

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace pohonné jednotky pro vůz Formula Student

Autor: **Bc. Marek VOČADLO**
Vedoucí práce: **Doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marek VOČADLO**
Osobní číslo: **S16N0077P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Název tématu: **Optimalizace pohonné jednotky pro vůz Formula Student**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Proveďte analýzu současného řešení pohonné jednotky a analýzu závodní tratě pro závody Formule Student. Navrhněte úpravy airboxu, vačkové hřídele a výfukového systému pro zvýšení plnicí účinnosti v nižších otáčkách motoru. Úpravy pohonné jednotky musí splňovat pravidla soutěže Formula Student pro rok 2018.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Specifikace požadavků
2. Analýza současného řešení pohonné jednotky a závodní tratě
3. Návrh úpravy jednotlivých komponent
4. Zhodnocení práce, závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah kvalifikační práce: **50-70 stran A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

VAN BASSHUYSEN, R., SCHÄFER, F., *Internal combustion engine handbook.*
USA: SAE International, 2004

VLK, F., *Vozidlové spalovací motory.* **Brno: František Vlk, 2003**

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.**

Katedra konstruování strojů

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Navrátil, Ph.D.**


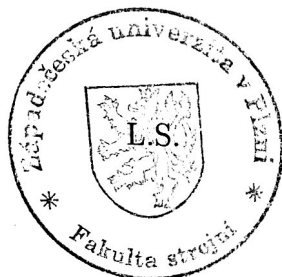
Ricardo Prague, s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **19. září 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2017

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval všem, kteří mi pomohli s vypracováním mé diplomové práce, za poskytnutí cenných odborných rad a pečlivé vedení. Zvláště bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Martinu Hynkovi, Ph.D., a konzultantovi panu Ing. Jiřímu Navrátilovi, Ph.D. Dále také hlavním konstruktérům z týmu UWB Racing Team Pilsen, Ing. Michalu Skovajsovi a Ing. Františku Sedláčkovi, kteří mne v posledních letech studia vedli a předávali své znalosti a zkušenosti z oboru.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vočadlo	Jméno Marek	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 – Dopravní a manipulační technika		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Jméno Martin	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace pohonné jednotky pro vůz Formula Student		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	94	TEXTOVÁ ČÁST	94	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce obsahuje rozbor pohonné jednotky u závodního vozu studentského týmu ze Západočeské univerzity. Jednotlivé části jsou popsány a následně je sestaven 1D model pohonné jednotky. Na tomto modelu jsou následně provedeny optimalizace pohonné jednotky. Pomocí optimalizací jsou upraveny jednotlivé díly.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Formula student, formule, pohonná jednotka, motor, 1D simulace, vačky, optimalizace, airbox, výfuk, CAD, počítačová simulace</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Vočadlo	Name Marek	
FIELD OF STUDY	N2301 “Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Name Martin	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Optimization of a powertrain unit for a Formula Student car		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2018
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	94	TEXT PART	94	GRAPHICAL PART	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis contains analysis of the powertrain unit of the racing student team from the University of West Bohemia. The individual parts are described and the 1D model is then created. This model is followed by optimization of the powertrain unit. With the optimizations, individual parts are adjusted.
KEY WORDS	Formula student, formula, drive unit, engine, 1D simulation, cams, optimization, airbox, exhaust, CAD, computer simulation

Obsah

ÚVOD	7
1 MOTOR YAMAHA YZF-R6 A NAVAZUJÍCÍ PRVKY	8
1.1 Parametry motoru	8
1.2 Plnicí soustava motoru.....	10
1.2.1 Sací potrubí	10
1.2.2 Výfukové potrubí	11
1.2.3 Vačkové hřídele.....	11
2 ANALÝZA ŘEŠENÍ PJ VOZU UWB-3	15
2.1 Sací ústrojí	15
2.1.1 Vzduchový filtr, škrticí klapka a restriktor	15
2.1.2 Airbox a runnery	17
2.2 Blok motoru	18
2.2.1 Sací a výfukové komory v hlavě válců	18
2.2.2 Rozvodový mechanismus.....	20
2.2.3 Ostatní části motoru	27
2.3 Výfukový systém.....	28
2.4 Hodnoty točivého momentu a výkonu z dynamometru.....	30
3 1D SIMULACE POHONNÉ JEDNOTKY	33
3.1 Lotus Engine Simulation	33
3.2 1D Simulace pohonné jednotky UWB03	33
3.2.1 1D model.....	34
3.3 Parametrické optimalizace pro úpravu PJ UWB04	60
4 ÚPRAVA VAČKOVÝCH HŘÍDELÍ.....	67
4.1 Výsledné hodnoty z parametrických optimalizací.....	67
4.2 Lotus Valve Train.....	67
5 WAVE – RICARDO SOFTWARE	78
5.1 1D model v softwaru Wave	78
ZÁVĚR.....	89
Použité zdroje.....	91
Seznam obrázků	92

ÚVOD

Formula Student je studentská soutěž v konstrukci vozů formulového typu. Studentské týmy z celého světa navrhují, konstruují a testují závodní vozy a později s nimi závodí na prestižních závodních okruzích po celém světě. Cílem této soutěže je navrhnout a postavit reálný závodní monopost. Aby každý nový monopost udržel konkurenceschopnost, musí jít vývoj studentských vozů neustále kupředu. Jednou ze základních částí vhodných pro nepřetržitě zlepšování je pohonná soustava vozidla, konkrétně motor a jeho charakteristiky.

Pohonná jednotka vozidla kategorie Formule Student je dle pravidel vybavena restriktorem omezujícím maximální průtok vzduchu do sacího traktu motoru. Omezení průtoku vzduchu do sběrného sacího potrubí je jednoduchá a oblíbená metoda používaná pro regulaci motorových výkonů při závodech. Tento princip se tedy využívá také u soutěží, které probíhají pod záštitou organizací SAE a Formula Student.

Pravidla závodů Formula Student stanovují, že veškerý vzduch, který vstupuje do motoru, musí projít skrz restriktor o průměru 20 mm. Toto omezení pro proudění vzduchu funguje jako částečně uzavřená klapka v sání, která generuje vakuum v sacím plénu. Během doby překrytí ventilových cyklů (střih ventilů – doba, ve které je otevřen jak sací, tak výfukový ventil), která může být až 100 stupňů v úhlu natočení klikové hřídele motocyklových čtyřválcových motorů, způsobuje tento podtlak zpětný tok výfukových plynů do sacího pléna. Tento děj následně snižuje podíl čerstvého vzduchu, který vstupuje do válce během následujícího sacího zdvihu, a tím snižuje produkovaný točivý moment a výkon. Tento zpětný tok také nastává při uzavírání sacího ventilu, kdy se již píst ve válci pohybuje směrem k ventilům. V tomto případě proudí z válce zpět do sacího pléna čerstvá směs paliva a vzduchu. Tyto efekty jsou obzvláště patrné u středních motorových rychlostí, kdy je k dispozici více času pro zpětný tok plynů než u vyšších rychlostí, ve kterých je produkovaný točivý moment maximální.

Použití restriktoru na sériové pohonné jednotce podstatně mění její úplnou charakteristiku. Podstatně zužuje rozsah otáček použitého motoru, při kterých má uspokojivý točivý moment a výkon. Příčinnou takové změny je i fakt, že použitý motor má v sériovém provedení maximální točivý moment v 10 500otáček/min a maximální výkon v 14 500otáčkách/min, což jsou oblasti, na které má značný vliv kritický průtok restriktorem, jenž nastává v okolí 10 500otáček/min.

Cílem této diplomové práce je přizpůsobení plnicí soustavy motoru, jmenovitě sacího potrubí, výfuku a vačkových hřídelí. Tyto úpravy budou provedeny pro posunutí oblasti nejvyšší plnicí účinnosti daného motoru do otáček, které nejsou restriktorem omezeny, což má vliv i na absolutní a měrnou spotřebu motoru. Následně, díky těmto úpravám, může být následující vůz týmu UWB Racing Team Pilsen úspěšnější na závodních tratích soutěží Formula Student a Formula SAE.

1 MOTOR YAMAHA YZF-R6 A NAVAZUJÍCÍ PRVKY

1.1 Parametry motoru

Dle pravidel podniku Formula Student musí být v závodních vozidlech použit čtyřdobý zážehový spalovací motor s vratným pohybem pístu o maximálním zdvihovém objemu 710cm^3 . Tým UWB Racing používá ve svých závodních vozech motory, obr. 1, původem z motocyklu Yamaha YZF-R6 r. v. 2008 – 2013 viz obr. 2. Průběh výkonu a točivého momentu na obr. 3. Dostupné parametry motoru jsou následující: [1]

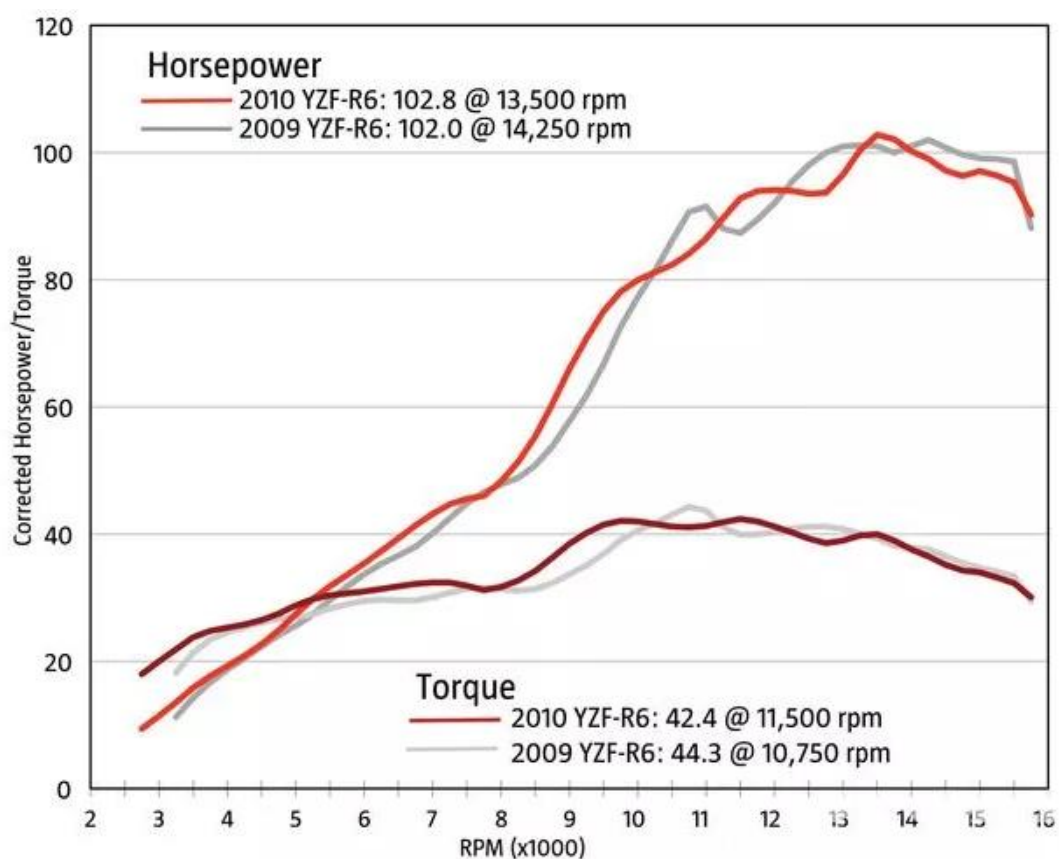
Zdvihový objem:	599cm ³
Počet válců:	4
Kompresní poměr:	13,1
Počet ventilů na válec:	4
Vrtání x zdvih:	67 mm x 42,5 mm
Max. výkon:	91 kW při 14 500/min
Max. točivý moment:	66 Nm při 10 500/min



Obr. 1 Motor ze stroje Yamaha YZF-R6 týmu UWB Racing Team



Obr. 2 Motocykl Yamaha YZF-R6 [1]

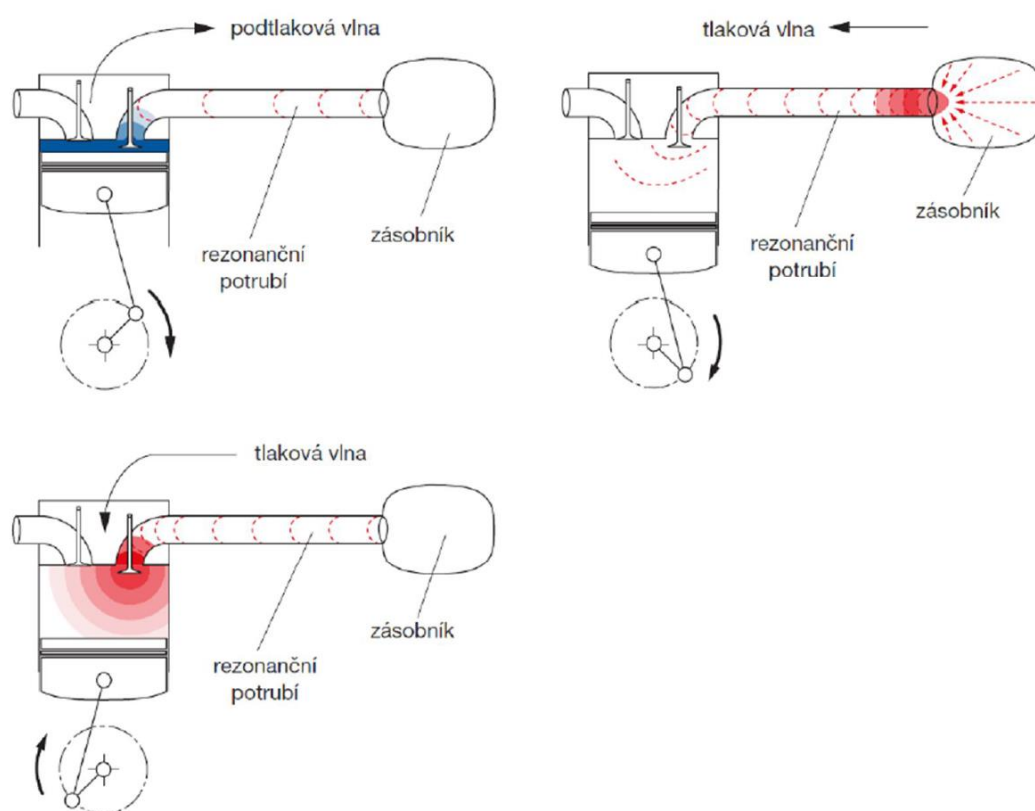


Obr. 3 Výkon (HP) a točivý moment (lbs-ft) sériové PJ z motocyklu Yamaha YZF-R6 [1]

1.2 Plnicí soustava motoru

1.2.1 Sací potrubí

Původní sací systém z motocyklu nelze použít kvůli pravidlům soutěže Formula Student. Proto je pro každý nový vůz vyvíjeno sací potrubí nové, které musí splňovat hned několik kritérií. Musí odpovídat pravidlům soutěže a to hned v několika směrech. Musí být splněna pravidla týkající se regulace zatížení motoru, restriktoru, zástavby a upevnění. Velice důležitým parametrem zůstávají délky sacích kanálů, které ovlivňují jejich vlastní frekvenci, a tak i pásmo otáček, kdy je motor pulzně přeplňován. Princip pulzního přeplňování, jenž je ilustrován obrázkem č. 3, zjednodušeně spočívá v tom, že při otevření sacího ventilu vzniká podtlaková vlna, která se šíří proti směru proudění směsi do sacího kanálu a sacího potrubí, kde ve vyústění do většího objemu/otevřeného konce se odrazí zpět s opačným potenciálem, tedy jako přetlaková. [2]



Obr. 4 Šíření tlakových vln v sacím potrubí a princip pulzního přeplňování [2]

Ta, nebo její harmonické funkce, jsou poté ideálně využity tak, že dorazí zpět k ventilu těsně před jeho uzavřením, čímž chvilkově zvětší rozdíl tlaků mezi prostorem před a za ventilem a může tak dojít k vyššímu naplnění válce než by tomu bylo bez tohoto efektu. Jelikož tlakové vlny se šíří lokální rychlostí zvuku, která je ovlivněna teplotou vzduchu, jediným konstrukčním prvkem, kterým může být dosaženo požadovaného načasování návratu přetlakové vlny zpět k ventilu, je dráha, kterou musí vlny urazit a tedy délka sacího potrubí včetně kanálů v hlavě válce, mezi ventilem a nejbližším výrazně větším objemem (tělem airboxu). [2]

1.2.2 Výfukové potrubí

Výfukové potrubí má za úkol odvádět výfukové plyny z hlavy motoru. Vhodnou volbou délek se dá využít obdobného efektu stojatého vlnění jako v potrubí sacím. V tomto případě je však žádoucí dobré načasování vlny podtlakové. Takové vlastnosti výfukového potrubí však nejsou ovlivněny pouze jeho délkou, ale i uspořádáním potrubí a průměrem jednotlivých částí. Původní výfukové potrubí motocyklu, ze kterého pochází používaný motor, je uspořádání 4-2-1, což znamená, že se výfukové potrubí skládá ze tří částí. Originální výfukové potrubí na obr. 5.

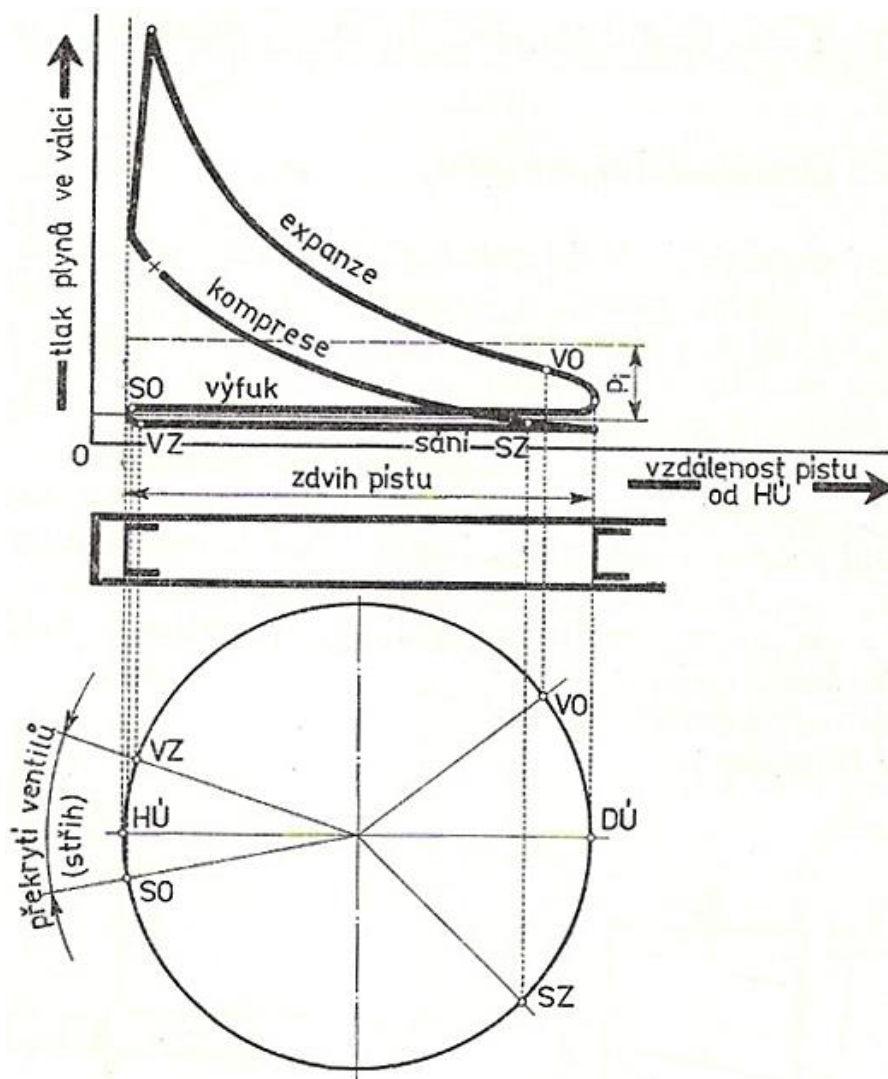


Obr. 5 Originální výfukový systém Yamaha YZF-R6, uspořádání 4-2-1 [2]

Část primární, která zahrnuje potrubí v hlavě válců a následně první části výfukového systému, část sekundární, kde již vedou pouze dvě trubky, z nichž do každé vedou z primárního potrubí právě dvě trubky a části terciální, kde už je veškeré proudění výfukových plynů svedeno do jediné trubky. U sériového motocyklu jsou v sekundárním potrubí sloučena proudění výfukových plynů z válců 1 a 2 v jedné trubce a z válců 3 a 4 v druhé trubce. To znamená, že vzhledem k pořadí zapalování tohoto motoru (1-2-4-3) je toto uspořádání s nerovnoměrným odstupem pulsů. [2]

1.2.3 Vačkové hřídele

Vačkové hřídele se ve čtyřdobém motoru starají o otevírání sacích a výfukových ventilů. Z hlediska plnicí účinnosti motoru jsou zejména důležité doby otevření, zavření ventilů a jejich zdvih. Změna těchto bodů má na vnější charakteristiky motoru zásadní vliv.



Obr. 6 p-V diagram spalovacího motoru s časováním ventilů [3]

Otevření výfukových ventilů

Standardně se bod otevření výfukových ventilů pohybuje okolo $50^\circ - 30^\circ$ klikové hřídele před dolní úvratí pístu. Když se otevření výfuku posouvá na později, expanze plynů je využita déle, stoupá tepelná účinnost, klesá spotřeba a teplota výfukových plynů. Ve vyšších otáčkách motoru a zatíženích však roste práce potřebná na výplach válce v podobě zvýšeného tlaku ve válci při výfukové fázi. Při dřívějším otevření výfukového ventilu nastává opak. Tlak od expandujících plynů dříve klesne, tepelná účinnost klesá, spotřeba a teplota výfukových plynů roste. Avšak ve vyšších otáčkách a zatíženích se snižuje práce na výplach válce. Načasování je kompromisem mezi prací získanou expanzí a prací na výplach válce.

Uzavření výfukových ventilů

Běžné úhly uzavření výfukových ventilů jsou $8^\circ - 20^\circ$ za horní úvratí. Toto je společně s otevřením sacích ventilů bodem udávající 'střih' ventilů, tedy moment, kdy jsou sací i výfukové ventily otevřeny současně. Při nízkých otáčkách a zatíženích má vliv na množství

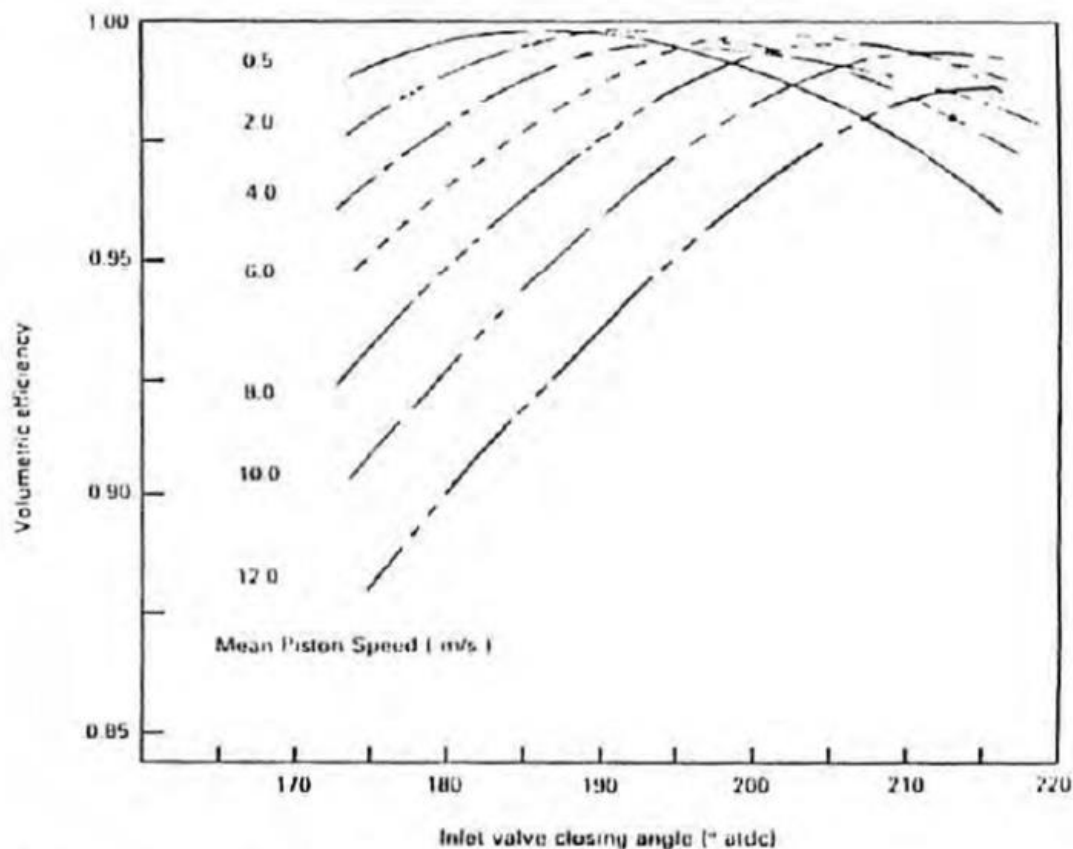
výfukových plynů nasátých do válce zpět z výfuku, což však nemusí být vnímáno jako výhradně negativní efekt. Při vyšší vnitřní recirkulaci výfukových plynů není potřeba velkého škrcení motoru pro částečná zatížení, čímž se redukuje pumpovní ztráty. Při vysokých zatíženích a otáčkách má vliv na množství residuí. Příliš pozdní uzavření může mít za následek unikání čerstvé směsi do výfuku při vyšších zatíženích. Při příliš brzkém zavření může nastat situace, kdy výfukové plyny setrvají ve válci, a tím se sníží plnicí účinnost, ale opět nebude potřeba tak vysokého škrcení na částečná zatížení.

Otevření sacích ventilů

Bod otevření sacích ventilů se běžně pohybuje okolo 20° - 5° před horní úvratí. Jakožto začátek stříhu ventilů je tento bod stejně důležitý jako zavření výfukových ventilů pro regulaci vnitřní recirkulace při částečném zatížení a vyplachování při plném zatížení. Vlivy jsou tedy velice podobné, protože oba zásahy ovlivňují šířku stříhu ventilů. Také má vliv na stabilitu volnoběhu.

Uzavření sacích ventilů

Načasování zavření sacích ventilů má velký vliv na momentovou charakteristiku. Běžně se pohybuje 40° - 60° za dolní úvratí a ovlivňuje plnicí účinnost motoru více, než ostatní otevření a zavírání ventilů. Pozdní zavření sacích ventilů ve většině případů zlepšuje plnicí účinnost ve vyšších otáčkách, což má za následek i dosažení vyšších výkonů. Na nízké otáčky a vysoká zatížení má dlouhá doba otevření naopak negativní vliv na plnicí účinnost. To proto, že v delším čase, který je k dispozici na naplnění válce, může nastat okamžik, kdy se tlaky v sacím potrubí a ve válci stihnou vyrovnat, a dochází ke zpětnému toku směsi do sacího potrubí. Příklad takového vlivu na plnicí účinnost je uveden v obr. 7.



Obr. 7 Ilustrace vlivu načasování uzavření sacího ventilu na plnicí účinnost při různých pístových rychlostech

Průběh otevření ventilů původními vačkovými hřídeli odpovídá i otáčkovému rozsahu motoru v původní konfiguraci. Motor produkuje 90% svého maximálního točivého momentu až k hranici 15 000ot/min, což znamená, že průběh otevření ventilů musí být dostatečně široký, aby se i v těchto otáčkách motor stíhal dostatečně plnit čerstvou směsí. V nižších otáčkách, například od 5 000/min do 8 000/min, je však točivý moment nízký, což odpovídá i špatné plnicí účinnosti v této oblasti. Zde se nabízí prostor pro vývoj vlastních vačkových hřídelí, s průběhem optimalizovaným pro dosažení co nejvyšší plnicí účinnosti v nižším otáčkovém spektru, kde není dosaženo kritického proudění restriktorem. [2]

2 ANALÝZA ŘEŠENÍ PJ VOZU UWB-3

2.1 Sací ústrojí

Sací soustava motoru se skládá z:

Vzduchového filtru

Škrticí klapky

Restriktoru dle pravidel SAE

Airboxu

Runnerů – sacích potrubí

Vstřikovačů

Sací soustava motoru slouží k nasávání vzduchu, jeho filtraci, úpravu množství nasávaného vzduchu, udržení vzduchu v soustavě pomocí airboxu, vstřik paliva do vzduchu a dopravu směsi k jednotlivým válcům.

2.1.1 Vzduchový filtr, škrticí klapka a restriktor

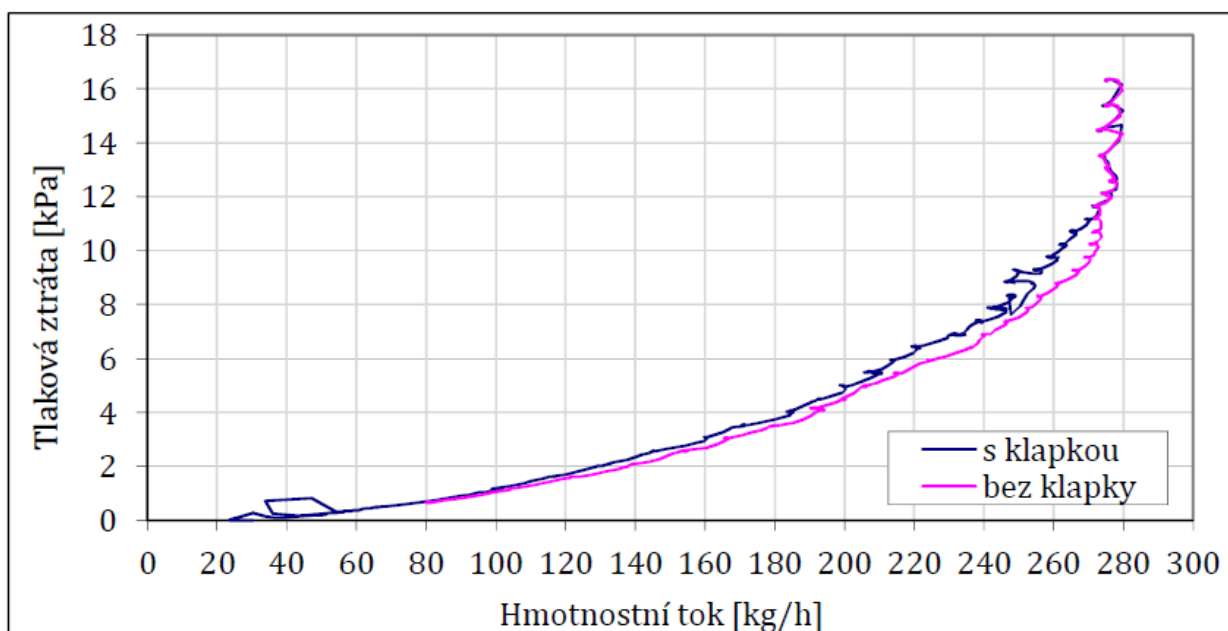
Hlavním omezením sací (plnicí) soustavy je restriktor daný pravidly soutěže. Na vozidlech UWB je používána škrticí klapka od firmy AT Power obr. 8-9. Tato klapka je určena speciálně na vozy kategorie Formula Student a splňuje pravidla daná organizací SAE. Součástí klapky je také vzduchový filtr na odstranění nečistot, které by mohly při vniknutí do sací soustavy poškodit motor a jeho části.



Obr. 8 Škrticí klapka s restriktorem od fy AT Power [4]



Obr. 9 Škrticí klapka s restriktorem a filtrem od fy AT Power [4]



Obr. 10 Průtoková charakteristika kompletu restriktoru s klapkou [2]

Z charakteristiky je patrné, že zhruba při průtoku 280kg/h dochází k aerodynamickému ucpání restriktoru. Kvůli dynamickým dějům v sání motoru však dojde k ucpání při nižším průtoku, přibližně v 250kg/h. V případě vozu UWB-03 se tak stává zhruba

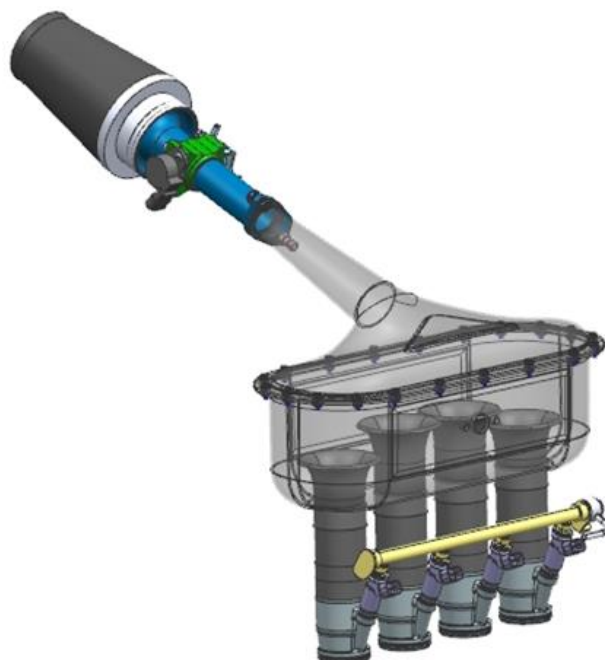
v rozmezí 10 000/min – 11 000/min a následkem je snižující se tlak v sání, tím snižující se plnicí účinnost a tím pádem nižší točivý moment, vyšší pumpovní ztráty a měrná spotřeba. Pro budoucí vývoj je tedy vhodné vyhnout se oblasti s ucpaným restriktorem zejména kvůli minimalizování pumpovních ztrát a tím i spotřeby paliva. [2]

2.1.2 Airbox a runnery

Sací potrubí vozidel týmu UWB Racing je koncipováno jako rovnotlaké a tvoří ho tedy komplet škrticí klapky s restriktorem, na ten navazuje difuzor, který vede do vyrovnávacího objemu také nazývaného jako airbox (plénium). Plénium je poté spojeno s hlavou motoru sacími kanály (runnery), do kterých vyústí vstříkovací trysky. Sací systém z vozu UWB03 na obr. 11.



Obr. 11 Sací ústrojí z vozu UWB03



Obr. 12 Rezonanční potrubí v sacím ústrojí vozu UWB03

Základní parametry pléna (airboxu):

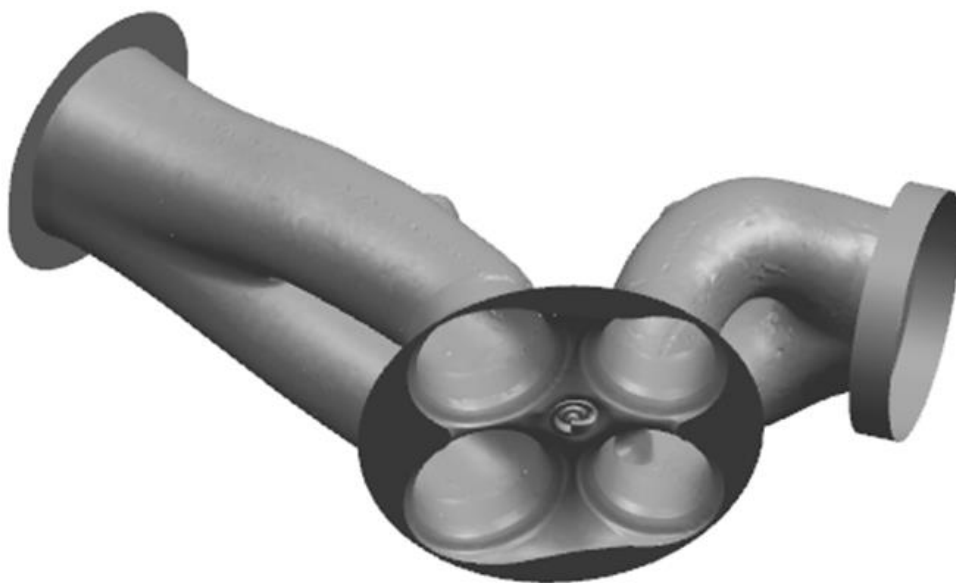
Velikost:	592x493x355 mm
Hmotnost:	1.74 kg
Objem pléna:	6.13 dm ³
Délka potrubí (runnerů):	210 a 190 mm
Umístění vstříků:	25mm od konce runneru, úhel 22,5°

Sací ústrojí je vyrobeno z uhlíkového kompozitu, který je laminován na formu, takže kvalita povrchu uvnitř sacího potrubí je vysoká a povrch je tudíž velmi hladký, což prospívá řádnému proudění plynů uvnitř soustavy.

2.2 Blok motoru

2.2.1 Sací a výfukové komory v hlavě válců

Sací a výfukové komory v hlavě válců slouží k plnění válce plyny přicházejícími ze sacího systému a následně k výfuku plynů do výfukového systému. Sací komora má na vstupu kruhovitý tvar, který se rozděluje na dvě oddělené části potrubí. Obě tyto části potrubí oddělují od prostoru válce sací ventily. Výfukové ventily oddělují prostor válce od dvou výfukových komor. Tyto komory následně přecházejí v jednu a ta ústí do výfukového systému. Geometrie sacích a výfukových kanálů (komor) je daná výrobcem a její tvar nebude měněn. Sací a výfukové komory na obr. 13 a 14.



