

Návrh chlazení elektrických komponent stolního počítače s využitím metod CFD

Lukáš Blaťák

Bakalářská práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Lukáš Blaták
Osobní číslo: A22148
Studijní program: B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci
Specializace: Průmyslová automatizace
Forma studia: Kombinovaná
Téma práce: Návrh chlazení elektrických komponent stolního počítače s využitím metod CFD
Téma práce anglicky: Design of Cooling for Desktop Computer Electronic Components Using CFD Methods

Zásady pro vypracování

- Popište vznik tepla z elektronických součástek a následný přenos tepla v uzavřeném prostoru, včetně možných dopadů působení nadměrného tepla.
- Uveďte možné způsoby chlazení elektronických komponent ve vztahu ke stolním počítačům (jejich výhody/nevýhody).
- Popište možné způsoby řešení chladicích systémů za pomoci metod virtuálního prototypování.
- Definujte teplotní limity jednotlivých zvolených hardwarových komponent stolního počítače.
- Proveďte návrh chladiče s cílem zajistit maximální efektivitu odvodu tepla z mikroprocesoru pomocí metod CFD.
- Proveďte analýzu šíření tepla ve skříni zvolené sestavy stolního počítače.

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

Seznam doporučené literatury:

1. FUKÁTKO, Tomáš a FUKÁTKO, Jaroslav. Teplo a chlazení v elektronice II. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0199-3.
2. KŘIVOHLÁVEK, Jindřich. Chlazení počítače: kompletní průvodce (nejen) pro hráče. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-802-5115-091.
3. YU, C.-W. a WEBB, R.L. Thermal design of a desktop computer system using CFD analysis. In: Seventeenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No.01CH37189). IEEE, 2001, s. 18-26. ISBN 0-7803-6649-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/STHERM.2001.915139>.
4. ANSYS Inc. ANSYS Fluent User's Guide. USA: ANSYS Inc., 2013.
5. YUDANTO, Fajar Dwi, 2023. Numerical study optimation design of CPU cooling system analysis using CFD method. Online. *Applied Engineering and Technology*. Roč. 2, č. 3, s. 241-253. ISSN 2829-4998. Dostupné z: <https://doi.org/10.31763/aet.v2i3.1207>.
6. CHANNAMALLIKARJUN, 2014. THERMAL ANALYSIS OF CPU WITH VARIABLE BASEPLATE HEATSINK USING CFD. Online. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. Roč. 03, č. May, s. 510-515. ISSN 2319-1163. Dostupné z: <https://ijret.org/volumes/2014v03/i15/IJRET20140315096.pdf>.
7. LAKSHMANAN, S., 2018. CFD analysis for rate of cooling of heat sink for CPU. Online. *International Journal for Advanced Research and Development*. Roč. 3, č. 6, s. 23-27. Dostupné z: <https://www.ijarnd.com/manuscripts/v3i6/V3i6-1150.pdf>.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Drábek, Ph.D.
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

6. prosince 2024

Termín odevzdání bakalářské práce:

27. května 2025

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. prosince 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá komplexní problematikou vzniku a šíření tepla v uzavřeném prostředí stolního počítače. Primárním cílem práce je zjistit jakým způsobem se teplo v počítači generuje a jakými způsoby lze teplo z počítačových komponent efektivně odvézt do okolního prostředí. V úvodní části je teoreticky popsán mechanismus generování tepla v elektronických součástkách a jeho šíření vedením, prouděním a sáláním uvnitř počítačové skříně, včetně možných negativních dopadů na životnost a spolehlivost hardwaru při překročení kritických teplot. Navazující kapitola porovnává používané chladičí metody – vzduchové chladiče, kapalinové okruhy, heat-pipe systémy, imerzní chlazení, kompresorové chlazení a termoelektrické moduly. Klíčovou část práce tvoří aplikace metod virtuálního prototypování, konkrétně 3D CAD modelování a numerické simulace proudění a přestupu tepla (CFD), které umožňují optimalizovat geometrii chladičích systémů ještě před fyzickou výrobou. Na základě analýzy datových listů a testů jsou definovány teplotní limity klíčových komponent (CPU, GPU, VRM, paměťové moduly a uložště dat), které slouží jako vstupní kritéria pro návrh chladiče mikroprocesoru.

Výstupem je případová studie návrhu heatsinku s důrazem na co nejvyšší efektivitu chlazení, ovšem pouze za použití hliníkového monobloku a ventilátoru.

V poslední části se práce zaměřuje na analýzu distribuce tepla uvnitř kompletní sestavy stolního počítače, a to v simulační rovině. Zde je cílem odhalit případné nedostatky sestavy, zhodnotit, zda návrh splňuje cíle vytyčené v předchozí kapitolách, a to konkrétně dodržení teplotních limitů jednotlivých komponent využitých v této sestavě. Práce tímto demonstruje, že kombinací pokročilých simulačních nástrojů a virtuálních prototypů lze zvýšit efektivitu návrhu počítačových komponent nebo sestav, prodloužit jejich životnost a zároveň snížit finanční zátěž při tvorbě fyzických prototypů.

Klíčová slova: simulace, CFD, 3D modely, teplo, chlazení, heatsink, stolní počítač

ABSTRACT

This bachelor's thesis examines the complex issues of heat generation and propagation in the confined environment of a desktop computer. Its primary goal is to determine how heat is generated inside the computer and by which methods it can be effectively removed from components to the surrounding environment.

The introductory section describes, in theoretical terms, the mechanisms of heat generation in electronic components and its transfer by conduction, convection and radiation within the computer case, including the potential negative impacts on hardware service life and reliability once critical temperatures are exceeded. The subsequent chapter compares the cooling methods currently in use—air coolers, liquid loops, heat-pipe systems, immersion cooling, compressor cooling and thermoelectric modules.

A key part of the thesis applies virtual-prototyping techniques—specifically 3D CAD modelling and numerical fluid-flow and heat-transfer simulations (CFD)—to optimise the geometry of cooling systems before any physical manufacturing occurs. Drawing on datasheet analysis and empirical tests, the temperature limits of the main components (CPU, GPU, VRM, memory modules and storage devices) are defined and used as design criteria for the microprocessor cooler.

The outcome is a case study detailing the design of an aluminium heat sink focused on achieving the highest possible cooling efficiency using a single aluminium monoblock.

In the final section, the thesis analyses heat distribution within the complete desktop-computer assembly purely in simulation. The aim is to identify potential shortcomings of the build and to evaluate whether the design meets the targets set in earlier chapters—namely, adherence to the temperature limits of each component employed. The work demonstrates that combining advanced simulation tools with virtual prototypes can enhance the efficiency of computer-component or whole-system design, extend service life and simultaneously reduce the financial burden associated with creating physical prototypes.

Keywords: simulation, CFD, 3D models, heat, cooling, heatsink, desktop computer

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Drábkovi, Ph.D. za cenné rady, vstřícný přístup a užitečné konzultace při psaní bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	15
1 TEPLO	16
1.1 PŘÍČINY VZNIKU TEPLA V ELEKTRICKÝCH SOUČÁSTKÁCH.....	16
1.2 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA	17
1.2.1 Šíření tepla vedením.....	17
1.2.2 Šíření tepla prouděním	19
1.2.3 Šíření tepla zářením.....	22
1.3 DOPADY NADMĚRNÉHO TEPLA NA ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY	22
1.3.1 Příčiny nadměrného tepla.....	23
1.3.2 Důsledky nadměrného tepla pro komponenty.....	23
1.3.3 Prevence proti vzniku nadměrného tepla	24
1.3.4 Moderní technologie pro teplotní management	24
2 ZPŮSOBY CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH KOMPONENT VE VZTAHU KE STOLNÍM POČÍTAČŮM	25
2.1 VZDUCHOVÉ CHLAZENÍ	25
2.1.1 Heatsink.....	25
2.1.2 Heatpipe	26
2.1.3 Ventilátor.....	27
2.2 VODNÍ OKRUH	29
2.3 KOMPRESOROVÉ CHLAZENÍ.....	30
2.4 PELTIERŮV ČLÁNEK.....	31
2.5 TEKUTÝ DUSÍK	33
2.6 IMERZNÍ CHLAZENÍ.....	33
3 ŘEŠENÍ CHLADICÍCH SYSTÉMŮ ZA POMOCÍ METOD VIRTUÁLNÍHO PROTOTYPOVÁNÍ	35
3.1 VIRTUÁLNÍ PROTOTYPOVÁNÍ POMOCÍ METODY CFD.....	35
3.1.1 Využití CFD	35
3.1.2 Preprocesor.....	36
3.1.3 Řešič.....	36
3.1.4 Postprocesor	37
3.2 MATEMATICKÝ POPIS CFD	37
3.2.1 Navier-Stokesovy rovnice.....	38
3.2.2 Rovnice kontinuity	38
3.3 ANSYS FLUENT	38
4 TEPLTNÍ LIMITY HARWAROVÝCH KOMPONENT STOLNÍHO POČÍTAČE.....	40
4.1 PROCESOR	40

4.2	OPERAČNÍ PAMĚŤ	41
4.3	ZÁKLADNÍ DESKA	41
4.4	GRAFICKÁ KARTA.....	41
4.5	SSD.....	41
4.6	HDD	42
4.7	NAPÁJECÍ ZDROJ	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
5	NÁVRH CHLADIČE PRO ODVOD TEPLA Z MIKROPROCESORU POMOCÍ METOD CFD	44
5.1	TVORBA 3D MODELŮ PRO CFD	44
5.2	GEOMETRIE CHLADIČE	45
5.3	VENTILÁTOR	46
5.4	ZDROJ TEPLA	47
5.5	OKOLNÍ PROSTŘEDÍ	47
5.6	TVORBA VÝPOČETNÍ SÍTĚ	48
5.6.1	Kvalita buněk sítě	50
5.7	NASTAVENÍ ŘEŠIČE.....	52
5.8	POČÁTEČNÍ PODMÍNKY SIMULACE	52
5.8.1	Specifikace využitých materiálů	53
5.9	ANALÝZA VÝSLEDKŮ	54
5.9.1	Konturový graf	54
5.9.2	Teplotní profil horní a spodní plochy	55
5.9.3	Konturový řez chladičem	56
6	ANALÝZA ŠÍŘENÍ TEPLA VE SKŘÍNI ZVOLENÉ SESTAVY STOLNÍHO POČÍTAČE.....	59
6.1	ANALYZOVANÝ MODEL	59
6.2	VÝPOČETNÍ SÍŤ	61
6.3	ANALÝZA VÝSLEDKŮ	61
	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	74
	SEZNAM TABULEK.....	75
	SEZNAM GRAFŮ	76
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	77
	SEZNAM PŘÍLOH.....	80

ÚVOD

V dnešní době se setkáváme s velice rychlým rozvojem techniky. Technika je s každou generací rozměrově menší, ale markantně výkonnější. Díky tomuto velice rychlému vývoji se problematika tepelného managementu stala nedílnou součástí návrhu výpočetní techniky, a to hlavně z důvodu spolehlivosti, energetické účinnosti a životnosti. Elektronické součástky – zejména mikroprocesory a polovodičové napájecí obvody přeměňují téměř všechnu dodanou elektrickou energii na teplo. V případě že nejsme schopni toto teplo v dostatečné míře odvézt do okolí, dochází k jeho kumulaci, která zvyšuje provozní teploty a napomáhá degradaci jednotlivých komponent. Projevem vysoké provozní teploty může být snížení výpočetního výkonu, zkracování životnosti součástek nebo náhlé havárie a destrukce systému jako celku.

V této bakalářské práci se zaměřím na popis vzniku tepla v elektronických součástkách a následný přenos ve skříní stolního počítače. Úvodní část bude věnována analýze fyzikální podstaty ztrátového tepla na úrovni polovodičových přechodů, vodivostních a dielektrických ztrát a jeho přenos vedením, prouděním nebo sáláním v omezeném objemu. Následně se budu zabývat negativními dopady nadměrných provozních teplot a způsoby, jak proti nim bojovat z hlediska návrhu komponent.

Druhou část budu věnovat představení a zhodnocení pozitivních a negativních vlastností u dostupných metod chlazení komponent stolních počítačů – od klasických vzduchových chladičů (jako je heatsink a ventilátor), přes složitější systémy kapalinového chlazení, chladiče s výparníkovou komorou až po termoelektrické prvky. Ve zhodnocení budu klást důraz na efektivitu, hlučnost, složitost konstrukce, náročnost na údržbu a ekonomické náklady na provoz.

Dále budu práci směřovat k zasazení problematiky návrhu chlazení do odvětví virtuálních prototypů. Nejprve osvětlím, jaký je základ CFD a proč je, nejen pro návrh chlazení, vítaným společníkem. V poslední části kapitoly vysvětlím, jaká je matematická podstata CFD a z jakého důvodu jsem si pro praktickou část vybral program ANSYS Fluent.

Jako podklad pro praktickou část provedu také literární rešerši a sběr katalogových dat, abych definoval teplotní limity jednotlivých komponent stolního počítače. Tyto mezní teploty mi budou sloužit jako návrhová kritéria pro posouzení efektivity návrhu chlazení.

Stěžejní oddíl praktické části se bude týkat problematiky návrhu chladiče mikroprocesoru s důrazem na co nejvyšší efektivitu za použití metod CFD. Postup bude

obsahovat návrh geometrie, volbu materiálu, nastavení okrajových podmínek a následnou analýzu v prostředí ANSYS Fluent. Tato simulační případová studie bude mít za výsledek návrh, který splňuje definovaný teplotní limit při realistických podmínkách.

Závěrem praktické části bude analýza šíření tepla ve skříní kompletní počítačové sestavy s využitím navrženého chladiče z předchozí části. Simulace nám poskytne rozložení teplot v prostoru, poukáže na možné „hot-spoty“ a otestuje efektivitu chlazení počítače jako celku.

Cílem práce tedy není pouze teoretický popis problematiky tepelného managementu v sestavách stolních počítačů, ale rovněž i poukázat na výhody virtuálního prototypování v tomto oboru, a to jednak v návrhu chlazení ale i v analýze libovolné sestavy za účelem stanovení efektivitu chlazení. Uvedené výsledky mohou rovněž sloužit jako podklad metodiky pro konstruktéry a tím pádem by mohly vést k vývoji energeticky efektivnějších a spolehlivějších modelů výpočetní techniky.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 TEPLO

V první řadě je důležité pochopit, jakým způsobem dochází k tvorbě tepla v počítači. Nejvýznamnějšími zdroji tepla jsou výkonné komponenty, jako například grafické karty, procesory, napájecí kaskády, radiče, čipsety nebo datová úložiště. Provoz těchto součástí je neoddělitelně spojen se spotřebou elektrické energie. Většina této spotřebované energie je přeměněna na teplo, což odpovídá téměř celé hodnotě vyzařovaného tepla. Pokud by tomu tak nebylo, popřeli bychom platnost zákona o zachování energie. Přeměna elektrické energie na teplo je tedy nevyhnutelným vedlejším efektem fungování výpočetní techniky. Množství vzniklého tepla pak úzce souvisí s energetickými nároky jednotlivých komponent, přičemž vyšší spotřeba elektrického proudu a napětí vede k vyšší produkci tepelné energie. [1][2]

1.1 Příčiny vzniku tepla v elektrických součástkách

Teplo v elektrických součástkách vzniká především v důsledku několika fyzikálních jevů doprovázejících průchod elektrického proudu a vlastností použitých materiálů využitých pro jejich výrobu.

První příčinou je Jouleovo teplo, také známé jako rezistivní ztráty. Při průchodu elektrického proudu součástkou s určitým elektrickým odporem, část elektrické energie se přeměňuje na teplo. Tento jev můžeme popsat vztahem:

$$P = R \cdot I^2 \quad (1)$$

kde P [W] je výkon (množství tepla vyzařovaného za jednotku času).

R [Ω] je elektrický odpor součástky.

I [A] je elektrický proud procházející součástkou.

Rezistivními ztrátami se nejvíce vyznačují rezistory a případně i vodiče. [3]

Druhou příčinou jsou přechodové ztráty v polovodičích. U polovodičových součástek, jako jsou diody a tranzistory, dochází k energetickým ztrátám při přechodu elektronů mezi různými energetickými hladinami. Tyto ztráty se projevují jako teplo vznikající při spínání, zesilování nebo usměrňování signálu, zvláště pak při vyšších frekvencích a proudech. [4]

Spínací ztráty jsou také podstatným zdrojem tepla. V zařízeních, která často mění svůj stav mezi zapnutým a vypnutým (například tranzistory u napájení procesoru), vzniká teplo při každém spínacím cyklu. Tyto ztráty jsou způsobeny nedokonalostmi v rychlosti spínání

a parazitními kapacitami či indukčnostmi, které vedou k nežádoucím energetickým ztrátám. [4]

Další příčinou vzniku tepla jsou dielektrické ztráty v izolantech a dielektrických materiálech, například kondenzátorech. Střídavé elektrické pole způsobuje polarizaci a depolarizaci molekul materiálu, což vede k vnitřnímu tření a tím pádem ke generování tepla. [5]

Magnetické ztráty se vyskytují v součástkách obsahujících magnetická jádra, jako transformátory a cívky. Tyto ztráty zahrnují hysterezní ztráty, které jsou důsledkem energetických ztrát při magnetizaci a demagnetizaci jádra, a vířivé proudy, které vznikají indukcí v materiálu jádra a generují teplo v důsledku jeho elektrického odporu. [6]

1.2 Způsoby přenosu tepla

Teplo se přenáší v důsledku teplotního rozdílu z jednoho místa do druhého, a to vždy z oblasti s vyšší teplotou do oblasti s teplotou nižší.

Přenos tepla může probíhat těmito třemi způsoby:

- **Vedením** (kondukcí) – Teplo se předává prostřednictvím vzájemného přenosu kinetické energie mezi sousedními molekulami v pevném prostředí.
- **Prouděním** (konvekci) – Dochází k pohybu hmoty o vyšší teplotě, než je teplota okolí, která přenáší teplo v pevném prostředí.
- **Zářením** (sáláním, radiací) – Teplo se přenáší prostřednictvím elektromagnetického záření, což umožňuje přenos tepla i ve vakuu.

