

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní
Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**

**Přepřehování čtyřválcového zážehového motoru pro soutěžní účely v
rámci Formula Student**

**Supercharging of four cylinder petrol engine for competitive purpose
in terms of Formula Student**

Bakalářská práce

Studijní program : Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor : Bezoborový

Vedoucí práce : Ing. Pavel Brynych

Jakub Záhorský

Praha 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů.

V Praze dne 18.6.2015

.....

Jakub Záhorský

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Pavlu Brynychovi za vedení při psaní této práce, ochotě věnovat mi svůj volný čas při konzultacích a za skvělý přístup.

Abstrakt

V této bakalářské práci je popsána problematika přeplňování pístových spalovacích motorů s následnou aplikací teoretických výpočtů v programu GT Suite na konkrétní motor Yamaha YZF-R6, jež tým CTU Car Tech využívá ve svém soutěžním voze, se kterým se úspěšně účastní několika závodů série Formula SAE. V první části práce, která je rešeršního charakteru, je popsána problematika přeplňování obecně, je vysvětleno, jaké důvody vlastně vedly lidstvo k přeplňování a v dnešní době k jeho tak masivnímu využívání, historické pozadí a vývoj této techniky, způsoby přeplňování včetně výhod a nevýhod obou hlavních metod, a konečně i nahlédnutí do motorsportu a aplikace přeplňování v něm, neboť zaměření této práce se vztahuje především právě ke sportovním účelům. Navazující praktická část shrnuje a popisuje výsledky nasimulování několika typů kompresorů na konkrétní pohonnou jednotku v programu GT POWER. Cílem této práce je zjistit, zda-li se týmu CTU Cartech vyplatí aplikovat kompresor, a případně najít i konkrétní typ.

Klíčová slova

Přeplňování, mechanické dmyhadlo, Rootsův kompresor, GT POWER, Yamaha YZF-R6

Abstract

In this bachelor thesis is described problematic of internal combustion engines supercharging, with subsequent application of theoretical calculations in GT Suite software on particular Yamaha YZF-R6 engine, used in CTU Car Tech's formula car, with which students successfully participates in several races Fomula SAE series. First part of thesis, which is theoretical, describes which reasons lead people to supercharging, why is it so popular today, historical overview and evolution of this technique, short analysis of advantages and disadvantages between two most common methods, and finally also use of supercharging in motorsport, which is this work all about. Second part sums up and describes results of simulations, in which variety of superchargers is individually connected with engine mentioned above in GT POWER software. Goal of this work is to find out, if it is profitable to attach supercharger to actual engine to bring better standings and eventually pick one particular type.

Key words

Supercharging, mechanical supercharger, Roots supercharger, GT POWER, Yamaha YZF-R6

Obsah

1. Úvod	13
2. Cíl práce.....	14
3. Princip přeplňování	14
4. Přeplňování v oblasti motorsportu	16
5. Druhy přeplňování.....	17
5.1 Turbodmychadla	18
5.2 Kompresory	20
5.3 Druhy kompresorů	21
5.3.1 Dvoupístový Rootsův kompresor	24
5.3.2 Šroubové kompresory	25
5.3.3 Vliv tlaku ve výtlačném potrubí na funkci dmychadla.....	27
6. Způsoby regulace kompresorů.....	28
6.1 Regulace změnou otáček	28
6.2 Regulace zastavováním a spouštěním.....	28
6.3 Regulace uzavíráním sání	29
6.4 Regulace obtokovým ventilem.....	29
7. Volba typu dmychadla.....	29
8. Spalovací motor Yamaha YZF-R6.....	30
9. Analýza dat z telemetrie.....	30
10. Model v prostředí GT-Power	31
11. Výsledky simulace	36
11.1 Atmosférické plnění	36
11.2 Přeplňování kompresorem.....	36
12. Závěr.....	38
13. Náměty pro další práci	39
14. Seznam použité literatury	41

1. Úvod

Jako člen závodního studentského týmu CTU CarTech z Českého vysokého učení technického v Praze, jenž se již několik let úspěšně účastní několika vybraných závodů ročně po celé Evropě, jsem se rozhodl svou bakalářskou prací zkusit posunout techniku našeho závodního monopostu na vyšší a ještě více konkurenceschopnou úroveň. Jelikož od první verze vozu až po jeho poslední sedmou evoluci je pohonnou jednotkou atmosférický zážehový čtyřválec od výrobce motocyklů Yamaha, a pravidla soutěže umožňují při malých změnách uspořádání sacího schématu a průměru restriktoru aplikovat přeplňování, rozhodl jsem se zkusit na něj virtuálně aplikovat mechanicky hnané dmychadlo, které by mělo zvýšit výkon motoru. Pro kompresor jsem se rozhodl z důvodu spolupráce mezi týmem CTU CarTech a společností Eaton, jež je významným výrobcem kompresorů. V úvodu práce jsem se rozhodl udělat přehled o přeplňování obecně, včetně přeplňování turbodmychadlem. Myslím si totiž, že je důležité probíranou problematiku uvést v širších souvislostech jak z technického, tak například i z historického úhlu pohledu. Pro potencionálního čtenáře této práce, který toho o přeplňování mnoho neví, je podle mého názoru takováto koncepce mnohem přínosnější. V dnešní době hraje prim zejména přeplňování turbodmychadly, takže je důležité zmínit i důvody, proč tomu je právě takto a ne naopak. Vzhledem k tomu, že CTU CarTech působí v motoristickém sportu a tato bakalářská práce úzce souvisí se sportovním využitím, pak je také důležité si udělat obrázek o uplatnění přeplňování právě v motorsportu, ve kterém jsou používány ty nejlepší technologie a nejlepší materiály. Poté, co tímto způsobem bude do problematiky uveden i neznalý čtenář, bude následovat praktická část, která má za úkol analyzovat a shrnout výsledky simulací v profesionálním softwaru GT POWER. Za pomoci tohoto programu se budu snažit zodpovědět na otázku, zda-li se pro soutěžní účely vůbec vyplatí kompresor aplikovat. K tomuto mi dobře poslouží i záznamy telemetrie z jednotlivých závodů a testování, kdy přesně vím, kolik času z jednotlivých disciplín využívá závodník plný potenciál motoru a naopak kolik času využívá například jen poloviční výkon. Pokud ze simulace vyjde najevo, že kompresor má pro potřeby CTU CarTech smysl, pak se budu snažit nalézt nejlepší model z modelové řady Eatonu.

2. Cíl práce

Cílem práce je zjistit, jestli se vyplatí aplikovat na aktuální pohonnou jednotku soutěžního vozu týmu CTU Cartech nějaký typ kompresoru. Pokud ano, pak je jednoznačným cílem najít konkrétní model a doporučit týmu, aby se do příště zabýval i možností pohonné jednotky přeplňované dmychadlem.

Zároveň je cílem uvést případného čtenáře do problematiky přeplňování a vysvětlit, proč může být přeplňování výhodné a proč je v dnešní době tak masově rozšířené.

3. Princip přeplňování

Základní myšlenkou, která stála u zrodu přeplňování, byla idea, že pokud zvýšíme hmotnost vzduchu ve válci, budeme do něj moci vstříknout i více paliva, a tím pádem při zachování zdvihového objemu motoru zvýšit jeho výkon. Protože běžný motor má přísun vzduchu z okolí zajištěn otevřením sacího ventilu a pohybem pístu směrem k dolní úvrati, čímž se vytvoří podtlak, a samotný vzduch je pak do spalovacího prostoru nahnán pouze okolním atmosférickým tlakem, nabízel se velký prostor pro zlepšení. Smysl tento nápad našel téměř okamžitě, protože od počátku automobilismu byl kladen důraz na zvyšování výkonu a zrychlování dopravy. Přeplňování se také ukázalo jako nezbytné u leteckých motorů, kde s rostoucí letovou hladinou klesá hustota vzduchu a tím i výkon atmosféricky plněného motoru. A cesta neustálého zvětšování zdvihového objemu motorů a tím i jejich velikosti a hmotnosti byla slepá. Bylo tedy potřeba najít řešení. Až do dnešních dní bylo, je, a do budoucna s největší pravděpodobností ve stále větší míře bude požíváno dvou hlavních metod. Přeplňování za pomoci turbodmychadel na jedné straně a přeplňování za pomoci mechanicky hnaných dmychadel, tedy kompresorů, na straně druhé. Principy těchto dvou metod se zásadně odlišují, jak je popsáno v další kapitole. Rozdílné principy ale nevylučují použití kompresoru a turbodmychadla najednou, kdy je kompresor využíván pro přeplňování v nízkých otáčkách a zatíženích motoru, kdy turbodmychadlo má nejnižší účinnost díky nízké teplotě výfukových plynů. Vlivem své nízké teploty pak mají plyny příliš nízkou entalpii. Nemají tedy dostatečné množství energie na roztočení turbíny tak, aby byl dosažen požadovaný plnicí tlak. S rostoucím počtem otáček je pak kompresor od motoru prostřednictvím spojky odpojen, aby neubíral z pohonné jednotky výkon a točivý moment, a v

tu dobu mají již výfukové plyny dostatečnou teplotu i entalpii k roztočení turbíny, a turbodmychadlo má dostatečné otáčky na to, aby mohlo být naplno využito. Toto řešení uplatnil ve velké míře zejména koncern Volkswagen, který ještě donedávna vyráběl motor 1.4 TSI Twincharger, který kombinoval kompresor s turbodmychadlem. Vzhledem k velmi náročné výrobě a zejména pak servisu ale Volkswagen s výrobou přestal a kompresor nahradil moderním dvoukomorovým turbodmychadlem, které přináší dostatek točivého momentu i v nízkých otáčkách a nahrazuje tím kompresor.

