



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

CHLADICÍ SYSTÉM FORMULE STUDENT

FORMULA STUDENT COOLING SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Marek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Janoušek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Jiří Marek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Michal Janoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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 bakalářské práce:

Chladicí systém Formule Student

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chladicí systém motoru monopostu Formule Student je jedním z klíčových prvků, který rozhoduje o tom, zda je možné využívat výkon motoru po celou dobu závodu. S použitím přeplňování a aerodynamických prvků pro zvýšení přitlaku se stává návrh chladicího systému komplexní úlohou, kde je třeba zahrnout proudění vzduchu přes aerodynamické prvky na výměník chladicího systému.

Cíle bakalářské práce:

Proveďte rešerši chladicích systémů motorů monopostů Formule Student.

Analyzujte aktuálně používaný systém ve vozidle Dragon 9.

Na základě analýzy navrhnete zlepšení systému se zaměřením na zvýšení účinnosti chladicího okruhu.

Zhodnoťte přínos provedených úprav.

Seznam doporučené literatury:

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily III: Motory. 4. přepracované. Brno: Avid, 2007. ISBN 978-80-903671-7-3.

KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.

2017-18 Formula SAE Rules. September 2, 2016. Michigan: SAE International, 2016, 175 s. Rev A. Dostupné také z: <http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf>.

Formula Student Germany All FSAE Teams. Formula Student Germany [online]. 2016 [cit. 2016-0-29]. Dostupné z: <http://www.formulastudent.de/fsc/>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá chladícím systémem Formule Student, analýzou současného systému chlazení, jeho konstrukčního řešení a návrhem na jeho zlepšení. Na základě rešerše chladících systému Formule Student a přízemního efektu byl implementován vodní výměník do zadního dvojitého difuzoru za účelem podpoření aerodynamiky a zlepšení důležitých parametrů pro dynamiku vozidla. Část výpočetní kapacity byla poskytnuta projektem „e-Infrastruktura CZ“ (e-INFRA LM2018140) poskytnuta na základě projektu výzkumu, vývoje a inovací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Formula Student, TU Brno Racing, chladící systém, simulace, CFD, BLDC, aerodynamika, difuzor, přízemní efekt

ABSTRACT

The bachelor's thesis deals with Formula Student cooling system, analysis of the current cooling system, its construction and possibilities for its improvements. Based on the research of Formula Student cooling systems, the water radiator was implemented into rear double diffuser in order to support aerodynamics and other important parameters for overall vehicle dynamics. Some of the computational resources were supplied by the project "e-Infrastruktura CZ" (e-INFRA LM2018140) provided within the program Projects of Large Research, Development and Innovations Infrastructures.

KEYWORDS

Formula Student, TU Brno Racing, cooling system, simulation, CFD, BLDC, aerodynamics, diffuser, ground effect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREK, Jiří. Chladicí systém Formule Student. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124750>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 52 s. Vedoucí práce Michal Janoušek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michala Janouška, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. června 2020

.....

Jiří Marek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Michalu Janouškovi Ph.D. za odborné vedení a věcné rady při zpracování této práce.

Dále bych chtěl poděkovat týmu TU Brno Racing za umožnění realizovat tento projekt.

OBSAH

Úvod	9
1 Formule Student	10
1.1 TU Brno Racing	10
2 Chladicí systémy ve formuli student	11
2.1 Odkryté výměníky	11
2.2 Sidepody	12
2.3 Výměníky za zadní nápravou.....	14
3 Pravidla soutěže.....	16
3.1 Pravidla pro chladicí systém	16
4 Přizemní efekt.....	17
4.1 Koncept ventilátoru.....	19
4.2 Koncept Venturiho tunelu.....	20
5 Analýza výkonnosti Konceptu.....	23
5.1 Laptime simulace	23
5.2 Měření	25
5.3 CFD simulace	31
6 Zástavba.....	41
6.1 Konstrukční řešení	43
6.2 Vrtule	46
6.3 Uložení vrtule.....	48
Závěr	49
Seznam použitých zkratk a symbolů	52

ÚVOD

Chladicí systém motoru monopostu Formule Student je jedním z klíčových prvků, který rozhoduje o tom, zda je možné využívat výkon motoru po celou dobu závodu. S použitím přeplňování a aerodynamických prvků pro zvýšení přitlaku se stává návrh chladicího systému komplexní úlohou, kde je třeba zahrnout proudění vzduchu přes aerodynamické prvky na výměník chladicího systému.

Nejprve byla provedena rešerše stávajících řešení chladicího systému v soutěži Formule Student a popsání jejich výhod a nevýhod. Následuje seznámení s pravidly, kterým musí navržený systém vyhovovat.

Práce se zabývá celkovou změnou konceptu chladicího systému na základě změny v pravidlech, týkající se nově povolené možnosti využít ventilátoru pro umocnění přízemního efektu. To má za následek zvýšení aerodynamického přitlaku a díky změnám zástavby pro tento koncept také došlo ke snížení koeficientu odporu a celkovému snížení hmotnosti a výšky těžiště chladicího systému a aerodynamického paketu.

Pro analýzu přínosu změn bylo provedeno několik softwarových simulací, jako simulace času na kolo a CFD simulace. Jako vstupní data do simulací sloužily experimentálně naměřené veličiny. Provedeno bylo měření průtoku vzduchu skrz tepelný výměník při použití různých konfigurací ventilátoru.

1 FORMULE STUDENT

Formule student je vzdělávací a výukový projekt zaměřený na studenty technických univerzit. Tento projekt má za úkol poskytnout studentům možnost získat praxi v inženýrském návrhu, vývoji, ale i konstrukci technických řešení v různých oblastech motorových vozidel. Dále student získá zkušenosti s prací v týmu, dodržování stanovených termínů a projektovém managementu.

Cílem projektu je každý rok navrhnout a zkonstruovat jednomístný monopost, který je vzhledem k zachování bezpečnosti studentů striktně svázán pravidly.

V létě se konají závody Formule Student, na kterých se týmy porovnávají s konkurencí jiných univerzit. Oficiální hodnocení je rozděleno do dvou hlavních kategorií.

První kategorií jsou statické disciplíny, do kterých spadá obhájení návrhu vozu, technických řešení a znalosti studentů. Další statickou disciplínou je nákladová studie na virtuální výrobu tisíce kusů monopostu. Poslední disciplínou je obchodní plán na prodej této série vozů. Hodnotícími těchto disciplín jsou experti z automobilové průmyslu a motorsportu.

Druhou kategorií jsou dynamické disciplíny. První z nich je akcelerace vozu na 75 m s pevným startem, dále skid-pad, což je simulace statického zatáčení při projíždění dráhy ve tvaru osmičky. Následuje autocross, kde monopost projíždí zhruba kilometrovou trať vystavěnou z kuželů na asfaltové ploše. Trať je velmi technická a slouží jako kvalifikace pro následující královskou disciplínu endurance. Tento vytrvalostní závod se odehrává na velmi podobné trati jako autocross. Délka tohoto vytrvalostního závodu je stanovena na 22 km, kdy v půce dochází k výměně řidičů, součástí hodnocení této disciplíny je spotřeba paliva. [1, 2]

1.1 TU BRNO RACING

Náš tým, založený v roce 2010, je tvořen studenty fakult Vysokého učení technického v Brně. Odborné podpory a konzultací se nám dostává jak od studentů doktorandského programu, tak od vedoucích pracovníků ústavu či externích odborníků nejen z automobilové praxe. [2]



Obrázek 1. Logo TU Brno Racing [5]

2 CHLADÍCÍ SYSTÉMY VE FORMULI STUDENT

Monoposty Formule Student ve spalovací kategorii využívají čtyřdobé vodou chlazené pístové motory a disponují tedy vodním výměníkem. Některé vozy mají i olejový výměník, jedná se zejména o vozy s přepřínováním turbodmychadlem, které je chlazeno olejem. Týmy konstruktérů jsou tedy nuceny řešit zástavbu, proudění vzduchu přes výměníky a další související problematiku chladicích systémů.

Mezi tři nejčastěji používané řešení zástavby chladicího systémů patří umístění výměníků po stranách vozu bez jakéhokoliv zakrytování a přídavného vedení vzduchu. Dalším řešením je umístění výměníků po stranách vozu a jejich zakrytování sidepody s případnými vzduchovody a posledním řešením je umístění výměníků za zadní nápravu.

2.1 ODKRYTÉ VÝMĚNÍKY

Toto řešení patří mezi nejjednodušší a v dnešní době již není tolik rozšířené.

Výhody tohoto řešení spočívají v jeho jednoduchosti, tudíž nízké hmotnosti, minimálních požadavcích na návrh a výrobu a s tím spojená nízká finanční a časová nákladnost.



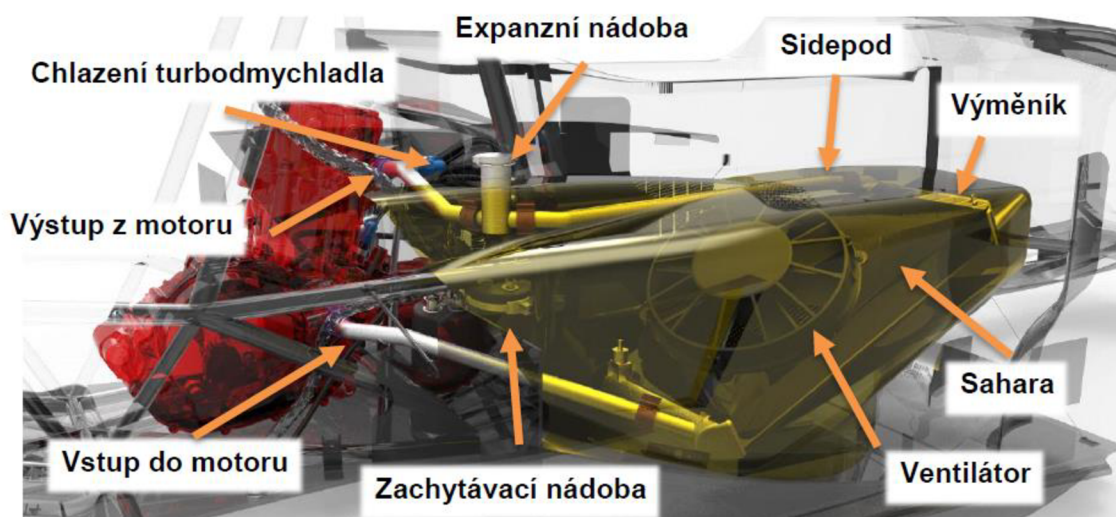
Obrázek 2. Formule týmu Gujarat Technological University [6]

Tyto plusy jsou převáženy nedostatky tohoto řešení jako vysoký aerodynamický odpor a při sklopení chladičů vznik nežádaného vztlaku. Hlavním nedostatkem je ale nízká efektivita chlazení, protože bez příslušných vzduchovodů a usměrňovačů proudění okolního vzduchu dochází z velké části k obtoku výměníku a skrze něj proudí jen malá část vzduchu. Toto je pravděpodobně kompezováno použitím ventilátoru. Proudění za ventilátorem je ale velmi turbulentní a tvoří silné vířivé proudy, což může mít za následek negativní dopad na aerodynamické prvky umístěny za ním, zejména zadní křídlo nebo prvky podlahy v zadní části vozu. Proto tento koncept využívají spíše vozy bez aerodynamického balení.

2.2 SIDEPODY

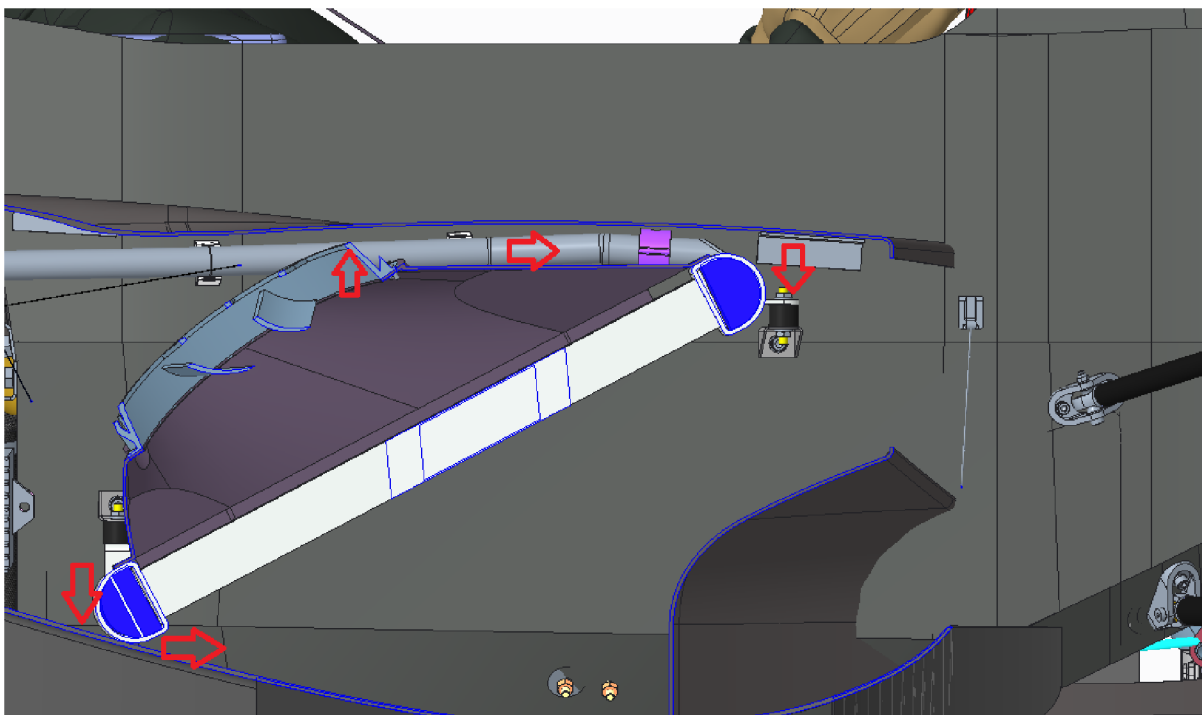
Dalším řešením je využití podobného umístění jako v předcházejícím konceptu, ale je navíc použito zakrytování s příslušnými vzduchovody pro zlepšení celkové efektivity.

Toto je nejčastěji používané řešení chladících systémů ve Formuli Student a náš tým toto řešení využíval po řadu let



Obrázek 3. Chladící systém Dragon 8 [2]

Aerodynamické krytování výměníku sidepody výrazně pomáhá celkové aerodynamice vozu snížením odporu a zejména zachováním mnohem čistšího proudění za výměníky. Vhodným umístěním vstupních otvorů a jejich velikosti lze docílit kontrolovaného průtoku vzduchu přes výměník. Tím je vyřešen hlavní nedostatek přecházejícího konceptu, ale na druhou stranu dochází k poněkud výraznému navýšení hmotnosti, které je způsobeno přidanými díly jako jsou sidepody a dalšími konstrukčními prvky bočního krytování vozu.

