

Návrh pasivního chladiče pro osvětlení z LED

Bc. Zbyněk Vávra

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zbyněk VÁVRA**

Osobní číslo: **T10555**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Řízení jakosti**

Téma práce: **Návrh pasivního chladiče pro osvětlení LED**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši na téma vedení, sdílení a přestupy tepla
2. Popište vznik tepla na PN přechodu a jeho šíření v polovodičových součástkách
3. Vytvořte počítačový model chladiče LED
4. Provedte počítačovou simulaci přenosu tepla
5. Zhodnotte dosažené výsledky

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jaroslav Maloch, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

13. února 2012

Termín odevzdání diplomové práce:

18. května 2012

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato diplomová práce popisuje a řeší, jakými úskalími se musíme zabývat, pokud chceme využívat výkonné LED pro osvětlení. Budou zde simulovány různé způsoby uložení osvětlovacích těles (respektive chladičů, na nichž jsou umístěny) a následně je zjišťován dopad na účinnost chlazení.

Klíčová slova: LED, osvětlení, pasivní chladiče, sdílení tepla

ABSTRACT

In this dissertation describe and resolve, which we have to do, when we use the high-performance LED for lighting. There are simulating different methods of laying high-performance LED (especially passive cooler, which hold them). After detect how changing effectiveness of cooling process is.

Keywords: LED, illumination, passive cooler, heating share

Cesta jenž nemá cíl, je vždy ta nejtěžší.

Čínské přísloví

Prohlašuji, že jsem na bakalářské/diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 LED TECHNOLOGIE	10
1.1 JAK FUNGUJE LED	10
1.2 DRUHY LED	11
1.2.1 OLED technologie	12
1.3 POUŽITÍ DIOD	12
1.4 VÝHODY POUŽITÍ LED	12
1.5 NEVÝHODY LED [4]	13
2 TEPLLO	14
2.1 VZNIK TEPLA NA PN PŘECHODU.....	14
2.2 ŠÍŘENÍ TEPLA V POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTKÁCH.....	14
2.2.1 Vedení	14
2.2.2 Proudění	14
2.2.3 Vyzařování	15
3 DRUHY CHLADIČŮ	17
3.1 PRINCIP SDÍLENÍ TEPLA MEZI CHLADIČEM A LED.....	17
3.2 SDÍLENÍ TEPLA MEZI CHLADIČEM A OKOLÍM.....	18
3.2.1 Postup při výpočtu součinitele přestupu tepla z empirických rovnic.....	18
3.3 ROZDĚLENÍ CHLADIČŮ	19
3.3.1 Pasivní chladiče.....	19
3.3.1.1 Heatpipe	19
3.3.1.2 Vodní chlazení	20
3.3.2 Aktivní chladič	20
3.4 VÝPOČET PASIVNÍHO CHLADIČE	21
3.4.1 Výpočet tepelného odporu	21
3.4.2 Výpočet tepelné kapacity chladiče.....	21
3.4.3 Výpočet časové konstanty pro	21
3.4.4 Výpočet hmotnosti chladiče.....	21
3.5 MATERIÁLY	23
3.6 VÝROBA.....	23
II PRAKTICKÁ ČÁST	24
4 PRAKTICKÁ ČÁST NÁVRHU CHLADIČE	25
4.1 POUŽITÉ SOUČÁSTI	25
4.2 SOLIDWORKS – FLOW SIMULATION	26
4.2.1 Základní nastavení (shodné pro všechny natočení).....	26
5 VYHODNOCENÍ UMÍSTĚNÍ CHLADIČŮ – ROVNOVÁŽNÝ STAV	27
5.1 ŽEBRA CHLADIČE UMÍSTĚNA KOLMO NA PROUDÍCÍ VZDUCH (VODOROVNĚ)	27
5.1.1 Chladič položen na stole	27
5.1.2 Chladič vytočen o 30°	29
5.1.3 Chladič vytočen o 60 stupňů	31
5.1.4 Chladič vytočen o 90 stupňů	34

5.1.5	Chladič vytočen o 120 stupňů	37
5.1.6	Chladič vytočen o 150 stupňů	39
5.1.7	Chladič vytočen o 180 stupňů	42
5.2	ŽEBRA CHLADIČE UMÍSTĚNA ROVNOBĚŽNĚ S PROUDÍCÍM VZDUCHEM (SVISLE)	45
5.2.1	Chladič vytočen o 30 stupňů	45
5.2.2	Chladič vytočen o 60 stupňů	48
5.2.3	Chladič vytočen o 90 stupňů	51
5.2.4	Chladič vytočen o 120 stupňů	54
5.2.5	Chladič vytočen o 150 stupňů	57
5.3	CHLADIČ JE SVISLE, ŽEBRA VYTOČENY O 45°	60
6	VYHODNOCENÍ UMÍSTĚNÍ CHLADIČŮ – ČASOVÁ ZÁVISLOST	63
6.1	CHLADIČ POLOŽEN NA STOLE	63
6.2	CHLADIČ VYTOČEN O 90 STUPŇŮ, ŽEBRA VE VODOROVNÉ POLOZE	65
6.3	CHLADIČ VYTOČEN O 90 STUPŇŮ, ŽEBRA VE SVISLÉ POLOZE	67
6.4	CHLADIČ VYTOČEN O 180 STUPŇŮ	69
6.5	CHLADIČ VE SVISLÉ POLOZE, ŽEBRA VYTOČENY O 45 STUPŇŮ	70
7	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK	83
	SEZNAM PŘÍLOH	84

ÚVOD

Svítit musíme. Záleží pouze na nás, jestli si zvolíme levné, zastaralé a neefektivní způsoby spotřeby elektrické energie, nebo se posuneme s vývojem dopředu a využijeme nejmodernější způsob produkce světla. Řeč je o LED technologii. Oproti klasickým žárovkám disponují tisícinásobnou dobou svítivosti a zároveň výrazně nižší spotřebou. Při využívání klasických vláknových žárovek se spotřebovává drtivé množství elektrické energie na teplo. Toto teplo nijak nevyužíváme a slouží nám pouze jako druhotný zdroj tepla v místnosti, ale máme příjemný pocit (podobnost s ohněm).

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LED TECHNOLOGIE

LED je elektronické polovodičové zařízení složené ze specifických materiálů, kterými když prochází elektrický proud, začnou světélkovat. První LED, které kdy vyprodukovalo světlo viditelné lidskému oku (jednalo se o červené světlo), bylo v roce 1962. Později byly vyvinuty LED čipy vytvářející oranžové, zelené, modré a fialové světlo. Základní technologickou výzvou je maximalizovat vyprodukované množství světla při co nejnižší spotřebě elektrické energie.

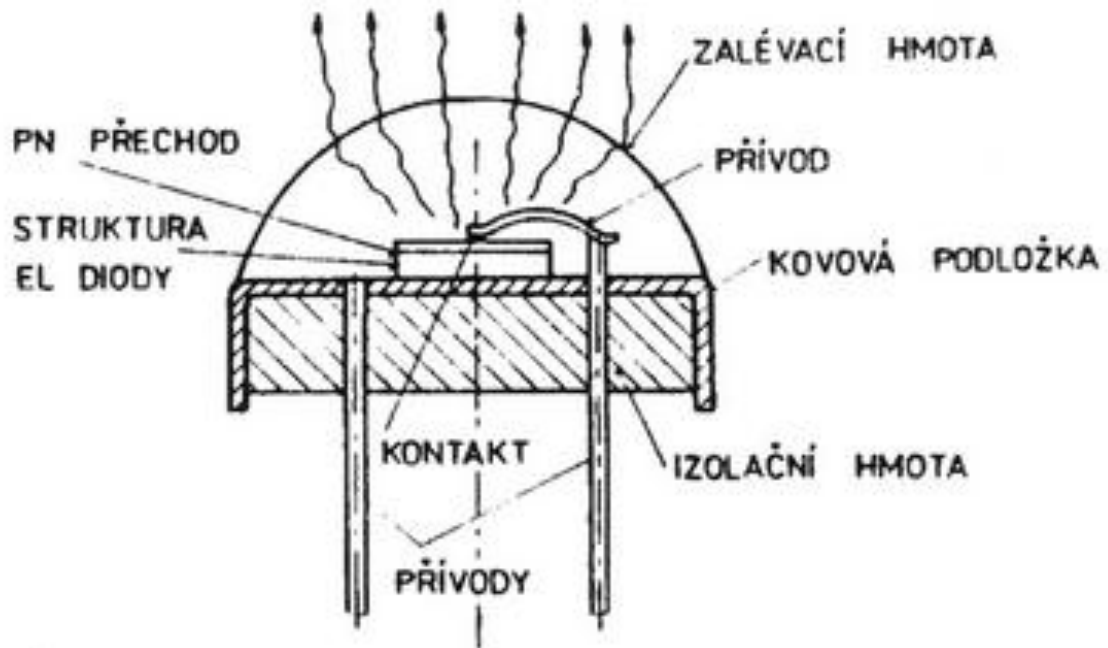
1.1 Jak funguje LED

LED dioda je tvořena ze dvou vodičů – anoda a katoda, které jsou zatavené v průhledném plastovém pouzdře s vypuklým povrchem, díky němuž se rozptyluje světlo (materiály pro výrobu LED mají vysoký index lomu a značná část vyzařovaného světla by se odrazela totálním odrazem zpět na rovinné rozhraní se vzduchem). Principem je, jak u běžné polovodičové diody, P-N přechod vytvořený z polovodičového materiálu. Tyto P-N přechody u LED rozlišujeme na homogenní a heterogenní.

Modré, fialové a super-svítivé jsou konstruovány na bázi heterogenních přechodů – přechody jsou na obou stranách složeny ze dvou různých polovodičových materiálů. Výhodou je výkonnost, nevýhodou složitost a vysoká cena.

Homogenní jsou naopak tvořeny na obou stranách jedním typem materiálu. Jsou levné a jednoduché.

Při průchodu elektrického proudu polovodičem v propustném směru dochází k přesunu elektronů z vyšší energetické vrstvy v atomech do nižší. To má za následek „uplatnění“ nahromaděného energetického rozdílu a dochází k vyzáření v podobě nekoherentního světla s úzkým spektrem – ultrafialového, viditelného světla. LED čipy, které se v poslední době používají pro vysoce výkonné LED, se již klasickým vzezřením LED nepochobají, ale princip je stále stejný.



Obr. 1 Průřez diodou

Mezi nejpoužívanější materiály patří sloučeniny III. a V. skupiny periodické soustavy prvků. Barva vyzařovaného světla je přímo ovlivněna chemickým složením polovodiče použitého na P-N přechod (např. křemíkové diody se používají pro emitaci červeného světla, směs galia a fosforu pro zelené a křemík-uhlík pro modrou barvu). [2]

Ze samotné podstaty LED vyplývá, že není schopná produkovat čistě bílé světlo. Dříve toho bylo dosaženo mícháním základních barevných složek (RGB spektrum) nyní se využívá luminoforu. Dioda produkuje modré světlo a přímo na čipu je žlutým luminoforem transformováno na bílé světlo. Kombinace modrého světla – žlutý luminofor je z cenových důvodů nejpoužívanější. V závislosti na použitém luminoforu může být záření nažloutlé až namodralé. [3]

Oproti jiným elektrickým zdrojům světla (žárovka, doutnavka, výbojka) mají tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami napětí a proudu.

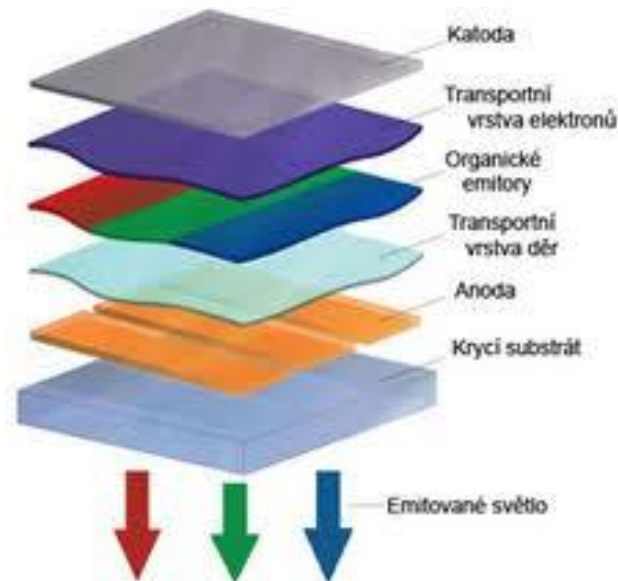
1.2 Druhy LED

LED se liší, jak bylo výše zmíněno, použitými prvky při výrobě polovodiče. To má vliv na jejich barvu.

Dále se liší umístěním kontaktů – SMD – diody určené k montáži do plošných spojů

1.2.1 OLED technologie

LED tvořené velice tenkými vrstvami organické hmoty na bázi plastu, nebo skla.



Obr. 2 Struktura OLED diody

Vrchní a spodní vrstvy jsou nejsilnějšími prvky, aby ochránily daleko tenčí organické vrstvy. Výsledná barva vyzářeného světla je vytvářena pomocí RGB spektra barev.

Velikou nevýhodou je různá doba stárnutí emitorů – nejrychleji modrá (až 50x rychleji oproti ostatním barvám), což udává krátkou dobu životnosti.

Na druhou stranu výhody jako ohebnost, nebo možnost nanášení na rozsáhlé plochy láká výrobce k experimentování s nimi.

1.3 Použití diod

Diody můžeme využívat různými způsoby. Od zviditelnění stavových informací (indikační diody), osvětlení míst, až po složité zobrazování pohyblivých obrazů – LED panely, televize (tady je tvrzení sporné, protože klasické OLED displeje zatím nemají široké použití. Televize označované jako LED mají pouze prosvětlovací panel složený z LED oproti klasickým vertikálním trubicím).

1.4 Výhody použití LED

- Produkují více světla na watt energie než žárovky, což je žádoucí v zařízeních napájených bateriemi, nebo v úsporných zařízeních.

- Mohou vyzářit světlo v požadované vlnové délce bez použití barevných filtrů
- Pouzdro může být navrženo k soustředění světla na určité místo (žárovky a zářivky většinou potřebují k soustředění vnější optickou soustavu)
- Při požadavku „stmívání“ (útlum světla) nemění svou barvu při snížení napájecího proudu (žárovky vydávají žlutější světlo)
- Odolnější vůči nárazům
- Snášení dobře časté vypínání a zapínání
- Extrémně dlouhá životnost (cca. 20 000 – 40 000 hodin). Výkonnější LED musí být chlazeny, při překročení teploty (cca. 60°C LED, 150-200°C P-N přechod), jejich výdrž velice rychle klesá
- Mají rychlý nástup plné intenzity osvětlení.
- Ekologickým hlediskem mimo nízké spotřeby energie je i to, že při jejich výrobě není použita rtuť

1.5 Nevýhody LED [4]

- Měrný výkon u LED oproti klasickým žárovkám je zhruba 5x vyšší. Pokud tedy chceme nahradit žárovku s výkonem 50W, musíme použít LED s výkonem přes 10W. Pouze tak získáme, co do množství světla adekvátní náhradu. Cena takto výkonných zdrojů se stále pohybuje ve stovkách korun.
- LED jsou monochromatické zdroje, tj. vyzařují pouze v úzké části spektra. To může způsobit problémy s rozlišováním barev
- Výkonové LED mají výkon v jednotkách wattů. Odpovídající světelný tok je vyzařován z malé plochy čipu, která bývá obvykle v milimetrech čtverečních. To má za následek velký jas povrchu zdroje. Svítidla vybavená těmito odkrytými zdroji bychom neměli umisťovat do našeho zorného pole. Světelný tok na úrovni zářivky, nebo výbojky není běžně k dispozici a pro osvětlení, kde je velký výkon požadován, je proto nelze použít.

2 TEPLLO

Tepelné poměry v elektronických zařízeních významným způsobem ovlivňují jejich spolehlivost. Doporučovaná maximální teplota polovodičového přechodu se udává v rozmezí 150°C – 200°C. V případě, že není uvolňované ztrátové teplo dostatečně odváděno, dochází ke změnám elektrických parametrů zařízení. Každé snížení teploty o 10°C prodlužuje o životnost polovodiče o $10^{2,5}$. Z tohoto důvodu a přihlédnutím k pořizovací ceně musíme velice dbát na správné chlazení.

2.1 Vznik tepla na PN přechodu

Teplo je druhem energie, která v elektronických systémech vzniká ztrátami z energie elektrické. Je na ni nahlíženo jako na ztrátový výkon, protože se spotřebovává z energie, z níž je zařízení napájeno. Obecný trend ve výrobě elektronických systémů je stálé snižování rozměrů a zvyšování výkonu. Umístění více funkcí v menším pouzdře s sebou přináší větší hustotu součástek, z toho také vyplývající větší množství tepla, které je v jednotce objemu rozptýleno jako ztrátový výkon v určitém čase. Toto teplo je zapotřebí efektivně odvádět a minimalizovat. Proto jsou tepelné vlastnosti důležitým faktorem, který ovlivňuje výkonost i spolehlivost celého elektronického zařízení.

2.2 Šíření tepla v polovodičových součástkách

Elektronické součástky jsou ochlazovány přirozeným odvodem tepla, který nastává v uplatnění principů přenosu tepelné energie. Základní způsoby sdílení tepla jsou:

2.2.1 Vedení

Zprostředkován buď volnými elektrony, nebo přenosem kmitů krystalové mřížky látky, který se podobá akustickému vlnění. Při takovém sdílení pohybu vznikne vlna přenášející energii kmitavého pohybu.

2.2.2 Proudění

Částice látky mění v prostoru svou polohu a přitom unášejí svou energii s sebou. Děj nastává v proudících kapalinách a plynech. U přirozeného proudění vznikne pohyb v důsledku hustot tekutin, které se vyrovnávají. Rozdíly přitom nastávají vlivem nestejných teplot v objemu.

Nucené proudění tepla vzniká vnějšími silami (např. ventilátorem). Používá se k zesílení přenosu tepla a jeho výhodou je, že proudění může nastat i proti teplotnímu spádu.

Rozeznáváme 2 typy proudění:

- Laminární – nastává při malých rychlostech. Částičky tekutiny se pohybují paralelně.
- Turbulentní – při vyšších rychlostech proudícího média. Částičky tekutiny se vzájemně promíchávají a dochází ke sdílení tepla (ohřev, nebo chlazení je účinnější). Teplo odvedené médiem z chladiče je přímo úměrné jeho ploše a součiniteli přenosu tepla.

Chladící médium	Nucené proudění (W/m ² *C)
plyn	10-100
olej	30-1000
voda	1000-3000
voda ve varu	4500
nasycená pára	8000-10000

Tab. 1 Součinitel přenosu tepla v závislosti na chladícím médiu

2.2.3 Vyzařování

Teplo se přenáší elektromagnetickým zářením (i ve vakuu, nevyžaduje látkové prostředí). Přenos energie probíhá mezi dvěma tělesy, i když teplota prostředí mezi nimi je podstatně vyšší nebo nižší, než je teplota obou těles. Důležité je, že každé těleso, které má nějakou teplotu je zářičem. S vyzařováním mluvíme i o sálavosti. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která závisí na druhu, barvě a povrchu materiálu.

Materiál a úprava povrchu	Součinitel sálavosti
leštěný hliník	0,05
leštěná měď	0,07
leštěný nikl	0,17
pískovaný hliník	0,4
oxidovaná měď	0,7
válcovaná ocel	0,66
eloxovaný hliník	0.15-0.87
barevný smalt	0.87-0.91
černý lesklý nátěr	0,88
černý matový nátěr	0,97
bílý matový nátěr	0,9
šedý nátěr	0.84-0.91

Tab. 2 Součinitel sálavosti v závislosti na materiálu a povrchové úpravě

Dle tabulky zjišťujeme, že ideální stav je co nejhrubší povrch (zvýšení plochy) a chemicky načerněný. Černě natírat nemá smysl, protože se hrubý povrch zacílí barvou a samotná barva působí navíc jako izolace.

3 DRUHY CHLADIČŮ

Chladič je zařízení, které díky svým fyzikálním vlastnostem je schopné odvádět teplo z místa vzniku do okolního prostoru. Při zahřátí LED na kritickou teplotu se snižuje její životnost řádově i o tisíce hodin, proto je nutností, aby měla dioda své chlazení.

3.1 Princip sdílení tepla mezi chladičem a LED

Při styku LED a chladiče dochází ke kondukcí – sdílení tepla předáváním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Základním předpokladem je rozdílná teplota obou systémů a co největší plocha (nelze dodržet z důvodů miniaturních rozměrů diod) a co možná nejtěsnější spojení mezi diodou a chladičem (toho dosahujeme speciálními pastami s vysokou teplotní vodivostí). Můžeme využít vzorec pro sdílení tepla přes rovinnou stěnu.

Fourierův zákon vedení tepla

$$d\dot{Q} = -\lambda \frac{dt}{dx} dA \quad (1)$$

Intenzita toku tepla

$$q = \frac{dt}{dx} \quad (2)$$

$$q = \frac{dQ}{dA}$$

Po integraci výše uvedených vztahů dostaneme

$$\dot{Q} = \lambda \frac{t_0 - t_1}{\delta} \cdot A \quad (3)$$

Q...teplo prostupující napříč chladičem [W]

λ ...součinitel tepelné vodivosti [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]

A...teplosměnná plocha [m^2]

t_0 ...teplota předávaná chladiči [K]

t_1 ...teplota okolí [K]

3.2 Sdílení tepla mezi chladičem a okolím

Při sdílení tepla mezi chladičem a okolím probíhá za pomoci konvekce.

Newtonův ochlazovací zákon

$$dQ = \alpha \cdot \left| \langle t_0 \rangle \dots t_p \right| \cdot dA \quad (4)$$

Po integraci dostáváme vztah

$$\dot{Q} = \alpha \cdot \left(\langle t_0 \rangle \dots t_p \right) \cdot A \quad (5)$$

Q...teplo předané chladičem okolí [W]

α ...součinitel přestupu tepla [W.m⁻².K⁻¹]

A...teplosměnná plocha [m²]

$\langle t_0 \rangle$...střední teplota tekutiny [°C]

T_p...teplota povrchu stěny u tekutiny [°C]

Rozeznáváme několik typů konvekce a v závislosti na typu se určuje součinitel přestupu tepla.

Proudění	Beze změny skupenství	Volná konvekce	Duplikátory
		Nucená konvekce	Trubkové systémy
	Se změnou skupenství	Kondenzace	
		Var	

Tab. 3 Druhy konvekce v závislosti na součiniteli přestupu tepla

3.2.1 Postup při výpočtu součinitele přestupu tepla z empirických rovnic

Pro výpočet součinitele přestupu tepla máme přesně dány kroky, kterými se řídíme.

- 1) O jaký druh konvekce se jedná v daném případě
- 2) Vybereme vhodný vztah, nebo skupinu vztahů
- 3) Zjistíme, jak jsou voleny charakteristické veličiny

- 4) Pokud tvar vztahů nebo hodnoty konstant ve vybraném vztahu závisí na hodnotách některých nezávisle proměnných (např. Re u nucené konvekce)
- 5) Vypočteme hodnoty všech potřebných bezrozměrných argumentů a zjistíme, zda naše podmínky leží uvnitř oboru platnosti vztahu, který chceme využít
- 6) Určíme součinitel přestupu tepla

3.3 Rozdělení chladičů

Chladiče rozdělujeme podle jejich konstrukce na pasivní a aktivní.

3.3.1 Pasivní chladiče

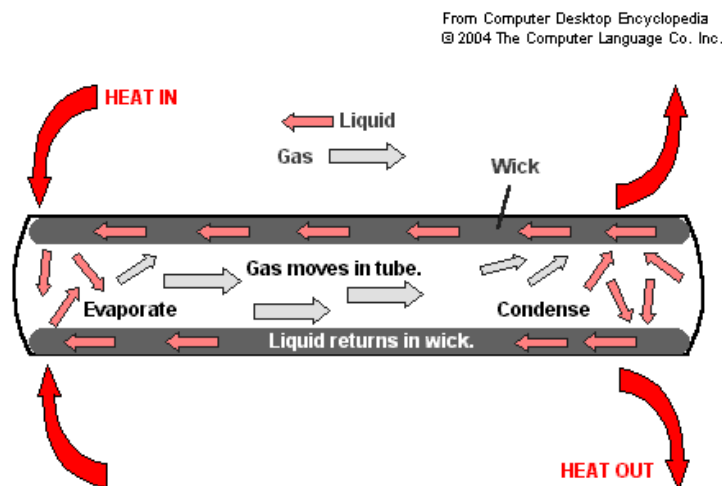
U pasivního chladiče využíváme přirozených vlastností chladicího média (nejčastěji vzduchu), u nichž vzniká pohyb rozdílem teplot.

Jeho tvary musí být co nejčlenitější, využíváme žeber s co největším povrchem.

3.3.1.1 Heatpipe

Speciální typ pasivního chladiče. Dokáže přenášet velké tepelné výkony při zachování malého rozdílu teplot. Přenos tepla je založen na odpařování a kondenzaci

Jedná se o hermeticky uzavřenou měděnou nebo ocelovou trubici, ve které je pracovní látka (voda, alkohol, propan-butan apod.). Zahříváme-li jeden konec a na druhý umístíme chladič, začne se pracovní médium odpařovat. Tím dochází ke zvýšení tlaku. Na chlazeném konci páry kondenzují. Tím předávají teplo, které bylo spotřebováno k odpaření. Kondenzát teče, nebo vzlíná zpět. [1]



Obr. 3 Princip heatpipe

3.3.1.2 Vodní chlazení

Snad jen pro doplnění uvádím systém, který se používá při chlazení výkonných počítačových sestav. Princip je stejný jak u aktivního chladiče, jen médiem pro odvod nadbytečného tepla je voda.

Nejčastěji zahřívané součásti, jako jsou procesor, grafická karta a paměti RAM mají na sobě uloženy tepelné výměníky. Tyto výměníky (pasivní chladiče vodotěsně uzavřeny) předají teplo protékající vodě, rozháněné čerpadlem. Zahřátá voda jde do velkého sloupového pasivního chladiče. Zde se předává naakumulované teplo do stěn a přes žebra pasivního chladiče přestupuje do okolí.

Výhodou je použité médium – voda má vyšší tepelnou kapacitu, než vzduch (menší tepelné výměníky při zachování účinnosti chlazení). Prvek pasivního sloupového chladiče působí na stole velice efektivně.

Nevýhoda je poškození chlazených součástí při úniku chladicího média a podstatně vyšší pořizovací cena.

3.3.2 Aktivní chladič

Zařízení, které využívá k ochlazení nuceného pohybu chladicího média (kapalina, vzduch).

Nucený pohyb je vytvářen např. ventilátorem, který žene chladicí médium (nejčastěji vzduch) přes žebra chladiče.

Výhodou oproti pasivnímu chladiči je možnost použít menší radiátor, neboť je množství protékajícího vzduchu několikrát vyšší. Můžeme použít i chladič, který není tak členitý (nemá takovou teplosměnnou plochu) opět díky několikanásobnému množství protékajícího vzduchu.

Nevýhodou je nutnost zdroje elektrické energie pro provoz ventilátoru a při provozu mohou vznikat rázy.