Obr. 13 Sací a výfuková komora v hlavě válců motoru ze stroje Yamaha YZF-R6



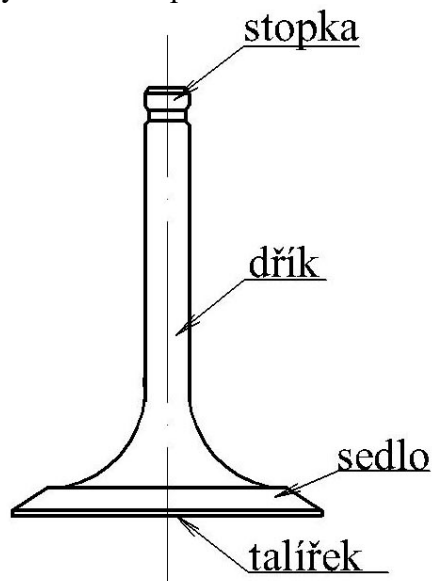
Obr. 14 Sací a výfuková komora s ventily ze stroje Yamaha YZF-R6

Vstup do sací komory:	Ø 38mm
Výstup ze sací komory a sací ventil:	Ø 27mm
Vstup do výfukové komory a výfukový ventil:	Ø 23mm
Výstup z výfukové komory:	Ø 32mm
Délka jedné větve sací komory:	102,5mm
Délka jedné větve výfukové komory:	65mm

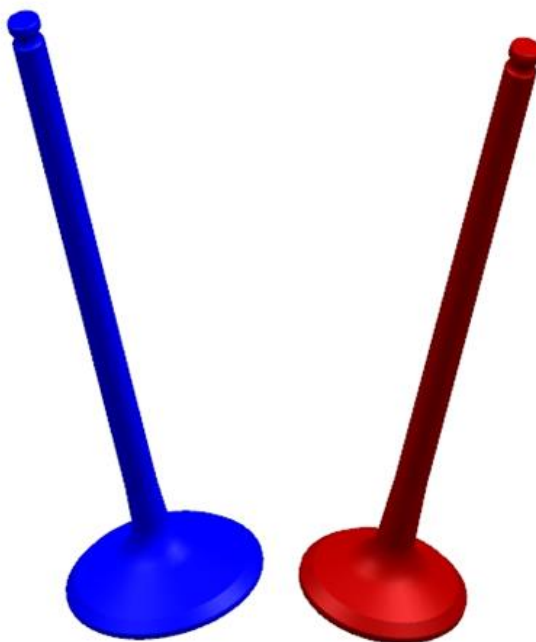
2.2.2 Rozvodový mechanismus

Ventily

Ventil otevírá sací/výfukový kanál spalovacího motoru a vypouští směs/vypouští plyny do/ze spalovacího prostoru. Otevírá se v danou dobu díky ventilovým rozvodům, kdy na něj působí mechanismus, který přetlačuje pružinu. Zavírá se tlakem pružiny přes miskou a klínek. Ventily jsou vyráběny z velmi kvalitní oceli (například z Chrom-křemíkové oceli) svářením natupo, petchováním, kováním, navářením, soustružením a broušením. U této pohonné jednotky jsou ventily vyrobeny z titanu. Popis částí ventilu na obr. 15.[5]



Obr. 15 Talířový ventil a jeho jednotlivé části



Obr. 16 Sací (modrý) a výfukový (červený) ventil z motoru Yamaha YZF-R6

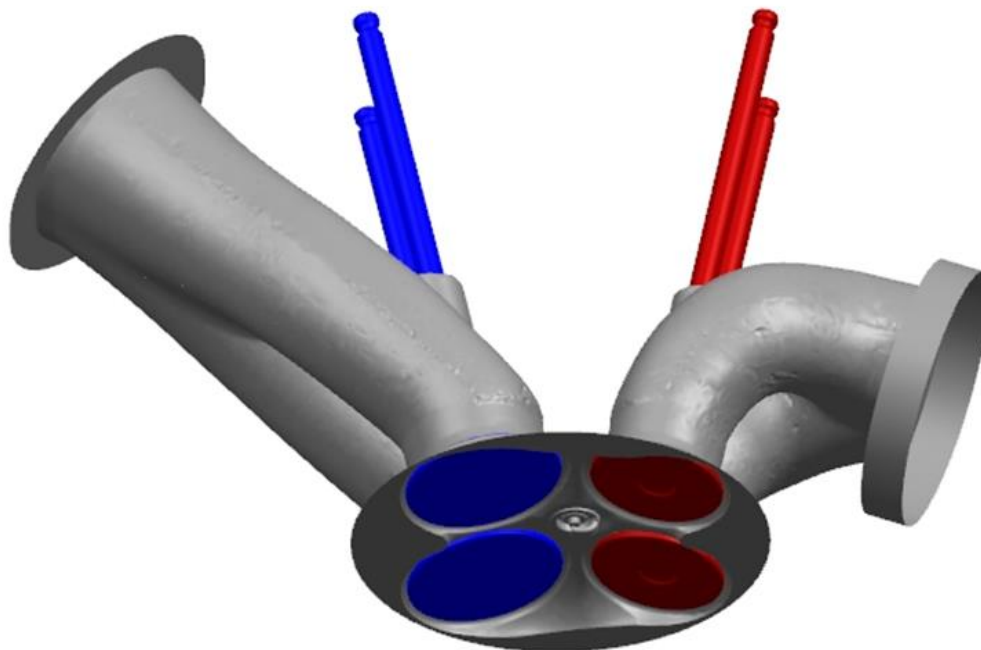
Základní parametry ventilů:

Průměr talířku sacího ventilu:

Ø 26,3mm

Průměr talířku výfukového ventilu:

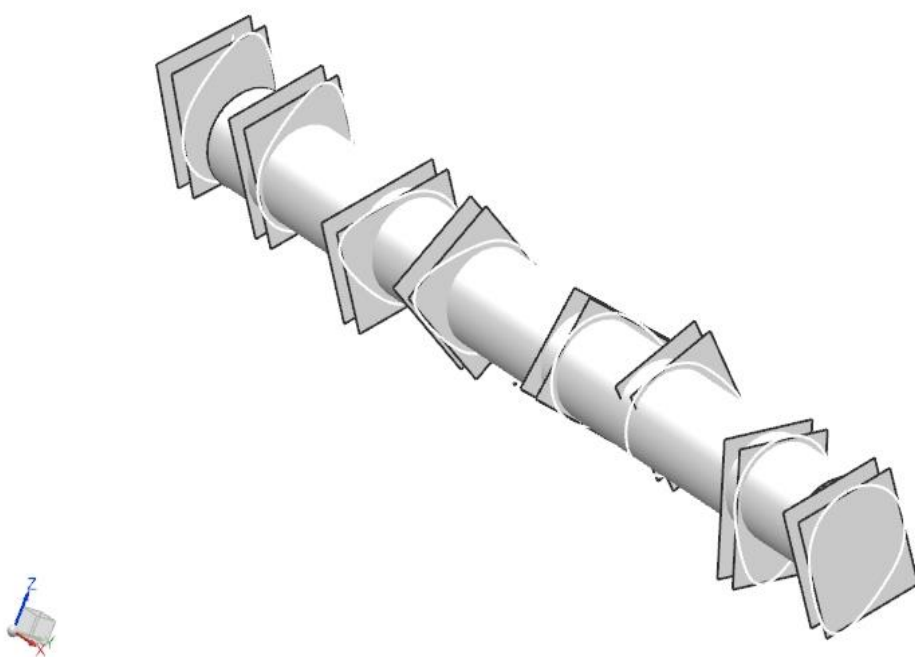
Ø 22,5mm



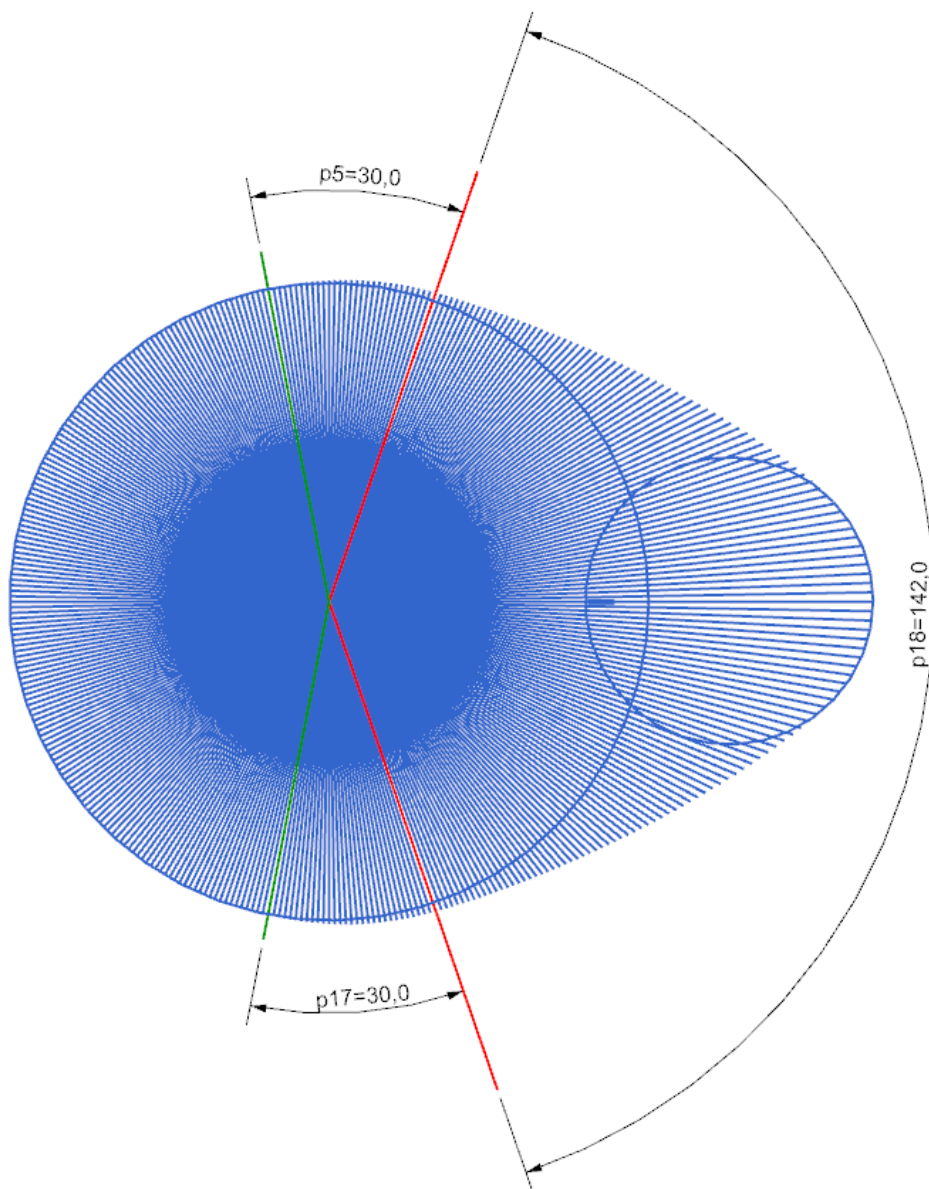
Obr. 17 Komory v hlavě válců s ventily motoru Yamaha YZF-R6

Váčkové hřídele

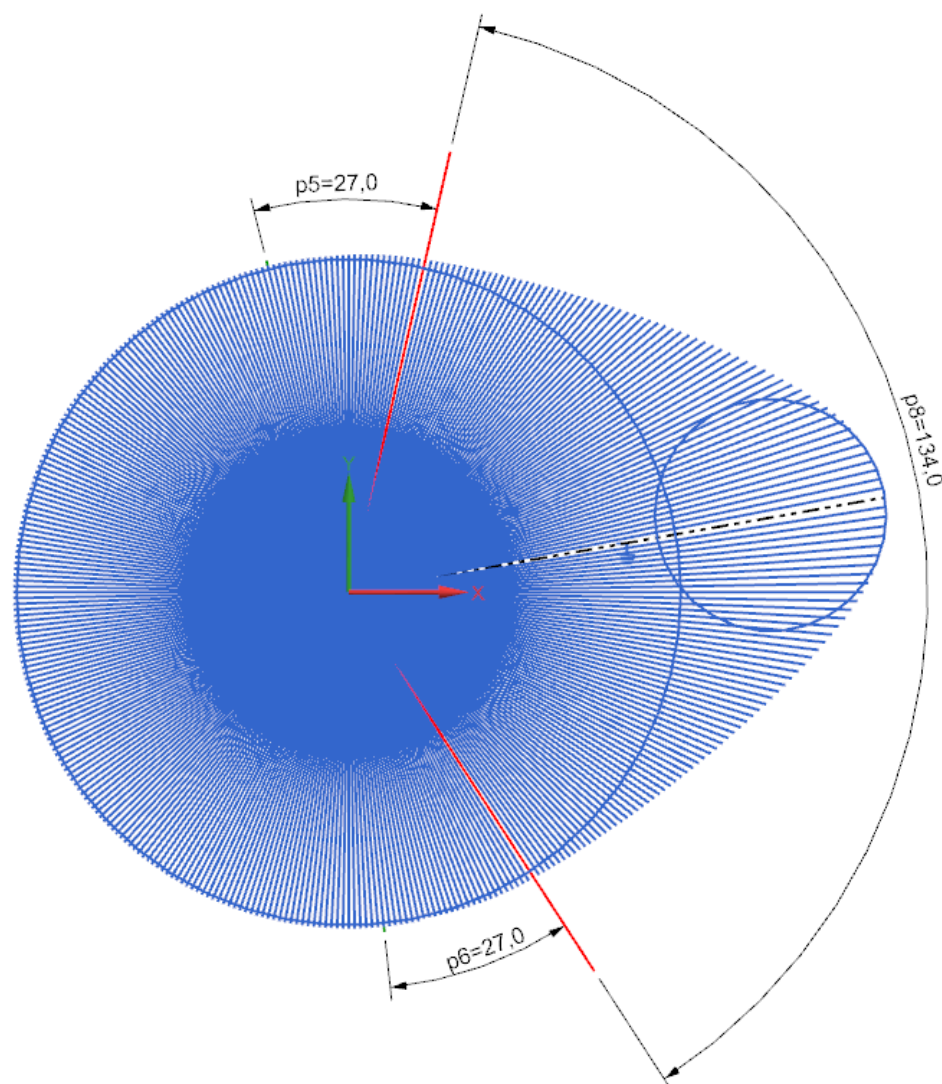
Tvar (geometrie) váčkových hřídelí určuje doby zavření/otevření ventilů a také jejich maximální zdvih a náběh zdvihu. Pro zjištění těchto parametrů byly váčkové hřídele z motoru vyjmuty, oskenovány na 3D skeneru a následně pomocí softwaru NX11 změřeny vzdálenosti od osy rotace váčkové hřídele k funkční ploše vačky po natočení úhlu o 1° (souřadnice 360 bodů ve 2D prostoru). 3D sken sací váčkové hřídele je na obr. 18. Profily sací a výfukové vačky na obr. 19 a 20.



Obr. 18 3D sken sací vačkové hřídele z motoru Yamaha YZF-R6



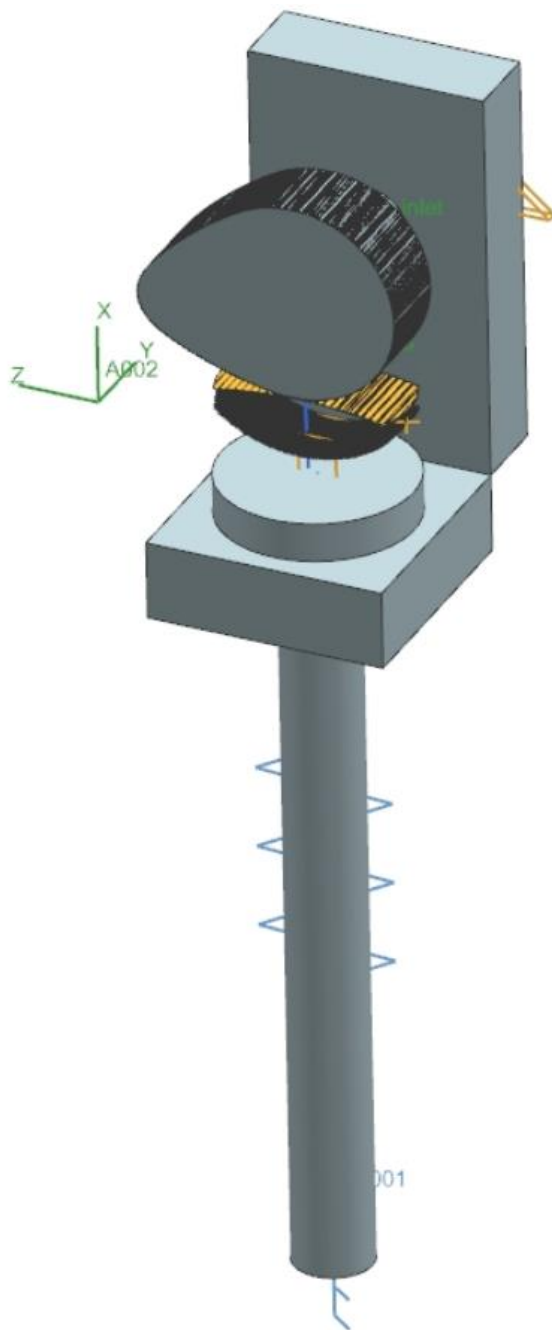
Obr. 19 Geometrie profilu sací vačkové hřídele z motoru Yamaha YZF-R6



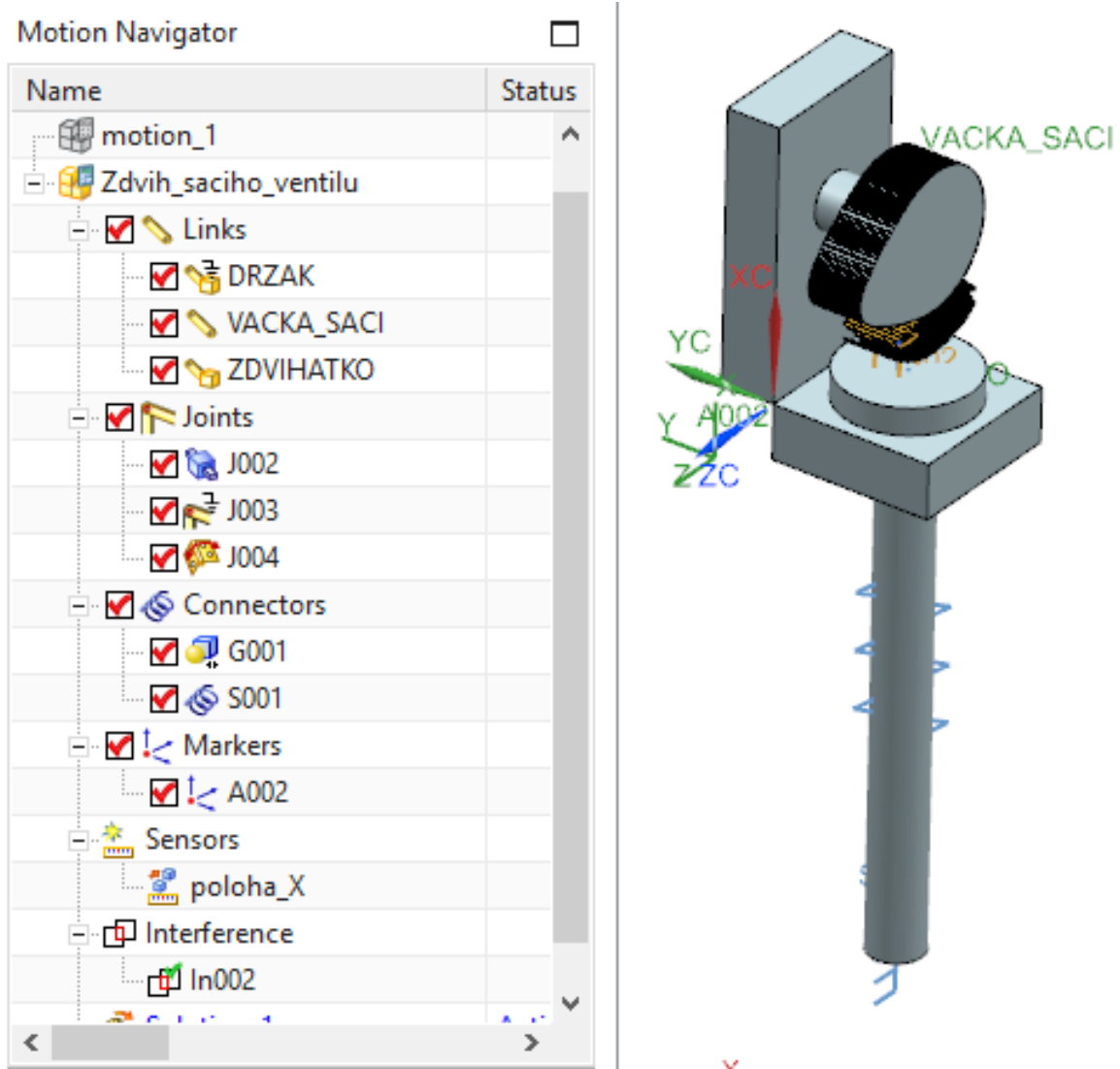
Obr. 20 Geometrie profilu výfukové vačkové hřídele z motoru Yamaha YZF-R6

Úhly o velikosti 30° (respektive 27°) jsou úhly náběžných hran, úhly 142° (resp. 134°) jsou úhly funkční části vačkové hřídele. Náběžné hrany slouží k vymezení vůlí mezi vačkovou hřídelí a plochou zdvihátka ventilu a také ke zmírnění náběhu zdvihu ventilu.

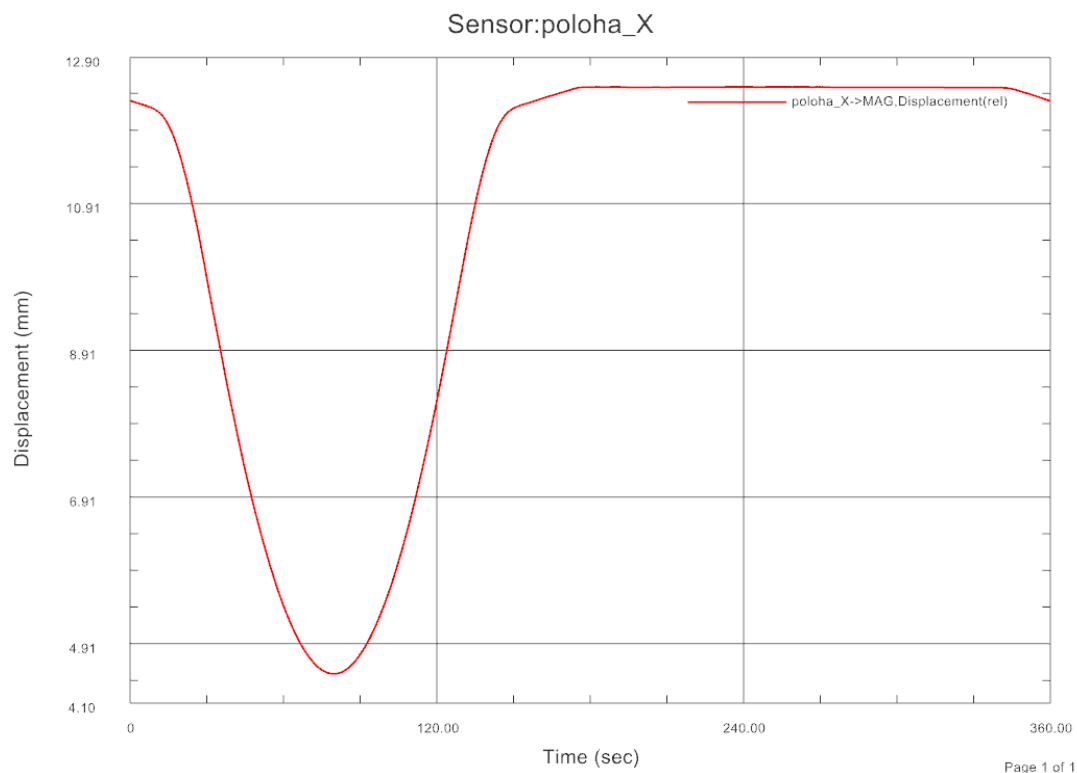
Vstupní parametry do 1D simulací ovšem nejsou tvary vačkových hřídelí, ale zdvihové funkce ventilů v závislosti na natočení vačkové hřídele. Pro získání zdvihových funkcí sacího a výfukového ventilu (ze sériového motoru) byl vytvořen mechanismus v modulu Motion v softwaru NX11. Zdvihová funkce ventilů lze získat také za pomoci softwaru Matlab, ovšem v tomto případě bylo snazší použití modulu v softwaru NX11. Rozvodový mechanismus vytvořený v softwaru NX11 na obr. 21 až 23.



Obr. 21 Palec sací vačkové hřídele, ventilu a zdvihátka z motoru Yamaha YZF-R6 v softwaru NX11 – modul Motion Simulation



Obr. 22 Palec sací vačkové hřídele, ventilu a zdvihátka z motoru Yamaha YZF-R6 v softwaru NX11 – modul Motion Simulation



Obr. 23 Zdvihová funkce sacího ventilu získaná za pomoci softwaru NX11 - modul Motion Simulation

Výstupem z toho mechanismu jsou zdvihové funkce sacího a výfukového ventilu. Osy grafu této funkce reprezentují natočení vačkové hřídele (popř. klikové hřídele) - po stupních a zdvihu ventilu - po milimetrech.

Po získání zdvihových funkcí ventilů na natočení klikové hřídele již mohou být tyto parametry zadány do 1D simulace.

Maximální zdvih – sací ventil:	8,5mm
Maximální zdvih – výfukový ventil:	7,7mm
Otevření sacího ventilu:	39° BTDC
Otevření sacího ventilu:	64° BBDC
Zavření sacího ventilu:	65° ABDC
Zavření sacího ventilu:	24° ATDC

2.2.3 Ostatní části motoru

Základní parametry:

Kompresní poměr:	13,7
Vrtání:	67mm
Zdvih:	42,5mm
Délka ojnice:	90,5mm

2.3 Výfukový systém

Výfuk nebo výfukový systém je zařízení odvádějící zplodiny ze spalovacího motoru, vznikající při spalování paliva. Představuje systém potrubí, který vede z prostoru spalovacího motoru. Má zabudovaný tlumič snižující hlučnost a často i katalyzátor, redukující obsah nebezpečných látek ve výfukových plynech. Trubkový systém výfuku může tvořit jedno nebo více potrubí, jejichž upravená koncovka upravuje akustický projev vozidla. Výfukový systém na voze UWB03 na obr. 24 a 25. [6]



Obr. 24 Výfukový systém vozu UWB - 03



Obr. 25 Tlumič výfuku UWB – 03

Základní parametry výfukového systému:

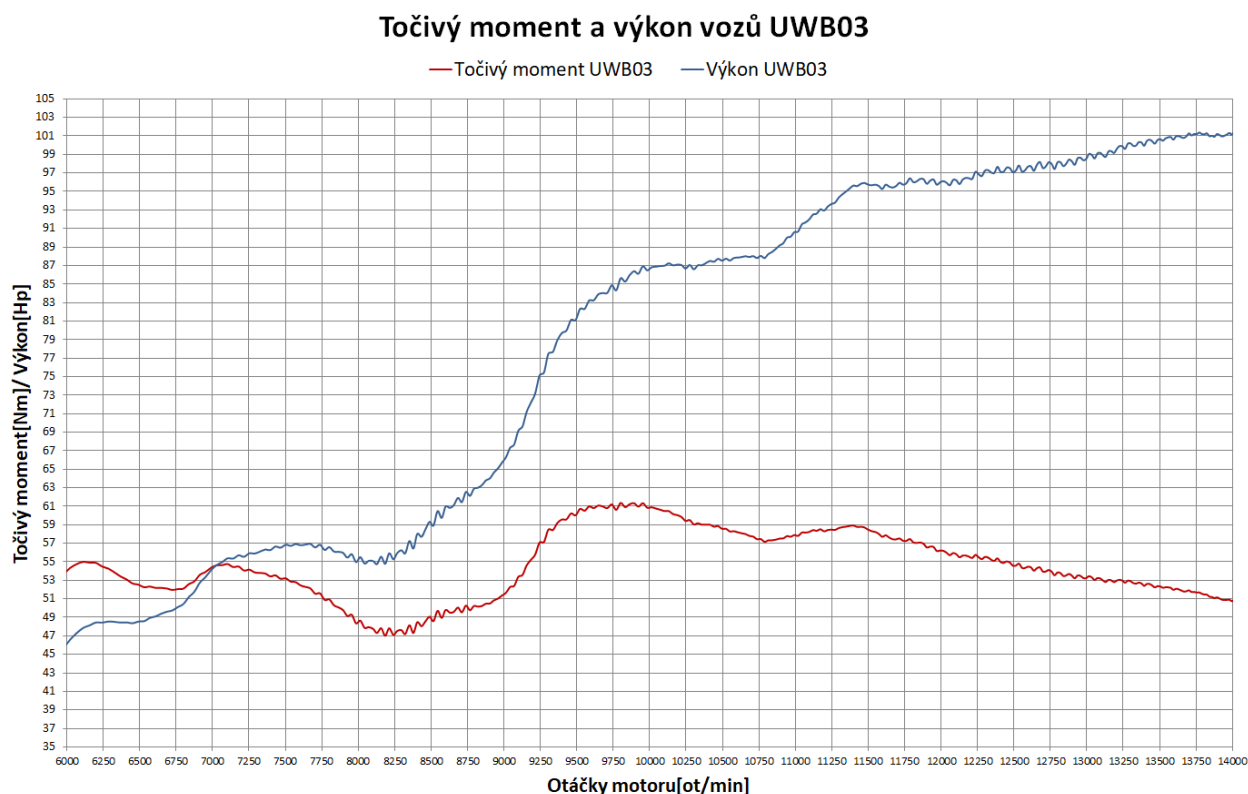
Uspořádání 4 – 2 – 1

Délka primárního potrubí:	425mm
Průměr primárního potrubí:	Ø 28mm
Délka sekundárního potrubí:	425mm
Průměr sekundárního potrubí:	Ø 36mm
Délka terciálního potrubí:	250mm + 100mm
Průměr terciálního potrubí:	Ø 60mm
Délka tlumiče:	400mm

	Počáteční průměr [mm]	Koncový průměr [mm]	Objem [litr]	Délka potrubí [mm]
Škrtková klapka	Ø 60	Ø 28		
Restriktor	Ø 28	Ø 20		
Potrubí k airboxu	Ø 20	Ø 42		
Airbox	592x493x355	1740	6,13	210, 190
Sací komora v hlavě válců	Ø 38	Výstup z komory [mm]	Vzdálenost vstup-výstup [mm]	
Výfuková komora v hlavě válců	Ø 23	Ø 27	102,5	
Ventil sací	Ø 26,3	Ø 32	65	
Ventil výfukový	Ø 22,5			
Vačková hřídel - sací profil	8,5	Otevření ventilu	Zavření ventilu	
Vačková hřídel - výfukový profil	7,7	39° BTDC	65° ABDC	
Motor	13,7	64° BBDC	24° ATDC	
Výfukový systém- primární část	Ø 28	Vrtání [mm]	Zdvih [mm]	Délka ojnice [mm]
Výfukový systém- sekundární část	Ø 36	Délka [mm]		
Výfukový systém- terciální část	Ø 60			
Tlumič	Ø 60			

2.4 Hodnoty točivého momentu a výkonu z dynamometru

Na obrázku č. 26 je zobrazena vnější rychlostní charakteristika motoru použitého ve voze UWB03 pro sezónu 2016. Z grafu je patrné, že motor má nejvyšší výkon mezi 9000ot/min – 14 000ot/min.



Obr. 26 Točivý moment a výkon vozu UWB-03 naměřený na dynamometru

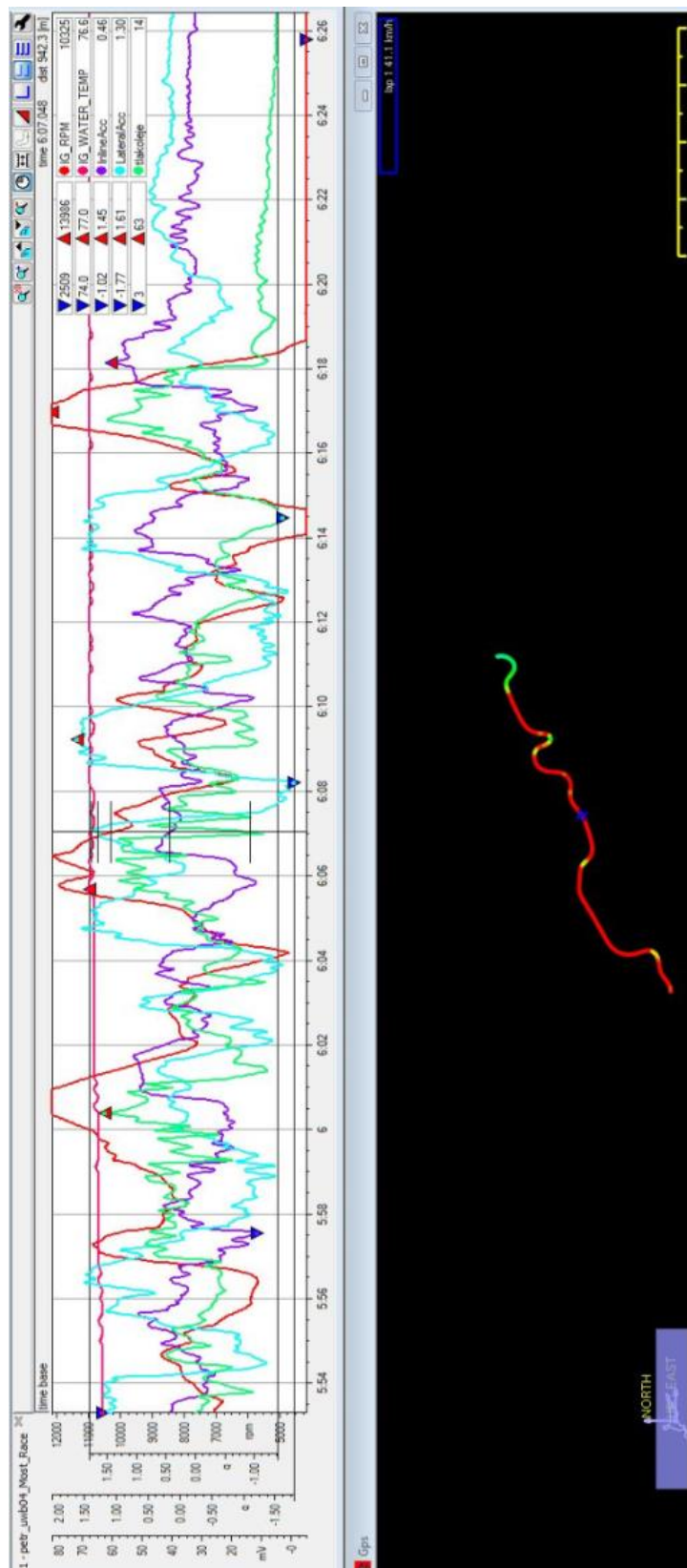
Využití otáčkového spektra během závodu lze vidět na obr. 29. Dle tohoto grafu je zřejmé, že nejvíce je využito rozpětí otáček mezi 8 000 – 12 000 ot/min. Toto rozpětí lze zjistit z dat, které během závodu ukládá do paměti datalogger na obr. 27 a 28. Na obrázku 27 lze vidět několik křivek. V bílé části jsou:

- otáčky motoru (červená)
- teplota chladicí kapaliny motoru (růžová)
- tlak oleje (zelený)
- odstředivé síly ve směru jízdy a kolmo ke směru jízdy (fialová a modrá)

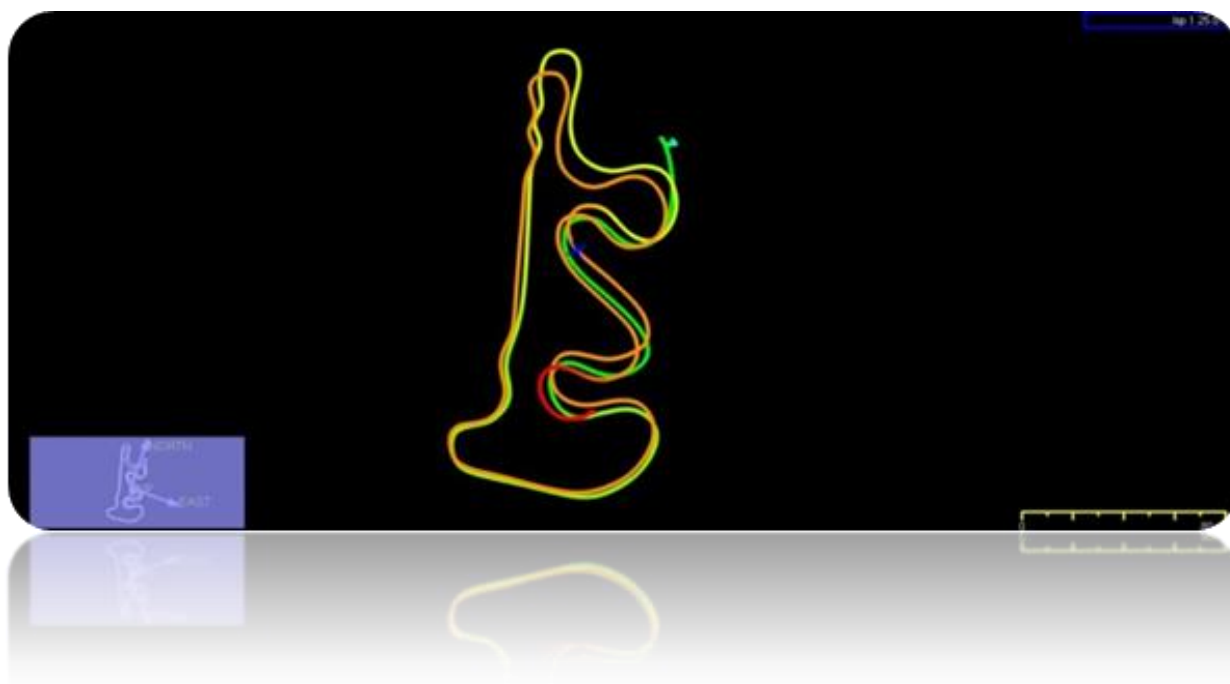
V černé části lze vidět data z GPS, která vykreslují tvar tratě.

Na obr. 28 jsou data z GPS o tvaru celé závodní tratě v České Republice a barvy na této křivce charakterizují tlak oleje – od zelené (vysoký tlak) po červenou (nízký tlak oleje).

