

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Dopravní a manipulační technika

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Možnosti ovlivňování charakteristiky spalovacího motoru úpravami  
sacího systému

Autor: **Michael CHARYPAR**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Ladislav NĚMEC, CSc.**

Akademický rok 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michael CHARYPAR**  
Osobní číslo: **S14B0021P**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**  
Název tématu: **Možnosti ovlivňování charakteristiky spalovacího motoru úpravami sacího systému**  
Zadávací 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 základní analýzu spalovacího procesu v zážehovém motoru, zhodnoťte účinnost způsobů přípravy směsi a plnění válce. Dále proveďte přehled způsobů přeplňování zážehových motorů a následně jejich vliv na výkonové parametry motorů. Zpracujte vyhodnocení procesu přeplňování s ohledem na současné trendy ve vývoji spalovacích motorů a prognózy směřování silniční dopravy.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Analýza spalovacího procesu v zážehovém motoru
2. Zvyšování výkonu úpravami sacího systému
3. Přeplňování a výkonová charakteristika motoru
4. Zhodnocení trendů ve vývoji vozidlového spalovacího motoru
5. Konstrukční řešení vybrané součásti

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

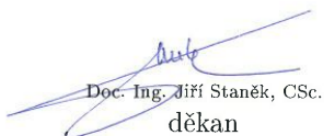
**HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J.** *Příručka strojího inženýra 1.* Brno: Computer Press, 1990

**VLK, F.** *Stavba motorových vozidel.* Brno: nakl. VLK, 2003

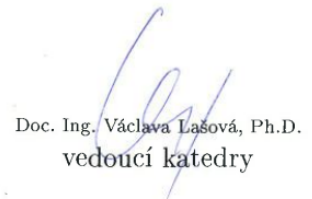
*Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.*

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**  
Katedra konstruování strojů  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Roubal**  
Expert z praxe

Datum zadání bakalářské práce: **22. září 2014**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. června 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



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

V Plzni dne 22. září 2014

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V plzni dne .....

.....

podpis studenta

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Charypar	<b>Jméno</b> Michael	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 „Dopravní a manipulační technika“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Doc. Ing. Němec.CSc.	<b>Jméno</b> Ladislav	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Možnosti ovlivňování charakteristiky spalovacího motoru úpravami sacího systému		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	37	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	33	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	4
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>V textové části této bakalářské práce je přiblížena problematika tvorby směsi paliva se vzduchem a s tím související emisní předpisy. Následuje přehled různých typů přeplňování a jejich vliv na změnu charakteristiky spalovacího motoru. Je zde i shrnutí současných trendů přeplňování a dalších možností zvyšování výkonu spalovacího motoru.</p> <p>Konstrukční část práce je zaměřena na návrh materiálu ventilu a sedla ventilu, který je součástí obtokového ventilu. Součástí práce je 3D model obtokového ventilu a výkresová dokumentace.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>sací systém, přeplňování, turbodmychadlo, sání, výkon, točivý moment, obtokový ventil, ventil, spalovací motor, elektrické turbodmychadlo</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Charypar	<b>Name</b> Michael	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 „Transport Vehicles and Handling Machinery“		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Doc. Ing. Němec,CSc.	<b>Name</b> Ladislav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Possibilities of the influence of a combustion engine characteristic by an intake system modification		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGE (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	37	<b>TEXT PART</b>	33	<b>GRAPHICAL PART</b>	4
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>In the text part of this bachelor thesis there is outlined problematics of the formation of fuel-air mixture and associated emission regulations. There is also an overview of different types of supercharging and their influence to the change of characteristics of the combustion engine. There is also a summary of current trends of supercharging and other possibilities of increasing the performance of the combustion engine.</p> <p>Construction part of this thesis is focused on the draft of material for valve and valve seat, which is part of wastegate. The thesis includes 3D model of wastegate and drawing documentation.</p>
<b>KEY WORDS</b>	intake system, supercharging, turbocharger, intake, performance, torque, wastegate, valve, combustion engine, electrical turbocharger

## **Poděkování**

Děkuji všem pedagogickým pracovníkům Západočeské univerzity, kteří mi během studia předávali své znalosti a zkušenosti. Poděkování patří především vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Ladislavu Němcovi, CSc. a panu Ing. Janu Roubalovi za odbornou konzultaci a připomínky k bakalářské práci. Dále děkuji všem, kteří mě během studia podporovali.

## Obsah

1	Analýza spalovacího procesu v zážehovém motoru .....	3
1.1	Tvorba směsi paliva a vzduchu .....	3
1.2	Spalovací proces u zážehového motoru.....	3
1.3	Spalovací proces u vznětového motoru .....	3
1.4	Oxidace uhlovodíků.....	4
1.5	Emise .....	5
1.6	Snižování obsahu škodlivin ve výfukových plynech .....	6
2	Zvyšování výkonu úpravami sacího systému .....	6
2.1	Sací systém spalovacího motoru.....	7
2.2	Dynamické přeplňování.....	7
2.2.1	Přeplňování kmity v sacím potrubí .....	7
2.2.2	Proměnná délka sacího potrubí .....	7
2.2.3	Rezonanční přeplňování .....	9
2.3	Mechanické přeplňování.....	11
2.4	Časování ventilů .....	12
2.4.1	Zdvih ventilů .....	13
2.4.2	Možnosti ovládání a časování ventilů .....	14
3	Přeplňování a výkonová charakteristika motoru.....	14
3.1	Přeplňování turbodmychadlem.....	15
3.1.1	Přeplňování zážehových motorů .....	16
3.1.2	Přeplňování vznětových motorů.....	19
3.1.2.1	Variabilní turbodmychadlo .....	19
3.1.2.2	Turbodmychadlo s regulačním šoupátkem .....	19
3.1.2.3	Dvoustupňové přeplňování .....	20
3.2	Turbocompounding .....	20
3.3	Přeplňování tlakovými vlnami.....	21
4	Zhodnocení trendů ve vývoji vozidlového spalovacího motoru.....	23
4.1	BMW X6 M50d šestiválec třemi turbodmychadly.....	23
4.2	Elektricky poháněné turbodmychadlo Valeo .....	27
4.3	Koncept Audi RS5 TDI .....	28
4.4	Ideální motor podle Controlled Power Technologies.....	29
5	Konstrukční řešení .....	30
6	Závěr .....	33