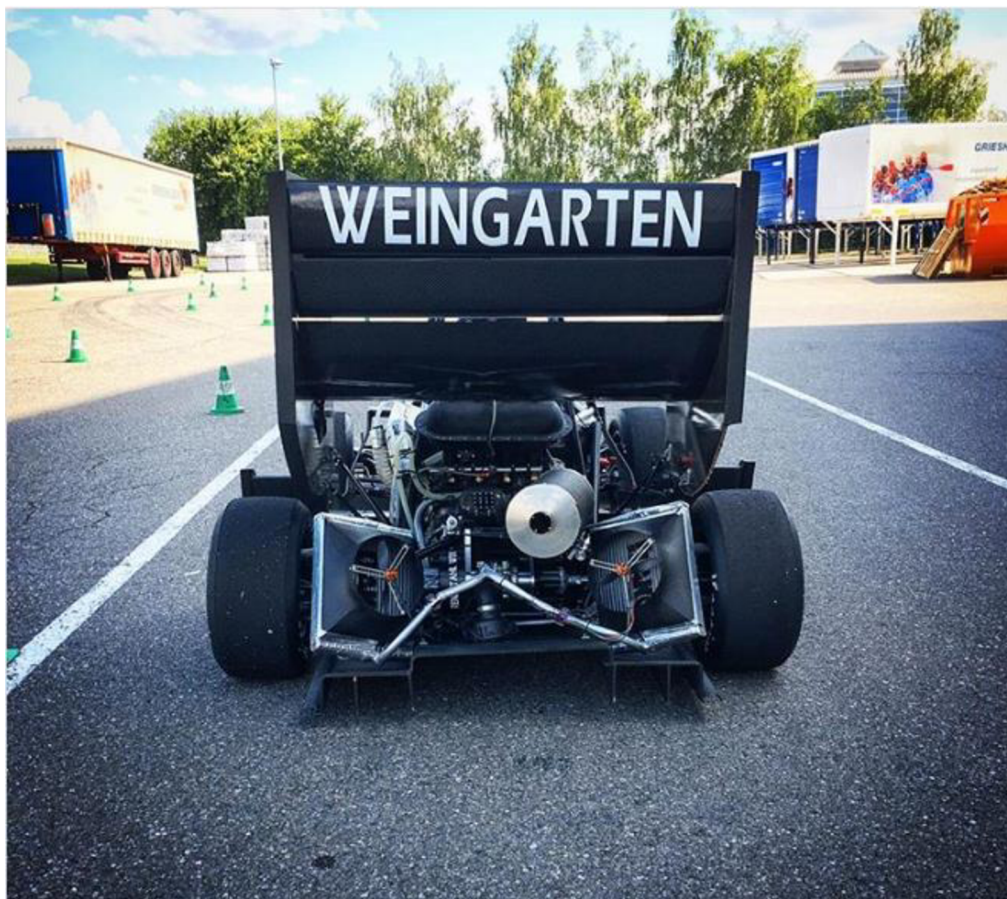


Obrázek 4. Naznačená recirkulace vzduchu tepelným výměníkem

Velmi důležitou součástí systému jsou potom utěsněné vzduchovody, které navádí vzduch od vstupní otvoru sidepodu do výměníku a z výměníku do ventilátoru, tak aby nedocházelo k nežádané recirkulaci vzduchu, tedy přísávání vzduchu, který již prošel výměníkem a jeho opětovný tok přes chladič. Recirkulace má za následek zvýšení teploty nasávaného vzduchu při stání nebo pomalé jízdě, což vede ke snížení efektivity chlazení. Přidání utěsněných vzduchovodů ale vede ke škrcení vstupu do chladiče a na grafu je patrný nižší průtok než ve variantě bez vzduchovodu. Tento průtok lze z velké části považovat za recirkulaci. [2]

2.3 VÝMĚNÍKY ZA ZADNÍ NÁPRAVOU

Posledním z častěji používaných řešení je umístění výměníků za zadní nápravou, a to v prostoru za poloosami nebo více na kraji za pneumatikami.



Obrázek 5. Pohled na zadní část vozu týmu FS Team Weingarten [7]

Toto řešení ustupuje požadavkům na aerodynamiku vozu, kde v boční části monopostu vzniká značný prostor pro boční difuzory a další prvky jako boční křídélka a podobné.



Obrázek 6. Postranní křídla vozu týmu TU Fast Racing Team [8]

Nevýhodou tohoto řešení může být vyšší hmotnost způsobená problémy s pevným připojením výměníků na poněkud vzdáleném místě od nosné části chasis vozu a dlouhým vedením chladicího média. Dalším z nedostatků je zvýšení momentů setrvačnosti vzhledem k těžišti vozu, a tedy i horší výsledná dynamika celého monopostu.

3 PRAVIDLA SOUTĚŽE

Formula Student je konstrukčně velmi komplexní závodní vůz a jeho návrh a stavba musí splňovat přísná pravidla. V Evropě v roce 2017 vznikly po vzoru původních pravidel publikovaných organizací Society of Automotive Engineers (SAE) nová pravidla vytvořena organizátory největšího závodu FSG, tyto pravidla byla rychle převzata ostatními evropskými soutěžemi. Pravidla jsou zaměřené zejména na bezpečnost nejen pilotů, ale i traťových komisařů, organizátorů a dalších.

Jelikož se náš tým TU Brno Racing zúčastňuje právě evropských soutěží, řídíme se pravidly FSG.

3.1 PRAVIDLA PRO CHLADÍCÍ SYSTÉM

Pravidly pro chladicí systém se zabývá část spadající pod obecné technické požadavky – pohonné ústrojí a jsou následující:

- Vodou chlazené motory musí používat jako chladicí kapalinu čistou destilovanou vodu.
- Chladicí systémy používající destilovanou vodu musí být kryté pevnou a teplotně odolnou zábranou v místech pod spojnicí kterékoliv části systému a rovinou 100 milimetrů nad spodní hranou helmy řidiče.
- Veškeré chladicí a mazací systému musí být řádně utěsněny, aby nedocházelo k únikům kapalin.
- Oddělené zachycovací nádoby musí zadržet jiné kapaliny než destilovanou vodu z jakéhokoliv odvětrávání chladících či mazacích systémů. Každá zachycovací nádoba musí mít objem, který je větší z těchto dvou, 10% kapaliny v systému kde je umístěna nebo 900ml.
- Odvětrávání systémů s destilovanou vodou musí mít zachycovací nádobu s minimálním objemem větším z těchto dvou, 10% kapaliny v systému kde je umístěna nebo 100ml.
- Zachycovací nádoby, jejich držáky a všechny hadice chladících a mazacích systémů musí být vyrobeny z materiálu, který je trvale teplotně odolný 120°C nebo teplotám který může daným systém dosáhnout.
- Zachycovací nádoby musí být upevněny k šasi, pod úrovní ramen řidiče a za ohnivzdornou přepážkou mezi motorovým prostorem a řidičem.
- Každá zachycovací nádoba musí být odvětrávání hadičkou s minimálním vnitřním průměrem 3 milimetry, vyvedenou mimo do spodní úrovně šasi mimo karoserii vozu.

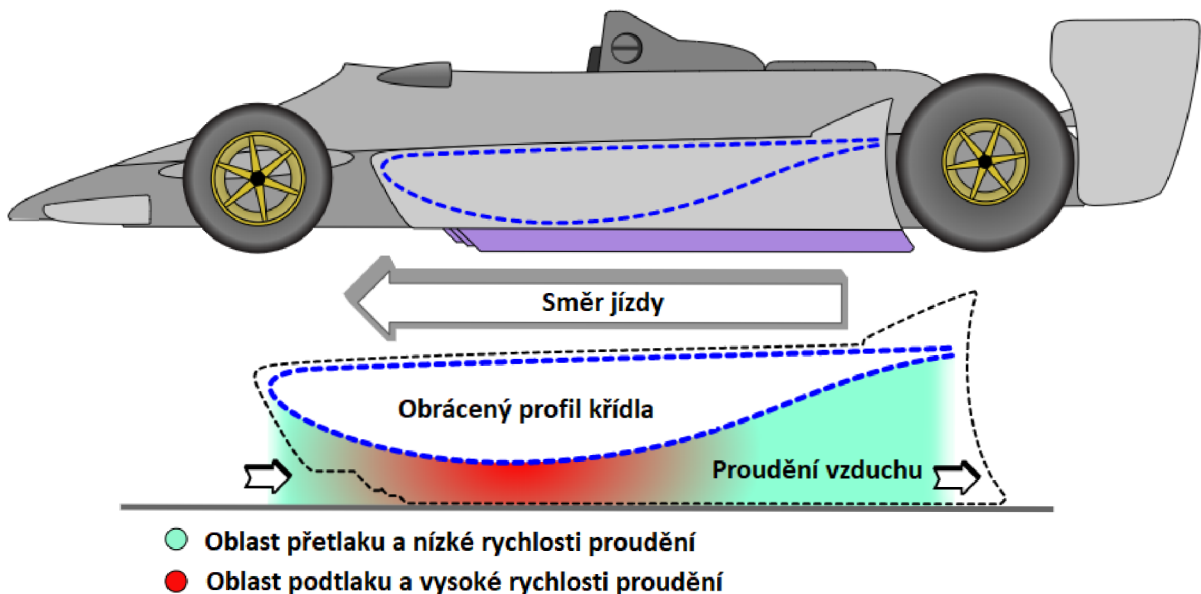
[1]

ZMĚNY V PRAVIDLECH PRO NOVOU SEZÓNU

V pravidlech pro sezónu 2020 došlo mezi jinými změnami i k odstranění zákazu použití hnaných zařízení pro posílení přizemního efektu.

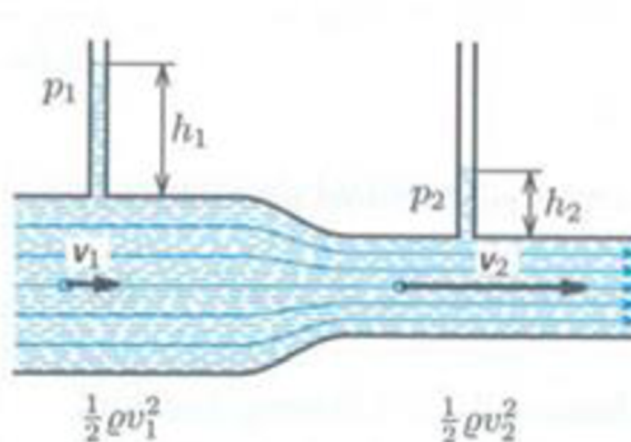
4 PŘÍZEMNÍ EFEKT

Přízemní efekt je v motorsportu do jisté míry využíván pro zvýšení přtlaku závodních monopostů, díky kterému pak mohou dosahovat vyšších rychlostí při průjezdu zatáčkami. Podobnému efektu zvýšení přtlaku lze dosáhnout i aerodynamickými křídly. Využití přízemního efektu má ovšem výhodu v tom, že i při významném zvýšení přtlaku nedochází k nárůstu odporu. [17]



Obrázek 7. Přízemní efekt [9]

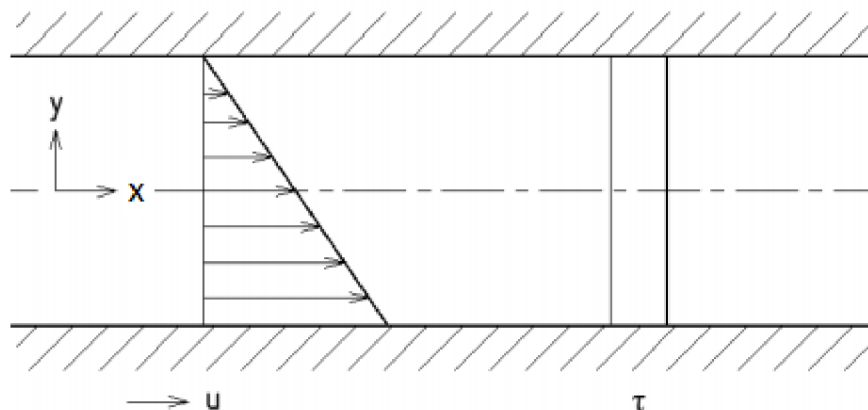
Ke zvýšení přtlaku dochází díky Bernoulliho principu. Proudící vzduch se dostává pod monopost čímž se výrazně zmenší plocha příčného průřezu, ve kterém vzduch může proudit, čímž dojde k jeho urychlení a snížení tlaku. Díky tomuto snížení tlaku mezi podlahou vozu a zemí dochází ke vzniku přtláčné síly. [17]



Obrázek 8. Bernoulliho princip [10]

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2 \quad (1)$$

Významnou roli u přízemního efektu hraje také viskozita proudícího vzduchu. Při pohybu závodního monopostu se země vzhledem k vozu pohybuje směrem dozadu. Mezní vrstva při zemi potom díky viskózním silám pomáhá urychlovat vzduch. Tento jev je v případě laminárního proudění označován jako Couettovo proudění. [17]



Obrázek 9. Couettovo proudění [11]

4.1 KONCEPT VENTILÁTORU

Jedním z prvních konstruktérů, který těchto poznatků využil v motorsportu byl Američan Jim Hall s jeho vozy Chaparral Cars. První prototypy v roce 1961 se pokoušely využít aerodynamicky tvarované podlahy vozu, ale měly jiné aerodynamické problémy, díky kterým se výhody toho řešení příliš neprojevíly a nebylo tedy ve výzkumu pokračováno. Revolučním vozem se stal jeho Chaparral 2J v roce 1970, které využíval dvojici ventilátorů v zadní části vozu poháněných dvoutaktním motorem. Tyto ventilátory odsávaly velké množství vzduch z prostoru pod vozem, čímž v tomto prostoru docházelo ke vzniku podtlaku. Vůz také disponoval bočními zástěrkami, které prakticky izolovaly prostor pod podlahou vozu od okolní atmosféry. [17,18,19]



Obrázek 10. Chaparral 2J [12]

4.2 KONCEPT VENTURIHO TUNELU

Dalšího využití a vývoje se přízemní efekt dočkal v prostředí Formule 1, kde týmy v sedmdesátých letech přemístily právě prvky chladicího systému systému jako například tepelné výměníky na strany vozu vedle řidiče. Výměníky byly kryty částí karoserie zvanou „sidepod“. Toto umožnilo konstruktérům výrazně zmenšit celkovou zástavbu hnacího ústrojí a podpořit tak aerodynamické vlastnosti vozu. [17,18,19]

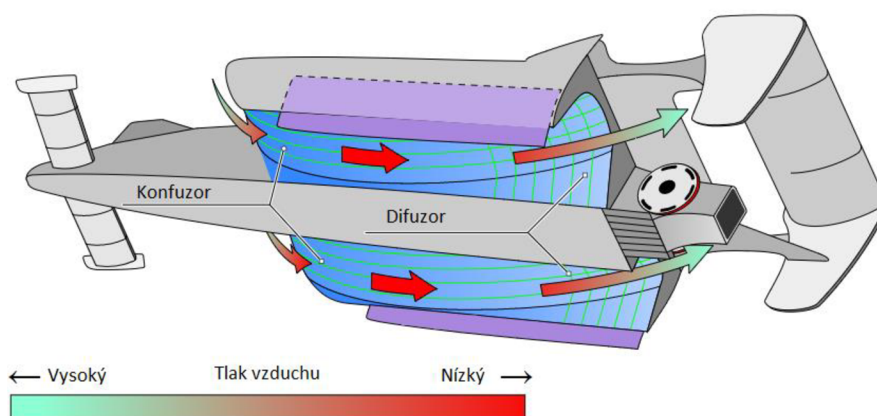


Obrázek 11. Příklad formule bez sidepodů, Ferrari 312B [13]



Obrázek 12. Formule se sidepody, McLaren MP4/4 [14]

Díky tomuto uspořádání vozu vznikla pro konstruktéry mnohem větší možnost tvarovat prvky podlahy monopostů a usměřňovat tak proudění mezi vozovkou a podlahou vozu. Jedním z průkopníků v této oblasti byl Shawn Buckley, který v sedmdesátých letech zabýval prouděním vzduchu pod podlahou závodních vozů. Testování prototypů ve větrném tunelu vedlo ke vzniku struktury podobné Venturiho tunelu v oblasti sidepodů. Těchto poznatků využil při vývoji závodního vozu Lotus 78. [15,16,17]



Obrázek 13. Venturiho tunel [15]

Vyvrcholením éry vozů využívajících „powered ground effect“ se stal Brabham-Alfa Romeo BT46B, který využíval výkonného ventilátoru pohaněného přímo z převodovky vozu a bočními zástěrkami. Výsledný přítlak tedy přímo závisel na otáčkách motoru. Efekt tohoto systému byl tak značný, že i když vůz stál na místě a došlo k vytočení motoru, celý vůz se „přisál“ k zemi a viditelně se snížila jeho jízdní výška.