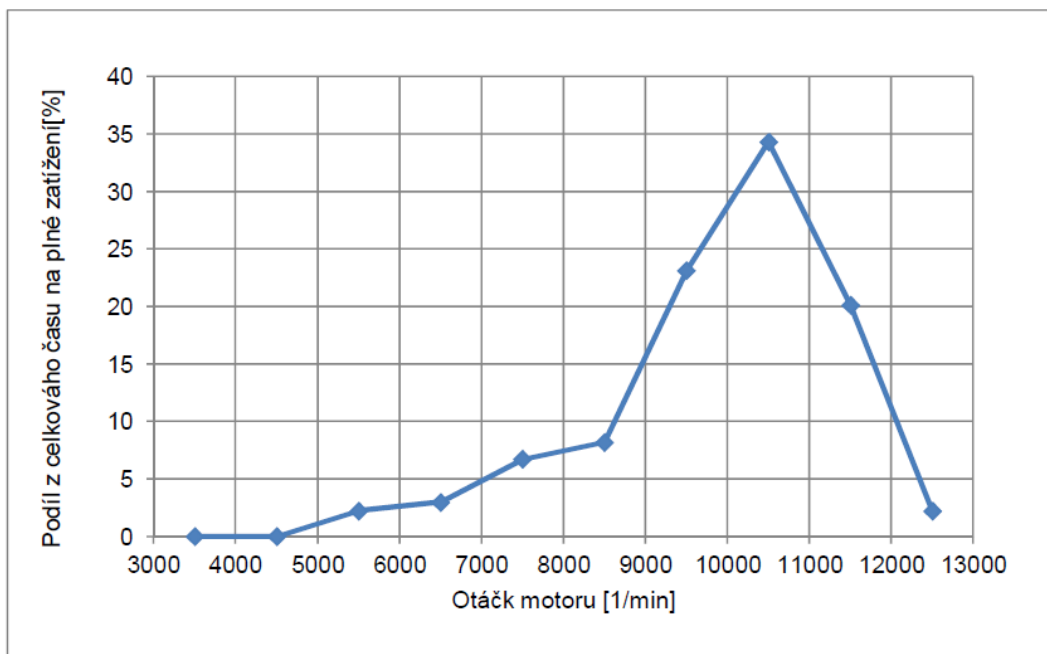
Při návrhu úprav PJ je vhodné dosáhnout takového rozpětí otáček, které by mělo hodnoty kolem 6 000 – 10 000 (max 11 000) ot/min. Horní hodnoty tohoto rozpětí jsou otáčky, při kterých se ucpává restriktor a do motoru proudí menší množství vzduchu, zvyšují se pumpovní ztráty a klesá účinnost motoru. [2]



Obr. 27 Data z dataloggeru vozu UWB ze závodní tratě (otáčky motoru, tlak oleje, teplota chladiva a akcelerometry)



Obr. 28 Data z dataloggeru vozu UWB - závod v České Republice



Obr. 29 Využití otáčkového spektra motoru během závodu

3 1D SIMULACE POHONNÉ JEDNOTKY

3.1 Lotus Engine Simulation

LOTUS ENGINE SIMULATION je simulační program schopný předpovědět kompletní výkonové charakteristiky systému motoru. Program lze použít k výpočtu:

- plné a částečné zatížení motoru v ustáleném stavu a v přechodných operačních podmínkách
- údaje o přenosu tepla ve válci
- okamžité změny vlastností plynu v motoru
- turbodmychadla a kompresoru

Uživatel sestavující simulační model zadá specifikace motoru a rozdělovače:

- rozměry vrtání válce, zdvih a rozměry ojnice
- kompresní poměr
- rozměry ventilů a data časování událostí ventilů
- údaje o průtoku sacího a výfukového portu
- rozměry sacího a výfukového potrubí
- mapování výkonu turbín a kompresorů
- provozní otáčky motoru
- údaje o uvolnění tepla, které charakterizují spalovací proces
- poměr vzduchu a paliva a teplota a tlak přivedeného vzduchu

Po definování údajů o specifikaci motoru a údajů o podmínkách zkoušek je provedena simulace cyklu. [7]

3.2 1D Simulace pohonné jednotky UWB03

Cílem 1D simulace pomocí softwaru Lotus Engine Simulation je návrh úprav jednotlivých prvků a přidružených komponent pohonné jednotky. V tomto případě je cílem simulací návrh úprav pro zvýšení točivého momentu v nižším spektru otáček u motoru pro vůz Formula Student – vůz UWB - 04 pro sezonu 2017. Ve voze UWB04 bude použita pohonná jednotka stejného typu, jako ve voze UWB03 a to PJ ze stroje Yamaha YZF-R6 viz obr. 1.

1D simulace bude nejdříve postavena na PJ a přidavných komponent z vozu UWB03, jelikož k této PJ jsou k dispozici data reálného výkonu a točivého momentu. S těmito daty bude následně provedena validace výsledků s výsledky 1D simulací. Nejdříve bude sestaven 1D model podle UWB03, tento model bude nasimulován a porovnán s reálnými daty. Pokud budou hodnoty výkonu a točivého momentu získané pomocí 1D simulací konvergovat k reálným datům, lze tvrdit, že 1D model a simulace jsou správně sestaveny. Následně se na tomto 1D modelu provedou parametrické optimalizace prvků na PJ a přidružených komponent ke splnění cíle – zvýšení výkonu a točivého momentu v nižším spektru otáček.

Pro vytvoření 1D modelu v softwaru Lotus Engine Simulation je zapotřebí změřit všechny geometrické instance PJ a přidružených komponent. Postupem od sání k výfuku toto zahrnuje informace o:

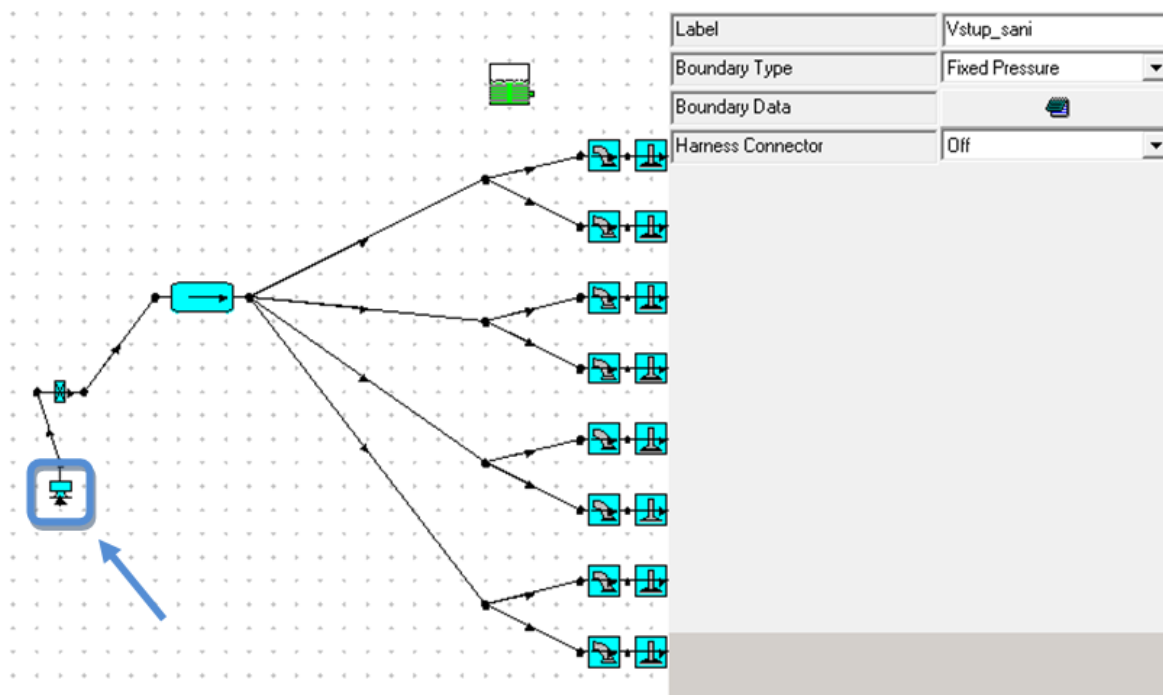
- škrticí klapce
- restriktoru
- airboxu (plénium)
- sacím potrubí (runnery)
- komorách v hlavě válců
- ventilech, vačkových hřídelí a dalších prvků v motoru
- spalovacím prostoru
- výfukovém potrubí a výfukovém tlumiči

3.2.1 1D model

1D model PJ se vytvoří pomocí jednotlivých prvků sacího ústrojí, motoru a výfukového ústrojí. Tyto prvky budou vytvořeny na základě naměřených hodnot z vozu UWB03 a následně bude u tohoto modelu spuštěna simulace. Cílem tohoto základního modelu je získání výstupních hodnot točivého momentu a výkonu, které se budou blížit reálně naměřeným hodnotám z dynamometru. Potom je možno považovat 1D model za správně navržený a dále na něm stavět a rozvíjet ho. Cílem bude optimalizovat jednotlivé prvky PJ k získání co nejoptimálnějších hodnot výkonu a točivého momentu v nižších otáčkách (cca do 11 000ot/min).

Vstup do sání

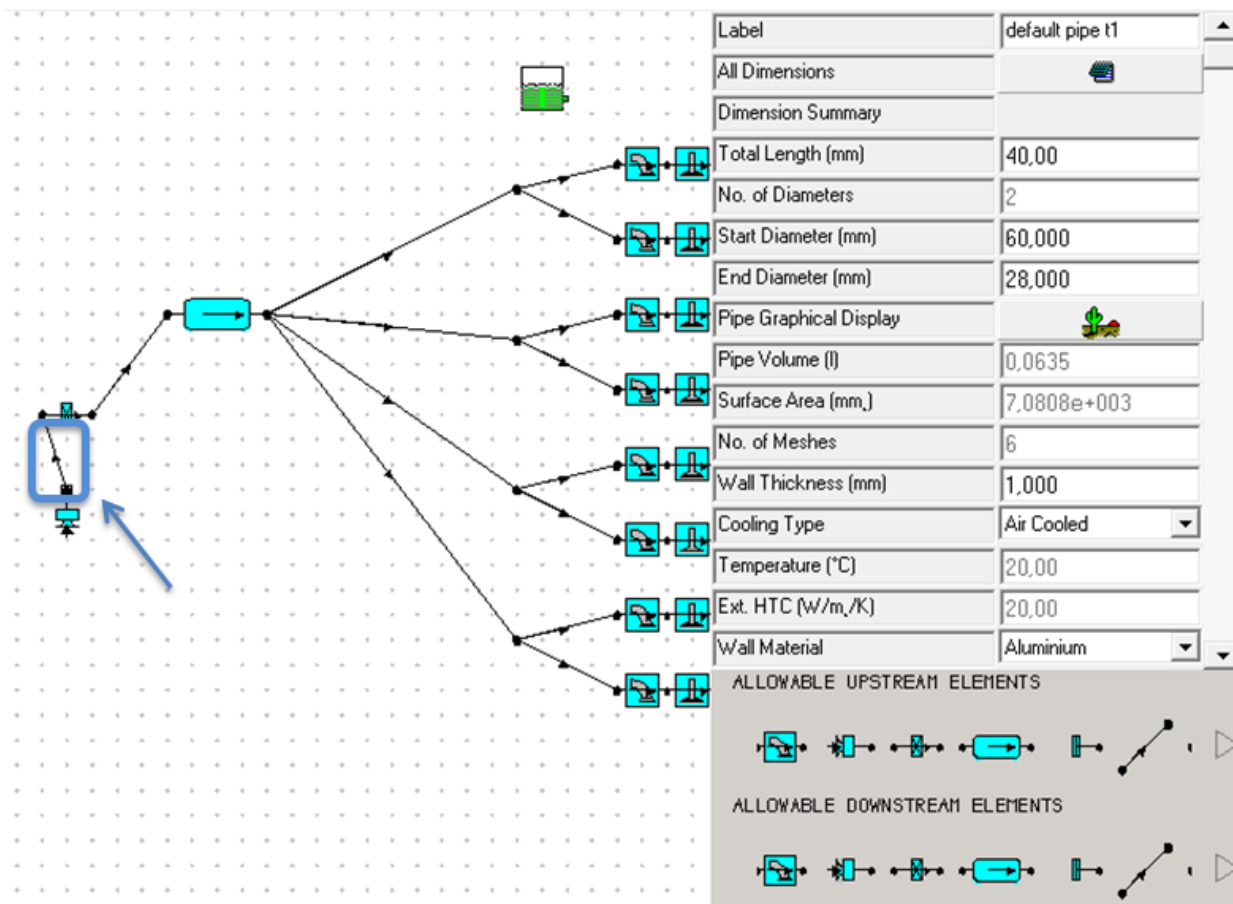
Vstup do sání je charakterizován tlakem a teplotou vzduchu, který se skládá z atmosférických plynů (procentuální podíl O_2 je 21%). Tlak (absolutní) je nastaven na 1bar = atmosférický tlak. Teplota je nastavena na $20^{\circ}C = 293,15K$.



Obr. 30 Vstup do sání navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

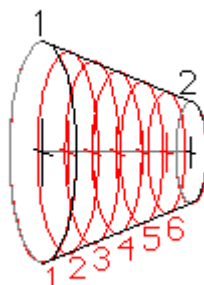
Potrubí vedoucí od vstupu ke škrticí klapce

Potrubí ke škrticí klapce má tvar difuzoru. Toto potrubí je součástí zakoupené klapky, stejně tak i restriktor, který odpovídá pravidlům soutěže Formula Student. Tato část je vyrobena z hliníku.



Obr. 31 Přívod ke škrticí klapce navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Len = 0.00 40.00

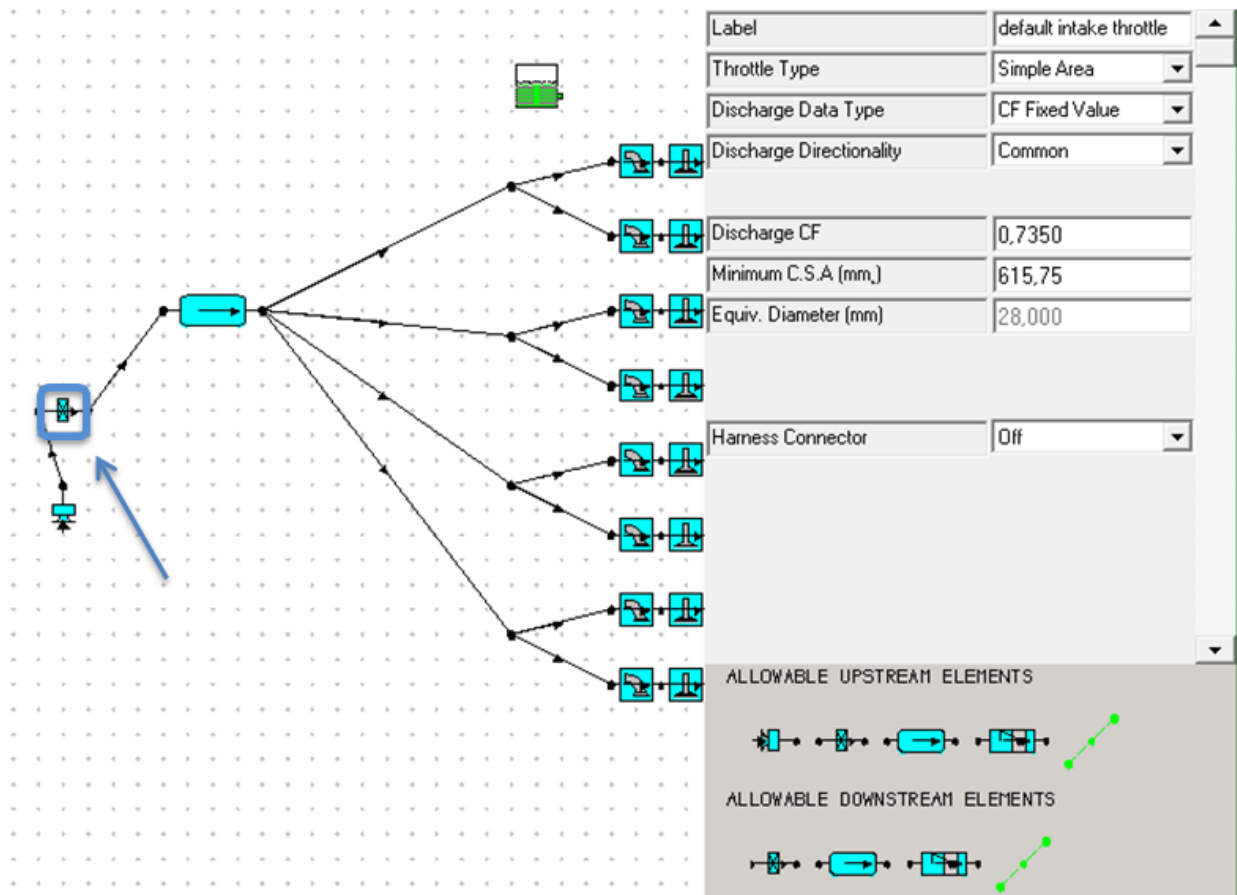


Dia = 60.00 28.00

Obr. 32 Geometrie přívodu ke škrticí klapce navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Škrticí klapka

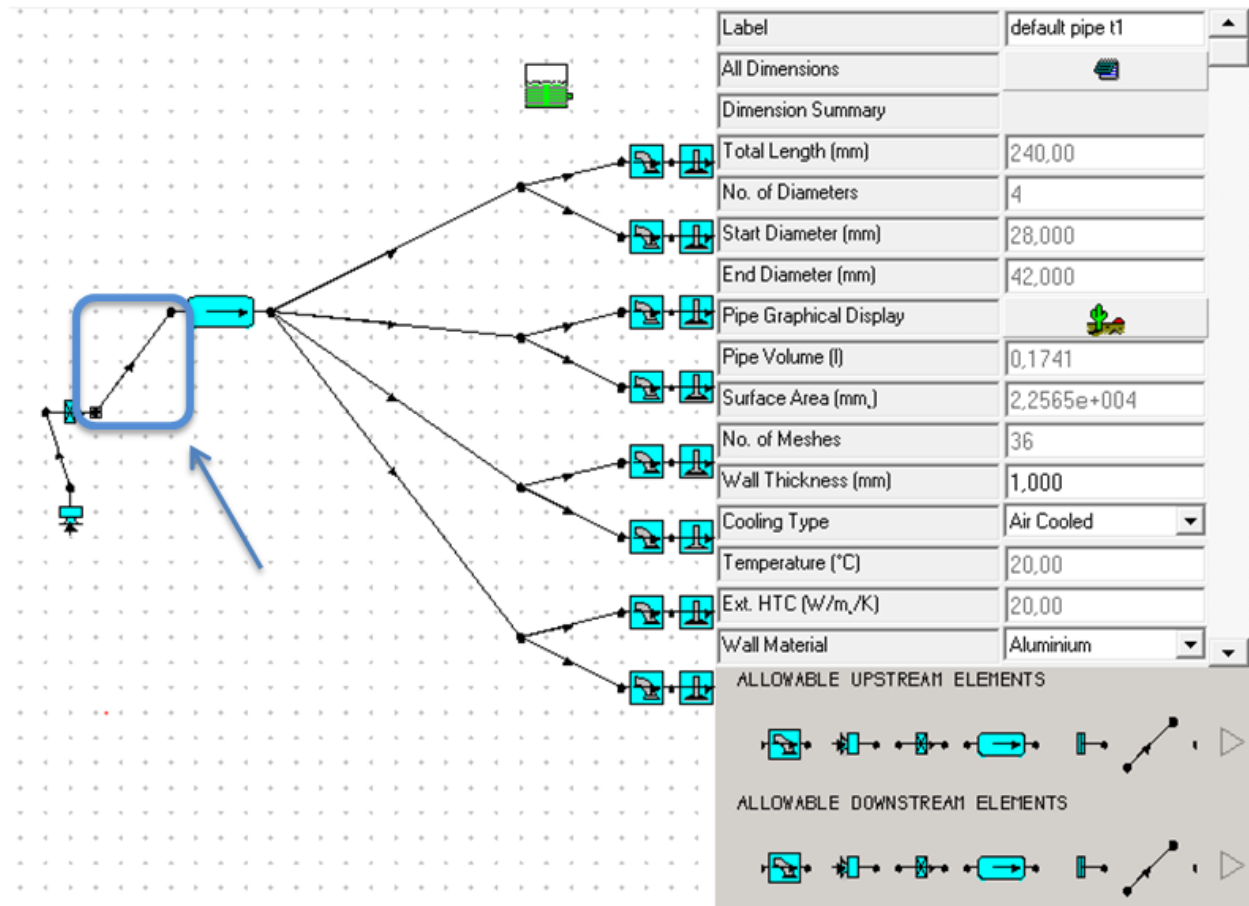
Škrticí klapka je definována svým průměrem (obsahem účinné plochy pro prostup vzduchu) a svým typem – zde zvolen zjednodušený typ CF pro rychlejší výpočet simulace (při změně typu klapky na typ butterfly – který více odpovídá klapce od AT Power – nastala zratelná změna ve výsledcích).



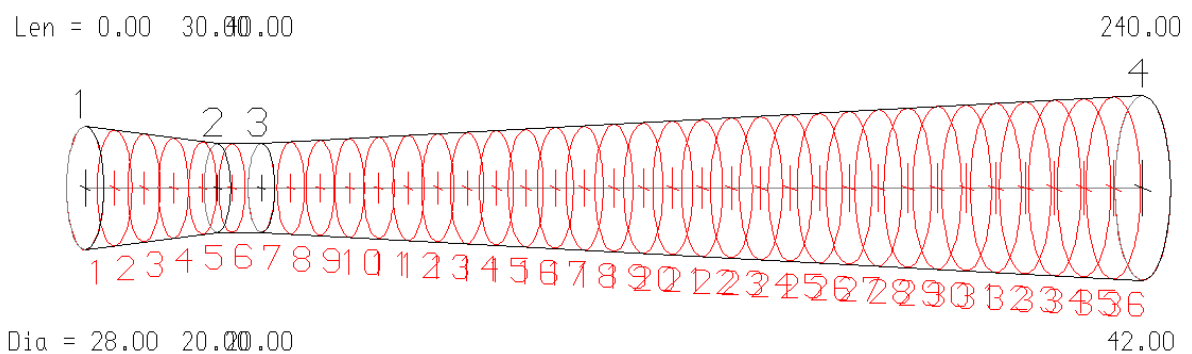
Obr. 33 Škrticí klapka navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Restriktor a potrubí k airboxu

Restriktor, který je součástí klapky od AT Power, je vymodelován společně s potrubím, které vede k airboxu (plénu), jelikož připojení obou částí je možno zanedbat.



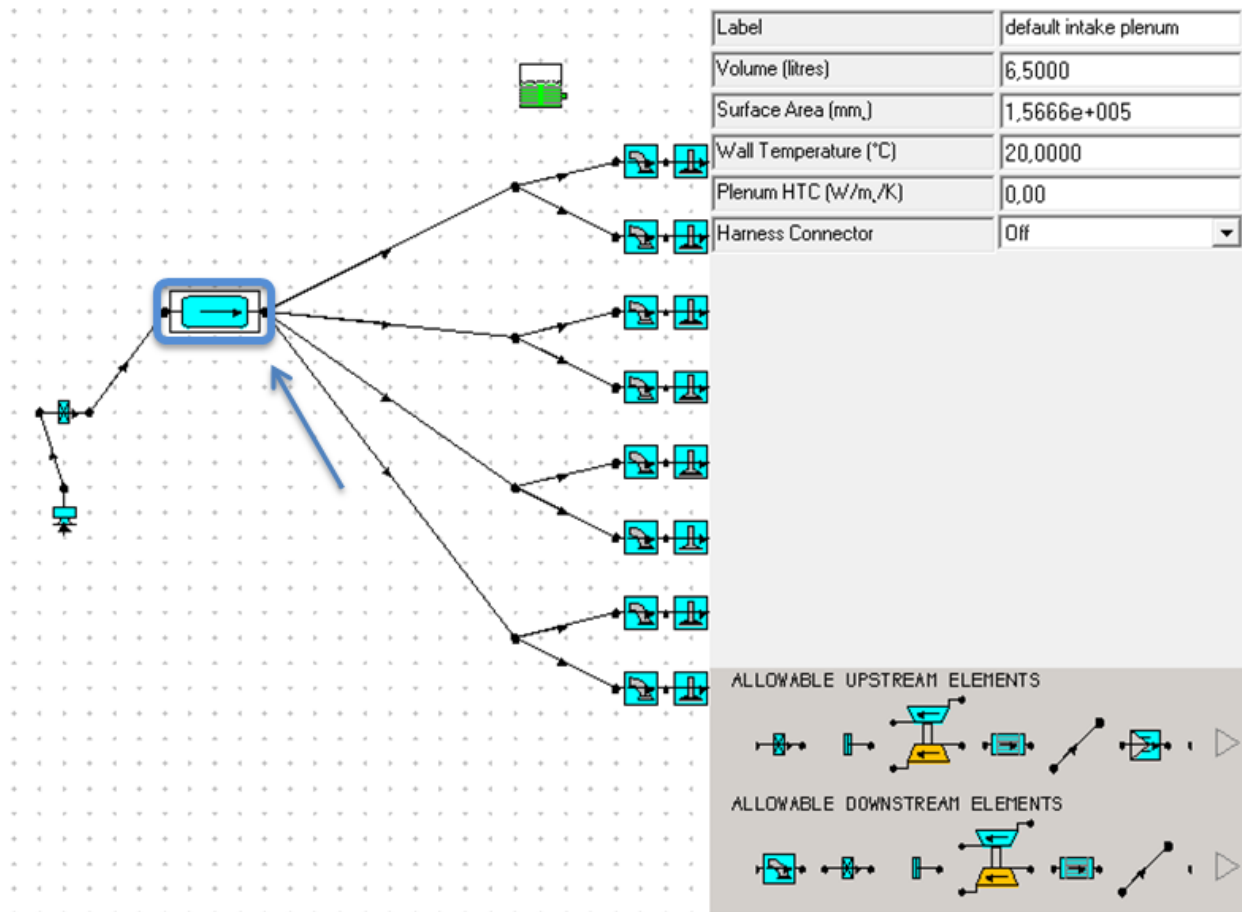
Obr. 34 Restriktor a potrubí k airboxu navržený v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 35 Geometrie restriktoru a potrubí navržená v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Airbox

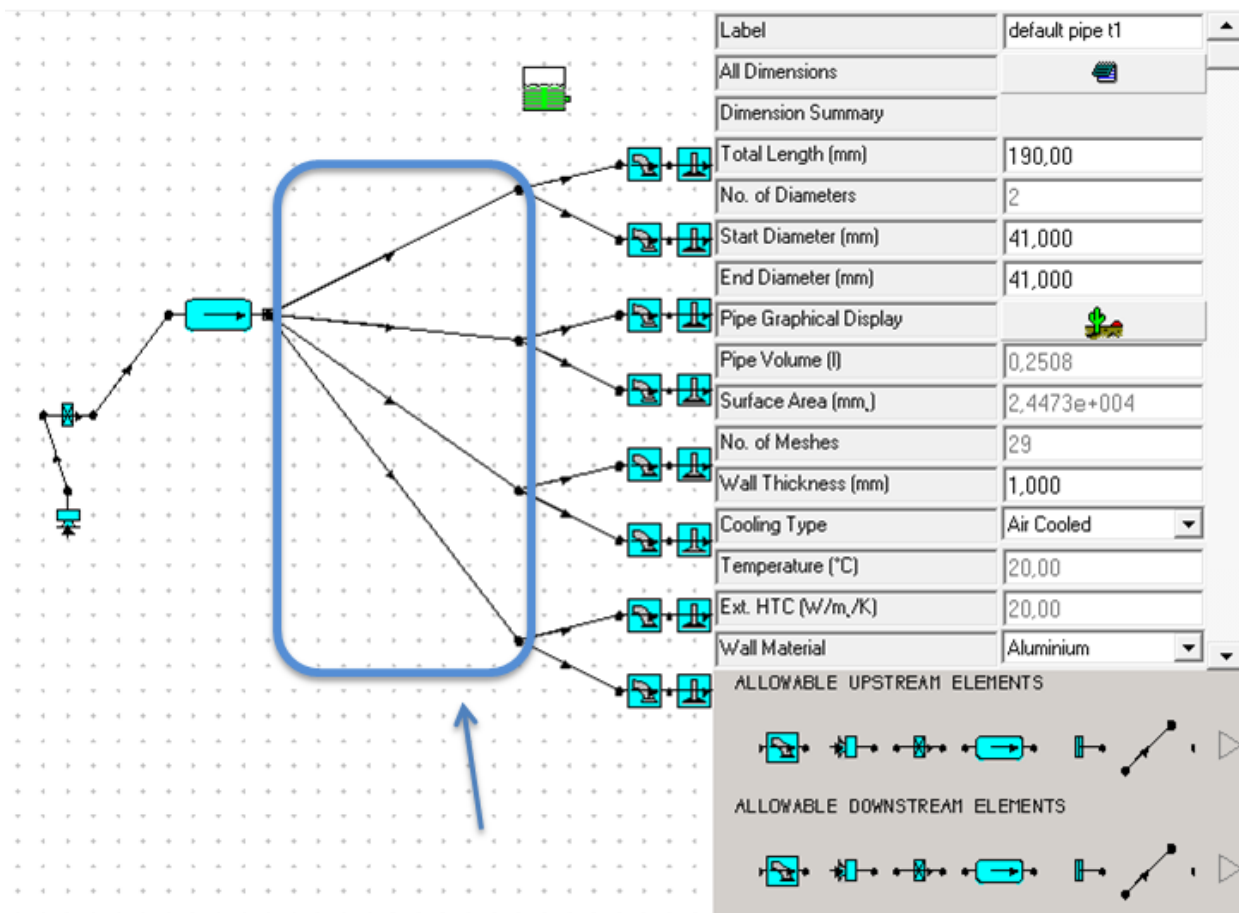
Airbox je v tomto případě použit zjednodušený pro rychlejší výpočet simulací. Airbox lze navrhnout také jiným způsobem za použití jednotlivých segmentů. Tento airbox poté více odpovídá realitě, ovšem v tomto případě je, kvůli rychlejším výpočtům simulací i optimalizací, vhodnější variantou airbox zjednodušený. Podstatné je zadání objemu airboxu a vnitřní plochy airboxu – tyto data je možno zjistit z CAD modelů týmu UWB Racing Team Pilsen viz obr. 11.



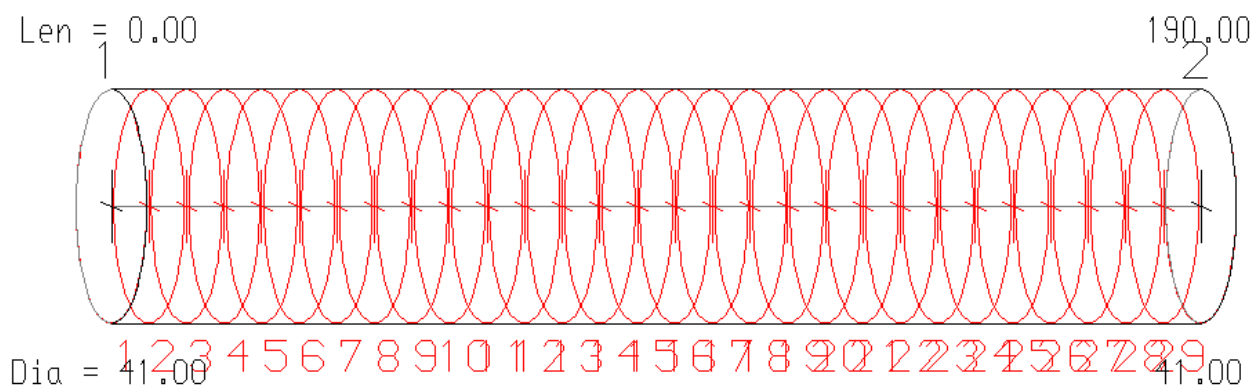
Obr. 36 Airbox navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Runnery

Na voze UWB-03 jsou použity dva typy runnerů. Tyto runnery se liší pouze ve své délce. Dva krajní runnery jsou 190mm dlouhé a dva prostřední runnery jsou 210mm dlouhé. Geometrie runnerů je zjednodušená a je odstraněn vstupní difuzor pro zrychlení průběhu simulací.



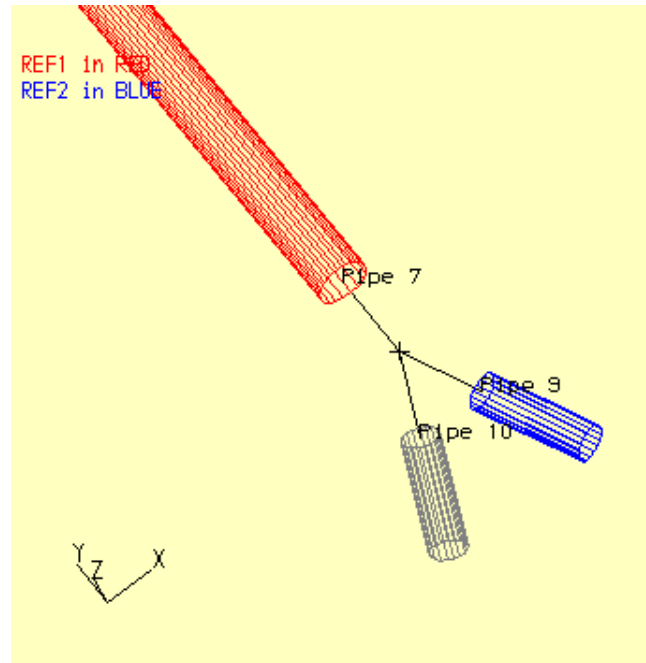
Obr. 37 Runnery – krajní typ navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



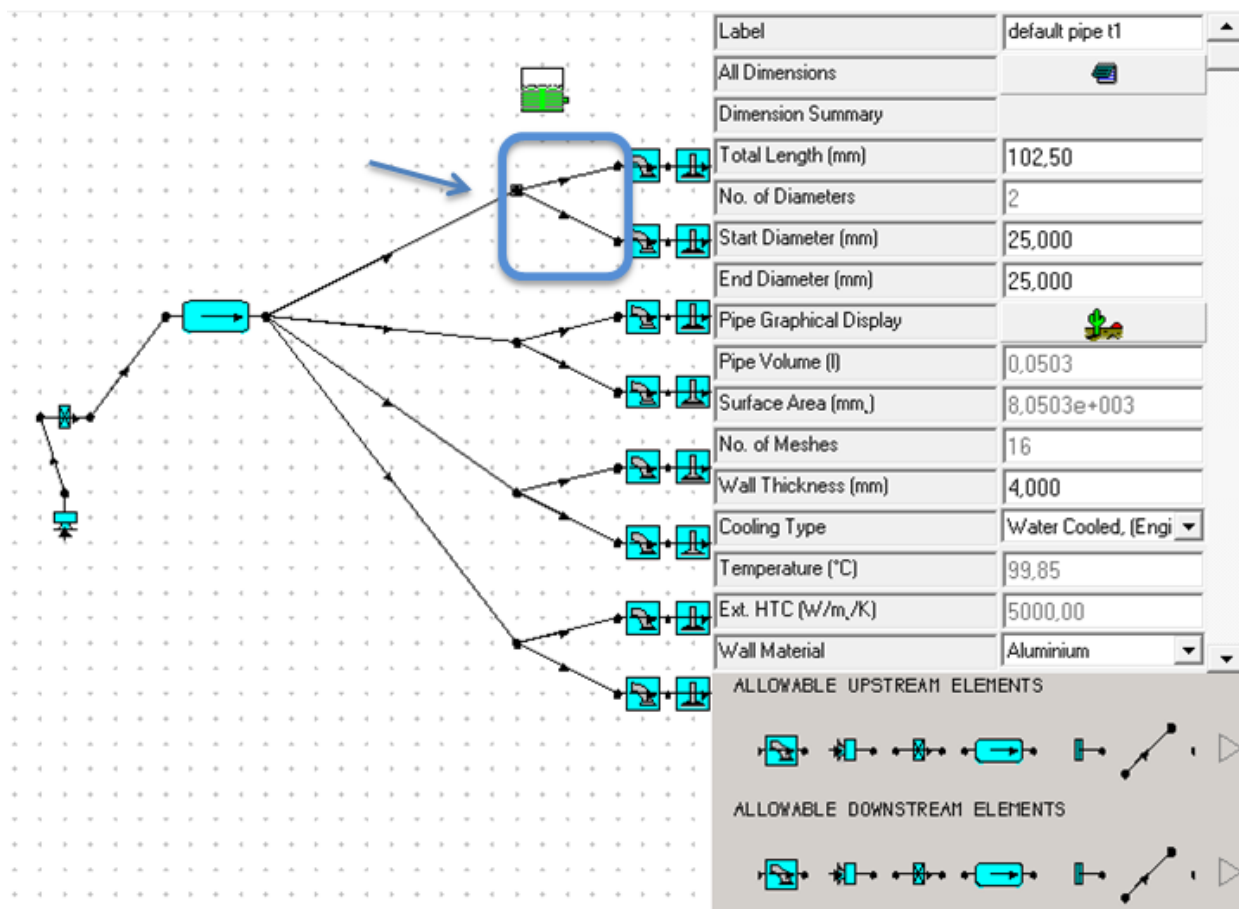
Obr. 38 Geometrie runnerů navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Vstupní kanály v hlavě válců

Jsou navrženy zjednodušeně a to tím způsobem, že jsou rozděleny na dvě potrubí od začátku kanálu až k ventilu. Geometrie a osová délka byla získána z 3D skenu.