V praxi se na přenosu tepla podílejí v různých poměrech všechny výše zmíněné varianty. [1]

1.2.1 Šíření tepla vedením

Při šíření tepla vedením dochází k průchodu tepelné energie pevnými, kapalnými nebo plynnými prostředními, případně mezi dvěma prostředními nacházejícími se v těsném dotyku. [1]

Způsob tohoto přenosu tepla převládá zejména u pevných látek, zatímco u kapalin a plynů je méně markantní, jelikož volnost uspořádání molekul umožňuje jejich pohyb s menší pravděpodobností srážek, které jsou klíčové pro přenos energie vedením. [1]

Pro přenos tepla vedením je zásadní veličinou tepelný tok, který někdy bývá označen jako přenesený výkon. Tento tepelný tok prochází stěnou o určité ploše a tloušťce, při rozdílu teplot mezi těmito látkami:

$$I_t = S \frac{\lambda}{d} \Delta t \quad (2)$$

kde I_t [W] je tepelný tok
 S [m²] je plocha stěny
 λ [W.m⁻¹.K⁻¹] je součinitel tepelné vodivosti materiálu
 d [m] je tloušťka stěny
 Δt [K nebo °C] je rozdíl teplot

Součinitel tepelné vodivosti konkrétního materiálu při stanovené teplotě nejčastěji zjistíme z tabulek, kdy materiály nebo kombinace materiálů běžně využívané pro konstrukci chladičů mají při teplotě 20 °C hodnoty uvedené v Tabulce 1. [1]

Tabulka 1 Součinitele tepelné vodivosti materiálů využívaných pro konstrukce chladičů [7]

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Měď	400
Hliník	204
Cín	64
Nikl	70

Převrácenou hodnotou tepelného toku je tepelný odpor R_t , vyjadřující, jak velký klade daný materiál odpor vůči průchodu tepla:

$$R_t = \frac{d}{\lambda S} = \rho_t \frac{d}{S} \quad (3)$$

kde R_t [K.W⁻¹] je tepelný odpor
 ρ_t [kg.m⁻³] je hustota

Množství prošlého tepla průřezem tělesa můžeme vyjádřit jako tepelný tok za uplynulý čas [1]:

$$Q_t = I_t \cdot \tau \quad (4)$$

kde Q_t [J] je množství tepla

τ [s] je čas

1.2.2 Šíření tepla prouděním

Proudění (neboli konvekce) zahrnuje přenos tepla mezi tělesem v pevné fázi a tekutinou, což může být kapalina nebo plyn, které toto těleso obklopují. Typickým příkladem může být pevné těleso ve vzduchu. V případě že část tekutiny je ve styku s teplejším povrchem, tak dochází k pohlcování energie a její teplota roste. Zvýšení teploty tekutiny má za následek její rozpínání a snížení její hustoty vzhledem k okolní chladnější tekutině. [1]

Rozdílná hustota tekutiny zapříčiní fyzikální jev vztakových sil, které mají za následek, že teplejší a méně hustá tekutina stoupá vzhůru. Následně jak část tekutiny stoupá, chladnější a hustší tekutina klesá dolů, aby kompenzovala přítomnost stoupající teplejší tekutiny. Při tomto pohybu vzniká cirkulační proudění přenášející teplo z oblasti teplejší do oblasti studenější, což postupně vede až k vyrovnání teplot v celém objemu tekutiny. Na druhou stranu můžeme říct, že v případě, kdy by těleso obklopené tekutinou mělo teplotu nižší než tato tekutina, pak by tento jev byl opačný. [1]

Výše uvedený proces nazýváme volnou konvekcí. Volná konvekce nám vzniká pouze díky rozdílům teplot a na to navazujícím změnám hustoty v tekutině. Příkladem může být ohřívání vzduchu nad chladičem, kdy vzduch o vyšší teplotě stoupá k horní straně skříně a ten o teplotě nižší naopak klesá ke spodku skříně. Ovšem tento děj můžeme ještě zefektivnit v případě, že na tento chladič přidáme ventilátor. Tím pádem se už bude jednat o konvekci nucenou, protože jsme využili k vyvolání tlaku nějaké pomocné zařízení pro urychlení celého procesu. U konvekce je velice důležitým parametrem tepelný tok, který projde mezi plochou pevného tělesa ponořeného v tekutině za jednotku času při diferenci teplot. [1]

$$I_t = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \quad (5)$$

Problematika sdílení tepla konvekcí se také zabývá tzv. mezní vrstvou. Jedná se o děj, kde se v těsné blízkosti pevného tělesa nachází velice tenká vrstva tekutiny, ve které dochází ke sdílení tepla vedením a ne prouděním. V případě volné konvekce je tato vrstva nepříznivě silná a do značné míry ovlivňuje proces sdílení tepla. Ovšem v případě konvekce nucené,

kdy můžeme hovořit o proudění laminárním a v extrémních případech turbulentním, se tato mezní vrstva ztenčuje a tím pádem dochází ke značně efektivnějšímu přenosu tepla. [1]

U volné konvekce, pokud je prostor daleko větší než velikost teplosměnné plochy, platí vztah mezi Nusseltovým, Grashofovým a Prandtlovým kritériem:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (6)$$

kde	$Nu [-]$	je Nusseltovo číslo
	$C [-]$	je bezrozměrná empirická konstanta
	$Gr [-]$	je Grashofovo číslo
	$Pr [-]$	je Prandtlovo číslo
	$n [-]$	je bezrozměrná empirická konstanta

Kdy tato bezrozměrná kritéria využívají fyzikální podobnosti pro zobecnění výsledků výpočtů v našem systému a následně je lze uplatňovat při návrhu skutečných dějů a zařízení.

Hodnotu Grashofovo kritérium vypočítáme dle vztahu:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3}{\nu^2} \Delta t \quad (7)$$

kde	$g [m^2.s^{-1}]$	je tíhovým zrychlením, tedy $9,81 m^2.s^{-1}$
	$\beta [K^{-1}]$	je součinitel objemové roztažnosti tekutin
	$l [m]$	je charakteristický rozměr
	$\nu [m^2.s^{-1}]$	je kinematická viskozita

Prandtlovo číslo pro specifikovaný materiál buď zjistit z tabulek nebo můžeme využít vztah:

$$Pr = c_p \frac{\eta}{\lambda} \quad (8)$$

kde	$c_p [J.kg^{-1}.K^{-1}]$	je měrná tepelná kapacita
	$\eta [Pa.s]$	je dynamická viskozita

Například pro vzduch při $35^\circ C$ je $Pr = 0,73$.

Pomocí výsledku součinu Gr a Pr zjistíme z Tabulky 2 konstanty C a n . [1][7]

Tabulka 2 Volba konstant C a n na základě výsledku součinu $Gr \cdot Pr$ [7]

$Gr \cdot Pr$	C	n
$<10^{-3}$	0,6	0
$<1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2>$	1,18	1/8
$<5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7>$	0,54	1/4
$<2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}>$	0,135	1/3

Poté už můžeme pomocí Nuseltova kritéria vyčíslit hodnotu součinitele přestupu tepla α který udává, jaké množství tepla je přeneseno mezi dvěma prostředními za jednotku času a plochy při jednotkovém rozdílu teplot mezi nimi:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \Delta t \quad (9)$$

kde h [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla

l [m] je charakteristický rozměr

Součinitel přestupu tepla h uvedený ve vztahu 9, jehož hodnoty jsem pro představu uvedl v tabulce 3, pro běžné tekutiny jako vzduch nebo voda se dřevem. Tento teplotní součinitel je relativně problém přesněji získat, protože závisí na typu proudění, struktuře a povrchových vlastnostech tělesa a prostorovém uspořádání tělesa. [8]

Tabulka 3 Součinitele přestupu tepla pro vzduch a vodu s dřevem při volné a nucené konvekci [8]

Tekutina	Součinitel přestupu tepla h [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	
	Volná konvekce	Nucená konvekce
Vzduch (plynná fáze)	5-35	10-140
Voda (kapalná fáze)	100-1000	600-10000

Pro posouzení, o jaký typ proudění se jedná je možné využít Reynoldsovo kritérium:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta} = \frac{v l}{\nu} \quad (10)$$

kde ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota při určité viskozitě

ν [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost proudění tekutiny

Pro určení typu proudění využíváme zmíněného Reynoldsova čísla [1][7]:

Pro laminární proudění: $Re < 2300$

Přechodná oblast: $2300 < Re < 4000$

Turbulentní proudění: $Re > 4000$

1.2.3 Šíření tepla zářením

Přenos tepla zářením je realizován pomocí elektromagnetického vlnění o různých vlnových délkách. Teplo je produktem přeměny energie tohoto vlnění při dopadu na těleso. Z hlediska vlnových délek rozlišujeme rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření a elektromagnetické vlny. Z hlediska přenosu tepla se pro nás stává nejdůležitějším infračervené záření, protože pouze to je pohlcováno tělesy a při tomto ději se většina jeho energie přemění na teplo. Infračervené záření se vyskytuje ve spektru elektromagnetických vln v rozmezí od 780 nm do 360 μ m. Toto záření můžeme rovněž najít pod pojmy tepelné záření nebo sálání. [1]

Když vezmeme v potaz principiální stránku věci, tak mezi tepelným a kterýmkoliv jiným elektromagnetickým zářením nelze nalézt diametrální rozdíly. Můžeme tak usuzovat hlavně ze skutečnosti, že každé záření je spojeno s přenosem energie. Pro tepelné záření také platí zákon odrazu a lomu nebo přímočarého šíření rychlostí světla ve vakuu. Hlavní odlišností zářivé energie od šíření tepla vedením a prouděním je ten fakt, že zde postrádáme podmínku přítomnosti zprostředkující látky. [1]

Přeměnu tepelné energie na tepelné záření nazýváme emisí, zatímco přeměnu tepelného záření na tepelnou energii označujeme jako absorpci. Tyto přeměny jsou vázány pouze na hmotnost tělesa. Na druhé straně vyzářená energie je odkázaná pouze na vlastnosti zářiče, ale ne na vlastnostech okolí. Kromě teploty zářiče musíme rovněž brát v potaz i vlastnosti povrchu, které jsou pro emisi taktéž velice důležité. [1]

1.3 Dopady nadměrného tepla na elektronické součástky

Elektronické součástky, ať už čipy nebo kondenzátory jsou základními stavebními prvky komponent výpočetní techniky – všechny mají jedno společné: při své činnosti generují teplo. Přestože jsou navrhovány tak, aby odolávaly specifickým teplotním rozsahům (řádově v rozmezí 100 °C až 150 °C), nadměrné teplo, známé také jako přehřívání může mít závažné dopady na jejich funkci, životnost a bezpečnost. [9]

1.3.1 Příčiny nadměrného tepla

Přehřívání elektronických komponent může mít různé příčiny, které můžeme rozdělit na vnitřní a vnější faktory. Mezi vnitřní faktory patří designové a inženýrské chyby, zahrnující špatné materiálové řešení, nevhodné dimenze komponent a nedostatečnou kontrolu kvality komponent během výroby. Snaha o celkové zmenšení moderních zařízení klade na vývojáře velice náročné výzvy, protože větší hustota součástek na menším prostoru omezuje efektivní odvod tepla. Například u polovodičů, zejména tedy tranzistorů, vysoká koncentrace elektronů zvyšuje odpor tepelného toku, což vede ke kumulaci tepla. Další problémem může být rovněž špatné vodivé spoje nebo použití materiálů s rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti, což může vést k prasklinám a mechanickému poškození. [9]

Mezi vnější faktory patří vlivy prostředí, jako jsou vysoká okolní teplota, vlhkost nebo časté teplotní změny, které mohou oslabovat materiálovou integritu součástek. Vlhkost například zvyšuje riziko koroze a zkratů. Problém může být také nesprávné používání zařízení. Například používání nevhodných napájecích adaptérů, přetěžování zařízení, nesprávný způsob chlazení nebo jeho skladování v prostředí s extrémními teplotami. [9]

1.3.2 Důsledky nadměrného tepla pro komponenty

Důsledky přehřívání se projevují na mikro a makro úrovni. Mikroúroveň můžeme definovat jako nežádoucí změny na úrovni materiálů a chemických vlastností. Naproti tomu makroúroveň zahrnuje selhání na úrovni selhání systému jako celku.

Nadměrné teplo na mikroúrovni způsobuje materiálovou degradaci. Například u kondenzátorů dochází k prasklinám v dielektriku, což může vést k absorpci vlhkosti a následnému zkratu. U spojů z mědi můžeme pozorovat únavové lomy vedoucí k jiskření a možnému požáru. U složitějších materiálů jako jsou slitiny na bázi terfenol-D, tepelné namáhání vyvolává změny mikrostruktury a krystalické orientace, kdy ovlivňuje jejich mechanické a magnetické vlastnosti. Tyto změny mohou být nevratné a zcela znehodnotit funkci použitého materiálu. [9]

Na makroúrovni se nadměrné teplo může projevit kaskádovitým selháním komponent v celém systému. Vada kondenzátoru v napájecím zdroji může například ovlivnit napájení hned několika komponent najednou a možnost jejich rozsáhlého a nevratného poškození. V některých případech došlo až k explozi nebo zahoření dlouhodobě přehřáté součástky a tím mohla být ohrožena jednak bezpečnost uložených dat, ale ohrožení mohli být i samotní

uživatelé. Nechvalně známými jsou třeba akumulátory, u kterých při přehřátí a poškození dochází v mnoha případech k požárům a výbuchům. [9]

1.3.3 Prevence proti vzniku nadměrného tepla

Prevence přehřívání je klíčem k zajištění spolehlivosti a bezpečnosti elektronických zařízení. Existuje několik strategií, jenž lze aplikovat na úrovni návrhu, výroby i provozu.

Z hlediska návrhu je důležité optimalizovat rozložení součástek na desce plošných spojů tak, aby byly tepelné zdroje odděleny od citlivých komponent a neohrožovaly jejich životnost a stabilitu. [9]

Ve výrobě by měly být komponenty důkladně testovány na odolnost vůči teplotním výkyvům a mechanickému namáhání. Výrobci často využívají tepelné profily pro pájení, tak aby minimalizovali riziko poškození součástek během osazování. [9]

Při provozu můžeme jako uživatelé přispět ke snížení rizika nadměrného tepla správným požíváním zařízení. To zahrnuje použití vhodných adaptérů a kabelů, pravidelné čištění od prachu nebo nečistot a zajištění dostatečného chlazení a cirkulace tepla. [9]

1.3.4 Moderní technologie pro teplotní management

Nové technologie přinášejí pokročilé možnosti pro správu tepla. Příkladem jsou termální pasty a termální podložky neboli thermal pady pro lepší přenos tepla mezi komponentami a chladiči. Další inovací jsou tepelně vodivé polymery, kombinující nízkou hmotnost s vysokou tepelnou vodivostí. [9]

V některých oblastech, například v kosmickém průmyslu, se můžeme setkat s pokročilými termálními řídicími systémy pro zajištění optimálních teplot všech součástek v extrémních podmínkách. Tyto systémy zahrnují pasivní i aktivní chlazení a často integrují redundanci tak, aby předešly možnému selhání. [9]

2 ZPŮSOBY CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH KOMPONENT VE VZTAHU KE STOLNÍM POČÍTAČŮM

V posledních letech nevyužíváme pro chlazení elektrických komponent pouze jeden způsob. Z hlediska využití není jednoznačně možné určit univerzální řešení pro všechny typy systémů. Systémy pro chlazení se vyznačují rozličným způsobem fungování, strukturou, chladícím výkonem, náklady na provoz, cenou a v neposlední řadě i životností. Ve specifických případech je dalším důležitým atributem také hlučnost. [2]

I v oblasti počítačových komponent se používá několik typů chlazení. Pro základní rozdělení jednotlivých metod je třeba brát v potaz rozdíl mezi pasivním a aktivním chlazením. Pasivním chlazením se rozumí chladicí systém, který se pro odvod tepla spoléhá pouze na samostatné tepelné procesy bez přídavného napájení. Naproti tomu aktivní chlazení vyžaduje pro plnohodnotné fungování i přísun elektrické energie. [2]

2.1 Vzduchové chlazení

Vzduchové chlazení patří mezi nejpoužívanější způsob chlazení. Jeho hlavními výhodami je relativně nízká cena, téměř žádná potřeba údržby (když tedy pomineme čištění od prachu) a výjimečná spolehlivost.

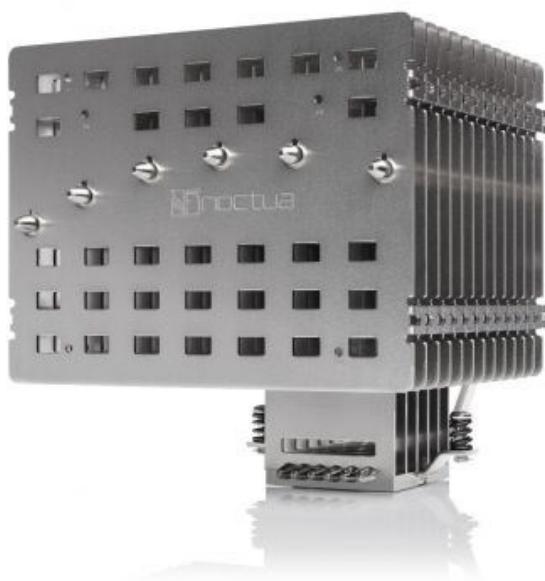
2.1.1 Heatsink

Úplným základem mezi chladiči je heatsink. Ten je většinou tvořený měděnou základnou dotýkající se přímo oné ochlazované komponenty a dále hliníkovým žebrováním, pomocí kterého je teplo vyzařováno do okolí. Je tichý, protože není tvořený žádnou pohyblivou součástí, která by vydávala jakýkoliv hluk. Absence pohyblivých součástí nám rovněž naznačuje pravděpodobně i velice dlouhou životnost. [10][11]

Musím ovšem zmínit že heatsink, neboli pasivní chladič má i pár nevýhod. Největší nevýhodou je jeho nízká účinnost odvodu tepla ze součástky. Tento parametr vede k tomu, že tyto chladiče jsou velké a potažmo i těžké. Moderní počítače obsahují komponenty s vysokým výkonem spojeným s vysokou spotřebou. Většina spotřebované elektrické energie se totiž u polovodičů přeměňuje na teplo a tím pádem potřebujeme i výkonné chlazení. Kdybychom tedy chtěli chladit procesor se spotřebou 200 W pouze heatsinkem, tak chladič bude mít s největší pravděpodobností hmotnost v řádech kilogramů a nemusí se nám vlézt do menších skříní. S hmotností může dále souviset i možnost zničení chlazené součástky, která není stavěná na takovou zátěž od chladiče. Může například dojít ke zlomení

procesoru nebo vylomení chladiče z upevnění na základní desce a tím pádem k přehřátí procesoru a zničení karet namontovaných pod ním. [2][10][11]

Heatsink rovněž sám o sobě není moc efektivní. Teplo se totiž bez nucené cirkulace (například pomocí ventilátorů) rozptyluje velice pomalu. Proto je tedy dobré, aby byl počítač, respektive počítačová skříň, vybavena ventilátory pro přívod chladnějšího vzduchu z okolí a odvod vzduchu o vyšší teplotě ven. [1][2][10][11]



Obrázek 1 Heatsink Noctua NH-P1 [12]

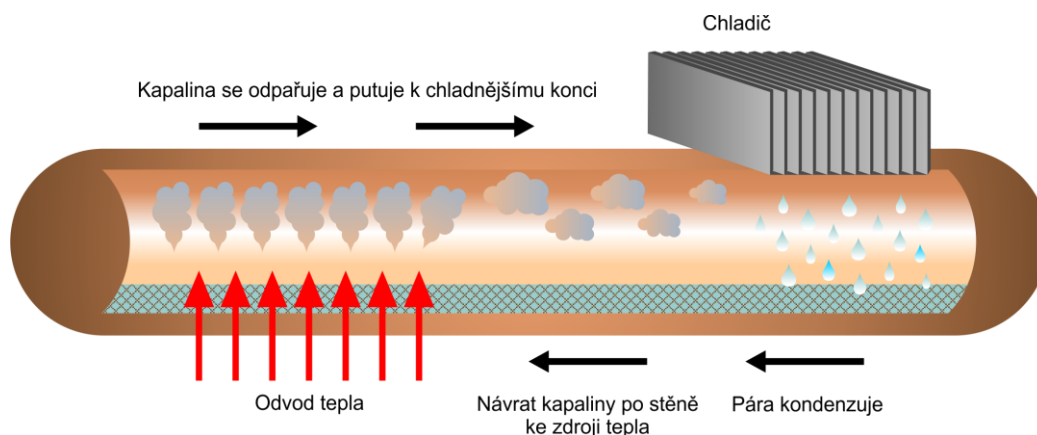
2.1.2 Heatpipe

Jedná se o hermeticky uzavřenou trubičku, která bývá nejčastěji vyrobena z mědi. Je specifická svou vnitřní strukturou, ta je uspořádána do houbovitého nebo síťovitého schématu.

