



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Technická
fakulta**

NÁVRH A VÝROBA SYSTÉMU SÁNÍ VZDUCHU

PRO MONOPOST FORMULE STUDENT

DESIGNING AND MANUFACTURING OF AIR INTAKE SYSTEM

FOR FORMULA STUDENT CAR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

WRITER OF THE THESES

BC. VOJTĚCH KLEPETKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. JIŘÍ MAŠEK, PH.D.

PRAHA 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Vojtěch Klepetko

Zemědělská technika

Název práce

Návrh systému sání vzduchu pro monopost Formule Student

Název anglicky

Design of air intake system for Formula Student car

Cíle práce

Cílem práce je navrhnout systém sání vzduchu pro atmosférický motor monopostu Formule Student, jehož součástí je restriktor omezující přívod vzduchu, škrtecí klapka a systém vstřikování paliva. Sání by mělo být navrženo tak, aby motor dosahoval co nejvyššího výkonu. Podle návrhu bude vyroben prototyp zařízení.

Metodika

Diplomant popíše funkci sacího systému v zážehových spalovacích motorech. Budou definována konstrukční omezení a okrajové podmínky výpočtu proudění vzduchu v systému. V praktické části práce diplomant navrhne a vyrobí zkušební model dle teoretických výpočtů. Dojde k ověření navržené technologie výroby i použitých materiálů. Funkčnost systému bude ověřena provozem studentského monopostu.

1. Úvod
2. Popis problematiky
3. Cíl práce
4. Metodika práce
5. Výpočet parametrů
6. Návrh systému
7. Zpracování naměřených hodnot
8. Diskuse
9. Závěr

Doporučený rozsah práce

60 – 65 stran textu včetně obrázků

Klíčová slova

System sání vzduchu, atmosférické plnění, formule student

Doporučené zdroje informací

ENGELMAN, H. W. Design of a tuned intake manifold. 1973

ERIKSSON, L., LARS, N. Modeling and Control of Engines and Drivelines : Modeling and Control of Engines and Drivelines, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014

FEHAN, Douglas R. Design of racing and high-performance engines 2004-2013. 2013. SAE International

HROMÁDKO, J. Spalovací motory. Grada, 2012. 160 s.



Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zemědělských strojů

Elektronicky schváleno dne 24. 1. 2017

prof. Dr. Ing. František Kumhála

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2019

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je seznámit čtenáře s kompletním postupem návrhu sacího systému na restriktorovaný motor monopostu Formule Student. V první části práce bude čtenář seznámen se základními typy používaných sacích systémů. S přihlédnutím ke všem omezením daným jak pravidly, tak zástavbou do monopostu, bude vybrán nejvhodnější systém sání pro návrh. Dále budou popsány možnosti výroby sání a vybrána nejvhodnější technologie výroby. Poté budou vypočítány nejdůležitější parametry sacího systému a celý systém bude vymodelován v CAD softwaru Autodesk Inventor 2017. Navržený design bude ověřen pomocí simulací proudění v simulačním softwaru ANSYS R19.2. Následně bude systém sání vyroben, sestaven a namontován na monopost Formule Student týmu CULS Prague Formula Racing.

Klíčová slova: Systém sání vzduchu, restriktorovaný motor, délka sběračů, objem airboxu, Formule Student

Summary

The target of this diploma theses is to show reader the complete process of designing an intake system for restricted Formula Student engine. In the first part, the basic intake systems types will be introduced. In accordance with rules and with cars dimensions the most suitable intake design will be chosen. In the next part, possible manufacturing technologies will be described and the most suitable one will be chosen. Then most important intake system parameters will be calculated and the whole intake will be designed in the Autodesk Inventor 2017 software. Designed intake will then be verified using the flow simulation in ANSYS R19.2 software. In the end intake system will be manufactured, assembled and mounted to the Formula Student car of the CULS Prague Formula Racing team.

Key words: Air intake system, restricted engine, runner length, plenum volume, Formula Student

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Návrh a výroba systému sání vzduchu pro monopost Formule Student** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který je součástí této práce.

Datum

Bc. Vojtěch Klepetko

Poděkování

Děkuji tímto panu doc. Ing. Jiřímu Maškovi, Ph.D. z Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze za odborné vedení při psaní práce, za jeho trpělivost a za jeho cenné rady a připomínky.

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíl Práce	2
3. Metodika práce	3
4. Formule Student	6
5. Systémy sání vzduchu atmosféricky plněných zážehových motorů	7
5.1 Karburátor.....	7
5.2 Systém sání vzduchu s jednobodovým vstřikováním paliva.....	8
5.3 Systém sání vzduchu s vícebodovým vstřikováním paliva.....	8
5.4 Systém sání vzduchu s přímým vstřikováním paliva.....	11
6. Způsob výroby	13
6.1. Technologie výroby.....	13
6.2. Metody 3D tisku.....	15
6.2.1. Metoda FDM (Fused deposition modeling).....	15
6.2.2 Metoda SLS (Selective laser sintering).....	16
6.2.3. Metoda SLA (Stereolithography).....	18
6.2.4. Volba metody tisku.....	19
6.3 Zkušební model pro ověření vhodnosti technologie.....	19
6.3.1. Zkoušení.....	20
7. Návrh systému sání vzduchu	23
7.1 Pravidla.....	23
7.1.1 Umístění systému sání vzduchu v rámci monopostu.....	23
7.1.2 Uchycení systému sání vzduchu.....	24
7.1.3 Uspořádání prvků sacího systému a restriktor.....	25
7.1.4 Vstřikování paliva.....	26
7.2 Základní konstrukční řešení.....	26
7.2.1 Sání s bočním vstupem vzduchu.....	27
7.2.2. Sání s centrálním vstupem vzduchu.....	27
7.2.3 Sání s nasávacím kuželem.....	28
7.3 Škrtková klapka a restriktor.....	30
7.4 Sběrače.....	31
7.4.1 Výpočet délky sběrače a Helmholtzův rezonátor.....	32
7.4.2 Koncovky sběrače.....	36
7.4.3. Rozteče sběračů a spodní díl sání.....	39
7.5 Airbox.....	42
7.5.1 Objem airboxu.....	42

7.5.2 Připojení škrtkící klapky, difuzor a tvar airboxu	44
7.5.3 Sekundární vstřikování paliva	44
7.6 Kompletní model sacího systému	47
8. Simulace	49
8.1 Vstupní podmínky	49
8.1.1 Simulace podtlaků v programu GT-Power	49
8.2 Simulace proudění a jeho rychlosti v programu Ansys R19.2 Academic.....	52
8.2.1 Výsledky simulace proudění	53
9. Komentář k výsledkům práce	59
10. Diskuse k výsledkům	60
11. Závěr	64
12. Seznam použitých zdrojů	65
13. Přílohy	68
13.1 Příloha 1 – Materiálový list PA2200.....	68

1. Úvod

Každý spalovací motor potřebuje ke svému provozu palivo a vzduch. Směs těchto dvou složek se tvoří v sání vzduchu spalovacího motoru. Proto je systém sání jednou ze základních částí motoru. Tato práce se zabývá návrhem sání pro atmosféricky plněný motor závodního monopostu Formule Student. Pravidla této soutěže omezují maximální velikost otvoru, kterým může motor nasávat vzduch – tzv. restriktor. Pro motory, které jako palivo používají benzín, musí mít restriktor kruhový průřez s průměrem ne větším než 20 mm. Toto je velmi zásadní omezení, které podstatně sníží výkon motoru.

Použití restriktoru ještě zvyšuje důležitost systému sání vzduchu. Ten musí být optimálně zvolen a dobře navržen, aby vzduch co nejlépe procházel přes restriktor a aby pokles výkonu byl co nejmenší.

2. Cíl práce

Cílem práce je navrhnout systém sání vzduchu pro atmosférický motor monopostu Formule Student, jehož součástí je restriktor omezující přívod vzduchu, škrtková klapka a systém vstřikování paliva. Sání by mělo být navrženo tak, aby motor dosahoval co nejvyššího výkonu. Podle návrhu bude vyroben prototyp zařízení.

3. Metodika práce

V práci budou nejprve stručně popsány existující typy systémů sání vzduchu a bude definováno, který typ bude zvolen pro návrh. Při výběru musí být kladen důraz na možnosti seřízení vstřikování v sacím systému a na možnosti jeho výroby. Ideální by bylo použití přímého vstřikování paliva, což však kvůli konstrukci motorů používaných v soutěži Formule Student není možné. Proto bude zvolen sací systém s vícebodovým nepřímým vstřikováním paliva, který je rozumným kompromisem mezi funkčností a cenou.

Dále budou rozebrány možnosti výroby sání, jejich výhody a nevýhody a bude vybrána nejvhodnější technologie výroby. V zásadě existují tři hlavní technologie výroby. Je to svaření sacího systému z hliníku, 3D tisk, a výroba z uhlíkových vláken. Zde je třeba opět najít správný kompromis. Sací systém má kvůli pravidlům Formule Student poměrně složitý tvar, kterého lze dosáhnout pouze pomocí 3D tisku. Zároveň však velkou roli při rozhodování hraje i hmotnost, která je samozřejmě nejnižší u uhlíkových vláken. Díky jednoduchosti výroby a možnosti dosáhnout požadovaného tvaru byl nakonec zvolen 3D tisk. U materiálů používaných na 3D tisk bývá problém s prodyšností, která je u sacího systému nepřijatelná. Proto byla vhodnost technologie 3D tisku ověřena výrobou a tlakovým testováním zkušebního modelu. Tím bylo potvrzeno, že materiál není prodyšný.

V návrhové části budou na začátku probrána všechna omezení daná pravidly a prostorovým uspořádáním monopostu, která mají vliv na finální design sání. Na základě poznatků, výpočtů a simulací dostupných v literatuře, budou vypočítány a zvoleny parametry sání vzduchu. Systém sání má tři základní parametry, je to délka sběračů, tvar koncovek sběračů a objem airboxu.

Délka sběračů bude spočítána pro zvolené otáčky podle H.W. Engelmana jako Helmolzův rezonátor. Tato metoda je již léty prověřená a v motorsportu stále často používaná.

$$L = \frac{1348^2 * v_s^2 * A * (R - 1)}{N_p^2 * 2,1^2 * V_p * (R + 1)}$$

Rovnice 1 – Výpočet délky sběrače podle Engelmana [3]

Kde: L = Délka sacího potrubí (sací kanál + sběrač) [cm]

v_s = Rychlost zvuku [m/s]

A = Obsah průřezu sběrače [cm²]

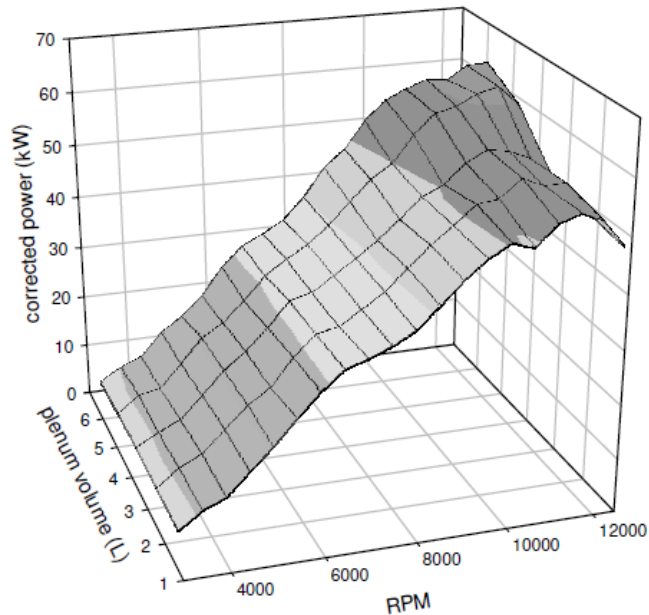
R = Kompresní poměr motoru

N_p = Otáčky motoru [ot/min]

V_p = Objem válce [cm³]

Tvary koncovek budou zvoleny podle doporučení Gordona P. Blaira v jeho práci Design and simulation of four stroke engines. V této práci Blair zkoumal různé tvary koncovek a zjistil, že nejlepší koncovka je taková, která má co největší průměr, zároveň je co nejnižší a má eliptický profil. Koncovky budou navrženy s ohledem na rozteč válců a následně bude jejich funkce ověřena v simulačním softwaru ANSYS R19.2.

Objem airboxu bude zvolen na základě praktických pokusů prováděných L. J. Hamiltonem a J. E. Leem na restriktorovaném motoru Formule Student. Hamilton a Lee zjistili, že u těchto motorů v podstatě platí tvrzení „čím větší objem airboxu, tím větší výkon“. To potvrzuje i následující graf.



Obr. 1 – 3D graf výkonu v závislosti na otáčkách motoru, v grafu je vidět, jakých výsledků dosáhly různé objemy airboxů (osa plenum volume)

Pro vytvoření modelu sání bude použit CAD softwar Autodesk Inventor 2017. Finální návrh sání bude podroben simulacím proudění pomocí softwaru ANSYS R19.2, který je považován za nejlepší a nejobsáhlejší simulační software na světě. Parametry motoru nutné pro simulace budou vypočítány pomocí softwaru GT-Power.

Simulacemi bude zjišťováno, jestli jsou všechny tři válce motoru optimálně plněny a jestli navržené koncovky a sběrače dobře sbírají a urychlují vzduch, proudící směrem do válců.

Podle navrženého a odsimulovaného modelu bude vyroben systém sání, který bude namontován na monopost Formule Student týmu CULS Prague Formula Racing.

4. Formule Student

Formule Student je mezinárodní vzdělávací soutěž, určená pro týmy složené ze studentů technických vysokých škol. Cílem soutěže je navrhnout a vyrobit jednomístný lehký závodní monopost – formuli, podle pravidel Formula SAE. S tímto monopostem poté studenti soutěží na mezinárodních závodech, kde poměřují své síly se studenty jiných univerzit, jak na závodní trati, tak mimo trať ve statických disciplínách jako je například prezentace designu monopostu.



obr. 2 – Monoposty a týmy na závodech Formula Student Czech 2018 [10]

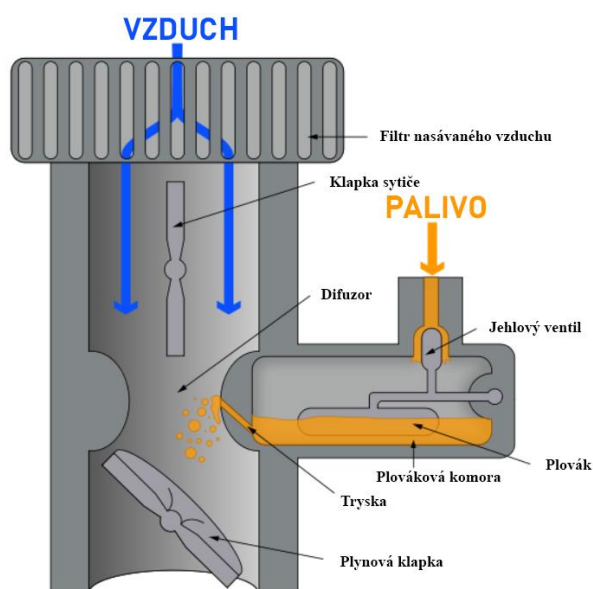
5. Systémy sání vzduchu atmosféricky plněných zážehových motorů

Pro správnou funkci spalovacího motoru musí do válce vstupovat směs paliva a vzduchu. Směs musí být ve správném poměru a palivo musí být ve vzduchu dobře rozptýleno. K zajištění zmíněného se používá tzv. systém sání vzduchu. Existuje několik systémů sání.

5.1 Karburátor

Karburátor se jakožto jednoduchá a spolehlivá metoda přípravy směsi používá již od počátku vývoje spalovacích zážehových motorů. Princip jednoduchého karburátoru lze popsat následovně.

Vzduch nasávaný do motoru prochází v karburátoru zúžením, tzv. difuzorem, kde stoupá rychlost proudění vzduchu a zvyšuje se podtlak, který přes trysku přisává do proudícího vzduchu palivo z plovákové komory karburátoru. Palivo je ve vzduchu rozptýleno na miniaturní kapičky a vzniká směs. Odsátím části paliva poklesne v plovákové komoře hladina a jehlový ventil mechanicky propojený s plovákem pootevře palivové potrubí, čímž se opět zvýší hladina paliva v komoře. Po zvýšení hladiny jehlový ventil přítok dalšího paliva opět uzavře. Funkce karburátoru je patrná z následujícího obrázku. [1]

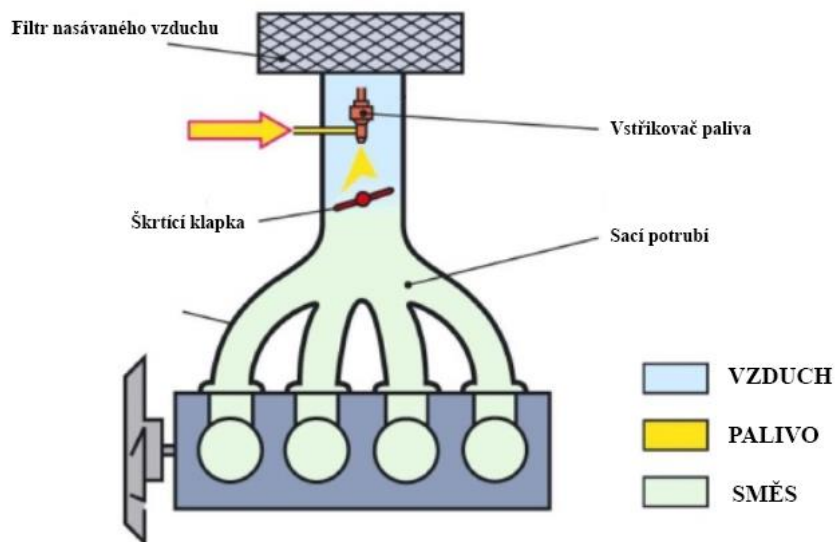


Obr. 3 – Schéma jednoduchého karburátoru [11]

Karburátory jsou jednoduché a spolehlivé, nedokážou však dosáhnout takových parametrů jako moderní systémy vstřikování paliva. A to jak maximálního výkonu, tak spotřeby. Proto je použití karburátoru na motor Formule Student nevhodné.

5.2 Systém sání vzduchu s jednobodovým vstřikováním paliva

Tento systém se objevil jako první elektronická náhrada karburátoru. Tryska řízená podtlakem je zde nahrazena elektronickým vstřikovačem. Díky tomu je možné provádět přesnější korekce množství vstřikovaného paliva například při prudkém sešlápnutí plynového pedálu a rychlém otevření škrticí klapky, nebo při startu motoru. Při deceleraci motoru je možno vstřikovač vypnout, což snižuje spotřebu. Vstřikovač je umístěn před společnou škrticí klapkou a do sacího potrubí motoru vstupuje již hotová směs paliva a vzduchu. Toto je sice výhodné z hlediska homogenity směsi, může ale docházet k nerovnoměrnému plnění jednotlivých válců motoru.