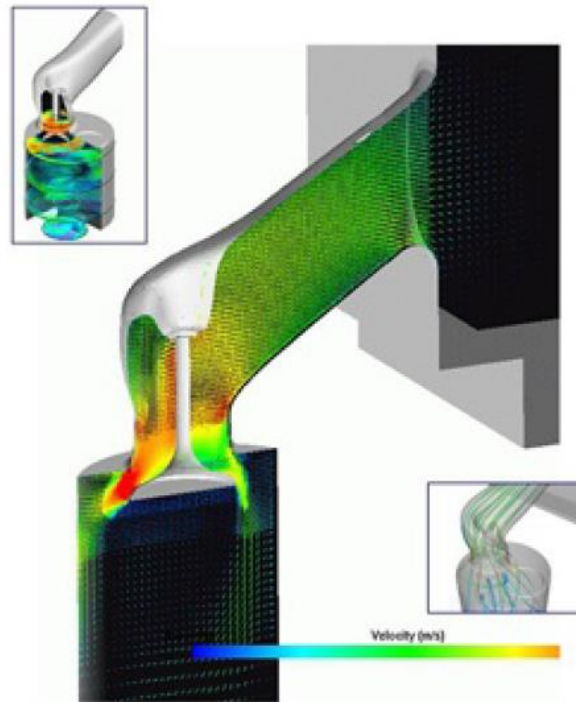
Obr. 39 Napojení potrubí navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



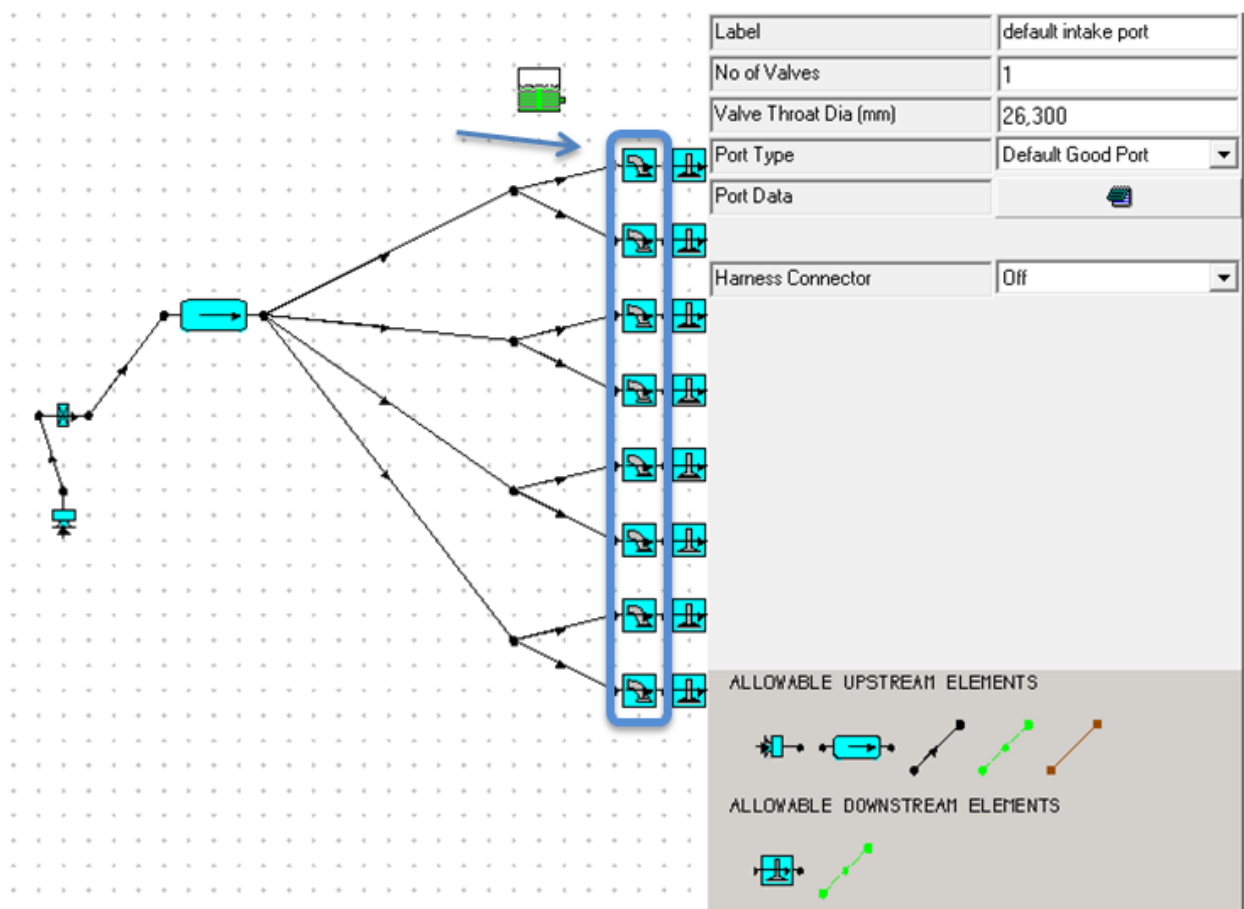
Obr. 40 Vstupní kanály v hlavě válců navrženy v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Vstupní port

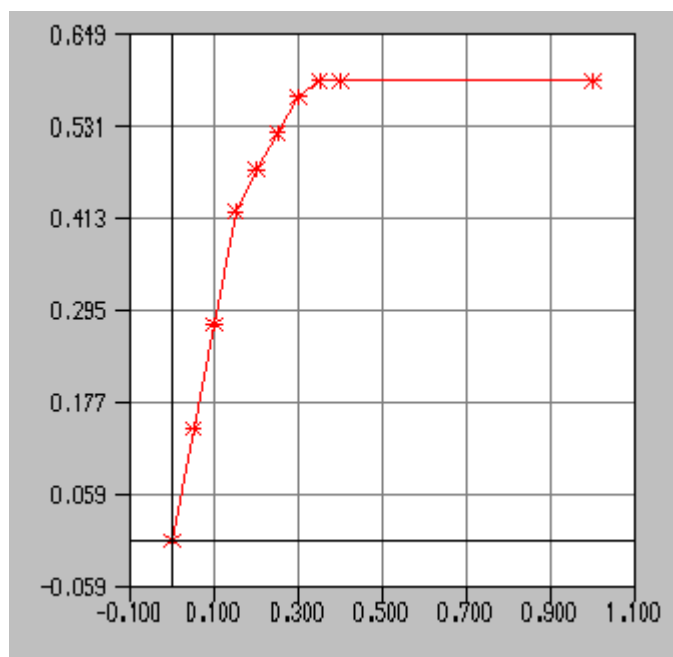
Definice průměru vstupního otvoru a proudění (koeficient proudění v závislosti na ventilu) v místě sedla ventilu. Vstupní a výfukové otvory mají velký vliv na vlastnosti proudění vzduchu uvnitř spalovací komory. Proto tyto charakteristiky proudění vzduchu mají velký vliv na spalování. Zlepšení charakteristik proudění vzduchu může vést k zlepšení výkonu, točivého momentu, úspore paliva, hluku a stabilitě v klidových podmínkách (běh motoru na volnoběh). Z těchto důvodů mnoho výrobců motorů investuje velké množství času a peněz do rozvoje portů. [8]



Obr. 41 CFD Simulace proudění směsi kolem ventilu [8]



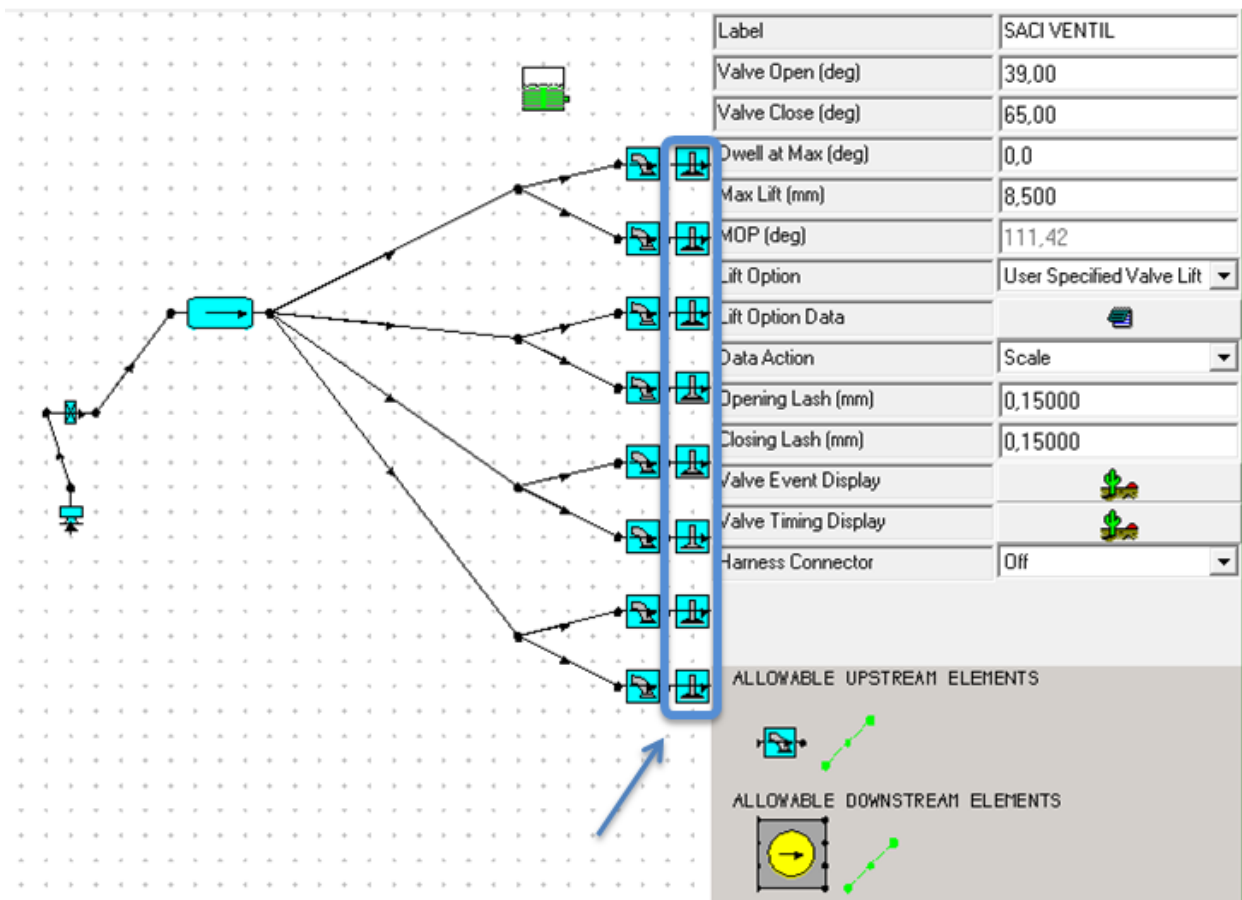
Obr. 42 Vstupní otvor navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



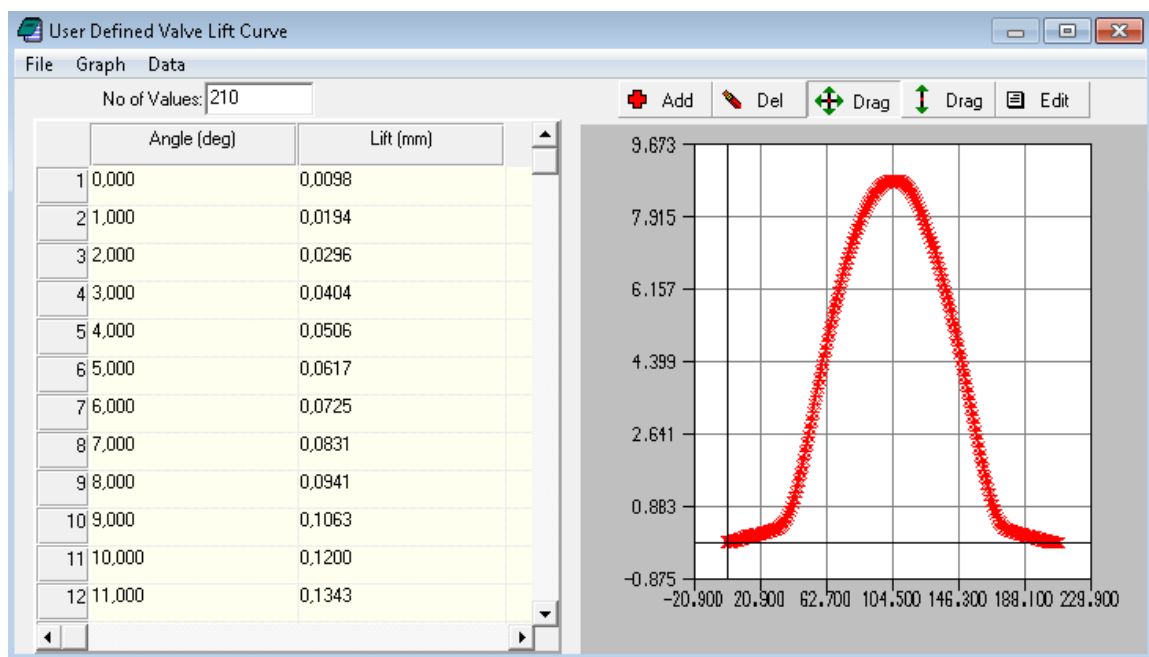
Obr. 43 Proudění sacím portem (Port flow coefficient) navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Sací ventil

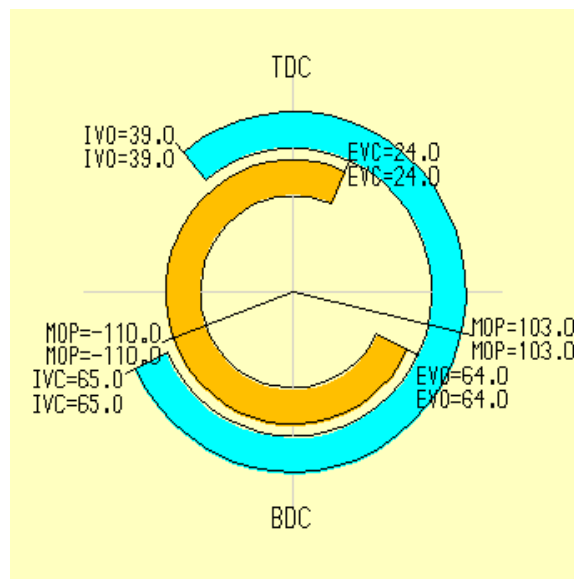
Při zadávání sacího ventilu jsou důležité hodnoty časování ventilu – úhel natočení klikové hřídele, kdy ventil otevře, zavře a v jaké fázi má největší zdvih. Také je třeba zadat ventilová vůle, kterou je možno zjistit v servisním manuálu motocyklu Yamaha YZF-R6. Pro funkci zdvihu ventilu na natočení klikové hřídele je použita křivka získaná z naskenované vačkové hřídele a dále podrobena Motion simulaci v softwaru Siemens NX v kapitole 2.2.2.



Obr. 44 Sací ventil navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



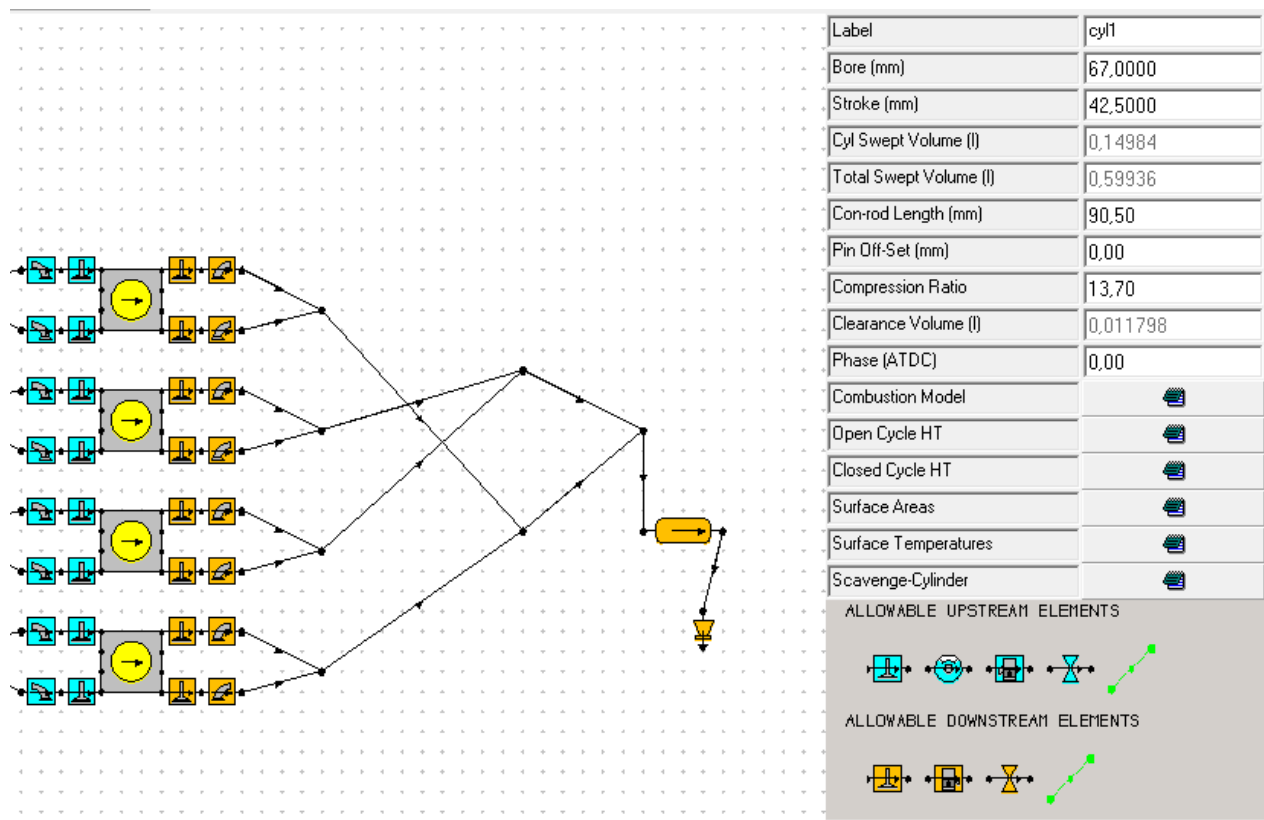
Obr. 45 Zdvih ventilu v závislosti na natočení klikové hřídele navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



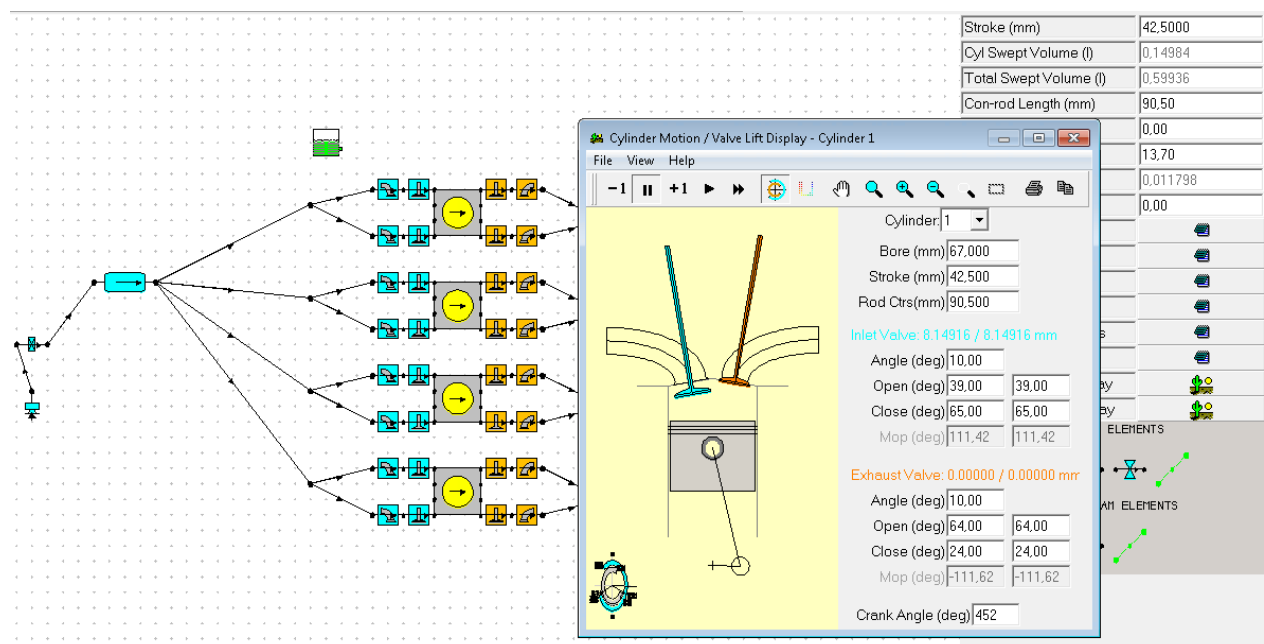
Obr. 46 Časování ventilů navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Válec

Při zadávání hodnot pro spalovací prostor je nutné zjistit geometrické hodnoty válce jako vrtání a zdvih, délka ojnice – tyto informace lze zjistit ze servisního manuálu. Kompresní poměr je u originálního motoru 13,1 ovšem u vozu UWB03 byl kompresní poměr zvýšen na 13,7. Toto zvýšení kompresního poměru bylo zajištěno výměnou těsnění pod hlavou za nižší.



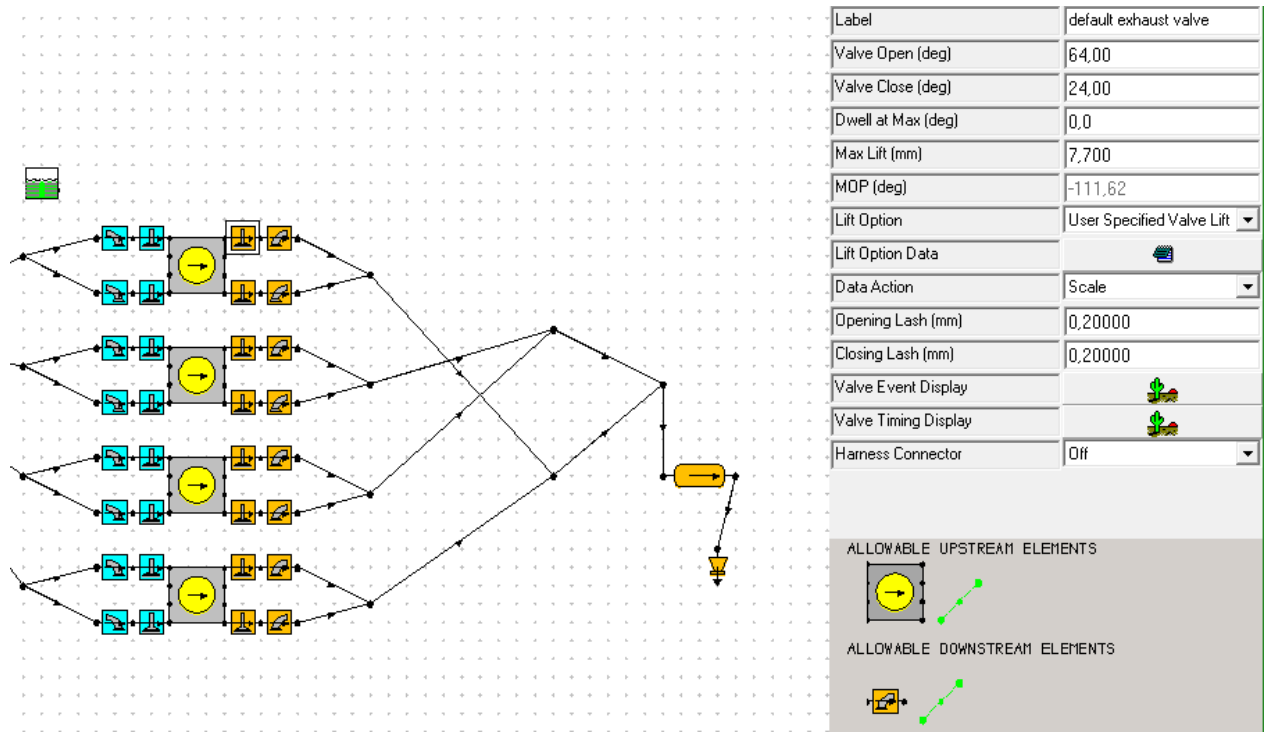
Obr. 47 Válec navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



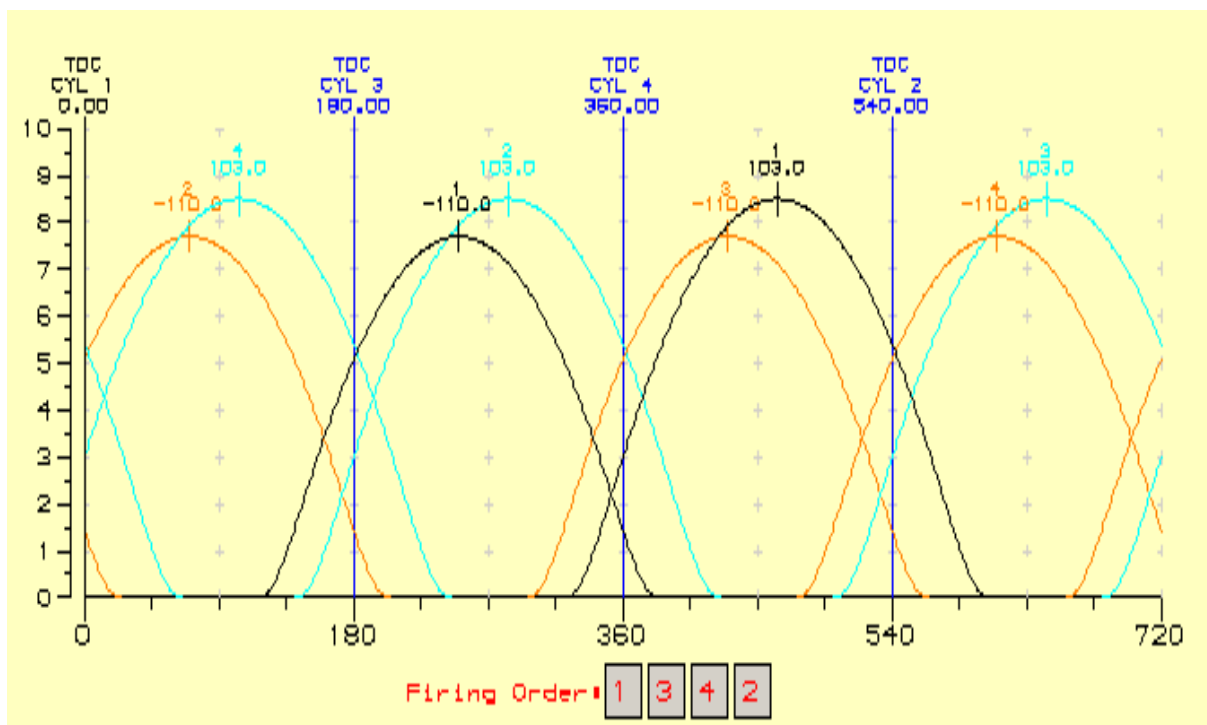
Obr. 48 Zadávání hodnot válce motoru v softwaru Lotus Engine Simulation

Výfukový ventil

U výfukového ventilu se zadávají stejné parametry jako u ventilů sacích.



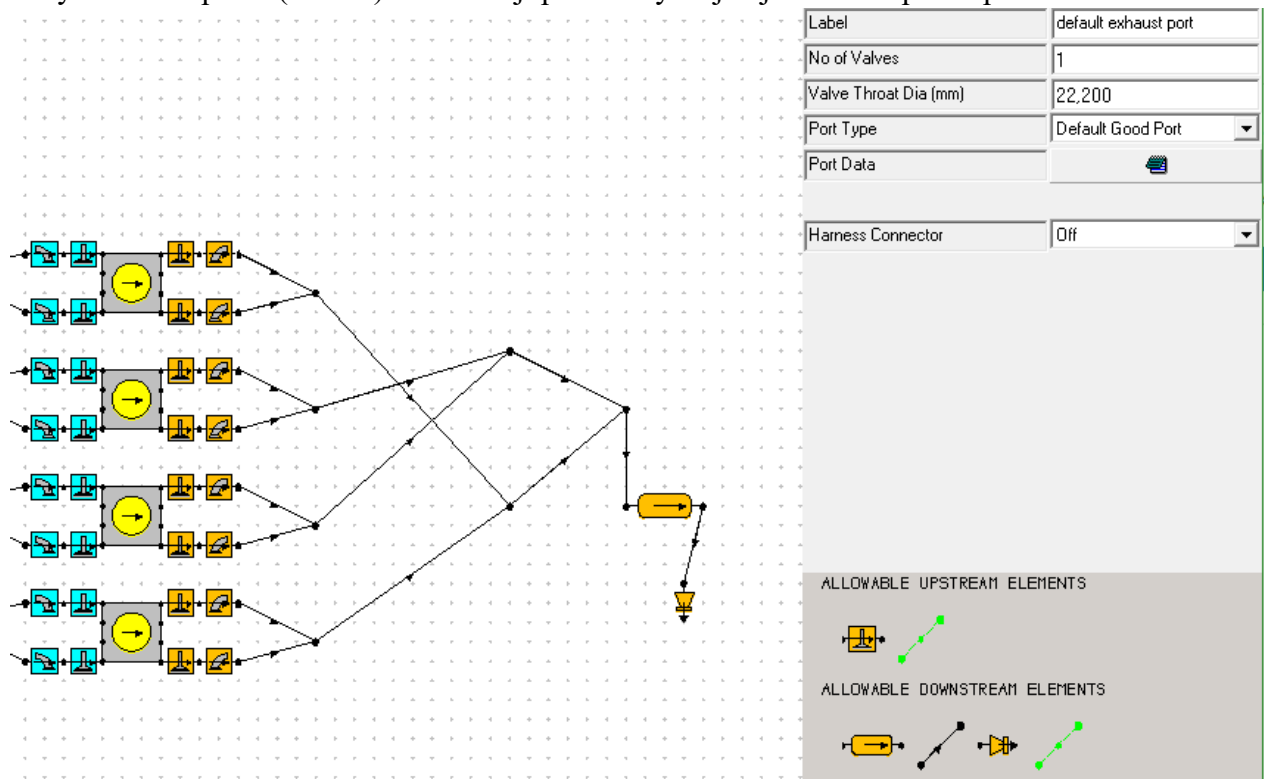
Obr. 49 Výfukový ventil navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



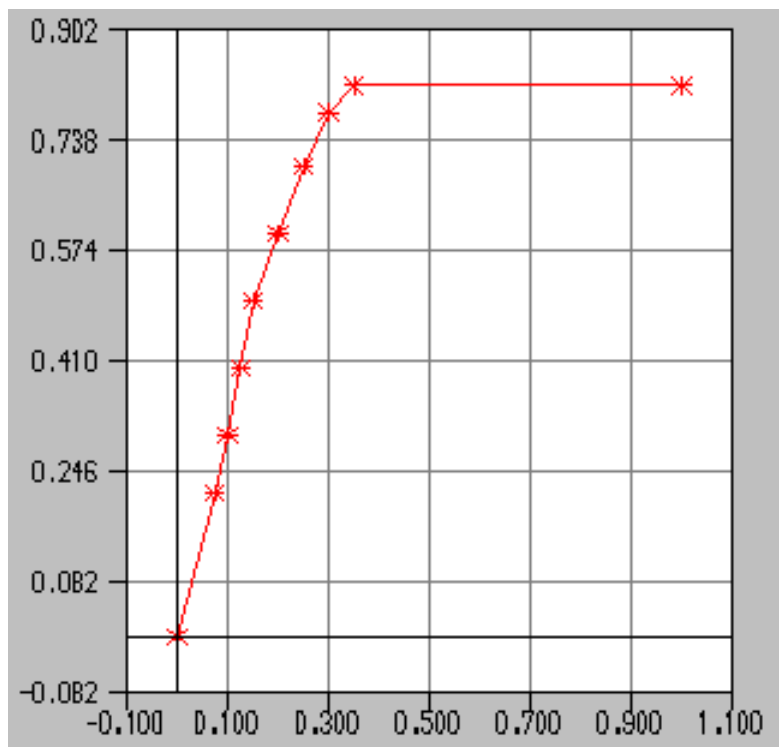
Obr. 50 Střih ventilů navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Výfukový port

U výfukového portu (kanálu) se zadávají parametry stejně jako u vstupního portu.



Obr. 51 Výfukový port navržený v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 52 Proudění výfukovým portem navržený v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Výfukové kanály v hlavě válců

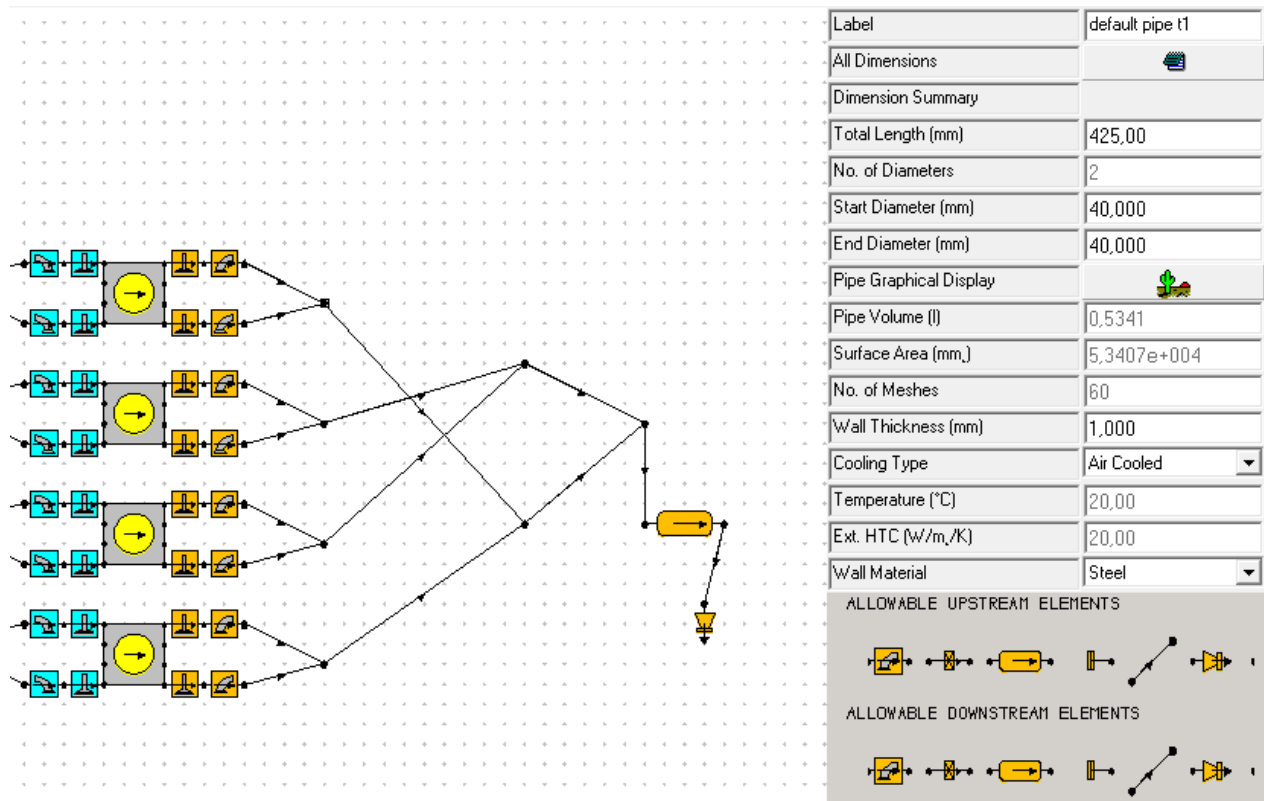
Parametry zadávají stejně jako u vstupních kanálů.

Label	default pipe t1
All Dimensions	
Dimension Summary	
Total Length (mm)	65,00
No. of Diameters	2
Start Diameter (mm)	20,000
End Diameter (mm)	20,000
Pipe Graphical Display	
Pipe Volume (l)	0,0204
Surface Area (mm ²)	4,0841 e+003
No. of Meshes	9
Wall Thickness (mm)	4,000
Cooling Type	Water Cooled, (Engi ▾)
Temperature (°C)	99,85
Ext. HTC (W/m ² /K)	5000,00
Wall Material	Aluminium ▾
ALLOWABLE UPSTREAM ELEMENTS	
ALLOWABLE DOWNSTREAM ELEMENTS	

Obr. 53 Výfukové kanály navrženy v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

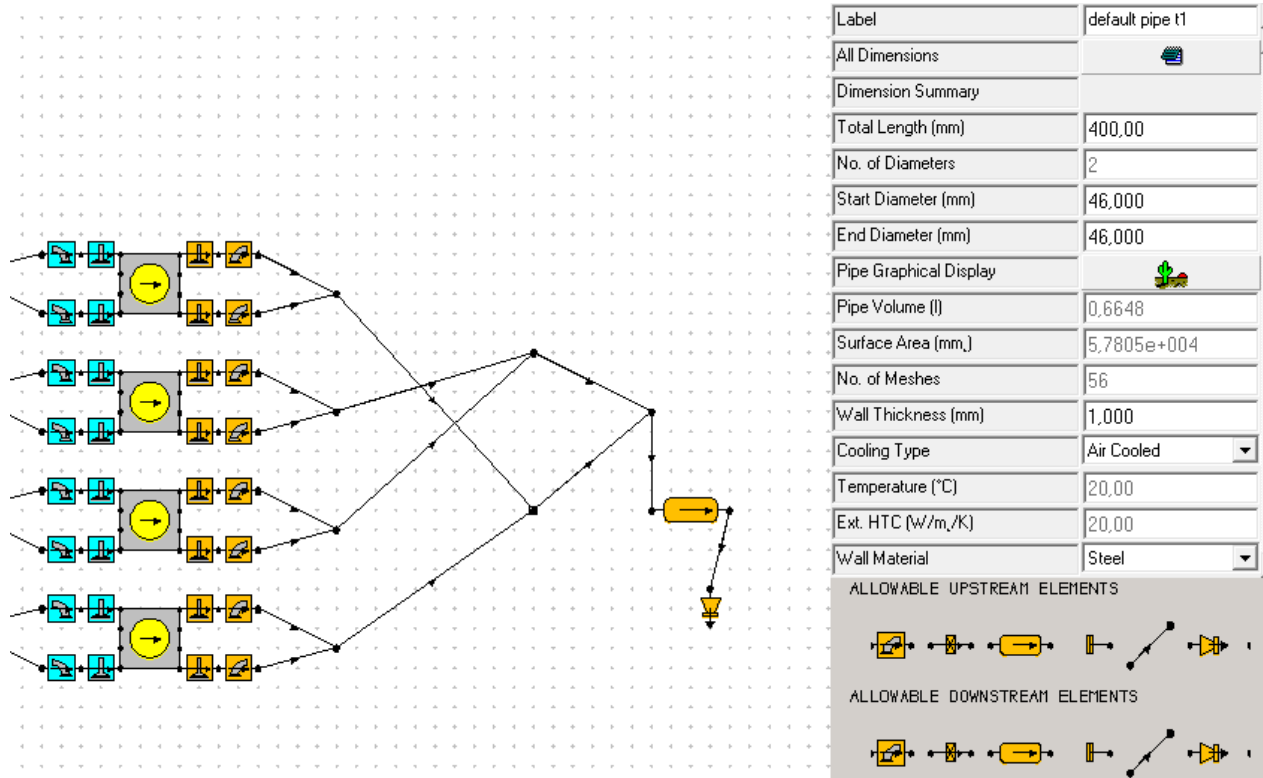
Primární potrubí výfukového systému

1D model výfukového potrubí se zadává na základě geometrických hodnot – průměru a délky potrubí. U primárního potrubí vozu UWB03 je průměr 40mm a délka 425mm.