Tento vůz se zúčastnil pouze jednoho závodu, a to Velké ceny Švédska v roce 1978. Technickou přejímkou prošel na základě tvrzení týmu, že ventilátor z větší části slouží pouze k chlazení. Během závodu se ale jasně ukázalo, že toto tvrzení není pravdivé. [17,18,19]



Obrázek 14. Brabham-Alfa Romeo BT46B [16]

Na základě této rešerše a uvolnění pravidla o zařízeních podporujících přízemní efekt byl zvážen implementaci podobného systému do monopostu Dragon 10. Implementace vyžaduje zásadní změny zástavby celého systému chlazení s cílem zlepšit klíčové parametry vozu, které pozitivně ovlivní celkovou výkonnost vozidla.

5 ANALÝZA VÝKONNOSTI KONCEPTU

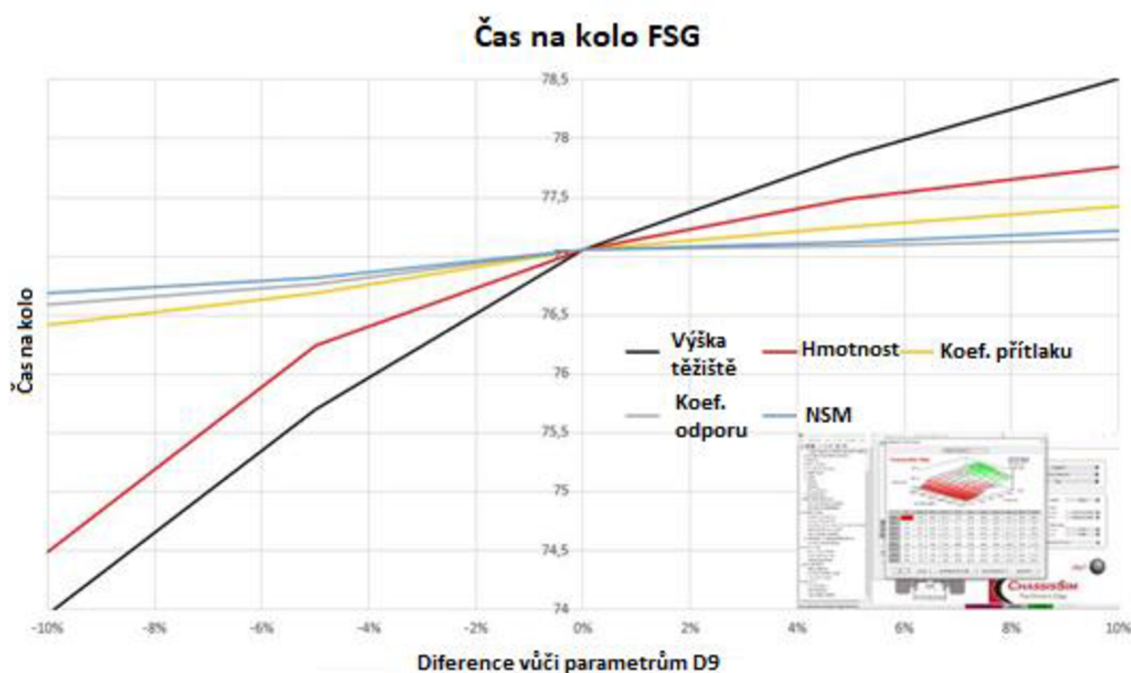
Cílem projektu Formule student je v první řadě porozumět principům návrhu a konstrukci závodního vozu. Na základě znalostí potom vyvinout a sestavit vlastní monopost, který se bude účastnit mezinárodních soutěží Formule Student. Při návrhu vozu se musí tým soustředit na specifické vlastnosti vozu, tak aby byl co nejrychlejší ve všech dynamických disciplínách. Každá disciplína je ovšem velmi odlišná a je tedy nutné během návrhu vozu přistupovat na různé kompromisy a rozhodovat se, který parametr vozu je důležitější a bude přínosnější ho upřednostnit. K určení důležitosti parametrů a následné evaluaci přínosu simulacemi a výpočty slouží různé softwarové nástroje. Do jisté míry se těmito simulacemi a výpočty dá orientačně řídit, je ovšem velmi důležité veškeré takto nabyté poznatky validovat měřením v reálném prostředí.

5.1 LAPTIME SIMULACE

Jedním z těchto nástrojů je simulace času na kolo, která hodnotí vozidlo jako celek, s ohledem na dosažení nejlepšího času v disciplíně endurance a autokros. Endurance je nejvíce bodově ohodnocená disciplína a zohledňuje komplexně všechny aspekty chování vozidla. Pro simulace času na kole využíváme software ChassisSim. Monopost je tvořen vstupními parametry, které jsou získány buď měřením z předchozích modelů nebo simulacemi.

Byla provedena citlivostní analýza následujících základních parametrů. Cílem bylo zjistit, které parametry mají největší vliv na čas na kolo.

Mezi tyto parametry se řadí ty nejzákladnější jako hmotnost, výška těžiště nebo jiné komplexní vlastnosti vozu jako aerodynamické mapy, výkonová a momentová křivka motoru, charakteristika tlumení zavěšení, vlastnosti pneumatiky a jiné. Dalším velmi důležitým vstupem je samotná trať na které simulace probíhá. Pro tento účel náš tým používá přesnou digitální kopii skutečné autokrosové a vytrvalostní tratě z největšího a nejdůležitějšího závodu na německém Hockenheimringu získanou z naměřených GPS souřadnic a drobné korekce pomocí kamerového záznamu z kamery umístěné přímo na našem voze. Software může dokonce zohlednit schopnost řidiče využít maximální potenciál vozu. [20,21]



Obrázek 15. Simulace času na kolo

Výstup této citlivostní analýzy je pak tento graf s vyznačenými změnami času na kolo na ose X v závislosti na změně různých parametrů o relativní hodnotu na ose Y. Tyto parametry jsou:

- Výška těžiště (CoG) - černá
- Hmotnost – červená
- Koeficient vztlaku (C_L) – žlutá
- Koeficient odporu (C_D) – šedá
- Neodpružené hmoty (NSM) – modrá

Je zřetelné, že změna výšky těžiště a hmotnosti vozu má mnohem větší vliv na výslednou rychlost vozu než například koeficient odporu C_D nebo koeficient přitlaku C_L při obdobné procentuální změně.

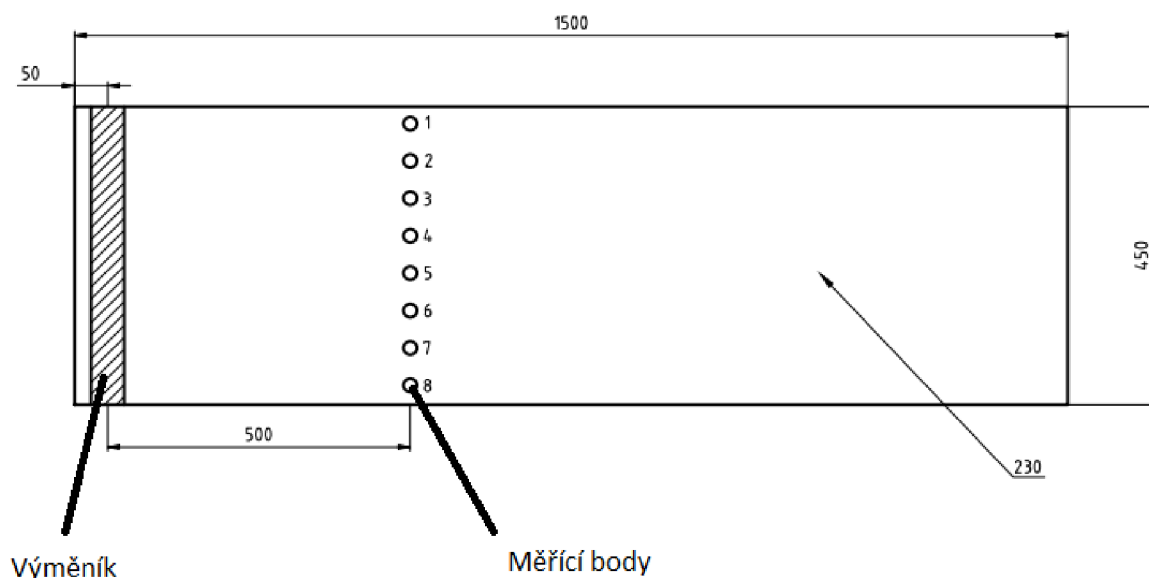
Na základě výsledku analýzy jasně vyplývá, že cílem úprav chladicího systému by měla být redukce hmotnosti, výšky těžiště a podpoření aerodynamiky vozidla. Bylo tedy přistoupeno na celkovou změnu konceptu, který by tyto požadavky umožnila.

Pro další zkoumání problematiky bylo nutné provést měření chování ventilátoru, jeho průtokových vlastností při použití různých vrtulí a motorů. Tyto údaje potom tvoří část vstupních veličin do CFD simulace, kdy se rozhodne přínos aerodynamiky vozu.

5.2 MĚŘENÍ

Pro určení průtokových parametrů ventilátoru v různých konfiguracích proběhlo měření dle normy ČSN EN 12599 příloha D.

Měření probíhalo ve vytvořeném vzduchovodu s rozměry tepelného výměníku tedy 450 mm x 230 mm a délce 1500 mm.



Obrázek 16. Schéma měřicí tratě

Blízko jednoho konce byl umístěn výměník osazený univerzálním držákem pro různé konfigurace ventilátoru. Za ventilátorem vzduchovod již nepokračoval pro věrnější napodobení skutečných podmínek v aplikaci na monopostu.

Požadavek rovnoměrného rychlostního profilu v průřezu vzduchovodu je málokdy splněn, z toho vyplývá že průřez je třeba rozdělit na dostatečný počet dílčích průřezů prostřednictvím sítě měření a ze změřených rychlostí v těchto průřezích se stanoví průměrná hodnota rychlosti. V průběhu měření je nutné dodržovat směr sondy a souřadnice bodu měření. Je nutné vzít v úvahu vliv vírů.

V tabulce T1 je uveden minimální počet bodů s ohledem na nejistotu měření 10% a 15% včetně nejistoty 5% nebo 10% měřícího přístroje jako funkce relativní vzdálenosti a/D_h . Tato relativní vzdálenost vychází z poměru vzdálenosti a mezi měřícím úsekem a místem, kde je rovnoměrnost narušena, a hydraulickým průřezem D_h vzduchovodu v rovině měření. [22]

Tabulka 1 – Požadovaný počet měřících bodů jako funkce relativní vzdálenost a/D_h od narušení proudu a relativní nejistoty [22]

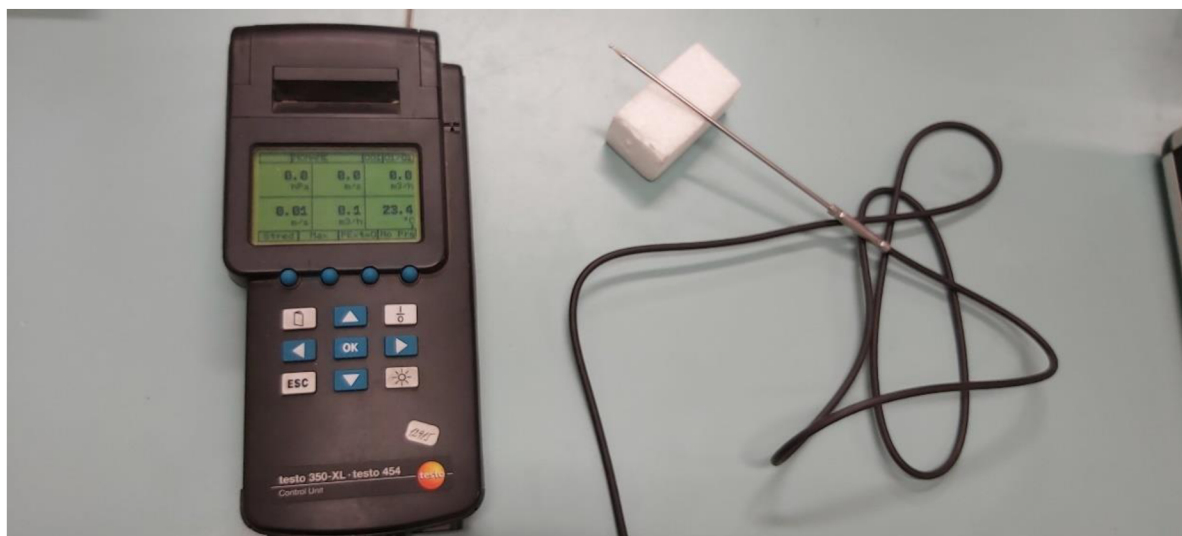
POŽADOVANÝ POČET MĚŘÍCÍCH BODŮ

RELATIVNÍ VZDÁLENOST	Celková nejistota [%] / nejistota měřícího zařízení [%]			
	A/D_H	„10/5“	„15/5“	„15/10“
1,6			30	44
2,0		50	21	30
2,5		34	16	24
3,0		25	12	18
4,0		16	8	12
5,0		12	6	9
6,0		9	4	6

Tabulka 2 – Parametry vzduchovodu

Délka vzduchovodu d [mm]	1500
Vzdálenost od narušení měřícího úseku a [mm]	500
Výška vzduchovodu A [mm]	450
Šířka vzduchovodu B [mm]	230
Průřez vzduchovodu $S = A * B$ [mm ²]	103 500
Obvod vzduchovodu $O = 2 * A + 2 * B$ [mm]	1360
Hydraulický průměr $D_h = (4*S) / O$ [mm]	304,4118
Relativní vzdálenost $A / D_h =$	1,64251

Pro měření bylo použito měřicí zařízení TESTO 350 XL osazeno sondou se žhavenou kuličkou taktéž od firmy TESTO vhodnou pro měření rychlostí 0 m/s až 10 m/s s nejistotou měření 5%.



Obrázek 17. Měřicí zařízení TESTO 350 XL se sondou

Z tabulky tedy vyplývá, že dostačující počet měřících bodů by měl být 30. Z důvodu zmenšení nepřesnosti měření a uvážení vznikajících vírů před ventilátorem bylo zvoleno bodů 40 v síti 8 hladin v delším rozměru vzduchovodu a 5 hladin v kratším rozměru. Měření se vyhodnotí tak, že se stanoví aritmetický průměr jednotlivých měření rychlostí v měřeném průřezu. Z této průměrné rychlosti je možné následně dopočítat objemový průtok vzduchu. [22]

Rychlost vzduchu byla měřena při různých konfiguracích ventilátorů při různých příkonech. Monopost Dragon 10 je vybaven pouze malým akumulátorem a alternátorem na jednoválcovém motoru Husqvarna FE 501, který je i po převinutí pro zlepšení jeho efektivity schopný dobíjet zhruba 250 W, ze kterých musí být napájeno zapalování motoru, desítky senzorů a dalších spotřebičů jako magnetoreologické tlumiče, elektricky řízená zadní náprava atd. Navržené ventilátory tedy v ideálním případě nesmí dlouhodobě překročit spotřebu původního ventilátoru SPAL VA07-AP12-/C-31S.

První měřenou konfigurací byl dosud využívaný ventilátor včetně jeho vrtule a motoru.