3.4 Výpočet pasivního chladiče

3.4.1 Výpočet tepelného odporu

Pro výpočet tepelného odporu mezi PN přechodem okolím (chladičem)

$$R_j = \frac{T_j - T_o}{P_{ztr}} \text{ [}^\circ\text{C/W]} \quad [2]$$

R_j ...tepelný odpor

T_j ...teplota přechodu

T_o ...teplota okolí

P_{ztr} ...ztrátový tepelný výkon – počítáme z úbytku napětí na součástce a procházejícího el. proudu

3.4.2 Výpočet tepelné kapacity chladiče

$$C_s = c \cdot m \text{ [J/}^\circ\text{C]} \quad [3]$$

C_s ...tepelná kapacita chladiče

c ...měrná tepelná kapacita slitiny, ze které je chladič zhotoven

m ...hmotnost chladiče

3.4.3 Výpočet časové konstanty pro

Časovou konstantu budeme mít zadanou. Výpočet je uveden pouze jako informativní.

$$\tau = R_j \cdot C_s \text{ [s]} \quad [4]$$

3.4.4 Výpočet hmotnosti chladiče

Z výše uvedených vztahů můžeme vyvodit vzorec, který nám pomůže při stanovení správného chladiče – získáme jeho hmotnost.

$$m = \frac{\tau \cdot P_{ztr}}{(T_j - T_o) \cdot c} \text{ [kg]} \quad [5]$$

m ...hmotnost chladiče

τ ...čas do ustáleného stavu chladiče

P_{ztr} ...ztrátový tepelný výkon

T_j ...teplota přechodu

T_o ...teplota okolí

c ...měrná tepelná kapacita slitiny použitá na chladič

Z výše uvedeného vzorce můžeme vypočítat výšku, při předem daných konstrukčních rozměrech (např. chladič se musí vejít do předem připraveného otvoru – žebra budou vyvedena ven)

Výpočet chladiče je závislý dále na ploše chladiče a jeho poloze

$$R_j = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C^{0,25} + \frac{650}{S} \cdot C \quad [5]$$

S ...plocha chladiče [cm^2]

d ...tloušťka desky [mm]

λ ...tepelná vodivost chladicí desky $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$

C ...korekční faktor [-]

Provedení chladiče	Korekční Faktor C
Vodorovný, bez povrchové úpravy	1
Vodorovný, černěný	0,5
Svislý, bez povrchové úpravy	0,85
Svislý, černěný	0,43

Tab. 4 Vliv umístění a povrchové úpravy na vyzářování

3.5 Materiály

Materiál	Tepelná vodivost (W/m ² K)
Ag	422
Cu	384
Al	201
Dural (Al+)	140-190
Kovar	167
Pb	34
Fe	80
slída	0,5
sklo	0.7-1.2
epoxid	0,26
azbest	0,11
PVC	0,44
křemík	0,83
korek	0,037
voda	0,651
vzduch	0.01-0.02
dusík	0,0238

Tab. 5 Přehled materiálů a jejich tepelných vodivostí

Materiály z nich zhotovujeme chladiče, musí mít co nejlepší tepelnou vodivost. Dle výše uvedené tabulky by bylo ideální využít stříbro. V praxi se používají dva níže druhy materiálů – hliník a měď a potažmo jejich slitiny. Každý má své pro i proti.

Měď je schopná rychleji odvést teplo od součástky, ale hliník dokáže více tohoto tepla nakumulovat. Avšak spojování mědi a hliníku je problematické, protože vlivem případné vlhkosti vytvoří galvanický článěk. U takto kombinovaných chladičů musí být „mezivrstva“.

3.6 Výroba

Pokud potřebujeme jednoduchý pasivní chladič, můžeme vzít základní materiál (trubičku, tyčinku) a na ni naskládat „lístičky“ plechu, které připájíme.

Ve velkosériové výrobě se chladiče vyrábí tažením. Samotné žebra se frézují, abychom docílili co největší teplosměnné plochy.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 PRAKTICKÁ ČÁST NÁVRHU CHLADIČE

S přihlédnutím k mému studijnímu oboru (řízení jakosti) jsem praktickou část, spíše než návrh nového chladiče, pojal jako kontrolu stávajícího (např. při osázení stávajícího chladiče výkonnějšími LED). Jsou brány v úvahu možné natočení chladiče v rozmezí $0^\circ - 180^\circ$ i poloha žeber. Zvolil jsem i natočení žeber chladiče na cca 45° .

Chladič s LED slouží jako zdroj osvětlení k rychloběžné kameře.

4.1 Použité součásti

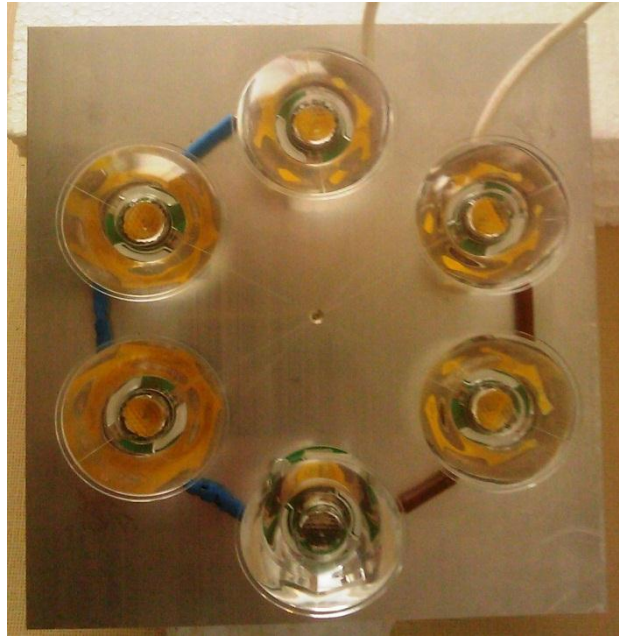
Chladič je z duralu s rozměry 138x150x50 mm. Žebra jsou orientována pouze v jednom směru (rovnoběžně s delší stranou). Horní plocha je rovná, bez jakýchkoliv žeber. Je určena pouze k montáži LED.

LED je použitých 6 ks. Jedná se o výkonné zdroje světla každý s přibližným výkonem 10W. Na diodách jsou umístěny kolimátory, které slouží k usměrnění světelného toku přímo na natáčený objekt.

Při spojení držáků LED s chladičem jsou použity šroubky M3x12 (v modelu s nimi není počítáno). Vlivem rozdílných materiálů chladiče a tělesa držáku diody je nutné použít pružné podložky pro uchycení držáků. Vznik případného pnutí by mohl deformovat (prohnout) těleso držáku a značně by poklesla teplosměnná plocha. V horším případě by mohlo dojít přímo k prasknutí SMD čipu. Tak či tak oboje by mělo jako následek výměnu LED.

Dále je mezi držákem a chladičem teplovodivá pasta. Její tepelná vodivost není zdaleka tak vysoká, jak mají kovy. Ale má značně vyšší tepelnou vodivost než vzduch. Pasty nanášíme co nejmenší množství – jen aby se zacelily nerovnosti na povrchu držáku a vznikla vyšší teplosměnná plocha.

K přihlédnutím k ročnímu období, byla výchozí teplota (zahřátí chladiče i LED) nastavena na 32°C .



Obr. 4 Testovaný model chladiče

4.2 SOLIDWORKS – FLOW SIMULATION

Veškeré simulace byly prováděny v programu SOLIDWORKS v nastavbě flow simulation. Model chladiče i s umístěním LED byl předchystán. Má práce spočívala v nastavení okrajových podmínek, stanovení výsledných veličin a

4.2.1 Základní nastavení (shodné pro všechny natočení)

- Stanovení hranic – nastavení hranic, kde se provádí simulace
- Nastavení výkonu jednotlivých LED (10W/LED)
- Výchozí teplota byla nastavena na 32°C
- Pro časovou závislost stanovený čas na 900s (v rovnovážném stavu není zahrnuto)
- Stanovení cílů – průměrné a maximální teploty chladiče a jednotlivých LED

5 VYHODNOCENÍ UMÍSTĚNÍ CHLADIČŮ – ROVNOVÁŽNÝ STAV

V těchto příkladech se jedná o ustálený stav. Vzhledem k občas špatně čitelné maximální teplotě, uvádím v textu nad obrázky.

Obrázky jsou voleny jako řezy středem chladiče v osách kolmo a vodorovně s žebry. Je použit i pohled shora, aby byly viditelné vektory rychlosti

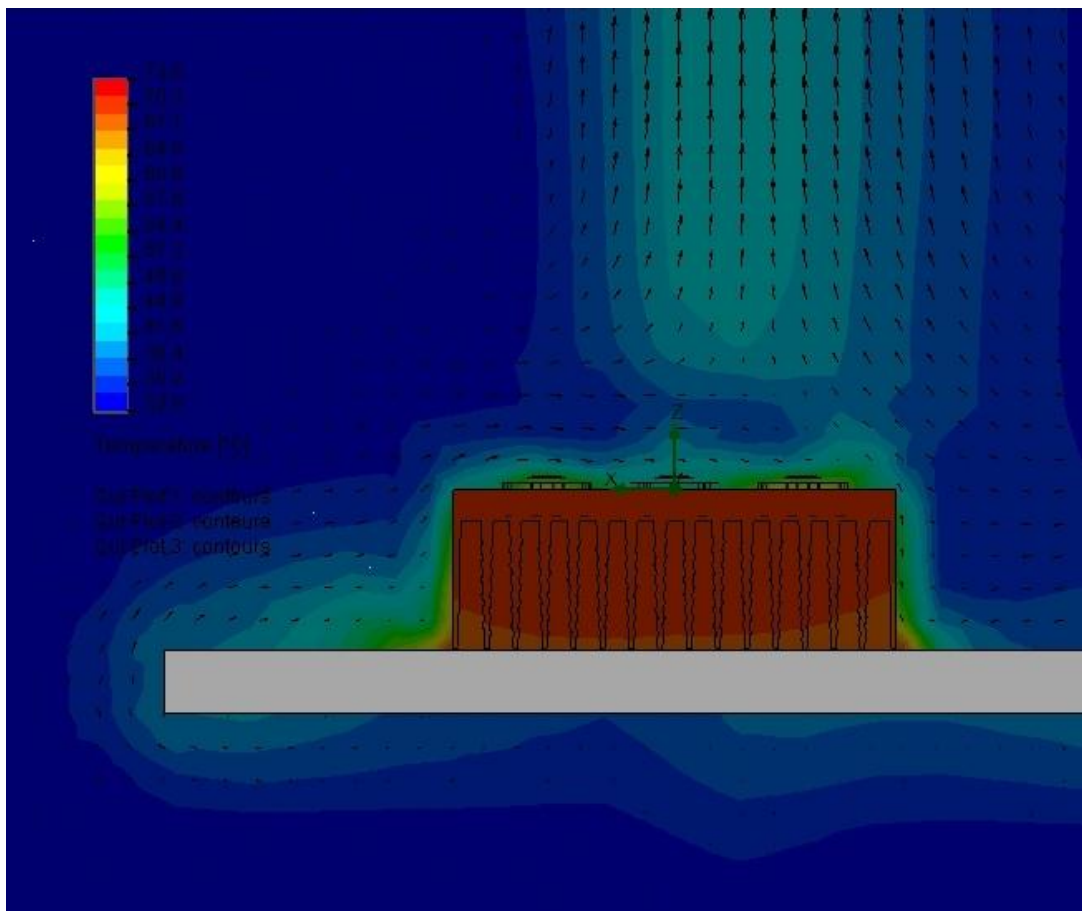
Vektory (šipky) znázorňují rychlost a směr proudění vzduchu. Jejich hustota je volena variabilně (10mm nebo 5 mm rozestupy) s ohledem na přehlednost a vypovídací funkci. Platí, čím kratší vektor, tím nižší rychlost proudění.

5.1 Žebra chladiče umístěna kolmo na proudící vzduch (vodorovně)

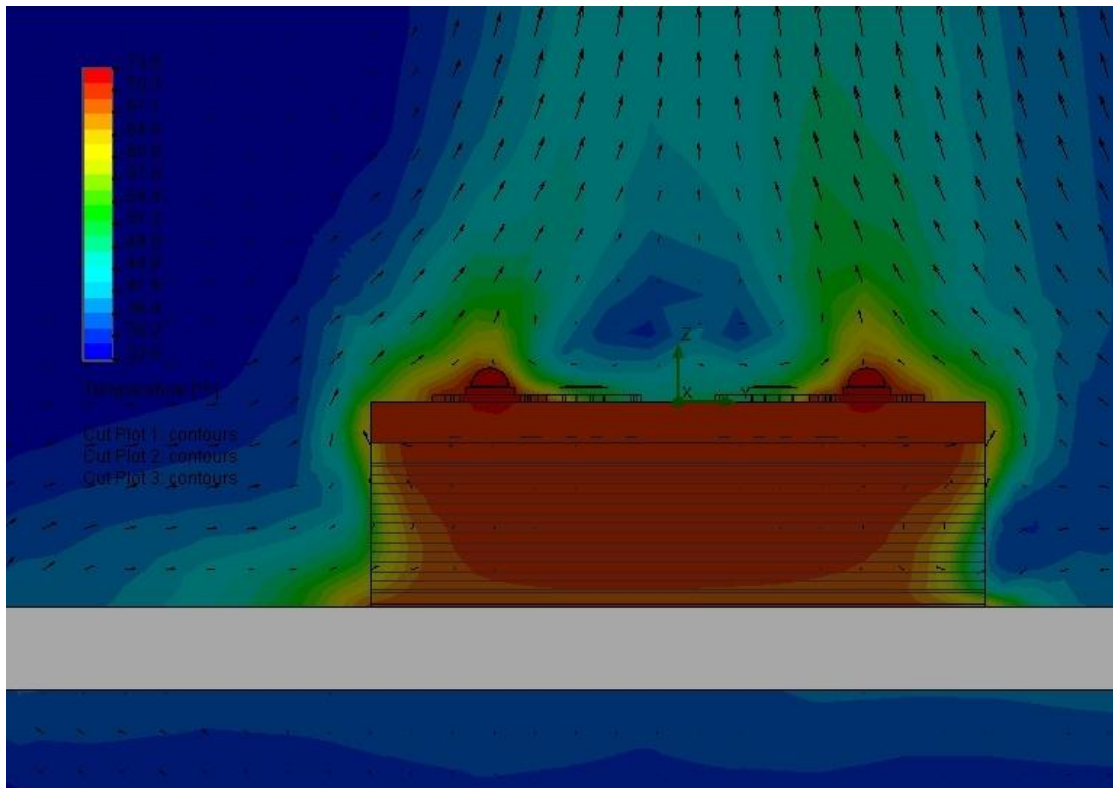
5.1.1 Chladič položen na stole

V tomto případě byl pouze chladič položen na dubovém stole.

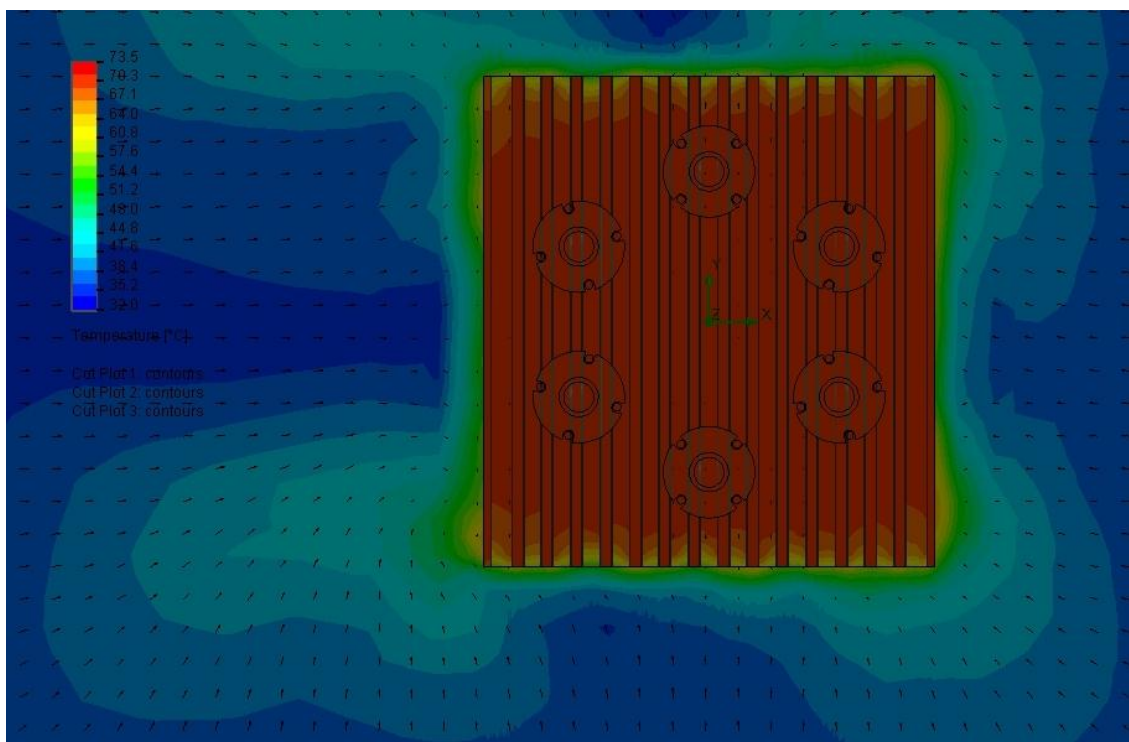
Maximální dosažená teplota byla 73,5°C



Obr. 5 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič položen vodorovně - pohled na mezeru



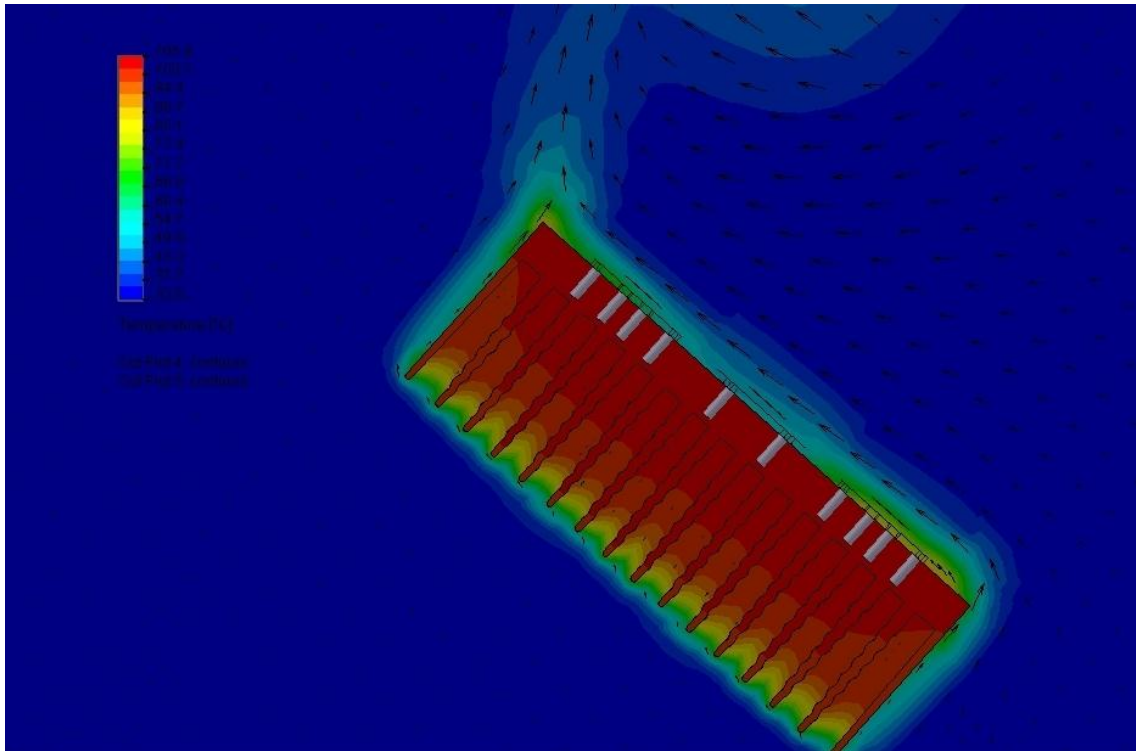
Obr. 6 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič uložen vodorovně - pohled na žebra



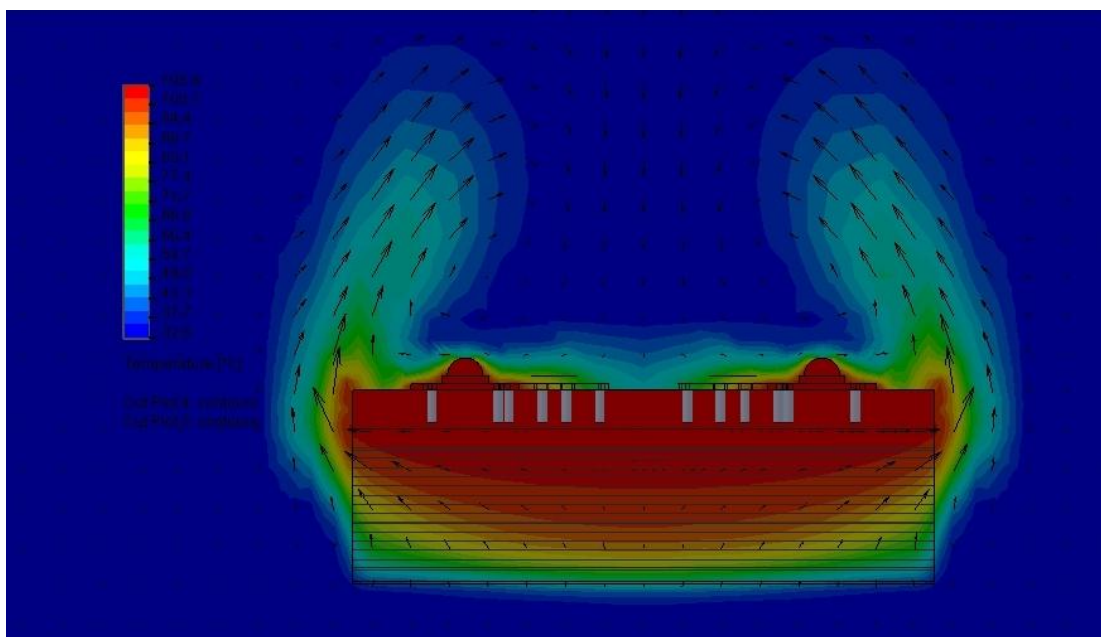
Obr. 7 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič uložen vodorovně - pohled shora

5.1.2 Chladič vytočen o 30°

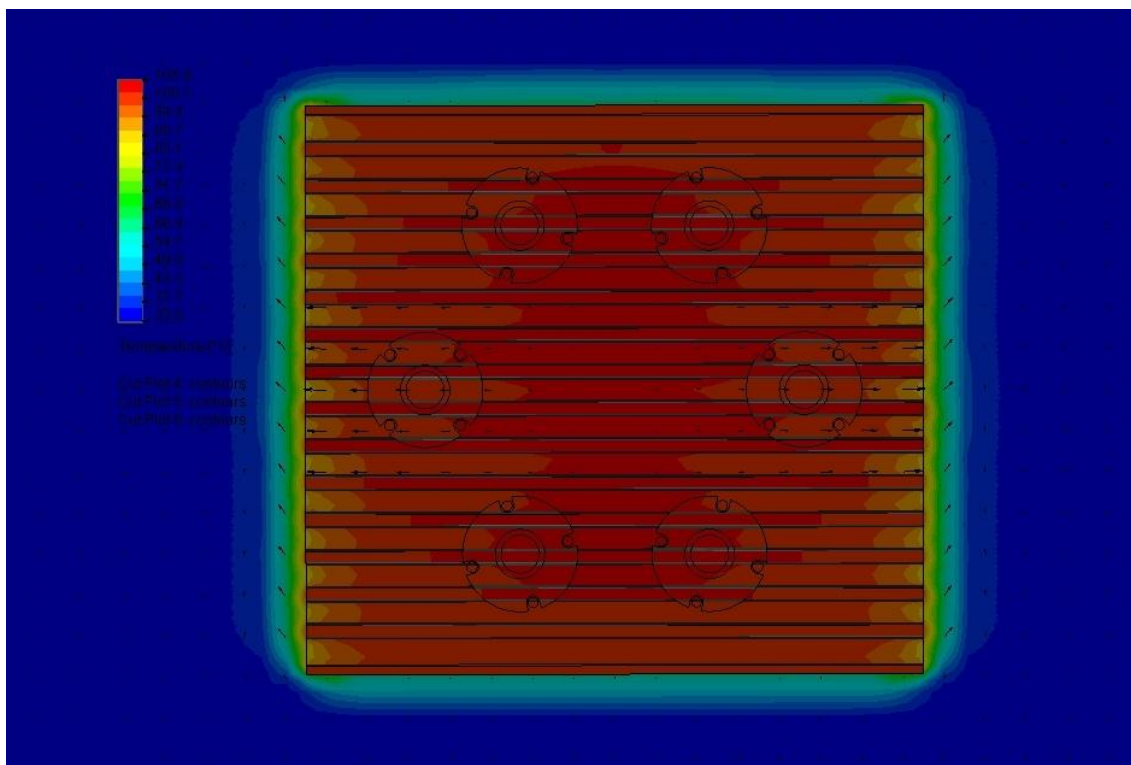
Maximální dosažená teplota 105,8°C



Obr. 8 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na mezeru



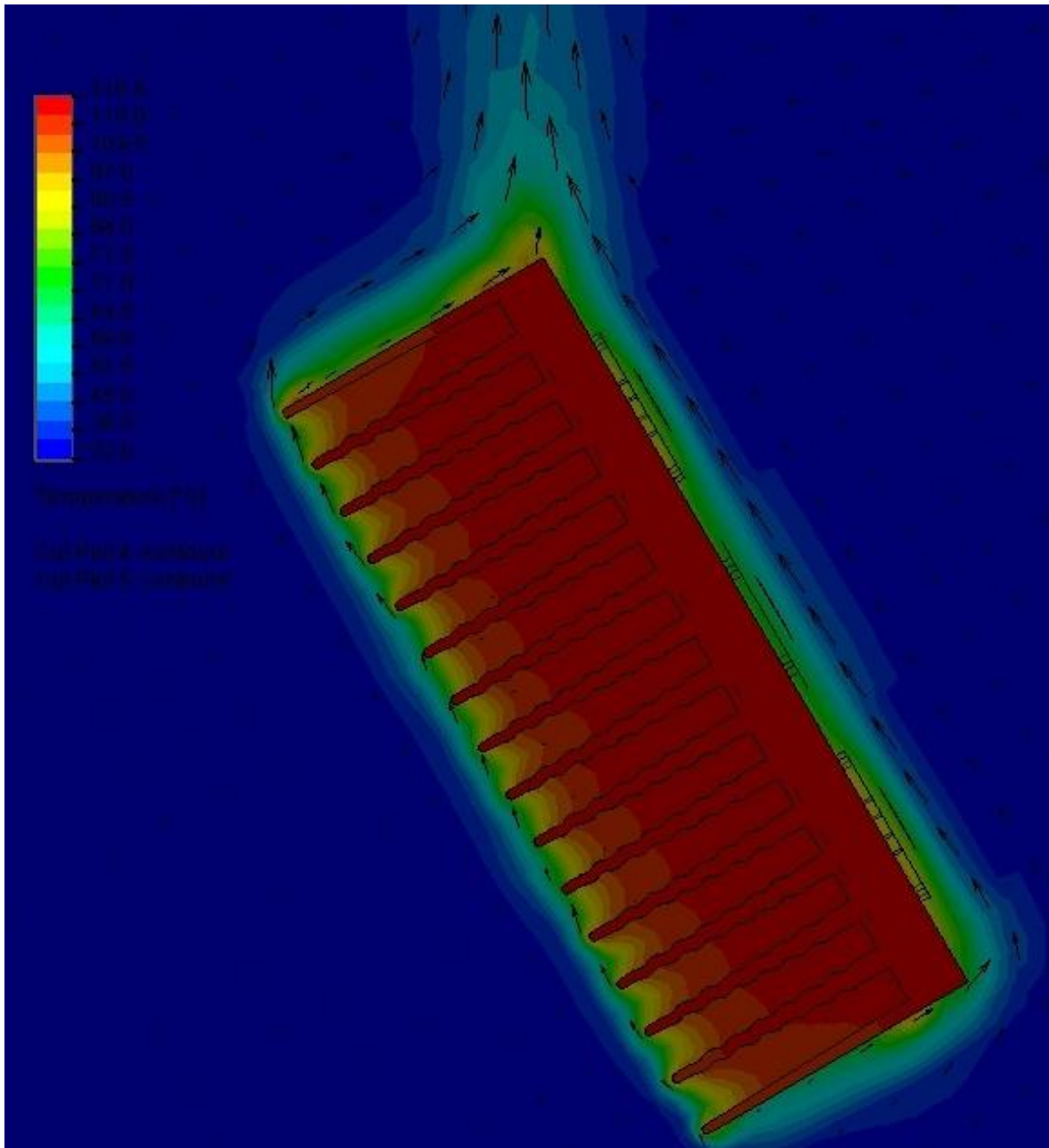
Obr. 9 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na žebra