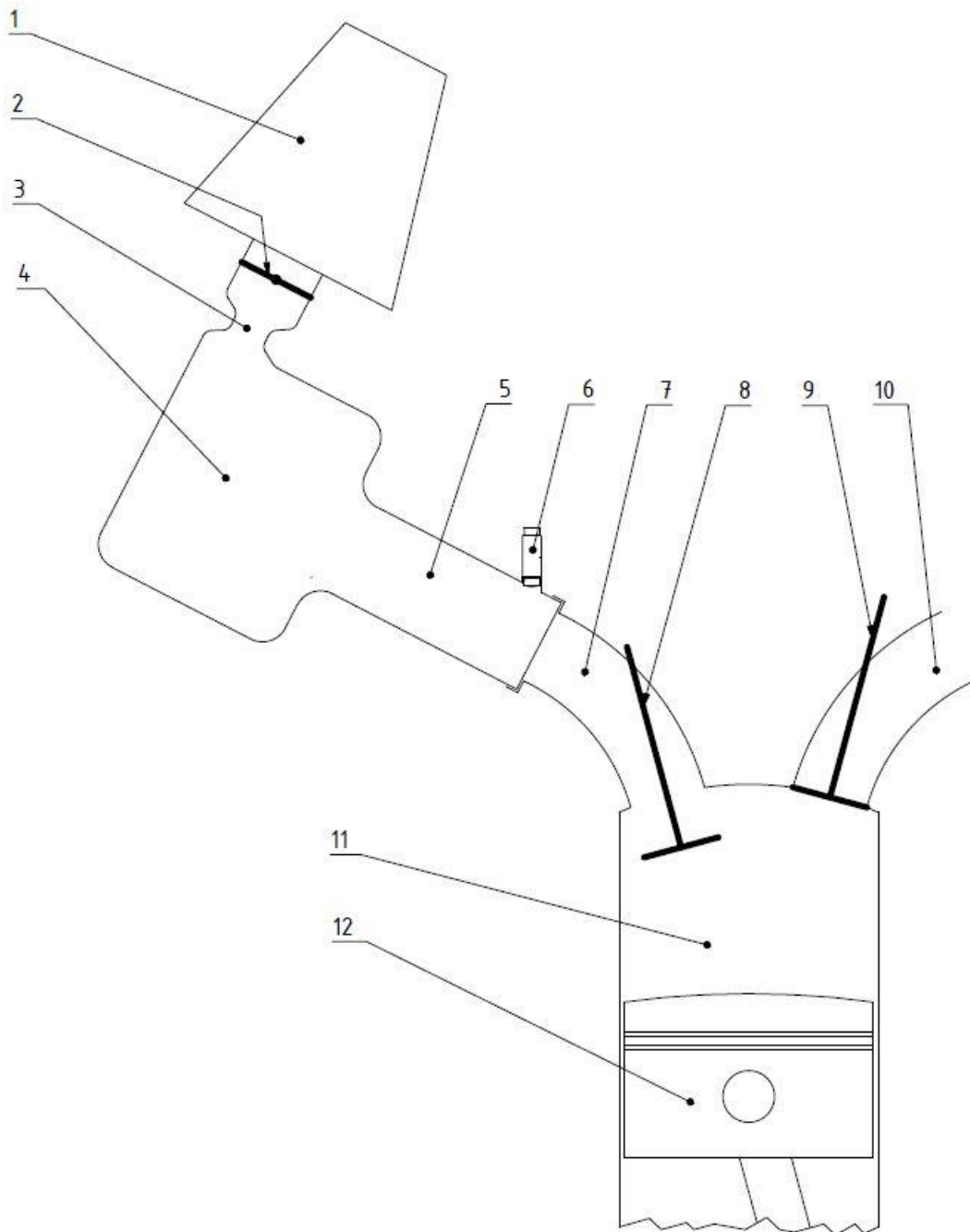


Obr. 4 – Schéma systému vstřikování paliva s jednobodovým vstřikováním [12]

5.3 Systém sání vzduchu s vícebodovým vstřikováním paliva

V dnešní době se zážehové spalovací motory vyrábějí převážně s tímto typem sacího systému. Je relativně jednoduchý a přitom efektivní a spolehlivý, umožňuje korekce množství vstřikovaného paliva, stejně jako jednobodový systém, a navíc zajišťuje to,

že všechny válce dostanou při každém cyklu přesné množství paliva. Je to dáno tím, že každý válec má svůj vlastní vstřikovač paliva, který se nachází na konci sběrače. Tento systém bude použit při návrhu sání, proto je podrobněji popsán na následujícím schématu.



obr. 5 – Schéma systému sání vzduchu atmosféricky plněného zážehového motoru

1 – Filtr nasávaného vzduchu: Slouží k čištění protékajícího vzduchu, který je nasáván motorem, zabraňuje vniknutí nečistot do dalších částí sacího systému

i do samotného motoru. Nečistoty by mohly vézt k většímu opotřebení válce a pístních kroužků, nebo k poškození citlivých senzorů v sacím traktu. Formule Student nejezdí v prašném prostředí, proto bývá filtr často nahrazen pouze sítkem nebo není použit vůbec.

2 – Škrťící klapka: Škrťící klapka je otočná klapka kruhového průřezu, jejíž otevírání a zavírání reguluje přívod vzduchu do motoru. Klapka je ovládána plynovým pedálem. Součástí škrťící klapky je senzor její polohy (TPS Throttle position sensor), který odesílá informace o otevření klapky do řídicí jednotky, ta podle těchto informací koriguje množství vstřikovaného paliva.

3 – Restriktor: Záměrné zúžení sacího potrubí, omezuje přísun vzduchu do motoru, čímž snižuje maximální výkon. V klasických systémech sání se nevyskytuje, v motorsportu je ale používán velmi často.

4 – Uklidňovací komora/Airbox: Komora která slouží k vyrovnání tlaku mezi vstupem do sacího systému a jednotlivými válci. Komora musí mít dostatečný objem na to, aby tlumila pulzy vzniklé otevíráním a zavíráním ventilů jednotlivých válců. V kombinaci se správně zvolenou délkou a průměrem sběračů, nastává v komoře jev zvaný Helmholtzova rezonance a vzniká rezonanční přeplňování – válec může nasát více směsi, než je jeho objem. Tzn. objemová účinnost je více než 100 %. V uklidňovací komoře se nachází senzor tlaku a teploty nasávaného vzduchu, senzor odesílá data do řídicí jednotky pro přesnější korekce množství vstřikovaného paliva. V neposlední řadě uklidňovací komora také tlumí hluk vytvářený sáním (syčení). [4]

5 – Sběrač/Runner: Sběrače slouží k rozvedení vzduchu k sacím kanálům pro jednotlivé válce. Ve spodní části sběračů jsou umístěny vstřikovače paliva – nepřímý vstřik. Změnou délky a průměru sběračů může být sání optimalizováno pro různé otáčky motoru.

6 – Vstřikovač paliva: Slouží ke vstříknutí požadovaného množství paliva do nasávaného vzduchu, vstřikovač musí palivo rozstříknout na co nejmenší kapičky, aby byla směs paliva a vzduchu co nejkvalitnější a v motoru co nejlépe hořela. Pro lepší rozstřík je palivo ke vstřikovačům přiváděno pod tlakem.

Součásti motoru

7 – Sací kanál v hlavě válců: Sací kanál slouží k propojení sběrače s ventily a se samotným spalovacím prostorem. Při výpočtu délky sběračů je nutné vzít v úvahu i délku sacího kanálu.

8 – Sací ventil (ventily)

9 – Výfukový ventil (ventily)

10 – Výfukový kanál v hlavě válců

11 – Válec

12 – Píst

5.4 Systém sání vzduchu s přímým vstřikováním paliva

Nejnovější typ sacího systému, který vznikl za účelem snížení emisí a snížení spotřeby. Palivo je pod vysokým tlakem vstřikováno při sacím cyklu přímo do válce, kde dochází k tvorbě směsi. Množství paliva ve válci je v tomto případě opravdu přesné. Pro použití systému s přímým vstřikem je však potřeba speciální hlava motoru – se vstupem na vstřikovač, vysokotlaké čerpadlo na palivo a pokročilý motor management.

Pravidla Formule Student udávají maximální povolený objem motoru. Ten je 710 cm³. Tím je výběr motorů prakticky omezen na motocyklové motory, u kterých se sání s přímým vstřikováním zatím nepoužívá. Proto je téměř nemožné motor s tímto sacím systémem použít – studentský tým by si musel vyrobit vlastní hlavu motoru.



Obr. 6 - Grafické znázornění jednoho válce zážehového motoru s přímým vstřikováním paliva [13]

6. Způsob výroby

Největší část této práce se bude zabývat výrobou důležitých komponent sacího systému, kterými je airbox se sběrači. Tato část slouží k propojení kanálů v hlavě válců s dvaceti milimetrovým restriktorem a se škrtící klapkou. Musí být optimálně navržena, aby mezi restriktorem a sacím kanálem nevznikaly velké tlakové ztráty, které by měly za následek špatné plnění válců a tím ztrátu výkonu motoru.



obr. 7 – Airbox se sběrným potrubím [14]

6.1 Technologie výroby

Airbox se sběrači jsou tvarově složité, musí být vyrobeny z materiálu, který je chemicky odolný vůči benzínu, musí být dostatečně pevný, aby odolal jak vibracím motoru, tak podtlakovým pulzům uvnitř sání, musí mít vysokou teplotní odolnost (alespoň 100°C) a stěny nesmí v žádném případě být porézní – to by vedlo k velmi špatné funkčnosti motoru, jenž by nasával „falešný vzduch“. Dále by výroba měla být co nejméně nákladná a nenáročná. Požadavky na výrobní technologii jsou tedy

vysoké. Existuje rozsáhlé množství technologií, které lze na výrobu sání použít. Prakticky použitelné pro tým Formule Student jsou ovšem pouze tři technologie a to: svaření sání z hliníku, výroba z uhlíkových vláken (carbon) a 3D tisk.

Všechny technologie jsou vhodné, avšak žádná z nich nedokáže plně vyhovět nastaveným požadavkům, proto je nutné najít nejlepší kompromis. Následující tabulka shrnuje výhody a nevýhody různých technologií.

<i>Technologie výroby</i>	<i>Klady</i>	<i>Zápory</i>
Svaření z hliníku	<ul style="list-style-type: none"> + nejvyšší spolehlivost + vysoká pevnost + vysoká teplotní odolnost + vysoká chemická odolnost 	<ul style="list-style-type: none"> - nelze vyrobit složité tvary - vyšší hmotnost - obtížná výroba
Výroba z uhlíkových tkanin (carbon)	<ul style="list-style-type: none"> + vysoká pevnost + nízká hmotnost +vysoká teplotní odolnost +vysoká chemická odolnost 	<ul style="list-style-type: none"> - obtížná výroba - nutnost výroby forem - lze vyrobit pouze omezeně složité tvary - nutnost kombinace s obráběnými díly nebo s 3D tiskem
3D tisk	<ul style="list-style-type: none"> + široká škála materiálů + lze vyrobit jakékoliv tvary + jednoduchá výroba + vyhovující teplotní i chemická odolnost 	<ul style="list-style-type: none"> - vyšší hmotnost - vysoká cena

Tab. 1 – Klady a zápory výrobních technologií

Nakonec byla zvolena výroba pomocí 3D tisku a to hlavně díky možnosti zhotovit komplikované tvary, kterých je v sacím traktu hodně, ale také díky menší složitosti výroby.

6.2. Metody 3D tisku

Existuje několik metod 3D tisku, každá je založena na jiném principu a v každé lze použít jiné materiály. V této kapitole budou tyto metody popsány.

6.2.1. Metoda FDM (Fused deposition modeling)

FDM je v současné době nejrozšířenější a nejdostupnější metoda 3D tisku. Materiál, ve formě struny, je taven v tiskové hlavě, která taveninu klade v tenkých vrstvách (řádově 0,1 mm) na podložku. Vrstvy jsou kladeny jedna na druhou, a to tak dlouho, dokud není hotový celý výrobek. [15]



obr. 8 – 3D tiskárna FDM [16]

Nejčastěji používanými materiály jsou termoplasty ABS nebo PLA. Ani jeden z těchto plastů však není vhodný pro použití v sacím systému spalovacího motoru. ABS není chemicky dostatečně odolný a PLA měkne již při teplotě kolem 50 °C. Jedinými opravdu vhodnými materiály pro tisk FDM jsou ULTEM 9085 a ULTEM 1010. Jejich cena je však 10x vyšší než u ABS nebo PLA. Kvůli vysoké teplotě tavení (350°C – 380°C) je tyto plasty možné tisknout pouze na speciální tiskárně s celokovovou tiskovou hlavou. [17] [18] [19]

Komplikace s touto metodou mohou nastat při tisku různých převisů, kde je potřeba vytisknout tzv. dočasné podpory, které budou po dokončení tisku odstraněny. Toto řešení je funkční, avšak kvalita povrchu nedosahuje takových výsledků jako tisk jinými metodami.

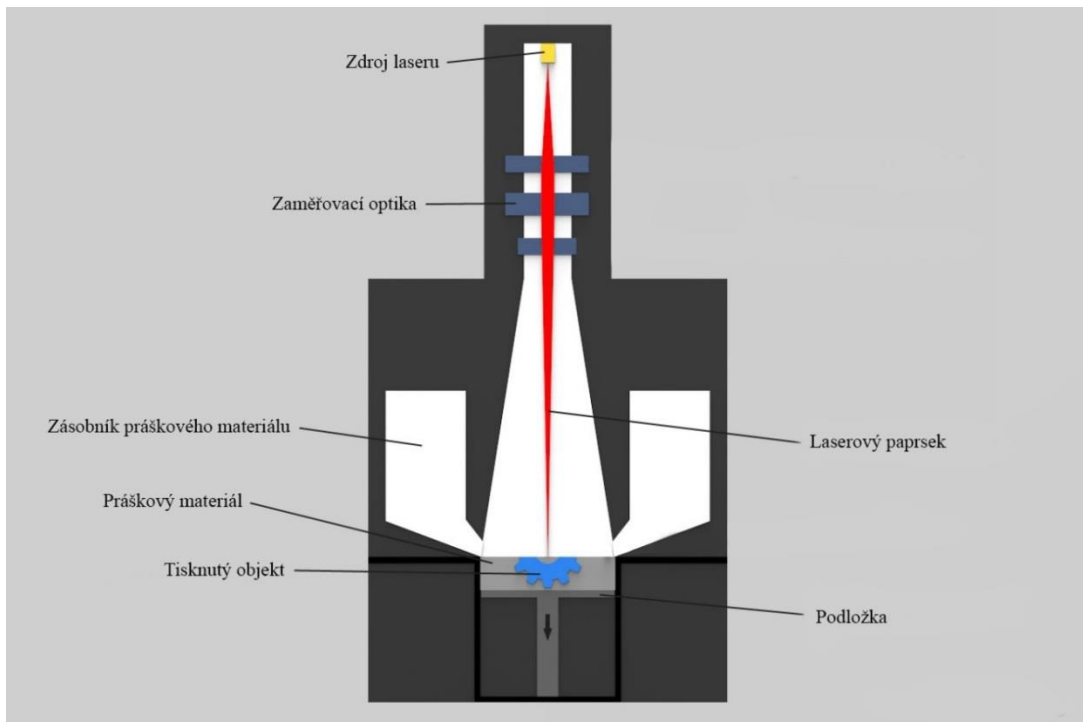
Dalším problémem je potom vyšší porezita materiálů, kterou je nutno řešit povrchovou úpravou hotového výrobku.



obr. 9 – Výrobek zhotovený metodou FDM – na detailu vpravo jsou dobře patrné jednotlivé tisknuté vrstvy [20]

6.2.2 Metoda SLS (Selective laser sintering)

Název této metody lze přeložit jako selektivní spékání laserem, ve zkratce se používá pojem „sintrování“. Výrobek vzniká tavením práškového materiálu, který je po tenkých vrstvách spékán vysoce výkonným a přesným laserem. Laser ohřeje materiál téměř na teplotu jeho tání, což má za následek výborné spojení materiálu. Při tisku touto metodou je kolem výrobku neustále přítomen materiál ve formě prášku, čímž odpadá potřeba použití dočasných podpor. Pomocí této metody se dají zhotovit výrobky, které mají kvalitu srovnatelnou s konvenčními způsoby výroby. [21]



obr. 10 – Schéma SLS tiskárny [22]

SLS nabízí použití široké řady materiálů a to plasty, kovy, keramiku či sklo. Kvůli cenové dostupnosti a hmotnosti by na tisk sání byl zvolen plast, konkrétně PA2200, který je velice pevný a chemicky odolný, jeho teplotní odolnost je také dostatečná (přes 170 °C). (Data sheet PA2200 – příloha 1)

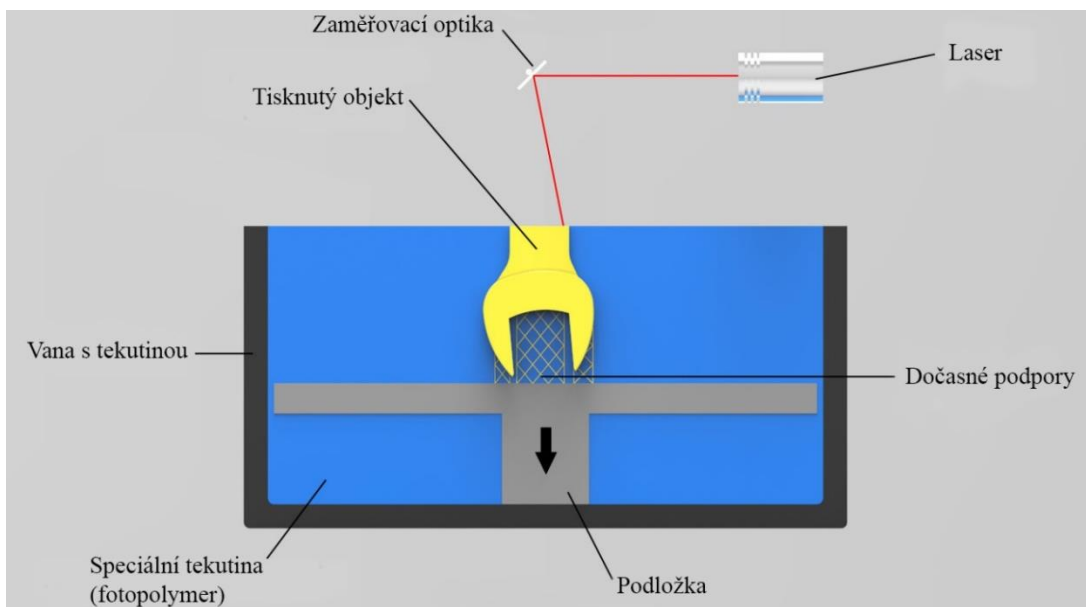
Nevýhodou metody SLS je její vysoká cena oproti FDM.



obr. 11 – Výrobek zhotovený metodou SLS, kvalita povrchu je velmi dobrá [23]

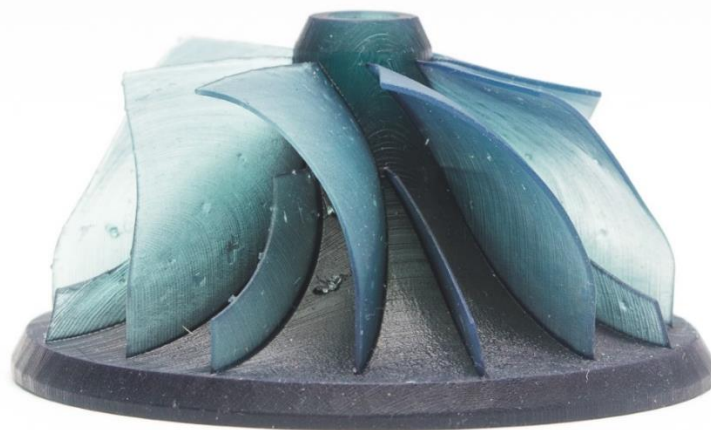
6.2.3. Metoda SLA (Stereolithigraphy)

Metoda SLA je podobná SLS s tím rozdílem, že místo prášku je používána speciální tekutina, tzv. fotopolymer, která je pomocí laseru vytvrzována. Tento proces se nazývá fotopolymerizace. SLA je nejpřesnější ze všech metod 3D tisku a výrobky mají nejvyšší kvalitu povrchu. Je proto vhodná pro výrobu přesných dílů, kde je třeba dodržet přísné rozměrové tolerance. U této metody je také potřeba tisknout dočasné podpory, ty však na rozdíl od metody FDM nemají nepříznivý vliv na kvalitu povrchu. [24]



obr. 12 – Schéma SLA tiskárny [25]

I přes to, že existuje celá řada materiálů, které lze metodou SLA tisknout, mechanické vlastnosti výrobků se nedokáží vyrovnat SLS. [24]



obr. 13 – Výrobek zhotovený metodou SLA [26]

6.2.4. Volba metody tisku

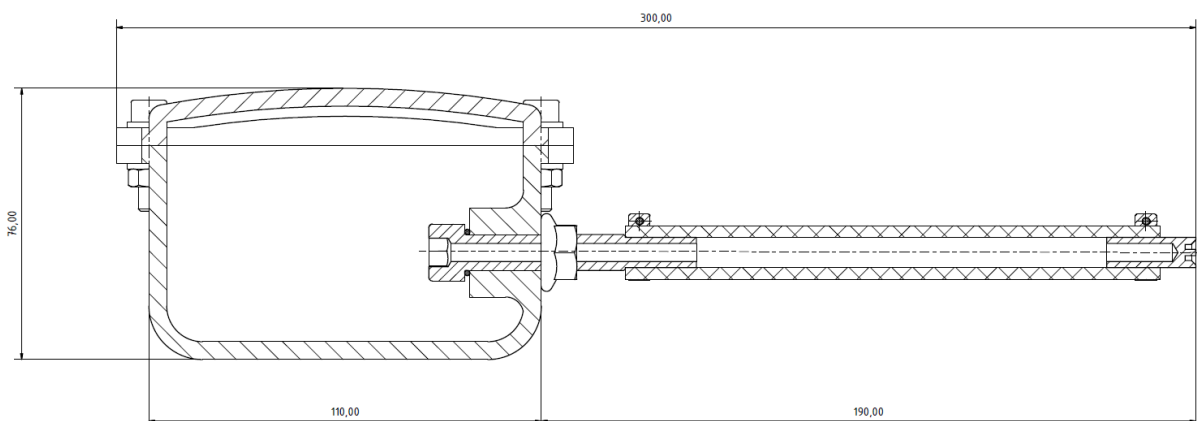
Metoda SLA byla z výběru vyřazena jako první, kvůli kombinaci její vysoké ceny, špatné dostupnosti a menší pevnosti vyrobených dílů.