Heatpipe jsou v posledních letech mezi chladiči velkým trendem. Disponuje jimi většina moderních chladičů. Nespornou výhodou je efektivita, kdy heatpipe má 100x až 1000x větší efektivitu než samotná měď. [13]

Princip spočívá v cirkulaci malého množství de-ionizované vody v uzavřených měděných trubičkách. V části, která je v přímém kontaktu s chlazenou komponentou se tato kapalina zahřívá a odpařuje. Vzniklá pára se přesune na konec trubice o nižší teplotě. Na konci o nižší teplotě dojde k jejímu ochlazení, následné kondenzaci a v kapalně fázi následně putuje zpět na základnu, která je v kontaktu s chlazenou součástí, a

to buď díky gravitační síle, nebo pomocí kapilárního jevu daného vnitřní strukturou trubice. Tento koloběh zajišťuje neustálou výměnu tekutiny mezi konci o vyšší a nižší teplotě. Využívá tedy latentní teplo při přeměně kapaliny na páru a zpět, což zajišťuje vysokou účinnost chlazení. [2][13][14]



Obrázek 2 Pracovní cyklus heatpipe (Zdroj: vlastní)

Samotné heatpipe ovšem nelze pro chlazení použít, protože jejich plocha je příliš malá. Na jejich studenější konec jsou tedy nalisovaná nebo naletovaná hliníková žebra mající funkci zvětšení plochy pro lepší rozptýlení tepla do okolí. [2][13][14]

2.1.3 Ventilátor

Chlazení pomocí ventilátoru je typickou aktivní metodou chlazení. V současnosti se málokdy setkáváme s použitím samotného ventilátoru – ten obvykle kombinujeme měděným či hliníkovým heatsinkem, který je přímo v kontaktu s chlazenou komponentou. V tomto případě mluvíme o kombinovaném chladiči.

Ventilátory mohou plnit dvě funkce. Proudění vzduchu vytváří nucenou konvekci, díky níž dojde ke značnému nárůstu chladicího výkonu. Zároveň ovšem odvádí teplý vzduch mimo skříň a přivádí z okolí vzduch chladnější, což pomáhá snižovat teplotu všech součástí počítače. [1][2][10][11]



Obrázek 3 Ventilátor ARCTIC P8 MAX [15]

Nevýhodou chlazení ventilátorem je vyšší hlučnost při zvýšených otáčkách, které systém nastavuje na základě vysoké teploty ochlazované komponenty. Dále zde můžeme zmínit i nutnost pravidelné údržby. Ventilátor totiž nasává vzduch z okolí skříně, který obsahuje prach, ten se postupně usazuje jak na ventilátoru, tak uvnitř počítače. Zejména vrstva prachu na žebrování může být problematická, protože působí jako tepelná izolace a brání přenosu tepla. Problémy s prachem lze do jisté míry řešit prachovými filtry, ale toto řešení nebude nikdy stoprocentní. [10][11]



Obrázek 4 Chladič Noctua NH-D15 G2 [16]

Tato metoda také přináší určitá omezení ohledně umístění počítače. Pokud je v okolí jiný zdroj tepla, například další elektronické zařízení nebo topení, ventilátor může nasávat již ohřátý vzduch a tím snižovat efektivitu chlazení. [2][10][11]

2.2 Vodní okruh

Vodní okruh se ve své podstatě úplně neliší od vzduchového chlazení. Jeho odlišnost tkví v tom, že k přenosu tepla do okolí neprobíhá přímo v místě jeho vzniku, ale používáme vodu jako médium pro odvod tepla mimo počítačovou skříň. Oproti vzduchovému chlazení má také o dost vyšší chladicí výkon, což sníží celkové teploty a tím prodlužuje životnost chlazené komponenty. Sestava jejíž cena může být i několik desítek tisíc korun zahrnuje bloky, výměník, expanzní nádobu, oběhové čerpadlo, hadice s fitinkami a směs kapaliny na bázi destilované vody. [2][11][17][18]

Základním stavební prvkem jsou bloky, které slouží pro odvod tepla od komponent a jsou tak v pozici původních vzduchových chladičů. Nejčastější materiálem je poniklovaná měď, skrze kterou proudí voda a odvádí teplo přímo od komponenty. [17][18]

Výměníkem se nejčastěji rozumí radiátor osazený ventilátory. Kapalina teplo odevzdá přítomnému žebrování, a to je následně nucenou konvekcí rozptýleno do okolí pomocí ventilátorů. [17][18]

Pro pohon vody v celém systému slouží oběhové čerpadlo. Mimo ventilátorů je to jediný aktivní prvek toho chlazení. U většiny využívaných čerpadel je důležitým parametrem průtok a výtlačná výška. [18]

Dalším neméně důležitým prvkem je i často opomíjená expanzní nádoba neboli rezervoár. Slouží jednak jako zásobárna vody, dále jako prvek pro snadné naplnění a zároveň má úlohu jako tzv. buffer, který potlačuje tepelnou roztažnost média a tlakové změny. Spousta firem spojuje oběhové čerpadlo a expanzní nádobu do jednoho prvku, a to z jednoho prostého důvodu. Tato podmínka spočívá v tom, že pro správné fungování chladicího systému musíme rezervoár umístit vždy před oběhové čerpadlo a expanzní nádoba musí být ve vyšší poloze než čerpadlo samotné. [18]



Obrázek 5 Kapalinový chladič EK-Quantum Power² Kit P360 Series [17]

K propojení jedlových prvků slouží hadice, resp. trubice. Rozdíl mezi nimi je například v propustnosti do okolí. Z hadic se v malé míře odpařuje chladicí směs, na druhou stranu je ale s trubicemi daleko složitější práce při tvarování. Konce hadic jsou navlečeny na fitinky, které nejprve pomocí závitů uchytíme k dalším prvkům a poté na nich dotáhneme i samotné hadice pomocí matic. [11][17][18]

Cenou několikanásobně přesahují chladiče vzduchové. Dále je třeba se o ně starat, protože v případě zanedbání může dojít k úniku a poškození celého počítače. Světlymi stránkami jsou ovšem relativně nízké teploty a velice nízká hluchnost. [2][11][18]

2.3 Kompresorové chlazení

S kompresorovým chlazením se všichni nejčastěji setkáváme v lednicích a mrazničkách. Bavíme se o způsobu chlazení s vysokými pořizovacími a provozními náklady. Zásadním nedostatkem může být také hluchnost, ovšem má jednu nezpochybnitelnou výhodu v podobě ochlazení na nízkou teplotu, a to až pod bod mrazu. [2][19][20]

Princip funkce je docela jednoduchý. Kompresor stlačuje chladicí plyn až do kapalně fáze. Díky stlačení a zkapalnění dochází k nárůstu teploty chladiva. Všechno teplo z chladiva předáme do okolí pomocí výměníku tepla. Takto ochlazené médium přivedeme pomocí výparníku na procesor nebo jinou chlazenou část. Ve výparníku dochází ke zvyšování objemu a přeměny na páru chladicí látky, což způsobuje ochlazovací efekt. Odpařené

médium dále putuje znovu do kompresoru a je znovu stlačeno a ochlazeno ve výměníku. [2][19]



Obrázek 6 Kompresorový chladič Cooler Max [20]

Při teplotách okolo bodu mrazu dochází ke srážení vodních par na jejich povrchu. S tímto jevem se musíme vypořádat i u tohoto typu chlazení, protože vodní páry způsobují korozi nebo zkrat u součástek nacházejících v blízkosti instalovaného výměníku. Pro tyto účely jsou nejčastěji využívána těsnění jako jsou těsnicí gumy nebo plastelína. [2]

Další zápornou stránkou může být také čas potřebný pro přípravu chlazení před zapnutím počítače. Nejprve je totiž nutné vychladit procesor na požadovanou hodnotu, až poté můžeme zapnout samotný počítač. Tato procedura před zapnutím může trvat i několik minut. [2][19][20]

2.4 Peltierův článek

Peltierův, či termoelektrický článek, pracuje na principu termoelektrického jevu, který lze popsat dvěma způsoby. První způsob formuloval Thomas Johann Seebeck. Zjistil, že mezi dvěma kovovými materiály rozdílných teplot, vznikne elektrické napětí. [21]

Tuto skutečnost lze popsat pomocí vztahu [21]:

$$U = \alpha' \cdot \Delta t \quad (11)$$

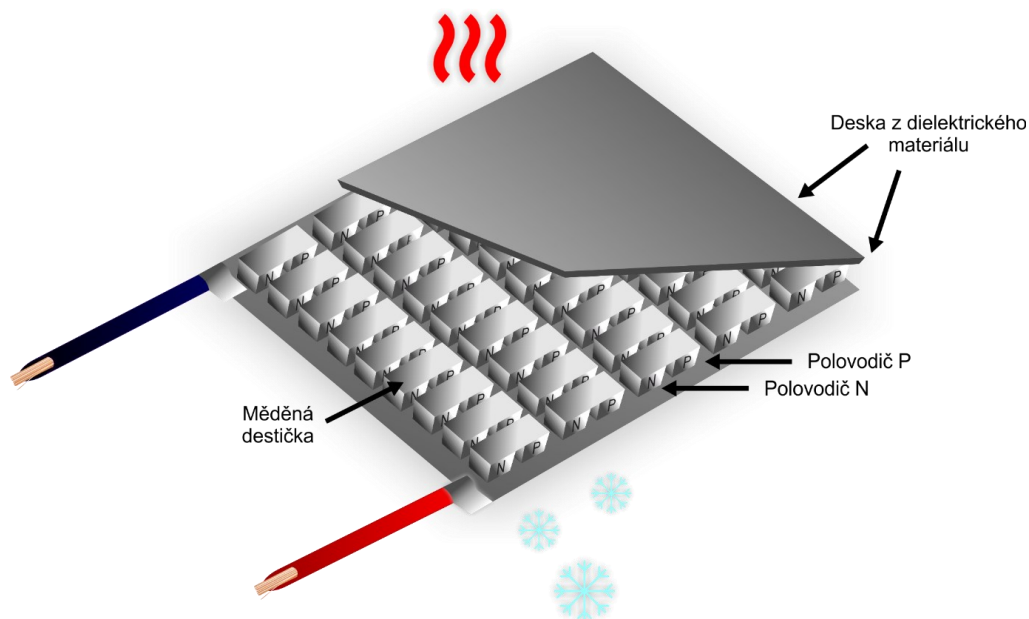
kde U [V] je elektrické napětí

α' [V.K⁻¹] je Seebeckův koeficient, jež je daný spojenými materiály

Druhá interpretace je inverzí k Seebeckovu zákonu. Pokud přivedeme na dva odlišné kovové materiály elektrické napětí, tak můžeme pozorovat vznik teplotního rozdílu mezi těmito kovy. U Peltierova článku se tyto kovové materiály vyskytují v podobě dvou kovových destiček, kdy do jedné z nich je dodáván elektrický proud, jenž je následně pomocí vodivého spoje odveden do destičky druhé. Díky tomuto zapojení dochází k onomu jevu, a dále k odvádění tepla. Při návrhu je nutné správně umístit obě kovové destičky, a to tak aby se chlazený materiál nacházel blíž ke zdroji tepla. V opačném případě by totiž mohlo dojít k nežádoucí absorpci tepla z okolí již zahřátými komponentami. [2][22]

Nespornými výhodami Peltierových článků je schopnost ochladit komponentu na nižší teplotu, než je teplota okolí, a velice nízká operační hluchnost, z důvodu nepřítomnosti pohyblivých částí. [2]

Obrovskou nevýhodou může být velká spotřeba, která může činit až dvojnásobek spotřeby chlazené komponenty. Dalším úskalím je izolování celého systému z důvodu možné kondenzace vodní páry na ochlazované destičce a následné destrukci v podobě zkratu. [2][22]



Obrázek 7 Peltierův článek (zdroj: vlastní)

2.5 Tekutý dusík

Chlazení tekutým dusíkem je jedno z nejméně obvyklých řešení. Využívá se zejména v případech extrémního přetaktování, kdy existují dalekosáhlé žebříčky „overclockerů“, kteří dokázali z hardwaru vymáčkout úplné maximum. [23]

Základem je samozřejmě tekutý dusík, jehož teplota se pohybuje okolo $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Práce s touto látkou není vůbec jednoduchá, a to z důvodu velice rychlého odpařování. Pro dlouhodobější uchování se využívá tzv. dewarova nádoba s vakuovou izolací, která se vyznačuje nízkým odparem látky. [23][24]

Dále potřebujete POT neboli „komín“ sloužící jako chladič naplněný tekutým dusíkem. Z hlediska konstrukce se jedná nejčastěji o hliníkový válec s měděnou základnou spojený přímo s chlazeným čipem (samozřejmě se mezi základnou a čipem ještě nachází kvalitní teplovodivá pasta). Kamenem úrazu může být, stejně jako u Peltierova článku nebo kompresorového chlazení, vzniklá kondenzace vody. Tomu se snažíme zabránit izolací POTu a obvodů nacházejících se v blízkosti chlazení. [23]

2.6 Imerzní chlazení

Tato alternativní cesta spočívá v ponoření celého počítače do chladicí látky. Touto chladicí látkou bývá kapalina, která by měla být elektricky nevodivá, nereaguje chemicky s materiály využitými v počítači a má velmi dobrou tepelnou vodivost. [2]

Osvědčenou látkou pro tento typ chlazení se stal minerální olej. Někdo by mohl namítnout, že by mohla být využita i destilovaná voda. Bohužel z chemického hlediska lze říct, že při styku s komponentami by začaly vznikat ve vodě minerály a ta by se za chvíli stala vodivou a vyzkratovala by celý váš stroj. [25][26][27]

Tento způsob chlazení je velice tichý a vyžaduje méně údržby než všechny předešlé typy chlazení. Oblíbenost si získal zejména v serverovém segmentu díky stabilitě teplot ochlazovaných komponent – neposkytuje tedy okamžitý chladicí efekt jako voda. Rovněž si našel příznivce mezi nadšenci hledající skvěle vypadající a dokonale tiché sestavy. [25][26]

Značným mínusem může být fakt přenositelnosti takto chlazených počítačů. Nádoby sloužící jako počítačová skříň mají totiž zpravidla objem několika desítek litrů. To se typicky odvíjí od velikosti počítačových komponent, ale spíše dle TDP využitých komponent. Je tedy třeba zajistit, aby chladicího oleje bylo dostatek a nedocházelo k příliš vysokému oteplení celé sestavy. [2][25][26][27]



Obrázek 8 Stolní počítač chlazený minerálním olejem [27]

3 ŘEŠENÍ CHLADICÍCH SYSTÉMŮ ZA POMOCÍ METOD VIRTUÁLNÍHO PROTOTYPOVÁNÍ

Virtuální prototypování je disciplína, při které využíváme numerickou simulaci na virtuálním prototypu pro účely výzkumu a testování. Umožňuje provádět testy digitálně, podobně jako u fyzických prototypů, ale v simulačním prostředí.

Simulační prototypování se stává obrovským trendem hlavně z důvodu celkového urychlení vývoje produktů. Kdy na virtuálním prototypu můžeme provádět velice rychle a jednodušeji velké množství změn. Díky programům určeným pro virtuální prototypování můžeme už při samotném návrhu aplikovat různé testy a na základě nich poté odhalit různé nedostatky v konstrukci vyvíjeného produktu. Tímto způsobem jsme schopni utvářet efektivní design jednotlivých prvků na základě požadovaných parametrů. Rovněž poté můžeme jednodušeji odzkoušet chování kompletně navržených systémů. [28]

Základem je práce s 2D a 3D modely. Výsledkem simulací mohou být poté mimo dat i animace. Lze tedy již při virtuálním prototypování, i když ještě neexistují fyzické prototypy, snadno prezentovat navržené produkty. Marketing a obchod tedy má k dispozici digitální modely, které mohou být téměř nerozpoznatelné od skutečných výrobků.

3.1 Virtuální prototypování pomocí metody CFD

Výpočetní dynamika tekutin neboli CFD (z anglického Computational Fluid Dynamics) je analýza systémů zahrnujících proudění tekutin, přenos tepla a související jevy pomocí počítačových simulací. Tato technika je velice účinná a má široké spektrum využití, jak v průmyslu, tak v různých jiných odvětvích jako energetika, hydrodynamika lodí, aerodynamika vozidel a letadel, procesní inženýrství, stavebnictví, námořní inženýrství, environmentální inženýrství, hydrologie, meteorologie, biomedicína nebo chlazení elektroniky. [29]

3.1.1 Využití CFD

Počátky CFD se datují přibližně do 60. let 20. století, kdy bylo poprvé využito pro návrh a výrobu proudových motorů a konstrukcí letadel. V současné době se CFD metoda aplikuje v širokém spektru aplikací. Výrobci motorových vozidel nyní naprosto běžně virtuálně testují odpor vzduchu, proudění pod kapotou a v exteriéru vozidla. Dále se s CFD můžeme setkat při návrhu tepelného managementu budov, například odvětrávání serverových

místností s využitím odpadního tepla pro vytápění kanceláří apod. CFD se tedy stává velice výhodným prostředníkem pro návrh různých produktů a procesů. [29]

Kromě investic je třeba zajistit kvalifikovaný personál pro obsluhu CFD software, což může být docela komplikací i v případě dostatečných financí.

Kódy pro CFD jsou sestaveny tak, aby pomocí numerických algoritmů byly schopny řešit problematiku proudění tekutin. Všechna komerční softwarová řešení CFD jsou vybavena pokročilými uživatelskými rozhraními, která umožňují definovat parametry úloh a prohlížet výsledky, což zajišťuje snadný přístup k jejich výpočetním schopnostem. Z těchto příčin můžeme vybavení těchto programů rozdělit na tři hlavní části [29]:

1. Preprocesor
2. Řešič
3. Postprocesor

3.1.2 Preprocesor

Preprocesssing (neboli předzpracování) je postup, při kterém se úloha proudění zadává do programu pro řešení CFD prostřednictvím uživatelsky přívětivého rozhraní a následně se převádí do formátu, jemuž rozumí řešitel.

Skládá se z pěti základních kroků [29]:

1. Definice geometrie oblasti zájmu (výpočetní domény).
2. Tvorba sítě (mesh), kdy rozdělí doménu na menší, navzájem se nepřekrývající subdomény, tvořící síť buněk.
3. Volba modelovaných fyzikálních a chemických jevů.
4. Specifikace vlastností tekutiny.
5. Určení vhodných okrajových podmínek pro buňky, jež se nachází u hranic zkoumané domény nebo se jich přímo dotýkají.

3.1.3 Řešič

Řešič (neboli Solver) je prvek provádějící numerické operace na doméně definované v Preprocesoru. Metody využívané při těchto numerických operacích lze rozdělit na spektrální metody, metodu konečných diferencí a metodu konečných prvků. Zejména metoda

konečných objemů bude pro moji práci klíčová, protože ji využívá software ANSYS Fluent, který jsem si zvolil pro realizaci praktické části.

Samotný numerický algoritmus probíhá následovně [29]:

1. Zintegrují se základní rovnice proudění přes všechny (konečné) řídicí objemy definované domény.
2. Diskretizace neboli převod získaných integrálních rovnic na soustavu rovnic algebraických.
3. Vyřešení algebraických rovnic pomocí iterační metody.