Co se smyslu přeplňování týče, pak nelze nezmínit trend, který je v současné době velice populární, a to sice snižování spotřeby paliva u automobilů. Zejména v Evropě je tento jev velmi rozšířený, a to díky regulím a směrnici Evropské unie, která se snaží omezit plošnou produkcí emisí oxidu uhličitého a dalších škodlivin, které kromě prokazatelně negativních účinků na lidské zdraví údajně způsobují globální oteplování a další změny klimatu. Produkce klasických atmosférických motorů poměrně rychle ustupuje motorům o menším zdvihovém objemu, které jsou přeplňovány turbodmychadly. Tento postup nahrazování větších atmosférických motorů za přeplňované motory s menším zdvihovým objemem se nazývá downsizing. Stěžejní ideou downsizingu je spálení stejného množství směsi v menším spalovacím prostoru a dosažení stejného výkonu motorem menším a lehčím. S menšími rozměry pístů je zmenšena i jejich styčná plocha s válcem a díky tomu dochází k menším mechanickým ztrátám vlivem tření. Přínos downsizingu má tedy být v mnohem nižší spotřebě paliva, reálné výsledky jsou ale spíše diskutabilní, neboť velmi záleží na zatížení motoru. Už z principu přeplňování je totiž jasné, že přidáním turbodmychadla do oběhu motoru se do válce s větším objemem vzduchu dostane také více paliva, což je naprostý opak snižování spotřeby. I přesto, že je objem downsizovaných motorů v porovnání s výkonově podobnými atmosférickými motory menší, spotřeba spíše mírně roste. Evropskou unií předepsané laboratorní zkušební cykly jsou ovšem nastaveny tak, že vůz má tabulkovou spotřebu skutečně nižší. Problém je však v tom, že jsou tyto testovací metody naprosto odlišné od reálného provozu, protože probíhají při nízkých zatíženích motoru, která naprosto neodpovídají reálnému provozu. V nízkém pásmu otáček před roztočením turbodmychadla tedy mají motory nízkou spotřebu, ale mají také nízký výkon, který roste až se stoupajícími otáčkami a plnicím tlakem. V reálném provozu je tedy motory potřeba vytáčet, aby měl člověk k dispozici dostatečný výkon a dynamiku, v důsledku čehož se spotřeba dostane naprosto mimo tabulkovou hodnotu uváděnou výrobcem, a nezdědka i nad hodnoty, kterých dosahují výkonově srovnatelné agregáty s atmosférickým plněním. V současné době je trendem tzv. rightsizing neboli vhodně zvolený zdvihový objem motoru vzhledem k požadovanému výkonu a způsobu využití vozidla. V podstatě jediným výrobcem, který se

rozhodl jít cestou atmosférických motorů je Mazda. Její motory Skyactiv jsou dnes velmi ceněny zejména kvůli jejich skvělému projevu a hospodárnosti, která je mnohem lepší než u downsizované, výkonově srovnatelné konkurence.

4. Přepřňování v oblasti motorsportu

Protože motoristické soutěže vždy bývaly výkladní skříní nejlepší techniky a v závodech rozhodoval především výkon, přepřňování se velmi rychle usadilo i v oblasti motorsportu. Zpočátku šlo především o mechanické přepřňování, turbodmychadla se kvůli své výkonové prodlevě neprosadila. Velký zlom nastal až koncem 70. let 20. století v závodech formule 1, kdy automobilka Renault přišla se svým proslulým přepřňovaným vidlicovým šestiválcem. Tento motor o zdvihovém objemu 1,5l dosahoval v kvalifikačním nastavení výkonu až přes 1300 koní při plnicím tlaku okolo 4 barů. Ostatní týmy samozřejmě nemohly se svými atmosféricky plněnými jednotkami tak vysokému výkonu konkurovat a také přešly k přepřňovaným motorům. Koncem 80. let 20. století pak byla turbodmychadla mezinárodní automobilovou federací FIA zakázána, protože auta začala být až nebezpečně výkonná.

Paralelně k vývoji ve formuli 1 začalo být přepřňování využíváno i v rallye seriálu WRC, kde počátkem 80. let 20. století vznikla nová soutěžní skupina s označením B. Díky turbodmychadlům soutěžní speciály dosáhly vysokých výkonů, které v konečném důsledku vedly po pár letech ke zrušení skupiny B. Vysoce výkonné vozy byly schopny vyvinout na tu dobu extrémní rychlost a po několika smrtelných nehodách byla mezinárodní automobilová federace FIA nucena zrušit tuto kategorii. Z této kategorie vozů bych zmínil zejména automobil Lancia Delta S4. Lancia totiž využívala dvojitého přepřňování, tedy kombinace kompresoru a turbodmychadla. Volkswagen tedy se svým Twinchargerem rozhodně nebyl první, Lancia měla tento systém o 20 let dříve.

V dnešní době jsou opět jak v rallye, tak ve formuli 1 využívány přepřňované motory. Ovšem výkon je mnohem nižší než byl u jejich předchůdců ze 70. a 80. let, zůstal prakticky na úrovni předchozích atmosférických motorů. Důvodem pro aplikaci turbodmychadel totiž již nebyla potřeba zvyšování výkonu, ale zvýšení účinnosti, snížení spotřeby a emisí.

Z výše uvedeného bych chtěl především zdůraznit to, že je jasně patrné, že inovace a pokrok v motorsportu vedou k pozdější implementaci i do sériové výroby. Proto je vývoj v

této oblasti velice důležitý, přestože se může zdát, že jde o plýtvání prostředky. Je také dobře znát jak se měnily trendy a nálada společnosti. Zatímco 80. léta byla nehledě na bezpečnost či hospodárnost honbou za lepšími výkony a vyššími rychlostmi, v dnešní době je na prvním místě bezpečnost a co možná nejnižší ekologická zátěž.

V případě formule CTU Cartech je však primárním cílem zvýšení výkonu a zlepšení dynamických parametrů vozidla. Případné snížení spotřeby paliva by bylo jen příjemným bonusem, nikoli podmínkou, kterou je potřeba splnit.

5. Druhy přeplňování

Jak bylo již zmíněno v předchozí kapitole, v oblasti motorsportu se nejčastěji využívá dvou typů přeplňování. Turbodmychadlem a mechanicky hnaným kompresorem, kterým se budu věnovat i ve své práci. Rozdíl mezi těmito dvěma způsoby je hlavně v tom, jakým způsobem to které dmychadlo získává energii na vytvoření plnicího tlaku. Turbodmychadlo získává energii z proudění horkých výfukových plynů, které by jinak bez využití pokračovaly z válce skrz výfukové potrubí do atmosféry, takže turbodmychadlo je, zjednodušeně řečeno, vlastně přidanou hodnotou zužitkovávající odpadní energii. Dalo by se snad i říci, že je jakousi formou mechanismu rekuperujícího energii. Díky využívání této „odpadní“ energie se zvyšuje objemová a tím i celková účinnost spalovacího motoru.

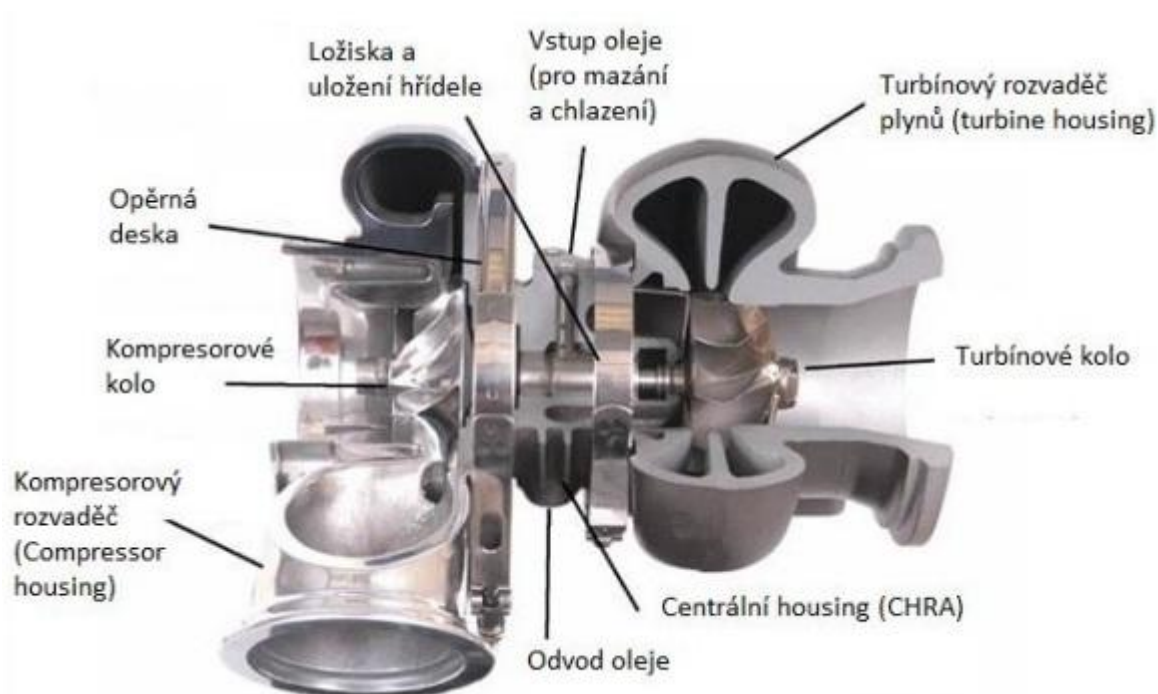
Naproti tomu mechanicky hnané dmychadlo je poháněno přímo motorem, jak už části názvu "mechanicky hnané" lze odtušit. Tímto tedy motoru část jeho výkonu a především točivého momentu odebírá, aby pak mohlo jeho výkon zase o nějaký kus zvýšit. Tento problém se velice dotýká i této práce, kdy nám v praktické části půjde o to, simulacemi zjistit, jaká bude celková výkonová bilance plnicí soustavy. Výsledek musí přinášet velké vylepšení, nemá totiž smysl přidávat na závodní monopost další hmotnost v podobě nového zařízení, které navíc může být náchylné k poruchám, aniž by došlo k významným posunům v oblasti výsledného výkonu.