Na výběr zůstala metoda FDM z materiálu ULTEM a metoda SLS. Obě tyto metody poskytují výrobky výborných mechanických vlastností, výhodou FDM je o něco nižší cena, naopak nevýhodou je větší poretita a menší přesnost. Jak je uvedeno výše, poretita je naprosto nepřijatelná. Protože tisknuté díly budou mít složité tvary, a budou obsahovat i díry, které musí být přesné, byl nakonec vybrán tisk metodou SLS. Vytisknuté díly budou následně ošetřeny přípravkem Dichtol, pro zacelení všech pórů ve stěnách.

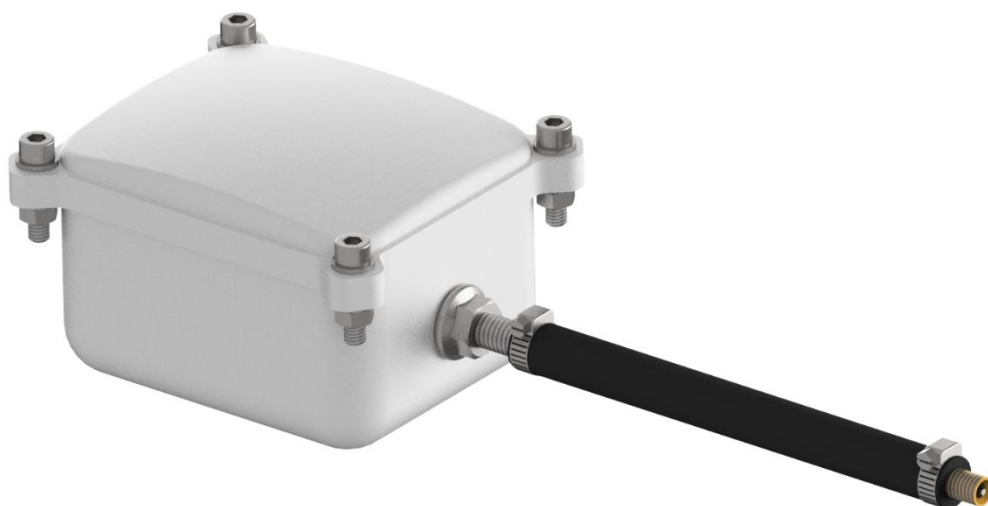
6.3 Zkušební model pro ověření vhodnosti technologie

Pro ověření vhodnosti zvolené technologie byl navržen malý model, který reprezentuje sání vzduchu. Tento model bude vyzkoušen na chemickou odolnost vůči benzínu, na poretitu stěn a mechanické vlastnosti.

Zjednodušeně řečeno, model je vlastně krabička s tloušťkou stěny 5 mm (stejná tloušťka jaká bude použita u finálního modelu sání), krabička je rozdělená na dva kusy, jenž jsou spojeny přírubou a utěsněny tmelem na motory (toto řešení bude s drobnou změnou rovněž použito na finálním modelu). Ve spodní části krabičky se nachází upravený a provrtaný šroub M10, na který je napojena gumová hadice, na jejímž konci se nachází autoventilek. Tímto autoventilkem bude do zkušebního modelu přiveden tlak a bude zkoušena těsnost.



Obr. 14 – Řez zkušebního modelu se základními rozměry



Obr. 15 – Realistické zobrazení kompletního zkušebního modelu



Obr. 16 – Vyrobený zkušební model utěsněný tmelem na motory

6.3.1. Zkoušení

Po vytisknutí modelu a vysoustružení průchozího šroubu byl celý zkušební model sestaven, příruby dvou tištěných půlek byly utěsněny pomocí tmelu na motory, a průchozí šroub byl utěsněn o-kroužkem, jak je vidět na výkresu výše. Poté, co tmel po 24 hodinách zaschnul, mohlo se přistoupit k první zkoušce.

Motor Formule Student je specifický tím, že malá škrtící klapka a malý restriktor je na sacím systému umístěn před velmi objemným airboxem. Díky tomu může ve vysokých otáčkách při úplném zavření klapky tlak v celém sání klesnout až o 0,75 bar. To znamená, že hodnota podtlaku je 0,25 bar – zjištěno pomocí senzoru absolutního tlaku v sání (IAP) ve Formuli Student pro sezonu 2018.

Komponenty tisknuté z plastu musí samozřejmě tomuto podtlaku odolat a nesmí při něm propustit žádný vzduch skrz stěny. Vyzkoušení těsnosti stěn není nutně potřeba dělat podtlakově, ke zkoušce bude tedy použit přetlak.

Na autoventilek byl připojen zdroj vzduchu s přesným ručičkovým manometrem a zkušební model byl natlakován na tlak 1,5 bar, což je dvojnásobek tlaku dosahovaného v sacím systému motoru. Poté byl celý model ponořen do nádoby s vodou. Jakékoliv bublinky uvolňující se ze stěn modelu by signalizovaly, že stěny jsou příliš porézní a propouštějí vzduch.



Obr. 17 – Model v nádobě s vodou při tlakové zkoušce

Výsledky však byly perfektní, nebyly vidět žádné bublinky ani pokles tlaku na manometru, a to i přes to, že se celý zkušební model viditelně nafukoval. Tím byla zároveň prokázána i výborná mechanická pevnost.

Po dokončení zkoušky byl model vystaven na několik hodin působení benzínu a poté byla zkouška druhý den opakována, model nejenže opět obstál bez chyby, ale dokonce tlak udržel i po několik dalších dní.

Po provedení těchto zkoušek byl zvolený materiál uznán jako vhodný a dalším krokem bylo navrhnout design airboxu a sběračů.

7. Návrh systému sání vzduchu

Hlavní částí této práce je návrh sání pro tříválcový motor Triumph Daytona 675, návrh se bude skládat z několika částí. Budou probrána omezení daná pravidly Formule Student. Dále pak konstrukční omezení vzniklá prostorovým řešením ostatních částí monopostu.

Ve výpočtové části budou spočítány optimální délky sběračů pro určené otáčky a bude určen objem airboxu.

Při návrhu kompletního sacího systému budou použity známá a osvědčená řešení, jejichž funkčnost byla již prokázána jinými odbornými studiemi. Pro modelování bude použit CAD program Autodesk Inventor 2017.

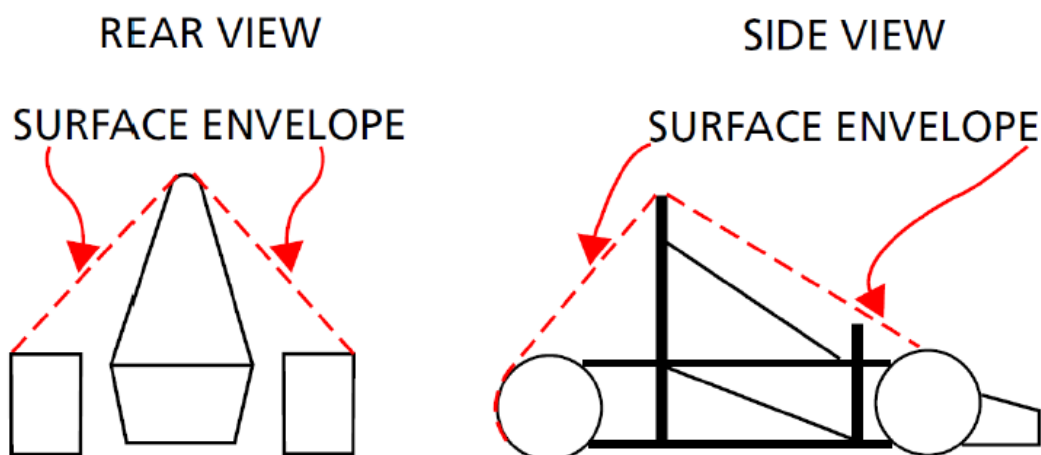
Výsledný design bude podroben několika simulacím rychlosti a proudění vzduchu v celém sacím systému. Podle výsledků těchto simulací bude na sání umístěn senzor tlaku v sání IAP a systém vstřikování paliva. A vyhodnocena celková vhodnost navrženého systému.

7.1 Pravidla

Kromě již několikrát zmiňovaného 20 mm restriktoru (pravidlo *IC2.4.*) udávají pravidla další podmínky pro sací systém. Ty budou zohledněny v konečném návrhu.

7.1.1 Umístění systému sání vzduchu v rámci monopostu

Pravidlo Formule Student č. *IC.1.2 Air intake and fuel system locaion* udává, že všechny části sacího a palivového systému (včetně škrtkové klapky, filtru nasávaného vzduchu a airboxu) musí být v prostoru, který je vymezen horní vnější stranou všech čtyř pneumatik vozidla. Vymezený prostor je patrný z následujícího obrázku. [2]



Obr. 18 – Prostor ve kterém se musí nacházet kompletní systém sání vzduchu [2]

Dále, podle pravidla *IC2.2 Intake system location* musí být každá část sání vzduchu, která je výše než 350 mm nad zemí, chráněna proti bočnímu nebo zadnímu nárazu. Tuto ochranu má zajišťovat rám. Vzhledem k tomu, že na monopostu týmu Culs Prague Formula Racing bude celý sací systém výše než 350 mm nad zemí, musí se sání nacházet uvnitř rámu. [2]

7.1.2 Uchycení systému sání vzduchu

Podle pravidla *IC2.3. Intake system mounting* musí být sání vzduchu pevně uchyceno k bloku motoru, nebo k hlavě válců pomocí mechanických spojovacích prvků nebo mechanických podpěr a konzol. Použití gumových hadic či přírub je dovoleno, není však považováno za pevné uchycení.

Spojovací prvky se závitem musí mít pojistný mechanismus proti povolení dle kapitoly *T.10.3* (jako přijatelný pojistný mechanismus jsou brány: správně použité zadrátkování šroubů, správně použité zakolíčkování šroubů, pojistné matice s nylonem a pojistné matice s prolisem. Pružné nebo vějířové podložky, lepidlo či použití „kontramatky“ nejsou považovány za přijatelný pojistný mechanismus).

Jako další spojovací prvky mohou být použity pouze ty, které byly dodávány jako originální příslušenství motoru.

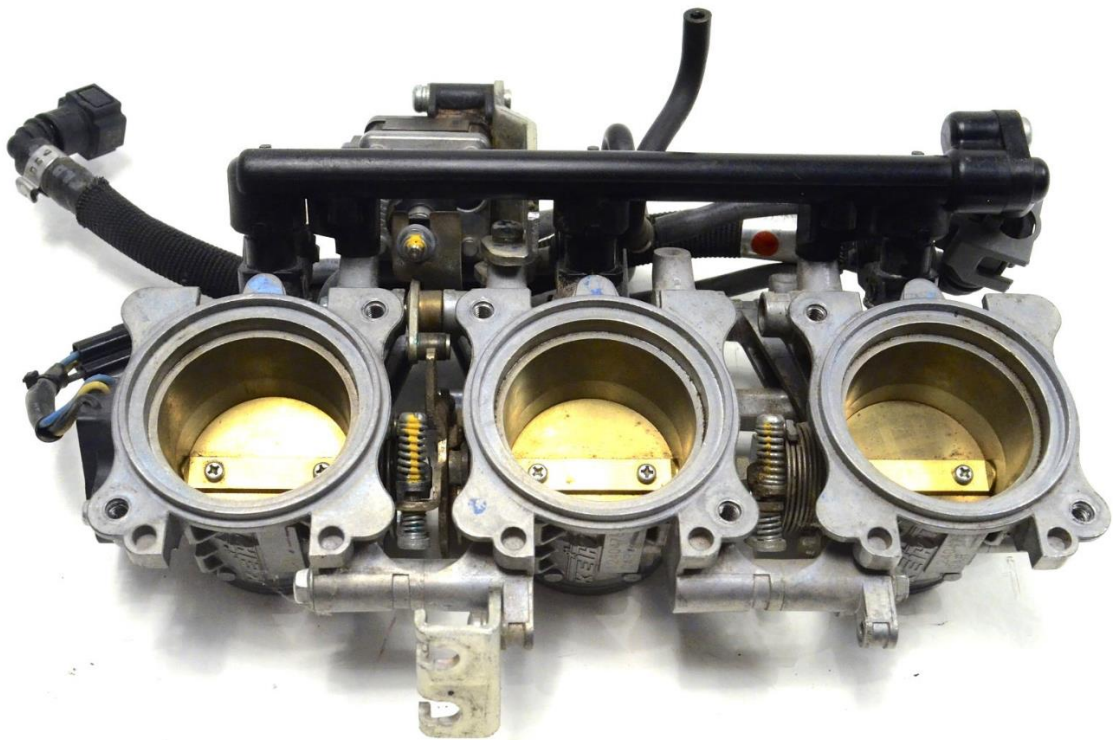
Pravidlo *IC.2.3.3* říká, že pokud je sání někde chyceno k rámu, toto uchycení musí být pružné. [2]

7.1.3 Uspořádání prvků sacího systému a restriktor

Podle pravidla *IC.2.4.2 The only allowe sequence of components* je jediné možné pořadí prvků sacího systému takovéto: škrťící klapka -> restriktor -> motor.

Restriktor musí být kruhového průřezu a průměru 20 mm (pro palivo benzín). Musí být umístěn tak, aby bylo možné na technické přejímce provést jeho kontrolu a měření.

Restriktor nesmí být nijak pohyblivý, ohebný či pružný a nesmí být součástí individuálních škrťících klapek, jejichž použití je zakázáno.



obr. 19 – Originální individuální škrťící klapky pro motor Triumph Daytona 675 [27]

V sacím systému musí být použita škrťící klapka nebo karburátor libovolného designu a velikosti. Klapka může být ovládána jak elektricky, tak mechanicky pomocí lanka. Lanko musí být vedeno tak, aby se nemohlo nikde zachytnout nebo zaseknout.

Škrťící klapka musí mít minimálně dvě pružiny, které ji vracejí do zavřeného stavu, aby nezůstala zaseklá na plném plynu. Pružina senzoru polohy škrťící klapky (TPS) se nepočítá. [2]

7.1.4 Vstřikování paliva

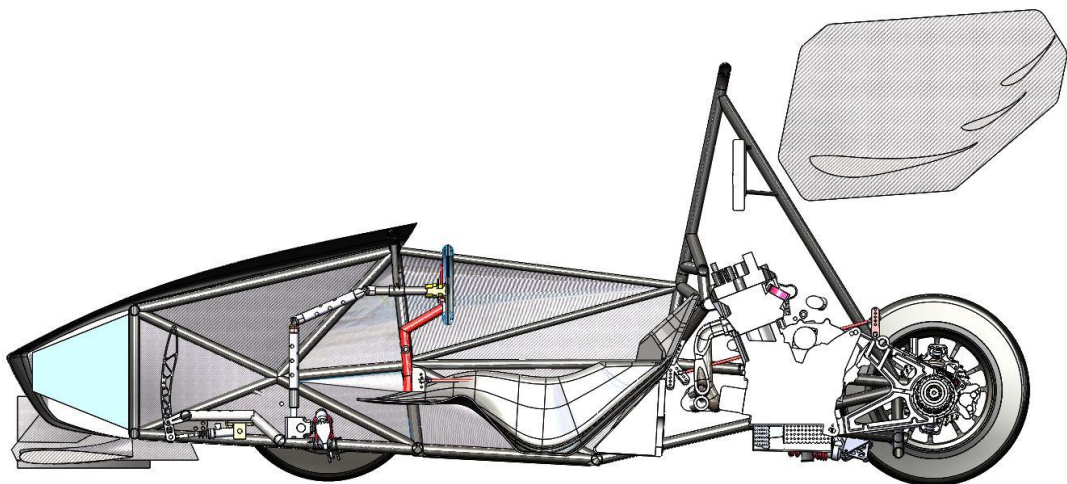
Pravidlo *IC.6.1. Low pressure injection LPI* uvádí povolené palivové lišty a jejich uchycení. Může být použita jakákoliv palivová lišta, která je originálně dodávána výrobcem motoru, a to bez ohledu na její materiál. Tato lišta nesmí být nijak upravována.

Použití neoriginálních palivových lišt je povoleno, ty však nesmí být vyrobeny z plastu, karbonu ani jiného hořlavého materiálu.

Palivová lišta musí být pevně přidělena k tělu sání nebo k motoru. Musí být použity závitové spojovací prvky s pojistným mechanismem dle kapitoly pravidel *T10.3* (viz. výše) a dle kapitoly *Critical fasteners* (uvádí že kritické spojovací prvky musí být šrouby pevnostní třídy min. 8.8, musí mít šestihrannou hlavu nebo válcovou hlavu na imbus klíč). [2]

7.2 Základní konstrukční řešení

Existuje více způsobů, jak systém sání konstrukčně vyřešit. Každý způsob má své klady a zápory. Na obrázku níže se nachází řez monopostem Formule Student týmu Culs Prague Formula Racing, na kterém budou popsána prostorová omezení jednotlivých řešení.