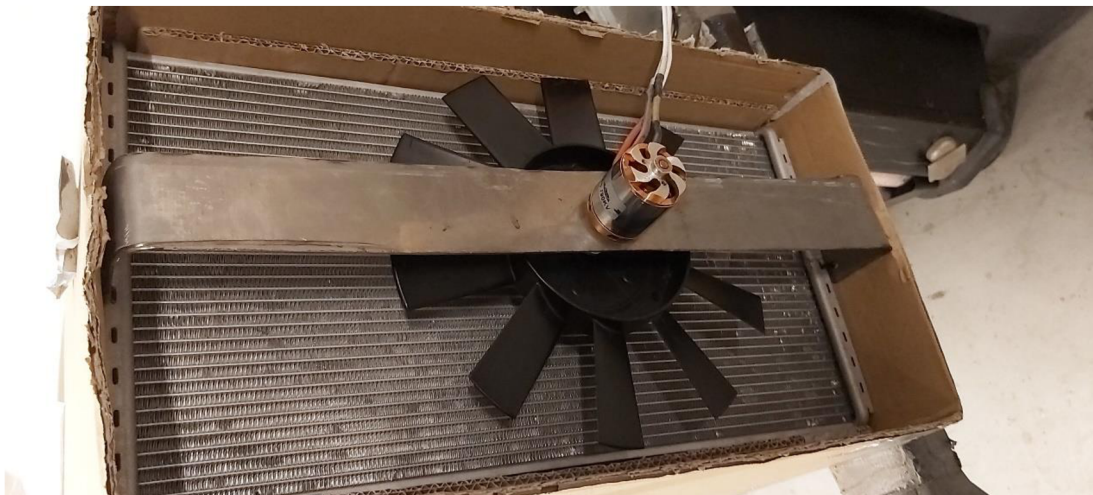
Obrázek 18. První konfigurace, Ventilátor SPAL VA07-AP12-/C-31S.

Druhou konfigurací bylo použití modelářského bezkartáčového motoru Turnigy D3548/6 s třílistou hnací vrtulí standardně používanou pro pohon dálkově ovládaných modelů a dronů.



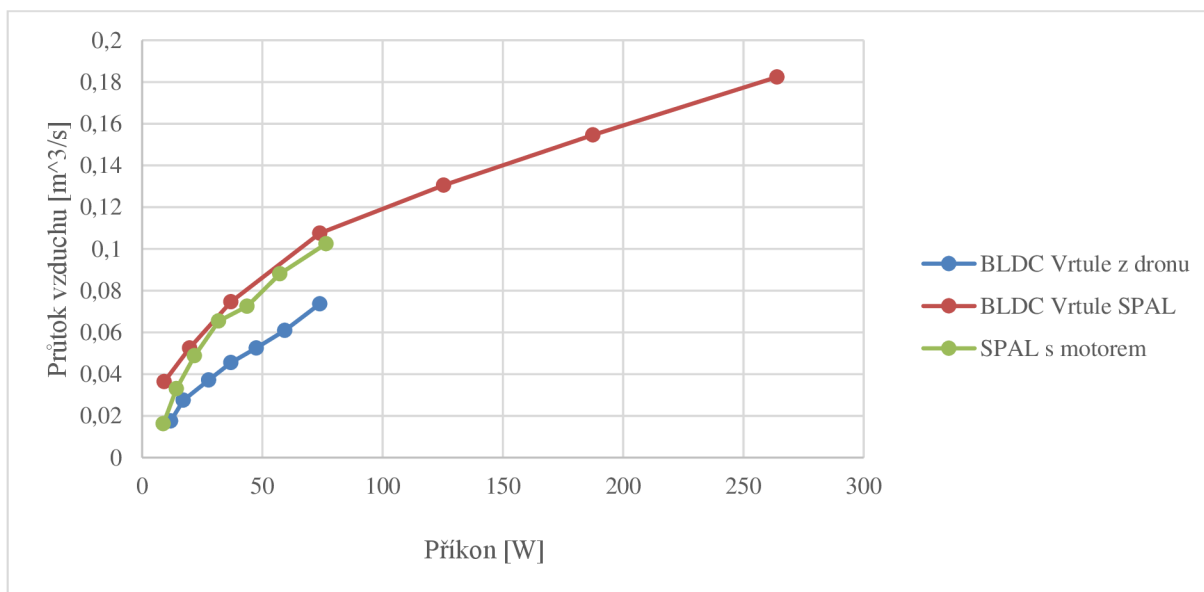
Obrázek 19. Druhá konfigurace, BLDC motor s třílistou vrtulí

Poslední konfigurací bylo použití stejného bezkartáčového motoru spojeného se sací vrtulí z ventilátoru SPAL VA07-AP12-/C-31S.



Obrázek 20. Třetí konfigurace, BLDC motor s vrtulí z ventilátoru SPAL

Výsledkem měření je graf závislosti průtoku vzduchu na příkonu motoru, měřený v zhruba desetiprocentních přírůstcích příkonu.



Obrázek 21. Graf závislosti průtoku na příkonu motoru

Z měření vyplývá nevhodnost použití třílisté vrtule, která díky svému malému aerodynamickému odporu dosáhla mnohem vyšších otáček při stejném příkonu, ale nebyla schopna dosáhnout dostatečného průtoku. Třílistá vrtule není schopna vytvořit se SPALem srovnatelný statický podtlak za výměníkem a není tak dosaženo dostatečného tlakového spádu.

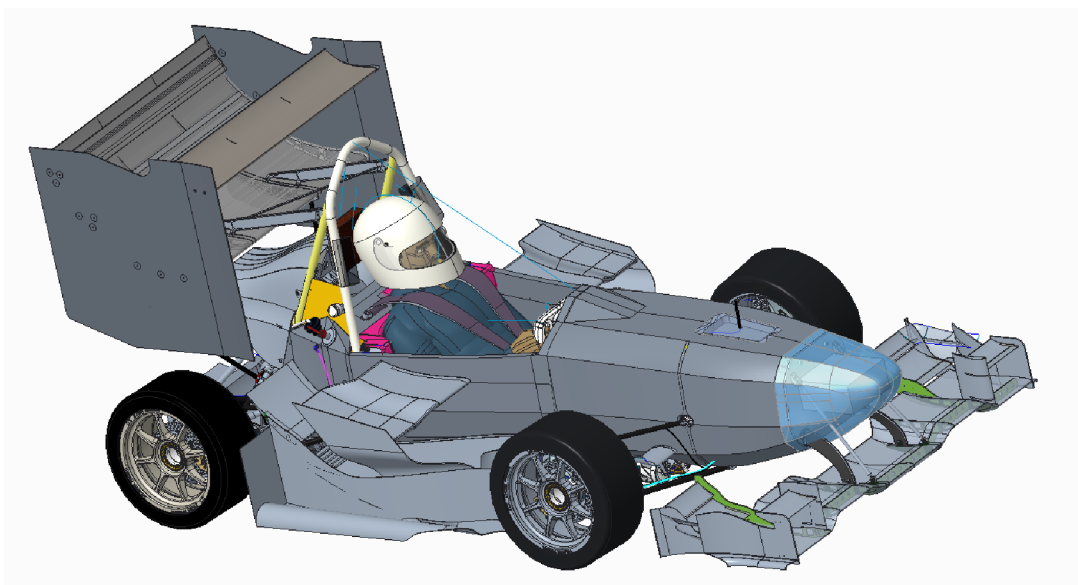
Podobnost konfigurací 2. a 3. v první části grafu byla očekávána a vychází z podobné účinnosti motorů, ale zatímco kartáčový motor již nebyl schopný pokračovat v navyšování otáček z konstrukčních důvodů, bezkartáčový motor dosáhl téměř dvojnásobného průtoku vzduchu, ovšem za cenu tří až čtyřnásobného zvýšení příkonu. Toto je pravděpodobně dáno geometrií sací vrtule, která je navržena pro práci v úzkém rozmezí otáček okolo 3000 min^{-1} , což zároveň odpovídá provozním otáčkám původního kartáčového motoru. Vzhledem k omezené kapacitě baterie je dlouhodobé využití tohoto navýšení nemyslitelné, ovšem v krátkých dynamických disciplínách jako je skidpad nebo autocross by akumulátor poskytl dostatečnou zásobu elektrické energie.

Ventilátor SPAL je s jeho příkonem přibližně 75 W schopný urychlit vzduch zhruba o 1 m/s a průtok vzduchu přes plochu výměníku se tedy zvětšil $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$. BLDC motory osazené stejnou vrtulí jsou při přibližně třinásobném příkonu 250 W schopny dosáhnout dvojnásobné rychlosti vzduchu 2 m/s, čemuž odpovídá průtok $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Naměřené urychlení vzduchu slouží jako vstupní parametr pro CFD simulaci.

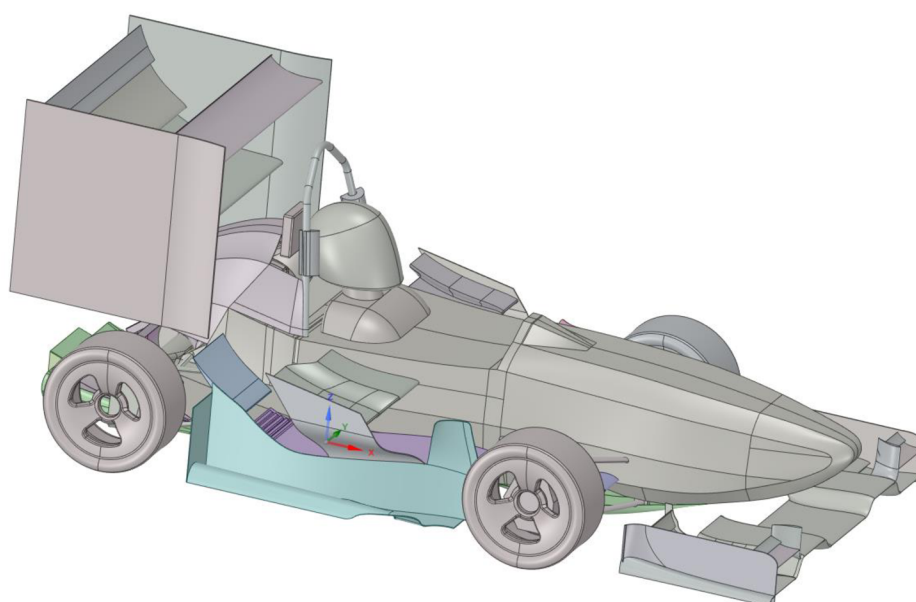
5.3 CFD SIMULACE

Aerodynamika vozu je velmi důležitá součást návrhu, jelikož její správné fungování má zásadní vliv nejen na jízdní vlastnosti, ale i na chladicí systém pohonné jednotky. Efektivita aeropaketu je také velmi úzce spjata se správným návrhem a nastavením podvozku. K vývoji aeropaketu slouží CFD simulace, pomocí kterých je posuzováno proudění vzduchu okolo vozu a vzniklé aerodynamické síly. Během návrhu jsou simulovány desítky různých verzí monopostu. Iterační metodou se tedy postupně dostáváme k nejlepšímu výsledku.

Jeden cyklus simulace obnáší přípravu geometrie, tj. její významné zjednodušení a vyčištění kvůli nárokům na výpočetní kapacitu a stabilitu výpočtu, nastavení výpočtové sítě a samotné simulace.

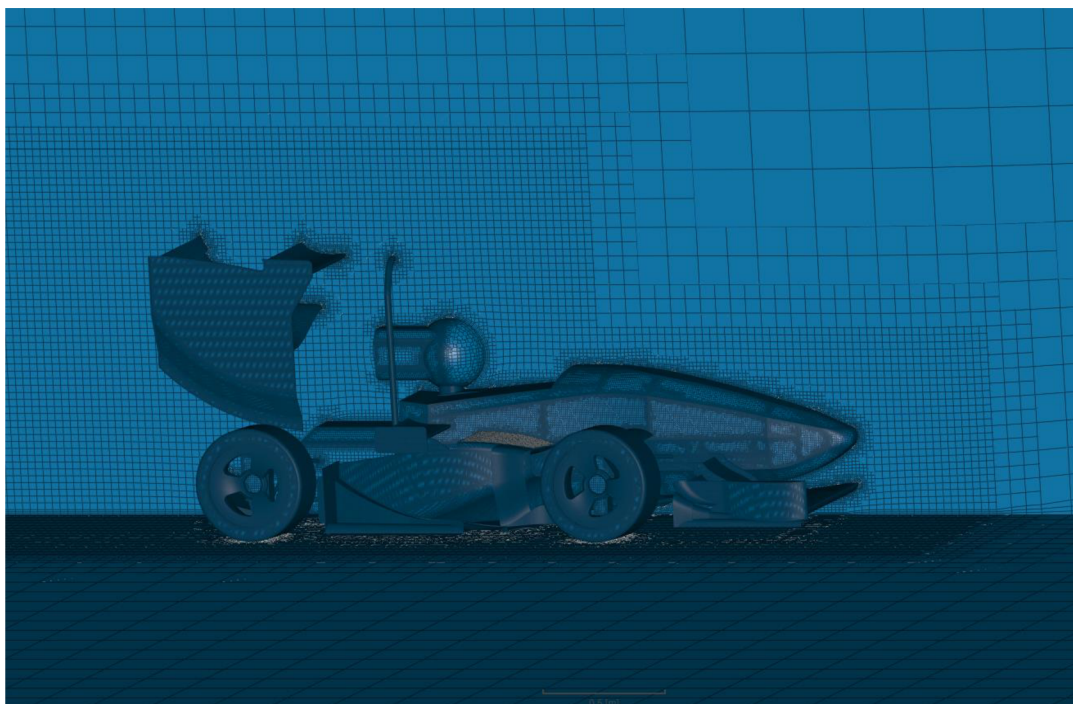


Obrázek 22. Příklad nezjednodušená verze 3D modelu Dragon 10



Obrázek 23. Příklad vyčištěné verze 3D modelu Dragon 10 vhodná pro CFD simulace

S takto upravenou geometrií je možné pokračovat s tvorbou výpočtové sítě tzv. „mesh“. Další zjednodušení pro simulace při rovné jízdě spočívá na rozdělení domény na dvě stranově symetrické poloviny. Takto zjednodušená síť má zhruba 25 až 30 milionů buněk a lze je použít pro ustanovení základních konceptů a výpočet efektů klonění vozů při prudkém brzdění, tzv. „pitch mapa“, která následně může sloužit jako vstup do laptime simulace.



Obrázek 24. Příklad mesh pro CFD simulaci

V případě simulování proudění při ustáleném stavu zatáčení již zjednodušení podélným rozpůlením domény není možné a výpočtová síť tedy dosahuje přibližně dvojnásobné velikosti, což vede k významnému zvýšení náročnosti výpočtu.

S připravenou výpočtovou sítí můžeme nastavit okrajové podmínky simulace které prezentují vstupní data do simulace, mezi ně patří:

- Rychlost proudění okolního vzduchu na vstupu do domény
- Rotace kol při dané rychlosti
- Nastavení porózní vlastnosti výměníků
- Nastavení ostatních ploch monopostu jako nepropustné stěny
- „Ubíhající“ vozovka pod monopostem
- Urychlení vzduchu v dvojitě difuzoru na základě naměřených hodnot a další

Takovouto simulací projde několik desítek vývojových verzí monopostu. Drtivá většina simulací spočívá v porovnávání drobnějších změn aerodynamických prvků.