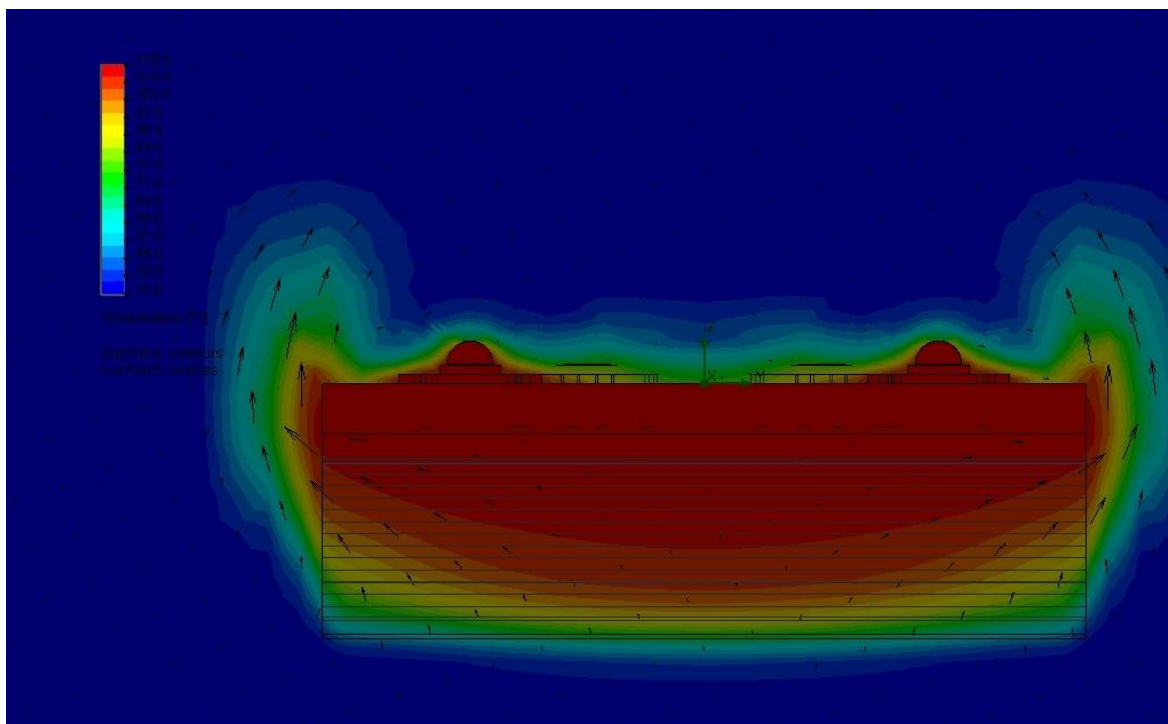
Obr. 10 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled shora

5.1.3 Chladič vytočen o 60 stupňů

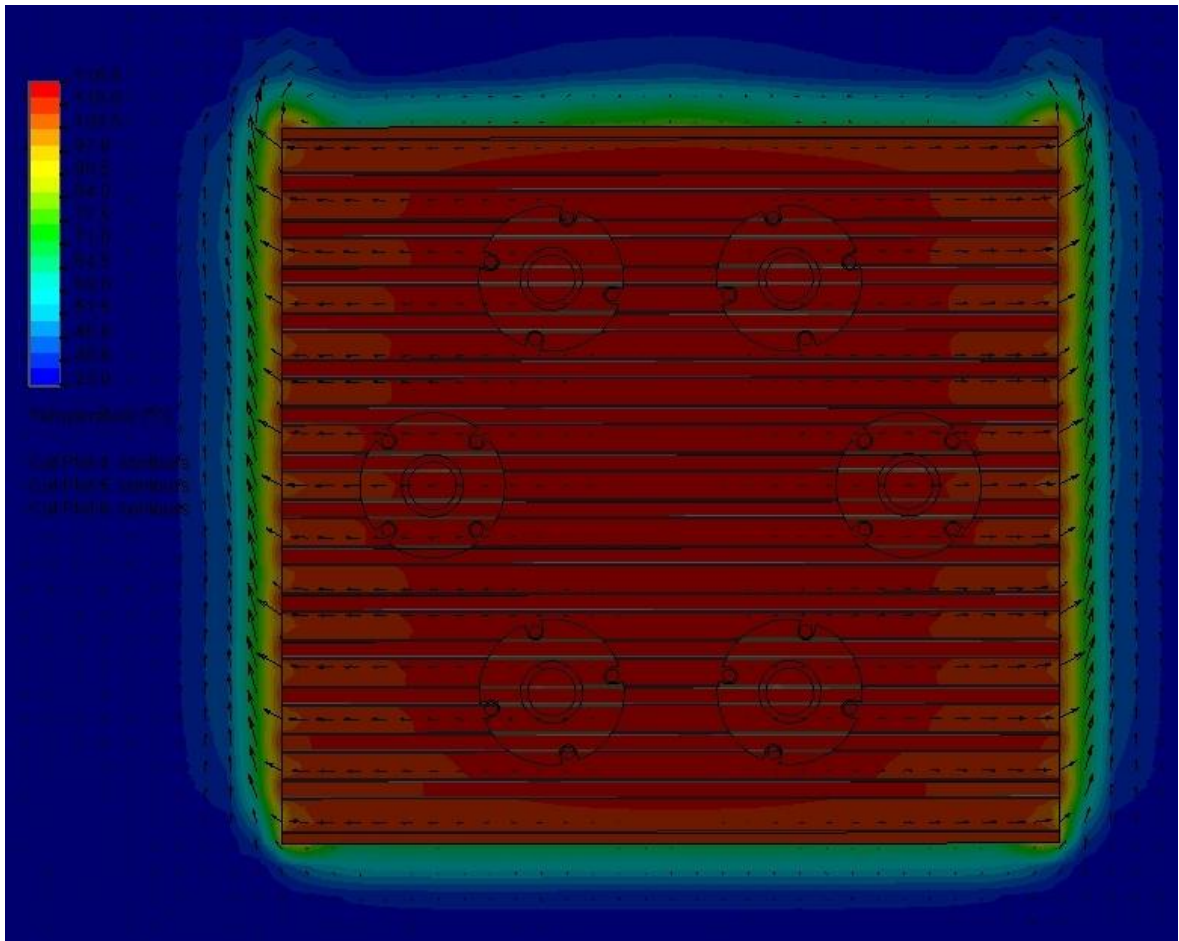
Maximální dosažená teplota 116,5°C



Obr. 11 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na mezeru



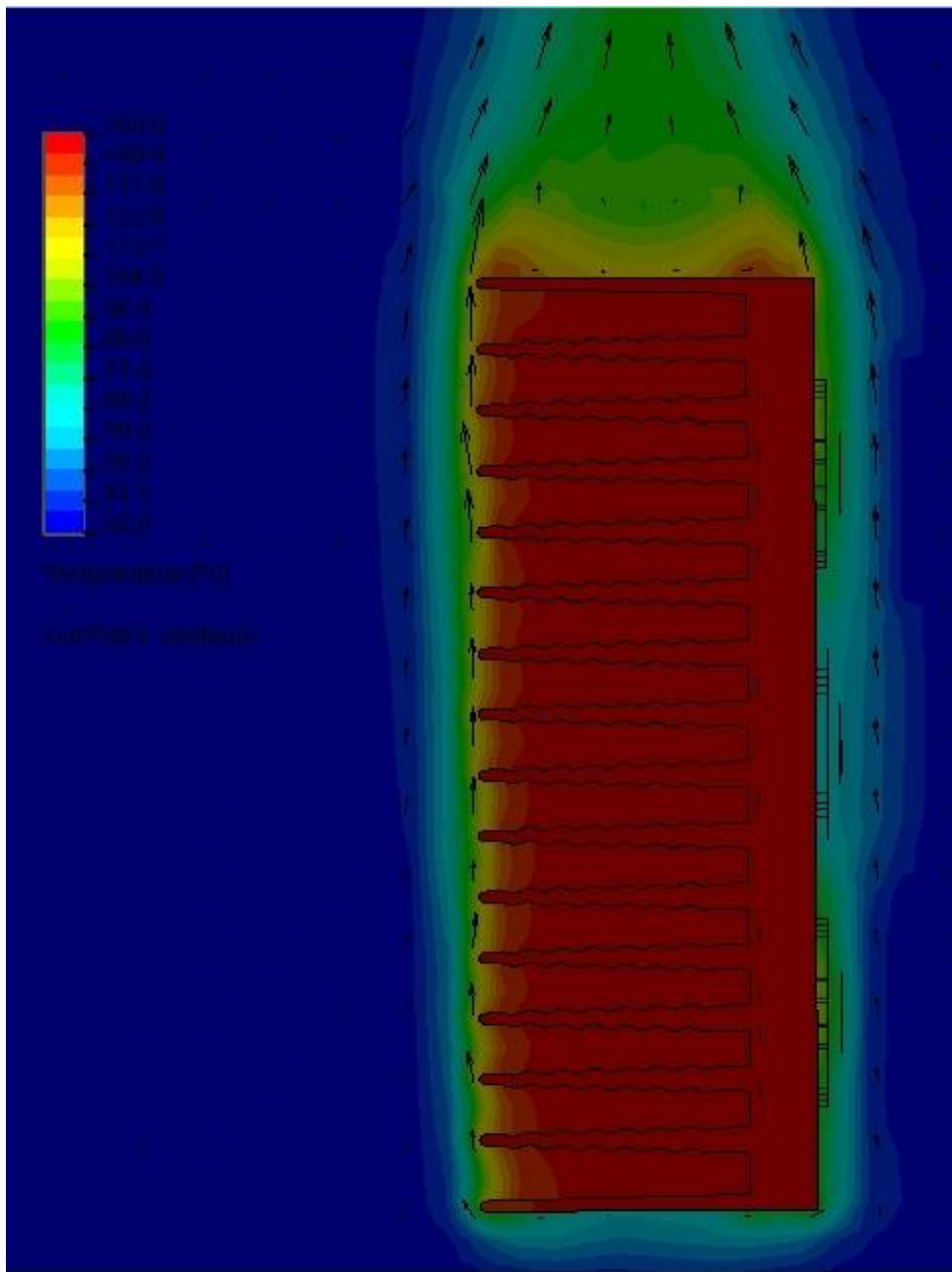
Obr. 12 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na žebra



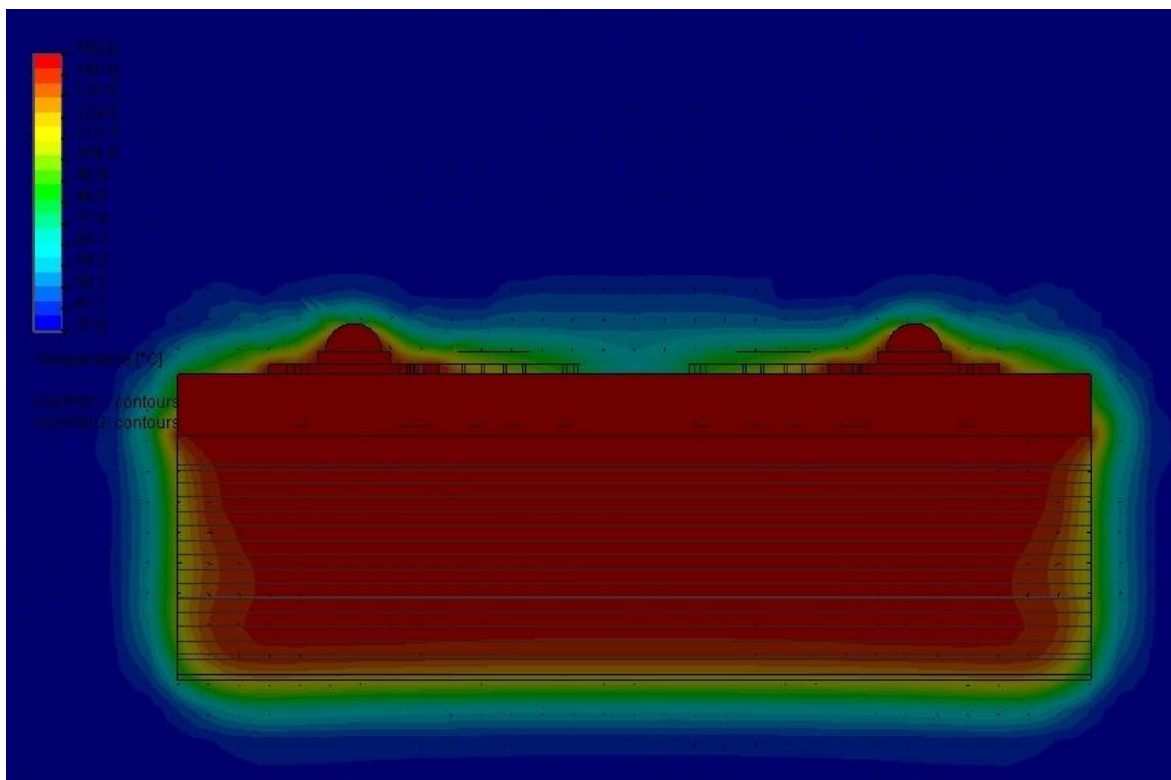
Obr. 13 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled shora

5.1.4 Chladič vytočen o 90 stupňů

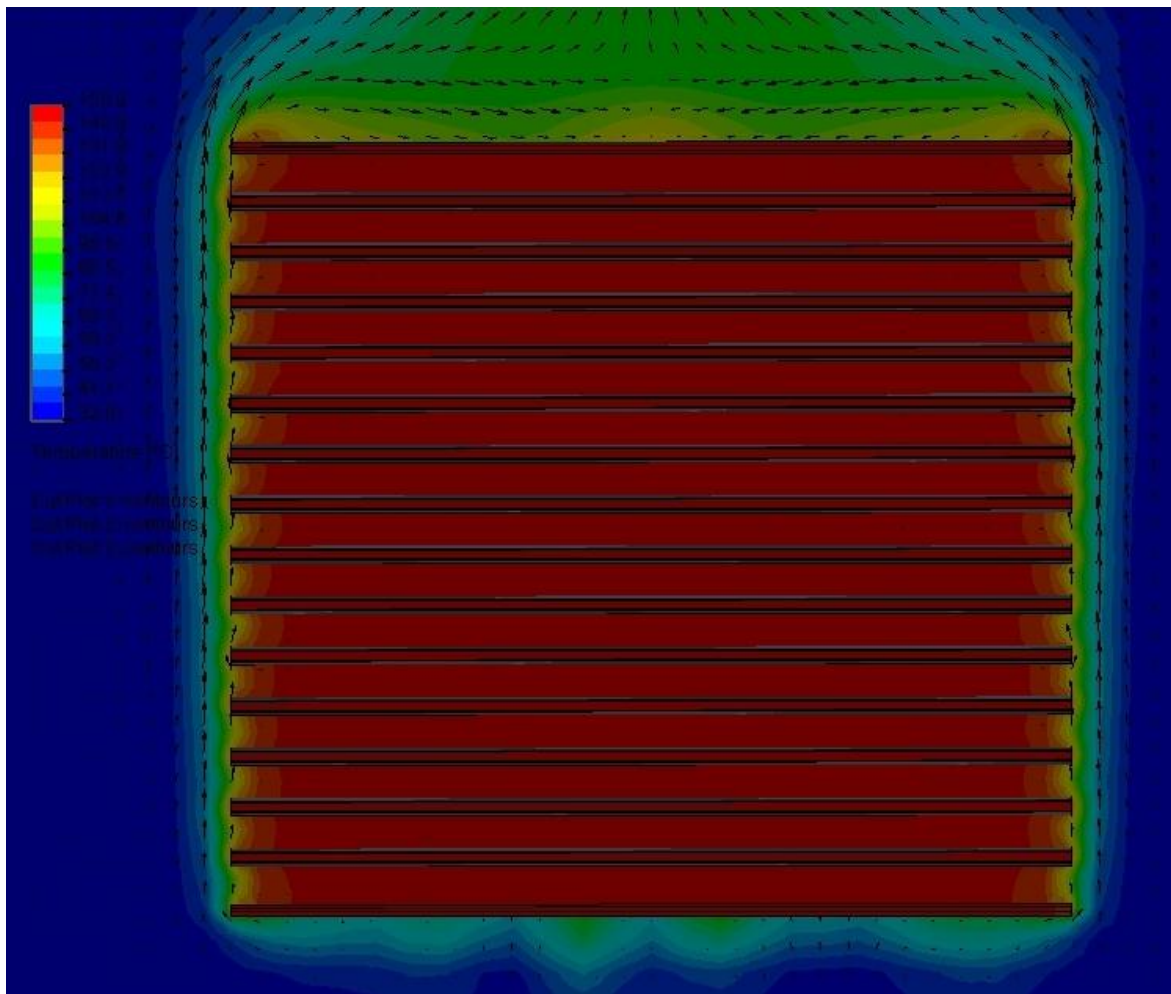
Maximální teplota 150°C



Obr. 14 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na mezeru



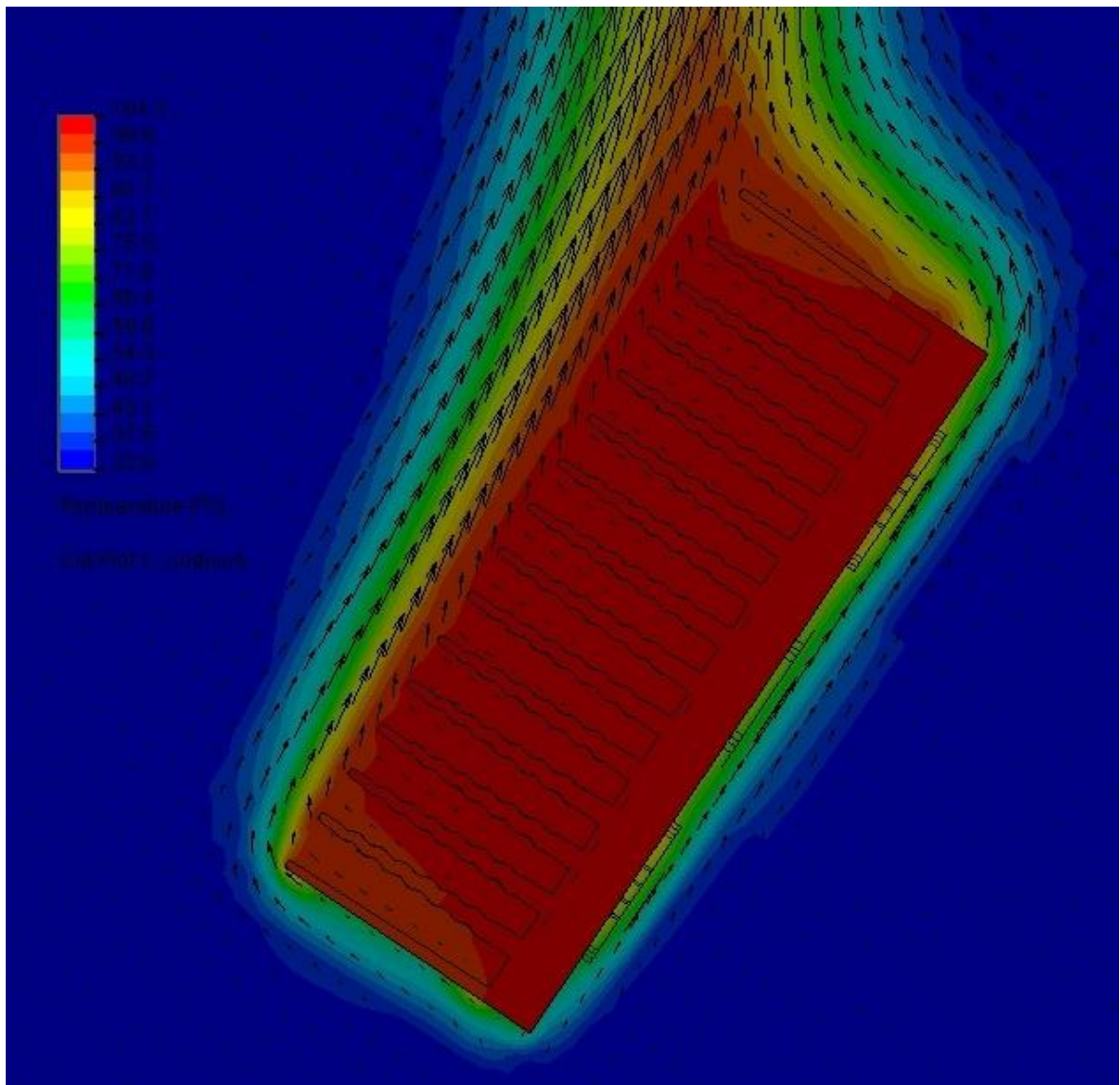
Obr. 15 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na žebra



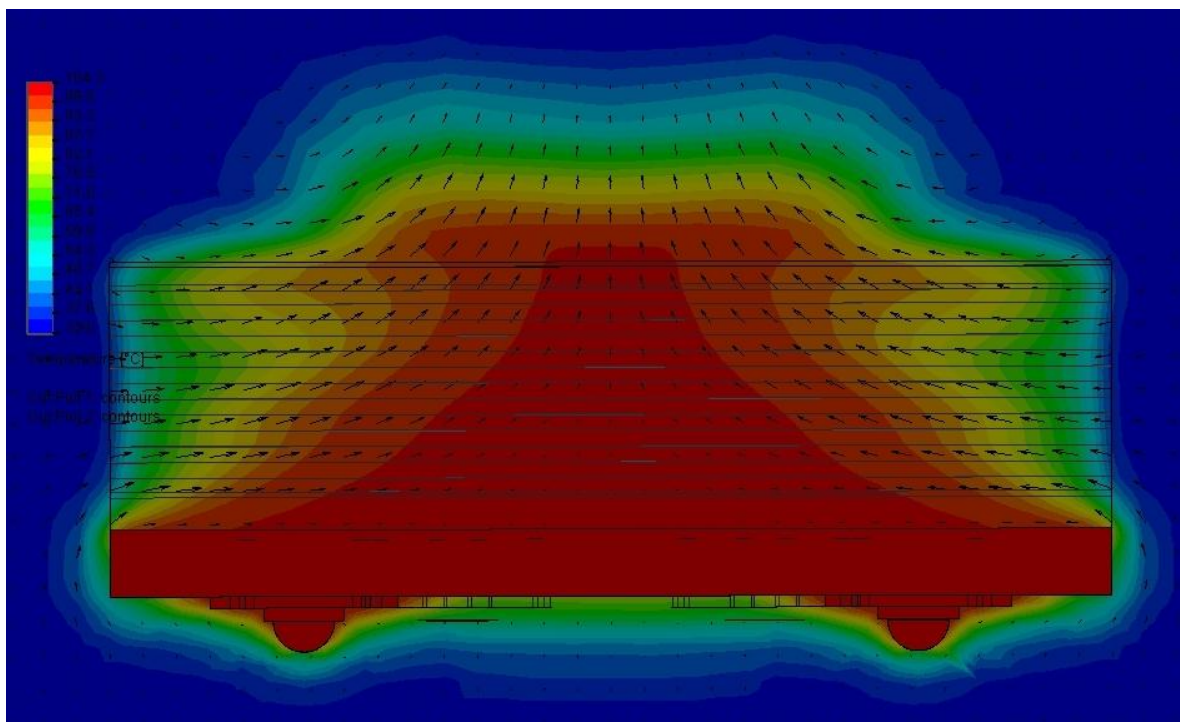
Obr. 16 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled shora

5.1.5 Chladič vytočen o 120 stupňů

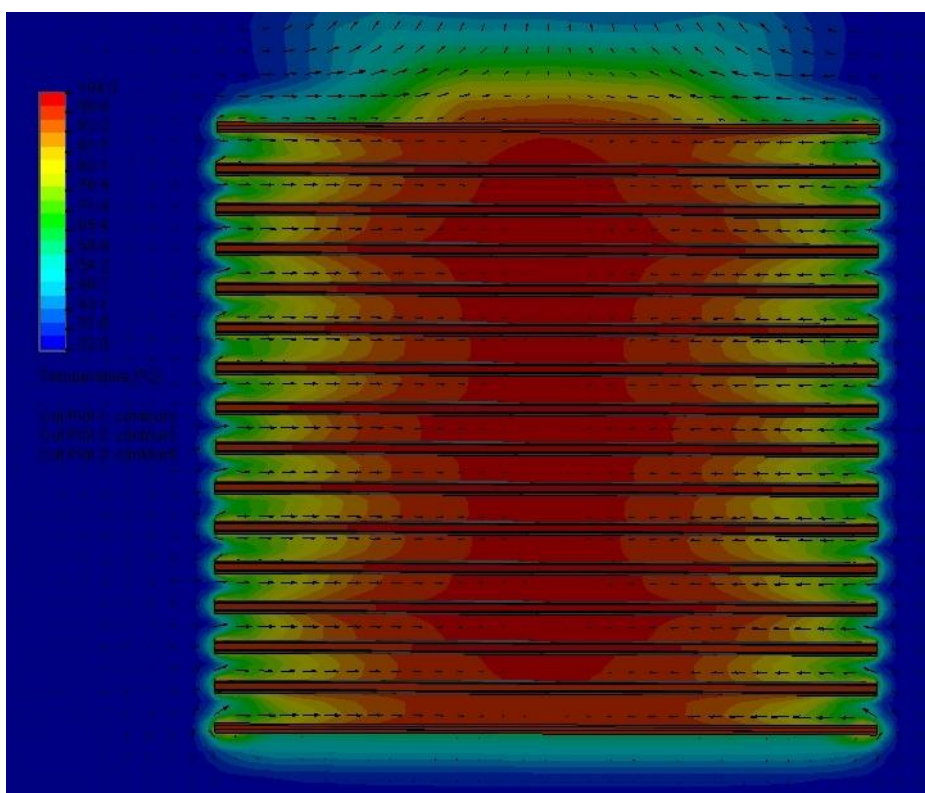
Maximální teplota 104,3°C



Obr. 17 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled na mezeru



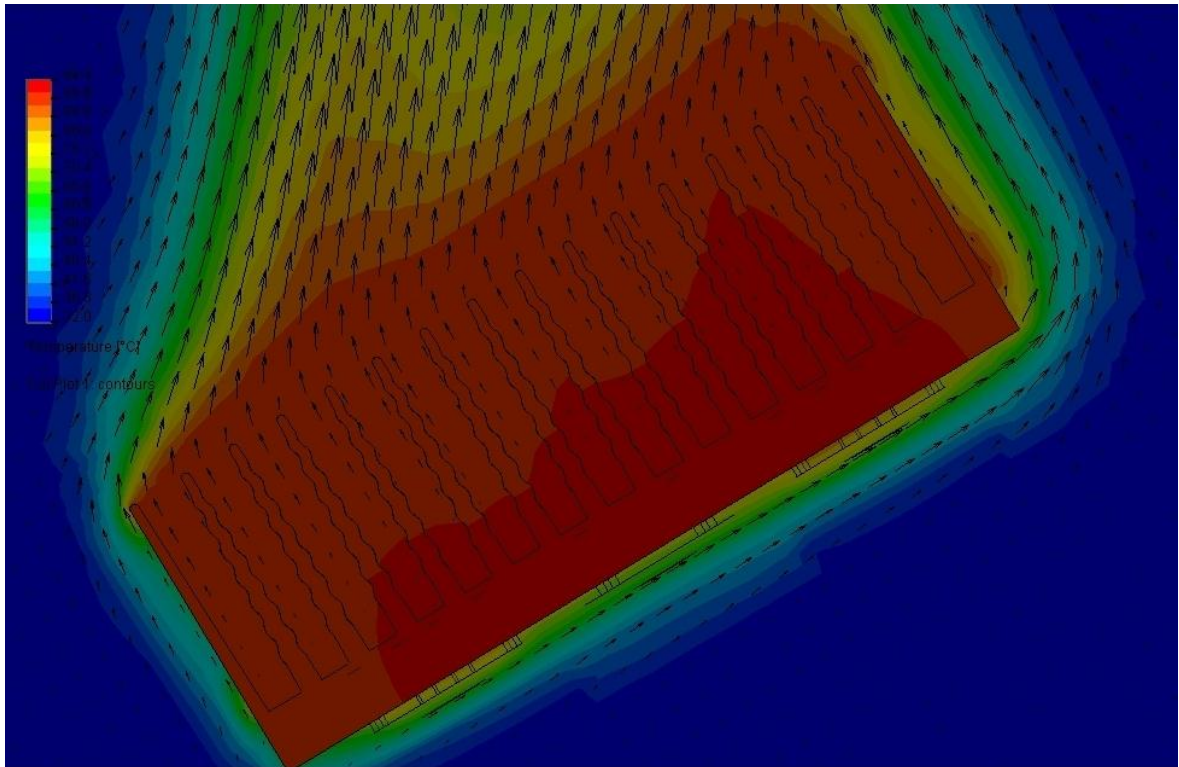
Obr. 18 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled na žebra