5.1 Turbodmychadla

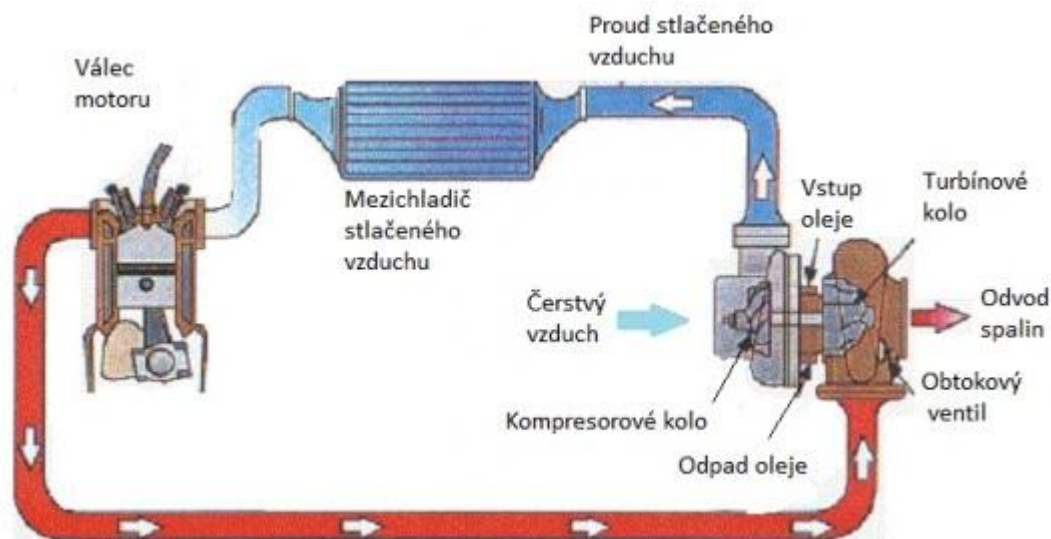
U turbodmychadel se jejich historie se začala psát v podstatě souběžně s vynálezem spalovacího motoru. Již v roce 1885 obdržel samotný Gottlieb Daimler patent na přeplňování zážehového benzinového motoru, ovšem nepřichází s žádným konkrétním aplikovatelným řešením. Pouze dokáže, že pokud vžene do motoru stlačený vzduch, pak zvýší jeho výkon a sníží spotřebu. Následujícího roku, tedy 1886, přichází Rudolf Diesel s patentem na přeplňování vznětového motoru, tedy přeplňování motoru, který sám vymyslel roku 1883. Tento motor byl sice přeplňován mechanickým dmychadlem, ale z tohoto příkladu je jasně vidět, že na přeplňování byl kladen důraz v podstatě již od samotného vzniku motorů s vnitřním spalováním. Veškeré snažení o zvýšení účinnosti, které vedlo až k turbodmychadlům tak, jak je dnes známe, dovedl k dokonalosti v roce 1905 švýcarský občan a tehdejší šéfinženýr výzkumu ve firmě bratří Sulzerů, doktor Alfred Büchi. Zpočátku se ovšem doktor Büchi neseťkal s pochopením, a tedy ani s úspěchem. Až za 20 let, roku 1925, se mu povedlo demonstrovat jednoznačné výhody jeho vynálezu, když ukázal, že díky svému turbodmychadlu zvýšil výkon spalovacího motoru o 40%. [3]

S tímto přišla v podstatě malá revoluce a turbodmychadlům se otevřel prostor pro široké využití v dopravě. Průkopníkem v této aplikaci byla zejména společnost Saurer, která začala jako první montovat do svých nákladních automobilů spalovací motory osazené turbodmychadly. Velký boom nastal v lodní a železniční dopravě, kde bylo spousta prostoru pro aplikaci velkých a neskladných turbodmychadel, a kde bylo zvýšení výkonu potřeba. Zároveň zde nevadila zpožděná reakce motoru na sešlápnutí pedálu akcelérátoru. Prvním, kdo aplikoval přeplňování do svých modelů byl Chevrolet ve voze Corvair Monza společně s Oldsmobile Jetfire. Tyto automobily ale trpěly řadou technických problémů a skončily komerčním neúspěchem. A tak prvním skutečně spolehlivě využitelným vozidlem, které využívalo přeplňovaný spalovací motor, bylo BMW 2002 Turbo, které bylo představeno v roce 1973. V roce 1978 přišel na trh Saab 99 Turbo, který pro využití turbodmychadel znamenal revoluci, neboť šlo o první dostupný automobil s přeplňovaným motorem, který si mohly dovolit širší masy. Od té doby postupně většina automobilek začala do své produkce zařazovat přeplňované modely a v dnešní době je turbodmychadlo již naprosto běžnou záležitostí.

Princip této technologie spočívá ve využívání energie horkých spalin proudících z motoru výfukovým potrubím. Tato energie by jinak zůstala nevyužitá, avšak díky vhodnému turbodmychadlu a vhodně navržené plnicí soustavě jí jsme schopni využít a tím pádem i zvýšit účinnost celého oběhu. Samotné turbodmychadlo se skládá ze dvou základních částí, které jsou pevně spojeny hřídelí. Jednou částí je turbína, kterou roztáčí zmíněné horké výfukové plyny a druhou částí je kompresor, který stlačuje vzduch vstupující do motoru. Výsledkem je nárůst celkové účinnosti. Celý tento proces probíhá za velmi vysokých teplot a otáček turbodmychadla, které se pohybují až kolem hodnoty 300 000 otáček za minutu u nejmenších typů turbodmychadel s průměrem oběžného kola okolo 35mm. Je tedy evidentní, že při výrobě jsou kladeny velké nároky na přesné zpracování a velmi kvalitní materiály. [2]



Obr. 1 Popis jednotlivých částí turbodmychadla. [4]



Obr. 2 Schéma zapojení turbodmychadla v oběhu spalovacího motoru. [4]

5.2 Kompresory

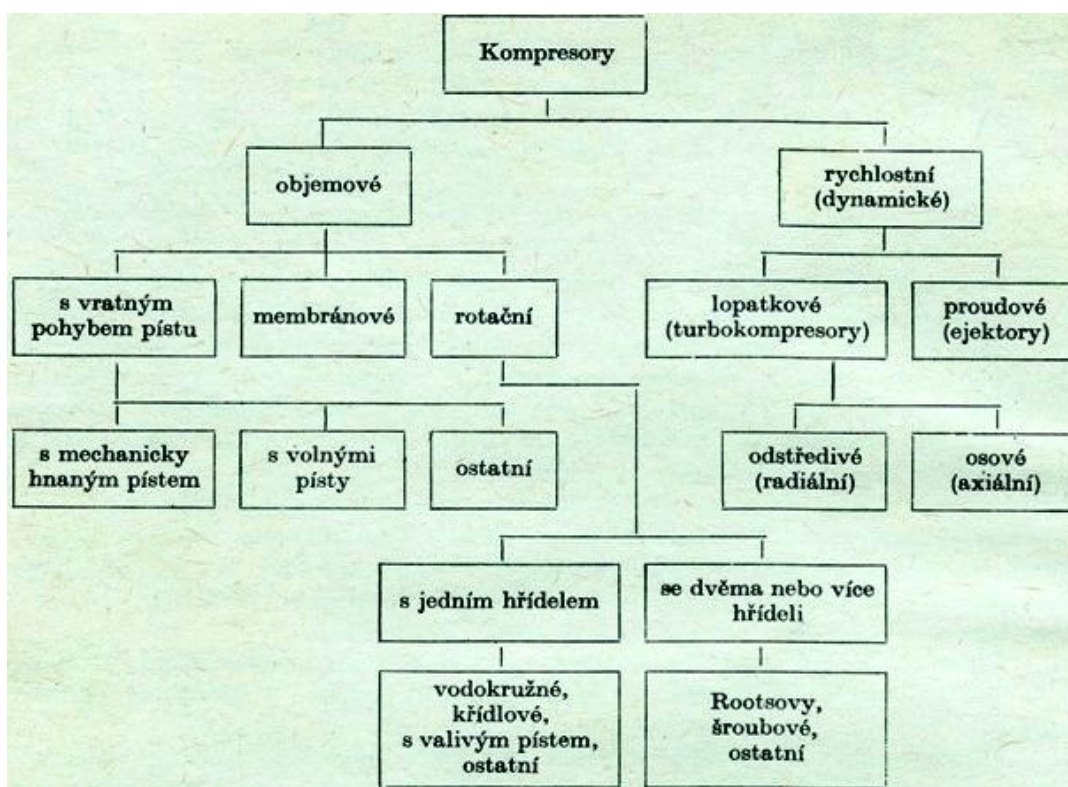
Na rozdíl od turbodmychadel, která byla vynalezena až s příchodem spalovacího motoru, sahá historie stavby kompresorů mnohem hlouběji. První lidské snahy o stlačení vzduchu se podle archeologických nálezů projeví pravděpodobně již zhruba 3000 let před naším letopočtem, kdy staří Babyloňané využívali primitivních měchových dmychadel k výrobě bronzových nástrojů. V antickém Řecku byla dmychadla využívána pro ozvučení píšťal či pro dodávku vzduchu potápěčům. Postupem času začala přicházet sofistikovanější a účinnější řešení. Již v prvním století našeho letopočtu bylo používáno dmychadlo s válcovým měchem a rozvodnými klapkami. Konstrukcí dmychadel se zabýval také Leonardo da Vinci. Obrovský rozmach dmychadel a kompresorů pak přišel díky průmyslové revoluci, kde bylo v oblasti hutnictví potřeba pracovat se stlačeným vzduchem. Tyto kompresory byly zpočátku poháněny vodními koly, od roku 1777 byly spřaženy s parními stroji. Dnes nejpoužívanější dmychadlo (Rootsovo dvoupístové) vymyslel v roce 1700 Němec Pappenheim a jeho myšlenku pak v roce 1867 zdokonalili bratři Rootsové. Tehdy sloužilo k ventilaci a odvětrávání důlních šachet.

Z výše uvedeného je zřejmé, že během historie byly kompresory vymyšleny a využívány z mnoha rozdílných důvodů. Sloužit ke zvyšování výkonu pístových spalovacích motorů začaly ale až s příchodem letectví, a to zejména během obou světových válek. Ve vysokých nadmořských výškách totiž kvůli řídkému vzduchu ztrácely motory výkon. Tento

problém se začal řešit aplikací dmychadel, které řídký vzduch stlačily. Výkon motorů tedy ve vysokých nadmořských výškách neklesal a zvýšil se i jejich dostup. [7][9]

5.3 Druhy kompresorů

Základní dělení kompresorů je podle způsobu stlačování vzduchu na kompresory objemové (také aerostatické) a kompresory rychlostní (též aerodynamické). Objemové kompresory fungují na principu nasátí vzduchu do prostoru, který je poté uzavřen. Zmenšováním objemu pak dochází ke stlačení. Naproti tomu rychlostní kompresory využívají kinetické energie urychleného vzduchu, která je v difuzoru transformována na tlakovou energii. Objemové i rychlostní kompresory se pak dále dělí ještě podrobněji podle jejich konstrukce a principu, jak je patrné z obrázku č. 3.