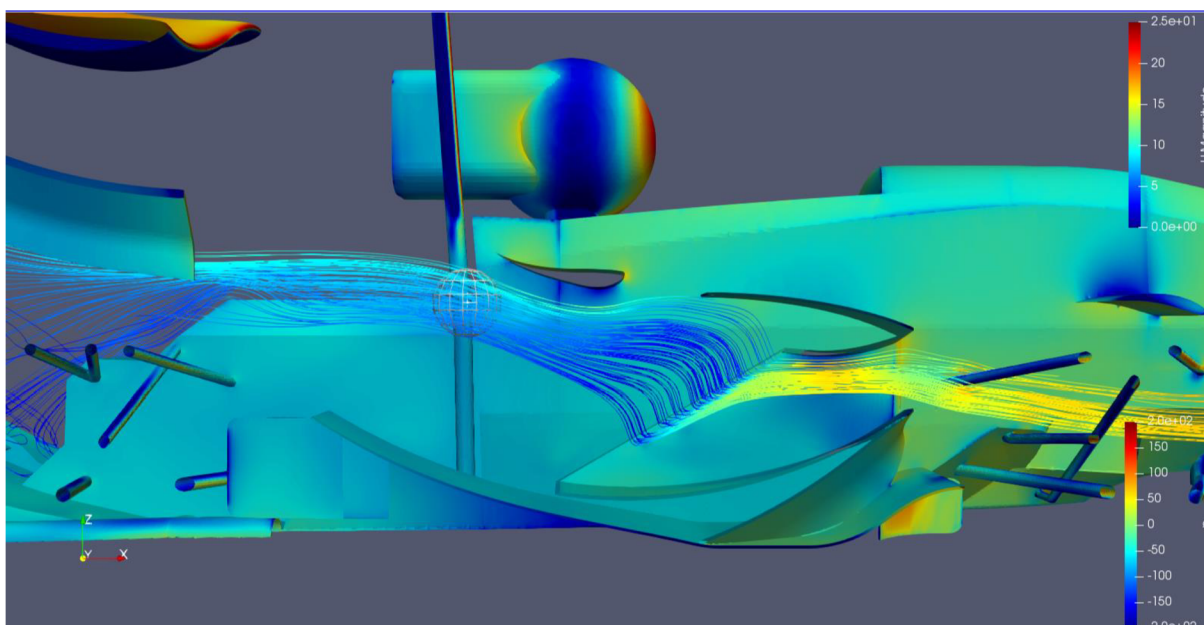
Největší změnou je porovnání dvou konceptů chladicího systému, a to zástavbového konceptu monopostu Dragon 9, kdy je vodní výměník umístěn v sidepodu na pravé straně vozu a nového konceptu, kdy jsou dva ventilátory na výměníku umístěném ve dvojitě difuzoru využívány k umocnění přízemního efektu.

DRAGON 9

Jako reference slouží design předcházejícího monopostu Dragon 9. Simulace proběhla při ustáleném stavu jízdy v přímém směru s následujícími okrajovými podmínkami:

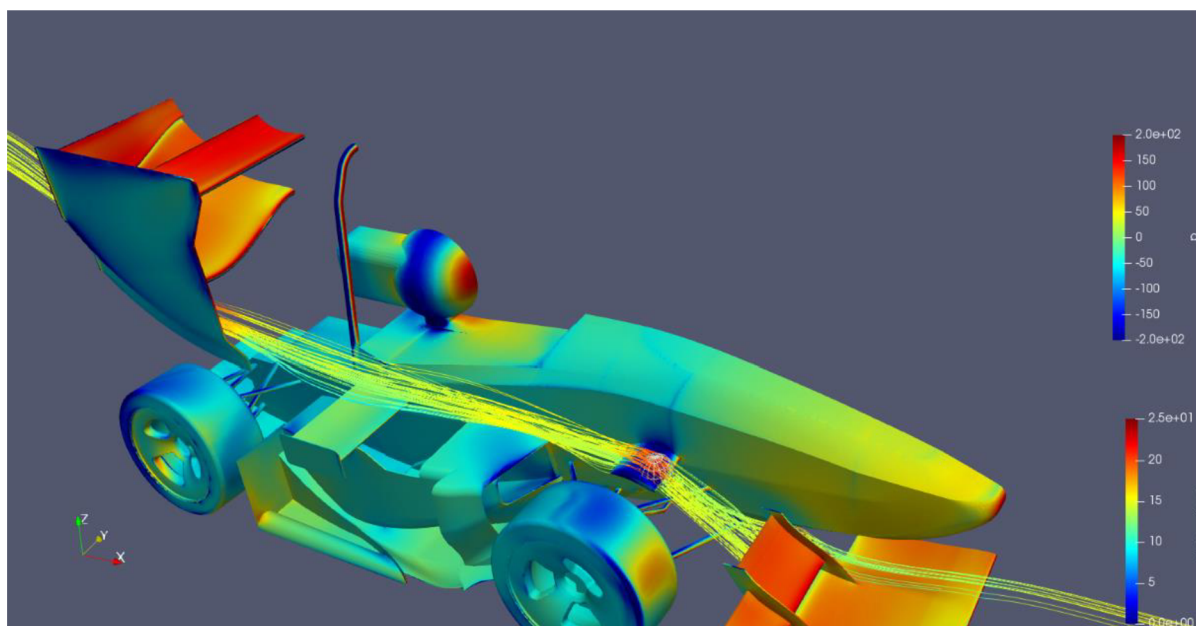
- Rychlost proudění na vstupu do domény: 16,7m/s
- Rotace kol s odpovídající úhlovou rychlostí
- „Ubíhající“ vozovka pod monopostem rychlostí 16,7m/s
- Porozita tepelného výměníku

Zástavba monopostu do jisté míry odpovídala standardnímu konceptu sidepodu, které byly ale doplněny o postranní křídla za účelem zlepšení chlazení vodního okruhu. Za stejným účelem byly na monopost přidány i přední postranní křídélka, které měly redukovat „upwash“, což je jev, kdy vzduch ovlivněný předním křídlem má silnou stoupavou tendenci a vyhýbá se tedy vstupním otvoru do sidepodu, na kterém navíc generuje nežádaný vztlak.



Obrázek 25. Řez sidepodem Dragon 9

Na obrázku je patrný efekt bočního křídla, které pomáhá odvádět vzduch z prostoru za výměníkem. Na plochách je vybarveno tlakové rozložení a proudnice jsou zbarveny dle rychlosti vzduchu.



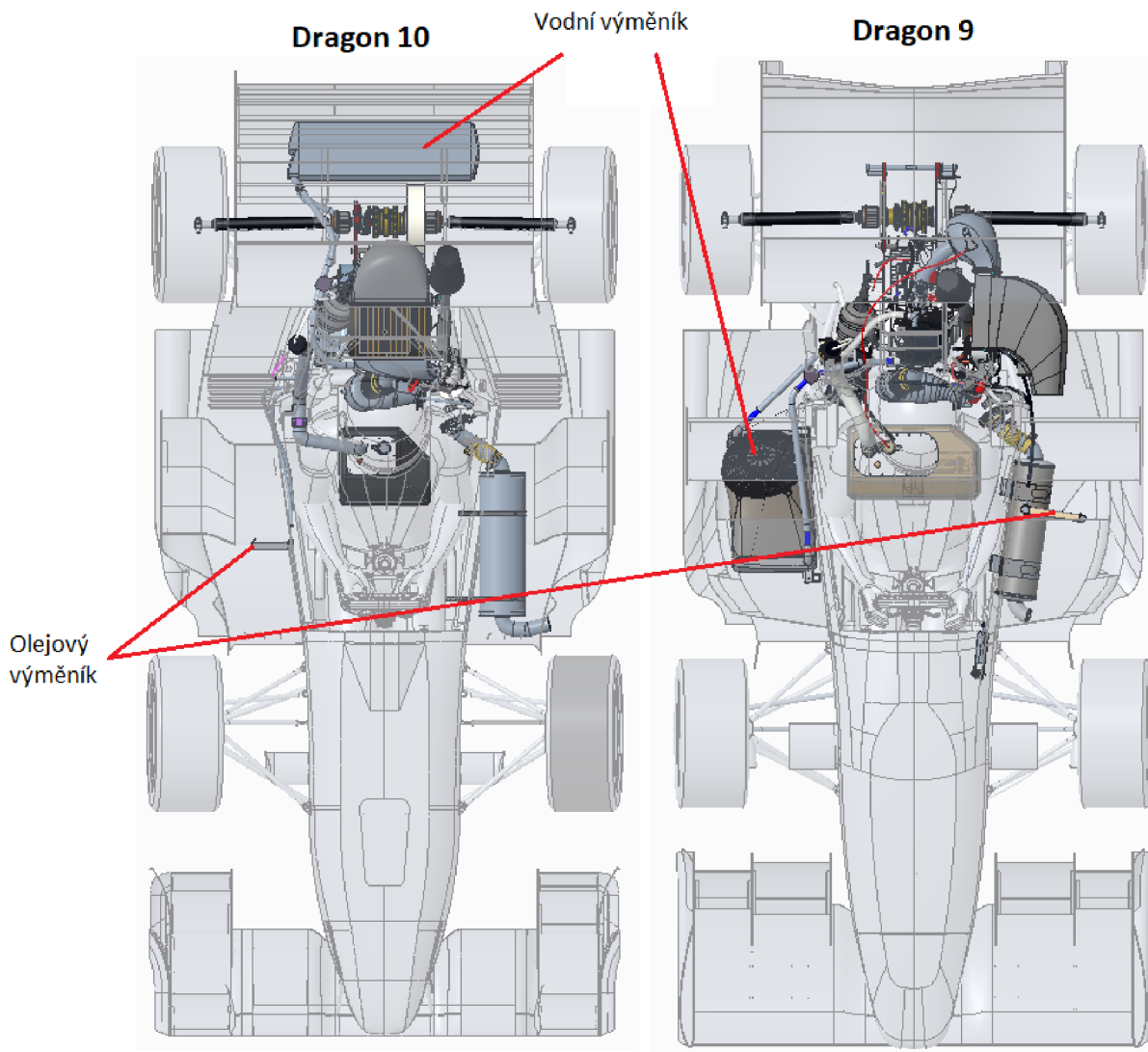
Obrázek 26. Proudnice přes postranní křídélko Dragon 9

Tabulka 3 – Parametry Dragon 9

Koeficient přítlaku C_L	-2,8
Koeficient odporu C_D	1,15
Efektivita $E = C_L/C_D$	2,44
Hmotnost aeropaketu [kg]	17,26
Výška těžiště aeropaketu [mm]	454
Hmotnost chladícího systému [kg]	7,71
Výška těžiště chladícího systému [mm]	244
Simulovaný průtok vodním výměníkem [m³/s]	1,04

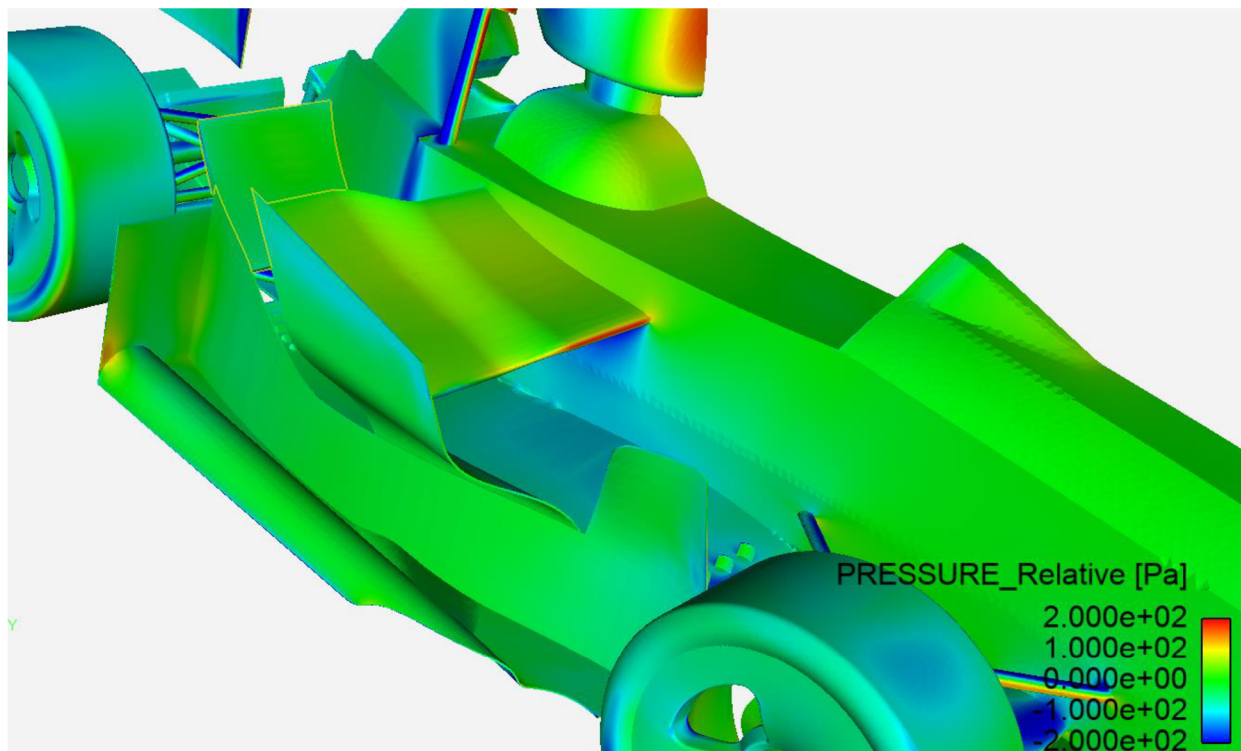
DRAGON 10

Dragon 10 prošel proti předcházejícímu modelu zásadními změnami aeropaketu spojenými se změnou zástavby systému chlazení.



Obrázek 27. Změna umístění výměníků

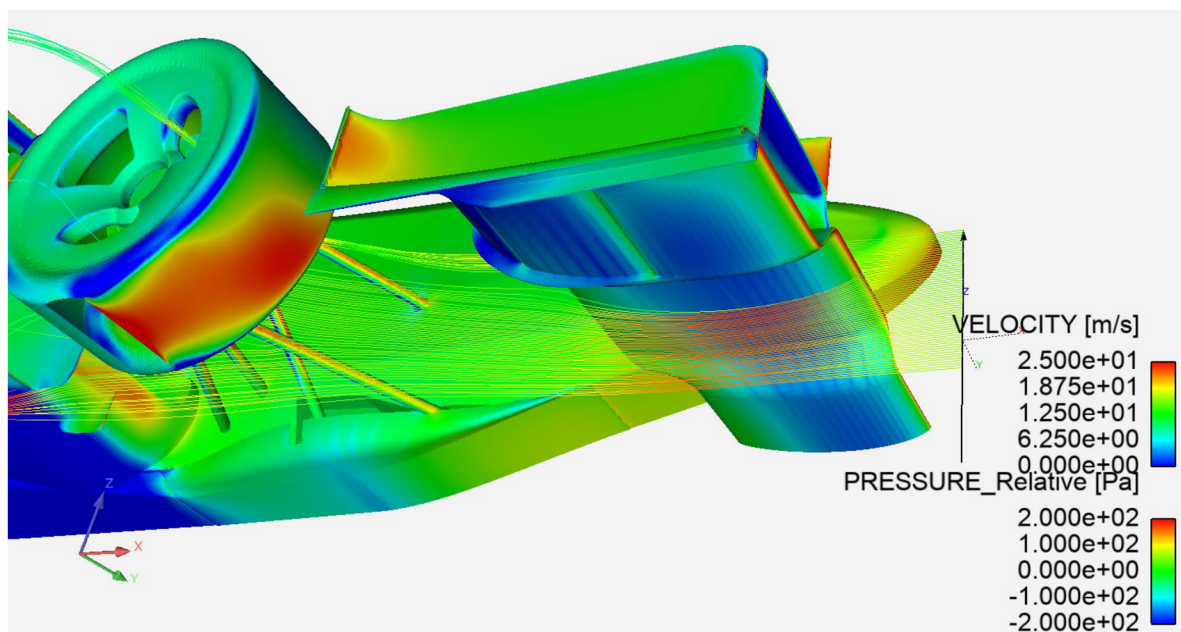
Díky přesunutí vodního výměníku do dvojitého zadního difuzoru došlo k významnému uvolnění prostoru po stranách vozu, což dalo vzniknout dvoulementové profilované boční podlaze bez sidepodů, podobně jako Lotus 79 [obr.7]. Postranní křídla byla také optimalizována a propojena s bočnicí podlahy za účelem zlepšení pevnosti, na kterou měl sidepod pozitivní vliv.