## Přehled použitých označení a jednotek

OZNAČENÍ	JEDNOTKY	NÁZEV VELIČINY
m	[kg]	hmotnost
P	[W]	výkon
$M_t$	[Nm]	točivý moment
$\Omega$	[rad/s]	úhlová rychlost
N	[1/min]	otáčky
$\lambda$	[-]	součinitel přebytku vzduchu
p	[Pa]	tlak
$\sigma$	[Pa]	napětí
V	[m <sup>3</sup> ]	objem
v	[m/s]	rychlost
k	[-]	koeficient bezpečnosti

## Seznam použitých zkratk

TDI – Turbocharged direct injection

HIP – Hot isostatic pressing

TFSI – Turbo fuel stratified injection

SUV – Sport utility vehicle

VTES - Variable Torque Enhancement System

CPT - Controlled Power Technologies

DPF - Diesel particulate filter

# 1 Analýza spalovacího procesu v zážehovém motoru

Spalovací motory jsou tepelné hnací stroje, kde je tepelná energie získaná spalováním paliva měněna na mechanickou práci. Směs paliva a vzduchu je spalována ve spalovacím prostoru motoru při tlaku vyšším než atmosférickém. Zbylé produkty hoření jsou ze spalovacího prostoru vytlačeny ve formě výfukových plynů, které mohou být dále využity k zefektivnění spalovacího cyklu. V průběhu spalování dochází vlivem chemických reakcí k uvolnění tepelné energie nasáté směsi paliva a vzduchu. [1], [2]

## 1.1 Tvorba směsi paliva a vzduchu

Spalování směsi probíhá v krátkých časových intervalech a je nutné zajistit dostatečné smíšení paliva a nasávaného vzduchu. Kapalné palivo se rozprašuje ve spalovacím prostoru tak, aby vznikla homogenní směs.

Dokonalé spalování je vyjádřeno stechiometrickým poměrem 1:1,48 (na spálení 1 kg paliva je potřeba 14,8kg vzduchu).

Součinitel přebytku vzduchu je vyjádřen poměrem skutečného množství přivedeného vzduchu a teoretickou spotřebou vzduchu na 1 kg paliva.

$$\text{Součinitel přebytku vzduchu } \lambda = \frac{\text{Množství přivedeného vzduchu v kg}}{\text{teoretická spotřeba vzduchu v kg}}$$

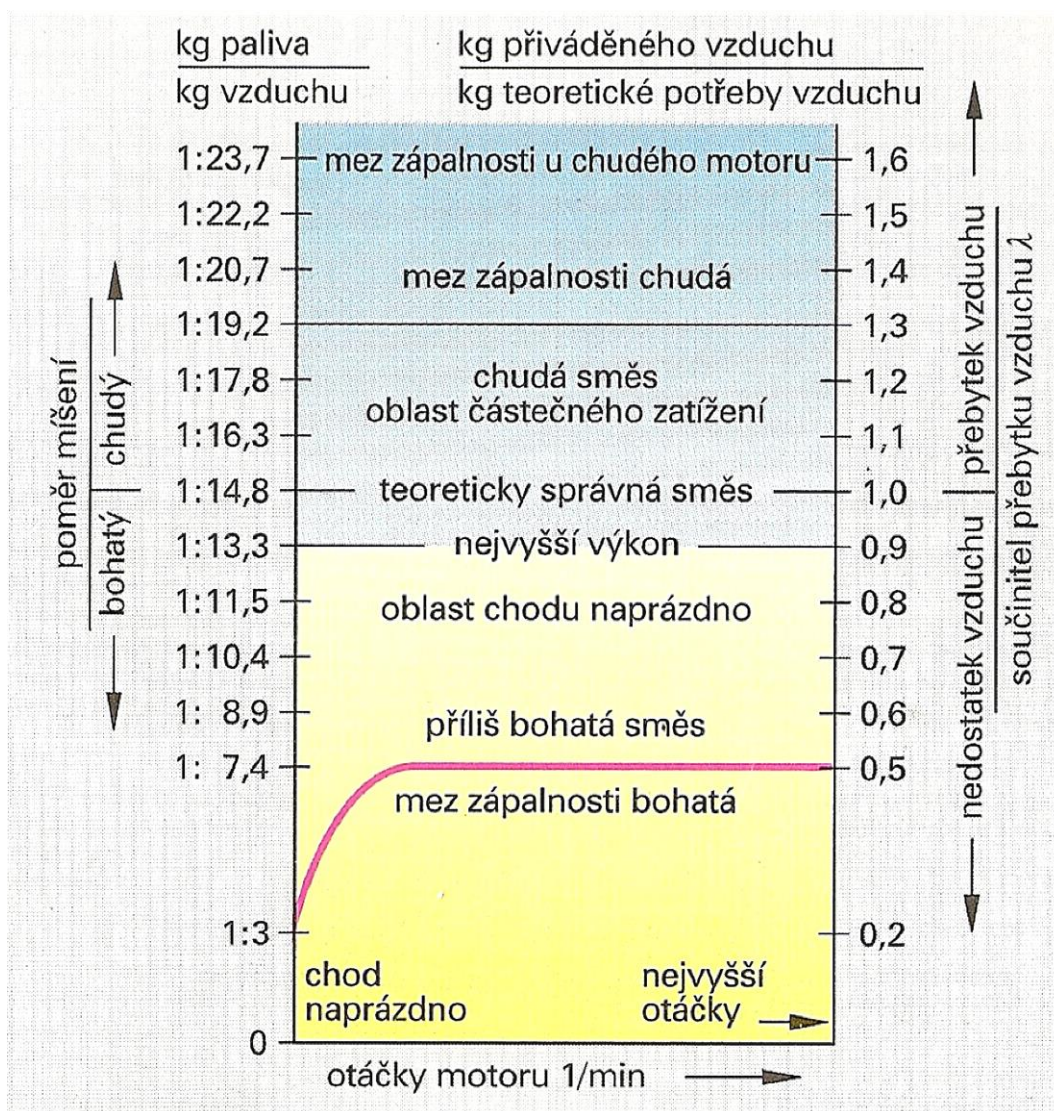
Při dokonalém spalování (teoretický směšovací poměr 1:1,48) bude součinnitel přebytku vzduchu  $\lambda=1$ . Pokud je množství přivedeného vzduchu na 1 kg paliva větší, dochází ke vzniku chudší palivové směsi. V opačném případě vzniká bohatší směs paliva. V reálném provozu a odlišných provozních stavech jako akcelerace, studeny start apod. se součinitel přebytku vzduchu pohybuje mezi oblastmi chudé a bohaté směsi, ale vždy musí být v mezi zápalnosti (obrázek 1). [2]