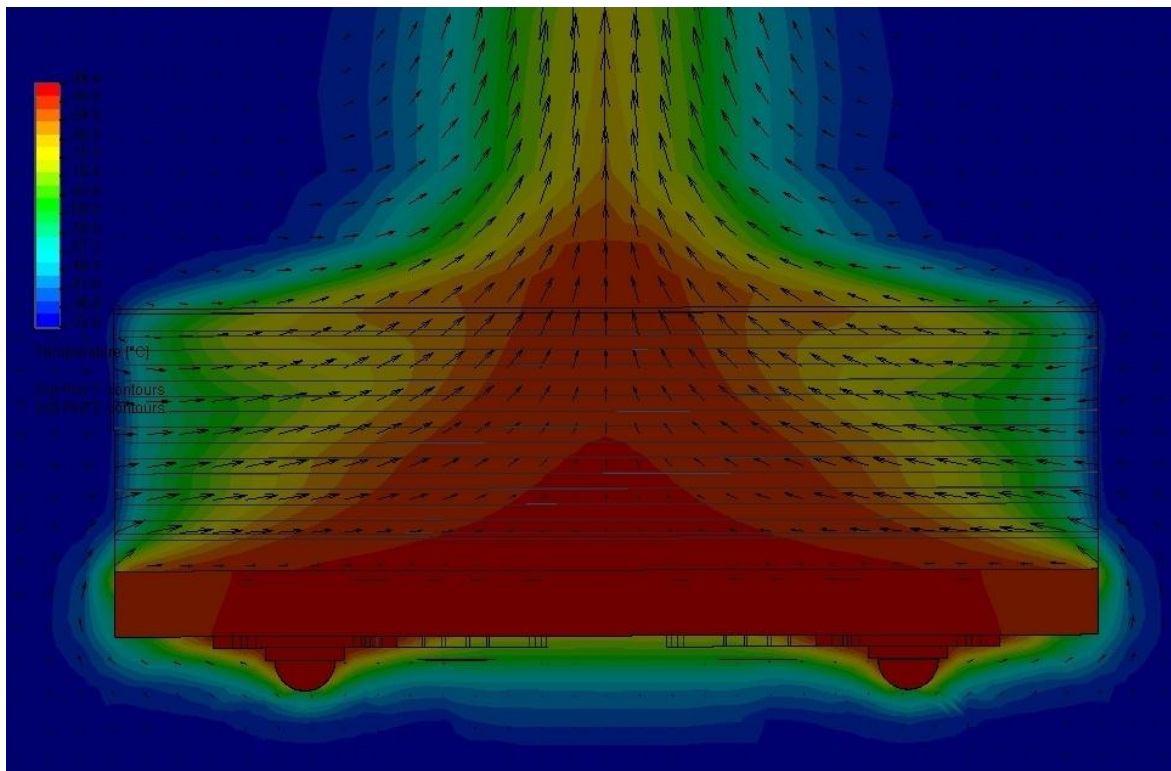
Obr. 19 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled shora

5.1.6 Chladič vytočen o 150 stupňů

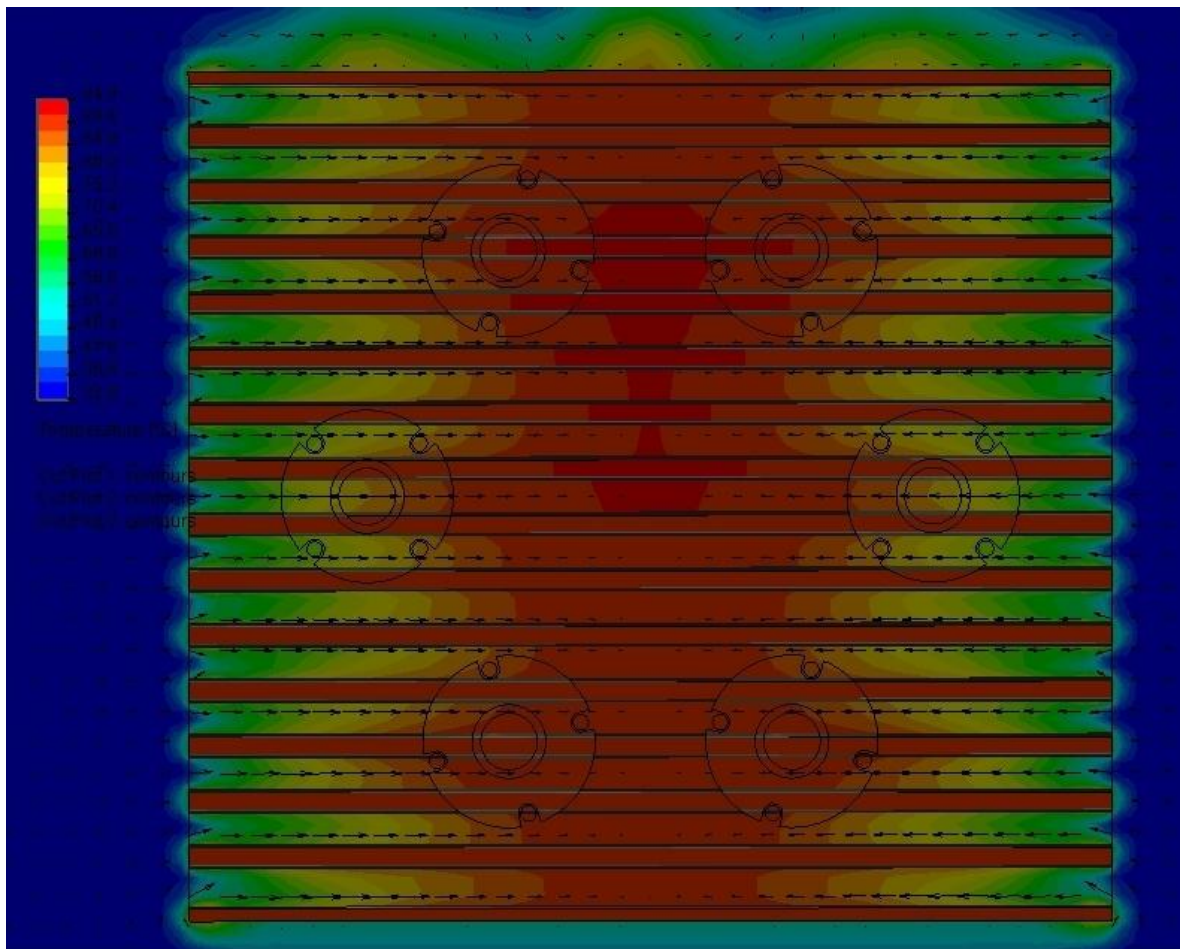
Maximální teplota 94,4°C



Obr. 20 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled na mezeru



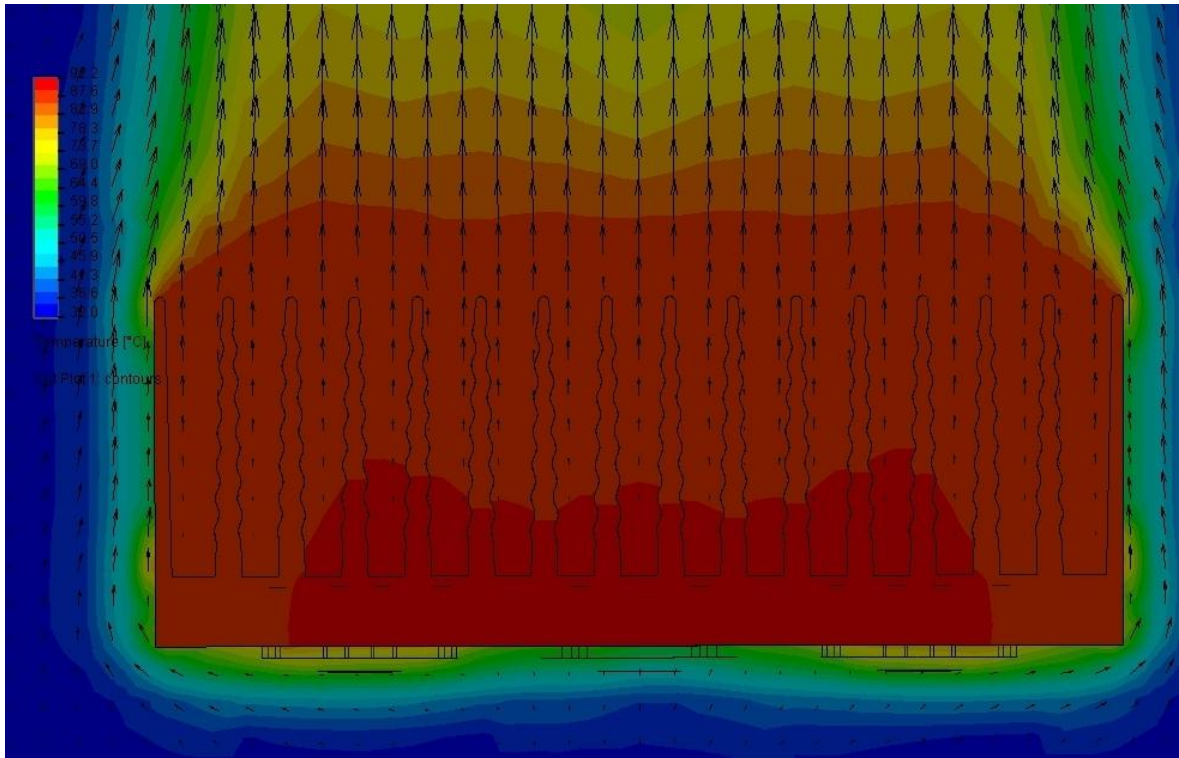
Obr. 21 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled na žebra



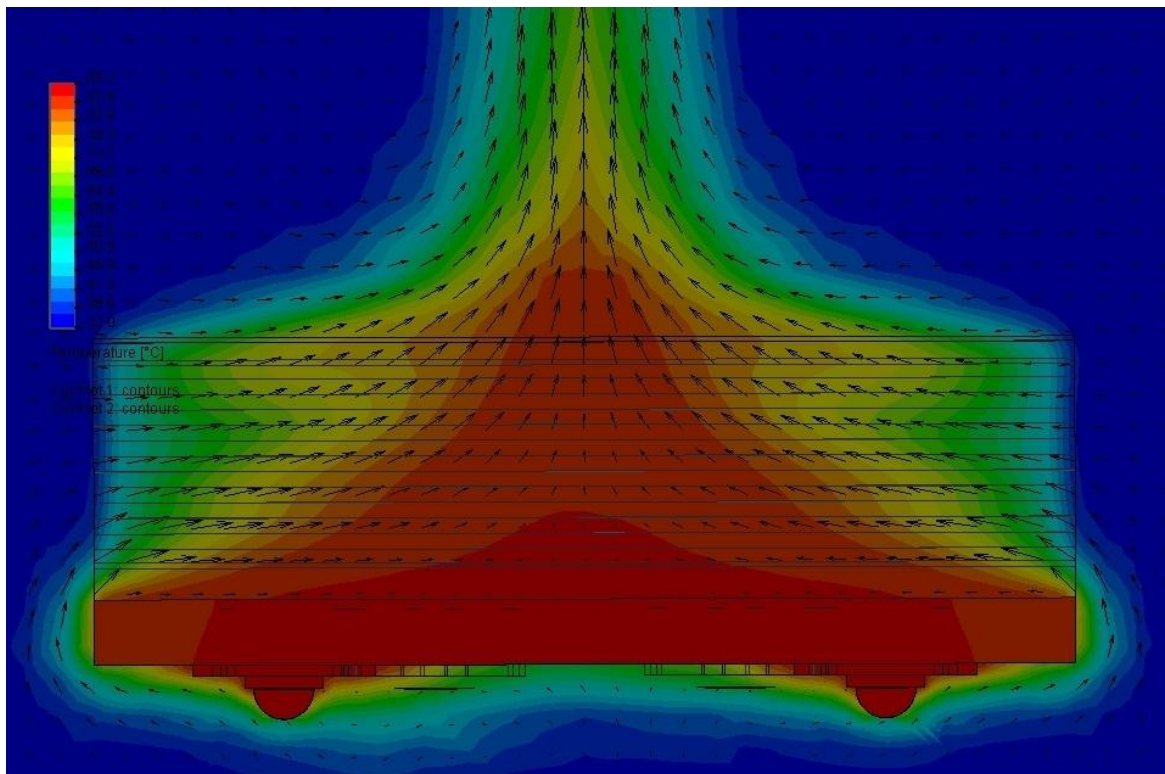
Obr. 22 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled shora

5.1.7 Chladič vytočen o 180 stupňů

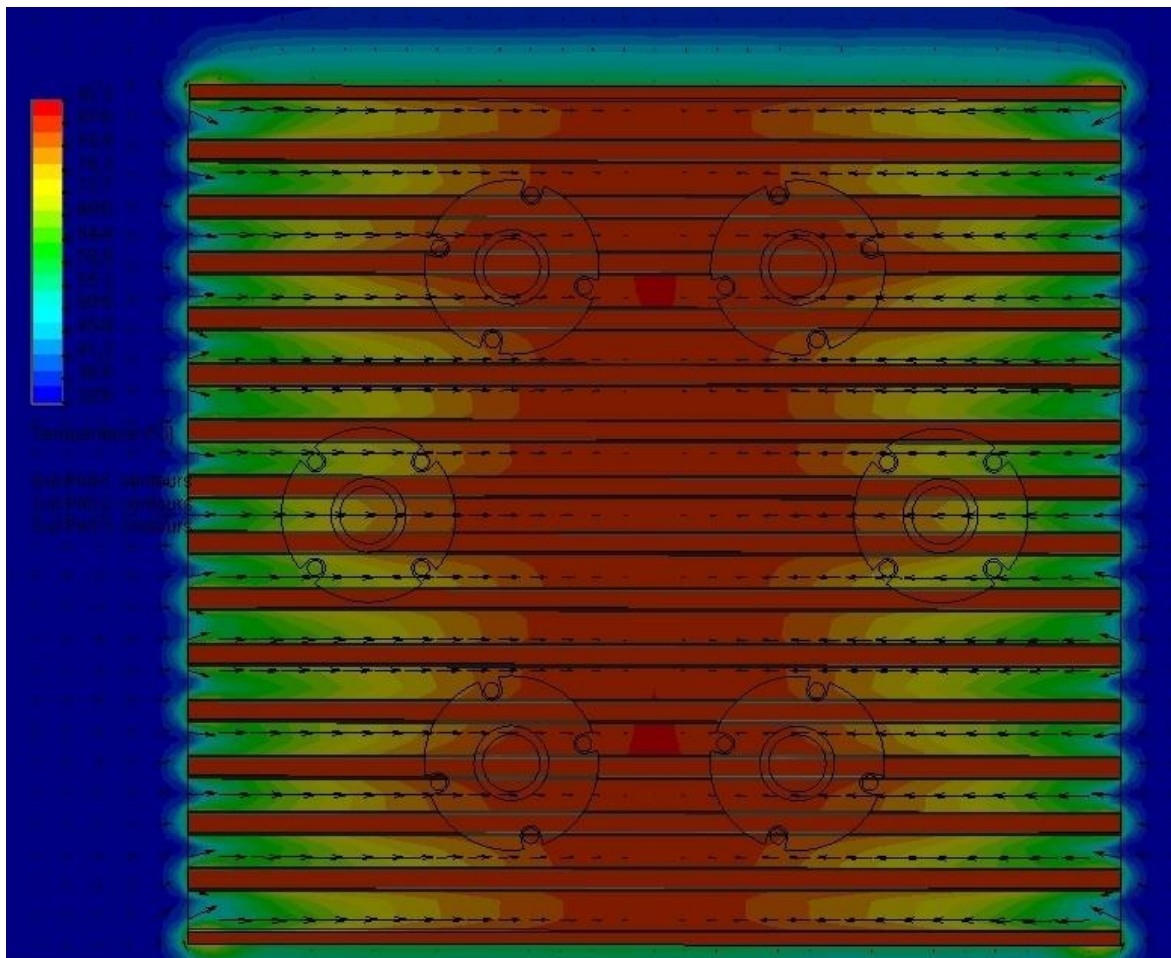
Maximální teplota 92,2°C



Obr. 23 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen žebry nahoru – pohled na mezeru



Obr. 24 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen žebry nahoru – pohled na žebra

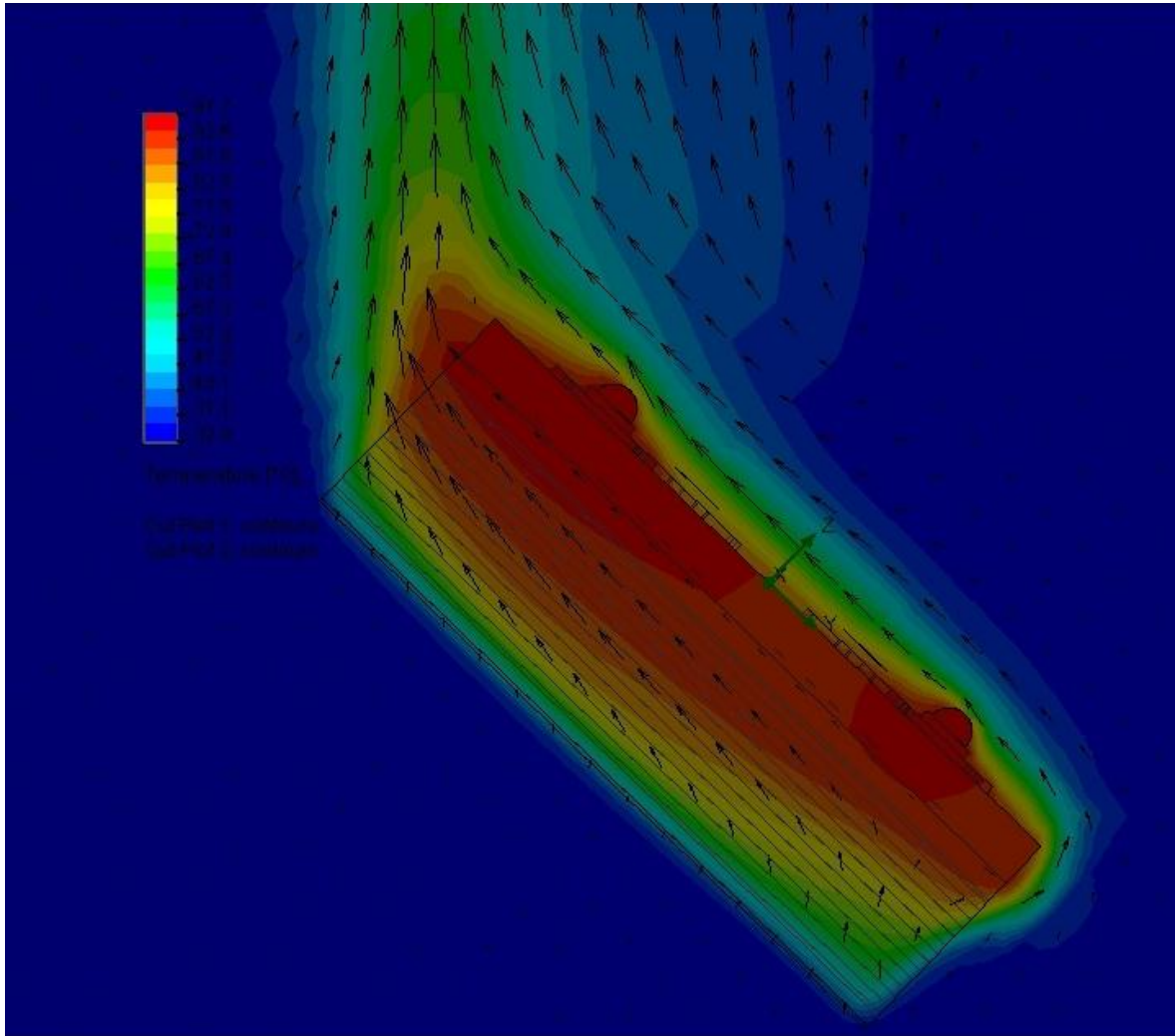


Obr. 25 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen žebry nahoru – pohled shora

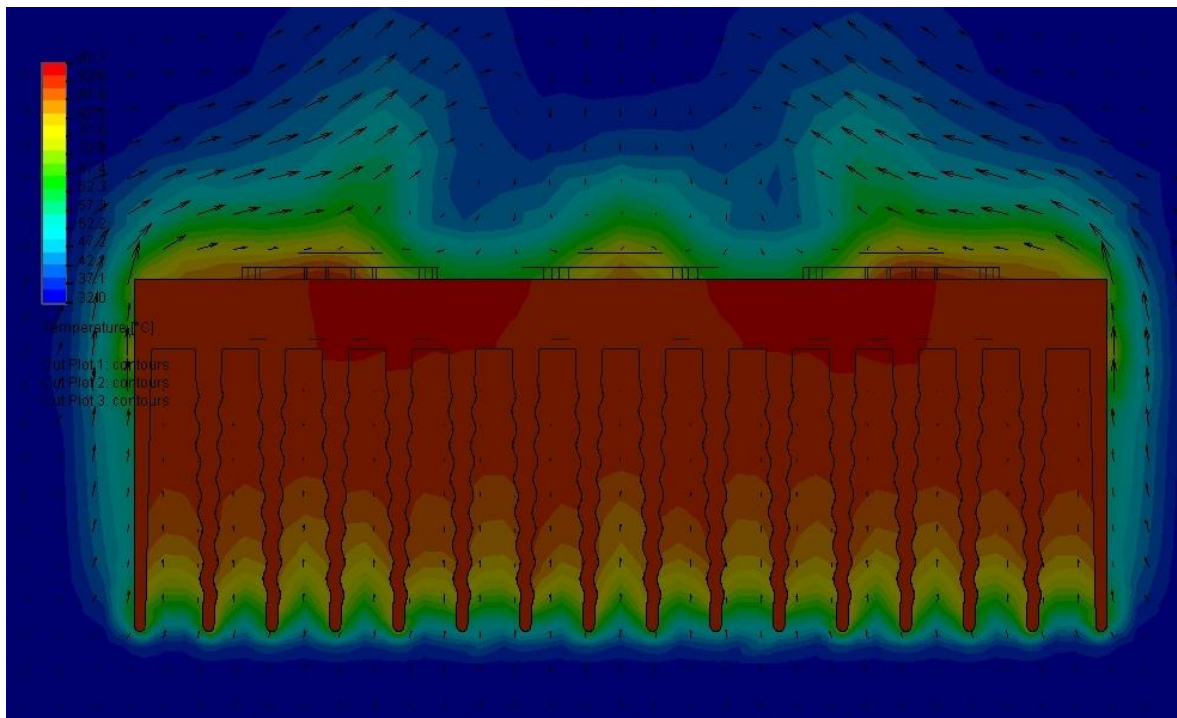
5.2 Žebra chladiče umístěna rovnoběžně s proudícím vzduchem (svisle)