Obrázek 28. Postranní křídlo Dragon 10

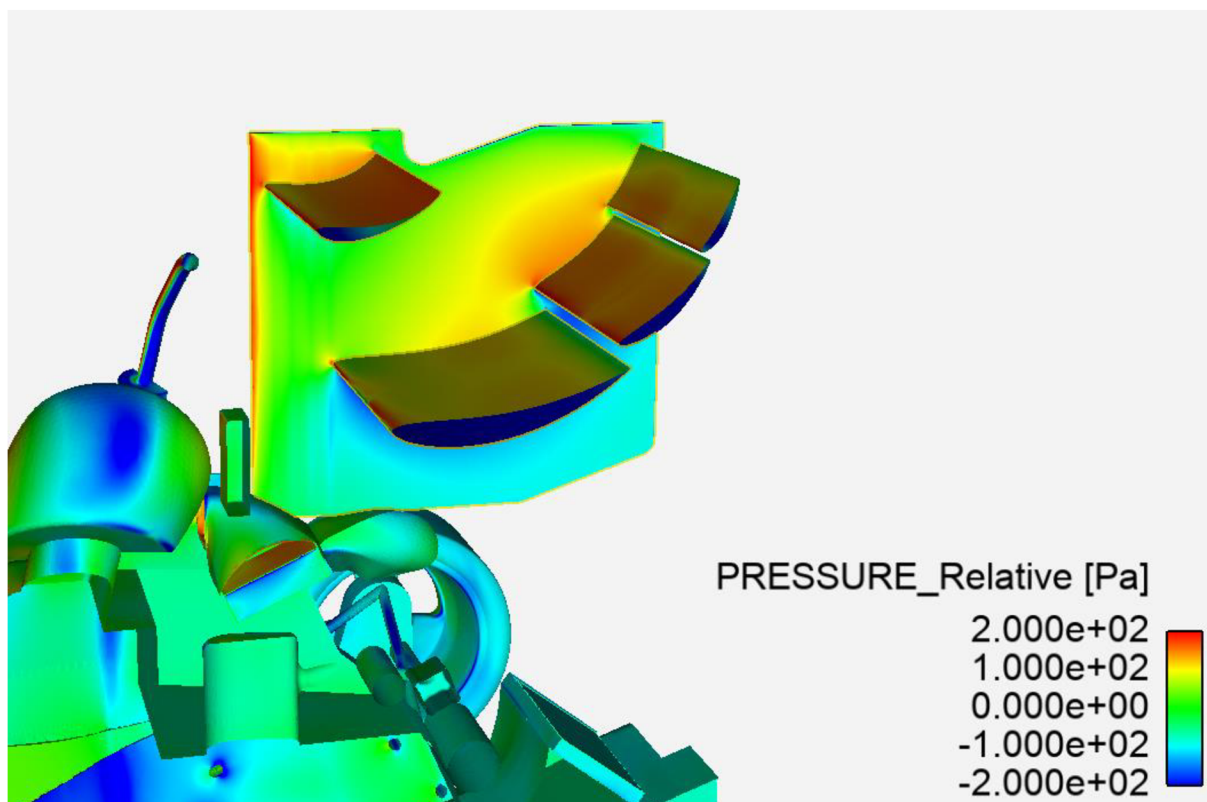
Koncept podlahy zůstal podobný loňskému roku, až na dvojitý zadní difuzor, ve kterém je nyní umístěn vodní výměník.

Došlo k optimalizaci předního křídla, které nyní umožňuje vstup více vzduchu do prostoru pod monopostem. Díky vyvýšené části profilu předního křídla nedochází k tak silné stoupavé tendenci vzduchu za křídlem.



Obrázek 29. Proudění pod předním křídlem Dragon 10

U zadního křídla došlo k návratu ke staršímu provedení s rovnými elementy, v důsledku nepřesvědčivého přínosu prohnutí elementů, což mělo za následek výrazný nárůst hmotnosti a komplexnosti výroby.



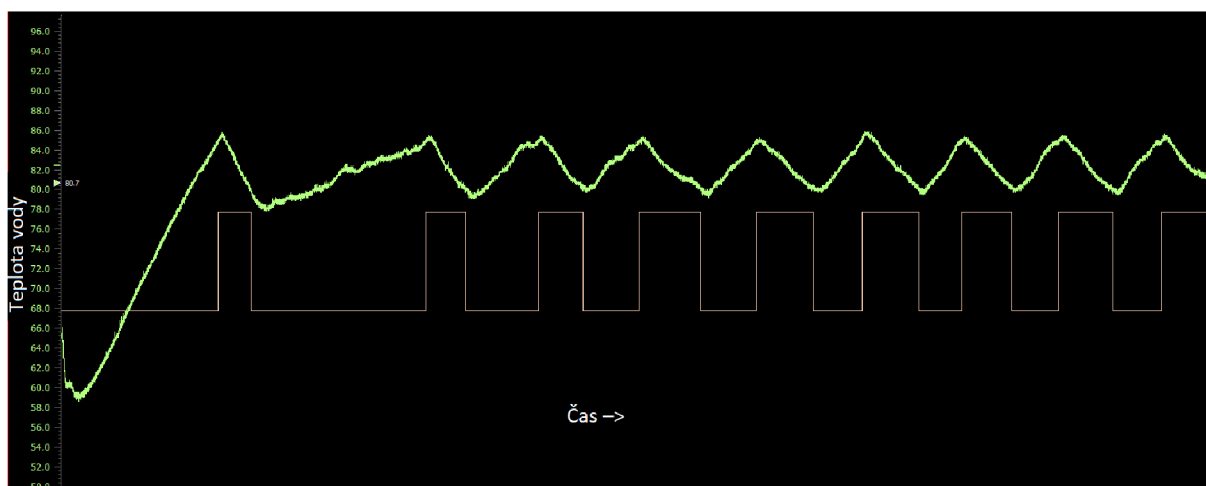
Obrázek 30. Zadní křídlo Dragon 10

Proti loňskému modelu došlo k významnému zlepšení aerodynamického přítlaku vozu, ovšem za cenu nárůstu odporu, který ale nehraje tak významnou roli, což plyne ze simulací času na kolo. Podařilo se také odlehčit aeropaket a výrazně snížit těžiště celého systému chlazení.

DRAGON 10 POROVNÁNÍ EFEKTU VENTILÁTORU

Odsávání vzduchu mělo pouze malý přínos k celkovému přitlaku vozu a to přibližně 4%, toto je způsobeno malým průtokem vzduchu skrz ventilátor. Zjištění je nutné ověřit měření v reálných podmínkách na trati a ve větrném tunelu. Nedostatečné urychlení vzduchu souvisí s malým výkonem ventilátorů, u kterých si vzhledem ke slabému alternátoru a malé kapacitě baterie vozu bohužel nemůžeme dovolit přidat.

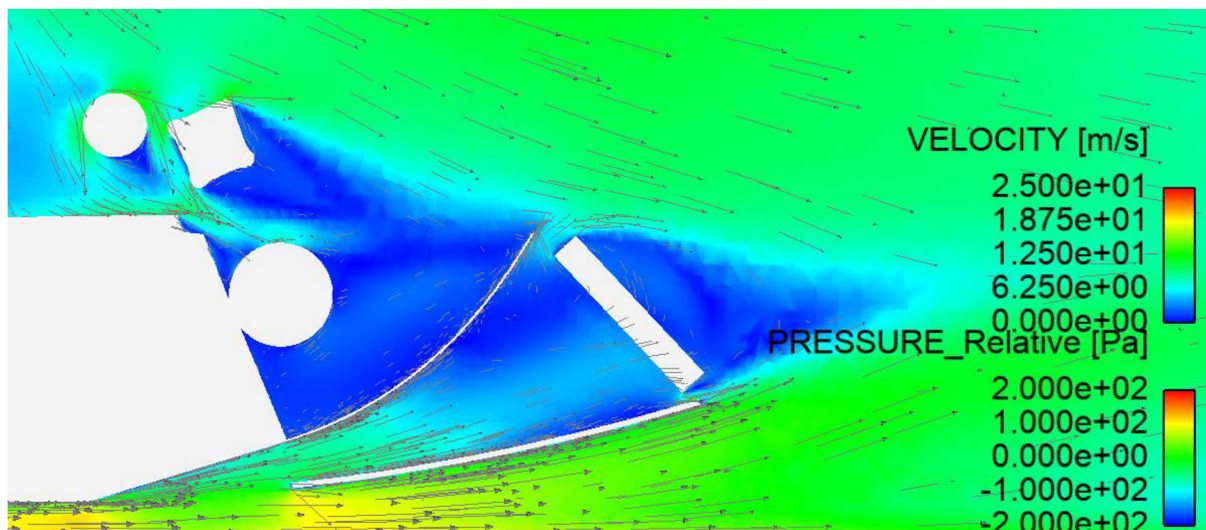
Ventilátor tvoří životně důležitou část chladicího systému. Při běžném závodním režimu monopostu Dragon je ventilátor rozhodující pro účinné chlazení a k jeho vypnutí dochází jen velmi málo. Toto je vidět na následujícím grafu závislosti teploty chladicí kapaliny a sepnutí ventilátoru na čase. Zelená křivka znázorňuje teploty vody a hnědá je sepnutí ventilátoru.



Obrázek 31. Graf teploty vody a sepnutí ventilátoru

Je vidět, že s přibývajícím časem se podíl jízdy bez zapnutého ventilátoru stále zmenšuje. Úvodní dlouhé prodlevy, kdy nedochází k sepnutí ventilátoru, jsou pozvolné zahřívání motoru a poté stání na startu. V průběhu jízdy je pak ventilátor sepnutý zhruba 70% času.

K podobnému závěru dospěla i CFD simulace Dragon 10, kdy je při vypnutém ventilátoru vidět nedostatečný průtok vodním výměníkem.



Obrázek 32. Proudění skrz výměník s vypnutým ventilátorem

Z proudnic je patrné, že pouze malá část vzduchu samovolně prochází horní částí dvojitého difuzoru. Aby nedocházelo k nepředvídatelnému chování monopostu, bude s novým konceptem ventilátor během testování odladěn tak, aby byl stále spuštěn při konstantním výkonu. Tím bude vůz pro řidiče čitelnější a snáze ovladatelný.

Tabulka 4 – Parametry Dragon 10 s vypnutým ventilátorem

Koeficient přítlaku C_L [-]	-3,22
Koeficient odporu C_D [-]	1,59
Efektivita $E = C_L/C_D$ [-]	2,02
Hmotnost aeropaketu [kg]	12,3
Výška těžiště aeropaketu [mm]	436
Hmotnost chladícího systému [kg]	7,69
Výška těžiště chladícího systému [mm]	169
Simulovaný průtok vodním výměníkem [m^3/s]	0,312

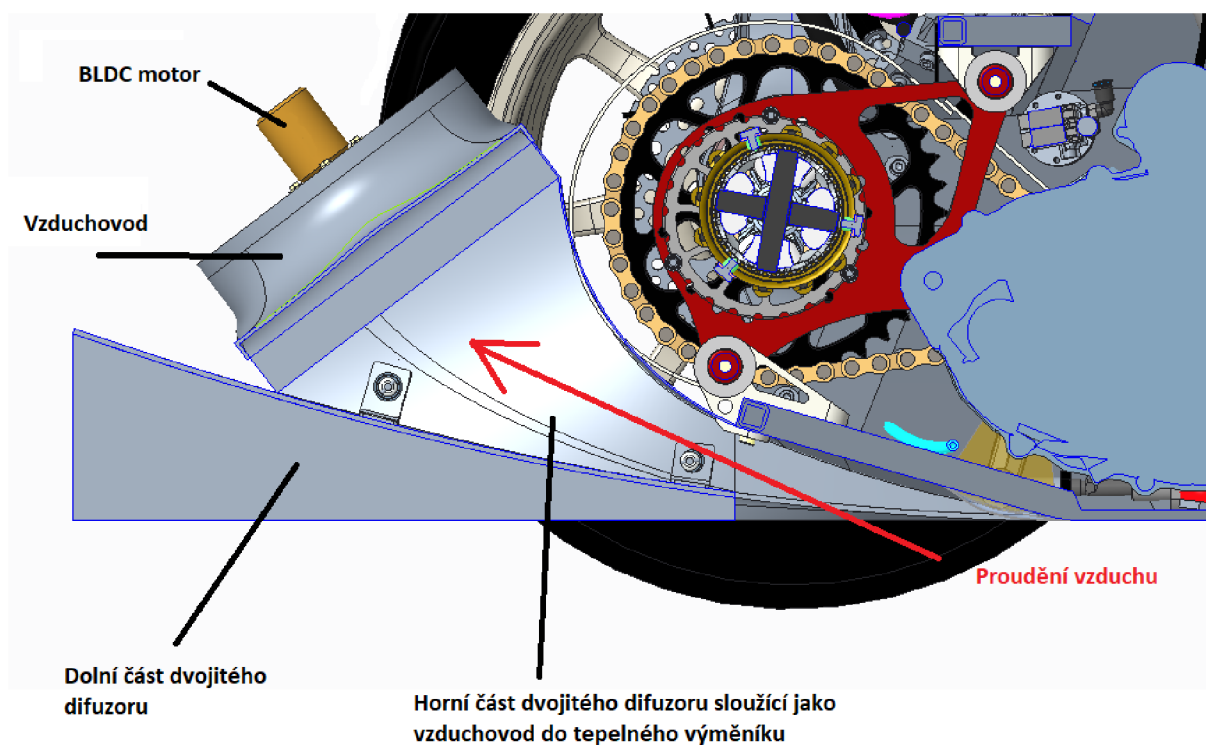
Tabulka 5 – Parametry Dragon 10 se zapnutým ventilátorem

Koeficient přítlaku C_L [-]	-3,36
Koeficient odporu C_D [-]	1,59
Efektivita $E = C_L/C_D$ [-]	2,11
Hmotnost aeropaketu [kg]	12,3
Výška těžiště aeropaketu [mm]	436
Hmotnost chladicího systému [kg]	7,69
Výška těžiště chladicího systému [mm]	169
Simulovaný průtok vodním výměníkem [m^3/s]	1,114

Simulovaný průtok vzduchu vodním výměníkem se vůči loňskému monopostu zvýšil o 7% a jeho schopnost chlazení by tak měla být mírně zvýšena.