## 1.2 Spalovací proces u zážehového motoru

Rozlišujeme dva způsoby tvorby směsi, vnitřní a vnější. Vnější tvorba směsi probíhá v sacím potrubí a je charakteristická pro motory s karburátory, nebo s nepřímým vstříkáním. U motorů s přímým vstříkáním probíhá tvorba směsi přímo ve spalovacím prostoru válce. Přímé vstříkání umožňuje lepší regulaci paliva v závislosti na provozním stavu motoru. [2]

## 1.3 Spalovací proces u vznětového motoru

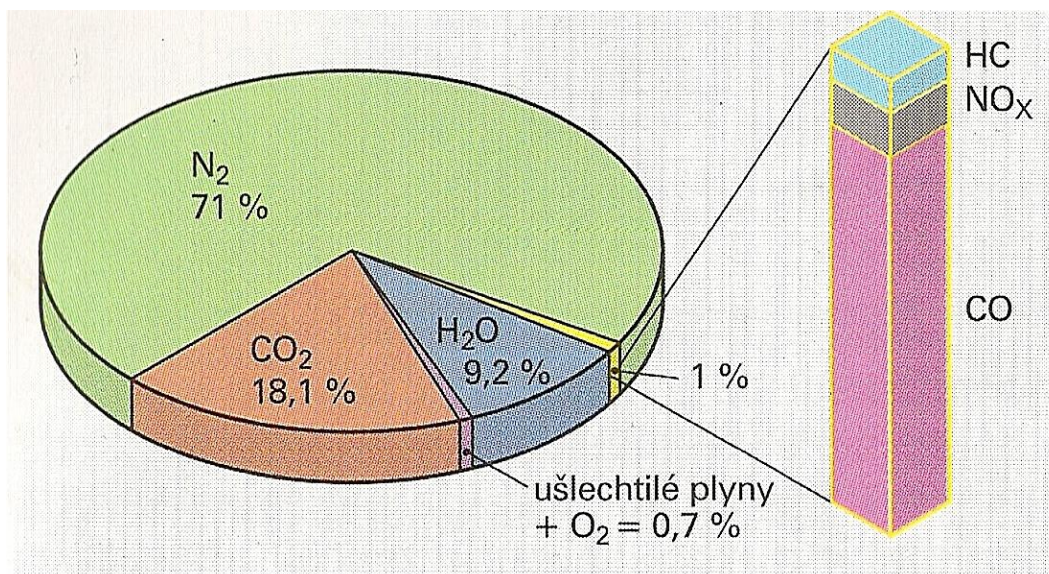
Vznětový motor nasává do válců pouze vzduch, který se následným stlačením zahřívá. Do takto stlačeného vzduchu je vstříknuto a jemně rozprašeno palivo, které se následně vznítí. Tento motor pracuje ve všech provozních stavech s chudou směsí (s přebytkem vzduchu). [2]



Obrázek 1: Směšovací poměry, podíl vzduchu [1]

## 1.4 Oxidace uhlovodíků

Nejčastěji používaným palivem spalovacích motorů je automobilový benzín a motorová nafta. Chemické složení těchto paliv je tvořeno různými druhy uhlovodíků. V průběhu spalovacího procesu dochází k chemickým reakcím ve směsi paliva a vzduchu. Pokud by spalování bylo dokonalé, výfukové plyny by se za ideálních podmínek skládaly ze zdraví neškodných sloučenin oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a vody ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Při nedokonalém spalování vznikají vedle již uvedených sloučenin oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) a vody ( $\text{H}_2\text{O}$ ) i oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ), oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ), sírné sloučeniny, uhlovodíky ( $\text{HC}$ ), pevné částice a další složky. Některé z těchto chemických sloučenin např. oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ) a oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) jsou zdraví nebezpečné a proto je snaha minimalizovat vznik těchto sloučenin. [2]



Obrázek 2: Složení výfukových plynů [3]

## 1.5 Emise

Vznik škodlivých sloučenin ve výfukových plynech a jejich negativní působení na lidské zdraví zapříčinilo vznik celé řady norem. První normy vznikaly od roku 1970. Postupným vývojem technologií a stoupajícího počtu automobilů došlo k výraznému zpřísnění. Norma EURO stanovuje přípustné limity škodlivých sloučenin, které mohou být obsaženy ve výfukových plynech (Tabulka 1). Hodnoty EURO norem jsou rozděleny podle typu paliva. Dále byly vydány předpisy na doporučenou spotřebu paliva, např. v USA v roce 1978 byla doporučená spotřeba stanovena na 13 l/100km, v roce 1989 na 8,8 l/100 km. Dále následovaly snahy o omezení hodnot oxidu uhličitého, skleníkového plynu, který je dnes spojován se změnami klimatu. Množství oxidu uhličitého obsaženého ve výfukových plynech je závislé na množství spáleného paliva a kvalitě spalovacího procesu. Lze ho eliminovat snížením spotřeby paliva. [2]

Rok/norma		CO (g/km)		NO <sub>x</sub> (g/km)		HC + NO <sub>x</sub> (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1993	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	0,70	-	0,08
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	-	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	-	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	-	0,23	0,10	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	-	0,17	0,10	0,005