3.1.4 Postprocesor

Během postprocesingu využíváme grafické nástroje pro srozumitelnou interpretaci a prezentaci výsledků získaných pomocí Řešitele.

Mezi tyto univerzální vizualizační nástroje patří [29]:

1. Zobrazení geometrie domény a výpočetní sítě
2. Vektorové znázornění
3. Konturové grafy
4. Povrchové grafy ve 2D a 3D
5. Sledování částic
6. Možnost manipulace s úhlem pohledu
7. Barevný výstup ve formátu PostScript

3.2 Matematický popis CFD

Základem výpočtů CFD jsou Navierovy–Stokesovy rovnice. Tyto rovnice, které se uplatňují v každé úloze týkající se proudění tekutin a přenosu tepla, se v tomto případě řeší numericky. V rámci této práce jde o dvourozměrné, vzájemně provázané parciální diferenciální rovnice. V oblasti dynamiky tekutin pak používáme tři základní rovnice: rovnici kontinuity, rovnici hybnosti a rovnici energie. Tyto rovnice popisují průběh proudění a vycházejí z fundamentálních fyzikálních principů, konkrétně ze zákona zachování energie, hmotnosti a hybnosti. Kvůli jejich složitosti je analytické řešení prakticky nemožné, a proto se přistupuje

k numerickým výpočtům. Při CFD simulacích se tak diferenciální rovnice převádějí na velký počet algebraických rovnic, které lze řešit pomocí výpočetních metod. [30]

3.2.1 Navier-Stokesovy rovnice

Navierovy–Stokesovy rovnice vycházejí z druhého Newtonova zákona a lze je vnímat jako rovnováhu sil působících na nepatrný objemový element. Obvykle se zapisují ve tvaru uvedeném níže. Jedná se o tři nelineární parciální diferenciální rovnice, přičemž každá popisuje jednu složku rychlostního vektoru. [31]

$$\begin{aligned}\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{v \partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{v \partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt}\end{aligned}\tag{12}$$

3.2.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vychází z myšlenky, že „hmotu nelze zničit“ a vyjadřujeme ji vztahem v rovnici 13 [31]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0\tag{13}$$

A za předpokladu, že proudící tekutina je nestlačitelná, pracujeme s rovnicí ve podobě uvedené v rovnici 14 [31]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0\tag{14}$$

3.3 ANSYS Fluent

Ansys Fluent je software, který jsem si zvolil jako prostředníka pro simulaci problematiky návrhu chlazení počítačových komponent v rozličných scénářích. Jedná se o jednoho z nejpoužívanějších a nejvýkonnějších komerčních řešitelů pro numerickou simulaci proudění tekutin (CFD). CFD využíváme jako řešitele rovnic pro zachování hmoty, hybnosti, energie a dalších veličin, abychom mohli tyto jevy analyzovat a vyhodnotit případné výsledky ve virtuální rovině. Tímto způsobem si můžeme relativně snadno, a

pomineme-li cenu samotného softwaru, i levně ověřit naše výpočty a představy, například o chování tekutin nebo přenosu tepla mezi rozličnými prostředími a materiály.

Základem CFD je tvorba sítě neboli „meshing“, s jejíž pomocí je analyzovaný povrch rozčleněný do diskrétních buněk, v rámci nichž řeší rovnice a vztahy pro specifikované chování. Diskrétní síť buněk se rozprostře po povrchu modelů těles, kde chceme provést analýzu. Ve fázi tvorby sítě musíme zvolit její adekvátní parametry z hlediska efektivity a přesnosti výpočtu, a rovněž z hlediska kvality sítě samotné. Čím jemnější síť dokážeme vytvořit, tím dostaneme přesnější a podrobnější výsledek. Kvalita sítě závisí na tom, jak moc se dokážeme přiblížit skutečnému tvaru těles. Na druhou stranu se ovšem může stát, že v případě větších projektů a příliš vysoké přesnosti mohou výpočty trvat příliš dlouho a proto je třeba aplikovat citlivostní analýzu pomocí níž si zvolíme konkrétní stupeň přesnosti. [29][32]

4 TEPLOTNÍ LIMITY HARDWAROVÝCH KOMPONENT STOLNÍHO POČÍTAČE

Pro zajištění dlouhodobého a stabilního fungování stolního počítače jako celku je třeba věnovat pozornost doporučeným teplotním rozsahům jednotlivých hardwarových komponent. V případě překročení hodnot označených jako maximální může vést k nežádoucímu snížení výkonu (tzv. thermal throttling), nestabilitě systému, a hlavně ke zkrácení životnosti u nedostatečně chlazených součástí. Všechny komponenty uvedené na trh mají ve svých specifikacích obecné rozmezí ideálních pracovních teplot a teplot maximálních, které vycházejí z konstrukce daného zařízení a doporučených specifikací od samotného výrobce.

4.1 Procesor

Nejpoužívanější architekturou ve stolních počítačích je aktuálně x86-64, který má aktuálně na trhu zastoupení přibližně 78 % oproti 22 % u ARM. Z toho důvodu se primárně budeme zabývat procesory AMD nebo Intel, které mají většinový podíl na poli stolních počítačů. [33]

Procesory architektury x86-64 často pracují s maximální teplotou (T_{jMax}) v rozmezí 90-110°C. V rámci dlouhodobého používání a udržitelnosti výkonu se obvykle doporučuje, aby při maximálním vytížení nebyla teplota vyšší než rozsah 70-85°C. Maximální hraniční teplota T_{jMax} může být z krátkodobého hlediska akceptována, ale po přesáhnutí této teploty procesor téměř ihned začne snižovat napětí a tím pádem i takt, aby předešel možnému poškození. [34][35]

V případě konkrétního modelu jako je AMD Ryzen 5 7600 je uvedena maximální teplota 95°C. Dlouhodobě AMD doporučuje udržovat provozní teplotu při maximální zátěži okolo 70-85°C. Tento procesor je díky nižšímu TDP (Thermal Design Power), které je stanoveno na 65 W při maximální zátěži, méně náročný na chlazení, proto si s ním poradí i přibalený chladič AMD Wraith Stealth. Ovšem v případě požadavku na nižší teploty a hlučnost je obecně výhodnější využít alespoň věžový chladič disponující technologií heatpipe a ventilátorem. [34][35]

4.2 Operační paměť

V případě moderních DDR5 modulů bývá doporučená horní hranic teplot okolo 85°C. Při běžné kancelářské práci se paměti zpravidla pohybují v rozmezí 40-60°C. Krátkodobé výkyvy směrem k 70 °C nejsou kritické, ovšem dlouhodobě bychom se tohoto limitu měli vyvarovat. [36]

4.3 Základní deska

Na základní desce je nejvíce tepelně namáhán chipset a napájecí kaskáda (VRM). Chipsety aktuálních základních desek zvládají teploty mezi 80–90 °C, přičemž běžně se můžeme setkat s hodnotami mezi 50-70 °C. VRM typicky zvládne i 100 °C, ale pro dlouhodobou zátěž je důležité nepřekročit hranici 90 °C, aby nedocházelo k degradaci MOSFET tranzistorů a kondenzátorů, z nichž se tyto napájecí obvody skládají. [37][38]

Jako modelový příklad se můžeme podívat na základní desku ASUS ROG STRIX B650E-I GAMING WIFI. V případě chlazení VRM se vyznačuje nadstandartní výbavou a díky tomu zvládne napájet procesory s vysokou spotřebou i při přetaktování. Výrobce uvádí, že teplota chipsetu by měla setrvávat okolo 50-70°C. Pokud by tepelná zátěž chipsetu či VRM dlouhodobě překračovala 85-90 °C, je vhodné posoudit účinnost proudění vzduchu (airflow) ve skříni. [37][38][39]

4.4 Grafická karta

Grafické karty (GPU) jsou obecně tou nejnáročnější komponentou z hlediska spotřeby a tím pádem i chlazení. Moderní grafické karty mívají $T_{j_{\text{Max}}}$ kolem 83-85 °C. V ideálním případě by se teploty měly držet při hodnotách 70-80 °C. Nad touto hranicí karta obvykle sama zvýší otáčky ventilátorů a upraví takt, aby se co nejrychleji dostala zpět pod tuto hranici. [40][41]

4.5 SSD

Drtivá většina moderních počítačů využívá jako uložení NVMe SSD. Tyto disky jsou charakteristické malými rozměry a velkými přenosovými rychlostmi (řádově GB/s). Vysoké rychlosti jsou ovšem vykoupeny vyššími teplotami a ve spoustě případů i potřebě tato uložení chladit pomocí heatsinku a dobrého airflow ve skříni.

Obecně je doporučeno udržovat jejich teplotu do 70 °C, kdy při překročení tohoto limitu může disk přistoupit k thermal throttlingu a tím omezit své rychlosti čtení a zápisu. [42]

4.6 HDD

Mechanické disky (HDD) se ovšem i přes většinový podíl SSD na trhu stále využívají jako uložení dat. U klasických pevných disků se za bezpečnou hranici považuje teplota od 50-55 °C. Přestože krátkodobé překročení 60 °C nemusí bezprostředně způsobit poškození, dlouhodobě teplota nad touto hranicí zvyšuje riziko mechanického opotřebení pohonu a chyb čtení a zápisu. [43]

4.7 Napájecí zdroj

Napájecí zdroje renomovaných značek s vyšší účinností, certifikované oceněním 80+ Gold nebo Platinum produkují v zásadě méně tepla než levnější modely. Většina kvalitních zdrojů je navržena pro teplotu přibližně 40 °C při plné zátěži. Pokud teplota ve skříni výrazně stoupá, roste i zatížení ventilátoru zdroje, což může zvyšovat hlučnost zdroje.

Z hlediska dlouhodobé životnosti a nižší hlučnosti se zdroj zpravidla umísťuje do spodní části skříně s možností nasávání vzduchu z okolí skříně. Tímto umístěním předejdeme ovlivnění teploty zdroje od ostatních součástí počítače. [44][45]

II PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH CHLADIČE PRO ODVOD TEPLA Z MIKROPROCESORU POMOCÍ METOD CFD

Hlavním cílem první části bude návrh chladiče s cílem zajistit co nejvyšší efektivitu odvodu tepla z mikroprocesoru stolního počítače za použití hliníkového heatsinku doplněného ventilátorem. Jako mikroprocesor jsem si zvolil nejpodstatnější část počítače v podobě Centrální procesorové jednotky (neboli CPU), která zajišťuje zpracování dat ze všech komponent počítače. Konkrétně využiji model AMD Ryzen 7600, jehož parametry jsou zmíněny v kapitole 4.1. Tento model by totiž neměl být problémem uchladit z dlouhodobého hlediska okolo teploty 70 °C, kterou jsem si určil jako mezní pro bezpečný provoz tohoto typu mikroprocesoru.

5.1 Tvorba 3D modelů pro CFD

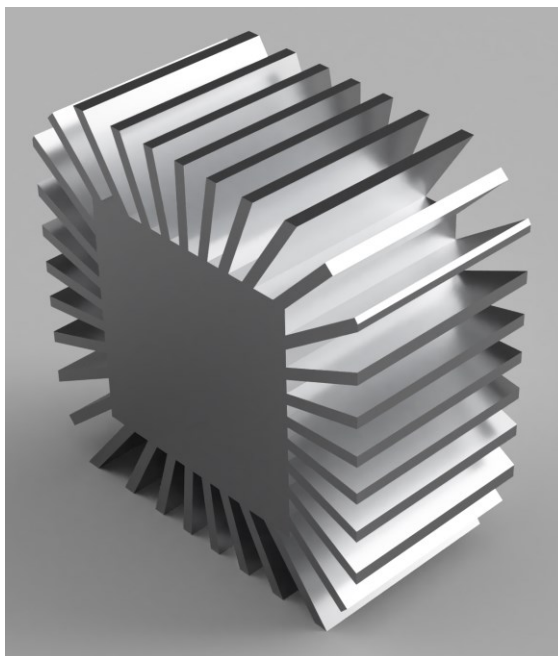
Všechny numerické výpočty jsou provedeny ve 3D. Hlavním důvodem je, aby bylo možné posoudit celkový průběh odvodu tepla. Tento přístup je sice náročnější na výpočetní výkon než 2D, ale pomůže nám provést lepší možnosti analýzy a na to navazující vylepšení geometrie. Pro tvorbu veškerých 3D modelů využitých v této práci jsem využil program Autodesk Fusion, protože je pro soukromé a edukační použití zdarma a s jeho prostředím jsem se už v minulosti mnohokrát setkal. Na obrázku 9 je ukázka základního chladiče, jež budeme metodou CFD posuzovat. Referencí byly chladiče standardně přibalené pro mikroprocesory Intel či AMD.

Jako mezistupeň mezi Autodesk Fusion a ANSYS Fluent jsem využil ANSYS SpaceClaim, poněvadž pro CFD je důležité definovat prostředí, ve kterém se sdílení tepla bude odehrávat. Definice prostředí tkví ve vytvoření obálky (v našem případě vzduchu), pojmenování ploch, hran či objemů pro lepší možnost zadávání okrajových podmínek a materiálových vlastností. V poslední řadě je také důležité zajistit sdílení topologie, aby více dílčích těles nebo prvků v modelu sdílelo svou hraniční geometrii. To znamená, že se společná hrana nebo stěna nerozpadne na dvě samostatné entity, ale sjednotí se do jednoho celku. Hlavním důvodem je správná tvorba sítě (meshing) a konfigurace počátečních podmínek simulace v ANSYS Fluent, kdy má software přesně specifikováno, kdy je daná hrana či stěna mezi prvky společná.

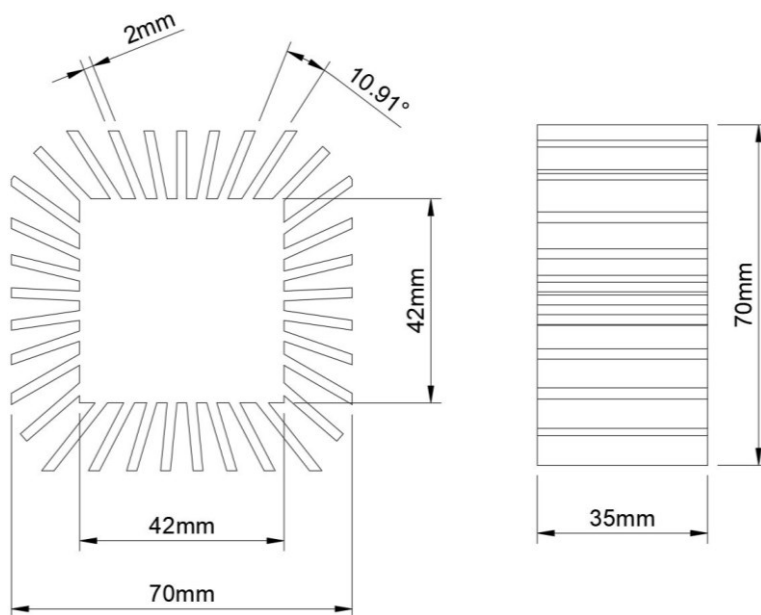
5.2 Geometrie chladiče

Jako modelový případ jsem si vybral klasický heatsink. Ten je nejčastěji tvořený měděným nebo hliníkovým jádrem, které je následně obklopené hliníkovým žebrováním. Chladiče o takovéto geometrii jsou typicky těmi levnějšími a často jsou přibaleny už přímo k mikroprocesorům.

Takto specifikovanou geometrii budu optimalizovat, aby se teplota mikroprocesoru držela okolo 70 °C. Potenciální úpravy provedu jednak na základě analýzy předchozích simulací anebo na nahodilých pokusech na základě různých příkladů z praxe pro zvýšení koeficientů pro sdílení tepla procesoru s chladičem a chladiče s okolním prostředím.



Obrázek 9 Render výchozí geometrie

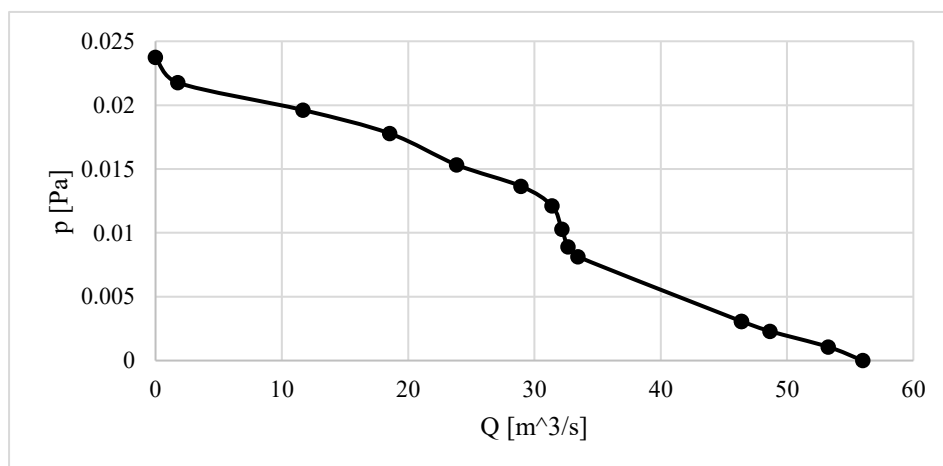


Obrázek 10 Rozměry výchozí geometrie

5.3 Ventilátor

Heatsink takového typu by při této velikosti zdaleka nebyl schopen uchlazen procesor pod doporučenou pracovní teplotou, kterou jsem si v tomto případě stanovil na 70 °C. Z toho důvodu je nutné ho osadit ještě ventilátorem.

Pro pokus jsem zvolil ventilátor Arctic P8 MAX, a to hlavně z důvodu jeho širokého spektra otáček (500-5000 RPM) a detailní specifikace na webu výrobce. Výrobce totiž uvedl ve specifikaci graf závislosti mezi statickým tlakem a průtokem vzduchu, který je nezbytně nutný pro CFD simulaci. [15]



Graf 1 Závislost statického tlaku na průtoku vzduchu u ventilátoru Arctic P8 MAX [15]

Tabulka 4 Nastavení 3D Fan zone pro ventilátor Arctic P8 MAX [15]

Zóna vstupu	Tloušťka ventilátoru [m]	Poloměr náboje [m]	Poloměr lopatek [m]	Úhlová rychlost [rad/s]	Inflexní bod	Směr rotace
fan-in	0,0250	0,0165	0,038	314,159	0,830	pozitivní

V prostředí Ansys Fluent jsem ventilátor realizoval pomocí 3D Fan Zone. Ta požaduje pro správnou funkčnost rozměry ventilátoru, jeho pozici v kartézském souřadném systému, rychlost otáčení, a právě již zmíněnou křivku ventilátoru. U křivky ventilátoru musíme zvolit počáteční podmínky. Konkrétní nastavení je uvedeno v tabulce 5.