5.2.1 Chladič vytočen o 30 stupňů

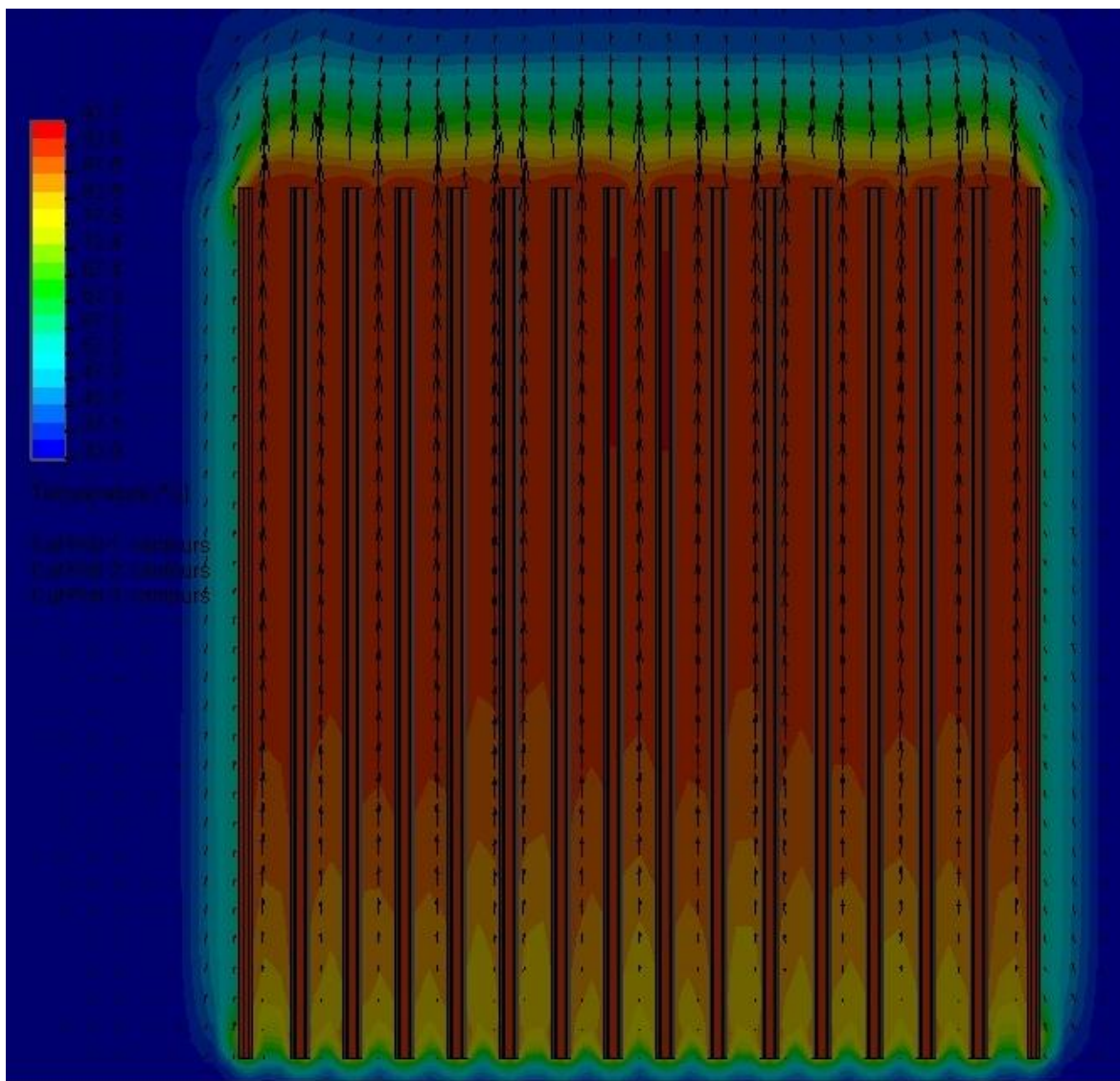
Maximální teplota 97,7°C



Obr. 26 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na žebra



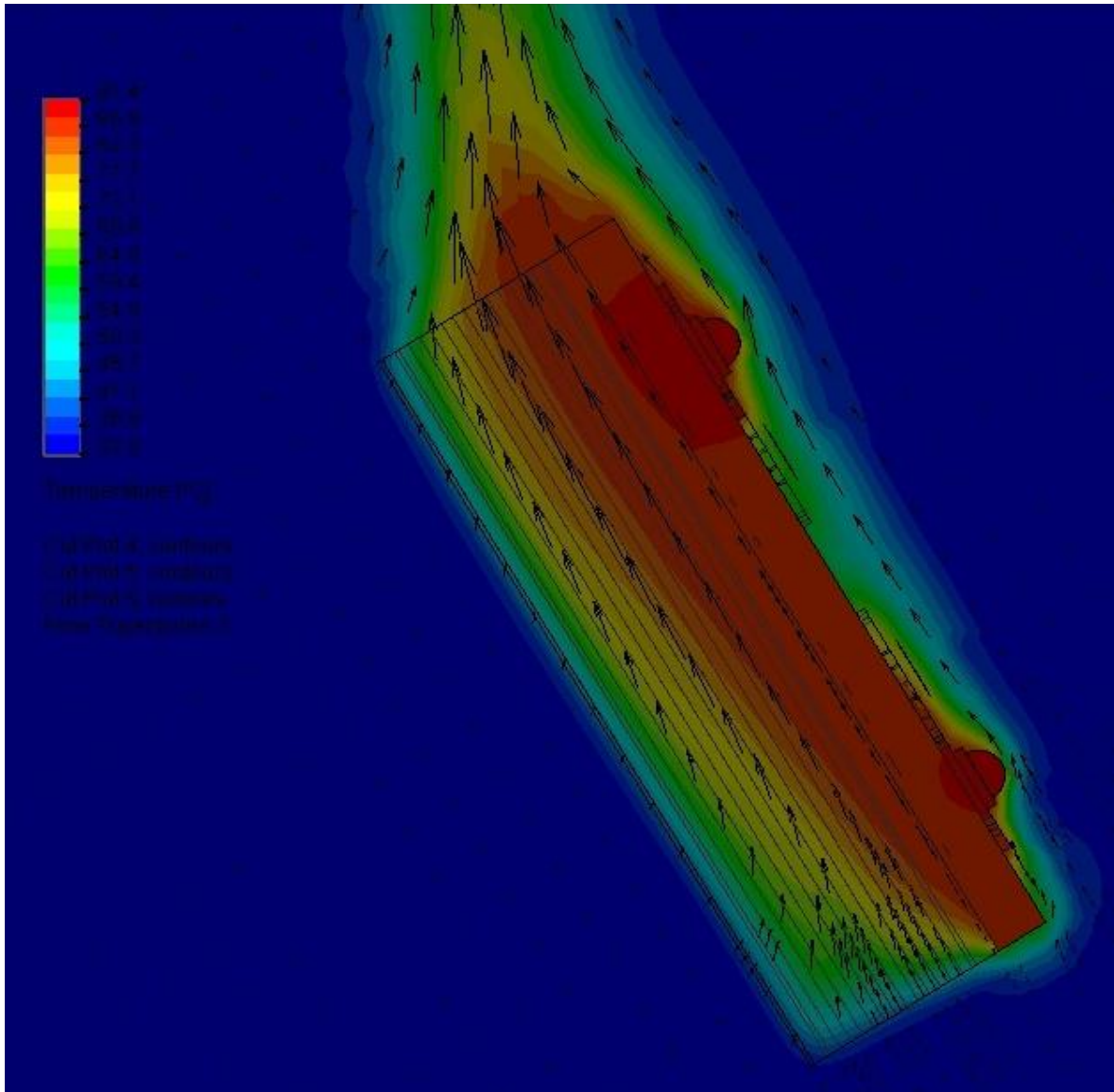
Obr. 27 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na mezeru



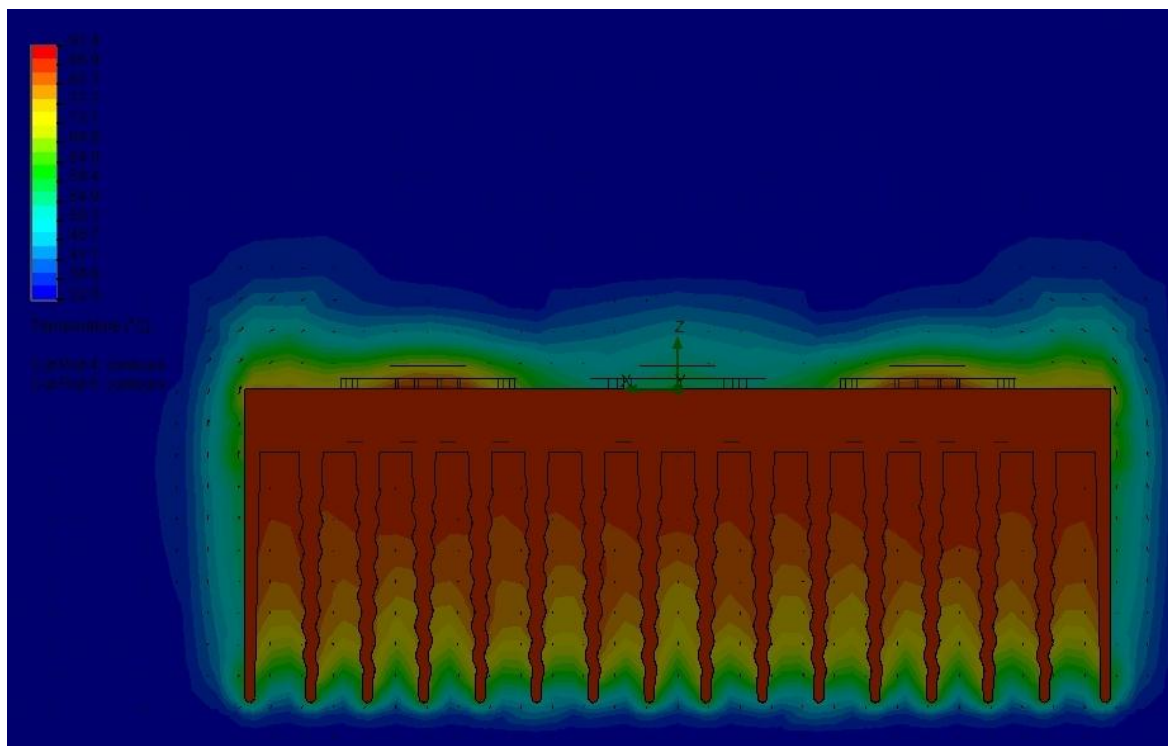
Obr. 28 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled shora

5.2.2 Chladič vytočen o 60 stupňů

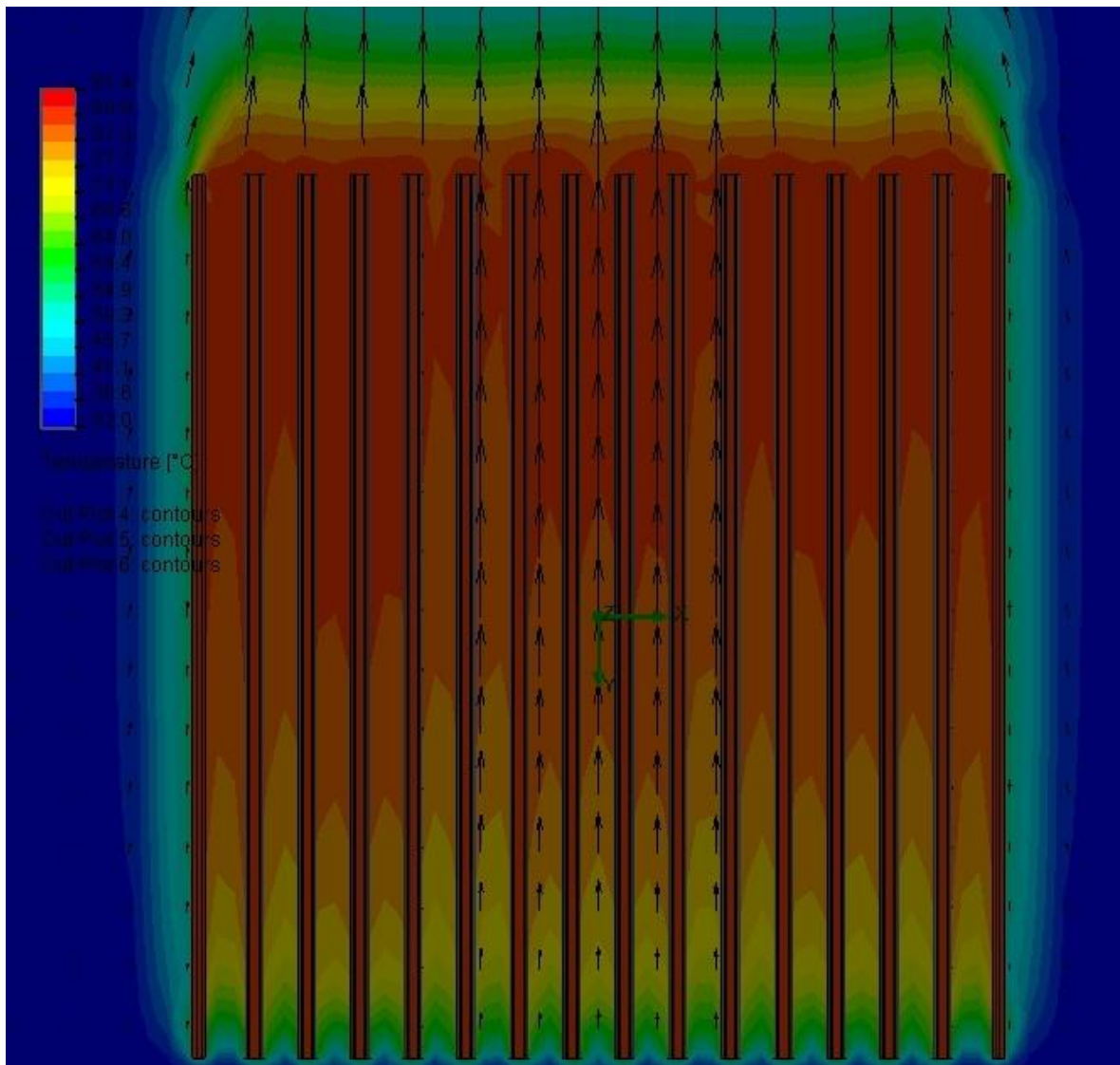
Maximální teplota 91,4°C



Obr. 29 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na žebra



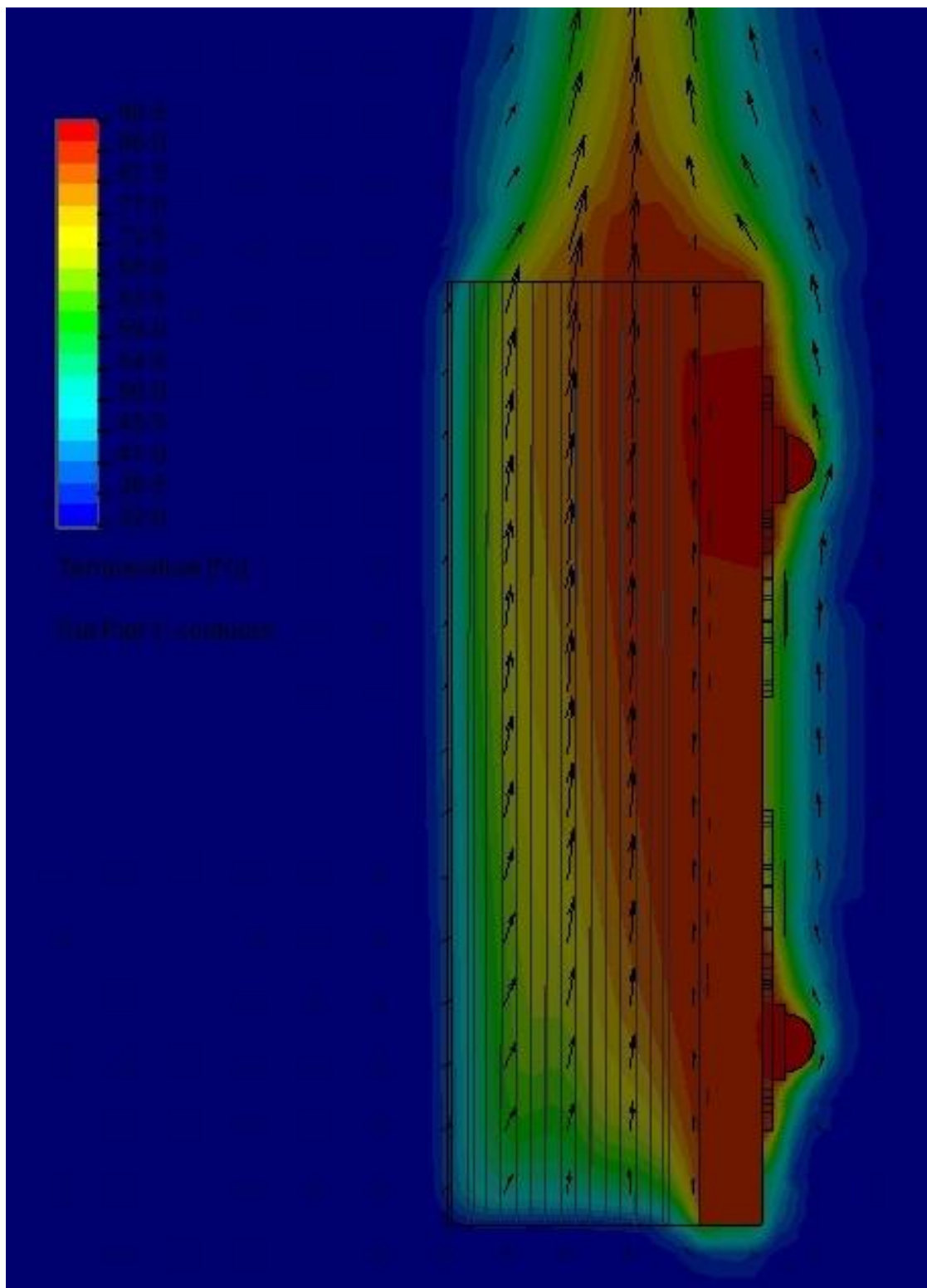
Obr. 30 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na mezeru



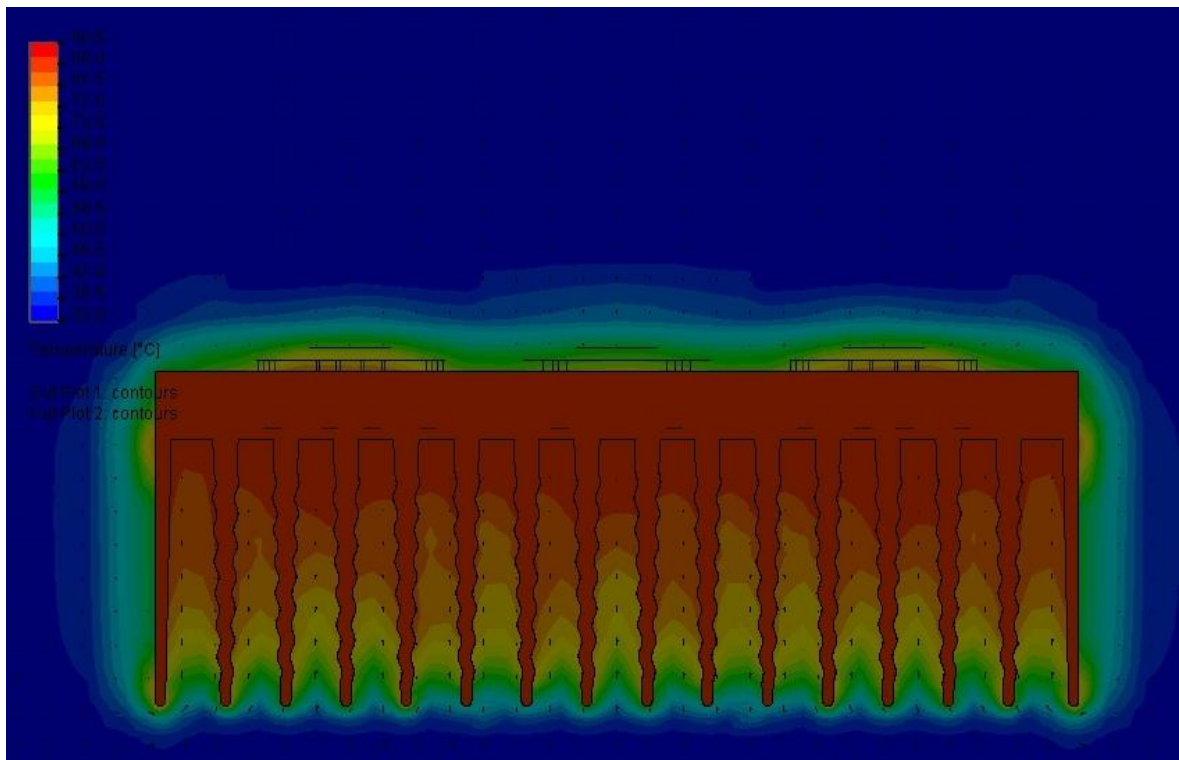
Obr. 31 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled shora

5.2.3 Chladič vytočen o 90 stupňů

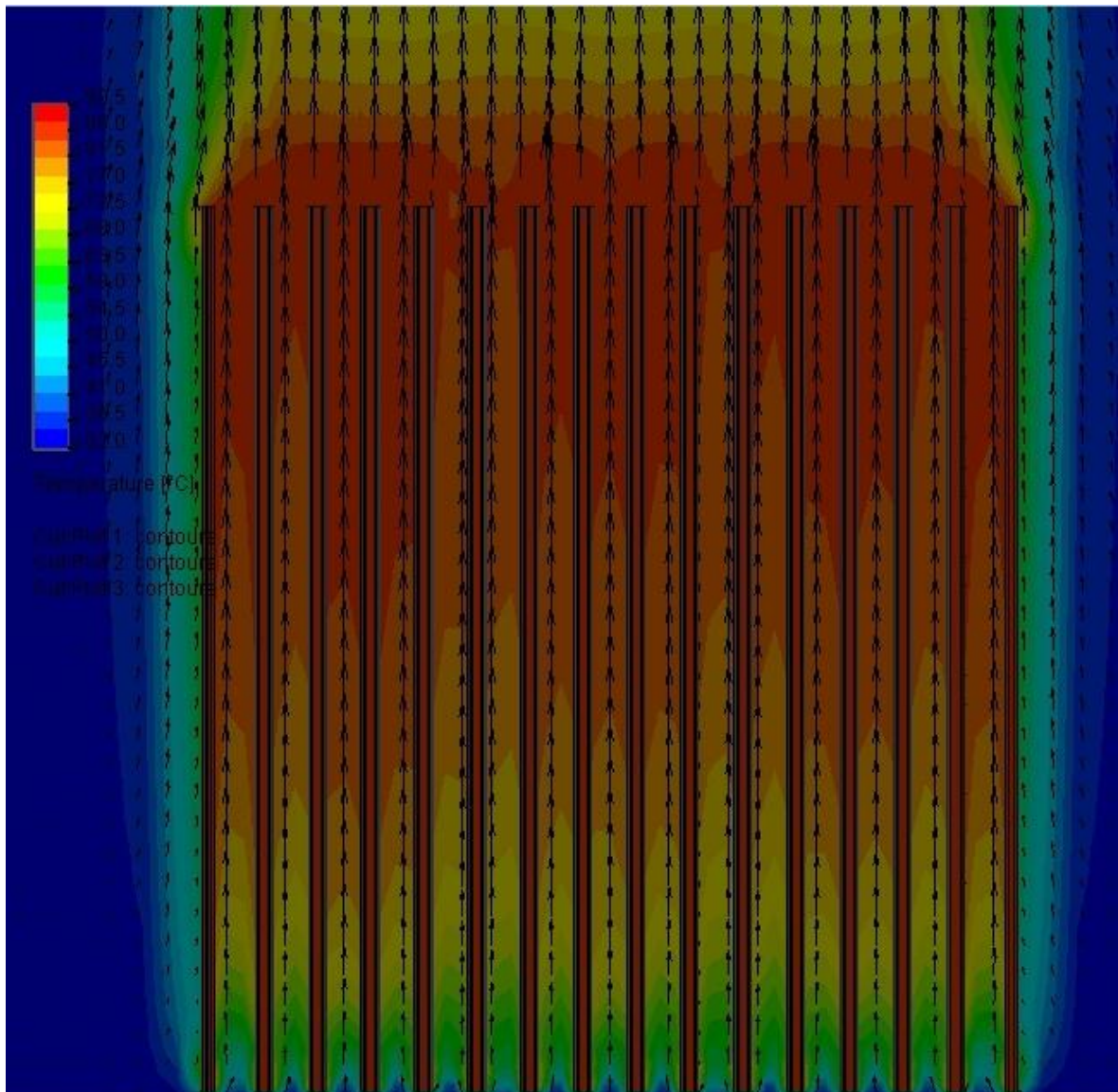
Maximální teplota 90,5°C



Obr. 32 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na žebra



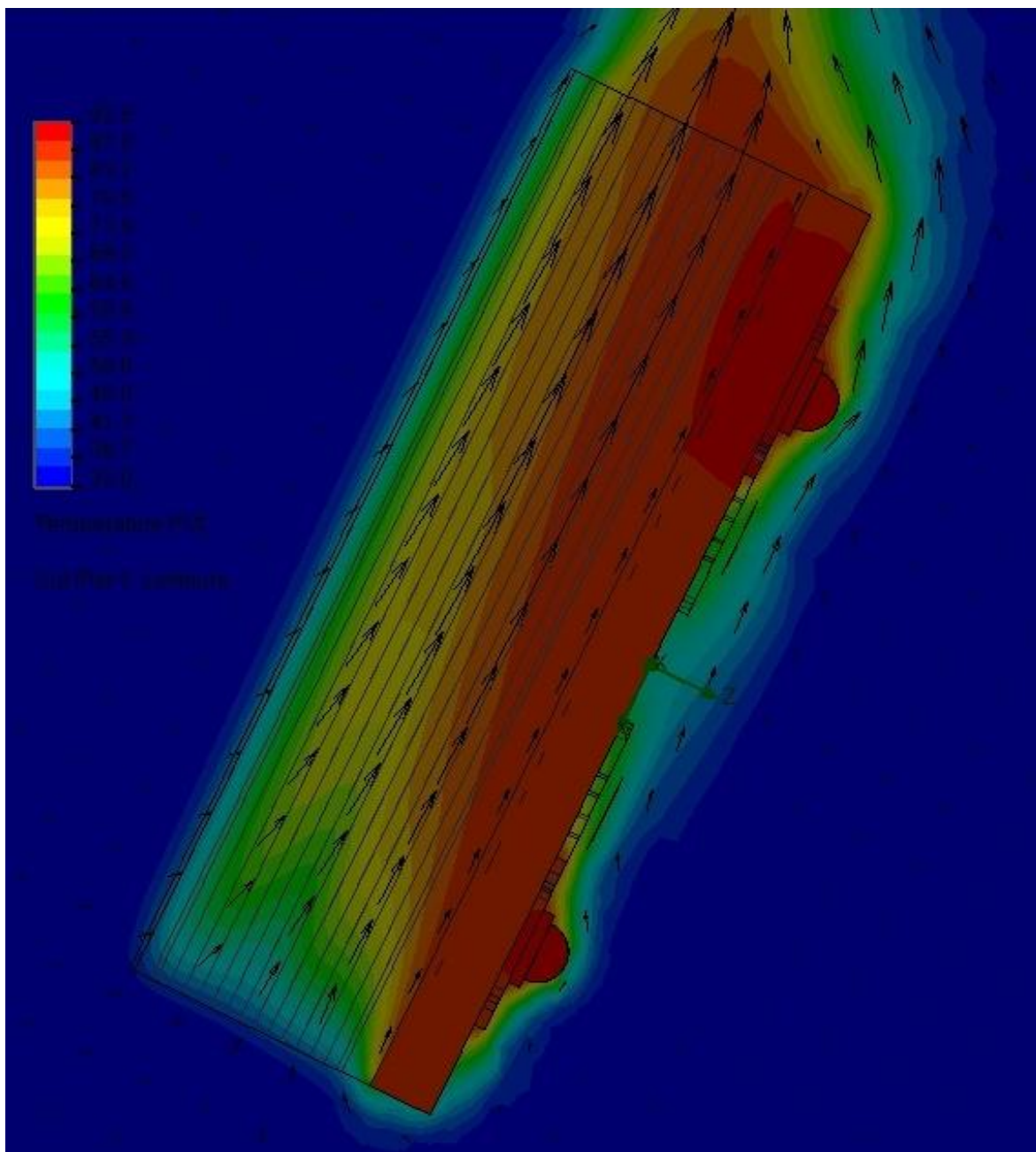
Obr. 33 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na mezeru