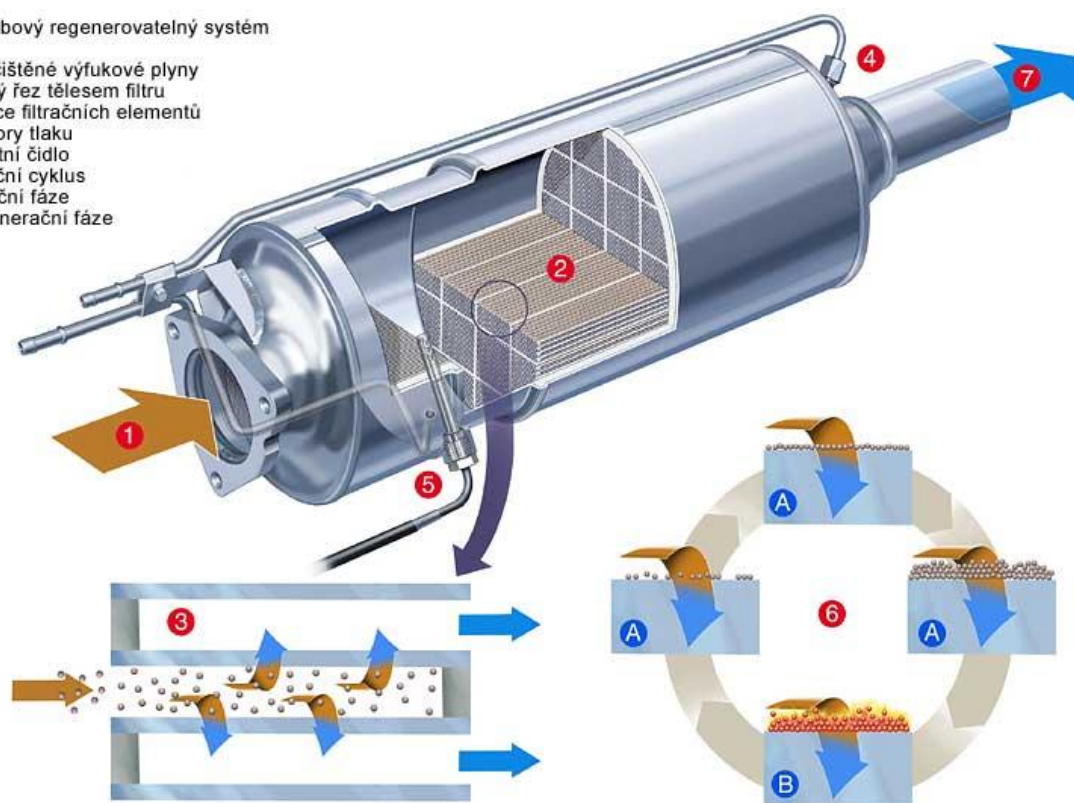
Tabulka 1: Emisní normy (Zážehové motory, vznětové motory) [4]

## 1.6 Snížování obsahu škodlivin ve výfukových plynech

Recirkulací výfukových plynů lze snížit tvorbu oxidů dusíku za současného nárůstu množství nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech. Škodliviny ve výfukových plynech můžeme zredukovat pomocí oxidačního katalyzátoru, který přeměňuje nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý na vodu a oxid uhličitý a zároveň snižuje množství pevných částic. U naftových motorů používáme částicové filtry, které odstraňují pevné částice ve výfukovém plynu. Existují různé typy částicových filtrů, mohou být např. keramické, s keramickým monolitem, filtry s ocelovou vlnou a elektrostatické čističe. [1]

Bezúdržbový regenerovatelný systém

1. Předčištěné výfukové plyny
2. Příčný řez tělesem filtru
3. Funkce filtračních elementů
4. Senzory tlaku
5. Teplotní čidlo
6. Filtrační cyklus
- A. Filtrační fáze
- B. Regenerační fáze



Obrázek 3: Částicový filtr pro vznětové motory Opel [5]

## 2 Zvyšování výkonu úpravami sacího systému

Při konstrukci motoru je hlavním cílem dosažení vysokého točivého momentu při nízkých otáčkách a také vysokého jmenovitého výkonu při maximálních otáčkách. Průběh točivého momentu motoru je úměrný nasátemu množství vzduchu v závislosti na otáčkách motoru. Množství vzduchu vyjadřuje tzv. součinitel plnění  $\lambda$ , který udává poměr mezi skutečným množstvím čerstvého vzduchu ve válci a teoretickou spotřebou vzduchu v jednom pracovním oběhu.

Množství dopraveného vzduchu do válců motoru lze ovlivnit geometrií sacího potrubí. Zmenšení odporů proudícího vzduchu dosáhneme odstraněním náhlých změn směru proudění, vytvořením plynulého obrysu a kvalitou povrchu sacího kanálu. [6]

## 2.1 Sací systém spalovacího motoru

Sací systém je součástí každého spalovacího motoru, kterému zajišťuje dodání nové náplně do válců motoru. U motorů s přímým vstřikováním paliva do válců se sací systém navrhuje pouze pro přívod vzduchu. U motorů s vnější tvorbou směsi je do válců motoru přiváděna směs paliva se vzduchem. V tomto případě je ovšem nutno navrhnout sací systém i s ohledem na průběh míšení paliva a vzduchu.

Sací systém je obecně složen ze sacího hrdla, sací trubice, čističe vzduchu, snímačů tlaku, teploty a průtočného množství vzduchu v sacím potrubí a dále pak škrticí klapkou. Čističe vzduchu mají za úkol vedle vlastního čištění také tlumení hluku sání, ohřev a regulaci teploty nasátého vzduchu.

Spalovací motory automobilů byly původně vybaveny karburátory, které jsou dnes nahrazeny vstřikovacími systémy. U motorů přepřňovaných dmychadlem může být zahřátý stlačený vzduch před vstupem do válců ochlazen mezichladičem. Tím dojde k zvýšení hustoty vzduchu při zachování stejného objemu a zlepšení plnění válců motoru. [6]

## 2.2 Dynamické přepřňování

Princip dynamického přepřňování je založen na využití pohybové energie nasávaného vzduchu. Otevřením sacího ventilu dojde k vyvolání zpětné podtlakové vlny, která se rychlostí zvuku pohybuje proudem vzduchu, dokud nenarazí na otevřené prostředí. Zde je tato přetlaková vlna opět odražena zpět k sacímu ventilu. Pokud vlna dorazí k ventilu v době mezi dolní úvratí a jeho zavřením vytvoří před ventilem tlakový spád a válec je plněn proti pohybu pístu, což způsobí lepší plnění válce motoru. Frekvence vlnění proudu vzduchu je závislá na délce sacího potrubí a rychlosti proudění vzduchu dané otáčkami motoru. Tímto způsobem přepřňování dosáhneme rovnoměrnějšího průběhu točivého momentu a vyššího výkonu motoru v oblasti středních a vysokých otáčkách při současném snížení emisí výfukových plynů. [7]