Obr. 3 Rozdělení kompresorů [7]

Dále je třeba rozlišovat názvosloví na základě tlaku :

- Vývěva** - vzduch je nasáván při tlaku nižším než je tlak atmosférický a stlačován na atmosférický tlak
- Dmychadlo** - Vzduch o atmosférickém tlaku je stlačován na přetlak do 200 kPa
- Kompresor** - Plyn je stlačován na přetlak vyšší než 200 kPa
- Booster** - Někdy nazývaný jako dotlačovací, slouží jako pomocný kompresor při příliš vysokých tlakových poměrech. [9]

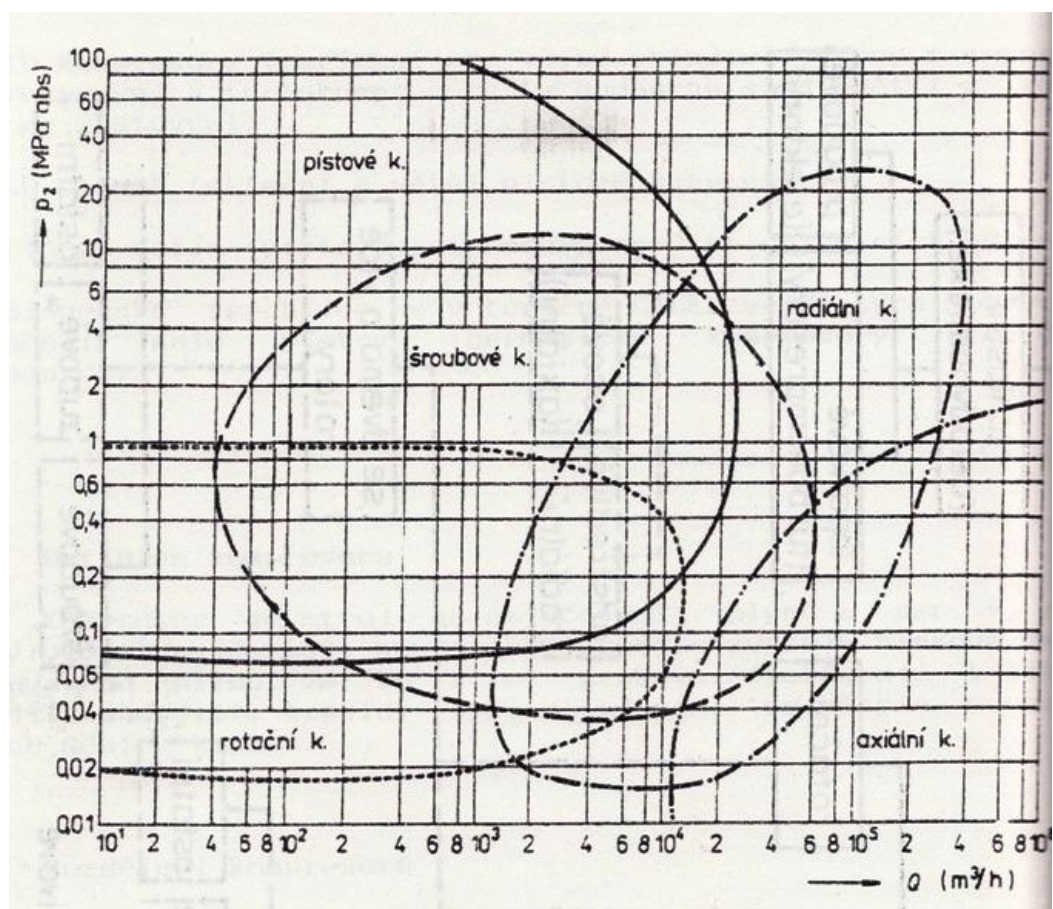
Při konstrukci je třeba také rozlišovat, k jakým účelům má kompresor sloužit. Podle stlačovaného média totiž dělíme kompresory na vzduchové, plynové a speciální, kdy na vzduchové není kladen oproti plynovým tak velký důraz na těsnost. Proti vzduchovým jsou plynové kompresory plynotěsné. Speciální kompresory slouží ke stlačování výbušných, jedovatých či jinak nebezpečných plynů. Znalost stlačovaného média je pak klíčovým faktorem při volbě konstrukce kompresoru, maziva či chlazení. [7]

Pokud se stlačení plynu ze sacího tlaku na tlak konečný uskuteční při jediné operaci, pak takové kompresory nazýváme kompresory jednostupňovými. Toto stlačování na jednu operaci však často není kvůli vysokému tlakovému poměru možné. Proto se přistupuje k několikanásobnému stlačování. Plyn musí být po ukončení jednoho stupně stlačování a před začátkem dalšího stupně stlačování ochlazen. Podle počtu stlačování pak rozlišujeme dvoustupňové, třístupňové a vícestupňové kompresory. Počet stupňů může být například u turbokompresorů, které patří mezi rychlostní kompresory, až kolem dvaceti.

Kompresory také dělíme podle výtlačného tlaku na :

- Nízkotlaké** - Výtlačný tlak je menší než 2,5 MPa
- Středotlaké** - Výtlačný tlak leží mezi hodnotami 2,5 až 10 MPa
- Vysokotlaké** - Výtlačný tlak je 10 až 250 MPa

Ze všech výše jmenovaných kompresorů se spousta používá pouze v průmyslu či v jiných odvětvích, ale v automobilech jsou naprosto nepoužitelné. Jejich princip je tak naprosto zbytečné v této práci popisovat hlouběji. Rád bych se tedy dále zaměřil na větev kompresorů objemových, konkrétně na skupinu rotačních kompresorů. Mezi ně patří kompresory křídlové, s kroužícím pístem, vodokružné, dvoupístové a šroubové. Poslední dva jsou typy nejčastěji používané v automobilech a jsou zároveň zařazeny v portfoliu společnosti Eaton. [7]

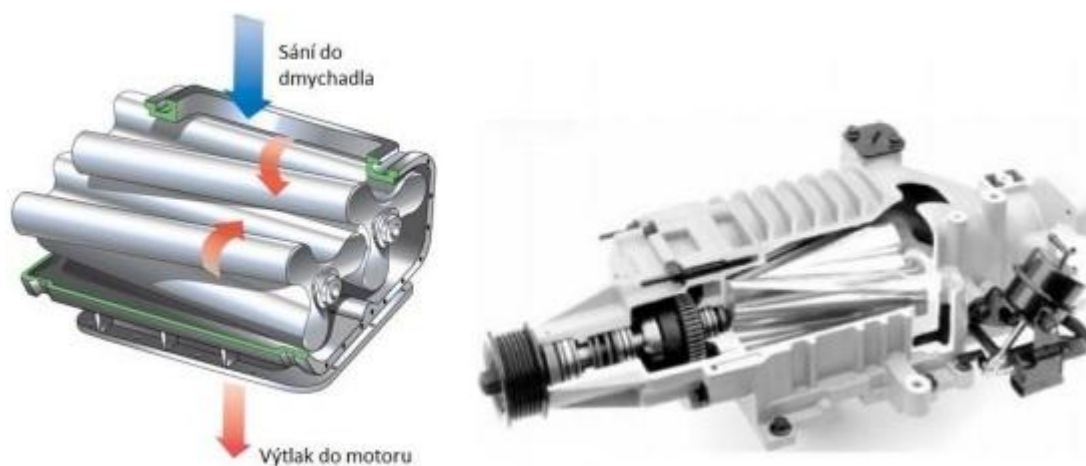


Obr. 4 Pracovní oblasti hlavních druhů plynových kompresorů. [9]

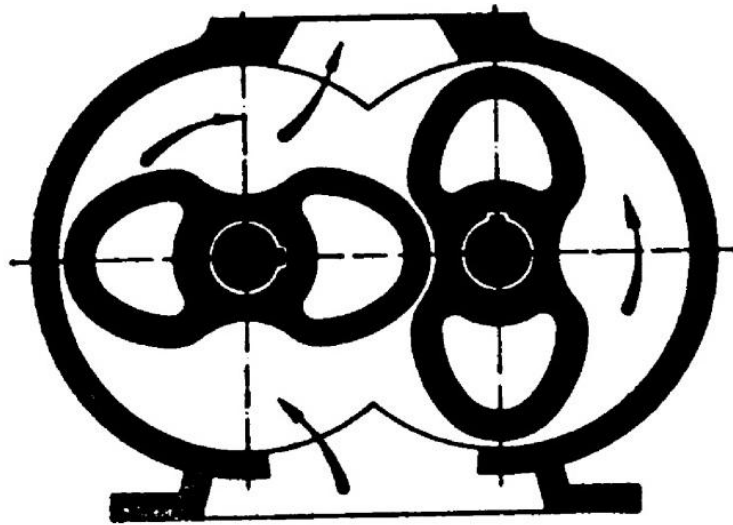
5.3.1 Dvoupístový Rootsův kompresor

Rootsův kompresor je v dnešní době nejpoužívanějším typem dmyhadla v automobilové výrobě, a to zejména kvůli jeho jednoduchosti a nízkým výrobním nákladům. Převážná část tohoto typu dmyhadel pracuje s vnější kompresí. Vnější komprese znamená, že ke stlačení plynu nedochází uvnitř kompresoru, ale až při vytlačení plynu, kdy se pracovní komůrka spojí s výtlakem a odtud uvolněný plyn je komprimován plynem, který byl vytlačen již dříve. Díky tomu vznikají rázy a vzniklá komprese je tedy rázová.

Kompresor má dva stejné, rovnoběžně uložené rotory, které jsou opatřeny dvěma, třemi, nebo více zuby s průřezem ve tvaru piškotu. Rotory jsou navzájem spřaženy párem stejných synchronizačních ozubených kol, takže mají vůči sobě opačný smysl otáčení. Ke kontaktu pístů či k jejich odvalování ale díky synchronizačním ozubeným kolům vůbec nedochází, což znamená, že mohou pracovat bez mazání. Mezi rotory je vždy malá vůle. Sací a výtlakové hrdlo jsou zaústěny do válce mezi oběma osami rotorů s osou kolmou k jejich rovině. Vůle sice znamená menší těsnost a účinnost, ale také možnost pracovat s mírně znečištěnými plyny. Pro zvýšení těsnosti a životnosti bývá zvykem na povrch aplikovat tenkou vrstvu laku či plastu. [6][7][9]



Obr. 5 Schéma Rootsova dmyhadla. [4]

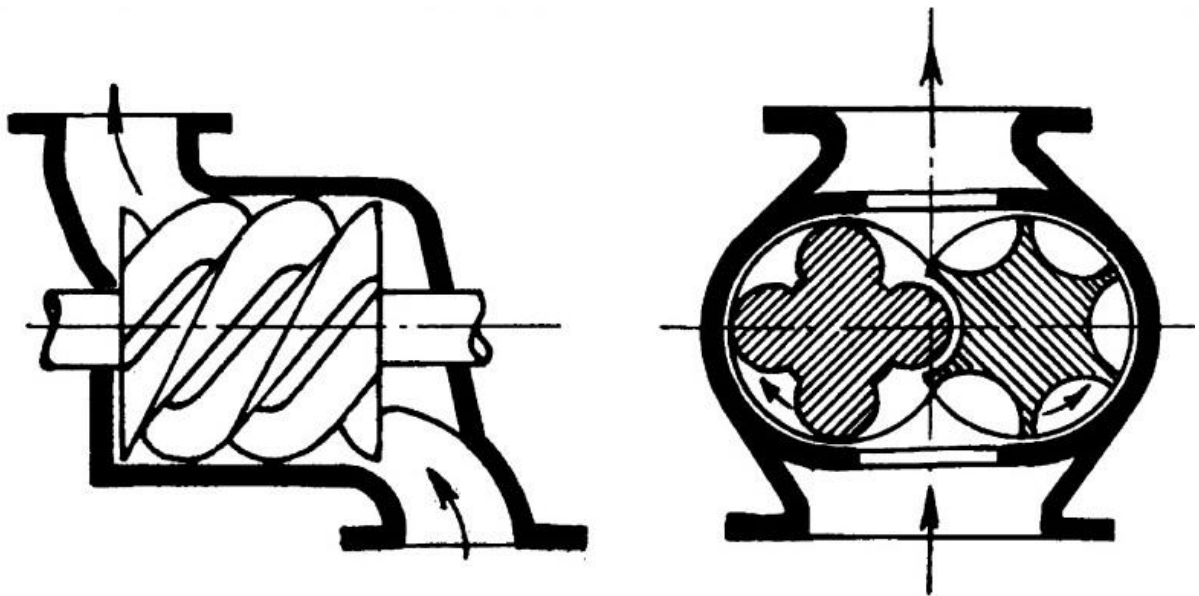


Obr. 6 Příčný řez Rootsovým dmychadlem. [7]