Tabulka 5 Inicializace křivky ventilátoru v 3D Fan Zone pro Arctic P8 MAX

Metoda axiální podmínky	Aproximace křivky ventilátoru	Stupeň polynomu	Počáteční průtok [m³]	Testovací úhlová rychlost [rad/s]	Testovací teplota [°C]
Křivka ventilátoru	Polynomiální	3	0,001	314,16	26,85

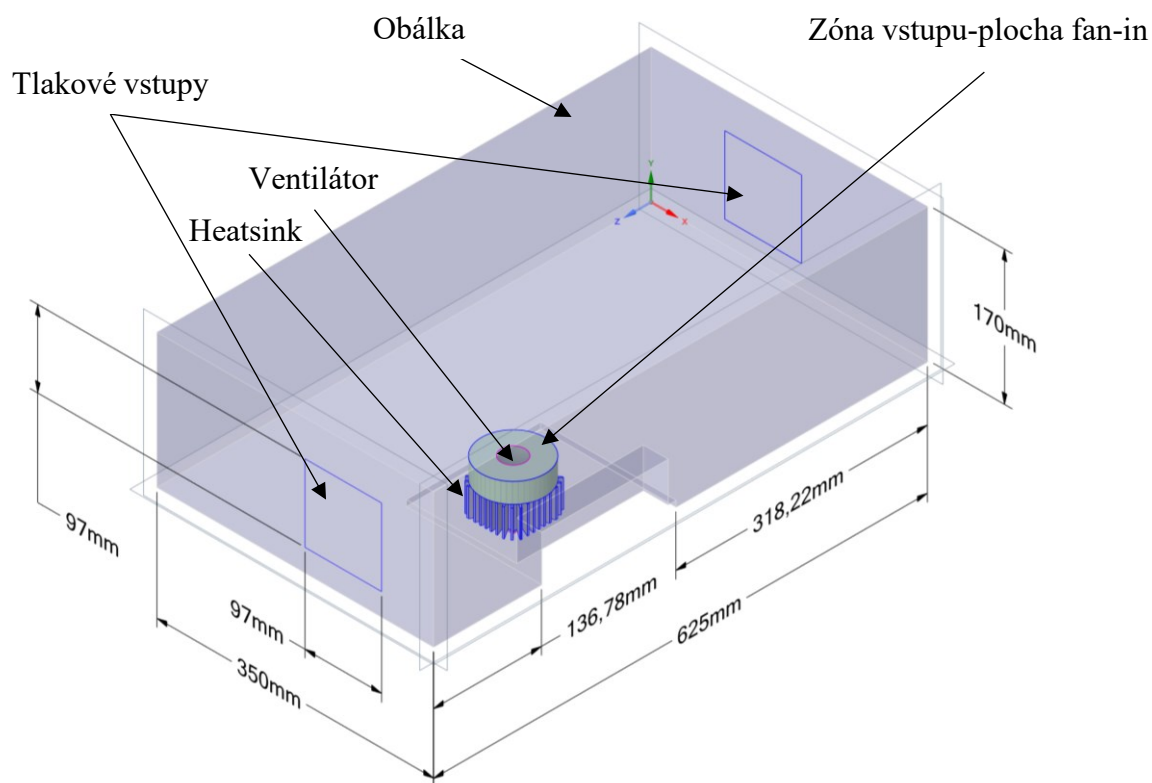
5.4 Zdroj tepla

Zdrojem tepla je model kvádrů o rozměrech 40x40x4 mm představující mikroprocesor s TDP = 65 W. TDP je pro účely ANSYS Fluent nutné ještě přepočítat na objemovou hustotu tepelného toku ve W/m³:

$$q = \frac{Q}{(a \cdot b \cdot c)} = \frac{65}{(4 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3})} = 10\,156\,250 \text{ W/m}^3 \quad (15)$$

5.5 Okolní prostředí

Celá dvojice – procesor a chladič je uzavřena v obálce vyplněné vzduchem. Tato obálka představuje počítačovou skříň se vstupy vzduchu o teplotě 26,85 °C.

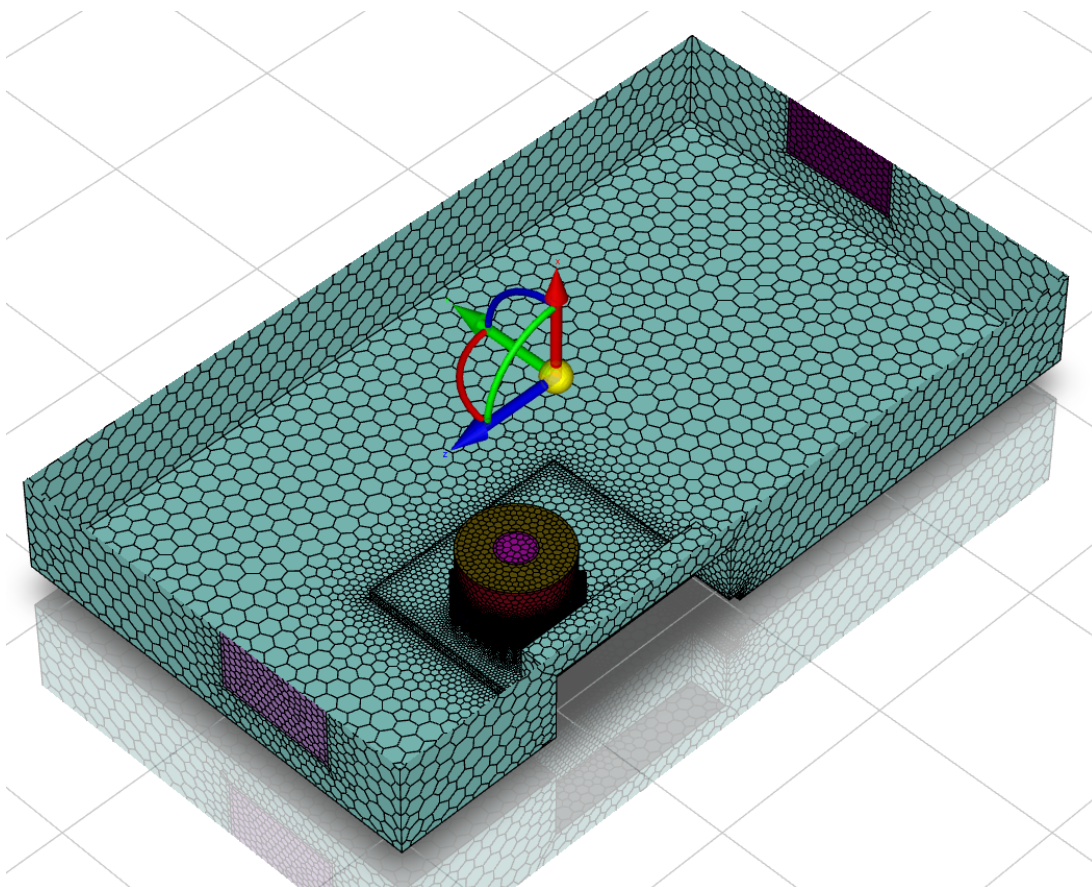


Obrázek 11 Geometrie pro CFD simulace chladičů

5.6 Tvorba výpočetní sítě

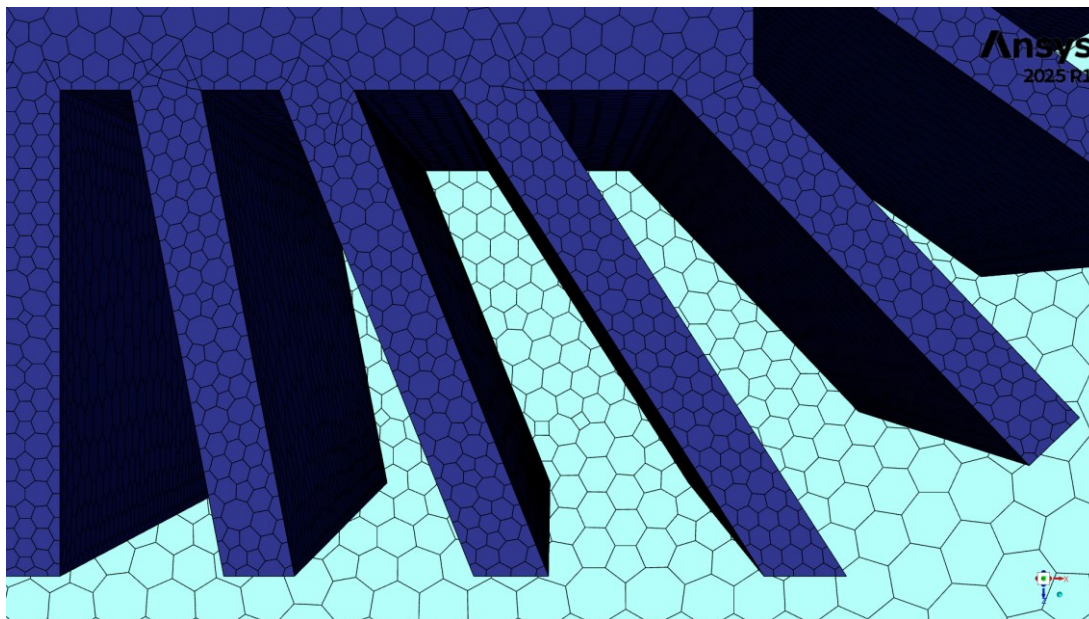
Tvorba výpočetní sítě neboli meshing v mém případě proběhla v ANSYS Fluent 2025R1, přesněji řečeno v jeho součásti Fluent Meshing. Ten umožňuje velice rozmanitá nastavení z hlediska volby velikosti prvků a struktury výpočetní sítě.

Jako ukázkou výpočetní sítě, která je uveden dále, jsem vybral výchozí geometrii, ze které jsem vycházel a následně upravoval, abych zvýšil efektivitu odvodu tepla z čipu.



Obrázek 12 Povrchová síť simulační sestavy

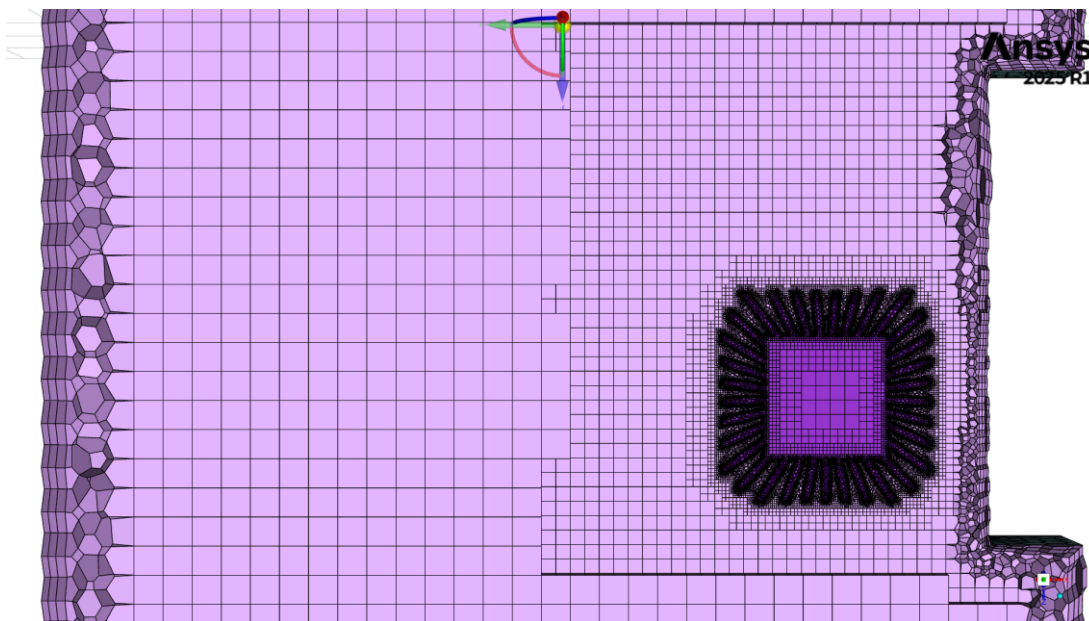
Z hlediska kvality a jednoduchosti sítě jsem zvolil síť typu poly-hexcore. ANSYS Fluent využívá pro tvorbu sítě technologii Mosaic Meshing, kterou společnost ANSYS vyvinula speciálně pro CFD Simulace. Díky této technologii zjednodušuje tvorbu sítě snížením počtu ploch, zvýšením kvality buněk a efektivním využitím paralelních výpočtů. A aby bylo dosaženo přesnějších výsledků a jasněji zachycena proudová pole, byly okolo žeber a procesoru vytvořeny hustší vrstvy sítě. Učinil jsem tak hlavně z toho důvodu, protože obecně platí, že se stoupající hustotou sítě v blízkosti stěn roste i přesnost získaných dat. [47]



Obrázek 13 Detail povrchové sítě chladiče

5.6.1 Kvalita buněk sítě

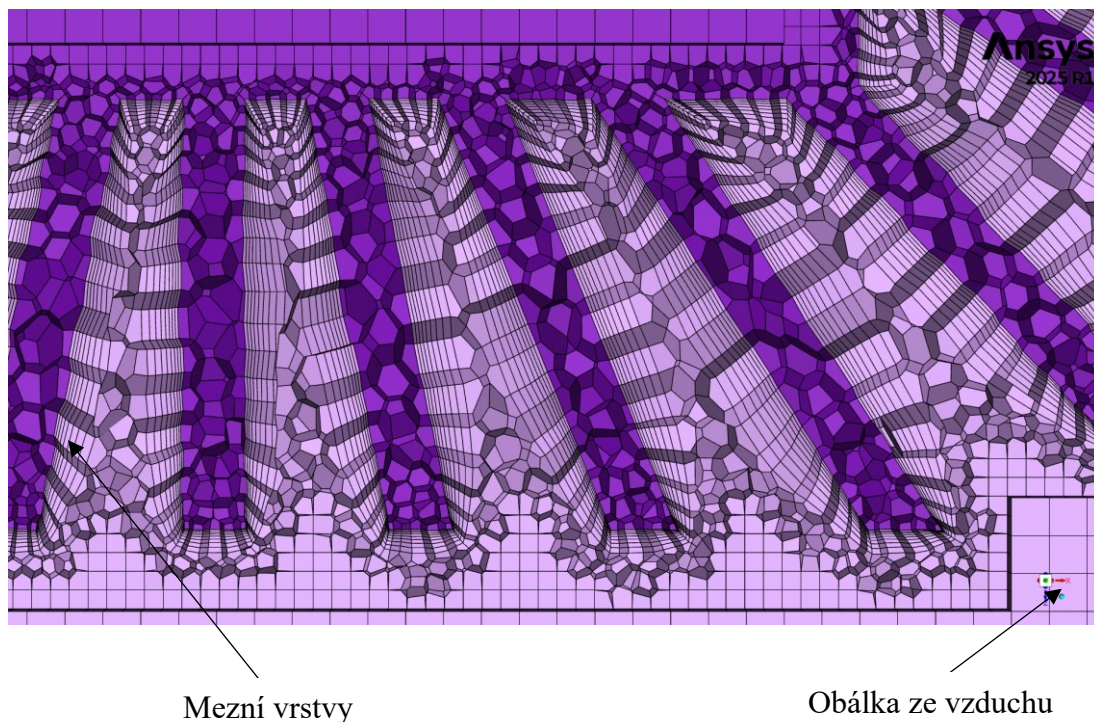
Kvalitu buněk můžeme posuzovat pomocí několika hledisek. Při tvorbě povrchové sítě posuzujeme její kvalitu pomocí parametru Skewness. Skewness neboli zkosení udává, jak moc jsou buňky povrchové sítě zdeformované. Obecně je snaha o buňky s co nejmenší Skewness, jehož hodnota se pohybuje v rozmezí 0 až 1, kde 0 je ideální buňka.



Obrázek 14 Řez objemovou sítí

Při tvorbě objemové sítě soustředím moji pozornost k hodnotě Orthogonal quality. Zde je ovšem hodnota vůči Skewness opačná, kdy 0 je naprosto zdeformovaná buňka a 1 je buňka

ideální. Podle uživatelské příručky ANSYS Fluent, z níž jsem uvedl Obrázek 15, by hodnota Skewness neměla přesahovat 0.95 a Orthogonal quality by měla být vyšší než 0.15. V případě nedodržení těchto doporučení nemusí být další výpočty správné.

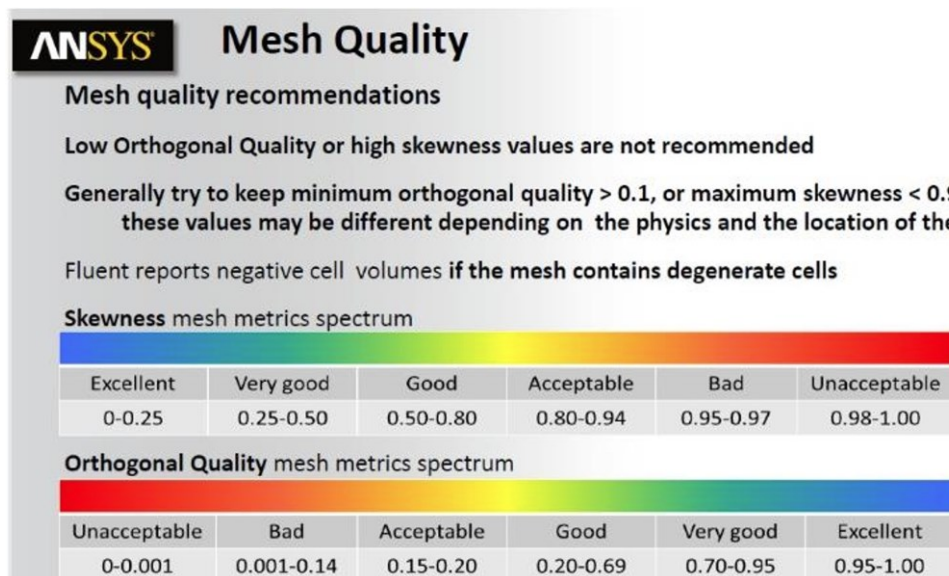


Obrázek 15 Detail objemové sítě

V případě mých pokusů v této případové studii se hodnota Skewness pohybovala v rozmezí 0.50 až 0.58 a ortogonalita od 0.15 až 0.16. Z toho vyplývá, že tyto sítě mají dostatečnou kvalitu pro další zpracování.

Tabulka 6 Parametry sítě výchozí geometrie chladiče v ANSYS Fluent Meshing

Typ sítě	Software	Počet buněk	Typ buněk	Min. ortho. kvalita	Max. poměr stran
Objemová	Fluent Meshing 2025R1	1,2 mil.	Poly-hexcore	0,1567	95,92



Obrázek 16 Stupnice kvality sítě dle společnosti ANSYS [46]

5.7 Nastavení řešiče

Následnými kroky, po tvorbě výpočetní sítě a definici okrajových podmínek ve Fluent Mesh, jsem ve Fluent Solution definoval hodnoty veličin souvisejících s nestacionárním stavem, konkrétně tedy využití materiály, jejich vlastnosti, okrajové podmínky a rychlostně-teplotní údaje.

5.8 Počáteční podmínky simulace

Pro řešení této úlohy jsem na základě pokusů zvolil nejpoužívanější model řešiče v ANSYS Fluent, a to kw-SST. Ten vykazoval ze všech vyzkoušených možností nejlepší výsledky.

Tabulka 7 Nastavení modelu řešiče

Prostředí	Přesnost	Čas	Model	Energie	Radiace
3D	Dvojitá přesnost	Ustálený	Kw-SST	Aktivní	Neaktivní

Přesnost výpočtů se standardně doporučuje nastavit na dvojitou, protože pro většinu úloh jednoduchá přesnost nemusí být dostatečná a simulace bude vykazovat nepřesné výsledky. Může se tak stát například v případě tenkých ale dlouhých prvků v geometrii. V mém případě by to mohlo ovlivnit výpočty na tenkých žebrech heatsinku. [32]

Při simulacích jsem pro šíření tepla do okolí počítal pouze s konvekcí. Tento fakt mohl do jisté míry ovlivnit simulace v rádech několika málo procent, tzn. teplota je o něco vyšší, než kdybych radiaci do výpočtů zahrnul.

