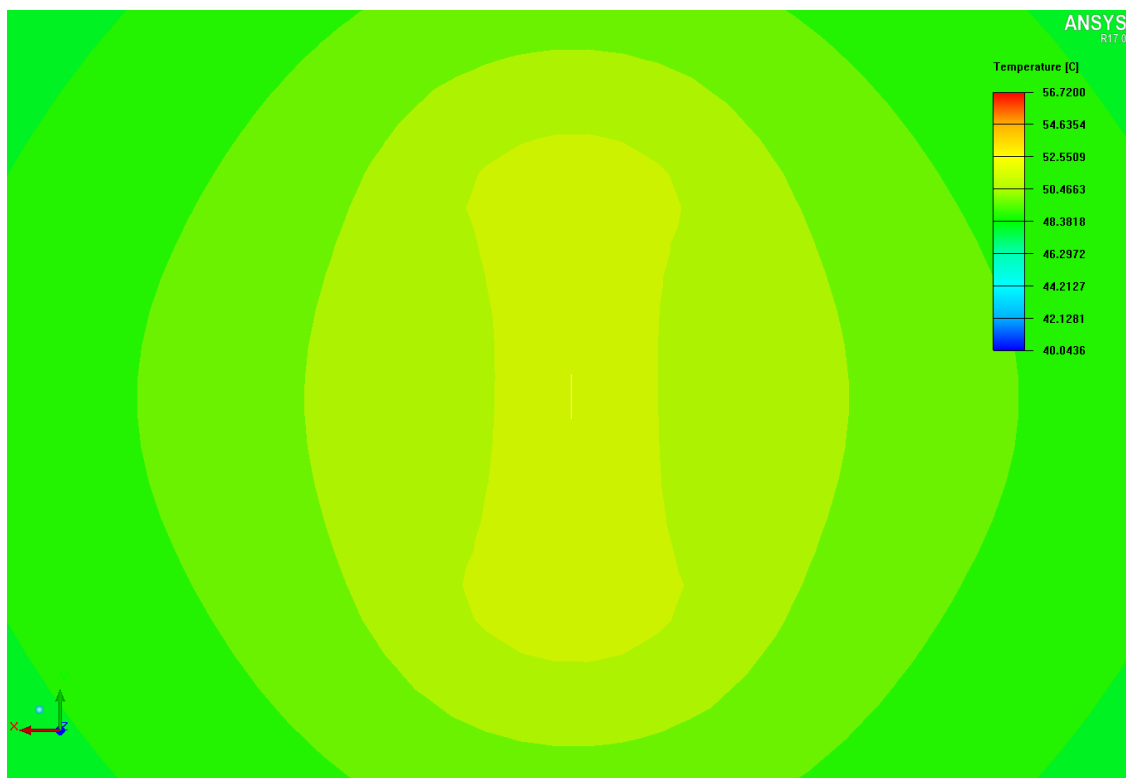
Obrázek 36: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 2 řadami prokůvů 0,50 mm na obou stranách chladící pájecí plošky

V případě prokůvů s poloviční dírou byla změna teplot mezi případem s jednou řadou prokůvů a dvěma řadami prokůvů 0,40 °C. V případě s prokůvy s dírou 0,5 mm se jedná pouze o teplotní rozdíl 0,21 °C. Vliv druhé řady prokůvů s dírou 0,5 mm je téměř poloviční oproti vlivu druhé řady prokůvů s dírou 0,25 mm.

Tabulka 14: Výsledky simulace 2V DPS se 2 řadami prokůvů 0,50 mm na obou stranách chladící pájecí plošky

T_j [°C]	T_{\min} [°C]	$T_{\text{střední}}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
73,92	40,04	48,27	68,78	0,47	12,31

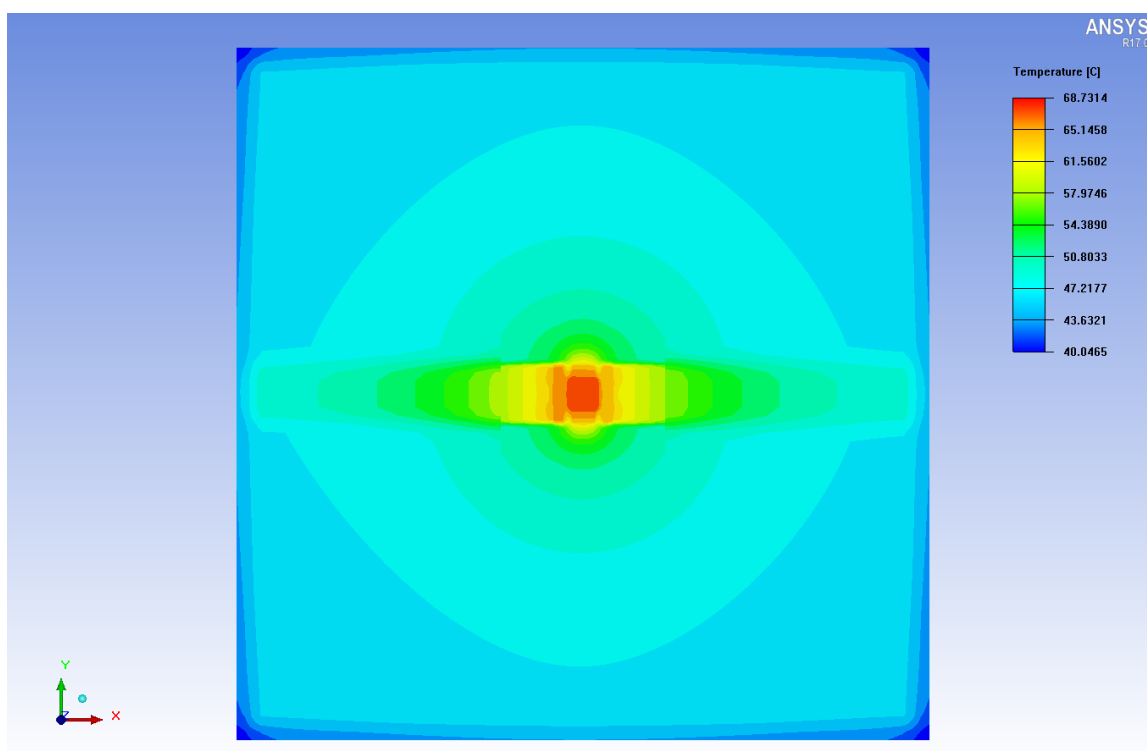
Na spodní vrstvě DPS je oproti předchozímu případu s jednou řadou rozšířen lokální extrém. Zmíněný jev zachycuje obrázek 37. Teplo z vrchní vrstvy je lépe odváděno do spodní vrstvy.



Obrázek 37: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 2 řadami 0,50 mm prokůvů na obou stranách

2.5.12 2V DPS se 3 řadami prokůvů 0,50 mm

Simulace je provedena celkem s 28 prokovy s velikostí díry 0,5 mm. Ty jsou situovány celkem ve třech řadách po obou volných stranách chladicí pájecí plošky.



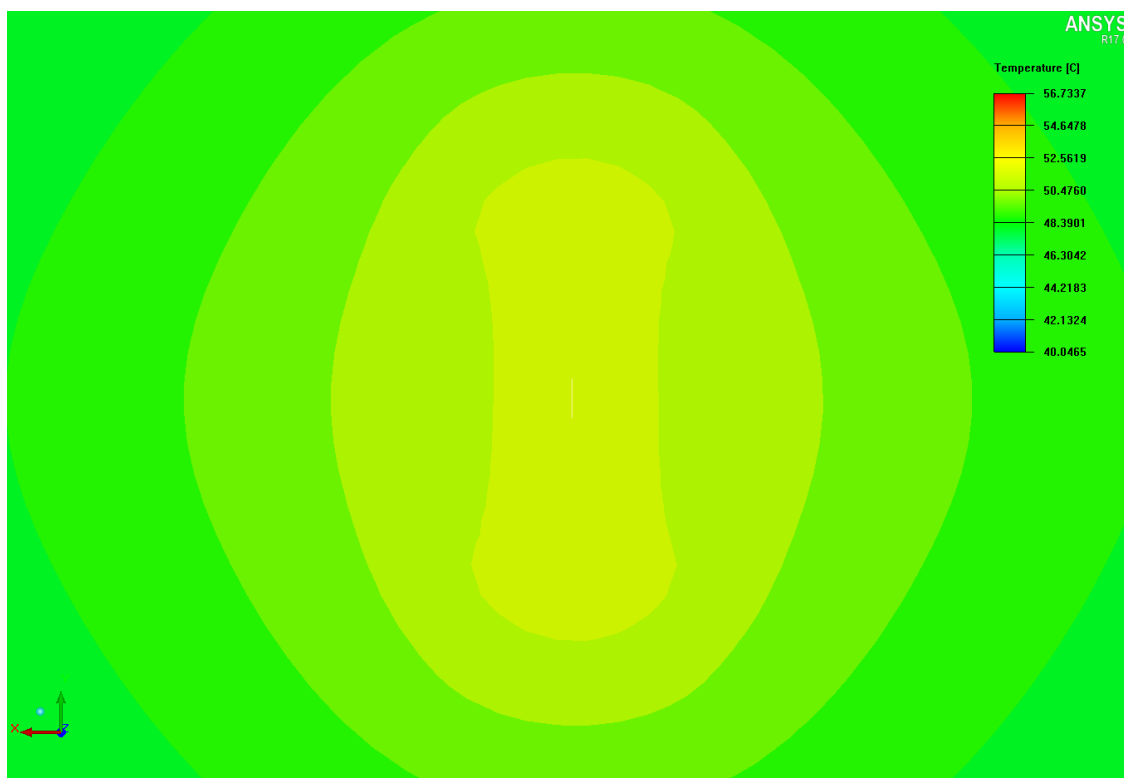
Obrázek 38: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 3 řadami prokůvů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky

Na obrázku 38 je zobrazen výstup simulace v podobě teplotních kontur na desce plošných spojů. Z tohoto obrázku lze zjistit malý vliv třetí řady proků. Maximální teplota se změnila v řádu setin stupňů Celsia. Zmíněný fakt dokazuje i tabulka 15.

Tabulka 15: Výsledky simulace 2V DPS se 3 řadami proků 0,50 na obou stranách chladící pájecí plošky

T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
73,88	40,05	47,77	68,73	0,47	12,31

Detail teplotních kontur spodní vrstvy zobrazený na obrázku 39 potvrzuje minimální změnu rozložení teplot při přidání třetí řady proků.



Obrázek 39: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 3 řadami 0,50 mm proků na obou stranách

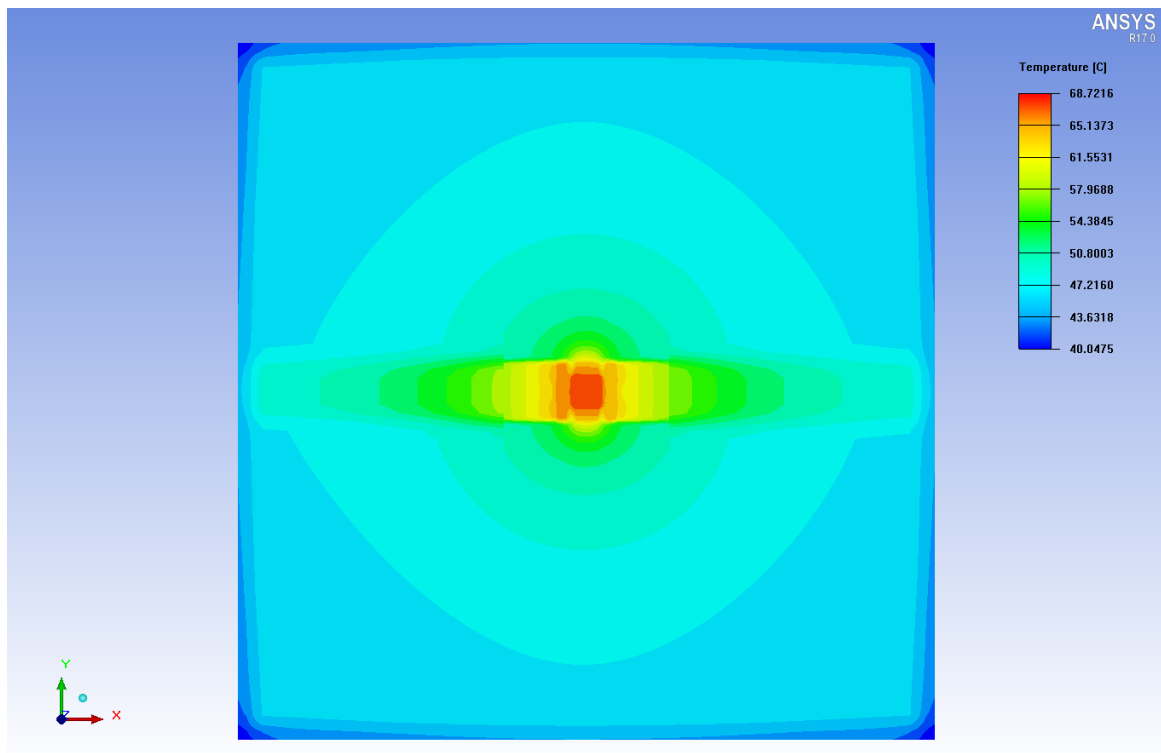
2.5.13 2V DPS se 4 řadami proků 0,50 mm

Simulace je provedena celkem s osmi řadami proků. Chladící pájecí ploška je z obou svých volných stran obklopena 4 řadami proků.

Tabulka 16: Výsledky simulace 2V DPS se 4 řadami proků 0,50 mm na obou stranách chladící pájecí plošky

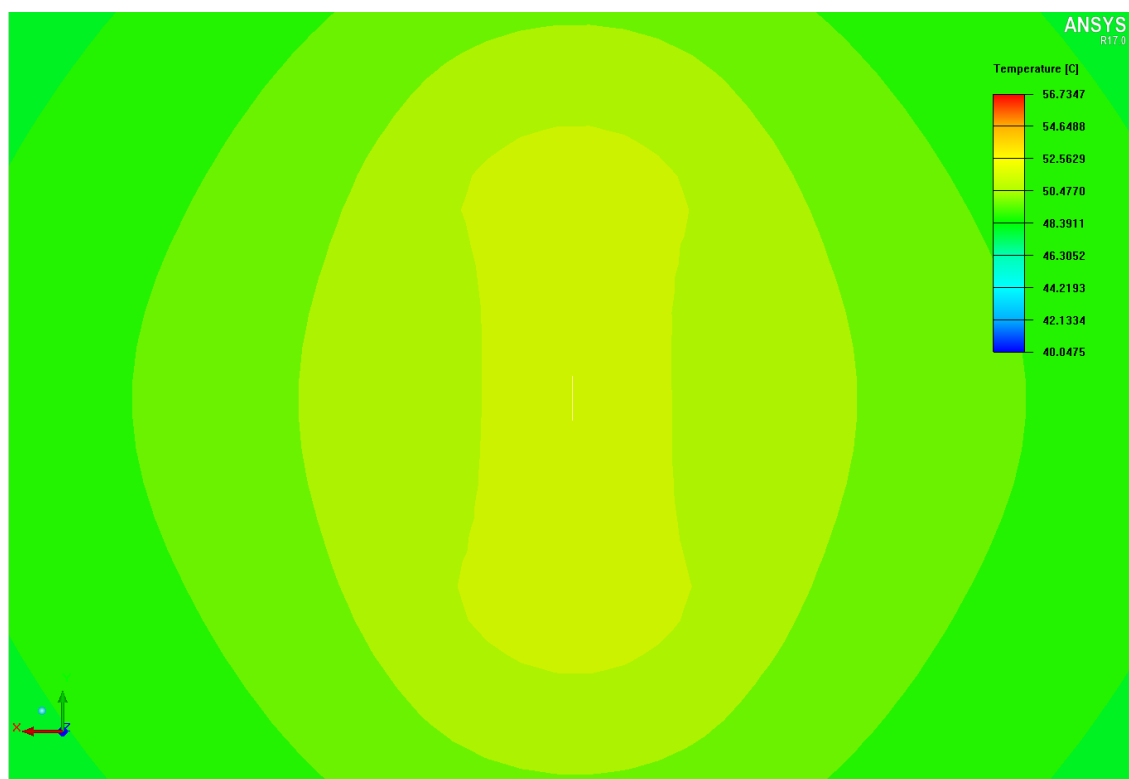
T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
73,87	40,05	47,77	68,72	0,47	12,31

Z výsledků v tabulce 16 a na obrázku 40 je zřejmé, že další navyšování počtu řad proků je zbytečné. Výsledné teploty jsou téměř totožné s výsledky modelu se třemi řadami proků po obou stranách.



Obrázek 40: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 4 řadami prokůvů 0,50 mm na obou stranách chladící pájecí plošky

Na rozložení teplot na spodní vrstvě DPS pod pájecí ploškou zachyceném na obrázku 41 není možné pozorovat změnu oproti předchozímu případu. Čtvrtá řada prokůvů s dírou 0,50 mm nemá na teplotní management této diody už žádný vliv.



Obrázek 41: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 řadami 0,50 mm prokůvů na obou stranách

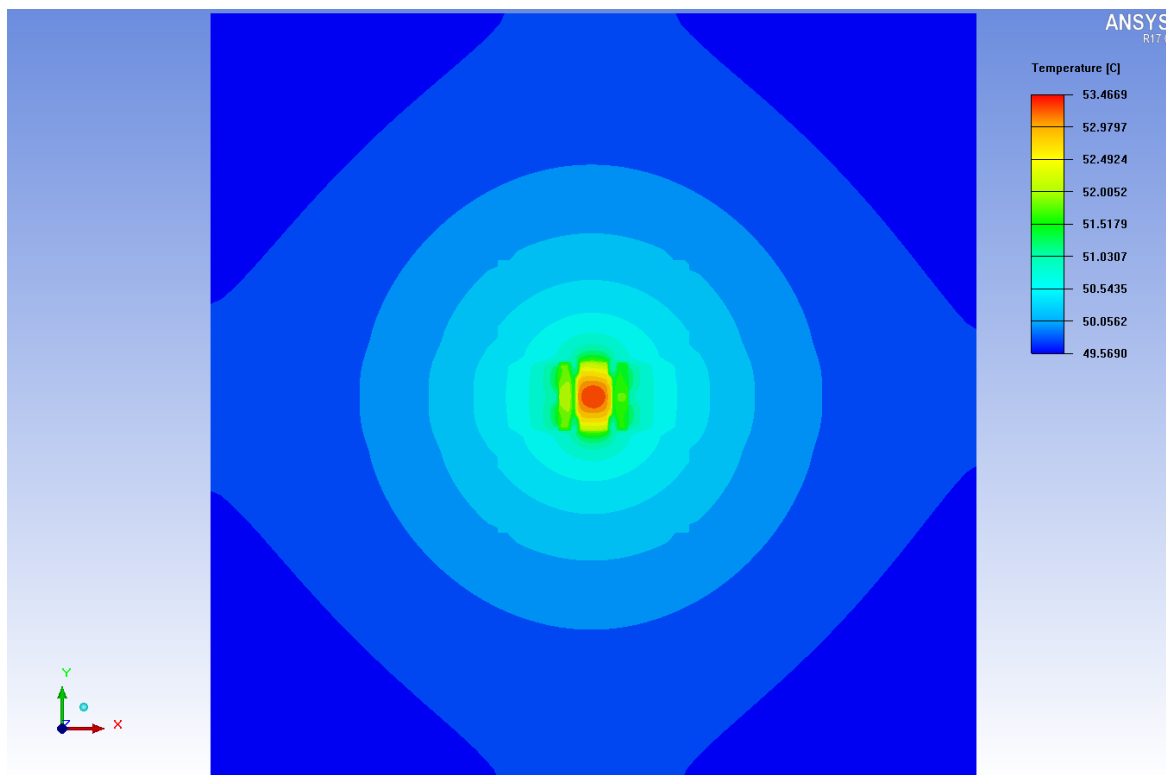
2.5.14 IMS 1 mm

IMS neboli Insulated Metal Substrate, je deska plošných spojů skládající se z vrstvy mědi, dielektrika a kovu, většinou hliníku. Typicky se vyrábí ve čtyřech tloušťkách hliníku. Jedná se o tloušťky 1 mm, 1,5 mm, 2 mm a 2,5 mm. Pro zakázkové výroby se mohou použít i silnější vrstvy.