5.3.2 Šroubové kompresory

Šroubové kompresory jsou svým tvarem a uspořádáním podobné kompresorům dvoupístovým, ale mají vestavěný kompresní poměr. Jejich konstrukce je více sofistikovaná a jsou účinnější. Vynálezcem tohoto typu kompresorů je Švéd Alf Lysholm, proto se lze setkat i s pojmem Lysholmovo dmychadlo. Předností tohoto typu kompresorů je zejména to, že slučuje mnoho výhod ostatních typů kompresorů a má jen málo jejich nevýhod. Tyto kompresory mají malé rozměry i hmotnost, proto jsou poměrně nenáročné na montáž a montážní základy. Jejich výroba je ale kvůli složitějším tvarům náročnější a dražší.

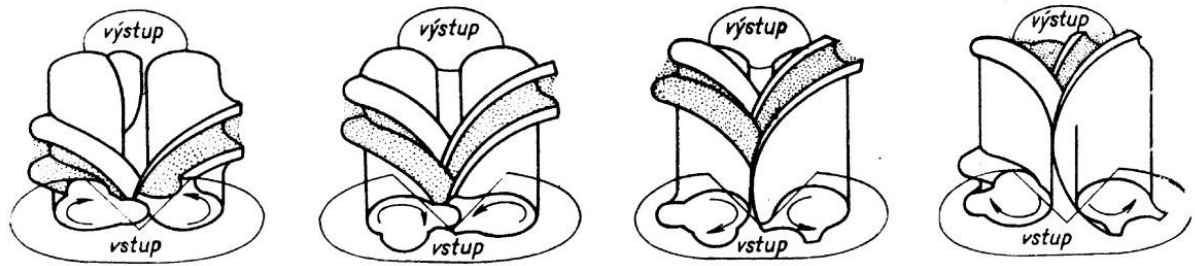
Stejně jako u dvoupístových kompresorů jsou i zde dva rovnoběžné rotory, které jsou vytvořeny jako šroubová tělesa s velkým stoupáním. Každý rotor má však jiný profil a počet zubů. Stlačení plynu se u šroubových kompresorů dosahuje zmenšováním objemu párových komůrek mezi zuby obou rotorů. Hlavní rotor se třemi až čtyřmi zuby je prostřednictvím své hřídele přímo napojen na motor. Připojen je často přes nějaký převod, aby mohl dosáhnout až 30 000 otáček za minutu. S druhým rotorem, který má čtyři až šest vybrání, je spojen přes synchronizační soukolí, které přenáší jen 5 až 10 % z příkonu kompresoru.



Obr. 7 Schéma řezů šroubovým kompresorem. [7]

Pracovní cyklus šroubového kompresoru lze rozdělit do těchto fází :

- 1. Sání** Na straně sacího otvoru se zuby rozbíhají od sebe a do vzniklé mezizubové mezery vniká plyn. S postupujícím otáčením rotorů se prostor zvětšuje až do chvíle, než u čelní stěny s výtlačným otvorem vyjdou zuby ze záběru.
- 2. Dopravování** Když mezizubová mezera přejede přes sací otvor, přeruší se spojení se sacím hrdlem a plyn, který je v mezeře pokračuje beze změny tlaku na stranu výtlačného otvoru.
- 3. Stlačování** U čelní stěny sacího otvoru začne do prostoru mezi zuby vnikat zub druhého rotoru. Toto vnikání způsobí růst tlaku plynu a postupuje dále k druhé čelní stěně.
- 4. Vytlačování** Natočení mezizubové mezery rotoru před výtlačný otvor způsobí vytlačení dopravovaného plynu do výtlačného hrdla. Dojde k vytlačení prakticky veškerého plynu, protože objem škodlivého prostoru tvoří necelé 1 % z teoreticky nasátého objemu. Expanze plynu ze škodlivého prostoru bývá zanedbatelná. [6][7][9]



Obr. 8 Pracovní cyklus šroubového kompresoru. [7]

5.3.3 Vliv tlaku ve výtlačném potrubí na funkci dmyhadla

Tlak ve výtlačném potrubí kompresoru má vliv na příkon samotného kompresoru. Pokud je ve výtlačném potrubí nižší tlak než jakému odpovídá stlačení uvnitř šroubového kompresoru, pak se potřebný příkon kompresoru sníží. Pokud je naopak tlak ve výtlačném potrubí vyšší než tlak odpovídající stlačení, pak je potřebný vyšší příkon. Pokud se tlak ve výtlačném potrubí rovná tlaku odpovídajícímu stlačení uvnitř kompresoru, tak se při výpočtu

příkonu vychází z rovnice $N_e = \frac{N_{ad}}{\eta_{cad}}$ [6]

kde

N_{ad} je adiabatický příkon

η_{cad} je celková adiabatická účinnost

6. Způsoby regulace kompresorů

Kompresory pracují s největší hospodárností tehdy, když jsou plně zatíženy. Z důvodu měnící se spotřeby stlačeného plynu v průběhu pracovního cyklu je nutné přizpůsobit vytlačované množství plynu množství odebíranému ve výtlaku. To je u šroubových kompresorů možno provést především následujícími způsoby. [6]

6.1 Regulace změnou otáček

Toto řešení se využívá zejména u kompresorů poháněných spalovacími motory, které jsou s motorem spojeny proměnným převodem. Výhodou tohoto řešení je jeho jednoduchost a plochost křivky adiabatické účinnosti v širokém rozmezí otáček. Regulovat se dá ale zhruba jen na 50% výkonu, neboť vlivem netěsností rotorů při nižších otáčkách značně stoupá výtlačná teplota plynu. Další nevýhodou bývá zpravidla nízká mechanická účinnost převodovek umožňujících plynulou změnu převodového poměru. [6][7]

6.2 Regulace zastavováním a spouštěním

Tento způsob regulace se využívá u malých kompresorů poháněných elektromotory, které mají dlouhé intervaly stání. Kompresor se samočinně spouští a zastavuje tlakovým spínačem. Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost konstrukce s většími vůlemi. Velké vůle jsou potřeba kvůli rychlým změnám teplot součástí kompresoru, které vznikají při přerušovaném chodu. Výhodou tohoto řešení je jeho snadná realizace pomocí elektromagnetických spojek při použití kompresoru k přeplňování spalovacího motoru. Tento způsob regulace je z hlediska snižování příkonu nejefektivnější, neboť se rozpojením spojky naprosto přeruší přívod mechanické energie do kompresoru, který se tím stane nečinným. Toto řešení se využívá například u dvoustupňového přeplňování, kdy je kompresor v kombinaci s turbodmychadlem. Ve chvíli, kdy mají výfukové plyny již dostatečnou entalpii pro roztočení turbodmychadla na požadované otáčky, je kompresor odpojen, aby neodebíral točivý moment z klikového hřídele motoru. [6][7][9]

6.3 Regulace uzavíráním sání

Regulace uzavíráním sání, často také nazývaná jako volnoběh, nebo chod naprázdno, je dvoupolohová regulace využívaná u kompresorů středních výkonů. Výtlačné hrdlo se spojí s atmosférou nebo se sacím potrubím a zároveň se v sacím potrubí uzavře ventil. Ve výtlačku se automaticky uzavře zpětný ventil. Výtlačný tlak klesne na úroveň sacího tlaku. Ven se vytlačuje jen to, co proniká do sacího prostoru, kde vzniká podtlak. Dlouhodobá regulace tímto způsobem je nevhodná. [6][9]

6.4 Regulace obtokovým ventilem

Ke skříně rotorů je připojen obtokový ventil, který umožňuje spojit pracovní prostor se sáním. K vypuštění nasátého plynu dochází ještě před jeho stlačením a příkon kompresoru lze snížit až na 60% jeho původní hodnoty v režimech, kdy je účelné snížit plnicí tlak motoru. [6]

7. Volba typu dmyhadla

Pro simulaci jsem z portfolia společnosti Eaton zvolil dmyhadlo z řady TVS, konkrétně model VR250. Řada TVS je velmi populární u výrobců sportovních vozů. Výhodou těchto dmyhadel oproti široce rozšířeným turbodmyhadlům je zejména okamžitá odezva na sešlápnutí pedálu akcelérátoru, což je pro sportovně zaměřené vozy důležitá vlastnost. Dmyhadlo z této řady využil mimo jiné i Chevrolet ve svém nejvýkonnějším sportovním modelu Corvette Z06. Eaton TVS VR250 je dvoupístové Rootsovo dmyhadlo schopné dosáhnout až 18 000 otáček za minutu, takže pro jeho plné využití po připojení na klikovou hřídel bude potřeba aplikovat mechanický převod. Pro lepší regulaci lze dmyhadlo případně spojit s vícestupňovou převodovkou.

Důvodem pro volbu tohoto dmyhadla byla zejména nižší pořizovací cena v porovnání se šroubovým dmyhadlem. Jednodušší konstrukce oproti šroubovému dmyhadlu by také mohla být výhodou ve smyslu případné snadnější opravitelnosti dmyhadla. Závodní nasazení totiž vytváří vysoké nároky na techniku a zvyšuje riziko poruchy. Díky moderní konstrukci s

teflonem potahovanými rotory má také nižší ztráty netěsnostmi než běžná dmychadla bez povrchové úpravy rotorů. Dle informací výrobce tato dmychadla dosahují isoentropické účinnosti přesahující 70%. Model VR250 disponuje regulací obtokem, což může u zážehového motoru být výhodou z důvodu omezení rizika klepání motoru po aplikaci dmychadla. Tyto výhody kompenzují nižší účinnost a více pulzující dodávku vzduchu oproti šroubovému dmychadlu.

8. Spalovací motor Yamaha YZF-R6

Pohonnou jednotkou monopostu CTU CarTech je kapalinou chlazený čtyřdobý řadový čtyřválec s 16 ventily a rozvody DOHC. Jedná se o motor, který Yamaha použila ve svém modelu YZF-R6 z roku 2007. Základní parametry této jednotky naladěné podle pravidel SAE jsou shrnuty v tabulce č.1. Motor je navíc jak předepisují pravidla soutěže Formula SAE osazen restriktorem na sání s průměrem 20 mm.

