



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NÁVRH VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ FORMULE DRAGON 3

EXHAUST MANIFOLD FOR FORMULA DRAGON 3

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VÍT BREZANSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID SVÍDA, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vít Brezanský

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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

Návrh výfukového potrubí formule Dragon 3

v anglickém jazyce:

Exhaust Manifold for Formula Dragon 3

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro zadaný motor vozu formule Dragon 3 proveďte návrh výfukového potrubí.

Cíle diplomové práce:

- 1) Proveďte přehled konstrukce výfukového traktu současných formulových vozů, se zaměřením na kategorii formule Student.
- 2) Pro zadaný motor proveďte návrh a výpočet výfukového potrubí.
- 3) Proveďte dostupný návrh absorpčního výfukového tlumiče.
- 4) Na základě prostorového uspořádání motoru ve formuli, vytvořte výrobní dokumentaci Vámi navrženého výfukového potrubí.
- 5) Zhodnoťte Vámi navržené řešení a naznačte možné zlepšení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Hofmann, Karel. Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory. :Přepřínování spalovacích motorů. / 2. vyd. Brno : VUT Brno, 1985. 134 s.
- [2] Anderson, J.D. Fundamentals of Aerodynamics / 1 ed. New York : McGraw-Hill Book Company, 1984. 563 s.
- [3] Molnár, V.: Počítačová dynamika tekutin [online], 2011, poslední revize 2.11.2012. Dostupné z: <<http://www.cfd.sk/cfd-book>>
- [4] Lotus Engineering Software, Group Lotus Plc, Norfolk, United Kingdom. Dostupné z: <<http://www.lesoft.co.uk>>

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Svída, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 1.11.2012

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty



ABSTRAKT

Cílem práce je návrh výfukového potrubí pro vůz kategorie Formula Student, konkrétně formuli Dragon 3. Konstrukční parametry se řídí požadavky na dosažení vysokého výkonu motoru a zároveň musí splňovat určitá omezení daná pravidly soutěže. V softwaru Lotus Engine Simulation byl namodelován použitý motor (z motocyklu Husaberg FE 570), na němž byl zjišťován vliv parametrů potrubí na výkonové charakteristiky. Práce se také věnuje hluku výfukové soustavy, který je důležitý z hlediska pravidel soutěže Formula Student.

KLÍČOVÁ SLOVA

výfuk, výfukové potrubí, tlumič, hluk, formule student, rezonanční potrubí

ABSTRACT

Main goal of this thesis is to design exhaust manifold for Formula Student car Dragon 3. Construction parameters follow requirements on high engine power and also have to meet some restrictions given by competition rules. Lotus Engine Simulation software was used for modelling the engine (originally from Husaberg FE 570 motorcycle) and for determination of influence of the exhaust parameters on power characteristics. This thesis is also dedicated to noise emitted by the exhaust system which is important due to Formula Student rules.

KEYWORDS

exhaust, exhaust manifold, silencer, noise, formula student, resonance manifold



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BREZANSKÝ, V. *Návrh výfukového potrubí formule Dragon 3*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída, Ph.D.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. května 2013

.....

Vít Brezanský



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Ing. Davidu Svídovi, Ph.D. za jeho pomoc ve formě konzultací, rad a připomínek v průběhu tvorby této práce. Také bych tímto rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.



OBSAH

Úvod	10
1 Výfukový systém	11
1.1 Hlavní části výfukového systému	11
1.1.1 Sběrné potrubí	11
1.1.2 Snižování emisí výfukových plynů	13
1.1.3 Tlumiče hluku	13
2 Princip rezonančního potrubí	15
2.1 Výpočet rychlosti plynů v potrubí	16
2.2 Výpočet délky potrubí	17
3 Akustika – základní pojmy	19
3.1 Zvuk	19
3.2 Hluk	19
3.3 Perioda, vlnová délka, amplituda	19
3.4 Akustický tlak	20
3.5 Akustická rychlost	21
3.6 Akustický výkon	21
3.7 Rychlost šíření zvuku	21
4 Proudění vazkých tekutin	22
4.1 Hydraulické ztráty	23
4.1.1 Třecí ztráty	23
4.1.2 Místní ztráty	23
5 Pravidla soutěže Formule Student	26
5.1 Výfukový systém obecně	26
5.2 Způsob měření hluku	26
5.3 Maximální úroveň hluku	26
5.4 Opakované testování hluku	26
5.5 Výpočet měřících otáček	27
6 Konstrukční řešení výfukových systému vozidel Formule Student	29
7 Parametry motoru formule Dragon 3	32
7.1 Základní parametry motoru	33
7.2 Klikový mechanismus	33
7.3 Rozměry ventilů	33
7.4 Časování ventilů	34
8 Testovací výfukový systém	35
8.1 Výroba testovacího výfukového systému	35



9	Lotus Engine Simulation	40
10	Stavba modelu motoru.....	41
10.1	Válec.....	43
10.1.1	Termodynamický model průběhu hoření	43
10.1.2	Termodynamický model přestupu tepla ve válci.....	45
10.2	Ventilové Rozvody.....	49
10.3	Potrubí	50
10.3.1	Elementy potrubí	50
10.3.2	Materiál potrubí	51
10.3.3	Chlazení potrubí	51
10.3.4	Ztrátové spojení potrubí	51
11	Návrh rozměrů výfukového potrubí	53
11.1	Varianta 1 – dlouhé potrubí.....	54
11.2	Varianta 2 – krátké potrubí.....	55
11.3	Porovnání variant 1 a 2.....	56
11.4	Určení délky potrubí.....	58
12	Návrh tlumiče hluku	62
12.1	Měření hluku	62
12.2	Stanovení rozměrů tlumiče.....	63
13	3D model výfukové soustavy	65
	Závěr.....	67
	Seznam použitých zkratk a symbolů	71
	Seznam příloh.....	73



ÚVOD

Ve své diplomové práci se zabývám návrhem výfukového potrubí formule Dragon 3, která se bude účastnit mezinárodní soutěže technických univerzit Formula Student. Na tomto vozidle pracuje tým TU Brno Racing (jehož jsem členem) působící pod záštitou Ústavu automobilního a dopravního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. K pohonu slouží jednoválcový zážehový motor původem z motocyklu Husaberg FE 570 a jak je z názvu Dragona 3 patrné, jedná se již o třetí evoluci tohoto jednomístného sportovního vozu.

Výfukový systém je důležitou součástí spalovacího motoru, která zásadním způsobem ovlivňuje výkonové parametry. Střetávají se zde požadavky na nízkou hmotnost, nízkou výrobní náročnost a cenu spolu s velmi omezenými prostorovými možnostmi, žádanou výkonovou charakteristikou a v neposlední řadě také s pravidly Formule Student, které upravují řadu parametrů výfukové soustavy.

Na úvod je nutné se seznámit s teorií funkce a konstrukce výfukového potrubí a dalších souvisejících vědních oborů, jako je např. proudění tekutin a akustika. Následně provedu přehled konstrukce výfukového traktu současných vozů Formule Student. Omezení pravidly soutěže je velmi podstatná součást návrhu a všechny předpisy a požadavky dané těmito pravidly musí být bezpodmínečně splněny. V opačném případě by mohlo hrozit až vyloučení ze závodu. Z tohoto důvodu se zaměřím na výklad pravidel a vyvodím z nich důsledky na konstrukci výfukové soustavy u formule Dragon 3.

K návrhu výfukového potrubí využiji teoretických znalostí, specializovaného softwaru Lotus Engine Simulation a také praktických zkušeností z provozu formule Dragon 2 během závodní sezony. Poslední zmíněný prvek je nespornou výhodou pro takovou práci a umožňuje větší orientaci v celé problematice a dosažení lepších výsledků. Z těchto poznatků budu čerpat při návrhu potrubí, tlumiče hluku i prostorového uspořádání celé soustavy. Při provozu formule Dragon 2 se například ukázalo, že vzhledem k poměrně malému výkonu motoru není orientace na průběh krouticího momentu v nízkých a středních otáčkách příliš vhodná a je nutné se zaměřit spíše na otáčky v horní třetině spektra a dosažení co nejvyššího výkonu. Snahou bude také navrhnout tlumič hluku takovým způsobem, aby dané hlukové limity splňoval s dostatečnou rezervou po celou dobu závodu, a nehrozil tak střet s předpisy soutěže Formula Student. Výstupem z této práce bude výrobní dokumentace, podle níž bude výfukový systém vyroben ve společnosti Creptus, s.r.o.

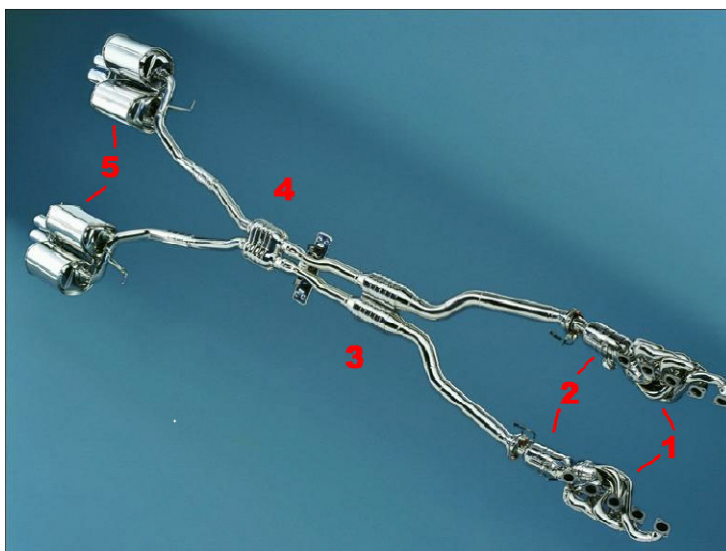


1 VÝFUKOVÝ SYSTÉM

Výfukový systém má za úkol odvádět ze spalovacího prostoru produkty spalování, tlumit hluk a také snižovat množství škodlivin, které se dostanou do okolí. Odvod spalín by měl být co nejdokonalejší, aby uvolnily prostor čerstvé směsi (neplatí vždy, např. při využití vnitřní recirkulace výfukových plynů). Nesmí docházet k úniku spalín do kabiny vozidla.

1.1 HLAVNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

Výfukový systém je tvořen výfukovým potrubím (může se dělit na sběrné a spojovací), soustavou pro snižování emisí výfukových plynů (tzn. katalyzátory, filtry pevných částic u vznětových motorů apod.) a tlumičem hluku.



Obr. 1.1 Výfukový systém spalovacího motoru, pozice 1 – sběrné potrubí, 2 – předřadný katalyzátor, 3 – hlavní katalyzační tlumiče, 4,5 – tlumiče hluku

Zdroj: RAUSCHER, J.: *Spalovací motory, Studijní opory, VUT FSI Brno, 2004, str. 208*

1.1.1 SBĚRNÉ POTRUBÍ

Jeho úkolem je odvádět spaliny z jednotlivých spalovacích prostorů. Nejčastějším materiálem bývá šedá litina, žáruvzdorné oceli, u závodních aplikací titan nebo inconel.

Šedá litina má dobrou odolnost proti oxidaci za vysokých teplot, dostatečnou pevnost a je schopná pohlcovat hluk a tlumit vibrace. Její výhodou je také nízká cena. Naopak nevýhodou je značný odvod tepla do okolí. Katalytické reakce v katalyzačních tlumičích probíhají spolehlivě až od teploty cca 320 °C, takže potrubí ze šedé litiny značně prodlužuje dobu, po kterou je katalyzátor v nečinnosti. Další nevýhodou je vysoká hmotnost, což je důvod, proč se začaly u sportovních vozidel používat žáruvzdorné a žáropevné oceli. [1]



Obr. 1.2 Litinové sběrné potrubí

Zdroj: Díly Fiat Ostrava: Výfukové sběrné potrubí 1,6 16v. [online]. [cit. 2012-12-21]. Dostupné z: <http://www.dilyfiatov.cz/p1116-vyfukove-sberne-potrubí-1-6-16v/>

Žáruvzdorné oceli mají nižší hmotnost a menší odvod tepla než litinové. Potrubí bývá délkově naladěno a využívá se tak tlakových pulsací a kinetiky plynů k dokonalejšímu vypláchnutí spalovacího prostoru. [1]

Sběrná potrubí z jednotlivých válců se sloučí do jednoho, které se nazývá potrubí spojovací. Používá se několik způsobů spojení potrubí, u čtyřválcových motorů např. 4-2-1, 4-1-2, 4-1 apod. Snahou je opět dosažení dokonalejšího vyprázdnění spalovacího prostoru. Formule Dragon 3 je však vybaveno pouze jednoválcovým motorem, takže spojovací potrubí v tomto případě odpadá.



Obr. 1.3 Sběrné potrubí ze žáruvzdorné oceli

Zdroj: Advance Speed Shop: Tomioka Racing Exhaust Manifold - 4B11) 2008-2010 Mitsubishi Lancer Evolution X. [online]. [cit. 2012-12-21]. Dostupné z: <http://www.advancespeedshop.com/tomioka-racing-exhaust-manifold-4b11-20082010-mitsubishi-lancer-evolution-em1004-p-16130.html>



1.1.2 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Vlivem nedokonalosti spalování dochází ke vzniku řady škodlivých látek, které následně odcházejí do ovzduší. V současné době se ke snižování obsahu těchto škodlivin používají třicestné katalyzační tlumiče, SCR, filtry pevných částic apod. V katalyzátorech dochází k redukci oxidů dusíku NO_x a oxidaci oxidu uhličitého CO a uhlovodíků HC.

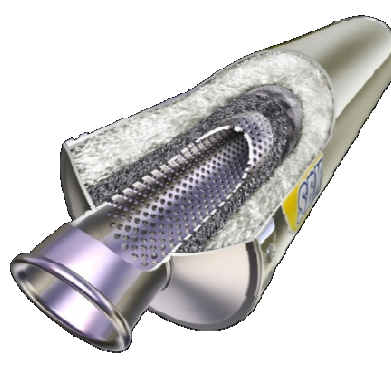
Pravidla Formule Student nelimitují obsah škodlivin ve výfukových plynech, proto nebude formule Dragon 3 vybavena katalyzačním tlumičem ani žádným jiným zařízením určeným pro redukci emisí.

1.1.3 TLUMIČE HLUKU

Hluk spalovacího motoru je nutno tlumit na úroveň předepsanou zákonem, u závodních aplikací pravidly soutěže, v tomto případě pravidly Formule Student. Možnosti tlumení hluku jsou následující: [1] [2]

Tlumení hluku absorpcí

U absorpčního tlumiče je utlumení hluku dosaženo pohlcením (absorpcí) tlakových vln do pohltivého materiálu. Ten musí být odolný proti vysokým teplotám a mít dobrý součinitel pohltivosti. Jedná se ve většině případů o kovová nebo minerální vlákna, nebo skelnou vatu. K absorpci hluku dochází třením vzduchu, snižováním tlakové energie a nepružnou deformací v pohltivém materiálu. Tento typ tlumiče je nejčastěji používán při úpravách motocyklů pro závodní účely a bude také použit na formuli Dragon 3.

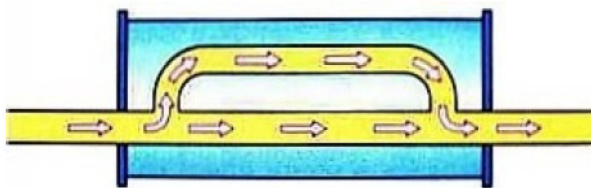


Obr. 1.4 Absorpční tlumič

Zdroj: Motorkáři.cz fórum: Jak ztláčit výfuk na MZ 150. [online]. [cit. 2012-12-21]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/forum-detail/?ft=63110&fid=9>

Tlumení hluku interferencí

Spaliny jsou vedeny do několika proudů o různých délkách a následně se opět spojí. Dojde tak k částečnému vyrušení (interferenci) tlakových vln. Tímto způsobem lze utlumit hluk pouze v určitém úzkém rozsahu frekvencí, na které je tlumič naladě.

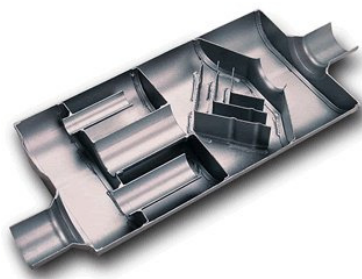


Obr. 1.5 Interferenční tlumič

CHLÍBEK, L. *Návrh výfukového potrubí pro vůz Formule SAE. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída. Str. 15.*

Tlumení hluku reflexí

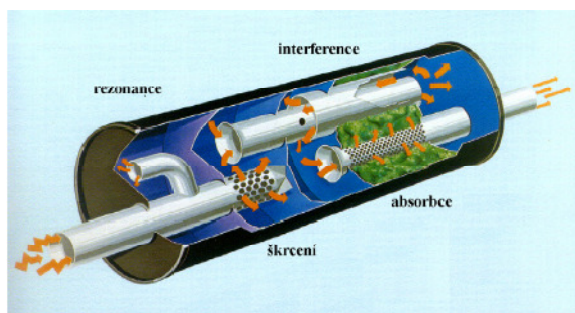
Do tlumiče se umísťují překážky, od kterých se tlakové vlny odrážejí. Dojde tedy k vyrušení přetlakových a podtlakových vln. Opět dochází k tlumení pouze v úzkém rozsahu frekvencí. Nejjednodušším typem je tlumič s expanzní komorou.



Obr. 1.6 Reflexní tlumič

Undercover Project: How a Muffler Works? [online]. [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://undercoverproject.blogspot.cz/2010/03/how-muffler-works.html>

Ve vozidlech se obvykle používá kombinace uvedených způsobů, čímž se dosáhne utlumení hluku v širokém frekvenčním rozsahu (viz 1.5). Reflexní tlumič dobře odolává vysokým teplotám, proto se umísťuje jako přední tlumič. Absorpční se používá až jako zadní, protože vysoké teploty by mohly způsobovat vypalování pohltivého materiálu. Při závodních úpravách motocyklů se využívají výhradně absorpční tlumiče.

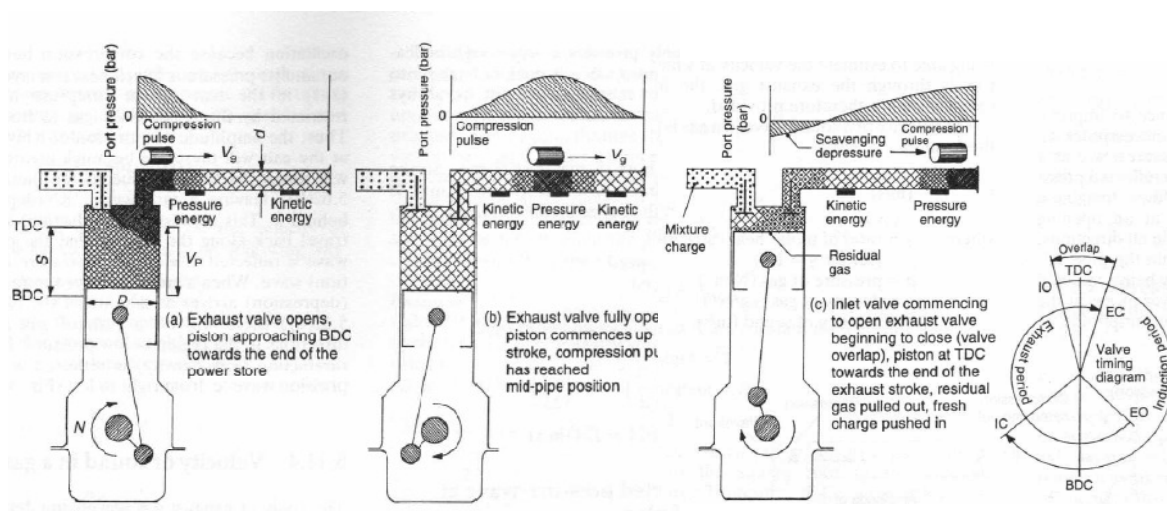


Obr. 1.7 Kombinovaný tlumič

Zdroj: RAUSCHER, J.: Spalovací motory, Studijní opory, VUT FSI Brno, 2004, str. 209

2 PRINCIP REZONANČNÍHO POTRUBÍ

V současné době se u všech automobilů používá tzv. rezonanční sací potrubí. Vhodně zvolenými délkami a objemy sací soustavy se dosáhne zlepšení průběhu točivého momentu a maximálního výkonu vozidla. Využívá se rezonančních jevů, které pomohou zvýšit hmotnostní naplnění válce čerstvou směsí. Pohybem pístu směrem k dolní úvratí při sacím cyklu vzniká infinitesimální podtlaková vlna, která se šíří sacím potrubím rychlostí zvuku. V momentě, kdy narazí na volný konec potrubí, se tato vlna odráží a putuje zpět do válce jako vlna přetlaková. Snahou je, aby přetlaková vlna dorazila do válce v momentu zavírání sacího ventilu a zvýšila tak hmotnostní naplnění válce. Obdobný princip lze praktikovat i na výfukové straně. [1]



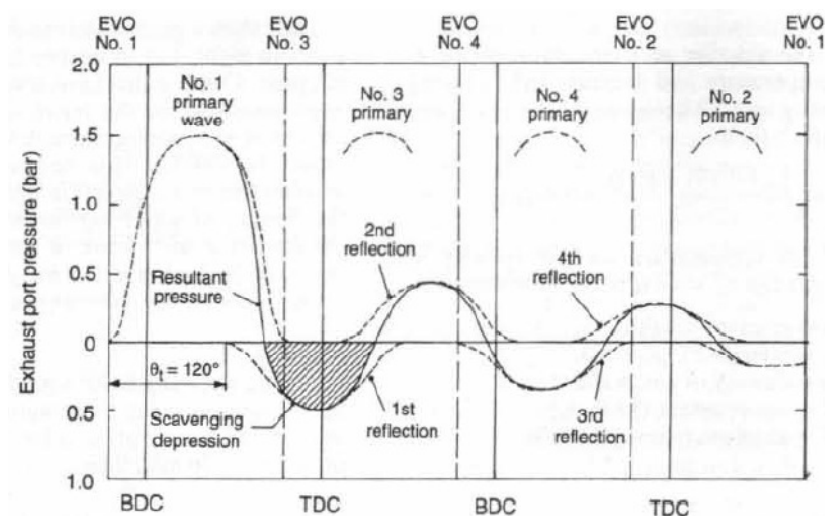
Obr. 2.1 Teorie rezonančního výfukového potrubí

Zdroj: HEISLER, H.; (1995). *Advanced Engine Technology*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, str. 273, ISBN 978-0340568224.