Obr.20 – Formule Culs, boční poloviční řez

7.2.1 Sání s bočním vstupem vzduchu

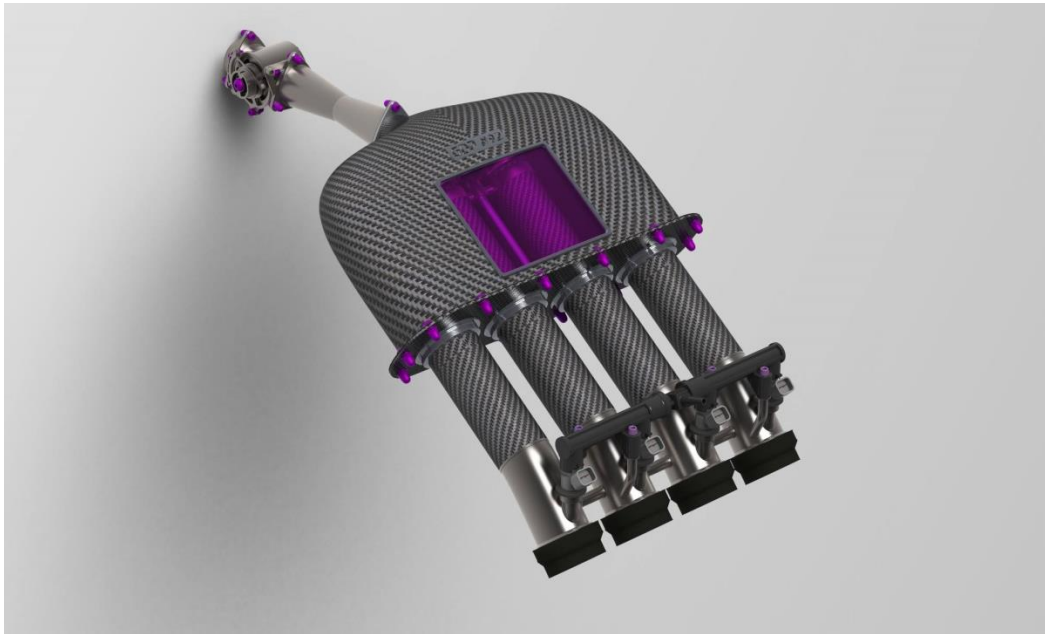
Sání s bočním vstupem je asi nejčastěji používané řešení u motorů osobních aut. Jde o léty prověřený kompaktní design. Díky zkosení airboxu jsou rovnoměrně plněny všechny válce motoru. Tyto výhody však platí pouze pro použití na nerestriktovaném motoru. Při použití restriktoru nastává problém. Kvůli urychlení proudění vzduchu je dobré, aby za restriktorem byl dlouhý, pomalu rozšiřující se difuzor. To u sání s bočním vstupem není možné, protože tím by se stalo příliš širokým a vyčnívalo by z rámu monopostu, což by odporovalo pravidlu IC.2.2.



Obr. 21 – Sání vzduchu s bočním vstupem, určeno pro motor Nissan CA18DE [28]

7.2.2. Sání s centrálním vstupem vzduchu

Centrální vstup vzduchu, jak již název napovídá se nachází v prostřední části airboxu, je tak zajištěno rovnoměrné rozložení vzduchu mezi všechny (tři) válce. Nevýhodou tohoto řešení je poloha jeho těžiště, které je výš než u předchozího řešení. Výhodou však je možnost použití dlouhého difuzoru za restriktorem. Další výhodou je možnost umístění vstupu do sání nad hlavu pilota, kde motor nasává čistý, méně zvlhčený studený vzduch. U tohoto designu lze také dobře dosáhnout velkého objemu airboxu. Je to také jediné konstrukční řešení, u kterého lze využít systému dvojitého vstřikování paliva. Tomu se budu věnovat v pozdějších kapitolách.



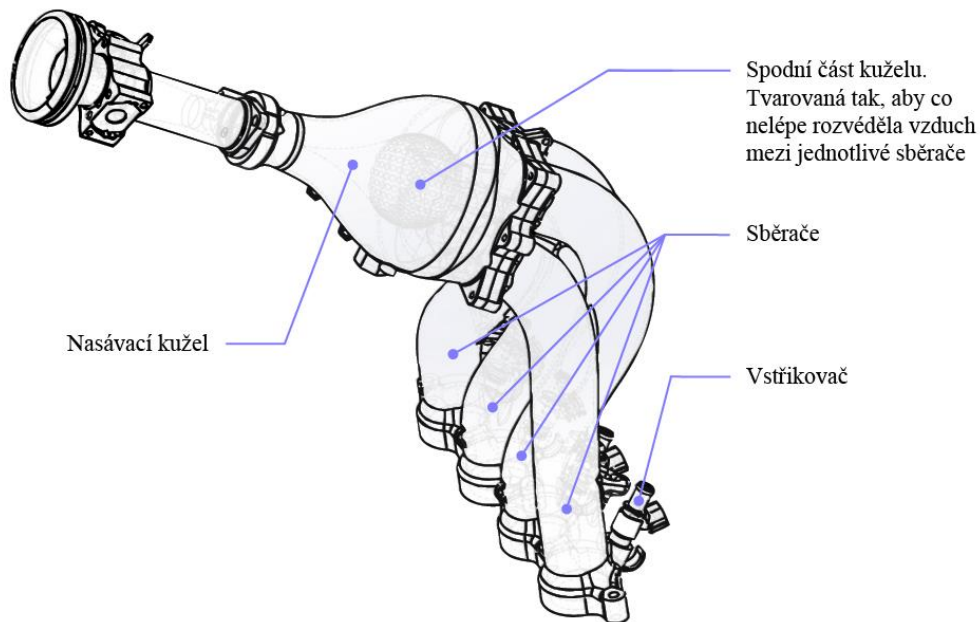
Obr. 22 – Sání vzduchu s centrálním vstupem, určeno pro motor Honda CBR600RR použitý v monopostu týmu Southampton Formula Student [29]

7.2.3 Sání s nasávacím kuželem

Tento typ sání se v poslední době stále více objevuje na monopostech Formule Student. Uvnitř airboxu je kužel, inspirovaný sacími kužely proudových letadel. Tento kužel rozděljuje proud vzduchu urychleného restriktorem k jednotlivým válcům. Toto konstrukční řešení tedy spoléhá na zachování co nejvyšší možné rychlosti vzduchu a její následné využití pro lepší plnění válců. To je však na úkor objemu airboxu a na úkor snížení efektu rezonančního plnění. Další nevýhodou je nutnost použití zakroucených sběračů, což velmi ztěžuje dodržení jejich vypočítané délky a také způsobuje tlakové ztráty.



Obr. 23 – Nasávací kužel letounu Mig 21 SMT [30]



Obr. 24 – Nákres sání se sacím kuželem, určeno pro motor Honda CBR600RR, týmu Hornet Racing California [31]

Na základě výše zmíněných faktů, bylo rozhodnuto použít sání s centrálním vstupem vzduchu. Varianta s nasávacím kuželem byla zamítnuta jako první, protože je velmi důležité dodržet vypočtenou hodnotu délky sběračů a také protože efekt rezonančního plnění je značný a použitím sání s kuželem se tento efekt hodně redukuje. Sání s bočním vstupem bylo nakonec také vyřazeno z výběru, hlavně kvůli prostorovým možnostem.

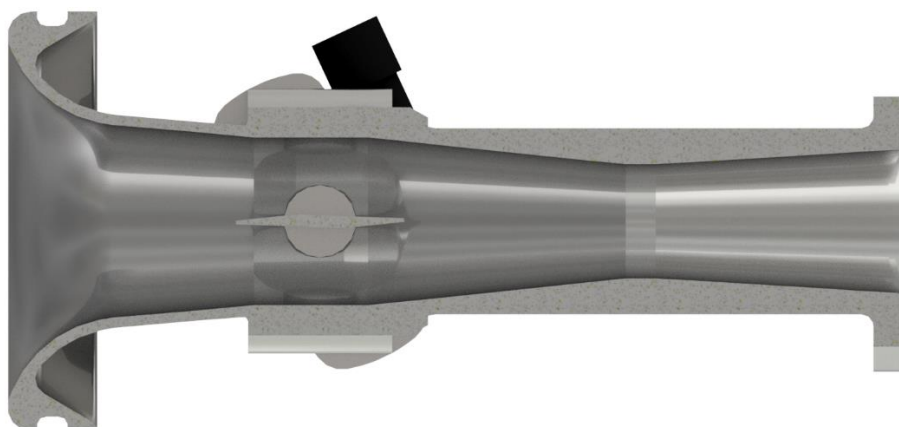
Sání s centrálním vstupem splňuje všechny potřebné požadavky. Snadno lze docílit velkého objemu airboxu, který je důležitý jednak pro uklidnění proudění vzduchu, ale také pro správnou funkci rezonančního plnění. Toto sání lze také snadno umístit do prostoru mezi zadní křídlo, opěrku hlavy a vrchní ochranou trubku rámu monopostu Culs – viz obrázek výše. V neposlední řadě je díky tomuto řešení sání možné použít systém dvojitého vstřikování paliva. Podrobnosti o těchto řešeních budou popsány v následujících kapitolách.

7.3 Škrťící klapka a restriktor

Bude použita škrťící klapka od firmy AT Power. Je to škrťící klapka, která byla vyvinuta speciálně pro Formuli Student a má integrovaný restriktor. Klapka vyhovuje pravidlům Formule Student a má ideální vlastnosti. Klapka má dvě vracející pružiny, senzor polohy škrťící klapky TPS, usazení pro plynové lanko, šroub na seřizování volnoběhu a 20mm restriktor. Klapka je rovněž lehká, což je výhodné pro úsporu celkové hmotnosti vozu. Tento typ škrťící klapky je velmi oblíbený napříč týmy Formule Student. I tým CULS Prague Formula Racing používá tuto klapku již několik sezón.



Obr.25 – Škrťící klapka od firmy AT Power [32]



Obr. 26 – Škrťící klapka AT Power, pohled v řezu na vnitřní část

7.4 Sběrače

Ve spodní části sběračů je umístěna palivová lišta se vstřikovači paliva. Uchycení sběračů k hlavě motoru a uložení vstřikovačů bude použito stejné, jako u originálních škrťících klapek motoru Triumph Daytona 675. Budou oměřeny všechny rozměry a spodní část sběračů vymodelována.

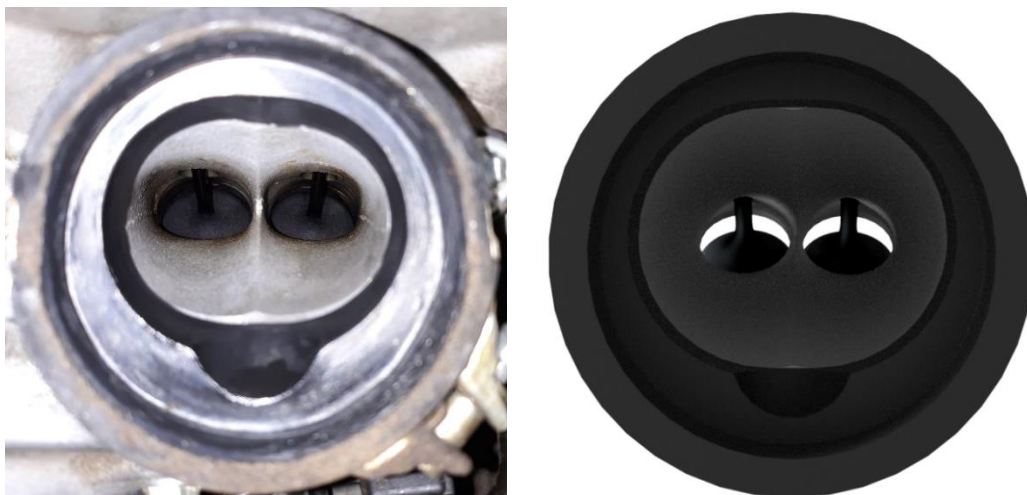


Obr. 27 – Originální škrťící klapky motoru Triumph Daytona 675

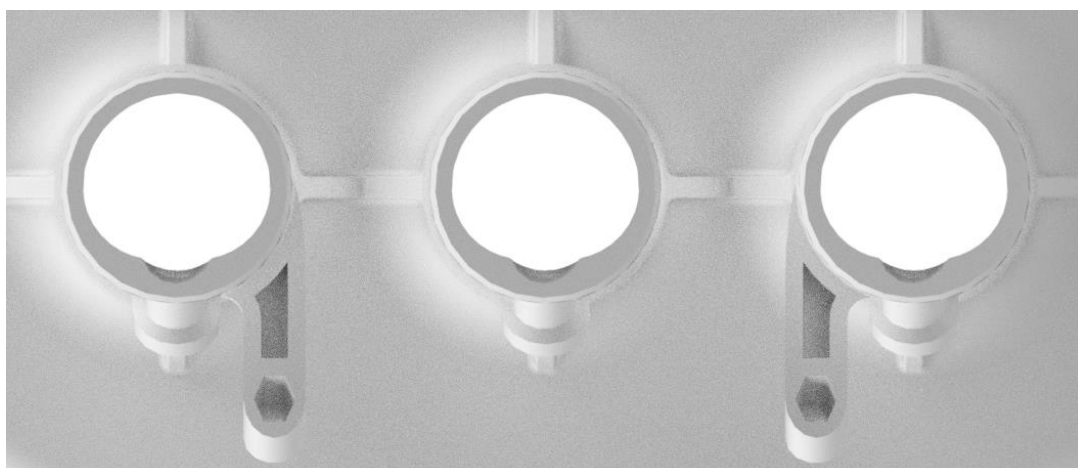


Obr. 28 – Spodní část sání, zakončení sběračů, sedla pro vstřikovače a držáky vstřikovací lišty byly převzaty z originálních škrťících klapek

Oměřen a následně vymodelován byl také sací kanál a jeho gumová příruba. Spodní část sběračů byla potom vymodelována tak, aby hrany sběrače přesně lícovaly s hranami příruby sacího kanálu. To je důležité proto, aby v místě přechodu sběrače do sacího kanálu nevznikaly přílišné turbulence a nedocházelo ke zpomalování proudění směsi do válce. Vymodelovaný tvar sběračů byl pro kontrolu porovnán nejen s modelem sacího kanálu, ale také s originálními škrťícími klapkami.



Obr. 29 – Skutečný sací kanál a jeho 3D model

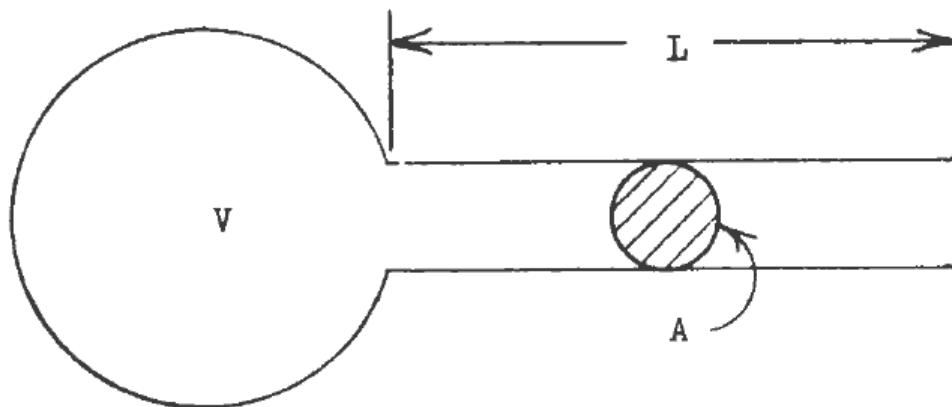


Obr. 30 – Spodní část, přechody do gumových přírub navrženy tak, aby byl přechod plynulý, v tomto pohledu je také vidět odlehčení držáků vstříkovací lišty a vybrání pro matici M6

7.4.1 Výpočet délky sběrače a Helmholtzův rezonátor

Jedním ze dvou nejdůležitějších parametrů sběrače je jeho délka. Sběrač využívá rezonancí, které vznikají v sání spalovacího motoru. Při správně navržené délce sběrače, mohou tyto rezonance docílit naplnění válce větším množstvím směsi, než je jeho objem – přeplňování. Tento fenomén se nazývá rezonanční plnění, případně rezonanční přeplňování (resonance supercharging / dynamic charging). [3]

Rezonanční plnění je popisováno pomocí tzv. Helmholtzova rezonátoru. Helmholtzův rezonátor je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 31 – Helmholtzův rezonátor [3]

Vzduch v trubici o délce L , můžeme považovat za kmitající masu a vzduch o objemu V v zásobníku za pružinu, která odráží tuto hmotu zpět do trubice.

Válec motoru, se sacím ventilem, sacím potrubím a airboxem je vlastně Helmholtzův rezonátor.

Při sacím cyklu motoru proudí vzduch velkou rychlostí (až 90 m/s) sacím kanálem do válce. Na konci sacího cyklu se zavře ventil a masa vzduchu narazí do talířku ventilu, od kterého se odrazí zpět. Vlna vzduchu poté putuje sacím kanálem a sběračem až do airboxu, což je zásobník vzduchu, který představuje pružinu a vzduchovou vlnu odráží zpět. Vlna potom putuje směrem k sacímu ventilu, který by se měl otevřít těsně před tím, než k němu vlna dorazí. Když se tak stane, vlna vletí až do válce a dojde k rezonančnímu plnění. [3]

Aby se vzduchová vlna dostala k ventilu ve správný okamžik, je nutné spočítat délku sacího potrubí pomocí následující rovnice. [3]

$$L = \frac{1348^2 * v_s^2 * A * (R - 1)}{N_p^2 * 2,1^2 * V_p * (R + 1)}$$

Rovnice 1 – Výpočet délky sběrače podle Engelmanna [3]

Kde:

L = Délka sacího potrubí (sací kanál + sběrač) [cm]

v_s = Rychlost zvuku [m/s]

A = Obsah průřezu sběrače [cm²]

R = Kompresní poměr motoru

N_p = Otáčky motoru [ot/min]

V_p = Objem válce [cm³]

Délka sacího potrubí (L)

Výsledkem výpočtu bude celková délka sacího potrubí, která se skládá jak z délky sběrače, tak z délky sacího kanálu. Délku sacího kanálu bude třeba odečíst od celkové délky, abychom dostali délku sběrače L_s . Délka sacího kanálu byla změřena na $L_k = 106 \text{ mm} = 10,6 \text{ cm}$.

$$L_s = L - L_k$$

Rovnice 2 – Výpočet délky sběrače z celkové délky sacího potrubí a délky sacího kanálu

Rychlost zvuku (v_s)

Rychlost zvuku za normálních podmínek je $v_s = 346 \text{ m/s}$.

Obsah průřezu sběrače (A)

Průměr sběrače vychází z průměru gumové příruby na sacím kanálu. Spodní část sběrače je přizpůsobena tvaru příruby, ta v další části přechází v kruhový průřez o průměru 42 mm. Pro urychlení proudu vzduchu bude mít sběrač kuželovitý tvar a úhel kuželu bude 3°. Na konci bude mít sběrač průměr přes 48 mm, proto pro výpočet obsahu průřezu sběrače bude použita hodnota $d = 45 \text{ mm} = 4,5 \text{ cm}$.

Obsah průřezu sběrače se vypočítá:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * 4,5^2}{4}$$

$$A = 15,904 \text{ cm}^2$$

Kompresní poměr motoru (R)

Motor týmu CULS Prague Formula Racing má oproti originálnímu motoru Triumph Daytona 675 zvýšený kompresní poměr. Docíleno toho bylo snížením hlavy válců. Hodnota kompresního poměru je $R = 13,5$.

Otáčky motoru (N_p)

Motor v monopostu CULS Prague Formula Racing je schopný pracovat od 1500 ot/min po 12500 ot/min. V závodním tempu se však motor neustále pohybuje v rozmezí od 9000 ot/min do 12000 ot/min. Pro výpočet délky sběračů bude použita střední hodnota mezi těmito hranicemi a to $N_p = 10500$ ot/min.

Objem válce (V_p)

Objem motoru Triumph Daytona 675 je $674,8 \text{ cm}^3$, motor je tříválcový. To znamená, že jeden válec má objem $V_p = 224,93 \text{ cm}^3$.