Tabulka 8 Nastavení metod řešení

Typ	Tlakově-rychlostní vazba	Diskretizační schéma	Diskretizace tlaku
Pressure based	Provázané	First Order Upwind	PRESTO!

Dále jsem také do simulací zahrnul veličiny, se kterými se na Zemi běžně setkáváme. A to gravitační zrychlení, jež je realizováno jako záporná hodnota ve směru osy Y, a atmosférický tlak, jejichž hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 9 Atmosférické veličiny zohledněné v simulaci

Veličina	Hodnota
Gravitační zrychlení g [m/s^2]	9,81
Atmosférický tlak p [Pa]	101 325,0

5.8.1 Specifikace využitých materiálů

Pro komponenty využitě v simulaci jsem zvolil 3 materiály, jejichž parametry jsem uvedl v tabulce 10.

Pro heatsink jsem typicky zvolil hliník. Hliník se primárně volí pro konstrukci chladičů hlavně z toho důvodu, že je dostupný, v odvodu tepla relativně efektivní, jednoduše zpracovatelný a levný.

Tabulka 10 Vlastnosti materiálů v simulaci návrhu chladiče

Materiál	Hustota [kg/m^3]	Tepelná vodivost [W/(m K)]	Měrné teplo [J/(kg K)]
Vzduch	Nestlačitelný ideální plyn	0,0242	1006,4
Hliník	2719	202,4	871,0
Měď	8978	381,0	387,6

Krycí vrstva mikroprocesoru je v simulacích tvořena mědí. V realitě bývá ještě tento povrch poniklovaný. Ovšem tato vrstva má spíše pozitivní vliv na ochranu proti vnějším vlivům (zejména tvorba měděnky způsobující nižší vodivost), ale na vodivost nemá téměř žádný vliv.

Jako okolní tekutinu (obálku) jsem zvolil vzduch, ale ve variantě ideálního nestlačitelného plynu. V případě ideálního nestlačitelného plynu platí pro výpočet hustoty následující vztah [32]:

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_W} T} \quad (16)$$

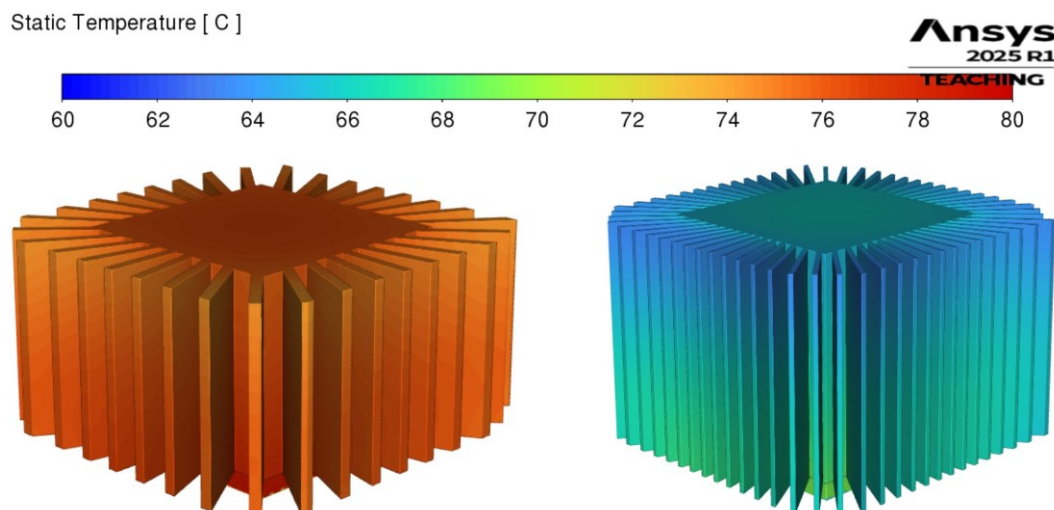
kde	p_{op} [Pa]	je provozní tlak
	R [J.K ⁻¹ .mol ⁻¹]	je univerzální plynová konstanta
	M_W [kg.mol ⁻¹]	je molekulární hmotnost
	T [K]	je teplota

5.9 Analýza výsledků

Analýza výsledků bude primárně spočívat ve srovnání výchozí geometrie s geometrií, která se ze všech simulovaných verzí vyznačovala nejnižší průměrnou teplotu procesoru. V poslední části si rovněž vyhodnotíme, jaký vliv měly jednotlivé parametry na efektivitu odvodu tepla z čipu do okolí.

5.9.1 Konturový graf

Geometrie z prvního pokusu, jejíž rozměry jsou uvedeny na obrázku 10, vykazovala vysokou hodnotu teploty procesoru. Průměrná teplota čipu v tomto případě činila 77,26 °C a teplota heatsinku, jež nebyl schopen odevzdat dostatečné množství tepla do okolí, ani při využití nucené konvekce, čítal průměrnou teplotu 74,82 °C.



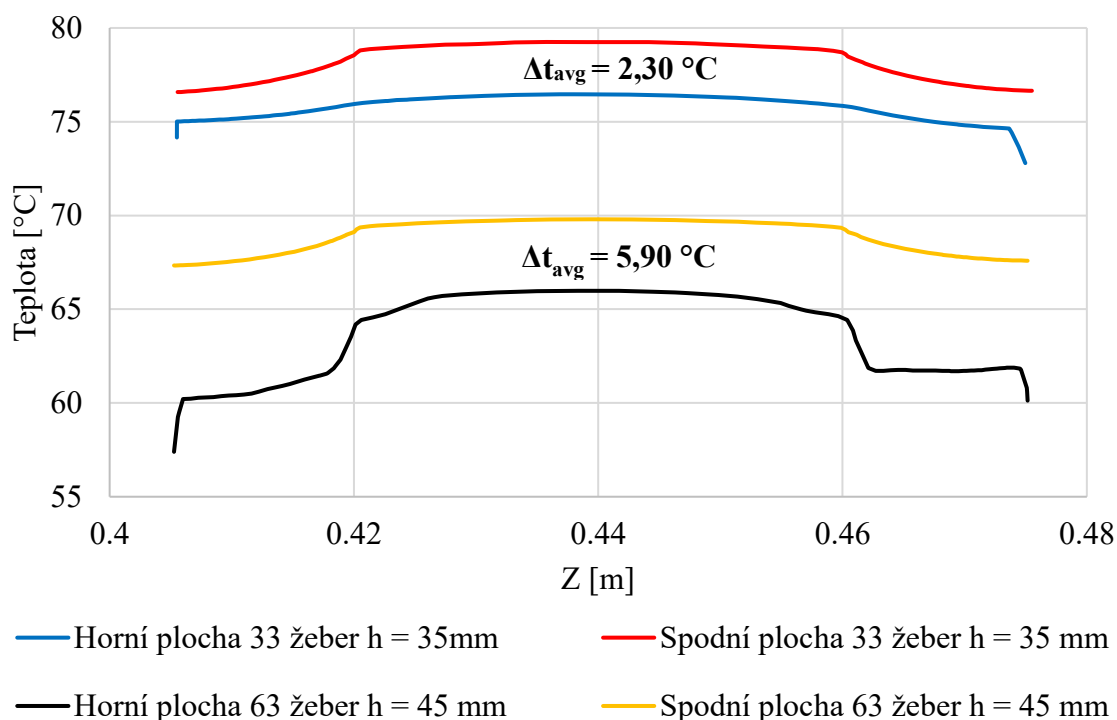
Obrázek 17 Konturové grafy teploty

V levé části obrázku 17 můžeme vidět, že maximální teplota procesoru šplhá až k 79,5 °C, což je horní mez doporučené pracovní teploty. Mým cílem je ovšem dostat se na teplotu co pokud možno v dolní polovině pracovní teploty, tj 60–70 °C.

Pro porovnání mám v pravé části obrázku 17 ještě chladič s nejlepšími výsledky, jehož efektivita odvodu tepla byla oproti výchozímu heatsinku o 20% lepší a dokázal udržet procesor na průměrné teplotě 69,68 °C.

5.9.2 Teplotní profil horní a spodní plochy

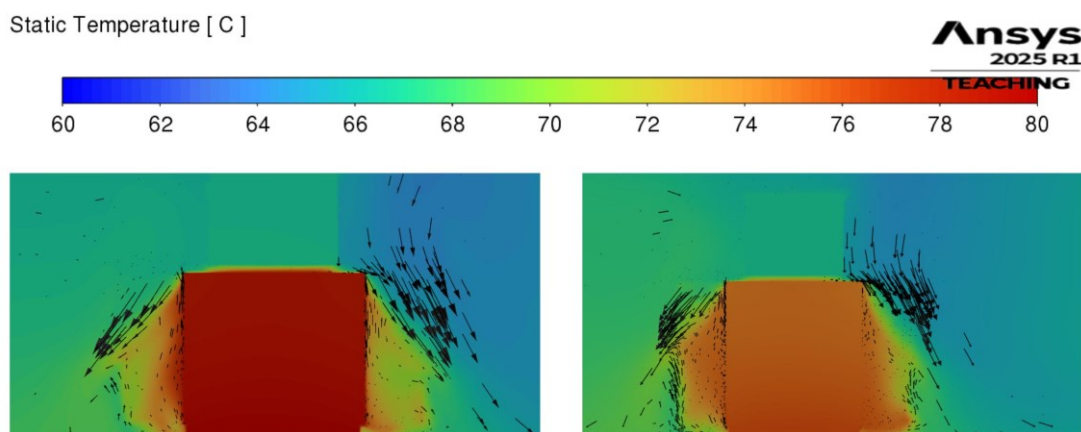
Co se týká teplotních profilů, tak rozdíl průměrných teplot mezi horní a spodní plochou u výchozího heatsinku o výšce $h=35$ mm odpovídá $\Delta t_{\text{avg}} = 2,30$ °C. Dále je zde pěkně vidět, že se vzrůstající vzdáleností od jádra se teplota žebrování snižuje, a to se stejným trendem na horní i spodní straně.



Graf 2 Teplotní profil horní a spodní plochy výchozí a nejefektivnější geometrie

Ve srovnání teplotních profilů těchto dvou geometrií (Graf 2) zde můžeme vidět docela velký rozdíl, a to konkrétně v krajních bodech. Na tento rozdíl má vliv výška chladiče, kdy druhý heatsink je o 10 mm vyšší. Další důvodem je také fakt, že disponuje dvojnásobným počtem o polovinu tenčích žeber, čímž je zajištěna větší plocha pro odvod tepla do okolí.

5.9.3 Konturový řez chladičem



Obrázek 18 Konturový řez chladiči včetně vektorů směru proudění vzduchu

Proudnice vzduchu a uvolňování tepla do okolí můžeme pro oba případy pozorovat na obrázku 18. Je zde jasně viditelný směr proudění vzduchu hnaného ventilátorem, který odebírá vzduch z horní strany a žene skrze žebra chladiče a na základní desku.

Tabulka 11 Výsledky průměrných teplot v simulační studii efektivity chladiče

Skupina	Číslo pokusu	Počet žeber [-]	Tloušťka žeber [mm]	Výška chladiče [mm]	Teplota procesoru [°C]	Teplota chladiče [°C]
A	1	33	2,0	35,0	79,11	76,68
	2	43	1,5	35,0	76,82	74,37
	3	63	1,0	35,0	70,05	67,56
B	4	33	2,0	45,0	78,39	75,61
	5	43	1,5	45,0	73,53	70,73
	6	63	1,0	45,0	69,65	66,78
C	7	33	2,0	55,0	84,76	81,64
	8	43	1,5	55,0	78,48	75,34
	9	63	1,0	55,0	73,28	70,09

Výsledky studie optimalizace výšky chladiče v kombinaci počtu žeber a tloušťky žebrování jsem rozdělil do tří základních skupin, jak je uvedeno v tabulce 11.

Výška chladiče a délka žeber zůstaly u každé ze skupin geometrií konstantní. Proměnnými parametry byly počty žeber a tloušťka žeber.

Analýza ukázala, že s rostoucím počtem žeber postupně klesá teplota chladiče a potažmo i procesoru.

Srovnáním skupiny A a B bylo zjištěno, že vzorky s výškou chladiče 35 mm (skupina A) vykazují vyšší průměrné teploty než vzorky o výšce 45 mm (Skupina B). Ovšem při srovnání skupiny B a C už můžeme pozorovat opačný trend, a to že průměrná teplota u heatsinků o výšce 55 mm je obecně vyšší. Tento výsledek primárně připisuji chování vzduchu poháněného ventilátorem. Na obrázcích 18 a 20 můžeme pozorovat, že proudnice vzduchu směřují do stran a tím pádem není plně ofukována celá plocha žeber. Rovněž

podstatným problémem zde může být také tepelná vodivost hliníku, jež nedokáže při této výšce základny dostatečně rychle vézt teplo. Heatsinky o výšce 45 mm jsou za použití ventilátoru nejefektivnější a vykazují lepší poměr plochy ofukované ventilátorem a množství využitého materiálu nežli ty o výšce 35 a 55 mm.

Zvýšení počtu žebër, podle Newtonova zákona ochlazování, zvětšuje teplosměnnou plochu, což vede k vyššímu přenosu tepla do okolí, a to má za následek nižší teplotu na chlazené komponentě. Ovšem v případě využití ventilátoru pro nucenou konvekci při tomto typu chladiče můžeme říct, že s rostoucí výškou chladiče není zaručena i nižší teplota.

Z hlediska pro nás klíčového parametru, a to teploty procesoru, je tedy nejefektivnějším chladič z pokusu 6, a to model s 63 žebry o tloušťce 1 mm a celkové výšce 45 mm.

6 ANALÝZA ŠÍŘENÍ TEPLA VE SKŘÍNI ZVOLENÉ SESTAVY STOLNÍHO POČÍTAČE

Na základě výsledků z předchozí kapitoly jsem vybral geometrii, která dokázala uchladiť procesor na nejnižší teplotní úrovni, a to konkrétně heatsink s 63 žebry s tloušťkou 1 mm o celkové výšce 45 mm.

Sestavu z předchozí kapitoly ještě obohatím o další komponenty jejichž parametry jsem uvedl v kapitole 4 a provedu analýzu celkového šíření tepla ve skříni s takovou konfigurací.

6.1 Analyzovaný model

Základ tohoto stolního počítače jsem pojal ve stejném duchu jako v kapitole 5, ovšem s tím že jsou zde doplněny další komponenty, jež jsem i s jejich parametry důležitými pro šíření tepla, uvedl v tabulce 13.

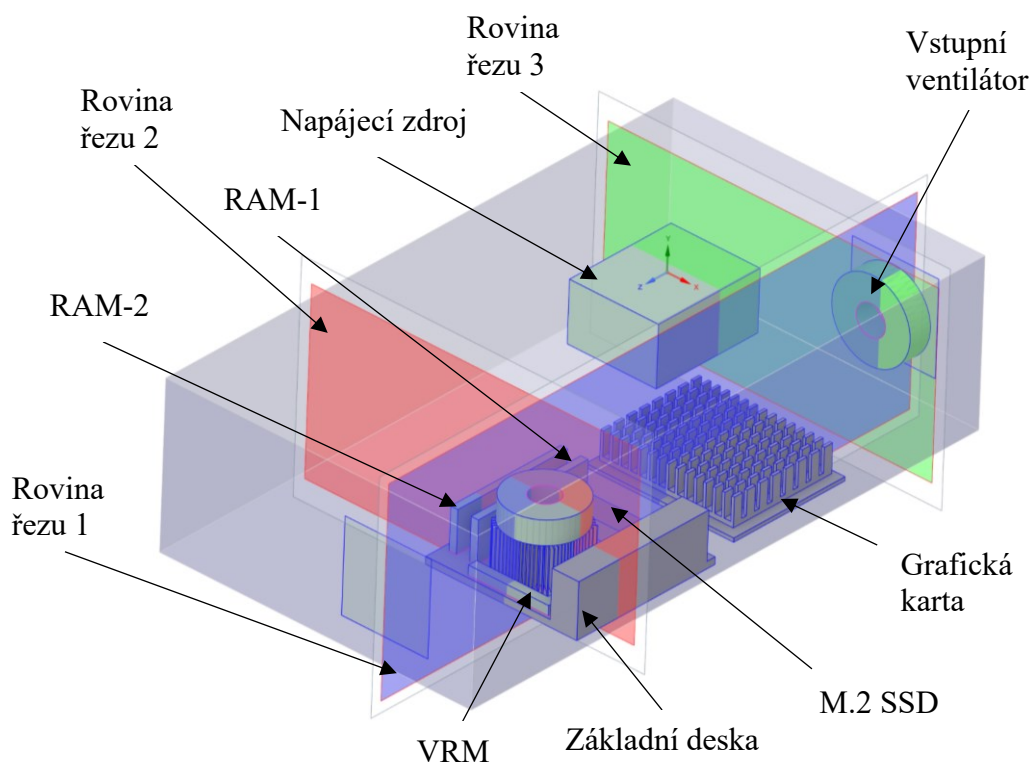
Tabulka 12 Vlastnosti materiálů v simulaci počítačové sestavy

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/(m K)]	Měrné teplo [J/(kg K)]
Vzduch	Nestlačitelný ideální plyn	0,0242	1006,4
Hliník	2719	202,4	871,0
Měď	8978	381,0	387,6
Ocel	8030	16,3	502,5
FR4	1250	0,2	1300,0

Z hlediska využitých materiálů jsem také zakomponoval několik dalších typů. Napájecí zdroj má zpravidla obal z oceli, a proto jsem tuto skutečnost zachoval. Dalším doplňkem je ten fakt, že zde počítám i s materiálem desky plošného spoje s označením FR4, a to jak v případě základní desky, tak i desky plošného spoje grafické karty. Materiál FR4 je z hlediska tepelné vodivosti izolant.

Tabulka 13 Komponenty využívané v simulaci počítačové sestavy

Komponenta	Materiál	Tepelné ztráty Q [W]
Procesor	měď	65
Operační paměť RAM-1	hliník	2
Operační paměť RAM-2	hliník	2
M.2 SSD	hliník	3
Napájení základní desky VRM	hliník	3
Základní deska	FR4	-
Čip grafické karty	měď	50
Napájecí zdroj	ocel	12



Obrázek 19 Geometrie pro CFD simulaci počítačové sestavy

Součástí vizualizace geometrie pro CFD simulaci počítačové sestavy jsou také tři roviny řezu. Tyto roviny řezu jsem využil jako prostředníky pro analýzu šíření tepla uvnitř počítačové skříně.

6.2 Výpočetní síť

U výpočetní sítě je nutné zmínit ten fakt, že jsem využil stejné nastavení jako při návrhu chladiče. Jediným markantním rozdílem je 4x vyšší počet buněk oproti síti v samotné výchozí geometrii chladiče z kapitoly 5. Z mého pohledu by pro detailnější analýzu bylo třeba tuto síť ještě zjemnit, ale s ohledem na výkon mého počítače a časových možnostech jsem setrval u této varianty.