Izolant bývá většinou zhotoven jako tkanina s epoxidy. Prepreg bývá co nejmenší tloušťky, jelikož se jedná o špatně tepelně vodivý materiál. Typické tloušťky jsou v řádu desítek až stovek mikronů.

Tloušťka měděné vrstvy se pak řídí normou pro daný typ montážních celků a technologickými možnostmi výrobce.

Pro tento model je zvolena vrstva mědi s tloušťkou 56 μm , tloušťka prepregu Corbritherm HTC 3.2W je 45 μm a tloušťka hliníku je 1 mm.

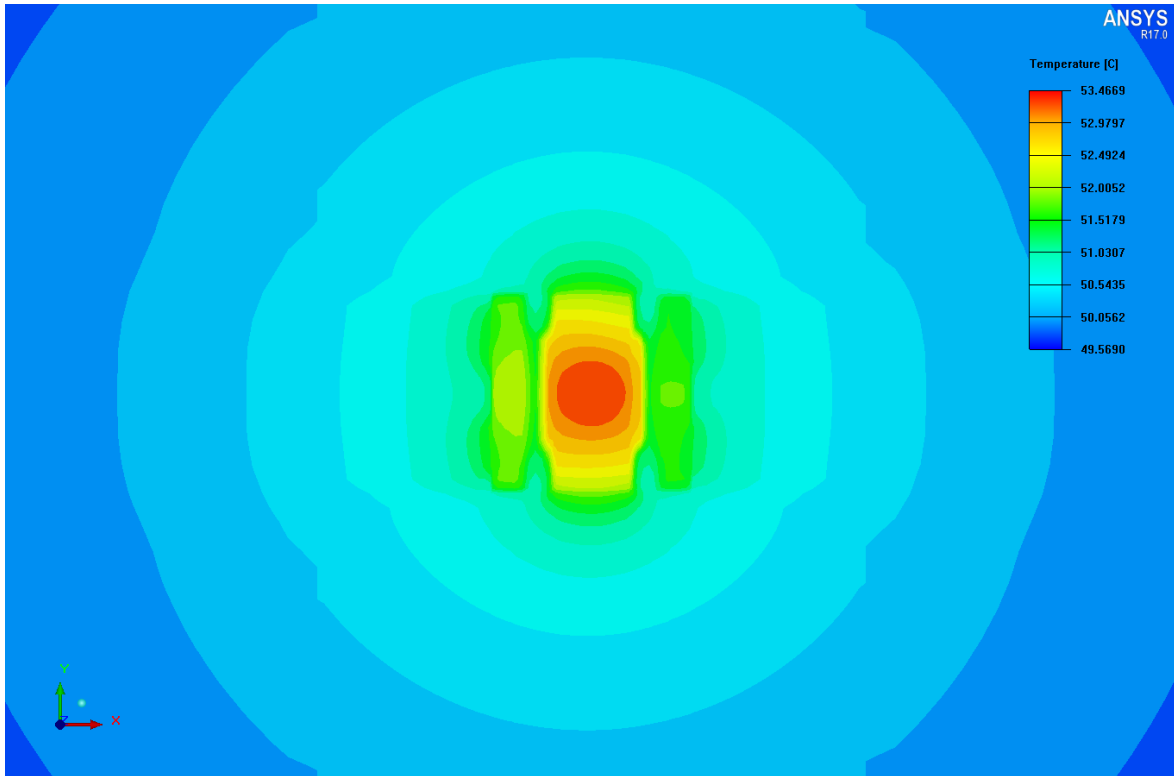


Obrázek 42: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 1V IMS DPS s hranou 4 cm, DPS s tloušťkou hliníku 1 mm

Jak je vidět z obrázku 42 rozdíl teplot na desce je minimální. Na zmíněný fakt poukazují i výsledky z tabulky 17. Rozdíl mezi střední a minimální teplotou na DPS je menší než 0,5 $^{\circ}\text{C}$. Dále rozdíl mezi maximální a minimální teplotou na DPS je pod 3 $^{\circ}\text{C}$, kdežto v předchozích případech s normální 2V DPS byl tento rozdíl vždy přes 30 $^{\circ}\text{C}$.

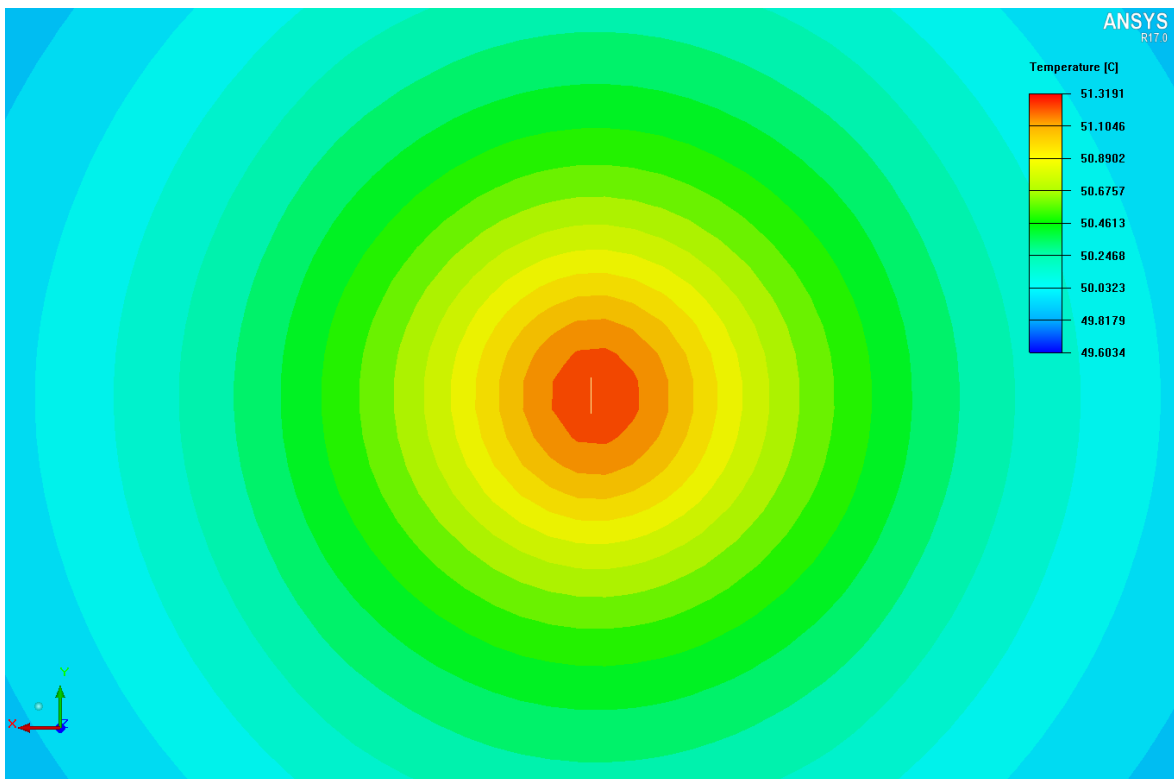
Tabulka 17: Výsledky simulace 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm

T_j [$^{\circ}\text{C}$]	T_{min} [$^{\circ}\text{C}$]	$T_{\text{střední}}$ [$^{\circ}\text{C}$]	T_{DPSmax} [$^{\circ}\text{C}$]	Q_{rad} [W]	α [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$]
59,26	49,57	49,96	53,47	0,46	12,41



Obrázek 43 Detail nejteplejšího místa 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm

Rozložení teplot v blízkosti pájecí plošky je zobrazeno na obrázku 43. Rozdíl teplot v blízkosti čipu je oproti ostatním případům velice malý.

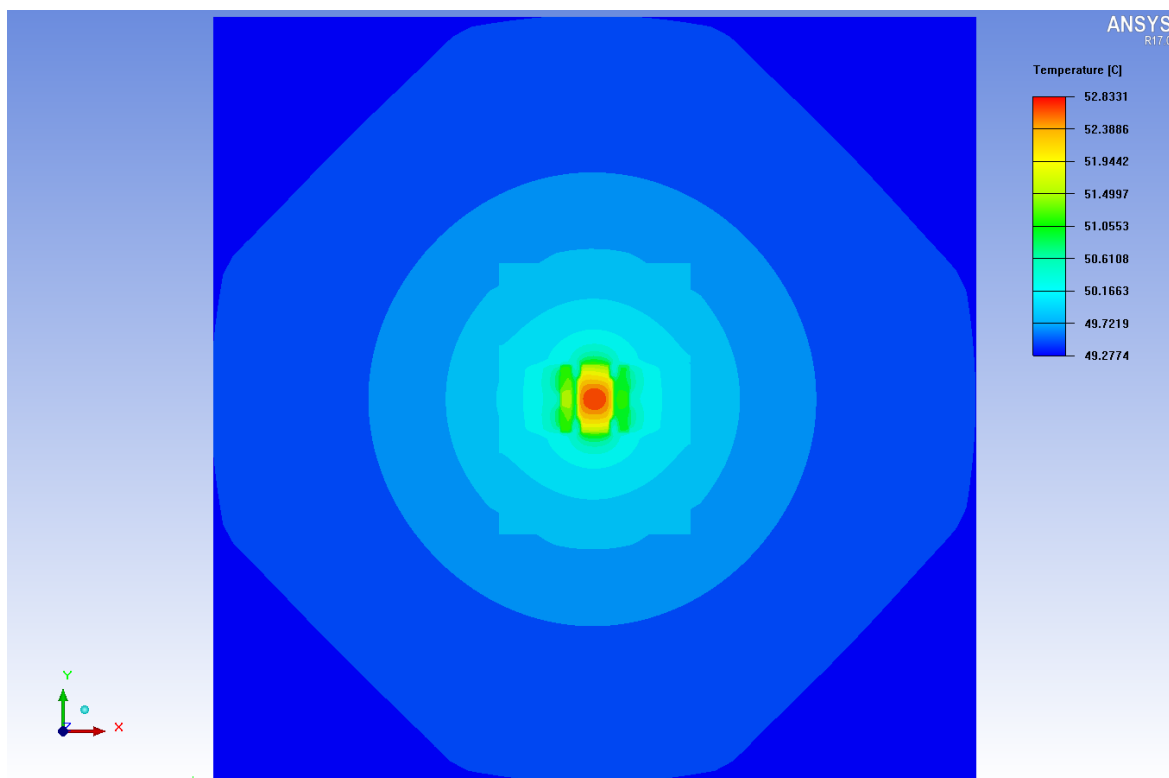


Obrázek 44: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm

Na spodní straně hliníkové vrstvy je téměř homogenní rozložení teplot. Jak je vidět na obrázku 44 maximální teplota na spodní vrstvě je 51,32°C a minimální je 49,6 °C. Rozdíl teplot mezi středem spodní vrstvy hliníku a jeho okrajem je menší než 2 °C. U spodních vrstev 2V DPS s mědi a FR-4 byl teplotní rozdíl mezi středem DPS a jejím okrajem přes 10 °C.

2.5.15 IMS 1,5 mm

Pro tento model je zesílena tloušťka hliníku na 1,5 mm. Tloušťky mědi a prepregu zůstaly zachovány.



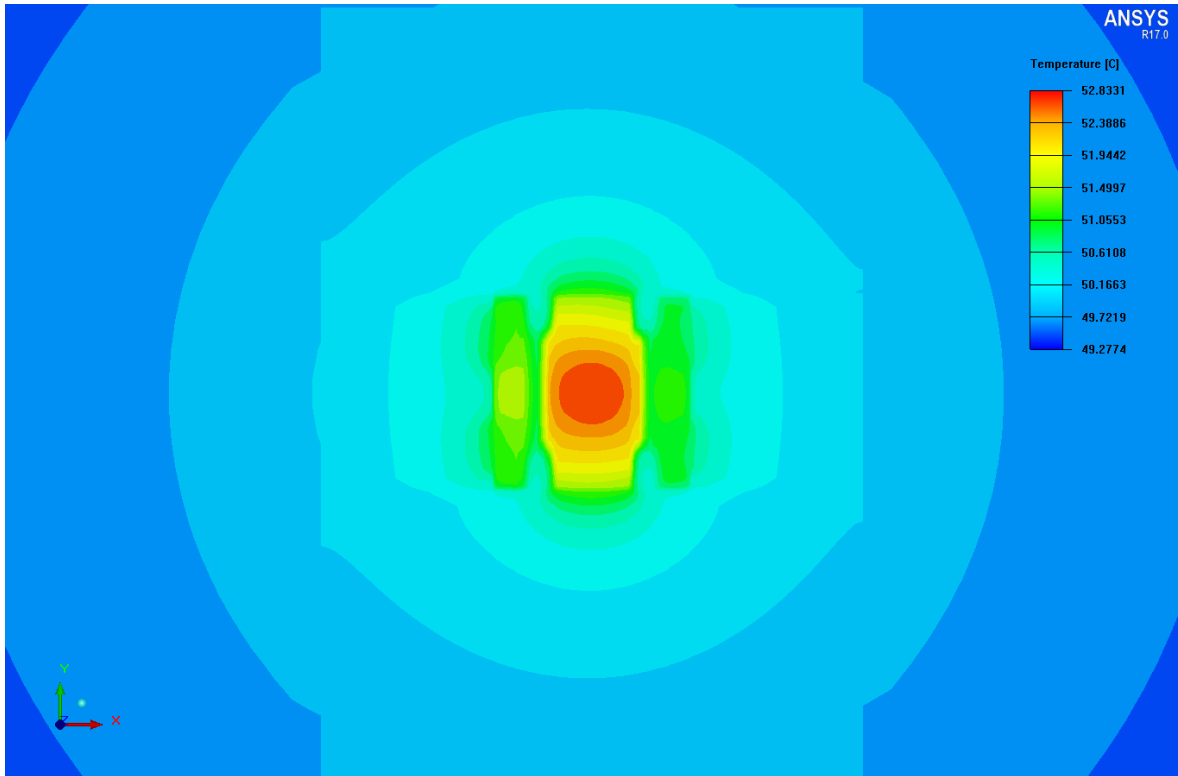
Obrázek 45: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 1V IMS DPS s hranou 4 cm, DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm

Jak je vidět na obrázku 45 teploty se oproti případu s tloušťkou hliníku 1 mm příliš nezměnily. Z tabulky 18 je vidět mírné snížení všech teplot oproti případu s 1 mm hliníkem.

Tabulka 18: Výsledky simulace 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm

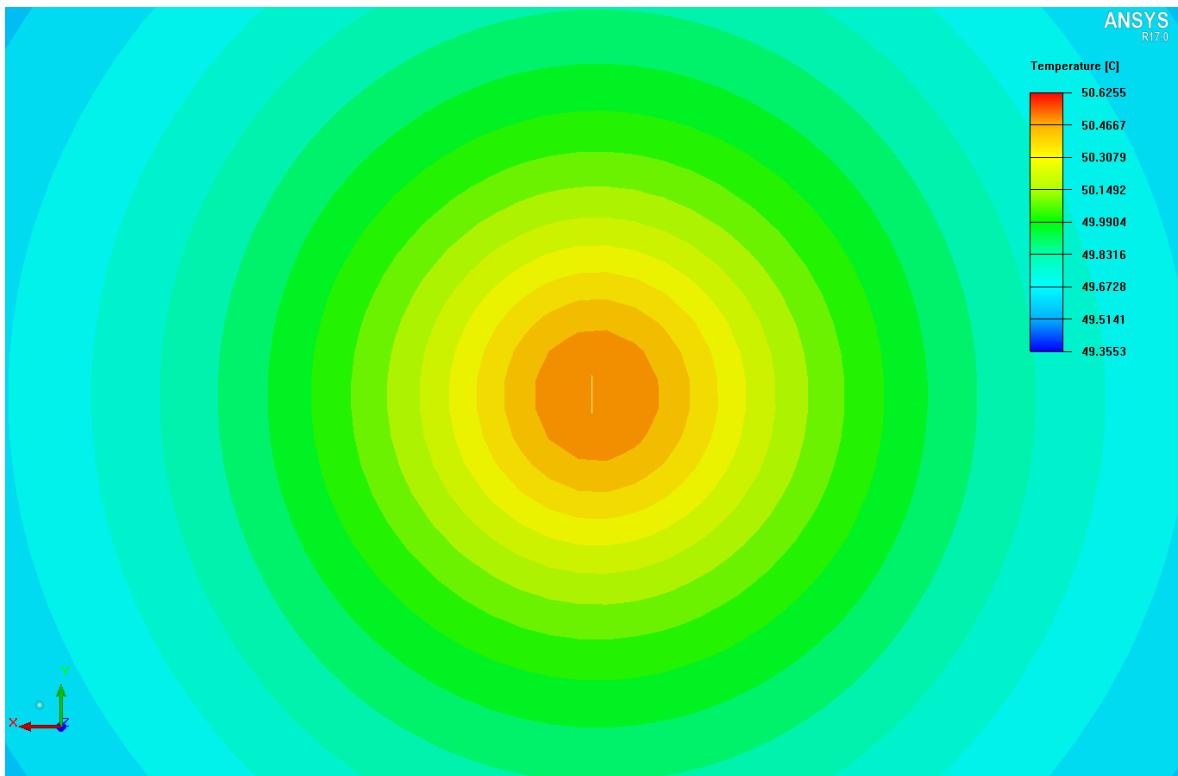
T_j [°C]	T_{min} [°C]	$T_{střední}$ [°C]	T_{DPSmax} [°C]	Q_{rad} [W]	α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
58,64	49,28	49,62	52,83	0,45	12,28

Na detailu rozložení teplot pájecí plošky na obrázku 46 je opět malý gradient teplot od středu DPS k jejímu okraji.



Obrázek 46: Detail nejteplejšího místa 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm

Velkou homogenitu teplot má i spodní hliníková vrstva zobrazená na obrázku 47. Zobrazený detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou ukazuje největší teplotu uprostřed DPS 50,63 °C, na okraji spodní vrstvy je teplota 49,36 °C. Teplotní rozdíl mezi těmito dvěma lokálními extrémami je pouze 1,27 °C a proto se dá považovat teplota hliníku za homogenní.