Po dosazení všech hodnot do Rovnice 1 vychází:

$$L = \frac{1348^2 * 346^2 * 15,904 * (13,5 - 1)}{10500^2 * 2,1^2 * 224,93 * (13,5 + 1)}$$

$$L \doteq 27,3 \text{ cm}$$

$$L_s = 27,3 - 10,6$$

$$L_s = 16,7 \text{ cm}$$

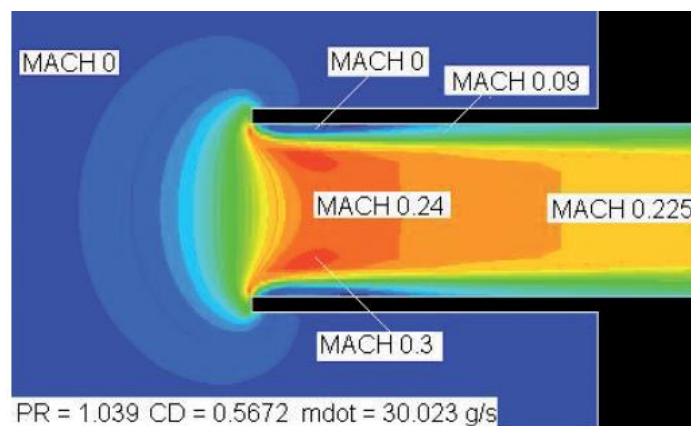
Délka sběrače bude navržena na hodnotu 16,7 cm.

7.4.2 Koncovky sběrače

Druhou nejdůležitější částí sběrače je jeho koncovka, které se přezdívá trumpetka. Použití správného tvaru koncovky, zvyšuje množství vzduchu, jenž je z airboxu přiváděno do sběrače a následně do válce. Pomocí počítačových simulací byly v minulosti již mnohokrát prokázány výhody tvarovaných koncovek sběrače, oproti prostému rovnému zakončení potrubí. [4]



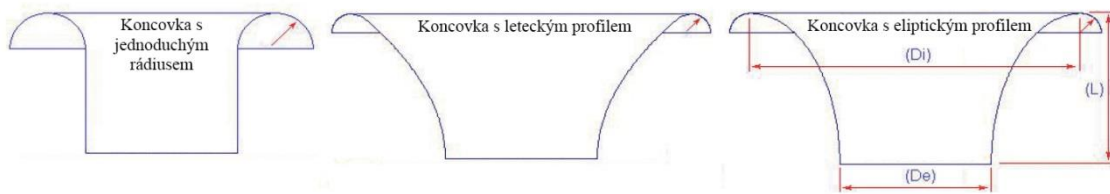
Obr. 32 – Sací potrubí s tvarovanými koncovkami, určeno pro Ford Mondeo ST220 3.0 V6 [33]



Obr. 33 – Počítačová simulace rychlosti proudění vzduchu v trubici s prostým rovným koncem [5]

Na obr. 33 je vidět simulace rychlosti proudění v trubici s prostým rovným koncem. Pozorujeme, že hned na začátku trubky získává vzduch velkou rychlost, která postupně klesá. Navíc proud rychlého vzduchu se s přibývajícím délkou trubice zužuje. To je zcela nevyhovující, protože při nasávání většího množství vzduchu se vstup stává restriktivním. Správný průběh rychlosti by měl být opačný, tedy rychlost by měla v potrubí postupně narůstat a proud vzduchu by se měl zužovat pouze málo. Z těchto důvodů se používají tvarované koncovky. [4] [5]

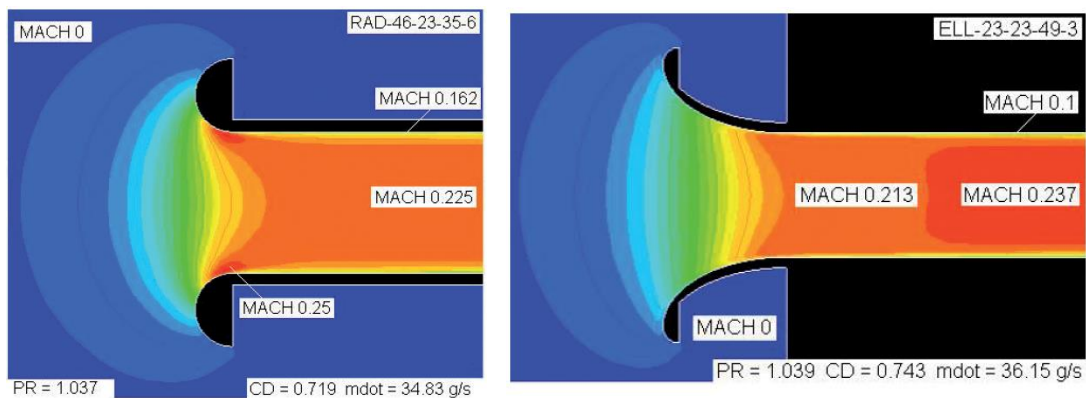
Existují tři základní typy koncovek. Koncovka s jednoduchým rádiusem, koncovka s leteckým profilem (aerofoil) a koncovka s eliptickým profilem. Byla testována široká škála možných tvarů těchto koncovek. Nejdůležitější poznatky z těchto zkoušek budou popsány níže a následně použity pro návrh koncovek pro sací systém Formule Student.



Obr.34 – Nákresy třech základních typů sacích koncovek [5]

Ve svých pokusech a simulacích Gordon P. Blair zjistil, že i přidání prostého rádiusu na konec trubice přináší velká zlepšení, jak v rychlosti proudění vzduchu v trubici, tak v naměřeném hmotnostním průtoku na konci trubice. Lepší výsledky byly zjištěny u koncovek s leteckým profilem a nejlepší pak u koncovek s eliptickým profilem.

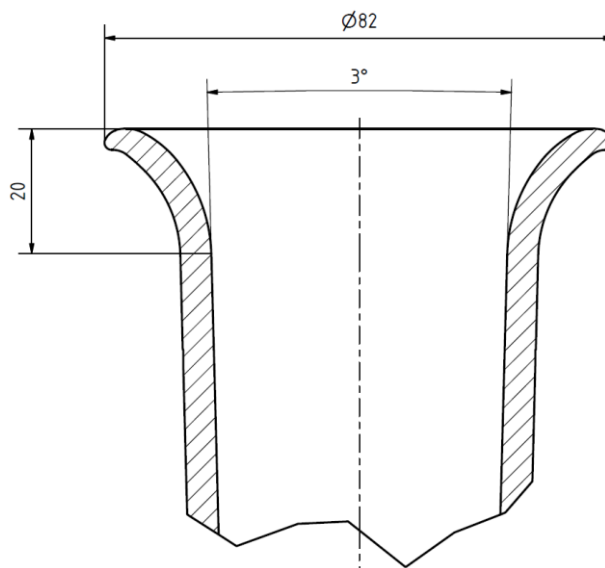
Dále byly porovnány koncovky s eliptickým profilem se třemi různými rádiusy na svých koncích. První byl poloviční rádius, jako je vidět na obr. 34, druhý byl kompletní rádius, který se dotýkal vnější hrany sací trubice a odstranil tak všechny ostré hrany na koncovce a třetí byla varianta s ostrým zakončením bez rádiusu. Toto porovnání ukázalo, že nejlepších výsledků dosahuje koncovka s kompletním rádiusem. Jeho použití však není bezpodmínečně nutné, protože výsledky všech tří typů koncovek byly velmi podobné.



Obr. 35 – Porovnání počítačové CFD simulace koncovky s prostým rádiusem a s eliptickým profilem, u obou koncovek je vidět výrazné zlepšení oproti trubici s rovným koncem. U koncovky s eliptickým profilem je nejlepší průběh rychlosti, která plynule narůstá. Proud rychlého vzduchu se u této koncovky také jen velmi málo zužuje, díky čemuž byl u koncovky s eliptickým profilem naměřen nejvyšší hmotnostní průtok. [5]

Z těchto poznatků vychází doporučený tvar sacích koncovek. Ty by měly mít eliptický profil, pokud možno s kompletním rádiusem. Měly by být nízké a mít co největší možný průměr.

Největší možný průměr je kvůli rozteči jednotlivých válců u motoru Triumph Daytona 675 omezen na 82 mm. Výška koncovky bude navržena co nejmenší, s ohledem na to, aby byl zachován optimální eliptický profil.

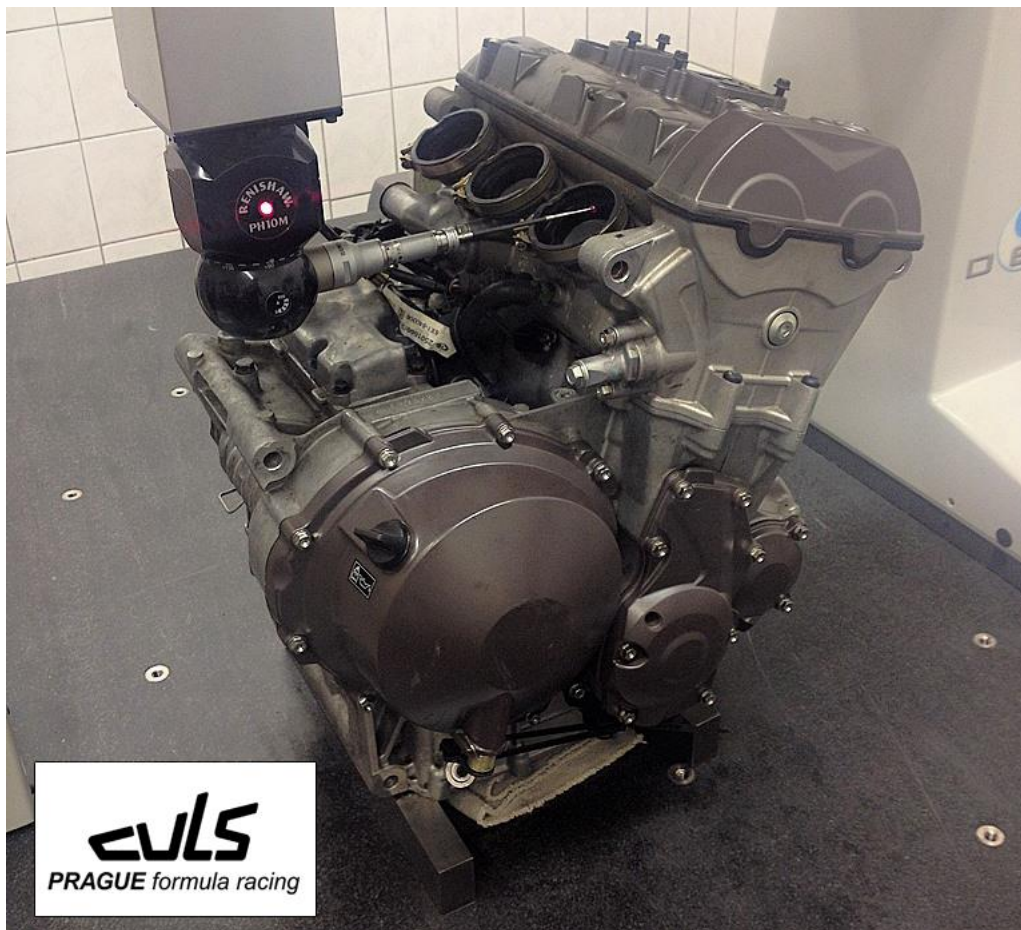


Obr. 36 – Navržený design koncovky se základními rozměry

V pozdější části práce bude provedena simulace koncovek, pro ověření správnosti jejich designu.

7.4.3. Rozteče sběračů a spodní díl sání

Rozteče sběračů musí být přesně stejné, jako rozteče gumových přírub na sacích kanálech motoru. Proto byl motor týmu CULS Racing oměřen na přesném 3D měřícím zařízení. Oměřeny byly také originální škrťací klapky. Rozteč sběračů byla měřením stanovena na 80,50 mm.



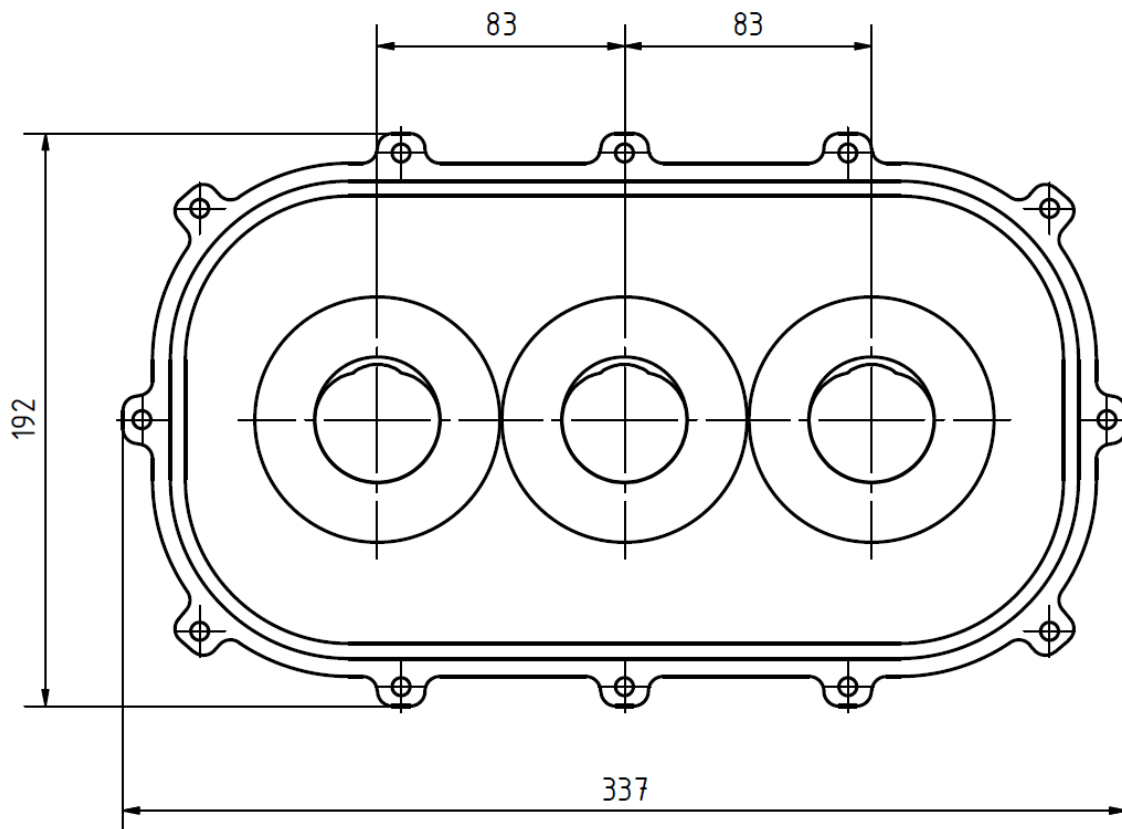
Obr. 37 – Měření rozteče gumových přírub na motoru Triumph Daytona 675

Po navržení délky a designu sběračů a po změření jejich rozteče bylo možné přejít k návrhu kompletního spodního dílu sání. Spodní díl obsahuje také spodní hranu airboxu s přírubou, ke které bude přišroubován vrchní díl sání, a díly tak společně vytvoří airbox. Spojovací příruba byla umístěna ještě pod koncovky sběračů, aby

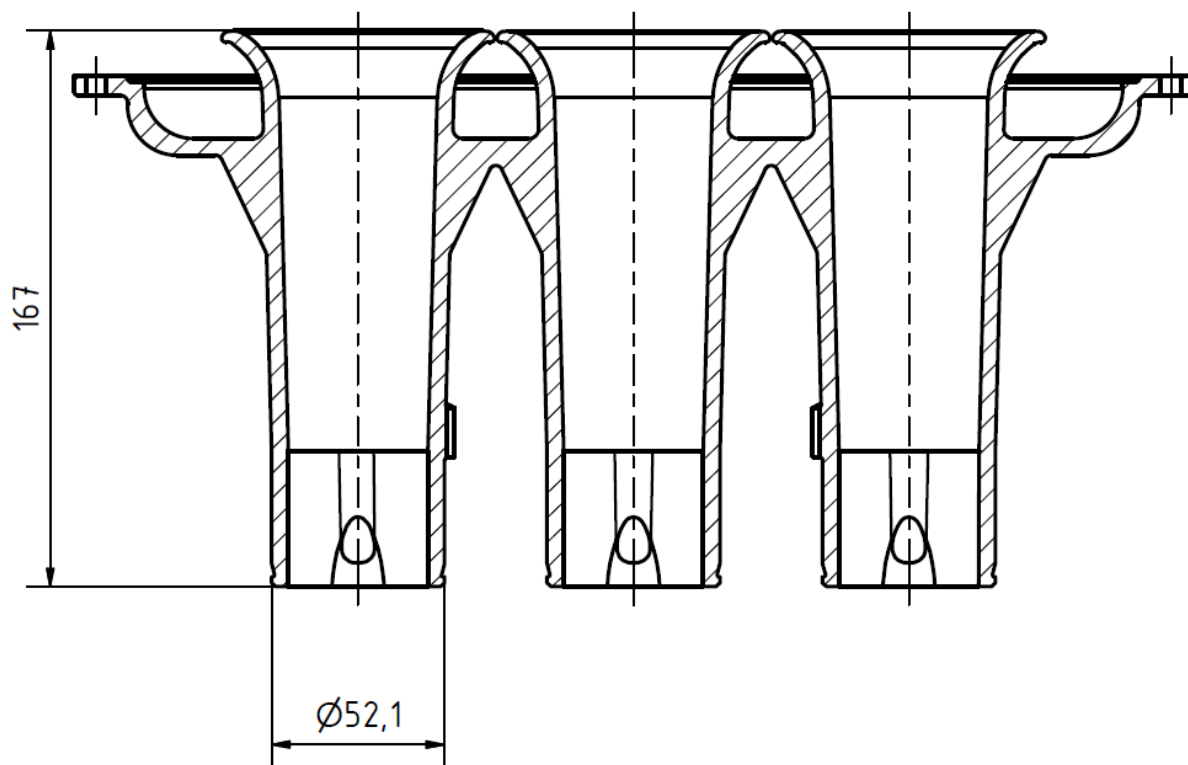
nerovnosti vzniklé na spoji dílů neměly nepříznivý vliv na proudění vzduchu v airboxu. V místě, kde sběrače přechází ve spodní vodorovnou plochu, byly umístěny vzpěry pro zlepšení tuhosti. Rozměry kompletního spodního dílu jsou (337 x 192 x 167) mm. Tyto rozměry jsou zvoleny tak, aby se celý díl jako jeden kus vešel do SLS 3D tiskárny.