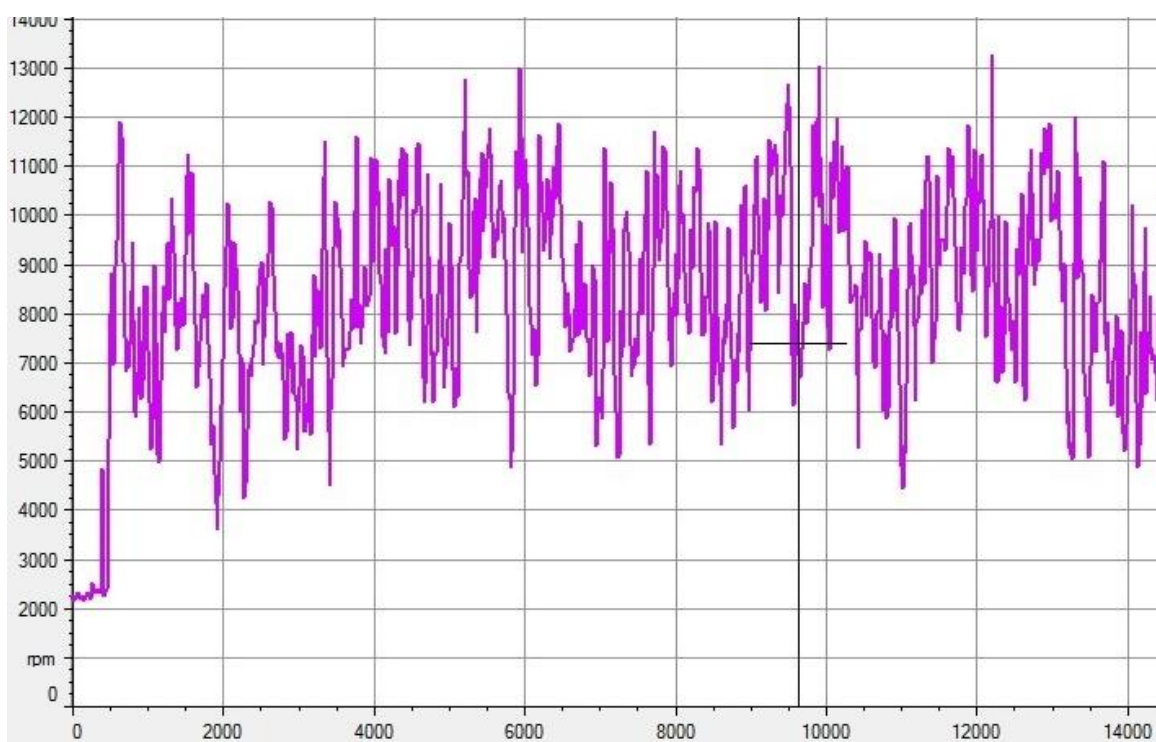
Zdvihový objem	599 ccm
Kompresní poměr	12,8:1
Vrtání	67 mm
Zdvih	43 mm
Maximální výkon	64 kW při 10 400 ot/min
Maximální točivý moment	60 Nm při 8 700 ot/min

Tabulka č.1 - Parametry motoru Yamaha YZF-R6

9. Analýza dat z telemetrie

Pro simulace jsem zvolil pracovní bod motoru, pro který jsem aplikoval dmychadlo a model motoru dále optimalizoval. Ve voze je z důvodu analýzy nejrůznějších dat zabudován datalogger, který v průběhu závodů zaznamenává hodnoty z jednotlivých čidel. Tato data se pak dále používají při optimalizaci nastavení vozu v průběhu sezony a při vývoji nových generací vozu.

Pro vyhodnocení zatížení motoru během závodu jsem použil data z roku 2014. Konkrétně se jednalo o vytrvalostní závod na 22km na okruhu v České Republice. Data jsem vyhodnocoval v programu Race Studio 2. Na obrázku níže je graf, ze kterého jsem zjistil, že motor je nejčastěji v hladině kolem 9000 otáček za minutu. Proto jsem jako pracovní bod pro simulaci v programu GT Power vybral právě hodnotu 9000 otáček. Protože jsem použil data z telemetrie a nikoliv data naměřená na motoru na brzdovém stanovišti, neměl jsem k dispozici pro dané otáčky střední indikovaný tlak ani hodnotu momentu motoru. Pro získání těchto dat jsem nejprve prováděl simulaci v původní konfiguraci motoru, tedy bez připojeného kompresoru. Výsledky této simulace byly výchozím bodem pro porovnání a zhodnocení přínosu aplikace dmyhadla.

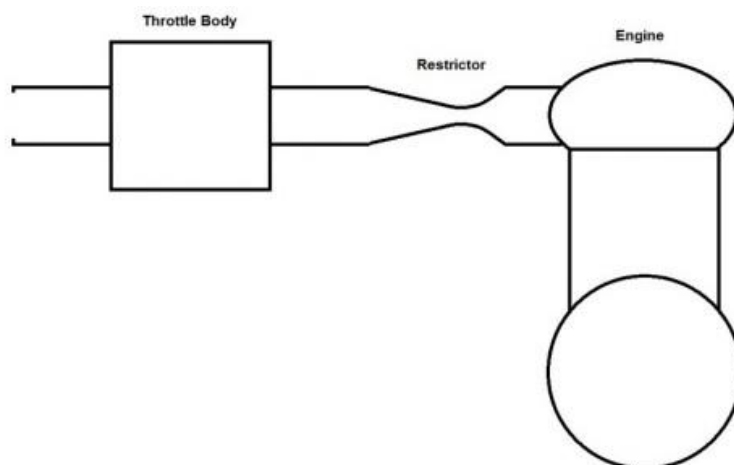


Obr. 9 Vyobrazení otáček motoru v průběhu závodu.

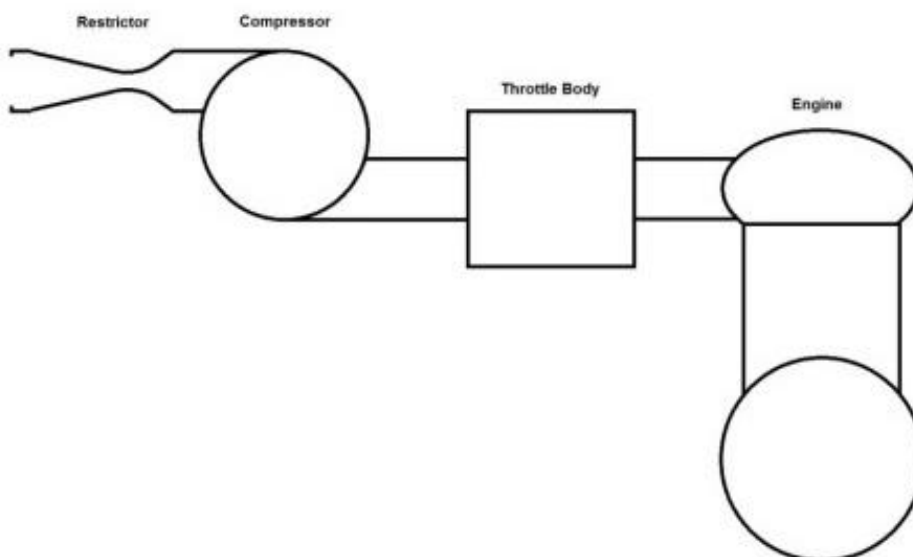
10. Model v prostředí GT-Power

Od kolegů z týmu, kterým bych tímto rád poděkoval, jsem obdržel aktuální model motoru, který slouží pro různé simulace při optimalizaci sacího a výfukového traktu. Model byl sice zkalibrovaný, ale pro simulaci stavu s připojeným dmyhadlem jsem musel předělat sací schéma, neboť aktuální pravidla soutěže nařizují při využití přeplňování odlišné uspořádání sání (viz *obr. 10 a 11*). Na *obrázku 12* je vyobrazeno původní schéma v programu GT-Power s atmosférickým plněním, na *obrázku 13* pak již přeuspořádaný model se

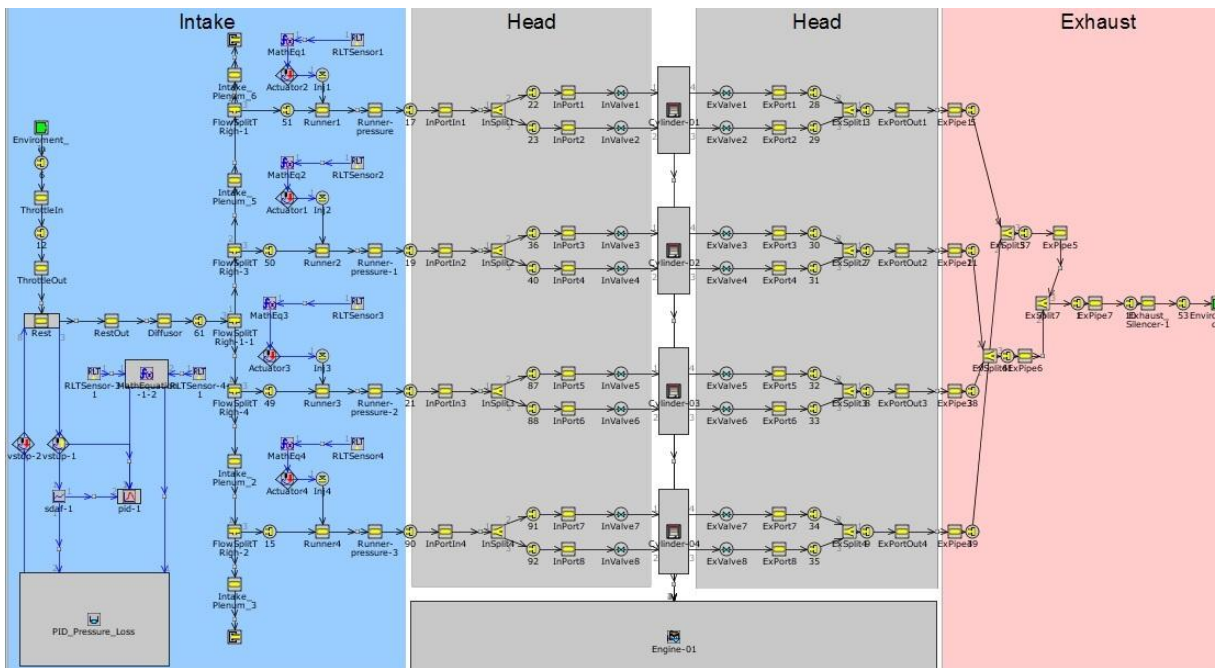
zapojeným dmychadlem. Tato práce mi posloužila k detailnímu seznámení se s modelem motoru.