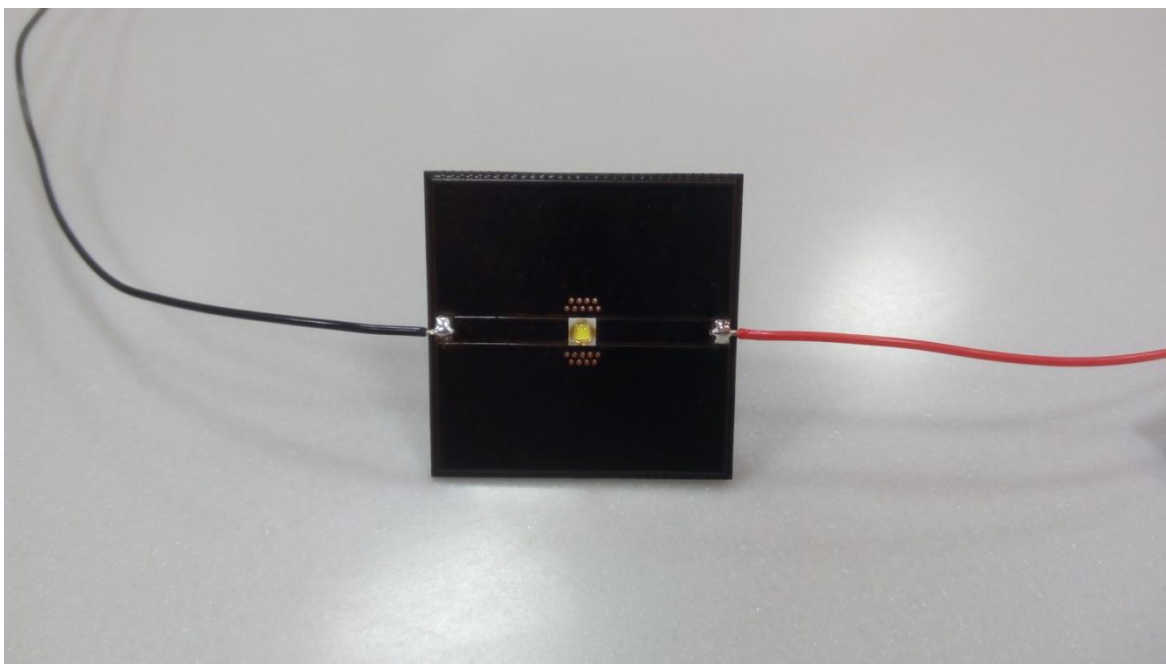


Obrázek 47: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm

3 Měření na reálném vzorku

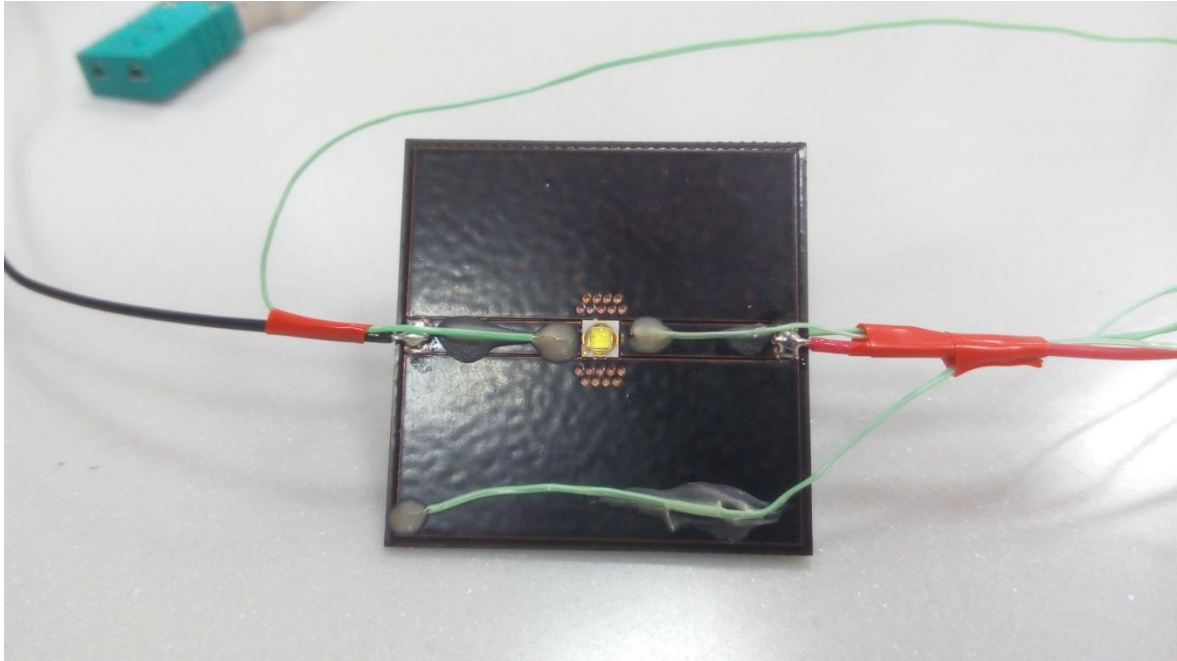
3.1 Nastavení měření

Pro měření byla zvolena DPS s dvěma řadami prokůvů o velikosti díry 0,50 mm po obou volných stranách chladicí pájecí plošky. Rozložení prokůvů bylo zvoleno díky výsledkům simulace, kde se větší počet řad prokůvů neprojevil ve zmenšení teploty polovodičového přechodu. Vyrobená a osazená DPS je zachycená na obrázku 48.



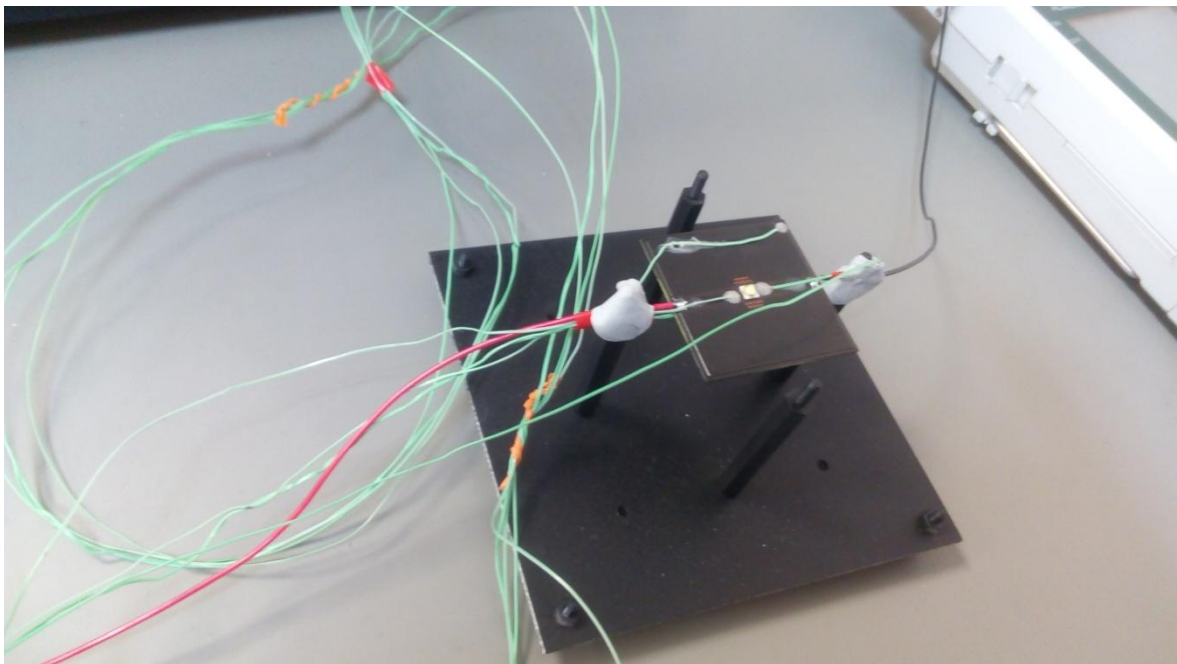
Obrázek 48: Osazená DPS s délkou hrany 4 cm určená k měření

Pro měření teploty byly použity termočlánky typu K a dataloger Almemo 2890-9, který je zobrazen na obrázku v příloze C.1. Pomocí dvousložkového rychleschnoucího lepidla, zobrazeného na obrázku v příloze C.2 byly přilepeny termočlánky k měřené DPS. Celkem byly k DPS připevněny 4 termočlánky. První termočlánek byl připevněn na spodní stranu DPS pod pájecí plošku. Druhý a třetí termočlánek byl připevněn na elektrické přívody co nejbliže k čipu, pro měření pokud možno vysokých teplot bez ovlivnění tepelné vodivosti prokůvů. Poslední termočlánek byl umístěn na vrchní stranu DPS do rohu měděné plochy. Finální uspořádání termočláneků je zachyceno na obrázku 49.



Obrázek 49 DPS s přilepenými termočlánky

Měření probíhalo v boxu, který měl všechny stěny černé. Box je zobrazen v příloze C.4. Díky boxu se do jisté míry eliminoval vliv okolních podmínek. DPS byla umístěna na držáku pro umožnění proudění vzduchu pod ní.



Obrázek 50: Uchycená DPS na držáku

Proudové buzení bylo odvozeno pro daný bin kód LED. Pro ztrátový výkon 1W je pro bin kód V3 diody Seoul SZ5-P je potřeba nastavit budící proud na hodnotu $I_F = 450 \text{ mA}$. Podle katalogového listu je maximální proud diodou $I_{F\text{MAX}} = 1 \text{ A}$ [8]. Nastavený proud diodou je méně než poloviční než maximální možný proud, takže je v povolených mezích. Buzení je zařízení pomocí laboratorního zdroje zobrazeného na obrázku v příloze C.5.

3.2 Výsledky měření

Celkem proběhla dvě měření. Pro obě měření se dá považovat teplota okolí s hodnotou $T_{\text{okolí}} = 25 \text{ °C}$. První měření probíhalo s LED čipem směrem nahoru. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 19. Nejteplejší naměřená místa jsou elektrické přívody. Nejstudenější místo je v rohu měděného povrchu.

Tabulka 19: Výsledky prvního měření

	$T_{\text{bottom}} \text{ [°C]}$	$T_{\text{Cathode}} \text{ [°C]}$	$T_{\text{Anode}} \text{ [°C]}$	$T_{\text{Corner}} \text{ [°C]}$
Počáteční stav	25,6	25,6	25,6	25,5
Ustálený stav	43,9	51,8	52,1	39,9

Druhé měření probíhalo s DPS otočenou LED čipem směrem dolů. DPS se pouze otočila, nebylo nutné čekat na ustálení teploty na teplotě okolí, proto je počáteční teplota vyšší než v předchozím případě. Teplota okolí zůstala stejná. V druhém případě měření je vidět, že naměřené hodnoty zobrazené v tabulce 20, jsou vyšší než v prvním měření. Velikost tepelného toku konvekcí a radiací je v případě s LED čipem otočeným směrem dolů menší.

Tabulka 20 Výsledky druhého měření

	$T_{\text{bottom}} \text{ [°C]}$	$T_{\text{Cathode}} \text{ [°C]}$	$T_{\text{Anode}} \text{ [°C]}$	$T_{\text{Corner}} \text{ [°C]}$
Počáteční stav	29,1	28,9	28,9	28,5
Ustálený stav	44,4	52,0	52,2	40,8

Z obou měření jsou získány menší hodnoty teplot než ze simulací. Naměřená teplota v rohu desky plošných spojů je obdobná simulované teplotě v rohu DPS. Na spodní straně DPS pod pájecí ploškou pro čip se teplota zjištěná ze simulace pohybuje v okolí hodnoty 52 °C . Naměřené teploty se pohybují v okolí hodnoty 44 °C . Pro elektrické přívody katody a anody byly ze simulace zjištěny výsledky pohybující se kolem hodnoty 60 °C . Z měření vyšly výsledky pohybující se kolem hodnoty 52 °C .

Chybu v měření mohlo způsobit mnoho faktorů. V měřené místnosti nebyla potlačena nucená konvekce (lehký průvan, klimatizace). Dalším faktorem mohl být vliv přírodních kabelů, které odvádí teplo kondukcí. V neposlední řadě nemuselo dojít ke správnému nastavení pracovního bodu tak, aby ztrátový výkon byl přesně s hodnotou 1 W . Další chybu měření mohlo způsobit přichycení termočládku a samotné měření hodnot z termočládku.

Odlišnost výsledků měření a simulace jsou způsobeny také rozdílnou uvažovanou tloušťkou mědi. V simulacích se jednalo o nejhorší případ tloušťky s hodnotou $52,9 \text{ μm}$, kdežto reálný vzorek mohl mít vrstvu mědi o 10 μm tlustší.

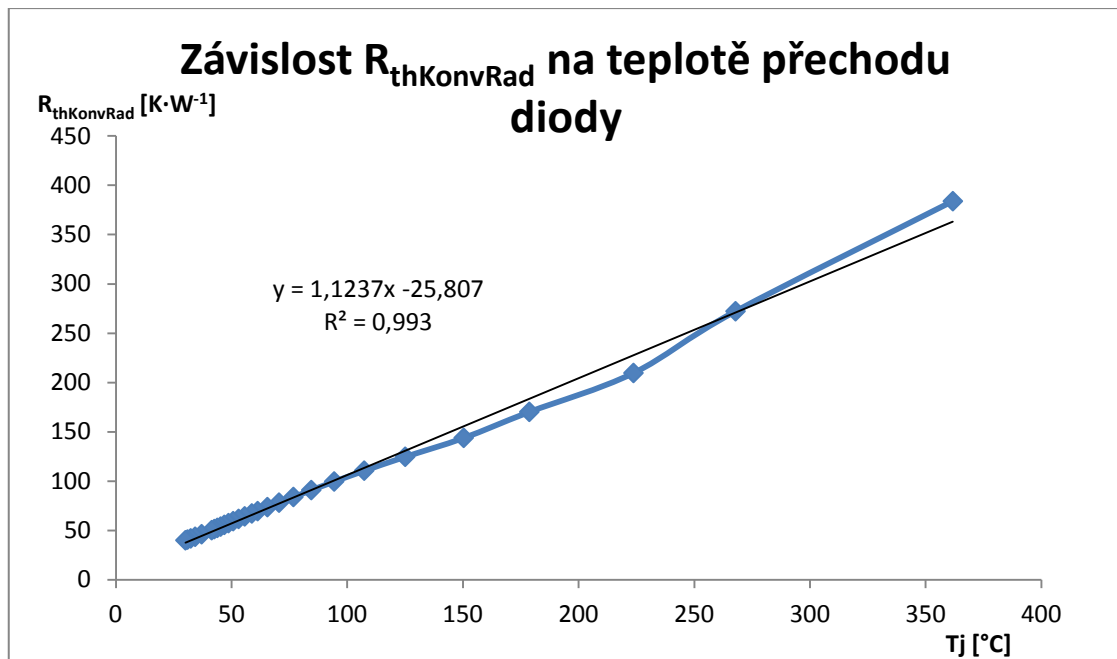
4 Odhad velikosti DPS pro efektivní odvod tepla

Pro matematické odvození vzorce odhadu velikosti pro efektivní odvod tepla z výkonové diody se vychází ze vzorců (1.3), (1.4) a (1.5), dále pak z obrázku 1. Za předpokladu, že návrhář zná požadovanou teplotu polovodičového přechodu, teplotu okolí a tepelný ztrátový výkon je možné z těchto veličin dopočítat velikost mědi na 2V DPS, která by měla ochladit čip na požadovanou teplotu. Celý výpočet uvažuje pouze znalost zmíněných vstupních veličin.

Je třeba zjistit tepelné odpory kondukce a tepelný odpor konvekce s radiací. Kondukční tepelný odpor čipu udává zpravidla výrobce. V katalogovém listu diody Seoul SZ5-P je uvedena typická hodnota na $R_{thLED} = 5,5 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}$ [8]. Dalším kondukčním odporem je tepelný odpor mědi. Ten lze vypočítat z geometrických rozměrů. V tomto případě má vrstva mědi na DPS výšku $v = 53 \text{ }\mu\text{m}$. Délka a šířka měděného materiálu záleží na geometrickém rozložení, v případě čtvercové desky, kde uprostřed leží polovodičový čip je poté délka k šířce v poměru 1:2. Z toho vyplývá, že pro čtvercovou desku platí $w = 2\cdot l$. Součinitel tepelné vodivosti mědi je pro reálné hodnoty teplot přechodu $\lambda = 386 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Po dosazení do upravené rovnice (1.3), pak pro tento případ dostáváme rovnici (3.1):

$$R_{thCu} = \frac{l}{\lambda \cdot S} = \frac{l}{\lambda \cdot v \cdot w} = \frac{l}{\lambda \cdot v \cdot 2 \cdot l} = \frac{1}{2 \cdot 53 \cdot 10^{-6} \cdot 386} = \underline{\underline{24,44 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1}}}. \quad (4.1)$$

Poslední tepelný odpor, který je třeba zjistit je tepelný odpor konvekce a radiace. Ten je ale nepřímý úměrný ploše určené ke konvekci a radiaci. Protože má být tato plocha výstupem celého tohoto odvození, je nutné si tepelný odpor určit empiricky. Jelikož není tepelný odpor pro konvekci a radiaci konstantní, je vztahen na požadovanou teplotu přechodu, která je vstupní hodnotou pro toto odvození. Zmíněná závislost je zjištěna ze simulací a je zachycena na obrázku 51.

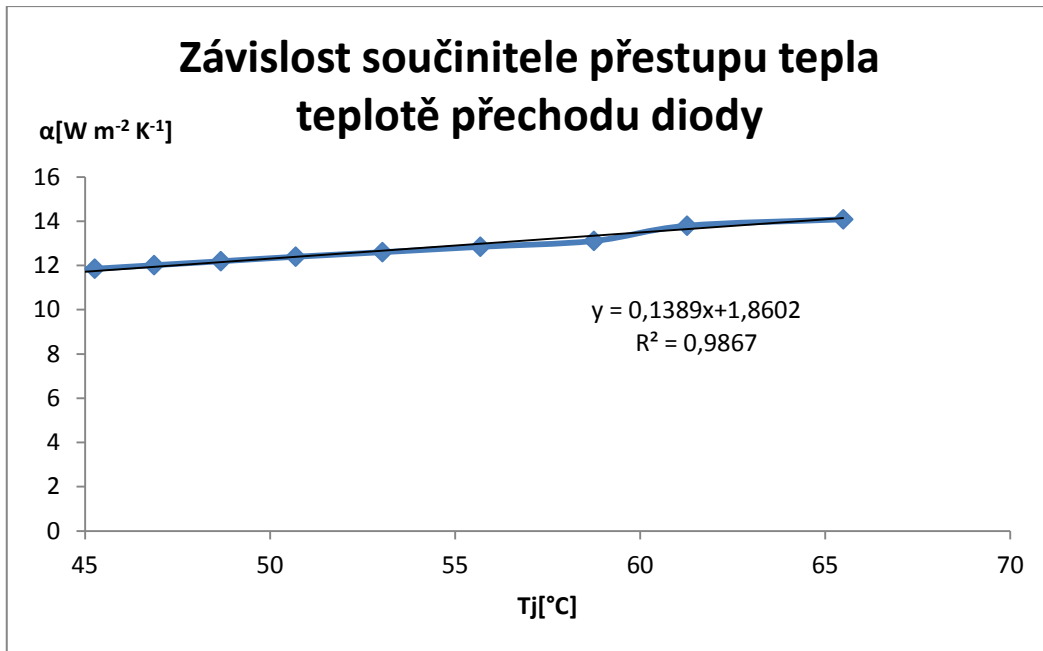


Obrázek 51 Graf závislosti tepelného odporu konvekce a radiace $R_{thKonvRad}$ na teplotě přechodu diody T_j

Zápis empirického odvození pro teplotní odpor konvekce a radiace pro 2V DPS je zobrazen v rovnici (3.2):

$$R_{thKonvRad} = 1,1237 \cdot T_j - 25,807 \quad (4.2)$$

Poslední potřebná veličina pro odhad velikosti DPS pro efektivní odvod tepla je součinitel přestupu tepla. Její teplotní závislost je obdobně empiricky odvozena ze simulací. Její průměrná hodnota se pro 2V DPS pohybuje kolem $12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, avšak pro přesnější výsledek je vhodnější využít teplotně závislou hodnotu. Součinitel přestupu tepla v sobě zahrnuje konvekční i radiační složku, v tomto případě se uvažuje šedé těleso s emisivitou $\epsilon = 0,9$ a teplotou okolí 25 °C .