Obr. 54 Primární potrubí výfukového systému navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

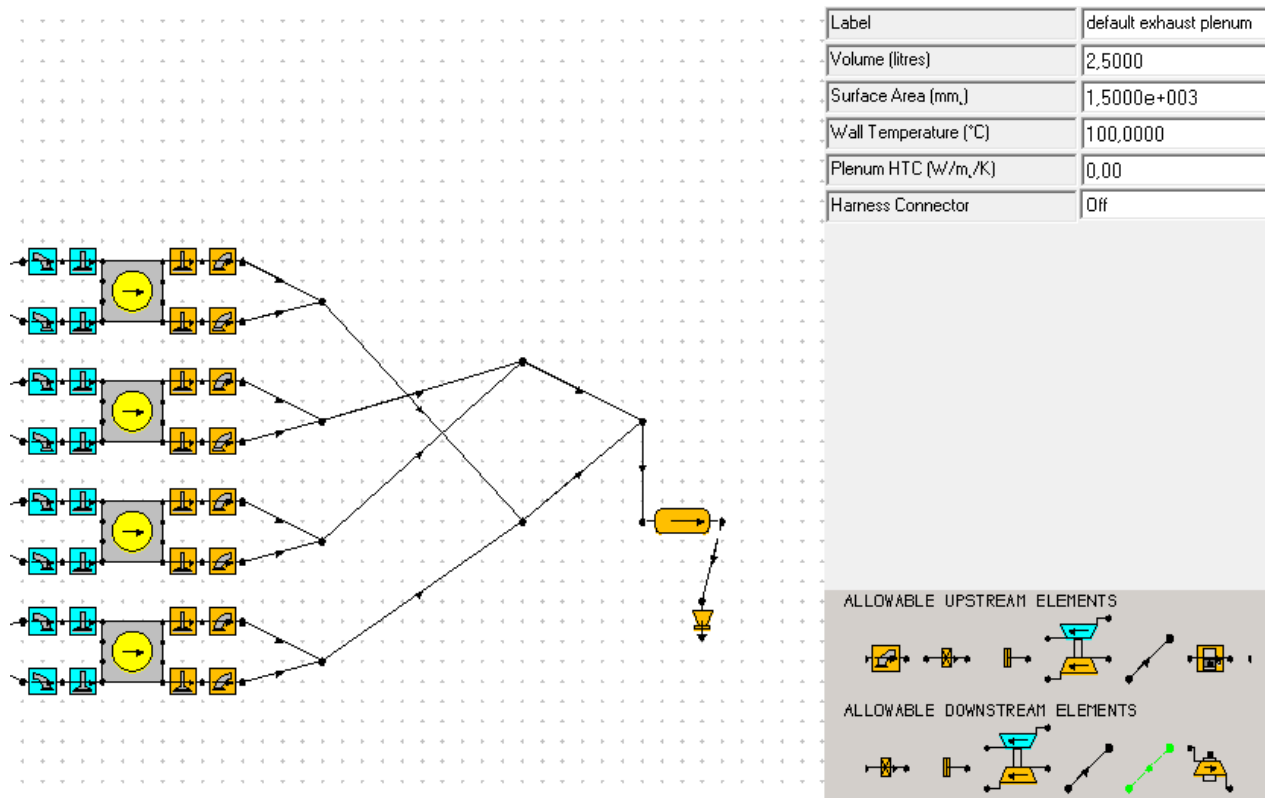
Sekundární potrubí výfukového systému



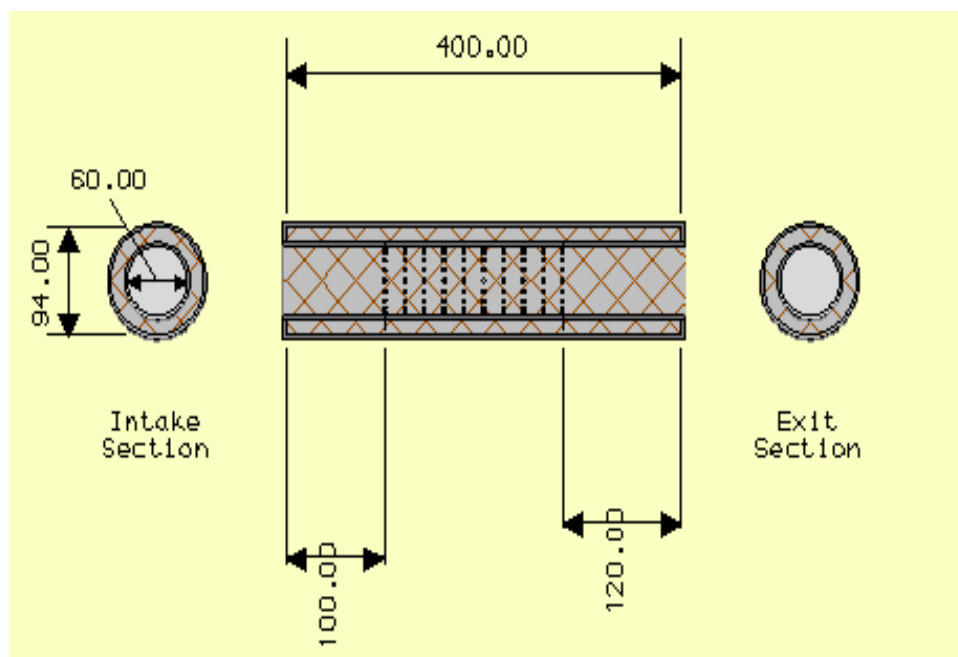
Obr. 55 Sekundární potrubí výfukového systému navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Tlumič výfuku

U tlumiče výfuku je třeba zadat objem a obsah vnitřní plochy tlumiče.

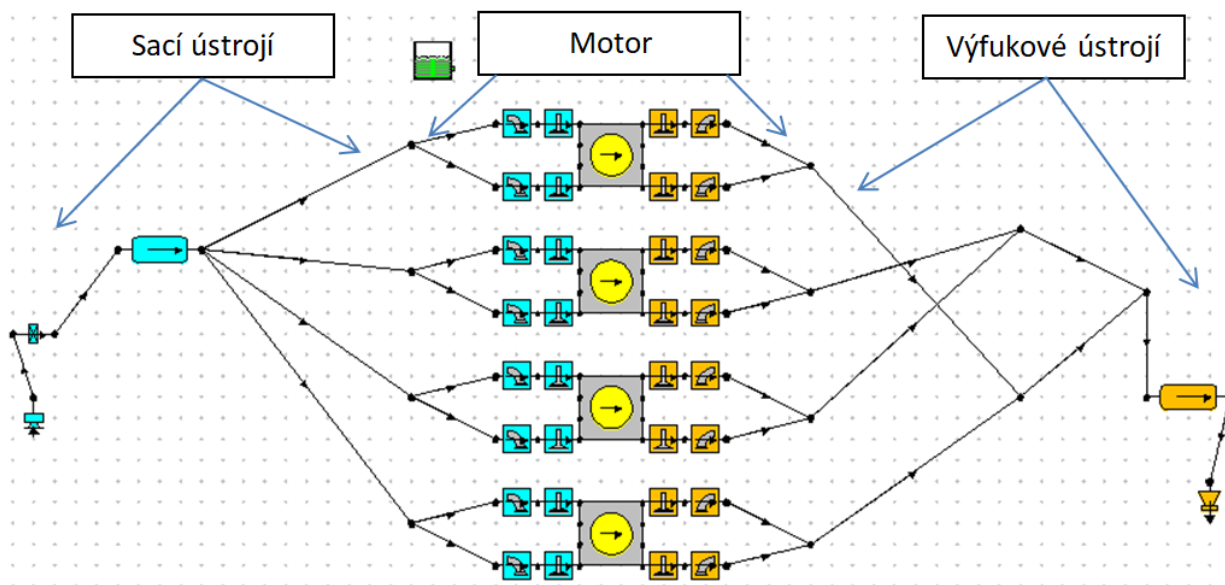


Obr. 56 Tlumič výfuku navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation



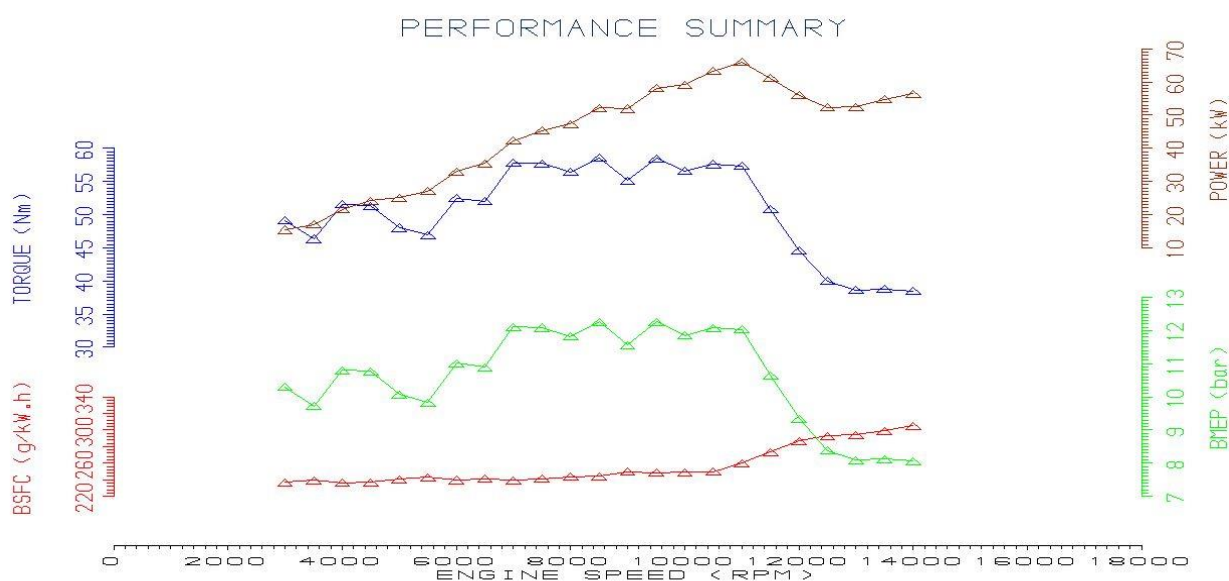
Obr. 57 Tlumič výfuku – grafické zobrazení v softwaru Lotus Engine Simulation

Pohled na celkový 1D model v softwaru Lotus Engine Simulation, který byl vytvořen na základě vozu UWB03:



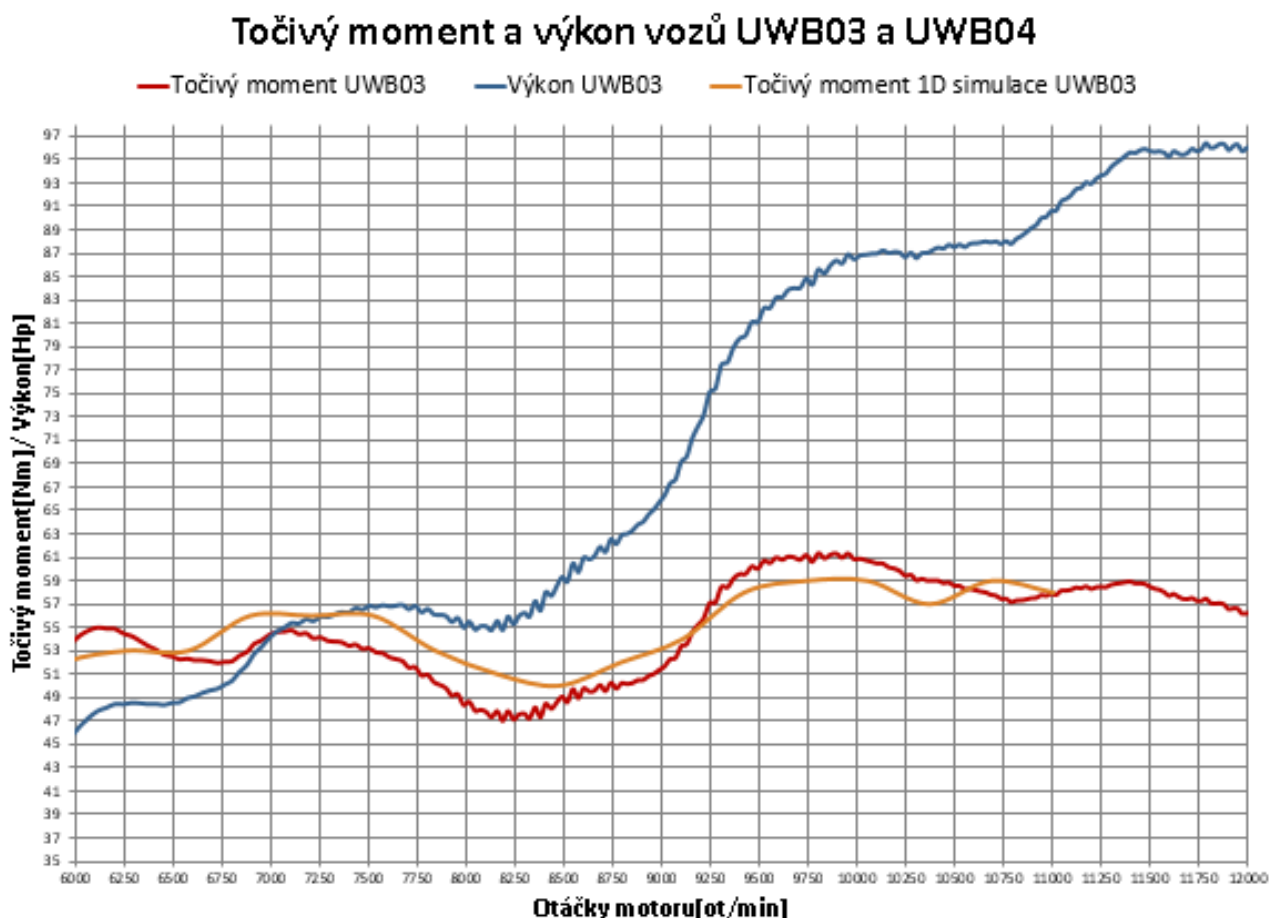
Obr. 58 1D model motoru navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation

Po zadání jednotlivých vstupních dat z oficiálních webových stránek, servisního manuálu Yamaha, 3D skenů, CAD dat, naměřených a nasimulovaných hodnot byla spuštěna simulace 1D modelu PJ vozu UWB03. Výsledky simulace takto postaveného 1D modelu na obr. 59.



Obr. 59 Výsledný točivý moment a výkon z 1D simulace v softwaru Lotus Engine Simulation

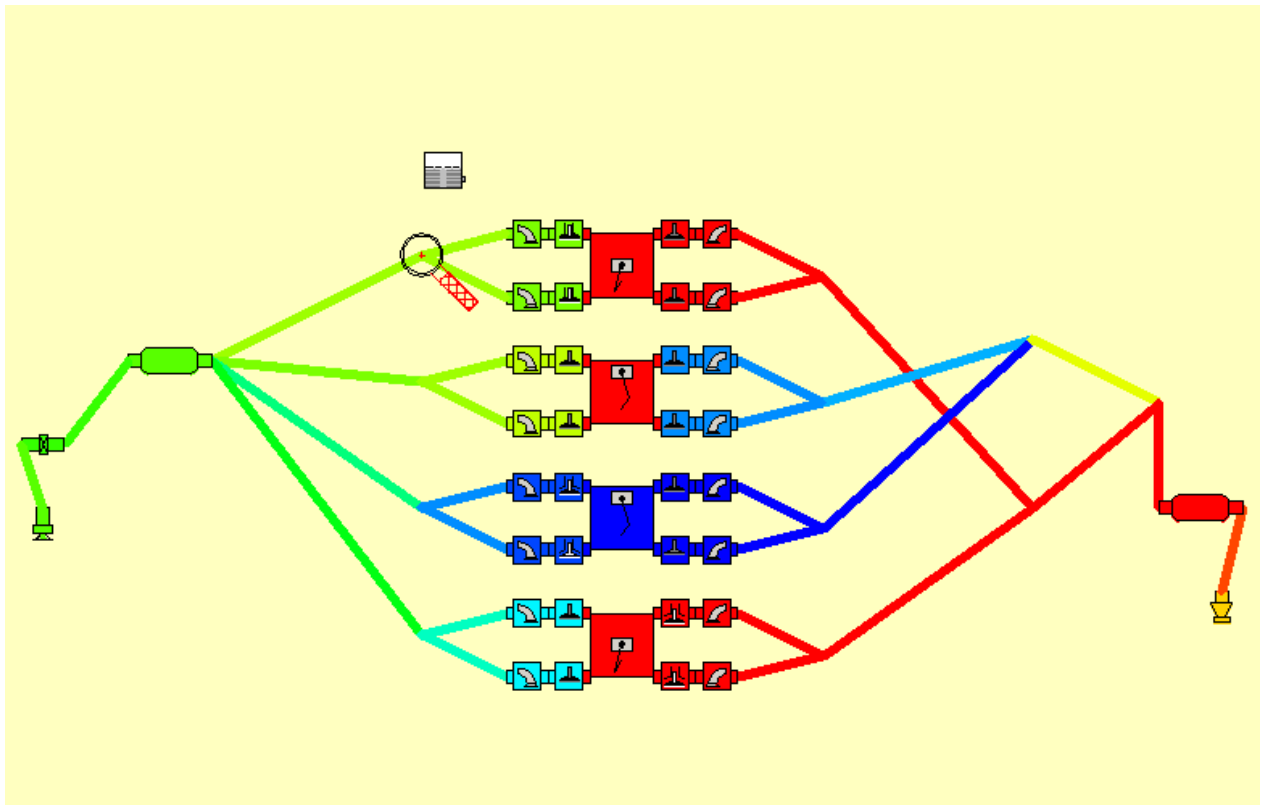
Následně byly tyto výsledky porovnány s naměřenými daty z dynamometru, viz obr. 60. Nejdůležitější rozsah otáček je mezi 6000 – 12 000 ot/min.



Obr. 60 Porovnání výsledného točivého momentu z 1D simulace s reálnými daty

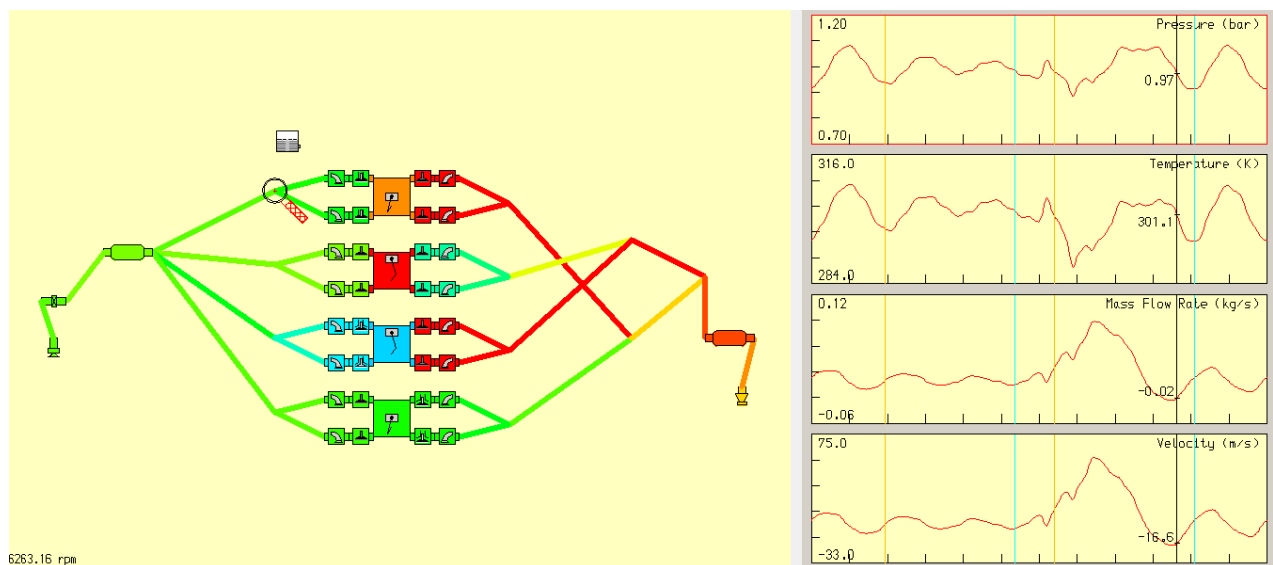
Výsledky točivého momentu z 1D simulace se blíží reálným datům PJ vozu UWB-03. Maximální rozdíl v rozmezí zkoumaných otáček motoru – 6000 až 12 000ot/min byl 8%. Porovnáním reálného točivého momentu s hodnotami ze simulace lze tvrdit, že takto postavený 1D model a simulace jsou správné. Na korektně postaveném modelu a simulaci je možné následně provádět parametrické optimalizace jednotlivých prvků/komponent pro zvýšení hodnot točivého momentu.

Před samotnými optimalizacemi je žádoucí podrobit 1D model, simulace a výsledky analýze. Model a simulace lze analyzovat v modulu PRS v systému Lotus Engine Simulation. V tomto modulu lze pro jednotlivá otáčková spektra prozkoumávat 1D model a to konkrétní místa – konkrétní prvky v 1D modelu. U těchto prvků následně můžeme zjistit průběhy tlaků, teplot, hmotnostního toku, rychlosti proudění atp. v závislosti na natočení klikové hřídele motoru. V tomto modulu je vhodné prozkoumat proudění plynů a následně z těchto poznatků získat informace pro požadované parametrické optimalizace.



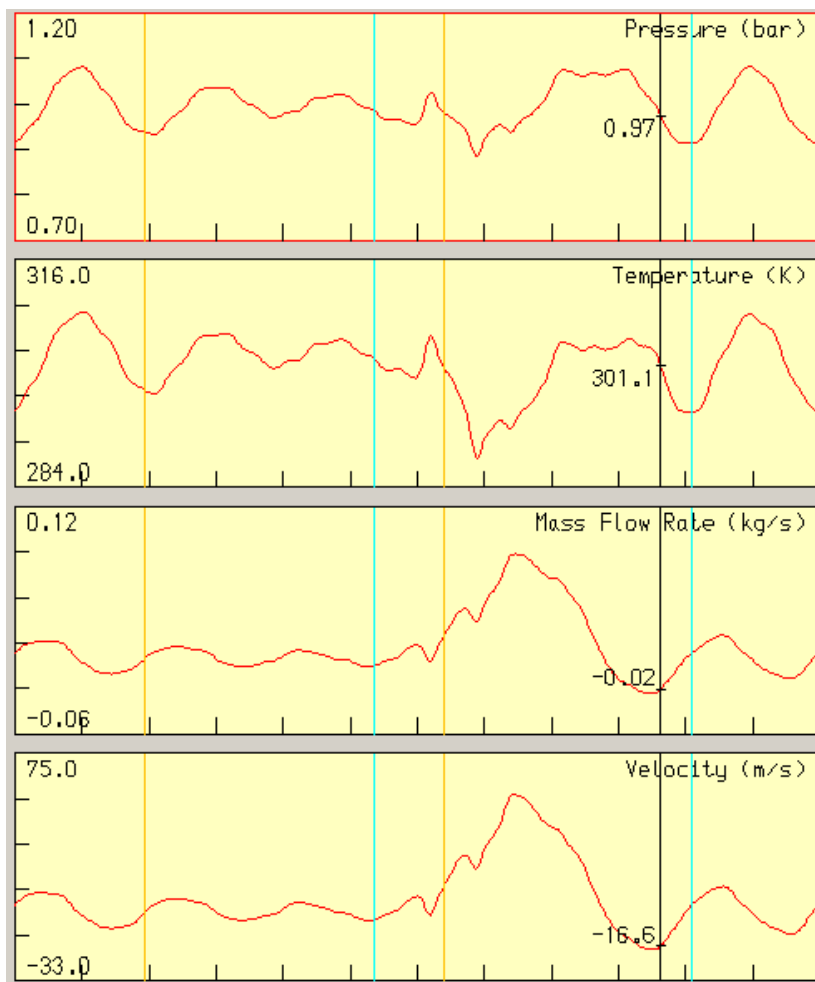
Obr. 61 Modul PRS v softwaru Lotus Engine Simulation

V tomto případě je žádoucí zvýšení výkonu a točivého momentu v nižších otáčkových spektrech – nejpoužívanější otáčky motoru jsou od 6000-12 000 otáček/minutu. V tomto rozpětí je vhodné 1D model prozkoumat a zjistit případné vhodné úpravy, které by zajistily zvýšení účinnosti v těchto otáčkách i za předpokladu, že by byla snížena účinnost v motorových otáčkách vyšších.

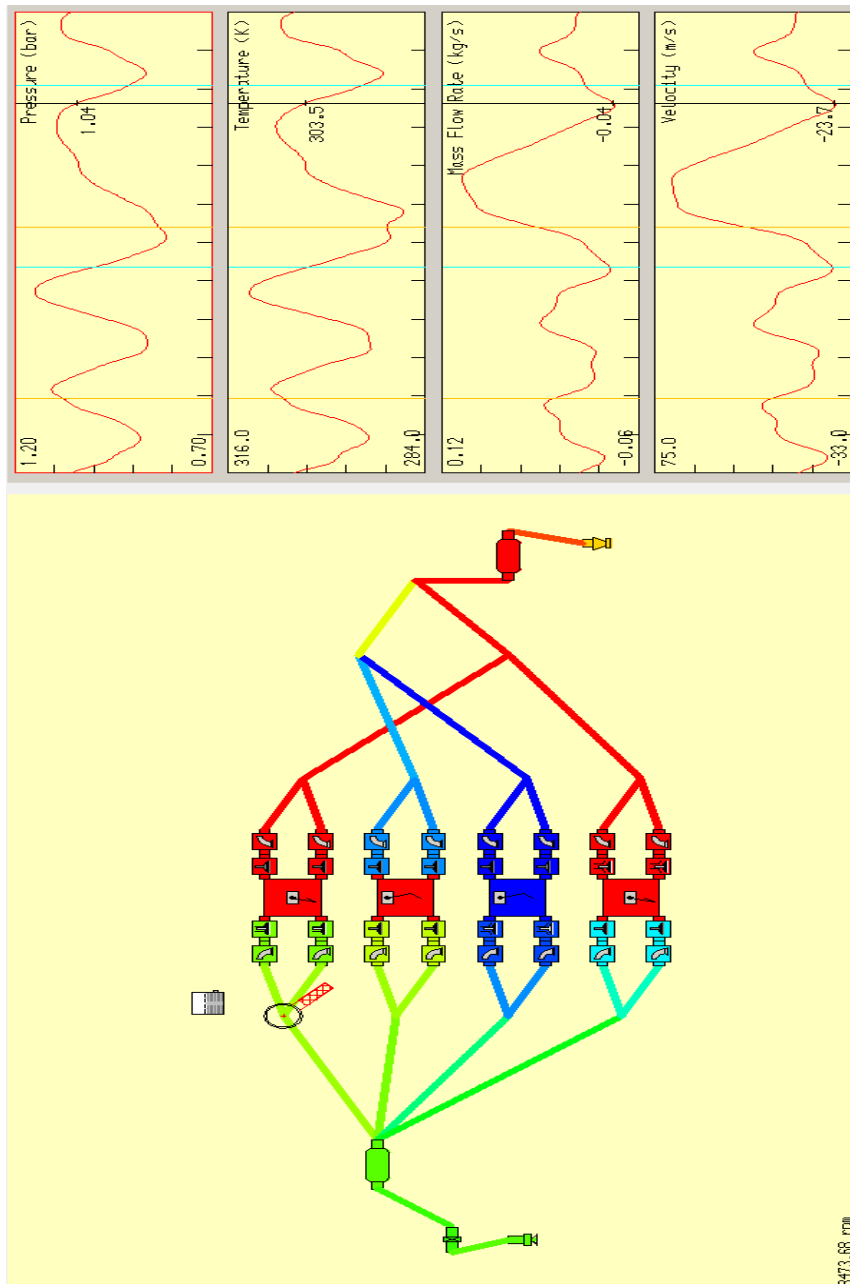


Obr. 62 Modul PRS při 6263ot/min v softwaru Lotus Engine Simulation

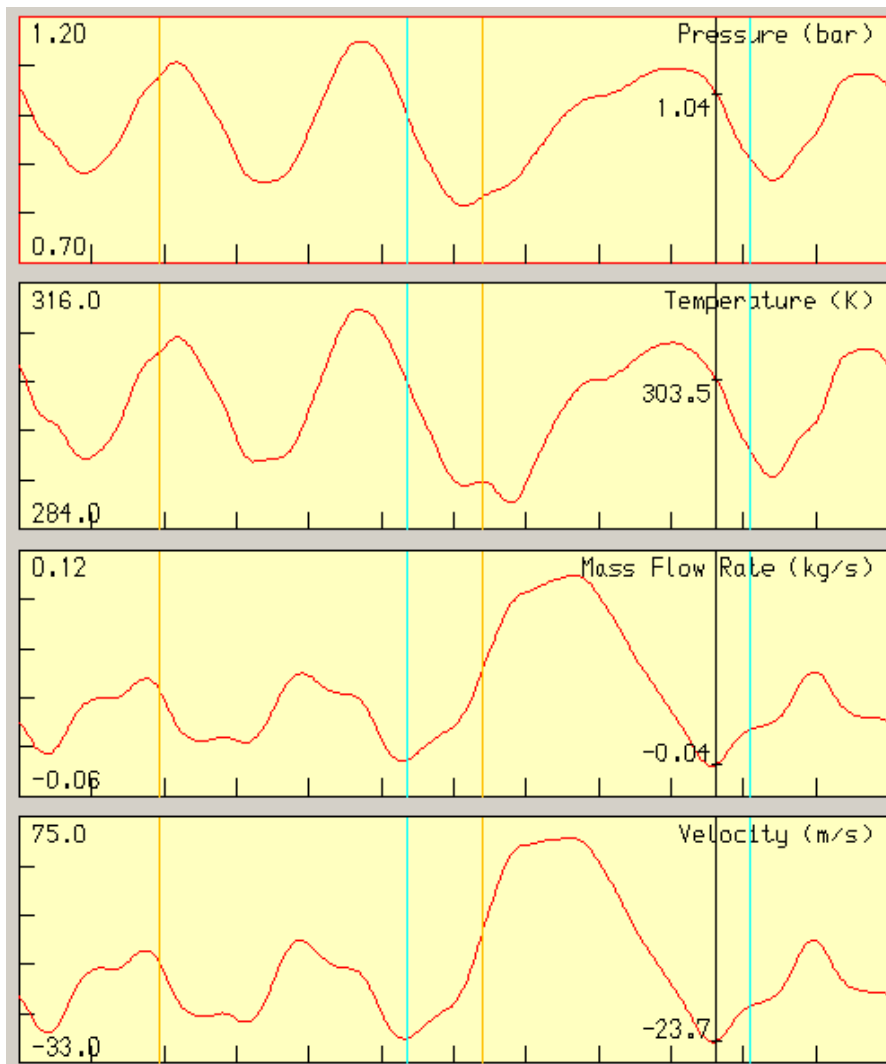
Na následujícím obrázku č. 63 lze vidět jednotlivé hodnoty na runneru 1. válce při 6263 ot/min. Pro větší přehlednost je na grafech možno vidět 4 čáry. Oranžové čáry znázorňují otevření a uzavření výfukového ventilu a modré čáry znázorňují otevření a zavření sacího ventilu. Lze vidět, že před zavřením sacího ventilu je hmotnostní tok záporný – tzn., že směs paliva a vzduchu proudí ven z válce - zpět do sacího systému.



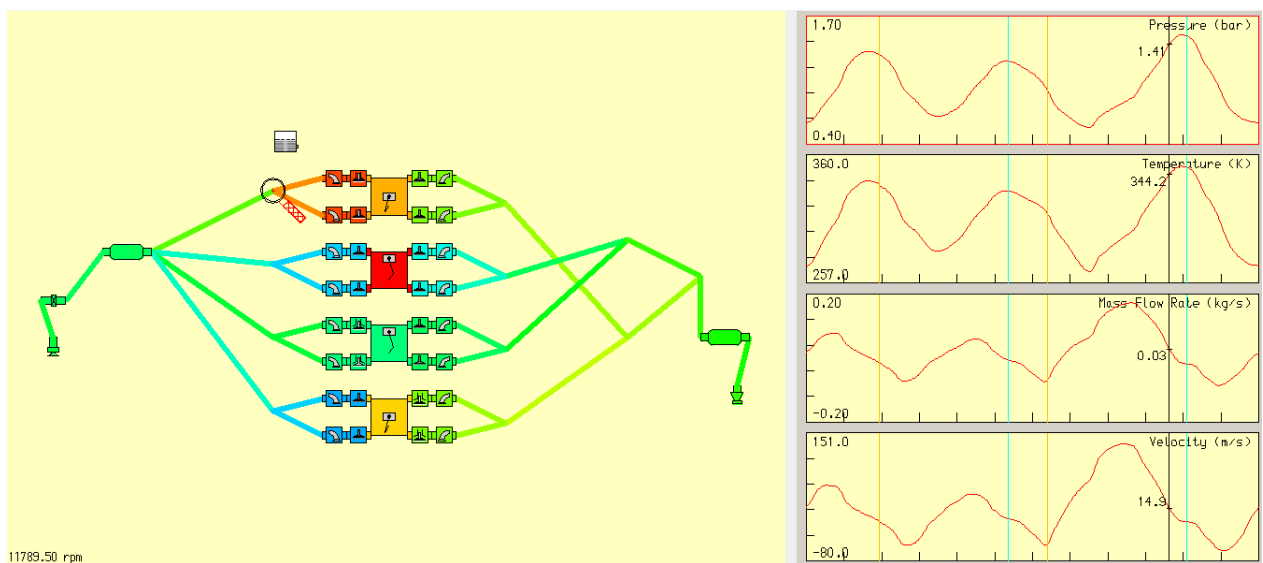
Obr. 63 Hodnoty na prvku runneru 1. válce při 6263ot/min v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation



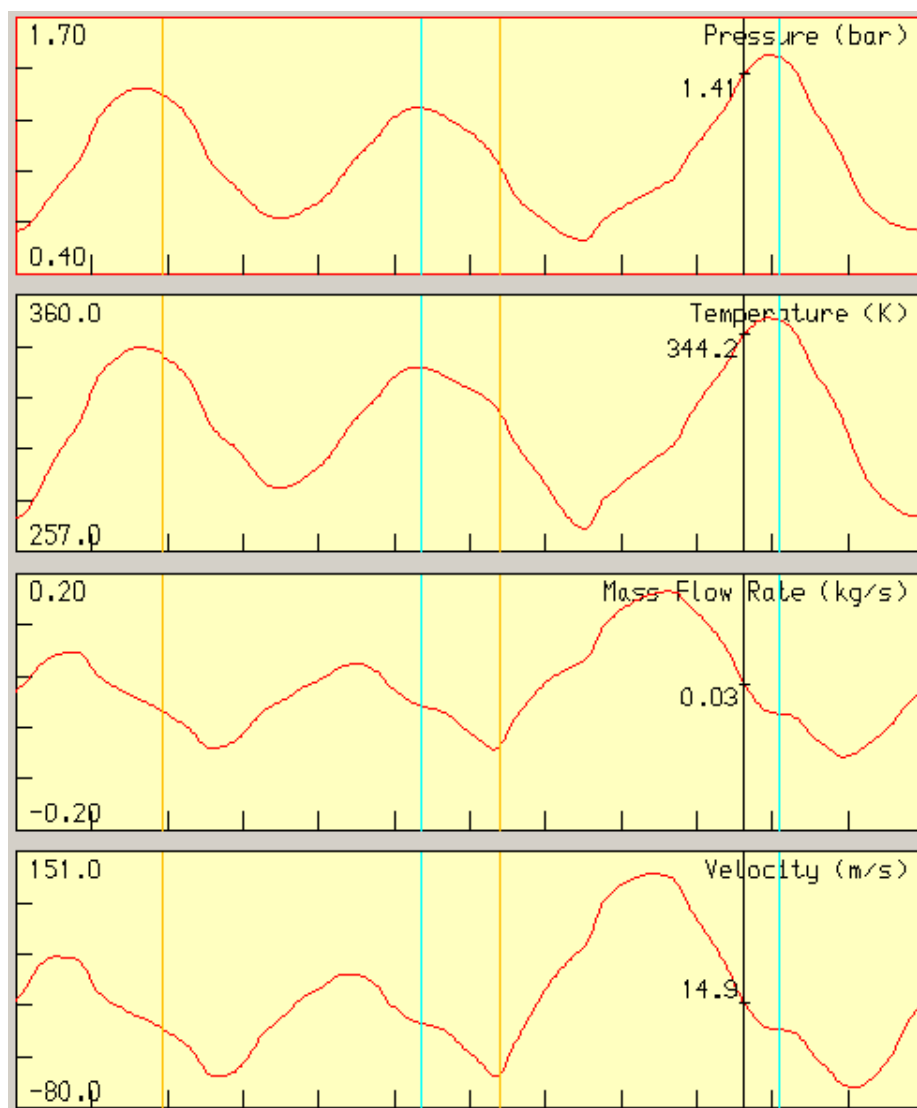
Obr. 64 Modul PRS při 8473ot/min v softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 65 Hodnoty na prvku runneru 1. válce při 8473ot/min v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 66 Modul PRS při 11789ot/min v softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 67 Hodnoty na prvku runneru 1. válce při 11789ot/min v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation

Při prozkoumání jednotlivých stavů 1D modelu při otáčkách od 6000-12 000 ot/min (výše jsou uvedené tři stavy PJ pro znázornění, ovšem vyhodnoceno bylo stavů více) lze vidět, že v nižších otáčkách (pod 10 000ot/min) je na prvku – runner 1. válce – záporná hodnota hmotnostního toku před zavřením sacího ventilu. Zde je možno spatřit šanci na zvýšení účinnosti v nižších otáčkách a to zajištění takového stavu PJ, kdy sací ventil uzavře spalovací prostor v takovém okamžiku, kdy je ve válci nejvíce směsi paliva a vzduchu. Jelikož je tato PJ stavěna pro nejvyšší výkon ve vysokých otáčkách, je vhodné jednotlivé prvky upravit takovým způsobem, aby byl točivý moment a výkon co nejvyšší v otáčkách do 12 000ot/min.

3.3 Parametrické optimalizace pro úpravu PJ UWB04

Pro začátek parametrických optimalizací k návrhu úprav komponent pohonné jednotky bylo třeba určit, které prvky z PJ UWB03 je možno upravit a které je třeba zanechat, např. z důvodů náročnosti výroby nebo dostupnosti materiálů/výrobních časů/financí.