Obr. 38 – Kompletní spodní díl sání



Obr. 39 – Spodní díl sání, pohled shora se základními rozměry



Obr. 40 – Spodní díl sání, pohled v bočním řezu se základními rozměry

7.5 Airbox

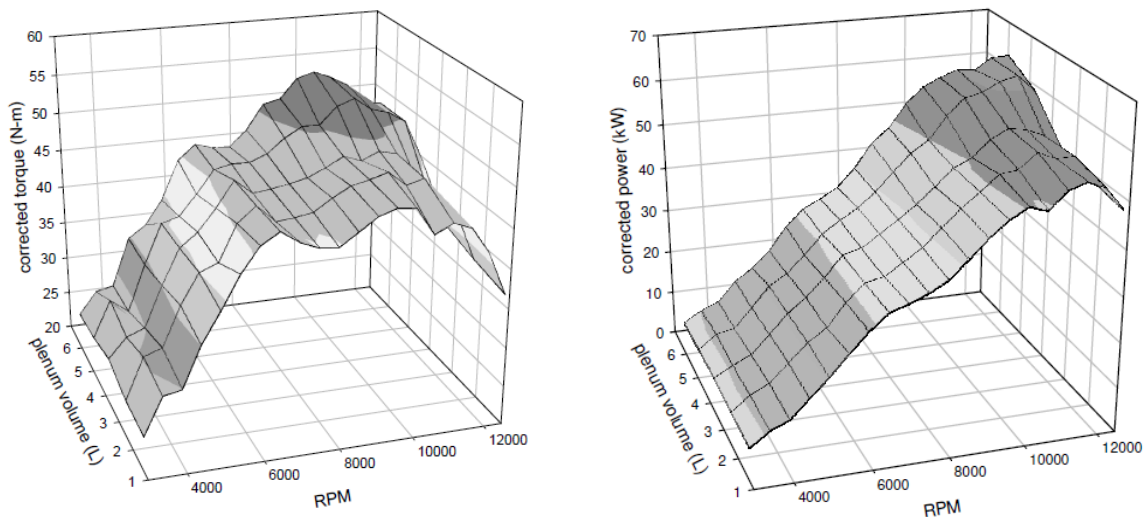
7.5.1 Objem airboxu

U motorů, které mají přístup vzduchu omezený restriktorem, nabývá Airbox velkého významu. Díky tomu existuje řada studií, které se zabývají vlivem objemu airboxu na výkon motoru. Většinou platí jednoduché pravidlo, že čím větší Airbox, tím vyšší výkon, protože motor musí být schopný se při náhlém zatížení volně „nadechnout“. [6] [7]

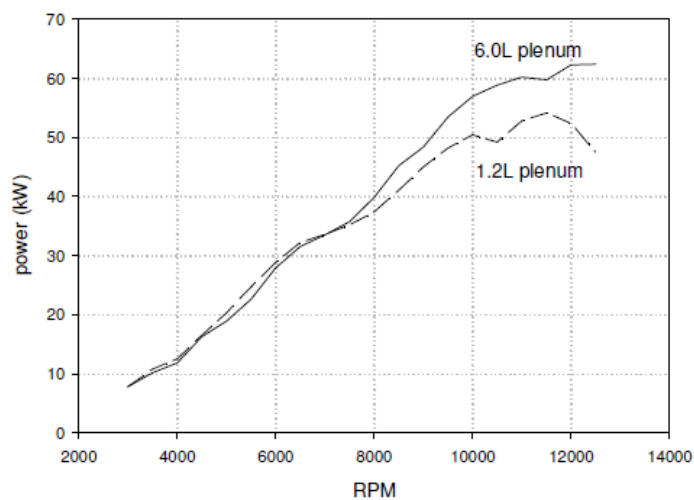
Efekt objemu airboxu byl testován i přímo na motoru určeném pro Formuli Student, na kterém byl použit 20 mm restriktor. Jednalo se o motor o objemu 599 cm³ z motocyklu Honda CBR600RR. Testování prováděl L. J. Hamilton a J. E. Lee.

Hamilton prováděl pokusy na airboxech od objemu 1,2 l až 6 l, čili dvojnásobku až desetinásobku objemu zkoumaného motoru. Pro každou velikost airboxu byl upraven software v řídicí jednotce tak, aby motor dosahoval maximálního výkonu. Výkon byl měřen pomocí dynamometru.

Bylo zjištěno že v nízkých otáčkách dosahuje lepších výsledků malý airbox. Rozdíly mezi malými a velkými airboxy však nebyly nijak markantní. Naproti tomu, od 7000 otáček za minutu výše, začaly být vidět výhody větších airboxů. Jak výkon, tak točivý moment dosahovaly u velkých airboxů lepších hodnot. Nejvyšší nárůsty výkonových parametrů byly naměřeny u airboxů, které měly osminásobek až desetinásobek objemu motoru. Výsledky měření jsou patrné na následujících grafech. [7]



Obr. 41 – 3D grafy točivého momentu a výkonu v závislosti na otáčkách motoru, v grafech je vidět, jakých výsledků dosáhly různé objemy airboxů (osa plenum volume) [7]



Obr. 42 – Porovnání naměřených výkonů u airboxů s nejmenším a největším objemem [7]

Při použití airboxu, který by měl objem větší, než desetinásobek objemu motoru by již mohlo docházet ke zhoršené reakci na plyn, což by bylo nežádoucí. Proto bude objem navrhovaného airboxu zvolen co největší, ne však větší než desetinásobek objemu motoru, což je 6,75 l. Nakonec se i přes prostorová omezení podařilo navrhnout airbox o objemu 6,21 l, tedy 9,2 násobek objemu motoru Triumph Daytona 675.

7.5.2 Připojení škrťící klapky, difuzor a tvar airboxu

Jak bylo napsáno v dřívějších kapitolách, bude použit airbox s centrálním vstupem vzduchu. Na vstupu do airboxu bude příruba, na kterou bude přišroubována škrťící klapka AT Power. Příruba je zpevněna žebry. Klapka bude utěsněna o-kroužkem na plochu příruby. Vnitřní tvar vstupu airboxu bude přesně navazovat na tvar vnitřku škrťící klapky, čímž bude vytvořen dlouhý, pomalu se rozšiřující difuzor. Vstup do airboxu musí být orientován tak, aby se škrťící klapka nacházela mezi horní trubkou rámu a opěrkou hlavy monopostu. Tím je omezena i celková délka difuzoru.

Difuzor dále pozvolna přechází ve velkou komoru, která tvoří hlavní část airboxu. V této části dojde k uklidnění proudu vzduchu a vznikne vzduchová masa, která je důležitá pro správnou funkci rezonanční plnění.

Do boční stěny airboxu byl umístěn senzor tlaku v sání IAP.

7.5.3 Sekundární vstřikování paliva

V navrženém sacím systému bude použito tzv. sekundární vstřikování paliva. Jedná se o použití druhé sady vstřikovačů, která se nachází v airboxu a je namířena přímo do koncovek sběračů. Toto řešení se používá u vysoko výkonových motorů pro lepší rozprášení paliva a dosažení lepší homogenity směsi ve vysokých otáčkách. Při normálním chodu motoru je palivo přiváděno spodními vstřikovači, při překročení cca 8000 otáček za minutu se dávka paliva dodávaná spodními vstřikovači začíná snižovat a nastupují horní vstřikovače. Při vysokých otáčkách potom palivo přivádějí pouze horní vstřikovače a spodní vstřikovače jsou vypnuté.

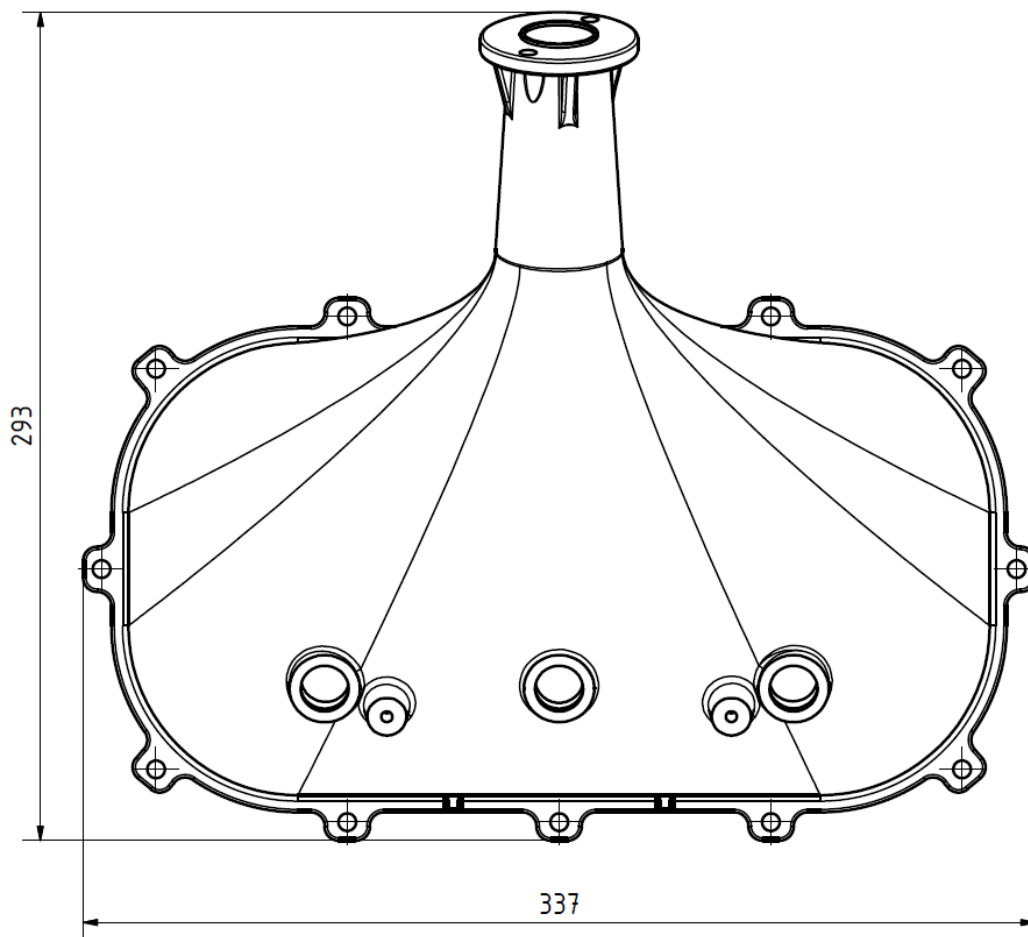
Protože sekundární vstřikovače jsou v relativně velké vzdálenosti od koncovek sběračů, musí být použity vstřikovače, které rozstříkují palivo na úzký kužel. Vybrané vstřikovače byly vyzkoušeny na testovací stoličce a tvar jejich sprejového kužele byl uznán za vhodný.

Pozice vstřikovačů je z části daná tvarem airboxu, podrobněji bude probrána v kapitole o simulacích. Vrchní díl sání má rozměry stanovené s ohledem na to, aby se do SLS 3D tiskárny vešel jako jeden kus.

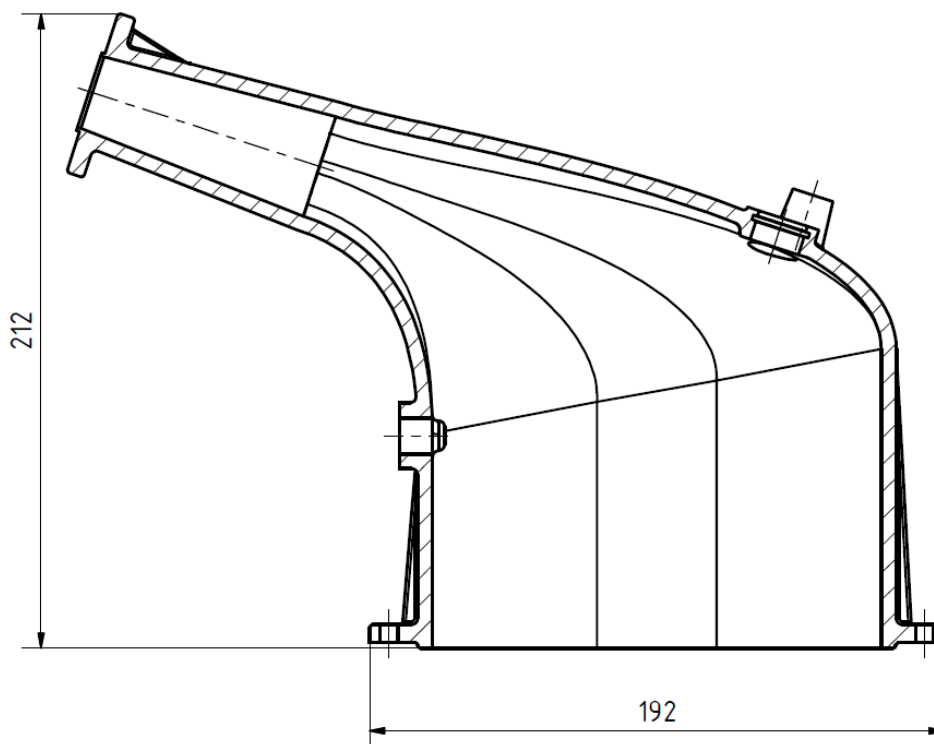
Výsledný design vrchního dílu sání je vidět na obrázku níže.



Obr. 43 – Vrchní díl sání, pohled zepředu, je vidět příruba škrtkící klapky a držák senzoru tlaku v sání IAP a držáky vstřikovačů



Obr. 44 – Vrchní díl sání, pohled shora se základními rozměry



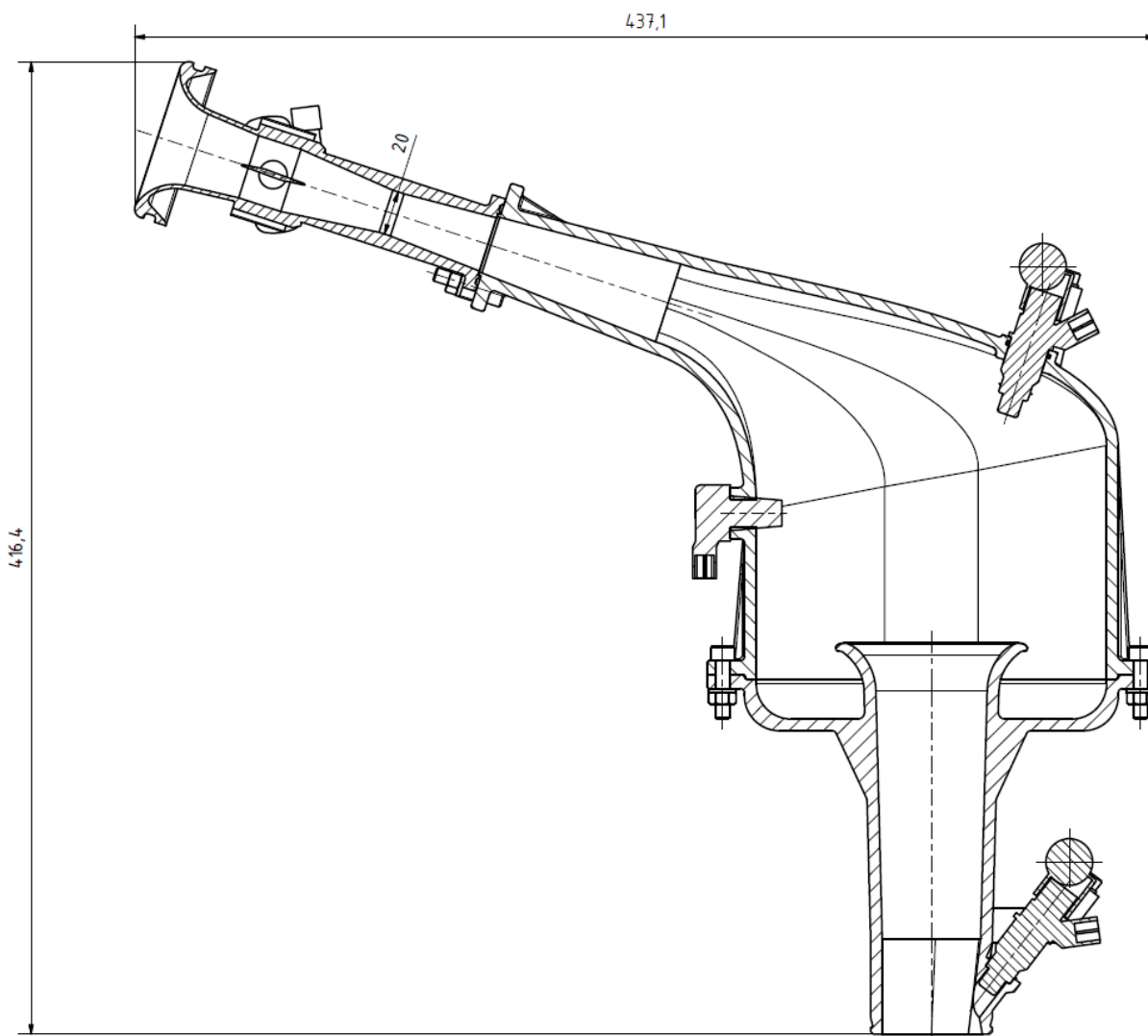
Obr. 45 – Vrchní díl sání, pohled v bočním řezu se základními rozměry

7.6 Kompletní model sacího systému

Po návržení součástí sání byl sestaven 3D model celého sacího systému, který byl poté použit pro simulace a ověření správnosti designu.



Obr. 46 – Vizualizace kompletního sacího systému, na obrázku jsou vidět obě sady vstřikovačů a škrťací klapka



Obr. 47 – Kompletní sací systém, pohled v bočním řezu, na tomto řezu je dobře vidět difuzor tvořený plynulým přechodem škrťací klapky do vrchního dílu sání

8. Simulace

Pro ověření správnosti designu sacího systému budou použity simulace. K simulování bude použit program Ansys CFX R19.2 Academic. Bude provedeno několik simulací rychlosti a proudění vzduchu v celém sacím systému. Sání bude simulováno na otáčky 10500 ot/min, pro které byly počítány i délky sběračů. Nejprve je však potřeba stanovit vstupní podmínky simulací.

8.1 Vstupní podmínky

Jako vstupní podmínky pro simulaci sání se nejčastěji používají tlaky. Na vstup do sání – hrdlo škrťací klapky – se nastaví atmosférický tlak a na konec každého ze sběračů se nastaví podtlak (absolutní tlak), který motor vytváří při každém sacím cyklu v sacích kanálech. Tyto podtlaky musí samozřejmě mít správně nastavený časový průběh, aby odpovídaly otáčkám klikového hřídele a cyklům jednotlivých válců.

Existuje více softwarů pro zjištění podtlaků v sacích kanálech, v tomto případě byl použit software GT-Power.