Obrázek 52 Graf závislosti součinitele přestupu tepla α na teplotě přechodu diody T_j

Z grafu na obrázku 52 je získána rovnice přímky součinitele přestupu tepla α (3.3):

$$\alpha = 0,1389 \cdot T_j + 1,8602 \quad (4.3)$$

Po úpravě rovnice (1.4) na tvar (3.4) je možné ji dosadit do rovnice pro konvekci (3.5) a tu dále také upravit na konečný tvar rovnice pro odhad velikosti povrchu mědi 2V DPS pro efektivní odvod tepla (3.6):

$$P_k = \frac{T_{KonvRad}}{R_{thKonvRad}} \quad (4.4)$$

$$\frac{T_{KonvRad}}{R_{thKonvRad}} = \alpha \cdot S \cdot \Delta T \quad (4.5)$$

$$S = \frac{T_{KonvRad}}{\alpha \cdot R_{thKonvRad} \cdot \Delta T} = \frac{T_j - R_{thLED} \cdot P - R_{thCu} \cdot P}{\alpha \cdot R_{thKonvRad} \cdot (T_j - R_{thLED} \cdot P - R_{thCu} \cdot P - T_{okoli})} \quad (4.6)$$

Výsledky z vzorce (3.6) jsou v tabulce 21 porovnány s výsledky ze simulací. Pro tabulku platí podmínky $P = 1 \text{ W}$, $T_{okoli} = 25 \text{ °C}$, $R_{thLED} = 5,5 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$, $R_{thCu} = 24,44 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$.

Z výsledků relativních odchylek δ_S je možné potvrdit použitelnost odvozeného vzorce v praxi. Pro reálně použitelné hodnoty teplot polovodičového přechodu se maximální relativní odchylky pohybují kolem 7 %.

Tabulka 21 Porovnání výsledků ze simulace a vypočtených výsledků z odvozených vzorců

T_j [°C]	T_{KonvRad} [°C]	S_{simulace} [m ⁻²]	α_{simulace} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	α_{vzorec} [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	δ_α [%]	$R_{\text{thKonvRad}}$ [K·W ⁻¹]	S_{vzorec} [m ⁻²]	δ_s [%]
364,57	334,63	1,12E-04	26,58	52,50	-97,54	383,86	5,36E-05	108,36
265,24	235,30	1,81E-04	22,75	38,70	-70,09	272,24	1,06E-04	70,44
209,55	179,61	2,66E-04	18,90	30,97	-63,83	209,66	1,79E-04	48,79
174,46	144,52	3,67E-04	17,71	26,09	-47,37	170,23	2,72E-04	35,00
151,02	121,07	4,85E-04	16,46	22,84	-38,73	143,89	3,84E-04	26,39
133,97	104,03	6,18E-04	16,17	20,47	-26,54	124,73	5,16E-04	19,85
121,41	91,47	7,67E-04	15,83	18,72	-18,27	110,63	6,64E-04	15,49
111,65	81,71	9,32E-04	15,47	17,37	-12,30	99,65	8,33E-04	12,01
103,91	73,97	1,11E-03	15,10	16,29	-7,89	90,95	1,02E-03	9,26
97,67	67,73	1,31E-03	14,75	15,43	-4,60	83,94	1,22E-03	7,10
92,55	62,61	1,52E-03	14,41	14,72	-2,09	78,19	1,45E-03	5,36
88,52	58,58	1,75E-03	14,09	14,16	-0,50	73,66	1,67E-03	4,81
84,92	54,98	2,00E-03	13,80	13,66	1,02	69,61	1,93E-03	3,59
82,82	52,87	2,26E-03	13,11	13,36	-1,93	67,25	2,11E-03	7,07
80,17	50,23	2,54E-03	12,85	13,00	-1,17	64,28	2,38E-03	6,46
77,88	47,94	2,83E-03	12,60	12,68	-0,60	61,71	2,67E-03	5,97
75,85	45,91	3,14E-03	12,40	12,40	0,01	59,43	2,98E-03	5,36
74,08	44,14	3,46E-03	12,19	12,15	0,36	57,44	3,30E-03	4,84
72,52	42,58	3,81E-03	12,02	11,93	0,68	55,68	3,65E-03	4,42
70,95	41,01	4,16E-03	11,85	11,71	1,18	53,92	4,06E-03	2,66
69,81	39,87	4,54E-03	11,70	11,56	1,25	52,64	4,41E-03	2,91
68,71	38,77	4,93E-03	11,56	11,40	1,37	51,41	4,80E-03	2,58
67,73	37,79	5,33E-03	11,43	11,27	1,44	50,30	5,21E-03	2,27
64,07	34,13	7,60E-03	10,91	10,76	1,43	46,19	7,52E-03	0,98
61,79	31,85	1,03E-02	10,52	10,44	0,75	43,62	1,02E-02	0,51
60,28	30,34	1,33E-02	10,22	10,23	-0,09	41,93	1,32E-02	0,68
59,26	29,32	1,68E-02	9,98	10,09	-1,09	40,78	1,65E-02	1,74
58,61	28,67	2,07E-02	9,56	10,00	-4,57	40,05	1,95E-02	5,97

Ze vzorce je získána celková plocha 2V DPS s tloušťkou mědi 53 μm a tloušťkou materiálu FR-4 1,55 mm. Je zde započítán 1 mm okraj bez mědi od hrany DPS. Tato metoda je funkční pro čtvercové DPS a obdélníkové DPS do poměru stran 1:2. Hranu této čtvercové desky plošných spojů získáme ze vzorce pro plochu kvádrů se čtvercovou podstavou, jehož vztah je zobrazen v rovnici (3.7). Tuto rovnici řešíme jako kvadratickou pomocí diskriminantu, reálný výsledek je v řešení se součtem odmocniny diskriminantu jak je uvedeno ve vztahu (3.8).

$$S = 2 \cdot a^2 + 4 \cdot a \cdot v \quad (4.7)$$

$$a = \frac{-4 \cdot v + \sqrt{16 \cdot v^2 + 8 \cdot S}}{4}$$

(4.8)

Příklady výpočtů pro tabulku 21 a tabulku 22 jsou v rovnicích (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) a (3.14)(3.12):

$$R_{thKonvRad} = 1,1237 \cdot 74,08 - 25,807 = \underline{\underline{57,44K \cdot W^{-1}}} \quad (4.9)$$

$$\alpha = 0,1389 \cdot 74,08 + 1,8602 = \underline{\underline{12,15W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}} \quad (4.10)$$

$$\delta_{\alpha} = \frac{\alpha_{simulace} - \alpha_{vzorec}}{\alpha_{simulace}} = \frac{12,19 - 12,15}{12,19} = \underline{\underline{0,36\%}} \quad (4.11)$$

$$S = \frac{74,08 - 5,5 \cdot 1 - 24,44 \cdot 1}{12,15 \cdot 57,44 \cdot (74,085 - 5,5 \cdot 1 - 24,44 \cdot 1 - 25)} = \underline{\underline{3,30E - 03m^{-2}}} \quad (4.12)$$

$$\delta_s = \frac{S_{simulace} - S_{vzorec}}{S_{simulace}} = \frac{3,46E - 03 - 3,30E - 03}{3,46E - 03} = \underline{\underline{4,84\%}} \quad (4.13)$$

$$a = \frac{-4 \cdot 0,001656 + \sqrt{16 \cdot 0,001656^2 + 8 \cdot 3,30E - 03}}{4} = \underline{\underline{0,039m}} \quad (4.14)$$

Díky charakteru rovnice (3.8) se razantně snižuje vzniklá odchylka při výpočtu plochy. Vypočtená plocha je ve zmíněné rovnici v odmocnině. Díky tomu se odchylka od reálné hodnoty nezvětšuje, ale naopak zmenšuje. Dopočtené výsledky hran čtvercových 2V DPS jsou v tabulce 22.

Tabulka 22 Porovnání výsledků simulací a výpočtů ze vzorců pro hranu čtvercové 2V DPS

T_j [°C]	a_{simulace} [m]	a_{vzorec} [m]	δ [%]
364,57	0,006	0,004	36,99
265,24	0,008	0,006	27,29
209,55	0,010	0,008	20,53
174,46	0,012	0,010	15,60
151,02	0,014	0,012	12,21
133,97	0,016	0,014	9,47
121,41	0,018	0,017	7,53
111,65	0,020	0,019	5,93
103,91	0,022	0,021	4,63
97,67	0,024	0,023	3,59
92,55	0,026	0,025	2,73
88,52	0,028	0,027	2,45
84,92	0,030	0,029	1,84
82,82	0,032	0,031	3,53
80,17	0,034	0,033	3,22
77,88	0,036	0,035	2,98
75,85	0,038	0,037	2,69
74,08	0,040	0,039	2,43
72,52	0,042	0,041	2,22
70,95	0,044	0,043	1,35
69,81	0,046	0,045	1,47
68,71	0,048	0,047	1,31
67,73	0,050	0,049	1,15
64,07	0,060	0,060	0,50
61,79	0,070	0,070	0,26
60,28	0,080	0,080	0,35
59,26	0,090	0,089	0,87
58,61	0,100	0,097	2,91

Vzorce (3.2) a (3.3) jsou odvozeny pro ztrátový výkon diody 1 W. Tímto faktem je velice omezena flexibilita výpočtu. Do obou vzorců vstupuje teplota přechodu T_j čipu právě s 1W ztrátového výkonu. Oproti tomu reálná dioda Seoul SZ5-P má typický ztrátový výkon 700 mW.

V případě rovnice (3.2) se jedná o materiálovou vlastnost $R_{\text{thKonvRad}}$. Za využití rovnice (1.4) je možné odvodit teoretickou vstupní teplotu do vzorce (3.2). Odvození pro libovolný ztrátový výkon $P = x$ W je popsáno ve vzorcích (3.15) a (3.16), z nich je odvozen vzorec (3.17), který udává již zmíněnou správnou vstupní hodnotu pro vzorec (3.2).

$$R_{\text{th}1\text{W}} = R_{\text{th}x\text{W}} \quad (4.15)$$

$$\frac{T_{\text{KonvRad}1\text{W}}}{P_{1\text{W}}} = \frac{T_{\text{KonvRad}x\text{W}}}{P_{x\text{W}}} \approx \frac{T_{j1\text{W}}}{P_{1\text{W}}} = \frac{T_{jx\text{W}}}{P_{x\text{W}}} \quad (4.16)$$

$$T_{j1W} = \frac{T_{jxW}}{P_{xW}} \cdot P_{1W} = \frac{T_{j0,7W}}{xW} \cdot 1W = \frac{T_{j0,7W}}{x} \quad (4.17)$$

Z rovnice (3.17) je patrné, že zvolená teplota přechodu je dělena číselnou hodnotou reálného ztrátového výkonu polovodičového prvku. Takto získaná hodnota po zadání do rovnice (3.2) dá správnou hodnotu $R_{thKonvRad}$ pro daný výkon.

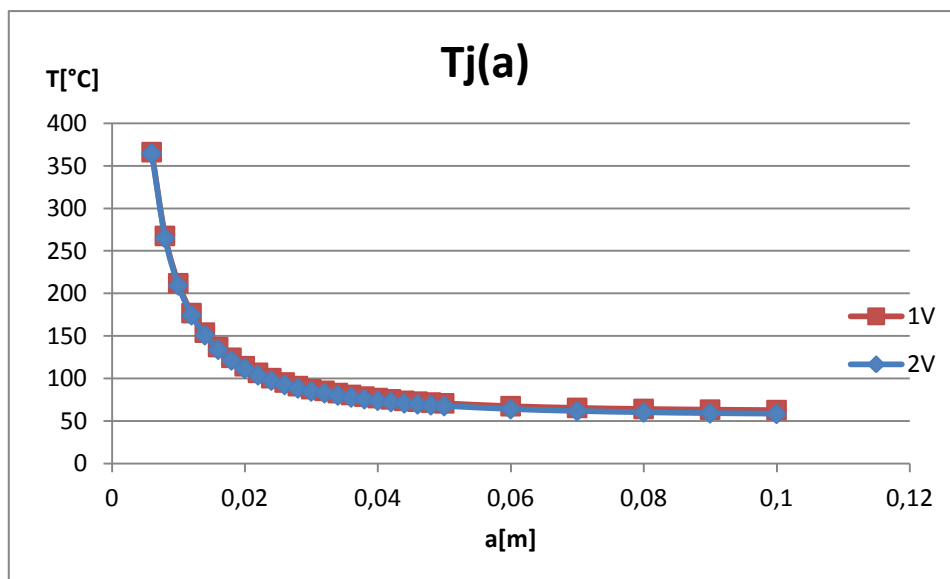
Pro součinitel přestupu tepla se obdobný postup nedá použít, proto je potřebné znát jeho hodnotu, případně použít odvozený vzorec (3.3) pro 1 W. Při použití koeficientu α z tohoto vzorce, je nutné počítat se zavedením chyby. Pro lepší odhad návrháře jsou v tabulce 23 uvedeny hodnoty součinitele přestupu tepla pro různé teploty a ztrátové výkony diod.

Tabulka 23 Přehled součinitelů přestupu tepla pro různé ztrátové výkony diod

$P_{LED} = 0,7 \text{ W}$		$P_{LED} = 0,9 \text{ W}$		$P_{LED} = 1 \text{ W}$		$P_{LED} = 1,2 \text{ W}$	
α [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	T_j [°C]	α [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	T_j [°C]	α [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	T_j [°C]	α [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	T_j [°C]
13,17	68,06	13,60	79,37	13,80	84,92	14,16	95,83
12,51	66,56	12,92	77,46	13,11	82,82	13,46	93,36
12,28	64,57	12,67	75,03	12,85	80,17	13,18	90,30
12,07	62,85	12,44	72,92	12,60	77,88	12,91	87,67
11,90	61,34	12,24	71,06	12,40	75,85	12,69	85,32
11,72	60,01	12,05	69,43	12,19	74,08	12,47	83,27
11,57	58,85	11,88	68,00	12,02	72,52	12,27	81,47
11,43	57,69	11,72	66,56	11,85	70,95	12,10	79,64
11,30	56,84	11,58	65,51	11,70	69,81	11,94	78,32
11,18	56,03	11,44	64,51	11,56	68,71	11,79	77,05
11,06	55,30	11,32	63,61	11,43	67,73	11,65	75,91
10,60	52,61	10,81	60,27	10,91	64,07	11,08	71,66
10,26	50,93	10,43	58,18	10,52	61,79	10,66	68,98
10,00	49,83	10,15	56,81	10,22	60,28	10,35	67,22
9,78	49,08	9,92	55,87	9,98	59,26	10,09	66,01
9,50	48,59	9,71	55,22	9,56	58,61	9,89	65,17

Závěr

Pomocí simulací v softwaru Ansys Icepak byla zjištěna hyperbolická závislost teploty přechodu LED na celkové ploše DPS. Simulace byly dělány pro tzv. „worst case“ – nejhorší možný případ. Počítalo se s minimální možnou tloušťkou povrchové mědi po všech chemických procesech v případě pokovení DPS jednou uncí mědi. Dle normy IPC-6012C je výsledná minimální tloušťka povrchového pokovení 52,9 μm . S touto tloušťkou mědi byly vypočtené výsledky v programu Icepak. Veškeré modely DPS byly čtvercové. Závislosti teploty přechodu T_j na velikosti hrany DPS a pro jednovrstvou a dvouvrstvou desku plošných spojů je zobrazena v grafu na obrázku 53. Prudký pokles teploty polovodičového přechodu při zvětšení DPS je nejvíce vidět do rozměrů DPS 2x2 cm. Teplota nadále s větší hranou DPS klesá, avšak pro DPS větší než 8x8 cm je klesání teploty polovodičového přechodu již minimální.



Obrázek 53: Závislost teploty přechodu na velikosti hrany DPS

Simulace s prokovy ukázaly, že do dvou řad prokovů je teplota oproti případu bez prokovů snižována. Každá další řada prokovů však již nepřispívá k lepšímu chlazení DPS.

Nejlepší skladba DPS pro odvod tepla je IMS. Nejnižší teplotu polovodičového přechodu měla DPS s 1,5 mm tlustým hliníkovým substrátem. Jelikož se ale DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm lišila v maximální teplotě polovodičového přechodu pouze o hodnotu 0,64 $^{\circ}\text{C}$ od DPS s hliníkem o tloušťce pouze 1 mm, je z ekonomického hlediska lepší využít tenčí variantu skladby DPS.

Ze simulací se podařilo odvodit vzorce pro návrh chladiče z 2V DPS. Pro vzorec je kritická přesná znalost součinitele α . Ten je většinou návrháři neznámý, proto jsou v tabulce 23 uvedeny součinitelé přenosu tepla pro různé ztrátové výkony a teploty polovodičového přechodu. Z grafů, které je možné sestavit ze zmíněné tabulky, se dají zjistit průběhy součinitele přenosu tepla pro daný ztrátový výkon a poté dopočítat jeho hodnotu pro libovolnou teplotu přechodu. Teplotní odpor pro konvekci a radiaci je možné

vcelku přesně dopočítat pro libovolný ztrátový výkon prvku pomocí vzorců (3.2) a (3.17). Výsledný vzorec pro odhad velikosti DPS pro danou teplotu polovodičového přechodu (3.6) je pro hodnoty teploty polovodičového přechodu pod 100 °C s maximální odchylkou pod 10%. Reálné využívané rozsahy teplot polovodičového přechodu bývají pro LED čipy nižší než 100 °C, vzorec je proto vhodný pro použití v praxi. Relativní odchylky vypočtené a simulované hodnoty jsou v tabulce 21 a tabulce 22. Tyto vzorce jsou aplikovatelné pro čtvercové 2V DPS s tloušťkou mědi 52,9 μm. Pokud bude vrstva mědi větší, bude konečná teplota polovodičového přechodu menší než vypočtená.