6 ZÁSTAVBA

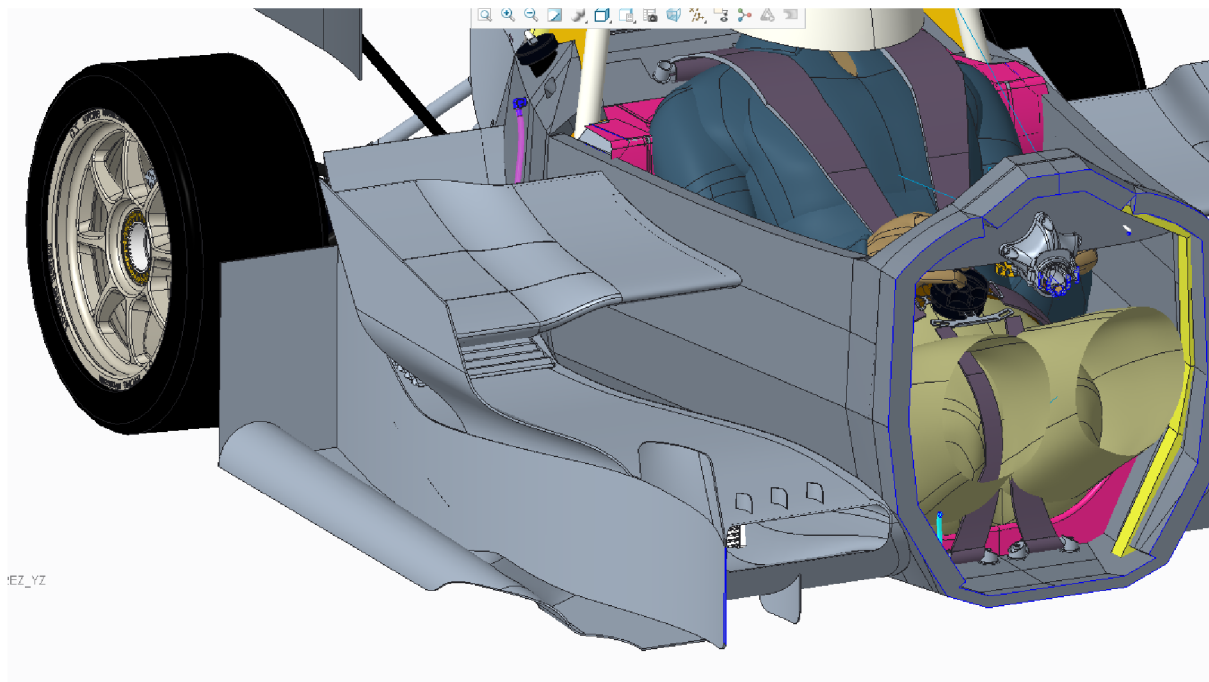
Postupným vývojem bylo docíleno finálního provedení chladičského systému monopostu Dragon 10 v podobě přesunutí vodního výměníku do zadní části vozu, jeho integrace do dvojitého difuzoru, kde budou ventilátory schopny umocňovat přízemní efekt a zlepšovat tak aerodynamické vlastnosti vozidla. Zároveň koncept dvojitého difuzoru umožní, aby při vyšších rychlostech, přebytečný vzduch bez překážky proudil spodní částí difuzoru a nedejde tak k jeho zahlcení a ztrátě přtlaku.



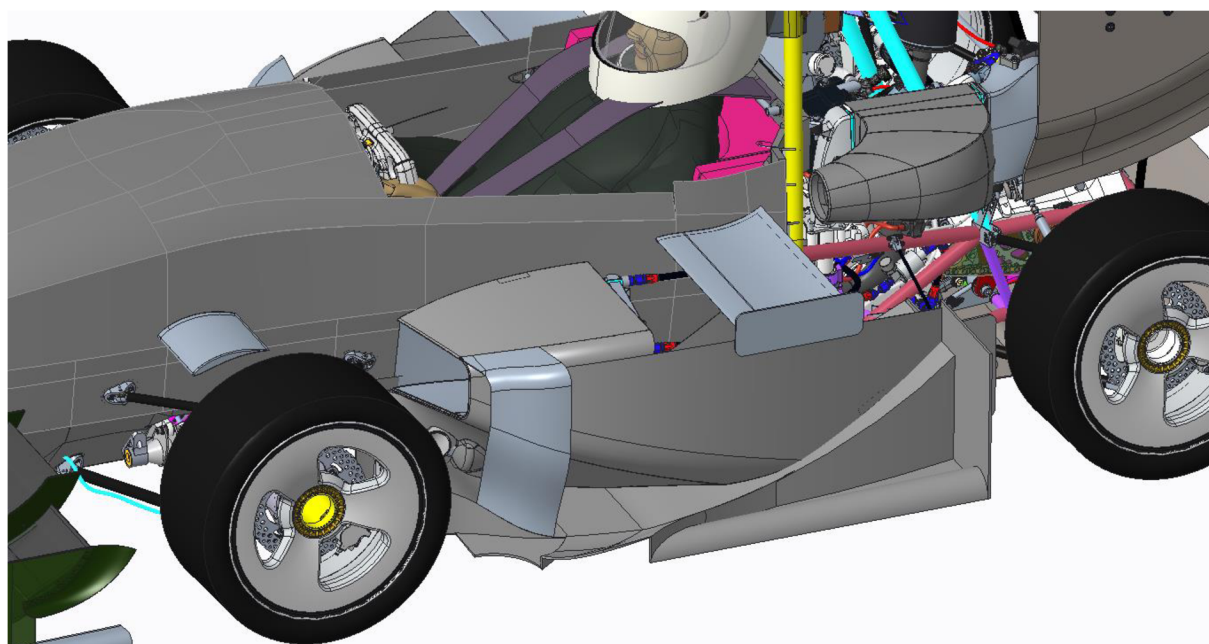
Obrázek 33. Dvojitý difuzor Dragon 10

Další významnou změnou je přesunutí olejového výměníku na pravou stranu vozu, čímž bude částečně zachováno vyrovnané stranové rozvážení monopostu. Oba výše zmíněné přesuny mají také pozitivní dopad na výšku těžiště.

Odstraněním vodního chladiče z pravé části vozu také došlo k dramatickému zmenšení až eliminaci sidepodů, které mají nyní podobu víceelementové profilované boční podlahy kombinované s postranním křídlem. Touto změnou bylo dosaženo eliminování nežádoucího vztlaku na aerodynamicky nepříznivé geometrii sidepodu, snížení aerodynamického odporu a v neposlední řadě snížení hmotnosti.



Obrázek 34. Zástavba bez sidepodu Dragon 10

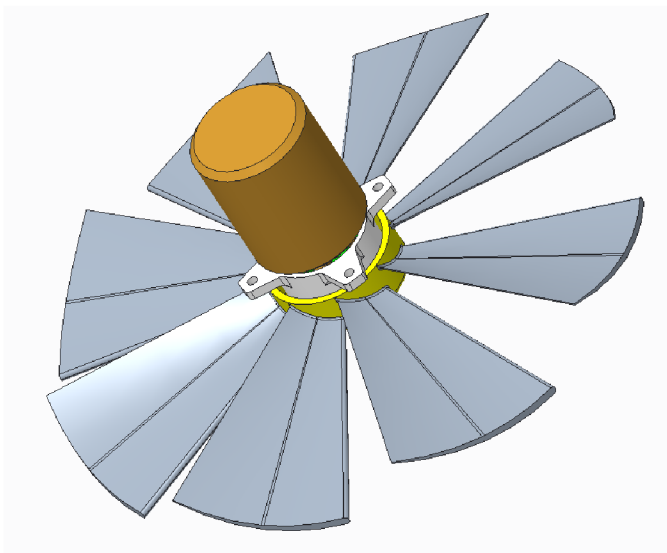


Obrázek 35. Zástavba se sidepody Dragon 9

Těmito změnami došlo ke snížení těžiště celého systému chlazení o 75 mm, což je při jeho hmotnosti 7 690 g velmi významná hodnota. Aerodynamický paket se z části díky změnám zástavby dočkal snížení těžiště o 18 mm a hmotnosti o 4960 g. Tyto změny jsou ale také způsobeny změnou vnitřní konstrukce křidel a jiné kompozitové skladby laminovaných dílů.

6.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Pro odlehčení systému byl zvolen návrh vlastního ventilátoru vyhovujícího všem požadavkům. Odlehčení bylo docíleno použitím bezkartáčových motorů s regulátorem. U tohoto nového ventilátoru bylo docíleno hmotnosti 175 g včetně uložení. Tyto ventilátory budou na voze umístěny dva a výsledná hmotnost tedy činí 350 g. Úspora hmotnosti ventilátoru je tedy přibližně 630 g.



Obrázek 36. Ventilátor vlastního návrhu

Dosud používaný ventilátor SPAL VA07-AP12-/C-31S používal k pohonu zastaralý kartáčový motor. Jeho hlavní nevýhoda spočívá ve vysoké hmotnosti 980 g a nevhodných rozměrech pro zástavbu do nového systému chlazení.



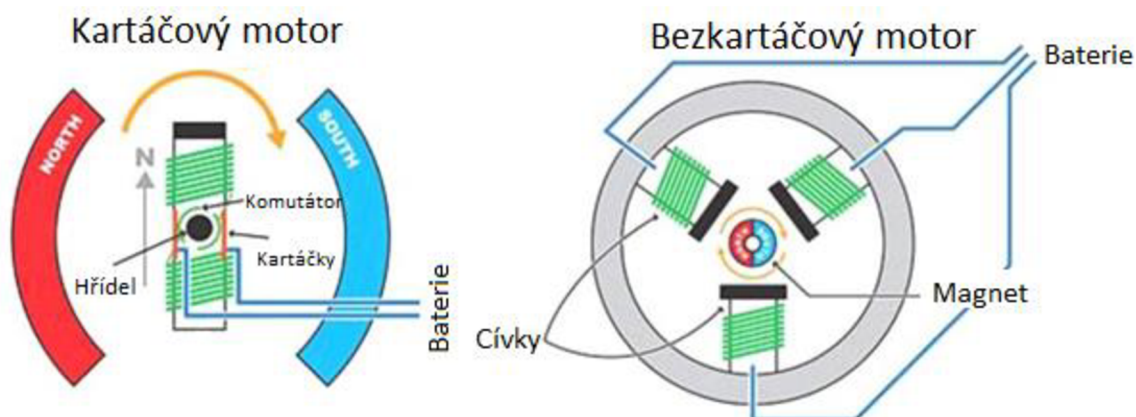
Obrázek 37. Ventilátor SPAL VA07-AP12-/C-31S [23]

Nevhodná velikost ventilátoru by byla možná vyřešit zakoupením ventilátoru SPAL jiné řady, avšak došlo by k dalšímu výraznému nárůstu hmotnosti, protože v novém monopostu budou z konstrukčního hlediska potřeba dva ventilátory umístěny na horizontálně položeném výměníku vedle sebe. Pro zachování stejného průtoku vzduchu přes výměník by byl systém dvou ventilátorů od firmy SPAL těžší o 830 g.



Obrázek 38. Ventilátor VA75-A101-90A [23]

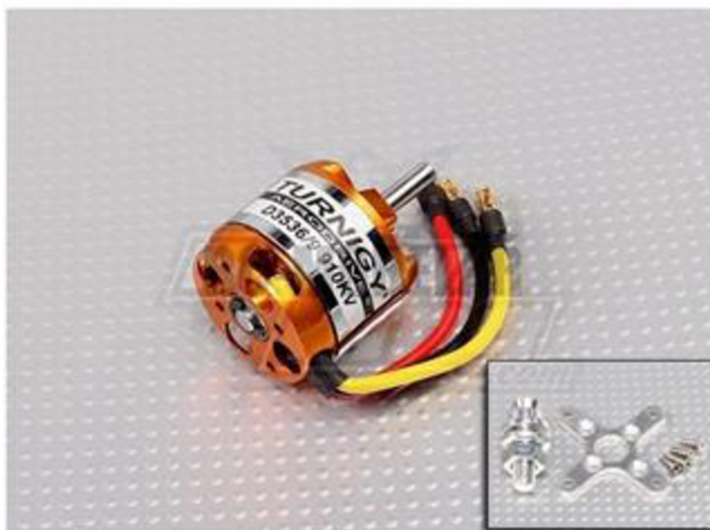
BLDC (elektronicky komutovaný) motor je typ synchronního stejnosměrného motoru, který místo komutátoru používá střídač vytvářející pulzy ve vinutí tak, aby se motor otáčel. Rotor je tvořen permanentními magnety. V porovnání se svým předchůdcem, kartáčovým stejnosměrným motorem, má velkou výhodu v eliminaci komutátoru. Komutátor je mechanický přepínač, který spíná pro velké proudy, je náročný na údržbu a poněkud poruchový. Jiskření na kartáčcích je také zdrojem silného elektromagnetického rušení.



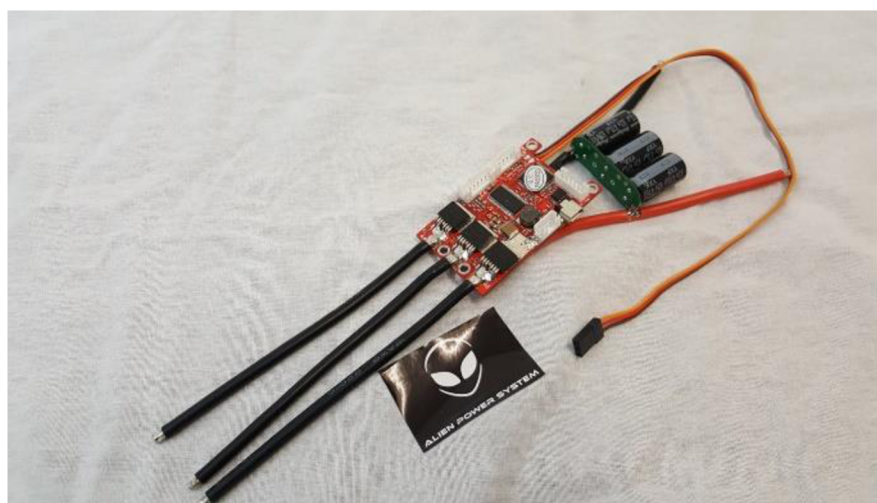
Obrázek 39. Porovnání kartáčového a bezkartáčového motoru [24]

Mezi nevýhody bezkartáčového motoru je nutnost použití ovládacího regulátoru a celková finanční nákladnost, ale tyto nevýhody jsou jednoznačně převáženy úsporou hmotnosti celé soustavy.

Pro aplikaci v chladicím systému byl po uvážení parametrů a jejich důležitosti zvolen lehký a kompaktní BLDC motor TURNIGY D3536/9 910KV s regulátorem do 20 A od Alien Power System.



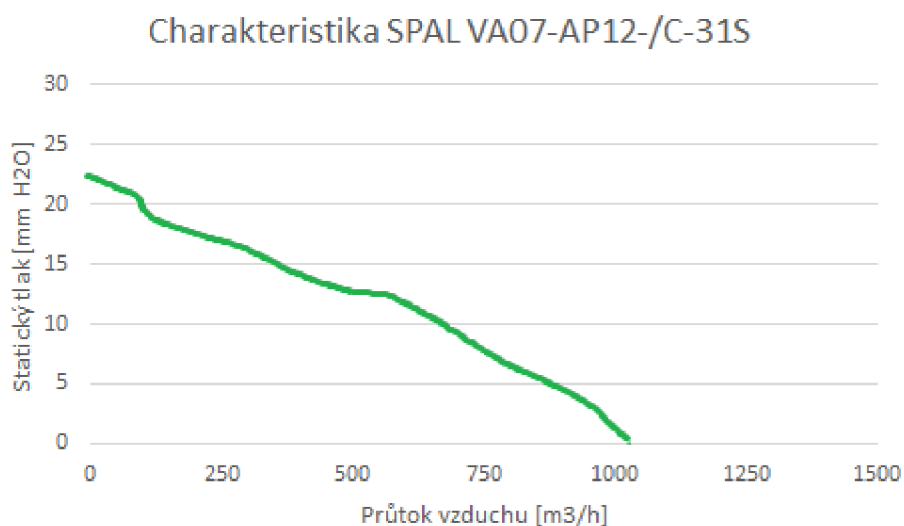
Obrázek 40. BLDC motor TURNIGY D3536/9 910KV [25]



Obrázek 41. Regulátor od firmy Alien Power System [26]

6.2 VRTULE

Při měření byl velmi zřetelný zásadní rozdíl v použití vrtulí určených k pohonu dronů a vrtule z doposud používaného ventilátoru SPAL. Toto je způsobeno překážkou tvořenou tepelným výměníkem, který klade odpor vzduchu při průchodu přes něj. Toto je u sací vrtule z ventilátoru SPAL kompenzováno její geometrií s velkou hustotou lopatkové mříže, díky tomu je vrtule schopná vytvořit za výměníkem výrazně větší statický podtlak, který napomáhá průchodu vzduchu.