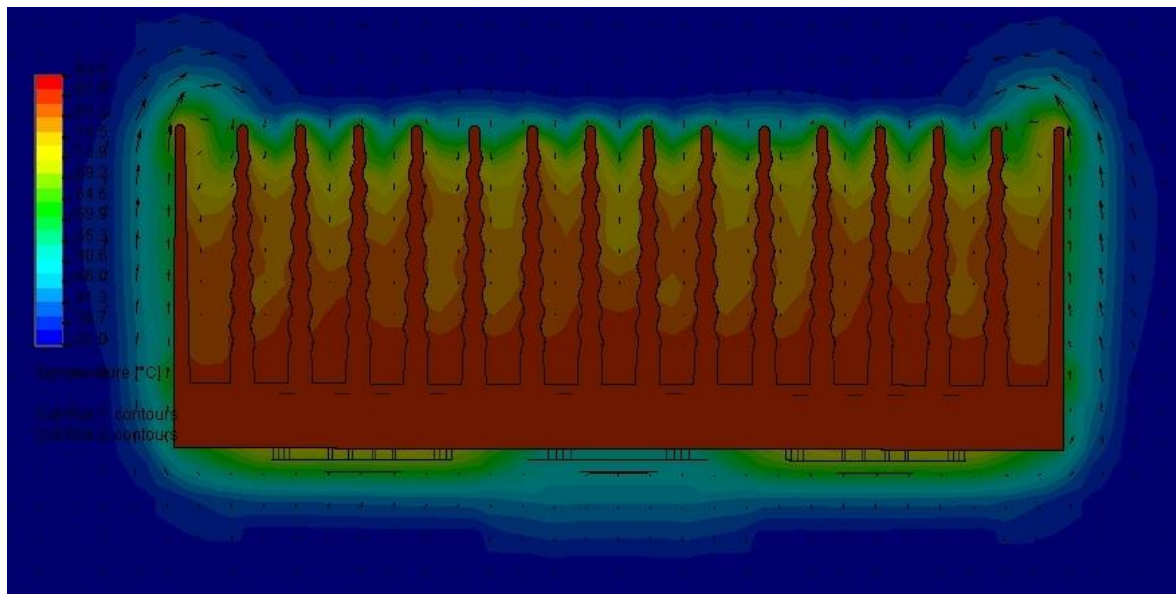
Obr. 34 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled shora

5.2.4 Chladič vytočen o 120 stupňů

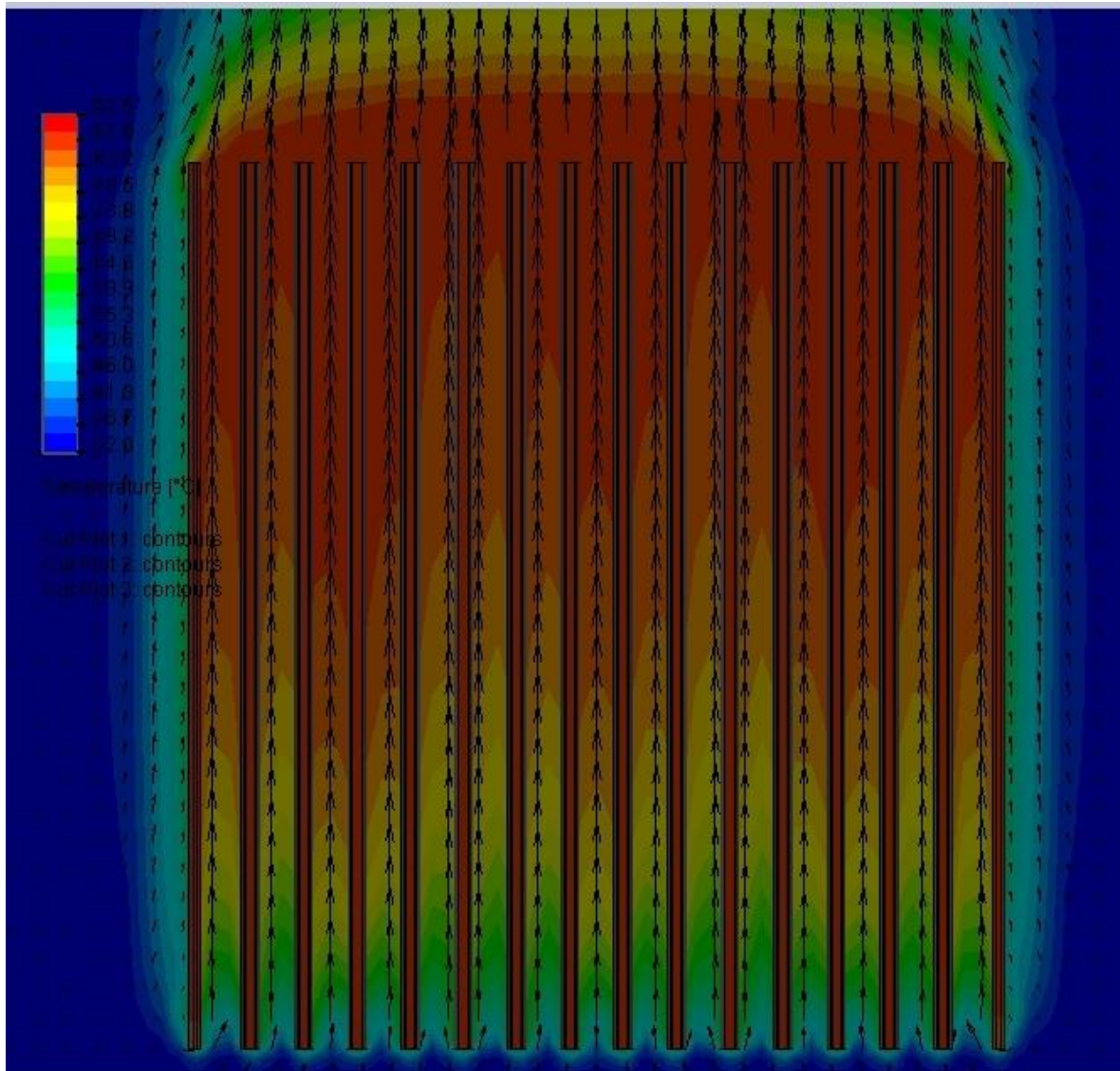
Maximální teplota 92,5°C



Obr. 35 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled na žebra



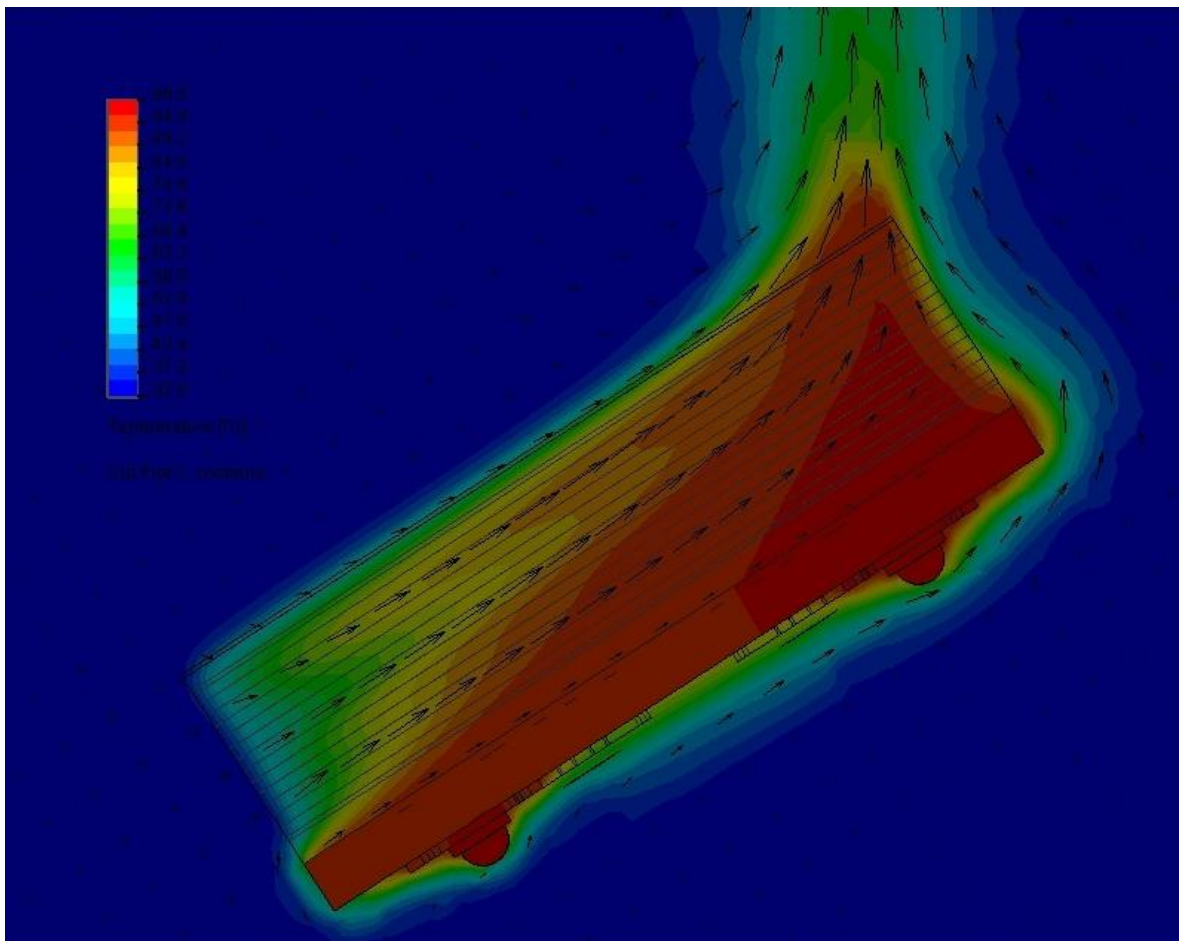
Obr. 36 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled do mezery



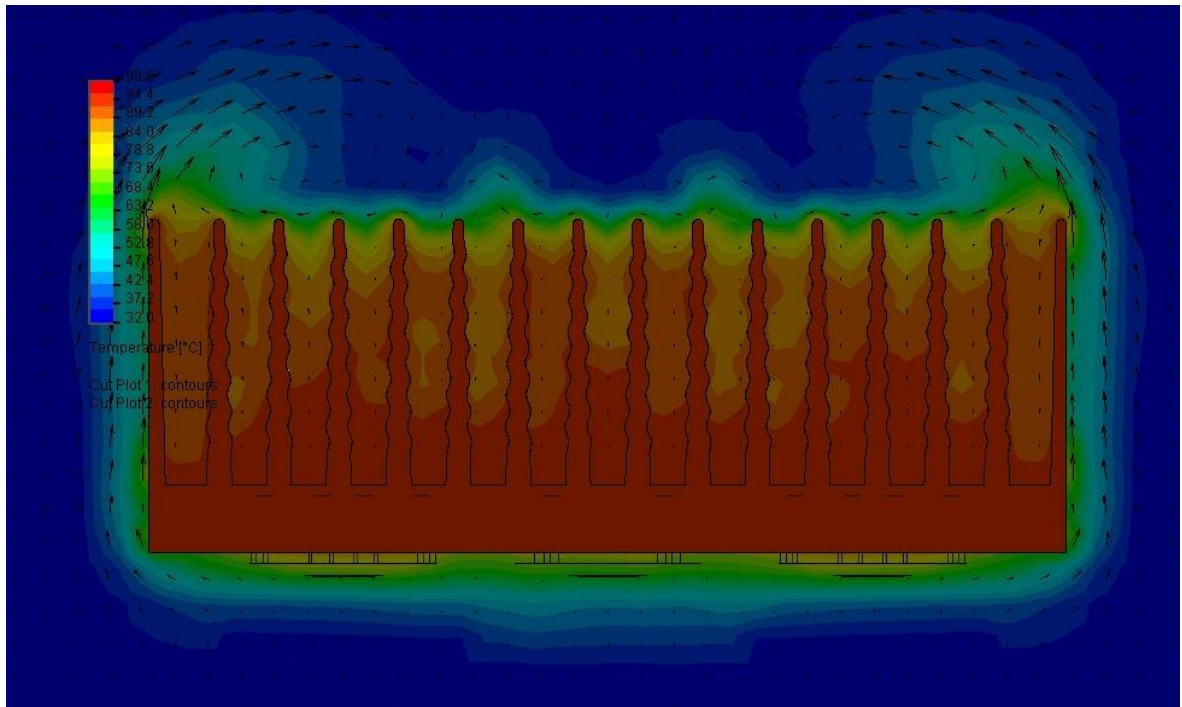
Obr. 37 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled shora

5.2.5 Chladič vytočen o 150 stupňů

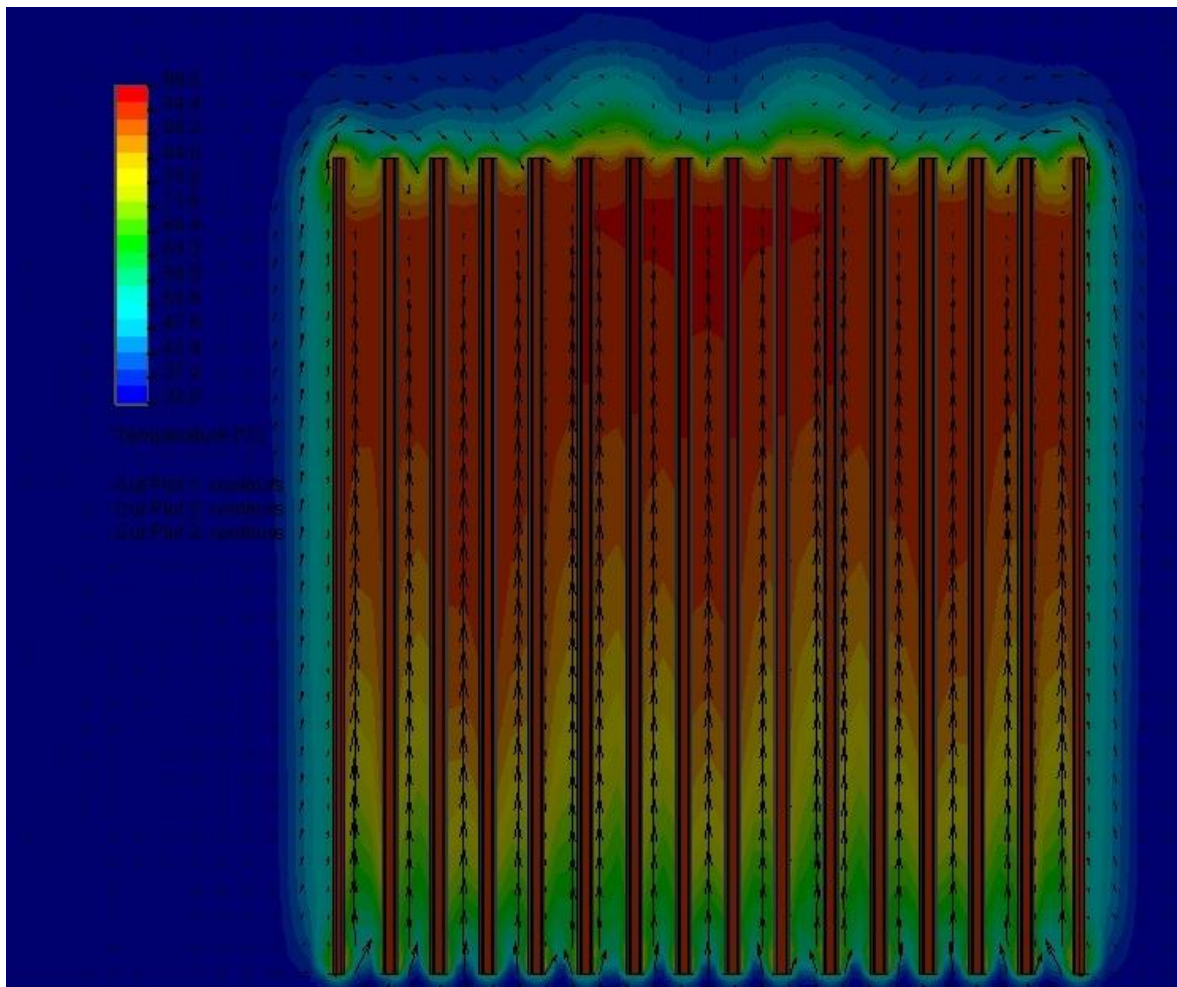
Maximální teplota 99,5°C



Obr. 38 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled na žebra



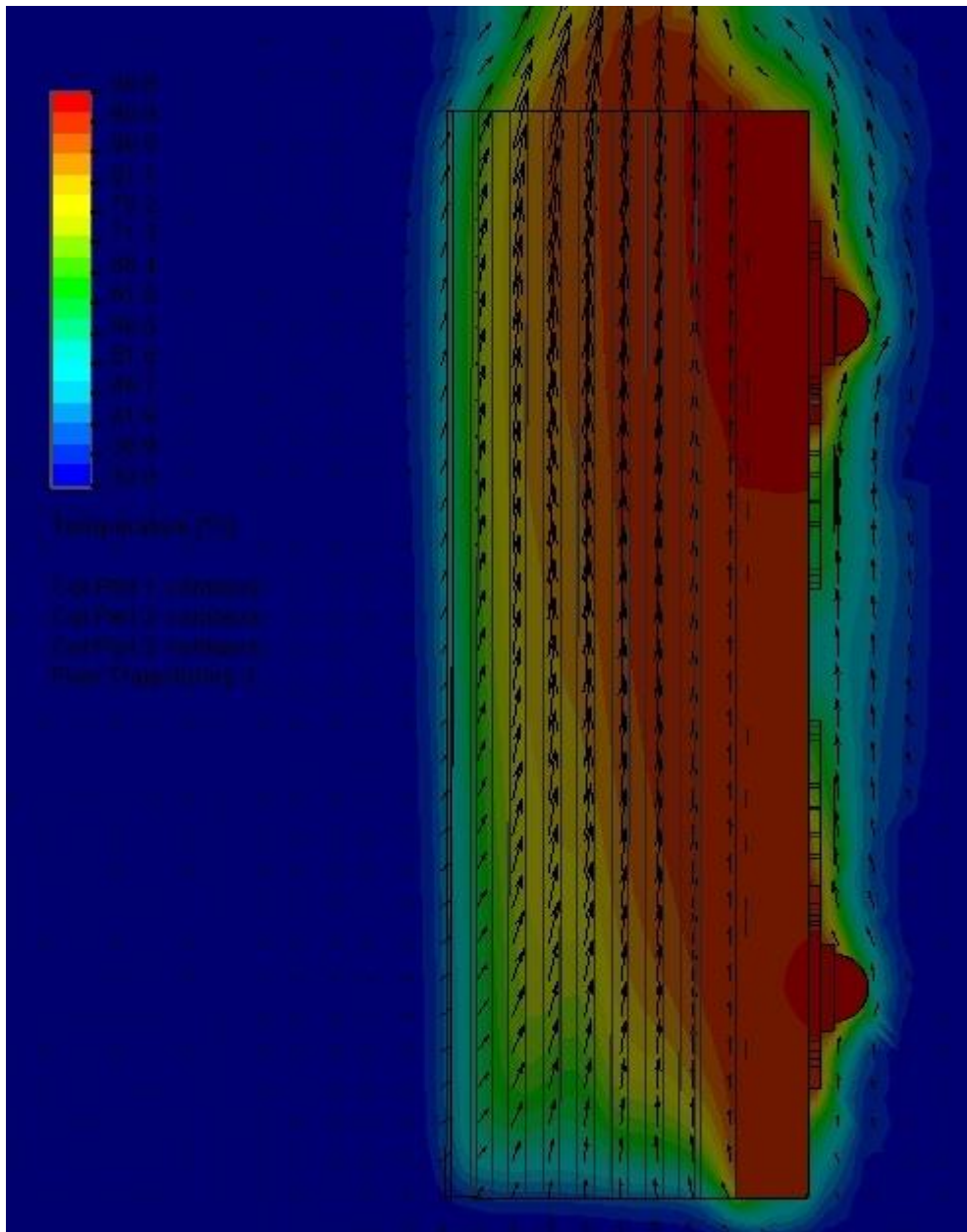
Obr. 39 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled mezi žebra



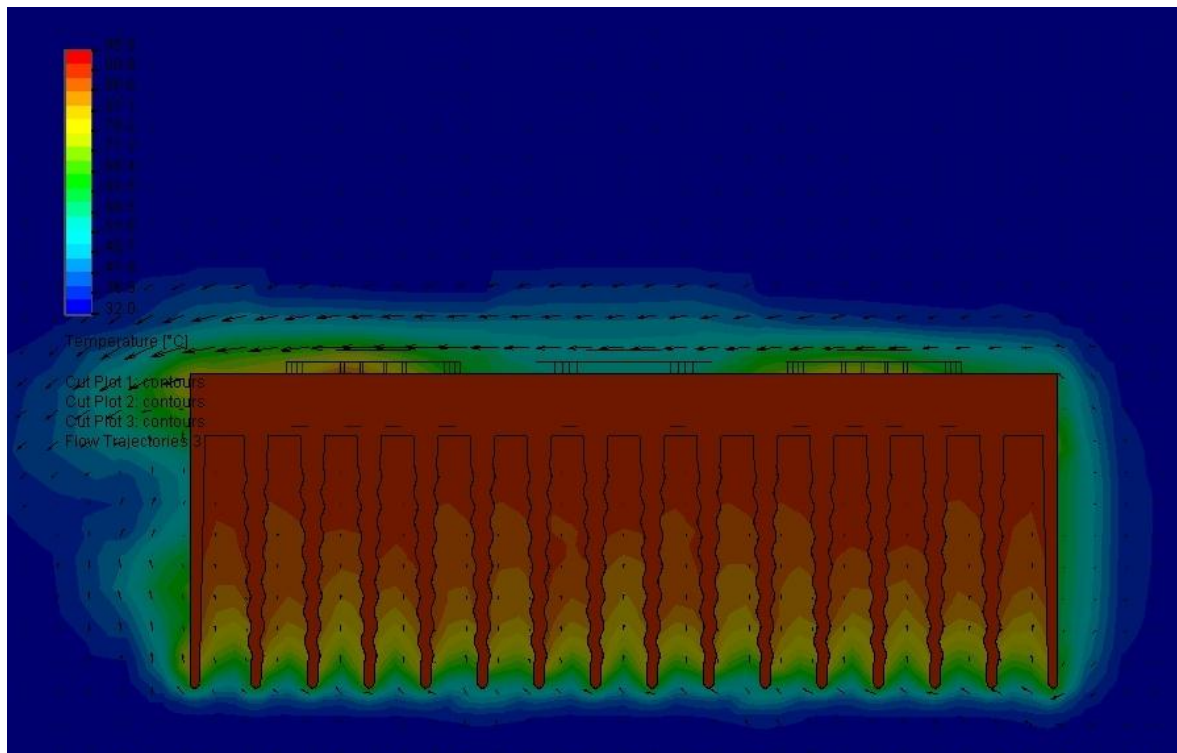
Obr. 40 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled shora

5.3 Chladič je ve svislé pozici, žebra vytočena o 45°

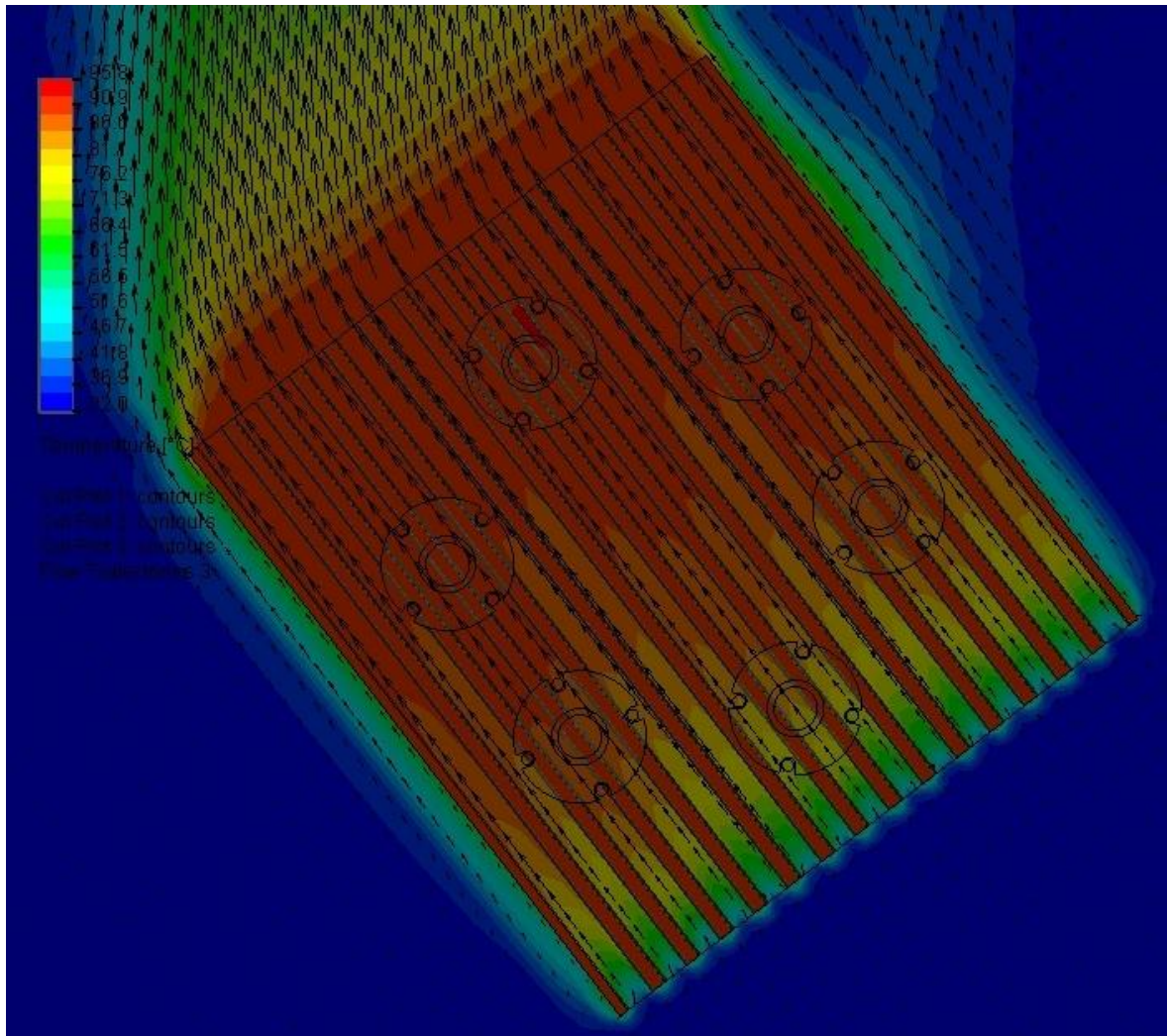
Maximální dosažená teplota 95,8°C



Obr. 41 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič svisle, žebra vytočena na 45°- pohled na žebra



Obr. 42 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič svisle, žebra vytočeny na 45°- pohled mezi žebra



Obr. 43 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič svisle, žebra vytočeny na 45°- pohled shora

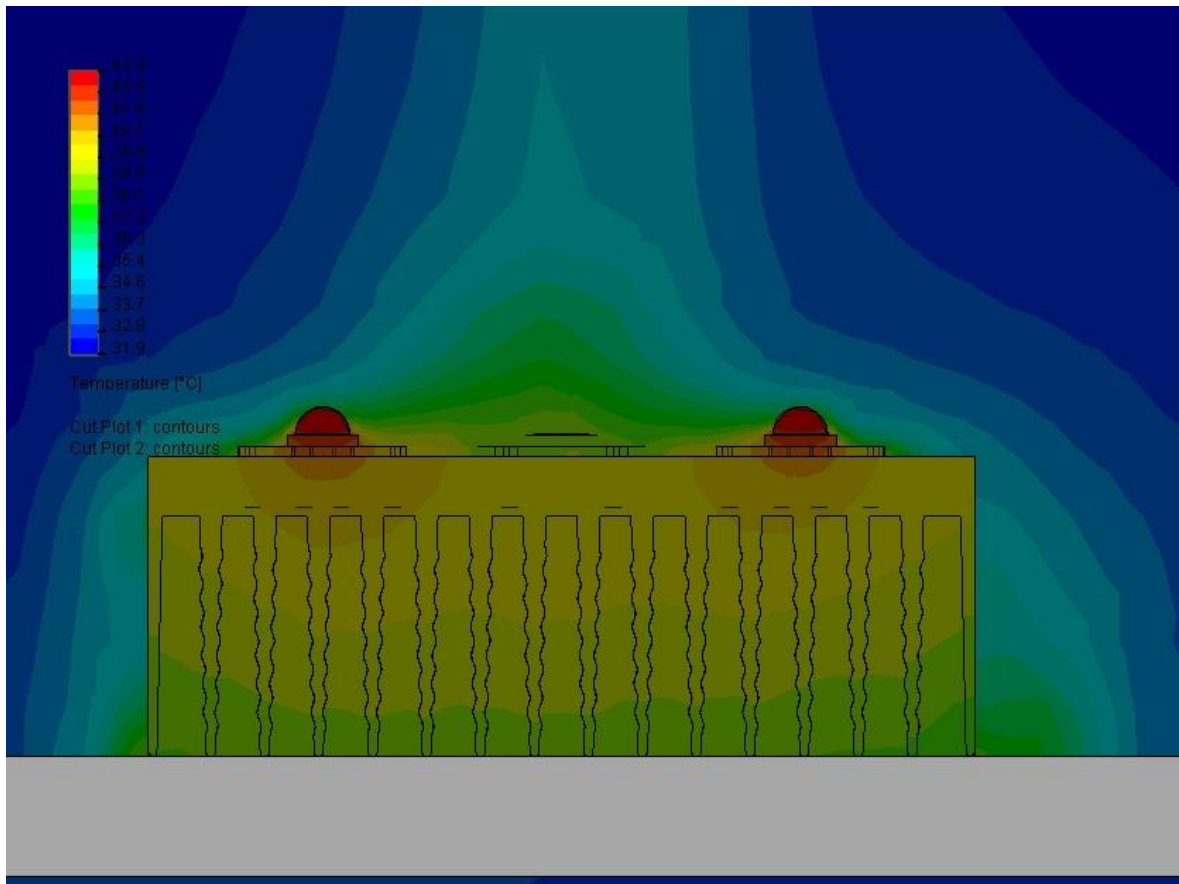
6 VYHODNOCENÍ UMÍSTĚNÍ CHLADIČŮ – ČASOVÁ ZÁVISLOST

V tomto bloku uvádím hodnoty naměřené při časové závislosti. Vzhledem k využití LED jako osvětlovacího prvku pro rychloběžnou kameru, jsem volil čas pro výpočet **15 minut (900s)**. Z tohoto důvodu jsou také uváděné teploty daleko nižší, než byly v rovnovážném stavu.