Z měření reálného vzorku byly zjištěny menší hodnoty teplot, než jaké byly zjištěny pomocí simulací. Menší teploty jsou způsobeny nedokonalostmi měření. Například přírodní elektrické kabely svojí kondukcí odvádí teplo, z praxe je známo, že tyto kabely mohou ochladit DPS až o hodnotu 1,5 °C. Odvod tepla přes přívody je možné pozorovat z obrázků zachycených termokamerou v příloze C.6 a C.7. Další nepřesnost měření je zavedena technologickou výrobou DPS. Simulace byly vytvářeny pro minimální dovolenou tloušťku mědi po všech chemických operacích v montážních celcích třídy 3. Reálně ovšem pokovení zůstává větší, samotná měřená DPS může mít tloušťku mědi přes 60 μm. Další nepřesnost mohla být zavedena špatným přichycením termočlánků, kde teplo mohlo prostupovat přes lepidlo, které svým tepelným odporem snižuje měřenou teplotu. Teplota okolí byla dodržena, teplota DPS v ustáleném stavu bez elektrického buzení byla 25,6 °C.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Teplotní management. *Inovace, technologie, projekty* [online]. 2010, (2) [cit. 2015-10-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40473.pdf>
- [2] LED teplotní management. In: *LED teplotní management* [online]. 2014 [cit. 2015-10-9]. Dostupné z: <http://nasesusenky.eu/aplikacni-poznamky/led-teplotni-management/>
- [3] Termomechanika: 15. Základy přenosu tepla. In: PAVELEK, Milan. *Termomechanika* [online]. 2012 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/15_Prenos.pdf
- [4] Termomechanika: 19. Přenos tepla zářením. In: PAVELEK, Milan. *Termomechanika* [online]. 2012 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19_Zareni.pdf
- [5] 4 Sálání tepla - radiace. In: POKORNÝ, Marek. *Sálání tepla* [online]. 2006 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste
- [6] CÍSLER, Petr. *Elektrická analogie sdílení tepla vedením* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2661/DP_Petr_Cisler.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] KEEPING, Steven. *Calculating LED Junction Temperature in Lighting Applications* [online]. 2011 [cit. 2015-10-27]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/jun/calculating-led-junction-temperature-in-lighting-applications>
- [8] Specifitaion SSC-SZ5P. In: *Specification SSC-SZ5P* [online]. 2012 [cit. 2015-10-27]. Dostupné z: http://www.seoulsemicon.com/_upload/Goods_Spec/SZ5P.pdf
- [9] Thermal solution for long-term reliability of power LEDs. In: *Thermal Management for LED application: Solutions guide* [online]. 2010 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: http://www.bergquistcompany.com/pdfs/LED_496KB.pdf
- [10] LED LAMPS : THERMAL MANAGEMENT IN LEDS (CONTINUED). *LED LAMPS* [online]. 2013 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: http://www.lighting.philips.com/pwc_li/main/connect/Lighting_University/internet-courses/LEDs/led-lamps11.html
- [11] Thermal Management of SMT LED: Application Note. In: *Thermal Management of SMT LED* [online]. 2014 [cit. 2015-11-27]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic4/00165246_0.pdf/Thermal%20Management%20of%20SMT%20LED.pdf
- [12] AZAR, K. a J.E. GRAEBNER. Experimental determination of thermal conductivity of printed wiring boards. *Twelfth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement*

and Management Symposium. Proceedings [online]. IEEE, 1996, : 169-182 [cit. 2015-12-14]. DOI: 10.1109/STHERM.1996.545107. ISBN 0-7803-3139-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=545107>

Seznam použitých zkratek

1V – jednovrstvá (v kontextu DPS)

2V – dvojevrstvá (v kontextu DPS)

DPS – deska plošných spojů

ECAD – Electronic Computer-Aided Design, elektronický počítačem podporovaný návrh

IMS – Isulated Metal Substrate, izolovaný kovový substrát

LED – Light Emitting Diode, světlo emitující dioda

PCB – Printed Circuit Board, deska plošných spojů

Seznam obrázků

Obrázek 1: Teplotní schéma LED s DPS	13
Obrázek 2: Graf závislosti relativního světelného výstupu na teplotě přechodu LED čipu	14
Obrázek 3: Půdorysný řez LED Seoul SZ5-P	15
Obrázek 4: Bokorysný řez LED Seoul SZ5-P	15
Obrázek 5: Bokorys modelu LED	16
Obrázek 6: Geometrie Icepak modelu LED	16
Obrázek 7: Ověření teplotního odporu modelu	17
Obrázek 8: Graf rozložení teploty na 1V DPS s hranou 10 cm v závislosti na vzdálenosti od středu desky	18
Obrázek 9: Graf závislosti teploty povrchu pájecí plošky určené k odvodu tepla na celkové ploše mědi 1V DPS	19
Obrázek 10: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 1V DPS s hranou 4 cm, pohled na vrchní vrstvu 1V DPS.....	21
Obrázek 11: Graf rozložení teploty na 2V DPS s hranou 10 cm v závislosti na vzdálenosti od středu desky	21
Obrázek 12: Graf závislosti teploty povrchu pájecí plošky určené k odvodu tepla na celkové ploše mědi 2V DPS	22
Obrázek 13: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, pohled na vrchní vrstvu.....	22
Obrázek 14: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm simulovanou s ECAD daty.....	24
Obrázek 15: Detail nejteplejšího místa 2V DPS bez prokovů.....	25
Obrázek 16: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm se 4 prokovy 0,25 mm.....	26
Obrázek 17: Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokovy 0,25 mm.....	27
Obrázek 18: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2VDPS se 4 prokovy 0,25	27
Obrázek 19: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm se 4 prokovy 0,30 mm.....	28
Obrázek 20: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 prokovy 0,30 mm.....	29
Obrázek 21: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm se 4 prokovy 0,50 mm.....	29
Obrázek 22: Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokovy 0,50 mm.....	30
Obrázek 23: Porovnání rozložení teplot DPS bez prokovů (vlevo) a DPS s 4 prokovy 0,50 mm (vpravo)	30
Obrázek 24: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 prokovy 0,50	31
Obrázek 25: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 4 prokovy 0,50 mm umístěných 1 mm od okraje měděného povrchu.....	32
Obrázek 26: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, s 1 řadou prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	33
Obrázek 27: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS s 1 řadou 0,25 mm prokovů na obou stranách	33
Obrázek 28: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 2 řadami prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	34
Obrázek 29: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 2 řadami 0,25 mm prokovů na obou stranách.....	35
Obrázek 30: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 3 řadami prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	36

Obrázek 31: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 3 řadami 0,25 mm prokovů na obou stranách.....	36
Obrázek 32: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 4 řadami prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	37
Obrázek 33: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 řadami 0,25 mm prokovů na obou stranách.....	38
Obrázek 34: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, s 1 řadou prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	38
Obrázek 35: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS s 4 řadou 0,50 mm prokovů na obou stranách	39
Obrázek 36: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 2 řadami prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	40
Obrázek 37: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 2 řadami 0,50 mm prokovů na obou stranách.....	41
Obrázek 38: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 3 řadami prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	41
Obrázek 39: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 3 řadami 0,50 mm prokovů na obou stranách.....	42
Obrázek 40: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm, se 4 řadami prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky.....	43
Obrázek 41: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 2V DPS se 4 řadami 0,50 mm prokovů na obou stranách.....	43
Obrázek 42: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 1V IMS DPS s hranou 4 cm, DPS s tloušťkou hliníku 1 mm.....	44
Obrázek 43 Detail nejteplejšího místa 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm.....	45
Obrázek 44: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm.....	45
Obrázek 45: Zobrazení teplotních kontur čtvercové 1V IMS DPS s hranou 4 cm, DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm.....	46
Obrázek 46: Detail nejteplejšího místa 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm.....	47
Obrázek 47: Detail spodní vrstvy pod pájecí ploškou 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm.....	47
Obrázek 48: Osazená DPS s délkou hrany 4 cm určená k měření	48
Obrázek 49 DPS s přilepenými termočlánky	49
Obrázek 50: Uchycená DPS na držáku	49
Obrázek 51 Graf závislosti tepelného odporu konvekce a radiace $R_{thKonvRad}$ na teplotě přechodu diody T_j	52
Obrázek 52 Graf závislosti součinitele přestupu tepla α na teplotě přechodu diody T_j	53
Obrázek 53: Závilost teploty přechodu na velikosti hrany DPS	58

Seznam tabulek

Tabulka 1: Analogie mezi teplotními a elektrickými veličinami	11
Tabulka 2: Výsledky parametrické simulace 1V DPS	20
Tabulka 3: Výsledky parametrické simulace 2V DPS	23
Tabulka 4: Výsledky simulace s ECAD daty čtvercové 2V DPS s hranou 4 cm bez prokovu	25
Tabulka 5: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,25 mm.....	25
Tabulka 6: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,30 mm.....	28
Tabulka 7: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,50 mm.....	30
Tabulka 8: Výsledky simulace 2V DPS se 4 prokovy s velikostí díry 0,50 mm 1 mm od okraje mědi	31
Tabulka 9: Výsledky simulace 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	32
Tabulka 10: Výsledky simulace 2V DPS se 2 řadami prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	34
Tabulka 11: Výsledky simulace 2V DPS se 3 řadami prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	35
Tabulka 12: Výsledky simulace 2V DPS se 4 řadami prokovů 0,25 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	37
Tabulka 13: Výsledky simulace 2V DPS s 1 řadou prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	39
Tabulka 14: Výsledky simulace 2V DPS se 2 řadami prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	40
Tabulka 15: Výsledky simulace 2V DPS se 3 řadami prokovů 0,50 na obou stranách chladicí pájecí plošky	42
Tabulka 16: Výsledky simulace 2V DPS se 4 řadami prokovů 0,50 mm na obou stranách chladicí pájecí plošky	42
Tabulka 17: Výsledky simulace 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1 mm	44
Tabulka 18: Výsledky simulace 1V IMS DPS s tloušťkou hliníku 1,5 mm	46
Tabulka 19: Výsledky prvního měření	50
Tabulka 20 Výsledky druhého měření.....	50
Tabulka 21 Porovnání výsledků ze simulace a vypočtených výsledků z odvozených vzorců	54
Tabulka 22 Porovnání výsledků simulací a výpočtů ze vzorců pro hranu čtvercové 2V DPS	56
Tabulka 23 Přehled součinitelů přestupu tepla pro různé ztrátové výkony diod.....	57

Seznam příloh

A. Náhledy 4 cm DPS v Allegru

- 1.1. Pohled na DPS bez prokovů
- 1.2. Pohled na DPS bez prokovů, vrchní vrstva
- 1.3. Pohled na DPS se 4 prokovy
- 1.4. Pohled na DPS se 4 prokovy, vrchní vrstva
- 1.5. Pohled na DPS s 1 řadou prokovů
- 1.6. Pohled na DPS s 1 řadou prokovů, vrchní vrstva
- 1.7. Pohled na DPS s 2 řadami prokovů
- 1.8. Pohled na DPS s 2 řadami prokovů, vrchní vrstva
- 1.9. Pohled na DPS s 3 řadami prokovů
- 1.10. Pohled na DPS s 3 řadami prokovů, vrchní vrstva
- 1.11. Pohled na DPS s 4 řadami prokovů
- 1.12. Pohled na DPS s 4 řadami prokovů, vrchní vrstva

B. Rozložení teplot pomocí kontur

- B.1. DPS bez prokovu, spodní vrstva
- B.2. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokovy 0,30 mm
- B.3. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokovy umístěné 1 mm od okraje měděného povrchu DPS
- B.4. Detail nejteplejšího místa 2V DPS s 1 řadou 0,25 mm prokovů na obou stranách
- B.5. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 2 řadami 0,25 mm prokovů na obou stranách
- B.6. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 3 řadami 0,25 mm prokovů na obou stranách
- B.7. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 řadami 0,25 mm prokovů na obou stranách
- B.8. Detail nejteplejšího místa 2V DPS s 1 řadou 0,50 mm prokovů na obou stranách
- B.9. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 2 řadami 0,50 mm prokovů na obou stranách
- B.10. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 3 řadami 0,50 mm prokovů na obou stranách
- B.11. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 řadami 0,50 mm prokovů na obou stranách

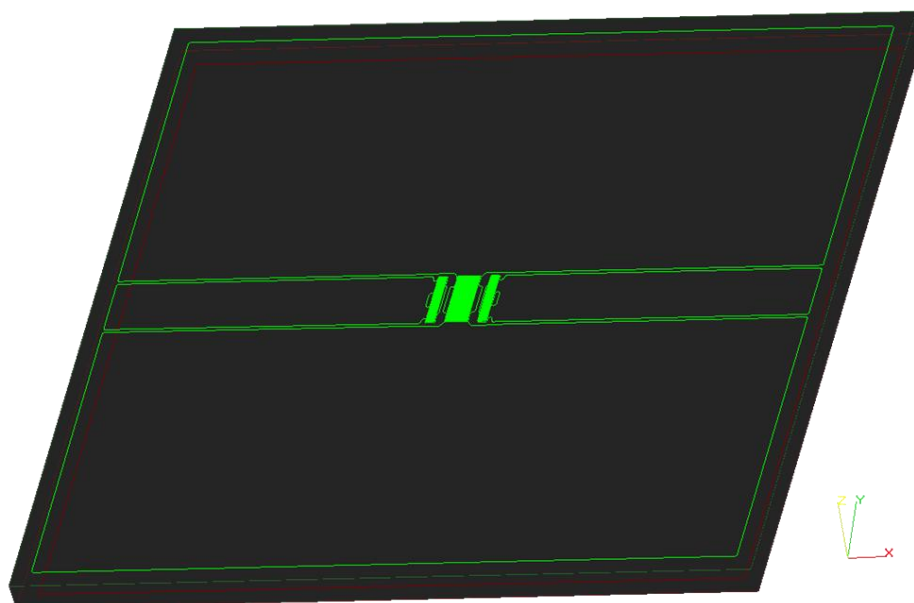
C. Měření na reálném vzorku

- C.1. Dataloger
- C.2. Dvousložkové lepidlo

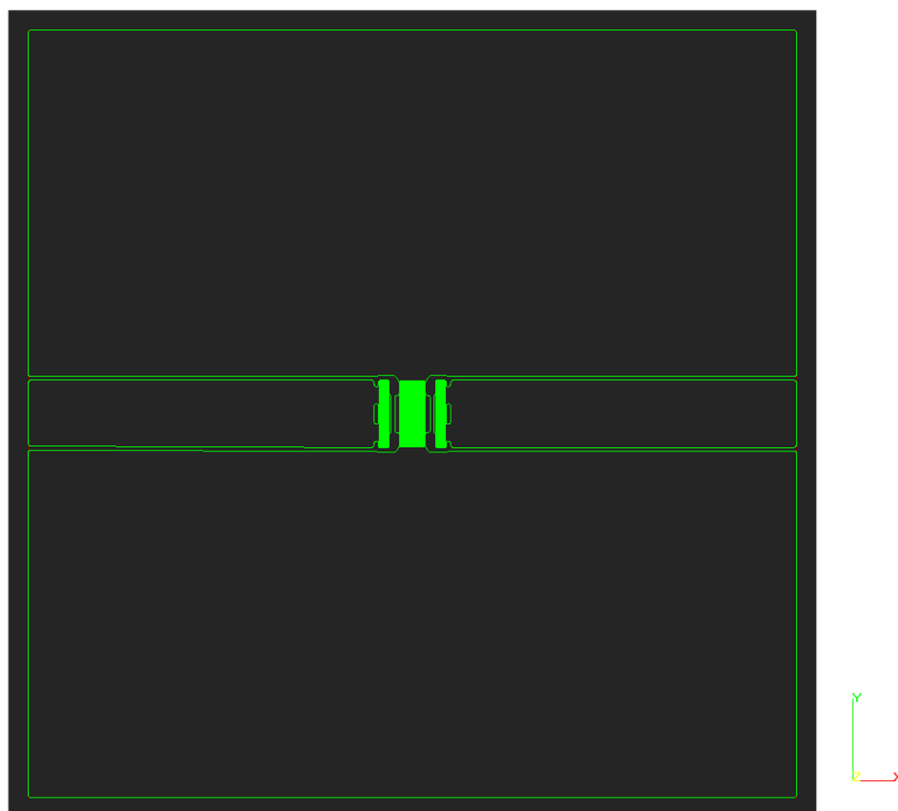
- C.3. Postup při lepení
- C.4. Měřicí box
- C.5. Buzení proudovým zdrojem
- C.6. Termokamera – počátek el. buzení
- C.7. Termokamera – rozložení tepla kondukcí

A. Náhledy 4 cm DPS v Allegru

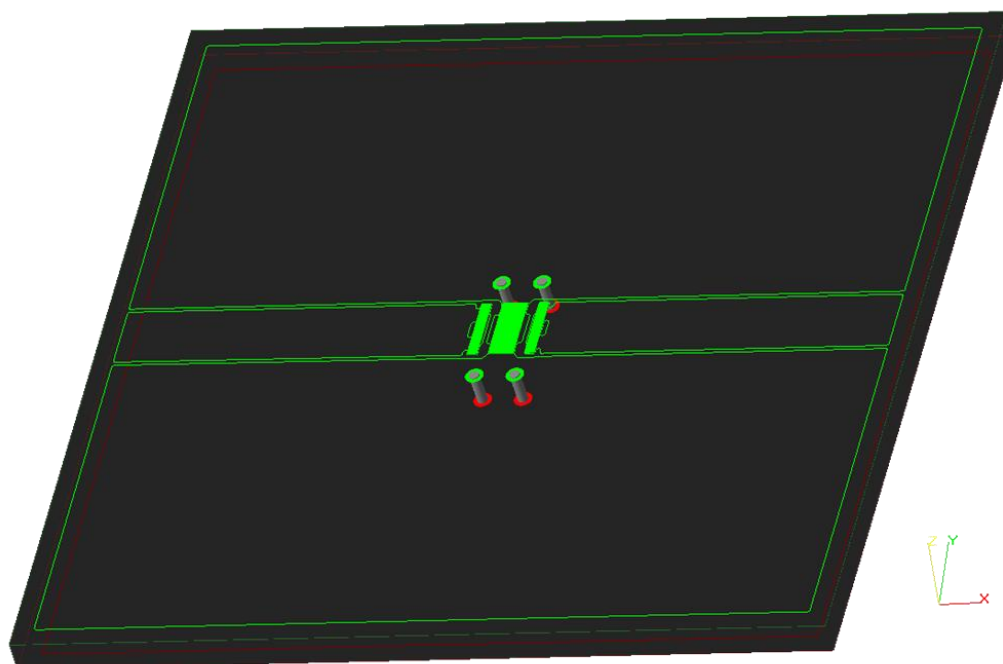
1.1. Pohled na DPS bez prokovů



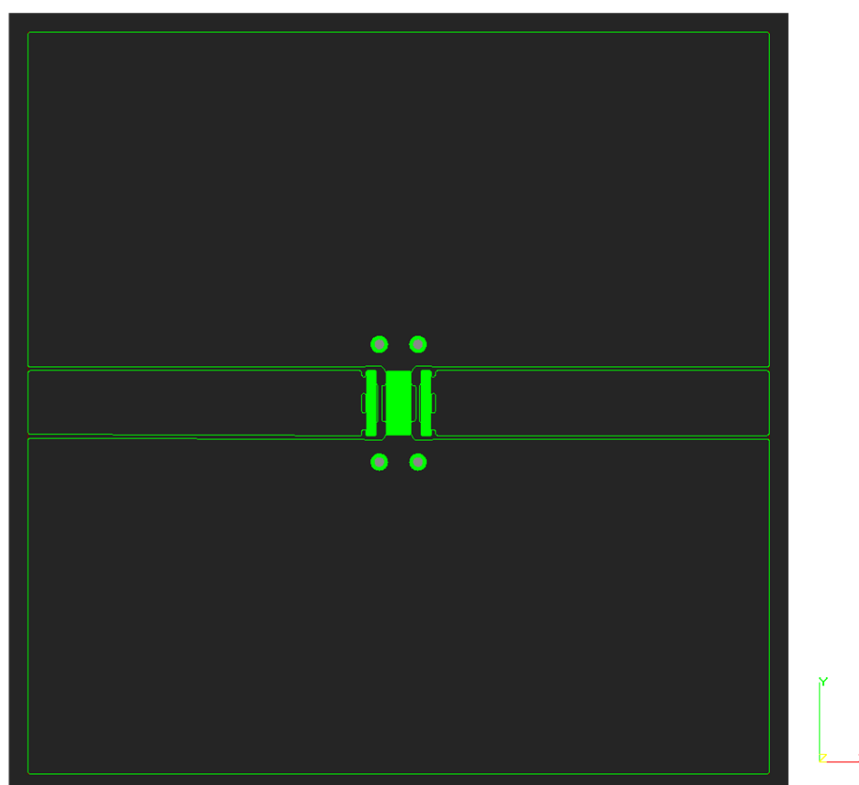
1.2. Pohled na DPS bez prokovů, vrchní vrstva