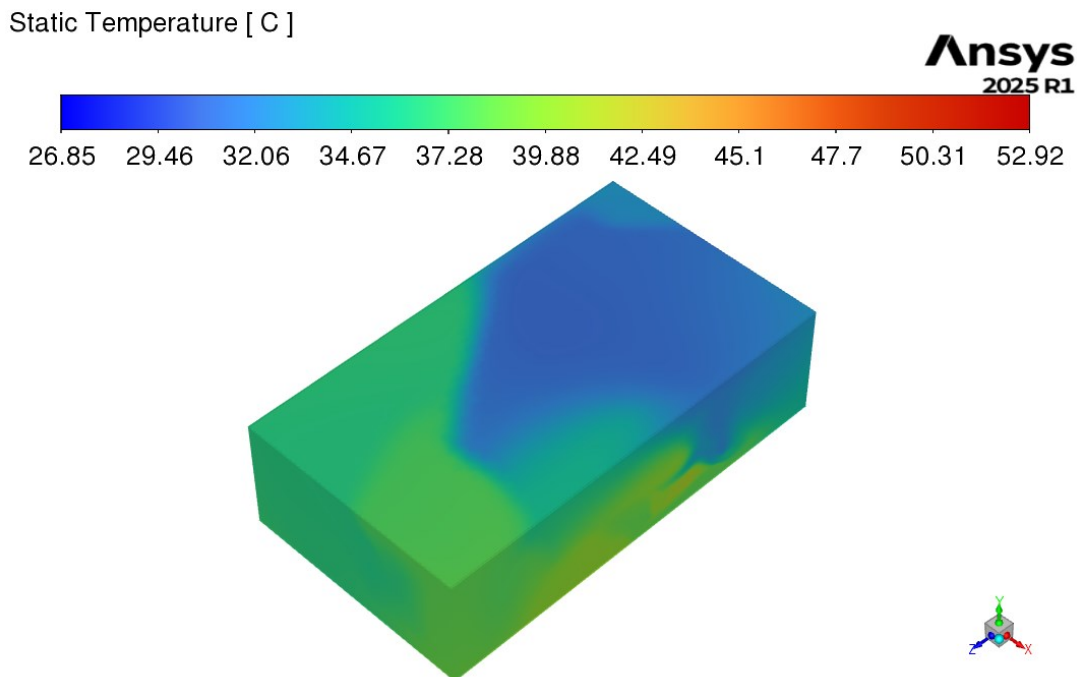
Tabulka 14 Parametry sítě počítačové sestavy v ANSYS Fluent Meshing

Typ sítě	Software	Počet buněk	Typ buněk	Min. ortho. kvalita	Max. poměr stran
Objemová	Fluent Meshing 2025R1	5,3 mil.	Poly-hexcore	0,15	87,85

6.3 Analýza výsledků

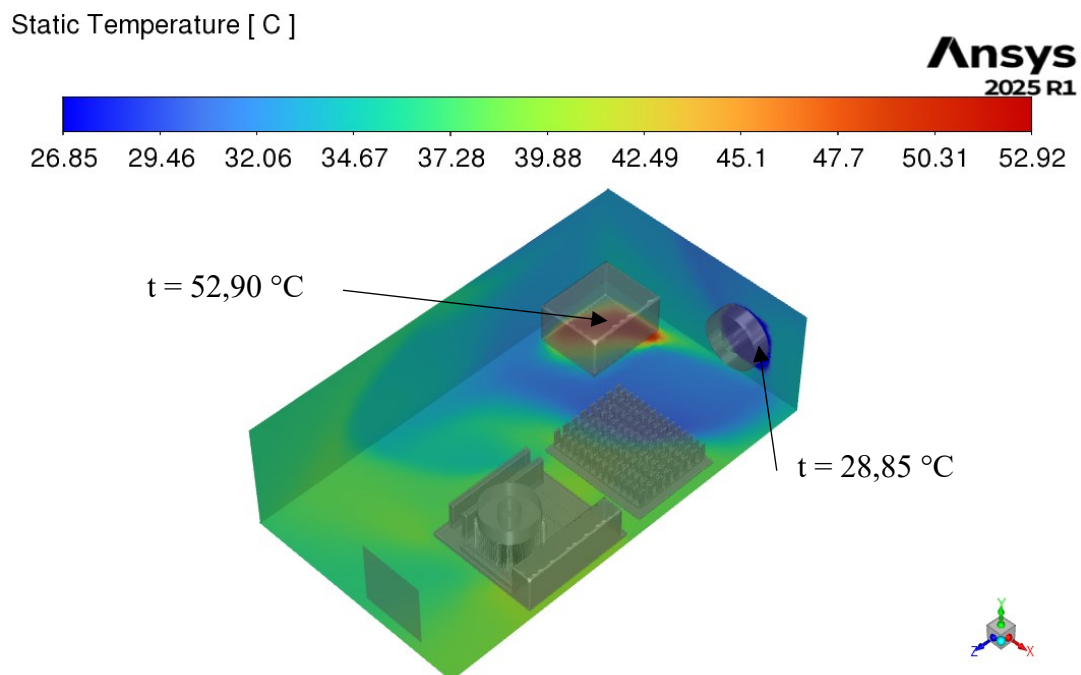
Analýza bude primárně spočívat v odhalení a posouzení tepelně kritických míst. V těchto místech se zpravidla hromadí teplo a mohou mít vliv na životnost některých komponent, a to zejména těch, které mají doporučenou pracovní teplotu v nižších hladinách.

Druhý pohled může být směřován k efektivitě chlazení jednotlivých komponent, a to primárně k porovnání jejich teploty vůči maximální doporučené pracovní teplotě specifikované výrobcem. Tato doporučená teplota je z dlouhodobého hlediska nepřípustná, ale krátkodobě ji lze přesáhnout.



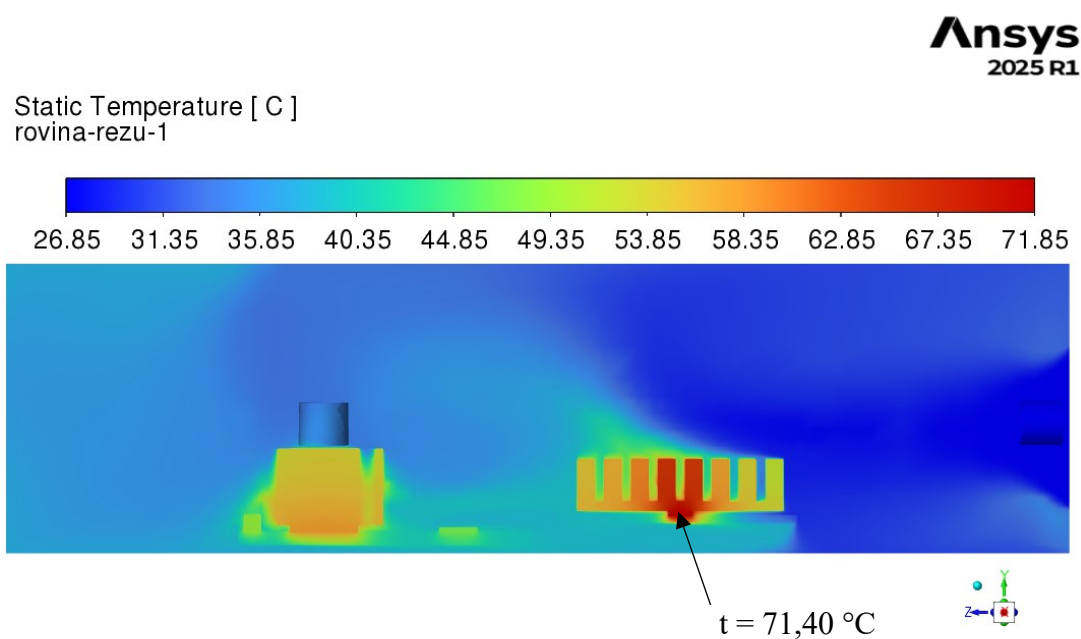
Obrázek 20 Šíření tepla na horní straně skříně

Jak můžeme vidět na obrázku 20, tak na první pohled z izometrické perspektivy vnější strany skříně se může zdát, že v analyzované sestavě není v šíření tepla, sebemenší problém. Vzduch o teplotě 26,85 °C je nasávaný vepředu skříně ventilátorem, který předává kinetickou energii vzduchu a na jeho výstupu jsem naměřil průměrnou rychlost 4,28 m/s a postupně pomocí nucené konvekce odebírá teplo z komponent, respektive z osazených chladičů. Takto proudící vzduch se postupně ohřívá až na teplotu okolo 37,5 °C a na konci skříně se dostává ven díky výstupnímu otvoru.



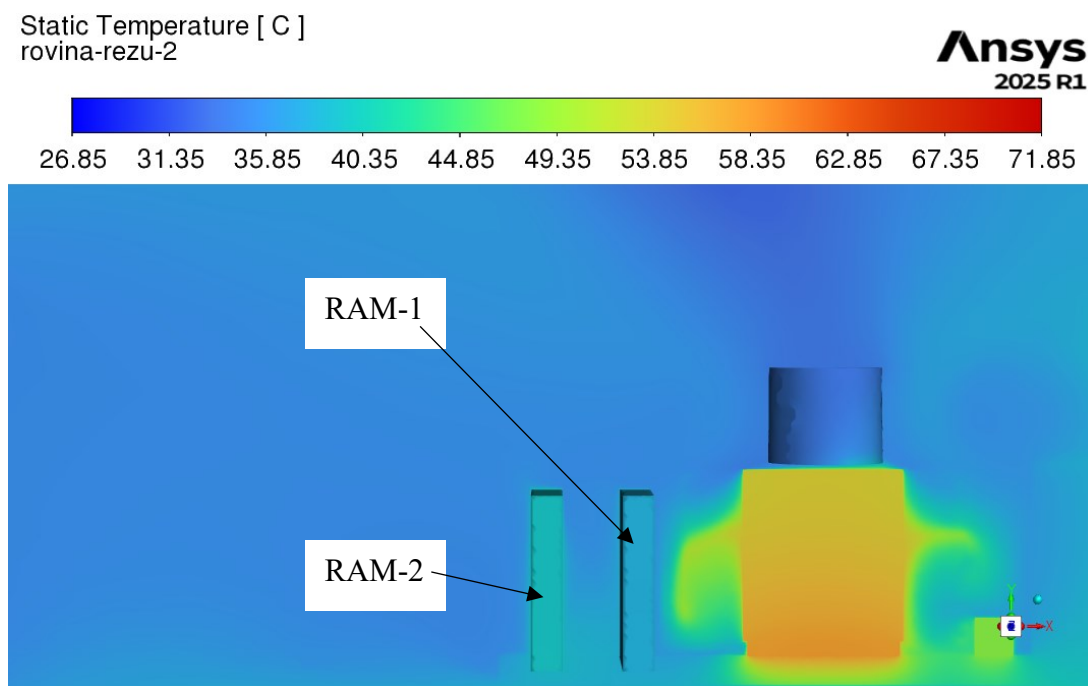
Obrázek 21 Šíření tepla ve spodní straně skříně

Ovšem v případě pohledu dovnitř skříně na obrázku 21 je zřejmé, že v oblasti napájecího zdroje dochází ke kumulaci tepla. Tato kumulace je způsobena převážně tím, že proudící vzduch z ventilátoru ochlazuje pouze roh a ke zbytku už se proudící vzduch nemůže dostat, protože úhel mezi nimi už je příliš velký.



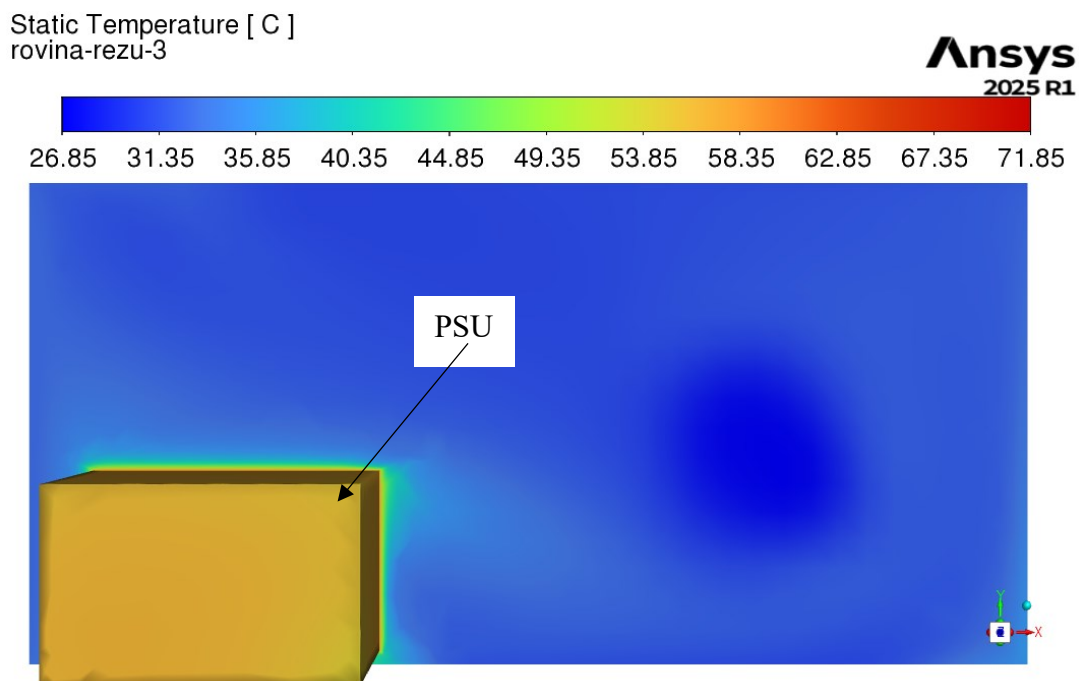
Obrázek 22 Šíření tepla počítačové sestavy v rovině řezu 1

Ostatní komponenty mají dostatečný odvod tepla do okolí. Komponenta o nejvyšší teplotě, což je čip grafické karty v kombinaci s proudícím vzduchem dosahuje průměrné teploty 67,10 °C a nejvyšší teplota uprostřed tohoto čipu čítá 71,40 °C. Tato teplota je pro tento typ čipu naprosto běžná a jsme ji tedy schopni chladit i takto jednoduchým heatsinkem, a to pouze nucené konvekce na vstupu do skříně.



Obrázek 23 Šíření tepla počítačové sestavy v rovině řezu 2

Obrázek 23 nám ukazuje, že ventilátor heatsinku ovlivňuje i teploty komponent okolo. Usuzuji tak hlavně z důvodu nižší teploty bližšího modulu RAM, který má teplotu o 1 °C nižší než modul vzdálenější.



Obrázek 24 Šíření tepla počítačové sestavy v rovině řezu 3

Ačkoliv napájecí zdroj nemá oproti ostatním komponentám o tolik vyšší teplotu, tak v této sestavě není možné tuto komponentu uchladiť pod ideální hodnotu 40 °C.

Tabulka 15 Srovnání doporučených provozních a naměřených teplot

Komponenta	Ideální provozní teplota [°C]	Průměrná teplota [°C]
Procesor	< 85	53,90
Operační paměť RAM-1	< 60	38,26
Operační paměť RAM-2	< 60	39,41
M.2 SSD	< 70	45,27
Napájení základní desky VRM	< 70	46,22
Základní deska	-	46,40
Čip grafické karty	< 80	67,10
Napájecí zdroj	< 40	56,05

Na základě provedené analýzy je v Tabulce 15 viditelné, že téměř všechny komponenty mají dostatečné chlazení, aby nepřekračovaly pracovní teploty dané výrobcem. Díky tomu

se jim nebude zkracovat životnost a jsme schopni je dlouhodobě provozovat. Jediná výjimka je napájecí zdroj, jehož teplota je v průměru o více než 16 °C vyšší než hodnota doporučená. Tento problém je způsobený kumulací tepla v okolí zdroje z důvodu nedostatečné ventilace. Z mého hlediska by se tento problém dal vyřešit prostým vytvořením ventilačních otvorů nad a pod touto součástí. Tím pádem by bylo možné ho částečně chladit nucenou konvekci pomocí vstupního ventilátoru skříně a zároveň by se větší část zdroje ochlazovala volnou konvekci přímo těmito otvory do okolí skříně.

ZÁVĚR

Teplotní management je v současné době inovací, minimalizace a celkové efektivity návrhu výpočetní techniky poměrně často diskutovaným tématem. Předmětem této bakalářské práce bylo prozkoumat problematiku šíření tepla ve stolním počítači a ověřit na praktickém příkladu, jakým způsobem lze metody virtuálního prototypování využít k návrhu optimálního řešení. V teoretické části jsem popsal fyzikální mechanismy generování tepla v elektronických součástkách. Nastínil jsem možné dopady dlouhodobého vystavení nadměrným teplotám – od degradace součástek přes zkrácení jejich životnosti až po možné poruchy počítače jako celku. Dále jsem zhodnotil běžně používané i pokročilé metody pro chlazení stolních sestav, přičemž jsem vyzdvihl jejich náklady na provoz, konstrukční náročnost, efektivitu odvodu tepla a hlučnost.

Metodika virtuálního prototypování mi dokázala schopnosti, jak rychle a s malými náklady otestovat geometrické návrhy, vyhodnocovat teplotní pole a rychle odhalovat problematická místa proudění. Pro stanovení efektivity daného řešení jsem stanovil na základě katalogových údajů a literární rešerše článků zabývajících se testování vybraných komponent. Tyto údaje sloužily jako nástroj pro zhodnocení úspěšnosti návrhu.

Stěžejním výsledkem práce je návrh heatsinku z hojně využívaného materiálu v podobě hliníku. CFD simulace prokázaly, že pro heatsink s ventilátorem nahoře je schopen uchladiť procesor s příkonem 65 W při konfiguraci 63 žebířů s tloušťkou 1 mm a výškou 45 mm pod stanovenou teplotou 70 °C – to je přibližně 25 °C pod doporučenou kritickou hranicí.

Analýza proudění v počítačové sestavě mi potvrdila, že implementace navrženého chladiče spolu s ostatními komponentami ve vybrané konfiguraci téměř eliminuje vznik míst, kde se kumuluje teplo. U většiny komponent se při plném zatížení ustálila průměrná teplota relativně hluboko pod maximální doporučenou pracovní teplotou. Výjimkou byl pouze napájecí zdroj, v jehož blízkosti jsem pomocí analýzy simulace prokázal kumulaci tepla. Tato akumulace tepla způsobila nárůst průměrné teploty o více než 16 °C oproti maximální doporučené teplotě. Pro eliminaci tohoto problematického místa jsem doporučil řešení v podobě přidavných otvorů skříně u pozice dané komponenty.