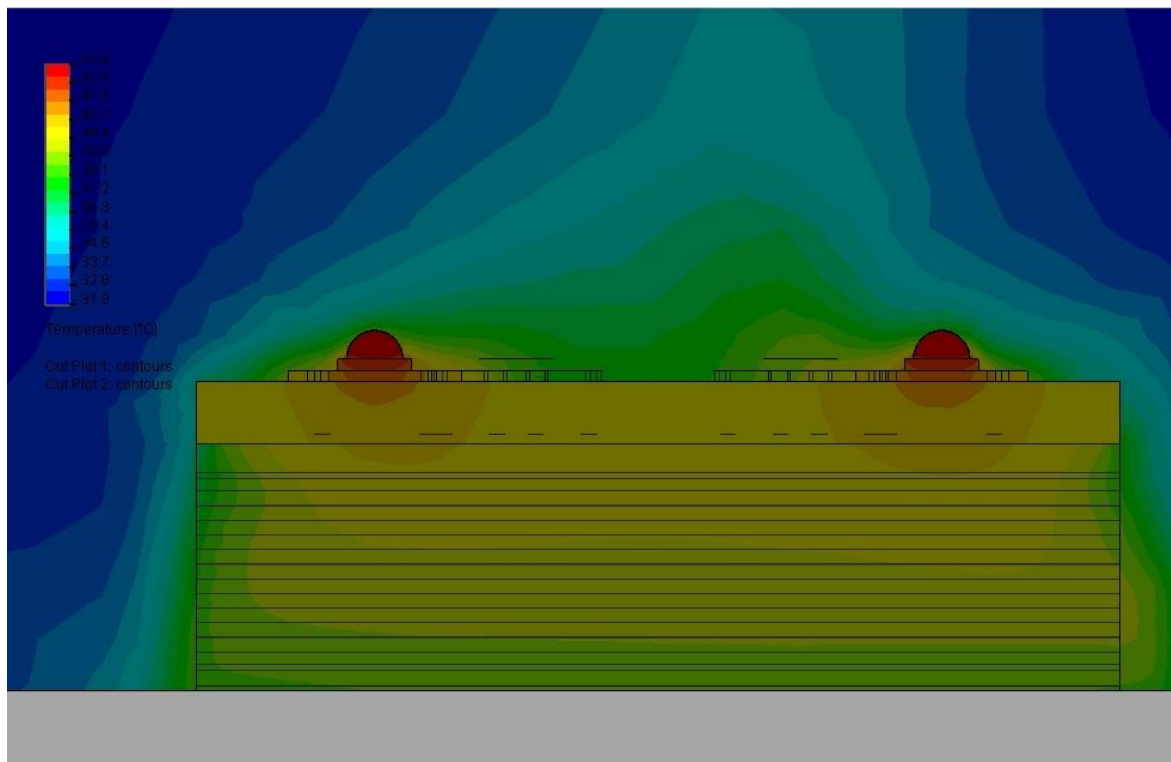
Vyhodnocení není uvedeno pro všechny polohy, ale pouze pro základní případy (chladič položen na stole; chladič svisle – žebra vodorovně, svisle; chladič otočen o 180°; chladič svisle, žebra vytočeny o 45°)

6.1 Chladič položen na stole

Maximální dosažená teplota 43,4°C



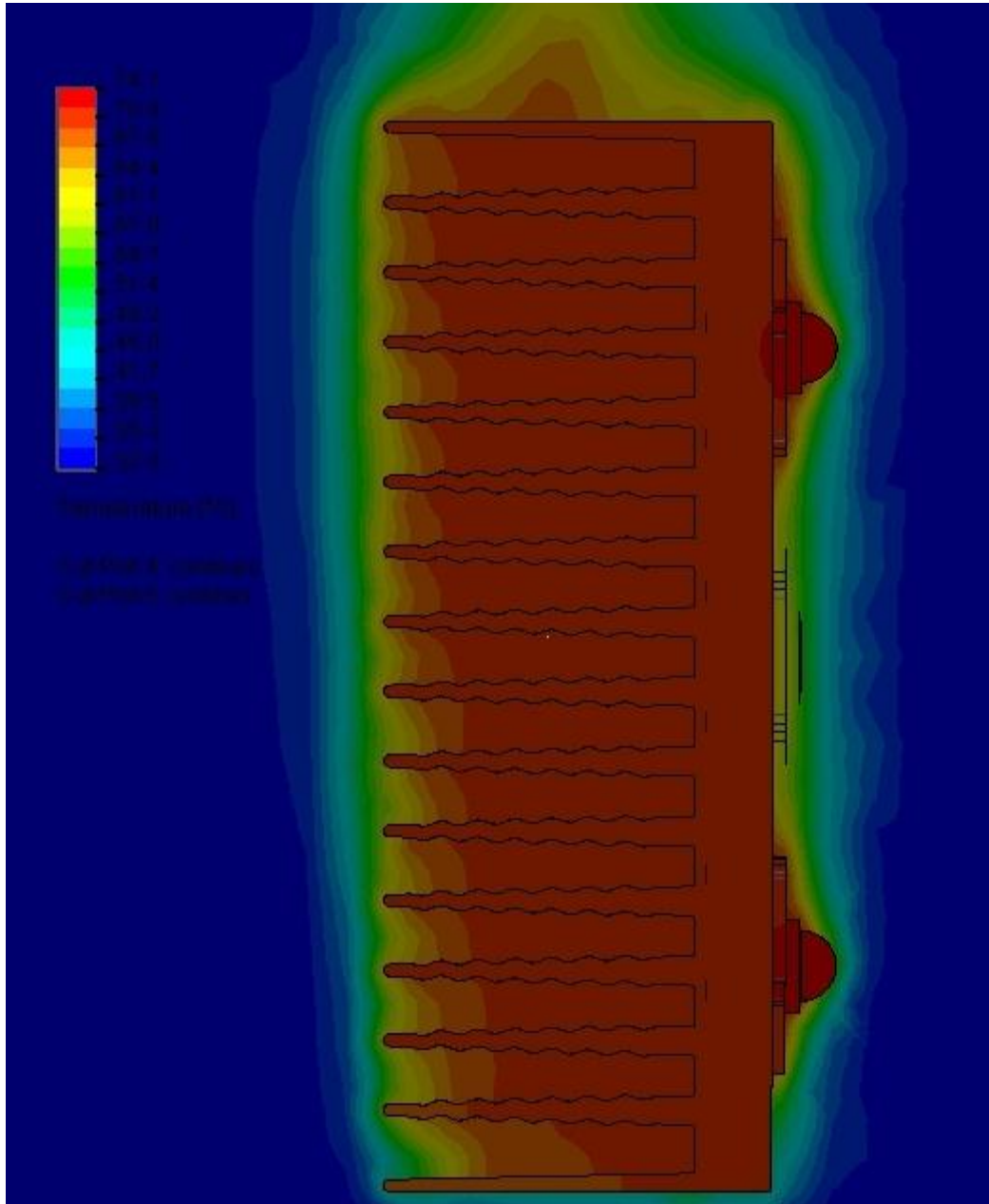
Obr. 44 Rozložení teplot – chladič položen na stole – pohled mezi žebra



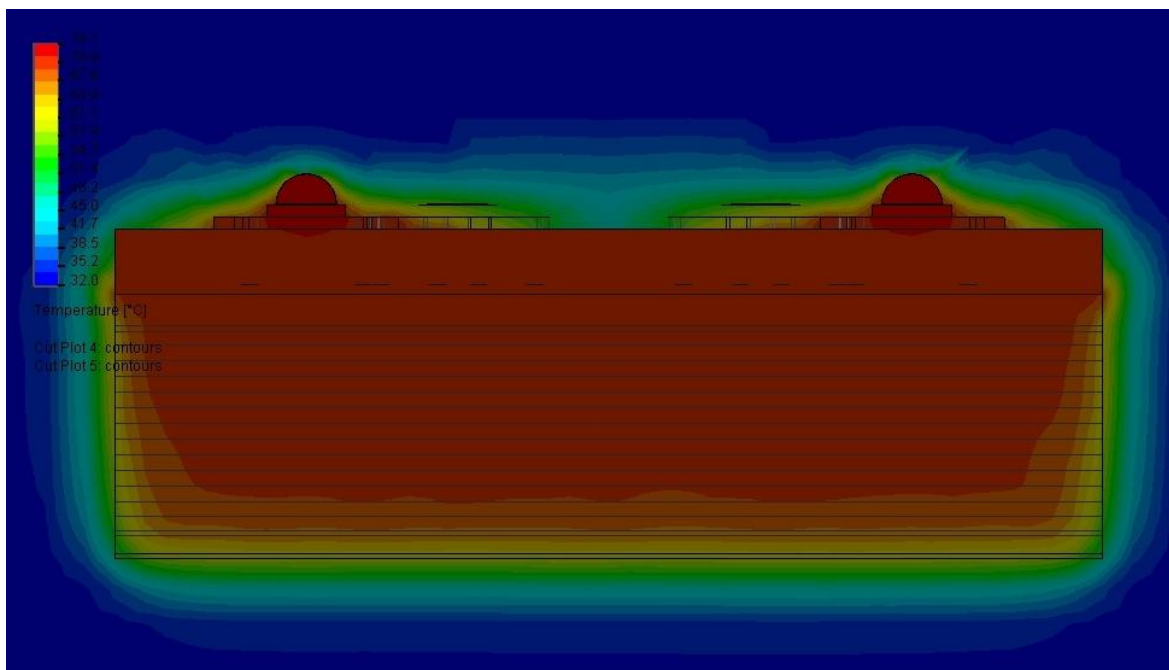
Obr. 45 Rozložení teplot – chladič položen na stole – pohled na žebra

6.2 Chladič vytočen o 90 stupňů, žebra ve vodorovné poloze

Maximální dosažená teplota 74,1°C

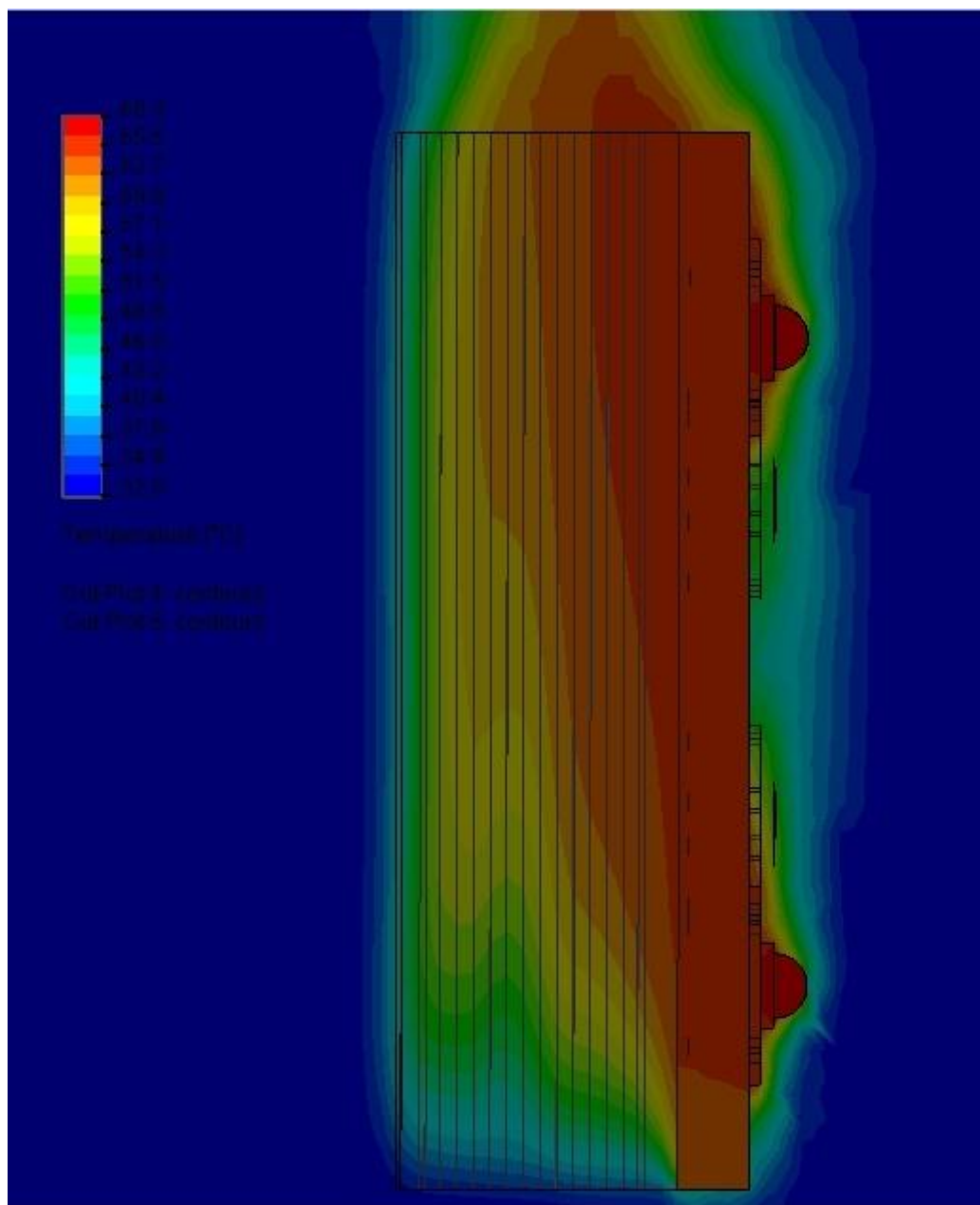


Obr. 46 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována vodorovně
– pohled mezi žebra

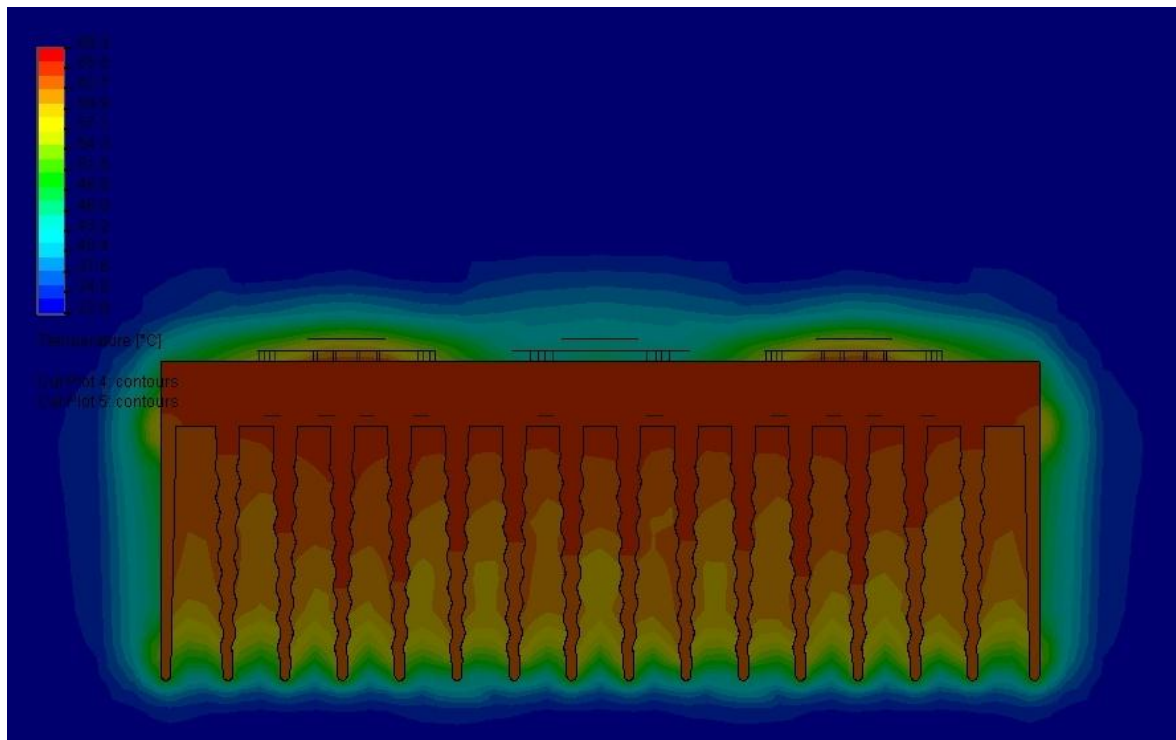


6.3 Chladič vytočen o 90 stupňů, žebra ve svislé poloze

Maximální dosažená teplota 68,3°C



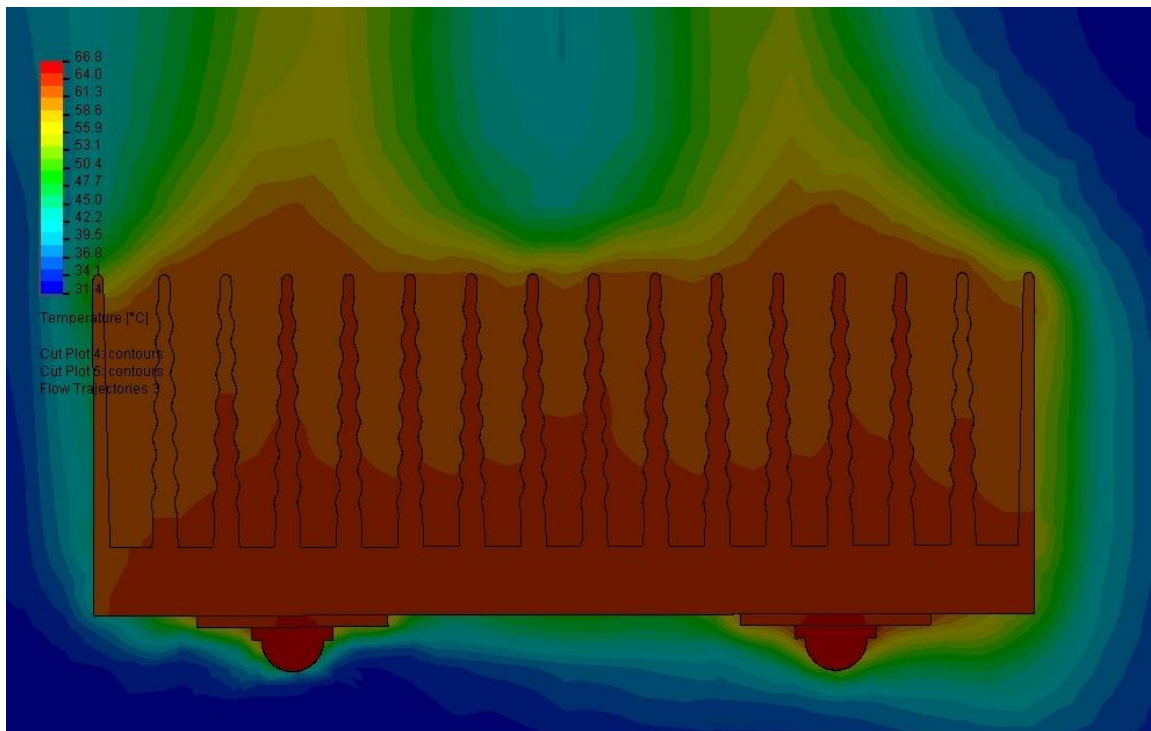
Obr. 48 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována svisle – pohled na žebra



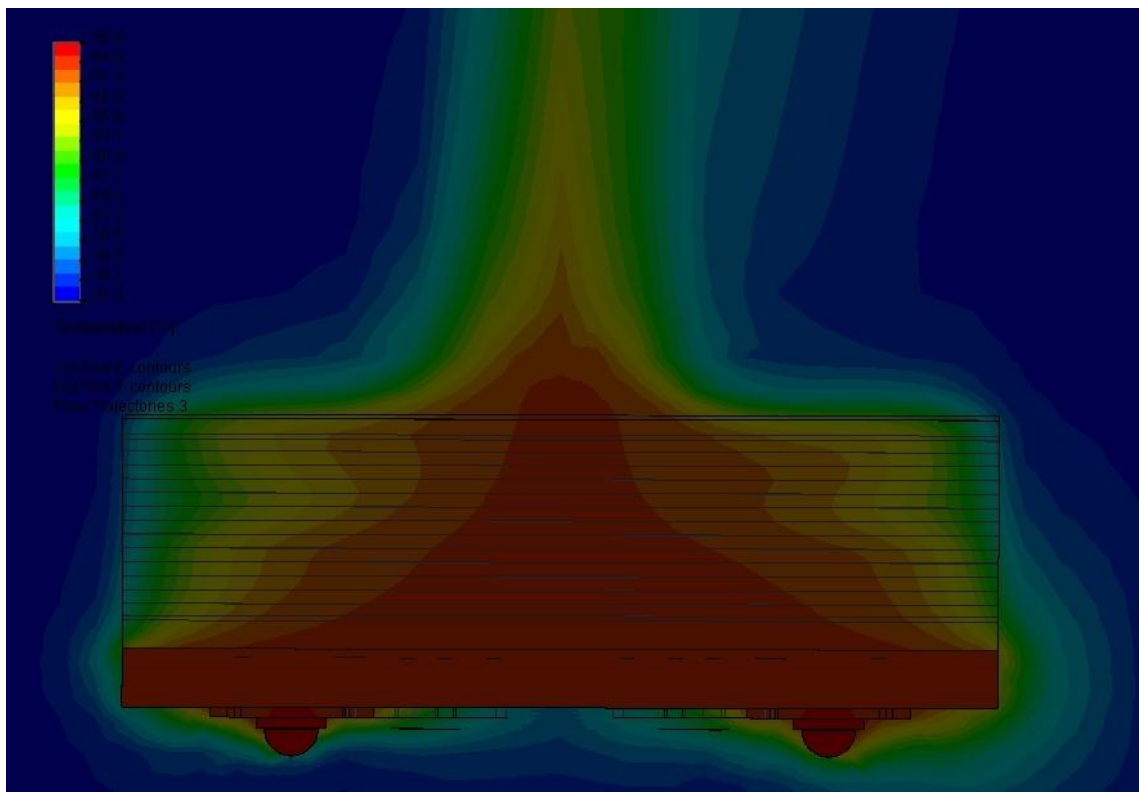
Obr. 49 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována svisle – pohled na žebra

6.4 Chladič vytočen o 180 stupňů

Maximální dosažená teplota 66,8°C



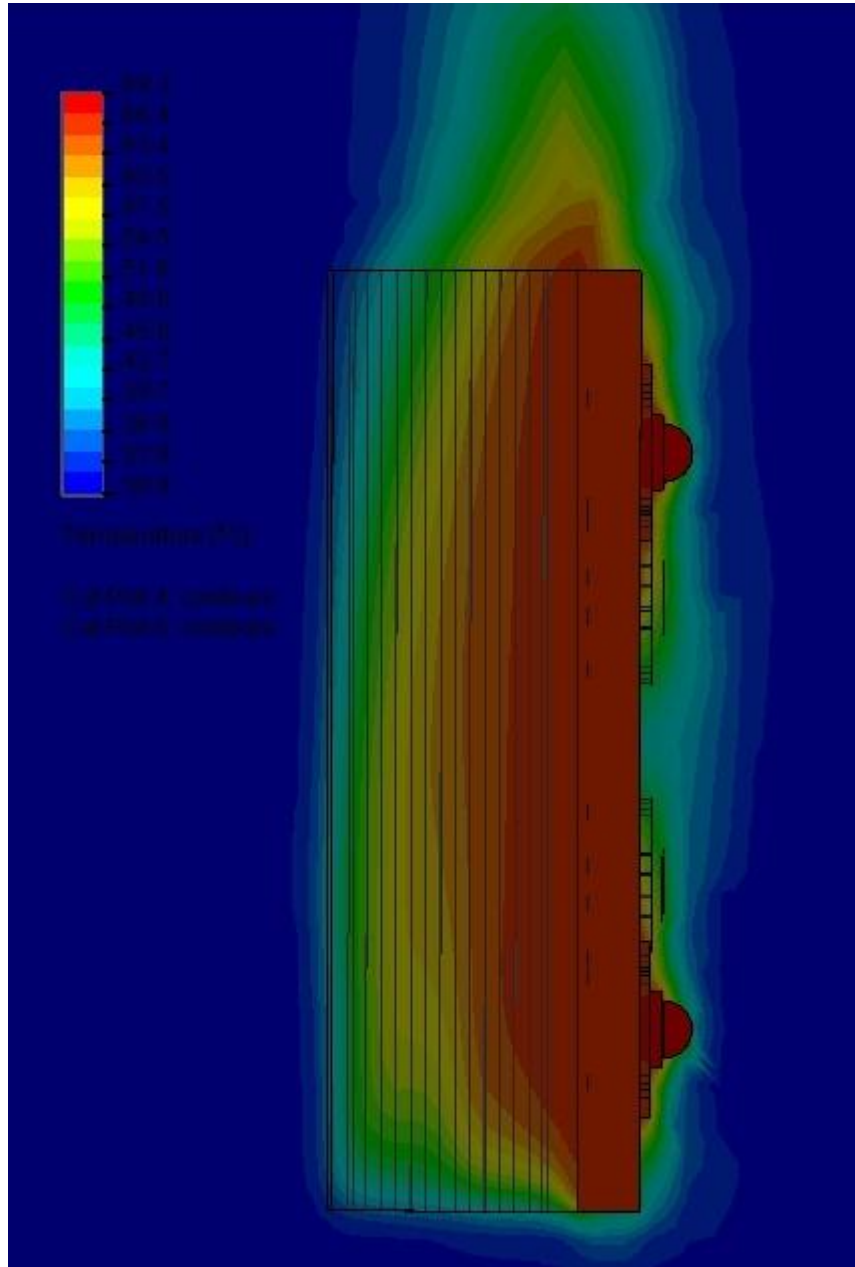
Obr. 50 Rozložení teplot – chladič uložen žebry vzhůru – pohled mezi žebra