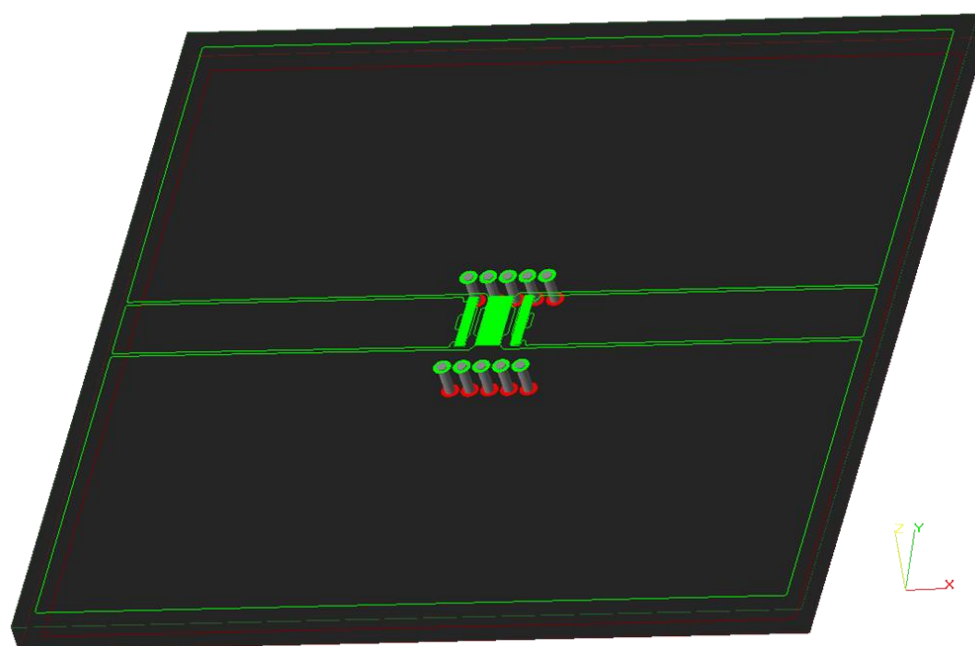
1.3.Pohled na DPS se 4 prokovy



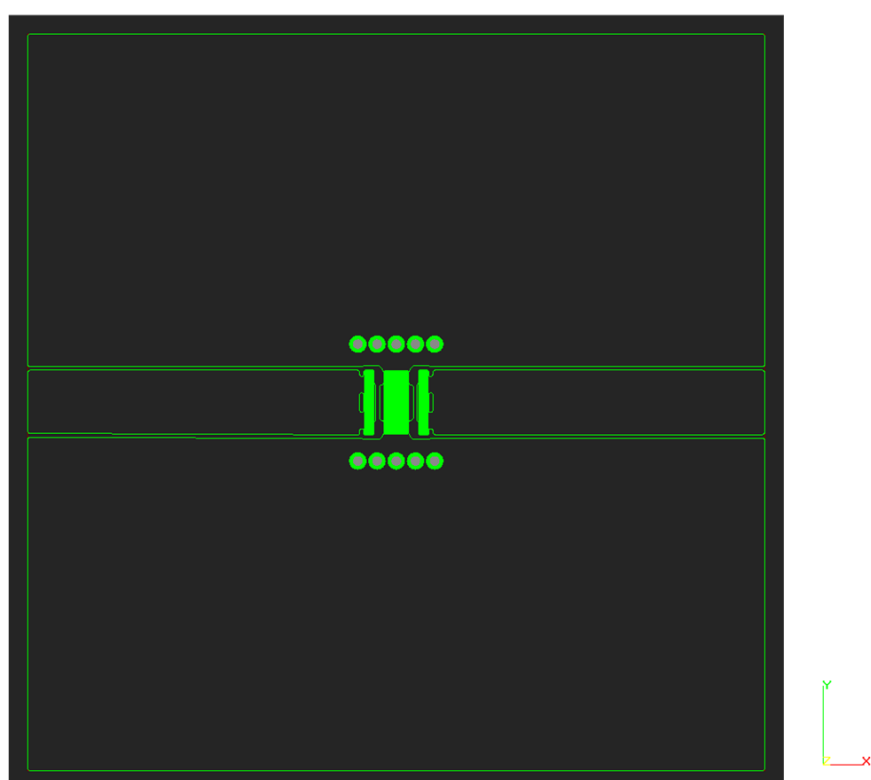
1.4.Pohled na DPS se 4 prokovy, vrchní vrstva



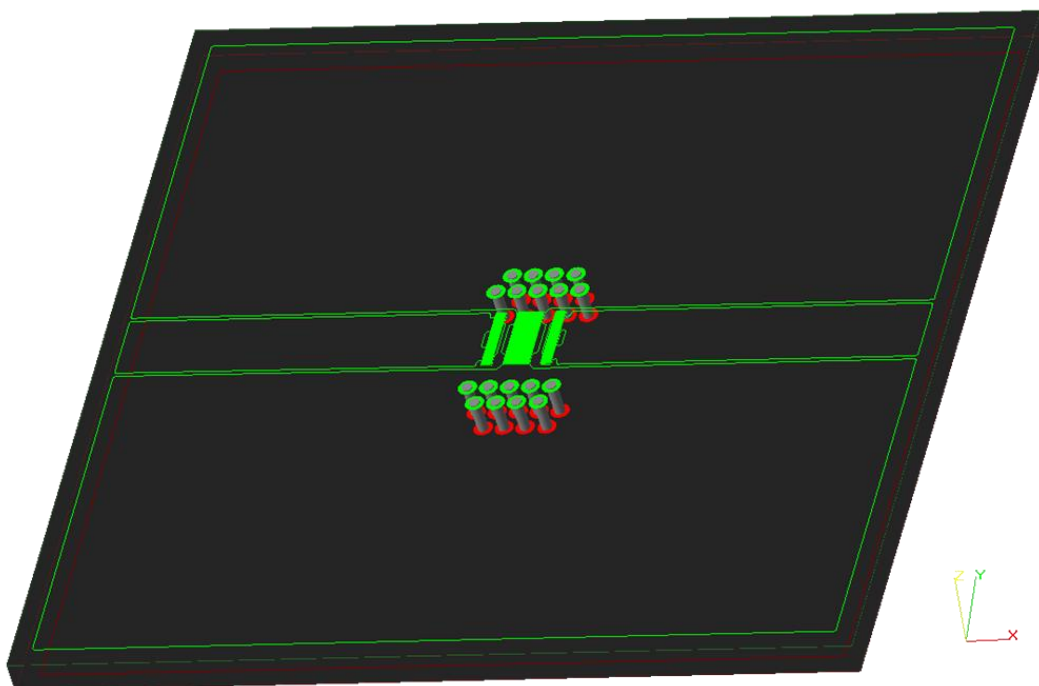
1.5.Pohled na DPS s 1 řadou prokůvů



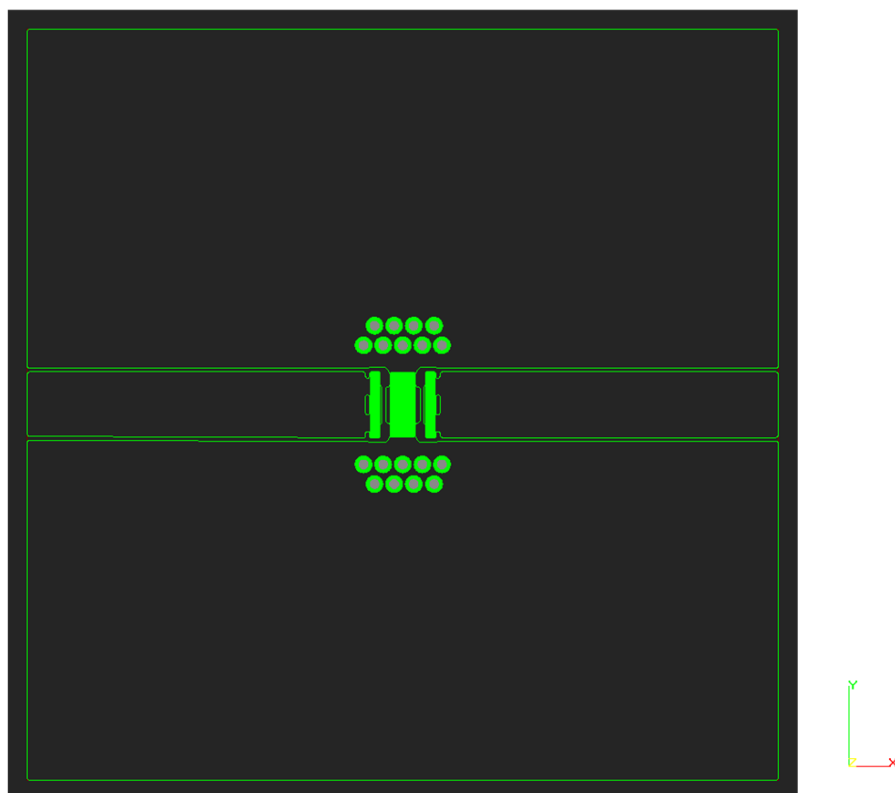
1.6.Pohled na DPS s 1 řadou prokůvů, vrchní vrstva



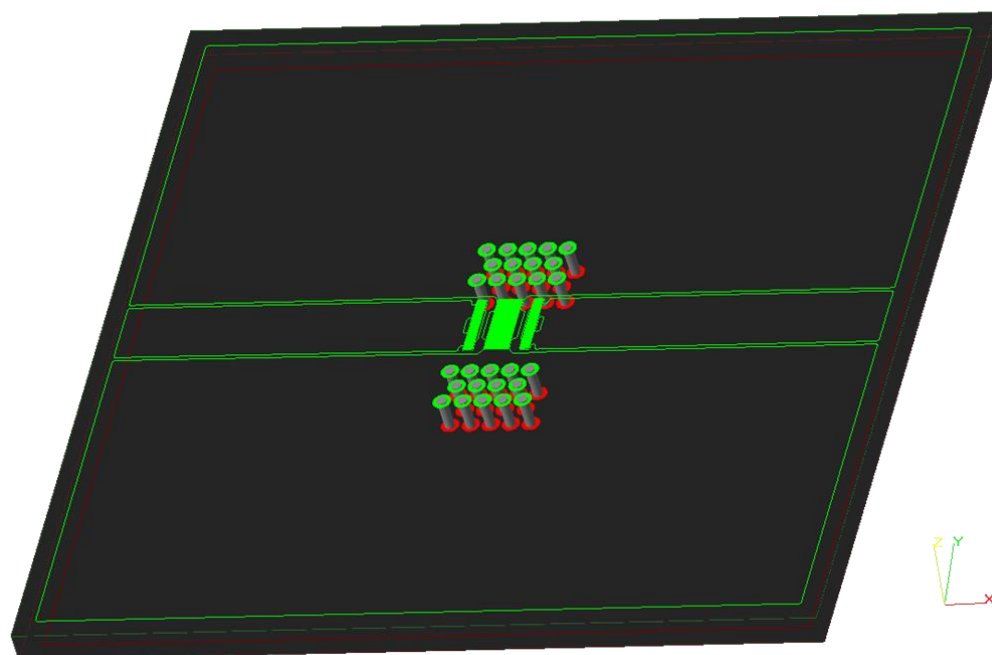
1.7. Pohled na DPS s 2 řadami prokůvů



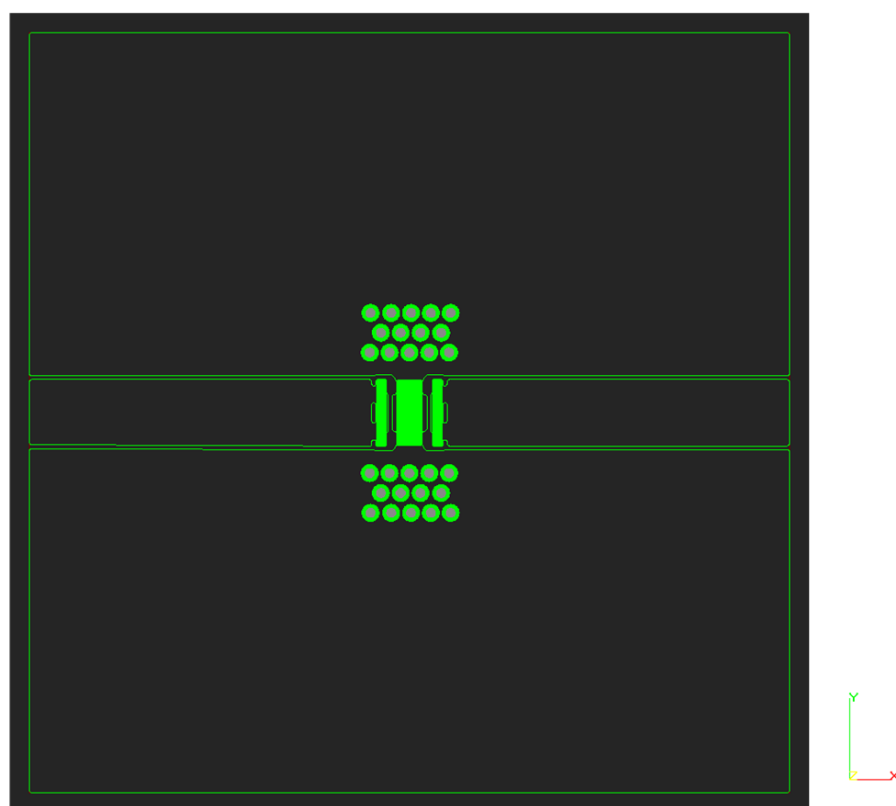
1.8. Pohled na DPS s 2 řadami prokůvů, vrchní vrstva



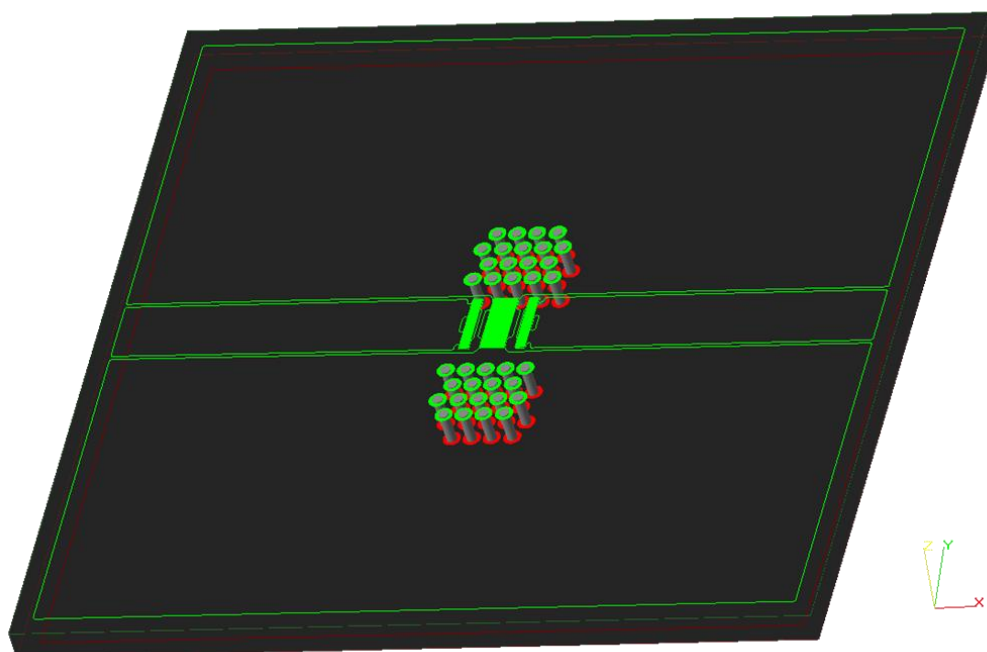
1.9. Pohled na DPS s 3 řadami prokůvů



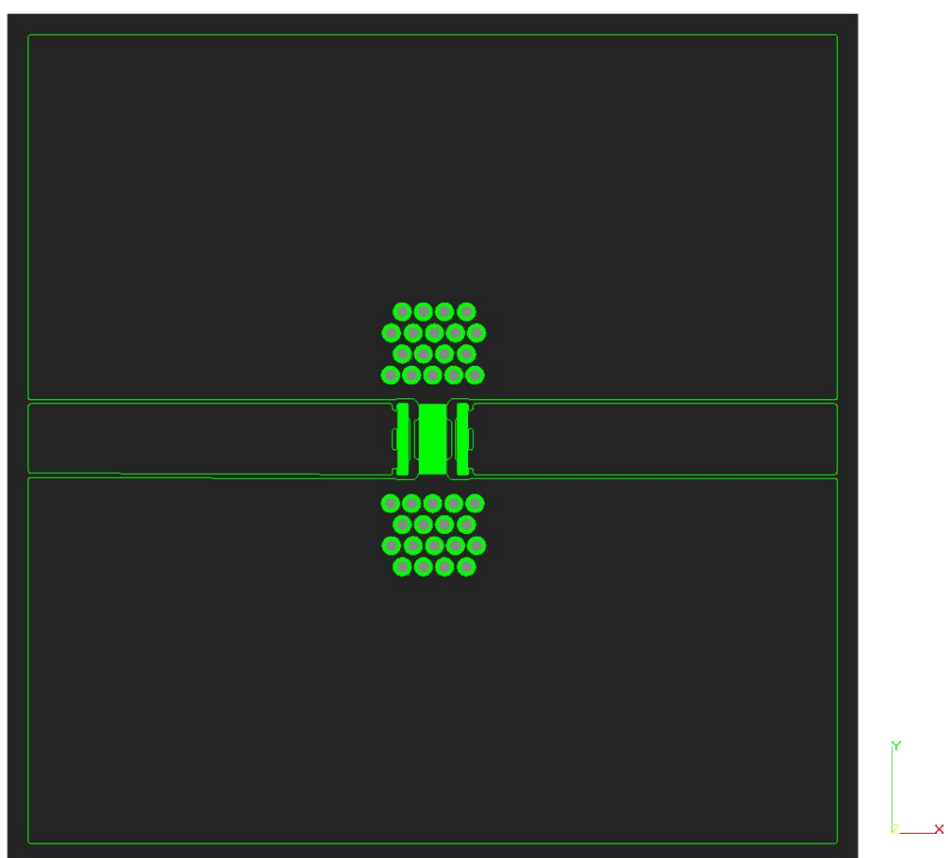
1.10. Pohled na DPS s 3 řadami prokůvů, vrchní vrstva