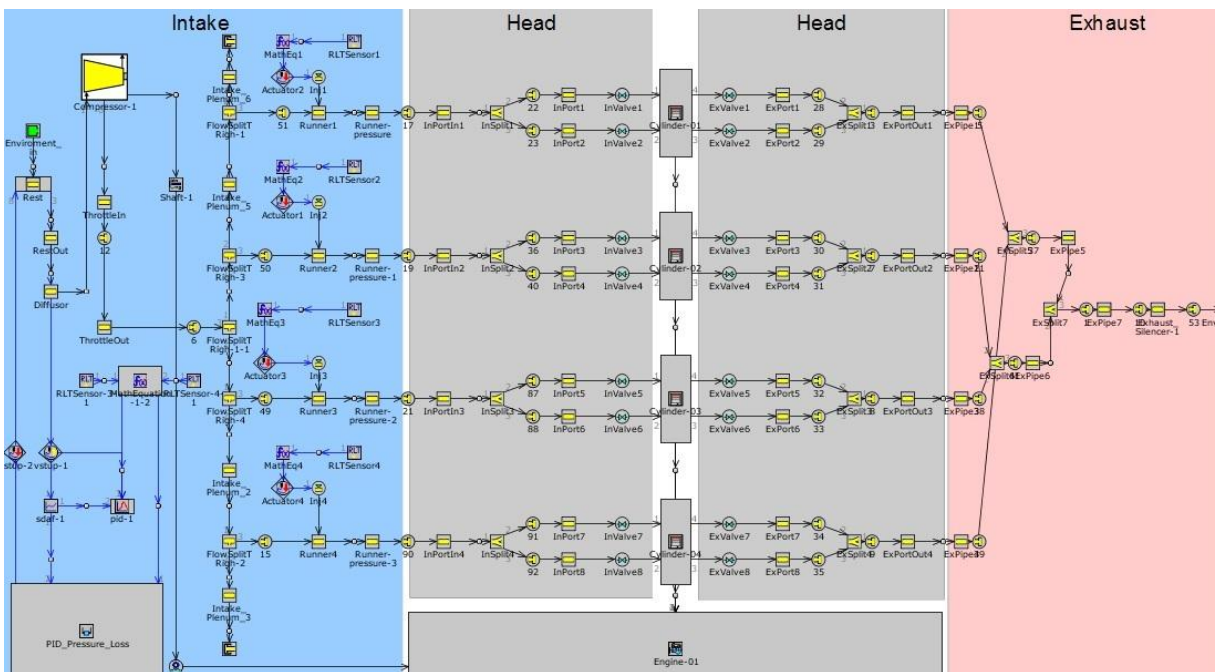
Obr. 10 Schéma sacího traktu při atmosférickém plnění. [12]



Obr. 11 Schéma sacího traktu při plnění dmychadlem. [12]



Obr. 12 Prostředí GT-Power - atmosféricky plněný motor.

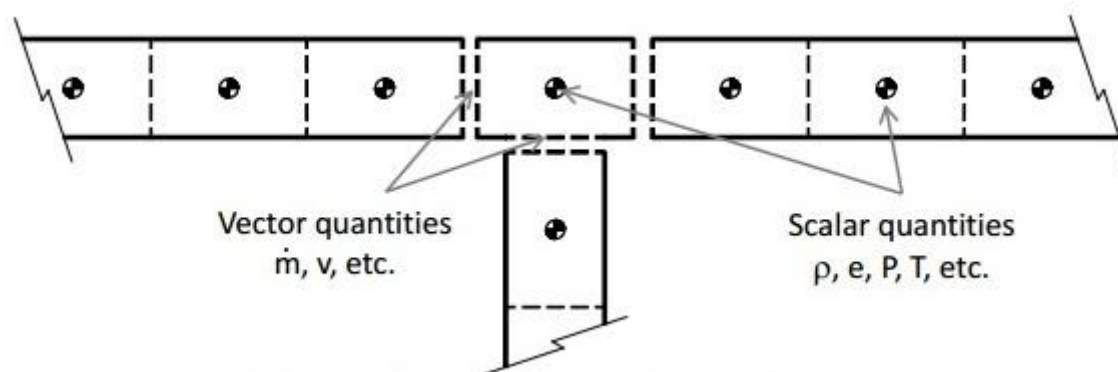


Obr. 13 Prostředí GT-Power - kompresorem přepřňovaný motor.

Princip simulace v prostředí GT POWER

Simulaci jsem prováděl v programu GT POWER v7.4 od společnosti Gamma Technologies. Tento software umožňuje vytvoření detailního modelu pístového spalovacího motoru, který věrně reprezentuje realitu. Vytvořený model umožňuje nasimulovat proudění plynů v motoru na základě Navier-Stokesových rovnic, konkrétně rovnic zákona zachování kontinuity, zákona zachování hybnosti a zákona zachování energie. Tyto rovnice jsou programem řešeny v jednodimenzionálním prostoru, což znamená, že všechny hodnoty jsou průměrem napříč směru proudění. Výsledek simulace lze ovlivnit metodou časové integrace, která může být buď explicitní, nebo implicitní. Primární proměnné v explicitní metodě jsou hmotnostní tok, hustota a vnitřní energie. Primární proměnné v metodě implicitní jsou pak hmotnostní tok, tlak a celková entalpie. [5]

Celý systém je rozdělen do mnoha menších objemů, které jsou spojeny hranicemi. Skalární proměnné jako tlak, teplota, hustota, vnitřní energie, entalpie, látková koncentrace a další, jsou jednotné v každém tomto malém objemu. Naproti tomu vektorové proměnné (hmotnostní tok, rychlost, atd.) jsou počítány pro každý objem a jeho hranici zvlášť, viz obrázek :



Obr. 14 Rozdělení veličin. [5]

Níže jsou rovnice, které program GT-SUITE řeší ve výpočtech. [5]

Zákon zachování kontinuity :

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}$$

Zákon zachování energie :

$$\frac{d(me)}{dt} = -p \frac{dV}{dt} + \sum(\dot{m}H) - hA_s(T_{tekutiny} - T_{stěny})$$

Zákon zachování entalpie :

$$\frac{d(\rho HV)}{dt} = -\sum(\dot{m}H) + V \frac{dp}{dt} - hA_s(T_{tekutiny} - T_{stěny})$$

kde:

\dot{m}	hmotnostní tok
m	hmotnost objemu
V	objem
p	tlak
ρ	hustota
A	plocha proudění v průřezu
A_s	plocha teplosměnného povrchu
e	celková vnitřní energie (vnitřní + kinetická)vztažená na jednotku hmotnosti
H	celková entalpie
h	koeficient přestupu tepla
$T_{tekutiny}$	teplota tekutiny
$T_{stěny}$	teplota stěny
u	rychlost na hranici
C_f	koeficient třecích ztrát
C_p	koeficient tlakových ztrát
D	ekvivalentní průměr
dx	diskretizační délka
dp	tlakový rozdíl po délce dx

11. Výsledky simulace

11.1 Atmosférické plnění

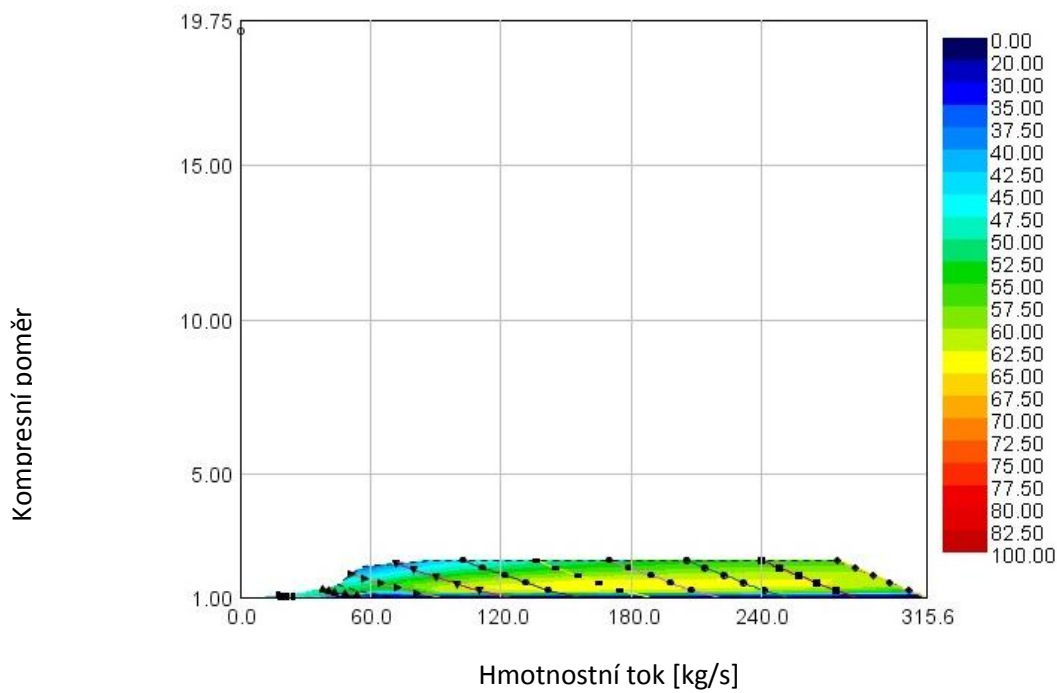
Simulaci pro atmosférické plnění jsem prováděl pro jeden ustálený stav v 9000 otáčkách za minutu. Výsledný výkon je necelých 55 kW a točivý moment necelých 59 Nm (viz obrázek 15)

Attribute Value	Unit	9000 Case# 1
Favorites		
Engine Speed (cycle average)	RPM	8895.0
Brake Torque	N-m	58.9666
Brake Power (kW)	kW	54.9264
BSFC - Brake Specific Fuel Consumption, Cyl	g/kW-h	283.069
IMEP720 - Net Indicated Mean Effective Pressure	bar	14.6028
BMEP - Brake Mean Effective Pressure	bar	12.3631
PMEP - Pumping Mean Effective Pressure	bar	-0.370071
FMEP - Friction Mean Effective Pressure	bar	2.2396
Volumetric Efficiency, Air	fraction	1.06779
Air Flow Rate	kg/h	197.911
EGR Percentage (normalized by Air +Burned Gas)	%	0.0
Air-Fuel Ratio (Inducted Air/Total Fuel)		12.7291

Obr. 15 Výsledné hodnoty pro atmosférické plnění

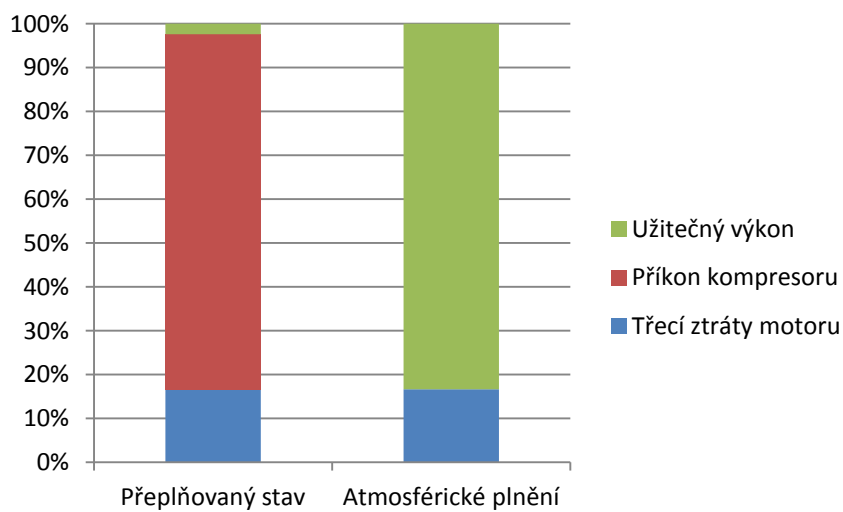
11.2 Přeplňování kompresorem

Pro nasimulování stavu s připojeným kompresorem jsem si zvolil případ, kdy převodový poměr mezi klikou a dmychadlem byl roven 1, tedy dmychadlo mělo stejný počet otáček za minutu jako motor, tj. 9000 ot/min. Zároveň jsem počítal s koeficientem hmotnostního průtoku vzduchu, který odpovídal reálné velikosti dmychadla. Hltnost motoru je zhruba 10x nižší než hmotnostní průtok dmychadla. Dmychadlo nemá vestavěný kompresní poměr. V důsledku těchto faktorů se vzduch na výstupu dmychadla hromadí a roste jeho tlak a teplota. Na obrázku 16 je zobrazen pracovní diagram kompresoru, přičemž hltnost motoru v pracovním bodě je zhruba 0,5 kg/s. Je tedy patrné, že se dmychadlo nenachází v optimálním pracovním rozmezí.



Obr. 16 Pracovní diagram kompresoru

Z uvedených výsledků je patrné, že aplikace kompresoru je velice nevýhodná. Užitečný výkon se snížil na zlomek své původní hodnoty. Zbylý výkon spotřebuje dmychadlo. S rostoucími otáčkami sice příkon dmychadla klesá, ale neklesne natolik, aby přinášelo motoru přidanou hodnotu. V takovém případě nemá aplikace dmychadla žádný smysl.



Obr. 17 Složení indikovaného výkonu pro oba stavy simulace

12. Závěr

Provedl jsem rešerši stavu přeplňování pístových spalovacích motorů. Zaměřil jsem se zejména na konstrukci a princip mechanicky hnaných dmychadel, ale zároveň jsem tento druh přeplňování porovnal s dnes mnohem rozšířenější metodou přeplňování turbodmychadlem. Fakt, že se oba tyto druhy přeplňování hojně využívají a využívají v motorsportu jen potvrzuje, že má smysl se zabývat přeplňováním i ve studentské formuli. Tato práce mi tedy pomohla porozumět problematice přeplňování. Poznal jsem jednotlivé druhy kompresorů a pochopil princip jejich práce. Tyto znalosti zcela jistě využiji během navazujícího magisterského studia.

Detailně jsem se seznámil se simulačním prostředím programu GT-Power a s poskytnutým modelem motoru. Naučil jsem se ovládat základní funkce a upravil modelu motoru tak, aby bylo možné připojit dmychadlo. Naučil jsem se také zpracovávat různá výstupní data ze simulací.

Po seznámení se s prostředím programu GT-Power jsem provedl několik simulací s různými převodovými poměry mezi klikou motoru a dmychadlem a s různými velikostmi dmychadla, jehož charakteristiku jsem z hlediska průtoku zmenšoval. Tyto simulace dopadly podle očekávání. Simulace probíhala v ustáleném stavu, tedy při konstantních otáčkách a zatížení motoru. V tomto režimu je použití kompresoru energeticky nevýhodné. Výkon motoru využitelný pro pohon kol je v tomto případě příliš nízký, většina se využije na stlačení plnicího vzduchu kompresorem. V případě ustáleného stavu nemůže mechanicky hnaný kompresor konkurovat turbodmychadlům. Přednosti kompresoru se projeví zejména v přechodovém režimu motoru, tedy při akceleraci. Zde by měly být výsledky podstatně příznivější. Touto prací jsem tedy mimo jiné vytvořil základy pro svou další práci, na které bych rád pokračoval v průběhu navazujícího magisterského studia. Výsledky bych pak rád shrnul ve své diplomové práci.

Úkolem bylo také zvolit vhodnou velikost dmychadla. Ze simulace vyplynulo, že daný model není pro použití na takto malém motoru zcela optimální. Má příliš vysoký hmotnostní průtok ve srovnání s motorem osazeném restriktorem. Přeplňování Rootsovým dmychadlem se využívá zejména u motorů větších zdvihových objemů a rozměrů, aplikace na motor těchto parametrů není běžná. V teoretické rovině jsme schopni najít optimální velikost dmychadla, ta by podle měření měla mít zhruba 10x menší hmotnostní průtok vzduchu než testované dmychadlo. V praxi je ale tento problém složitější, protože VR250 je nejmenším vyráběným dmychadlem na trhu. To je dáno jednak tím, že se tak malá dmychadla nevyžívají a zejména

tím, že dmychadlo nemůže být o mnoho menší z konstrukčních důvodů. Nezbytné synchronizační soukolí totiž zvětšuje minimální možnou velikost dmychadla a není možné ho z konstrukce vyloučit.

Vzhledem k tomu, že se menší dmychadlo Rootsova typu nevyrobí, bude třeba se rozhlédnout po jiném typu dmychadla.

13. Náměty pro další práci

Toto časově i obsahově náročné téma skýtá mnoho možností pro další rozpracování. Ve své budoucí práci bych rád provedl simulaci s tímto typem dmychadla v přechodovém režimu. V tomto případě by mi jako podklad pro simulaci také výborně posloužila data z telemetrie, tentokrát ovšem z jiné disciplíny. Jako vhodná disciplína se jeví měřené zrychlení na trati dlouhé 75 metrů. Křivka otáček motoru během tohoto sprintu by byla výborným podkladem pro simulaci přechodového stavu.

Dále je potřeba v budoucnu znovu zanalyzovat trh kvůli případným novým modelům dmychadel, které by byly menší a pro tuto aplikaci vhodnější. Zabývat se teoretickým zmenšováním dmychadla ve virtuálním prostředí hlubší smysl nemá. Je potřeba vycházet z vyráběných velikostí dmychadel.

Velmi důležité by také bylo vyřešit otázku převodu a regulace dmychadla. Přinejmenším by bylo vhodné nalézt ideální stálý převodový poměr dmychadla, případně se zabývat rovnou převodem proměnným. Následně pak vybrat vhodný způsob regulace a aplikovat jej.

Námětem na úplně nové pojetí celé práce by byla volba jiného typu dmychadla. Nabízí se například odstředivé dmychadlo, které by na tomto typu motoru mohlo dosahovat zajímavých výsledků. Odstředivý kompresor na svém modelu Ninja H2R použila letos poprvé firma Kawasaki. Tento model má čtyřválcový motor o zdvihovém objemu 1000 ccm. Tento motor je tedy velikostně a částečně i objemově podobný tomu od Yamahy.

Při reálném použití dmychadla bude také potřeba upravit sací potrubí. To je nyní optimalizováno pro atmosférické plnění. V případě aplikace dmychadla by bylo potřeba

geometrii potrubí uzpůsobit většímu hmotnostnímu toku vzduchu. Návrh takového sacího potrubí by mohl být v budoucnu zpracován například jako bakalářská práce.

Nakonec je nesmírně důležité zvážit riziko klepání. Jelikož tento jev může přepřehované motory díky vyšším spalovacím tlakům provázet, tak je nezbytně nutné před případnou aplikací kompresoru na motor toto pečlivě zvážit a spočítat. Pokud by ke klepání došlo, může to mít pro motor destruktivní následky.

Všechny simulace jak z této práce, tak z prací případně z této vzešlých, by bylo vhodné před konečným použitím v závodech pečlivě odzkoušet na motorovém brzdovém stanovišti, kde by se potvrdil reálný dopad na pohonnou jednotku.

14. Seznam použité literatury

- [1] ATTARD William, Harry C. WATSON, Steven KONIDARIS et al. *Comparing the Performance and Limitations of a Downsized Formula SAE Engine in Normally Aspirated, Supercharged and Turbocharged Modes*. San Antonio, Texas: SAE International, 2006, 22s. ISSN 0148-7191
- [2] BARKER, John. *Kult TURBO. EVO*. 2011, roč. 2, č. 018, s. 45-49.
- [3] BARTONÍČEK, Ladislav. *Přepřínování pístových spalovacích motorů*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2004, 77 s. ISBN 80-7083-800-0.
- [4] BLAHA, Adam. *Moderní metody přepřínování spalovacích motorů*. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně 2012. Bakalářská práce, Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav energetiky.
- [5] GAMMA TECHNOLOGIES. *GT SUITE Flow Theory manual*. [součást počítačového programu]. Version 7.4, 2013
- [6] CHLUMSKÝ, Vladimír. *Rotační kompresory a vývěvy*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1966, 130 s.
- [7] CHLUMSKÝ, Vladimír, Antonín LIŠKA. *Kompresory*. 2. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1982, 195 s.
- [8] KAMINSKÝ, Jaroslav, Kamil KOLARČÍK a Oto PUMPRLA. *Kompresory*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004, 122 s. ISBN 80-248-0704-1.
- [9] LIŠKA, Antonín a Pavel NOVÁK. *Kompresory*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994, 227 s. ISBN 80-01-01145-3.
- [10] MACEK, Jan a Vladimír KLIMENT. *Spalovací turbíny, turbodmychadla a ventilátory: přepřínování spalovacích motorů*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1988, 206 s. ISBN 80-01-02275-7.
- [11] MRE-BOOKS. *History of Turbocharging and Supercharging*. [online]. [vid. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.mre-books.com/turbo/history.html>
- [12] SAE INTERNATIONAL. *2015 Formula SAE Rules - 09/17/2014 Revision*. [online]. [vid. 2015-05-20]. Dostupné z: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf

[13] TURBO TECHNIK. *History of the exhaust gas driven turbocharger*. [online]. [vid. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://en.turbolader.net/Technology/History.aspx>