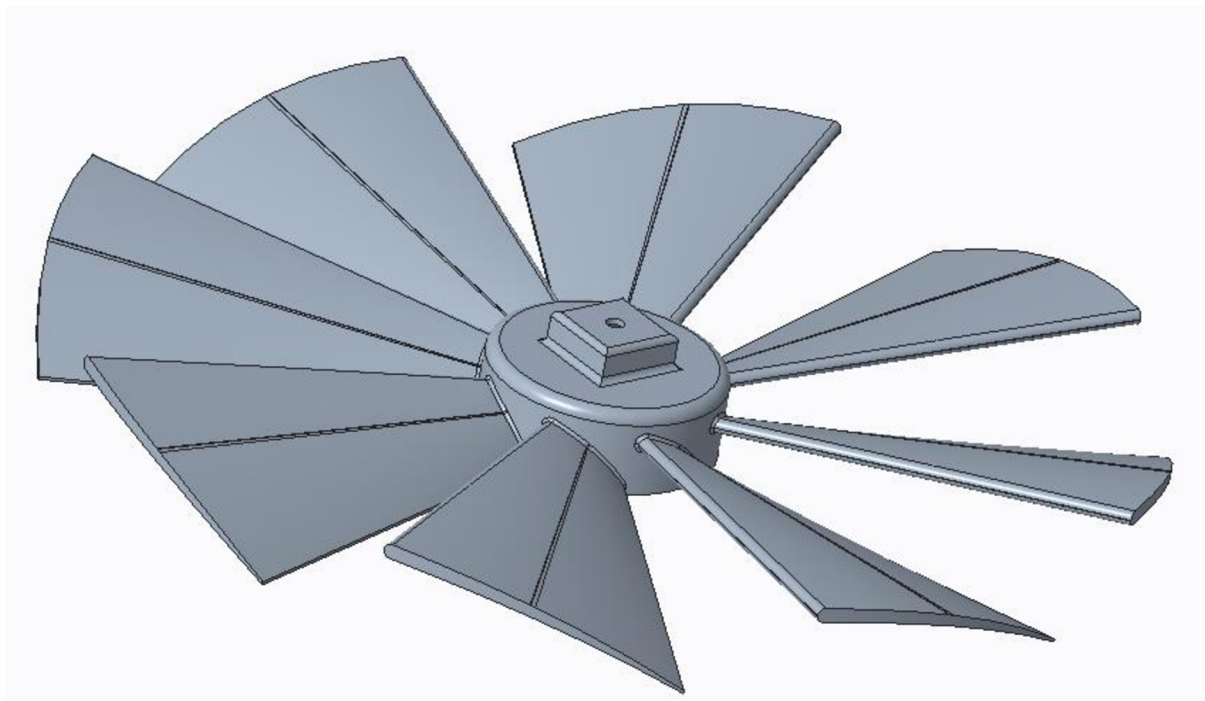
Obrázek 42. Graf charakteristiky vrtule SPAL VA07-AP12-/C-31S [23]

Naopak druhá měřená vrtule je určena k pohonu dronů a jejím hlavním parametrem je vysoký tah ve volném prostředí. Díky své menší konstrukci ovšem klade mnohem menší odpor a je tak schopna dosahovat daleko vyšších otáček při stejném výkonu motoru.



Obrázek 43. Měřená třílistá vrtule

Výsledkem je tedy vrtule vlastního návrhu, která vychází z požadavků na menší zástavbu. Nosné uložení je umístěno v jejím středu a vrtule disponuje vysokou hustotou lopatkové mříže. Výroba vrtule bude řešena pomocí odlévání vysokopevnostního plastu do 3D tištěné silikonové formy ve spolupráci s firmou MCAE Systems, s.r.o.

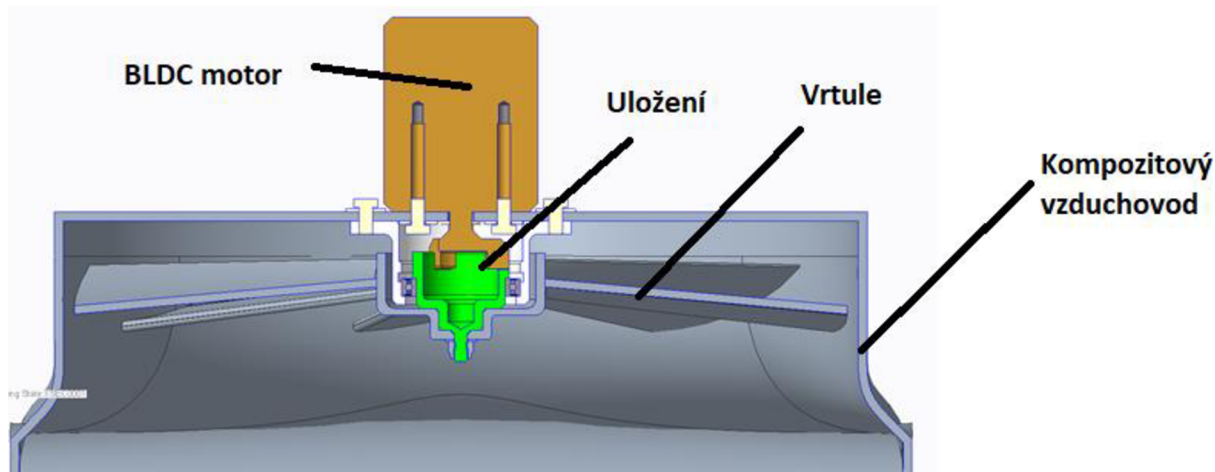


Obrázek 44. Navržená vrtule

Navržená vrtule se kvůli konstrukčním požadavkům zcela neshoduje s geometrií původní vrtule SPAL, je proto nutné měření průtoku ve vzduchovodu s touto vrtulí opakovat. Z důvodu světové pandemie COVID-19 byla ovšem odložena výroba celého monopostu a měření tak nebylo možné včas realizovat.

6.3 ULOŽENÍ VRTULE

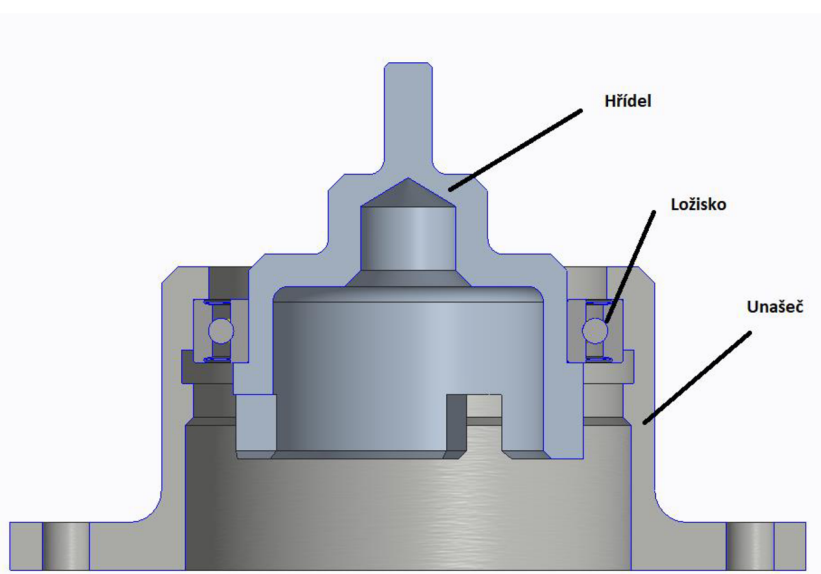
Zvolené BLDC motory nejsou určeny k provozu v náročných podmínkách jako jsou v chladičím systému Formule Student, kde by musely odolávat vibracím, vysokým teplotám a mechanickým rázům od nerovností povrchu vozovky. Proto bylo zvoleno separátní uložení vrtule a motoru tak, aby nedocházelo k přenosu mechanických zatížení na motor. K přenosu kroutícího momentu z motoru na vrtuli potom dochází pomocí zubové spojky.



Obrázek 45. Uložení vrtule

Celý systém je připevněn ke kompozitové struktuře, která zároveň slouží jako vzduchovod pro vedení vzduchu skrz tepelný výměník.

Vrtule je připevněna ke středové hřídelce pomocí tvarového spojení, které přenáší kroutící moment a je zajištěna pouze samojistící maticí s levým závitem, proti nechtěnému povolení. Hřídelka je uložena v hliníkovém nosiči pomocí kuličkového valivého ložiska od firmy SKF s označením W 61704-2RS1.



Obrázek 46. Unašeč vrtule s hřídelkou

ZÁVĚR

Po podrobné analýze stávajícího systému chlazení Dragon 9 a změn pravidel pro nadcházející sezónu je výsledkem práce zásadní změna zástavby tepelných výměníků za účelem významného podpoření aerodynamiky, návrh a konstrukce vlastního ventilátoru splňujícího požadavky na menší rozměry a nižší hmotnost a zachování nebo navýšení průtoku přes vodní výměník.

Jedním z cílů bylo využití ventilátoru pro posílení přízemního efektu, čehož se nakonec podařilo dosáhnout, ale zvětšení aerodynamického přítlaku je jen okolo 4 % vůči stavu s vypnutým ventilátorem. Toto je dáno příliš nízkým průtokem vzduchu, a tedy malým urychlením proudění pod monopostem.

Dragon 10 má omezenou kapacitu baterie a je tak schopen dlouhodobě pohánět ventilátory s příkonem zhruba 75 W, v případě implementace obdobného systému do elektrického monopostu eD2, plánovaného pro sezónu 2020/2021 by ovšem toto omezení zmizelo, jelikož kapacita baterií elektrické formule je mnohonásobně vyšší. Bylo by tak pravděpodobně možné použít ventilátory s mnohem vyšším výkonem a přínos aerodynamice by se mohl několikanásobně navýšit.

Měření dále ukázalo, že geometrie vrtule má naprosto zásadní dopad na průtok vzduchu výměníkem, a proto by bylo vhodné se jejím návrhem dále podrobněji zabývat. Dále je opakovat měření průtoku výměníkem s nově navrženou vrtulí pro validaci její funkčnosti. Toto měření muselo být odloženo, v důsledku světové pandemie COVID-19 a odložení výroby monopostu Dragon 10.

Navržený systém se ale na aerodynamice také zásadně podílel zlepšením jeho zástavby, díky které se podařilo dosáhnout až 20 % nárůstu přítlaku. Dle CFD simulací se rovněž navýšil průtok výměníkem o 0,074 m³/s a jeho chladicí schopnost by se tak měla mírně zlepšit.

Velký dopad má nová zástavba také na hmotnost a výšku těžiště systému chlazení a aeropaketu. Chladicí systém se podařilo odlehčit pouze o 20 g, ale jeho těžiště se snížilo o 75 mm. Celý aerodynamický paket se také z části kvůli lepší zástavbě podařilo odlehčit o 4,96 kg a snížit jeho těžiště o 18 mm. Tyto změny mají velmi pozitivní vliv na výslednou dynamiku vozidla, kterou je možno vidět v simulacích času na kolo.

Výše zmíněné hodnoty jsou vypočteny simulacemi a rozdíly hmotností určeny pomocí 3D modelu. Veškeré parametry je nutné validovat měřením v reálném prostředí po dokončení stavby monopostu, která je bohužel odložena vzhledem k současné pandemii.

Přínos aerodynamice vozidla bylo plánováno měřit ve větrném tunelu a pomocí tenzometrů na zavěšení a následného přepočtu na rozklad sil.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Formula Student Germany [online]. Bahnhofstr. 2c, 30853 Langenhagen, Germany, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsg/>
- [2] ŠEBELA, Kamil. Chladicí systém Formule Student. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily III: Motory. 4. přepracované. Brno: Avid, 2007. ISBN 978-80-903671-7-3.
- [4] KATZ, Joseph. Race car aerodynamics: designing for speed. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 08-376-0142-8.
- [5] TU Brno Racing [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://tubnoracing.cz/en/introduction/>
- [6] Gujarat Technological University Formula [online]. 2016 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.deshgujarat.com/2016/01/12/gtu-formula-race-car-for-formula-student-india-2016-launched/?fbclid=IwAR19MCHSKuIkNfoja49UQ01LJUX6C3CG3OdOrZhexWED9R62V-NwOL3yB6A>
- [7] FS Team Weingarten [online]. 2019 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.instagram.com/fsteamweingarten>
- [8] TU Fast Racing Team [online]. 2019 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/Tufast.Racing.Team/>
- [9] Lotus 79 Wing profile [online]. In: . 2017 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lotus_Modell_79_wing-profile.svg
- [10] Bernoulliho rovnice [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.oocities.org/vektor_ol/html/i/ie.html
- [11] FELDOVÁ, Petra. Objemové ztráty. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] Chaparral 2J [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://auta5p.eu/katalog/chaparral/chaparral_2j_01.php
- [13] Ferrari 312B [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ferrari_312B_Donington.jpg
- [14] McLaren MP4/4 [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Formula_One#/media/File:Ayrton_Senna_1988_Canada.jpg
]
- [15] Lotus 79 Underbody [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Lotus_Modell_79_under-body.svg

- [16] Brabham BT46B [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:2001_Goodwood_Festival_of_Speed_Brabham_BT46B_Fan_car.jpg
- [17] Ground effect (cars). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_\(cars\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_effect_(cars))
- [18] NYE, Doug. Seller Image The Autocourse History of the Grand Prix Car 1966–1985. 1. Hazleton publishing, 1985. ISBN 9780905138374
- [19] HENRY, Allan. BRABHAM: THE GRAND PRIX CARS. 1. Osprey, 1985. ISBN 0-905138-36-8.
- [20] ChassisSim [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.chassissim.com/>
- [21] NOVOTNÝ, Tomáš. Výpočet teoretického času vozidla na závodním okruhu. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [22] ČSN EN 12599.
- [23] Spal Automotive [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://www.spalautomotive.it/axial-fans>
- [24] Brushless vs Brushed [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://www.thinkrc.com/faq/brushless-motors.php>
- [25] Turnigy [online]. In: . [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<http://www.modelmania.cz/index.php?page=pictureview&itemCode=Nzc1Xzc5XzQ5Nw==&pic=1>
- [26] Alien Power Systems [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z:
<https://alienpowersystem.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[mm]	Vzdálenost od narušení měřicího úseku
A	[mm]	Výška vzduchovodu
B	[mm]	Šířka vzduchovodu
BLDC		Brushless Direct Current
C_D	[-]	Coefficient of Drag
CFD		Computational fluid dynamics
C_L	[-]	Coefficient of Lift
CoG		Center of Gravity
d	[mm]	Délka vzduchovodu
D_h	[mm ²]	Hydraulický průřez
E	[-]	Aerodynamická efektivita
eD2		Electric Dragon 2
FSG		Formula Student Germany
GPS		Global Positioning System
NSM		Non Suspended Mass
O	[mm]	Obvod vzduchovodu
p_1	[Pa]	Tlak v bodě 1
p_2	[Pa]	Tlak v bodě 2
S	[mm ²]	Průřez vzduchovodu
SAE		Society of Automotive Engineers
v_1	[ms ⁻¹]	Rychlost v bodě 1
v_2	[ms ⁻¹]	Rychlost v bodě 2
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota tekutiny