Prvky sacího ústrojí vhodné pro úpravu:

- sací runnery airboxu



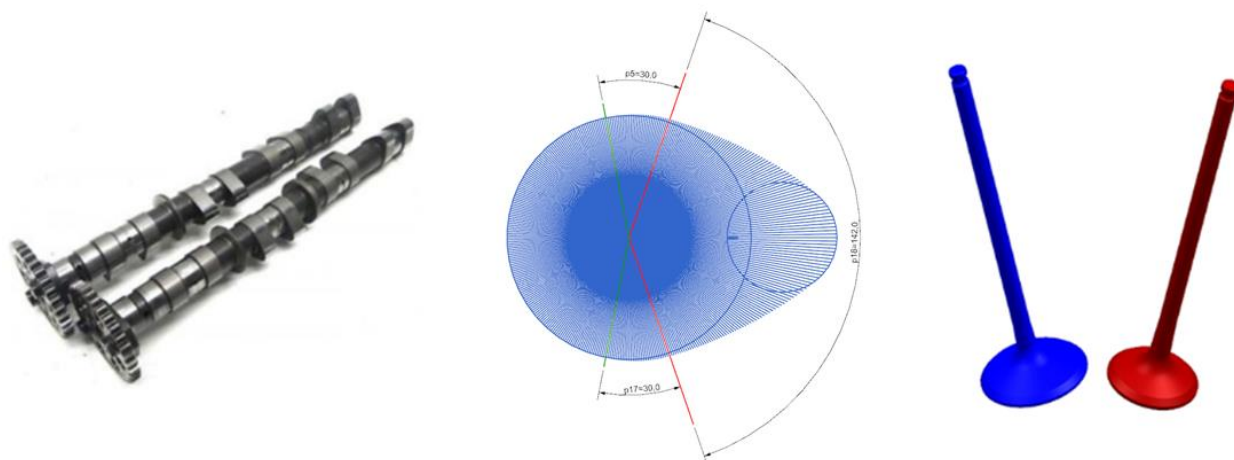
Obr. 68 Sací runnery z vozu UWB03

Jiné prvky sacího ústrojí není možné upravovat:

- airbox (objem i tvar airboxu je z výrobních důvodů nutno zanechat)
- klapka (nakupovaný díl, není možné upravit)
- restriktor (nakupovaný díl, není možné upravit)

Prvky motoru vhodné pro úpravu:

- vačkové hřídele (časování ventilů, doba otevření ventilů, maximální zdvih) obr. 69
- sací a výfukové kanály (úprava povrchu – není předmětem par. optimalizací)



Obr. 69 Vačkové hřídele, profil vačky a ventily z motoru Yamaha YZF-R6

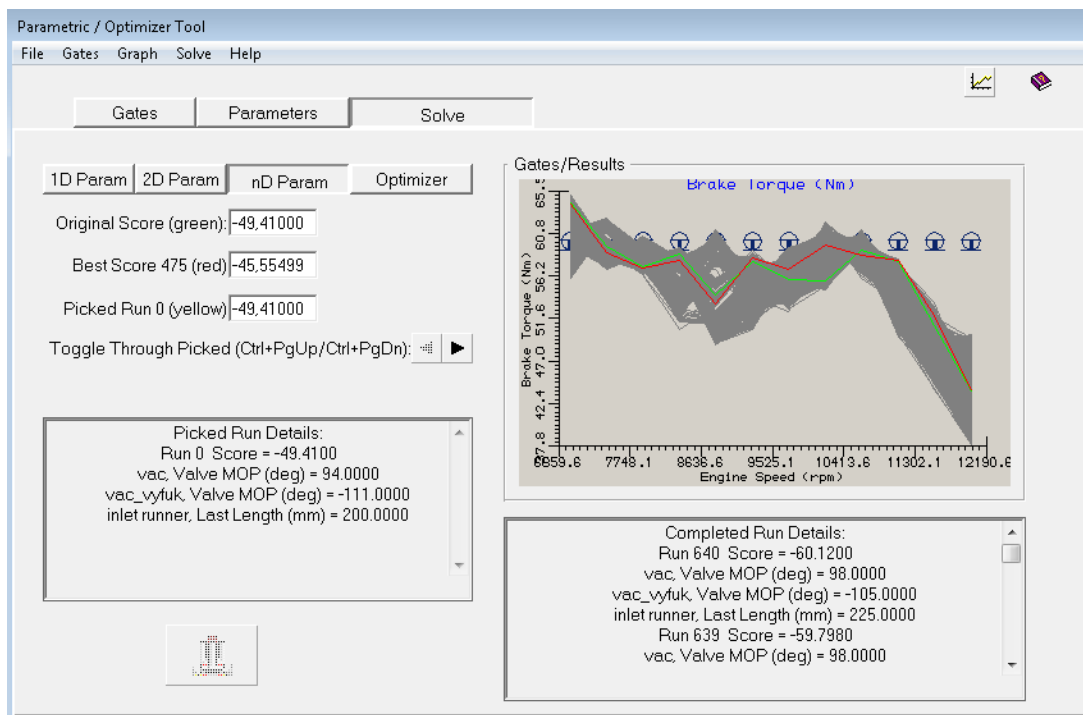
Prvky výfukového ústrojí vhodné pro úpravu:

- svody výfuku – primární potrubí
- spojení svodů – sekundární potrubí
- tlumič výfuku

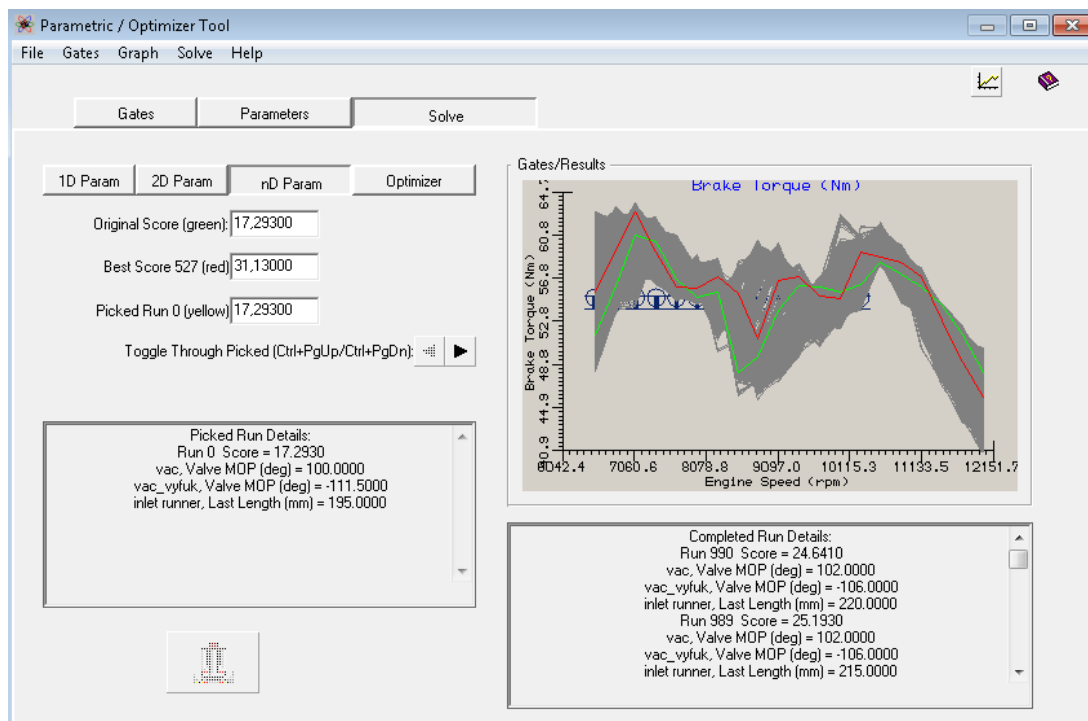
Software Lotus Engine Simulation dovoluje parametricky optimalizovat PJ zadáním n parametrů prvků, které budou postupně měnit své hodnoty, přičemž po každé změně jednoho parametru dojde k celé simulaci motoru a následně je výsledek každé simulace zanesen do grafu. Jelikož jedna simulace 1D modelu trvá přibližně 10-20min, je vhodné parametricky optimalizovat pouze jednu komponentu. Z této optimalizace zvolit nejvhodnější výsledek, upravit podle tohoto výsledku 1D model a následně optimalizovat další prvek. Existuje možnost parametricky optimalizovat celou PJ a všechny její komponenty v jedné dlouhé řadě simulací, ovšem doba, po kterou by simulace běžela, by byla enormně dlouhá (v řádu měsíců).

Největší vliv na průběh točivého momentu, výkonu a celkový projev motoru z prvků vhodných k úpravě má rozvodový mechanismus (vačková hřídel) – časování otevření a zavření ventilů, doba otevření a maximální zdvih ventilů. Z tohoto důvodu byla nejdříve parametricky optimalizována sací a výfuková vačková hřídel (doba otevření, zavření a zdvih ventilů).

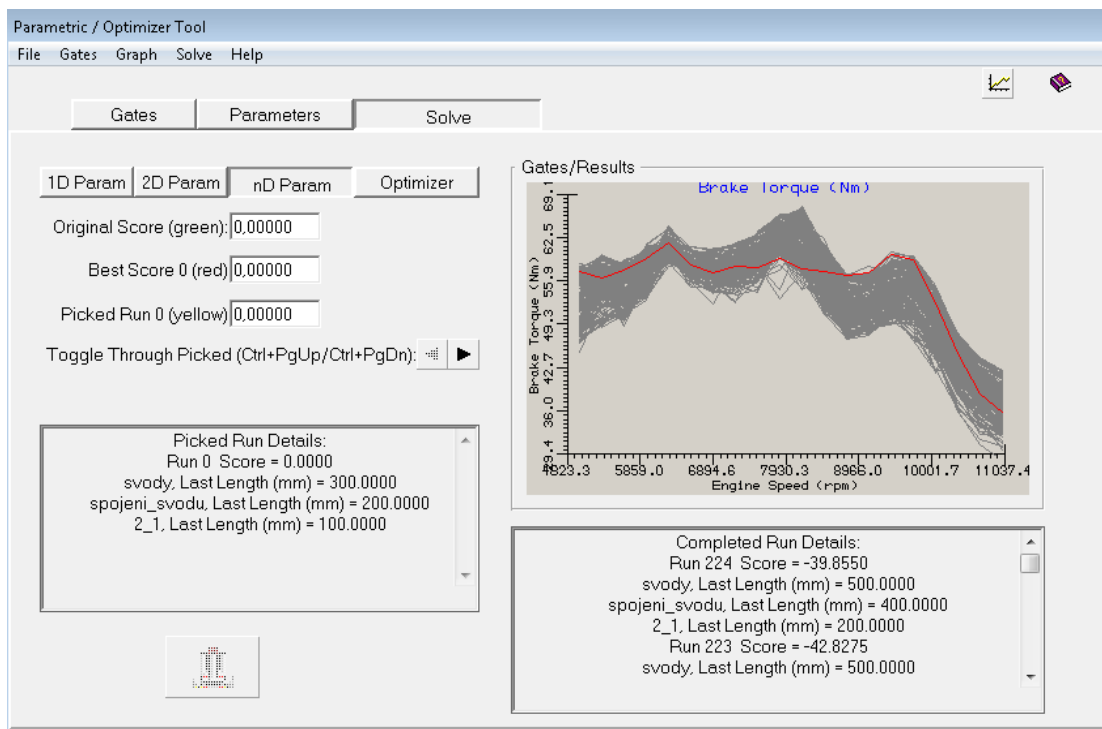
Pro znázornění několik oken parametrických optimalizací v softwaru Lotus Engine Simulation na obr. 70 až 72.



Obr. 70 Parametrická optimalizace vačkových hřídelí a runnerů v softwaru Lotus Engine Simulation



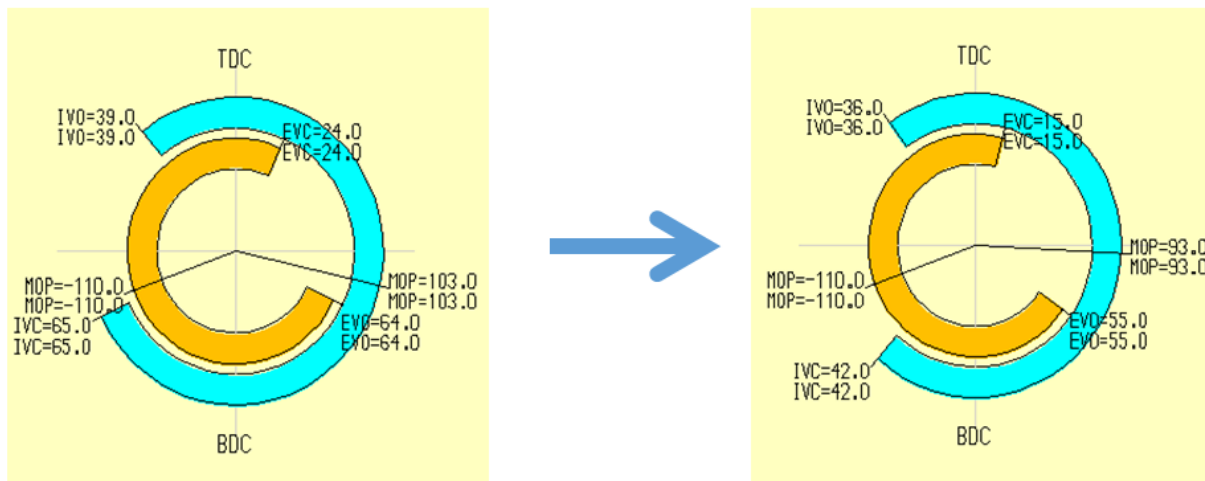
Obr. 71 Parametrická optimalizace vačkových hřídelí a runnerů v softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 72 Parametrická optimalizace výfukového systému v softwaru Lotus Engine Simulation

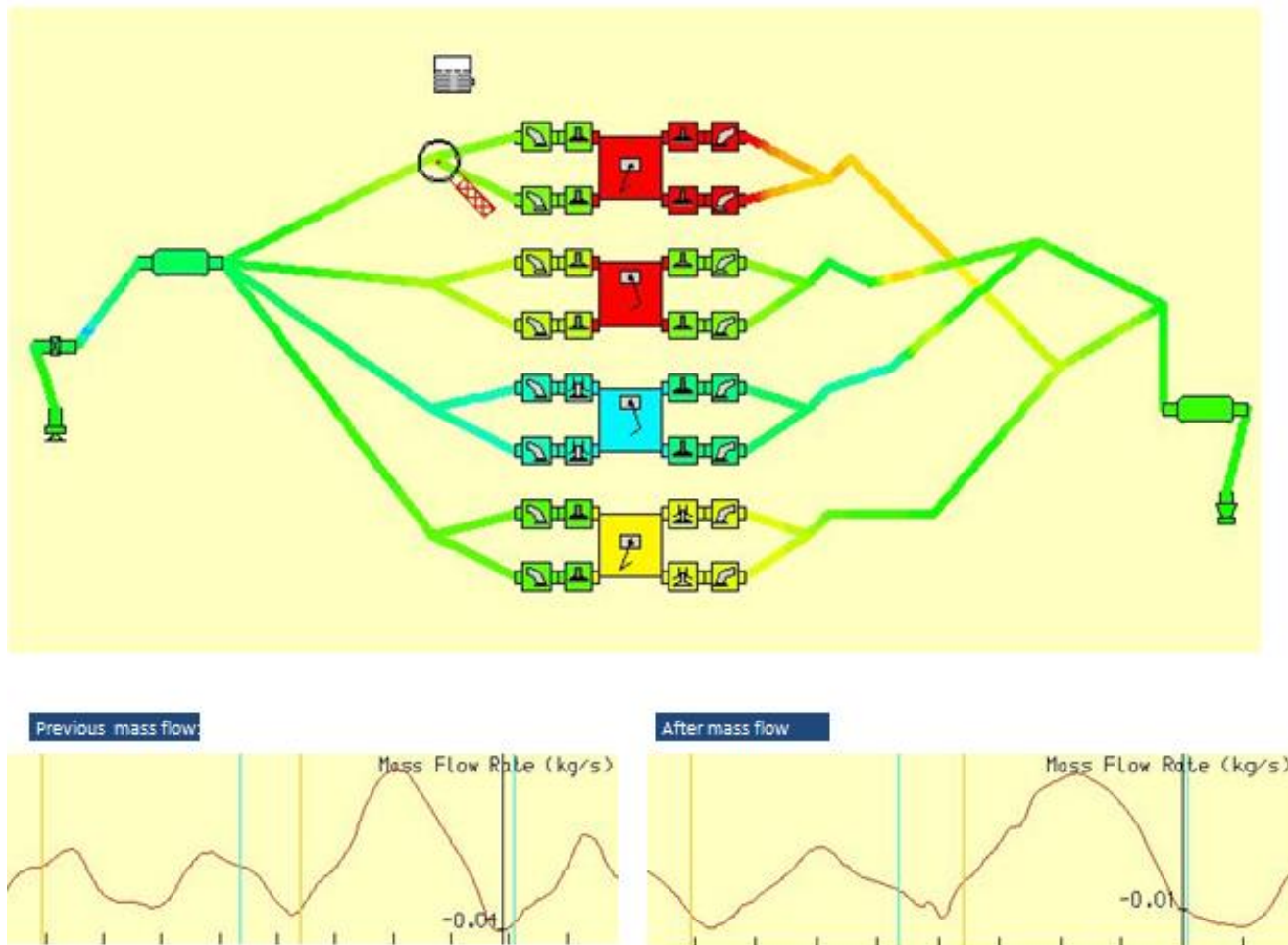
Tyto simulace trvaly přibližně dva týdny výpočetního času. Po této optimalizaci byly vybrány nejvhodnější parametry otevření a zavření ventilů. Největší změnou je dřívější zavření sacího ventilu, které má za důsledek zvýšení množství směsi ve válci při nižších otáčkách (do 12 000ot/min). Změna na obr. 73.

Tyto parametry byly zadány do 1D modelu a následně parametricky upraveny délky runnerů. Nejvhodnější délky runnerů pro zvýšení hodnot točivého momentu v nižších otáčkách jsou 200mm a to pro všechny runnery, oproti UWB03, kde byly vnější runnery dlouhé 190mm a vnitřní 210mm. Viz obr. 75.

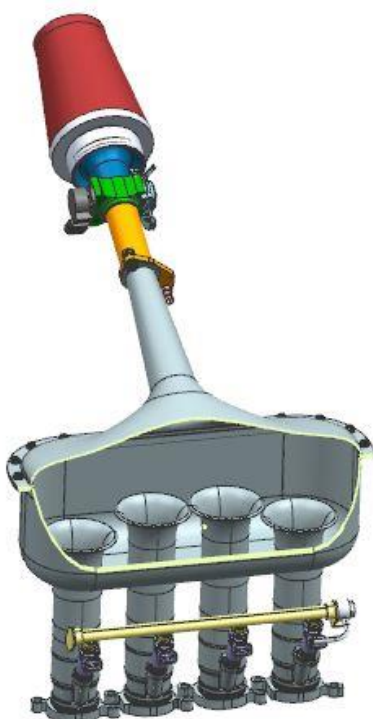


Obr. 73 Změna časování ventilů po parametrických optimalizacích v softwaru Lotus Engine Simulation

Na obr. 74 lze vidět snížení zpětného proudění plynů (směs paliva a vzduchu) do airboxu díky dřívějšímu uzavření sacího ventilu. Díky tomuto projevu ve válci zůstane více zápalné směsi a dochází ke zvýšení výkonu a točivého momentu.



Obr. 74 Zpětné proudění plynů v runneru 1. válce před a po úpravě v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 75 Různé délky runnerů v airboxu z vozu UWB03

Po parametrických optimalizacích runnerů byly provedeny optimalizace výfukového ústrojí a to konkrétně délky:

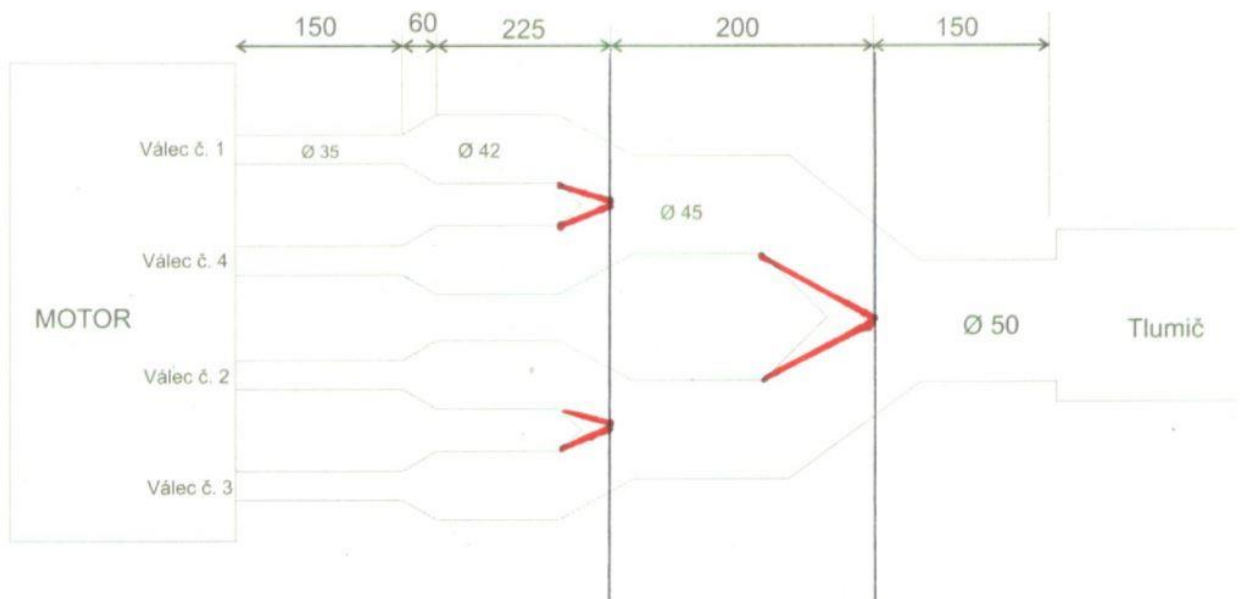
- výfukových svodů
- spojení svodů 4 do 2
- spojení svodů 2 do 1

Pro zvýšení točivého momentu jsou, dle simulací, nejvhodnější rozměrové hodnoty na obr. 76. Průměry trubek jednotlivých větví byly doporučeny přímo výrobcem výfukových systémů.

Rozměry výfukového systému pro vůz UWB04:

Uspořádání 4 – 2 – 1

Délka primárního potrubí:	435mm
Průměr primárního potrubí:	Ø35mm a Ø42mm
Délka sekundárního potrubí:	200mm
Průměr sekundárního potrubí:	Ø 45mm
Délka terciálního potrubí:	150mm
Průměr terciálního potrubí:	Ø 50mm
Délka tlumiče:	300mm



Obr. 76 Nejvhodnější rozměry výfukového systému po parametrických optimalizacích v softwaru Lotus Engine Simulation



Obr. 77 Výroba výfukového systému pro vůz UWB04

4 ÚPRAVA VAČKOVÝCH HŘÍDELÍ

4.1 Výsledné hodnoty z parametrických optimalizací

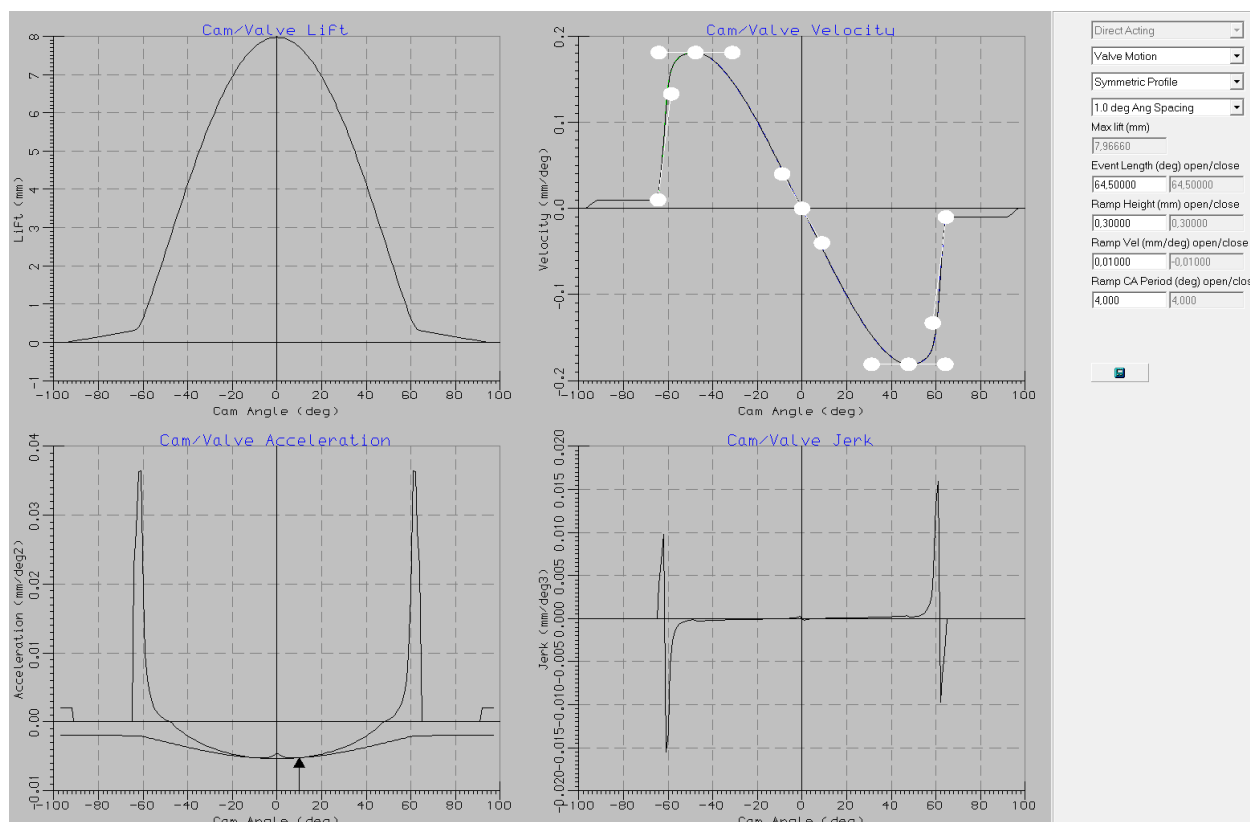
Parametrickou optimalizací profilů vačkových hřídelí bylo dosaženo zvýšení točivého momentu a zploštění průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách. Software Lotus Engine Simulation umožňuje optimalizaci jednotlivých prvků vačkových hřídelí, ovšem výstupem jsou pouze hodnoty otevření/zavření ventilů a úhel natočení vačkové hřídele při maximálním zdvihu ventilu. Geometrie vačkové hřídele je třeba vytvořit v jiném vhodném softwaru. Jelikož je tvar vačkové hřídele velmi složitý, je vhodné použít software k tomuto přímo určený.

4.2 Lotus Valve Train

Software Lotus Valve Train je přímo určený k vytváření geometrie vačkové hřídele, kontrole dynamických veličin, pružin, stříhu ventilů, olejového filmu atd. Návrh profilu na obr. 78.

Vstupními hodnotami do Lotus Valve Train jsou:

- doba otevření ventilu
- doba náběhu vačky
- výška náběhu
- úhel ventilu vzhledem k válci
- průměr zdvihátka
- tuhost pružin a předpětí
- hmotnost systému
- max. otáčky motoru



Obr. 78 Návrh profilu sací vačkové hřídele v softwaru Lotus Valve Train

Pro návrh profilu vačkové hřídele je třeba zadat dobu otevření ventilu. V tomto případě u sací vačky na obr. 78 je tato doba $129/2 = 64,5^\circ$. Výška náběhové rampy je 0,3mm a úhel náběhu je 4° . Profil vačky se definuje pomocí polynomů – v tomto případě polynomů, které upravují rychlost [mm/deg]. „Plnost“ (obsah plochy pod zdvihovou křivkou) vytvořeného profilu by měla být co nejvyšší, ovšem jsou zde limity, kterých je třeba se držet. Maximální rychlost (velocity) vačkové hřídele by měla být 0,19mm/deg. Pokud není tato rychlost překročena, je zaručeno, že profil vačkové hřídele zůstává po celou dobu pohybu na zdvihátku a nevybíhá ven. Tuto maximální rychlost je možno vypočítat:

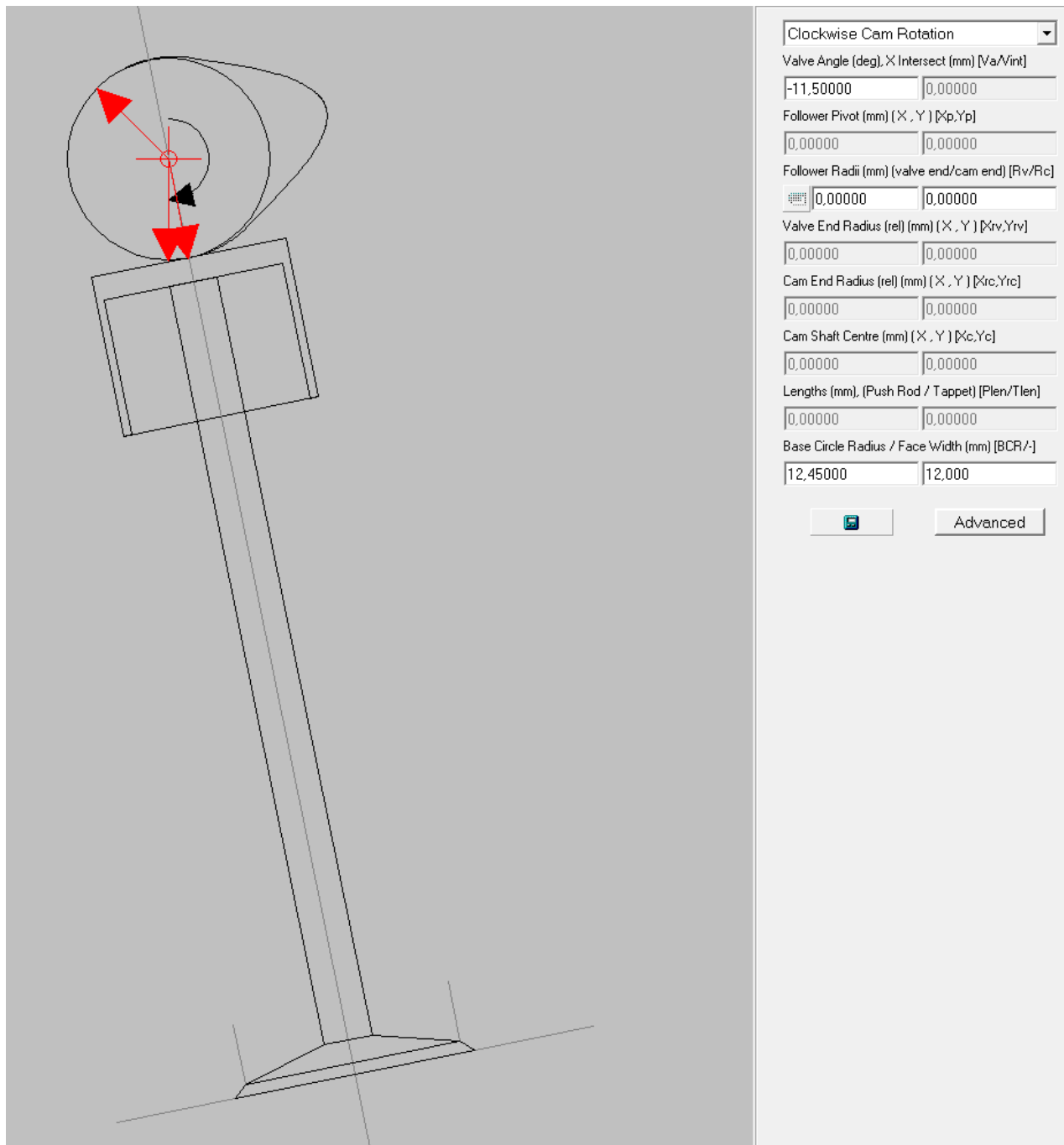
$$K - \text{rychlost [mm/rad]}$$

$$R - \text{poloměr zdvihátka} - 12,25\text{mm}$$

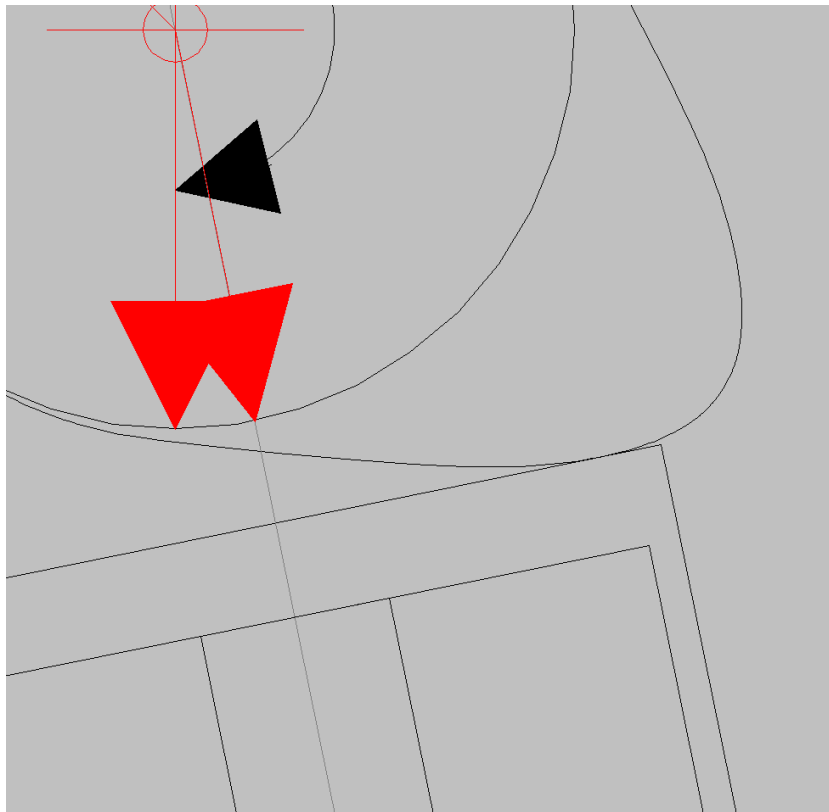
$$W/2 - \text{poloviční šířka palce} - 5\text{mm}$$

$$k < \sqrt{R^2 - \left(\frac{W}{2}\right)^2}$$

Další z důležitých hodnot je nepřekročení zrychlení přes $0,04\text{mm/deg}^2$, které je maximální u vačkových hřídelí používaných ve vozích pro sportovní účely. Jednotlivé hodnoty v grafech (zdvih, rychlost, zrychlení, puls) se i při malých změnách tvaru křivky výrazně mění, a proto je třeba křivku upravovat po velmi malých krocích a kombinací pohybů různých polynom, pro dosažení co nejideálnějších hodnot rychlosti, zrychlení, pulsu a „plnosti“ křivky.

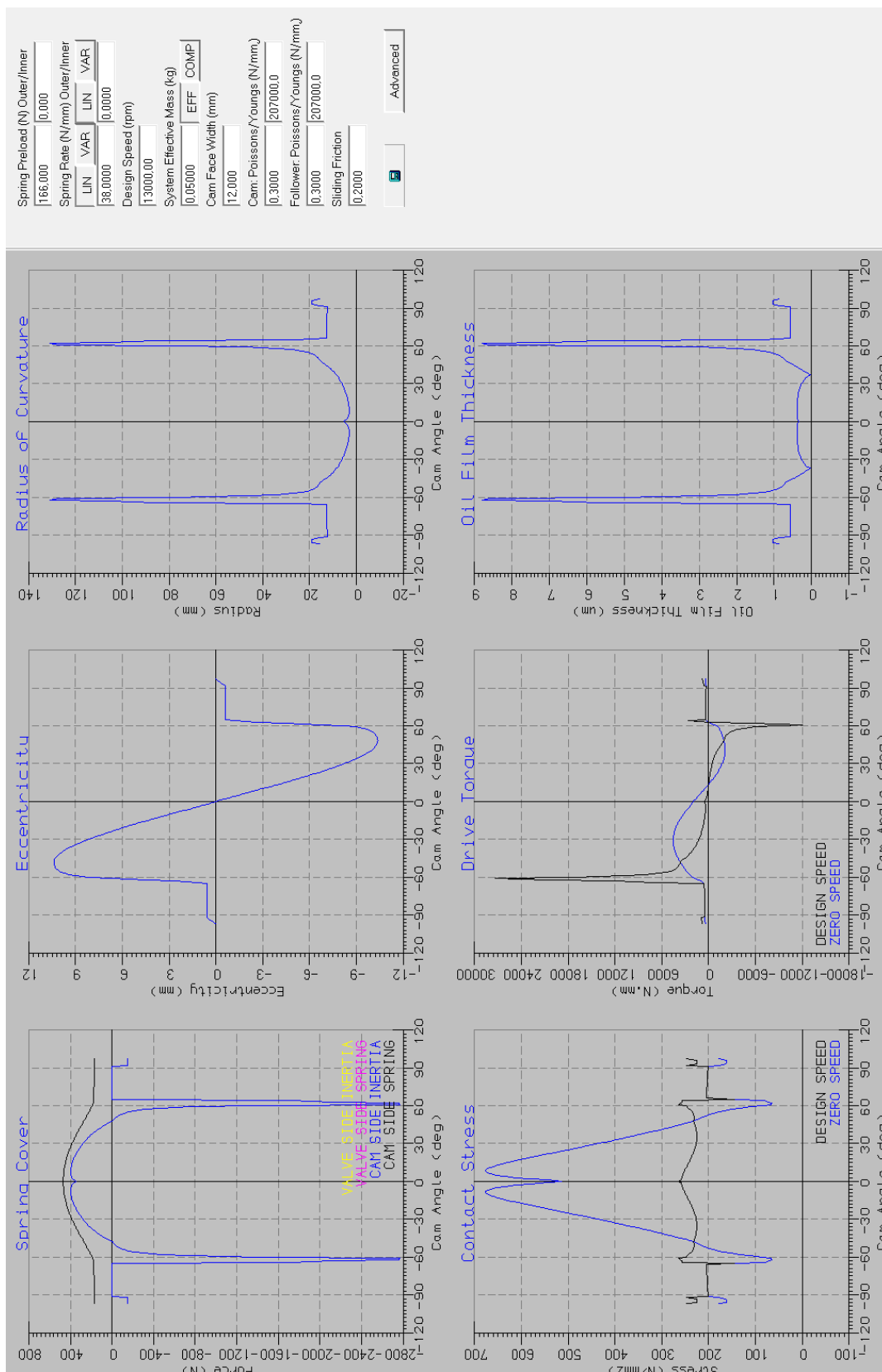


Obr. 79 Vačkový profil, zdvihátko a ventil v softwaru Lotus Valve Train



Obr. 80 Vačkový hřídel a jeho stálý kontakt se zdvihátkem v softwaru Lotus Valve Train

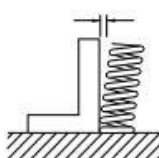
V modulu mechanism, obr. 79, v softwaru Lotus Valve Train je třeba zadat úhel ventilu vzhledem k válci – $11,5^\circ$, poloměr základní kružnice vačky, poloměr zdvihátka a tloušťku „palce“ vačky. Modul mechanismus vykreslí tvar vačky a je zde možnost zkontrolovat stálost kontaktu mezi vačkou a zdvihátkem.