Výfukový systém má za úkol pokud možno co nejdokonaleji odvézt spaliny ze spalovacího prostoru a uvolnit místo pro čerstvou směs. Spaliny, které neodejdou výfukem, zabírají místo čerstvé směsi. Důsledek je snížení výkonu motoru. Proto se opět snažíme využívat dynamických tlakových jevů ve výfukovém potrubí pro dosažení dokonalejší výměny směsi. Při otevření výfukového ventilu se píst pohybuje směrem k horní úvratí a vytlačuje spaliny z válce motoru. Vzniká tlaková vlna, která se šíří potrubím rychlostí zvuku. Při šíření vlny její čelní polovina stlačuje médium (zvyšuje jeho hustotu) a její druhá polovina hustotu snižuje. Když vlna dorazí na otevřený konec do atmosféry (nebo na rozhraní prostředí), vznikne krátkodobé snížení hustoty vzduchu v blízkosti konce potrubí. Vlivem pružnosti tohoto vzduchu se odrazí a putuje zpět jako vlna podtlaková. Na druhém konci (ve výfukovém kanálu) se opět odrazí a putuje jako přetlaková zpět. Takto může cestovat se snižující se amplitudou do doby, než začne další výfuková fáze. Délka výfukového traktu by měla být taková, aby tlaková vlna dorazila na konec a vrátila se zpět během přibližně 120° natočení klikového hřídele. To zajistí, že první podtlaková vlna dorazí k výfukovému ventilu v době, kdy píst právě překonal horní úvrat' na konci výfukového zdvihu a ventil se zavírá (postup tlakové vlny znázorněn na Obr. 2.2). Tímto způsobem budou zbytkové spaliny „vysáty“ ze spalovacího prostoru. Díky tzv. překrytí ventilů zároveň vtáhne do spalovacího prostoru



čerstvou směs ze sacího kanálu, který už se v této chvíli začíná otevírat. V jiných otáčkách motoru však první podtlaková vlna nedorazí přesně v době zavírání výfukového ventilu, nevytáhne zbytkové spaliny a tudíž ani nenasaje čerstvou směs do válce. [3]



Obr. 2.2 Postup tlakové vlny ve výfukovém traktu

Zdroj: HEISLER, H.; (1995). *Advanced Engine Technology*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, str. 276, ISBN 978-0340568224.

2.1 VÝPOČET RYCHLOSTI PLYNŮ V POTRUBÍ

Rychlost plynů proudících v potrubí lze vypočítat pomocí následujících rovnic: [3]

D_v = vrtání válce [mm]

d = průměr potrubí [mm]

Z = zdvih [mm]

V_p = střední pístová rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

V_g = střední rychlost plynů [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

N = otáčky klikového hřídele [min^{-1}]

Střední pístová rychlost:

$$V_p = \frac{2ZN}{60 \cdot 1000} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

Zdvihový objem:

$$V_z = V_p \cdot \frac{\pi D_v^2}{4} [\text{m}^3] \quad (2)$$



Objem vypuštěných plynů:

$$V_v = V_g \cdot \frac{\pi d^2}{4} [m^3] \quad (3)$$

Porovnání rovnic (2) a (3):

$$\begin{aligned} V_g \cdot \frac{\pi d^2}{4} &= V_p \cdot \frac{\pi D_v^2}{4} \\ V_g &= V_p \cdot \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right) D_v^2}{\left(\frac{\pi}{4}\right) d^2} \\ V_g &= V_p \cdot \left(\frac{D_v}{d}\right)^2 \\ V_g &= \frac{ZN}{30000} \cdot \left(\frac{D_v}{d}\right)^2 [m \cdot s^{-1}] \end{aligned} \quad (4)$$

Touto rovnicí lze získat pouze přibližný odhad rychlosti plynů, protože nepočítá s proměnlivostí zdvihu výfukového ventilu. [3]

2.2 VÝPOČET DÉLKY POTRUBÍ

Ideální délku výfukového potrubí spočítáme podle následujících rovnic: [3]

t_v = čas, za který puls dorazí od výfukového ventilu ke konci potrubí a zpět [s]

L_v = délka potrubí od výfukového ventilu po konec potrubí [m]

C_v = rychlost zvuku ve výfukových plynech [$m \cdot s^{-1}$]

N = otáčky klikového hřídele [$m \cdot s^{-1}$]

Θ_t = úhel natočení klikového hřídele, během něž dorazí vlna na konec a zpět [$^\circ$]

Čas, za který vlna dorazí na konec potrubí a zpět:

$$t_v = \frac{2L_v}{1000C_v} [s] \quad (5)$$

Úhel natočení klikového hřídele během této doby:

$$\theta_t = t_v \cdot \frac{360}{60} \cdot N [^\circ] \quad (6)$$

Dosadíme za čas t_v :

$$\theta_t = \frac{2L_v}{1000C_v} \cdot 6N [^\circ]$$



$$\theta_t = \frac{0,012L_v N}{c_v} [^\circ] \quad (7)$$

$$L_v = \frac{\theta_t c_v}{0,012N} [m] \quad (8)$$

Délka L_v má závislost na otáčkách klikového hřídele, tudíž pro každé otáčky existuje jiná ideální délka potrubí. V praxi se toto řeší naladěním délky potrubí pro otáčky, které budou vhodné pro konkrétní použití motoru (různé typy závodů, tzn. naladění spíše na výkon ve vysokých otáčkách, nebo naopak snaha o větší krouticí moment v nízkých otáčkách apod.). V případě sací části motoru se u většiny současných automobilů využívá variabilní délka potrubí, stejně tak u některých sportovních motocyklů.

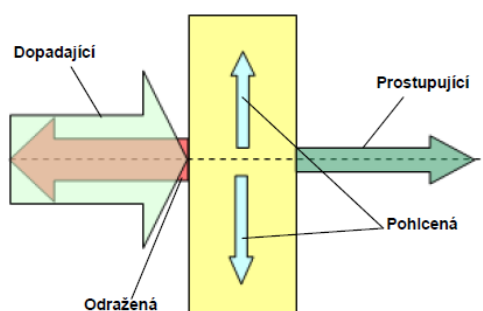


3 AKUSTIKA – ZÁKLADNÍ POJMY

Akustika je rozsáhlý vědní obor, který se zabývá vznikem zvuku, přenosem a vnímáním lidskými smysly.

3.1 ZVUK

Zvuk je mechanické vlnění v látkovém prostředí, které vyvolává v lidském uchu sluchový vjem. Šíří se formou zvukových vln plyny, kapalinami i pevnými látkami s tím, že v různých médiích se šíří rozdílně. Člověk je schopen slyšet frekvence přibližně v rozsahu 16 Hz až 20 kHz. Zvuky pod hranicí slyšitelnosti nazýváme infrazvuk (0,7 – 16 Hz) a zvuky nad touto hranicí ultrazvuk (20 kHz – 50 kHz). Pokud částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění, hovoříme o podélném vlnění. Pokud kmitají kolmo na směr šíření, jedná se o příčné proudění. U plynů a kapalin vyskytuje pouze podélné vlnění, protože jsou pružné jen ve smyslu objemové stlačitelnosti. U elastických materiálů může vznikat obojí, protože mají pružnost v tahu, tlaku i smyku. Zvuková vlna se šíří od svého zdroje v tzv. vlnoplochách. Při dopadu na překážku se podle druhu této překážky může odrazit, nebo jí prostoupit. Akusticky pohltivé materiály neodráží téměř žádné vlny a energii pohlcují. [4]



Obr. 3.1 Zvuková vlna při dopadu na překážku

Zdroj: Základy akustiky: Příručka pro začátečníky. MEDVECOVÁ, I.; GREIF-AKUSTIKA, s.r.o. [online]. 2011-11-1 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.greif.cz/download/its075-zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf>

3.2 HLUK

Hlukem rozumíme zvuk, který je pro člověka nepříjemný, nežádoucí, rušivý nebo škodlivý. Je to nepravidelné nebo náhodné kmitání, jehož vnímání se mění s dobou trvání, věkem a zdravotním stavem posluchače. [4]

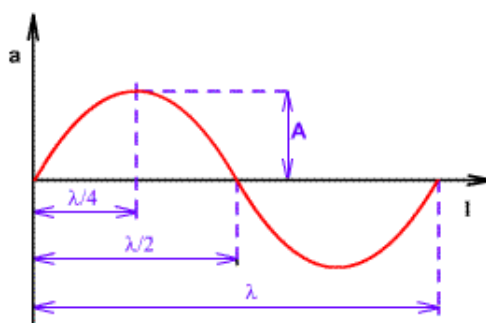
3.3 PERIODA, VLNOVÁ DÉLKA, AMPLITUDA

Perioda (T) je doba trvání jednoho cyklu periodického děje. Častěji se používá počet period za jednotku času – frekvence v jednotkách Hz (s^{-1}). [4]



Amplituda (A) je největší vzdálenost od rovnovážné polohy, o kterou se soustava vychýlí. [4]

Vlnová délka (λ) je vzdálenost, kterou urazí signál za dobu jedné periody, tzn. je ovlivněna rychlostí šíření signálu v prostředí. Udává se v jednotkách metr (m). Jedná se tedy pouze o součin rychlosti šíření signálu c a periody T . [4]



Obr. 3.2 Harmonická vlna a její charakteristické parametry

Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu.

BERNAT, P. [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z:

http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm

3.4 AKUSTICKÝ TLAK

Je poměr mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v určitém místě zvukového pole a trvalou (statickou) hodnotou atmosférického tlaku. Důležitým parametrem je hladina akustického tlaku, která říká, o co je okamžitá hodnota tlaku vyšší než referenční. Udává se v jednotkách decibel (dB) a je logaritmická: [4]

$$L_a = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad (9)$$

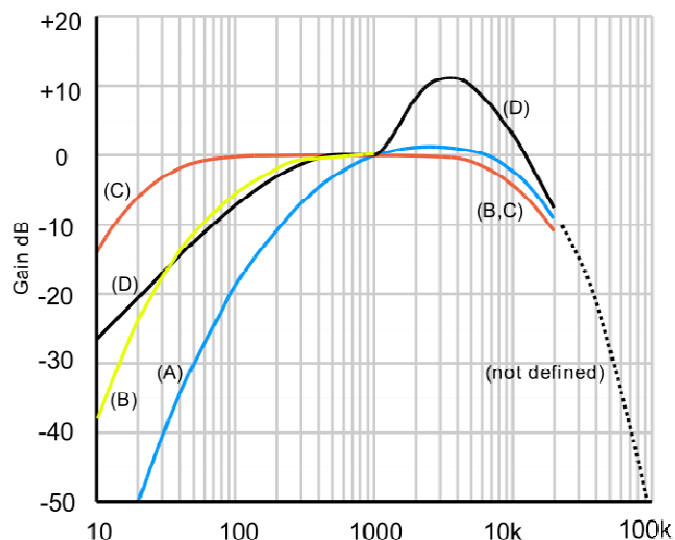
Kde:

p = změřená či okamžitá hodnota akustického tlaku [Pa]

p_0 = referenční hodnota akustického tlaku [Pa]

Jako referenční hodnota se používá hodnota akustického tlaku ve vzduchu $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Jak již bylo řečeno, jednotka dB je logaritmická, takže např. zvýšení hodnoty o 6 dB vnímáme jako dvojnásobné zvýšení hluku, zvýšení o 20 dB jako desetinásobné apod. [4]

V praxi se běžně udává jednotka dBA a je také použita v pravidlech Formule Student, kde je pomocí ní určen maximální dovolený hluk výfukového systému (kap. 5.3). Jedná se o akustický tlak, který zohledňuje vlastnosti lidského ucha. V tomto případě se používá tzv. váhový filtr A, který redukuje zaznamenaný zvuk o 30 dB v 50 Hz, 19 dB v 100 Hz, 3 dB v 500 Hz a 0 dB v 1000 Hz. Od 2 kHz do 4 kHz ho zvyšuje o 1 dB a poté ve 20 Hz opět snižuje o 10 dB . Důvodem je vnímání frekvencí mezi 1000 Hz až 4000 Hz, které je pro lidské ucho velmi nepříjemné. [5]



Obr. 3.3 Běžně používané váhové filtry

Zdroj: *Weighting filter*. Wikipedia [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Weighting_filter

3.5 AKUSTICKÁ RYCHLOST

Je to rychlost, kterou se pohybují částice vlivem působení akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy. Pro práh slyšitelnosti je akustická rychlost $5 \cdot 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ a pro práh bolestivosti $1,6 \cdot 10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$. [6]

3.6 AKUSTICKÝ VÝKON

Popisuje celkovou akustickou energii vyzářenou ze zdroje zvuku a je základní a nejdůležitější veličinou popisující jeho akustické vlastnosti. Také může být měřítkem akustické energie procházející určitou plochou. [6]

3.7 RYCHLOST ŠÍŘENÍ ZVUKU

Rychlost zvuku v suchém vzduchu lze spočítat podle vzorce: [6]

$$C_o = 331,8 + 0,61 \cdot t_o \text{ [m.s}^{-1}\text{]} \quad (10)$$

Kde:

t_o = teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]

Ze vzorce je zřejmé, že rychlost zvuku závisí na teplotě vzduchu.



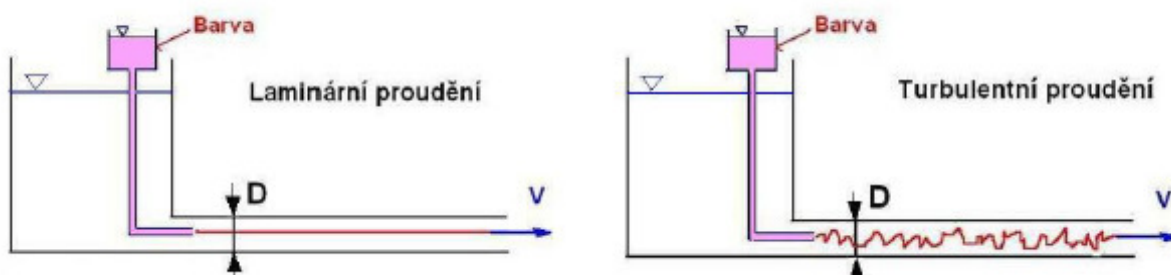
4 PROUDĚNÍ VAZKÝCH TEKUTIN

Informace v této kapitole čerpají ze zdroje [7].

Proudění skutečných (vazkých) tekutin může být:

- laminární – částice se pohybují ve vrstvách (deskách) a nepřemísťují se po průřezu
- turbulentní – částice mají kromě postupné rychlosti také rychlost turbulentní (flukтуаční) - přemísťují se po průřezu

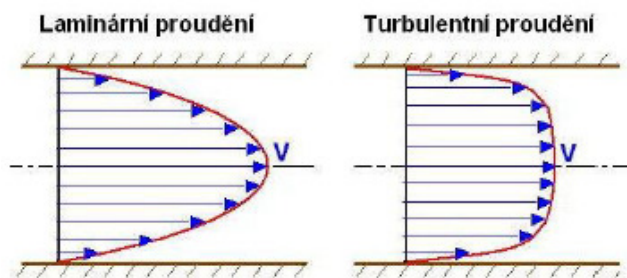
Na Obr. 4.1 je znázorněn Reynoldsův pokus, který ukazuje průběh obou druhů proudění. Do kruhového potrubí s proudící tekutinou je přiváděna tenkou trubičkou obarvená tekutina. Při malých rychlostech je proud obarvené tekutiny neporušen, pohyb se děje po vrstvách a částice se vzájemně nepromíchávají – hovoříme o laminárním proudění. Turbulentní proudění vznikne při zvětšení rychlosti nad kritickou hodnotu. Částice se pohybují ve všech směrech, přecházejí z jedné vrstvy do druhé apod. Odpor proti pohybu je v tomto případě větší než u laminárního proudění, protože při přemísťování částic dochází ke změně hybnosti, která se projevuje brzdícím účinkem.



Obr. 4.1 Reynoldsův pokus

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>*

Rozdíl mezi nimi jsou v rychlostním profilu i ve velikosti hydraulických ztrát. Rychlostní profil laminárního proudění je rotační paraboloid, u turbulentního se tvar podobá obdélníku (viz Obr. 4.2). Čím větší jsou turbulence (čím větší je Reynoldsovo číslo), tím více se tvar přibližuje obdélníku. Kritická hodnota Reynoldsova čísla, tzn. přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním, je pro tekutiny v kruhovém průřezu $Re = 2320$. Přechod však není skokový. V počátku se objevuje v krátkých úsecích turbulentní proudění, které se s rostoucím Reynoldsovým číslem prodlužuje, až laminární proudění zcela vymizí.



Obr. 4.2 Rychlostní profily v potrubí

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>

4.1 HYDRAULICKÉ ZTRÁTY

Následkem viskozity vznikají u skutečných tekutin hydraulické síly, které působí proti pohybu tekutiny. Nazýváme je hydraulické odpory, nebo také hydraulické ztráty. Jedná se o velmi složitý proces. V této kapitole budou představeny základní prvky, ve kterých vznikají tyto ztráty, a které se běžně ve výfukovém potrubí objevují. Snahou je tyto prvky pokud možno co nejvíce eliminovat, tzn. vyhnout se složitým tvarům, ostrým kolenům, změnám průřezu apod.

Hydraulické odpory se rozdělují na odpory třecí a místní.

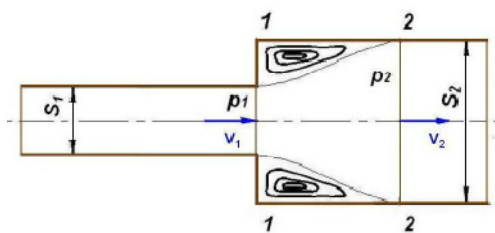
4.1.1 TŘECÍ ZTRÁTY

Třecí odpory vznikají třením tekutiny o stěnu potrubí a jsou závislé na délce potrubí. Ztrátový součinitel ζ obecně závisí na druhu tekutiny, rychlosti proudění, drsnosti povrchu a geometrii daného místa. Ztrátový součinitel u třecích odporů je přímo úměrný délce potrubí. U turbulentního proudění jsou tyto ztráty větší než u laminárního.

4.1.2 MÍSTNÍ ZTRÁTY

Ve výfukovém potrubí se běžně vyskytují kolena, změny průřezu, měřicí zařízení apod. Tyto prvky vyvolávají víření a odtržení proudu tekutiny. Ztrátový součinitel u místních odporů závisí na typu, tvaru, drsnosti prvku, tvaru rychlostního profilu a na režimu proudění. Ztrátový součinitel se určuje experimentálně.

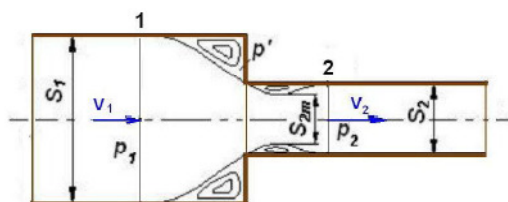
Náhle zvětšení průřezu – ztráta je způsobena odtržením proudu mezi stěnami a proudnicí a vznikají víry. Po rozšíření průřezu se sníží celková rychlost, a tedy stoupne tlak.



Obr. 4.3 Náhlé zvětšení průřezu

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>*

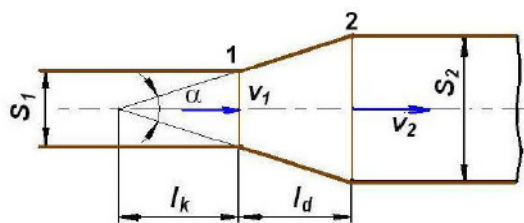
Náhlé zmenšení průřezu – zúžení potrubí vyvolává zrychlení kapaliny. Proud nemůže díky své setrvačnosti sledovat tvar stěny.