### 2.2.1 Přepřňování kmity v sacím potrubí

Sací efekt vyvolán pohybem pístu způsobí rozkmitání sloupce proudícího plynu. Volbou délky sacího potrubí lze kmity proudících plynů ovlivnit tak, aby se tlaková vlna pohybovala otevřeným sacím ventilem dovnitř motoru a tím zlepšila plnění válce. Každý válec je opatřen samostatným sacím potrubím vhodné délky. V horní oblasti otáček je výhodné krátké a široké sací potrubí a ve spodní oblasti otáček naopak dlouhé a tenké potrubí. [1]

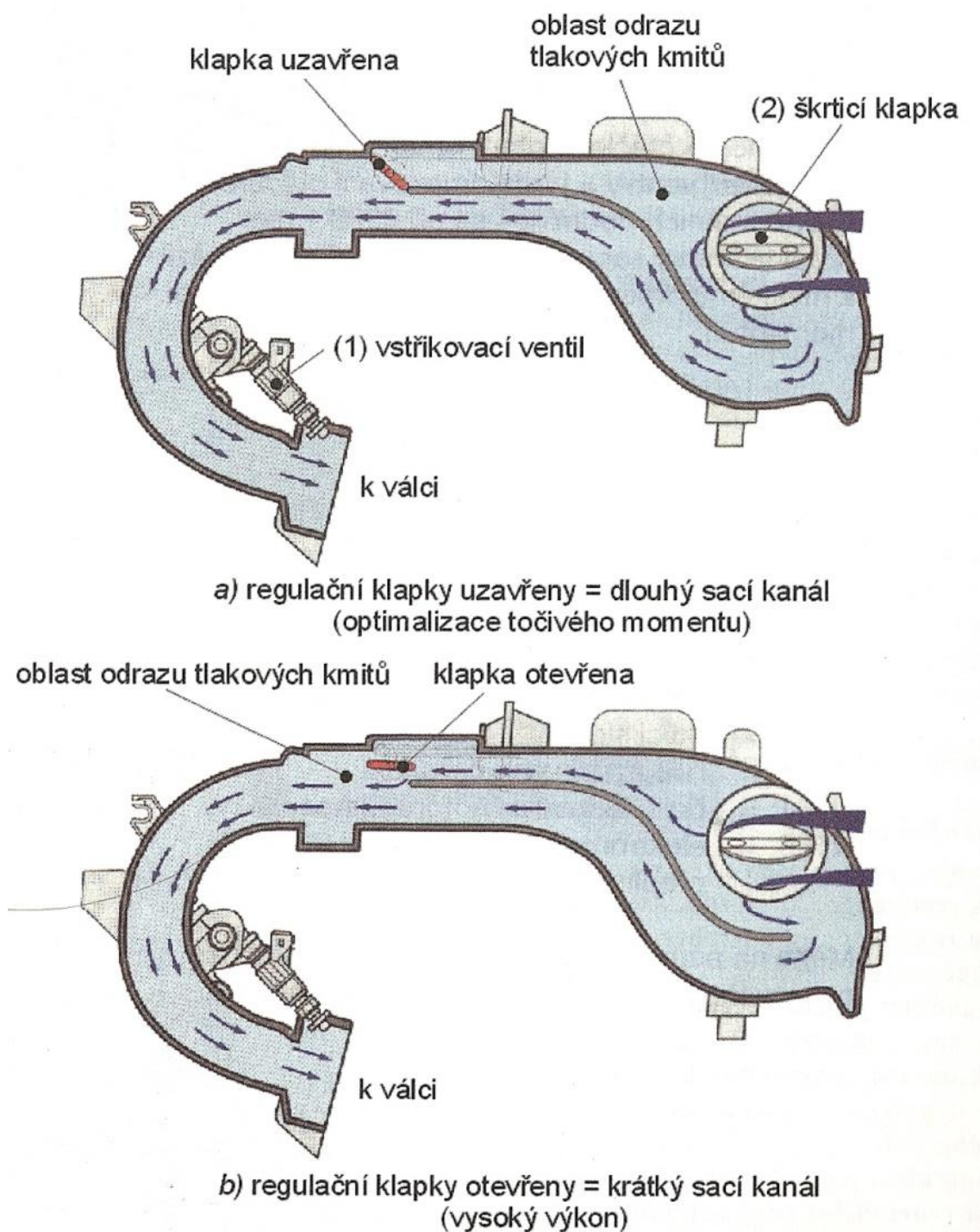
### 2.2.2 Proměnná délka sacího potrubí

Zde je aplikován princip dynamického přepřňování společně s proměnnou délkou sacího potrubí. Pro dolní oblast otáček je vhodné dlouhé a tenké sací potrubí, které umožňuje vysoký točivý moment. Zkrácené větve potrubí jsou uzavírány klapkami (obrázku 4), nebo rotačním šoupátkem. V horní oblasti otáček je šoupátko, nebo klapka elektricky či elektropneumaticky otevřena a všechny válce nasávají krátkým a širokým potrubím. Na obrázku 6 je znázorněno porovnání motoru s variabilní délkou sacího potrubí a motoru s jednoduchým sacím potrubím. Ve spodní oblasti otáček do  $4250\text{min}^{-1}$  lze pozorovat zvýšení a rovnoměrnější rozložení točivého momentu a od  $4250\text{min}^{-1}$  zvýšení výkonu motoru. [1], [8]