Obr. 81 Modul statics v softwaru Lotus Valve Train

V modulu Statics, obr. 81, je možno ověřit jednotlivé vlivy vačky na ostatní prvky. Je zde třeba zadat hodnoty předpětí a tuhost pružiny, maximální otáčky motoru, hmotnost systému, šířka vačky. Vyhodnotit lze v tomto modulu vhodnost použitých pružin, excentricitu dotyku vačky se zdvihátkem, zakřivení profilu vačky, napětí, moment a tloušťku olejového filmu.

Valve spring	
Free length (intake)	37.47 mm (1.48 in)
Limit	35.60 mm (1.40 in)
Free length (exhaust)	37.67 mm (1.48 in)
Limit	35.79 mm (1.42 in)
Installed length (intake)	32.80 mm (1.29 in)
Installed length (exhaust)	32.80 mm (1.29 in)
Spring rate K1 (intake)	38.11 N/mm (217.61 lb/in) (3.89 kgf/mm)
Spring rate K2 (intake)	52.40 N/mm (299.20 lb/in) (5.34 kgf/mm)
Spring rate K1 (exhaust)	36.36 N/mm (207.62 lb/in) (3.71 kgf/mm)
Spring rate K2 (exhaust)	53.40 N/mm (304.91 lb/in) (5.45 kgf/mm)
Installed compression spring force (intake)	166.00–190.00 N (37.32–42.71 lbf) (16.93–19.37 kgf)
Installed compression spring force (exhaust)	165.00–189.00 N (37.09–42.49 lbf) (16.83–19.27 kgf)
Spring tilt (intake)	2.5°/1.6 mm
Spring tilt (exhaust)	2.5°/1.6 mm



Winding direction (intake)	Clockwise
Winding direction (exhaust)	Clockwise

Obr. 82 Parametry pružin ze servisního manuálu Yamaha [9]

Jelikož je v servisním manuálu uveden jistý rozsah tuhosti byly následně změřeny tuhosti ventilových pružin pro zadání korektních hodnot. Také byly zváženy hmotnosti jednotlivých komponent.

		E_{mod}	F_{max}	dL at F_{max}
		N/mm	N	mm
Specimen 1	žlutá 1	52,57183	707,7053	13,87603
Specimen 2	žlutá 2	52,20323	711,0416	13,93121
Specimen 3	modrá 1	56,50188	716,035	13,17085
Specimen 4	modrá 2	57,33837	708,5718	13,03219

Tab. 1 Naměřené tuhosti ventilových pružin

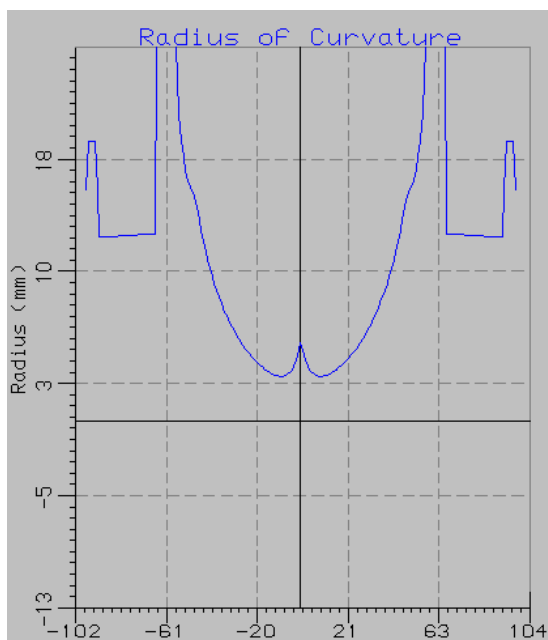


Obr. 83 Hmotnost ventilových komponent z motoru Yamaha YZF-R6



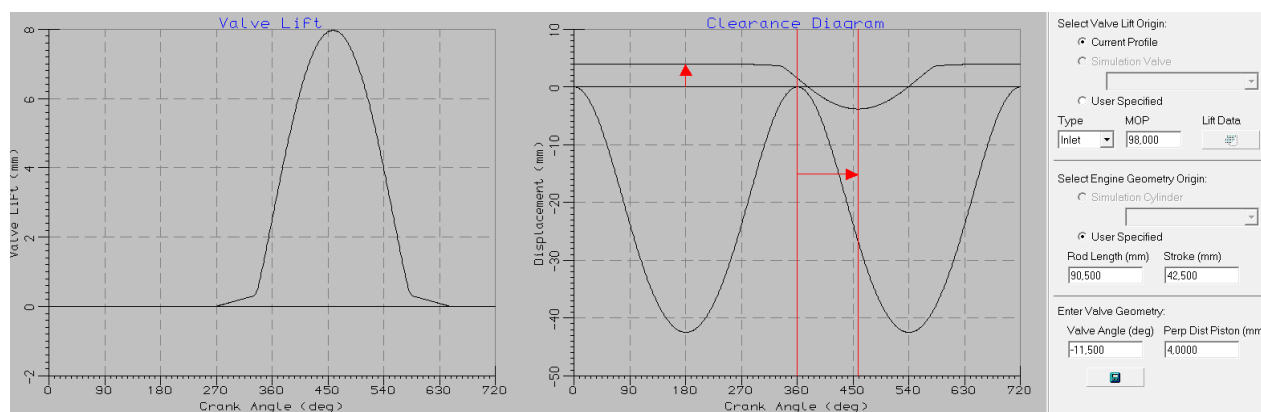
Obr. 84 Hmotnost ventilových komponent bez pružiny z motoru Yamaha YZF-R6

Pro správnou funkci vačkového mechanismu by tvar profilu vačky neměl mít rádius pod 3mm, jelikož by potom vačka byla příliš špičatá, čímž by docházelo k opotřebení jednotlivých komponent a nežádoucím velikostem rychlosti, zrychlení a pulsu při otáčení hřídele.



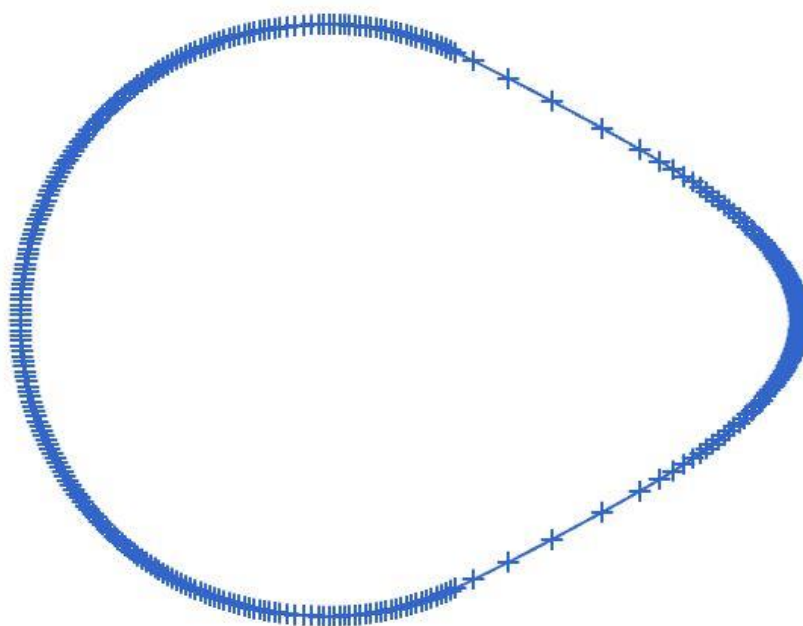
Obr. 85 Rádius křivky v softwaru Lotus Valve Train

Následující modul Valve/Piston clearance slouží ke kontrole překryvu ventilu s pístem. Díky tomuto modulu je možno se ujistit, že nedojde ke kontaktu ventilu s pístem a následnému zničení motoru. Je zde třeba zadat úhel maximálního otevření ventilu, délku ojnice, zdvih pístu, úhel ventilu vzhledem k válci a vzdálenost ventilu od pístu v horní úvrati.



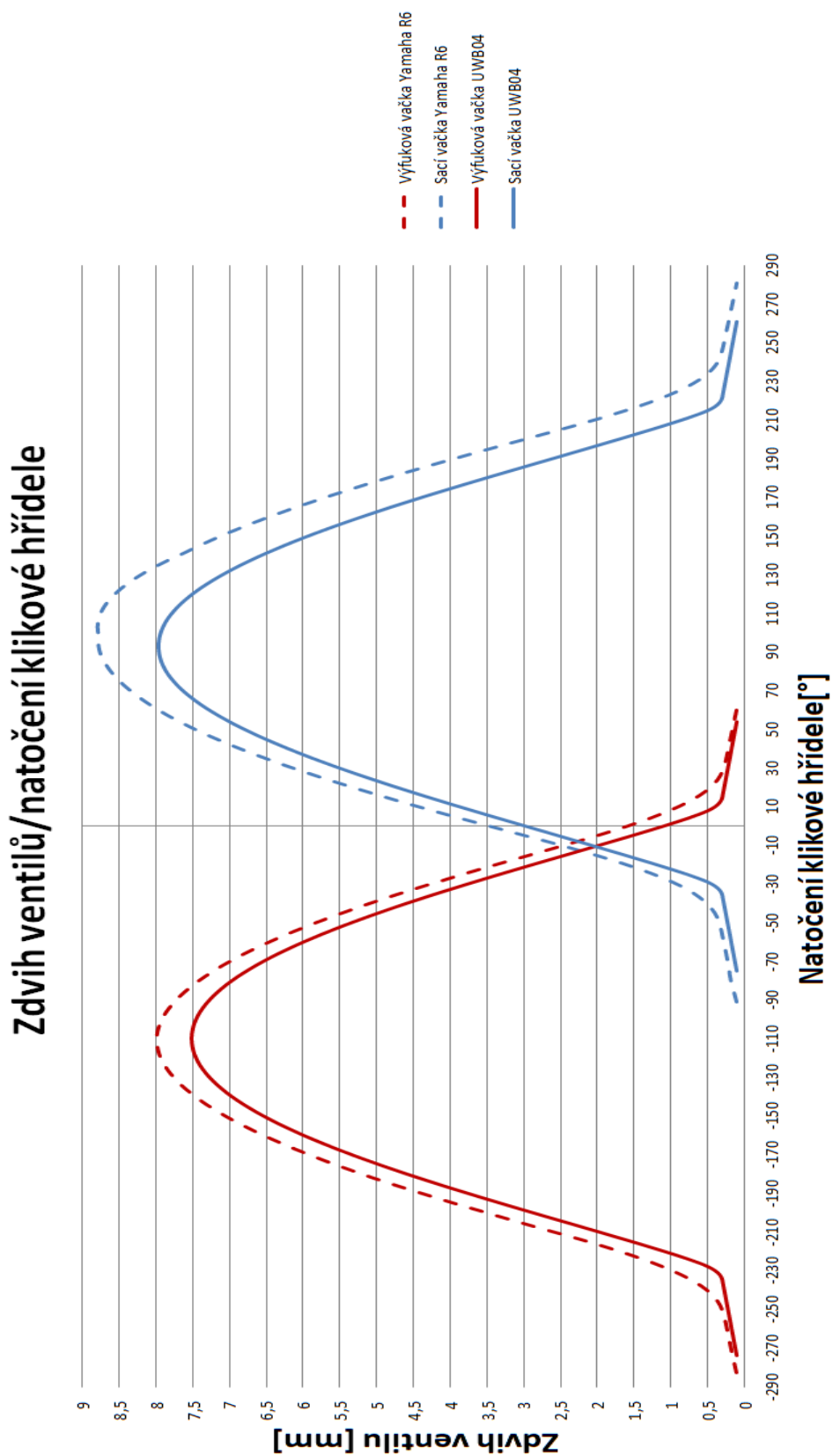
Obr. 86 Překryv pístu/ventilu v softwaru Lotus Valve Train

Po návrhu profilu vačkových hřídelí a splnění jednotlivých kritických hodnot je možno profily vygenerovat. Profily byly vygenerovány do programu Excel. Z textových hodnot jednotlivých bodů byly následně profily převedeny do softwaru NX11 viz obr. 87.



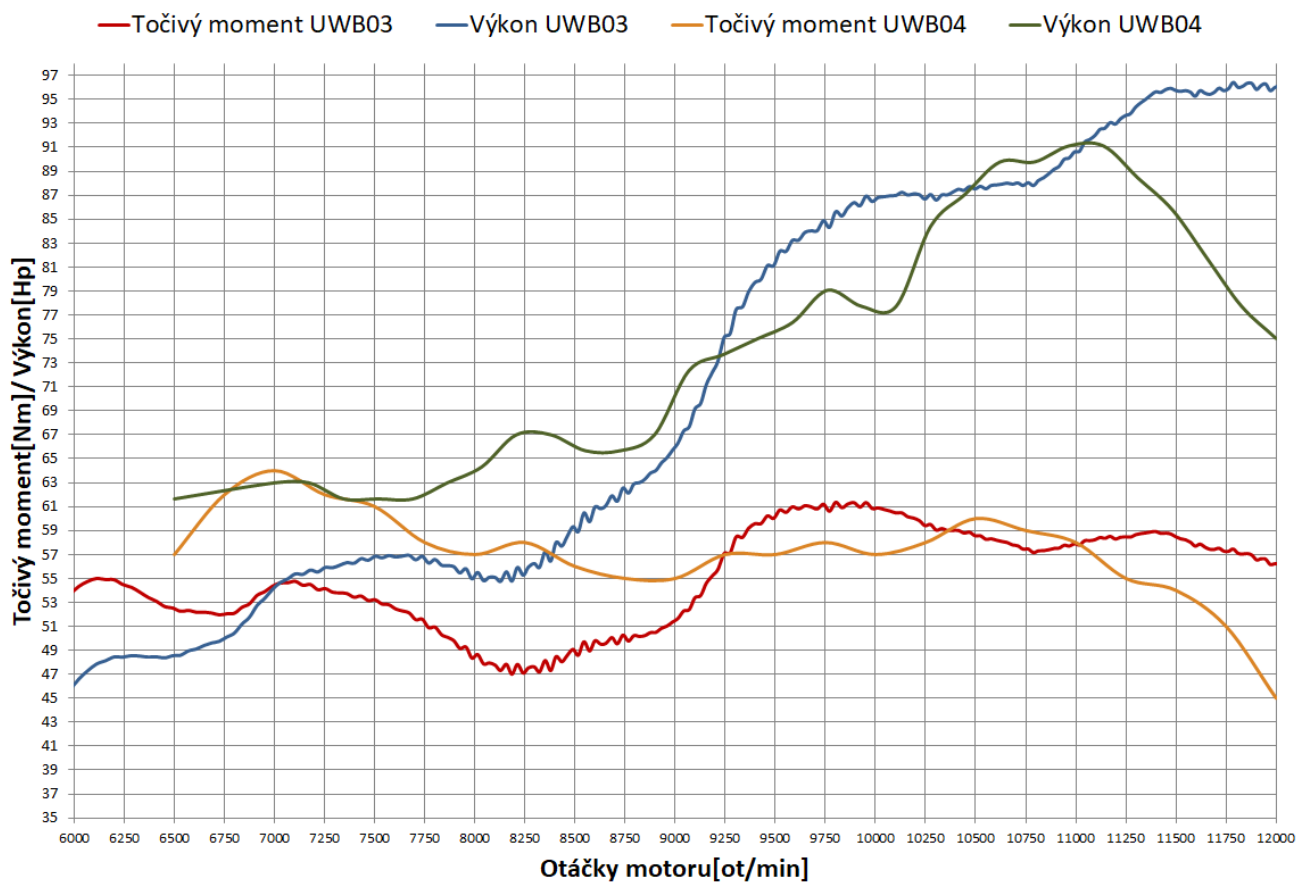
Obr. 87 Vygenerovaný profil sací vačky v softwaru Siemens NX11

Stejným způsobem byl následně navrhnout profil výfukové vačky. Na obr. 88 lze vidět porovnání originálních a nově navržených vaček.



Obr. 88 Porovnání originálních a nových zdvihových funkcí ventilů

Točivý moment a výkon vozů UWB03 a UWB04



Obr. 89 Porovnání točivého momentu a výkonu u nových a originálních vaček

Na obr. 89 lze vidět porovnání výkonů a točivých momentů vozu UWB3 a UWB4 (data z 1D simulace). Točivý moment u vozu UWB4 vzrostl v nižších otáčkách, což bylo cílem. Tyto hodnoty je ale nutno ověřit na dynamometru.

5 WAVE – RICARDO SOFTWARE

WAVE je jedním z nejpoužívanějších softwarů pro úpravy a návrhy pohonných jednotek. Zabývá se 1D dynamikou plynů, simulacemi motorů a je schválený ISO (mezinárodní organizace pro normalizaci). Je to počítačový inženýrský kód vyvinutý společností Ricardo Software k analýze dynamiky tlakových vln, hmotnostních toků a ztrát energie v potrubí, komorách a komponentech různých systémů a strojů. Poskytuje plně integrovanou úpravu časově závislé dynamiky tekutin a termodynamiky pomocí jednosměrné formulace, která umožňuje provádět simulace výkonu na základě prakticky jakéhokoli sání, spalování a konfigurace výfukového systému. WAVE se používá v celosvětovém měřítku v průmyslových odvětvích včetně osobních automobilů, motocyklů, nákladních automobilů, lokomotiv, motorsportu, lodí a generátorů elektřiny. [8]

5.1 1D model v softwaru Wave

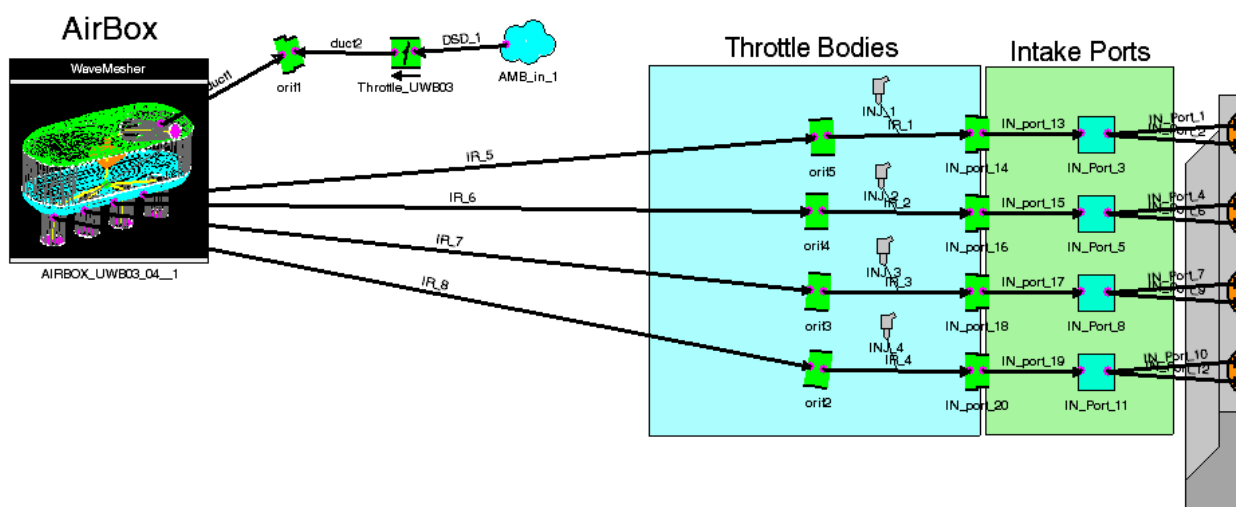
Cílem práce v softwaru Ricardo Wave je příprava 1D modelu a simulačního prostředí pro následující vývoj pohonných jednotek vozů UWB Racing Team. Jak již bylo řečeno úvodem, pro udržení konkurenceschopnosti, posun ve vývoji vozů a dosahování předních příček na závodech Formula Student a Formula SAE, je třeba vozy a jejich jednotlivé části nepřetržitě vylepšovat. Jednou z nejdůležitějších částí vozu je pohonná jednotka, a proto je velmi důležité se věnovat jejímu vývoji a úpravám.

Ricardo Wave je moderní software pro úpravy pohonných jednotek, na rozdíl od softwaru Lotus Engine, který byl vyvinut v roce 2001. Software Ricardo Wave je také z velké části vyvíjen v České Republice, a proto je možno se společností Ricardo spolupracovat na vývoji 1D modelů. Z těchto hledisek je třeba začít používat modernější software a dosahovat ještě vhodnějších úprav pohonné jednotky pro zlepšování účinností, výkonů a točivých momentů.

Pomocí softwaru Wave od společnosti Ricardo byl vytvořen 1D model. Stejně jako u softwaru Lotus Engine Simulation byl nejprve vytvořen 1D model pohonné jednotky z vozu UWB3, jelikož jsou známy jednotlivé parametry a také naměřeny motorové charakteristiky.

1D model je v softwaru Wave vytvářen podobným způsobem jako v softwaru Lotus Engine Simulation. Rozbor jednotlivých částí nebude součástí této práce, bude uvedeno pouze několik příkladů. Na obr. 90 lze vidět sací systém vytvořený v softwaru Wave.

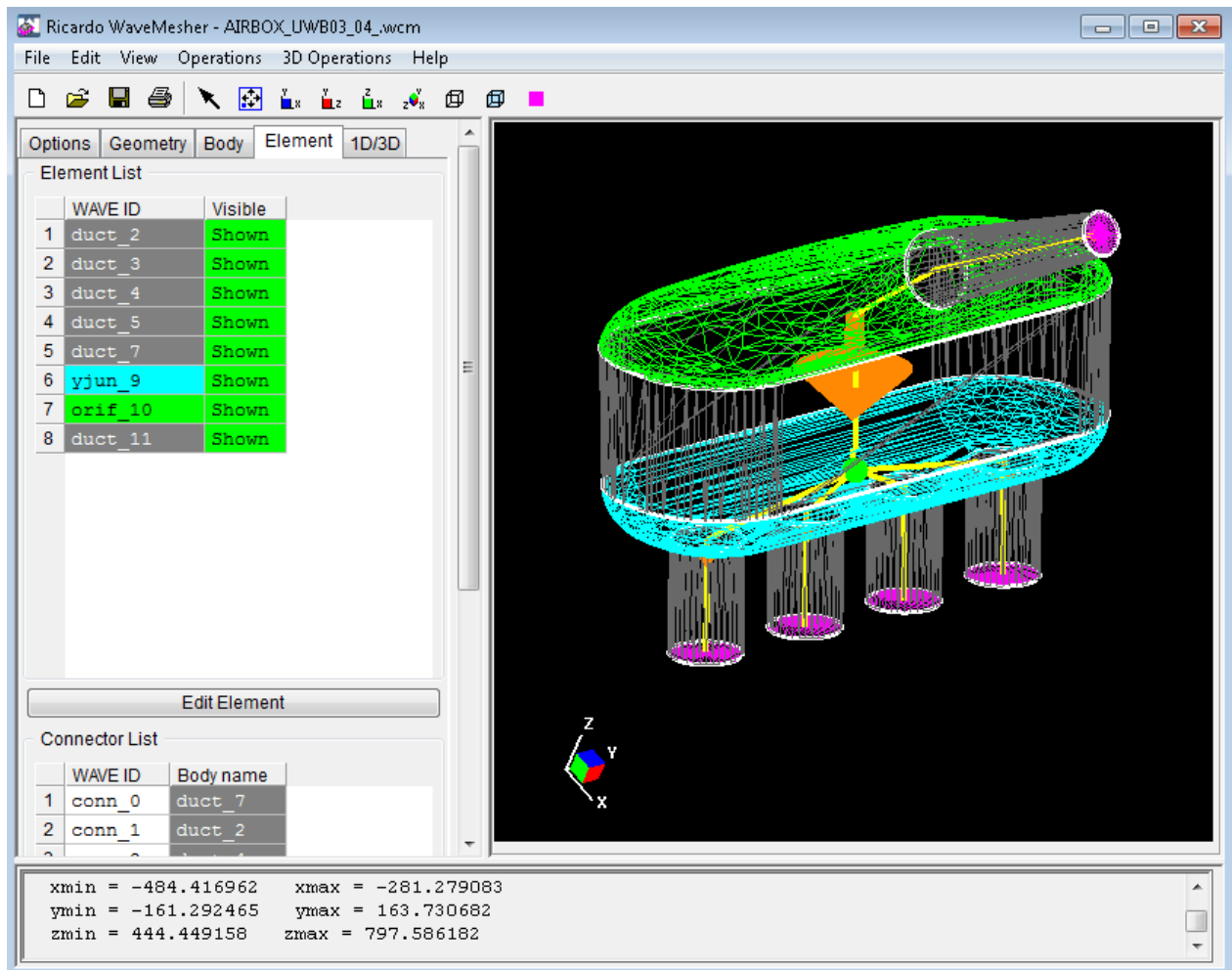
UWB 03 @ 15000rpm



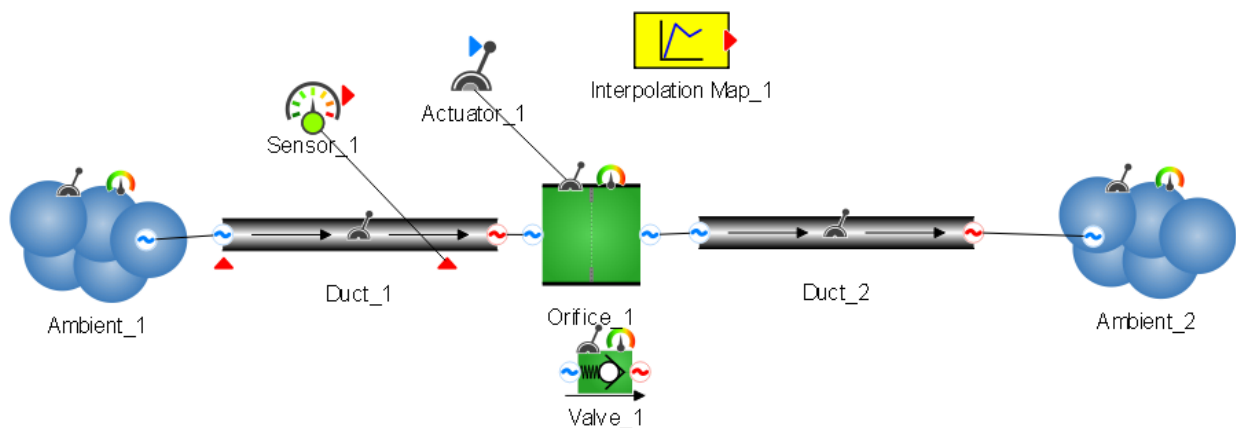
Obr. 90 Sací systém vytvořený v softwaru Wave

Jak lze vidět na obr. 90, v softwaru Wave je možné vkládat do modelu i vstřikovací jednotky paliva. V systému Wave lze také používat modul WaveMesher, který dokáže převádět CAD modely ve formátu STL do 1D prvků. CAD model airboxu z vozu UWB03 byl upraven a převeden do formátu STL za použití softwaru Siemens NX. Následně byl nahrán do modulu WaveMesher a upraven pro vytvoření 1D prvků a implementování takového airboxu do 1D modelu. Modul WaveMesher a v něm vytvořený airbox lze vidět na obr. 91.

V navazující práci se systémem by mělo být provedeno detailnější zpracování restriktoru. Tato část má významný vliv na celkové průběhy simulace, jak bylo uvedeno v úvodní části. V nynějším modelu je restriktor navržen pouze pomocí potrubí a geometrie, ovšem je vhodnější tuto část navrhnout systematictější způsobem, pro příklad na obr. 92.

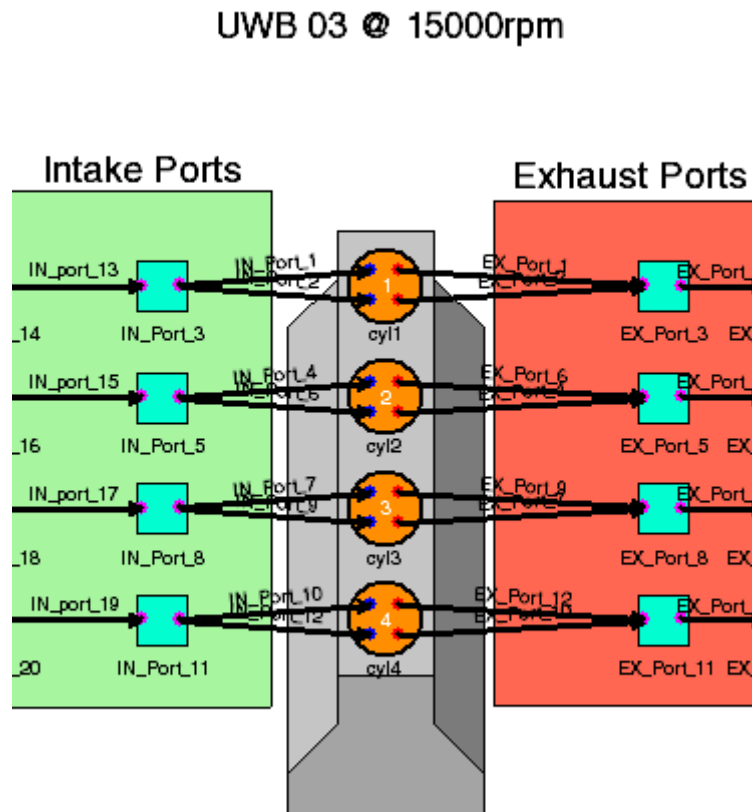


Obr. 91 Airbox vozu UWB03 v modulu WaveMesher v softwaru Wave



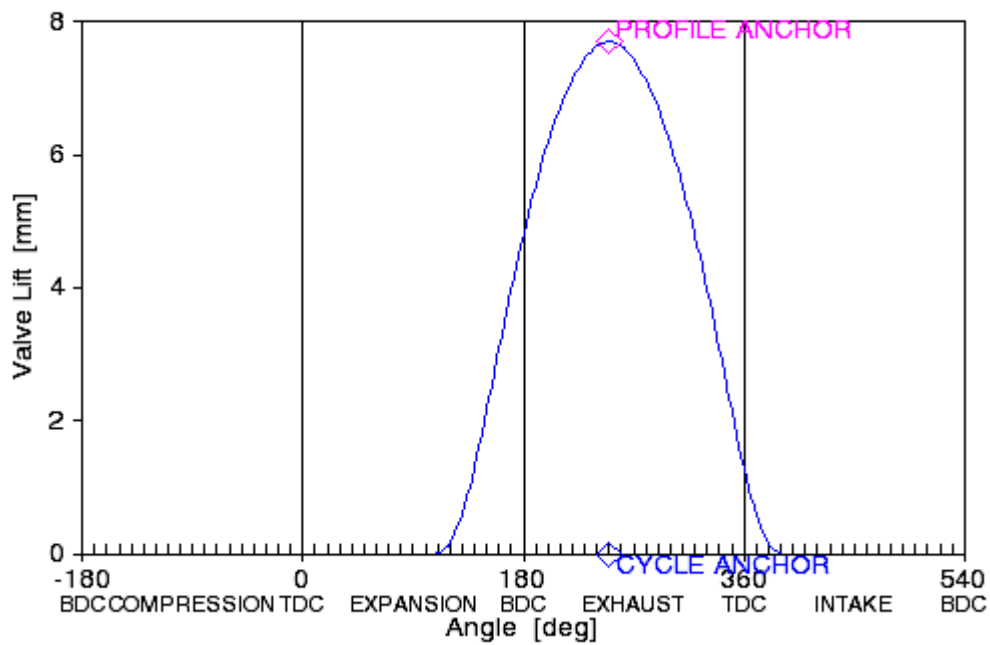
Obr. 92 Podrobnější návrh restriktoru v softwaru Wave

1D model bloku motoru byl vytvořen dle UWB03, jednotlivé parametry byly vloženy podobným způsobem jako u 1D modelu softwaru Lotus Engine Simulation. 1D model lze vidět na obr. 93.

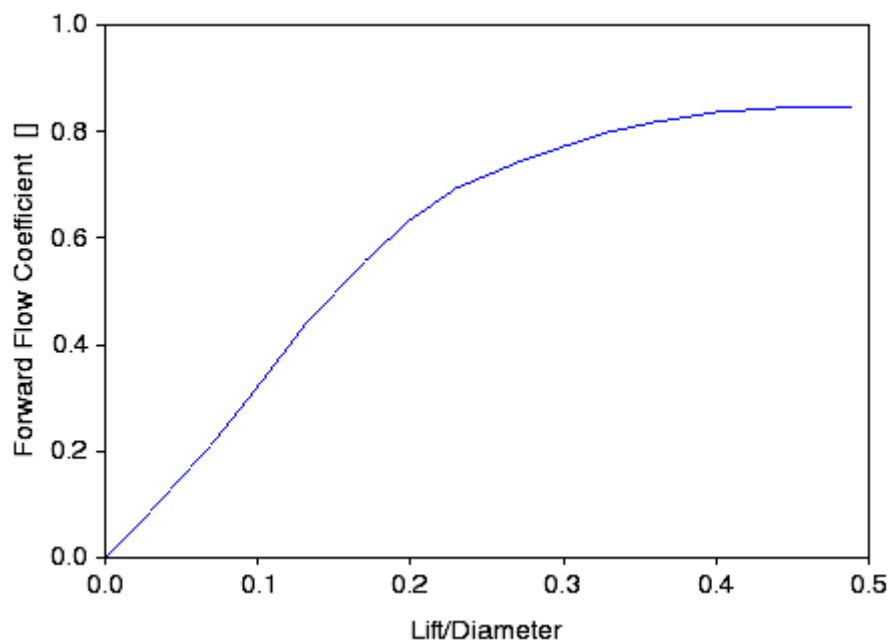


Obr. 93 1D model bloku motoru v softwaru Wave

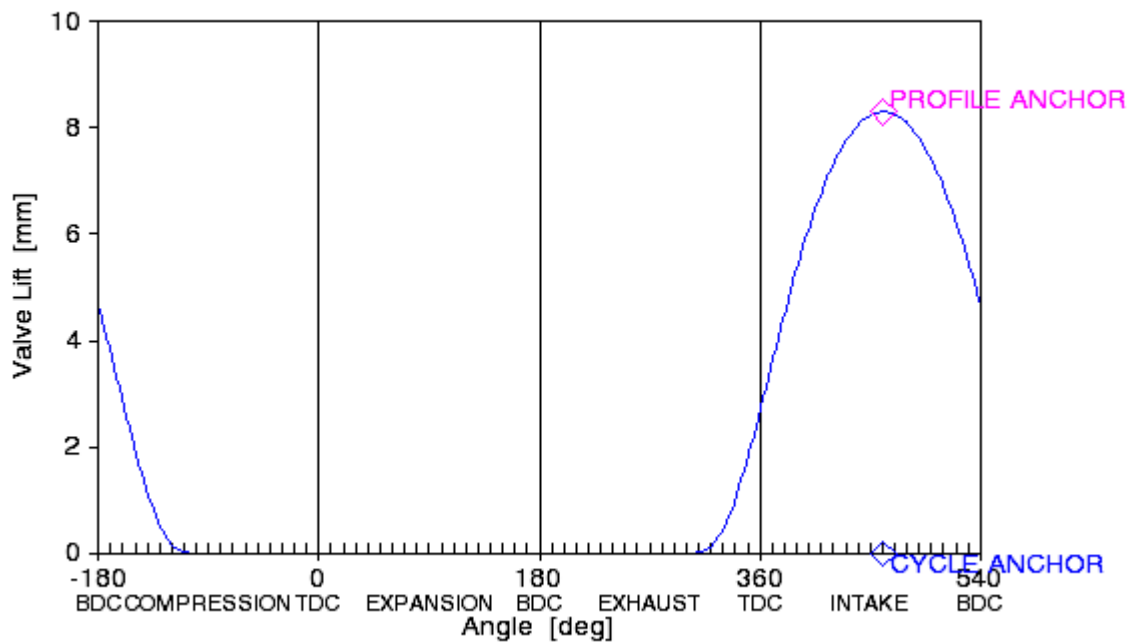
Byly vloženy i data ohledně zdvihů ventilů, které byly získány, viz kap. 2.2.2. Křivky těchto funkcí lze vidět na obr. 94 a 96. Na obr. 95 a 97 je graf průtokového koeficientu v závislosti zdvihu/průměru ventilu.