1.11. Pohled na DPS s 4 řadami proků

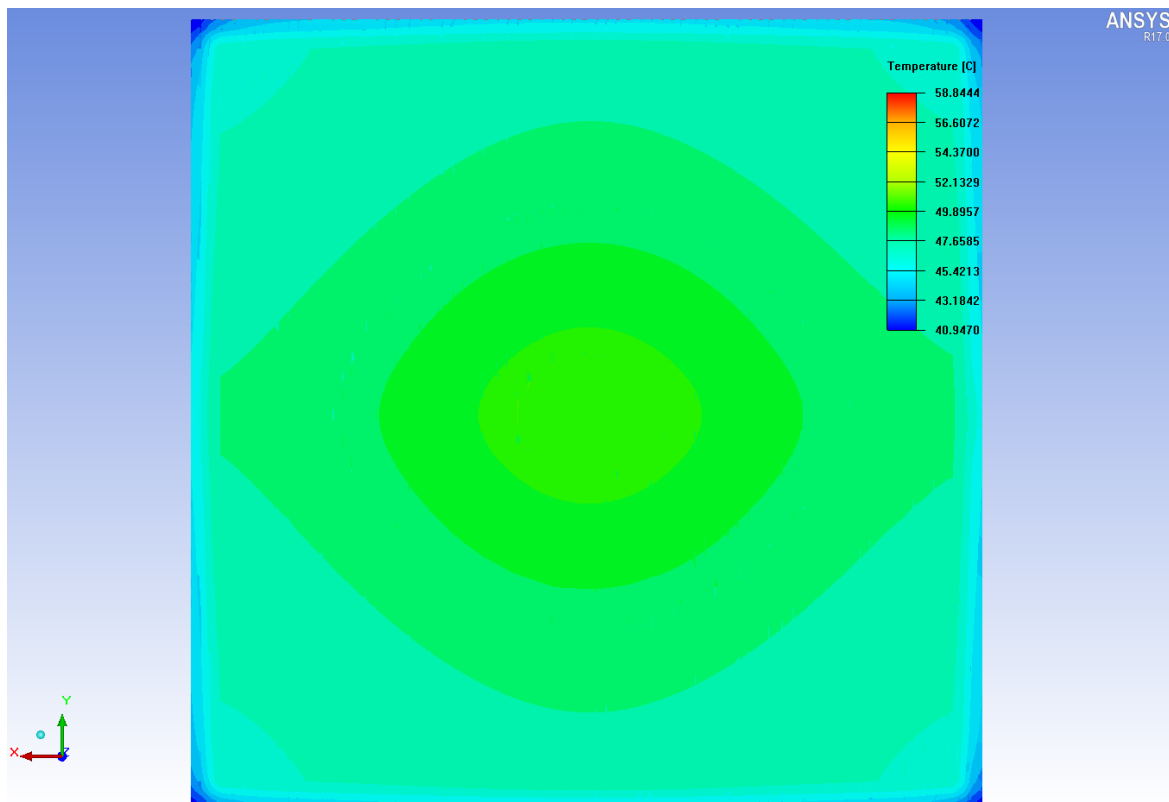


1.12. Pohled na DPS s 4 řadami proků, vrchní vrstva

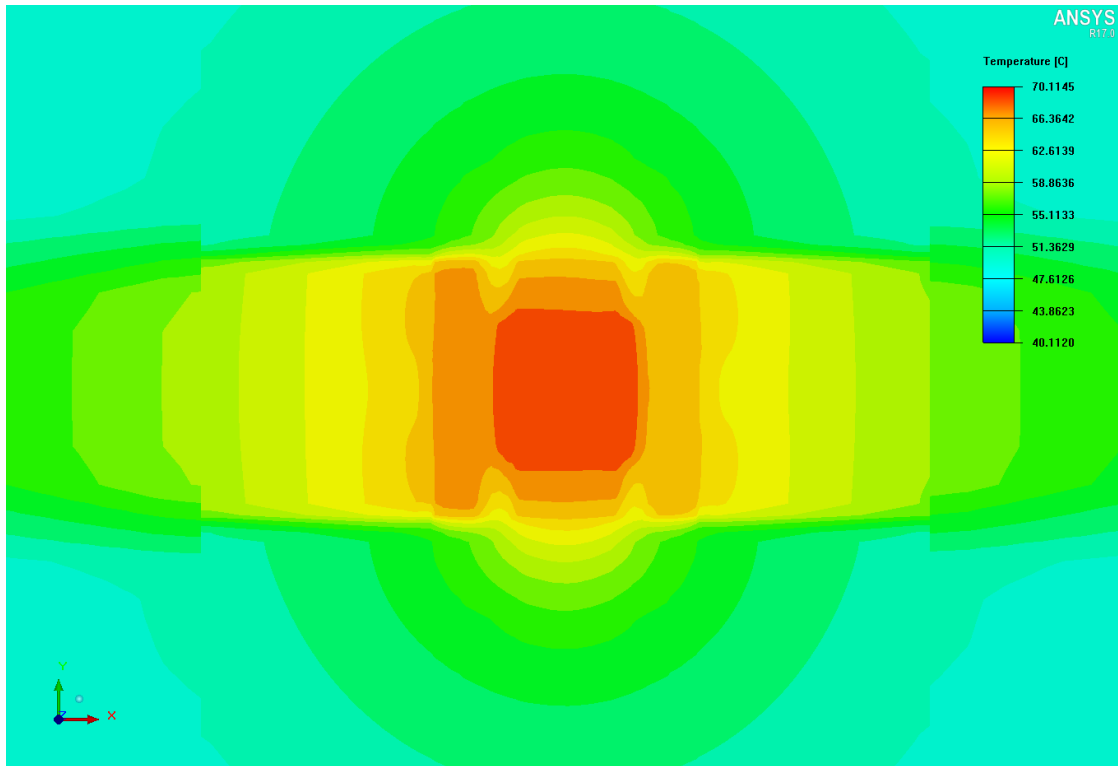


B. Rozložení teplot pomocí kontur

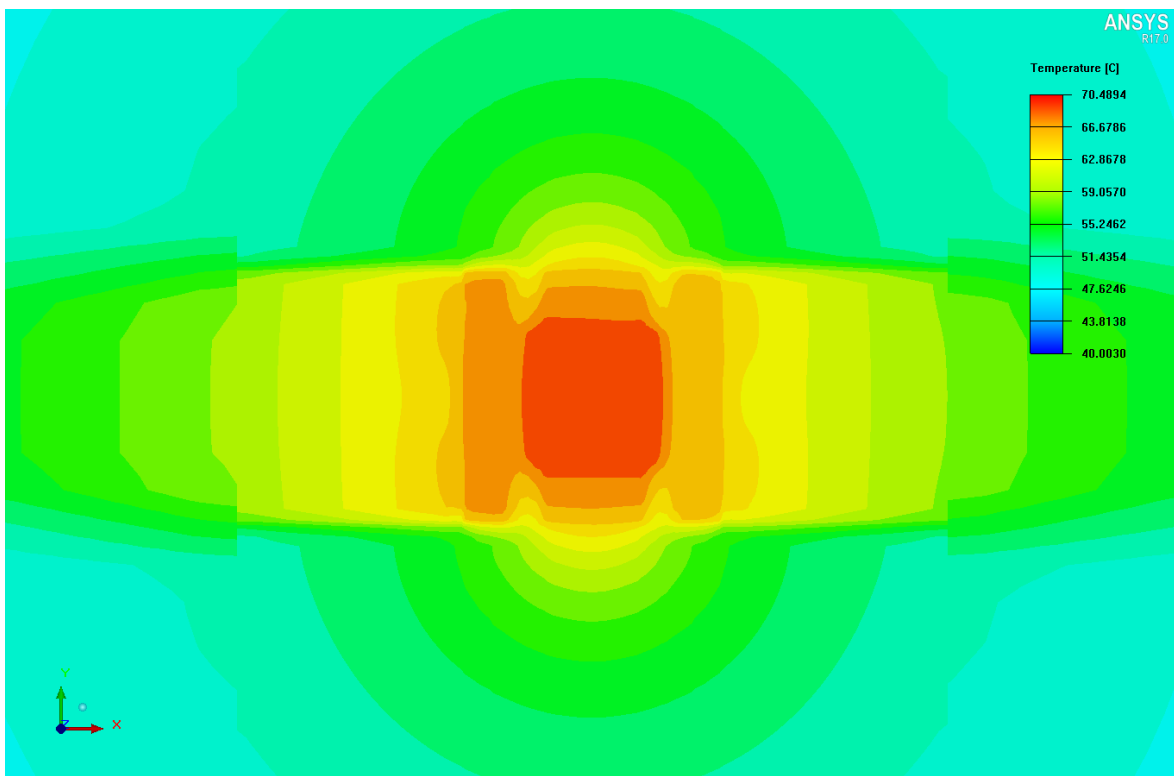
B.1. DPS bez prokovu, spodní vrstva



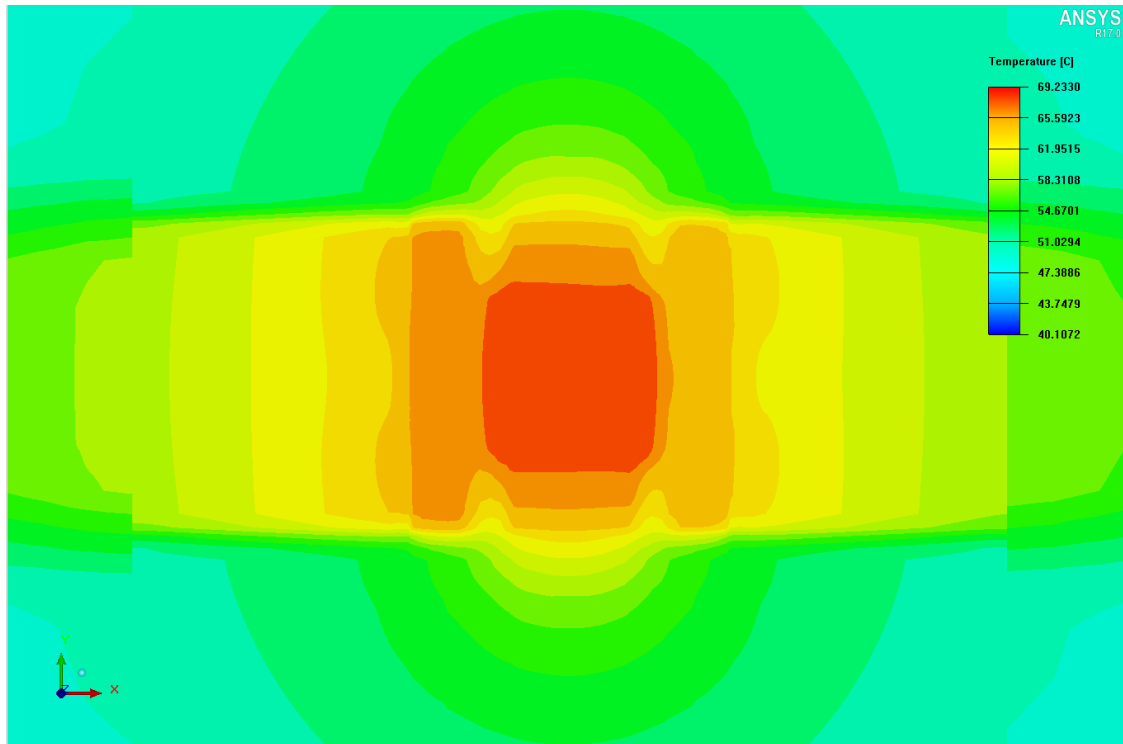
B.2. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokvy 0,30 mm



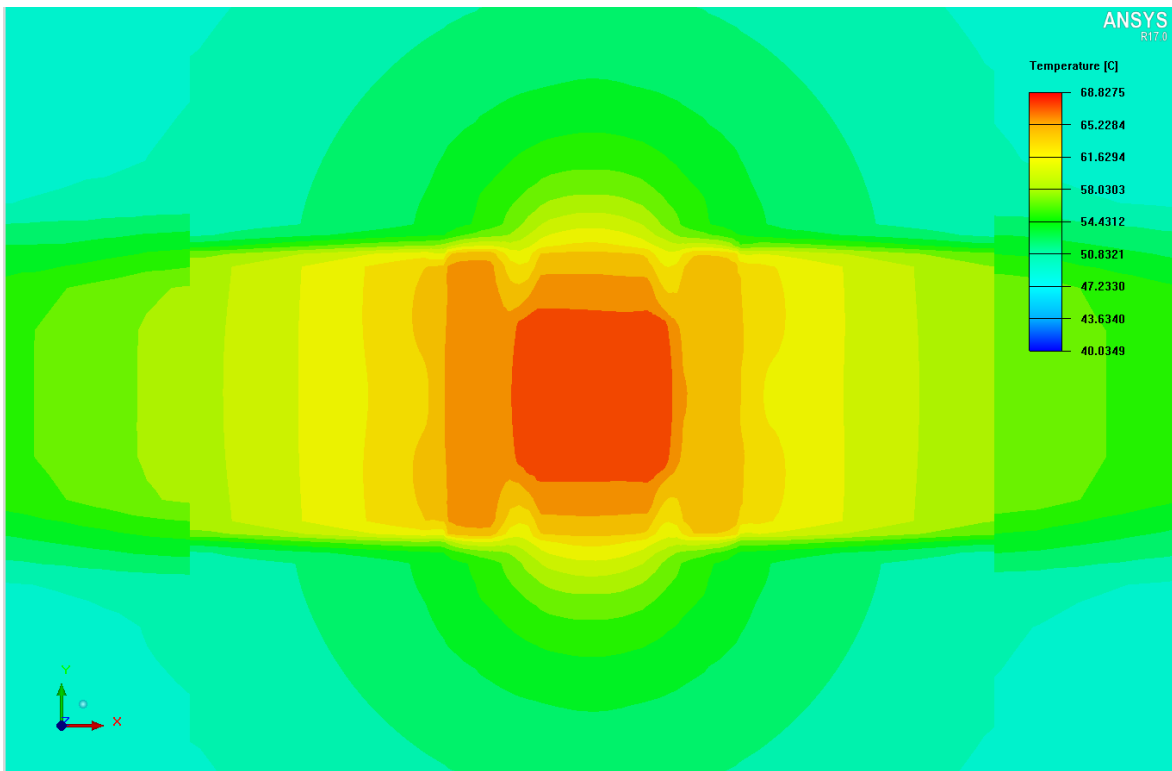
B.3. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 prokvy umístěné 1 mm od okraje měděného povrchu DPS



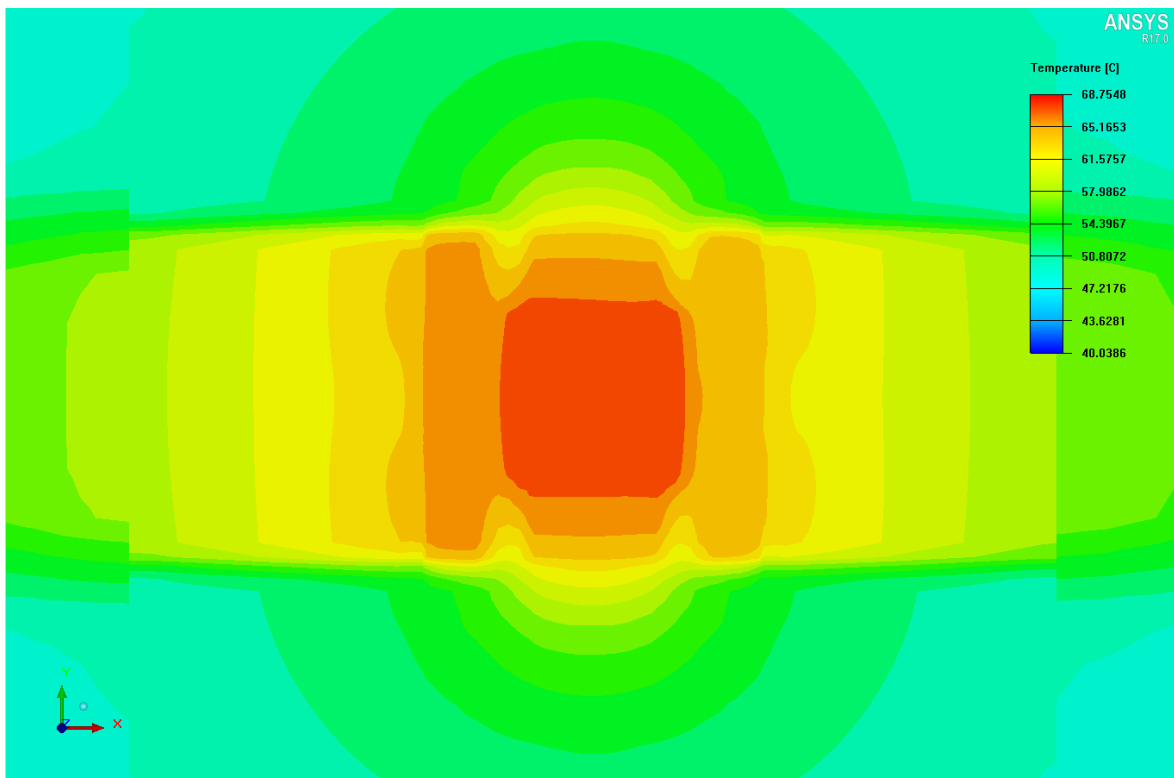
B.4. Detail nejteplejšího místa 2V DPS s 1 řadou 0,25 mm proků na obou stranách



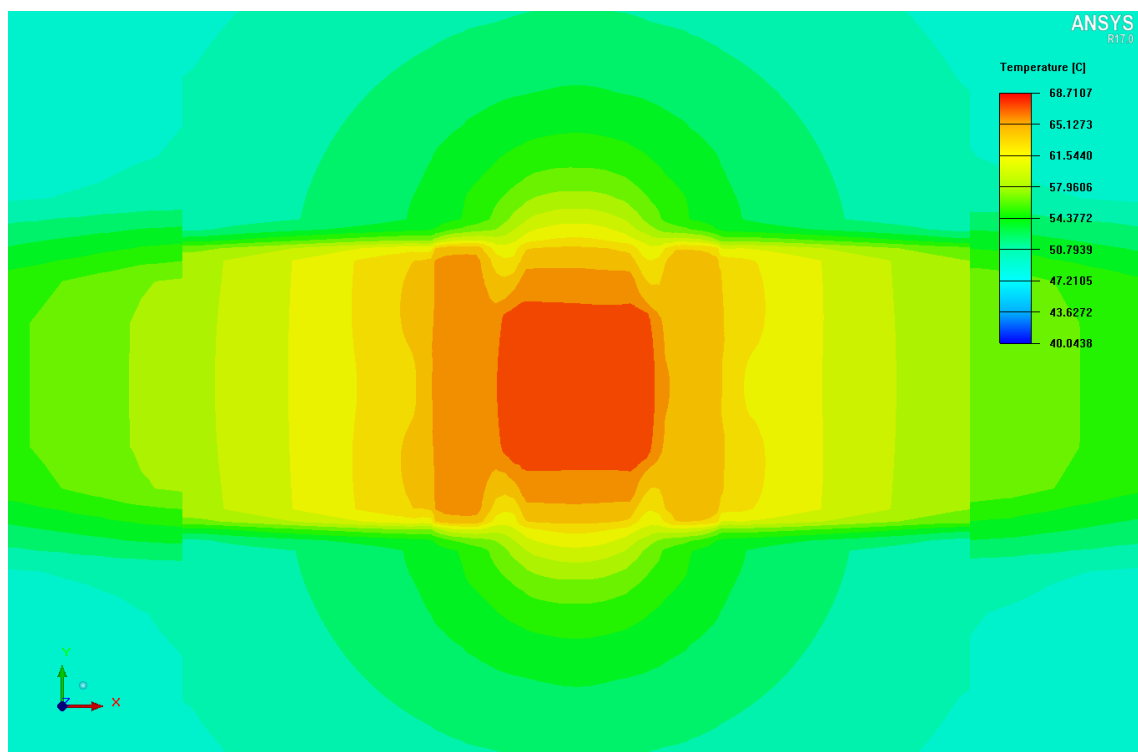
B.5. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 2 řadami 0,25 mm proků na obou stranách