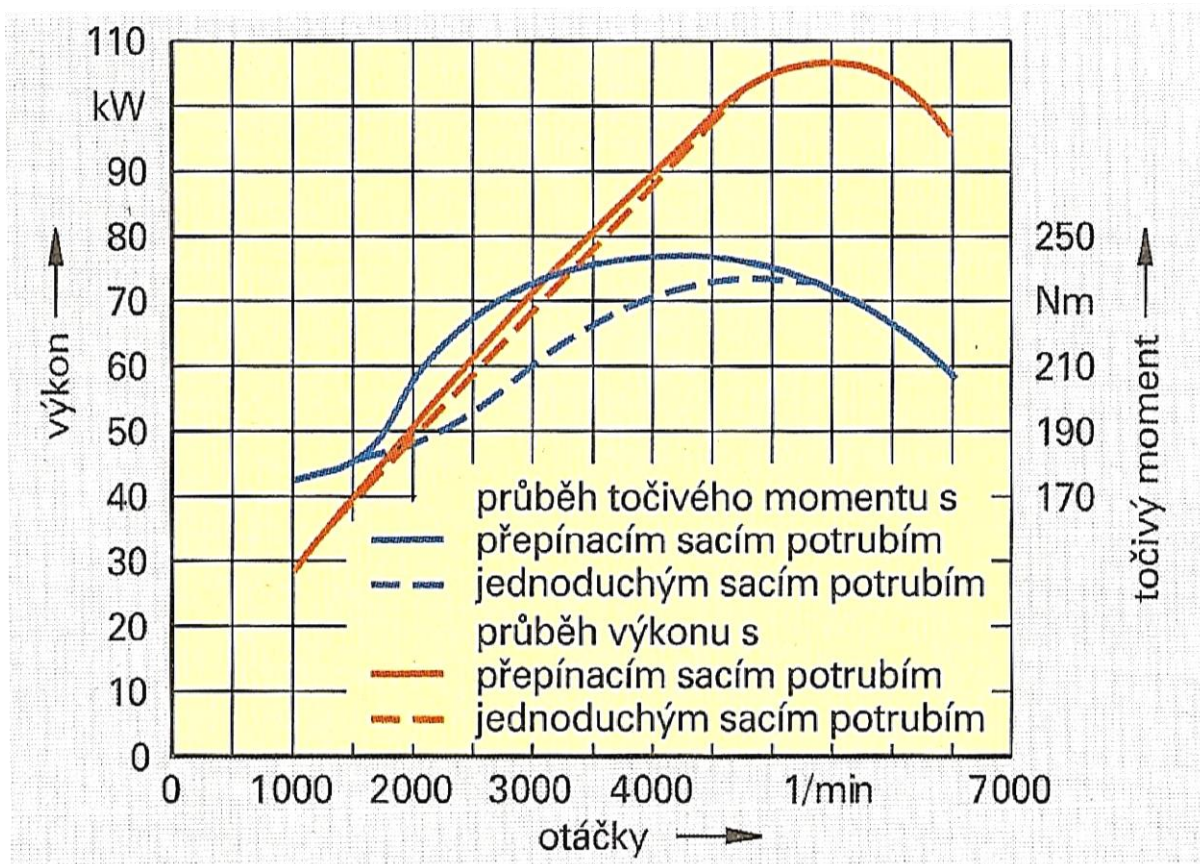
Výkon a točivý moment představují dvě rozdílné veličiny, mezi kterými platí následující vztah:

$$M_k = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

Ze vztahu lze odvodit, že při snaze dosáhnout vysokého točivého momentu je potřeba dosáhnout vysokého výkonu a zároveň nízkých otáček. Zachování konstantního výkonu při rostoucích otáčkách motoru klesá jeho točivý moment. [9]



Obrázek 4: Variabilní sací potrubí [10]



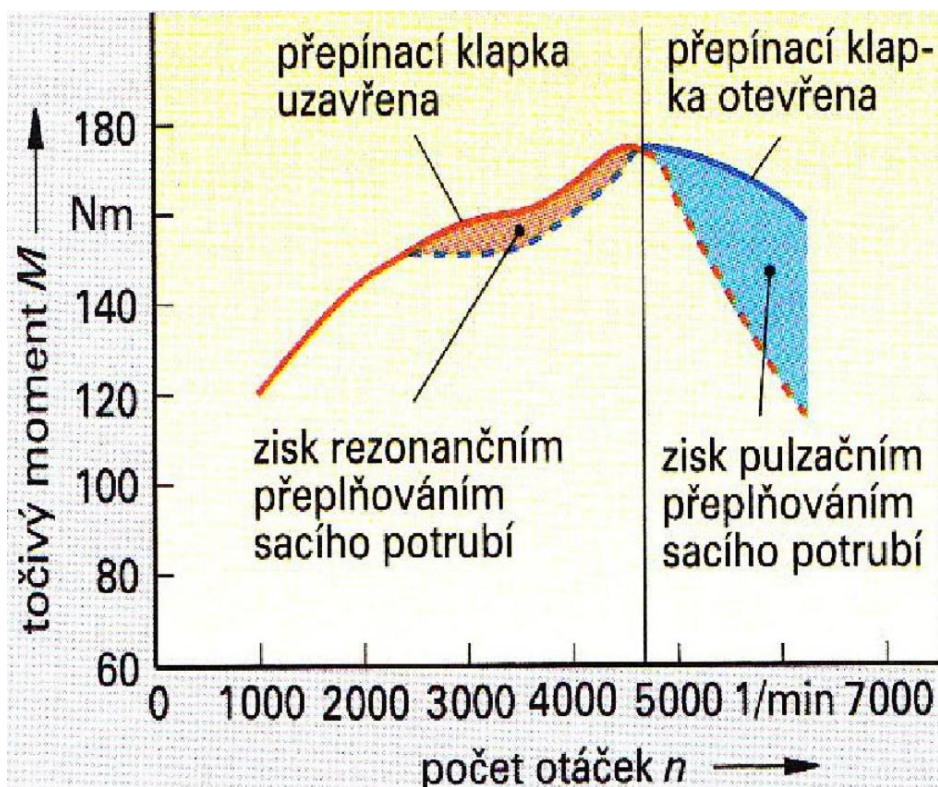
Obrázek 5: Výkonová a momentová charakteristika motoru s proměnnou délkou sacího potrubí [1]

### 2.2.3 Rezonanční přeplňování

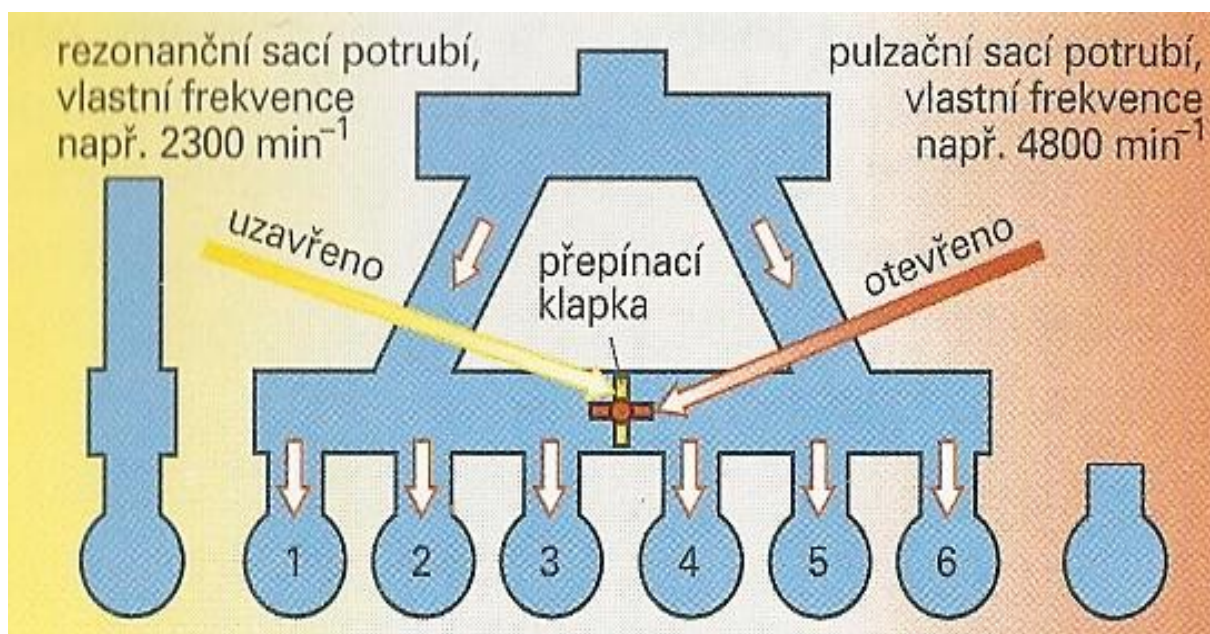
Představuje další možnost zvýšení plnicího tlaku využitím dynamiky plynů. Nastává v případě vzájemné shody frekvence kmitů vln ve sloupci plynu s frekvencí sání, která je dána otáčkami motoru. Vlastní frekvence systému je závislá na množství kmitající hmoty. Malá hmota způsobí krátké kmitání s vysokou frekvencí a naopak velká hmota vyvolá dlouhá kmitání s nízkou frekvencí. Otevřením rezonanční klapky se ke kmitajícímu sloupci plynu v sacím potrubí připojí další hmota, zvětší se délka kmitočtu a poklesne frekvence. Při nízkých otáčkách je tímto přírůstkem hmoty vyvoláno rezonanční přeplňování a zlepšení plnění.

Pro lepší využití zvýšení plnění válců je kombinováno rezonanční a pulzační přeplňování (obrázek 6). Rezonanční sací potrubí pracující v režimu středních otáček se pro vysoké otáčky přepne na systém s dynamickým plněním. Přepínací klapka mezi komorami se ovládá elektricky, nebo elektropneumaticky. Lepší plnění rezonančního a pulzačního sacího potrubí nastane v dolní oblasti otáček pomocí rezonančního přeplňování a v horní oblasti otáček vlivem dynamického přeplňování (obrázek 7). [11]





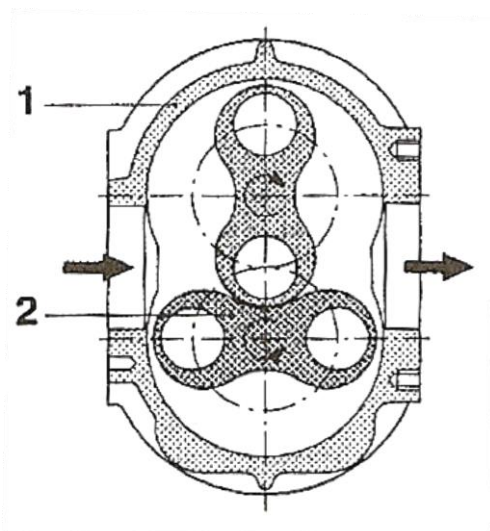
Obrázek 6: Točivý moment kombinovaného rezonančního a pulzačního přeplňování [11]



Obrázek 7: Soustava rezonančního a pulzačního potrubí [1]

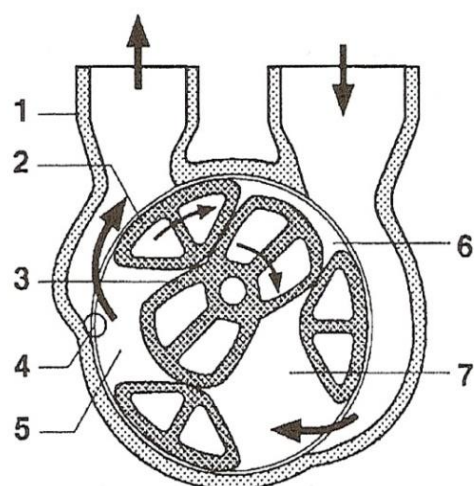
## 2.3 Mechanické přeplňování

Mechanické přeplňování je založeno na principu mechanické pohony dmyhadla spalovacím motorem. Dmyhadlo stlačuje nasávaný vzduch, který tlačí do spalovací komory a tím zlepšuje plnění válců. Přímé spojení kompresoru s motorem se projeví v okamžité reakci a na rozdíl od turbodmyhadla je reakce na změnu otáček okamžitá. Největší nevýhodou mechanického přeplňování je příkon dmyhadla, který snižuje mechanickou účinnost motoru a zvyšuje spotřebu paliva. Proto je potřeba navrhnout dmyhadlo tak, zlepšilo celkový výkon motoru a zároveň pokrylo i ztráty vzniklé svým pohonem. Snaha zmenšit ztráty z příkonu dmyhadla vede k jeho odpojování při nižším zatížení motoru. Existuje několik typů mechanických dmyhadel např. Rootsovo dmyhadlo, křídlové, šroubové, dmyhadlo s otočnými písty nebo spirálové dmyhadlo, též označováno jako G-dmyhadlo. [12]