Obr. 4.4 Náhlé zmenšení průřezu

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>*

Difuzor – ztráty u pozvolného zvětšování průřezu jsou podstatně menší, než u náhlého rozšíření potrubí. V difuzoru se s malými ztrátami přemění kinetická energie proudu na energii tlakovou. Při malých úhlech rozšíření (cca 6° až 8°) zůstane rychlostní profil symetrický k ose difuzoru. Při vyšších úhlech se proud odtrhává od jedné stěny (na které je menší rychlost) a profil je nesymetrický. Důsledkem je kmitání proudu a tvoření vírů.

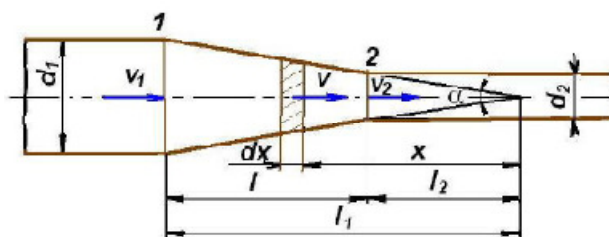


Obr. 4.5 Difuzor (rozšiřující se kuželové potrubí)

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>*



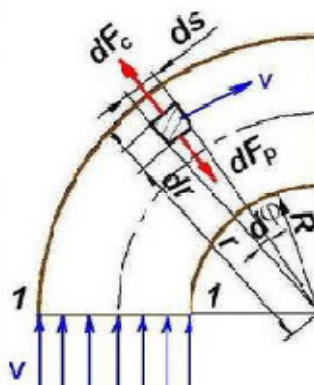
Zužující se kuželové potrubí – ztráty jsou způsobeny třením o stěnu potrubí. Při výpočtu se uvažuje změna průměru a rychlosti po délce potrubí.



Obr. 4.6 Konfuzor (zužující se kuželové potrubí)

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>

Změna směru proudění – v zakřiveném potrubí, v obloucích, kolenech a jejich kombinacích dochází k rozptylu energie. U skutečných kapalin se částice přemisťují na větší nebo menší poloměr a vzniká složitý spirálový prostorový pohyb. Součástí je vířivé proudění v příčném průřezu se dvěma víry opačného smyslu.



Obr. 4.7 Zakřivené potrubí

Zdroj: JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin* [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>



5 PRAVIDLA SOUTĚŽE FORMULE STUDENT

Pravidla soutěže [8] omezují umístění výfukového systému a stanovují, jakým způsobem bude prováděno měření hluku.

5.1 VÝFUKOVÝ SYSTÉM OBECNĚ

- 1) Ukončení výfuku – výfuk musí být umístěn tak, aby pilot nepřišel do kontaktu s výfukovými plyny, a to při žádné rychlosti vozidla.
- 2) Koncovka výfuku nesmí přesáhnout zadní osu o více než 45 cm a nesmí být víc než 60 cm nad zemí.
- 3) Veškeré komponenty (potrubí, tlumič), které vyčnívají ze strany karoserie vpředu od hlavního oblouku, musí být kryté, aby nedošlo ke kontaktu s osobami okolo vozidla nebo s jezdcem, který vystupuje z vozidla.

5.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ HLUKU

- 1) Úroveň hluku bude měřena v průběhu statického testu. Měření bude provedeno mikrofonom umístěným na úrovni ukončení výfuku a bez překážek mezi nimi. Vzdálenost 0,5 m a v úhlu 45° od ústí tlumiče v horizontální rovině. Test bude probíhat při zařazeném neutrálu v otáčkách definovaných níže. Pokud je na vozidle více výfukových koncovek, test bude proveden pro všechny z nich a zapsán bude nejvyšší naměřený.
- 2) Vozidlo musí vyhovovat ve všech otáčkách motoru až po testovací otáčky definované níže.
- 3) Jestliže má výfuk jakoukoliv pohyblivou část nebo systém, musí být vyhovující ve všech pozicích. Pozice tohoto zařízení musí být viditelná komisařům kvůli testu hluku a být manuálně upravovatelná během měření.
- 4) Otáčky motoru – testovací otáčky motoru pro konkrétní motor budou takové, které odpovídají průměrné pístové rychlosti 914,4 m.min⁻¹ pro automobilové a motocyklové motory, nebo 731,5 m.min⁻¹ pro „průmyslové“ motory. Vypočítané otáčky budou zaokrouhleny na nejbližších 500 min⁻¹. Testovací otáčky pro nejběžnější motory budou zveřejněny organizátory.
„Průmyslový“ motor je definován jako motor, který, podle výrobních specifikací a bez požadovaného restriktoru, není schopen produkovat více než 5 hp (cca 3,68 kW) na 100 cm³. Aby mohl být motor klasifikovaný jako „průmyslový“, musí být povolení od organizátorů obdrženo už před závody.

5.3 MAXIMÁLNÍ ÚROVEŇ HLUKU

Maximální povolená úroveň hluku je 110 dBA rychlým vážením.

5.4 OPAKOVANÉ TESTOVÁNÍ HLUKU

Na základě požadavku komisařů může být hluk testován kdykoliv během soutěže. Pokud vozidlo neprojde, nebude moci pokračovat, dokud nebude opraveno a znovu neabsolvuje test hluku.



Obr. 5.1 Procedura měření hluku při závodě Formule Student

Zdroj: TU Brno Racing, In: Facebook [online]. 18. srpna 2012 [cit. 2013-01-04]. Dostupné z: http://www.facebook.com/photo.php?fbid=469780289712552&set=pb.162916657065585.-2207520000.1359282702&type=3&src=http%3A%2F%2Fsphotos-e.ak.fbcdn.net%2Fhphotos-ak-snc7%2F480091_469780289712552_1126796351_n.jpg&size=960%2C720

5.5 VÝPOČET MĚŘÍCÍCH OTÁČEK

Ve formuli Dragon 3 bude použit motocyklový motor Husaberg FE 570, který nelze definovat jako „průmyslový“, takže testovací otáčky budou odpovídat pístové rychlosti $914,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Výpočet pístové rychlosti je podle následujícího vzorce: [9]

$$c_s = \frac{2 \cdot Z \cdot N}{60} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

Kde:

Z = zdvih pístu [m] (pro použitý motor = $72 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, viz kap. 7.1)

N = otáčky motoru [min^{-1}]

Z rovnice (11) vyjádříme otáčky motoru n a zároveň vynecháme konstantu 60, protože pístovou rychlost již máme zadanou v jednotkách min^{-1} :

$$N = \frac{c_s}{2 \cdot Z} [\text{min}^{-1}] \quad (12)$$

Po dosazení:

$$N = \frac{914,4}{2 \cdot 72 \cdot 10^{-3}} \quad (13)$$



Otáčky motoru N odpovídající pístové rychlosti $914,4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ jsou 6350 min^{-1} . Dle pravidel Formule Student (kap. 5.2) se vypočítané otáčky zaokrouhlují na nejbližších 500 min^{-1} . Výsledné měřicí otáčky pro motor Husaberg FE 570 jsou tedy 6500 min^{-1} .

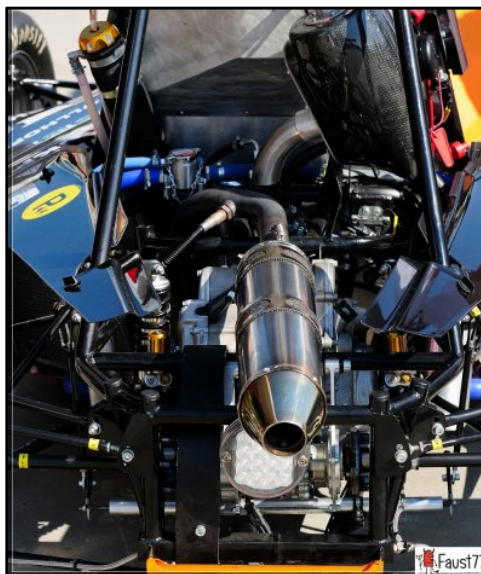


6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VÝFUKOVÝCH SYSTÉMU VOZIDEL FORMULE STUDENT

Ve vozidlech Formule Student se objevují motory jednoválcové, dvouválcové i čtyřválcové. Ve formuli Dragon 3 bude použit jednoválcový motor, proto se zde nebudu zabývat uspořádáním spojovacího potrubí, ale pouze umístěním tlumiče hluku a vedení jednoduchého potrubí s jednou větví.

Návrh výfukového systému pro Formuli Student je kompromisem mezi zástavbovými možnostmi, výkonovými požadavky a požadavky z hlediska pravidel (umístění a hlukové limity).

U formule Dragon 2 byl použit systém s tlumičem umístěným podélně nad motorem. Při tomto způsobu je nutné se přizpůsobit pravidly omezené maximální vzdálenosti, kterou může výfuk přesahovat za zadní nápravu (viz kap. 5.1). Toto řešení využívá formule Dragon 1 i Dragon 2. Nevýhodou je mírné zvýšení těžiště, což je u závodních vozidel velmi sledovaný parametr.



Obr. 6.1 Umístění tlumiče hluku u formule Dragon 2

*Zdroj: TU Brno Racing: TU Brno Racing a Gregor Racing na závodech v maďarském Györu.
[online]. [cit. 2013-01-05]. Dostupné z:*

http://www.tubrnoracing.cz/images/phocagallery/TUBrnoGregorracingGyor/thumbs/phoca_thumb_l_2012.08.19%20formula%20student%20gyor_0001.jpg

Tuto nevýhodu odstraňuje řešení s tlumičem pod zadní nápravou. Naopak ale přináší problémy kvůli omezeným prostorovým možnostem v těchto místech a možném snížení světelné výšky.

Další možností je podobné řešení jako uvedené výše, ale s tlumičem umístěným kolmo k ose vozidla. Takto je možné použít delší potrubí (pravděpodobně ale s ohyby o malém poloměru – vyšší ztráty), ale na druhou stranu zde není tolik místa pro tlumič, který bude mít omezenou délku. Tlumič musí být umístěn tak, aby neomezoval přístup k tzv. jacking pointu.



Obr. 6.2 Tlumič hluku umístěný kolmo k ose vozidla

Zdroj: Moto IQ: Formula SAE: Part 2, The Little Team That Could. [online]. 18. února 2012 [cit. 2013-01-05]. Dostupné z: http://www.motoiq.com/magazine_articles/id/2165/pageid/3750/formula-sae-part-2-the-little-team-that-could.aspx

Řešení, které bude používat i formule Dragon 3, je s tlumičem výfuku umístěným na straně vozidla, vedle kokpitu. Lze použít potrubí krátké i dlouhé, u kterého je však nutný poměrně ostrý ohyb a také má vyšší těžiště. Formule Dragon 2 byla vybavena chladiči na každé straně, takže nebylo možné tento způsob použít. Dragon 3 bude mít pouze jeden chladič na pravé straně a uvolní tak místo pro výfukové potrubí na straně levé. Dle pravidel je nutné veškeré části výfukového systému odstínit tak, aby v žádném případě nepřišly do kontaktu s jezdcem nebo s osobou přistupující k vozidlu ze strany a takovým způsobem, aby jezdec nebyl vystaven výfukovým plynům (viz kap. 5.1). Přesné umístění a konstrukční provedení bude specifikováno dále.



Obr. 6.3 Umístění tlumiče výfuku u formule týmu Einstein Motorsport

Zdroj: Einstein Motorsport: Saison 2010. In: Facebook [online]. 19. února 2012 [cit. 2013-01-05]. Dostupné z:

http://www.facebook.com/photo.php?fbid=371236426221607&set=pb.215534788458439.-2207520000.1359286940&type=3&src=http%3A%2F%2Fsphotos-h.ak.fbcdn.net%2Fphotos-ak-snc7%2F407569_371236426221607_1469754128_n.jpg&size=960%2C720



Obr. 6.4 Umístění tlumiče výfuku u formule týmu UWA Motorsport

Zdroj: FSAE.com Forums: Any team install NOS on your car?. [online]. [cit. 2013-01-05]. Dostupné z: <http://fsae.com/eve/forums/a/tpc/f/125607348/m/540107973/p/2>



7 PARAMETRY MOTORU FORMULE DRAGON 3

Dragon 3 bude používat motocyklový motor Husaberg FE 570, stejně jako oba jeho předchůdci. Týmy Formule Student mohou dle pravidel využít motor o maximálním objemu 610 cm^3 . S velkou převahou se proto využívají motory motocyklové, které mají dobrý poměr výkonu, hmotnosti a rozměrů.

Nejvíce se v současné době používají motory čtyřválcové, ale stále častěji se lze setkat i s motory jednoválcovými. Čtyřválcové motory mohou dosahovat v sériové podobě výkonu přibližně v rozmezí 70 až 90 kW. Jednoválcové motocykly 35 až 45 kW. Pravidla Formule Student upravují vstup vzduchu do motoru restriktorem o průměru 20 mm pro vozidla poháněná benzínem a 19 mm pro palivo E-85. Tyto rozměry jsou podstatně menší, než obvykle mají sériové motocykly. Výkon tedy bude o několik jednotek kilowatt snížen. Výhodou jednoválcového motoru je jeho nižší hmotnost (cca o 20 kg oproti čtyřválcovému) a menší rozměry. Z nižšího výkonu plyne také menší namáhání hnacího ústrojí (poloosy, řetěz apod.). Kompromisem může být použití dvouválcového motoru, ovšem nabídka v kubatuře do 610 cm^3 je velmi omezená.

Tab. 1 Příklady nejběžněji používaných motorů v soutěži Formule Student

Jednoválcové motory	Dvouválcové motory	Čtyřválcové motory
KTM 450 EXC	Aprilia RXV 450	Honda CBR 600 RR
Husaberg FE 570	Aprilia RXV 550	Yamaha YZF R6
Yamaha WR 450 F		Kawasaki ZX-6R
Honda CRF 450 X		Suzuki GSX-R 600
Suzuki RMX 450 Z		Honda CB 600F
		Yamaha FZ6

Na začátku celého projektu Formule Student na VUT v Brně byl zvolen jednoválcový motor z motocyklu Husaberg FE 570. Čím se odlišuje od svých konkurentů, je sklon válce v úhlu 70° od vertikální roviny, tzv. ležatý motor. Mezi další méně častá řešení pro motocykly typu enduro je hydraulické ovládání spojky. Příprava směsi paliva se vzduchem je zde řešena vstřikováním benzínu do sacího potrubí. Objem tohoto motoru je vyšší než u ostatních výrobců, a více tak využívá maximálního povoleného limitu pro objem motoru dle pravidel Formule Student. Motocykl Husaberg FE 570 je na českém trhu spíše raritou, je obtížné koupit samotný motor a bazarové náhradní díly se vyskytují velmi zřídka. Od modelového roku 2013 již tyto motory nemají tzv. ležaté válce. Do budoucna je vhodné zvážit použití jednoválcového motoru jiného výrobce, případně přejít na motor víceválcový.



7.1 ZÁKLADNÍ PARAMETRY MOTORU

Tab. 2 Specifikace sériového motoru [10]

Motor	čtyřdobý jednoválec
Chlazení	vodní
Objem	565,5 cm ³
Vrtání	100 mm
Zdvih	72 mm
Kompresní poměr	11,8:1
Rozvod	OHC
Výkon	46 kW
Krouticí moment	58 Nm

7.2 KLIKOVÝ MECHANISMUS

Tab. 3 Parametry klikového mechanismu a pístu [10]

Délka ojnice	120,8 mm
Počet hlavních ložisek	2
Počet pístních kroužků	2 (těsnící a stírací)
Materiál pístu	kovaný z lehkých slitin

7.3 ROZMĚRY VENTILŮ

Tab. 4 Základní rozměry ventilů [11]

Počet ventilů	4
Průměr sacích ventilu	38 mm
Průměr výfukových ventilu	32 mm
Zdvih sacích ventilů	10 mm
Zdvih výfukových ventilů	8,6 mm
Průměr dříku sacích ventilů	6 mm
Průměr dříku výfukových ventilů	5 mm

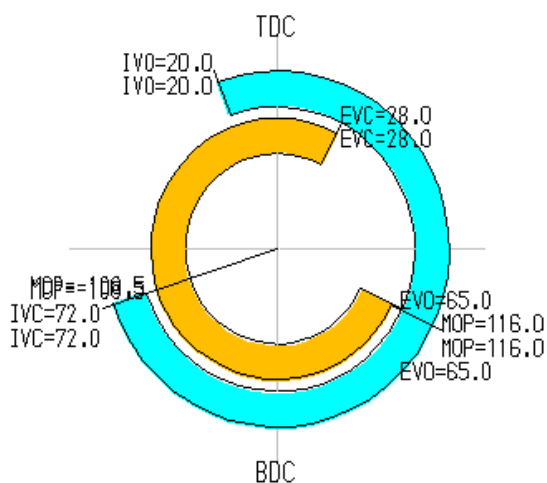


7.4 ČASOVÁNÍ VENTILŮ

Pohon je zajištěn pomocí ozubeného řetězu a vahadlem s kladničkou pro snížení třecích ztrát. [7]

Tab. 5 Časování ventilů [10]

Úhel otevření sacích ventilů	20° před HÚ
Úhel uzavření sacích ventilů	72° po DÚ
Celkový úhel otevření sacích ventilů	272°
Úhel otevření výfukových ventilů	65° před HÚ
Úhel uzavření výfukových ventilů	28° po DÚ
Celkový úhel otevření výfukových ventilů	273°

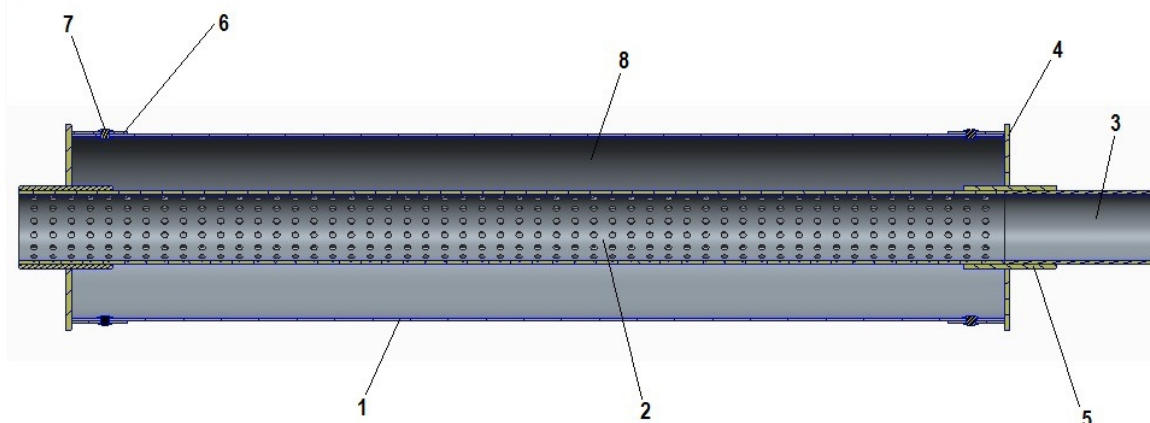


Obr. 7.1 Schéma časování ventilů (software Lotus Engine Simulation)

8 TESTOVACÍ VÝFUKOVÝ SYSTÉM

Po návrhu výfukového systému pomocí softwarových prostředků byl tento systém fyzicky vyroben za účelem porovnání a otestování. Cílem bylo ověřit správnost softwarového modelu a porovnat výsledky. Výfuk byl namontován na formuli Dragon 2, protože v této fázi ještě nebyl Dragon 3 v takovém stupni výroby a sestavení, kdy by jej bylo možné využít pro měření. Motory jsou však u obou evolucí stejné, takže shodnost výsledků je zaručena. Tento výfukový systém byl vyroben pouze za účelem testování a formule Dragon 3 jej nebude ve své finální podobě používat. Na jeho základě a z dat zjištěných při jeho testování bude pro Dragon 3 vyroben výfukový systém na míru firmou Creptus s.r.o., která se výrobou výfuků pro motocykly zabývá a s týmem TU Brno Racing spolupracovala již při vývoji Dragonu 2.

Důvodem, proč bylo přistoupeno k výrobě tohoto testovacího systému, je ověření úrovně hluku. Podle pravidel soutěže Formula Student (kap. 5.3) nesmí úroveň hluku přesáhnout 110 dBA. Dragon 2 procházel na závodech tímto omezením jen velmi těsně. Zároveň docházelo k „vypalování“ tlumící vlny a hluk se tak postupně stále zvyšoval. Dle pravidel mají techničtí komisaři právo kdykoliv během soutěže hluk přeměřit znovu a pokud vozidlo neprojde, nebude mu umožněno pokračovat dále v soutěži, dokud nebude závada odstraněna. Je nutné se těmto problémům vyhnout, a proto bude také testováno několik variant tlumiče výfuku a alternativní tlumící vlna. Výsledky budou sloužit jako podklady pro výrobu finální verze výfukového systému.