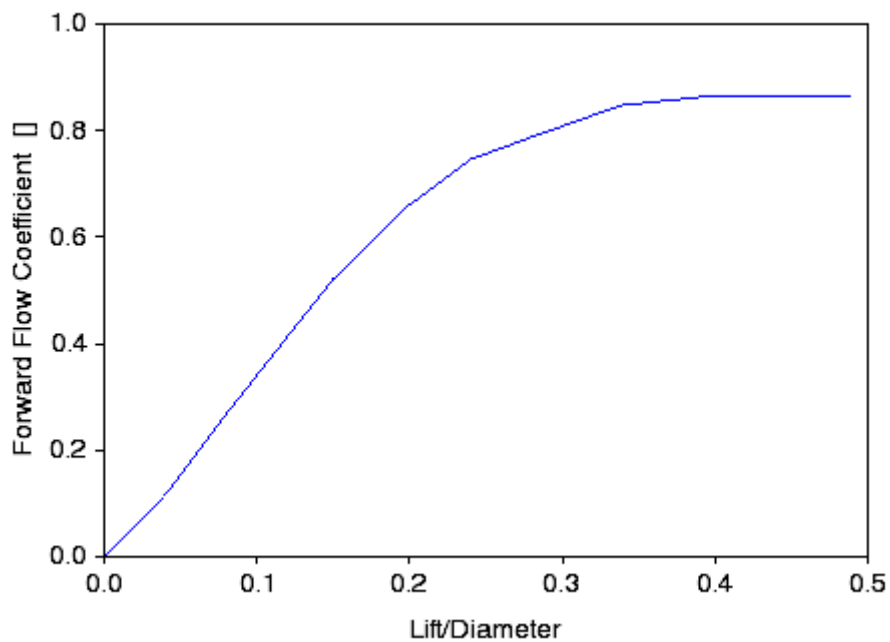
Obr. 94 Zdvih sacího ventilu v softwaru Wave



Obr. 95 Průtokový koeficient u sacího ventilu v softwaru Wave

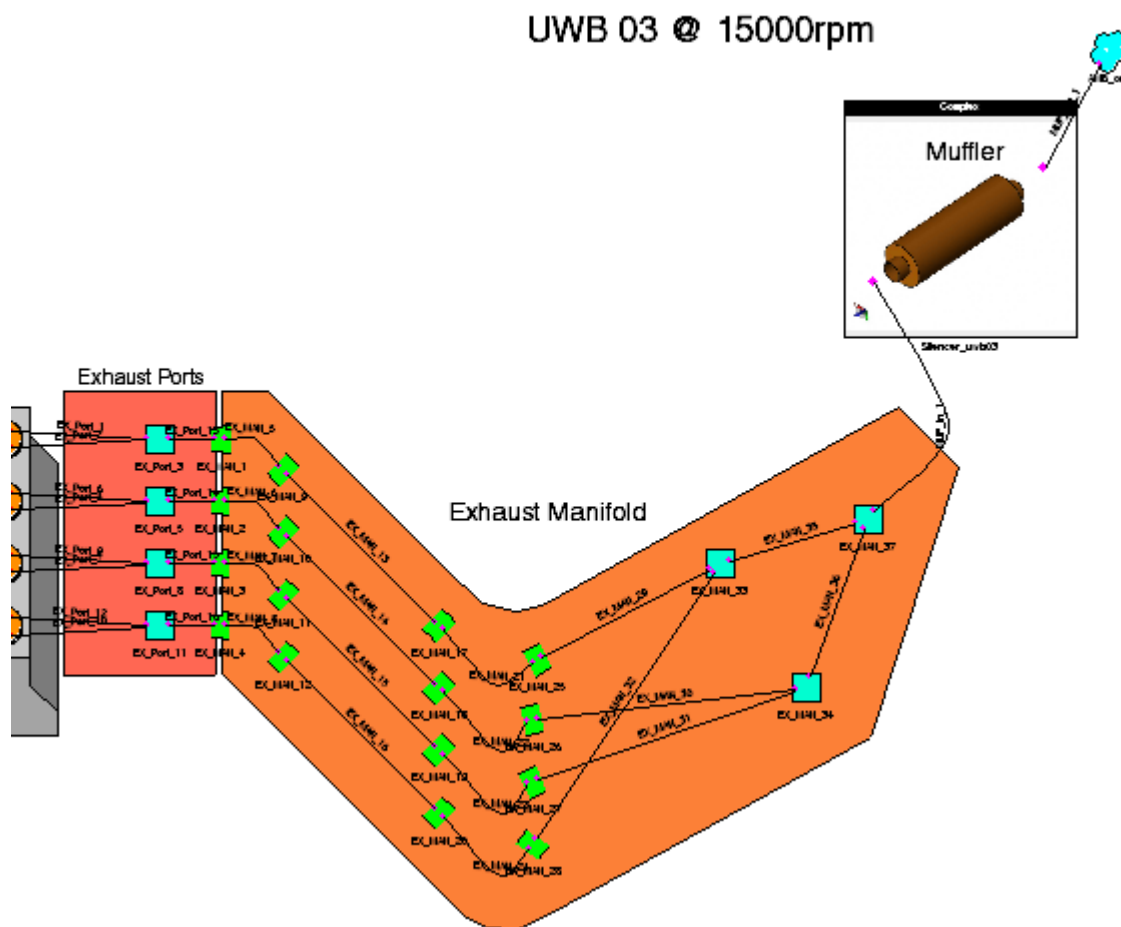


Obr. 96 Zdvih výfukového ventilu v softwaru Wave

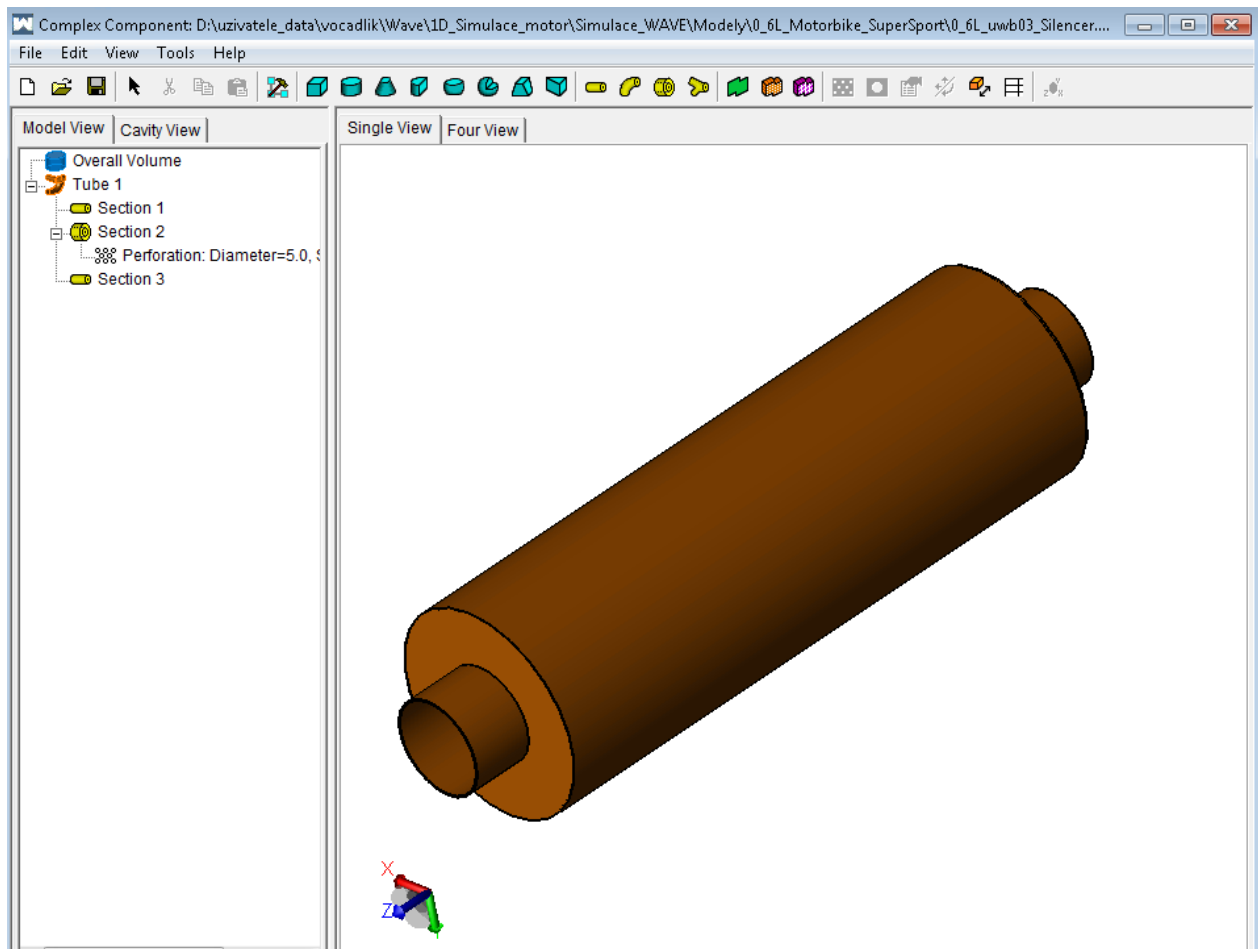


Obr. 97 Průtokový koeficient u výfukového ventilu v softwaru Wave

Na obr. 98 lze vidět 1D model výfukového systému vytvořený v softwaru Wave. Tento systém byl vytvořen na základě dat naměřených na UWB03. 1D model byl vytvořen podobným způsobem, jako v Lotus Engine Simulation. Při návrhu výfukového systému byl použit další pomocný modul – Wave Build 3D, ve kterém lze přímo 3D modelovat jednoduché díly a tento systém následně dokáže takto vytvořený díl implementovat do 1D modelu. V tomto modulu byl navržen tlumič výfuku – na obr. 99.

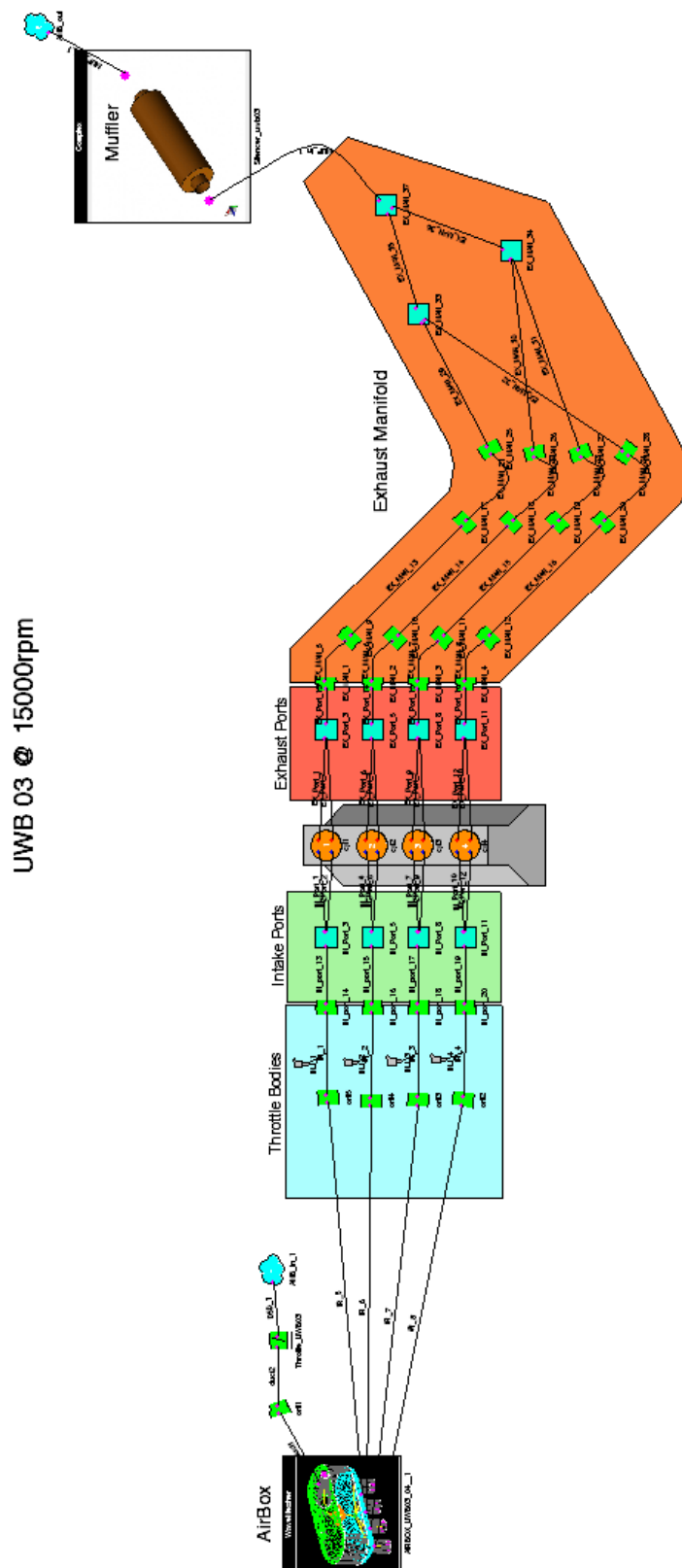


Obr. 98 Výfukový systém vytvořený v systému Wave

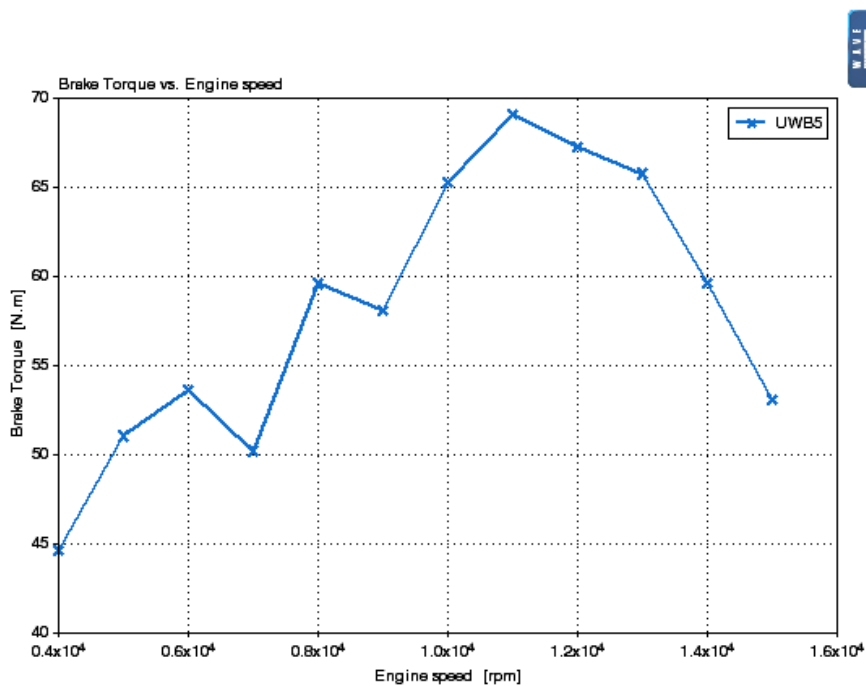


Obr. 99 Tlumič výfuku vytvořen v modulu Wave Build 3D

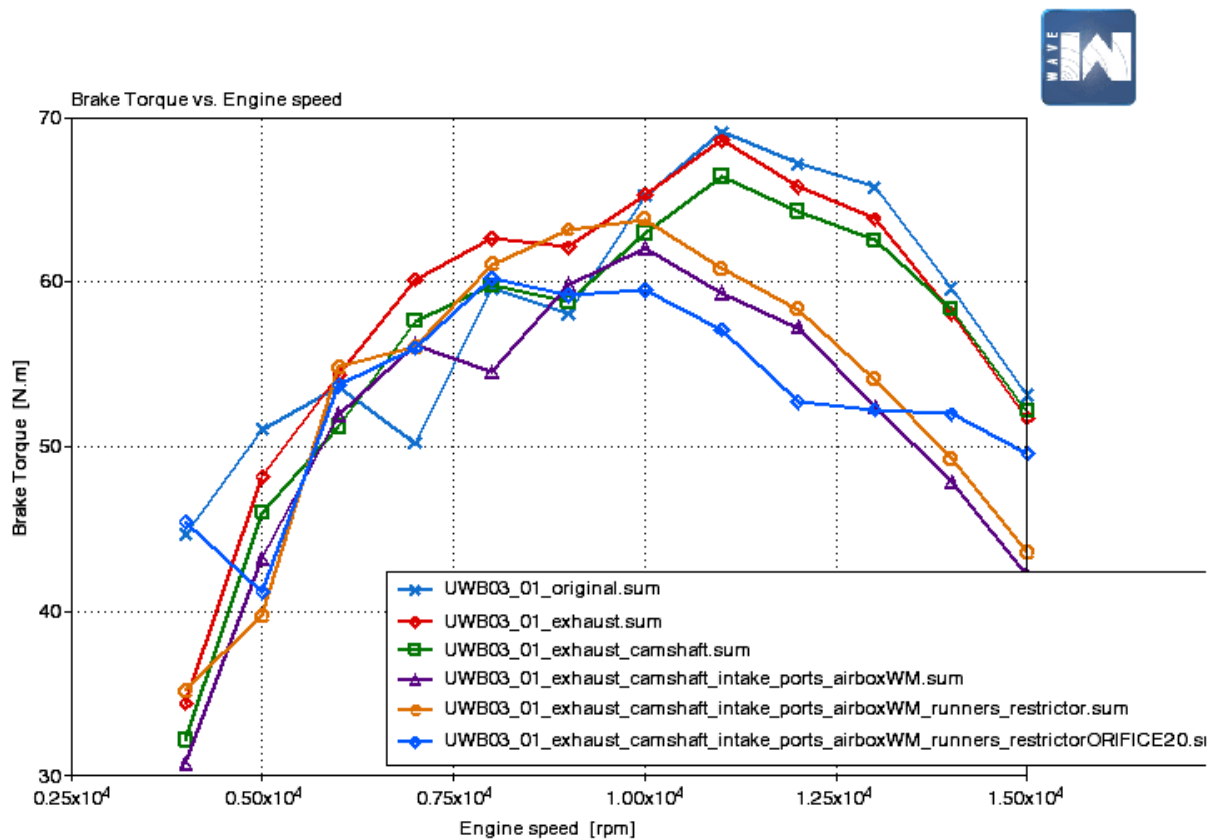
Pohled na celkový systém pohonné jednotky je vidět na obr. 100.



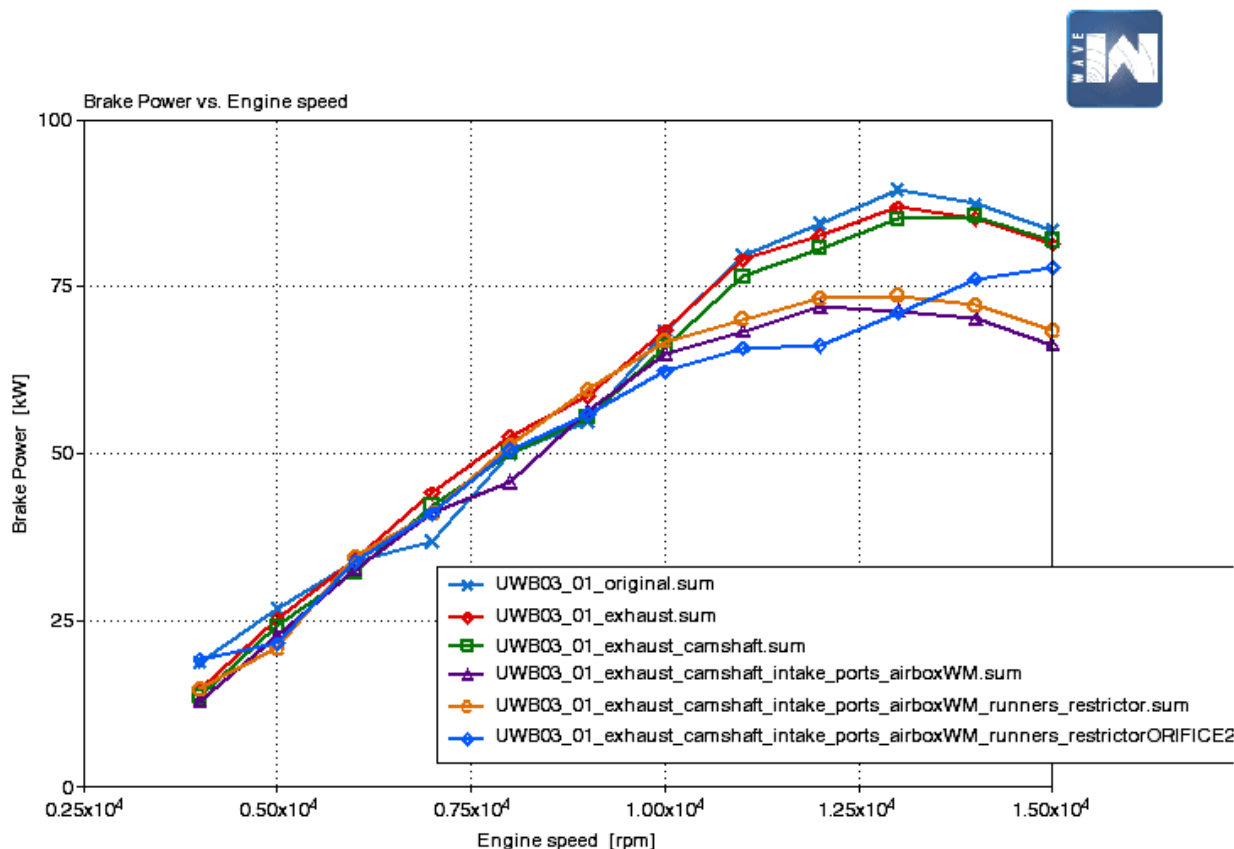
Obr. 100 Celkový 1D model vytvořen v softwaru Wave



Obr. 101 Graf točivého momentu originální PJ ze stroje Yamaha YZF-R6 získán simulací v softwaru Wave



Obr. 102 Změny průběhů točivých momentů průběžnými úpravami 1D modelu v softwaru Wave



Obr. 103 Změny průběhů točivých momentů průběžnými úpravami 1D modelu v softwaru Wave

Na obr. 101 lze vidět točivý moment ze simulace originální pohonné jednotky ze stroje Yamaha YZF-R6. Na obr. 102 a 103 jsou průběhy točivých momentů a výkonů, které byly postupně nasimulovány po jednotlivých úpravách systému. Díky těmto změnám je možné následně jednotlivé úpravy analyzovat a zjišťovat celkový vliv úpravy na charakteristiku motoru.

1D model v softwaru Wave byl vytvořen pro vývoj následujících vozů týmu UWB Racing a jejich pohonných jednotek. U tohoto modelu je nutné ještě vytvořit přesnější 1D model restriktorového sání, tento prvek zahrnout do celkového 1D modelu a následnými úpravami dosáhnout nasimulovaných charakteristik, které se budou blížit k reálným datům naměřeným s vozem UWB03 na dynamometru.

Po simulacích tohoto 1D modelu, které budou považovány za správné, je možné model optimalizovat podobným způsobem jako tomu bylo v softwaru Lotus Engine Simulation. Jelikož je možné s tímto sw spolupracovat s experty ze společnosti Ricardo, může být dosaženo ještě lepších plnicích charakteristik motoru a z toho plynoucí zvýšení točivého momentu a výkonu v určitých otáčkách a snížení spotřeby paliva. Díky tomuto může být v následujících vozech UWB Racing týmu využitelnější pohonná jednotka a díky tomu lepší celkové výsledky ze závodů a postup týmu výše v celkovém světovém žebříčku.

ZÁVĚR

V první kapitole této práce je proveden rozbor pohonné jednotky, která je využívána ve vozech studentského závodního týmu UWB Racing. Jsou zde obecně popsány jednotlivé části pohonné jednotky od sacího systému, samotného motoru až po výfukový systém. Prvky jsou zde popsány a uvedeny jejich základní funkční principy.

Ve druhé kapitole jsou podrobněji popsány a analyzovány jednotlivé prvky pohonné jednotky vozu UWB03. Jsou analyzovány díly ze sacího systému, motoru i systému výfukového. Díly použité na pohonné jednotce jsou jak nakupované, tak navržené a vyrobené týmem UWB Racing. Při rozboru těchto prvků probíhá odměřování jednotlivých parametrů, které jsou potřebné při vytváření 1D modelu pro simulační software Lotus Engine Simulation. Jedná se převážně o geometrické parametry, ale také o informace o průtokových koeficientech kolem zvedajících se ventilů a funkce zdvihů sacího a výfukového ventilu. Získávání těchto parametrů proběhlo fyzickým měřením, simulacemi (viz strana 21 až 27 – simulace zdvihů ventilů) či nalezením těchto informací na oficiálních stránkách výrobců. Tyto hodnoty jsou na konci kapitoly sepsány v tabulce. V kapitole je také uveden graf průběhu točivého momentu a výkonu vozu UWB03, který byl naměřen s vozem na dynamometru. Na konci kapitoly jsou zobrazeny data z dataloggeru, ze kterých je vyhodnoceno otáčkové spektrum motoru napříč závodem Formula Student v České Republice.

V následující kapitole je pomocí parametrů, dat a informací získaných v kapitole předešlé, sestaven 1D model v simulačním softwaru Lotus Engine Simulation. Jsou zde popsány jednotlivé 1D prvky a jejich zadávání. Po vytvoření 1D modelu je takováto pohonná jednotka simulována a výsledky z těchto simulací jsou porovnány s daty, které byly naměřeny na voze UWB03. Při porovnání výsledků získaných ze simulačního softwaru Lotus Engine Simulation s výsledky naměřenými na dynamometru, vychází dostatečná shoda průběhu točivého momentu v závislosti na otáčkách (průměrná odchylka 4% v zjišťovaném otáčkovém spektru od 6000 do 11 000ot/min) a proto je možné považovat model pohonné jednotky za korektní. Poté jsou prozkoumána jednotlivá otáčková spektra v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation. Po zjištění a vyšetření hodnot, které jsou závislé na průběhu točivého momentu, výkonu a celkové spotřeby paliva (například proudění směsi paliva a vzduchu z válce zpět do airboxu před uzavřením sacího ventilu), jsou navrženy úpravy, kterými je vhodné 1D model upravit pro dosažení vyššího točivého momentu ve středních otáčkách motoru. Pro úpravu 1D modelu jsou určeny jednotlivé části, které budou upraveny i pro následující vůz týmu UWB Racing. Tyto části byly následně podrobeny parametrickým optimalizacím. Z těchto optimalizací pro získání vyššího točivého momentu v nižších/středních otáčkách motoru byly získány data k úpravě délek sacího potrubí, délek a průměrů výfukového systému a data ke změně časování sacích a výfukových ventilů.

Ve čtvrté kapitole je použit software Lotus Valve Train pro návrh vačkových hřídelí. Pro tento software byly odměřeny potřebné parametry rozvodového systému a také byly změřeny tuhosti ventilových pružin jak pro sací, tak výfukový ventil. Po vytvoření vačkových profilů sací a výfukové vačky jsou porovnány originální a nově navržené zdvihové funkce ventilů. Také je zde porovnán výkon a točivý moment získaný z 1D simulací, ve kterých byl použit již optimalizovaný 1D model, s daty naměřenými na dynamometru.

V poslední kapitole je rozebrán návrh 1D modelu v softwaru Wave od společnosti Ricardo. Tento model by měl sloužit v následujících letech pro návrhy úprav pohonné jednotky týmu UWB Racing. 1D model v tomto softwaru není zcela dokončen a je třeba, aby se dokončením a konzultacemi ohledně něj tým UWB Racing dále zabýval. V tomto softwaru

je nutné se zaměřit na podrobný návrh restriktorového sání, porovnání a validování výsledků s realitou. Na takto upraveném modelu je následně možno provést optimalizace a získat tak návrhy změn pro další vůz studentského formulového vozu. Tento software je moderní, stále jsou vyvíjeny nové verze a společnost Ricardo působí také v České Republice, proto je vhodné se v budoucnu věnovat úpravám pohonné jednotky a 1D simulacím v tomto systému.

Díky 1D simulacím, optimalizacím a návrhům úprav jednotlivých prvků pohonné jednotky, provedených v této práci, bude dosaženo zvýšení točivého momentu, výkonu v nižších/středních otáčkách motoru a snížení celkové spotřeby, což povede k lepším vlastnostem pohonné jednotky a k celkově lepšímu vozu studentského formulového týmu UWB Racing. Dle provedených simulací se, na již parametricky optimalizovaném 1D modelu, zvýšil točivý moment až o 15% při otáčkách motoru 7000/min. Průměrně se točivý moment zvýšil o 8% v rozmezí otáček 6500-9250ot/min. Díky tomuto zlepšení vnějších charakteristik motoru bude možno dosahovat vyššího zrychlení a celkově lepších jízdních časů na závodních okruzích. Vzhledem ke změně výkonových a momentových charakteristik motoru navrhl tým UWB Racing novou převodovku (není součástí této práce), která dokáže zlepšené vlastnosti pohonné jednotky kompletně využít. Rozsah provozních otáček pohonné jednotky se díky této práci posune k nižším hodnotám otáčkového spektra a zrychlení vozu bude probíhat rychleji, díky vyššímu točivému momentu v nižších otáčkách a nové převodovce. Za těchto okolností se také sníží celková spotřeba paliva, jelikož motor již nebude dále provozován ve vysokých otáčkách, kdy se aerodynamicky ucpává restrikce sání, zvyšují se pumpovní ztráty a celkově klesá účinnost pohonné jednotky.

Díky úpravám pohonné jednotky a ostatních částí vozu se zvýší konkurenceschopnost monopostu navrženého na Západočeské univerzitě.

Použité zdroje

- [1] Motorkari.cz. *Motorkari.cz* [online]. Praha: MOTOportal, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.motorkari.cz/motokatalog/yamaha/yamaha-yzf-r6.html>
- [2] *Optimalizace výkonu a spotřeby*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT, FS, PRAHA.
- [3] BUREŠ, O. (1974): *Traktory a automobily*, 1. vyd. Praha: Státní zemědělské nakladatelství.
- [4] AT Power. *At power* [online]. Norfolk: AT Power Throttles, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.atpower.com/products/28mm-fs-20mm-restrictor>
- [5] Wikipedia. *Wikipedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Sac%C3%AD_ventil
- [6] Wikipedia. *Wikipedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDfuk>
- [7] *GETTING STARTED USING LOTUS ENGINE SIMULATION*. Norwich: Lotus Cars, 2001.
- [8] *WAVE User Manual*. Praha: Ricardo Software, 2016.
- [9] *Service Manual YZFR6Y*. Hamamacu: Yamaha Motor Corporation, 2009.
- [10] VAN BASSHUYSEN, Richard a Fred Schäfer *Internal combustion engine handbook*. USA : SAE International 2004. ISBN 0-7680-1139-6. 811 s.
- [11] HEYWOOD, J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. USA : McGraw-Hill 1988. ISBN 00-702-8637-X. 930 s.
- [12] STONE, Richard *Introduction to Internal combustion engines*. UK : The MacMillan Press Ltd. 1992. Druhá edice. ISBN 0-333-55083-8. 574 s.
- [13] VLK, František. *Automobilová technická příručka*. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-9681-4.

Seznam obrázků

Obr. 1 Motor ze stroje Yamaha YZF-R6 týmu UWB Racing Team	8
Obr. 2 Motocykl Yamaha YZF-R6 [1].....	9
Obr. 3 Výkon (HP) a točivý moment (lbs-ft) sériové PJ z motocyklu Yamaha YZF-R6 [1]	9
Obr. 4 Šíření tlakových vln v sacím potrubí a princip pulzního přeplňování [2]	10
Obr. 5 Originální výfukový systém Yamaha YZF-R6, uspořádání 4-2-1 [2]	11
Obr. 6 p-V diagram spalovacího motoru s časováním ventilů [3]	12
Obr. 7 Ilustrace vlivu načasování uzavření sacího ventilu na plnicí účinnost při různých pístových rychlostech.....	14
Obr. 8 Škrticí klapka s restriktorem od fy AT Power [4].....	15
Obr. 9 Škrticí klapka s restriktorem a filtrem od fy AT Power [4]	16
Obr. 10 Průtoková charakteristika kompletu restriktoru s klapkou [2].....	16
Obr. 11 Sací ústrojí z vozu UWB03.....	17
Obr. 12 Rezonanční potrubí v sacím ústrojí vozu UWB03.....	18
Obr. 13 Sací a výfuková komora v hlavě válců motoru ze stroje Yamaha YZF-R6	19
Obr. 14 Sací a výfuková komora s ventily ze stroje Yamaha YZF-R6.....	19
Obr. 15 Talířový ventil a jeho jednotlivé části.....	20
Obr. 16 Sací (modrý) a výfukový (červený) ventil z motoru Yamaha YZF-R6.....	20
Obr. 17 Komory v hlavě válců s ventily motoru Yamaha YZF-R6.....	21
Obr. 18 3D sken sací vačkové hřídele z motoru Yamaha YZF-R6.....	22
Obr. 19 Geometrie profilu sací vačkové hřídele z motoru Yamaha YZF-R6.....	23
Obr. 20 Geometrie profilu výfukové vačkové hřídele z motoru Yamaha YZF-R6	24
Obr. 21 Palec sací vačkové hřídele, ventilu a zdvihátka z motoru Yamaha YZF-R6 v softwaru NX11 – modul Motion Simulation.....	25
Obr. 22 Palec sací vačkové hřídele, ventilu a zdvihátka z motoru Yamaha YZF-R6 v softwaru NX11 – modul Motion Simulation.....	26
Obr. 23 Zdvihová funkce sacího ventilu získaná za pomoci softwaru NX11 - modul Motion Simulation	27
Obr. 24 Výfukový systém vozu UWB - 03	28
Obr. 25 Tlumič výfuku UWB – 03	28
Obr. 26 Točivý moment a výkon vozu UWB-03 naměřený na dynamometru	30
Obr. 27 Data z dataloggeru vozu UWB ze závodní tratě (otáčky motoru, tlak oleje, teplota chladiva a akcelerometry.....	31
Obr. 28 Data z dataloggeru vozu UWB - závod v České Republice	32
Obr. 29 Využití otáčkového spektra motoru během závodu.....	32
Obr. 30 Vstup do sání navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	34
Obr. 31 Přívod ke škrticí klapce navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	35
Obr. 32 Geometrie přívodu ke škrticí klapce navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	35
Obr. 33 Škrticí klapka navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	36
Obr. 34 Restriktor a potrubí k airboxu navrženy v 1D softwaru Lotus Engine Simulation.....	37
Obr. 35 Geometrie restriktoru a potrubí navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation ..	37
Obr. 36 Airbox navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation.....	38
Obr. 37 Runnery – krajní typ navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation.....	39

Obr. 38 Geometrie runnerů navržena v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	39
Obr. 39 Napojení potrubí navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	40
Obr. 40 Vstupní kanály v hlavě válců navrženy v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	41
Obr. 41 CFD Simulace proudění směsi kolem ventilu [8]	42
Obr. 42 Vstupní otvor navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	42
Obr. 43 Proudění sacím portem (Port flow coefficient) navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	43
Obr. 44 Sací ventil navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	44
Obr. 45 Zdvih ventilu v závislosti na natočení klikové hřídele navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	44
Obr. 46 Časování ventilů navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	45
Obr. 47 Válec navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	46
Obr. 48 Zadávání hodnot válce motoru v softwaru Lotus Engine Simulation	46
Obr. 49 Výfukový ventil navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	47
Obr. 50 Sřih ventilů navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	47
Obr. 51 Výfukový port navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	48
Obr. 52 Proudění výfukovým portem navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	48
Obr. 53 Výfukové kanály navrženy v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	49
Obr. 54 Primární potrubí výfukového systému navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	50
Obr. 55 Sekundární potrubí výfukového systému navrženo v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	51
Obr. 56 Tlumič výfuku navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	52
Obr. 57 Tlumič výfuku – grafické zobrazení v softwaru Lotus Engine Simulation	52
Obr. 58 1D model motoru navržen v 1D softwaru Lotus Engine Simulation	53
Obr. 59 Výsledný točivý moment a výkon z 1D simulace v softwaru Lotus Engine Simulation	53
Obr. 60 Porovnání výsledného točivého momentu z 1D simulace s reálnými daty	54
Obr. 61 Modul PRS v softwaru Lotus Engine Simulation	55
Obr. 62 Modul PRS při 6263ot/min v softwaru Lotus Engine Simulation	55
Obr. 63 Hodnoty na prvku runneru 1. válce při 6263ot/min v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation	56
Obr. 64 Modul PRS při 8473ot/min v softwaru Lotus Engine Simulation	57
Obr. 65 Hodnoty na prvku runneru 1. válce při 8473ot/min v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation	58
Obr. 66 Modul PRS při 11789ot/min v softwaru Lotus Engine Simulation	58
Obr. 67 Hodnoty na prvku runneru 1. válce při 11789ot/min v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation	59
Obr. 68 Sací runnery z vozu UWB03	60
Obr. 69 Vačkové hřídele, profil vačky a ventily z motoru Yamaha YZF-R6	61
Obr. 70 Parametrická optimalizace vačkových hřídelí a runnerů v softwaru Lotus Engine Simulation	62
Obr. 71 Parametrická optimalizace vačkových hřídelí a runnerů v softwaru Lotus Engine Simulation	62
Obr. 72 Parametrická optimalizace výfukového systému v softwaru Lotus Engine Simulation	63
Obr. 73 Změna časování ventilů po parametrických optimalizacích v softwaru Lotus Engine Simulation	63

Obr. 74 Zpětné proudění plynů v runneru 1. válce před a po úpravě v modulu PRS softwaru Lotus Engine Simulation	64
Obr. 75 Různé délky runnerů v airboxu z vozu UWB03	65
Obr. 76 Nejvhodnější rozměry výfukového systému po parametrických optimalizacích v softwaru Lotus Engine Simulation	66
Obr. 77 Výroba výfukového systému pro vůz UWB04	66
Obr. 78 Návrh profilu sací vačkové hřídele v softwaru Lotus Valve Train	68
Obr. 79 Vačkový profil, zdvihátko a ventil v softwaru Lotus Valve Train	69
Obr. 80 Vačkový hřídel a jeho stálý kontakt se zdvihátkem v softwaru Lotus Valve Train ...	70
Obr. 81 Modul statics v softwaru Lotus Valve Train	71
Obr. 82 Parametry pružin ze servisního manuálu Yamaha [9]	72
Obr. 83 Hmotnost ventilových komponent z motoru Yamaha YZF-R6	73
Obr. 84 Hmotnost ventilových komponent bez pružiny z motoru Yamaha YZF-R6	73
Obr. 85 Rádus křivky v softwaru Lotus Valve Train	74
Obr. 86 Překryv pístu/ventilu v softwaru Lotus Valve Train	74
Obr. 87 Vygenerovaný profil sací vačky v softwaru Siemens NX11	75
Obr. 88 Porovnání originálních a nových zdvihových funkcí ventilů	76
Obr. 89 Porovnání točivého momentu a výkonu u nových a originálních vaček	77
Obr. 90 Sací systém vytvořený v softwaru Wave	79
Obr. 91 Airbox vozu UWB03 v modulu WaveMesher v softwaru Wave	80
Obr. 92 Podrobnější návrh restriktoru v softwaru Wave	80
Obr. 93 1D model bloku motoru v softwaru Wave	81
Obr. 94 Zdvih sacího ventilu v softwaru Wave	82
Obr. 95 Průtokový koeficient u sacího ventilu v softwaru Wave	82
Obr. 96 Zdvih výfukového ventilu v softwaru Wave	83
Obr. 97 Průtokový koeficient u výfukového ventilu v softwaru Wave	83
Obr. 98 Výfukový systém vytvořený v systému Wave	84
Obr. 99 Tlumič výfuku vytvořen v modulu Wave Build 3D	85
Obr. 100 Celkový 1D model vytvořen v softwaru Wave	86
Obr. 101 Graf točivého momentu originální PJ ze stroje Yamaha YZF-R6 získán simulací v softwaru Wave	87
Obr. 102 Změny průběhů točivých momentů průběžnými úpravami 1D modelu v softwaru Wave	87
Obr. 103 Změny průběhů točivých momentů průběžnými úpravami 1D modelu v softwaru Wave	88