8.1.1 Simulace podtlaků v programu GT-Power

GT-Power je 1D výpočetní software, který po zadání údajů o motoru dokáže vypočítat nesčetné množství parametrů motoru. Výpočet podtlaku v sacím kanále je jedním ze základních počítaných parametrů, a i pro dosažení relativně přesných výsledků vyžaduje pouze základní údaje o motoru. [8]

Těmito údaji jsou:

Počet válců: 3

Vrtání válce: 74 mm

Zdvih válce: 52,3 mm

Počet sacích ventilů na válec: 2

Průměr talířku sacího ventilu: 30,5 mm

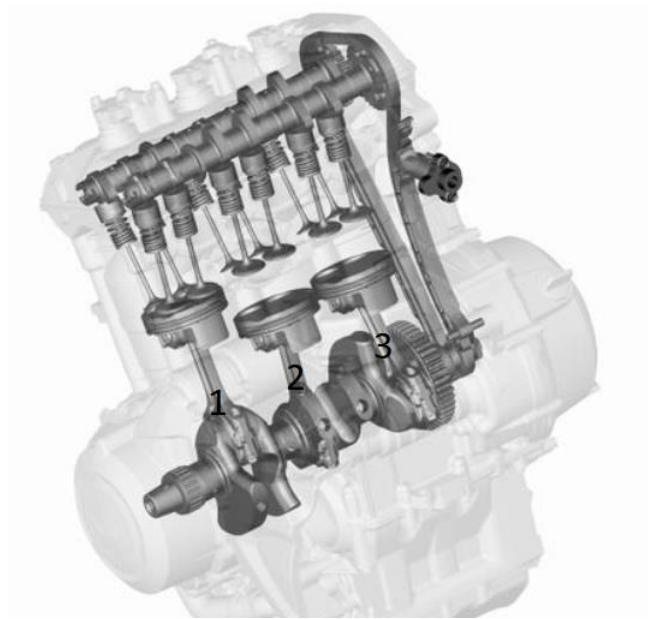
Zdvih sacího ventilu: 9,25 mm

Počet výfukových ventilů na válec: 2

Průměr talířku výfukového ventilu: 25,5 mm

Zdvih výfukového ventilu: 8,5 mm

Pořadí zapalování: 1-2-3 po 240° natočení klikového hřídele (válců se počítají zleva doprava, válec č.3 je na straně rozvodového řetězu)



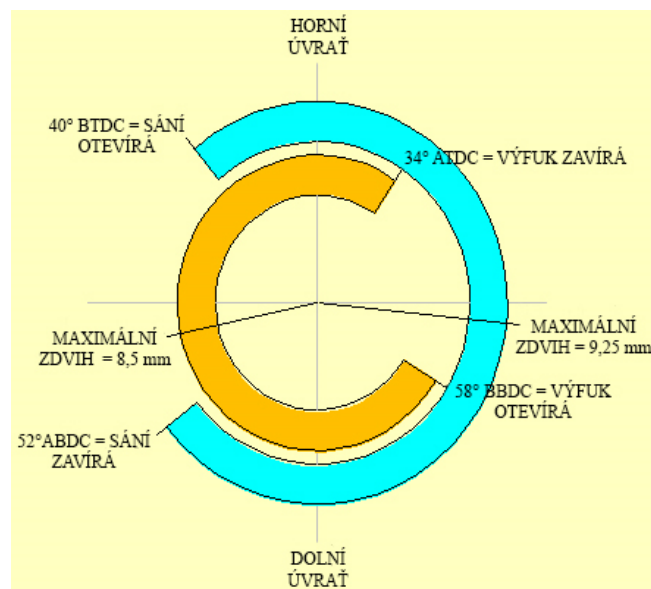
Obr. 48 – Číslování válců motoru Triumph Daytona 675 [34]

Otevření sacího ventilu: 40° před horní úvratí

Zavření sacího ventilu: 52° za dolní úvratí

Otevření výfukového ventilu: 58° před dolní úvratí

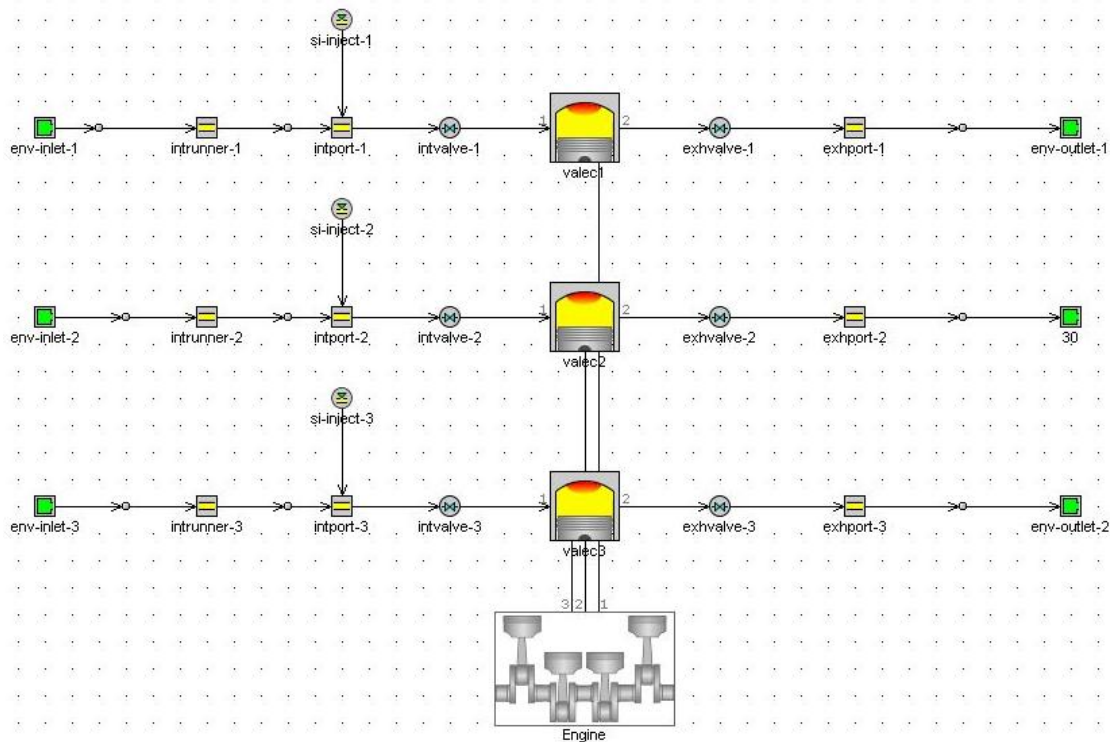
Zavření výfukového ventilu: 34° za horní úvratí



Obr. 49 – Graf časování ventilů motoru Triumph Daytona 675

Údaje o motoru: [9]

Údaje o motoru jsou zadány do 1D modelu, který musí být v programu GT-Power vytvořen.



Obr. 50 – Zjednodušený 1D model motoru Triumph Daytona 675 v programu GT-Power

Po vytvoření modelu motoru a zadání potřebných hodnot, program spočítá námi požadované tlaky v sacích kanálech pro všechny polohy klikového hřídele, tedy pro natočení klikového hřídele o $1^\circ - 360^\circ$. Podtlaky jsou vypočítány pro všechny válce zvlášť a výsledky je možné snadno exportovat do programu Microsoft Excel. Poté je úhel natočení klikového hřídele potřeba převést na čas, aby byla data použitelná pro program Ansys R19.2 Academic. To lze provést jednoduchým přepočítáním:

Čas natočení klikového hřídele o 1° (t_1)

Otáčky motoru $n_{min} = 10500$ ot/min se vydělí šedesáti, výsledkem jsou otáčky za sekundu. Podílem čísla 1 a těchto otáček, vyjde čas jedné otáčky klikového hřídele t_n . Čas t_n po vydělení 360 dá čas t_1 , za který se klikový křídél potočí o 1° .

$$t_n = \frac{1}{n_{min} \div 60}$$

$$t_1 = \frac{t_n}{360}$$

$$t_1 = 0,00001587302 \text{ s}$$

Násobky času t_1 poté nahradí hodnoty natočení klikového hřídele v dokumentu Excel. Dokument se použije jako vstupní data pro software Ansys R19.2 Academic.

	A	B
1	Čas t1 (s)	Tlak v sacím kanálu (bar)
2	0,00001587302	0,764
3	0,00003174604	0,776
4	0,00004761906	0,788
5	0,00006349208	0,8
6	0,00007936510	0,812
7	0,00009523812	0,824
8	0,00011111114	0,836
9	0,00012698416	0,848

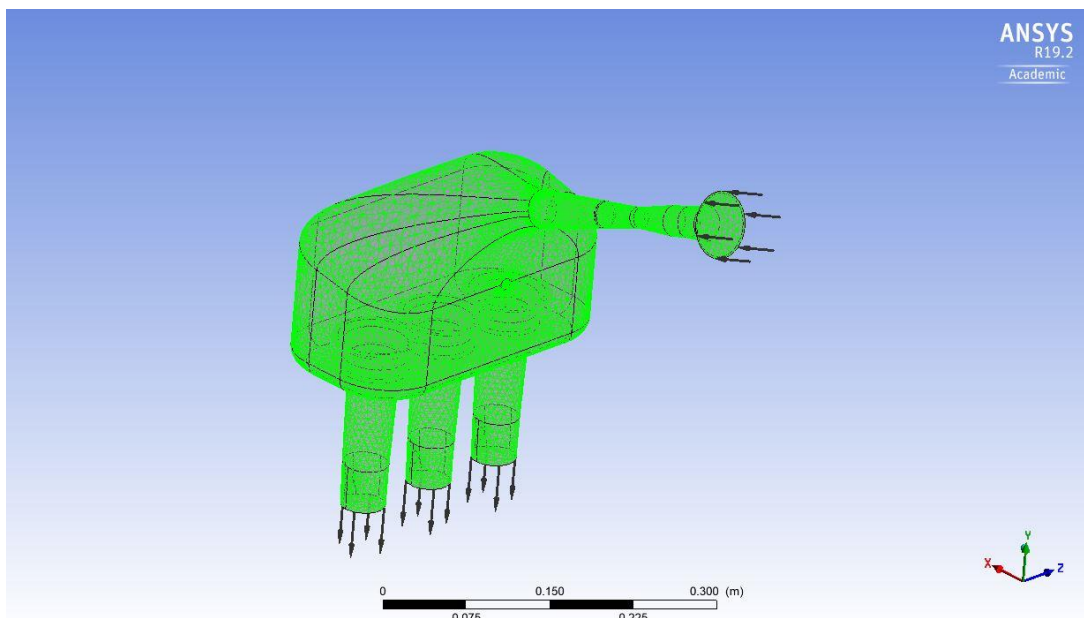
Obr. 51 – Ukázka dokumentu se vstupními parametry pro program Ansys R19.2 Academic

8.2 Simulace proudění a jeho rychlosti v programu Ansys R19.2 Academic

V programu Ansys R19.2 Academic bude použit modul Fluid Flow (CFX), do tohoto modu je nutné vložit předem připravený 3D model vnitřního objemu sání. Ten byl zhotoven jako negativní díl v programu Autodesk Inventor 2017. Po vložení tohoto 3D modelu je potřeba definovat vstupní a výstupní parametry simulace, tedy:

Vstupní tlak = 1 bar

Výstupní tlaky válců 1 – 3 = výsledky 1D simulace z programu GT-Power

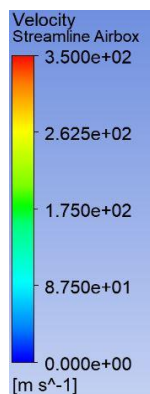


Obr. 52 – Model vnitřního objemu sání s definovanými vstupy a výstupy v programu Ansys R19.2 Academic

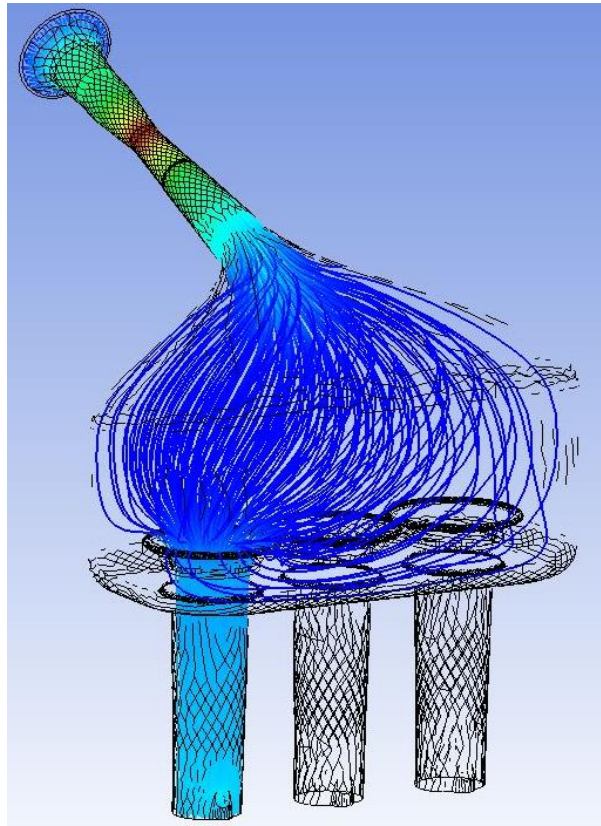
Po zadání těchto parametrů je možné spustit výpočet. Výpočet trval softwaru cca 32 hodin a 16 minut. Po dokončení výpočtu je možné již přejít k vyhodnocení výsledků.

8.2.1 Výsledky simulace proudění

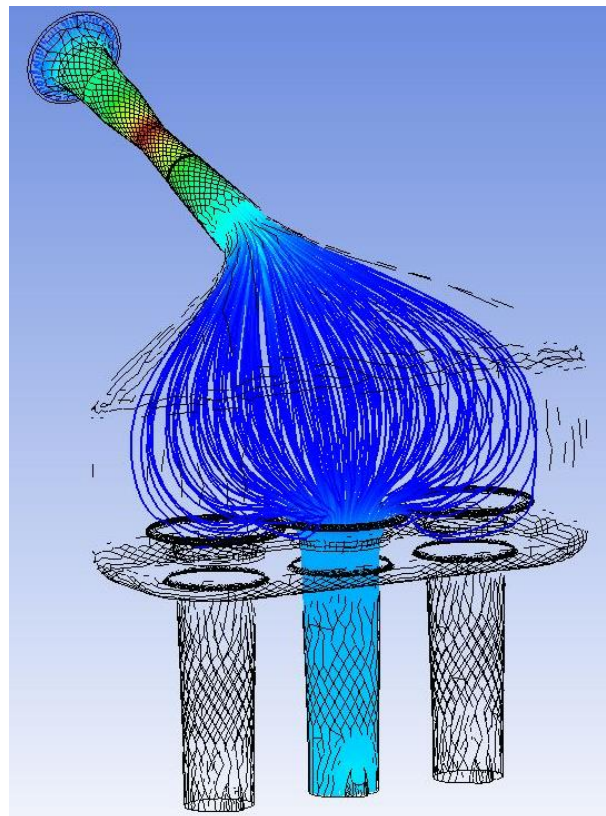
Na obrázcích níže jsou znázorněny prostorové simulace proudění vzduchu pro všechny tři válce. Je vidět, že vzduch z restriktoru vstupuje do airboxu velkou rychlostí, ta ovšem po vstupu do airboxu klesá na minimum a vzduch je rovnoměrně nasáván jednotlivými sběrači. Ani u jednoho sběrače nejsou viditelné problémy v podobě nerovnoměrného sání nebo nadměrného víření vzduchu.



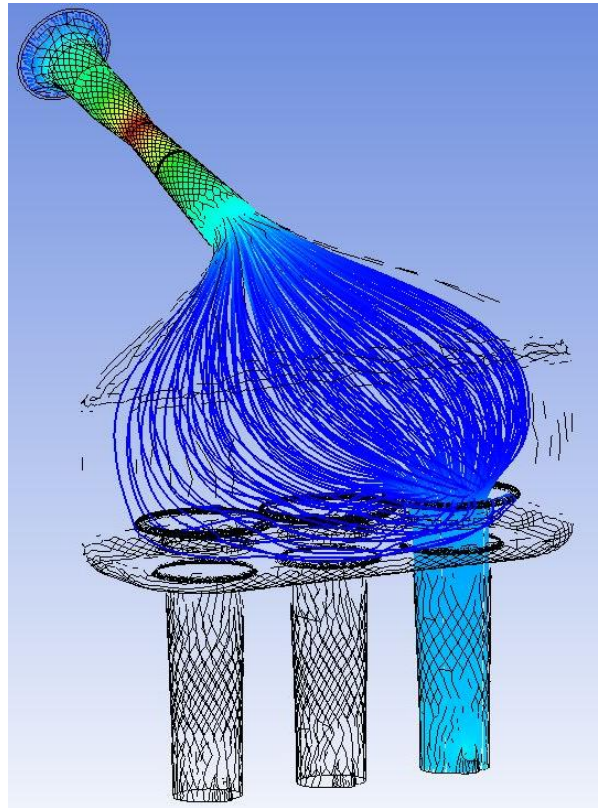
Obr. 53 – Měřítko rychlosti použité v simulacích proudění v airboxu



Obr. 54 – Simulace proudění vzduchu do sběrače prvního válce

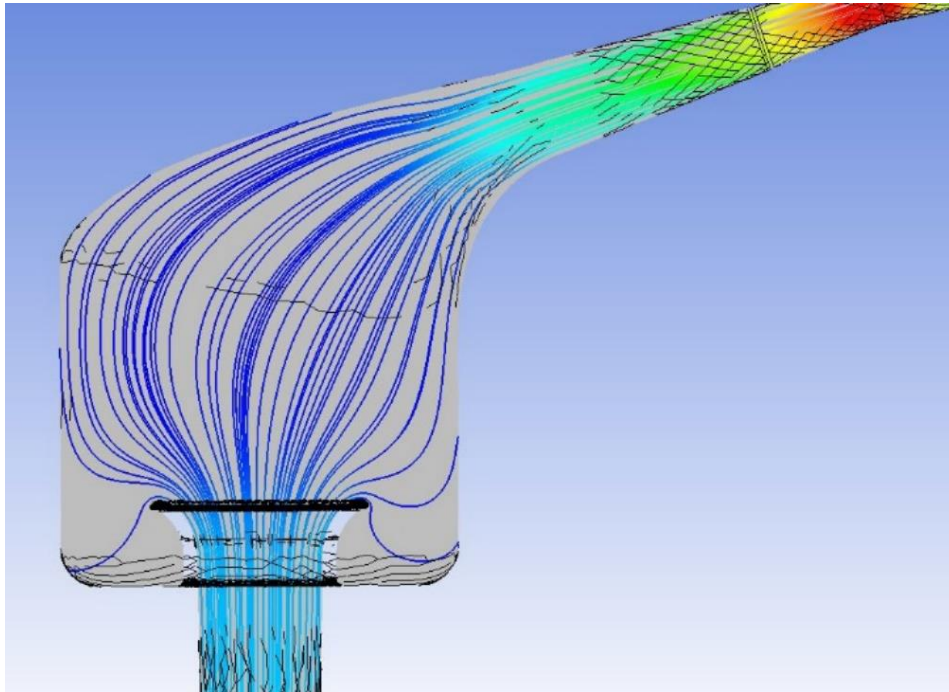


Obr. 55 – Simulace proudění vzduchu do sběrače druhého válce

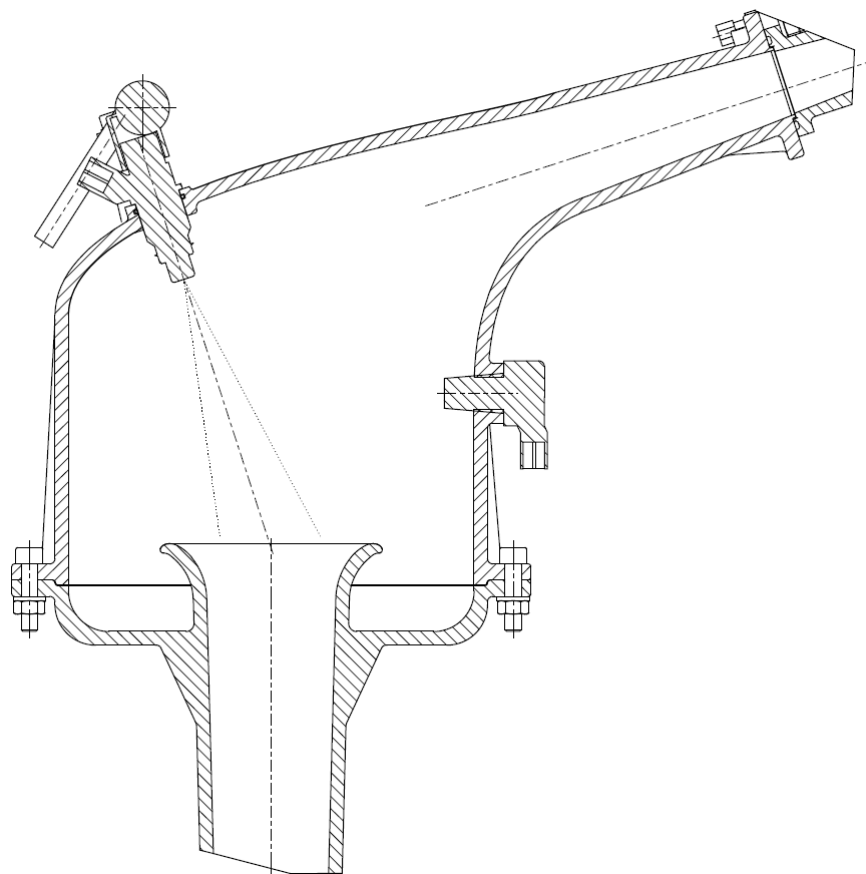


Obr. 56 – Simulace proudění vzduchu do sběrače třetího válce

Umístění sekundárních vstřikovačů: Simulace proudění byla dále použita pro umístění sekundárních vstřikovačů. V bočním pohledu na proudění je vidět, že vzduch v horní části airboxu se pohybuje rovnoběžně se stěnou, podél stěny pokračuje dolů a teprve potom se stáčí směrem do koncovky sběrače. I přesto, že rychlost proudění je v tomto místě velmi nízká, nebylo by optimální do tohoto místa vstřikovat palivo, protože by mohl být narušen kužel vytvořený vstřikovačem a palivo částečně odnášeno mimo sběrač. Proto bylo rozhodnuto, že vstřikovače budou zapuštěny více dovnitř do airboxu. Na proudění vzduchu restriktorem to nebude mít vliv, protože vzduch v airboxu se pohybuje pomalu a vstřikovač tak nebude představovat významnou aerodynamickou překážku.