1 - vnější obal tlumiče, 2 – děrovaná trubka, 3 - trubka svodu výfuku, 4 – víko tlumiče, 5 – nátrubek, 6 – osazení víka, 7 – nýt, 8 – prostor vyplněný tlumící vatou

Obr. 8.1 Návrh testovacího tlumiče výfuku v softwaru Creo Parametric

8.1 VÝROBA TESTOVACÍHO VÝFUKOVÉHO SYSTÉMU

Pro potřeby výroby testovacího výfuku byly nakoupeny komponenty uvedené v Tab. 6.

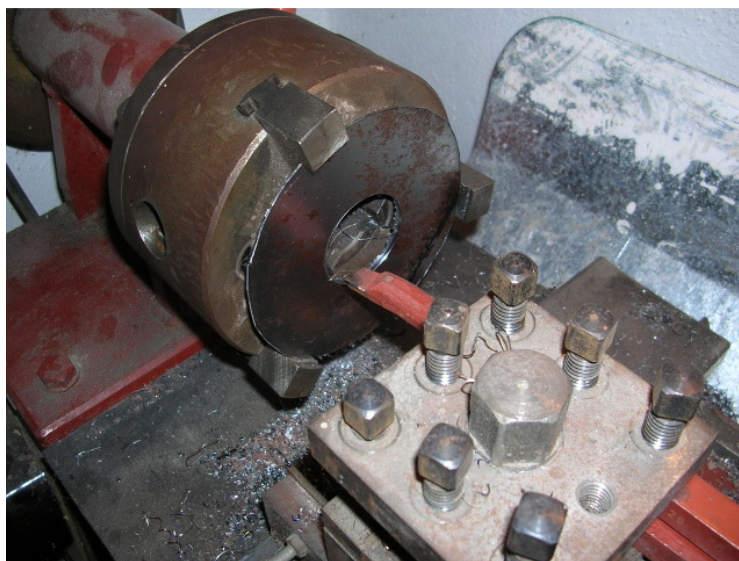
Tab. 6 Jednotlivé komponenty pro výrobu testovacího výfukového systému

Trubka - koleno	Ø 40 mm (na rozšířené straně vnitřní, na opačné vnější), ohyb 90°
Trubka - přímá	Ø 40 mm (na rozšířené straně vnitřní, na opačné vnější), délka 1 m
Trubka - děrovaná	Ø 40 mm (vnější), délka 1 m
Spona (2x)	Ø 42 mm
Vnější roura tlumiče	Roura Ø 100 mm (vnější), délka 1 m
Tlumící vata	Čedičová vlna tl. 30 mm, 4 m ²



Obr. 8.2 Díly pro výrobu testovacího výfuku

Počáteční délka tlumiče byla navržena na 500 mm, takže vnější roura byla rozříznuta na dvě poloviny. Pro víka tlumiče byl použit plech o tloušťce 2 mm. Nejprve byl hrubě vystřižen základní tvar a vyvrtán středový otvor. Do této díry byl vsazen šroub s maticí, za který byl poté v soustruhu uchycen ve sklíčidle. Tímto způsobem bylo možné dříve vystřižený vnější tvar upravit do přesného rozměru. Vnitřním nožem byl pak otvor zvětšen do požadovaného průměru (Obr. 8.3).



Obr. 8.3 Soustružení vnitřního průměru víka tlumiče

Osazení na víka byla vystřížena z plechu, obtočena do průměru shodného s vnějším průměrem vík a spojena tvrdým pájením (Obr. 8.4) Tento způsob spojování materiálu byl zvolen jako nejvhodnější. Měkkou pájku nebylo možné použít z důvodu vysokých teplot výfukových plynů a svařování bylo zamítnuto kvůli pravděpodobnému zkroucení tenkých plechů.



Obr. 8.4 Víko tlumiče (spojeno tvrdým pájením)

Dalším krokem bylo vyrobení dvou krátkých kusů trubek, které budou také připájené k víkům a bude do nich vsazena děrovaná trubka tlumiče a svod výfuku. Původním záměrem bylo uchytit víka k vnějšímu obalu tlumiče pomocí samořezných šroubů a zajistit tak jednoduše rozebíratelné spojení. Toto řešení se ale neosvědčilo z důvodu malé tloušťky vnější roury, takže bylo nutné přistoupit k nýtování, které se běžně u tlumičů používá. Rozmontování je však v tomto případě pracnější, protože se náty musí odvrátat. Na Obr. 8.5 je zachycena výroba děr víka (i s výše zmíněným nátrubkem) na stojanové vrtačce.



Obr. 8.5 Vrtávání děr do víka tlumiče

Příruba na výfukový svod byla vyrobena z plechu tloušťky cca 3,5 mm. Nejprve byl opět vyřezán přibližný základní tvar, vyvrtán středový otvor, do kterého byl umístěn šroub s maticí, za nějž byla příruba upevněna v soustruhu. Středový otvor byl axiálně upíchnut do přibližného průměru a poté zvětšen do přesného rozměru vnitřním nožem. Následně byly vyvrtány dvě díry pro šrouby a celkový vnější tvar upraven do výsledné podoby (Obr. 8.6). Příruba byla se svodem spojena svařováním.



Obr. 8.6 Příruba výfukového svodu

Jako tlumicí materiál do tlumiče byla použita izolační rohož Isover Orstech DP 80 [12], která je primárně určená pro izolace potrubí a technologických zařízení, má vysokou teplotní odolnost a velmi dobrou pohltivost zvuku. Tlumicí vata určená do výfuků motocyklů se u formule Dragon 2 neosvědčila, protože docházelo k jejímu častému vypalování, a tedy zvyšování hluku.



Obr. 8.7 Vstupní část testovacího tlumiče výfuku



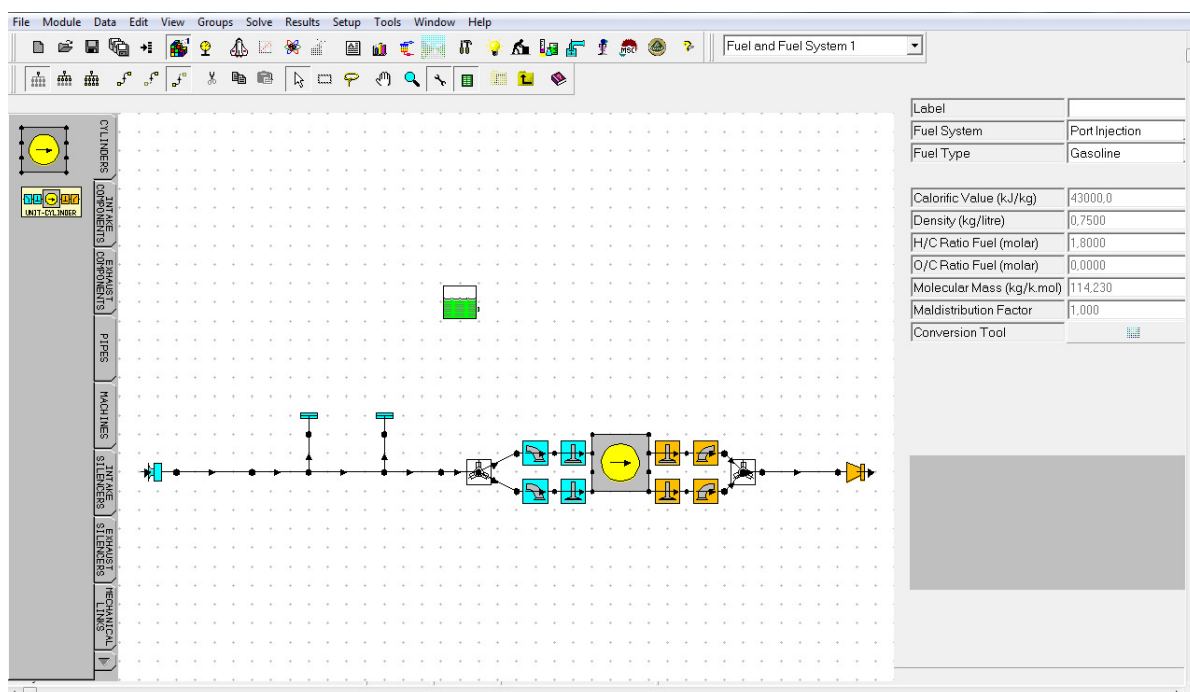
Obr. 8.8 Výstupní část testovacího tlumiče výfuku



9 LOTUS ENGINE SIMULATION

Při návrhu a optimalizaci výfukového potrubí budu využívat software Lotus Engine Simulation. Pomocí tohoto programu je možné počítat ustálené i přechodové režimy motorů dvoudobých i čtyřdobých. Obdobné funkce nabízí také GT-POWER Engine Simulation Software. Lotus má výhodu v tom, že mnoho hodnot je již přednastaveno, takže není nutné měřit, určovat a vyplňovat každou veličinu a program použije své standardní hodnoty. I přesto se jedná o velmi komplexní software s mnoha funkcemi. Pro tvorbu jednorozměrného modelu jsou použity komponenty jako válce, ventily, potrubí apod., které reprezentují vlastnosti reálných částí spalovacích motorů.

Model motoru Husaberg FE 570 v softwaru Lotus Engine Simulation (dále jen LES) bude vycházet z modelu, který vytvořil ve své diplomové práci Ladislav Adámek (využit pro formuli Dragon 1) [10]. Tento model využil také Tomáš Bartoš pro svou diplomovou při návrhu výfukového systému pro formuli Dragon 2 [13].



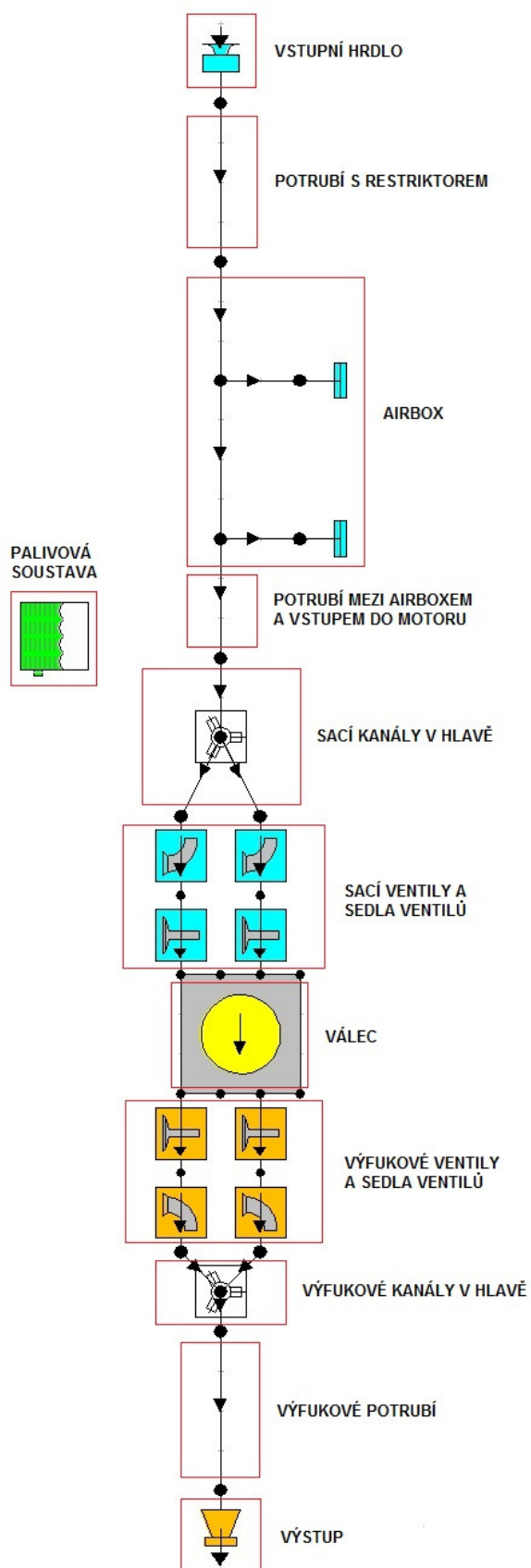
Obr. 9.1 Prostředí softwaru Lotus Engine Simulation



10 STAVBA MODELU MOTORU

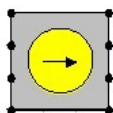
Jak již bylo uvedeno výše, budu využívat model vytvořený pro potřeby formule Dragon 1 a 2.

Na Obr. 10.1 je zobrazen model motoru i s popisky jednotlivých komponentů vytvořený v LES. Standardní model airboxu z LES je zde nahrazen soustavou alternativních komponent, které lépe vystihují skutečnou konstrukci airboxu použitou na formulích Dragon. Z důvodu vysoké výpočetní náročnosti nebude v této fázi prozatím uvažován tlumič hluku ani ohyby. Bližší popis částí modelu bude uveden v následujících kapitolách.



Obr. 10.1 Model motoru formule Dragon 3 vytvořený v LES

10.1 VÁLEC



Label	default cylinder
Bore (mm)	100,0000
Stroke (mm)	72,0000
Cyl Swept Volume (l)	0,56549
Total Swept Volume (l)	0,56549
Con-rod Length (mm)	120,80
Pin Off-Set (mm)	0,00
Compression Ratio	11,80
Clearance Volume (l)	0,052360
Phase (ATDC)	0,00
Combustion Model	
Open Cycle HT	
Closed Cycle HT	
Surface Areas	
Surface Temperatures	
Scavenge-Cylinder	

Obr. 10.2 Model válce motoru

Na Obr. 10.2 je zobrazený model válce tak, jak jej vidíme v softwaru LES. V tabulce jsou vyplněny hodnoty, které čerpají z Tab. 2 a Tab. 3 (kap. 7). V dalších kolonkách vidíme model spalování a model přestupu tepla, které budou blíže vysvětleny v následujících kapitolách.

10.1.1 TERMODYNAMICKÝ MODEL PRŮBĚHU HOŘENÍ

Informace v této kapitole čerpají ze zdroje [14].

Při hoření paliva ve válci vzniká teplo, které se přeměňuje na mechanickou práci. Důležité je nejen množství vzniklého tepla, ale také průběh hoření. Oba tyto parametry ovlivňují výkon motoru, indikovanou účinnost a mnoho dalších charakteristických parametrů. Množství tepla je závislé na množství a výhřevnosti paliva, které shoří za jednotku času a platí:

$$dQ_B = H_u dm_B [J] \quad (13)$$

Kde: H_u = výhřevnost paliva [$J \cdot kg^{-1}$]

m_B = množství paliva [kg]

Jak již bylo uvedeno, podíl na celkové vzniklé energii má také průběh hoření. Značný vliv mají vlastnosti paliva, teplota a tlak ve válci a způsob tvoření směsi. Německý inženýr Vibe poloempiricky odvodil rovnici, která je výchozím vztahem pro výpočet průběhu hoření ve válci (bezrozměrný tvar):

$$x = 1 - e^{-ay^{m+1}} [-] \quad (14)$$

Kde: a = podíl nespáleného paliva ve válci [-]

m = parametr charakteristiky hoření [-]

A platí:

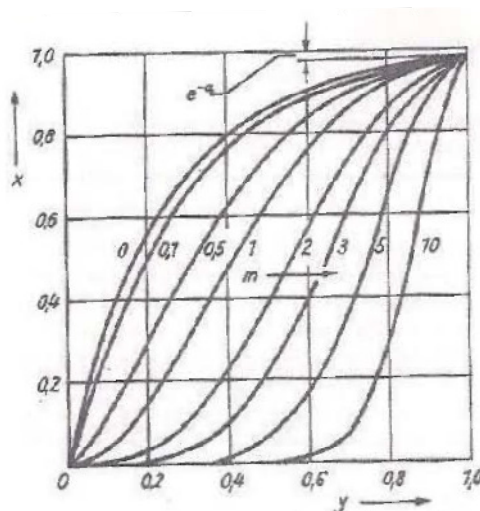
$$x = \frac{m_B(\varphi)}{m_B}, y = \frac{t(\varphi)}{t_H} [-] \quad (15)$$

Kde: $m_B(\varphi)$ = hmotnost paliva, které již shořelo [kg]

$t(\varphi)$ = čas, za který palivo shořelo [s]

m_B = celková hmotnost paliva, které shořelo za celou dobu hoření [kg]

t_H = celková doba hoření [s]



Obr. 10.3 Bezrozměrná funkce prohořívání paliva ve válci - Vibeho vztah pro různá „m“

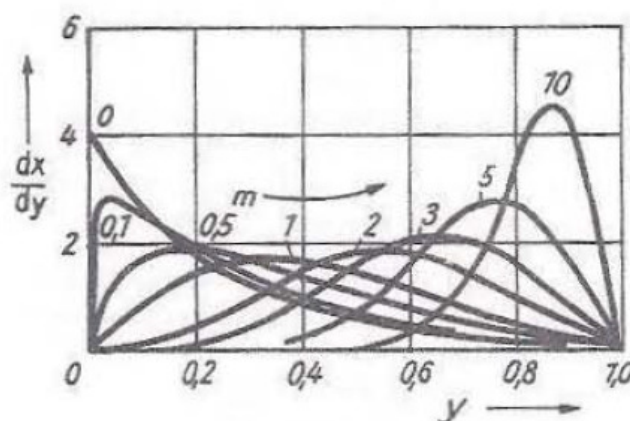
Zdroj: PIŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J.. Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů: Určeno pro posl. fak. strojní. Vyd. 1. Brno: VUT, 1991, 129 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0368-3. Str. 98

Na Obr. 10.3 je znázorněn podíl z celkového spáleného množství paliva v závislosti na časovém podílu z celkové doby hoření. Na počátku hoření je y a x rovno 0. Na konci hoření je $y=1$ a podíl spáleného z celkového přivedeného paliva $x=1-e^{-a}$.

Velikost x na konci hoření odpovídá chemické účinnosti spalování μ_{ch} . Vztah mezi ztrátovým součinitelem a a zmíněnou chemickou účinností je:

$$a = -\ln(1 - \mu_{ch}) \quad (16)$$

Na Obr. 10.4 je znázorněna intenzita hoření pomocí dy/dx . Rozdíly v intenzitě během hoření paliva mají výrazný vliv na účinnost přeměny energie ve spalovacích motorech.



Obr. 10.4 Průběh hoření (intenzita) - Vibeho funkce pro různá „m“

Zdroj: PIŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J.. Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů: Určeno pro posl. fak. strojní. Vyd. 1. Brno: VUT, 1991, 129 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0368-3. Str. 98

Vibeho funkce tvoří základ při modelování průběhu hoření ve spalovacích motorech. Pro její přesné využití u konkrétních motorů je vhodné mít i experimentálně zjištěné podklady. Mezi další způsoby zjišťování průběhu hoření patří například metody založené na změření průběhu vstřiku paliva do spalovacího prostoru.

Tab. 7 Výchozí hodnoty pro různá paliva v Lotus Engine Simulation

Palivo	a	m
Benzín	10	2
Nafta	6,9	0,5
Metan	5	2,2
Metanol	10	2

Pro další práci využijí výchozí hodnoty z LES. Palivo pro formuli Dragon 3 bude benzín, takže platí $a = 10$ a $m = 2$.

10.1.2 TERMODYNAMICKÝ MODEL PŘESTUPU TEPLA VE VÁLCI

Informace v této kapitole čerpají ze zdroje [14].

Při spalování v motoru dochází k výměně tepla mezi náplní válce a stěnami spalovacího prostoru. Vznikají tepelné toky, které se během procesu spalování výrazně mění. Obecně platí, že při vysokých teplotách plynu teplo přechází z plynu do stěn a při nižších teplotách naopak, tedy že plyn ve válci je ohříván stěnami. Tento přestup tepla znamená energetické ztráty a snížení celkové účinnosti, navíc při ohřevu média také zhoršení plnicí účinnosti motoru.

Mezi stěnami válce a náplní dochází k přestupu tepla (tzv. přenos tepla konvekci) a lze jej popsat Newtonovým zákonem, podle něž pro tepelný tok platí:



$$\dot{Q} = \alpha \cdot A_w \cdot (T_w - T) [W] \quad (17)$$

Kde: α = součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

A_w = okamžitá velikost povrchu pracovní stěny [m^2]

T_w = teplota stěn válce [K]

T = teplota náplně válce [K]

Popisem součinitele přestupu tepla se zabývalo několik autorů, pro výpočty v softwaru LES budu využívat vztahy, které odvodil Woschni. Jeho postup při výpočtu součinitele přestupu tepla obecně dává velmi dobré výsledky a je proto nejvíce využíván. LES nabízí také vztahy podle Annanda a Eichelberga.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla podle Woschniho využívá LES vztah:

$$\alpha = \frac{A \cdot p_v^{0,8}}{T^{0,55} \cdot D_v^{0,2}} \left(B \cdot \bar{V}_p + C \cdot \bar{U}_{swirl} + D \cdot \frac{T_{soc} \cdot V_z \cdot (p_v - p_{motor})}{p_{soc} \cdot V_{soc}} \right)^{0,8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (18)$$

Kde: A, B, C, D = Woschniho koeficienty [-] (viz Tab. 8)

p_v = tlak ve válci [Pa]

T = teplota ve válci [K]

V_z = zdvihový objem [m^3]

D_v = vrtání [m]

V_p = střední pístová rychlost [$m \cdot s^{-1}$]

U_{swirl} = střední rychlost víru směsi ve válci [$m \cdot s^{-1}$]

T_{soc} = teplota ve válci na počátku spalování [K]

p_{soc} = tlak ve válci na počátku spalování [Pa]

V_{soc} = objem válce na počátku spalování [m^3]

p_{motor} = kompresní tlak [Pa]

Tab. 8 Woschniho koeficienty pro nepřímé vstřikování benzínu dle LES

	Woschniho koeficienty			
	A	B	C	D
Otevřený cyklus	3,26	9,12	0,834	-
Uzavřený cyklus	3,26	4,56	0,616	0,00324



Woschniho koeficienty berou v potaz střední pístovou rychlost, rychlost víření směsi a tlakový rozdíl (pro uzavřený cyklus).

Přenos tepla mezi náplní a stěnami válce je v LES počítán pro každý přírůstek úhlu natočení klikového hřídele, což vyžaduje znalost velikosti plochy stěny, teploty stěny a koeficientu přenosu tepla.

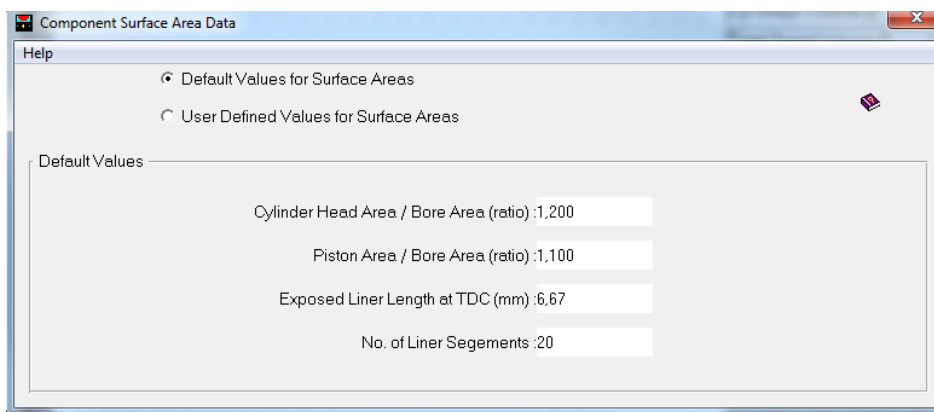
Protože není softwaru možno dodat přesnou geometrii spalovacího prostoru, je nutné specifikovat velikost stěn jinými způsoby. V LES je toto řešeno definováním plochy hlavy a pístu jako faktorů plochy vrtání válce. Tuto volbu je možno ponechat ve výchozím nastavení, nebo může uživatel zadat vlastní hodnoty, a to pro všechny válce, nebo pro každý zvlášť.

Využiju výchozí hodnoty LES pro zážehové motory s nepřímým vstřikováním paliva uvedené v Tab. 9.

Tab. 9 Výchozí hodnoty LES pro určení velikosti povrchu pro přestup tepla

Způsob přípravy směsi	Poměr - hlava/vrtání	Poměr - píst/vrtání
Karburátor	1,2	1,1
Nepřímé vstřikování	1,2	1,1
Přímé vstřikování	1,0	1,4

Poměr hlava/vrtání je poměr mezi plochou hlavy válce a plochou vrtání válce (příčným průřezem válce). *Poměr píst/vrtání* je poměr mezi plochou pístu a opět plochou vrtání válce.



Obr. 10.5 Tabulka s výchozími hodnotami v LES

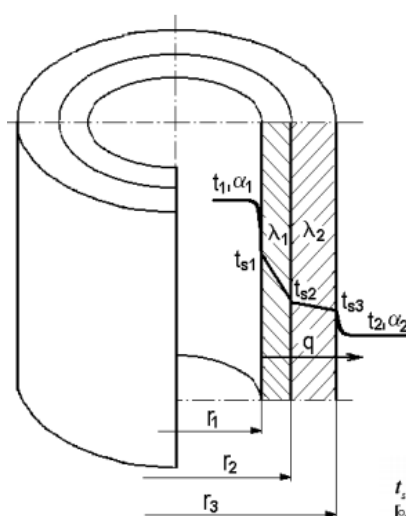
Na Obr. 10.5 vidíme kromě výše zmíněných hodnot také „Exposed Liner Length at TDC“ což je velikost vložky válce, která je viditelná, když je píst v horní úvrati. Jedná se délku, proto hodnota v milimetrech. Velikost viditelné plochy vložky válce je počítána v nastavených krocích, v našem případě je jich dvacet.

Teploty stěn válce mohou být zadány uživatelem, nebo je spočítá software pomocí jednorozměrných výpočtů pro hlavu válce a vložku válce. Tloušťka stěny se předpokládá úměrná k vrtání podle vztahu $0,07 \times \text{vrtání}$. Tepelná vodivost různých materiálů je uvedena

v Tab. 10, která čerpá z LES. U motoru Husaberg je píst, hlava i vložka válce z hliníkových slitin. Přenos tepla do stěny válce je zobrazen na Obr. 10.6.

Tab. 10 Tepelná vodivost různých materiálů

Materiál	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Litina	45,0
Hliník	150,0
Ocel	48,0
Zirkon	4,1



Obr. 10.6 Znázornění přestupu tepla stěnou válce (dvěma materiály)

Zdroj: Sdílení tepla: Přenos tepla kondukcí. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. [online]. [cit. 2013-03-31]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/Termo/Sdileni_tepla/Sd%EDlen%ED-pdf/A1%20Sd%EDlen%ED-kondukcce.pdf

LES využívá pro výpočet teploty stěny válce následující vztah:

$$Q = \frac{T_w - T_k}{\left(\frac{1}{h_k} + \frac{dx_s}{k_s}\right)} [W] \quad (19)$$

Kde: T_w – teplota stěn válce [K]

T_k – teplota chladicí kapaliny [K]

h_k – koeficient přenosu tepla chladicí kapaliny [-]

dx_s – tepelná vodivost stěny válce [W.m⁻¹.K⁻¹]

k_s – tloušťka stěny válec [m]



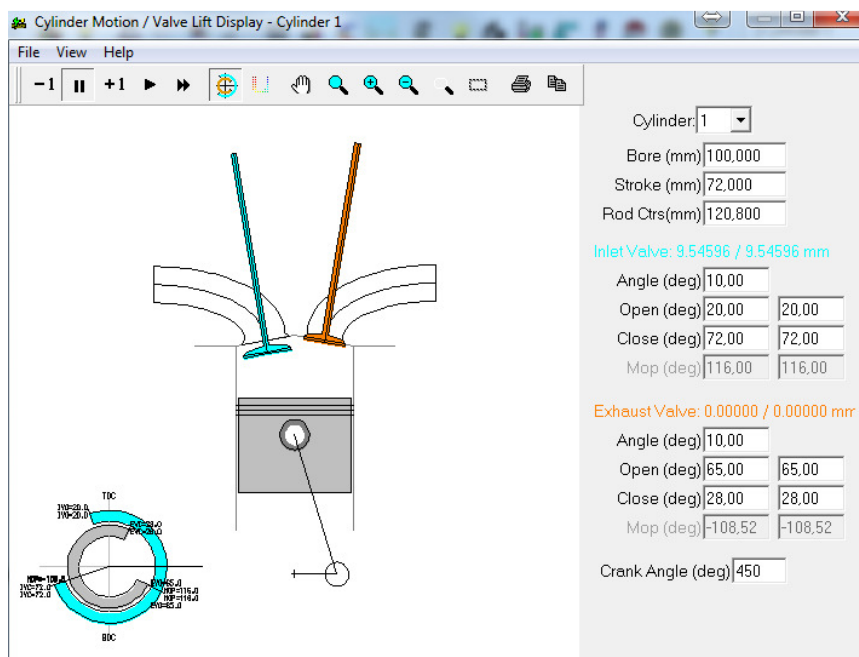
Další nabídkou u konfigurace válce v LES je „Scavenge-Cylinder“. Popisuje vyplachování válce, tzn. způsob, jakým je čerstvá směs vstupující do válce smíchána s jeho náplní. Tyto hodnoty ovlivňují výslednou objemovou účinnost motoru. Využiji model „Perfect Mixing“, který předpokládá, že směs vstupující do válce je okamžitě a homogenně smíchána se směsí ve válci. Jedná se o nejjednodušší a nejkonzervativnější model.

10.2 VENTILOVÉ ROZVODY

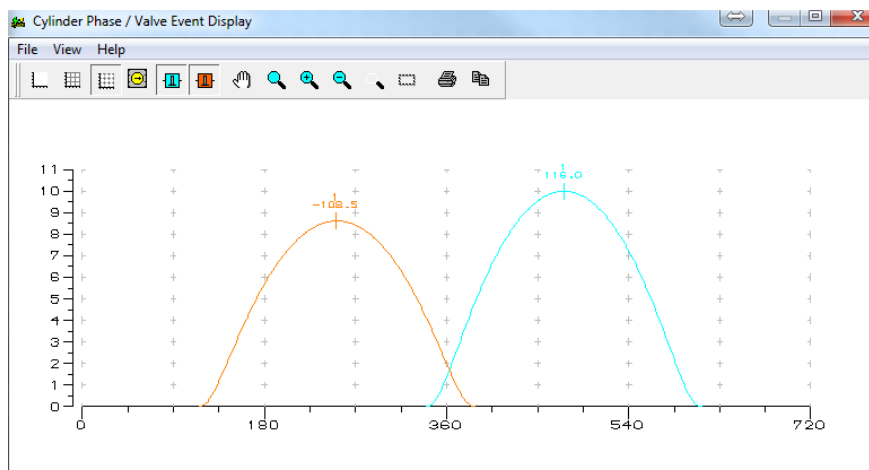
Informace v této kapitole čerpají ze zdroje [14].

Parametry ventilových rozvodů použitého motoru jsou uvedeny v kap. 7 (Parametry motoru formule Dragon 3).

Shrnutí základních rozměrů válce a rozvodů ventilů je možno zobrazit i s animací v přehledné formě pod nabídkami „Cylinder Timing Display“ (Obr. 10.7) a „Cylinder Phase Display“ (Obr. 10.8).



Obr. 10.7 Zobrazení pohybu pístu a časování ventilů v LES



Obr. 10.8 Časování ventilů (osa x - natočení klikového hřídele, osa y - zdvih ventilů)

10.3 POTRUBÍ

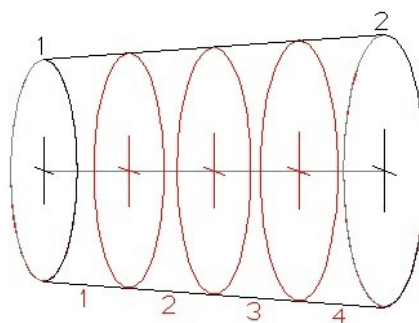
Informace v této kapitole čerpají ze zdroje [14].

Vzhledem k vysoké výpočtové náročnosti nebudou v této části uvažovány ohyby potrubí.

Tok plynu v potrubí je v softwaru LES uvažován jednorozměrný, nevazký a stlačitelný. Vlastnosti potrubí jsou určeny jeho délkou, průměrem, materiálem, tloušťkou stěny, typem chlazení a třecím koeficientem.

10.3.1 ELEMENTY POTRUBÍ

Největší vliv na přesnost výpočtu (ale také časovou náročnost) má síťování potrubí. V LES je možno využít výchozích hodnot pro síťování, nebo zadat vlastní. V tom případě je doporučená délka elementů sítě 10 až 20 mm pro sací potrubí a 20 až 30 mm pro výfukové. Je nutné si uvědomit, že optimální hustota sítě závisí na otáčkách motoru. V případě prudších změn potrubí je vhodné volit hustší síť. Skokovým změnám v průměru potrubí je nejlepší se pokud možno vyhnout úplně. Jak již bylo zmíněno, LES počítá s jednorozměrným prouděním a výpočet v tomto případě velmi často nekonzverguje. Na Obr. 10.9 je zobrazeno síťování kanálu výfukového potrubí v hlavě motoru. Černě ohraničená plocha 1 značí vstup, plocha 2 výstup a červeně je naznačeno rozdělení na elementy.



Obr. 10.9 Příklad síťování potrubí (výfukový kanál)



10.3.2 MATERIÁL POTRUBÍ

LES dovoluje volbu materiálů, ke kterým jsou přiřazeny hodnoty tepelné vodivosti, hustoty a měrné tepelné kapacity. Tyto hodnoty je možno zadat ručně, v mém případě však postačí vybrat materiály z nabídky. Kanály v hlavě motoru jsou hliníkové (jsou součástí hlavy) a výfukové svody ocelové. Důležité hodnoty těchto dvou materiálů jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Vlastnosti použitých materiálů potrubí

Materiál	Hustota [kg.m ⁻³]	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Tepelná kapacita [kJ.kg ⁻¹]
Hliník	2700	204	940
Ocel	7900	48	490

10.3.3 CHLAZENÍ POTRUBÍ

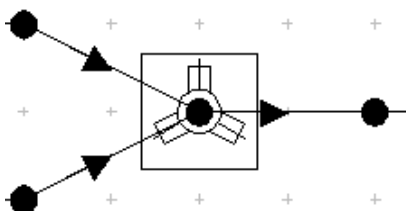
Přenos tepla ovlivňuje materiál potrubí, ale také jeho okolí. Proto LES nabízí výběr z několika chladicích médií. Pro hliníkové kanály v hlavě motoru volím, jako je tomu ve skutečnosti, chlazení vodou. Zbylá část výfukového systému je chlazená již pouze okolním vzduchem.

Tab. 12 Vlastnosti použitých chladicích médií

Materiál	Teplota média [°C]	Hustota [kg.m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla [W.m ⁻² .K ⁻¹]
Voda	100	958,6	4216	5000
Vzduch	20 (okolní vzduch)	1,3	1000	20

10.3.4 ZTRÁTOVÉ SPOJENÍ POTRUBÍ

Při spojování několika potrubí do jednoho existují v LES dvě možnosti. Výpočtově jednodušší, ale také méně přesné, je jednoduché bezztrátové spojení. Pro vysokootáčkové motory je vhodné použít ztrátové spojení, protože mnohem lépe reprezentuje realitu, ovšem za cenu vyšší výpočtové náročnosti.

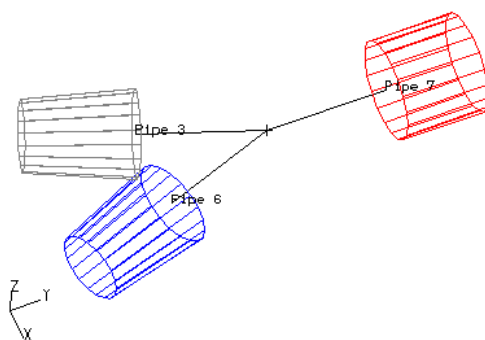


Obr. 10.10 Schematické zobrazení ztrátového spojení v LES

Uživatel zadává, které potrubí je referenční. Napojující potrubí jsou zadány úhlem, který svírají právě s referenčním potrubím.



REF1 in RED
REF2 in BLUE



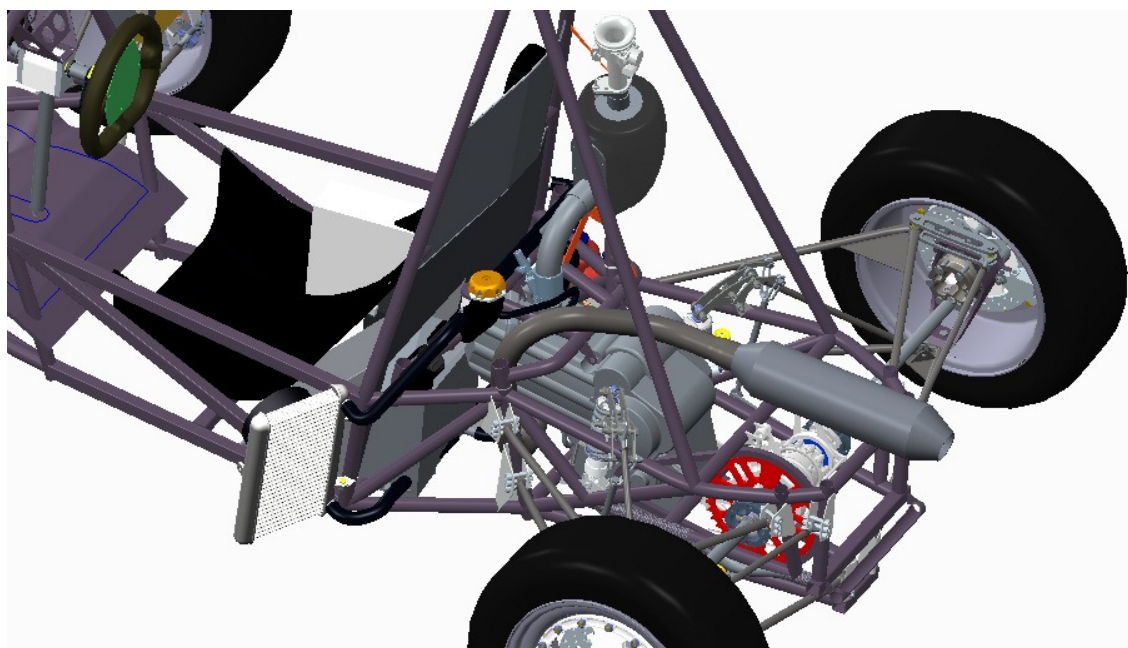
Obr. 10.11 Grafické zobrazení ztrátového spojení dvou výfukových kanálů v hlavě válce



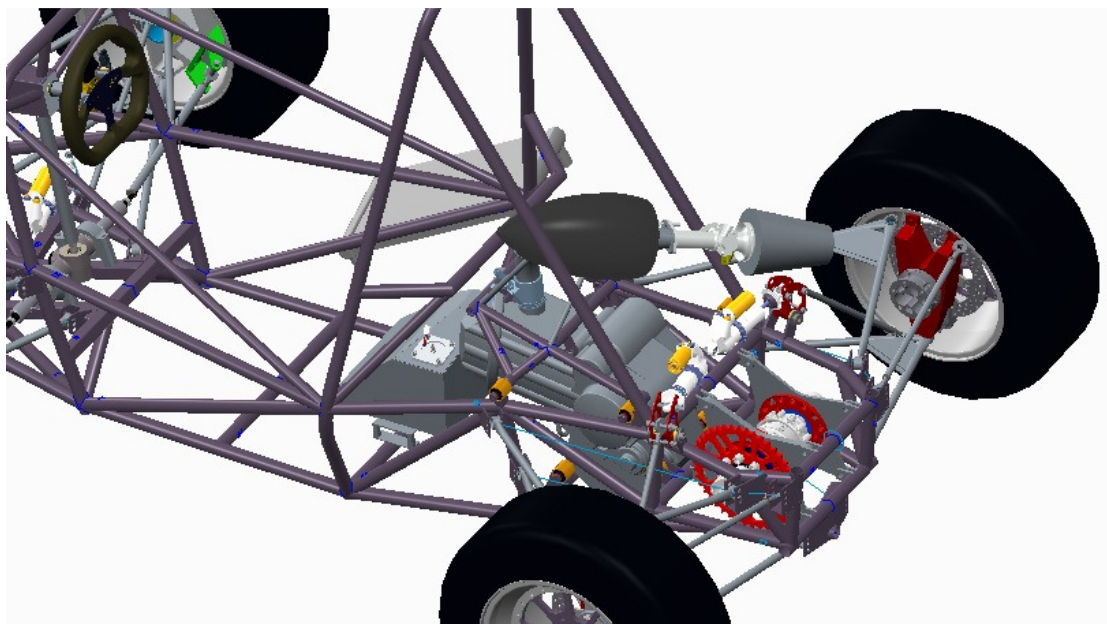
11 NÁVRH ROZMĚRŮ VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

Vzhledem k rozdílnému umístění příslušenství motoru formule Dragon 3 oproti jejímu předchůdci se změnily také zástavbové možnosti výfukového systému. Z tohoto důvodu je nutné navrhnout kompletně nové potrubí i tlumič hluku.

Do oblasti výfukového tlumiče u Dragona 2 se u formule Dragon 3 přesunuly jiné komponenty. U Dragona 2 jsou použity dva chladiče, na každé straně vozu jeden. Jak bylo v průběhu testování a závodní sezony zjištěno, chlazení motoru bylo poměrně předimenzované, proto bude u Dragona 3 použit pouze jeden chladič na pravé straně. Tímto řešením se uvolnil prostor na straně levé, jež využijí pro vedení výfukového systému. Představu o uspořádání a porovnání zástavby u formule Dragon 3 a jejího předchůdce poskytují Obr. 11.1 a 11.2.



Obr. 11.1 Konstrukční řešení zadní části formule Dragon 2



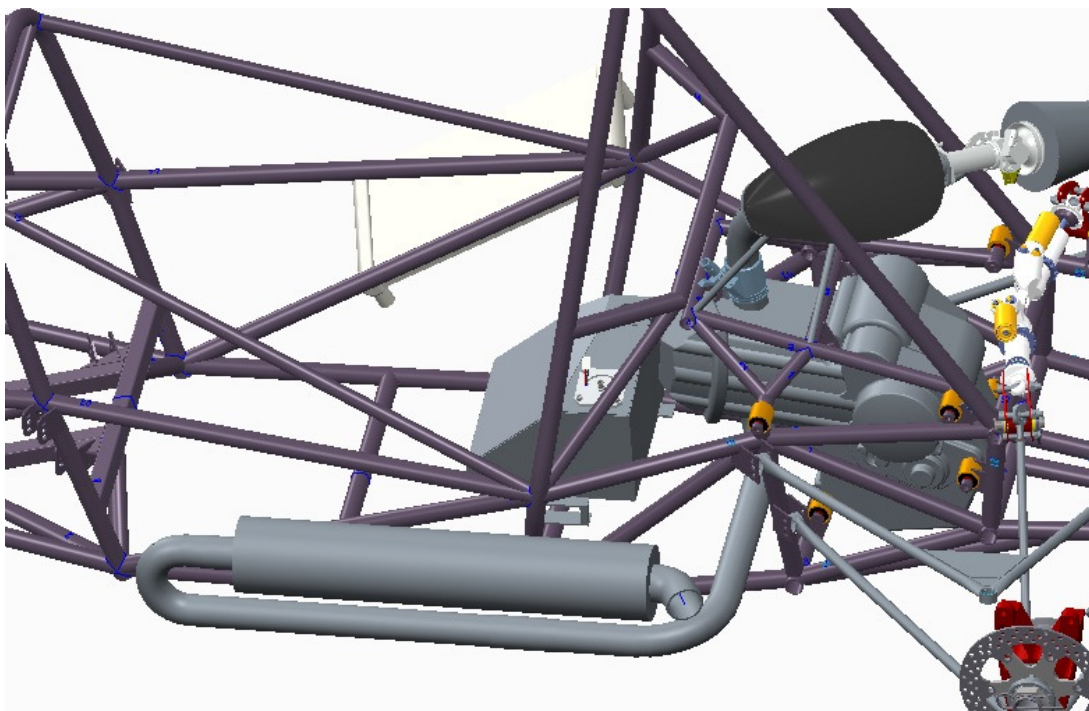
Obr. 11.2 Konstrukční řešení zadní části formule Dragon 3

Můžeme vidět, že vzhledem k uspořádání airboxu a celého sacího systému, pružící a tlumící jednotky a rámu okolo motoru již zde není možné umístit výfukový systém. Jak již bylo zmíněno, pro vedení výfukového potrubí využijí prostor na levé straně podél střední části rámu. Toto řešení přináší několik výhod. Za hlavní se dá považovat snížení těžiště díky přesunutí celého potrubí a hlavně tlumiče hluku o několik centimetrů níže. Není zde také takové omezení, co se týče délky potrubí a tlumiče, tak jako tomu je u verze Dragona 2 (pravidla Formule Student stanovují maximální vzdálenost, o kterou může výfuk přesahovat osu zadních kol). Výhodou je také zlepšený přístup k motorovým a podvozkovým částem a nehrozí zde popálení při práci okolo horkého výfuku. Jako nevýhodu se dá považovat nutnost počítat s vysokou teplotou výfuku při návrhu laminátové karoserie a také dbát na pravidla Formule Student, která říkají, že všechny části výfuku, které vystupují ze strany vozu před ochranným obloukem, musí být chráněny před kontaktem s vystupujícím řidičem nebo s osobami přistupujícími k vozu. Další nevýhodou je možný přenos tepla do prostoru řidiče.

Po určení prostorových možností je již možné přistoupit k prvotnímu konstrukčnímu návrhu, kde zjistím přibližné délky potrubí, které lze reálně použít na vozidle.

11.1 VARIANTA 1 – DLOUHÉ POTRUBÍ

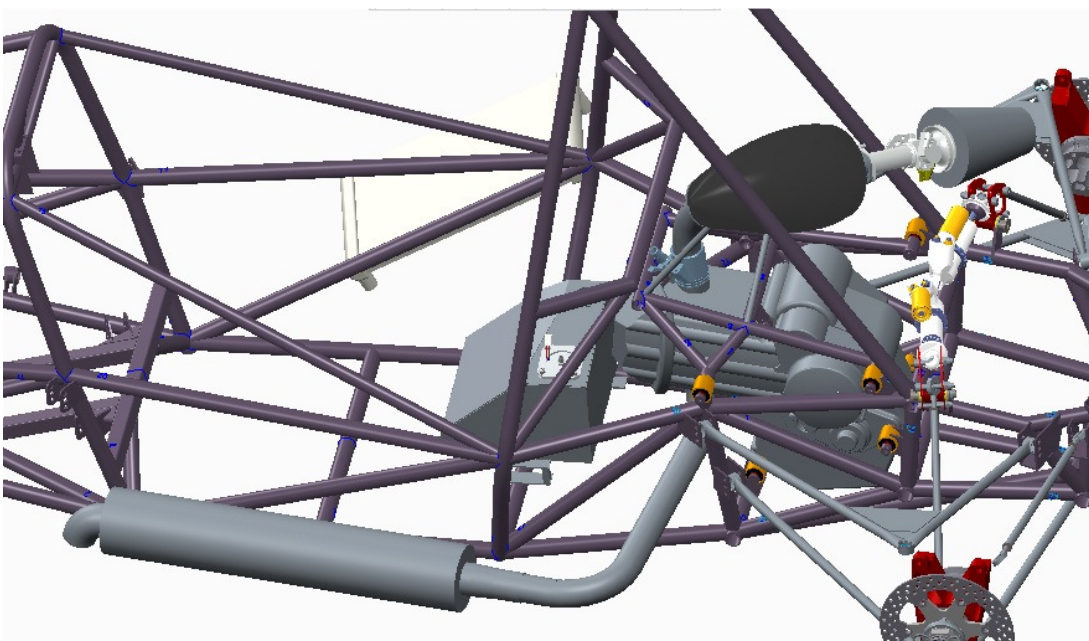
Na Obr. 11.3 je znázorněn prvotní návrh dlouhé varianty výfukového potrubí. Pro účely simulace v softwaru Lotus Engine Simulation je nutné znát rozmezí, v jakém se může pohybovat celková délka potrubí. V tomto případě je to od cca od 1150 do 1390 mm (zjištěno pomocí CAD softwaru Creo Parametric). Délku omezují součásti předního zavěšení a také není žádoucí, aby ústí tlumiče hluku mířilo na zadní pneumatiku.



Obr. 11.3 Počáteční návrh - dlouhé potrubí

11.2 VARIANTA 2 – KRÁTKÉ POTRUBÍ

Druhou možností je odebrání 180° ohybu a vytvoření přibližně o polovinu kratšího potrubí, jak je možno vidět na Obr. 11.4. Zde se mohou délky potrubí pohybovat v rozmezí 550 – 700 mm. Výhodou tohoto řešení je nižší těžiště a také menší výrobní cena.



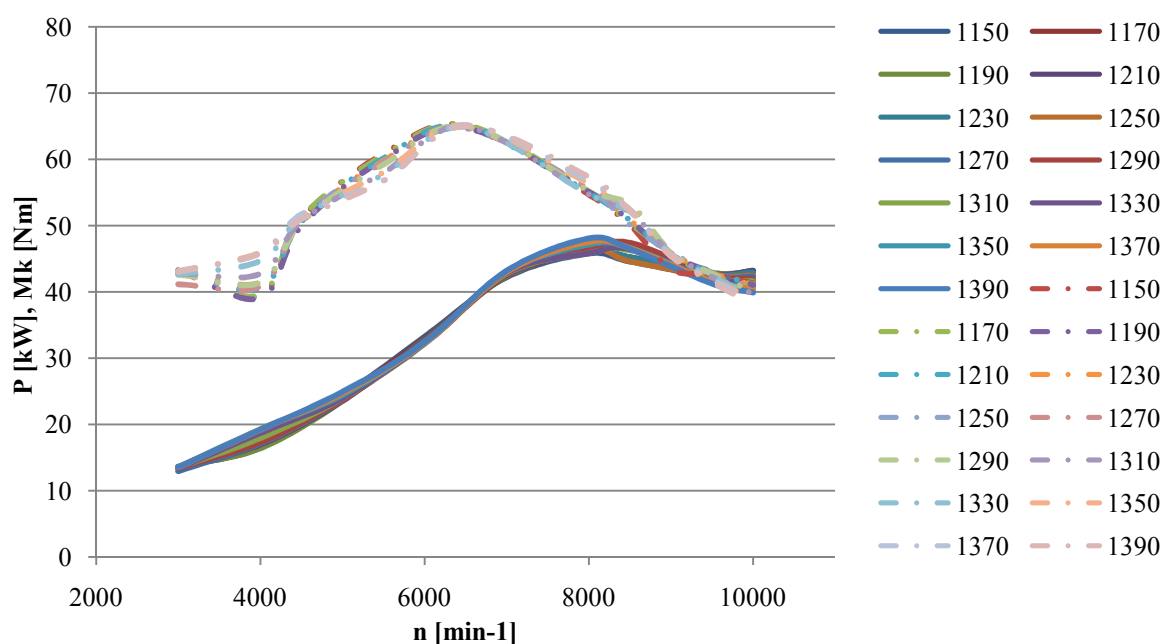
Obr. 11.4 Počáteční návrh - krátké potrubí



Rozměry z obou variant budou použity v následujících kapitolách při výpočtech v Lotus Engine Simulation. Výhodnější varianta z hlediska výkonových parametrů bude vymodelována v softwaru Creo, vytvořena výrobní dokumentace a zadána do výroby.

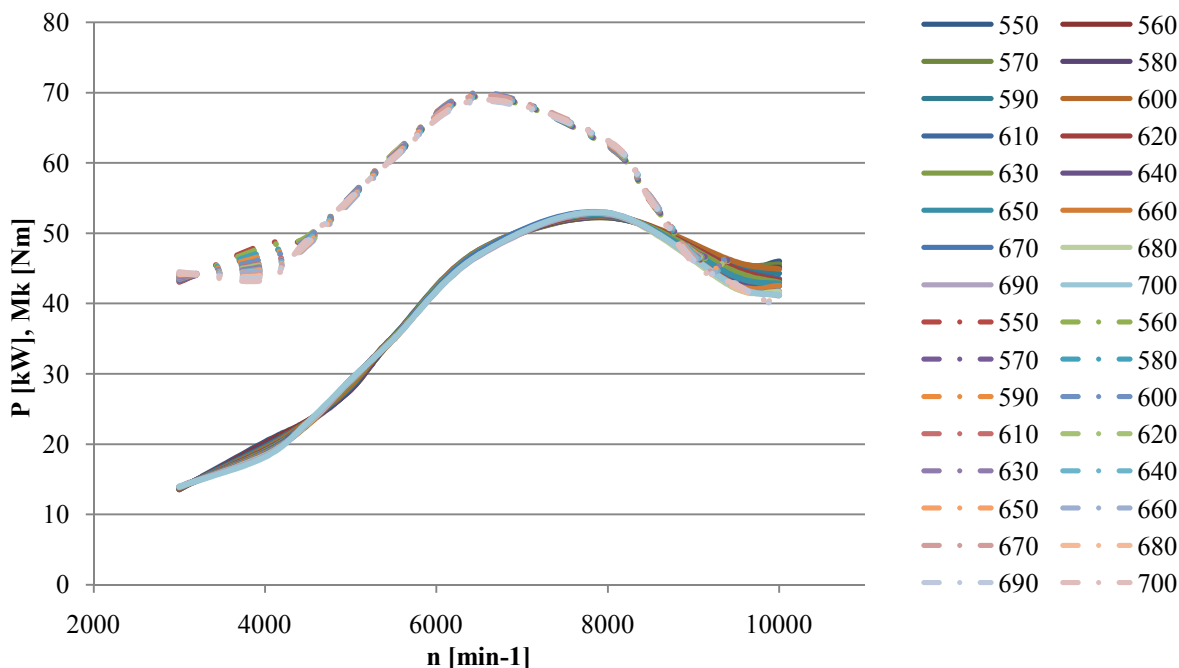
11.3 POROVNÁNÍ VARIANT 1 A 2

Pomocí nástroje Parametric Tool v LES jsem provedl výpočet výkonu a krouticího momentu pro obě varianty. Pro dlouhé potrubí od 1150 do 1390 mm s krokem 20 mm. U krátkého potrubí bylo rozmezí 550 – 700 mm s krokem 10 mm. Tyto simulace slouží pouze k hrubému porovnání variant. Výhodnější z nich se budu následně zabývat blíže.



Graf 1 Výkon (plná čára) a krouticí moment (čerchovaná) varianty 1

Pro dlouhou verzi potrubí můžeme vidět, že maximální výkon se pohybuje v rozmezí 45,5 do 48 kW v otáčkách přibližně 8000 – 8500 min^{-1} . V oblasti okolo otáček 4000 min^{-1} pozorujeme propad výkonu i krouticího momentu u kratších potrubí. Naopak u delších se objevuje propad až v oblasti od 5500 do 6000 min^{-1} . Pro použití ve formuli Dragon 3 se jeví výhodnější kratší délky (cca od 1150 do 1200 mm), kde snížení výkonu okolo 4000 min^{-1} nehraje roli, protože v těchto otáčkách se při závodním tempu motor nepohybuje.

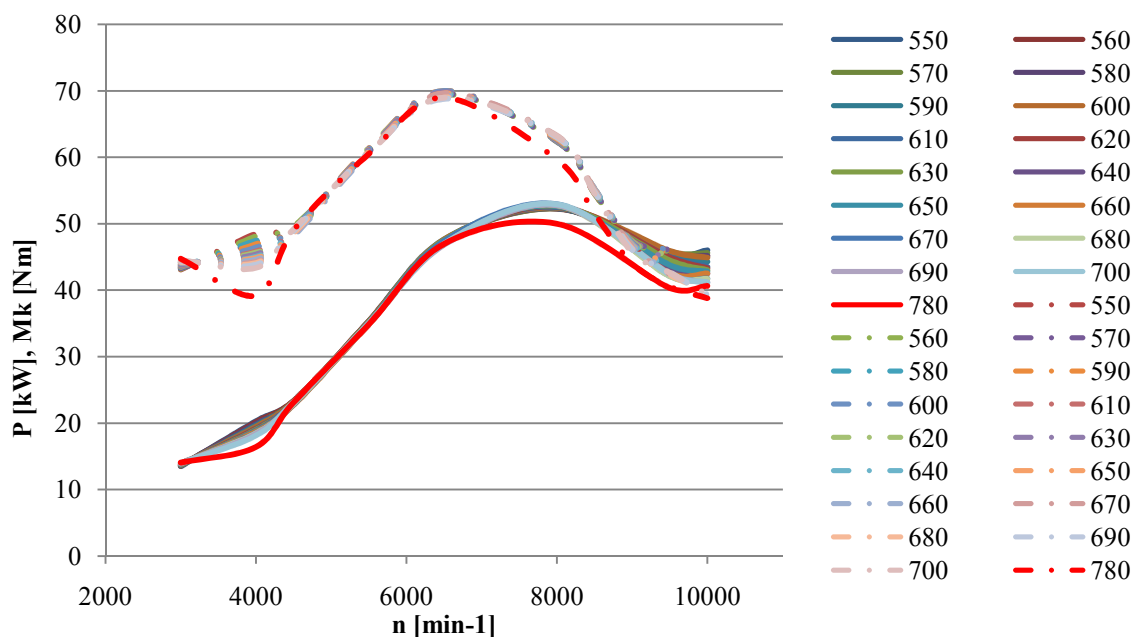


Graf 2 Výkon (plná čára) a krouticí moment (čérchovaná) varianty 2

U varianty č. 2 pozorujeme dosažení vyššího výkonu i krouticího momentu, a to v celém otáčkovém spektru. V oblasti otáček 5500 min^{-1} není žádný znatelný pokles, stejně tak propad okolo 4000 min^{-1} již není tak výrazný a u délek 550 až 650 mm ho lze zcela eliminovat.

Varianta 2 má kromě výše zmíněných výkonových benefitů také několik dalších – snížení těžiště, nižší hmotnost celého systému, s čímž také souvisí menší nároky na uchycení k rámu a v neposlední řadě také menší výrobní náklady. Z těchto důvodů je výhodnější varianta č. 2 (krátké potrubí bez ohybu o 180°) a budu se ji zabývat dále.

Na Grafu 3 je porovnáno potrubí použité na formuli Dragon 2 (délka 780 mm) s variantou č. 2 pro Dragona 3. V oblasti okolo otáček 4000 min^{-1} pozorujeme propad, který však není z hlediska reálného použití na závodech podstatný. Ve středním pásmu otáček jsou rozdíly poměrně malé. Okolo 6300 min^{-1} dosahují obě formule svého maximálního krouticího momentu. Za tímto bodem ale křivky u Dragona 3 klesají pozvolněji a tento trend zachovávají téměř až do konce otáčkového spektra, s čímž samozřejmě souvisí také dosažení vyššího výkonu přibližně v 8000 min^{-1} .



Graf 3 Porovnání řešení u formule Dragon 2(780 mm) s variantou 2 pro Dragona 3

11.4 URČENÍ DÉLKY POTRUBÍ

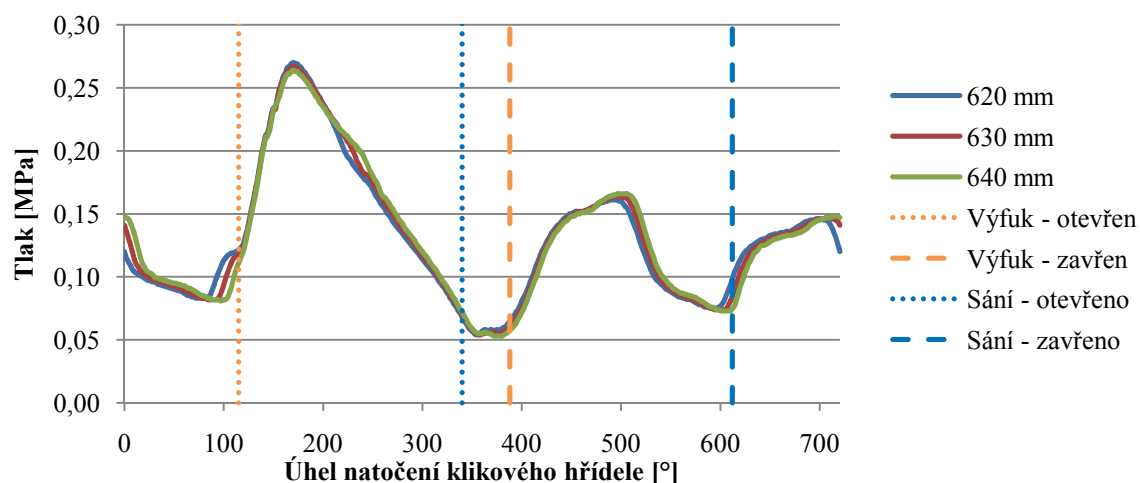
V předchozí kapitole byla vybrána jako vhodnější varianta č. 2. Nyní se jí budu zabývat blíže a určím konečnou délku výfukového potrubí s ohledem na výkonové parametry, ale i zástavbové možnosti.

V kap. 2.2 byl odvozen vzorec (8) pro výpočet rezonanční délky potrubí:

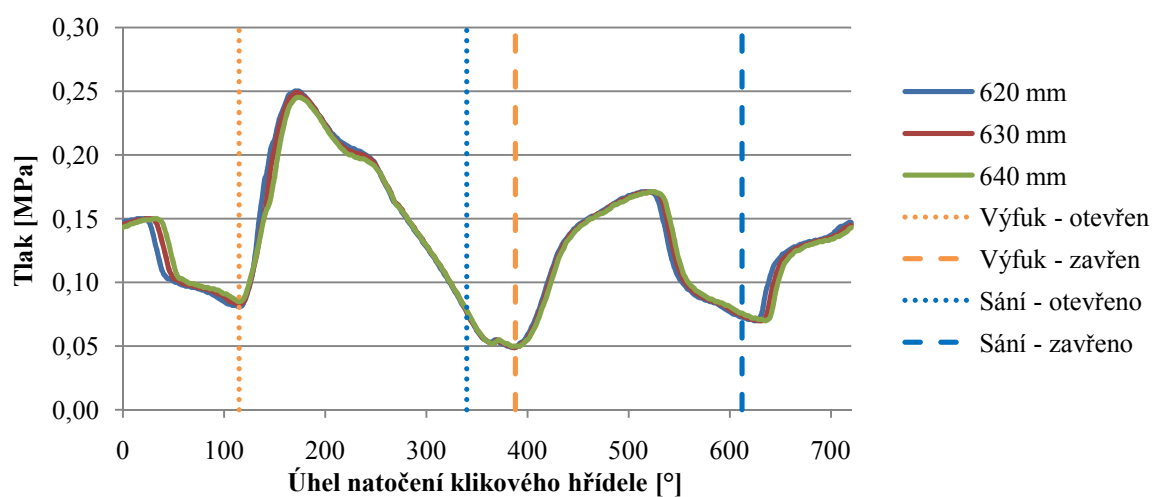
$$L = \frac{\theta_t C}{0,012N}$$

Kde za θ_t (otočení klikového hřídele, během nějž tlaková vlna dojde na konec potrubí a zpět) dosadím hodnotu 120° z literatury [3]. Rychlost zvuku C ve výfukových plynech je 574 m.s^{-1} (odečteno z LES). Vzhledem k závodnímu využití motoru se otáčky, v nichž chceme využít efektu rezonančního potrubí, pohybují v rozmezí cca $7000 - 8200 \text{ min}^{-1}$. Dosazením do vzorce (8) jsem získal užší rozmezí délek 620 až 740 mm (po odečtení délky výfukového kanálu v hlavě válce 78 mm). Vzhledem k omezeným zástavbovým možnostem se toto rozmezí dále snižuje na 620 až 700 mm.

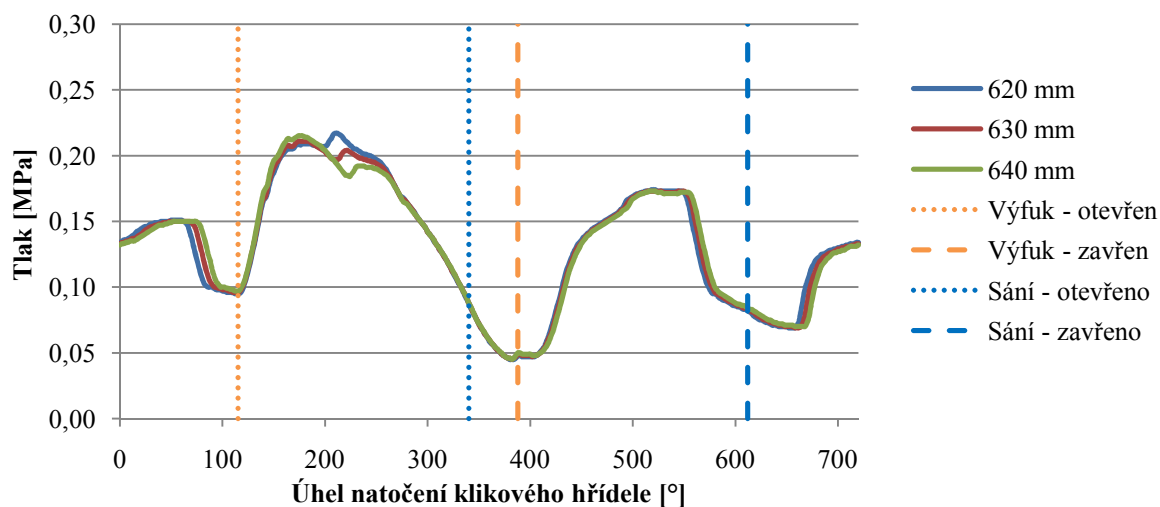
Z grafů 2 a 3 je při bližším pohledu patrné, že nejlepších výsledků dosahují délky 620, 630 a 640 mm. Pomocí .PRS Results Viewer v Lotus Engine Simulation je možno zobrazit výsledky z .prs souborů, které se vytvářejí pro každý bod, ve kterém je provedena simulace. Výsledky obsahují okamžité predikce teploty, tlaku apod. pro nastavený krok otočení klikového hřídele, a to pro každý komponent motoru (válec, sací kanál, výfukový kanál atd.). Tímto způsobem je možno zjistit, jaké délky výfukového potrubí nejlépe využívají efektu rezonančního potrubí.



Graf 4 Průběh tlaku za výfukovým ventilem pro uvedené délky potrubí v otáčkách 7000 min^{-1}



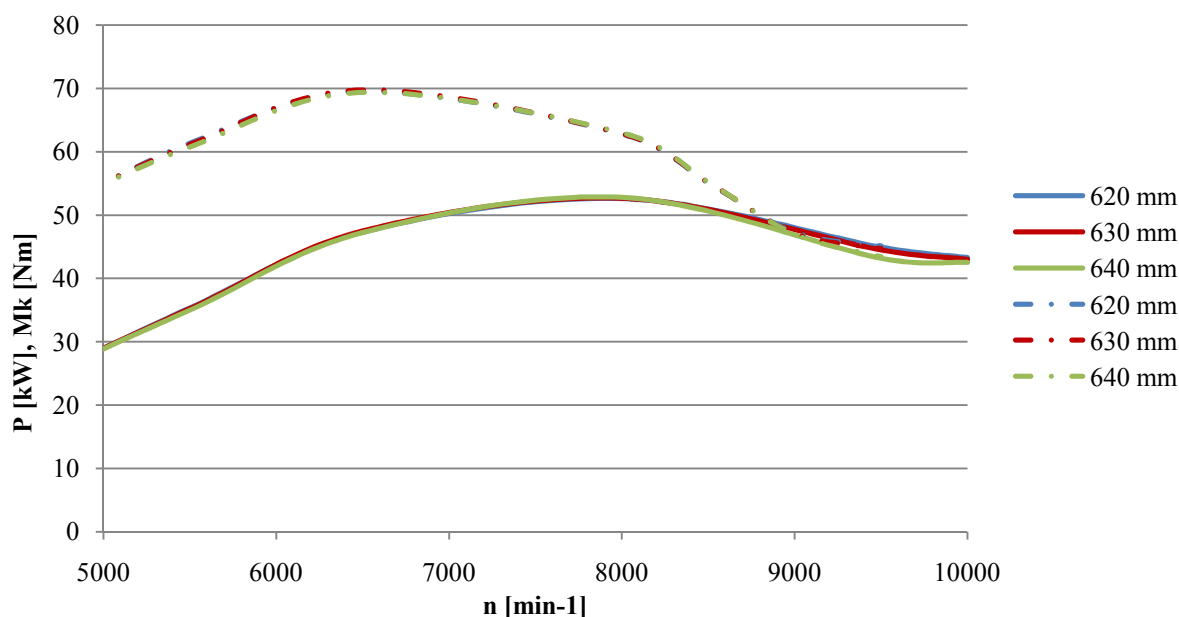
Graf 5 Průběh tlaku za výfukovým ventilem pro uvedené délky potrubí v otáčkách 7500 min^{-1}



Graf 6 Průběh tlaku za výfukovým ventilem pro uvedené délky potrubí v otáčkách 8000 min^{-1}

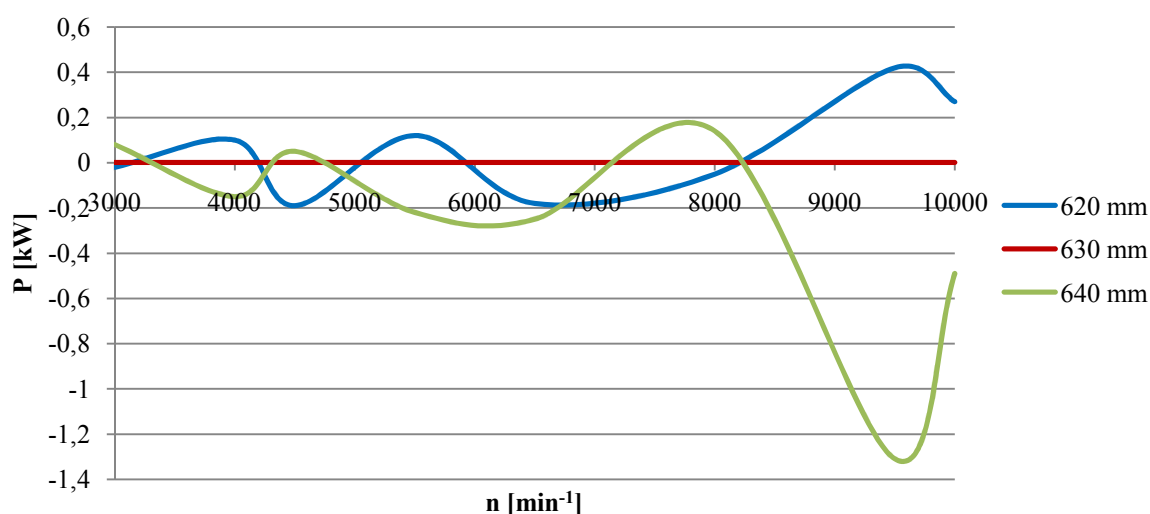


Na grafech 4, 5 a 6 jsou znázorněny tlaky za výfukovými ventily pro délky potrubí 620, 630 a 640 mm v otáčkách 7000, 7500 a 8000 min^{-1} . Tedy v takových, ve kterých by se vozidlo mělo ideálně pohybovat a kde požadujeme největší výkon. Vidíme, že podtlaková vlna přichází před uzavřením výfukových ventilů a v době otevírání ventilů sacích a iniciuje tak počátek sacího cyklu. V otáčkách 8000 min^{-1} tento jev není tak výrazný, protože podtlaková vlna přichází pozdě, kdy jsou již výfukové ventily téměř zavřeny. Podstatné jsou však rozdíly mezi uvedenými délkami potrubí, které jsou v tomto případě minimální. Proto se dále zaměřím na průběhy výkonu a krouticího momentu pro tyto tři délky v otáčkách, které nás zajímají nejvíce.

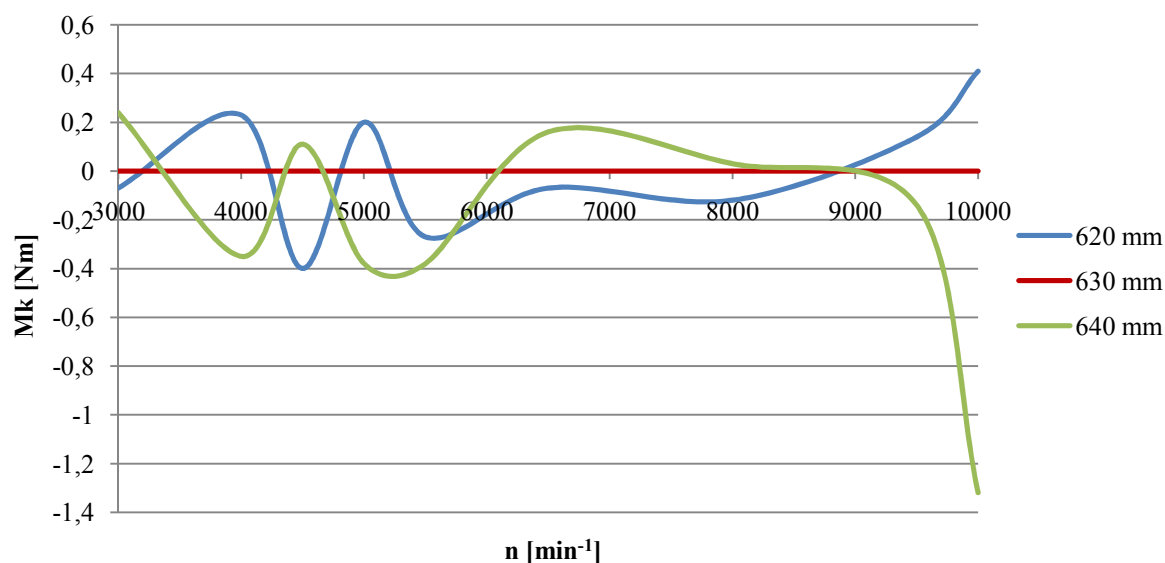


Graf 7 Blíže pohled výkonové parametry délek potrubí 620, 630 a 640 mm

Zde opět vidíme, že rozdíly jsou velmi malé a z grafu není přesně patrné, které potrubí je nejvýhodnější. Proto stanovím jednu z těchto tří délek jako referenční a k ní vztáhnou ostatní. Jako referenční volím délku 630 mm.



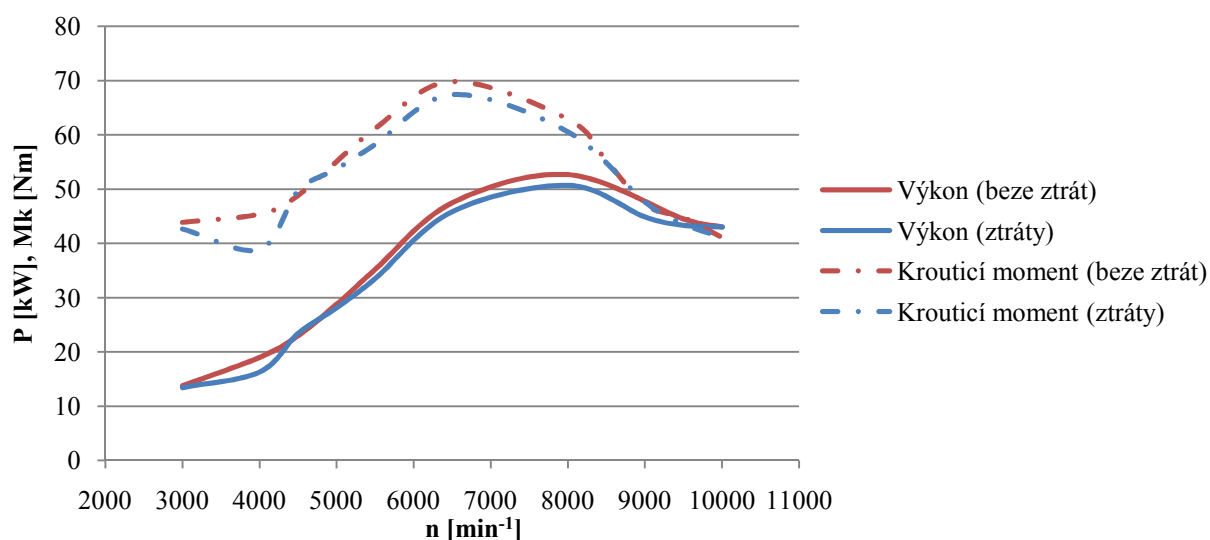
Graf 8 Relativní porovnání vlivu vybraných délek potrubí na výkon



Graf 9 Relativní porovnání vlivu vybraných délek potrubí na krouticí moment

Z grafů 8 a 9 je zřejmé, že rozdíly mezi sledovanými variantami se pohybují v rozmezí zhruba $\pm 0,2$ kW a $\pm 0,3$ Nm. Délka potrubí 630 mm, dříve vybraná jako referenční, se jeví jako nejvhodnější a dosahuje dobrých výsledků v celém otáčkovém spektru. Pro použití na formuli Dragon 3 proto volím délku výfukového potrubí 630 mm. Průměr potrubí je dán průměrem kanálu v hlavě motoru, který činí 40 mm. Rozhraní prostředí bude dosaženo skokovou změnou průřezu při přechodu z výfukového potrubí do tlumiče hluku.

Na závěr jsem provedl simulaci pro délku 630 mm i s ohyby a tlumičem hluku. Na Grafu 10 jsou výsledné charakteristiky porovnány s potrubím bez těchto ztrátových prvků.



Graf 10 Porovnání otáčkových charakteristik



12 NÁVRH TLUMIČE HLUKU

Konstrukce absorpčních tlumičů hluku je v literatuře málo popsána a vychází spíše z dlouholetých zkušeností jejich výrobců. Software Lotus Engine Simulation, který jsem využil v předchozích kapitolách pro návrh výfukového potrubí, nabízí také možnosti pro simulaci vlivu jednotlivých parametrů tlumičů na výsledný hluk. Tímto způsobem postupoval ve své diplomové práci Tomáš Bartoš při konstrukci výfuku pro formuli Dragon 2 [13]. Výsledky však nepříliš odpovídaly realitě, když naměřený hluk byl mnohem vyšší než vypočítaný. V kombinaci s tlumící vlnou, u které docházelo vlivem vysokých teplot k jejímu postupnému vypalování, formule procházela testy hluku na závodech jen velmi těsně. Pro návrh tlumiče pro Dragona 3 využiji právě poznatků z diplomové práce mého předchůdce, zkušeností z průběhu závodní sezony a také zkušeností a rad pracovníků společnosti Creptus, která bude výfuk vyrábět.

Dle výše zmíněných zdrojů je jeden z nejdůležitějších parametrů tlumiče jeho délka. Při prodlužování tlumiče by měl útlum plynule růst. Vzhledem k použití na závodním voze je však nutné udržet hmotnost na co nejnižší hodnotě. Proto jsem přistoupil k výrobě testovacího tlumiče výfuku (viz kap. 9), na němž určím přibližný vliv jeho délky na hluk celé soustavy. Výsledky poslouží (společně s výše uvedenými) jako podklady pro stanovení konečných rozměrů tlumiče.

12.1 MĚŘENÍ HLUKU

Měření bylo provedeno na formuli Dragon 2 pomocí multianalyzátoru Brüel & Kjaer PULSE 3560–B, kterým disponuje Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Jedná se o analyzátor s pěti vstupy a jedním výstupem a slouží k měření a analýze hluku a vibrací.

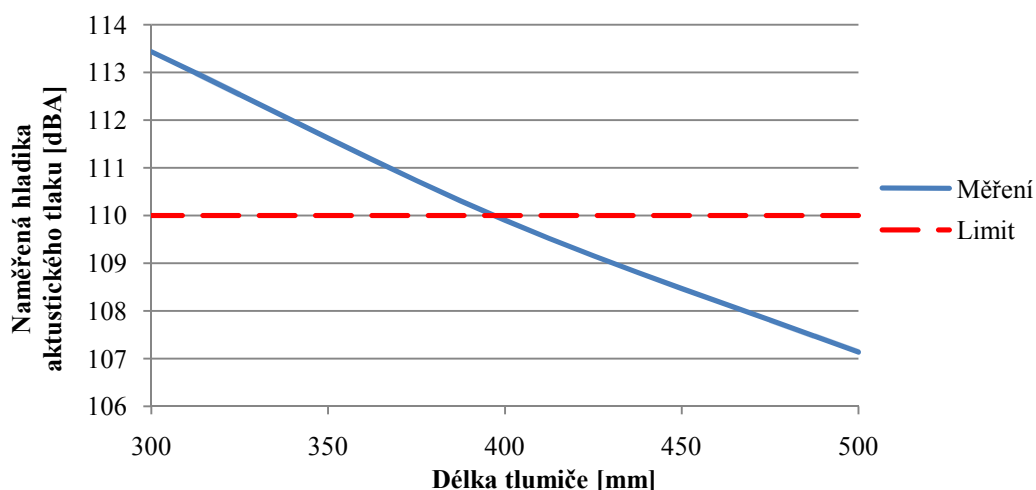
Zvukoměr byl použit typ 4188-A-021 od stejného výrobce s předpolarizovaným mikrofonom a předzesilovačem. Měřicí rozsah je 15,8 – 146 dB ve frekvencích 20 Hz až 12,5 kHz. [15]

Jako vyhodnocovací zařízení byl využit software PULSE LabShop a nastaveno lineární průměrování po dobu 2 s. Dle pravidel Formule Student je při měření použit váhový filtr A, což toto měřicí zařízení také umožňuje.

Měření bylo provedeno v otáčkách 6500 min^{-1} (výpočet měřících otáček v kap. 5.5) ve vzdálenosti 50 cm v úrovni ústí tlumiče pod úhlem 45° v horizontální rovině (viz kap. 5.2). Výchozí délka tlumiče byla 500 mm, provedena byla tři měření a z nich vypočítána průměrná hodnota. Tímto způsobem byly zaznamenány výsledky i pro 400 a 300 mm. Kompletní výsledky jsou uvedeny v tab. 13 a konečná závislost v grafu 10.

Tab. 13 Měření hluku testovacího výfuku

Měření	Hladina akustického tlaku [dBA]		
	500 mm	400 mm	300 mm
1	107,2	109,9	113,3
2	107,1	110,0	113,5
3	107,1	109,8	113,5
průměr	107,1	109,9	113,4



Graf 11 Naměřená hladina akustického tlaku v závislosti na délce tlumiče hluku

Závislost hladiny akustického tlaku na délce tlumiče je dle grafu 10 téměř přímo úměrná. Je nutné počítat s nepřesnostmi, které se do výsledků promítají, např. nemožnost udržet otáček motoru přesně na předepsaných, hluk okolí apod. Limitu 110 dBA dosahuje tlumič o délce přibližně 400 mm.



Obr. 12.1 Měření hluku - testovací výfuk na formuli Dragon 2

12.2 STANOVENÍ ROZMĚRŮ TLUMIČE

Vzhledem k výsledkům měření a ze zkušeností při provozování formule Dragon 2 volím délku tlumicí části 470 mm. Je nutné brát v potaz postupné zvyšování hluku v průběhu závodních jízd vlivem „vypalování“ tlumicí vlny a také nepřesnosti při měření. Délka 470



mm se proto jeví jako vhodný kompromis mezi dostatečnou rezervou pro test hluku a nízkou hmotností.

Vnitřní průměr tlumiče (perforované trubky) je v návaznosti na průměr potrubí 42 mm. Vnější průměr pláště tlumiče je stejný, jako na formuli Dragon 2 i jako má testovací tlumič, tedy 100 mm.

Tlumič je absorpčního typu a velkou roli tedy má použitá tlumící vlna. Při měření hluku i při testování na formuli Dragon 2 se osvědčila izolační rohož Isover Orstech DP 80 (viz kap. 8.1). Výhodou je především její dobrá odolnost proti vysokým teplotám, která prodlouží čas do výměny, která je vzhledem k pravidlům Formule Student nutná (přeměřování úrovně hluku v průběhu závodů – viz kap. 5).



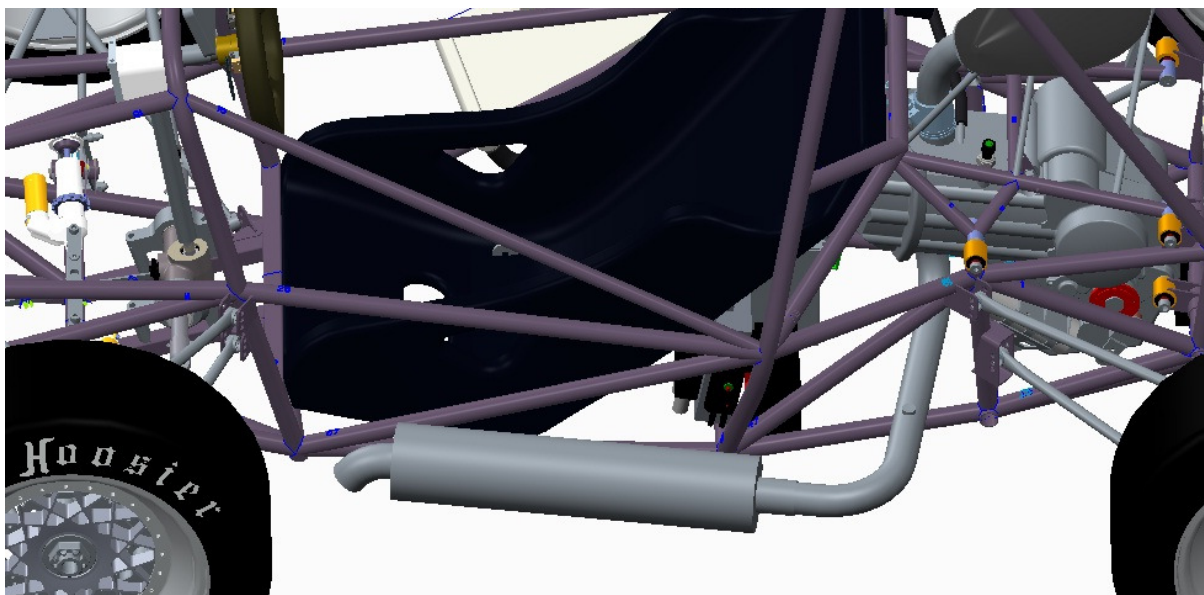
13 3D MODEL VÝFUKOVÉ SOUSTAVY

V kap. 11.4 byly stanoveny rozměry výfukového potrubí a v kap. 12.2 parametry tlumiče hluku. O přibližném vedení celé výfukové soustavy bylo rozhodnuto již při počátečních návrzích vozidla s ohledem na umístění ostatních komponentů. U Dragona 3 bude použit pouze jeden chladič, a to na pravé straně vozu, takže levou část bylo možné využít právě pro výfukový systém. Na místo, kde byl výfuk veden u Dragona 2, se přesunul airbox s dalšími částmi sání motoru. Kombinace těchto řešení vede ke snížení těžiště vozidla.

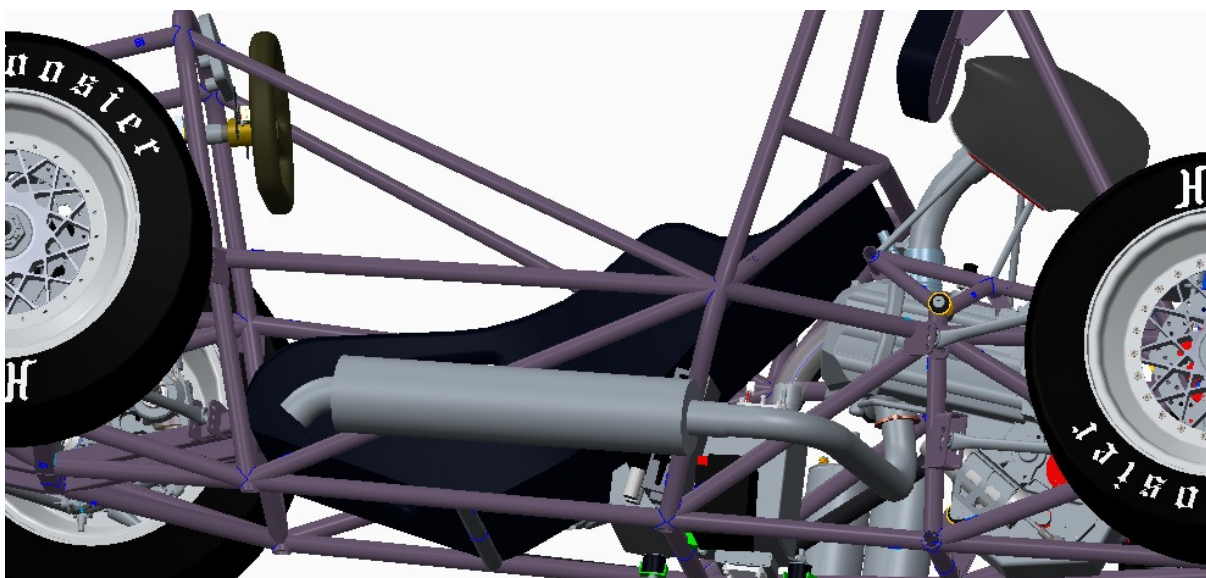
Při tvorbě modelů jsem využil parametrický 3d modelář Creo Parametric 2.0, v němž jsem také vytvořil výrobní dokumentaci. O realizaci se postarala firma Creptus, která se specializuje na výrobu výfukových systémů pro motocykly.

Při tvorbě potrubí v softwaru Creo bylo nutné vytvořit model takovým způsobem, aby byly všechny jeho rozměry snadno měnitelné. Z tohoto důvodu jsem vytvořil pomocné roviny, na něž jsem umístil body, které jsem následně spojil křivkou. Tato křivka sloužila jako střednice pro vedení potrubí. Jednoduchou změnou pozic rovin jsem docílil žádané změny ve vedení a tvaru potrubí.

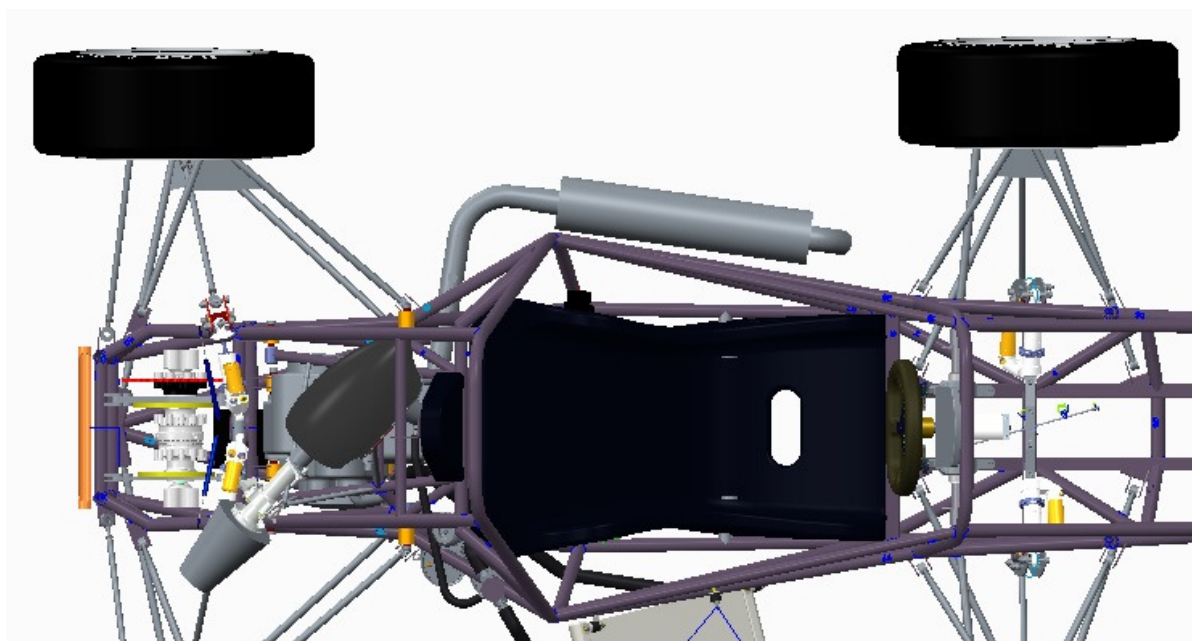
Na obrázcích níže je znázorněno prostorové uspořádání výfukové soustavy na formuli Dragon 3 vytvořené v softwaru Creo Parametric.



Obr. 13.1 Prostorové uspořádání výfukové soustavy na formuli Dragon 3 – pohled ze strany shora



Obr. 13.2 Prostorové uspořádání výfukové soustavy na formuli Dragon 3 – pohled ze strany zdola



Obr. 13.3 Prostorové uspořádání výfukové soustavy na formuli Dragon 3 – pohled shora



ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout výfukové potrubí formule Dragon 3. Tento jednomístný závodní vůz se bude, stejně jako jeho dva předchůdci, účastnit mezinárodní soutěže technických univerzit Formula Student. Vozidlo vzniká pod vedením Ústavu automobilního a dopravního inženýrství a pracuje na něm studentský tým TU Brno Racing, ve němž také působím. Všechny evoluce formule Dragon jsou vybaveny jednoválcovým zážehovým motorem původem z motocyklu Husaberg FE 570.

Před samotným návrhem jsem se seznámil s funkcí výfukového systému u spalovacích motorů, zejména jeho vlivem na výkonové parametry. U běžných osobních automobilů i motocyklů slouží výfuk také ke snižování emisí vznikajících díky nedokonalému spalování. Pravidla soutěže Formula Student žádným způsobem nelimitují obsah těchto škodlivých látek, a vozidlo tedy nebude vybaveno žádným dodatečným zařízením pro snižování emisí. Dynamické jevy při proudění výfukových plynů potrubím mají výrazný vliv na dosažené výkonové parametry. Při vhodném návrhu rozměrů lze využít tzv. rezonančního výfukového potrubí, kdy pomocí postupu tlakových vln ovlivňujeme vyplachování spalovacího prostoru. Těchto efektů jsem v dalších fázích práce využíval při návrhu délky výfukového potrubí.

Pravidla Formule Student omezují hluk výfukové soustavy, proto byla této oblasti věnována další část práce. Zde jsem vycházel z teoretických znalostí, ale také ze zkušeností získaných během závodní sezony s formulí Dragon 2. Ukázalo se například, že vlivem vysokých teplot docházelo již po poměrně krátké době k „vypalování“ tlumící vlny, a tedy ke zvyšování hluku. Vzhledem k důležitosti dostatečného tlumení hluku po celou dobu závodu jsem přistoupil k výrobě testovací výfukové soustavy, kde jsem zkoumal vliv délky tlumiče a alternativního absorpčního materiálu na útlum hluku. Z výše zmíněných poznatků jsem navrhl konečné rozměry absorpčního tlumiče.

Dále jsem provedl přehled konstrukce výfukové soustavy používané u vozidel kategorie Formula Student. Nabízí se několik způsobů řešení a pro každý z nich jsem se snažil identifikovat hlavní výhody a nevýhody. Seznámení s touto problematikou pomohlo k určení nejvhodnějšího vedení a uchycení výfukového systému na vozu Dragon 3, a to konkrétně vedle střední části rámu na levé straně. Při porovnání s formulí Dragon 2 (umístění nad motorem a zadní nápravou) má toto řešení výhodu v umístění poměrně velké hmoty blíže k vozovce, a tedy ve snížení těžiště. Uvolnil se tím prostor těsně nad motorem, kam lze přesunout soustavu sání s airboxem, restriktorem a škrticí klapkou, což vzhledem k předchozímu umístění této soustavy vede k dalšímu snižování těžiště vozidla. Při umístění výfuku v místech vedle kokpitu je však nutné zajistit, aby řidič a osoby přistupující k vozidlu nepřišly do kontaktu s horkými částmi.

V další fázi práce jsem navrhl dvě možné varianty výfukového potrubí – dlouhou a krátkou. Jako vhodnější jsem vybral variantu s krátkým potrubím, která dosahuje lepších výkonostních parametrů, má nižší hmotnost a také menší výrobní náklady. Pro simulace vlivů rozměrů výfukového potrubí na výkon motoru jsem využíval software Lotus Engine Simulation. Vzhledem k poměrně nízkému výkonu motoru jsem se zaměřil na dosažení co nejvyššího výkonu v poslední třetině otáčkového spektra. Vytvoření trojrozměrného modelu výfukové soustavy a určení jejího vedení a umístění jsem provedl v softwaru Creo Parametric 2.0. V tomto programu jsem také vytvořil výrobní dokumentaci, podle níž pak byl celý výfukový systém vyroben společností Creptus, která se na výrobu výfuků pro motocykly specializuje a tým TU Brno Racing dlouhodobě podporuje.



Navržená konstrukce výfukové soustavy přinesla oproti řešení na formuli Dragon 2 několik výhod. Především je to snížení těžiště, nižší výrobní náročnost a uvolnění prostoru pro další části a příslušenství spalovacího motoru. Za nevýhodu lze považovat nutnost zajistit, aby nedošlo ke zranění osob přistupujících k vozidlu ze strany. Také je zde pravděpodobný zvýšený přenos tepla do prostoru kokpitu. Podle výsledků simulací se podařilo zvýšit výkon ve vysokých otáčkách a zároveň zachovat průběh ve středním pásmu. Absorpční tlumič jsem navrhl jako kompromis mezi nízkou hmotností a zároveň dostatečnou rezervou při tlumení hluku. Použil jsem alternativní tlumící vlnu, která se osvědčila při měření hladiny akustického tlaku na testovacím tlumiči a při testování na formuli Dragon 2. Ta v obou případech vykazovala větší odolnost proti vysokým teplotám a dobrou schopnost tlumení hluku.

Při dokončování této práce nebyla formule Dragon 3 v takovém stavu výroby, aby na ní bylo možné výfukový systém otestovat. Dragon 2 používá stejný motor, ale vzhledem k jinému vedení výfukového potrubí dochází ke kolizi s rámem, takže zde bohužel také není možnost ověřit výsledky mnou navrženého řešení. Výrazného zlepšení v oblasti dosahovaných výkonových parametrů by bylo možné dosáhnout při návrhu výfukového systému společně se sacím traktem. Vzhledem k tomu, že formule Dragon 4 již nebude vybavena motorem Husaberg a bude nutné navrhnout novou soustavu sání, nabízí se tento způsob jako velmi výhodný.

V této diplomové práci jsem se seznámil s problematikou výfukových systémů a získané znalosti jsem využil při konstrukci výfukového potrubí a tlumiče hluku pro formuli Dragon 3. Navrhl jsem prostorové uspořádání na vozidle, vytvořil výrobní dokumentaci a naznačil možné zlepšení, které by bylo vhodné použít v budoucích formulích týmu TU Brno Racing. Tímto jsem splnil všechny body zadání své diplomové práce.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] RAUSCHER, J.: Spalovací motory, Studijní opory, VUT FSI Brno, 2004
- [2] FiatCoupe.cz: Výfuky - mýty a fakta. [online]. [cit. 2013-05-04]. Dostupné z: <http://www.fiatcoupe.cz/rady-navody/vyfuky-myty-a-fakta-1-/>
- [3] HEISLER, H.; (1995). Advanced Engine Technology. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, ISBN 978-0340568224.
- [4] Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu. BERNAT, P. [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [5] BLAIR, Gordon P. Design and simulation of two-stroke engines. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, c1996, xxiii, 623 p. ISBN 15-609-1685-0.
- [6] Základy akustiky: Příručka pro začátečníky. MEDVECOVÁ, I.; GREIF-AKUSTIKA, s.r.o. [online]. 2011-11-1 [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.greif.cz/download/its075-zaklady-akustiky-prirucka-pro-zacatecniky.pdf>
- [7] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: Mechanika tekutin [online]. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2002, 125 s. [cit. 2013-03-10]. ISBN 80-248-0038-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik,Stava-MechanikaTekutin.pdf>
- [8] FSAE Rules: 2013 Formula SAE Rules, vydáno 11-22-12 [online]. [cit. 2013-01-4]. Dostupné z: <http://www.fsaeonline.com/content/2013%20FSAE%20Rules%2011%2022%2012%20FINAL.pdf>
- [9] RAUSCHER, J.: Ročníkový projekt, Studijní opory, VUT FSI Brno, 2005
- [10] Husaberg Owners Manual 2009 [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: http://www.husaberg.com/uploads/tx_ktmproduct/techdocs/2403I3_OM_EN.pdf
- [11] ADÁMEK, L. Single cylinder SI engine for Formula Student. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída.
- [12] Isover: Technický list Orstech DP80 [online]. [cit. 2013-03-09]. Dostupné z: <http://www.isover.cz/data/files/tl-orstech-dp-80-2012-03-130-cz.pdf>
- [13] BARTOŠ, T. Výfukové potrubí motoru Formule Student. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída, Ph.D.
- [14] PIŠTĚK, V., ŠTĚTINA, J.. Výpočetní metody ve stavbě spalovacích motorů: Určeno pro posl. fak. strojní. Vyd. 1. Brno: VUT, 1991, 129 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0368-3.



- [15] 4188-A-021. Brüel & Kjaer: Microphone-preamplifier combinations [online]. [cit. 2013-05-11]. Dostupné z:
<http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations/4188-A-21.aspx?tab=overview>



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

μ_{ch}	[-]	chemická účinnost spalování
a	[-]	podíl nespáleného paliva ve válci
A	[-]	Woschniho koeficient
A_w	[m ²]	okamžitá velikost povrchu pracovní stěny
B	[-]	Woschniho koeficient
C	[-]	Woschniho koeficient
C_o	[m.s ⁻¹]	rychlost zvuku v suchém vzduchu
c_s	[m.s ⁻¹]	střední pístová rychlost
C_v	[m.s ⁻¹]	rychlost zvuku ve výfukových plynech
d	[m]	průměr potrubí
D	[-]	Woschniho koeficient
D_v	[m]	vrtání válce
dx_s	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná vodivost stěny válce
h_k	[-]	koeficient přenosu tepla chladicí kapaliny
H_u	[J.kg ⁻¹]	výhřevnost paliva
k_s	[m]	tloušťka stěny válce
L_a	[dB]	hladina akustického tlaku
L_v	[m]	délka potrubí
m	[-]	parametr charakteristiky hoření
m_B	[kg]	hmotnost paliva
$m_B(\varphi)$	[kg]	hmotnost paliva, které již shořelo
N	[min ⁻¹]	otáčky klikového hřídele
p	[Pa]	změřená či okamžitá hodnota akustického tlaku
p_0	[Pa]	referenční hodnota akustického tlaku
p_{motor}	[Pa]	kompresní tlak
p_{soc}	[Pa]	tlak ve válci na počátku spalování
p_v	[Pa]	tlak ve válci
Q	[W]	tepelný tok
Q_B	[J]	teplo vzniklé hořením paliva
S	[m]	zdvih pístu
T	[K]	teplota náplně válce
t_H	[s]	celková doba hoření



T_k	[K]	teplota chladicí kapaliny
t_o	[°C]	teplota vzduchu
T_{soc}	[K]	teplota ve válci na počátku spalování
t_v	[s]	čas, za který puls dorazí na konec potrubí a zpět
T_w	[K]	teplota stěn válce
U_{swirl}	[m.s ⁻¹]	střední rychlost víru směsi ve válci
V_g	[m.s ⁻¹]	střední rychlost plynů
V_p	[m.s ⁻¹]	střední pístová rychlost
V_{soc}	[m ³]	objem válce na počátku spalování
V_v	[m ³]	objem vypuštěných plynů
V_z	[m ³]	zdvihový objem
x	[-]	Vibeho koeficient
y	[-]	Vibeho koeficient
α	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
Θ_t	[°]	úhel natočení klikového hřídele



SEZNAM PŘÍLOH

DP-01-A4 – Příruba výfukového potrubí (výkres součásti)

DP-02-A4 – Absorpční tlumič hluku (výkres součásti)

DP-03-A3 – Výfukové potrubí (výkres součásti)

DP-04-A3 – Výfuková soustava (výkres sestavy)