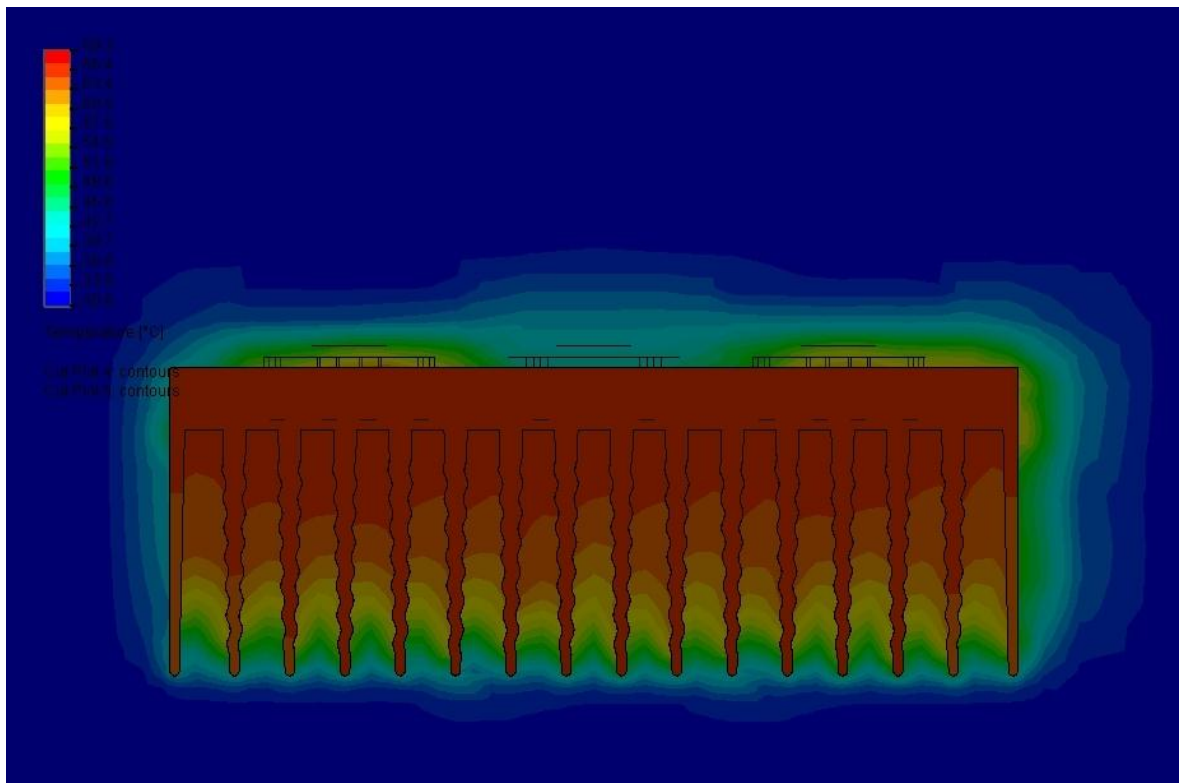
Obr. 51 Rozložení teplot – chladič uložen žebry vzhůru – pohled na žebra

6.5 Chladič ve svislé poloze, žebra vytočena o 45 stupňů

Maximální dosažená teplota 69,3°C



Obr. 52 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra vytočena o 45°- pohled na žebra



Obr. 53 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra vytočeny o 45°- pohled mezi žebra

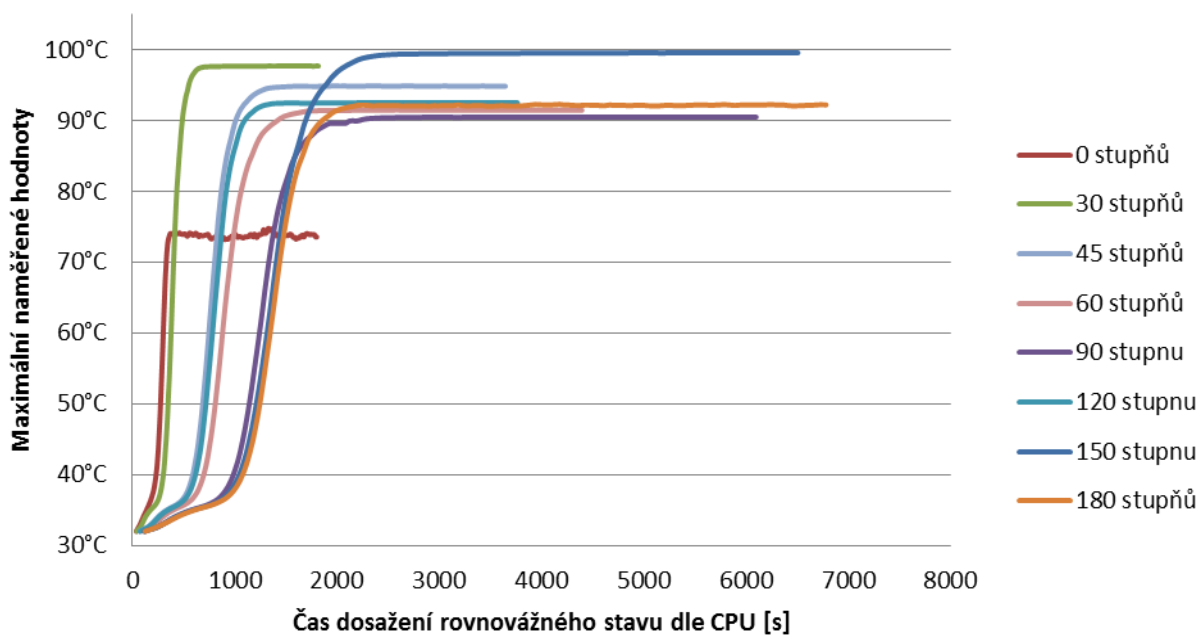
7 ZÁVĚR

V tabulkách jsou zvýrazněny maximální hodnoty, které jsou následně použity do grafu. Více stejných maximálních hodnot vzniklo vlivem zaokrouhlování, ale do grafu je vynášena jen maximální (zjišťováno v nezaokrouhleném stavu).

Měřená hodnota	Úhel natočení chladiče							
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
VG Av Chladič	69,99	93,76	91,72	87,43	86,43	88,29	95,22	88,57
VG Max LED 1	73,52	97,13	95,82	90,67	89,48	91,26	98,02	92,12
VG Max LED 2	73,40	97,17	95,54	90,82	89,70	91,54	98,34	92,18
VG Max LED 3	73,43	97,46	95,00	91,23	90,24	92,21	99,15	92,16
VG Max LED 4	73,54	97,67	94,82	91,43	90,47	92,48	99,55	92,10
VG Max LED 5	73,49	97,46	95,05	91,22	90,23	92,20	99,15	92,17
VG Max LED 6	73,48	97,16	95,59	90,81	89,70	91,53	98,34	92,19
Čas dosažení rovnovážného stavu dle CPU [s]	1802	1818	3647	4395	6099	3765	6508	6783

Tab. 6 Přehled maximálních teplot a časů dosažení rovnovážného stavu - žebra ve svislém směru

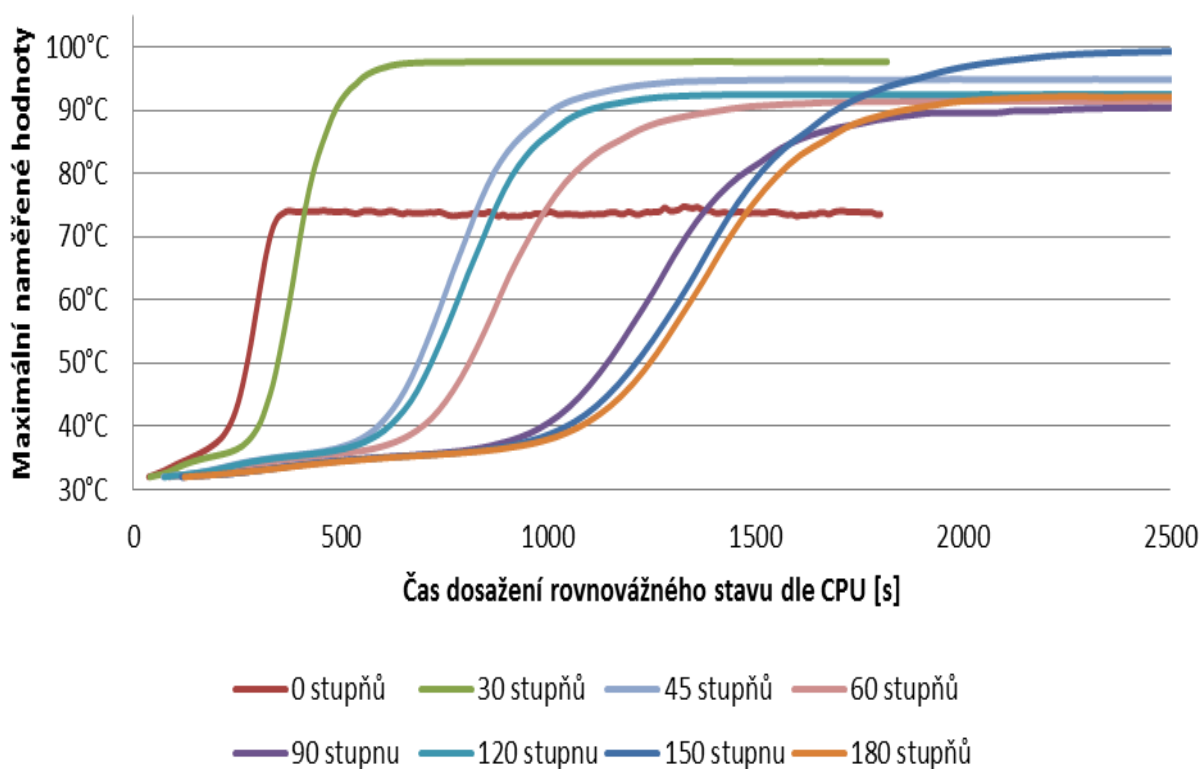
Přehled maximálních dosažených teplot při svisle uložených žebrech chladiče



Obr. 54 Přehled maximálních dosažených teplot při svisle orientovaných žebrech chladiče

S přihlédnutím k ustálenému stavu zkrátím časovou osu na cca 1/3. Dostanu graf, ze které snadněji odečteme přibližnou teplotu v časovém okamžiku.

Přehled maximálních dosažených teplot při svisle uložených žebrech chladiče omezení času

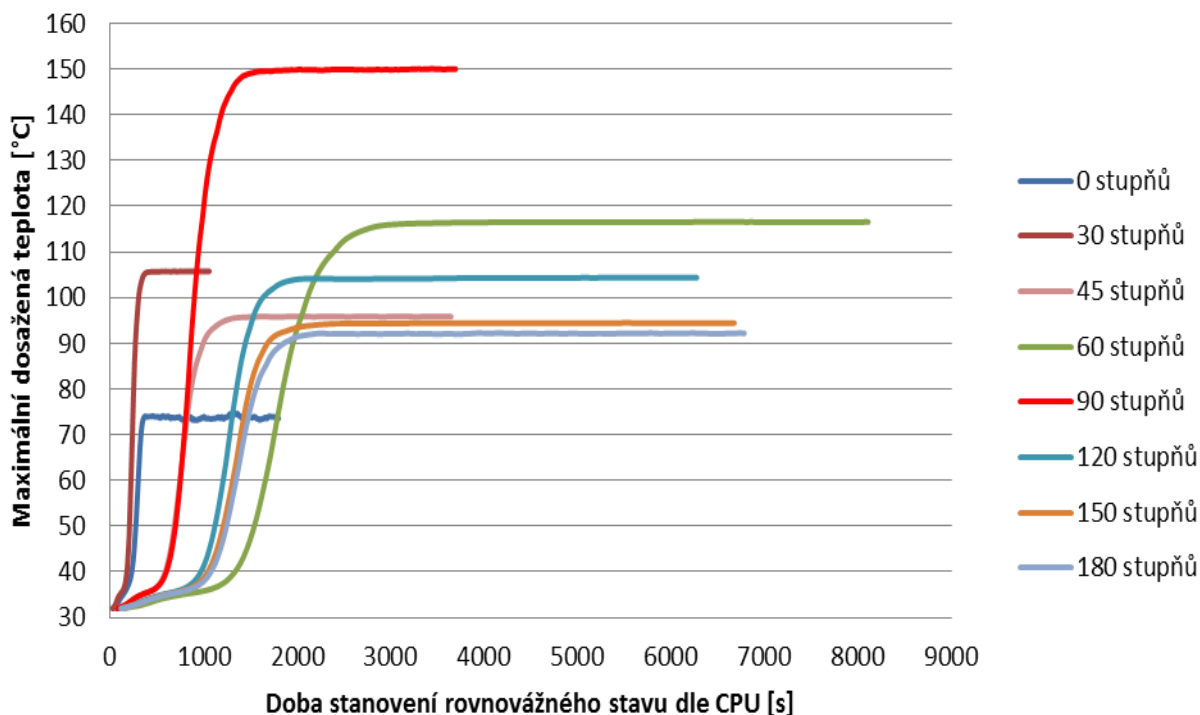


Obr. 55 Přehled maximálních dosažených teplot při svisle orientovaných žebrech chladiče; omezení času

Měřená hodnota	Úhel natočení chladiče							
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	150°	180°
VG Av Chladič	69,99	102,1	91,72	112,92	146,31	100,69	90,75	88,57
VG Max LED 1	73,52	105,75	95,82	116,54	149,87	104,16	94,26	92,12
VG Max LED 2	73,40	105,64	95,54	116,32	149,47	104,16	94,24	92,18
VG Max LED 3	73,43	105,64	95,00	116,32	149,46	104,15	94,24	92,16
VG Max LED 4	73,54	105,74	94,82	116,53	149,86	104,16	94,25	92,10
VG Max LED 5	73,49	105,72	95,05	116,51	149,98	104,35	94,44	92,17
VG Max LED 6	73,48	105,72	95,59	116,52	149,98	104,35	94,44	92,19
Čas dosažení rovnovážného stavu dle CPU [s]	1802	1060	3647	8108	3696	6275	6677	6783

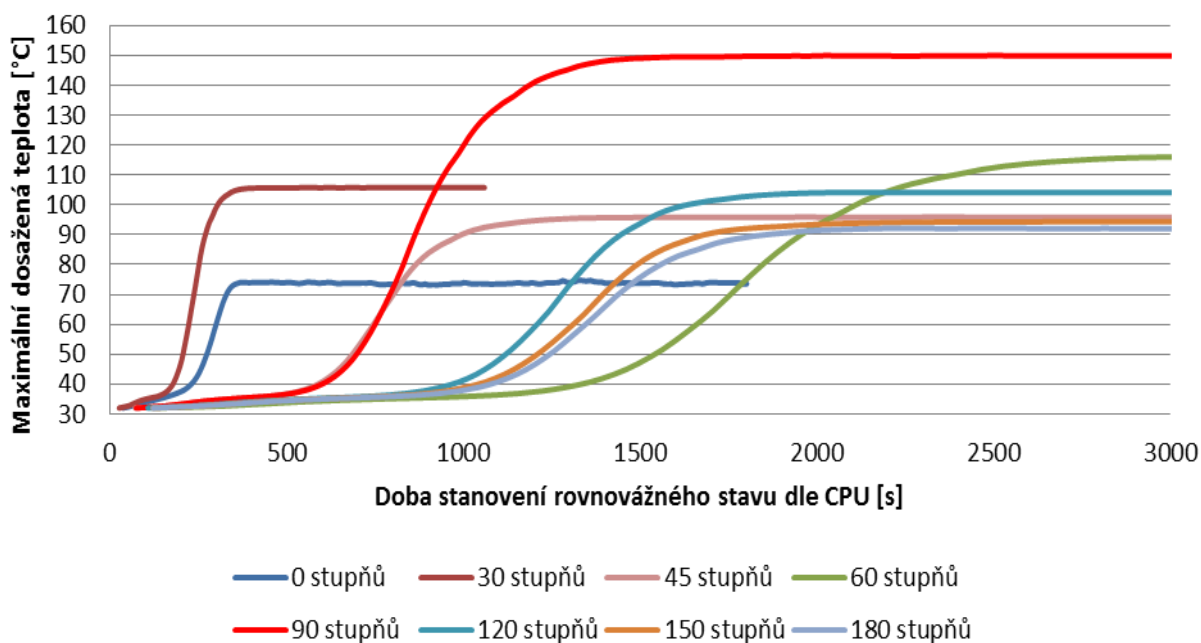
Tab. 7 Přehled maximálních teplot a časů dosažení rovnovážného stavu - žebra ve vodorovném směru

Maximální dosažené teploty při vodorovně orientovaných žebrech chladiče



Obr. 56 Přehled maximálních dosažených teplot při vodorovně orientovaných žebrech chladiče

Maximální dosažené teploty při vodorovně orientovaných žebrech chladiče omezení času

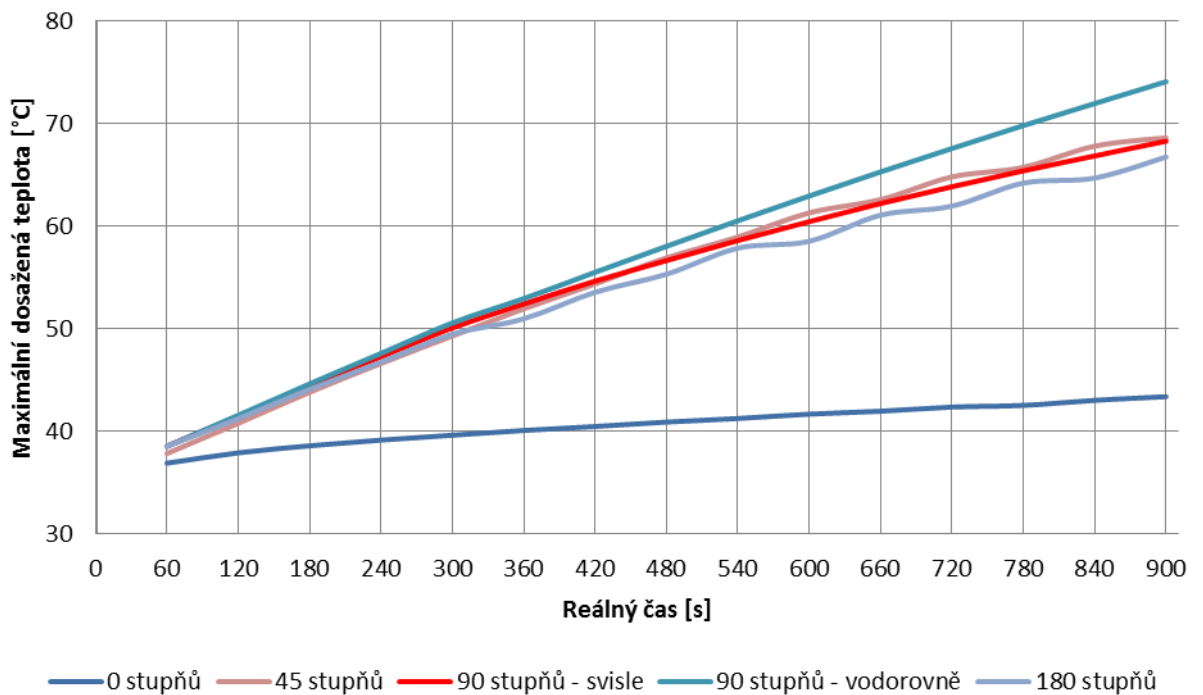


Obr. 57 Přehled maximálních dosažených teplot při vodorovně orientovaných žebrech chladiče; omezení času

Měřená hodnota	Úhel natočení chladiče				
	0°	45°	90° svisle	90° vodorovně	180°
VG Av Chladič	39,81	65,73	64,45	70,50	63,18
VG Max LED 1	43,35	69,34	68,30	74,01	66,61
VG Max LED 2	43,25	69,27	68,15	73,76	66,54
VG Max LED 3	43,23	69,22	67,79	73,75	66,57
VG Max LED 4	43,40	69,24	67,62	74,00	66,68
VG Max LED 5	43,32	69,23	67,78	74,09	66,76
VG Max LED 6	43,33	69,29	68,14	74,09	66,75

Tab. 8 Přehled maximálních teplot pro teplotní závislost – nastavený čas 900 s

Maximální dosažené teploty při čase $t=900s$



Obr. 58 Přehled maximálních dosažených teplot pro teplotní závislost (nastavený čas 900s)

Z grafů se dá odvodit, že maximální teplota u chladiče položeného na stole je nižší, než v ostatních případech. Bohužel této teploty dosáhneme ve velice krátkém čase. Přibližně stejného času dosahujeme i při uložení, kdy je chladič vykloněn o 30° .

Na grafu vodorovně orientovaných žebër si také můžeme všimnout výrazného zvýšení teploty ve velice krátkém čase, pokud je chladič vytočen svisle (90°). V obrázku (str. 34) je viditelná vysoká rychlost proudícího vzduchu pouze v oblasti kraje žebër – díky tomu se nemá chladicí médium možnost dostat do mezižebërni oblasti.

S přihlédnutím k životnosti použitých diod bych tyto možnosti uložení viděl jen jako krajní případy.

U grafu tepelné závislosti si jsem vědom značného nepoměru – dle grafů rovnovážných stavů, by při čase $t=900s$, neměl žádný prvek přesahovat teplotu 50°C . Avšak jak je uvedeno v popisku, jedná se o časy dle procesoru v počítači. Pravděpodobně díky tomu vznikají zkreslené výsledky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Heatpipe. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 30.8.2011 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Heatpipe>
- [2] JERHOT, J. a M. JIRÁČEK. *Optoelektronika*. Plzeň: VSŠE, 1987, s. 124. ISBN 55-063-87.
- [3] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky: Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha: BEN - technická literatura, 2007, s. 160. ISBN 80-7300-184-5.
- [4] NEVÝHODY LED. TRUSTIA. *Svítlidla a osvětlení Deltalight* [online]. 2011 [cit. 2012-08-14]. Dostupné z: <http://www.svitidla-deltalight.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- LED** Light emitting diode – světlo emitující dioda; (LED dioda je tudíž nesprávně používáno, ale tolerováno, kvůli jeho vžitosti.)
- SMD** Surface mount device – součástka pro povrchovou montáž (dáno umístěním kontaktů)
- OLED** Organic Light emitting diode – světlo emitující dioda s organickými prvky

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Průřez diodou</i>	11
<i>Obr. 2 Struktura OLED diody.....</i>	12
<i>Obr. 3 Princip heatpipe</i>	19
<i>Obr. 4 Testovaný model chladiče</i>	26
<i>Obr. 5 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič položen vodorovně - pohled na mezeru.....</i>	28
<i>Obr. 6 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič uložen vodorovně - pohled na žebra</i>	28
<i>Obr. 7 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič uložen vodorovně - pohled shora</i>	29
<i>Obr. 8 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na mezeru.....</i>	29
<i>Obr. 9 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na žebra</i>	30
<i>Obr. 10 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled shora</i>	30
<i>Obr. 11 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na mezeru.....</i>	31
<i>Obr. 12 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na žebra</i>	32
<i>Obr. 13 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled shora</i>	33
<i>Obr. 14 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na mezeru.....</i>	34
<i>Obr. 15 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na žebra</i>	35
<i>Obr. 16 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled shora</i>	36
<i>Obr. 17 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled na mezeru.....</i>	37
<i>Obr. 18 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled na žebra</i>	38

<i>Obr. 19 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled shora</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 20 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled na mezeru.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 21 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled na žebra</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 22 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled shora</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 23 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen žebry nahoru – pohled na mezeru</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 24 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen žebry nahoru – pohled na žebra.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 25 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen žebry nahoru – pohled shora</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 26 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na žebra</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 27 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled na mezeru.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 28 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 30° - pohled shora</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 29 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na žebra</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 30 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled na mezeru.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 31 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 60° - pohled shora</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 32 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na žebra</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 33 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled na mezeru.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 34 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 90° - pohled shora</i>	<i>53</i>

<i>Obr. 35 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled na žebra</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 36 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled do mezery</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 37 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 120° - pohled shora</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled na žebra</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled mezi žebra</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 40 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič vytočen o 150° - pohled shora</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 41 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič svisle, žebra vytočeny na 45°- pohled na žebra</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 42 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič svisle, žebra vytočeny na 45°- pohled mezi žebra</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 43 Rozložení teplot a intenzita proudícího vzduchu – chladič svisle, žebra vytočeny na 45°- pohled shora</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 44 Rozložení teplot – chladič položen na stole – pohled mezi žebra</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 45 Rozložení teplot – chladič položen na stole – pohled na žebra</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 46 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována vodorovně – pohled mezi žebra</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 47 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována vodorovně – pohled na žebra</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 48 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována svisle – pohled na žebra</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 49 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra orientována svisle – pohled na žebra</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 50 Rozložení teplot – chladič uložen žebry vzhůru – pohled mezi žebra</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 51 Rozložení teplot – chladič uložen žebry vzhůru – pohled na žebra</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 52 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra vytočeny o 45°- pohled na žebra</i>	<i>70</i>

<i>Obr. 53 Rozložení teplot – chladič uložen svisle, žebra vytočeny o 45°- pohled mezi žebra</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 54 Přehled maximálních dosažených teplot při svisle orientovaných žebrech chladiče</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 55 Přehled maximálních dosažených teplot při svisle orientovaných žebrech chladiče; omezení času.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 56 Přehled maximálních dosažených teplot při vodorovně orientovaných žebrech chladiče</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 57 Přehled maximálních dosažených teplot při vodorovně orientovaných žebrech chladiče; omezení času</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 58 Přehled maximálních dosažených teplot pro teplotní závislost (nastavený čas 900s)</i>	<i>76</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Součinitel přenosu tepla v závislosti na chladícím médiu</i>	15
<i>Tab. 2 Součinitel sálavosti v závislosti na materiálu a povrchové úpravě</i>	16
<i>Tab. 3 Druhy konvekce v závislosti na součiniteli přestupu tepla</i>	18
<i>Tab. 4 Vliv umístění a povrchové úpravy na vyzařování</i>	22
<i>Tab. 5 Přehled materiálů a jejich tepelných vodivostí</i>	23
<i>Tab. 6 Přehled maximálních teplot a časů dosažení rovnovážného stavu - žebra ve svislém směru</i>	72
<i>Tab. 7 Přehled maximálních teplot a časů dosažení rovnovážného stavu - žebra ve vodorovném směru</i>	74
<i>Tab. 8 Přehled maximálních teplot pro teplotní závislost – nastavený čas 900 s</i>	75

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY