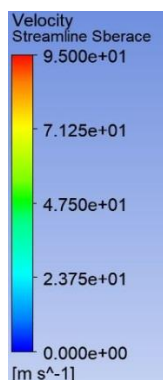


Obr. 57 – Simulace proudění v airboxu, boční řez

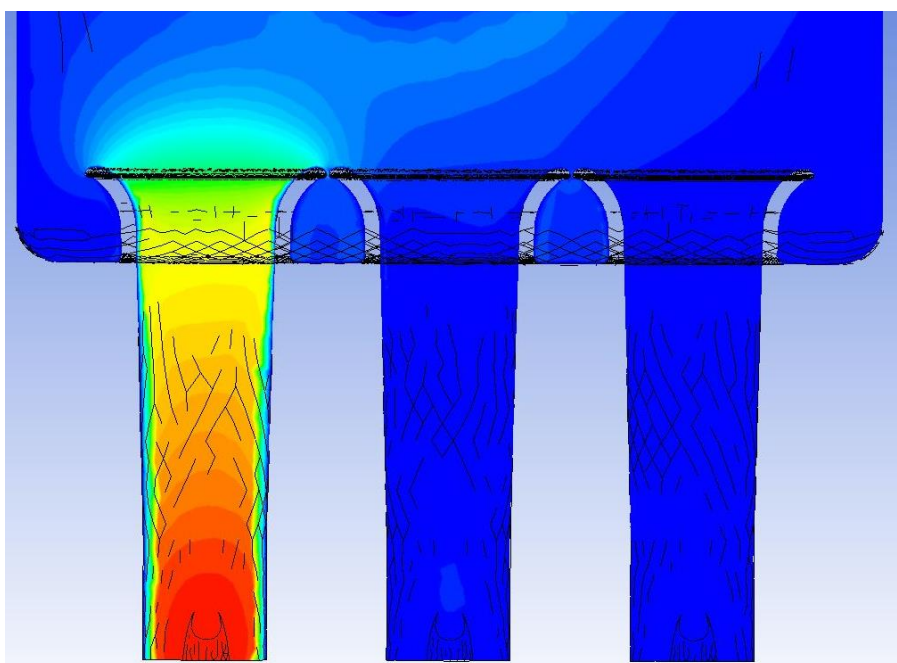


Obr. 58 – Umístění sekundární sady vstřikovačů s naznačeným kuželem vstřikovaného paliva

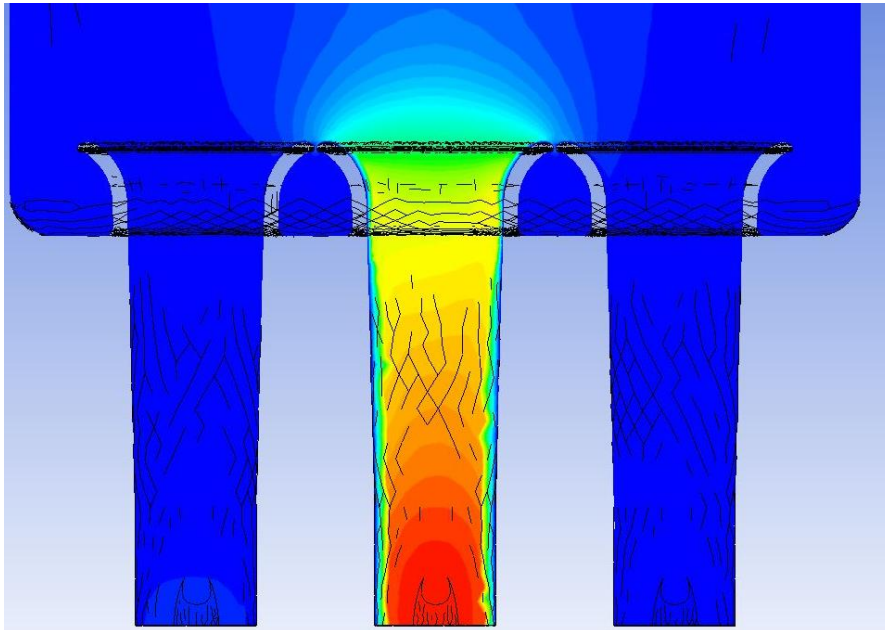
Další provedenou simulací byla simulace rychlosti proudění ve sběračích. U všech třech sběračů je vidět postupné rovnoměrné urychlování proudění vzduchu až na hodnotu cca 90 m/s.



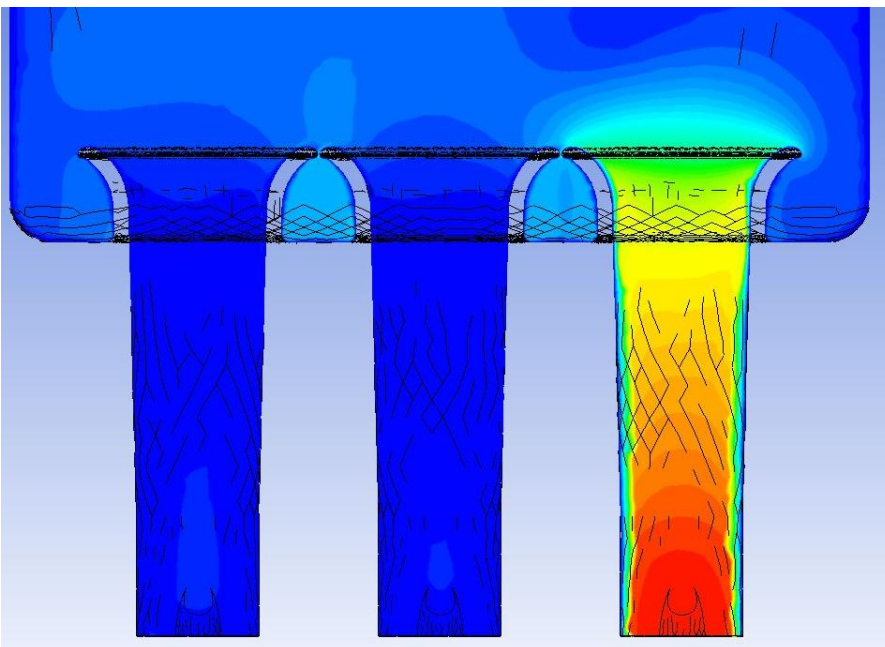
Obr. 59 – Měřitko rychlosti proudění použité v simulaci rychlosti vzduchu ve sběračích



Obr. 60 – Proudění ve sběrači prvního válce



Obr. 61 – Proudění ve sběrači druhého válce



Obr. 62 – Proudění ve sběrači třetího válce

9. Komentář k výsledkům práce

Jako technologie výroby byl zvolen 3D tisk metodou SLS, zkušební díl vyrobený touto metodou následně úspěšně prošel tlakovou zkouškou.

Simulacemi se potvrdila správnost tvaru airboxu – všechny válce dobře plněny. Simulace rovněž prokázaly správnou funkci koncovek sběračů – koncovky nasávají vzduch z airboxu, vzduch je ve sběračích postupně urychlován.

Kvůli prostorovému řešení monopostu se u návrhu airboxu nepodařilo dosáhnout objemu 10x většího, než je objem motoru. Objem airboxu je nakonec 6,21 l neboli 9,2x objem motoru, což je dostatečné (ideální objem airboxu = 8x - 10x obj. motoru).

Všechny ostatní navržené parametry byly díky zvolené technologii výroby dodrženy bez kompromisů.

10. Diskuse k výsledkům

Po dokončení návrhu sání a zaslání poptávky na jeho výrobu 3D tiskem, se ukázalo, že cena je podstatně vyšší, než bylo očekáváno. Po dlouhých pokusech najít nějaké řešení, se nakonec podařilo sání vyrobít díky sponzorské podpoře.

Hotový výrobek vypadal velmi pěkně, kvalita povrchu přesně podle očekávání.



Obr. 63 – Horní díl sání vytisknutý technologií SLS

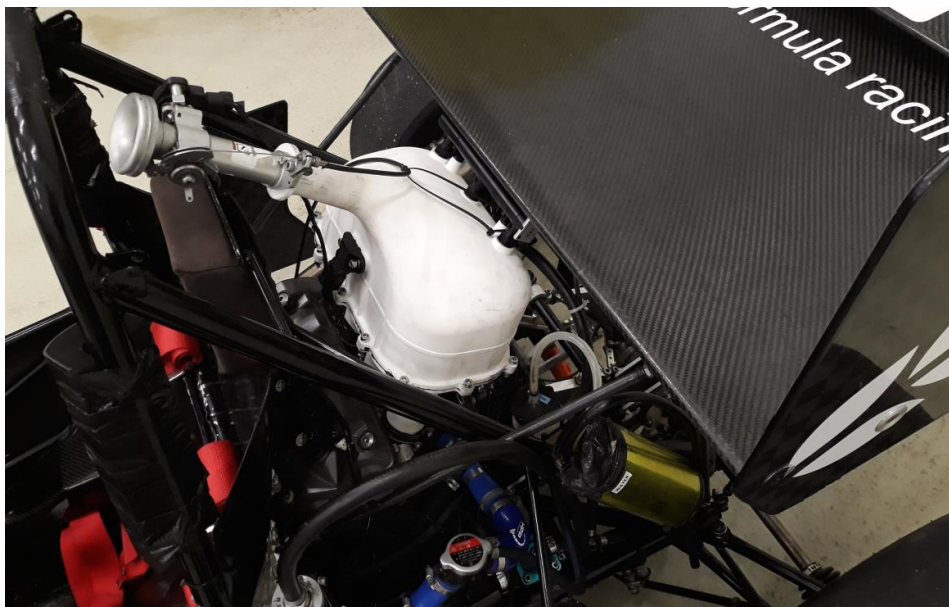


Obr. 64 – Spodní díl sání vytisknutý technologií SLS

Do vytisknutých dílů byly následně zhotoveny potřebné závity pro uchycení horních vstřikovačů a senzoru tlaku v sání IAP a celé sání bylo smontováno tak, jak bylo navrženo v diplomové práci. Poté bylo na monopostu Formule Student týmu CULS vyrobeno palivové vedení a elektroinstalace pro sekundární vstřikovače a systém sání vzduchu byl nainstalován. Všechny rozměry seděly dobře a sání vyšlo přesně tak, jak bylo naprojektováno ve 3D modelu.



Obr. 65 – Zkompletovaný systém sání před montáží na monopost Formule Student



Obr. 66 - Systém sání vzduchu na monopostu Formule Student týmu CULS



Obr. 67 – Přední pohled na kompletní monopost – škrtková klapka je vidět nad hlavou řidiče, pod vrchní trubkou rámu

Při zkušebním startu monopostu měl motor v porovnání s předchozím sacím systémem vysoký volnoběh a lambda sonda ukazovala lehce chudou směs. To je dáno tím, že díky velkému objemu airboxu se do motoru dostává více vzduchu, ale stále stejné množství paliva, protože palivová mapa v řídicí jednotce zatím nebyla upravena. Toto značí, že motor lépe „dýchá“ a měl by dosáhnout vyššího výkonu. Motor bude brzy odlazen ve specializované firmě na certifikované válcové zkušebně.

Při vytáčení motoru stěny airboxu lehce pulzovaly, pulzy však nebyly výraznější než u minulých monopostů s jinými tvary airboxů. Poškození sacího systému podtlakem nehrozí.

Nevýhodou tohoto sacího systému je poměrně vysoká hmotnost, která překračuje 2,5 kg. Pokud se tento design sání osvědčí v praxi na závodech, jistě by stálo za zvážení vyrobit jej znovu, ale za použití karbonových vláken, což by mohlo snížit hmotnost na úroveň 1 kg.

11. Závěr

V práci byl navržen prototyp systému sání vzduchu, podle parametrů stanovených pravidly soutěže Formule Student. Před samotným návrhem byla vybrána nejvhodnější technologie výroby a její vhodnost byla ověřena měřeními na zkušebním modelu. Dílčí parametry sacího systému byly vypočítány či zvoleny na základě známých faktů. Ověření celého designu proběhlo pomocí simulací proudění. Poté byl vyroben prototyp, který byl nainstalován na monopost Formule Student týmu CULS Prague Formula Racing z roku 2018. Tím byla ověřena jeho funkčnost. V následujících měsících bude sání přemontováno na nový monopost pro rok 2019, který je v současné době vyvíjen.

12. Seznam použitých zdrojů

- [1] FERENC, Bohumil. *Spalovací motory, karburátory a vstřikování paliva*. 1. 2004. ISBN 80-251-0207-6.
- [2] FORMULA SAE, Sae International. *Rules 2019*. Version 1.0. 2018.
- [3] ENGELMAN, H. W. *Design of tuned intake manifold*. ASME, 1974.
- [4] BLAIR, Gordon P. *Design and simulation of four stroke engines*.
- [5] BLAIR, Gordon P. a W. Melwin CAHOON. *Best Bell*.
- [6] FEHAN, Douglas R. *Design of racing and high performance engines*.
- [7] HAMILTON, L. J. a J. E. LEE. *The effects of Intake Plenum Volume on the Performance of a Small Normally Aspirated Restricted Engine*. SAE International, 2009.
- [8] GT-SUITE. *Engine Performance tutorials*. Gamma technologies, 2016.
- [9] TRIUMPH. *Service Manual - Daytona 675, Street Triple, Street Triple R*. Triumph, 2009.
- [10] *Facebook Formula Student Czech Republic* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.facebook.com/FormulaStudentCzechRepublic/>
- [11] *Carburetor* [online]. Dostupné z: <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/File:Carburetor.svg>
- [12] *Injector of the car: How the principal of work is arranged. How the injector works* [online]. Dostupné z: <https://instrument.ru/en/injector-of-the-car-how-the-principle-of-work-is-arranged-how-the-injector-works.html>
- [13] *Skoda technologie w silnikach* [online]. Dostupné z: <https://moto.money.pl/flota/galerie/skoda-technologie-w-silnikach-g715553.html>
- [14] Dalhousie FSAE. *Intake arrived!* [online]. Dostupné z: <https://blogs.dal.ca/formulaSAE/2014/02/28/intake-arrived/>
- [15] HOMOLA, Jan. *Fused Deposit Modeling. 3D-tisk.cz* [online]. 18.9.2013. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>

- [16] Prusa Research. [online]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/>
- [17] Přehled dostupných materiálů. *NA3D.cz* [online]. Dostupné z: <https://www.na3d.cz/blog/prehled-dostupnych-materialu>
- [18] ULTEM 9085 resin. *Stratasys* [online]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/ultem9085>
- [19] ULTEM 1010 resin. *Stratasys* [online]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/ultem1010>
- [20] FDM Quality Guidelines. *3D Hubs* [online]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/hub-academy/fdm-quality-guidelines>
- [21] HOMOLA, Jan. Selective Laser Sintering. *3D-tisk.cz* [online]. 30.4.2013. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [22] *Laser sintering, melting and others: SLS, SLM, DMLS, DMP, EBM, SHS* [online]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/laser-sintering-melting-sls-slm-dmls-dmp-ebm-shs>
- [23] *3D Printing* [online]. Dostupné z: <https://revpart.com/services/3d-printing/>
- [24] FDM vs SLA vs SLS: How to choose the right 3D printing technology. *Formlabs* [online]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-vs-sls-how-to-choose-the-right-3d-printing-technology/>
- [25] *SLA – Stereolithography (and DLP, CDLP, CLIP)* [online]. Dostupné z: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/sla-stereolithography-dlp-cdlp-clip/>
- [26] CAIN, Perry. Support in 3D Printing: A technology overview. *3D Hubs* [online]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/supports-3d-printing-technology-overview>
- [27] [online]. Dostupné z: http://www.rubbersideup.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/d/s/dsc_2308_10.jpg

[28] *Plazmaman* [online]. Dostupné z: <https://plazmaman.com/product/ca18-billet-inlet-manifold>

[29] *Twitter Southampton Formula Student Team* [online]. Dostupné z: <https://plazmaman.com/product/ca18-billet-inlet-manifold>

[30] Mig 21 SMT. *Revell* [online]. Dostupné z: <https://www.revell.de/en/products/modelmaking/planes/military-planes/mig-21-smt.html>

[31] How CSU Sacramento's Hornet Racing Formula SAE team improved engine performance. *Carbon*[online]. Dostupné z: <https://www.carbon3d.com/case-studies/hornet-racing-csu-sacramento-improves-formula-sae-engine-performance-csu-sacramento/>

[32] AT Power 28mm FS 20mm Restrictor. *AT Power* [online]. Dostupné z: <https://www.atpower.com/products/28mm-fs-20mm-restrictor>

[33] *FORD MONDEO ST220 DURATEC NOBLE M400 V6 INDIVIDUAL THROTTLE BODY KIT ITBS* [online]. Dostupné z: <https://rennsportfactory.co.uk/product/duratech-v6-itb/>

[34] Engine Building. *TTRNO Motorbikes* [online]. Dostupné z: <https://ttrno.com/products/engine-building-part-1-may-28>

13. Přílohy

13.1 Příloha 1 – Materiálový list PA2200



Material data sheet

PA 2200

1 General

Typical applications of the material are fully functional parts with high end finish right from the process, which easily withstand high mechanical and thermal load.

PA 2200 is suitable for processing on the following systems:

- > EOSINT P 730, P 700
- > EOSINT P 390, P 385, P 380i, P 380, with or without powder conveying system
EOSINT P 360 with upgrade S&P, P 350/2 with upgrade 99 and upgrade S&P
- > FORMIGA P 100

2 Technical data

General material properties

Average grain size	ISO 13320-11	56	µm
	Laser diffraction	2.20	mil
Bulk density	EN ISO 60	0.45	g/cm ³
Density of laser-sintered part	EOS method	0.93	g/cm ³
		58	lb/ft ³

Mechanical properties

Tensile modulus	EN ISO 527	1700	MPa
	ASTM D638	247	ksi
Tensile strength	EN ISO 527	48	MPa
	ASTM D638	6962	psi

PA 2200
AHO / 12.08

1 / 2

EOS GmbH – Electro Optical Systems

Robert-Stirling-Ring 1
D-82152 Krailling / München

Telephone: +49 (0)89 / 893 36-0
Telefax: +49 (0)89 / 893 36-285
Internet: www.eos.info



Material data sheet

Elongation at break	EN ISO 527	24	%
Elongation at break	ASTM D638	24	%
Flexural modulus	EN ISO 178	1500	MPa
	ASTM D790	217	ksi
Flexural strength	EN ISO 178	58	MPa
	ASTM D790	8412	psi
Charpy - Impact strength	EN ISO 179	53	kJ/m ²
Charpy - Notched impact strength	EN ISO 179	4.8	kJ/m ²
Izod - Impact strength	EN ISO 180	32.8	kJ/m ²
Izod - Notched impact strength	EN ISO 180	4.4	kJ/m ²
Ball indentation hardness	EN ISO 2039	78	N/mm ²
Shore D - hardness	ISO 868	75	-
	ASTM D2240	75	-

The mechanical properties depend on the x-, y-, z-position and on the exposure parameters used.

Thermal properties

Melting point	EN ISO 11357-1	172 - 180	°C
Vicat softening temperature B/50	EN ISO 306	163	°C
	ASTM D1525	325	°F
Vicat softening temperature A/50	EN ISO 306	181	°C
	ASTM D1525	358	°F

The data are based on our latest knowledge and are subject to changes without notice. They do not guarantee properties for a particular part and in a particular application.

© 2008 EOS GmbH – Electro Optical Systems. All rights reserved.