

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270017 – Konstruování strojů a  
technických zařízení  
**Studijní specializace:** Konstruování vozidel a manipulačních  
zařízení

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace mechanické konstrukce asistenčního systému pro  
motocykl**

**Autor:** Bc. Jan Rada  
**Vedoucí práce:** Ing. Roman ČERMÁK, Ph.D.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan RADA**  
Osobní číslo: **S20N0059P**  
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**  
Specializace: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**  
Téma práce: **Optimalizace mechanické konstrukce asistenčního systému pro motocykl**  
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Analyzujte současný stav konstrukce asistenčního systému pro motocykl (ARAS). Proveďte rešerši v oblasti chlazení mikropočítačových zařízení a slaboproudé elektroniky. Analyzujte současný stav řešeného elektronického systému. Optimalizujte konstrukci s ohledem na použité elektronické komponenty. Optimalizační proces podložte výpočty a simulacemi.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova práce:

Literární rešerše

Analýza řešeného problému

Optimalizace konstrukce s využitím simulací

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Sohel Murshed, S.M., (Ed.) Electronic cooling, ExLi4Eva, 2016  
Kuneš, J., Modelování tepelných procesů, SNTL Praha, 1989

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **30. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Václavu Maškovi za veškeré cenné rady a připomínky. Dále děkuji rodině a všem, kteří mě podporovali v průběhu studia.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Rada	<b>Jméno</b> Jan	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Čermák, Ph.D.	<b>Jméno</b> Roman	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU – FST – KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace mechanické konstrukce asistenčního systému pro motocykl		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	54	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	54	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce obsahuje analýzu konceptu asistenčního systému pro motocykl (ARAS) z hlediska odvodu tepla z počítačové desky a jeho následnou optimalizaci s využitím simulačních nástrojů SolidWorks Flow Simulation.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	asistenční systém, CFD, tepelná simulace, optimalizace, počítačová deska

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Rada	<b>Name</b> Jan
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270017 Design engineering of machines and technical devices	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Čermák, Ph.D.	<b>Name</b> Roman
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KKS	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Optimization of motorcycle assistance system mechanical structure	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	54	<b>TEXT PART</b>	54	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis contains an analysis of the motorcycle assistance system (ARAS) concept in terms of heat dissipation from the computer board and its subsequent optimization using SolidWorks Flow Simulation tools.
<b>KEY WORDS</b>	assistance system, CFD, thermal simulation, optimization, single-board computer

## Obsah

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	12
Seznam grafů.....	12
Úvod.....	13
1 Základy tepelného přenosu.....	14
1.1 Vedení.....	14
1.2 Konvekce .....	15
1.3 Radiace .....	16
2 Pouzdření čipů a odvod tepla .....	17
2.1 Základní typy.....	17
2.2 Odvod tepla z čipu.....	18
2.3 Desky plošných spojů.....	20
3 Koncept .....	21
3.1 Senzory a hardware .....	21
4 Analýza konceptu.....	24
4.1 Experimentální kontrola matematického modelu.....	24
4.1.1 Simulace počítačové desky .....	26
4.2 Tepelná simulace .....	29
4.3 Vyhodnocení.....	32
4.4 Specifikace pro zlepšení .....	32
4.4.1 Odvod tepla .....	32
4.4.2 Rozměry zařízení.....	33
4.4.3 Použitý materiál a výrobitelnost.....	33
5 Návrh.....	34
5.1 Koncept s předním chladičem .....	34
5.1.1 Tepelná analýza první varianty .....	34
5.2 Varianta s horním chladičem.....	37
5.3 Varianta se spodním chladičem a využitím teplovodivých trubek.....	39
5.4 Vyhodnocení.....	42
6 Finální řešení .....	43
6.1 Chladič.....	44
6.2 Hlavní box .....	45
6.3 Battery box .....	47
7 Montáž na motocykl.....	48



8	Porovnání s původním konceptem .....	50
8.1	Odvod tepla.....	50
8.2	Rozměry.....	51
9	Závěr.....	52
	Seznam použitých zdrojů .....	53

## Seznam obrázků

Obr. 1: DIP [10] .....	17
Obr. 2: QFP [10].....	17
Obr. 3:SOIC [10].....	17
Obr. 4: PGA [26].....	17
Obr. 5: LGA [27].....	17
Obr. 6: BGA [28] .....	17
Obr. 7: Struktura pouzdra PBGA (vlevo) a CBGA (vpravo) [13] .....	18
Obr. 8: Vývoj pouzder [11].....	18
Obr. 9: Struktura pouzdra s ohledem na tepelný odpor.....	19
Obr. 10: Schéma BGA pouzdra s flip chipem.....	20
Obr. 11: Definice DPS v programu SolidWorks.....	20
Obr. 12: Kamera Waveshare RPi [23] .....	21
Obr. 13: Laserový dálkoměr TeraRanger Evo [24].....	21
Obr. 14: GPS senzor [7] .....	21
Obr. 15: Inerciální senzor [7] .....	22
Obr. 16: Raspberry Pi 3 Model B+ [25].....	22
Obr. 17: koncept ARAS .....	22
Obr. 18: Popis ARAS systému.....	23
Obr. 19: ARAS umístěný na vidlici motocyklu [7] .....	23
Obr. 20: Snímek z termokamery v průběhu experimentu .....	24
Obr. 21: MxL7704.....	25
Obr. 22: LAN7515 .....	25
Obr. 23: Broadcom BCM2837 .....	26
Obr. 24: Zjednodušená deska Raspberry P 3B+ .....	26
Obr. 25: Zjemnění sítě v oblasti pouzder .....	27
Obr. 26: Teplotní pole desky Raspberry Pi 3B+ .....	27
Obr. 27: Teplotní pole tekutiny v místě řezu na Obr. 26 .....	28
Obr. 28: Popis chlazení ARAS.....	29
Obr. 29: Teplotní pole v oblasti procesoru při 2,5 W a 14 m/s.....	30
Obr. 30: Proudění vzduchu kolem labyrintu .....	30
Obr. 31: Proudění vzduchu napříč zařízením.....	31
Obr. 32: Koncept s předním chladičem.....	34
Obr. 33: Zasítování žeber chladiče .....	35

Obr. 34: Umístění řezu teplotního pole simulace první varianty .....	35
Obr. 35: Teplotní pole první varianty při teplotním výkonu čipu 20 W a rychlosti motocyklu 5 m/s .....	35
Obr. 36: Rychlostní pole vzduchu obtékající kolem první varianty .....	36
Obr. 37: Koncept s horním chlazením .....	37
Obr. 38: Umístění řezu teplotního pole simulace druhé varianty .....	38
Obr. 39: Teplotní pole druhé varianty při teplotním výkonu čipu 20 W a rychlosti motocyklu 14 m/s .....	38
Obr. 40: Rychlostní pole vzduchu obtékající kolem druhé varianty .....	39
Obr. 41: Schéma funkce teplovodivé trubky [29] .....	39
Obr. 42: Koncept s využitím teplovodivých trubek .....	40
Obr. 43: Umístění řezu teplotního pole simulace třetí varianty .....	40
Obr. 44: Teplotní pole třetí varianty při teplotním výkonu čipu 20 W a rychlosti motocyklu 14 m/s .....	41
Obr. 45: Rychlostní pole vzduchu obtékající kolem třetí varianty .....	41
Obr. 46: Finální návrh .....	43
Obr. 47: Rozstřel sestavy finálního návrhu .....	43
Obr. 48: Sestava chladiče se senzory a počítačovou deskou .....	44
Obr. 49: Chladič zřepedu .....	44
Obr. 50: Vnitřní strana chladiče .....	44
Obr. 51: Sestava hlavního boxu .....	45
Obr. 52: Popis sestavy hlavního boxu .....	45
Obr. 53: Hlavní box .....	46
Obr. 54: Pohled na bok hlavního boxu .....	46
Obr. 55: Držák baterie .....	47
Obr. 56: Battery box .....	47
Obr. 57: Sestava battery boxu .....	47
Obr. 58: Sestava držáku .....	48
Obr. 59: Sestava finálního zařízení s držákem .....	49
Obr. 60: Umístění finálního zařízení na motocyklu .....	49
Obr. 61: Porovnání teplotních polí původního konceptu a nového řešení při tepelném výkonu čipu 2,5 W a rychlosti motocyklu 5 m/s .....	50
Obr. 62: Porovnání polí rychlosti obtékajícího vzduchu původního konceptu (vlevo) a nového řešení (vpravo) při rychlosti motocyklu 5 m/s .....	51
Obr. 63: Porovnání velikosti původního konceptu (vlevo) a nového řešení (vpravo) .....	51

## Seznam tabulek

Tab. 1: Emisivita povrchů materiálů .....	16
Tab. 2: Okrajové podmínky pro simulaci konceptu .....	29
Tab. 3: Vypočtené hodnoty v jednotlivých zátěžových stavech .....	31
Tab. 4: Okrajové podmínky pro simulaci první varianty .....	34
Tab. 5: Vypočtené hodnoty teploty čipu první varianty (hodnoty ve [°C]) .....	36
Tab. 6: Vypočtené hodnoty teploty čipu druhé varianty (hodnoty ve [°C]) .....	37

## Seznam grafů

Graf 1: Závislost teploty čipu BCM2837 na čase z průběhu experimentu .....	25
Graf 2: Porovnání naměřených hodnot s vypočtenými hodnotami simulací .....	28
Graf 3: Vypočtená závislost teploty čipu na rychlosti jízdy motocyklu pro jednotlivé výkony čipu .....	32
Graf 4: Závislost teploty čipu na rychlosti motocyklu pro jednotlivé výkony čipu první varianty .....	36
Graf 5: Závislost teploty čipu na rychlosti motocyklu pro jednotlivé výkony čipu druhé varianty .....	37
Graf 6: Teplota čipu při tepelném výkonu 20 W a rychlosti motocyklu 14 m/s .....	42

## Úvod

Přítomnost asistenčních systémů v dopravních prostředcích se každým rokem zvyšuje. Může za to velké procento nehod zaviněné lidským faktorem (až 95 %). Dle dat zpracovaných na platformě „Vize 0“ je každoročně na světě při nehodách zraněno 50 mil. lidí, přičemž 1,35 mil. lidí na následky dopravních nehod zemře. Pokud navíc přihlédneme i k ekonomické stránce, celosvětově je až 2,5 % HDP vynaloženo na následky dopravních nehod. [1] [2]

Asistenční systémy dokážou předejít vzniku dopravní nehody. Některé z nich jsou již povinnou součástí nově vyráběných osobních vozidel. Například ABS je součástí povinné výbavy nově homologovaných vozidel v EU již od roku 2006, ESP od roku 2011. Novější systémy jako lane assist či front assist jsou od roku 2015 povinné zatím jen pro autobusy a nákladní automobily, avšak v nejbližší době by měl evropský parlament schválit povinnost těchto asistentů i v osobních automobilech. [2]

Od roku 2021 je na Západočeské univerzitě v Plzni vyvíjen koncept asistenčního zařízení pro motocykl, který zahrnuje 3 základní systémy – čtení značek/semaforů, detekci chodců a hlídání bezpečné vzdálenosti od vpředu jedoucího vozidla. Jedná se o senzorickou jednotku nezasahující do řízení, která s pomocí senzorů vyhodnocuje dopravní situaci a na základě získaných dat dává řidiči signalizaci o případných rizicích v dopravním provozu.

Hlavním úkolem diplomové práce je analyzovat tento koncept z hlediska odvodu tepla z počítačové desky a na základě výpočtů rozhodnout, jestli je tento koncept schopný odvést teplo z počítačové desky Raspberry Pi, popřípadě jestli je vhodný i pro desku s vyšším výkonem. Na základě těchto simulací bude rozhodnuto, jestli další vývoj a optimalizace zařízení bude směřovat stejným směrem, či jestli bude vytvořen nový koncept, který bude dále rozvíjen.

Teoretická část práce je zaměřena na odvod tepla z počítačových desek. Jsou zde sepsány základy tepelného přenosu spolu s rozborem konstrukce pouzder čipů a plošných spojů. Tyto znalosti jsou následně využity v praktické části pro nastavení jednotlivých simulací a vytvoření nových variant.

Ve 3. kapitole této práce je popsáno dosavadní řešení ARAS (Advanced Rider-Assistance Systém) s rozborem jeho funkcí a senzorů.

Dále je vytvořena kalibrační simulace počítačové desky Raspberry Pi, pro zjištění okrajových podmínek odpovídajících co nejbližší realitě pro další simulace. Následně je vytvořena analýza původního konceptu z hlediska odvodu tepla.

V kapitole 5 jsou představeny nové varianty řešení spolu tepelnými výpočty, které určí směr vývoje finální varianty. Ta je spolu s porovnáním vůči původnímu konceptu rozepsána v poslední části práce.

# 1 Základy tepelného přenosu

Základem optimalizačního návrhu je porozumění přenosu tepla mezi komponenty. Obecně se způsoby přenosu tepla dělí na tři typy, vedení (kondukce), proudění (konvekce) a sálání (radiace). Přestože je k jednotlivým způsobům přenosu tepla přistupováno většinou samostatně, v realitě vystupují všechny způsoby společně. Tato kapitola stručně popíše jednotlivé typy přenosu tepla. Pro hlubší porozumění termodynamických dějů je potřeba zamířit do odborné literatury. Z české literatury například *Přenos tepla a látky* [4], z anglické *Cooling of Microelectronic and Nanoelectronic Equipment* [21] zaměřené přímo na chlazení elektroniky.

## 1.1 Vedení

Vedení je proces, při kterém prostupuje teplo látkou, případně prostupuje mezi dvěma látkami, které jsou v přímém kontaktu. V pevných látkách dochází k vedení tepla vibracemi krystalové mřížky, či pohybem volných elektronů v případě kovových pevných látek. Kapalně a plynné látky také vedou teplo pomocí konvekce, avšak v podstatně menší míře než pevné látky. To je zapříčiněno většími vzdálenostmi mezi jednotlivými molekulami. Základní zákon definující vedení tepla je tzv. Fourierův zákon, který říká: *”Velikost tepla přenášeného vedením je úměrná ploše kolmé na směr toku tepla a teplotnímu gradientu ve směru toku tepla.”* [4][5][6]

Což je možné popsat rovnicí:

$$\dot{Q}_x = -\lambda S \frac{dT}{dx}$$

Kde:  $\dot{Q}_x$  – tepelný tok ve směru x  
 $\lambda$  – tepelná vodivost  
 $S$  – plocha kolmá na směr tepelného toku  
 $T$  – teplota  
 $x$  – vzdálenost

Důležitou materiálovou vlastností při výpočtech je tepelný odpor. Tato veličina udává, jak materiál při dané tloušťce „odolává“ prostupu tepla. Pro homogenní materiály je tato veličina přímo úměrná tloušťce.

$$R = \frac{\Delta T}{q} = \frac{x}{\lambda S}$$

Kde:  $R$  – tepelný odpor  
 $\Delta T$  – změna teploty  
 $q$  – hustota tepelného toku  
 $x$  – vzdálenost  
 $\lambda$  – tepelná vodivost

Nárůst tepelného odporu ovlivňuje také kontakt dvou těles. Při kontaktu dvou těles nikdy nevznikne dokonalé přilnutí ploch k sobě, vždy zde vzniknou vzduchové kapsy, které zvyšují tepelný odpor soustavy. Na tepelný odpor kontaktu má vliv hned několik prvků. Těmi jsou rovinnost a drsnost povrchu, upínací tlak, tloušťka materiálu a jeho stlačitelnost. [4][5][6]

K výpočtu celkového tepelného odporu soustavy lze přistupovat analogicky jako k výpočtu elektrického odporu. Celkový tepelný odpor soustavy je dán jako suma dílčích odporů, přičemž:

Sériové řazené odpory jsou sčítány přímo:

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

U paralelních odporů je sčítána jejich převrácená hodnota:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

## 1.2 Konvekce

Konvekce, nebo také proudění je přenos tepla vznikající v tekutinách. Tento jev je možné rozdělit na samovolné proudění (přirozená konvekce) a nucené proudění.

**Přirozená konvekce** vzniká díky změně hustoty v závislosti na teplotě. Ohřátý plyn zvětšuje svůj objem (zmenšuje svou hustotu) a díky vztlakové síle stoupá vzhůru.

**Nucená konvekce** je uměle vytvořené proudění tekutiny vnějším zdrojem (například ventilátorem).

Tepelný tok je pak možné vyjádřit rovnicí:

$$\dot{Q} = \alpha S(T - T_f)$$

Kde:  $\dot{Q}$  – tepelný tok

$S$  – povrch tělesa

$\alpha$  – součinitel přestupu tepla

$T$  – teplota tělesa

$T_f$  – teplota proudící tekutiny

Aby mohla tekutina přenést teplo dál od tělesa, je nejprve potřeba, aby jej z tělesa odebrala. To je dosaženo výše popsanou kondukcí tepla (viz 1.1.) v bezprostřední blízkosti tělesa. Rychlost odvádění tepla konvekcí tedy nezáleží pouze na rychlosti proudění okolo tělesa, ale i schopnosti tekutiny teplo absorbovat. Poměr mezi přenosem tepla konvekcí a kondukcí představuje Nusseltovo číslo. [5]

### 1.3 Radiace

Radiace je mechanismus přenosu tepla pomocí elektromagnetických vln, při kterém přestup probíhá rychlostí světla. Zároveň může procházet i prostředím, které není schopno vedení tepla (vakuum).

Intenzita záření je popsána Stefan-Boltzmannovým zákonem, který je definován rovnicí:

$$I = \varepsilon\sigma T^4$$

Kde:

$I$  – celková intenzita záření

$\varepsilon$  – emisivita

$\sigma$  – Stefanova–Boltzmannova konstanta

$T$  – Teplota tělesa

Emisivita je vlastnost vyjadřující, jak dobře dokáže povrch materiálu vyzařovat teplo v podobě elektromagnetických vln. Emisivita se pohybuje v rozmezí 0 až 1, přičemž materiály s vysokou emisivitou vyzařují více tepla než materiály s nízkou emisivitou.

Těleso s nulovou emisivitou se nazývá „absolutně bílé“ a představuje „absolutní reflektor“-tedy těleso, které nevyzařuje žádné vlastní záření, a současně veškeré vnější záření odráží.

Druhým extrémem je „absolutně černé těleso“ s emisivitou rovno jedné, které žádné záření neodráží (100 % vnějšího záření je absorbováno). Veškeré záření od tohoto tělesa tedy pochází přímo z něho samotného.

Šedé těleso pak představuje jakékoliv reálné těleso s emisivitou  $0 < \varepsilon < 1$ .

Emisivita závisí na vlastnostech povrchu materiálu, jako je jeho struktura, barva, textura a chemické složení. Hladké, lesklé povrchy mají obvykle nízkou emisivitu, zatímco matné, hrubé a tmavé povrchy mají emisivitu vysokou. [4][5][6]

Pro často využívané materiály v oblasti elektroniky jsou orientační hodnoty emisivity vypsány v Tab. 1.

Tab. 1: Emisivita povrchů materiálů

Materiál	$\varepsilon$
hliníková slitina 6061 (po běžném obrábění)	0,4
leštěný hliník	0,04
zoxidovaný hliník	0,11
matná nerez ocel	0,21
leštěná nerez ocel	0,17
černá epoxidová barva	0,87
FR-4	0,85 - 0,95



## 2 Pouzdření čipů a odvod tepla

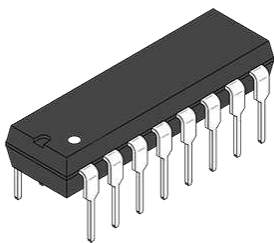
Čip je polovodičová součást, která v zařízení vykonává logické operace. Pro ochranu silikonových čipů a jednodušší montáž na desku plošných spojů (DPS) jsou čipy ukládány do pouzder. Postupem času s růstem výkonu čipů vzniklo mnoho různých typů pouzder, které se od sebe liší například tvarem, velikostí, materiálem, způsobem instalace na plošný spoj, počtem pinů aj.

Tato kapitola má za úkol čtenáře seznámit s běžnými typy pouzder a jejich strukturou. Podobně jako u přenosu tepla má tato kapitola pouze přiblížit problematiku, přičemž pro hlubší porozumění je potřeba zaměřit do odborné literatury.

### 2.1 Základní typy

Jak již bylo zmíněno, existuje mnoho různých typů pouzder čipů, přičemž každý z nich má své vlastní charakteristiky a využití. Na následujících řádcích je seznam těch nejběžnějších typů.

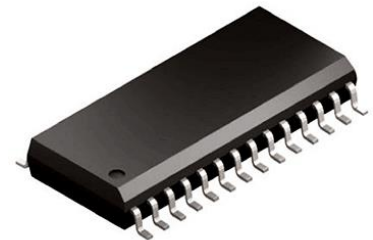
- **DIP** (Dual Inline Package) – pouzdro s dvojicí řad páskových vývodů
- **QFP** (Quad Flat Package) – pouzdro s páskovými vývody na každé straně
- **SOIC** (Small Outline Integrated Circuit) - menší verze pouzdra DIP s páskovými vývody určenými pro povrchovou montáž
- **PGA** (Pin Grid Array) – pouzdro s vertikálními kolíky (piny) rozmístěnými na spodní straně pouzdra
- **LGA** (Land Grid Array) – podobné jako PGA, ale s plochými kontakty namísto kolíků
- **BGA** (Ball Grid Array) – pouzdro pevně připájené k desce pomocí kulových vývodů



Obr. 1: DIP [10]



Obr. 2: QFP [10]



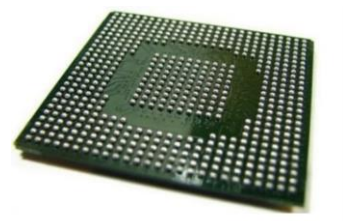
Obr. 3:SOIC [10]



Obr. 4: PGA [26]

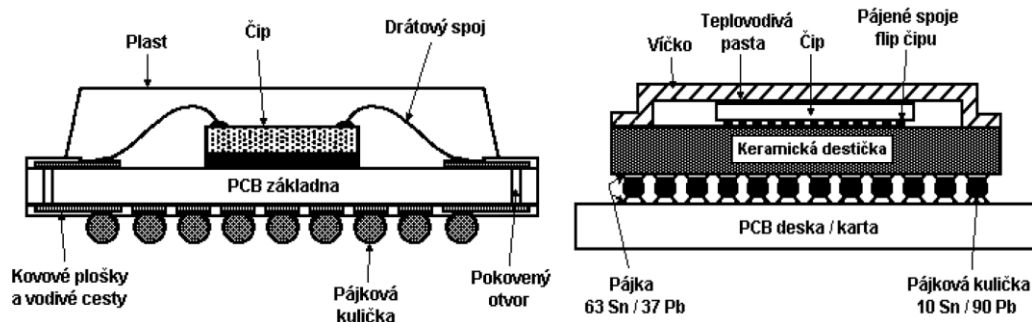


Obr. 5: LGA [27]



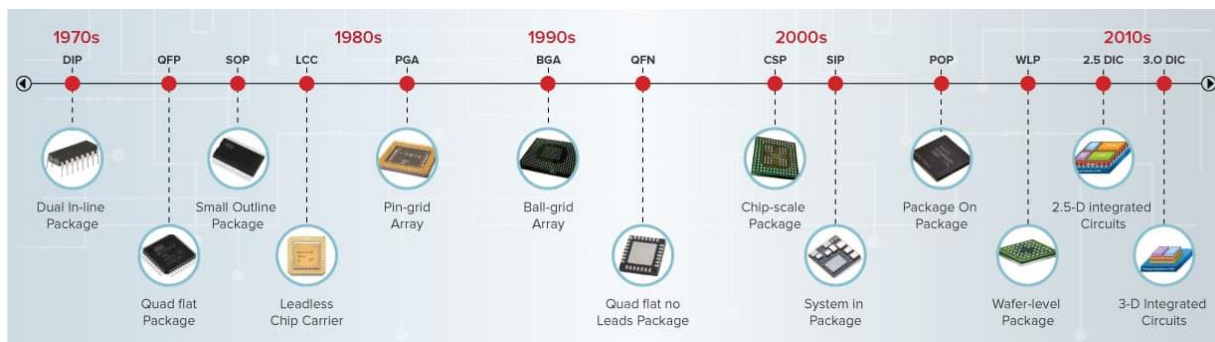
Obr. 6: BGA [28]

Jednotlivé druhy pouzření mohou mít ještě další své podkategorie. Například BGA pouzdro může být dále děleno na PBGA (Plastic Ball Grid Array), CBGA (Ceramic Ball Grid Array), TBGA (Tape Ball Grid Array), MBGA (Metal Ball Grid Array) aj. Navíc může být i samotný čip k pouzdru připojen různými technikami, např. kontaktovacím drátkem či jako flip chip. Existuje tedy velké množství různých druhů pouzření. Na Obr. 7 se pro znázornění různorodé struktury pouzder nachází 2 typy BGA pouzdra, a to PBGA a CBGA. [12][13]



Obr. 7: Struktura pouzdra PBGA (vlevo) a CBGA (vpravo) [13]

Na Obr. 8 je znázorněn vývoj pouzder na časové ose od roku 1970 do 2010.



Obr. 8: Vývoj pouzder [11]

## 2.2 Odvod tepla z čipu

S postupným vývojem čipů se zvyšuje jejich výpočetní výkon, avšak s tím přichází i zvýšené ztrátové teplo. Navíc s trendem zmenšování mikroprocesorů se tepelný výkon koncentruje do stále menší plochy. Toto popsal i Gordon Moore v Moorově zákoně, který popisuje, že počet tranzistorů v integrovaném obvodu při zachování stejné ceny se každý rok přibližně zdvojnásobuje. [8]

Při návrhu elektrických zařízení je kritické správně odvést odpadní teplo tvořené čipem. Jelikož existuje velké množství typů pouzření čipů, pro výpočet odvodu tepla z čipu je často využíván zjednodušený tepelný model pouzdra. Tento model zjednodušuje pouzdro na několik základních tepelných odporů, kterými jsou:

- Tepelný odpor čip - pouzdro ( $R_{JC}$  – Junction to case resistance)
- Tepelný odpor pouzdro – okolí ( $R_{CA}$  – Case to ambient resistance)
- Tepelný odpor čip - deska ( $R_{JB}$  – Junction to board resistance)

Přičemž  $R_{JC}$  a  $R_{CA}$  je možné sloučit do jednoho odporu:  $R_{JA}$  – Junction to ambient resistance.

Na Obr. 9 jsou jednotlivé odpory znázorněny graficky.

Při takovémto zjednodušení pak výrobci mikroprocesorů nemusí udávat materiálové vlastnosti a přesné rozměry všech komponent v pouzdře, ale pouze hodnoty tepelných odporů, které jsou dány rovnicí:

$$R_{xy} = \frac{T_x - T_y}{q}$$

Tedy například pro tepelný odpor mezi čipem a pouzdrem:

$$R_{JC} = \frac{T_j - T_c}{q_j}$$

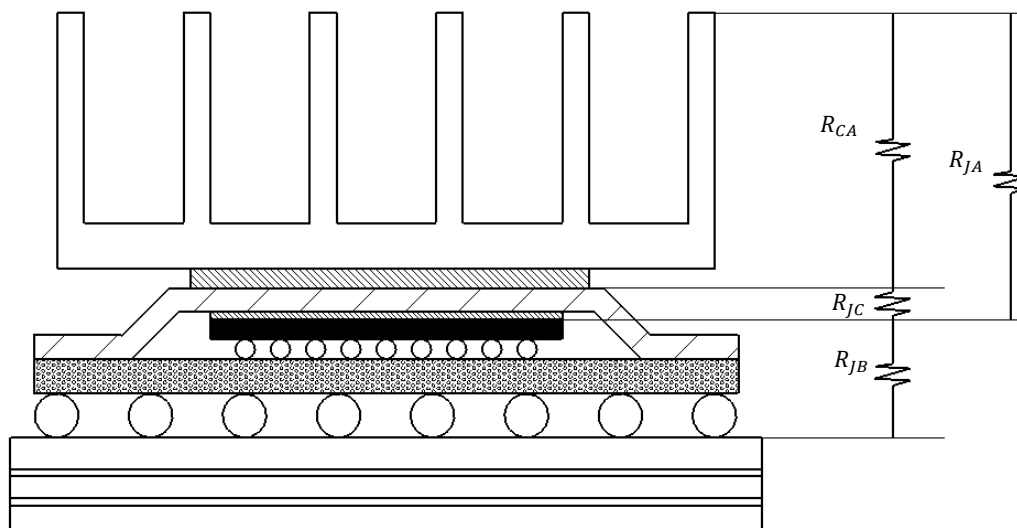
Kde  $T_j$  – teplota čipu (junction)

$T_c$  – teplota pouzdra (case)

$q_j$  – teplo přenášené z čipu do pouzdra

$R_{JC}$  – tepelný odpor mezi čipem a pouzdrem

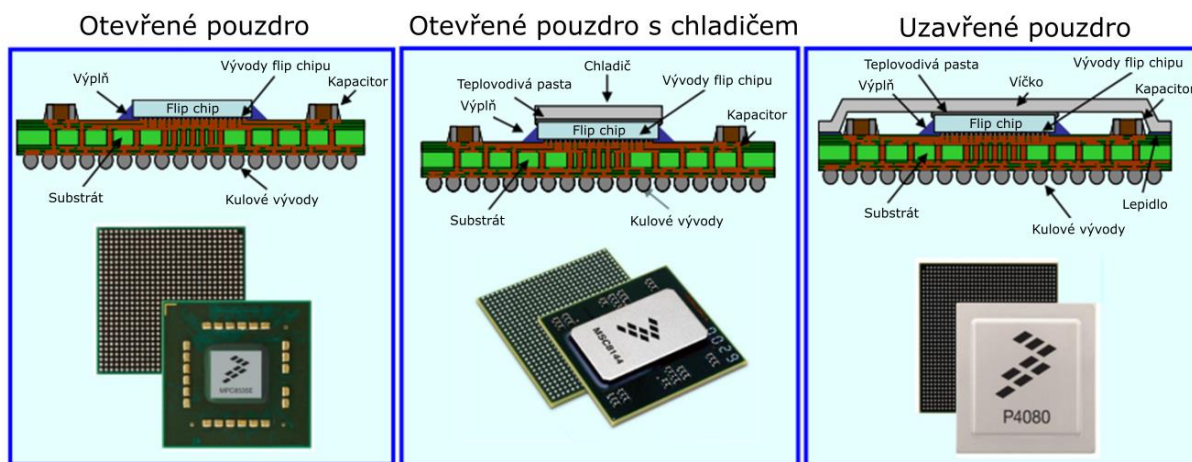
Přestože se jedná o velmi často využívanou metodu, stále je třeba počítat s tím, že se jedná o poměrně významné zjednodušení reálného modelu, čímž je do celého výpočtu vnesena nepřesnost. Ve většině běžných případů, kde není počítáno s velkými tepelnými výkony, je však tato metoda dostačující. [5][14]



Obr. 9: Struktura pouzdra s ohledem na tepelný odpor

Pro snížení celkového tepelného odporu je u některých druhů pouzder (jako například CBGA s flip-chipem) možné odstranit víčko a umožnit přímý kontakt externího chladiče s čipem. Při využití této metody je však třeba dbát na zvýšené riziko možnosti poškození čipu. Chladicí prvky je třeba upevnit tak, aby nepřenášely vibrace do pouzdra. Zároveň je třeba

dbát zvýšené ostráživosti na teplotní roztažnost materiálu, aby nedošlo k odlehnutí chladících prvků od čipu. Tato metoda tedy není vhodná pro všechny typy zařízení.



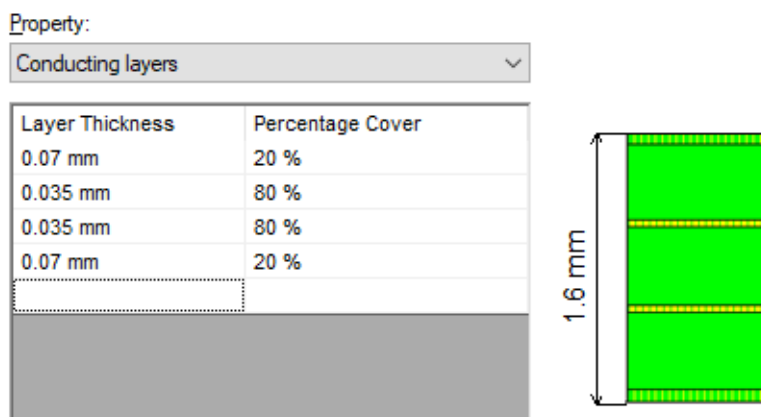
Obr. 10: Schéma BGA pouzdra s flip chipem

### 2.3 Desky plošných spojů

Běžné desky plošných spojů, jsou tvořeny ze střídajících se vrstev mědi a sklolaminátu (nejčastěji je využíván sklolaminát s označením FR-4). Jedná se tedy o kompozitní anizotropní strukturu, která má v různých směrech různou tepelnou vodivost.

V mnoha případech jsou DPS navrhovány přímo dle požadované specifikace při vývoji zařízení. V tom případě je známa přesná struktura desky, kterou je možné využít i pro přesný tepelný výpočet. Pokud však neexistuje přesný model, nebo výrobce desek neuvádí přesné vlastnosti desky, je třeba jednotlivé vrstvy laminátu odhadnout a následně experimentem validovat.

K vytvoření modelu DPS je možné využít funkci v programu SolidWorks, ve které je možné definovat materiál a počet jednotlivých vrstev.



Obr. 11: Definice DPS v programu SolidWorks

### 3 Původní koncept

Tato kapitola se zabývá shrnutím designu a funkce asistenčního zařízení ARAS (Advanced Rider-Assistance System), vyvíjeném na Západočeské univerzitě v Plzni.

ARAS je asistenční systém pro řidiče motocyklu, který má za úkol rozšířit řidičovy „smysly“ na základě dat přijímaných ze senzorů, a tím zlepšit bezpečnost účastníků provozu. Mezi hlavní schopnosti systému ARAS patří:

- Detekce dopravních značek
- Detekce osob a zvířat
- Detekce vozidel
- Měření rychlosti motocyklu
- Vyhodnocení vzdálenosti mezi motocyklem a vozidlem jedoucím před ním
- Zjištění překážky a vyhodnocení vzdálenosti mezi ní a motocyklem
- Komunikace s externím zobrazovacím zařízením

Jednotka je koncipována tak, aby mohla fungovat nezávisle na motocyklu. Veškeré senzory jsou tedy umístěny v samotné jednotce, která má současně i vlastní zdroj energie.

#### 3.1 Senzory a hardware

Jednotlivé funkce asistenta zajišťují senzory. Pro projekt ARAS systému byl vybrán dostupný a cenově nenáročný hardware. V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé senzory, které jsou použity v původním koncepčním řešení.

**Kamera** – zajišťuje zachycení obrazu, který je dále zpracován počítačovou deskou. Díky algoritmu strojového učení může sensorická jednotka rozeznávat jednotlivé objekty (vozidla, chodce, značky, atd...) a podle toho správně reagovat.



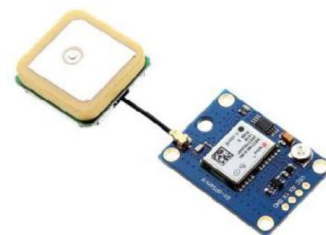
Obr. 12: Kamera Waveshare RPi [23]

**Laserový dálkoměr** – tento senzor snímá vzdálenost objektů před vozidlem. Ve spolupráci s kamerou je možné vyhodnotit případné nebezpečí kolize. Zároveň na základě údajů o rychlosti je možné vyhodnotit zachování bezpečné vzdálenosti od vozidla jedoucím před motocyklem.



Obr. 13: Laserový dálkoměr TeraRanger Evo [24]

**GPS senzor** zajišťuje nezávislé měření rychlosti motocyklu, která je důležitá pro výpočet brzdné dráhy vozidla.



Obr. 14: GPS senzor [7]

**Inerciální senzor** zajišťuje nezávislé měření rychlosti motocyklu v místech, kde není dostatečný GPS signál.



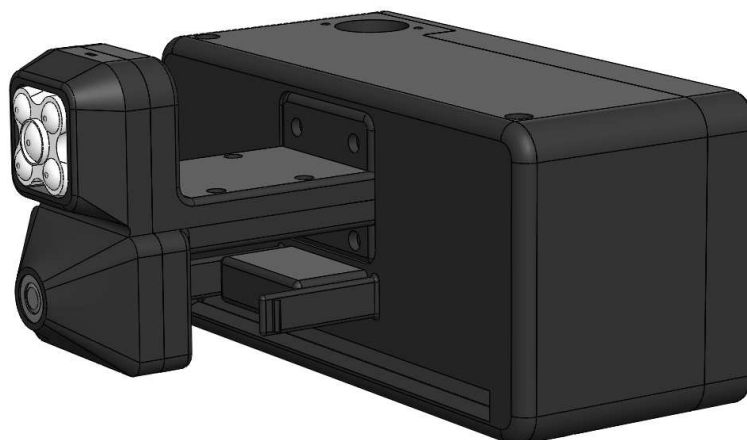
Obr. 15: Inerciální senzor [7]

Data ze senzorů jsou zpracována **počítačovou deskou**, která zajišťuje výpočetní výkon pro jejich vyhodnocení. V původním konceptu je využita deska Raspberry Pi 3B+.

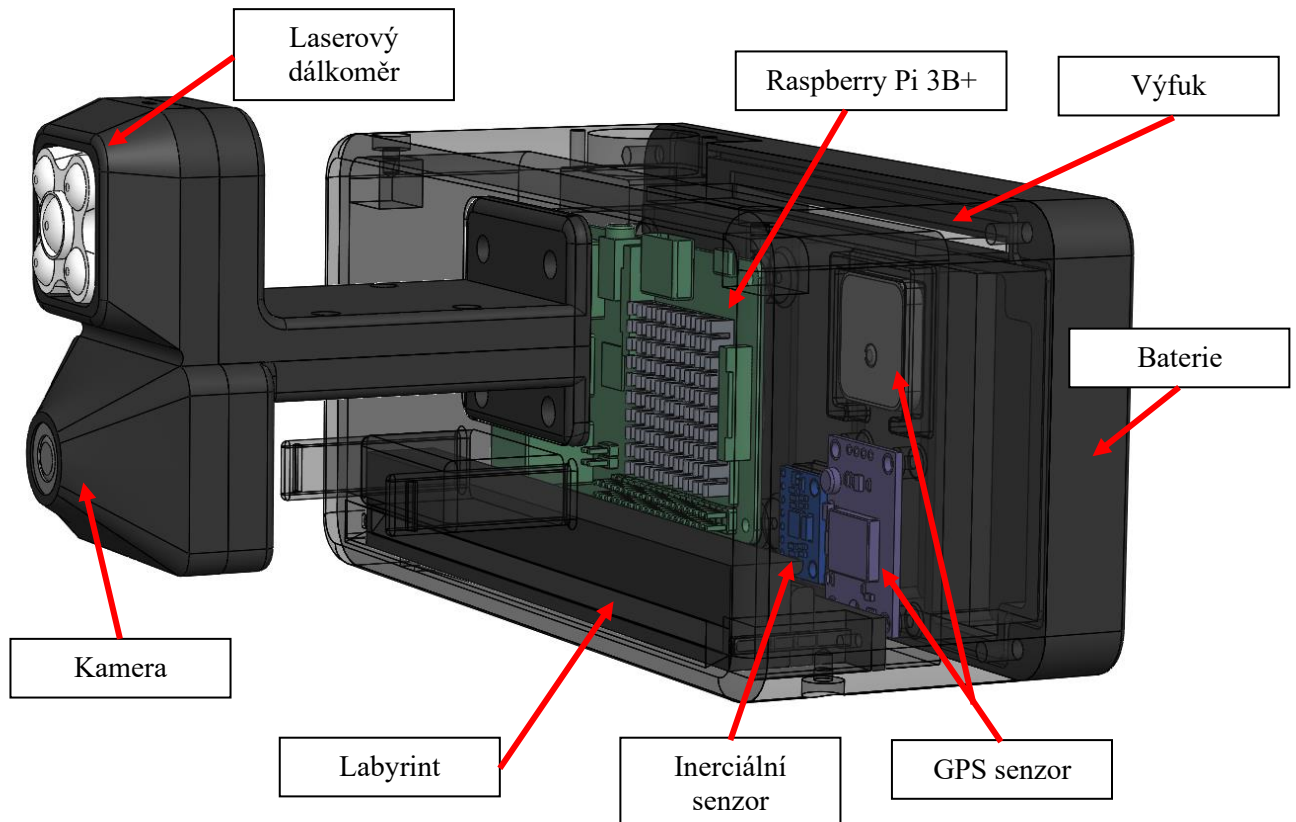


Obr. 16: Raspberry Pi 3 Model B+ [25]

Samotná senzorická jednotka je rozdělena na 3 hlavní části. První část, ve které je umístěna kamera spolu s laserovým dálkoměrem, je umístěna vpředu zařízení. Počítačová deska je spolu se zbytkem senzorů umístěna v boxu, do kterého může přes labyrint proudit vzduch pro chlazení jednotlivých komponent. Ohřátý vzduch je ze zařízení odváděn výfukovým otvorem v zadní části zařízení, kde je také usazena power banka. Detail zařízení se nachází na Obr. 18.

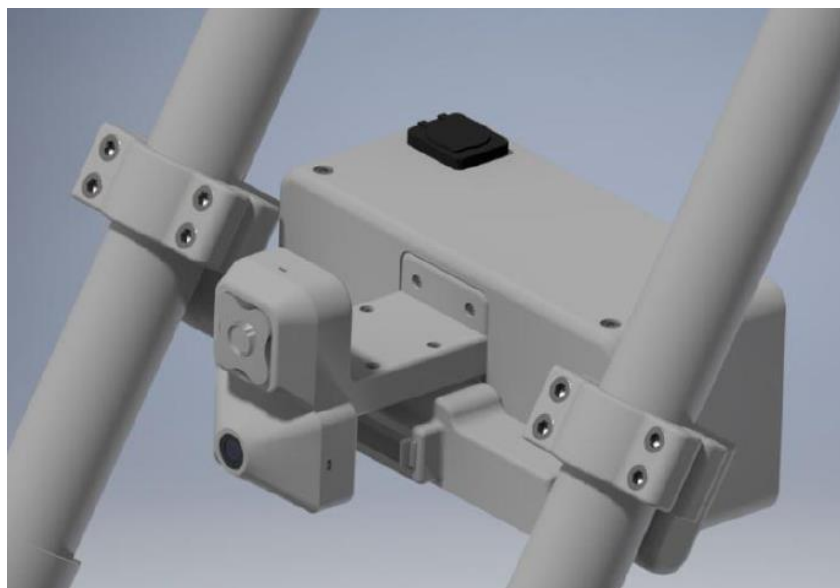


Obr. 17: koncept ARAS



Obr. 18: Popis ARAS systému

Pro upevnění senzorické jednotky k motocyklu je využit držák s tvarovými elementy, do kterých je zařízení uloženo. Tento držák je upevněn přímo na vidlici motocyklu s využitím svěrných spojů.



Obr. 19: ARAS umístěný na vidlici motocyklu [7]

## 4 Analýza konceptu

Jedním z hlavních úkolů práce je analyzovat odvod tepla z počítačové desky umístěné v konceptu ARAS systému. K tomu je využit program SolidWorks s nástavbou Flow Simulation, která nabízí mnoho funkcí přímo pro simulaci odvodu tepla z elektroniky. Aby bylo možné vytvořit simulaci, je však třeba nejdříve znát několik parametrů desky, jako třeba tepelný výkon komponentů či jejich tepelný odpor. Jelikož ne všechny parametry je možné zjistit z katalogových listů, je potřeba vytvořit experimentální měření, díky kterému je možné tyto parametry stanovit.

### 4.1 Experimentální kontrola matematického modelu

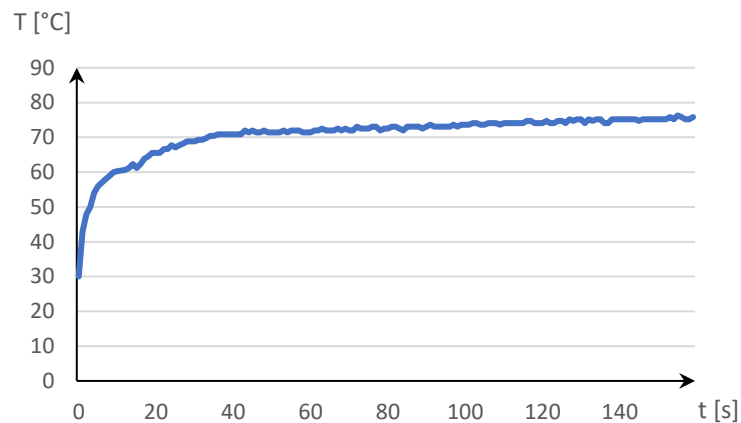
Pro ověření správnosti matematického modelu pro tepelnou analýzu byl vytvořen experiment, ve kterém byla deska Raspberry Pi 3B+ zatěžována pomocí benchmarku, přičemž hlavním cílem bylo zjistit rychlost ohřívání jednotlivých komponent při volné konvekci bez chladiče. V průběhu experimentu bylo vytvořeno několik snímků s pomocí termokamery pro zjištění tepelného pole na desce a určení komponent s nejvyšší tepelnou zátěží.



Obr. 20: Snímek z termokamery v průběhu experimentu

Přestože je největší koncentrace tepla okolo procesoru (Broadcom BCM2837), na snímku má procesor barvu odpovídající teplotě okolo 30°C. To je způsobeno odlišnou emisivitou víčka procesoru oproti desce. Teploty procesoru byly odečítány softwarově přímo z teploměru v pouzdře, podle kterého se orientuje i dynamické škálování frekvence, tedy upravení výkonu čipu pro zamezení jeho přehřátí. Naměřené hodnoty teploty čipu byly zaneseny do grafu (Graf 1) v závislosti na čase.





Graf 1: Závislost teploty čipu BCM2837 na čase z průběhu experimentu

Dle snímku na Obr. 20 je největší koncentrace tepla okolo procesoru (Broadcom BCM2837), integrovaného obvodu řízení napájení (PMIC – power management integrated circuit – MxL7704) a ovládacího čipu USB (LAN7515). Z toho důvodu bylo při validační simulaci počítačové desky počítáno s těmito čipy jako se zdroji tepla. Pro zjištění důležitých parametrů pro výpočet byly vyhledány katalogové listy jednotlivých pouzder, ze kterých byly parametry vypsány.

MxL7704 [16]

- Provozní rozsah teplot:  $-40\text{ °C} \leq T_J \leq 125\text{ °C}$
- Tepelný odpor čip-okolí  $\theta_{JA} = 27\text{ °C/W}$
- Tento čip by měl být schopný, dle katalogového listu, správně pracovat i bez nucené konvekce



Obr. 21: MxL7704

LAN7515 [17]

- Tepelný odpor čip-okolí  $\theta_{JA} = 24.4\text{ °C/W}$
- Tepelný odpor čip-pouzdro  $\theta_{JC} = 0.1\text{ °C/W}$
- Provozní teplota: od  $-40\text{ °C}$  do  $+85\text{ °C}$



Obr. 22: LAN7515

## Broadcom BCM2837

Výrobce tohoto procesoru neuvádí mechanické ani tepelné vlastnosti v katalogovém listu. Z toho důvodu byly hodnoty v simulaci odhadnuty a na základě experimentu upravovány, dokud se s experimentem neshodovaly.

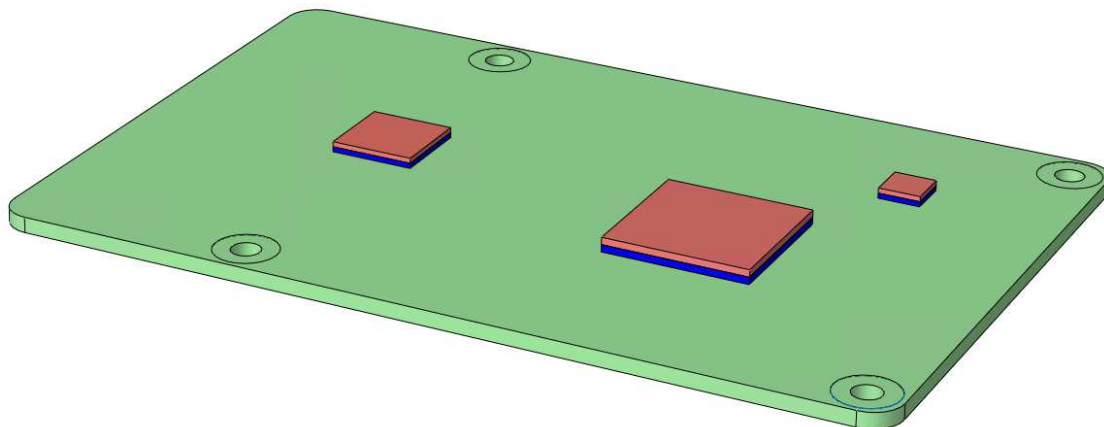


Obr. 23: Broadcom BCM2837

### 4.1.1 Simulace počítačové desky

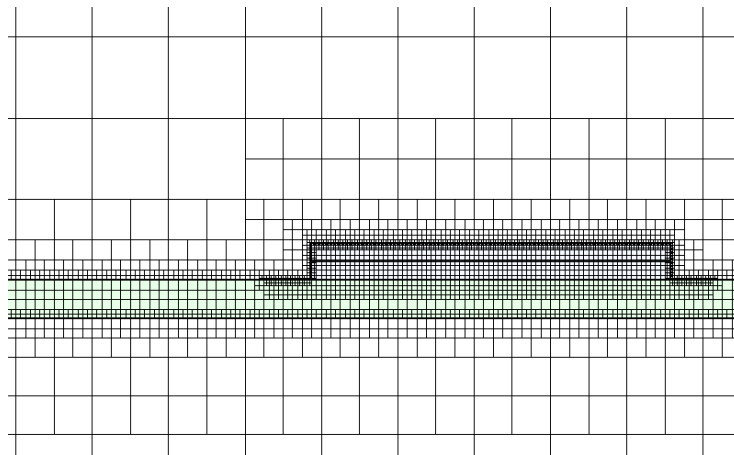
V programu *SolidWorks* s doplňkovým modulem *Flow Simulation* byla vytvořena transientní úloha pro kalibraci matematického modelu desky Raspberry Pi 3B+. V té byly postupně upravovány jednotlivé vlastnosti pouzder nezadané výrobcem tak, aby simulace odpovídala reálným naměřeným hodnotám z experimentu.

Pro účely simulace byla vytvořena jednoduchá deska s pouzdry s odpovídajícími rozměry. Pouzdra jsou tvořena ze dvou na sebe doléhajících objemů pro simulování „Two-resistor component“



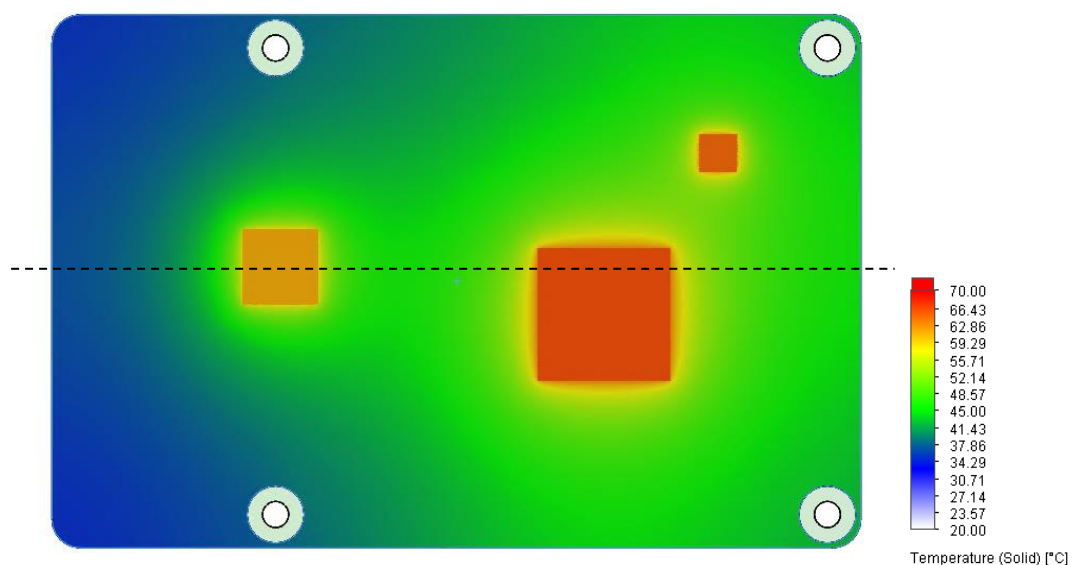
Obr. 24: Zjednodušená deska Raspberry P 3B+

V okolí pouzder byla zjemněna síť pro zlepšení přesnosti výpočtu (Obr. 25). Simulace byla nastavena jako úloha s volnou konvekcí (nebylo zde vytvořené žádné nucené proudění a současně byla uvažována gravitace).

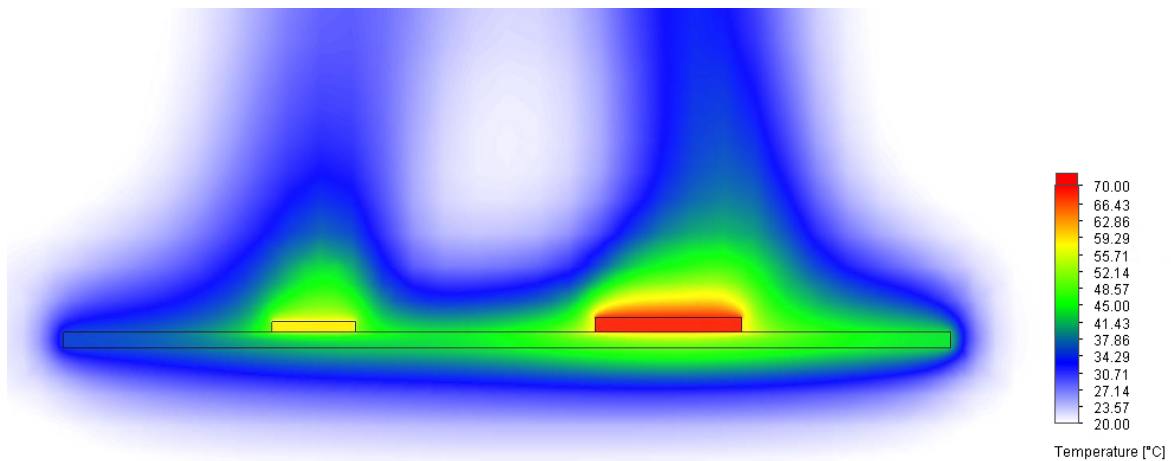


Obr. 25: Zjemnění sítě v oblasti pouzder

Na Obr. 26 je znázorněné teplotní pole na desce, které dostatečně odpovídá snímkům z termokamery (viz Obr. 20). Řez v místě čárkované čáry je zobrazen na následujícím Obr. 27 pro znázornění teplotního pole tekutiny (vzduchu).

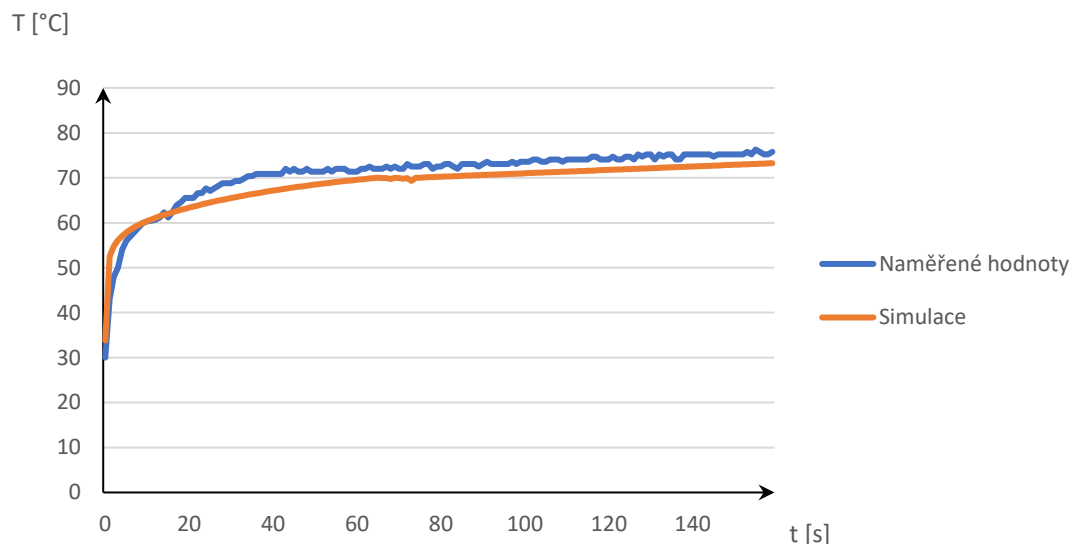


Obr. 26: Teplotní pole desky Raspberry Pi 3B+



Obr. 27: Teplotní pole tekutiny v místě řezu na Obr. 26

Výsledné hodnoty teplot čipu byly zaznamenávány do grafu (Graf 2) kde jsou porovnány s naměřenými hodnotami.



Graf 2: Porovnání naměřených hodnot s vypočtenými hodnotami simulací

Ve finální simulaci vychází hodnoty teploty čipu přibližně o 2 stupně menší, což je pro uvažovanou aplikaci dostatečně malá odchylka.

Pro další simulace využívající počítačovou desku Raspberry Pi 3B+ budou tedy využity tyto výsledné hodnoty:

**Broadcom BCM2837**

Velikost pouzdra 14x14 mm

Tepelný odpor čip-pouzdro: 0,22 K/W

Tepelný odpor čip-deska: 3,15 K/W

Tepelný výkon: 2,5 W

### MxL7704

Velikost pouzdra 5x5 mm  
Tepelný odpor čip-pouzdro: 0,13 K/W  
Tepelný odpor čip-deska: 1,3 K/W  
Tepelný výkon: 0,5 W

### LAN7515

Velikost pouzdra 9x9 mm  
Tepelný odpor čip-pouzdro: 0,1 K/W  
Tepelný odpor čip-deska: 1 K/W  
Tepelný výkon: 1,3 W

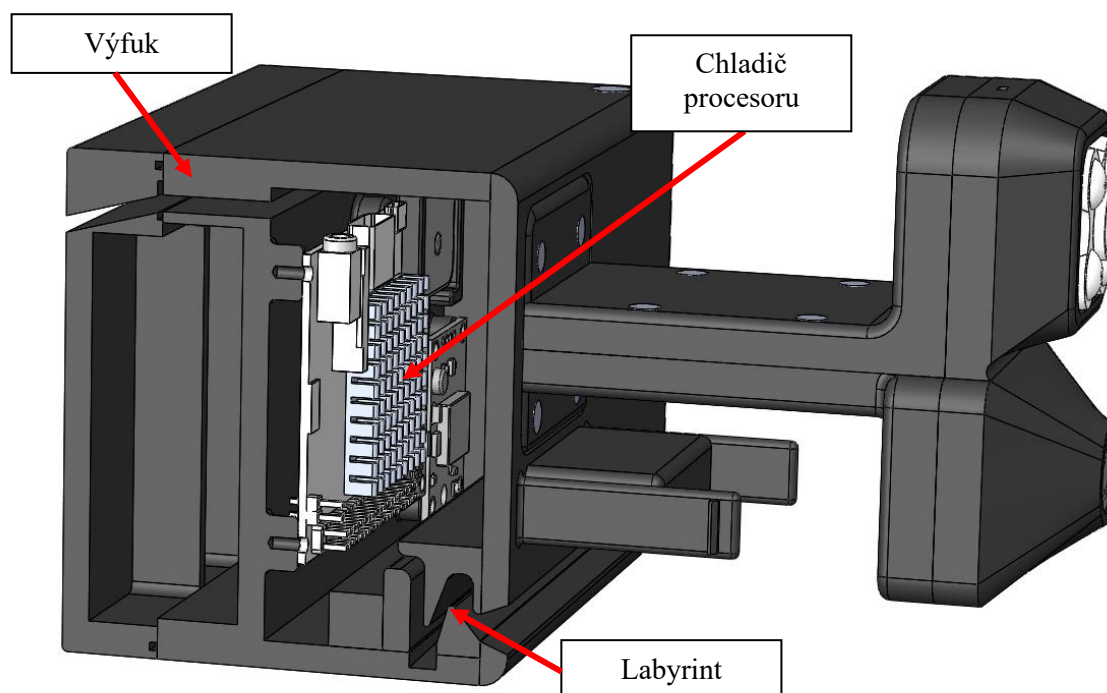
## 4.2 Tepelná simulace

Na základě dat z předchozí kapitoly byla vytvořena parametrická simulace původního konceptu pro zjištění maximálního možného výkonu desky, který dokáže být v zařízení provozován bez rizika tepelného poškození. Byly vybrány 4 zatěžovací stavy procesoru pro 3 různé proudění vzduchu okolo zařízení, tedy celkem 12 situací simulujících jízdu na motocyklu.

Tab. 2: Okrajové podmínky pro simulaci konceptu

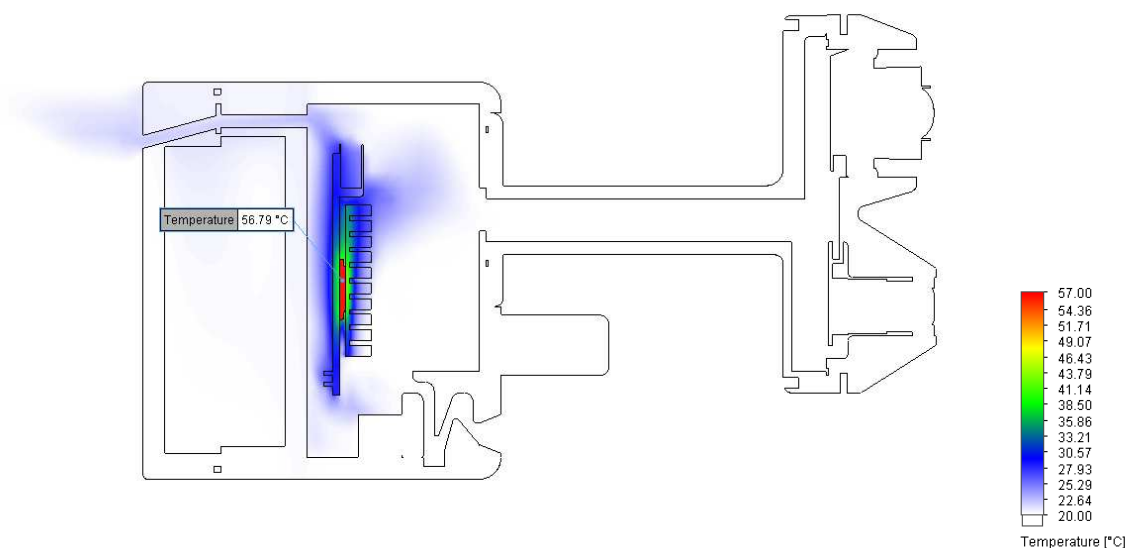
Tepelný výkon čipu [W]	2,5	7	20	40
Rychlost okolního proudění [m/s]	5	14	20	

Koncept chlazení původního zařízení předpokládá, že proudící vzduch okolo zařízení při jízdě motocyklu vstoupí přes labyrint do zařízení, prostoupí žebry chladiče (čímž odebere teplo ze soustavy) a ohřátý vzduch opustí zařízení výfukem ven.



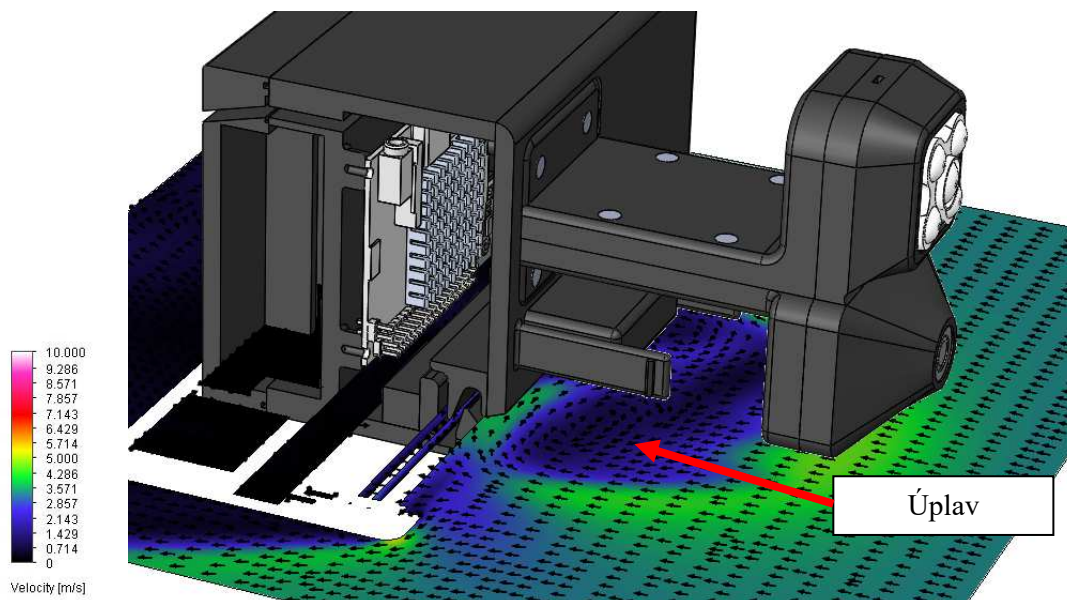
Obr. 28: Popis chlazení ARAS

Tento koncept je částečně potvrzen simulací. Na Obr. 29 je možné si všimnout slabého proudu teplého vzduchu (modře) vstupujícího do výfuku.

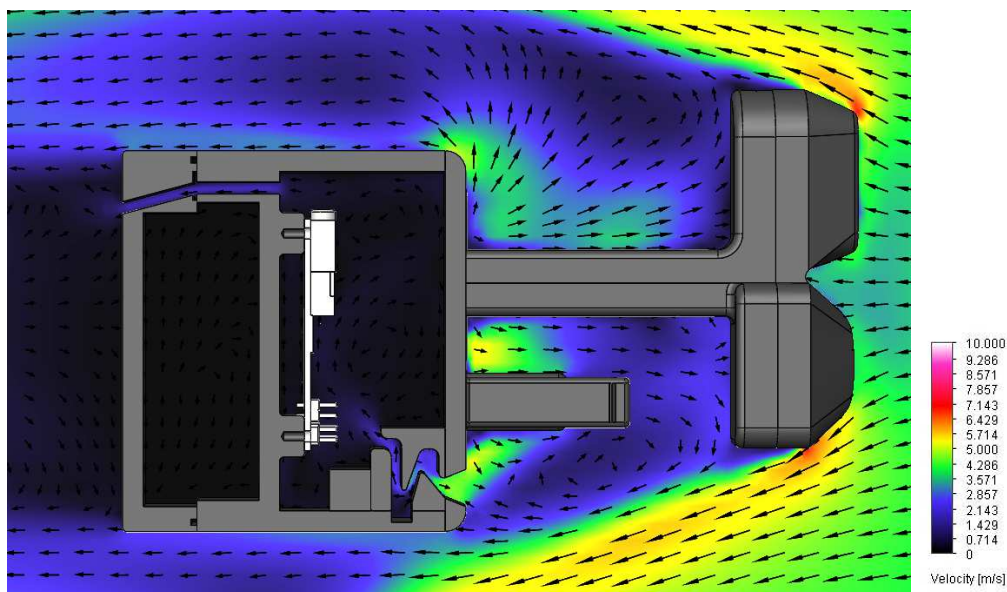


Obr. 29: Teplotní pole v oblasti procesoru při 2,5 W a 14 m/s

Malý průtok vzduchu labyrintem (a tedy i chladičem) je způsoben odkloněním proudu vzduchu držákem kamery a dálkoměru. Před labyrintem se vytváří úplav, který spolu s poměrně vysokým odporem vzduchu labyrintu zabraňuje vstupu většiny vzduchu do zařízení. Tento stav je zobrazen ve dvou řezech na Obr. 30 a Obr. 31.



Obr. 30: Proudění vzduchu kolem labyrintu



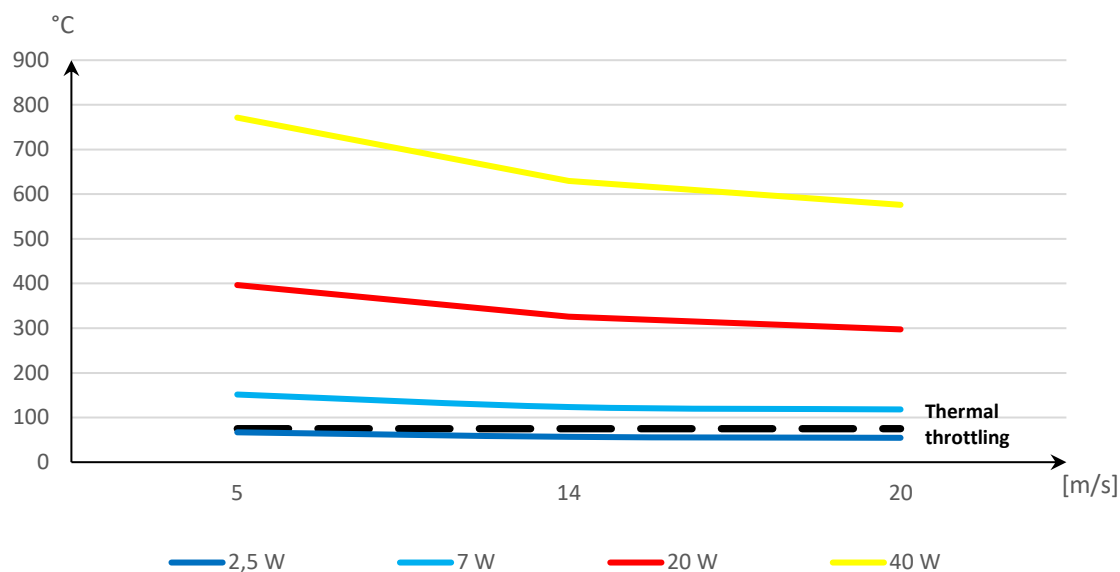
Obr. 31: Proudění vzduchu napříč zařízením

V následující tabulce jsou vypočtené hodnoty teploty čipu pro jednotlivé konfigurace. Jedná se o teoretické hodnoty, které počítají s konstantním tepelným výkonem čipu bez dynamického škálování frekvence (thermal throttling). Je zde tedy počítáno s tím, že čip pracuje na maximální výkon po celou dobu. Dle výpočtů je tento koncept vhodný pro procesory vydávající do cca 3W tepla. Vypočtené hodnoty pro 20 W a 40 W nevyšly reálné, jelikož při takovýchto teplotách by došlo k roztavení částí obvodu. Pro přehlednost byly jednotlivé hodnoty zaneseny do grafu (Graf 3), kde je také znázorněna hodnota dynamického škálování frekvence (thermal throttling).

Tab. 3: Vypočtené hodnoty v jednotlivých zátěžových stavech

	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3	Design Point 4	Design Point 5	Design Point 6
Teplo čipu [W]	2,5	2,5	2,5	7	7	7
Rychlost okolního proudění [m/s]	14	20	5	14	20	5
Teplota čipu (Junction) [°C]	57,06	54,85	66,68	123,49	116,64	151,39

	Design Point 7	Design Point 8	Design Point 9	Design Point 10	Design Point 11	Design Point 12
Teplo čipu [W]	20	20	20	40	40	40
Rychlost okolního proudění [m/s]	14	20	5	14	20	5
Teplota čipu (Junction) [°C]	318,02	295,35	397,95	621,81	574,47	774,71



Graf 3: Vypočtená závislost teploty čipu na rychlosti jízdy motocyklu pro jednotlivé výkony čipu

### 4.3 Vyhodnocení

Simulace částečně potvrdila funkčnost konceptu chlazení počítačové desky nucenou konvekcí přes labyrint. Pro počítačové moduly s nízkým výpočetním výkonem (jako je Raspberry Pi 3B+) je toto chlazení dostatečné i při pomalejším pohybu motocyklu. Pro případnou výkonnější variantu počítačové desky je tento koncept nevhodný. Nižší účinnost chlazení je dána úplavem tvořícím se u vstupu do labyrintu. Ten je způsoben vpředu umístěnými senzory, které rozráží proud vzduchu mimo labyrint.

### 4.4 Specifikace pro zlepšení

Při vytváření nové verze zařízení je potřeba se zaměřit na několik základních vlastností, které souvisejí s vývojem všech elektronických zařízení. Hlavní z nich jsou sepsány v této kapitole.

#### 4.4.1 Odvod tepla

Nová verze ARAS systému by měla být schopna lépe odvést teplo z počítačové desky a připravit tak podklad pro budoucí zvýšení výpočetního výkonu. Toho je možné dosáhnout zvolením správné metody chlazení. Z vytvořené analýzy konceptu lze vyvodit, že přímé chlazení elektroniky proudem vzduchu uvnitř zařízení není příliš vhodné, a to hned z několika důvodů. Prvním je nízká účinnost chlazení, která je dána malým průtokem vzduchu zařízením. Tu je samozřejmě možné zvýšit vhodnou optimalizací proudění. Současně je však potřeba řešit problém možnosti vniknutí kapek a nečistot do zařízení. To je možné eliminovat labyrintem (jako je to v případě koncepčního řešení) který však dále snižuje účinnost chlazení.

Vhodnější alternativou je celé zařízení uzavřít a odvést přebytečné teplo k jeho povrchu, kde je odebíráno obtékajícím proudem vzduchu kolem zařízení. Tímto je zamezen vnik částic dovnitř zařízení a zároveň docíleno většího proudění vzduchu kolem chladiče.



#### **4.4.2 Rozměry zařízení**

Zařízení ARAS by mělo být (dle konceptu) umístěno v předu motocyklu na jeho vidlici. Z toho důvodu je třeba dbát při návrhu na jeho velikost a vytvořit co možná nejkompaktnější zařízení, které nebude překážet dalším součástem motocyklu. Současně je však potřeba vytvořit dostatečný prostor kolem senzorů a jiných komponent pro snadnou montáž. V neposlední řadě je třeba počítat s prostorem pro vodiče s konektory.

#### **4.4.3 Použitý materiál a vyrobitelnost**

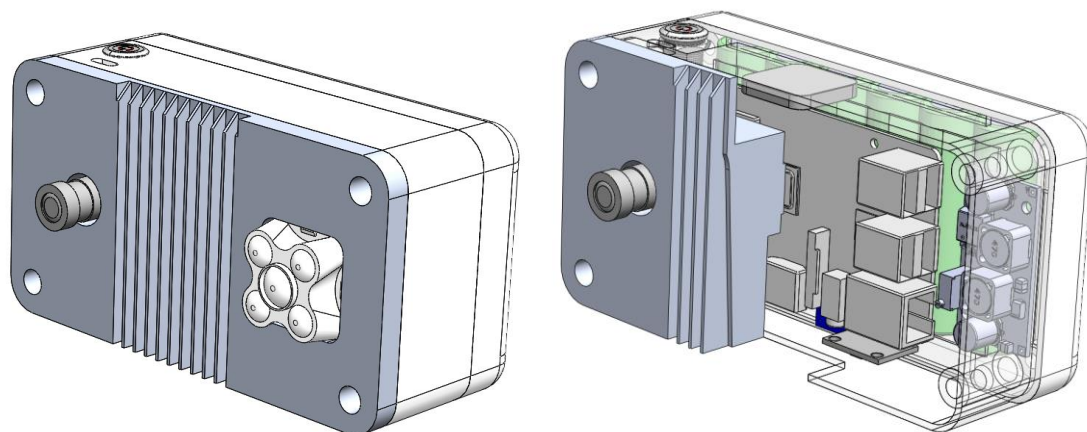
Výhodou původního konceptu je, že je možné jeho celou schránku vyrobit s pomocí 3D tisku. Jedná se tedy o poměrně cenově dostupné zařízení. Nová varianta by měla být z větší části vyráběna stejnou metodou. Rozdíl nastává pouze u chladiče, který musí být tvořen z tepelně vodivého materiálu. Vhodnou volbou jsou zde slitiny hliníku, které mají vysokou tepelnou vodivost, nízkou hmotnost při často dobré odolnosti vůči korozi. Pro návrh chladiče je vybrána řada 6xxx, ze které se běžně chladiče vyrábějí.

## 5 Návrh variant

Tato kapitola se zabývá představením nově vytvořených variant, podle kterých je následně určen další směr vývoje zařízení. Jednotlivé varianty byly vytvořeny zejména pro znázornění, jak se úprava konstrukčních prvků projeví v tepelných simulacích.

### 5.1 Koncept s předním chladičem

První varianta využívá pro odvod přebytečného tepla chladič, který zároveň slouží i jako víko celého zařízení. Na vnitřní stranu chladiče je přímo upevněna počítačová deska, díky čemuž je zajištěn pevný kontakt mezi pouzdrem procesoru a chladičem. V zadní části zařízení se nachází samostatný plastový box s bateriemi



Obr. 32: Koncept s předním chladičem

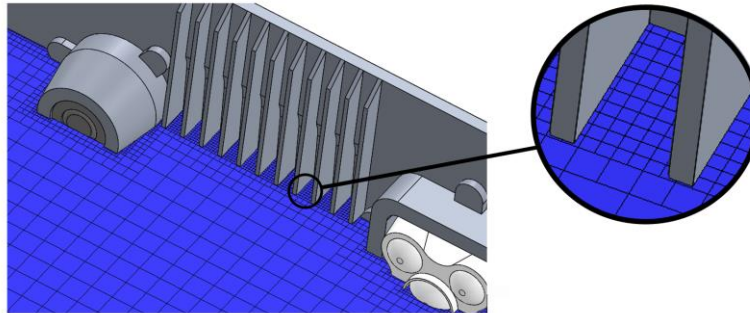
#### 5.1.1 Tepelná analýza první varianty

Pro tepelnou simulaci první varianty byly zvoleny stejné zatěžovací stavy jako pro původní koncept. K nim však přibyla ještě jedna varianta s velmi nízkou rychlostí obtékání vzduchu (0,1 m/s) simulující stojící motocykl. Vzniklo tedy celkem 16 různých kombinací simulující různé výkony procesoru a rychlosti motocyklu, které by měly ukázat veškeré limity varianty.

Tab. 4: Okrajové podmínky pro simulaci první varianty

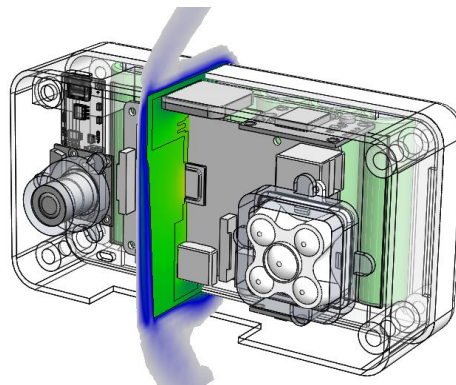
Tepelný výkon čipu [W]	2,5	7	20	40
Rychlost okolního proudění [m/s]	0,1	5	14	20

Pro zajištění dostatečné jemnosti sítě, a tudíž přesnosti výpočtu byla síť nastavena tak, aby mezi žebry chladiče bylo minimálně 5 elementů. Tento počet elementů je empiricky využívaná hodnota pro členité geometrie. Jako zdroj tepla byla využita stejná počítačová deska, která byla verifikována v kapitole 4.1 a použita i v analýze původního konceptu.

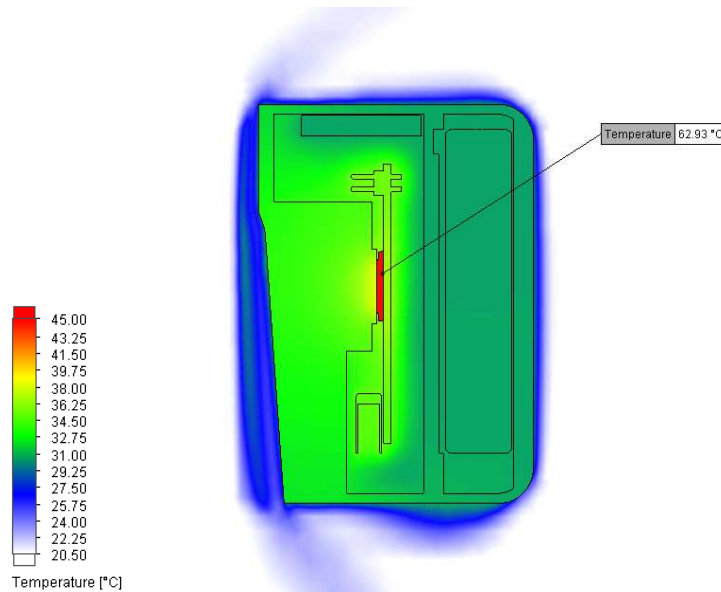


Obr. 33: Zasítování žebér chladiče

Tepelné pole v místě procesoru je znázorněno na Obr. 34 a Obr. 35. Výsledné hodnoty teploty čipu jsou uvedeny v Tab. 5 na následující straně.



Obr. 34: Umístění řezu teplotního pole simulace první varianty

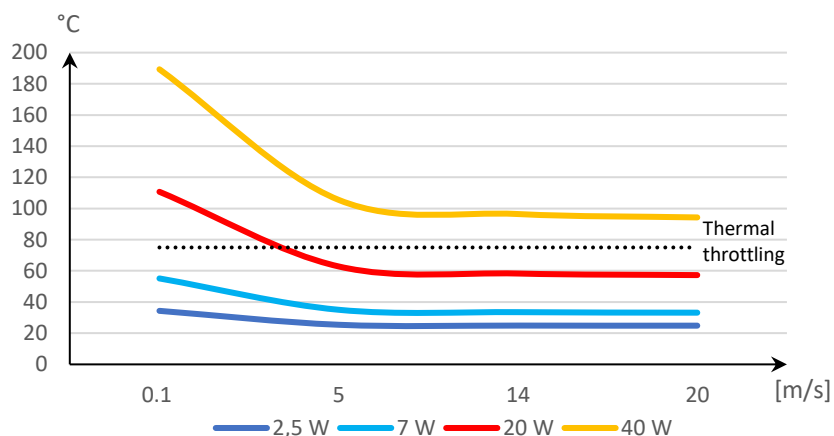


Obr. 35: Teplotní pole první varianty při teplotním výkonu čipu 20 W a rychlosti motocyklu 5 m/s

**Tab. 5: Vypočtené hodnoty teploty čipu první varianty (hodnoty ve [°C])**

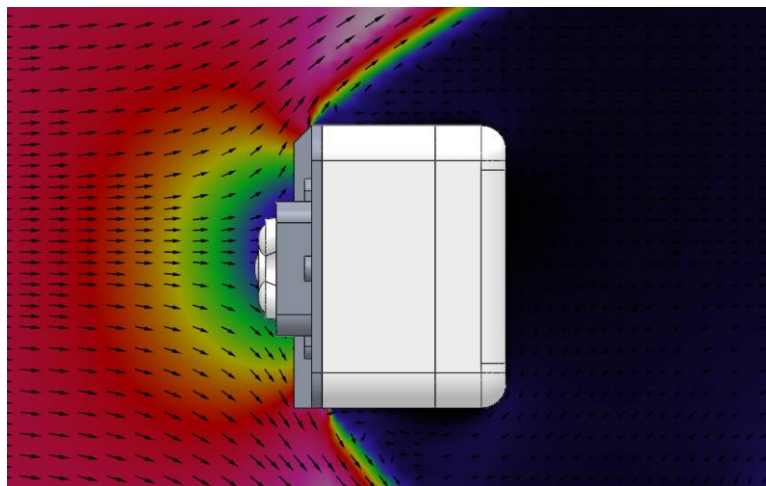
Tepelný výkon čipu [W]	Rychlost okolního proudění [m/s]			
	0,1	5	14	20
2,5	34,3	25,4	24,9	24,8
7	55,1	35,0	33,5	33,2
20	110,7	62,9	58,3	57,3
40	189,3	105,5	96,4	94,3

Hodnoty byly zaneseny do grafu (Graf 4), kde je také vyznačena hodnota thermal throttling podobně jako u výpočtu původního konceptu.



**Graf 4: Závislost teploty čipu na rychlosti motocyklu pro jednotlivé výkony čipu první varianty**

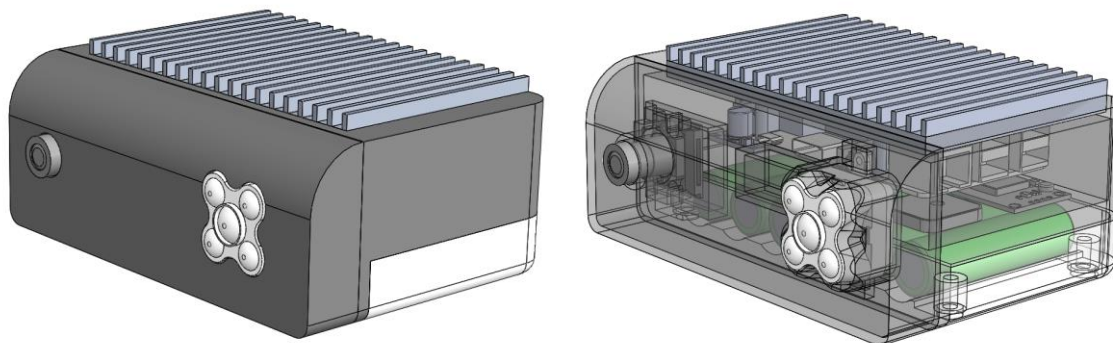
Na Obr. 36 je znázorněno rychlostní pole obtékajícího vzduchu kolem sestavy první varianty. Dle výpočtu uprostřed zařízení vzniká nárůst statického tlaku snížení rychlosti vzduchu, což má za následek snížení efektivity odvodu tepla z chladiče. I přes tuto skutečnost je dle výsledků teplo odváděno výrazně efektivněji než v původním konceptu, kde se maximální tepelný výkon pohyboval okolo 2,5 W. V nové variantě je možné stabilně využít procesor s tepelným výkonem až 20 W.



**Obr. 36: Rychlostní pole vzduchu obtékající kolem první varianty**

## 5.2 Varianta s horním chladičem

Druhá varianta uvažuje chladič v horní části zařízení s žebry orientovaným po směru jízdy. Samotný plastový box je podobný jako u první varianty, avšak je navýšen o další mezikus, ve kterém je umístěna kamera s laserovým dálkoměrem. Počítačová deska je, stejně jako v prvním případě, přímo upevněna na chladič.

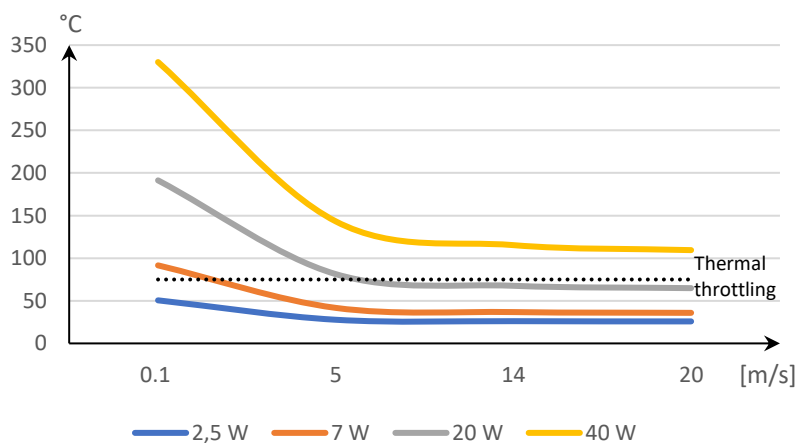


Obr. 37: Koncept s horním chlazením

Simulace druhé varianty proběhla za stejných podmínek jako v případě první varianty. Bylo tedy vytvořeno 16 různých kombinací počátečních podmínek pro různé tepelné výkony čipu a rychlosti motocyklu (viz Tab. 4). Výsledky výpočtu se nachází v Tab. 6, přičemž graficky jsou znázorněny v Graf 5.

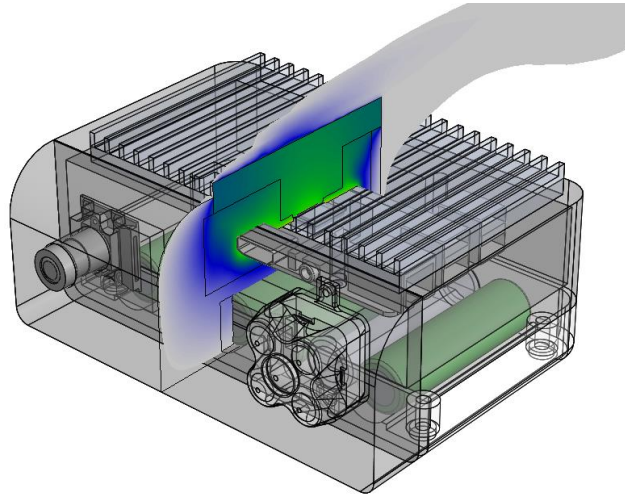
Tab. 6: Vypočtené hodnoty teploty čipu druhé varianty (hodnoty ve [°C])

Tepelný výkon čipu [W]	Rychlost okolního proudění [m/s]			
	0,1	5	14	20
2,5	50,5	27,7	26,1	25,8
7	91,6	41,7	36,8	35,9
20	191,3	81,3	67,8	64,8
40	330,1	143,2	115,3	109,4

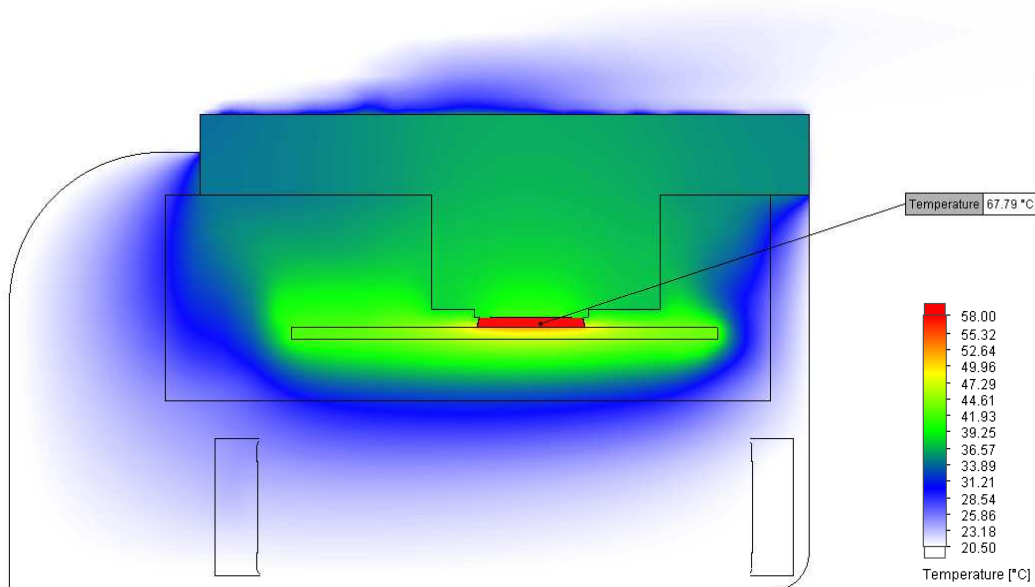


Graf 5: Závislost teploty čipu na rychlosti motocyklu pro jednotlivé výkony čipu druhé varianty

S vytvořením této varianty bylo předpokládáno, že odvod tepla bude vyšší oproti první variantě, díky chladiči s žebry orientovanými ve směru jízdy, a tudíž většímu proudění vzduchu mezi žebry. Výpočet ovšem ukázal, že z důvodu nevhodně zvolené náběhové geometrie je hlavní proud vzduchu odkloněn od chladiče a hodnoty odvodu tepla jsou naopak nižší než u první varianty.

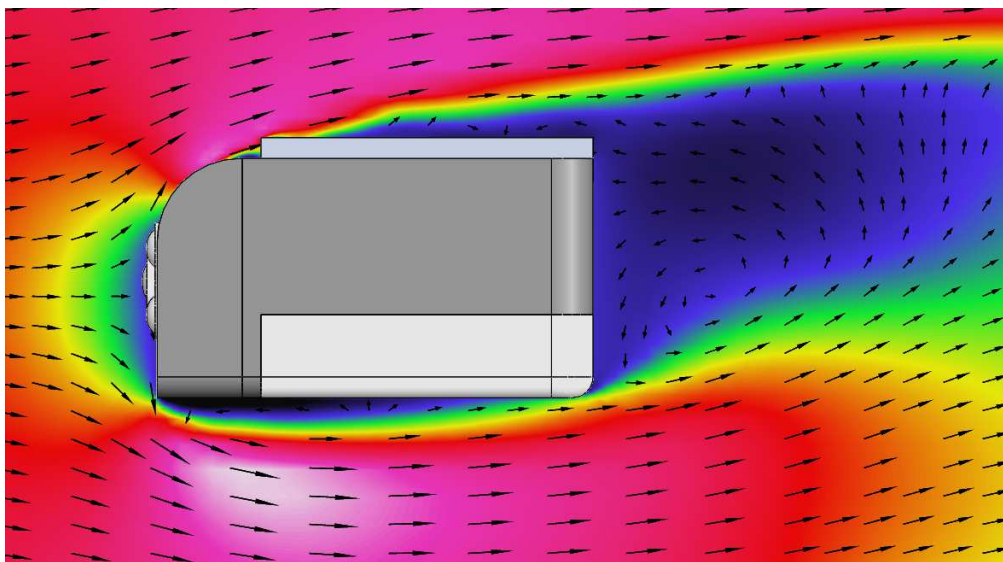


Obr. 38: Umístění řezu teplotního pole simulace druhé varianty



Obr. 39: Teplotní pole druhé varianty při teplotním výkonu čipu 20 W a rychlosti motocyklu 14 m/s

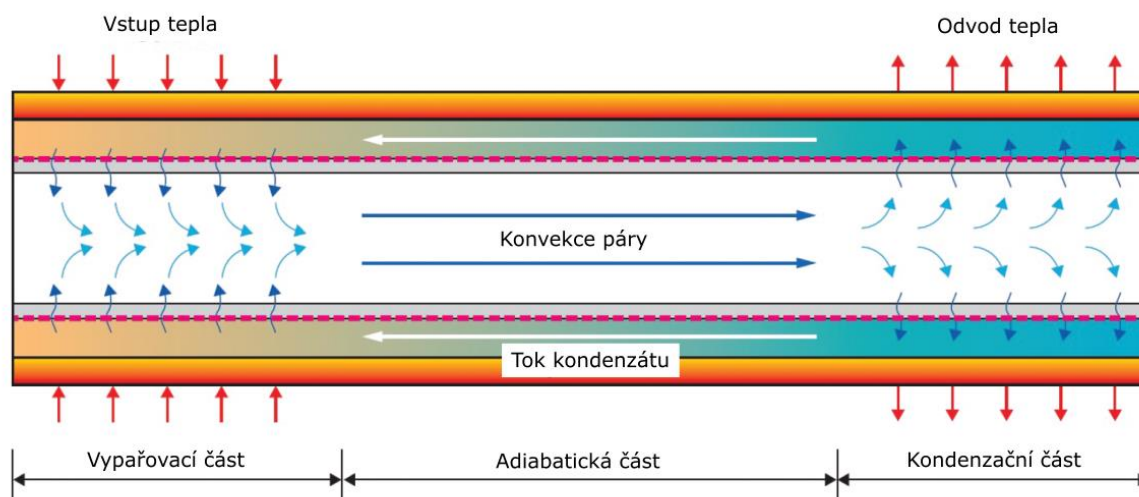
Obr. 40 znázorňuje rychlostní pole obtékajícího vzduchu kolem zařízení. Těsně před začátkem chladiče je možné si všimnout utržení hlavního proudu vzduchu od zařízení.



Obr. 40: Rychlostní pole vzduchu obtékající kolem druhé varianty

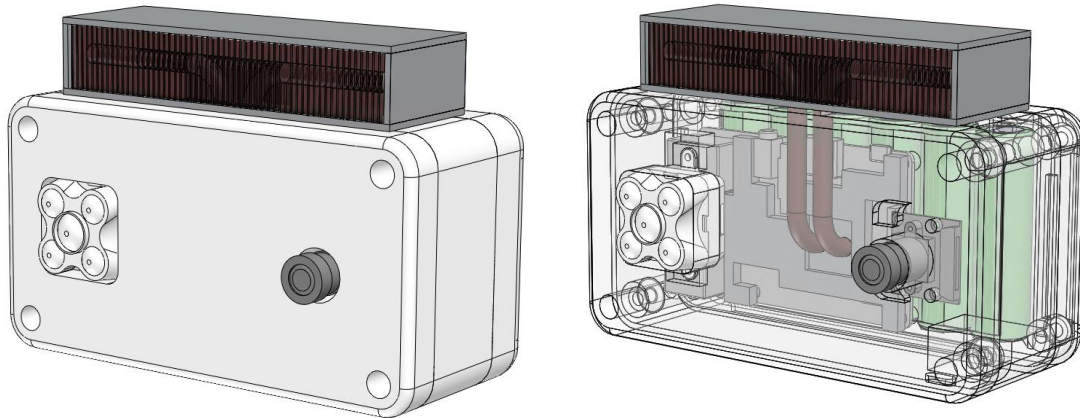
### 5.3 Varianta se spodním chladičem a využitím teplovodivých trubek

Třetí varianta byla inspirována chladicími systémy osobních počítačů, které často využívají teplovodivé trubky (heat-pipes) k odvodu tepla z procesoru do žebër chladiče. Teplovodivá trubka je součástí s velmi nízkým tepelným odporem, což je zajištěno specifickou konstrukcí, která využívá k přesunu tepla fázovou přeměnu média uvnitř trubky. Konstrukčně se jedná o dutou měděnou uzavřenou trubici s porézním povrchem z vnitřní strany. Uvnitř trubice je podtlak s malým množstvím tekutiny. Podtlak je nastaven tak, aby se při daném zvýšení teploty v určité části trubice tekutina začala vypařovat. Tím je z místa odebráno teplo, které je konvekcí přemístěno do studenějšího místa trubice (například u žebër chladiče), kde začne kondenzovat. Zkondenzovaná tekutina se následně za pomoci kapilárního jevu „přemístí“ do teplejšího místa a celý proces se opakuje. Na Obr. 41 je tento proces znázorněn. [21] [29]



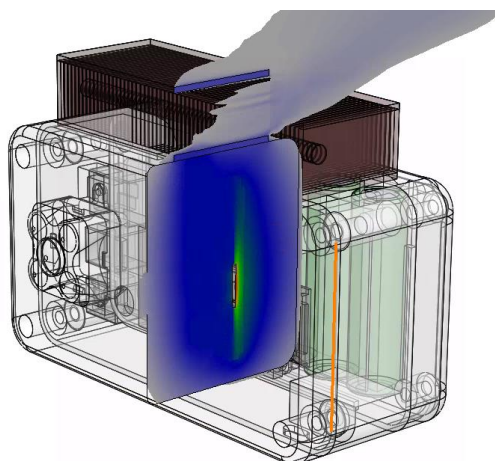
Obr. 41: Schéma funkce teplovodivé trubky [29]

Oproti předchozím dvěma variantám nemá třetí varianta celohliníkový chladič. Místo toho je celý box plastový a na horní stěně je umístěn chladič tvořený nalisovanými plechy na dvě teplovodivé trubky. Současně jsou jednotlivá žebra zasazena v plechovém ochranném rámečku. Počítačová deska je z jedné strany připevněna k plastovému boxu, přičemž současně je na ni z druhé strany přichycen tzv. „coldplate“, tedy hliníková deska se zalisovanými teplovodivými trubkami.



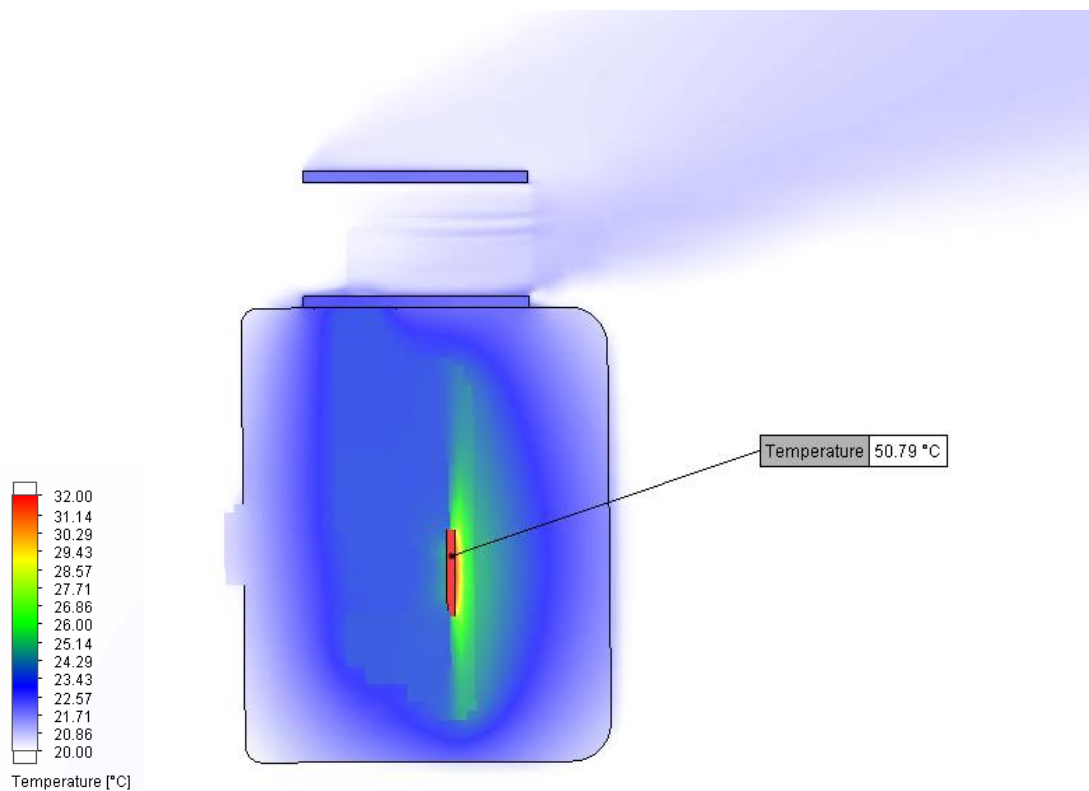
Obr. 42: Koncept s využitím teplovodivých trubek

Z důvodu větší časové náročnosti výpočtu oproti předchozím verzím, způsobené složitějším chladičem byla vypočtena pouze hodnota pro porovnání s předchozími verzemi při 20 W a 14 m/s. Na Obr. 43 a Obr. 44 je znázorněno teplotní pole v oblasti čipu. Dle výpočtu je tato varianta cca o 20% účinnější oproti předchozím dvěma variantám. Na obrázku Obr. 45 je dále znázorněno pole rychlosti vzduchu obtékající třetí variantu.

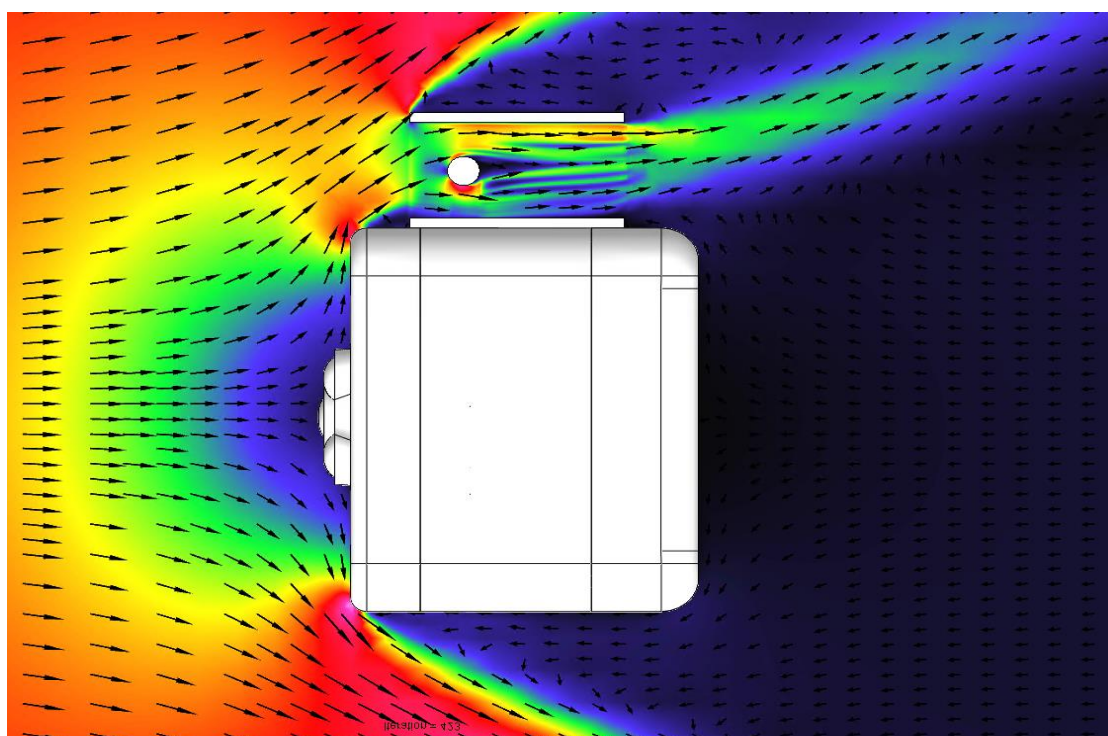


Obr. 43: Umístění řezu teplotního pole simulace třetí varianty





Obr. 44: Teplotní pole třetí varianty při teplotním výkonu čipu 20 W a rychlosti motocyklu 14 m/s



Obr. 45: Rychlostní pole vzduchu obtékající kolem třetí varianty

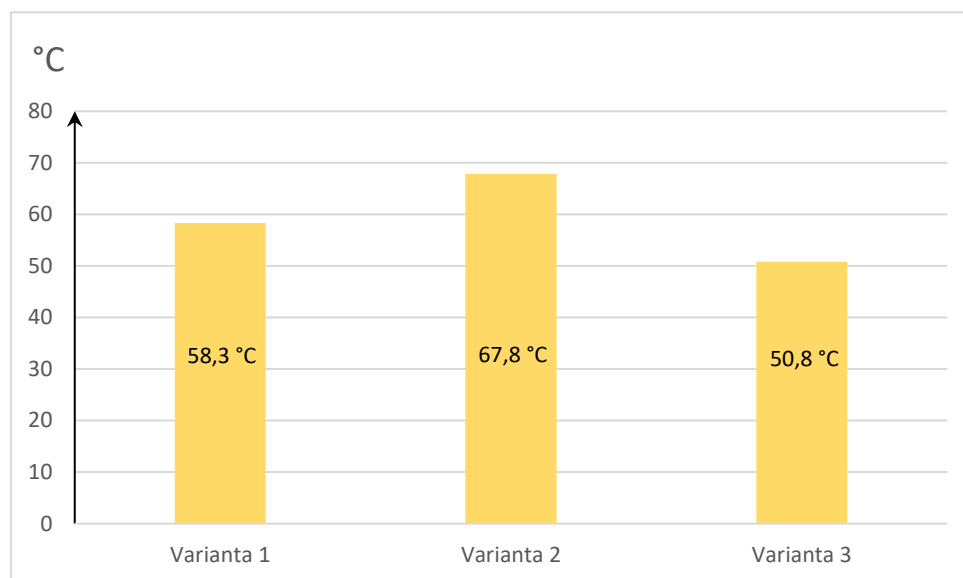
## 5.4 Vyhodnocení

Všechny tři varianty ukázaly významné zlepšení v odvodu tepla oproti původnímu konceptu současně se zmenšením zástavbového prostoru.

První a druhá varianta jsou koncepčně velmi podobné. Skládají se z plastových boxů a hliníkového chladiče pro odvod tepla, na kterém je přímo nainstalována počítačová deska. Hodnoty odvodu tepla jsou u obou variant velmi podobné. U druhé varianty je třeba více dbát na zvolenou geometrii pro obtékání vzduchu, díky které má však druhá varianta větší potenciál k lepším výsledkům chlazení. Nevýhodou druhé varianty oproti první je zvětšení zástavbových rozměrů z důvodu nutnosti umístění senzorů do čela zařízení.

Třetí varianta byla vytvořena zejména k zobrazení potenciálu dražšího systému chlazení. Ten se ukázal jako účinný, avšak zvýšená cena a složitost výroby nakonec nebyla těmito výsledky dostatečně vykompenzována.

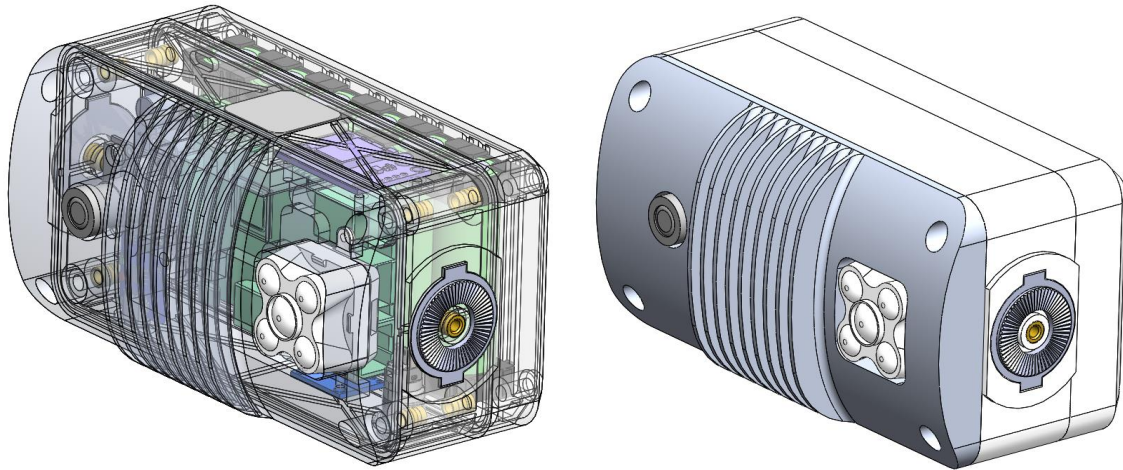
Pro finální návrh byla vybrána první varianta díky její jednoduchosti a kompaktnosti. Přestože výsledky odvodu tepla z počítačové desky jsou horší než ve třetí variantě, stále s rezervou dosahují na využití i výkonnějších počítačových desek.



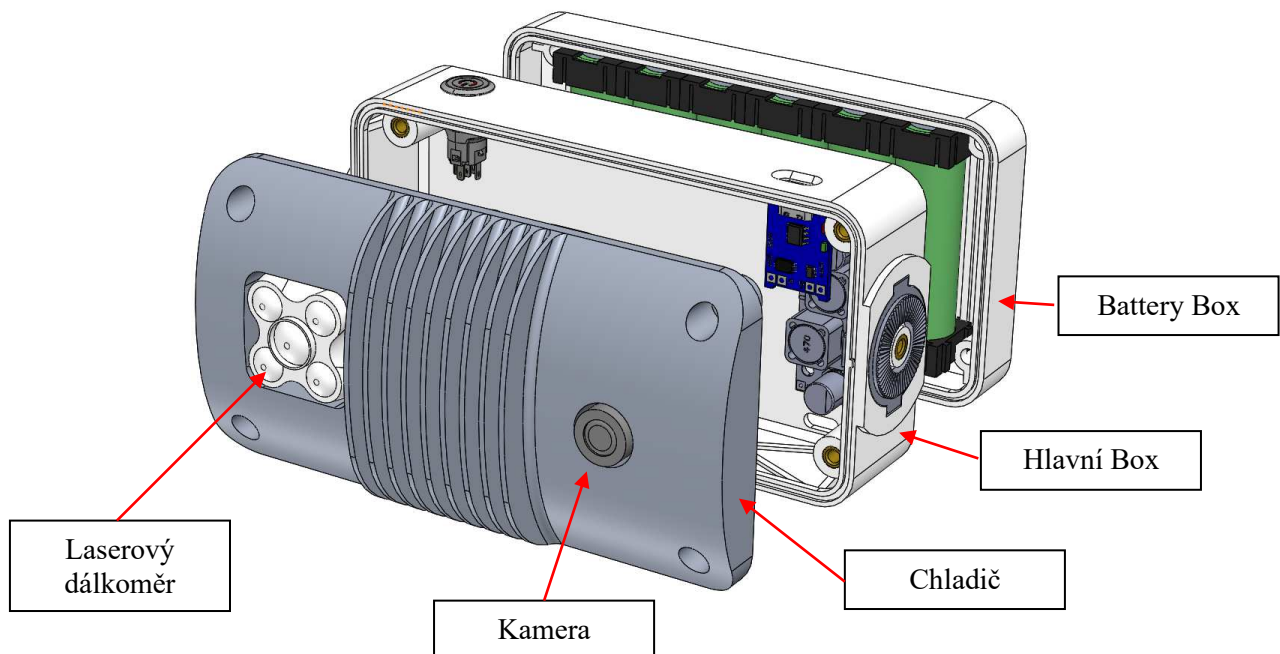
Graf 6: Teplota čipu při tepelném výkonu 20 W a rychlosti motocyklu 14 m/s

## 6 Finální návrh

Finální návrh, odvozený od první varianty, se skládá ze tří hlavních částí – chladiče, boxu a battery boxu, které jsou zobrazeny na Obr. 47 a podrobně popsány v následujících podkapitolách. Pohled na celkovou sestavu se nachází na Obr. 46, přičemž na levé straně je zobrazena sestava se zprůhledněnou vnější obálkou.



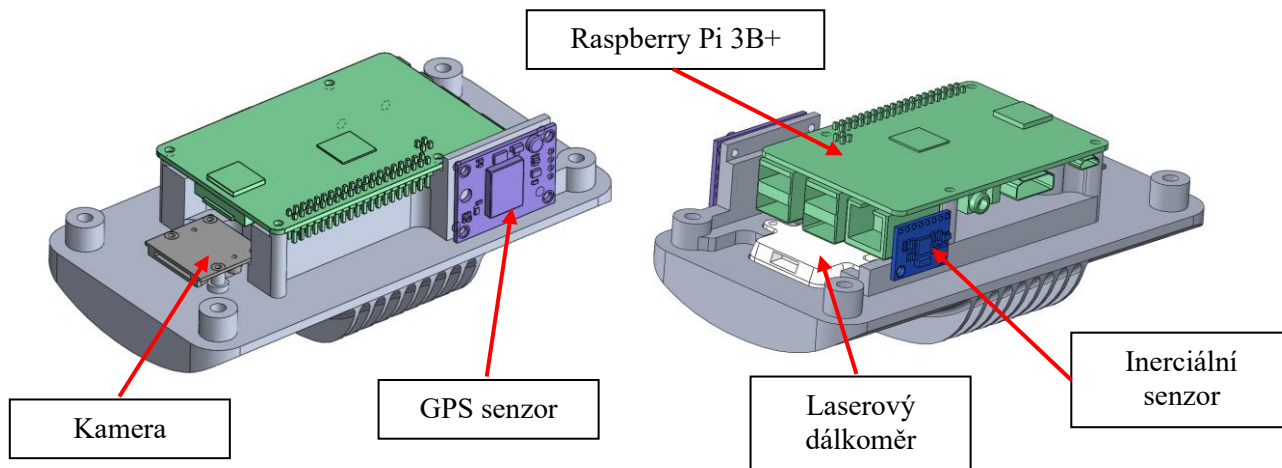
Obr. 46: Finální návrh



Obr. 47: Rozstřel sestavy finálního návrhu

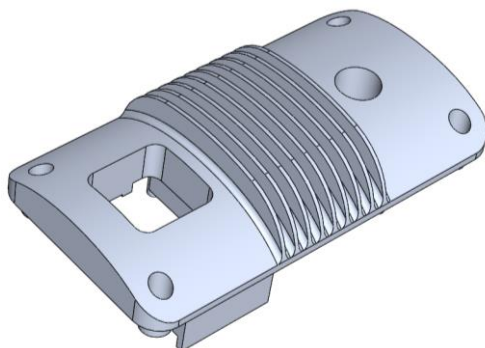
## 6.1 Chladič

Chladič je k hlavnímu boxu přišroubován třemi šrouby M4 a slouží i jako víko celého boxu. V čele chladiče se nachází kamera s laserovým dálkoměrem, které jsou montovány z vnitřní strany chladiče do vytvořených tvarových kapes. Uprostřed vnitřní strany chladiče je vytvořeno místo pro počítačovou desku Raspberry Pi 3B+. Kolem ní jsou k chladiči přišroubovány zbylé senzory na místa, které nepřekáží vývodům z desky. Na Obr. 48 je znázorněna vnitřní strana chladiče spolu s jednotlivými namontovanými senzory.



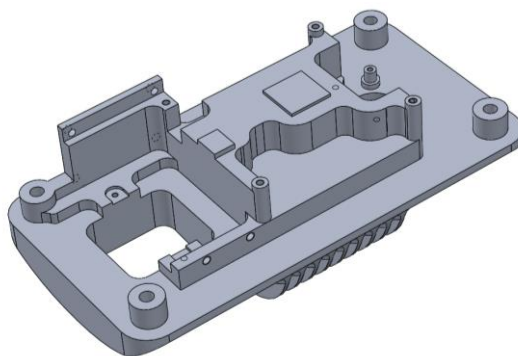
Obr. 48: Sestava chladiče se senzory a počítačovou deskou

Čelo chladiče bylo u finální varianty upraveno pro lepší obtékání vzduchu okolo žebér. Kamera i laserový dálkoměr byly zapuštěny do chladiče pro zlepšení jejich ochrany.



Obr. 49: Chladič zepředu

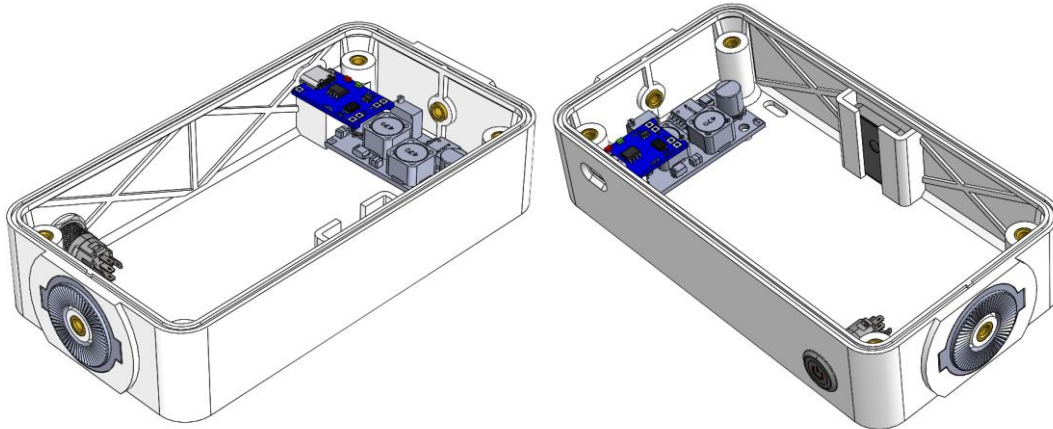
Celý koncept chladiče byl navrhován tak, aby bylo možné jej vyrobit na 3 osé CNC frezce s využitím běžných nástrojů. Materiál chladiče je hliníková slitina řady 6060.



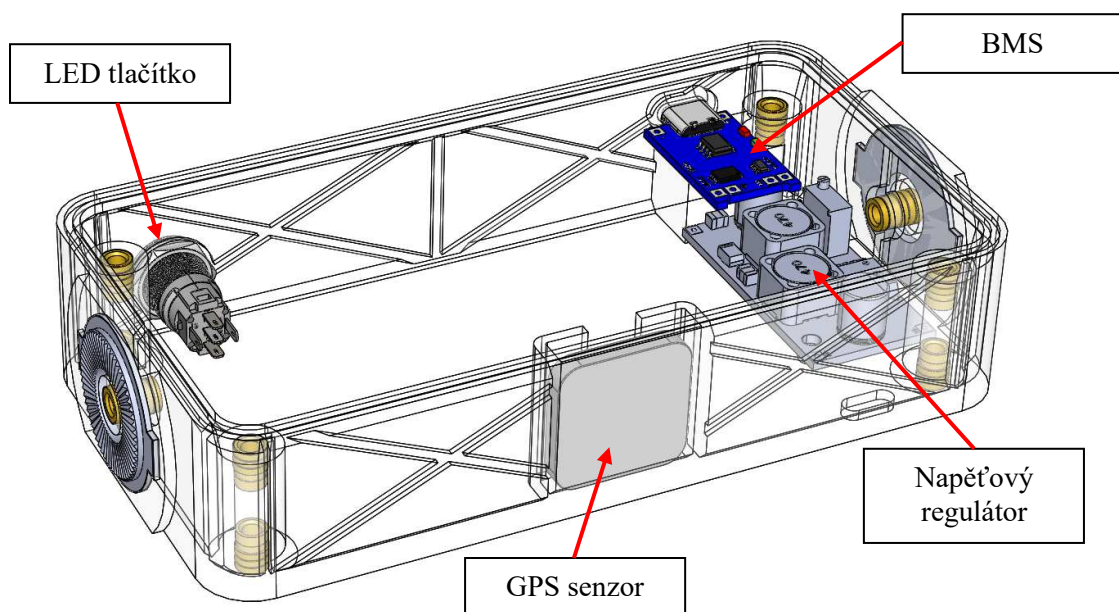
Obr. 50: Vnitřní strana chladiče

## 6.2 Hlavní box

Do hlavního boxu byla umístěna zbývající elektronika vyjma baterií. Na levé straně boxu se nachází BMS (battery management systém) s konektorem USB-C, přes který je celé zařízení napájeno. Pod ním se nachází měnič napětí zajišťující požadované napájení desky Raspberry Pi. Na druhé straně boxu je umístěno tlačítko pro zapínání zařízení. Jedná se o 12V LED tlačítko s IP65 ochranou, které světelně indikuje stav zařízení.

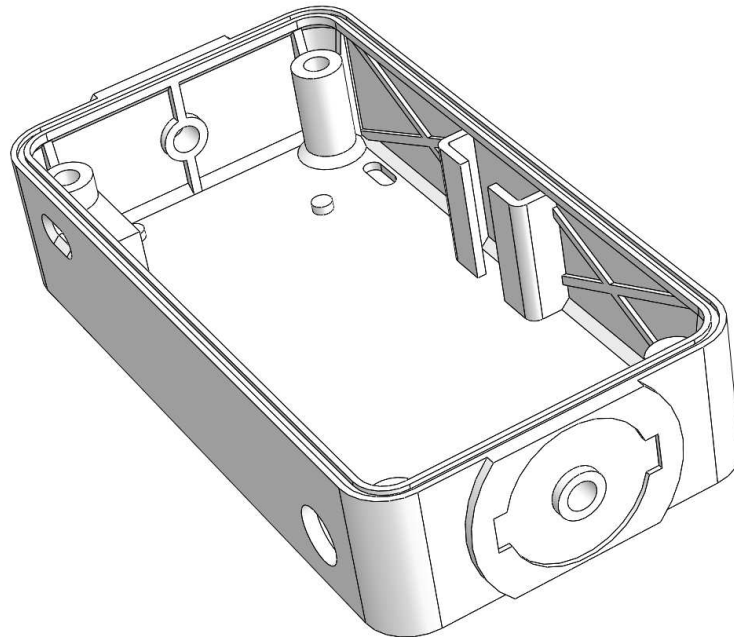


Obr. 51: Sestava hlavního boxu



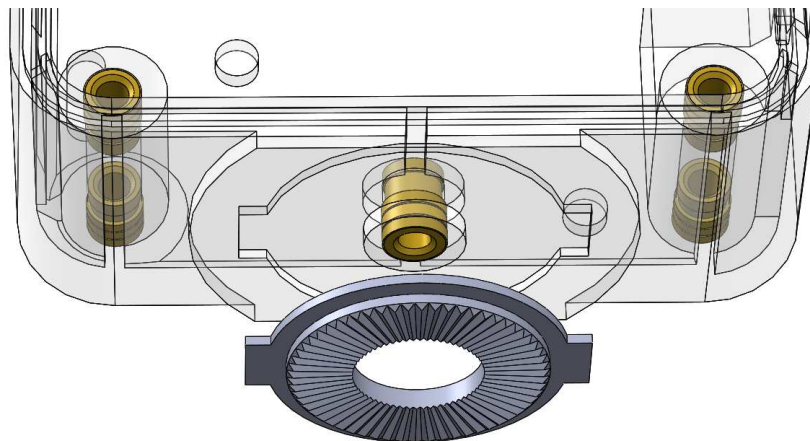
Obr. 52: Popis sestavy hlavního boxu

Samotný box je připraven na výrobu 3D tiskem z materiálu PETG. Na stěnách byly pro úsporu materiálu vytvořeny žebra. Na vrchu stěn je vytvořené osazení s drážkou pro těsnění. Díky tomu je zamezeno vniknutí vody do boxu kolem chladiče.



Obr. 53: Hlavní box

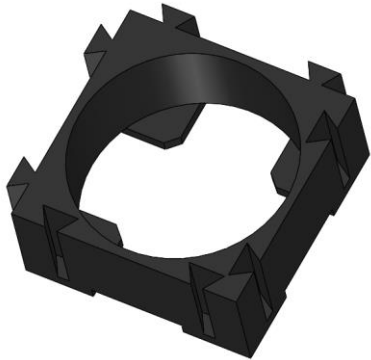
Do sloupků v rozích jsou zalisovány závitové vložky M4 pro spojení boxu s chladičem a battery boxem. Z boku zařízení jsou zalisovány závitové vložky M5 pro spojení s držákem. Zároveň se zde nachází stavěcí kolo pro nastavení úhlu sklonu zařízení v držáku (viz kapitola 7).



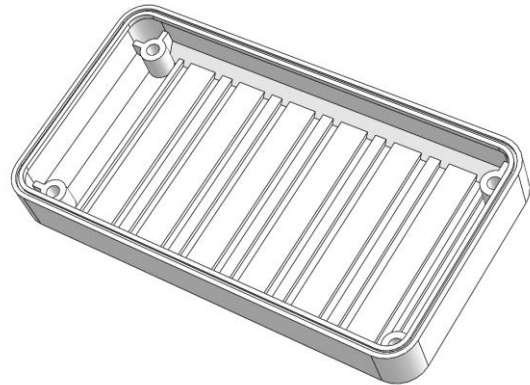
Obr. 54: Pohled na bok hlavního boxu

### 6.3 Battery box

V zadní části zařízení se nachází battery box s šesti li-ion bateriemi. Každá z nich je z obou stran uložena do držáků, které jsou mezi sebou spojeny tvarovými elementy. Celý blok baterií je vložen do boxu s podélnými drážkami, které zabraňují celému bloku v pohybu (viz Obr. 57).

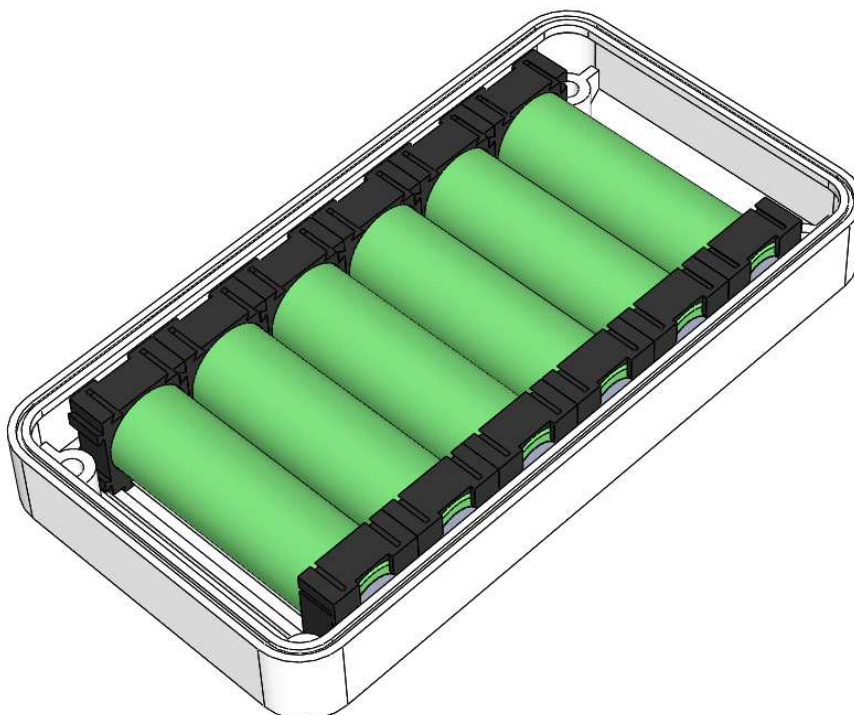


Obr. 55: Držák baterie



Obr. 56: Battery box

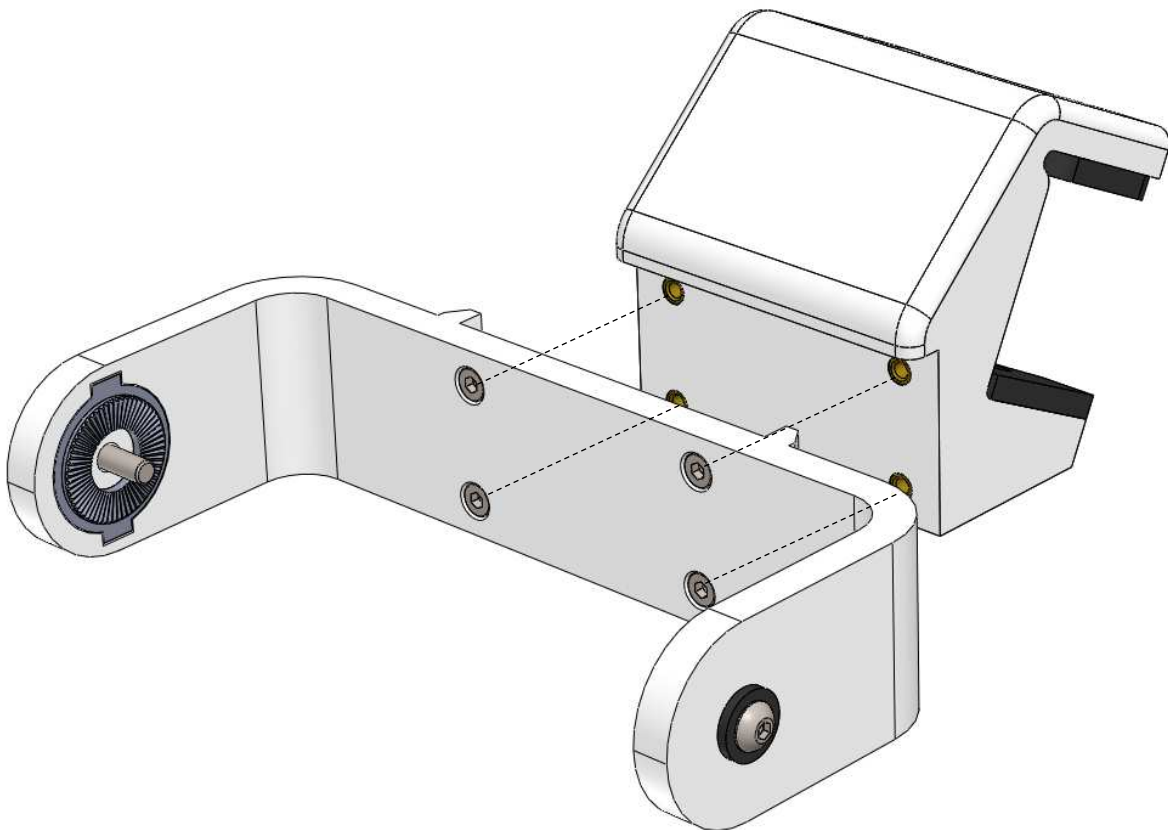
Battery box je s hlavním boxem spojen pomocí 4 šroubů M4, které jsou šroubovány do předpřipravených vložek. Pro utěsnění boxů mezi sebou je podél okraje drážka na těsnění či silikon.



Obr. 57: Sestava battery boxu

## 7 Montáž na motocykl

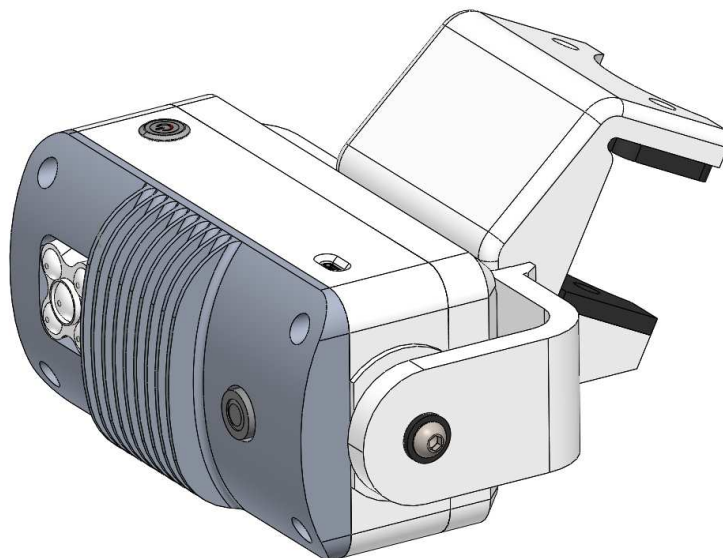
Pro uchycení zařízení k motocyklu byl vytvořen držák skládající se ze dvou hlavních částí. První část je objímka, která svírá zařízení za pomoci stavěcích kol s tvarovými elementy. Pevná spojení tvarových elementů zajišťují šrouby spojené se závitovými vložkami. Druhá část, ke které je objímka upevněna čtyřmi šrouby M4, je uchycena k upevnění pření vidlice motocyklu pomocí dvou šroubů přes 2 gumové podložky. Ty mají za úkol tlumit vibrace z motocyklu.



**Obr. 58: Sestava držáku**

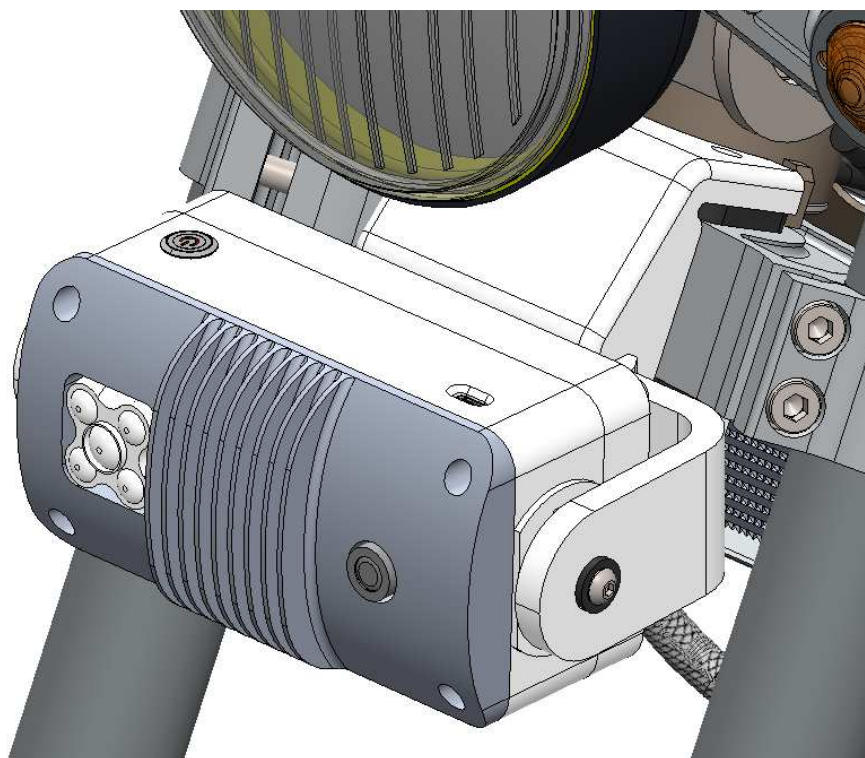
Stavěcí kola s tvarovými elementy zabraňují samovolnému pootočení zařízení v držáku. Současně však dovolují nastavení úhlu sklonu zařízení. Obě hlavní části jsou tištěné z PETG, stejně jako stavěcí kola. Držák je rozdělen na několik částí z důvodu úspory materiálu při 3D tisku a získání lepší struktury výtisku. Na Obr. 59 je zobrazena celková sestava zařízení s držákem.





**Obr. 59: Sestava finálního zařízení s držákem**

Pro znázornění uchycení celé sestavy na motocykl (Obr. 60) byl využit model motocyklu Yamaha XS 650 z úložiště grabcad [22].



**Obr. 60: Umístění finálního zařízení na motocyklu**

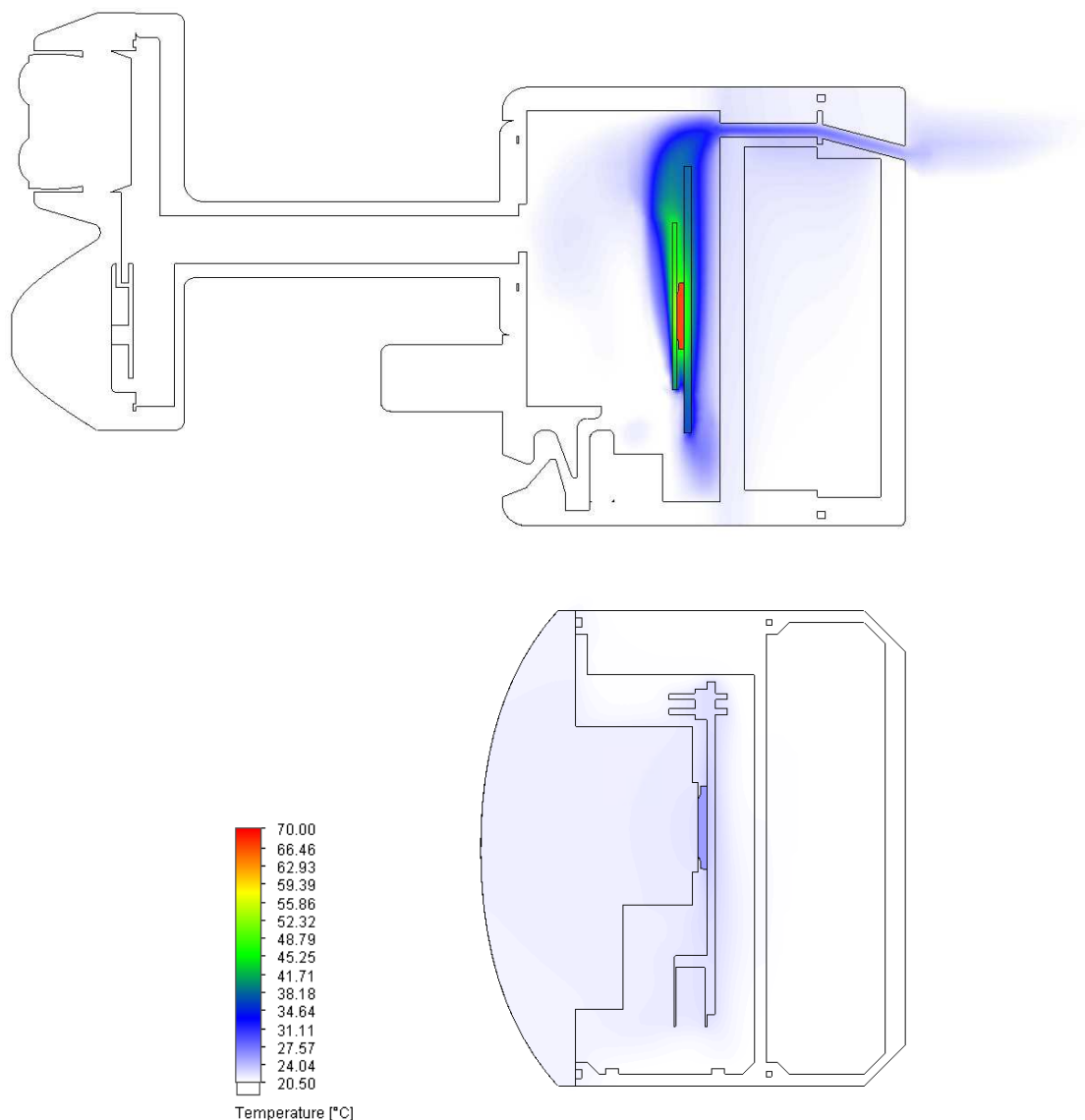
## 8 Porovnání s původním konceptem

Na závěr práce bylo vytvořeno porovnání původního konceptu ARAS systému s finální variantou. Zařízení jsou porovnávána ve dvou základních parametrech, kterými jsou odvod tepla a zástavbové rozměry.

### 8.1 Odvod tepla

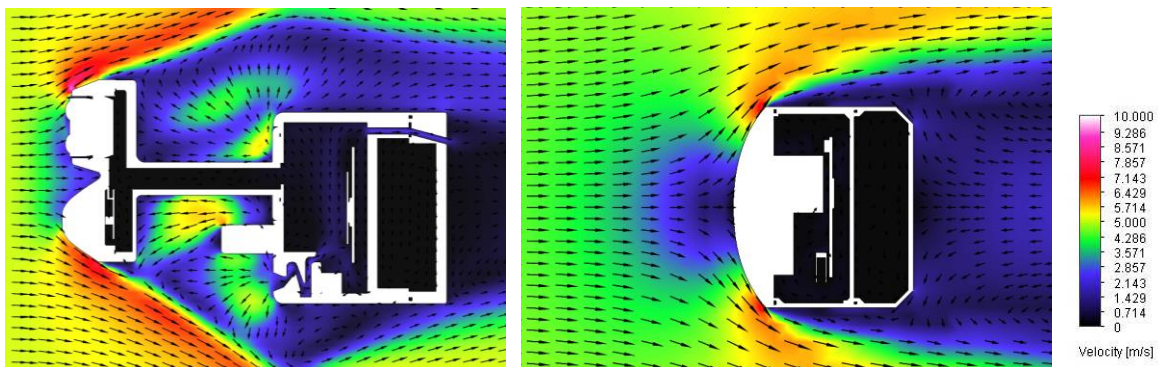
Pro porovnání byla vytvořena simulace finální varianty se stejnými počátečními podmínkami, se kterými počítal návrh původního konceptu. Bylo tedy s využito počítačové desky Raspberry Pi s tepelným výkonem procesoru 2,5 W. Pro obtékání okolního vzduchu byla zvolena rychlost 5 m/s simulující pomalou jízdu na motocyklu.

Výsledky simulace ukázali mnohanásobné zlepšení v odvodu tepla počítačové desky. V původní variantě dosáhla teplota čipu 66,9 °C, přičemž v novém řešení tato hodnota vystoupala pouze na 25,6 °C. Tepelné pole obou zařízení je zachyceno na Obr. 61.



Obr. 61: Porovnání teplotních polí původního konceptu a nového řešení při tepelném výkonu čipu 2,5 W a rychlosti motocyklu 5 m/s

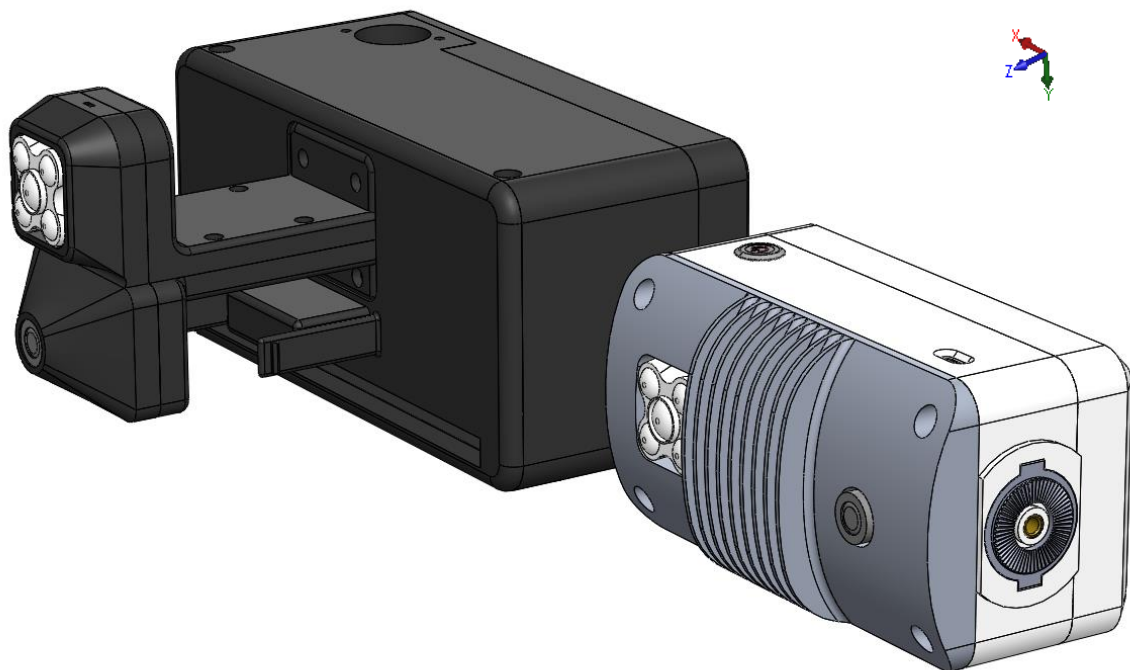
Obr. 62 znázorňuje obtékání vzduchu u původního konceptu a nového řešení při rychlosti motocyklu 5 m/s.



Obr. 62: Porovnání polí rychlosti obtékajícího vzduchu původního konceptu (vlevo) a nového řešení (vpravo) při rychlosti motocyklu 5 m/s

## 8.2 Rozměry

Zástavbové rozměry původního konceptu jsou v jednotlivých osách (x,y,z) 192x92x184 mm. Nové zařízení je ve všech rozměrech kompaktnější, jelikož zde není využito předsunutých senzorů jako v původním konceptu. Rozměry nového zařízení jsou 160x80x82 mm. Na Obr. 63 jsou zobrazeny obě zařízení vedle sebe pro porovnání.



Obr. 63: Porovnání velikostí původního konceptu (vlevo) a nového řešení (vpravo)

## 9 Závěr

Hlavním úkolem diplomové práce bylo analyzovat koncept ARAS systému z hlediska odvodu tepla z počítačové desky Raspberry Pi 3B+, a na základě výsledků vytvořit nové zařízení.

V teoretické části práce byly shrnuty základy tepelného přenosu spolu s úvodem do problematiky mikroprocesorů a jejich chlazení. Zde byly sepsány základní typy pouzření čipů a způsob výpočtu tepelného odporu pouzder. Dále je zde byl uveden stručný popis ARAS systému včetně seznamu senzorů, které jsou využity i v novém zařízení.

Na začátku praktické části byla vytvořena simulace počítačové desky Raspberry Pi 3B+, která byla za pomoci experimentálního měření validována. Simulační model desky byl následně využit ve všech dalších simulacích.

Následně byla vytvořena simulace konceptu ARAS systému, která potvrdila původní myšlenku chlazení počítačové desky. Výsledky simulace ukázaly, že navrhovaným způsobem je možné odvést až cca 3 W tepla, což však nedostačuje požadavku na budoucí zvyšování výpočetního výkonu počítačové desky. Z toho důvodu byly vytvořeny 3 nové varianty řešení, které měly za úkol ukázat, jaký mají jednotlivé konstrukční změny dopad na obtékání vzduchu kolem zařízení a odvod tepla. Všechny tři varianty ukázaly významné zlepšení oproti původnímu konceptu.

První varianta byla dále rozpracována do finálního návrhu, který byl podrobně popsán v šesté kapitole. Spolu s finálním návrhem byl vytvořen koncept držáku umožňující montáž zařízení na motocykl.

V poslední části práce bylo vytvořeno porovnání původního konceptu a nového zařízení. Zde výsledky simulace ukázaly více jak dvojnásobné zlepšení v odvodu tepla z počítačové desky u nové varianty řešení při současném zmenšení jejího celkového zástavbového prostoru.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Roman Budský, *Asistenční systémy ve vozidlech pro záchranu lidského života*, [online] platforma Vize 0, [cit. 19.3.2023]. Dostupné z: <https://platformavize0.cz/materialy/material/?id=61e80ef2313631545b0000bc>
- [2] *Jak je to s ABS a ESP a dalšími povinnými systémy*, [online] platforma Vize 0, [cit. 19.3.2023]. Dostupné z: <https://www.asistencnisystemy.cz/jak-je-to-s-abs-a-esp-a-dalsimi-povinnymi-systemy>
- [3] *Asistenční systémy na motocyklech*, [online] BESIP, [cit. 19.3.2023]. Dostupné z: <https://besip.cz/Besip/media/Besip/data/web/soubory/motocyklista/besip-systemy-nr.pdf>
- [4] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2029-4.
- [5] JAMNIA, Ali. *Practical guide to the packaging of electronic Thermal and mechanical design and analysis*. 2nd ed. 2009. ISBN 978-1-4200-6531-2
- [6] Xingcun Colin Tong, *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*. 2011. ISBN 978-1-4419-7758-8
- [7] MAŠEK, Václav. *Asistenční systém řidiče motocyklu pro detekci překážek a vizualizací v zorném poli jezdce*. 2021. Diplomová práce
- [8] Gordon E. Moore. *Cramming more components onto integrated circuits*, [online] [cit. 9.4.2023]. Dostupné z: [https://hasler.ece.gatech.edu/Published\\_papers/Technology\\_overview/gordon\\_moore\\_1965\\_article.pdf](https://hasler.ece.gatech.edu/Published_papers/Technology_overview/gordon_moore_1965_article.pdf)
- [9] REMABURG, Ralph. *Advanced thermal design of electronic equipment*. Chapman & Hall, 1998. ISBN 978-1-4613-4633-3
- [10] The Common IC Packaging Types, PS Electronics, září 2022. [online] [cit. 9.4.2023]. Dostupné z: <https://www.quick-pcba.com/pcb-news/ic-packaging-types.html>
- [11] *Semiconductor Packaging History and Trends*, anysilicon. [online] [cit. 15.4.2023]. Dostupné z: <https://anysilicon.com/semiconductor-packaging-history-trends/>
- [12] *A Brief Introduction of BGA Package Types*, PCBCart. [online] [cit. 15.4.2023]. Dostupné z: <https://www.pcbcart.com/article/content/introduction-of-bga-package-types.html>
- [13] Szendiuch, Ivan. *MIKROELEKTRONIKA A TECHNOLOGIE SOUČÁSTEK*. Garant předmětu: Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [14] OCAK, Mustafa. *CONDUCTION BASED COMPACT THERMAL MODELING FOR THERMAL ANALYSIS OF ELECTRONIC COMPONENTS*, Master thesis. 2010, MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY

[15] Lemczyk, T.F., Mack, B., Culham, J.R. and Yovanovich, M.M., 1992, *Printed Circuit Board Trace Thermal Analysis and Effective Conductivity*, ASME J. Electronic Packaging, Vol. 114, pp. 413 - 419.50.

[16] Datasheet MxL7704, MaxLiner. [online] [cit. 15.4.2023]. Dostupné z:  
<https://assets.maxlinear.com/web/documents/mxl7704.pdf>

[17] Datasheet LAN7500/LAN7500i, Microchip. [online] [cit. 15.4.2023]. Dostupné z:  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001734A.pdf>

[20] Inui, Y, Hirayama, S, Tanaka, T. *Detailed estimation method of heat generation during charge/discharge in lithium-ion battery using equivalent circuit*. Electron Comm Jpn. 2019; 102: 3– 14. <https://doi.org/10.1002/ecj.12221>

[21] Iyengar, Madhusudan. *Cooling of microelectronic and nanoelectronic equipment*. World Scientific Publishing 2015, ISBN 978-9814579780

[22] Model motocyklu Yamaha xs650. [online] [cit. 5.5.2023]. Dostupné z:  
<https://grabcad.com/library/xs-650-cafe-racer-motorcycle-1>

[23] Obrázek kamery Waveshare rpi [online] [cit. 15.5.2023]. Dostupné z:  
<https://rpishop.cz/mipi-kamerove-moduly/1045-waveshare-rpi-kamera-h.html>

[24] Obrázek TeraRanger Evo [online] [cit. 15.5.2023]. Dostupné z:  
<https://www.terabee.com/shop/lidar-tof-range-finders/teraranger-evo-60m/>

[25] Obrázek Raspberry pi 3B+ [online] [cit. 15.5.2023]. Dostupné z:  
<https://rpishop.cz/raspberry-pi-3b/896-raspberry-pi-3-model-b-plus-64-bit-1gb-ram-713179640259.html>

[26] Obrázek PGA [online] [cit. 15.5.2023]. Dostupné z:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cyrix\\_IBM\\_CPU\\_6x86MX\\_PR200\\_bottom.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cyrix_IBM_CPU_6x86MX_PR200_bottom.jpg)

[27] Obrázek LGA [online] [cit. 15.5.2023]. Dostupné z:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel\\_CPU\\_Pentium\\_4\\_640\\_Prescott\\_bottom.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel_CPU_Pentium_4_640_Prescott_bottom.jpg)

[28] Obrázek BGA [online] [cit. 15.5.2023]. Dostupné z:  
<https://www.multi-circuit-boards.eu/en/pcb-design-aid/bga-pcb-design-for-ball-grid-array.html>

[29] Sohel Murshed, S.M., (Ed.) *Electronic cooling*, ExLi4Eva, 2016. ISBN-10: 953-51-2406-4