Práce tak demonstruje, že díky spojení analýzy fyzikálních principů šíření tepla a spojení simulačních metod umožňuje navrhnout efektivní a ekonomicky přijatelné řešení. Výsledná metodika může sloužit jako praktický návod nejen pro vývojáře hardwaru, ale i pro nadšené stavitele výkonných počítačových sestav.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. Teplo a chlazení v elektronice. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0199-3.
- [2] KŘIVOHLÁVEK, Jindřich. Chlazení počítače: kompletní průvodce (nejen) pro hráče. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1509-1.
- [3] CHUDÝ, Vladimír. Meranie technických veličín. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 1999. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 80-227-1275-2.
- [4] MOHAN, Ned, Tore UNDELAND a William P. ROBBINS. Power electronics: converters, applications and design, media enhanced. 3rd ed. Hoboken: Wiley, c2003. ISBN 04-712-2693-9.
- [5] D. UMANS, Stephen. Electric Machinery. 7th edition. New York: McGraw-Hill, 2014. ISBN 978-0-07-338046-9.
- [6] KAZIMIERCZUK, Marian K. High-frequency magnetic components. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-71779-0.
- [7] MÍKA, V. a L. NEUŽIL. Sbírka příkladů z chemického inženýrství. 2. vydání. Praha: SNTL, 1981. ISBN 04-607-81.
- [8] KRÁLOVÁ, Leontýna. Tepelné vlastnosti dřeva - přestup tepla [online]. s. 12 Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2863966/>. [cit. 2025-05-25].
- [9] AHMED ALMUBARAK, Adel. The Effects of Heat on Electronic Components. Int. Journal of Engineering Research and Application [online]. 2017, 7(5), 52-57. ISSN 2248-9622. Dostupné z: https://www.ijera.com/papers/Vol7_issue5/Part-5/H0705055257.pdf. [cit. 2025-04-19].
- [10] VÍTEK, Jan. Technologie současného a budoucího chlazení. Svět hardware [online]. 2005. ISSN 1213-0818. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/technologie-soucasneho-a-budouciho-chlazení/12967>. [cit. 2025-04-19].
- [11] STACH, Jan. Základy PC: chlazení a tichý počítač. Pctuning.cz [online]. 2006. ISSN 1214-0201. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/zaklady-pc-chlazení-a-tichy-pocitac>. [cit. 2025-04-19].

- [12] NOCTUA. Noctua NH-P1. Noctua.at [online]. 2025. Dostupné z: <https://noctua.at/en/nh-p1>. [cit. 2025-04-19].
- [13] CABÚK, Pavol Ing. Chladienie elektronických komponentov s použitím Heatpipe-s a Vapour chamber-s. DPS Elektronika od A do Z [online]. 2021. ISSN 1805-5044. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:78764/z-aktualniho-vydani-chladienie-elektronickych-komponentov-s-pouzitim-heatpipe-s-a-vapour-chamber-s>. [cit. 2025-04-19].
- [14] KOTLÍK, Václav. Heat Pipe: princip a konstrukce. Svět hardware [online]. 2007. Dostupné z: https://www.svethardware.cz/heat-pipe-princip-a-konstrukce/15941?fbclid=IwAR3e5DC2PgztFXkpVRdAT7Vj54DfSpVwAm1HTnNbd6nm6yF_VMHBdxfuXKM. [cit. 2025-04-19].
- [15] ARCTIC. P8 MAX. ARCTIC [online]. 2025. Dostupné z: <https://www.arctic.de/en/P8-Max/ACFAN00286A>. [cit. 2025-04-19].
- [16] NOCTUA. NH-D15 G2. NOCTUA. Noctua [online]. 2025. Dostupné z: <https://noctua.at/en/nh-d15-g2>. [cit. 2025-04-19].
- [17] EK WATER BLOCKS. EK-Quantum Power² Kit P360 Series - AMD AM5. EK WATER BLOCKS. EKWB [online]. 2025. Dostupné z: <https://www.ekwb.com/shop/ek-quantum-power2-kit-p360-series-amd-am5>. [cit. 2025-04-19].
- [18] KOŠTÁL, Ondřej. Chladíme procesor: Vzduch, AiO nebo vlastní vodník? PCTuning.cz [online]. 2016. ISSN 1214-0201. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/chladime-procesor-vzduch-aio-nebo-vlastni-vodnik>. [cit. 2025-04-19].
- [19] BOČEK, Pavel. Biohazard a aktualizovaná sestava chlazená kompresorem. Svět hardware [online]. 2008. ISSN 1213-0818. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/biohazard-a-aktualizovana-sestava-chlazenakompresorem/24004>. [cit. 2025-04-19].
- [20] NARDI, Tom. Teardown: Cooler Max Liquid Cooling System. HACKADAY [online]. 2022. ISSN 2373-2822. Dostupné z: <https://hackaday.com/2022/10/17/teardown-cooler-max-liquid-cooling-system/>. [cit. 2025-04-19].

- [21] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN-technická literatura, 2005, 239 s. ISBN 80-730-0145-4.
- [22] REDAKCE, HW Serveru. Peltierovy termobaterie. Vyvoj.hw.cz [online]. 1999. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>. [cit. 2025-04-19].
- [23] KAŇÁK, Aleš. Návod: Extrémní taktování s dusíkem pro začátečníky. PCTuning.cz [online]. 2013. ISSN 1214-0201. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/navod-extremni-taktovani-s-dusikem-pro-zacatecniky>. [cit. 2025-05-25].
- [24] KAŇÁK, Aleš. AI vygenerovala komín pro chlazení CPU tekutým dusíkem a ten naprosto rozdrtil zavedený produkt od ElmorLabs. PCTuning.cz [online]. 2024. ISSN 1214-0201. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/ai-vygenerovala-komin-pro-chlazení-cpu-tekutym-dusikem-a-ten-naprosto-rozdrtil-zavedeny-produkt-od-elmorlabs>. [cit. 2025-04-19].
- [25] JAVŮREK, Karel. Servery ponořené do oleje? Efektivní chlazení i podle Intelu. ŽIVĚ.CZ [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/servery-ponorene-do-oleje-efektivni-chlazení-i-podle-intelu/sc-3-a-165349/default.aspx>. [cit. 2025-04-19].
- [26] KRČMÁŘ, Petr. Utopte servery v oleji, ušetříte a vyhřejete městský bazén. ROOT.CZ [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/utopte-servery-v-oleji-usetrite-a-vyhrejete-mestsky-bazen/>. [cit. 2025-04-19].
- [27] PUGET SYSTEMS. Mineral Oil Cooled PC. PUGET SYSTEMS [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.pugetsystems.com/mineral-oil-pc>. [cit. 2025-04-19].
- [28] SOLIDWORKS CORPORATION. Simulace. SOLIDWORKS [online]. 2025. Dostupné z: <https://www.solidworks.cz/domain/simulation>. [cit. 2025-04-19].
- [29] VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. Harlow: Pearson/Prentice Hall, 2007. ISBN 978-0-13-127498-3.
- [30] TEFFAH, Khaled, Youtong ZHANG a Xiao-long MOU. Modeling and Experimentation of New Thermoelectric Cooler–Thermoelectric Generator Module.

- MDPI [online]. 2018, 25(8). ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en11030576>. [cit. 2025-05-25].
- [31] STREETER, Victor L. a E. Benjamin WYLIE. Fluid mechanics. Seventh edition. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979. ISBN 00-706-2232-9.
- [32] ANSYS INC. ANSYS Fluent User's Guide. ANSYS [online]. [cit. 2025-04-19].
- [33] ALEKSANDARK. Arm-based PCs to Nearly Double Market Share by 2027, Says Report. TECHPOWERUP [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.techpowerup.com/307094/arm-based-pcs-to-nearly-double-market-share-by-2027-says-report>. [cit. 2025-04-19].
- [34] JUSTICE, Brent. AMD Ryzen 5 7600 vs Ryzen 5 7600X CPU Review. The FPS REVIEW [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.thefpsreview.com/2023/07/31/amd-ryzen-5-7600-vs-ryzen-5-7600x-cpu-review/7/>. [cit. 2025-04-19].
- [35] ADVANCED MICRO DEVICES, INC. AMD Ryzen™ 5 7600. AMD [online]. Dostupné z: <https://www.amd.com/en/products/processors/desktops/ryzen/7000-series/amd-ryzen-5-7600.html>. [cit. 2025-05-25].
- [36] IR_COW. DDR5 Thermal Testing & Analysis. TECHPOWERUP [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.techspot.com/review/2633-amd-b650-motherboards/>. [cit. 2025-04-19].
- [37] WALTON, Steven. AMD B650 Motherboard Roundup: VRM Thermal Testing. TECHSPOT [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.techspot.com/review/2633-amd-b650-motherboards/>. [cit. 2025-04-19].
- [38] VERMA, Akshat. HomeHow To GuidesHow to Find VRM & Motherboard Chipset Temperature [All Methods]. GRAPHIC CARD HUB [online]. 2025. Dostupné z: <https://graphicscardhub.com/vrm-temperature/>. [cit. 2025-04-19].
- [39] ASUSTEK COMPUTER INC. ROG STRIX B650E-I GAMING WiFi. REPUBLIC OF GAMERS [online]. Dostupné z:

- <https://rog.asus.com/cz/motherboards/rog-strix/rog-strix-b650e-i-gaming-wifi-model/>. [cit. 2025-05-25].
- [40] WICKRAMASINGHE, Shanika. How Hot is Too Hot for GPU? Check Your GPU Temperature. Cherry servers [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.cherryservers.com/blog/gpu-temperature-range>. [cit. 2025-04-19].
- [41] PALIT MICROSYSTEMS. GeForce RTX™ 3050 KalmX 6GB. PALIT [online]. Dostupné z: <https://www.palit.com/palit/vgapro.php?id=5147&lang=en&pn=NE63050018JE-1070H&tab=ov>. [cit. 2025-05-25].
- [42] JEŽEK, David. Životnost dat na SSD značně snižuje teplota. Diit.cz [online]. 2015. Dostupné z: <https://diit.cz/clanek/zivotnost-dat-na-ssd-znacne-snizuje-teplota>. [cit. 2025-04-19].
- [43] W. KAESE, Rainer. The effects of high temperatures on hard drives. Data Centre Dynamics [online]. 2023. Dostupné z: <https://www.datacenterdynamics.com/en/opinions/the-effects-of-high-temperatures-on-hard-drives/>. [cit. 2025-04-19].
- [44] MPITZIOPOULOS, Aris. How We Test Power Supply Units. Tom's hardware [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.tomshardware.com/reviews/how-we-test-psu,4042-11.html>. [cit. 2025-04-19]
- [45] SEA SONIC. PRIME FANLESS PX 450 W. SEASONIC [online]. Dostupné z: <https://seasonic.com/prime-fanless-px/>. [cit. 2025-05-25].
- [46] ANSYS INC. Lecture 7: Mesh Quality & Advanced Topics [online]. Dostupné z: https://featips.com/wp-content/uploads/2021/05/Mesh-Intro_16.0_L07_Mesh_Quality_and_Advanced_Topics.pdf. [cit. 2025-05-25].
- [47] ANSYS, INC. *Ansys Fluent Mosaic Meshing*. Online. ANSYS. 2025. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent/mosaic-meshing#tab1-1>. [cit. 2025-05-26].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Heatsink Noctua NH-P1 [12]	26
Obrázek 2 Pracovní cyklus heatpipe (Zdroj: vlastní).....	27
Obrázek 3 Ventilátor ARCTIC P8 MAX [15]	28
Obrázek 4 Chladič Noctua NH-D15 G2 [16].....	28
Obrázek 5 Kapalinový chladič EK-Quantum Power ² Kit P360 Series [17]	30
Obrázek 6 Kompresorový chladič Cooler Max [20].....	31
Obrázek 7 Peltierův článek (zdroj: vlastní).....	32
Obrázek 8 Stolní počítač chlazený minerálním olejem [27]	34
Obrázek 9 Render výchozí geometrie	45
Obrázek 10 Rozměry výchozí geometrie	46
Obrázek 11 Geometrie pro CFD simulace chladičů	48
Obrázek 12 Povrchová síť simulační sestavy	49
Obrázek 13 Detail povrchové sítě chladiče.....	50
Obrázek 14 Řez objemovou sítí	50
Obrázek 15 Detail objemové sítě	51
Obrázek 16 Stupnice kvality sítě dle společnosti ANSYS [46].....	52
Obrázek 17 Konturové grafy teploty	55
Obrázek 18 Konturový řez chladiči včetně vektorů směru proudění vzduchu	56
Obrázek 19 Geometrie pro CFD simulaci počítačové sestavy	60
Obrázek 20 Šíření tepla na horní straně skříně	62
Obrázek 21 Šíření tepla ve spodní straně skříně	63
Obrázek 22 Šíření tepla počítačové sestavy v rovině řezu 1	63
Obrázek 23 Šíření tepla počítačové sestavy v rovině řezu 2.....	64
Obrázek 24 Šíření tepla počítačové sestavy v rovině řezu 3.....	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Součinitele tepelné vodivosti materiálů využívaných pro konstrukce chladičů [7]	18
Tabulka 2 Volba konstant C a n na základě výsledku součinu Gr·Pr [7]	21
Tabulka 3 Součinitele přestupu tepla pro vzduch a vodu s dřevem při volné a nucené konvekci [8]	21
Tabulka 4 Nastavení 3D Fan zone pro ventilátor Arctic P8 MAX [15]	47
Tabulka 5 Inicializace křivky ventilátoru v 3D Fan Zone pro Arctic P8 MAX	47
Tabulka 6 Parametry sítě výchozí geometrie chladiče v ANSYS Fluent Meshing	51
Tabulka 7 Nastavení modelu řešiče	52
Tabulka 8 Nastavení metod řešení	53
Tabulka 9 Atmosférické veličiny zohledněné v simulaci	53
Tabulka 10 Vlastnosti materiálů v simulaci návrhu chladiče	53
Tabulka 11 Výsledky průměrných teplot v simulační studii efektivity chladiče	57
Tabulka 12 Vlastnosti materiálů v simulaci počítačové sestavy	59
Tabulka 13 Komponenty využitě v simulaci počítačové sestavy	60
Tabulka 14 Parametry sítě počítačové sestavy v ANSYS Fluent Meshing	61
Tabulka 15 Srovnání doporučených provozních a naměřených teplot	65

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Závislost statického tlaku na průtoku vzduchu u ventilátoru Arctic P8 MAX [15] .46

Graf 2 Teplotní profil horní a spodní plochy výchozí a nejefektivnější geometrie56

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Název
AMD		Advanced Micro Devices (název firmy)
ARM		Advanced RISC Machine (název firmy)
CFD		Computational Fluid Dynamics (výpočetní dynamika tekutin)
C	[-]	bezrozměrná empirická konstanta
c_p	[J/(kg.K)]	měrná tepelná kapacita
d	[m]	tloušťka
DDR5		Double Data Rate 5
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
Gr	[-]	Grashofovo číslo
GPU		Graphics Processing Unit (grafický procesor)
h	[W/(m ² .K)]	součinitel přestupu tepla
HDD		Hard Disk drive (pevný disk)
I	[A]	elektrický proud
I_t	[W]	tepelný tok
l	[m]	charakteristický rozměr
MOSFET		Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (polovodičový tranzistor s izolovaným hradlem)
n	[-]	bezrozměrná empirická konstanta
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
NVMe		Non-Volatile Memory express (rozhraní pro uložení)
P	[W]	výkon
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
q	[W/m ³]	objemová hustota tepelného toku
PSU		Power Supply Unit (napájecí zdroj)

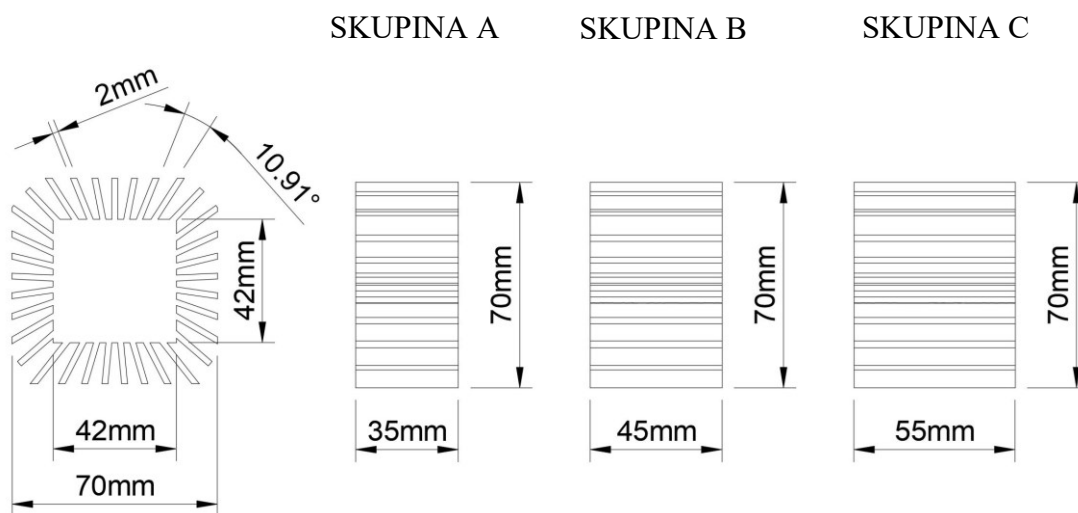
Q_r	[J]	množství tepla
R	[Ω]	elektrický odpor
R_t	[(m^2K)/W]	tepelný odpor
RISC		Reduced Instruction Set Computer (počítač s redukovaným instrukčním souborem)
S	[m^2]	plocha
SSD		Solid-state drive (polovodičový disk)
TDP		Thermal Design Power (tepelný návrhový výkon)
t	[$^{\circ}C$ nebo K]	teplota
Δt	[$^{\circ}C$ nebo K]	rozdíl teplot
Δt_{avg}	[$^{\circ}C$ nebo K]	rozdíl průměrných teplot
T_{jMax}	[$^{\circ}C$ nebo K]	maximální teplota komponenty
U	[V]	elektrické napětí
V	[m/s]	rychlost proudění tekutiny
ν	[m^2/s]	kinematická viskozita
VRM		Voltage Regulator Module (modul regulátoru napětí)
α'	[V/K]	Seebeckův koeficient
β	[K^{-1}]	součinitel objemové roztažnosti tekutin
λ	[W/(m.K)]	součinitel tepelné vodivosti
ρ	[kg/ m^3]	hustota
τ	[s]	čas
η	[Pa.s]	dynamická viskozita

SEZNAM PŘÍLOH

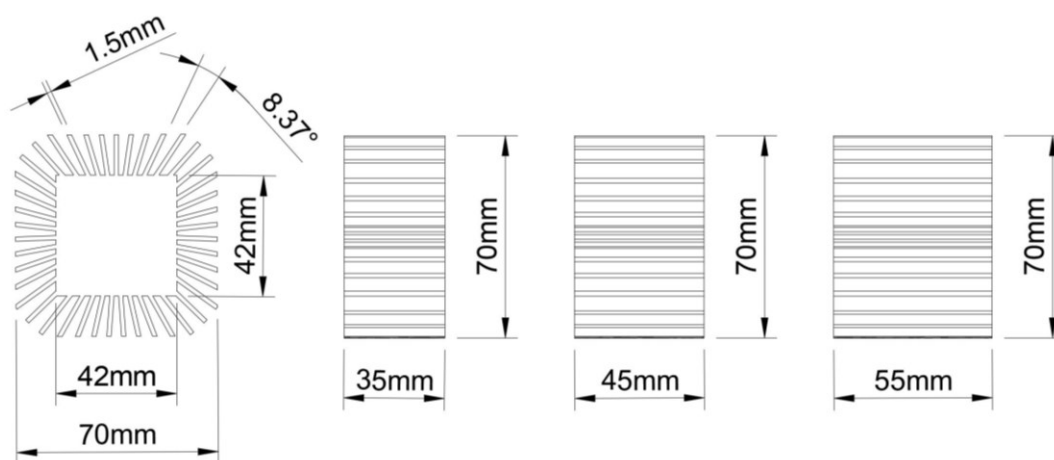
Příloha P I: Rozměry geometrií heatsinků z případové studie v kapitole 5

PŘÍLOHA P I: ROZMĚRY GEOMETRIÍ HEATSINKŮ Z PŘÍPADOVÉ STUDIE V KAPITOLE 5

Heatsink 33 žeber tloušťky 2 mm:



Heatsink 43 žeber tloušťky 1,5 mm:



Heatsink 63 žeber tloušťky 1 mm:

