



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

BILANCE RECIRKULACE VZDUCHU NA CHLADICÍM PAKETU VOZIDLA

AIR RECIRCULATION BALANCE OF THE VEHICLE'S COOLING PACKAGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kamil Macejka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vančura, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Bc. Kamil Macejka**
Studijní program: Automobilní a dopravní inženýrství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vančura, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Bilance recirkulace vzduchu na chladicím paketu vozidla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při specifických jízdních režimech dochází k výraznému ovlivnění výkonu jednotlivých komponent chladicího paketu vozidla. K tomuto ovlivnění dochází z důvodů recirkulace vzduchu, který již výměníky prošel a zvyšuje teplotu na vstupu do chladicího paketu. V diplomové práci bude provedeno porovnání vlivu recirkulace pro zvolené chladicí pakety a jízdní režimy, vyhodnocení kritických režimů a návrh úprav pro snížení vlivu recirkulace.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.
Analýza CFD výpočtů vybraných jízdních režimů.
Vytvoření 1D výpočtového modelu pro jednoduché bilancování výkonu chladicího paketu i jednotlivých komponent.
Citlivostní analýza změn vstupních parametrů, nalezení kritických režimů.
Návrh úprav pro snížení vlivu recirkulace.

Seznam doporučené literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road Vehicles. 4th edition. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1998. 918 s. ISBN 0-7680-0029-7.

MORELLO, Lorenzo, et. al. The Automotive Body. Dordrecht: Springer Verlag, 2011. 668 s. ISBN 978-94-007-0512-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Cieľom tejto práce je vytvoriť vhodný nástroj pre rýchle analýzy recirkulácie teplého vzduchu na chladiacom pakete, ktorá je jedným z významných faktorov vplývajúcich na jeho účinnosť, zhodnotiť tento vplyv a navrhnúť spôsoby na jeho zníženie. Teoretická časť práce sa venuje popisu problému, preskúmaniu existujúcich štúdií a priblíženiu mechanizmov, ktoré sú súčasťou sledovaného javu. Praktická časť obsahuje analýzu prúdových a tepelných javov v motorovom priestore existujúceho vozidla, ktorej výsledky slúžia ako podklad pre vytvorenie výpočtového modelu s grafickým rozhraním. Tento model je následne použitý na porovnanie vplyvov rôznych vstupných parametrov a na základe výsledkov sú navrhnuté geometrické opatrenia cielené na zníženie negatívneho efektu recirkulácie, ktoré sú vyhodnotené pomocou CFD výpočtov.

Kľúčové slová

chladenie, chladič, kondenzátor, výmenník, recirkulácia, prúdenie, elektromobil, BEV, DrivAer, CFD

Abstract

The focus of this thesis is to create an effective tool for quick analyses of hot air recirculation at the cooling package, which is a significant factor that influences its effectivity, to evaluate this influence and to propose viable solutions for its mitigation. The theoretical part of the thesis is devoted to the description of the problem, review of existing scientific studies and introducing the mechanisms responsible for the studied phenomenon. The practical part contains an analysis of flow and thermal effects, whose outputs are used for developing a computational model with a graphical user interface. This model is further used for comparison of effects of various input parameters and based on its results the measures targeted on reduction of recirculation are designed, which are then evaluated using CFD methods.

Keywords

cooling, radiator, condenser, heat exchanger, recirculation, air flow, electric vehicle, BEV, DrivAer, CFD

Bibliografická citácia

MACEJKA, Kamil. *Bilance recirkulace vzduchu na chladicím paketu vozidla*. Online, závěrečná práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedoucí práce Jan Vančura. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158015>.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Jana Vančury, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

Podakovanie

Chcem sa podakovať Ing. Janovi Vančurovi, Ph.D. za jeho ochotný prístup, trpezlivosť, cenné rady a čas venovaný pri písaní tejto práce. Veľká vďaka patrí aj rodine a priateľom za ich pomoc a podporu počas štúdia.

Obsah

Úvod	13
1 Motorový priestor	14
2 Chladiaca sústava elektromobilu	15
2.1 Chladienie batérie	15
2.1.1 Vzduchové	15
2.1.2 Kvapalinové	16
2.2 Chladienie motora	17
2.2.1 Vzduchové	18
2.2.2 Kvapalinové	18
3 Prehľad literatúry popisujúcej recirkuláciu	19
4 Prenos tepla	21
5 Prúdové a tepelné vplyvy	23
5.1 Vstup do motorového priestoru	23
5.2 Chladiaci paket	24
5.3 Výstup z motorového priestoru	24
6 Analýza poskytnutých CFD výpočtov	25
6.1 Konfigurácia vozidla	25
6.2 Pozorované režimy	25
6.3 Vyhodnotenie	26
7 Výpočtový model	30
7.1 Dostupné údaje a zahrnutie vplyvov	30
7.1.1 Mechanizmy prenosu tepla	30
7.1.2 Geometrické parametre	31
7.1.3 Nerovnomernosť naprúdenia	31
7.1.4 Vonkajšie podmienky	31
7.2 Výpočet	31
7.2.1 Vodný chladič	32
7.2.2 Kondenzátor	32
7.3 Uživatelské rozhranie	33
7.4 Citlivostná analýza	36
7.4.1 Prietok vzduchu mriežkou	36
7.4.2 Vonkajšia recirkulácia	37
7.4.3 Vnútorná recirkulácia (NTK)	38
7.4.4 Vnútorná recirkulácia (KK)	39
7.4.5 Porovnanie citlivostí	40

8	Návrh opatrení	41
8.1	Základná varianta	41
8.1.1	Geometria	41
8.1.2	Výpočtová doména	43
8.1.3	Sieť	44
8.1.4	Okrajové podmienky	46
8.1.5	Výsledky základnej varianty	47
8.2	Upravené varianty	50
8.2.1	Krátky deflektor	50
8.2.2	Dlhý deflektor	52
8.2.3	Pasívne vyfukovanie	54
8.2.4	Aktívne vyfukovanie	57
8.3	Zhrnutie	60
	Záver	61
	Literatúra	63
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	66

Úvod

S pribúdajúcim počtom automobilov a s narastajúcimi požiadavkami na zníženie negatívneho dopadu na životné prostredie sa výrobcovia čím ďalej tým viac zameriavajú na zvýšenie účinnosti vozidiel. V dnešnej dobe už pri tom nejde len primárne o znižovanie emisií výfukových plynov, ako tomu bolo pred niekoľkými rokmi, ale s postupným prechodom na elektromobilitu sa výrobcovia potýkajú aj s rastúcimi nárokmi zákazníkov.

Pre zákazníkov je v súčasnosti kúpa elektrického vozidla pretkaná kompromismi. Jedným z hlavných faktorov sú obavy z nedostatočného dojazdu oproti vozidlám so spaľovacím motorom. Súčasný stav vývoja automobilových batérií môže pri jazdách na veľké vzdialenosti vyžadovať časté zastavovanie a dobíjanie, s čím sa viaže doba potrebná na nabitie batérie oproti rýchlemu natankovaniu palivovej nádrže. Okrem toho hrá významnú úlohu aj zatiaľ nedostatočná infraštruktúra dobijacích staníc, čo obmedzuje efektívne použitie elektromobilov primárne na jazdy v mestských a prímestských oblastiach. Často sa tak automobilky pri vývoji nového vozidla sústreďujú na optimalizáciu drobných detailov. Napríklad pri honbe za zvýšením dojazdu sa hľadajú spôsoby ako znížiť koeficient odporu vzduchu, pričom typicky ide o malé geometrické zmeny s dopadom v rádoch tisícín.

Pri snahe o skrátenie doby dobíjania ide nie len o technológiu dobijacích staníc, ale aj o spôsob ako uchladiť elektroniku potýkajúcu sa s veľkými výkonmi a teplotami. To v spojení s tepelným manažmentom batérií a motorov vyžadujúcich pomerne nízke a stále teploty kladie vysoké nároky na optimalizáciu chladiaceho systému.

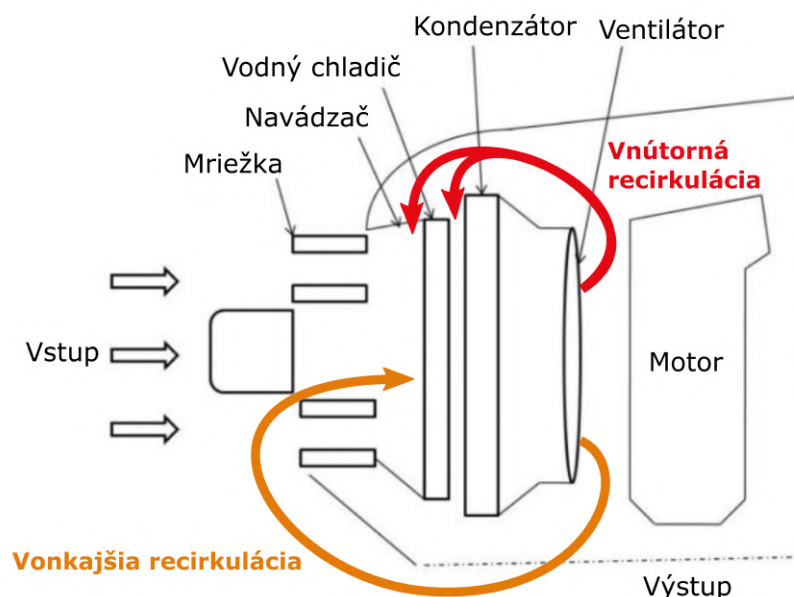
Aj keď majú výrobcovia dlhoročne overené znalosti a metódy na dimenzovanie chladiaceho systému, nie všetky deje sa v komplikovanom prúdovom poli motorového priestoru dajú jednoducho predvídať. Jedným z takýchto dejov je recirkulácia teplého vzduchu, ktorý prešiel výmenníkmi a vracia sa späť na ich vstup, čo znižuje celkovú účinnosť systému a prispieva tak k jeho naddimenzovaniu. Tento jav je známy, avšak je zložitý ho namerať a popísať. Experimentálne metódy sú časovo a finančne náročné a používajú sa až v neskorších vývojových fázach pre validáciu výpočtov. Pri vývoji nových modelov je vytváranie prototypov a ich dodatočná úprava na základe výsledkov neudržateľná. Priemyselným štandardom sú pri podobných problémoch zaužívané numerické metódy v podobe CFD. Ani tie však nie sú vždy dostatočne presné a ich príprava, výpočet a následná analýza taktiež výrazne zaťažujú vývojový proces.

V raných vývojových fázach je preto vhodné mať k dispozícii nástroj v podobe výpočtového modelu, ktorý by bol jednoduchý, rýchly a dostatočne presný na to, aby bolo možné na základe známych parametrov a požiadavkov uskutočňovať rýchle analýzy a na základe nich vyvodzovať informované rozhodnutia.

Táto práca sa zaoberá popisáním problému recirkulácie vzduchu, analýzou existujúcich výpočtov, vytvorením návrhu modelu vo forme nástroja určeného pre použitie pri vývoji chladiaceho systému a návrhom opatrení na zamedzenie negatívneho vplyvu recirkulácie.

1. Motorový priestor

Aj napriek tomu, že v prípade elektrických vozidiel nezaberá väčšinu priestoru pod kapotou objemný spalovací motor, výfukový systém a prevodovka, stále je to veľmi komplexný a stiesnený priestor obsahujúci veľké množstvo mechanických a elektrických komponentov, typicky od elektromotora, cez chladiaci systém, rôzne pomocné agregáty a nádržky až po sústavu hadíc, káblov a snímačov. Jeho návrh predstavuje neľahkú úlohu, pri ktorej je potrebné dosiahnuť čo najlepšie usporiadanie všetkých súčastí z hľadiska vhodného prúdenia vzduchu, tepelného manažmentu a dostatočnej prístupnosti a servisovateľnosti.



Obr. 1.1: Prúdenie v motorovom priestore [1].

Geometria a priestorové rozloženie komponentov priamo vytvára vzduchové kanály, ktoré definujú prúdové cesty (obr. 1.1) ovplyvňujúce tepelnú konvekciu nie len vzduchu hnaného náporom pri pohybe vozidla alebo ventilátorom, ale aj prirodzenú konvekciu ohrievaného vzduchu. Tieto faktory hrajú dôležitú úlohu pri návrhu chladiaceho systému vrátane rozloženia a veľkostí ventilátorov.

Ďalším cieľom pri návrhu motorového priestoru je zníženie vznikajúceho aerodynamického odporu, čo sa s aktuálnym nástupom väčšieho množstva elektrických vozidiel stáva čoraz dôležitejším. Pre chladiaci systém je nutné zaistiť prívod dostatočného množstva vzduchu na výmenníky, no so zvyšujúcim sa množstvom vzduchu natekajúceho do motorového priestoru stúpa aerodynamický odpor. Je preto dôležité nájsť vhodnú rovnovahu pre zaistenie vhodného chladiaceho výkonu a čo najmenšieho odporu. Tento pomer sa výrazne mení so zvyšujúcou sa rýchlosťou vozidla, a preto niektorí výrobcovia zaviedli vo svojich modeloch pomocné prvky, ako napríklad aktívne uzatváranie mriežky [2]. Pri vysokej rýchlosti, kedy sú nároky na chladenie nižšie, sa tieto prvky privrú, čo má za následok zníženie množstva vzduchu vtekajúceho dovnútra a tým pádom zníženie koeficientu odporu.

2. Chladiaca sústava elektromobilu

Táto kapitola približuje funkciu chladiaceho systému elektromobilu a popisuje rôzne spôsoby chladenia batérie a elektromotora. Okrem rozlíšenia medzi vzduchovým a vodným chladením a ich výhod a nevýhod, prípadne spoločných ich charakteristík, sa zaoberá tiež princípom funkcie kondenzátora v chladiacom okruhu.

2.1. Chladenie batérie

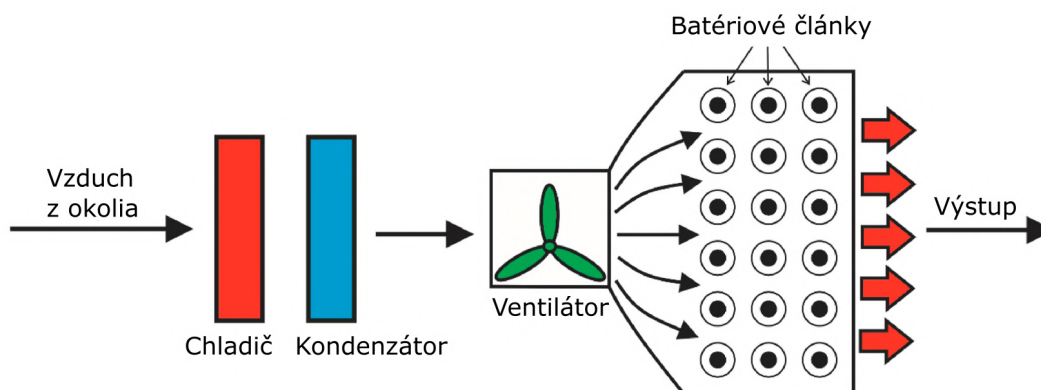
Počas nabíjania a vybíjania batérie v nej prebiehajú rôzne chemické procesy, ktoré spôsobujú vznik tepla. Takéto zvyšovanie teploty spôsobuje pokles výkonu a životnosti batérie [3].

Pre optimálne fungovanie batérie sa odporúča teplotný rozsah medzi 15 °C až 50 °C a rovnomerné rozloženie teploty v jednotlivých článkoch [4, 5]. Na zaistenie týchto prevádzkových teplôt je potrebný účinný systém tepelného manažmentu. Podľa princípu chladenia môžeme tento systém rozdeliť na dva typy: chladenie vzduchom a chladenie kvapalinou.

2.1.1. Vzduchové

Batéria je tu chladená priamo vzduchom nasatým z okolia. Vzduch vstupuje do batérového modulu z jednej strany, prúdi cez medzery medzi článkami a vystupuje na druhej strane, pričom odvádza teplo vygenerované článkami (obr. 2.1). Pri vyšších rýchlostiach je nápor vzduchu dostatočný na splnenie nárokov na odvod tepla, ale pri nízkych rýchlostiach alebo státi sa požadovaný prietok vzduchu zaisťuje ventilátorom.

Vzduchové chladenie batérie poskytuje dostatočnú efektivitu a má oproti kvapalinovému niekoľko výhod, ako jednoduchosť, malé zástavbové rozmery, nízku hmotnosť, nízke nároky na údržbu, vysokú spoľahlivosť a nízku cenu [6].



Obr. 2.1: Vzduchové chladenie batérie [7].

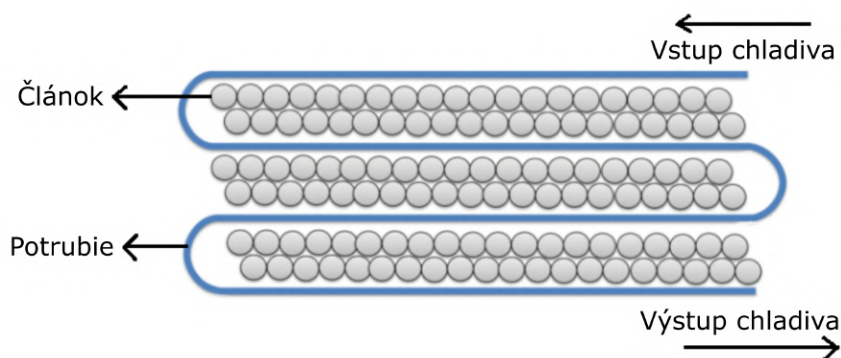
2.1.2. Kvapalinové

Pri kvapalinovom chladení sa teplo z batérie odvádza chladiacou kvapalinou. Výhodou kvapalinového chladenia je možnosť presnej regulácie teploty systému a vysoká účinnosť odvodu tepla. Nevýhodami tohto systému sú vyššia hmotnosť, komplikovaná zástavba, náročnejšia údržba, vyššia cena a zvýšená spotreba energie, ktorá môže skrátiť efektívny dojazd vozidla [8]. Tiež je potrebné zaistiť bezchybnú izoláciu okruhu a zamedziť nechcenému kontaktu vody s elektrickými časťami vozidla.

Tento spôsob chladenia môžeme ďalej rozdeliť na dva typy: chladenie priamym kontaktom alebo nepriamym kontaktom [9].

Pri priamom kontakte sú batériové články priamo ponorené v kvapaline, čo zväčšuje účinný chladiaci povrch a zlepšuje odvod tepla. Zároveň tu vzniká dodatočná požiadavka na kvapalinu, ktorá musí byť nevodivá.

Pri nepriamom kontakte je chladenie zaistené prostredníctvom chladiaceho plášťa v podobe chladiacich kanálov nachádzajúcich sa okolo článkov (obr. 2.2).



Obr. 2.2: Nepriame kvapalinové chladenie batérie [10].

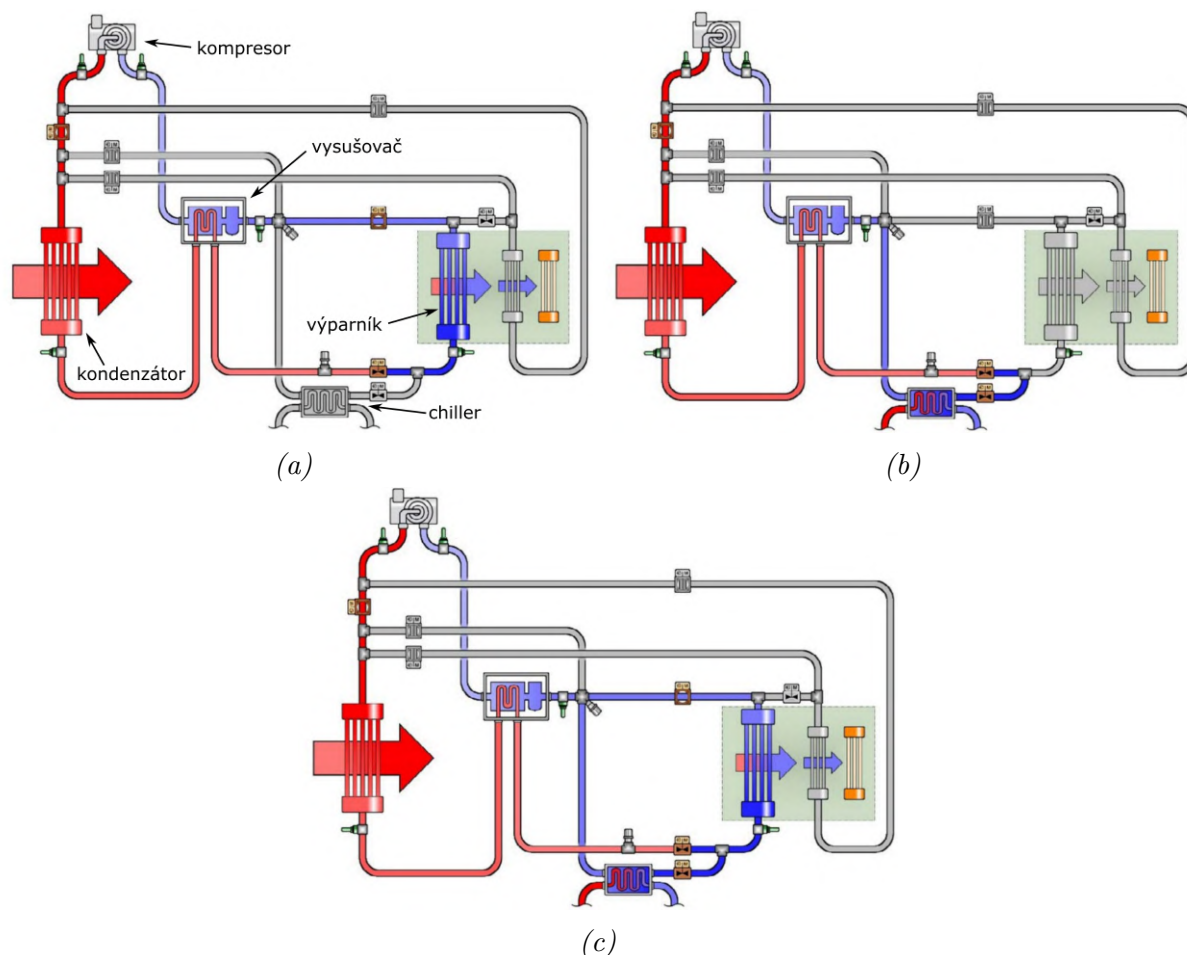
Kondenzátor

V prípade kvapalinového chladenia je za chladenie batérie zodpovedný kondenzátor, ktorý okrem toho slúži aj na reguláciu teploty v kabíne prostredníctvom klimatizačného okruhu.

Ak je vozidlo v režime, kedy batéria nepotrebuje chladenie, je otvorený iba okruh klimatizácie. Chladiivo v plynnom skupenstve prúdi cez kompresor, kde sa stlačením zvýši jeho teplota a pokračuje do kondenzátora, kde za zmeny skupenstva z plynného na kvapalné odovzdá teplo prúdiacemu vzduchu. Následne plyn expanduje v úzkej trubičke a expanznom ventile, prechádza výparníkom, kde ochladí vzduch prúdiaci do priestoru kabíny a cez vysušovač znova vstupuje do kompresora (obr. 2.3a) [11].

Ak je teplota batérie vysoká a je potrebné ju znížiť, otvorí sa ďalšia časť okruhu, kondenzát prúdi cez ďalší výmenník, tzv. "chiller", kde odoberie teplo kvapaline chladiacej batériu (obr. 2.3b) [11].

Môže byť teda otvorený iba okruh klimatizácie (obr. 2.3a), napr. pri nenáročnej jazde so zapnutou klimatizáciou, v prípade zvýšenej záťaže sú otvorené obidva okruhy zároveň (obr. 2.3c), alebo je otvorený iba okruh s “chillerom” (obr. 2.3b), napr. pri rýchlom nabíjaní a vypnutej klimatizácii.



Obr. 2.3: Schéma chladiaceho systému (a – otvorený okruh klimatizácie, b – otvorený okruh batérie, c – otvorené obidva okruhy) [11].

2.2. Chladienie motora

Počas behu elektromotora dochádza k premene elektrickej energie na mechanickú, čo sa nezaobíde bez určitých strát vo forme tepla. Príliš vysoké teploty môžu spôsobiť nižšiu účinnosť alebo v horšom prípade zničenie súčiastok motora. Preto by sa mala prevádzková teplota pohybovať približne v rozmedzí 40 °C až 60 °C [5].

Ďalším problémom je, že ak sú permanentné magnety rotora vystavené teplotám mimo vhodného rozsahu, dochádza k ich rýchlej demagnetizácii. Takáto opakovaná demagnetizácia môže spôsobiť trvalú demagnetizáciu a zlyhanie motora [12].

Okrem elektromotora vyžaduje chladenie aj samotná riadiaca elektronika. Obidva tieto systémy typicky zdieľajú spoločný chladiaci systém. Chladenie elektromotora a riadiacej elektroniky môžeme rozdeliť podobne ako v prípade batérií na dva typy: chladenie vzduchom a chladenie kvapalinou [5].

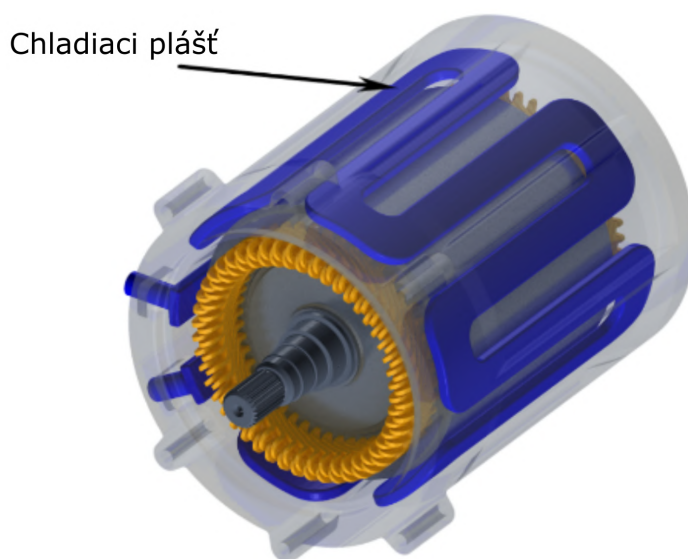
2.2.1. Vzduchové

Vzduchové chladenie sa spolieha na odvod tepla prostredníctvom vzduchu získaného z okolia za využitia prirodzenej alebo nútenej konvekcie s ventilátorom. Takto bývajú chladené malé motory s nízkym výkonom, ktorých tepelné straty nie sú vysoké a zvyčajne majú na povrchu rebrovanie slúžiace na zväčšenie teplovodivej plochy. Výhodami sú jednoduchosť a nízka hmotnosť, ale sú menej účinné a pri vyšších nárokoch na chladenie nemusia postačovať [5].

2.2.2. Kvapalinové

Na chladenie vysoko výkonných motorov sa zvyčajne používa kvapalinové chladenie. Chladičom obvykle býva etylénglykol, ktorý dokáže účinne fungovať pri prevádzkových teplotách od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]. Keďže merná tepelná kapacita kvapalného chladiča je výrazne nižšia než vzduchu, poskytuje dostatočný odvod tepla aj pri nízkych prietokoch.

Podobne ako pri batériovom chladení, aj tu sa často využíva tzv. chladiaci plášť (obr. 2.4), teda kanály s chladičom obklopujúce steny motora. Tieto systémy sa typicky skladajú z čerpadla, výmenníka a potrubia. Nevýhody sú rovnaké ako v prípade kvapalinového chladenia batérie [5].



Obr. 2.4: Chladiaci plášť elektromotora [13].

3. Prehľad literatúry popisujúcej recirkuláciu

Motorový priestor vozidla je geometricky zložitá oblasť, kde sú tepelné javy ovplyvnené prúdovým polom ťažko popísateľným experimentálnym prístupom. Aj napriek tomu bolo historicky vykonaných niekoľko praktických meraní, ktoré priniesli relevantné poznatky. V dnešnej dobe je už možné vďaka dostupnejšej a výkonnejšej výpočtovej technike pristupovať k tomuto problému numericky, čo sa stalo priemyselným štandardom v prostredí automobilového vývoja.

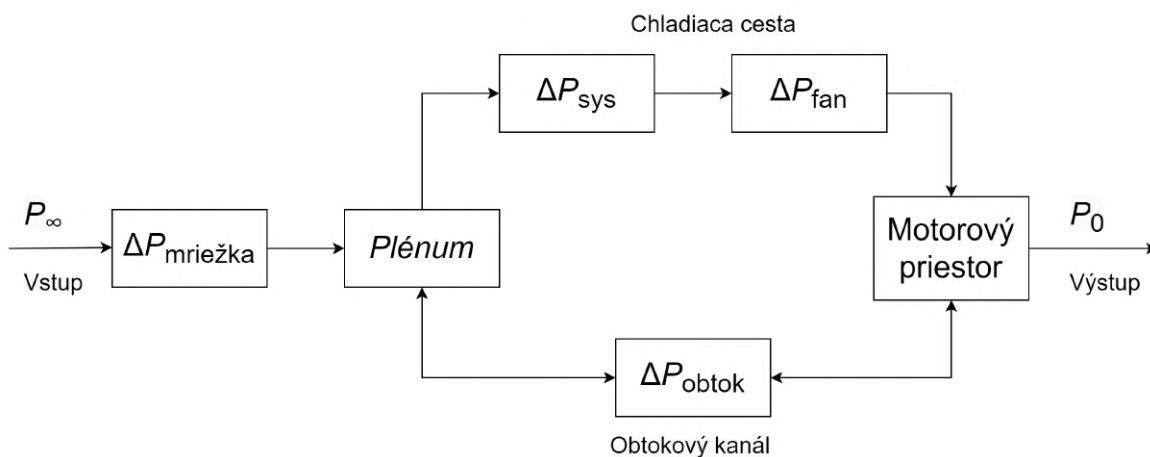
Jednou z dôležitých tém týkajúcej sa recirkulácie je samotná interakcia vzduchu s rôznymi komponentami motorového priestoru, ktorá vplýva na výslednú teplotu recirkulovaného vzduchu. V štúdiu [14] od Khaleda a spol. boli preto experimentálne posudzované teplotné vplyvy komponentov vo fáze konštantnej jazdy, vo fáze spomaľovania a vo fáze “thermal soak” (tzn. efekt nárastu teploty komponentov po zastavení), vždy v troch rôznych režimoch (rôzne rýchlosti jazdy, vetra, výkony a otáčky), a to pomocou meracej zostavy skladajúcej sa zo štyridsiatich termočlánkov a dvadsiatich prietokomerov. Vyhodnocovaná bola emisia a absorpcia tepla rôznych komponentov a bolo skúmané, ktorý mechanizmus (konvekcia alebo radiácia) je hlavnou príčinou tepelného toku. Týmto bol demonštrovaný významný vplyv nútenej konvekcie medzi komponentami motorového priestoru a bolo zhodnotené, že má výrazne vyšší podiel na celkovom tepelnom toku než radiácia.

Yang a spol. využili v [15] CFD simulácie na výpočet prietoku vzduchu chladiacou sústavou a mieru recirkulácie pri voľnobehu. Tu bolo zistené, že množstvo prietoku vzduchu je určované hlavne ventilátorom a vykazuje iba malé zmeny až do rýchlosti jazdy 18 km/h. Zároveň naň v týchto rýchlostiach nemá vplyv ani smer vetra. Vonkajšia recirkulácia je naopak na rýchlosť a smer vetra omnoho citlivejšia, a to hlavne pri fúkaní od zadnej časti vozidla smerom dopredu. V prípade spätného vetra s rýchlosťou -1 m/s bola teplota vzduchu na vstupe do kondenzátora 56,5 °C (čo predstavuje 16,5 °C nad teplotou okolia), zatiaľ čo v prípade vetra fúkajúceho spredu bola táto teplota len 49,5 °C (resp. 9,5 °C nad teplotou okolia). Ako možné riešenie problému recirkulácie bola skúmaná účinnosť úpravy geometrie v podobe utesnenia prúdových ciest v prednej časti vozidla (v režime spätného vetra), ktorej výsledkom bol významný pokles teploty vzduchu vstupujúceho do kondenzátora o 8,5 °C. Vo výsledku bolo dokázané, že CFD metódy sú vhodným nástrojom pre skúmanie vplyvu recirkulácie a že je možné zvýšiť účinnosť chladiaceho systému pomocou utesnenia recirkulačných ciest.

V roku 2005 vykonal Mathur v [16] prvý experiment na vyhodnotenie množstva vdychu prúdiaceho okolo jednotlivých výmenníkov, ktorého cieľom bolo nájsť metódy na zlepšenie vzduchového manažmentu a zlepšenie účinnosti chladenia pri voľnobehu a pomalej jazde. Po preskúmaní dvanástich sériových vozidiel zhodnotil, že väčšina z nich mala nedostatočný dizajn prednej časti motorového priestoru. Aj keď polovica z nich mala aplikovaný navádzač vzduchu, iba v jednom prípade neboli prítomné medzery medzi navádzačom a kondenzátorom. Ďalej na jednom z týchto vozidiel meral prietoky vzduchu v problémových oblastiach identifikovaných pomocou dymovej analýzy a zistil, že približne 15 % z celkového množstva vzduchu vstupujúceho do motorového priestoru obteká kondenzátor a až 24 % obteká vodný chladič.

Následne na rovnakom vozidle skúmal vplyv recirkulácie a účinnosť dodatočne pridaného navádzača a tesnení medzi výmenníkmi. Výsledkom v základnom stave bez úprav bolo zvýšenie teploty vzduchu na vstupe do kondenzátora o 29 °C oproti okolitej teplote, zatiaľ čo aplikáciou úprav sa podarilo znížiť túto teplotu o približne 15 °C.

Song a spol. v [17] popísal recirkuláciu pomocou jednoduchého modelu zobrazeného na obr. 3.1. Tým znázornil, že ak je rýchlosť vozidla pod určitým limitom, nápor vzduchu je príliš malý na vytvorenie pretlaku v oblasti medzi mriežkou a kondenzátorom (označenej ako plénium), čím vzniká podtlak vyvolaný ventilátorom, ktorý nasáva teplý vzduch do kondenzátora skrz prítomné obtokové kanály.



Obr. 3.1: Diagram prúdových ciest v motorovom priestore [17].

V [18] následne dospeli k podobným výsledkom ako štúdie spomenuté vyššie. Na vozidle bez tesnení namerali, že výkon klimatizácie začína pri postupnom spomaľovaní výrazne klesať už pri rýchlosti nižšej ako 30 km/h a do dosiahnutia úplného státia vzrástla teplota na vstupe do kondenzátora až na 28 °C nad teplotu okolia. S použitím navádzača a tesnení sa následne túto teplotu podarilo znížiť až o 14 °C.

Z preskúmaných štúdií vyplýva, že úprava geometrie motorového priestoru v podobe tesnení medzier a navádzača vzduchu medzi mriežkou a prvým výmenníkom sa javí ako efektívny spôsob redukcie vnútornej recirkulácie teplého vzduchu. Tieto opatrenia však neriešia problém vonkajšej recirkulácie, ktorá môže mať rovnako negatívny, prípadne ešte horší efekt na chladiaci výkon sústavy.

4. Prenos tepla

Na porozumenie toho, ako sa teplo prenáša medzi prúdiacim vzduchom a komponentami motorového priestoru je potrebná aspoň základná znalosť teórie prenosu tepla. Hlavným princípom prenosu tepla medzi dvomi médiami je druhý termodynamický zákon, ktorý tvrdí, že energia sa vždy prenáša z oblasti s vyššou teplotou do oblasti s nižšou teplotou a žiadny prenos tepla nenastáva, ak sú tieto dve teploty rovnaké. Existujú tri mechanizmy, ktorými sa teplo môže prenášať: kondukcia, konvekcia a radiácia.

Kondukcia

Prenos tepla kondukciou (inak povedané vedením) nastáva z dôvodu interakcie medzi susednými časticami s rôznymi energiami v médiu a môže sa vyskytovať v pevných látkach, kvapalinách aj plynoch. V kvapalinách a plynoch tento proces nastáva spôsobom, kde kondukciu vyvoláva náhodný pohyb molekúl, ktorý spôsobuje ich vzájomné zrážky a difúziu. V pevných látkach, kde sa molekuly nepohybujú takýmto spôsobom, vyvoláva kondukciu energia prenášaná voľnými elektrónmi a vibráciami molekúl v mriežke kryštálu.

Rychlosť prenosu tepla závisí na troch parametroch: geometrii, materiáli a teplotnom rozdieli. Čím väčšia plocha a teplotný rozdiel, tým viac energie sa preniesie cez médium. Materiálová vlastnosť, ktorá vyjadruje schopnosť materiálu prenášať teplo sa nazýva tepelná vodivosť (konduktivita). V jednorozmernom priestore je rýchlosť prenosu energie vyjadrená Fourierovým zákonom tepelnej vodivosti:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad } T, \quad (1)$$

kde \dot{Q} je tepelný tok, A je plocha na ktorej prebieha kondukcia, $\text{grad } T$ je teplotný gradient a λ je súčiniteľ tepelnej vodivosti.

Konvekcia

Konvekcia je mechanizmus, pri ktorom prenos energie nastáva medzi pevnou látkou a pohybujúcou sa tekutinou, v ktorej je ponorená. Na povrchu pevnej látky je rýchlosť pohybu tekutiny nulová a energia sa prenáša vedením. Ďalej od povrchu, kde rýchlosť tekutiny je nenulová, sa energia prenáša pohybom tekutiny. Čím vyššia je rýchlosť pohybu tekutiny, tým viac tepla sa prenáša medzi pevnou látkou a tekutinou.

Podľa hnacích síl vyvolávajúcich konvekciu ju možno rozdeliť na dva typy: nútená a prirodzená. Ak je pohyb tekutiny vyvolaný vonkajšou silou, napr. čerpadlom alebo ventilátorom, ide o nútenú konvekciu. Ak na tekutinu nevlývajú žiadne vonkajšie sily, pohyb je vyvolaný vztlakovými silami spôsobenými rozdielnymi hustotami a ide tak o prirodzenú konvekciu.

Rýchlosť prenosu tepla konvekciou sa dá vyjadriť rovnicou Newtonovho ochladzovacieho zákona, ktorá hovorí, že tepelný tok rastie priamo úmerne teplotnému rozdielu medzi jadrom obtekajúcej tekutiny a povrchom obtekanej steny:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_S - T_\infty), \quad (2)$$

kde \dot{Q} je tepelný tok, α je súčiniteľ prestupu tepla, A je plocha na ktorej dochádza k prenosu tepla, T_S je teplota povrchu steny a T_∞ je teplota v jadre tekutiny. Súčiniteľ prestupu tepla nie je skutočnou vlastnosťou tekutiny, tak ako tepelná vodivosť v prípade kondukcie, ale závisí na vlastnostiach tekutiny, pohybe tekutiny a geometrii povrchu.

Radiácia

Tretím mechanizmom prenosu tepla je radiácia (žiarenie), ktorá prenáša energiu pomocou elektromagnetického vlnenia, ktoré vyžarujú všetky telesá v dôsledku tepelného pohybu častíc v látke. Radiáciu je možno popísať Stefan-Boltzmannovým zákonom:

$$\dot{Q} = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot T^4, \quad (3)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konštanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), ϵ je emisivita povrchu, A je povrch telesa a T je teplota telesa. Emisivita popisuje ako veľmi sa teleso približuje takzvanému čiernemu telesu. Čierne teleso je idealizované teleso ktorého povrch vyžaruje radiáciu v maximálnom množstve a jeho emisivita je 1.

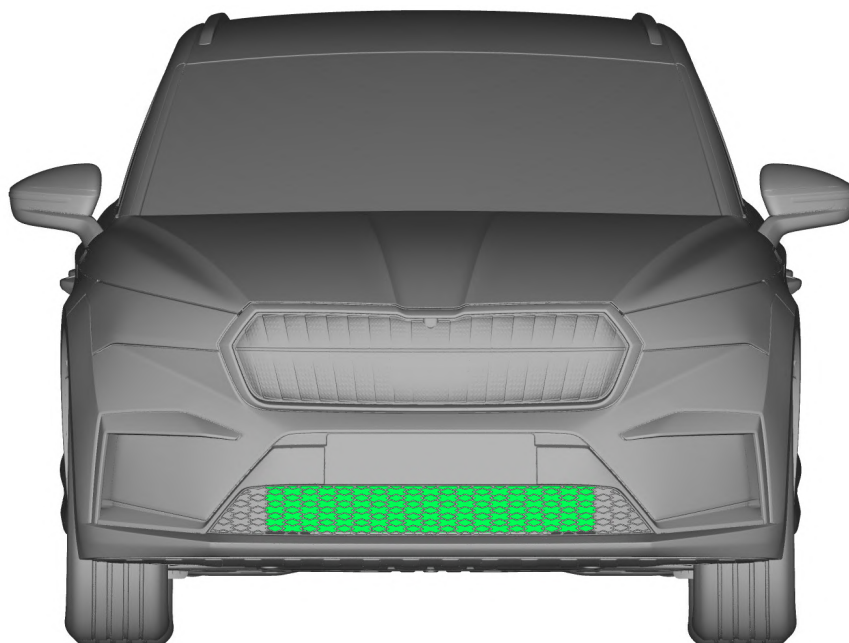
Ďalším faktorom, ktorý je potrebné vziať do úvahy, je množstvo žiarenia, ktoré môže byť pohltené. Telesá, okrem čierneho telesa, neabsorbujú všetku radiáciu energiu a jej množstvo popisuje tzv. absorptivita, ktorá je závislá na teplote a na vlnovej dĺžke.

5. Prúdové a tepelné vplyvy

Na konečný výkon chladiacej sústavy vplyva množstvo faktorov, ale nie všetky tieto faktory je možné spoľahlivo zachytiť a zahrnúť do pripravovaného výpočtového modelu. Preto je vhodné ich preskúmať a zhodnotiť, či je potrebné sa ich vplyvom zaoberať a či je k nim dostupný dostatok informácií.

5.1. Vstup do motorového priestoru

Hneď prvým faktorom, ktorý zohráva významnú úlohu v účinnosti chladiacej sústavy sú vstupné otvory motorového priestoru vo forme mriežky, pričom ich veľkosti a rozloženie sa medzi výrobcami líšia. Často sa dajú odlíšiť minimálne dve hlavné časti, a to mriežka v maske vozidla medzi svetlami a spodná mriežka ako súčasť nárazníka (obr. 5.1). Nie je to ale pravidlom a je bežné že tieto mriežky sú rozdelené na viac kusov alebo sú vizuálne prepojené do jedného veľkého celku.



Obr. 5.1: Vstupný otvor motorového priestoru.

Keďže sa výmenníky nenachádzajú vo voľnom prúde, je potrebné zaistiť vhodnú kombináciu veľkosti a umiestnenia otvorov tak, aby sa na výmenník dostalo čo najväčšie množstvo vzduchu, a aby rozloženie rýchlosti vzduchu na ploche výmenníka bolo čo najrovnomernejšie. K tomuto účelu sa často používajú tzv. navádzače vzduchu v podobe plastových dielov, ktoré vytvárajú akýsi tunel medzi otvormi mriežky a výmenníkom. Priveľká nerovnomernosť naprúdenia by mohla spôsobiť odchýlky od laboratórnych meraní charakteristík výmenníkov, ktoré sú uskutočňované vo veternom tuneli a sťažiť tak predikciu účinnosti chladiaceho systému v reálnej prevádzke.

Okrem rýchlostnej nerovnomernosti sa na výmenníkoch objavuje aj teplotná nerovnomernosť, spôsobená samotnou recirkuláciou. V závislosti od recirkulačných kanálov a umiestnenia otvorov mriežky má potom vzduch vstupujúci v rôznych častiach čelnej plochy výmenníka rôznu teplotu a znova tak spôsobuje rozdiely v charakteristikách oproti laboratórnym hodnotám.

Svoju úlohu tu zohrávajú aj vonkajšie podmienky. Počas horúcich letných dní môže rozpálená vozovka ohrievať vstupujúci vzduch, alebo naopak pri nízkej okolitej teplote sa vonkajší recirkulovaný vzduch ochladí, kým dorazí na vstup do motorového priestoru.

5.2. Chladiaci paket

Dôležitá je aj samotná geometria a umiestnenie výmenníkov. Musia byť dostatočne veľké aby zaistili spoľahlivé chladenie, ale zároveň dostatočne kompaktné aby sa zmestili do stiesneného priestoru plného ďalších komponentov a splnili nároky na montáž a servisovateľnosť. Okrem toho nesmú byť ničím zakryté aby ich naprúdenie bolo čo najoptimálnejšie.

Ich rozmery a charakteristiky potom spolu s typom, prietokom a teplotou použitého chladiaceho média rozhodujú o tom, koľko tepla sú schopné odvieť.

5.3. Výstup z motorového priestoru

Po prejdení všetkými výmenníkmi vzduch interaguje s rôznymi komponentami, od ktorých sa môže potenciálne ďalej zohriať, alebo naopak ohrievať chladnejšie komponenty a ovplyvňovať ich funkciu. V závislosti od zástavby sa dostáva späť na vstup do výmenníkov cez spomínané štrbiny v motorovom priestore (vnútorná recirkulácia) alebo putuje späť na mriežku chladiča vonkajšou cestou (vonkajšia recirkulácia). Miesta, ktorými sa vzduch dostáva von z motorového priestoru môžu zohrávať úlohu v závažnosti vonkajšej recirkulácie.

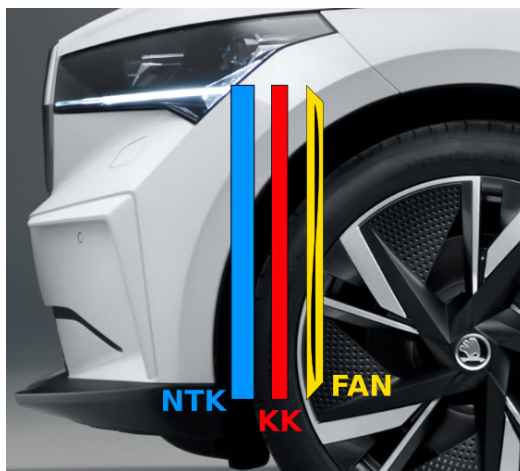
6. Analýza poskytnutých CFD výpočtov

Prvým krokom v tvorbe výpočtového modelu bola analýza existujúcich CFD výpočtov pre pochopenie prúdových javov v motorovom priestore skúmaného vozidla. Na základe toho je potom možné zostaviť prúdový diagram a nastaviť výpočet tak, aby odpovedal skutočnosti a zároveň porovnávať výstupy z modelu so základným stavom pri zmene jednotlivých parametrov.

6.1. Konfigurácia vozidla

Východiskovým modelom pre analýzy bolo vozidlo Škoda Enyaq – elektromobil typu SUV, ktorého konfigurácia bola pre účely tohto výskumu upravená pre lepšie zachytenie javu recirkulácie.

Chladiaci paket vozidla (obr. 8.3) pozostáva z dvoch výmenníkov a ventilátora. Prvým výmenníkom je vodný chladič s označením NTK (z nem. Niedertemperaturkühler = nízkoteplotný chladič) a jeho úlohou je chladiť elektromotor a ďalšiu elektroniku. Druhým výmenníkom je kondenzátor označený KK (z nem. Klimmakondensator), ktorý je súčasťou klimatizačného okruhu pre kabínu posádky a zároveň pomáha pri chladení batérie v určitých režimoch.



Obr. 6.1: Chladiaci paket vozidla Škoda Enyaq.

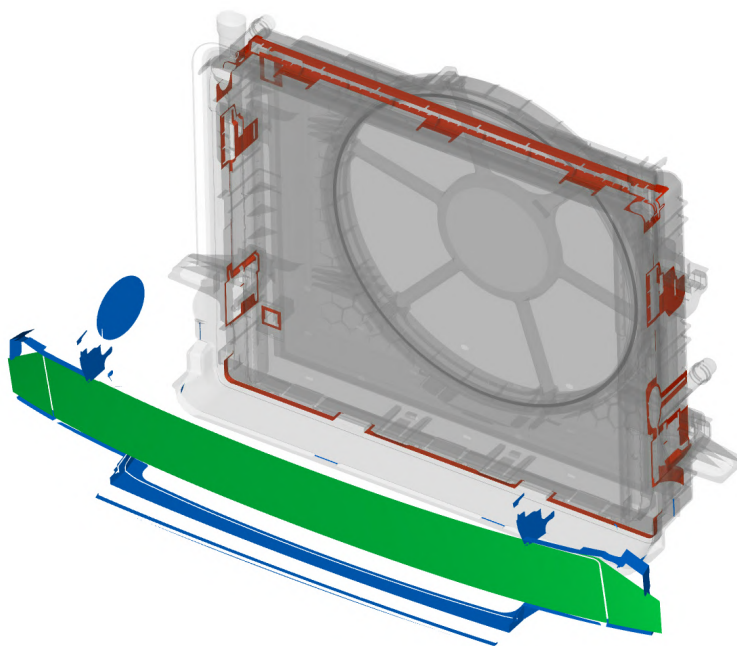
6.2. Pozorované režimy

Ako hlavné režimy záujmu boli určené dva stavy: nabíjanie vozidla v bezvetří a nabíjanie vozidla pri spätnom vetre s rýchlosťou 10 km/h. Dôvodom tohto výberu bolo spozorované problémové správanie chladiaceho systému v týchto režimoch pri reálnych experimentoch. Ako bolo spomenuté vyššie, pri státi a veľmi nízkych rýchlostiach je hlavnou hnacou silou prúdu vzduchu ventilátor, ktorý vytvára oblasť nízkeho tlaku a spôsobuje tak nasávanie vzduchu späť do systému.

Výsledky CFD výpočtov oboch týchto režimov boli poskytnuté pre účely tohto výskumu firmou Škoda Auto a.s. Pomocou softvéru na post-processing bolo skúmané prúdové pole, boli určené dôležité prúdové cesty a získané hodnoty hmotnostných prietokov vzduchu na rôznych vyhodnocovacích plochách. Vďaka funkcii pasívneho skaláru bolo taktiež vyhodnotené konkrétne množstvo čerstvého a recirkulovaného vzduchu na oboch výmenníkoch.

6.3. Vyhodnotenie

Na obr. 6.2 sú znázornené vyhodnocovacie plochy reprezentujúce miesta, na ktorých vzduch obteká chladiaci paket. Celkové hmotnostné prietoky týmito vyhodnocovacími plochami sú v tabuľke 6.1. *Mriežka* označuje vstup do motorového priestoru, *NTK* je čelná plocha vodného chladiča a *KK* čelná plocha kondenzátora. Zvyšné plochy označujú štrbiny relevantné pre recirkuláciu na jednotlivých výmenníkoch, kde predpona *NTK-* označuje plochy zodpovedné za recirkuláciu na vodnom chladiči a predpona *KK-* tie zodpovedné za recirkuláciu na kondenzátore. Na každej z nich je vyhodnotený tok záporný, čo znamená, že vzduch prúdi proti smeru normály každej plochy. Po kontrole orientácie normál bolo potvrdené, že v každom prípade prúdi vzduch v smere pred výmenníky a ide tak o vnútornú recirkuláciu.



Obr. 6.2: Vyhodnocovacie plochy pre meranie prietoku (zelená – mriežka, modrá – NTK-rec, červená – KK-rec).

Aj napriek tomu, že pri spätnom vetre s rýchlosťou 10 km/h do motorového priestoru vstupuje zvonku o 0,0174 kg/s menej vzduchu, na vstupe do vodného chladiča je tento rozdiel iba 0,0042 kg/s. Dôvodom tohto rozdielu je väčšie množstvo vnútornej recirkulácie v prípade spätného vetra.

Pri porovnaní prietokov vzduchu vodným chladičom a kondenzátorom je v režime 0 km/h ich rozdiel 0,0725 kg/s a v režime -10 km/h rozdiel 0,0736 kg/s. To znamená, že vnútorná recirkulácia na kondenzátore je v oboch režimoch takmer totožná.

Na plochách *NTK-left-02*, *NTK-right* a *NTK-right-02* bol vyhodnotený nulový prietok, a je možné ich považovať za nevýznamné a nebudú v ďalšej analýze vystupovať. Pre lepšiu prehľadnosť sú v tabuľke 6.2 relevantné plochy zoskupené do dvoch častí: *NTK-rec* a *KK-rec*. Vyššia hodnota recirkulácie na vodnom chladiči v prípade spätného vetra a rovnaké hodnoty recirkulácie na kondenzátore dokazujú vyššie uvedené predpoklady.

Tab. 6.1: Hmotnostné toky jednotlivými vyhodnocovacími plochami.

Vyhodnocovacia plocha	Hmotnostný tok [kg/s]	
	0 km/h	-10 km/h
mriežka	0,7580	0,7406
NTK	0,8983	0,8941
KK	0,9708	0,9677
NTK-left-02	0	0
NTK-lower-02	-0,0008	-0,0009
NTK-lower-03	-0,0320	-0,0344
NTK-lower-04	-0,0015	-0,0016
NTK-lower-05	-0,0316	-0,0349
NTK-lower-06	-0,0318	-0,0344
NTK-lower-07	-0,0014	-0,0016
NTK-lower-08	-0,0317	-0,0348
NTK-right	0	0
NTK-right-02	0	0
KK-left	-0,0428	-0,0430
KK-lower	-0,0352	-0,0347
KK-right	-0,0445	-0,0444
KK-upper	-0,0444	-0,0449

V tabuľke 6.3 sú vpísané hodnoty prietoku čerstvého a recirkulovaného vzduchu na oboch výmenníkoch, ktoré boli získané pomocou funkcie pasívneho skaláru. Pomocou týchto a predchádzajúcich hodnôt môžeme vypočítať, aký podiel recirkulovaného vzduchu tvorí vonkajšia, resp. vnútorná recirkulácia.

Tab. 6.2: Zoskupenie významných plôch.

Skupina	Hmotnostný tok [kg/s]	
	0 km/h	-10 km/h
NTK-rec	-0,1308	-0,1425
KK-rec	-0,1669	-0,1669

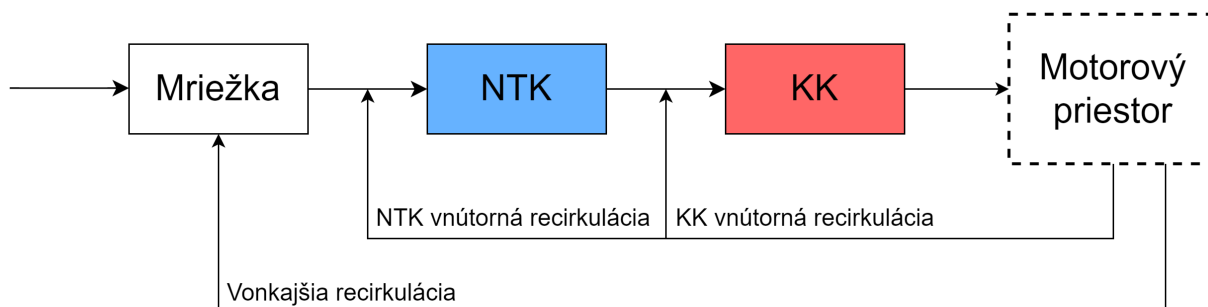
V režime 0 km/h pripadá na celkovú recirkuláciu na vodnom chladiči 0,2539 kg/s, z čoho 0,1308 kg/s tvorí vnútorná recirkulácia (tab. 6.2). To znamená, že 0,1231 kg/s pripadá na vonkajšiu recirkuláciu. Analogicky je možné dospieť k hodnotám pre režim -10 km/h.

Prietok vzduchu kondenzátorom má pri 0 km/h hodnotu 0,9708 kg/s. Odčítaním prietoku vodným chladičom získame hodnotu vnútornej recirkulácie na kondenzátore 0,0725 kg/s, čo je iba 43,4 % z prietoku vyhodnocovacími plochami *KK-rec* v tab. 6.2. Príčinou tohto rozdielu je fakt, že nie všetok vzduch, ktorý pretečie týmito vyhodnocovacími plochami sa dostane na vstup do výmenníka. Tento jav je vo výslednom výpočtovom modeli zahrnutý.

Tab. 6.3: Hodnoty čerstvého a recirkulovaného vzduchu na výmenníkoch.

Vyhodnocovacia plocha	Hmotn. tok [kg/s]		Hmotn. tok [%]	
	0 km/h	-10 km/h	0 km/h	-10 km/h
NTK-fresh	-0,6460	-0,5598	71,8	62,6
NTK-reentering	-0,2539	-0,3341	28,2	37,4
KK-fresh	-0,6554	-0,5696	67,1	58,9
KK-reentering	-0,3213	-0,3979	32,9	41,1

Všetky vypočítané hodnoty prietokov, ktoré vstupujú do finálneho modelu sú zhrnuté v tabuľke 6.4 a na obrázku 6.3 je znázornený prúdový diagram pre lepšiu vizualizáciu týchto parametrov.



Obr. 6.3: Prúdový diagram.

Tab. 6.4: Výsledné prietoky relevantné pre model.

	Hmotn. tok [kg/s]		Hmotn. tok [%]	
	0 km/h	-10 km/h	0 km/h	-10 km/h
mriežka	0,7580	0,7406	(100)	(100)
vonkajšia recirkulácia	0,1231	0,1916	16,2*	25,9*
NTK	0,8983	0,8941	(100)	(100)
NTK vnút. recirkulácia	0,1308	0,1425	14,6 [†]	15,9 [†]
KK	0,9708	0,9677	(100)	(100)
KK vnút. recirkulácia	0,0725	0,0736	7,5 [‡]	7,6 [‡]

*Vztiahnuté k prietoku mriežkou.

[†]Vztiahnuté k prietoku NTK.

[‡]Vztiahnuté k prietoku KK.

7. Výpočtový model

Hlavnou úlohou modelu je vytvoriť nástroj vhodný pre použitie pri vývoji na odhadovanie správania chladiaceho systému už v prvotnej fáze a uskutočňovať tak lepšie informované rozhodnutia pre ďalší postup. Nástroj musí byť zrozumiteľný a primerane jednoduchý na použitie a zároveň poskytovať dostatočne presný odhad, treba však brať do úvahy obmedzenú dostupnosť parametrov vstupujúcich do výpočtu. V aktuálnej fáze vývoja nástroja výpočty vychádzajú iba z jedného CFD výpočtu pre každý režim a každá ďalšia zmena vstupného parametru je tak zatažená ďalšou chybou. Nie je teda vylúčené, že pri navolení istej kombinácie parametrov môže dôjsť k získaniu nereálnych a nefyzikálnych výsledkov.

7.1. Dostupné údaje a zahrnutie vplyvov

V prvom kroku tvorby nástroja je potrebné zistiť, aké vstupné parametre a údaje budú k dispozícii, a na základe toho rozhodnúť o možnosti zahrnutia vplyvov zhrnutých v podkapitole 5. Keďže táto práca vychádza zo zadania úlohy od Škoda Auto a.s., je treba vziať do úvahy obmedzené množstvo poskytnutých dát z interných dôvodov (ako sú ochrana vlastníctva a know-how, či nedostupnosť meraní).

7.1.1. Mechanizmy prenosu tepla

Jedným z prvotných rozhodnutí bolo určiť, či bude model schopný zachytiť tri základné mechanizmy prenosu tepla, resp. v akej forme. Pre každý z týchto mechanizmov je v prvom rade dôležité poznať teplotu povrchov komponentov motorového priestoru nachádzajúcich sa v blízkosti chladiaceho systému.

Vplyv prenosu tepla vedením bol označený ako zanedbateľný. Veľká časť konštrukcie a krytov komponentov je vyrobená z plastu, ktorý je z princípu slabým teplelným vodičom. Okrem toho, bezprostredný kontakt komponentov chladiaceho systému s komponentami vyššej teploty je minimálny až neexistujúci.

Určenie prenosu tepla radiáciou by okrem jednotlivých teplôt vyžadovalo poznať veľkosť povrchov komponentov s vysokou teplotou, emisivitu materiálov komponentov vyžarujúcich teplo a absorbtivitu materiálov, z ktorých sú vyrobené časti chladiaceho systému. Tieto údaje neboli v čase písania práce dostupné. Z tohto dôvodu bolo po konzultácii so Škoda Auto a.s. rozhodnuté o nezahrnutí týchto mechanizmov do modelu, ale boli prediskutované potenciálne možnosti dodania chýbajúcich vstupov pre ďalšie spresňovanie výpočtu v budúcnosti.

Spôsob zahrnutia konvekcie bol navrhnutý tak, že po zhodnotení dostupných vstupných údajov bolo rozhodnuté o možnosti výpočtu prírastku teploty vzduchu pri prechode jednotlivými výmenníkmi a následnom spočítaní jeho premiešania so studeným vzduchom pred vstupmi do výmenníkov podľa množstva recirkulácie.

7.1.2. Geometrické parametre

Príkladom geometrických parametrov vstupujúcich do výpočtu sú napríklad veľkosti otvorov mriežky a štrbín okolo chladiaceho paketu. Keďže do výpočtov vstupujú hmotnostné prietoky vzduchu, ktoré závisia na veľkosti otvorov, budú tieto použité namiesto veľkosti jednotlivých otvorov. S tým sa spájajú ďalšie nepresnosti, pretože bez dodatočných 3D výpočtov nie je možné presne predpovedať, ako zmena veľkosti otvoru kvantitatívne ovplyvní prietok vzduchu týmto otvorom. Táto analýza bude v budúcnosti predmetom ďalšieho skúmania.

7.1.3. Nerovnomernosť naprúdenia

Z hľadiska nerovnomernosti naprúdenia výmenníka sa dajú rozlíšiť dva druhy: rýchlostná a teplotná nerovnomernosť. Rýchlostná nerovnomernosť znamená rôznu rýchlosť prúdiaceho vzduchu v rôznych častiach výmenníka. To znamená, že v každej z týchto častí sa mierne líši množstvo preneseného tepla medzi chladivom a vzduchom. Tento vplyv bol spočítaný princípom diskretizácie, kde bola plocha výmenníka rozdelená na sieť menších plôch, spočítané zmeny teploty vzduchu pri prechode každou touto plochou a nakoniec sčítané jednotlivé prírastky dohromady. Po získaní výsledku bolo zhodnotené, že tento vplyv je zanedbateľný a nebude ďalej zahrnutý.

Teplotná nerovnomernosť znamená, že vduch prúdiaci výmenníkom má v každom mieste výmenníka inú vstupnú teplotu. Keďže výpočtový model pracuje za predpokladu rovnakého výkonu a rovnakej teploty chladiiva v každom mieste výmenníka, konkrétne zmeny výkonov z hľadiska rozdielnych teplôt vzduchu a chladiiva v týchto miestach by boli nepresné. Pre zjednodušenie je tento jav nahradený prostredníctvom prostého miešania prúdov dvoch známych hmotnostných prietokov a dvoch známych teplôt.

7.1.4. Vonkajšie podmienky

Z vonkajších podmienok model zachytáva teplotu okolitého vzduchu, ktorú si užívateľ môže zvoliť. Vplyvy ako rozpálené kusy karosérie boli zhodnotené ako zanedbateľné a zo strany Škoda Auto a.s. bol na základe ich skúseností z meraní ako zanedbadelný označený aj vplyv teploty vozovky na recirkulovaný vzduch.

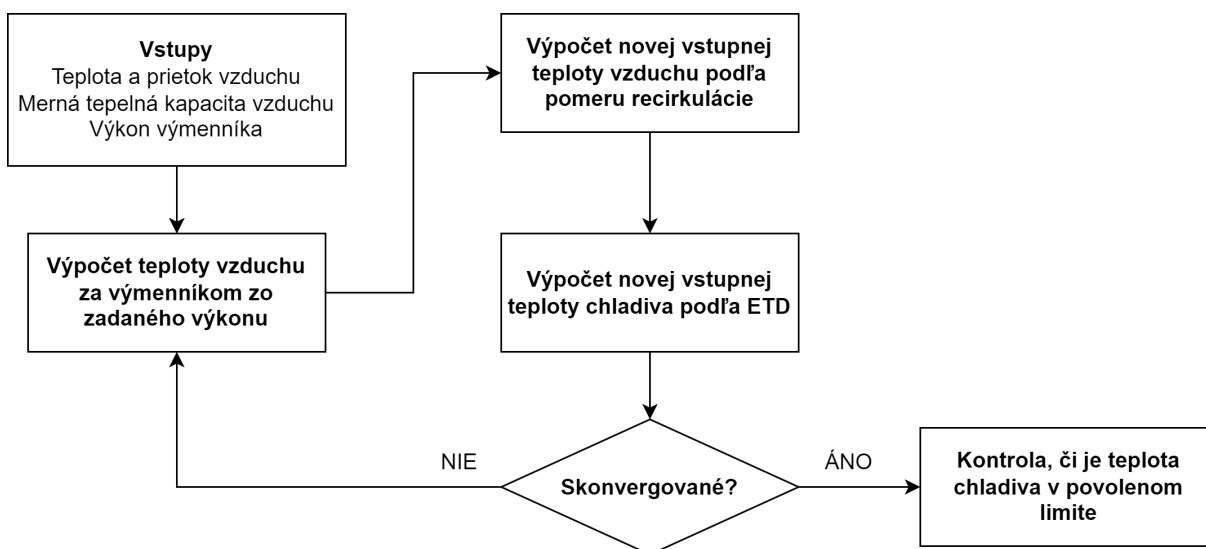
7.2. Výpočet

Model je postavený na iteračných výpočtoch. V počiatočnom stave nie je známy vplyv recirkulácie na teploty a výkony, ale zo známych prietokov recirkulovaného vzduchu z dostupného CFD výpočtu sa v jednotlivých iteráciách sleduje zmena teploty vzduchu. Ak je rozdiel tejto hodnoty vo dvoch po sebe nasledujúcich iteráciách menší než nastavený limit, tak sa to považuje za konečný stav.

7.2.1. Vodný chladič

Výpočet vodného chladiča je založený na predpoklade, že jeho výkon sa udržiava na konštantnej hodnote pri zachovaní konštantného *ETD* (z angl. Entering Temperature Difference = rozdiel vstupnej teploty chladiča a vzduchu). Chladič teda v prípade existencie teplotného rozdielu odvádza vždy rovnaké množstvo tepla, ale na inej teplotnej hladine.

Algoritmus výpočtu je znázornený na obr. 7.1. Pre jednoduchosť popisu výpočtu je popísaný samostatne, bez zahrnutia kondenzátora. V prvej iterácii sa zo známych vstupných veličín (teplota, prietok a merná tepelná kapacita vzduchu a výkon chladiča) vypočíta teplota vzduchu za chladičom. Tento vzduch sa cez recirkulačné cesty dostáva naspäť na jeho vstup, kde sa z pomeru čerstvého a recirkulovaného vzduchu získaného v predchádzajúcej CFD analýze vypočíta nová vstupná teplota vzduchu. Táto znova vstupuje do výpočtu výstupnej teploty za chladičom a proces sa opakuje, až kým nie je dosiahnutá konvergencia (tzn., že rozdiel výslednej hodnoty teploty vzduchu vo dvoch po sebe nasledujúcich iteráciách nie je väčší ako 0,001 °C).



Obr. 7.1: Diagram výpočtu vodného chladiča.

7.2.2. Kondenzátor

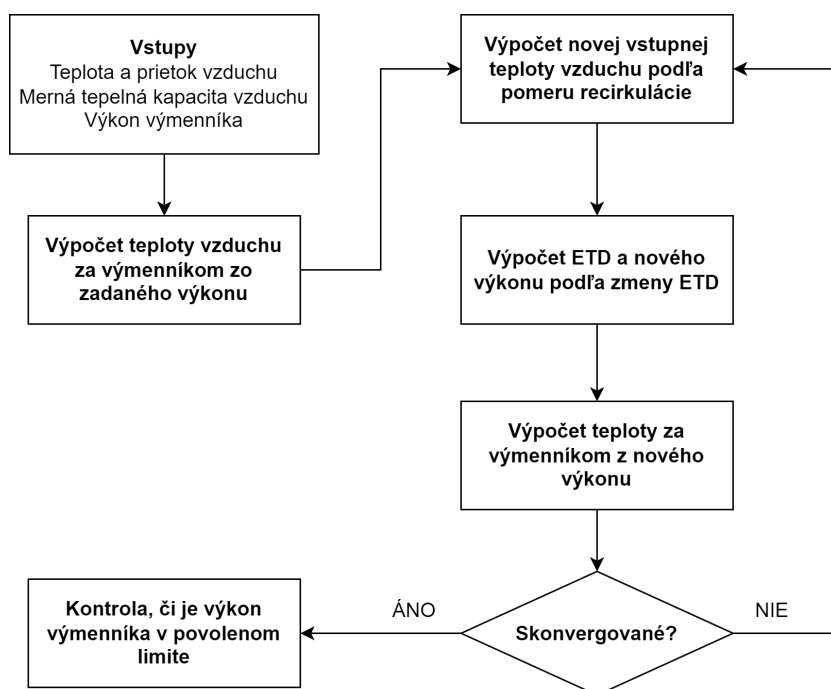
Pri výpočte kondenzátora sa uvažuje schopnosť okruhu udržiavať konštantnú teplotu plynnej fázy na vstupe do kondenzátora. Pri recirkuláciou vyvolanom zvýšení teploty vzduchu pred kondenzátorom poklesne hodnota *ETD* a priamo úmerne tomu poklesne aj výkon výmenníka. Algoritmus výpočtu je na obr. 7.2. V prvom kroku vypočítaná výstupná teplota vzduchu pomocou vstupných údajov a počiatočného výkonu. Následne sa zo známeho pomeru studeného a recirkulovaného vzduchu získa nová vstupná teplota a vypočíta sa pokles *ETD* oproti predchádzajúcej iterácii pomocou rovnice

$$E = \frac{ETD_i}{ETD_{i-1}}, \quad (4)$$

kde E je pomer poklesu, index i označuje aktuálnu iteráciu a $i-1$ predchádzajúcu iteráciu. Z tohto pomeru sa vypočíta nový výkon výmenníka Q_i pomocou rovnice

$$Q_i = Q_{i-1}E, \quad (5)$$

kde Q_i je výkon v aktuálnej a Q_{i-1} výkon v predchádzajúcej iterácii. Nový výkon vstupuje do výpočtu výstupnej teploty vzduchu v aktuálnom kroku a tento cyklus sa opakuje do konvergenencie.



Obr. 7.2: Diagram výpočtu kondenzátora.

Vo výslednom modeli sú tieto dva algoritmy spojené do jedného celku, kde výstupný vzduch z vodného chladiča figuruje ako “čerstvý” vzduch na vstupe do kondenzátora a výstupný vzduch z kondenzátora vstupuje pred vodný chladič a kondenzátor ako recirkulovaný vzduch.

7.3. Uživatelské rozhranie

Aby bol nástroj jednoducho použiteľný ktorýmkoľvek členom vývojového tímu bez nutnosti znalostí rôznych výpočtových softvérov, bolo potrebné vytvoriť prehľadné a zrozumiteľné grafické užívateľské rozhranie (GUI - Graphical User Interface). Pre tento účel bol použitý programovací jazyk Python z dôvodu jeho jednoduchosti, flexibility a množstva podporovaných knižníc.

V rámci Pythonu existuje niekoľko modulov na vytváranie GUI, pri čom každý z nich má svoje výhody a nevýhody [20, 21]:

Tkinter

Tkinter je súčasťou štandardnej knižnice Pythonu, čo znamená, že je k dispozícii vo väčšine distribúcií Pythonu bez potreby ďalšej inštalácie.

Výhody

- + Jednoduchosť.
- + Dostupnosť podpory a dokumentácie.
- + Bez nutnosti ďalšej inštalácie.

Nevýhody

- Limitovaná funkcionálnosť.
- Zastaralý vzhľad.

PyQt

PyQt je väzba multiplatformového frameworku Qt, ktorý poskytuje široké spektrum nástrojov na tvorbu moderných aplikácií. *PyQt* kombinuje jednoduchosť Pythonu a výkonnosť Qt, čo z neho robí veľmi populárny nástroj pre vývoj komplexného GUI. Vďaka nástroju *QtDesigner* je navyše možné vytvárať aplikácie prístupom “drag-and-drop”.

Výhody

- + Všestrannosť a prispôsobiteľnosť.
- + Veľké množstvo funkcií.
- + Moderný vzhľad.
- + Podpora väčšiny operačných systémov.
- + Nástroj *QtDesigner*.

Nevýhody

- Prudká krivka učenia.
- Nutnosť dodatočnej inštalácie.
- Horšia dostupnosť dokumentácie.

Kivy

Kivy je multiplatformový framework na vytváranie intuitívnych GUI, ktorý má za cieľ byť jednoduchý, plynulý a rýchly.

Výhody

- + Stačí jeden kód pre všetky platformy.
- + Plynulosť.
- + Dotykový vstup a gestá.

Nevýhody

- Nenatívny vzhľad.
- Veľkosť balíka.
- Slabá podpora.
- Menej dostupná dokumentácia.
- Nutnosť dodatočnej inštalácie.

wxPython

wxPython je balík pre vytváranie natívne vyzerajúcich aplikácií pre rôzne platformy.

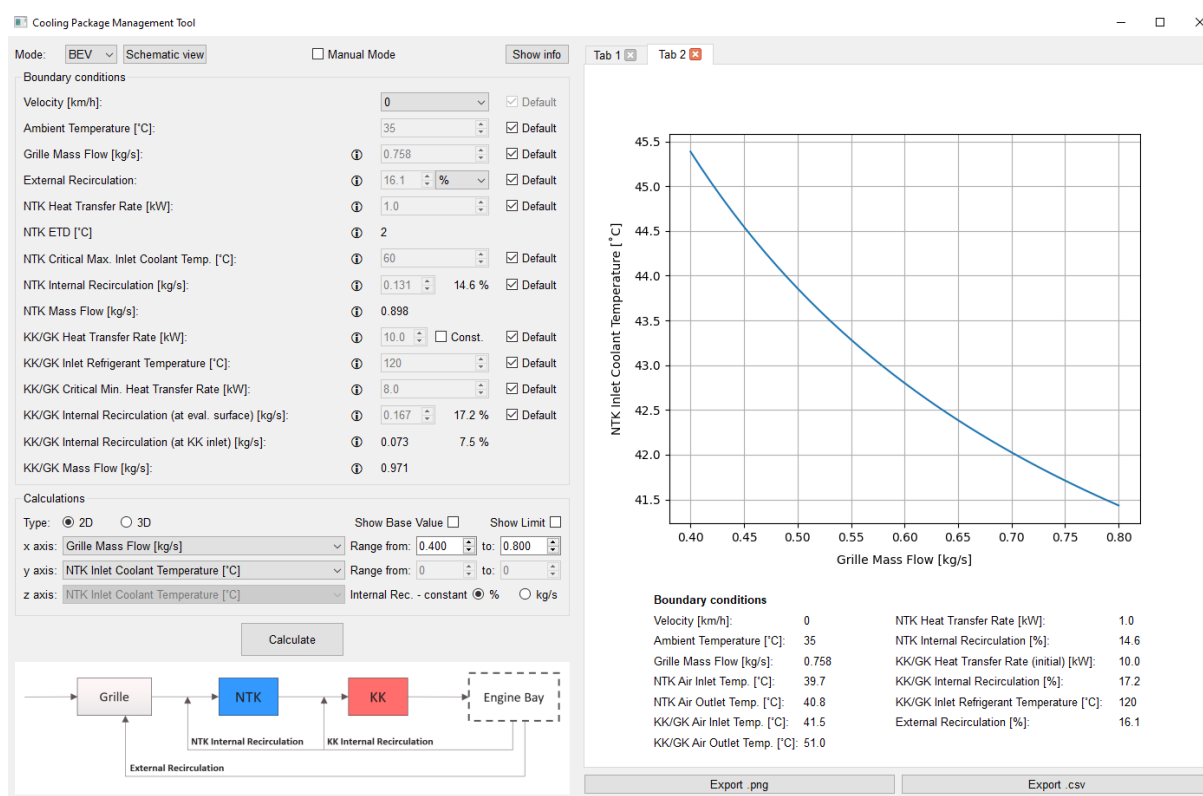
Výhody

- + Veľké množstvo funkcií.
- + Natívny vzhľad.
- + Veľká a aktívna komunita.

Nevýhody

- Prudká krivka učenia.
- Slabšia prispôbitelnosť.
- Menej dostupná dokumentácia.
- Nutnosť dodatočnej inštalácie.

Pre účely tejto práce bol zvolený modul *PyQt*, pre jeho všestrannosť, moderný vzhľad a prispôbitelnosť. Na vizuálny návrh bol použitý nástroj *QtDesigner*, ktorý ponúka jednoduchý spôsob ako rozmiestniť jednotlivé prvky okamžite bez nutnosti písania a kompilovania kódu. Funkcie jednotlivých prvkov, ako aj samotný výpočet, boli následne naprogramované pomocou Pythonu. Výsledný vzhľad vytvoreného rozhrania je na obr. 7.3.



Obr. 7.3: Uživatelské rozhranie vytvoreného modelu.

7.4. Citlivostná analýza

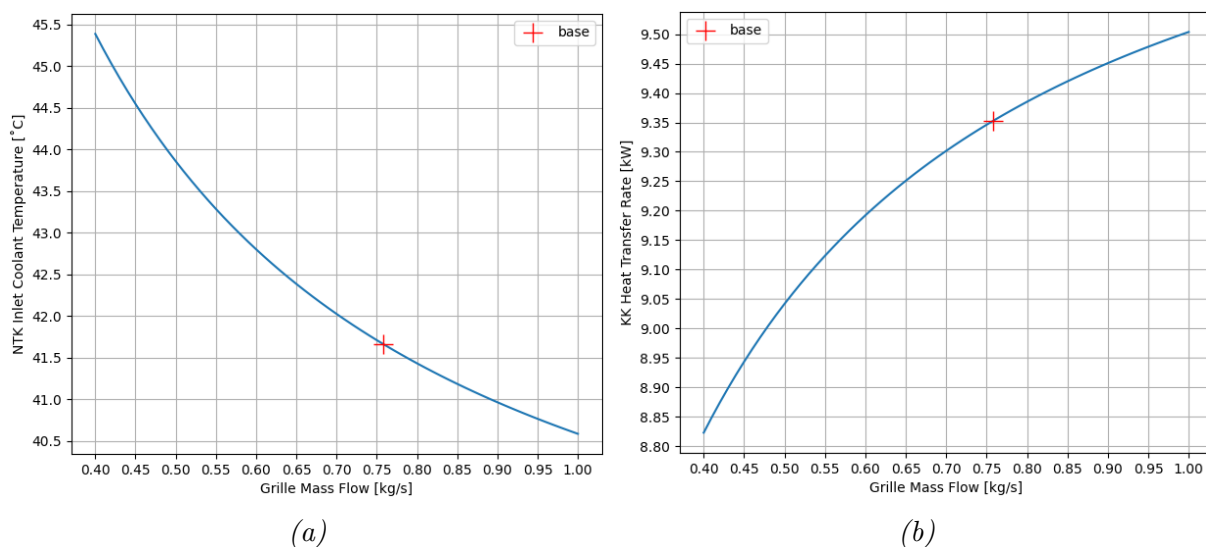
V tejto podkapitole sú znázornené závislosti sledovaných výstupných veličín na zadaných vstupných parametroch. Pre všetky uvedené analýzy bola zadaná teplota okolia 35 °C, výkon vodného chladiča 1 kW, *ETD* na vodnom chladiči 2 °C, počiatočný výkon kondenzátora 10 kW a teplota kondenzátu na vstupe do kondenzátora 120 °C. Červený bod s označením “base” na grafoch vyjadruje základný stav odpovedajúci výsledkom CFD analýzy.

7.4.1. Prietok vzduchu mriežkou

Pri návrhu chladiaceho systému je jedným zo základných požiadavkov zaistenie dostatočného množstva vzduchu vstupujúceho do výmenníkov pri zachovaní čo najmenšieho celkového odporu vzduchu - veľkosť otvorov mriežky by teda mala zostať čo najmenšia.

Problémom pri predikcii správania systému v závislosti na zmene množstva privádzaného vzduchu je spôsob, ako odhadnúť vplyv na vnútornú a vonkajšiu recirkuláciu. Ideálnym riešením by bolo vykonať väčší počet CFD výpočtov, vždy s odlišnou veľkosťou mriežky, a popísať zmeny na základe týchto výsledkov.

V tomto prípade je však dostupný iba jeden CFD výpočet, a preto bol zvolený dvojaký prístup s možnosťou voľby v grafickom rozhraní. Prvou voľbou je zachovanie konštantného percentuálneho podielu oboch typov vnútornej recirkulácie. Pri zmene absolútnej hodnoty prietoku vzduchu na výmenníku je tak zachovaný pomer studeného a recirkulovaného vzduchu podľa základného stavu. Druhou voľbou je zachovanie konštantných absolútnych hodnôt recirkulácie v kg/s. Pri zmene prietoku výmenníkom sa vtedy adekvátne mení pomer čerstvého a recirkulovaného vzduchu.

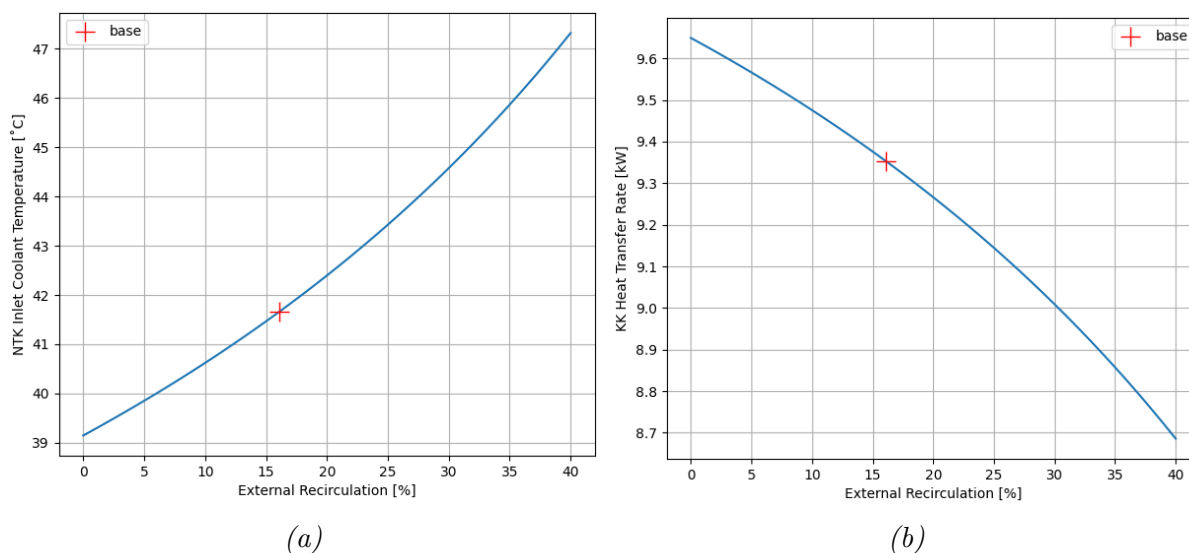


Obr. 7.4: Závislosť teploty chladiva vo vodnom chladiči (a) a výkonu kondenzátora (b) na prietoku vzduchu mriežkou.

Na obr. 7.4 je graf závislosti výstupných veličín na prietoku vzduchu mriežkou pri zachovaní konštantného percentuálneho podielu recirkulácií. S klesajúcim prietokom vzduchu rastie teplota chladiva vo vodnom chladiči a zároveň klesá výkon kondenzátora. Dôvodom je to, že pri nižšom prietoku je teplota vzduchu po prechode výmenníkom (a teda aj teplota recirkulovaného vzduchu) pri zachovaní konštantného výkonu vyššia, čo znamená väčší negatívny dopad na účinnosť systému. Zároveň čím nižší je hmotnostný prietok vzduchu, tým prudší je nárast teploty chladiva, resp. pokles výkonu kondenzátora.

7.4.2. Vonkajšia recirkulácia

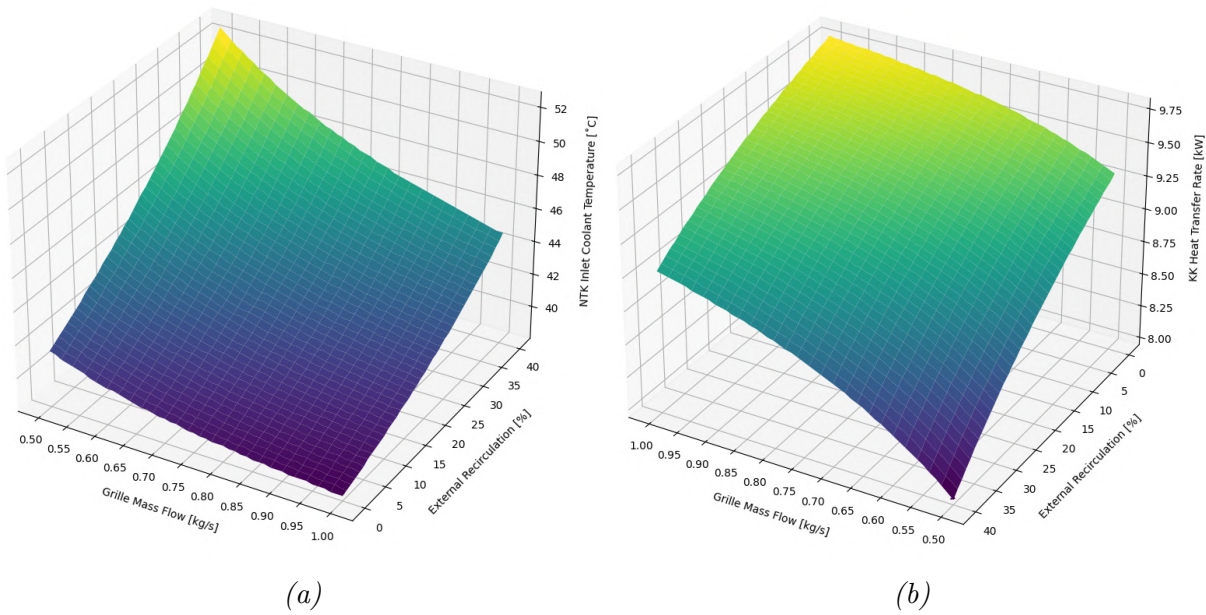
Vonkajšia recirkulácia je vyhodnotená na mriežke ako percentuálny podiel recirkulovaného vzduchu voči celkovému prietoku mriežkou. Pri návrhu vozidla a chladiaceho systému treba dbať na to, že pri zväčšovaní otvoru mriežky a získavaní tak väčšieho prietoku vzduchu za účelom lepšieho chladenia zároveň môže znamenať výraznejšie nasávanie recirkulovaného vzduchu pri státi. Dopad tohto efektu je viditeľný na obr. 7.5 a obr. 7.6.



Obr. 7.5: Závislosť teploty chladiva vo vodnom chladiči (a) a výkonu kondenzátora (b) na vonkajšej recirkulácii.

Pri štandardnom prietoku vzduchu mriežkou (0,76 kg/s; hodnota získaná z CFD) je pri odstránení vonkajšej recirkulácie potenciálne zníženie teploty chladiva vo vodnom chladiči až o 2,4 °C a zvýšenie výkonu kondenzátora o 0,3 kW (obr. 7.5). Aj keď je úplné odstránenie vonkajšej recirkulácie nepravdepodobné, už pri jej znížení z pôvodných 16 % na hodnotu 10 % môže byť pokles teploty chladiva o 1 °C, resp. nárast výkonu kondenzátora o 0,12 kW vítaným zlepšením.

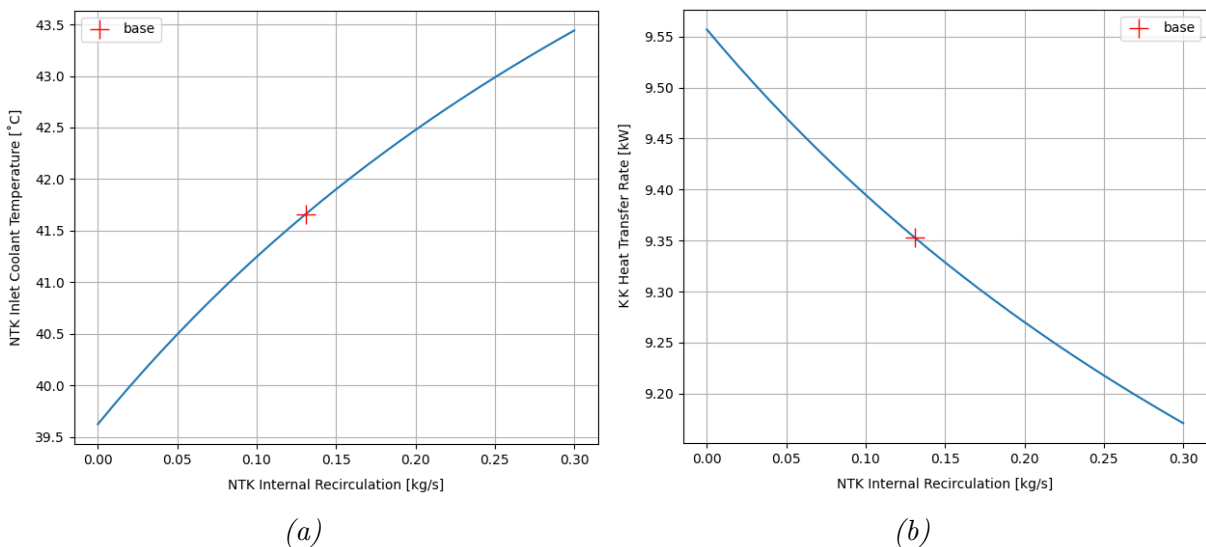
Na obr. 7.6 je táto závislosť rozšírená o rozsah prietokov mriežkou. Tu vyplýva, že znížovanie vonkajšej recirkulácie má lepší potenciál k zlepšovaniu účinnosti chladenia než riadenie prietoku vzduchu. Na dosiahnutie zníženia teploty chladiva vody o 1 °C by bolo nutné zvýšiť prietok vzduchu pri zachovaní rovnakého podielu recirkulácie až na 1 kg/s.



Obr. 7.6: Závislosť teploty chladiva vo vodnom chladiči (a) a výkonu kondenzátora (b) na prietoku vzduchu mriežkou a vonkajšej recirkulácii (osi na obr. b) sú otočené pre lepšiu viditeľnosť grafu).

7.4.3. Vnútoraná recirkulácia (NTK)

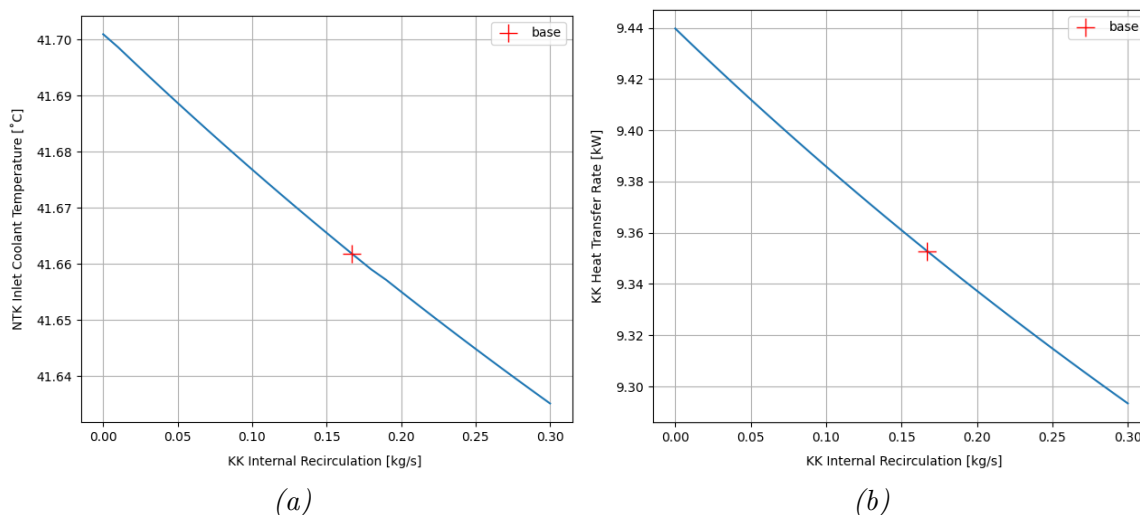
Odstránenie vplyvu vnútornej recirkulácie na vodnom chladiči je podstatne priamočiarnejšie než regulácia prietoku či vonkajšej recirkulácie. Tu je možnosť priamo ju ovplyvniť či takmer úplne eliminovať zásahom do geometrie motorového priestoru, teda utesnením prítomných prúdových ciest. Jej úplnou elimináciou by mohlo dôjsť k poklesu teploty chladiva vo vodnom chladiči o 1 °C a nárastu výkonu kondenzátora o 0,2 kW (obr. 7.7).



Obr. 7.7: Závislosť teploty chladiva vo vodnom chladiči (a) a výkonu kondenzátora (b) na NTK vnútornej recirkulácii.

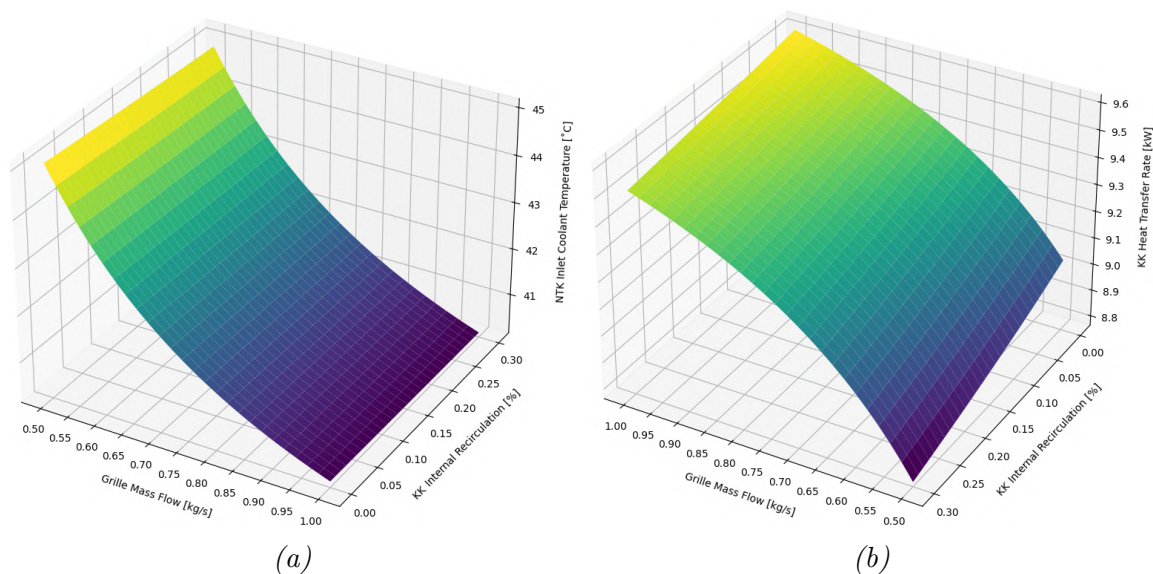
7.4.4. Vnútrotná recirkulácia (KK)

Recirkulácia na kondenzátore je už v pôvodnom stave pomerne malá, preto by jej odstránenie prinieslo iba zanedbateľné zmeny vzhľadom k náročnosti dokonalého utesnenia už tak malých netesností. Obr. 7.8 ukazuje, že v prípade výkonu kondenzátora by jeho hodnota stúpala iba o 0,09 kW.



Obr. 7.8: Závislosť teploty chladiva vo vodnom chladiči (a) a výkonu kondenzátora (b) na KK vnútornej recirkulácii.

V prípade teploty chladiva je pozorovaná zmena v rádoch stotín a navyše vykazuje opačnú tendenciu - teplota chladiva stúpa s klesajúcou recirkuláciou. To môže byť spôsobené princípom výpočtu, kedy so znižujúcou sa recirkuláciou na kondenzátore klesá celkový prietok vzduchu kondenzátorom a stúpa tak výstupná teplota vzduchu za kondenzátorom, čo má výraznejší vplyv než samotný ohrev vzduchu recirkuláciou.

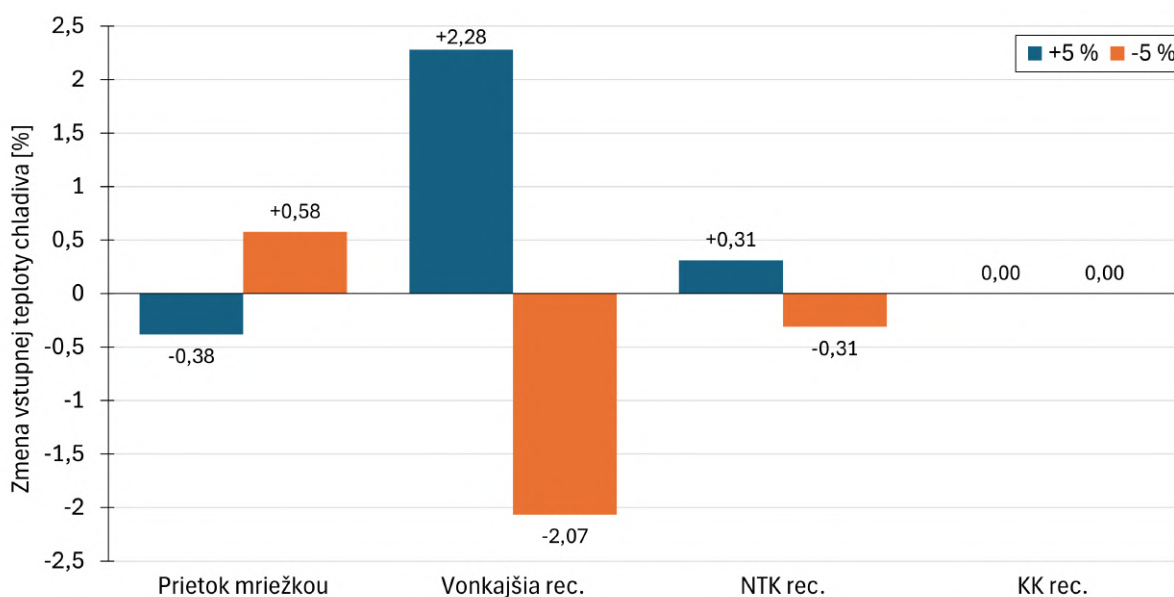


Obr. 7.9: Závislosť teploty chladiva vo vodnom chladiči (a) a výkonu kondenzátora (b) na KK vnútornej recirkulácii (osi na obr. b) sú otočené pre lepšiu viditeľnosť grafu).

Na obr. 7.9 je vidieť, že toto správanie sa pri zmene celkového prietoku veľmi nemení. Teplota chladiva zostáva takmer konštantná a výkon kondenzátora vykazuje výraznejší pokles iba pri veľmi nízkych prietokoch vzduchu, ktoré pre správne fungovanie chladiaceho systému nie su dostatočné.

7.4.5. Porovnanie citlivostí

V grafe na obr. 7.10 sú zhrnuté vplyvy jednotlivých vstupných parametrov na zmenu vstupnej teploty chladiva. Pre každý parameter bola vyhodnotená odozva systému na zmenu vstupu o +5 %, resp. -5 %.



Obr. 7.10: Závislosť zmeny výstupnej teploty na zmene vstupných parametrov.

Z grafu je zrejmé, že najvýraznejšie na sledované výstupy vplýva vonkajšia recirkulácia. Z toho vyplýva, že je vhodné sa na ňu pri návrhu systému viac zamerať, a že je tu veľký priestor k zlepšovaniu. Ďalšia kapitola tejto práce sa venuje práve návrhu geometrických opatrení na zníženie jej negatívneho vplyvu.

Odozva vnútornej recirkulácie na kondenzátore bola v prípade 5-percentnej zmeny menšia než aká je rozlišovacia schopnosť nástroja, a preto je vyhodnotená ako nulová.

8. Návrh opatrení

Pri návrhu opatrení bolo cieľom nájsť také geometrické úpravy, ktoré by výrazne znížili množstvo vonkajšej recirkulácie. Opatrenia proti vnútornej recirkulácii sú známe a v súčasnosti už implementované a vytvorený model ukázal, že jej ďalšie znižovanie nemá tak veľký potenciál ako v prípade vonkajšej recirkulácie.

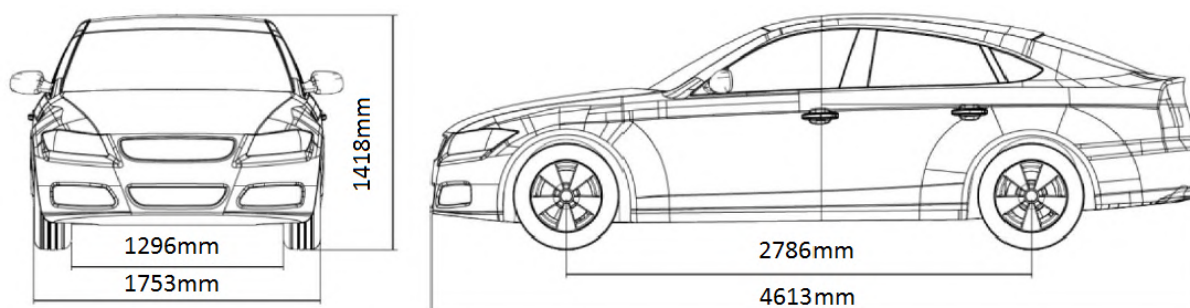
Prvým krokom bolo uskutočnenie výpočtov pre variantu reprezentujúcu základný stav vozidla vo dvoch režimoch: bezvetrie a spätný vietor. Po ňom nasledovali výpočty jednotlivých upravených variant. Išlo o krátky a dlhý deflektor umiestnený na podlahe v prednej časti vozidla, a pasívne a aktívne vyfukovanie vzduchu z motorového priestoru. Podrobnejšie sú popísané v podkapitole 8.2.

8.1. Základná varianta

V tejto podkapitole je popísaná voľba geometrie základnej varianty a jej úpravy, výpočtová sieť spolu s nastavením okrajových podmienok výpočtu a analýza dosiahnutých výsledkov.

8.1.1. Geometria

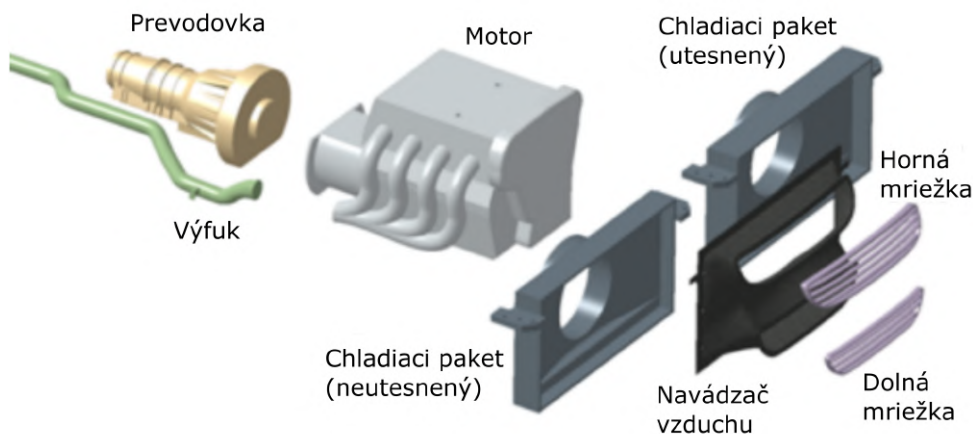
Pre základný CFD výpočet bola zvolená geometria vychádzajúca z modelu DrivAer, ktorého schematický náčrt s rozmermi je na obr. 8.1. Model DrivAer vznikol v roku 2012 na Technickej Univerzite Mníchov ako generický verejný model vozidla určeného pre numerické simulácie a experimentálne validácie [22]. Jeho geometria bola odvodená od vozidiel BMW radu 3 a Audi A4, a ponúka výrazne viac detailov než modely používané v minulosti (napr. Ahmed Body alebo SAE Body). Aj napriek tomu je ale dostatočne jednoduchý v porovnaní s geometriou produkčných vozidiel. Vďaka sade modulov je model značne prispôsobiteľný a umožňuje voľbu spomedzi niekoľkých tvarov zadnej časti karosérie, detailnej či hladkej podlahy, kolies, a otvoreného alebo uzavretého motorového priestoru. Tieto modifikácie robia DrivAer vhodným základom pre detailné skúmanie prúdových javov v oblasti vonkajšej aj vnútornej vozidlovej aerodynamiky.



Obr. 8.1: Rozmery modelu DrivAer [23].

V tejto práci bola pre potrebu skúmania vnútorného prúdenia zvolená varianta s otvorenými vstupmi v prednej časti, spolu s modulmi motorového priestoru - navádzač, chladiaci paket, motor (obr. 8.2). Prevodovka a výfuk neboli použité, pretože zadná stena motorového priestoru bola uzavretá a bola zvolená hladká podlaha, ktorá najvernejšie popisuje skutočnú podlahu elektrického vozidla.

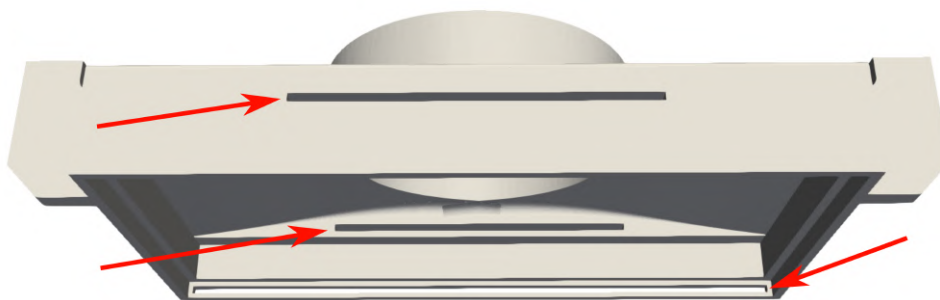
Modul spalovacieho motora bol ponechaný aby simuloval prekážku pre vzduch prúdiaci z ventilátora. Ďalej bola zvolená zadná časť karosérie typu Fastback a pre nižšie nároky na vytvorenie výpočtovej siete a skrátenie výpočtového času boli použité kolesá so zakrytými diskami a neboli zahrnuté spätné zrkadlá, ktorých vplyv nie je pre výpočet relevantný.



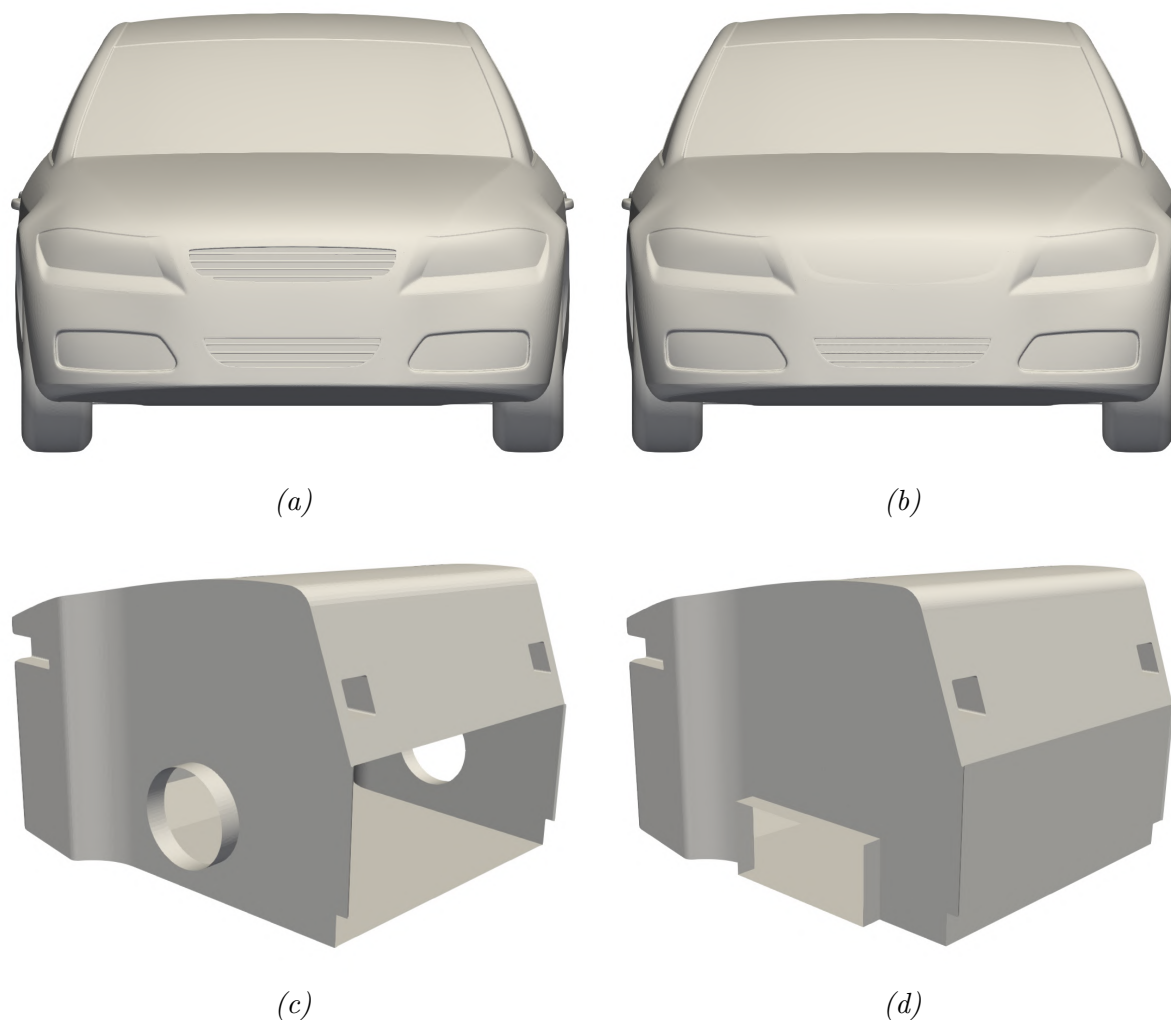
Obr. 8.2: Moduly motorového priestoru modelu DrivAer [24].

Oproti vyššie popísanej voľne dostupnej geometrii boli vo výpočtovom modeli uskutočnené úpravy pre lepšie napodobnenie skutočného vozidla popísaného v kapitole 6. Bol zatesnený horný otvor mriežky (obr. 8.4b), zväčšené výstupné otvory v podbechoch (obr. 8.4d) a upravená zadná stena motorového priestoru tak, aby ňou neunikal vzduch (obr.8.4d).

Pôvodný modul neutesneného chladiaceho paketu má príliš veľké medzery v porovnaní s vozidlom skúmanom v tejto práci, preto bol upravený modul utesneného paketu pridaním troch výrezov tak, aby bola umožnená recirkulácia iba v menšej miere (obr. 8.3).



Obr. 8.3: Upravený chladiaci paket.



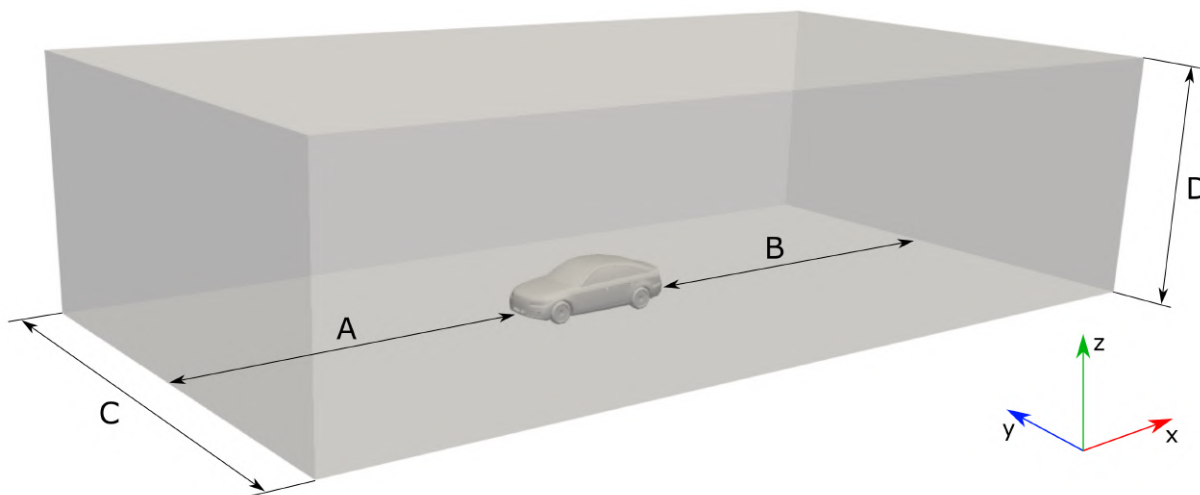
Obr. 8.4: Úpravy modelu DrivAer (a – pôvodná karoséria, b – upravená karoséria, c – pôvodný motorový priestor, d – upravený motorový priestor).

8.1.2. Výpočtová doména

Pre simulácie prúdenia vzduchu okolo vozidiel je dôležité zvoliť výpočtovú oblasť tak, aby nedochádzalo k vzájomnému ovplyvňovaniu medzi stenami tunelu a vozidlom. To znamená, že vstupná a výstupná plocha musí byť umiestnená v dostatočnej vzdialenosti pred a za vozidlom, čo zaisťuje vytvorenie ustáleného prúdu vzduchu a zabráni ovplyvňovaniu prúdu za vozidlom výstupnou stenou. K tomuto účelu sa vo väčšine prípadov používajú násobky rozmerov geometrie a ich hodnoty vychádzajú zo štúdií a praktických skúseností pre konkrétnu aplikáciu.

Zároveň je potrebné dbať na to, aby v mieste skúmaného objektu nedošlo k výraznému zúženiu a následnému stlačeniu a zrýchleniu prúdu vzduchu. Na minimalizáciu tohto efektu sa používa parameter blokácie tunela B_T . Tento parameter vyjadruje pomer čelnej plochy skúmaného objektu k ploche prierezu tunela a je všeobecným odporúčaním jeho hodnotu držať pod úrovňou 5 % [25].

Pre potreby tejto práce sa rozmery domény a vzdialenosti vozidla od stien (obr. 8.5) mierne líšili od zaužívaných doporučení, a to z toho dôvodu, že v tomto prípade je simulovaný režim státia pri takmer nulovej, resp. zápornej rýchlosti vzduchu. Vďaka tomu je možné skrátiť vzdialenosť zadnej steny tunela od vozidla a znížiť tak počet buniek siete a výpočtovú náročnosť oproti bežnejším výpočtom v režime jazdy.

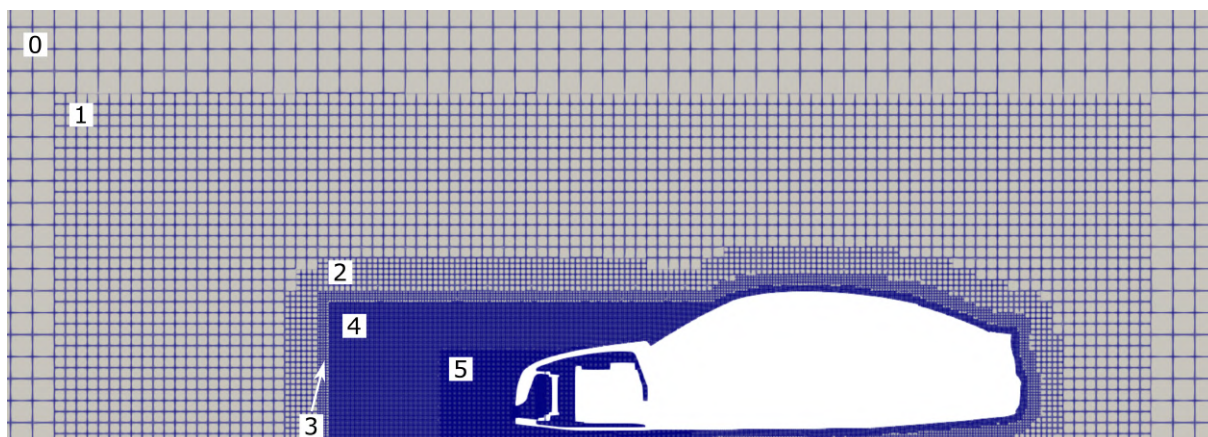


Obr. 8.5: Výpočtová doména.

Vzdialenosť vozidla od vstupnej plochy tunela je $A = 10$ m a vzdialenosť výstupnej plochy tunela od vozidla $B = 12,4$ m, čo spolu s dĺžkou vozidla 4,6 m vytvára tunel o celkovej dĺžke 27 m. Šírka tunela je $C = 14$ m a výška $D = 7$ m. Pomer čelnej plochy vozidla $2,16$ m² a plochy prierezu tunela 98 m² vytvára blokáciu tunela s hodnotou 2,2 %, čo spĺňa podmienku $B_T < 5$ %. Pre zamedzenie vytvoreniu nekvalitnej siete v mieste kontaktu pneumatiky s vozovkou a priblíženie sa reálnemu stavu deformácie pneumatiky bolo vozidlo posunutú voči vozovke v osi z o -25 mm. Orientácia súradnicového systému je zobrazená na obr. 8.5 a jeho začiatok leží v priesečníku osi rotácie predných kolies s rovinou symetrie vozidla.

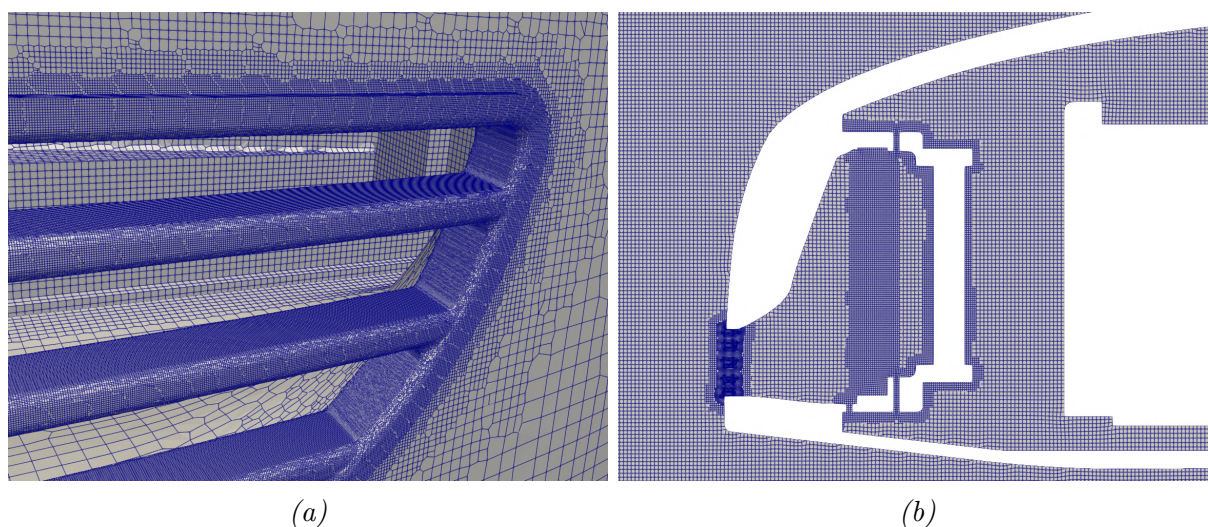
8.1.3. Sieť

Na tvorbu siete boli použité nástroje *blockMesh* a *snappyHexMesh*, ktoré sú súčasťou voľne dostupného softvérového balíka *OpenFOAM*. V prvom kroku bola pomocou *blockMesh* vytvorená základná doména tvaru kvádra s rozmermi popísanými v predchádzajúcej podkapitole a bola jej predpísaná základná veľkosť bunky 0,2 m. Následne bola táto sieť ďalej upravovaná v module *snappyHexMesh*. Tu bola naimportovaná geometria vozidla a predpísané zjemnenie základnej siete. Zjemňovanie funguje na princípe úrovní, kde každá úroveň znamená polovičnú veľkosť bunky oproti tej predchádzajúcej, pri čom základná bunka predstavuje úroveň 0. Tzn., že ak je predpísaná úroveň zjemnenia 3, veľkosť bunky v tejto oblasti bude 2³-krát menšia než základná bunka). Predpísané je zjemnenie jednotlivých povrchov geometrie a aj dodatočné oblasti zjemnenia vo forme kvádrov ohraničujúcich požadovanú oblasť. Jednotlivé oblasti a úrovne sú zobrazené na obr. 8.6.



Obr. 8.6: Výpočtová sieť – zjemňovacie oblasti.

Zjemňovacie oblasti boli vytvorené okolo prednej časti auta pre čo najlepšie zachytenie prúdenia v motorovom priestore a prípadnej externej recirkulácie. Mriežka na vstupe do motorového priestoru bola zjemnená najprísnejšie pre správne zachytené zaoblenia (obr. 8.7a) a v blízkosti chladiaceho paketu bola sieť dodatočne zjemnená pre zaistenie dostatočného rozlíšenia malých otvorov výmenníka (obr. 8.7b). Zjemnenie v blízkosti stien v oblasti medznej vrstvy nebolo realizované, pretože táto oblasť nie je pre potreby tejto práce relevantná a nie je sledovaný ani koeficient odporu.



Obr. 8.7: Detail výpočtovej siete (a – mriežka, b – motorový priestor).

Výslednú sieť je vždy potrebné skontrolovať či spĺňa kvalitatívne kritéria, na ktorých priamo závisí presnosť výsledku, rýchlosť konvergenie a stabilita výpočtu. V softvéri *OpenFOAM* sú dvomi najdôležitejšími parametrami *Non-orthogonality* a *Skewness*. Parameter *Non-orthogonality* vyjadruje uhol, ktorý zvierajú vektor spájajúci stredy dvoch susedných buniek a normálový vektor ich spoločnej steny, a pre čo najlepšie výsledky by malo platiť $Non-orthogonality < 70$. *Skewness* je podiel kolmej vzdialenosti priesečníka stredov dvoch susedných buniek od stredu ich spoločnej steny a vzdialenosti stredov týchto buniek.

V základnom nastavení softvéru je za dostatočnú považovaná hodnota $Skewness < 4$, z praktických poznatkov však vyplýva, že výpočet býva stabilný až do $Skewness < 8$. Popis kvality siete ako aj samotný počet buniek je v tab. 8.1.

Tab. 8.1: Popis kvality a nastavenia siete.

Parameter	Hodnota
Počet prvkov	41 410 377
Max. non-orthogonality	64,9
Max. skewness	3,9

Prvok	Úroveň zjemnenia	Velkosť bunky [mm]
Karoséria	4	12,500
Podvozok	4	12,500
Kolesá	5	6,250
Motorový priestor	5	6,250
Motor	5	6,250
Chladiaci paket	6	3,125
Mriežka	9	0,391

8.1.4. Okrajové podmienky

Na samotný CFD výpočet bol taktiež použitý softvér *OpenFOAM*. Okrajové podmienky výpočtu (tab. 8.2) boli nastavené tak aby simulovali režim státia a nabíjania v bezvetrí, resp. so spätným vetrom a rotujúcim ventilátorom chladiaceho systému. Konkrétne nastavenie ventilátora bolo zvolené tak aby vzniknuté prúdové pole čo najvernejšie odpovedalo prúdovému poľu CFD výpočtu vozidla Škoda Enyaq.

Médiom v doméne bol vzduch s konštantnou hustotou, počiatočným tlakom 0 Pa a kinematickou viskozitou $1,5e-5 \text{ m}^2/\text{s}$ a pre turbulenciu bol použitý model Realizable k-Epsilon.

Pre režim bezvetria bola na vstupe do tunela (predná stena) predpísaná rýchlosť 0,2 m/s, keďže nenulová rýchlosť je nutná pre stabilitu výpočtu, no je zároveň dostatočne malá aby simulovala bezvetrie. Na výstup (zadná stena) bol predpísaný tlak 0 Pa (nulový pretlak = atmosférický tlak). V režime spätného vetra bola na vstup (zadná stena) predpísaná rýchlosť -2,78 m/s (10 km/h) a na výstup (predná stena) tlak 0 Pa. Na vozovku a na vozidlo bola predpísaná podmienka *No-slip wall* (zaisťujúca nenulové šmykové napätie na povrchu steny a vytvorenie viskózneho medznej vrstvy) a na bočné steny a hornú stenu tunela podmienka *Slip wall* (nulové šmykové napätie).

Ventilátor bol simulovaný pomocou dvoch okrajových podmienok predpisujúcich hodnotu prietoku a rotáciu. Na vstupe do ventilátora (miestny výstup z domény) bola použitá podmienka *flowRateOutletVelocity* s hodnotou $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ a na jeho výstupe (miestny vstup do domény) podmienka *swirlFlowRateInletVelocity* s hodnotou $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ a 500 min^{-1} .

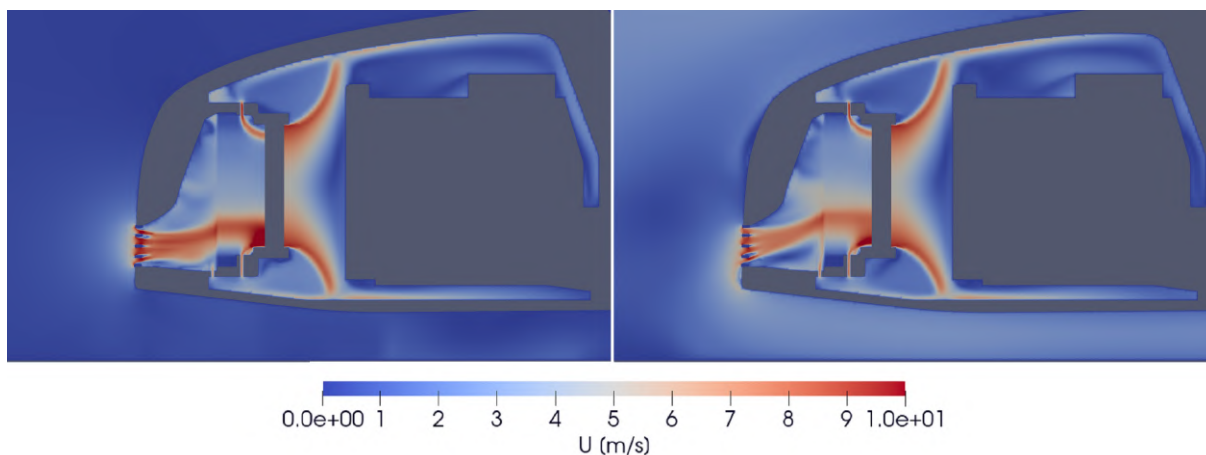
Tab. 8.2: Okrajové podmienky.

Prvok	Okrajová podmienka
Tunel: Vstup	$0,2 \text{ m/s}$ ($-2,78 \text{ m/s}$)
Tunel: Výstup	0 Pa
Tunel: Vozovka	No-slip wall
Tunel: Bočné steny	Slip wall
Tunel: Horná stena	Slip wall
Vozidlo	No-slip wall
Ventilátor: Vstup	$0,4 \text{ m}^3/\text{s}$
Ventilátor: Výstup	$0,4 \text{ m}^3/\text{s} + 500 \text{ min}^{-1}$
Výmenník	$d (1e6 -1e3 -1e3)$; $f (0 0 0)$

Pre výmenník bola použitá podmienka *Porosity* simulujúca tlakový spád v poréznom médiu a bola zadaná pomocou modelu *Darcy-Forchheimer*. V tomto modeli sa nastavujú dva parametre d a f pomocou trojice čísel reprezentujúcich tlakový spád v každom smere súradnicového systému. Tie boli odhadnuté tak, aby prúdové pole v oblasti výmenníka čo najviac odpovedalo prúdovému poľu v oblasti výmenníkov vozidla Škoda Enyaq. Parameter f bol nastavený na hodnotu 0 v každom smere, aby boli znížené nároky na výpočet a aby bolo zaistené jednoduchšie ladenie. Parameter d bol nastavený na hodnotu $1e6$ v smere x a $-1e3$ v smeroch y a z (negatívna hodnota zabraňuje prúdeniu v týchto smeroch).

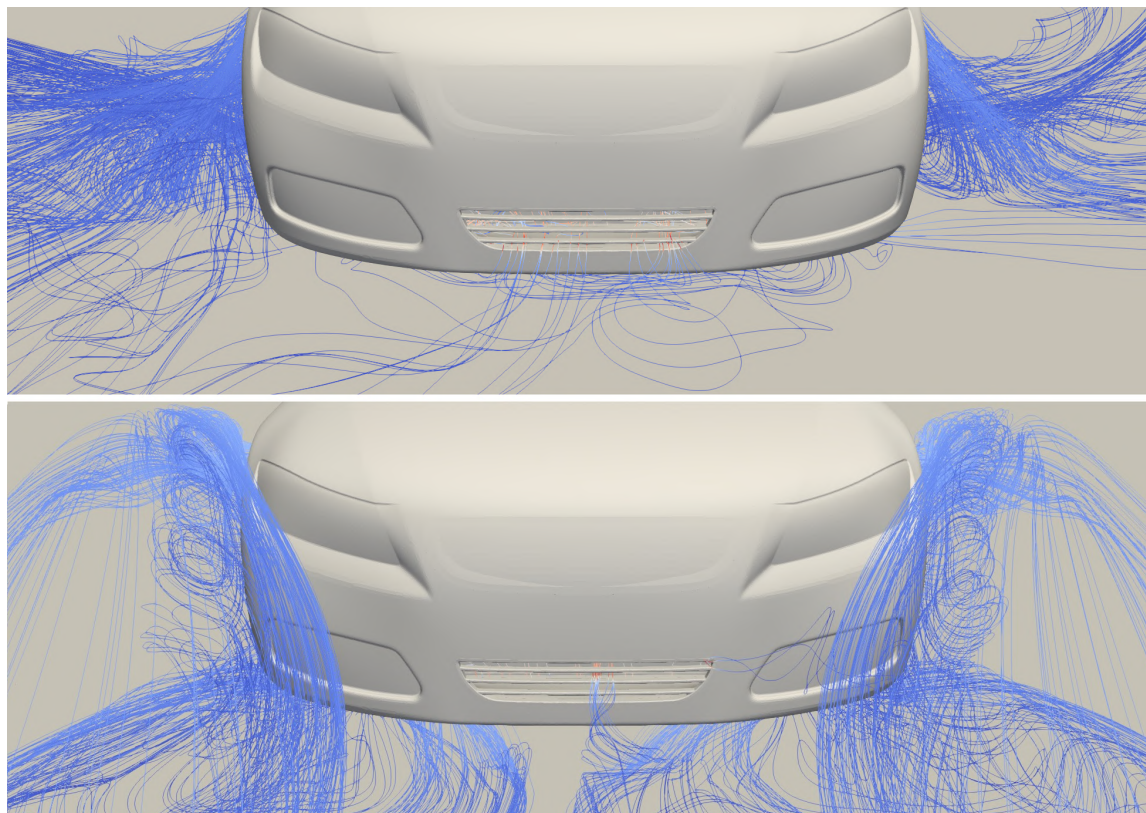
8.1.5. Výsledky základnej varianty

Na obr. 8.8 je zobrazená rýchlosť vzduchu pre bezvetrie ($0,2 \text{ km/h}$) a pre spätný vietor (-10 km/h). Vo vnútri motorového priestoru je rozdiel medzi režimami minimálny, no z vonkajšej strany je pri spätnom vetre viditeľný nárast rýchlosti v oblasti spodnej hrany nárazníka, kde sa vzduch stáča smerom nahor do mriežky. Zároveň je týmto overená správna funkčnosť okrajovej podmienky ventilátora, kde rotujúca zložka unáša vzduch radiálne smerom od osi rotácie, a tiež okrajovej podmienky výmenníka (porozity), kde je smer vzduchu výhradne horizontálny.



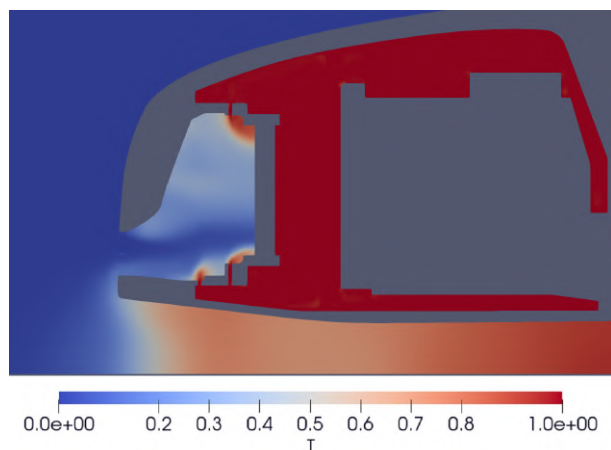
Obr. 8.8: Rychlostné pole základnej varianty v bezvetrí (vľavo) a v spätnom vetre (vpravo). Rez v rovine $Y = 0$.

Na obr. 8.9 sú zobrazené prúdnicie pre oba režimy, ktoré sú vypustené z ventilátora. V režime bezvetria je vidieť, že vzduch opúšťajúci motorový priestor sa viac zdržiava v oblasti pod ním a že je do mriežky nasávaný väčšou plochou. V spätnom vetre je vzduch okamžite po výstupe z podbehov hnaný vpred a je nasávaný na menšej a koncentrovanej ploche mriežky. Ďalším zásadným rozdielom je výrazne väčšie množstvo vzduchu prúdiaceho okolo blatníkov a svetiel pri spätnom vetre.



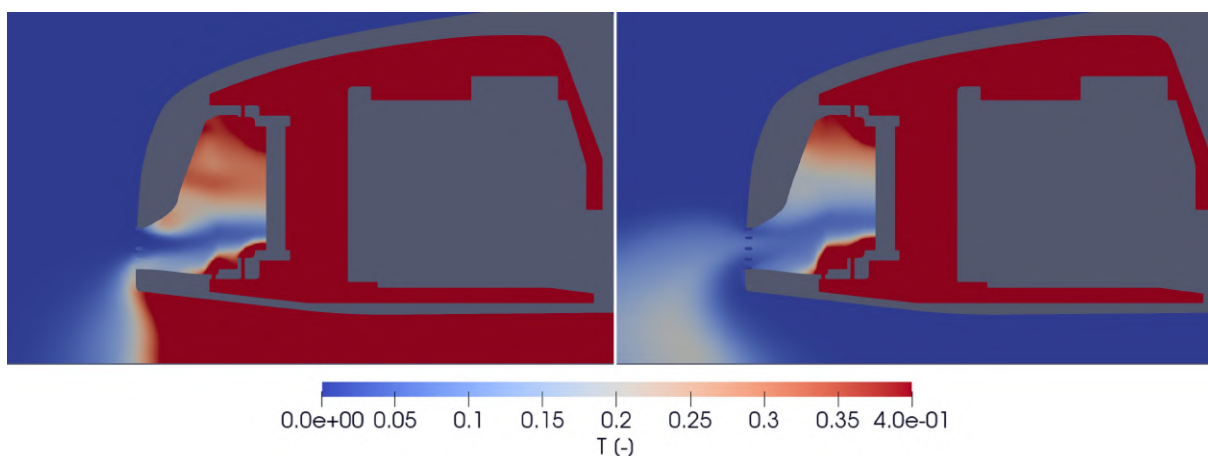
Obr. 8.9: Prúdnicie základnej varianty v bezvetrí (hore) a v spätnom vetre (dole).

Obr. 8.10 zobrazuje pole pasívneho skaláru. Pasívny skalár je veličina, ktorá aktívne nevplyva na prúdové pole, ale správa sa ako kontaminant prítomný v tekutine, ktorý je prenášaný jej prúdom a má zanedbateľný vplyv na jej vlastnosti. V tomto prípade je veličina nastavená na hodnotu 0 na vstupnej stene tunela a hodnotu 1 na ploche ventilátora. To znamená, že na vstupe do tunela je prítomnosť tohto skaláru nulová, čo reprezentuje 100 % čerstvého vzduchu a na výstupe z ventilátora je hodnota maximálna, čo znamená nulovú prítomnosť čerstvého vzduchu a stopercentnú prítomnosť vzduchu zohriateho výmenníkom. Hodnoty medzi 0 a 1 na obrázkoch potom znamenajú určitý pomer čerstvého a zohriateho vzduchu.



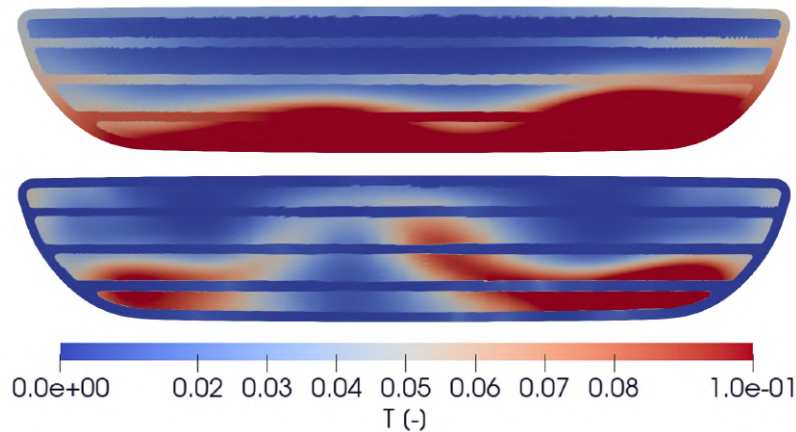
Obr. 8.10: Pasívny skalár základnej varianty v bezvetří. Rez v rovine $Y = 0$.

Pre lepšiu viditeľnosť zohriateho vzduchu vstupujúceho do mriežky bude v ďalej použitých obrázkoch pasívneho skaláru v reze $Y = 0$ stupnica nastavená na rozsah 0 až 0,4, tzn. plne červená farba bude reprezentovať zmiešaný vzduch s aspoň 40 percentným podielom vzduchu vystupujúceho z ventilátora (obr. 8.11). Tu je znova vidieť rozdiel medzi režimami, kde v bezvetří je v rovine symetrie vozidla podstatne väčšie množstvo teplého vzduchu ako pri spätnom vetre, kde je vzduch nasávaný primárne mimo tejto roviny.



Obr. 8.11: Pasívny skalár základnej varianty v bezvetří (vľavo) a v spätnom vetre (vpravo). Rez v rovine $Y = 0$.

Na obr. 8.12 je zobrazená recirkulácia vyhodnotená na vstupe do motorového priestoru. Je vidieť zásadný rozdiel v množstve aj charaktere recirkulácie, kde pri spätnom vetre je miesto vstupu recirkulovaného vzduchu koncentrovanejšie, čo súhlasí s vyhodnotením prúdnic. Po kvantitatívnom vyhodnovení množstva recirkulácie bolo zistené, že v bezvetrí predstavuje recirkulovaný vzduch 5,53 % a v spätnom vetre 2,63 % z celkového prietoku mriežkou, čo predstavuje zníženie o 52 %. Tento trend je opačný ako v prípade vozidla skúmaného v kapitole 6, kde bol pozorovaný nárast recirkulácie v spätnom vetre.



Obr. 8.12: Pasívny skalár základnej varianty v bezvetří (hore) a v spätnom vetre (dole) na vstupe do motorového priestoru.

8.2. Upravené varianty

Pre všetky upravené varianty platia rovnaké základné nastavenia siete, okrajových podmienok aj výpočtu a bližšie sú popísané v príslušných podkapitolách.

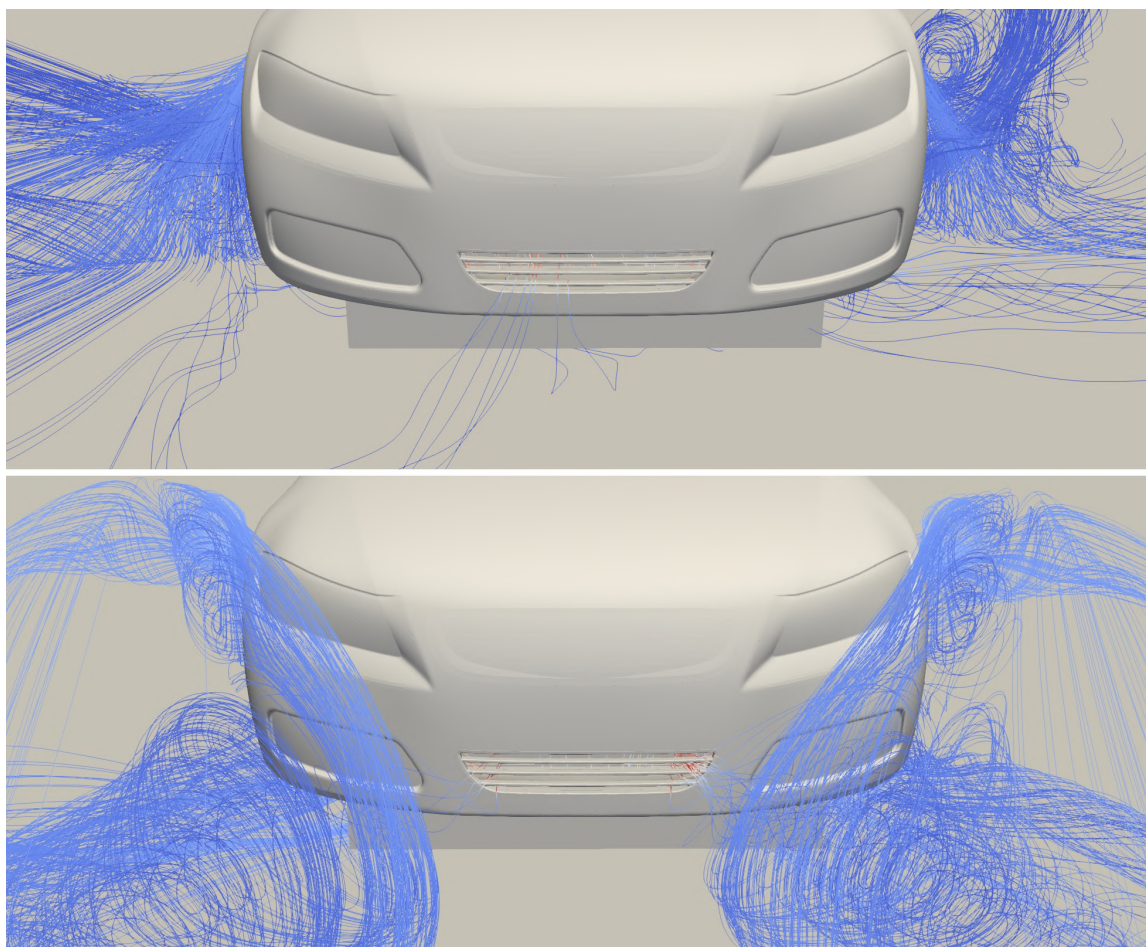
8.2.1. Krátky deflektor

Z výsledkov výpočtov základnej varianty je zrejmé, že väčšina vzduchu sa do mriežky dostáva prúdením popod auto cez priestor medzi kolesami. Deflektor reprezentuje fyzickú prekážku prúdiacemu vzduchu v tejto oblasti. Jeho umiestnenie bolo volené tak, aby bolo konštrukčne možné ho realizovať ako aktívny prvok vyrobený z plastu, ktorý by sa pri nabíjaní vyklopil a naopak pri jazde sklopil do roviny podvozku. Spodná hrana krátkej verzie deflektora siaha do výšky 3 cm nad vozovkou a berie tak do úvahy prípadné nerovnosti a prekážky brániace úplnému vyklopeniu. Celkové rozmery sú označené na obr. 8.13.



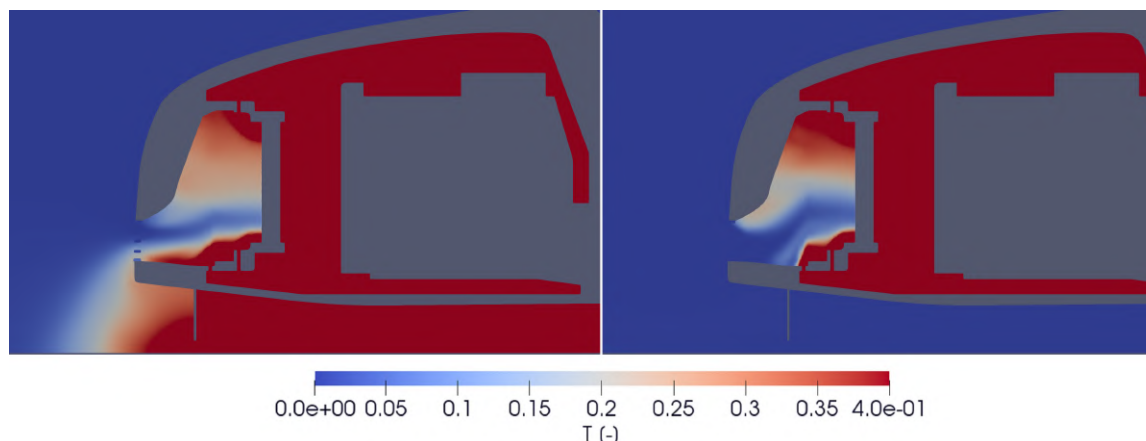
Obr. 8.13: Rozměry krátkého deflektora.

Na vykreslených prúdnicích (obr. 8.14) je vidieť, že krátky deflektor do istej miery bráni vzduchu v prúde, ale nie dokonale. V bezvetrí sa vzduch pretlačí cez medzeru vytvorenú deflektorom a vozovkou a okrem toho je do mriežky nasávaný aj vzduch ktorý bol vyfúknutý na pravej strane vozidla. V spätnom vetre sa do motorového priestoru dostáva veľké množstvo teplého vzduchu prúdiaceho okolo blatníkov a vstupuje do mriežky na jej okrajoch, pričom medzerou pod deflektorom zdanlivo neprúdi žiadny recirkulovaný vzduch.



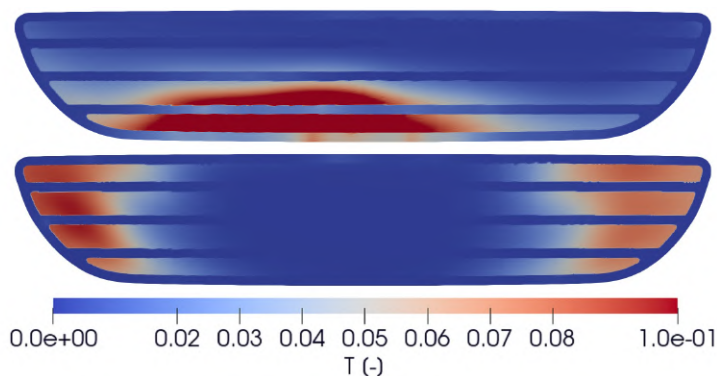
Obr. 8.14: Prúdnicie varianty s krátkym deflektorom v bezvetří (hore) a v spätnom vetre (dole).

Pole pasívneho skaláru (obr. 8.15) potvrdzuje, že v bezvetrú recirkulovaný vzduch prúdi v blízkosti roviny symetrie popod auto skrz medzeru pod deflektorom, zatiaľ čo v spätnom vetre sa tu recirkulácia vôbec nevyskytuje. Tento rozdiel je výrazný aj na obr. 8.16 – recirkulovaný vzduch je v spätnom vetre koncentrovaný na okrajoch mriežky, čo naznačuje, že ani dlhý deflektor nebude v tomto režime výraznejšie účinný.



Obr. 8.15: Pasívny skalár varianty s krátkym deflektorom v bezvetrú (vľavo) a v spätnom vetre (vpravo). Rez v rovine $Y = 0$.

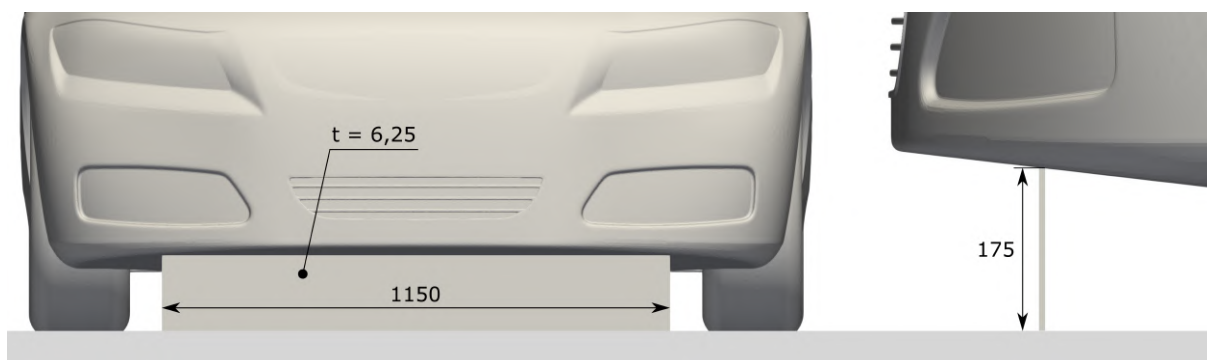
Aj napriek stále prítomnej recirkulácii bolo dosiahnuté významné zlepšenie: množstvo recirkulácie vyhodnotenú na mriežke predstavuje 2,52 % v režime bezvetria a 1,74 % v režime spätného vetra. V prvom prípade tak ide o 55-percentnú a v druhom prípade o 34-percentnú zníženie recirkulácie oproti základnej variante.



Obr. 8.16: Pasívny skalár varianty s krátkym deflektorom v bezvetrú (hore) a v spätnom vetre (dole) na vstupe do motorového priestoru.

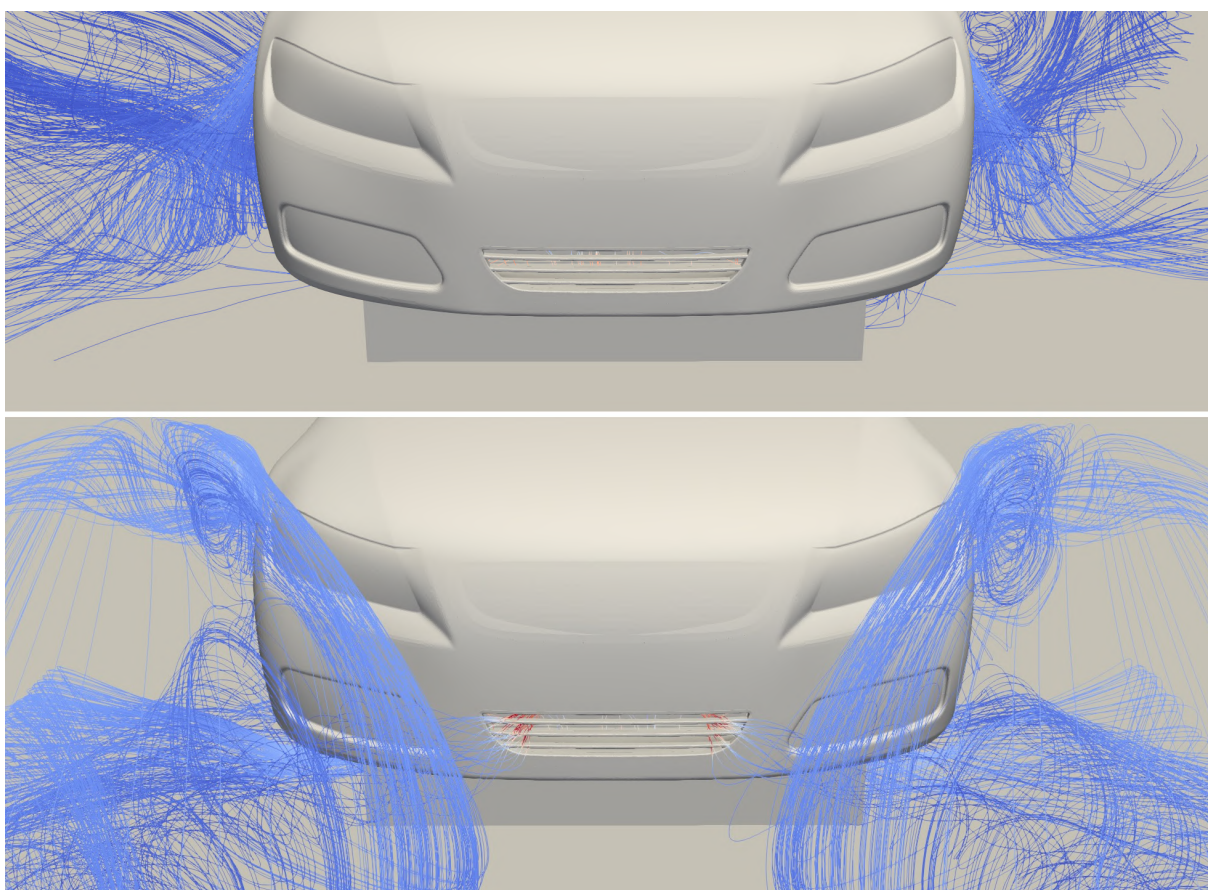
8.2.2. Dlhý deflektor

Dlhá verzia deflektora bola navrhnutá pre ďalšie zvýšenie jeho účinnosti. Limity v prípade vyskytujúcich sa nerovností vozovky by mohli byť odstránené tak, že by koncová časť bola nahradená materiálom schopným ohýbania, napr. gumou, z akej sú vyrobené lapače nečistôt na podbehoch.



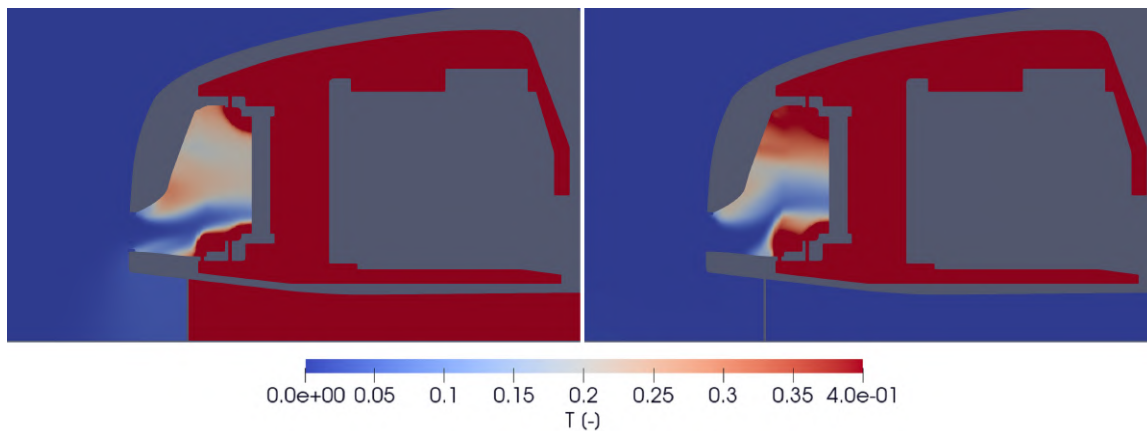
Obr. 8.17: Rozměry dlouhého deflektora.

Průdnice ukazují, že při odstranění mezery mezi deflektorem a vozovkou je v režime bezvětrí úspěšně zabráněno zatekání recirkulácie na vstup do motorového priestoru (obr. 8.18) a zdanlivo je recirkulácia úplne odstránená. Pri spätnom vetre sa znova opakuje jav, pri ktorom vzduch nateká do mriežky po stranách vozidla, a teda v tomto režime dlhý deflektor neposkytuje žiadnu výhodu.



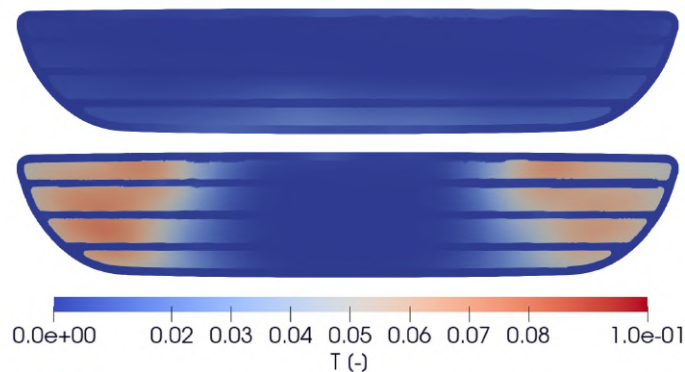
Obr. 8.18: Průdnice varianty s dlouhým deflektorem v bezvětrí (hore) a v spätnom vetre (dole).

Pasívny skalár na obr. 8.19 ukazuje podobné výsledky ako pri krátkom deflektori, s rozdielom v úplnom utesnení priestoru pod vozidlom v bezvetrí.



Obr. 8.19: Pasívny skalár varianty s dlhým deflektorom v bezvetří (vľavo) a v spätnom vetre (vpravo). Rez v rovine $Y = 0$.

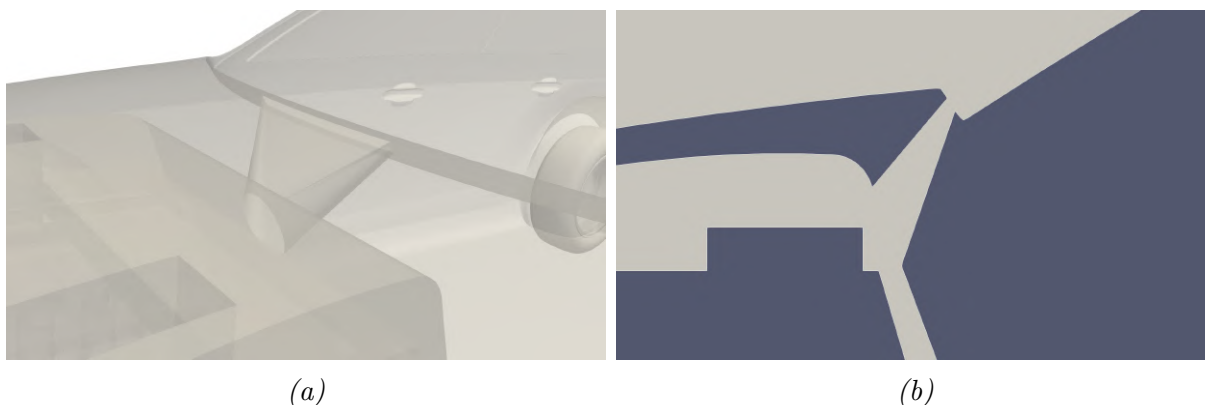
Na mriežke na obr. 8.20 je potvrdené, že v režime bezvetria je recirkulácia takmer úplne odstránená a jej množstvo predstavuje 0,25 % z celkového prietoku, čo je redukcia vo výške 95 % oproti základnej variante. Pri spätnom vetre je jej hodnota 1,97 % s redukciami 25 % voči základnej variante a ide tak o mierne zhoršenie oproti krátkemu deflektoru.



Obr. 8.20: Pasívny skalár varianty s krátkym deflektorom v bezvetří (hore) a v spätnom vetre (dole) na vstupe do motorového priestoru.

8.2.3. Pasívne vyfukovanie

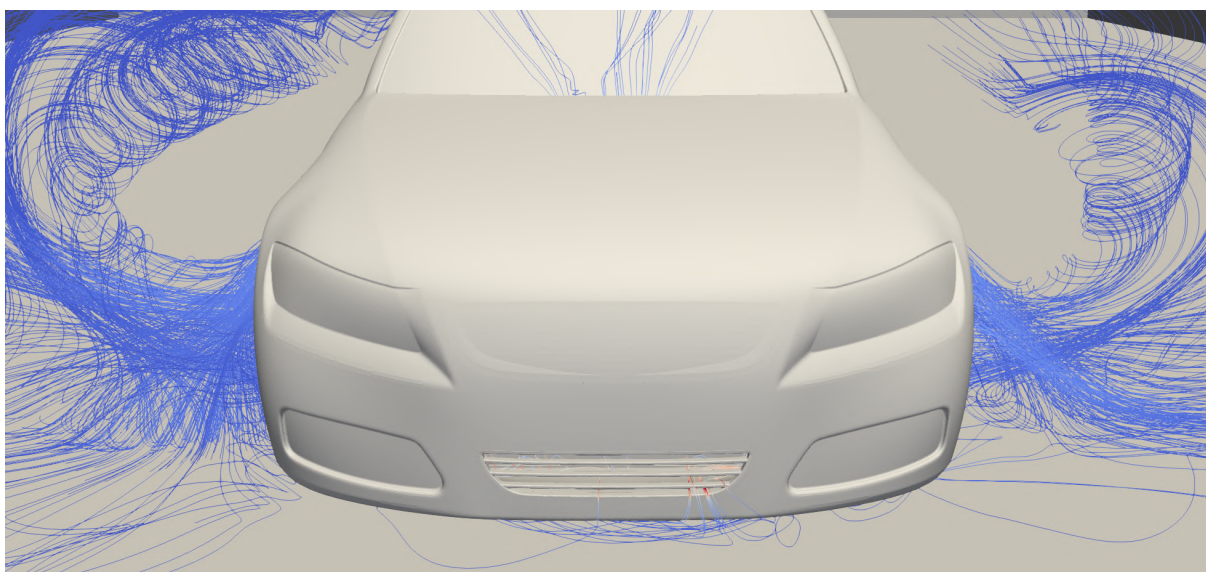
V prípade nemožnosti použitia zásahov do vonkajšej geometrie vozidla, či už z funkčných alebo estetických dôvodov, je ďalšou možnou úpravou vyvedenie vzduchu z motorového priestoru tam, odkiaľ je nepravdepodobné aby sa dostal späť na vstup a tým potenciálne znížiť množstvo vzduchu vystupujúceho z podbehov. Takýmto miestom môže byť napríklad rozhranie kapoty a čelného skla, ktoré je v dostatočnej vzdialenosti od vstupu do motorového priestoru. Geometria použitého výfukového kanálu je na obr. 8.21



Obr. 8.21: Kanál pre vyfukovanie vzduchu z motorového priestoru (a – zobrazenie v 3D, b – rez v rovine $Y = 0$).

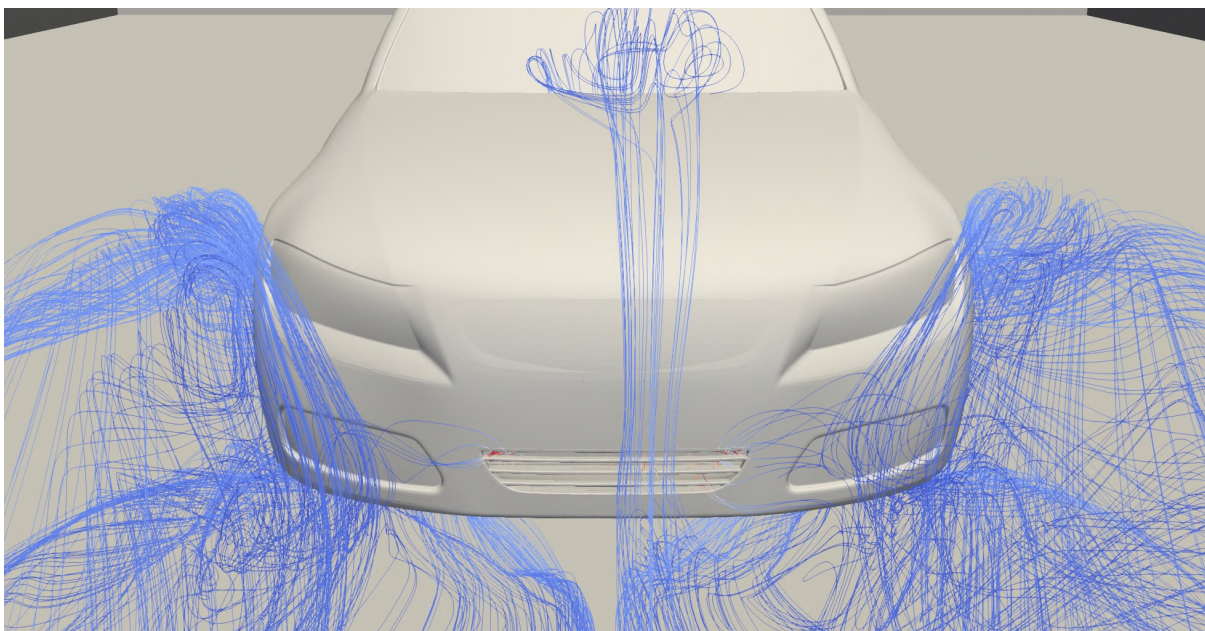
Množstvo prúdnic vstupujúcich do motorového priestoru na obr. 8.22 je v bezvetrú viditeľne menšie ako v základnej variante a indikujú čiastočnú účinnosť opatrenia. Pri spätnom vetre (obr. 8.23) je naopak vidieť, že oproti základnej variante vstupujú do motorového priestoru väčšou plochou otvoru.

Detail na obr. 8.24 dokazuje, že teplý vzduch vystupujúci v oblasti čelného skla nie je priamo nasávaný do motorového priestoru a jeho vplyv je nutné posúdiť iným spôsobom.

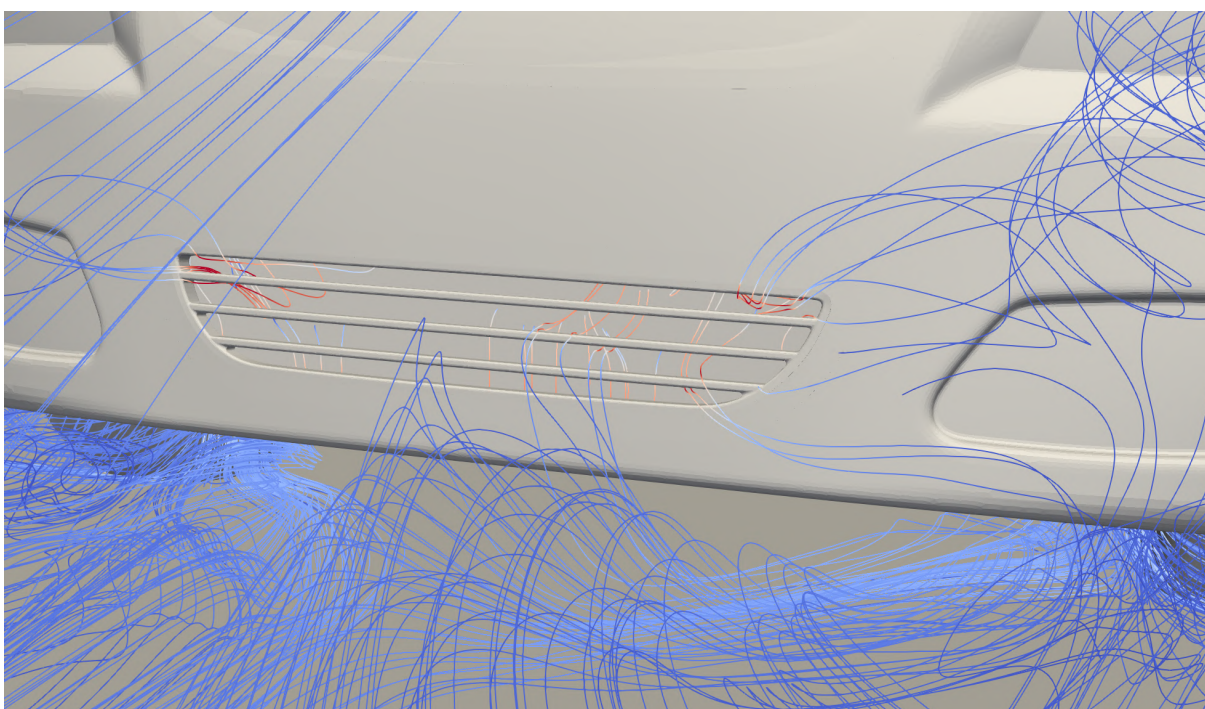


Obr. 8.22: Prúdnicie varianty s pasívnym vyfukovaním v bezvetrú.

Na pasívnom skalári na obr. 8.25 je vidieť zlepšenie v prípade bezvetria a po vyhodnotení bola získaná hodnota recirkulácie 2,57 %, resp. 54-percentné zlepšenie oproti základnej variante. Účinnosť pasívneho vyfukovania je tým pádom v bezvetrú rovnaká ako účinnosť krátkeho deflektora.

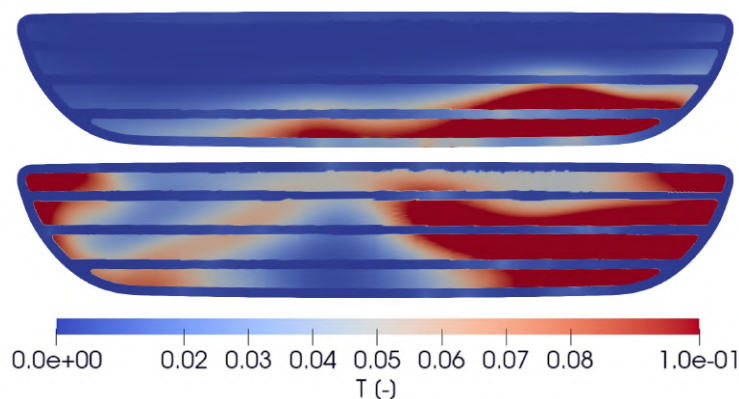


Obr. 8.23: Prúdnice varianty s pasívnym vyfukovaním v spätnom vetre.

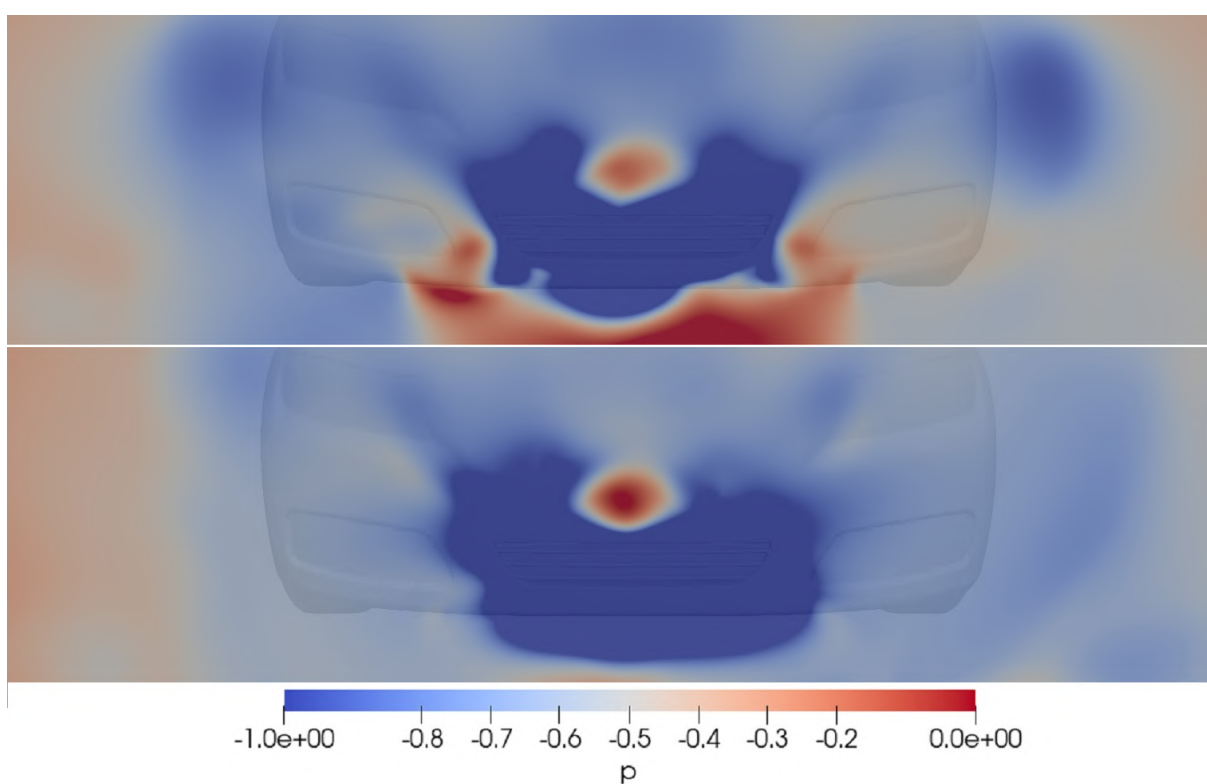


Obr. 8.24: Detail na prúdnice varianty s pasívnym vyfukovaním v spätnom vetre.

Režim spätného vetra však priniesol opačný efekt: výrazné zhoršenie recirkulácie o 85 % na hodnotu 4,88 %, a to aj napriek tomu, že vzduch prúdiaci ponad kapotu vozidla nie je do motorového priestoru nasávaný, čo bolo dokázané pomocou prúdníc. Predpokladaným dôvodom pre toto zhoršenie je vyvolanie väčšej oblasti nízkeho tlaku prúdom vzduchu ponad kapotu a následne zvýšený sací efekt v tejto oblasti, čo potvrdzuje tlakové pole zobrazené v rovine Y-Z v mieste tesne pred mriežkou na obr. 8.26.



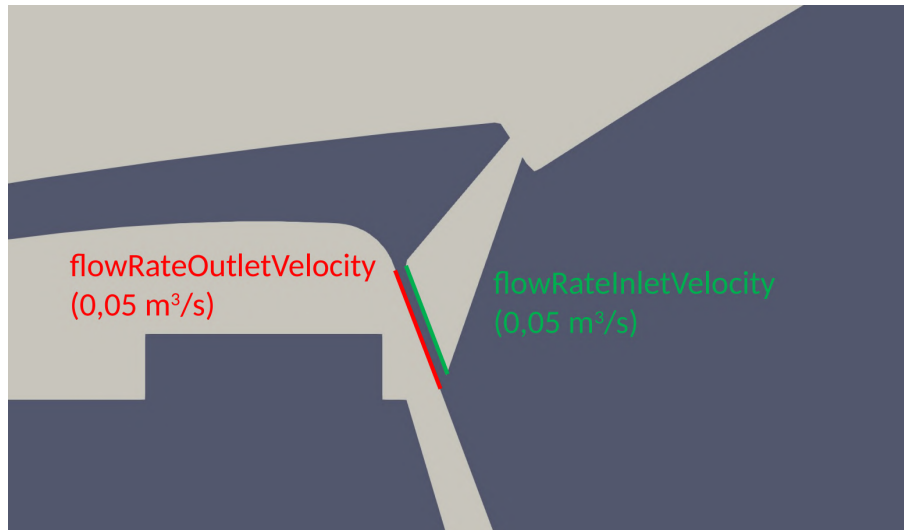
Obr. 8.25: Pasívny skalár varianty s pasívnym vyfukovaním v bezvetrí (hore) a v spätnom vetre (dole) na vstupe do motorového priestoru.



Obr. 8.26: Tlakové pole varianty s pasívnym vyfukovaním v bezvetrí (hore) a v spätnom vetre (dole).

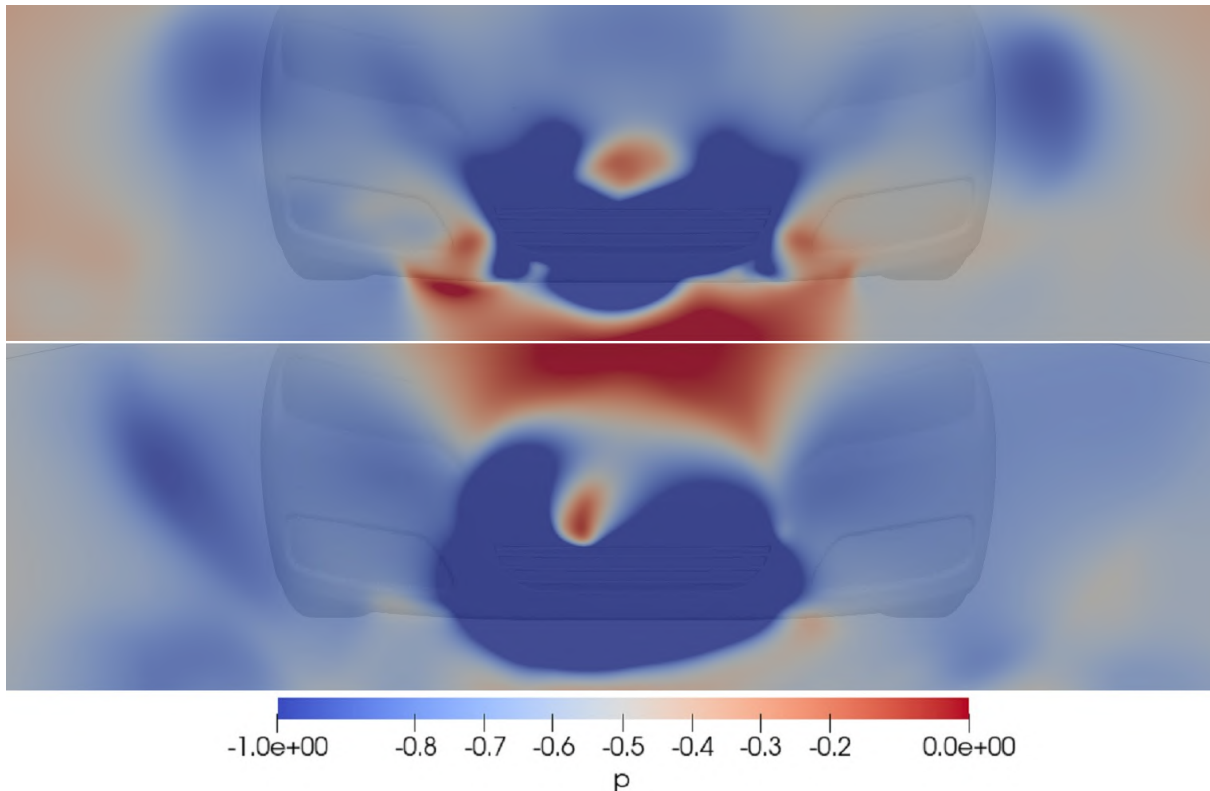
8.2.4. Aktívne vyfukovanie

Na podpora funkčnosti a účinnosti výfukového kanálu je možné tento kanál osadiť ventilátorom, ktorý by vzduch nútené hnal von z motorového priestoru na požadovanom mieste. Pre účely výpočtov v tejto práci bol zvolený prietok kanálom $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, ktorý napodobňuje výkonnosť ofukovačov v kabíne posádky, čo je spojené s predpokladom možného použitia ofukovača rovnakého typu aj pre túto aplikáciu. Okrajové podmienky prietoku boli predpísané podľa obr. 8.27.

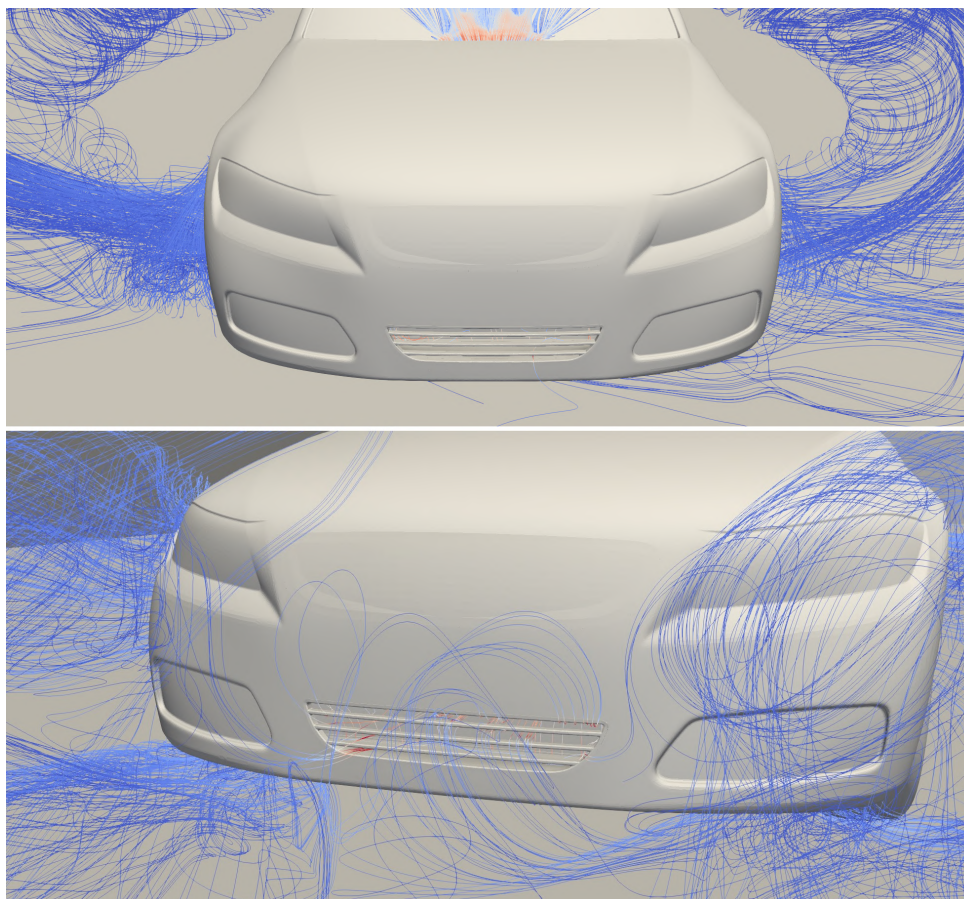


Obr. 8.27: Okrajové podmienky predpísané pre aktívne vyfukovanie.

V bezvetří funguje aktívne vyfukovanie lepšie než pasívne, čo je viditeľné na obr. 8.29. Pred vozidlo sa dostáva iba minimálne množstvo vzduchu. V spätnom vetre je naopak recirkulácia ešte výraznejšie zosilnená ako pri pasívnom vyfukovaní, čo je pravdepodobne spôsobené ešte väčšou oblasťou nízkeho tlaku vyvolanou prúdením teplého vzduchu ponad kapotu (obr. 8.28).

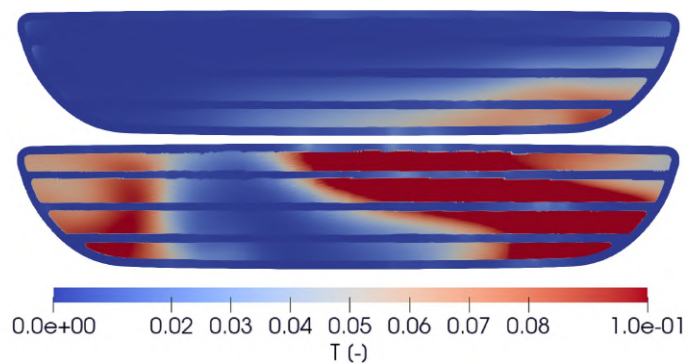


Obr. 8.28: Tlakové pole varianty s aktívnym vyfukovaním v bezvetří (hore) a v spätnom vetre (dole).



Obr. 8.29: Prúdnice varianty s aktívnym vyfukovaním v bezvetrÍ (hore) a v spätnom vetre (dole).

Výsledok viditeľný pomocou prúdníc je potvrdený aj pomocou pasívneho skaláru na mriežke na obr. 8.30. V bezvetrÍ dosahuje toto opatrenie s pomerom teplého vzduchu 0,94 % výrazné zlepšenie oproti základnej variante, a to konkrétne o 83 %. Pri spätnom vetre je vidieť veľké množstvo recirkulácie na takmer celej vstupnej ploche. Po kvantitatívnom vyhodnotení bola získaná hodnota recirkulácie 5,42 %, resp. zhoršenie o 106 % oproti základu, čo predstavuje najhorší stav spomedzi všetkých výpočtov.



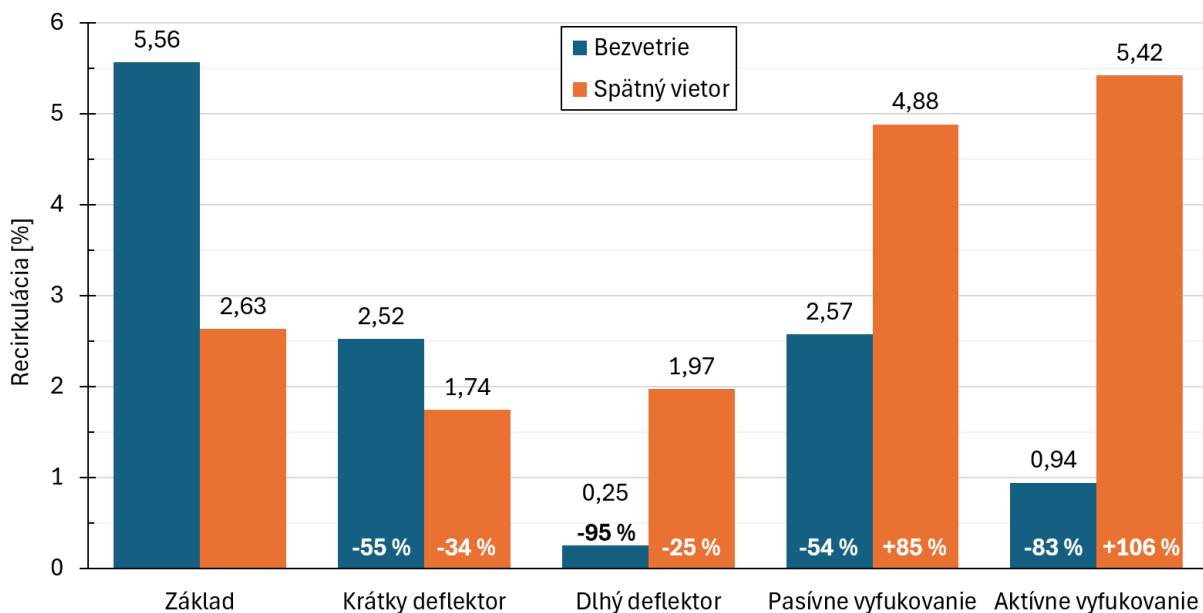
Obr. 8.30: Pasívny skalár varianty s aktívnym vyfukovaním v bezvetrÍ (hore) a v spätnom vetre (dole) na vstupe do motorového priestoru.

8.3. Zhrnutie

Obr. 8.31 ukazuje zhrnutie výsledkov všetkých počítaných variant, z ktorých je možné vyvodit niekoľko záverov.

Dlhý deflektor vykazuje jednoznačú výhodu oproti jeho krátkej verzii, keďže úroveň redukcie vonkajšej recirkulácie v bezvetří výrazne prevyšuje jej mierne zhoršenie v spätnom vetre (pri čom si stále zachováva významné zlepšenie oproti základnej variante).

Pasívne vyfukovanie v bezvetří dorovnáva výsledok dosiahnutý krátkym deflektorom, zatiaľ čo aktívne vyfukovanie ho výrazne prekonáva a dosahuje takmer takej účinnosti ako dlhý deflektor. V spätnom vetre ale obidve varianty vyfukovania spôsobujú výrazné zhoršenie množstva vonkajšej recirkulácie oproti základnej variante, čo by mohlo predstavovať určité riziko pri predpoklade, že v reálnych situáciách je istý poryv vetra prítomný prakticky neustále.



Obr. 8.31: Množstvo vonkajšej recirkulácie pre jednotlivé varianty.

Záver

Táto práca sa zaoberala popisom fenoménu recirkulácie teplého vzduchu v motorovom priestore. Po preskúmaní existujúcich štúdií na túto tému bolo možné zhodnotiť, že nie je pochýb o negatívnom vplyve recirkulácie na účinnosť chladiaceho systému, a že aplikácia rôznych navádzačov vzduchu či tesnení medzier vystupujúcich ako recirkulačné kanály ju dokáže spoľahlivo obmedziť či úplne eliminovať. Zároveň je však zrejmé, že tieto opatrenia neriešia vplyv vonkajšej recirkulácie a že štúdie zaoberajúce sa týmto problémom sú prakticky neexistujúce.

Pomocou obdržaných CFD dát bola uskutočnená analýza prúdenia v motorovom priestore skúmaného vozidla, ktorej výsledky slúžili ako základ pre vytvorenie výpočtového modelu slúžiaceho na rýchle analýzy chladiaceho paketu vo vývojovej fáze vozidla bez nutnosti uskutočňovania cenovo a časovo náročných experimentov či numerických výpočtov. Analyzované boli dva režimy v stave nabíjania vozidla, a to bezvetrie a prítomnosť spätného vetra s rýchlosťou -10 km/h. Z analýzy vyplynulo, že ako v bezvetrí, tak v prítomnosti spätného vetra je množstvo vnútornej recirkulácie takmer totožné (14,6 %, resp. 15,9 % pre recirkuláciu na vodnom chladiči; 7,5 %, resp. 7,6 % pre recirkuláciu na kondenzátore). Vonkajšia recirkulácia naopak zaznamenala výrazný nárast v prípade spätného vetra, a to o takmer 10 % (16,2 %, resp. 25,9 %).

Následne bol úspešne zostavený výpočtový model, pre ktorý bolo taktiež vytvorené prehľadné užívateľské rozhranie umožňujúce jednoduchú obsluhu. Pomocou tohto modelu bolo vykonaných niekoľko citlivostných analýz na preskúmanie vplyvu rôznych vstupných parametrov na sledované veličiny chladiaceho systému reprezentujúce jeho účinnosť. Ich výsledkom bolo zistenie, že najväčšiu citlivosť vykazuje vonkajšia recirkulácia a že má najväčší potenciál pre zlepšenie, zatiaľ čo vnútorná recirkulácia bola v sledovanom vozidle už dostatočne pod kontrolou a ďalšie opatrenia na ňu zamerané by priniesli iba zanedbateľné zlepšenie.

Na základe tohto zistenia boli navrhnuté geometrické úpravy vozidla zamerané na zníženie či odstránenie negatívneho vplyvu vonkajšej recirkulácie. Z dôvodu nedostupnosti geometrického modelu predchádzajúceho skúmaného vozidla boli tieto opatrenia uskutočnené na voľne dostupnej geometrii DrivAer. Celkovo štyri geometrické varianty (krátky a dlhý deflektor, pasívne a aktívne vyfukovanie vzduchu z motorového priestoru) boli spočítané vo dvoch režimoch (bezvetrie a spätný vietor) pomocou CFD nástroja OpenFOAM, pričom bolo vyhodnocované množstvo recirkulácie na vstupe do motorového priestoru. Z výsledkov týchto výpočtov je možné vyvodiť tieto závery:

- Na rozdiel od vozidla skúmaného v kapitole 6, DrivAer vykazoval výrazne nižšiu (približne polovičnú) recirkuláciu v spätnom vetre oproti bezvetriiu.
- Najlepšou variantou bol dlhý deflektor, ktorý znížil recirkuláciu v bezvetří o 95 % a v spätnom vetre o 25 %.
- Krátky deflektor bol v spätnom vetre mierne účinnejší (-34 %), no v bezvetří výrazne menej účinný než dlhý deflektor (-55 %). Aj napriek tomu to možno považovať za úspešnú redukciu recirkulácie.

- Obe varianty vyfukovania vzduchu výrazne zhoršili recirkuláciu v spätnom vetre, pasívne o 85 % a aktívne o 106 %. V prípade bezvetria boli ich výsledky podobné výsledkom deflektorov.

Je nutné podotknúť, že všetky tieto varianty majú slúžiť len ako základ a nastienenie možných spôsobov vylepšenia účinnosti chladiaceho systému. Pri rozhodovaní o tom, ktorá z týchto variant je najvhodnejšia pre realizáciu a nasadenie v sériovom vozidle je okrem samotných výsledkov výpočtov nutné vziať do úvahy aj ďalšie faktory. Prítomnosť deflektora by mohla priniesť zásadné zhoršenie koeficientu odporu vozidla, ktorý je v prípade elektromobilov jedným z najvýznamnejších parametrov. Vyfukovanie vzduchu by naopak mohlo lepšie fungovať v prípade iného umiestnenia výstupu. Ďalej by bolo nutné bližšie preskúmať možnosti zástavby a dimenzovanie súčiastok ako sú napr. elektromotory zodpovedné za vysúvanie deflektora či ventilátor umožňujúci aktívne vyfukovanie vzduchu. V neposlednom rade je treba všetky zásahy zvážiť s ohľadom na cenu ich implementácie.

Literatúra

- [1] BASKAR, S a RAJARAMAN, R. Airflow Management in Automotive Engine Cooling System - Overview. Online. *International Journal of Thermal Technologies*. 2015, vol. 5, no. 1. ISSN 2277 – 4114. Dostupné z: <https://inpressco.com/category/ijtt/>. [cit. 2023-10-25].
- [2] *Active grille shutter: Controlling air flow for enhanced performance and comfort*. Online. In: Valeo - Smart technology for smarter mobility. Dostupné z: <https://www.valeo.com/en/active-grille-shutter>. [cit. 2024-02-11].
- [3] JAEWAN, Kim; JINWOO, Oh a HOSEONG, Lee. Review on battery thermal management system for electric vehicles. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2019, vol. 149, s. 192-212. ISSN 1873-5606. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.020>. [cit. 2023-10-25].
- [4] GANG, Zhao; XIAOLIN, Wang a HENGYUN, Zhang. A review of air-cooling battery thermal management systems for electric and hybrid electric vehicles. Online. *Journal of Power Sources*. 2021, vol. 501. ISSN 1873-2755. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230001>. [cit. 2023-10-25].
- [5] HE, Liange; JING, Haodong; ZHANG, Yan; LI, Pengpai a GU, Zihan. Review of thermal management system for battery electric vehicle. Online. *Journal of Energy Storage*. 2023, vol. 59. ISSN 2352-1538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106443>. [cit. 2023-10-25].
- [6] WESTBROOK, Mike. H. *The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars (Energy Engineering)*. 1st ed. The Institution of Engineering and Technology, 2001. ISBN 978-0852960134.
- [7] KHAN, Aamir; YAGUB, Sana; AHMAD, Adeel Wagas a NAZIR, Hassan et al. A state-of-the-art review on heating and cooling of lithium-ion batteries for electric vehicles. Online. *Journal of Energy Storage*. 2024, vol. 76. ISSN 2352-1538. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109852>. [cit. 2023-10-25].
- [8] MUKILAN, Arasu; QADEER, Ahmed a RIZZONI, Giorgio. Optimizing Battery Cooling System for a Range Extended Electric Truck. Online. *SAE Technical Paper*. 2019, 2019-01-0158. ISSN 2688-3627. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0158>. [cit. 2024-01-20]
- [9] WU, Weixiong; WANG, Shuangfeng; WU, Wei; CHEN, Kai; HONG, Sihui et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management. Online. *Energy Conversion and Management*. 2019, vol. 182, s. 262-281. ISSN 1879-2227. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.051>. [cit. 2023-10-25].
- [10] THAMIZULLAH, Suheab. *Thermal Management in Automotive Electric Propulsion Systems*. Online. In: SoftInWay Turbomachinery Blog. 2019. Dostupné z: <https://blog.softinway.com/thermal-management-in-automotive-electric-propulsion-systems>. [cit. 2023-10-25].

- [11] *SSP 881213 - Air Conditioning and Heat Pump in MEB Vehicles*. Online. Volkswagen Group of America, 2021. Dostupné z: <https://docplayer.net/220169869-Air-conditioning-and-heat-pump-in-meb-vehicles.html>. [cit. 2024-05-05].
- [12] PARK, Joonbum; AN, Jaehyuck; HAN, Kyoungseok; CHOI, Hong-Soon a PARK, Il Seouk. Enhancement of cooling performance in traction motor of electric vehicle using direct slot cooling method. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2022, vol. 217. ISSN 1873-5606. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119082>. [cit. 2023-10-25].
- [13] MARATHE, Siddharth a WENDLING, Loïc. *E-MOTOR COOLING WITH PREONLAB 5.2*. Online. In: FIFTY2 Technology GmbH | PreonLab Software. Dostupné z: <https://www.fifty2.eu/innovation/e-motor-cooling-with-preonlab-5-2>. [cit. 2024-04-13].
- [14] KHALED, Mahmoud; HARAMBAT, Fabien a PEERHOSSAINI, Hassan. Underhood thermal management: Temperature and heat flux measurements and physical analysis. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2010, vol. 30, iss. 6-7, s. 590-598. ISSN 1873-5606. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.11.003>. [cit. 2024-01-20].
- [15] YANG, Zhigang; BOZEMAN, Jeffrey a SHEN, Fred Z. CFD for Flow Rate and Air Re-Circulation at Vehicle Idle Conditions. Online. *SAE Technical Paper*. 2004, 2004-01-0053. ISSN 2688-3627. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2005-01-1512>. [cit. 2024-01-20].
- [16] MATHUR, Gursaran D.; Performance Enhancement of Mobile Air Conditioning System With Improved Air Management for Front End. Online. *SAE Technical Paper*. 2005, 2005-01-1512. ISSN 2688-3627. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2004-01-0053>. [cit. 2024-01-20].
- [17] SONG, Xu; MYERS, John a SARNIA, Scott. Integrated Low Temperature Cooling System Development in Turbo Charged Vehicle Application. Online. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 2014, vol. 7, no. 1, s. 163-173. ISSN 1946-4002. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2014-01-0638>. [cit. 2024-01-20].
- [18] SONG, Xu; FORTIER, Ryan a SARNIA, Scott. Underhood Air Duct Design to Improve A/C System Performance by Minimizing Hot Air Recirculation. Online. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 2015, vol. 8, no. 1, s. 338-345. ISSN 1946-4002. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1689>. [cit. 2024-01-20].
- [19] ÇENGEL, Yunus A.; TURNER, Robert H. a CIMBALA, John M. *Fundamentals of thermal-fluid sciences*. 3rd ed. Boston: McGraw-Hill, c2008. ISBN 978-007-126631-4.
- [20] EROLIN, Justice. *8 Best Python GUI Frameworks*. Online. In: BairesDevBlog: Insights on Software Development & Tech Talent. Dostupné z: <https://www.bairesdev.com/blog/best-python-gui-libraries>. [cit. 2024-02-03].

- [21] KUMMARIKUNTLA, Teja. *Choosing the Right Python GUI Framework: A Complete Guide*. Online. In: ToolJet | Open-source low-code platform to build internal tools. Dostupné z: <https://blog.tooljet.com/python-gui-framework>. [cit. 2024-02-03].
- [22] *DrivAer Model*. Online. In: Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics, Technical University of Munich. Dostupné z: <https://www.epc.ed.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer>. [cit. 2024-02-11].
- [23] ALI, Mohamed Sukri Mat; JALASABRI, Jafirdaus; SOOD, Anwar Mohd; MANSOR, Shuhaimi; SHAHARUDDIN, Haziqah et al. Wind noise from A-pillar and side view mirror of a realistic generic car model, DriAver. Online. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*. 2018, vol. 14, no. 1. ISSN 1479-1471. Dostupné z: <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2018.093109>. [cit. 2024-02-11].
- [24] *Geometry*. Online. In: Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics, Technical University of Munich. Dostupné z: <https://www.epc.ed.tum.de/en/aer/research-groups/automotive/drivaer/geometry>. [cit. 2024-02-11].
- [25] ARNETTE, Steve a MARTINDALE, Bill. Advances in Wind Tunnel Aerodynamics for Motorsport Testing. Online. *SAE Technical Paper*. 2000, 2000-01-3549. ISSN 2688-3627. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2000-01-3549>. [cit. 2024-04-08].

Zoznam použitých skratiek a symbolov

BEV		Battery electric vehicle – batériové elektrické vozidlo
CFD		Computational fluid dynamics – výpočtová dynamika tekutín
ETD		Entering temperature difference – rozdiel vstupných teplôt
GUI		Graphical user interface – grafické užívateľské rozhranie
KK		Klimakondensator – klimatizačný kondenzátor
NTK		Niedertemperaturkühler – nízkoteplotný chladič
SUV		Sports utility vehicle – športové úžitkové vozidlo
A	$[\text{m}^2]$	Plocha
B_T	$[\%]$	Blokácia tunela
E	$[-]$	Pomer poklesu ETD
\dot{Q}	$[\text{kW}]$	Tepelný tok
T	$[\text{°C}]$	Teplota
T_S	$[\text{°C}]$	Teplota povrchu steny
T_∞	$[\text{°C}]$	Teplota v jadre tekutiny
α	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$	Súčiniteľ prestupu tepla
ϵ	$[-]$	Emisivita
λ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Súčiniteľ tepelnej vodivosti
σ	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	Stefan-Boltzmannova konštanta