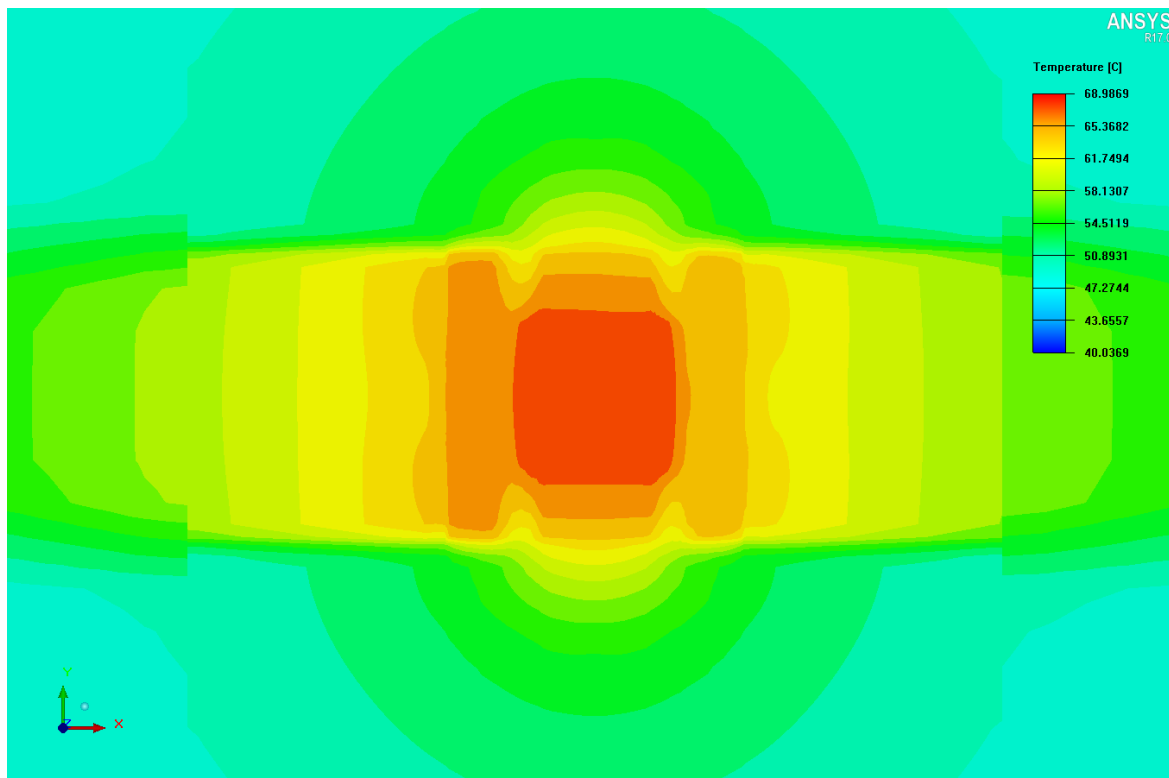
B.6. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 3 řadami 0,25 mm prokůvů na obou stranách



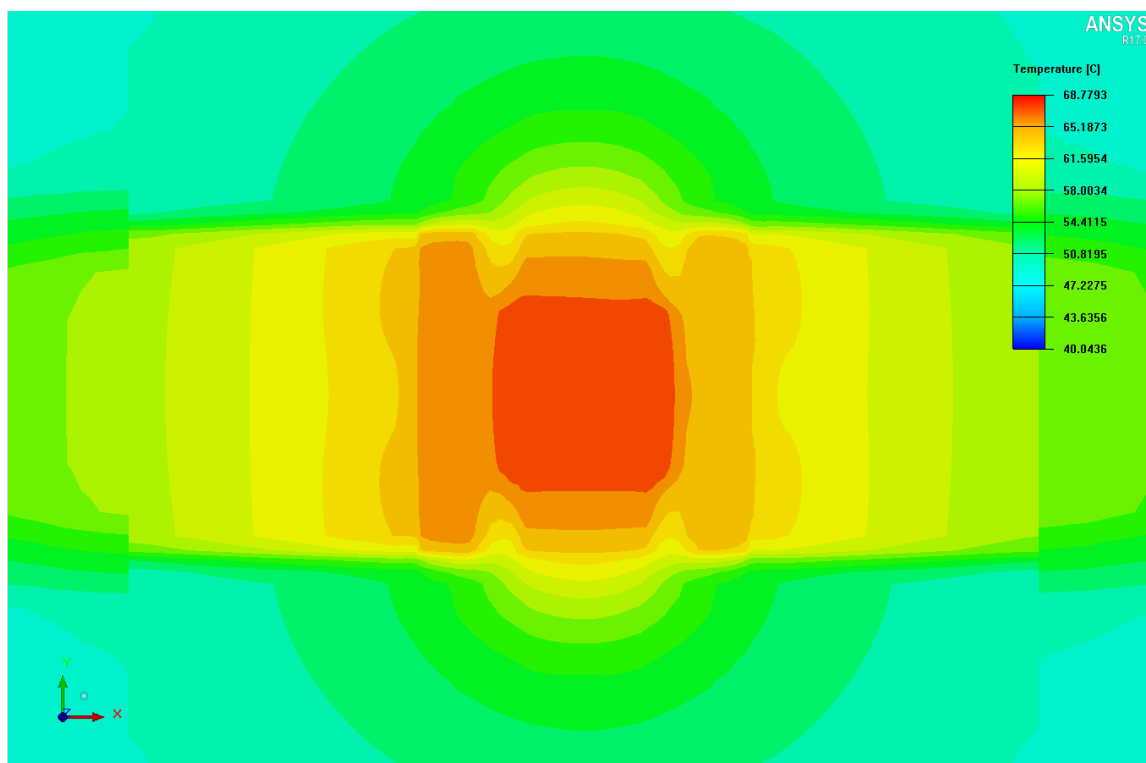
B.7. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 řadami 0,25 mm prokůvů na obou stranách



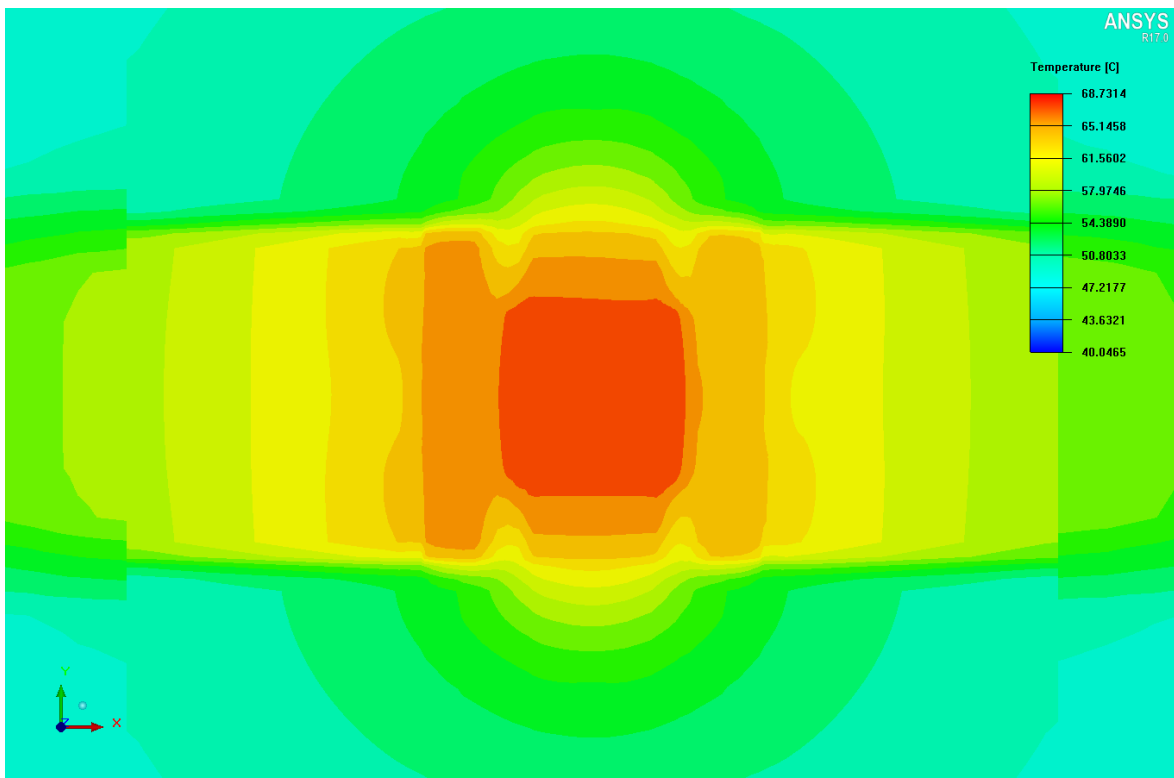
B.8. Detail nejteplejšího místa 2V DPS s 1řadou 0,50 mm prokůvů na obou stranách



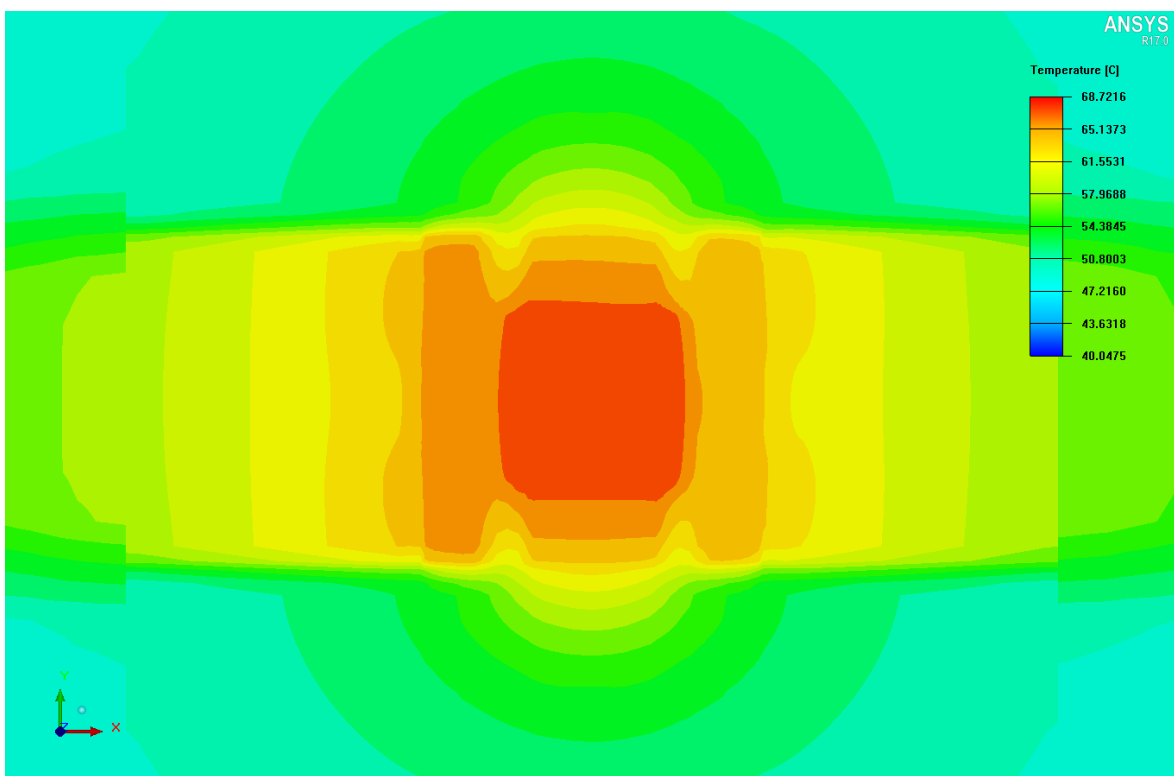
B.9. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 2 řadami 0,50 mm prokůvů na obou stranách



B.10. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 3 řadami 0,50 mm prokůvů na obou stranách



B.11. Detail nejteplejšího místa 2V DPS se 4 řadami 0,50 mm prokůvů na obou stranách

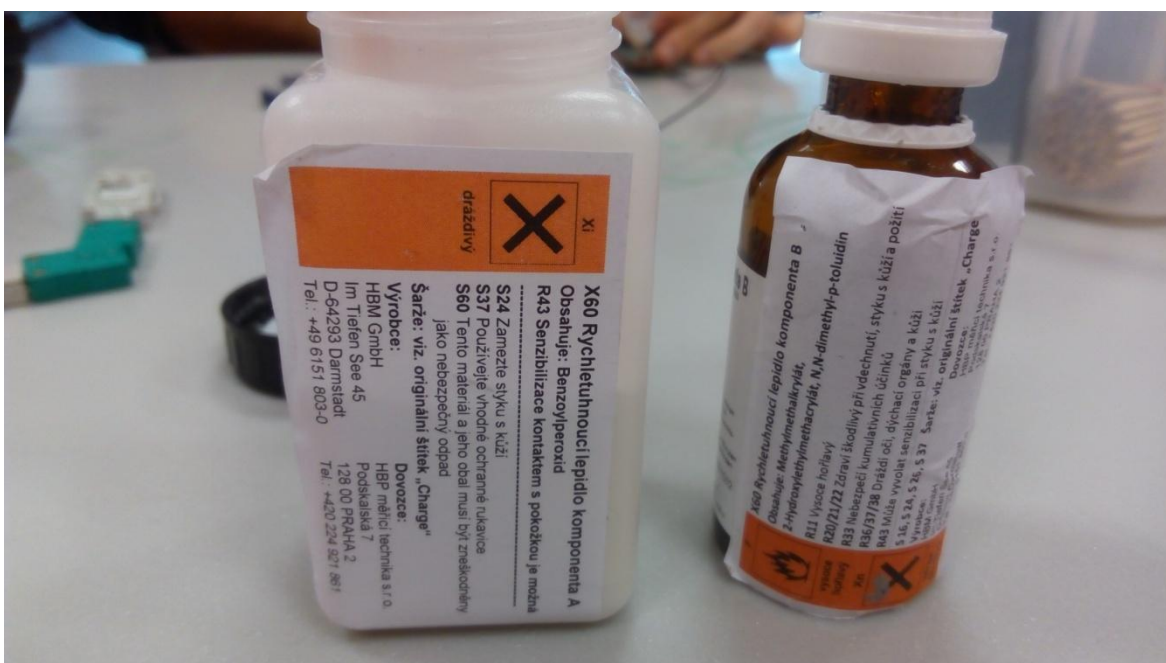


C. Měření na reálném vzorku

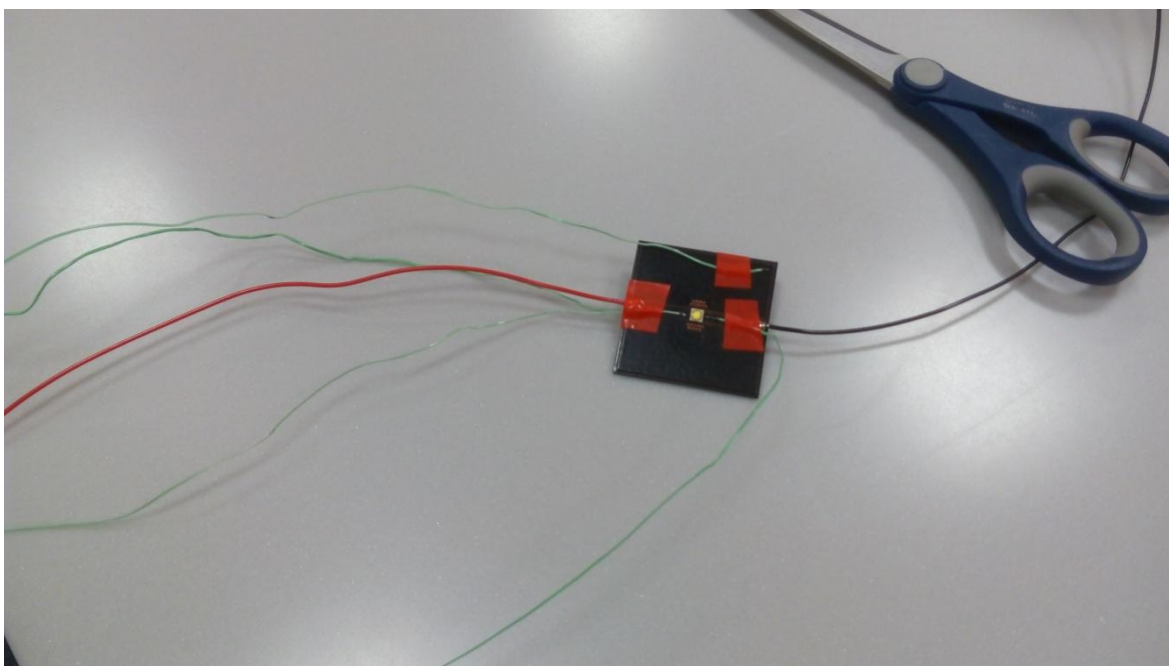
C.1. Dataloger



C.2. Dvousložkové lepidlo



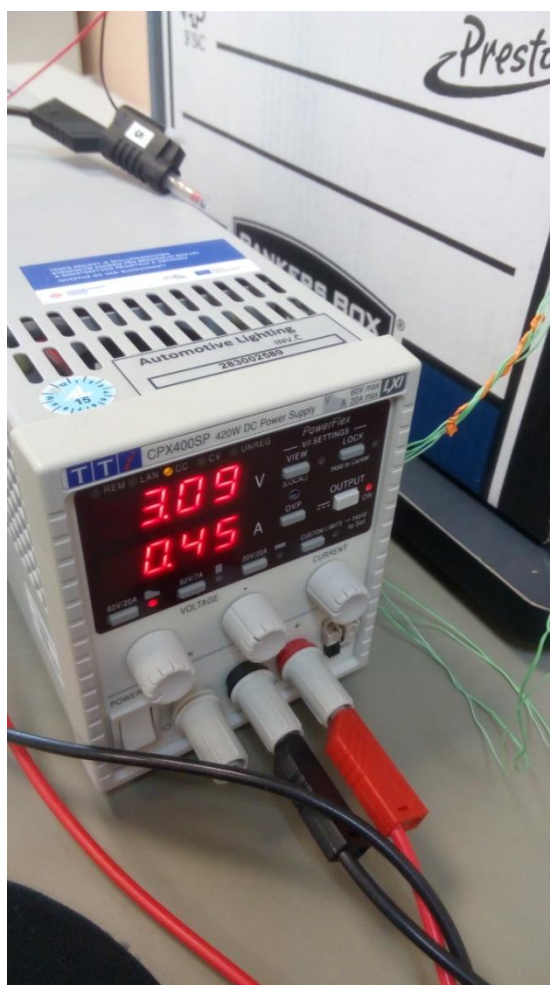
C.3. Postup při lepení



C.4. Měřicí box



C.5. Buzení proudovým zdrojem



C.6. Termokamera – počátek el. buzení



C.7. Termokamera – rozložení tepla kondukcí