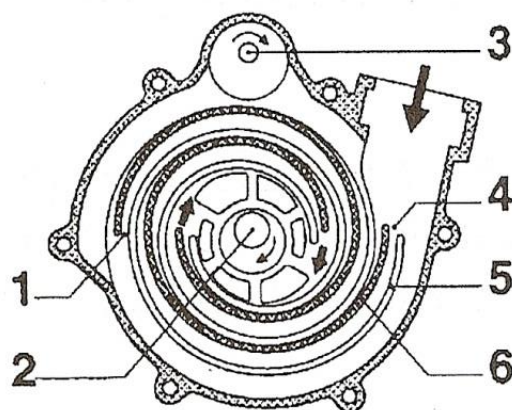
1 – skříň, 2 – otočné písty

Obrázek 8: Rootsovo dmyhadlo [12]



1 skříň, 2 větší rotor, 3 vnitřní rotor, 4 výstupní hrana, 5 komora III, 6 komora II, 7 komora I

Obrázek 9: Dmyhadlo s otočnými písty [12]



1 vstup vzduchu do druhého pracovního prostoru, 2 hnací hřídel, 3 vedení dmyhadla, 4 vstup vzduchu do prvního pracovního prostoru, 5 skříň, 6 stlačovač

Obrázek 10: Spirálové dmychadlo [12]

## 2.4 Časování ventilů

Časování ventilů spočívá v nastavení okamžiku otevření a uzavření sacích a výfukových ventilů, dále ve správné volbě rychlosti otevírání a uzavírání těchto ventilů. Spalovací motory bývají běžně vybaveny dvěma a více ventily.

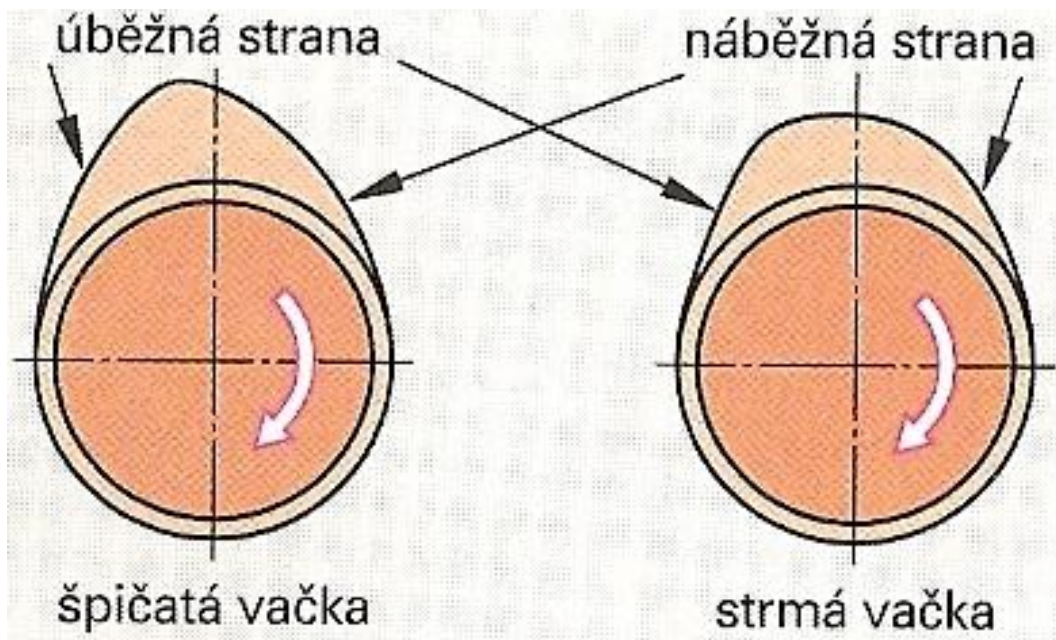
Výfukový ventil bývá otevírán těsně před dolní úvratí kvůli snížení ztrát během expanzního zdvihu pístu. Tím dojde k odpuštění asi poloviny objemu spalovacích plynů z válce a zbytek je vytlačení zdvihem pístu. Pokud se před horní úvratí zdvihu, kdy zbytek spalín opouští spalovací prostor, otevře sací ventil, dochází k překrytí ventilů.

Výkon zážehových motorů je řízen polohou škrticí klapky. V okamžiku otevření sacího kanálu proudí výfukové plyny ze spalovacího prostoru do sacího kanálu a to zejména při částečném zatížení motoru, kdy je za škrticí klapkou podtlak. Výfukové plyny mohou proudit z výfukového kanálu zpět do spalovací komory, kde se mísí s čerstvě nasátou směsí, tento děj se označuje jako recirkulace. Tímto se sníží množství čerstvě nasáté směsí a proto pro zachování stejného výkonu je potřeba většího otevření škrticí klapky.

Výkon vznětového motoru je určen především množstvím vstříkovaného paliva. Při částečném zatížení pracuje motor s velkým přebytkem vzduchu a dochází ke snižování spalovací teploty. Proto je potřeba zvolit takový kompresní poměr, který zajistí spolehlivé vznícení nejen při částečném zatížení, ale i při studeném rozběhu. K tomu je ve vznětovém motoru využívána recirkulace výfukových plynů, kdy se s ohledem na zatížení motoru může zmenšit kompresní poměr, protože je zmenšeno množství vstříkovaného paliva. Recirkulované výfukové plyny se spalovacího cyklu nezúčastňují a mohou ho ovlivňovat jak příznivě, tak nepříznivě. Proto je recirkulace spojena např. s řízeným pohybem směsi ve válci.

Sací ventil je uzavírán až za dolní úvratí pístu a tak setrvačnost směsi zlepší plnicí účinek válce. Tento plnicí účinek je nejefektivnější při vyšších otáčkách motoru, kdy je zároveň největší rychlost plnicí směsi. V nižších otáčkách se sací ventil musí uzavírat dříve, aby při pohybu pístu nedocházelo k vytlačování již nasáté směsi.

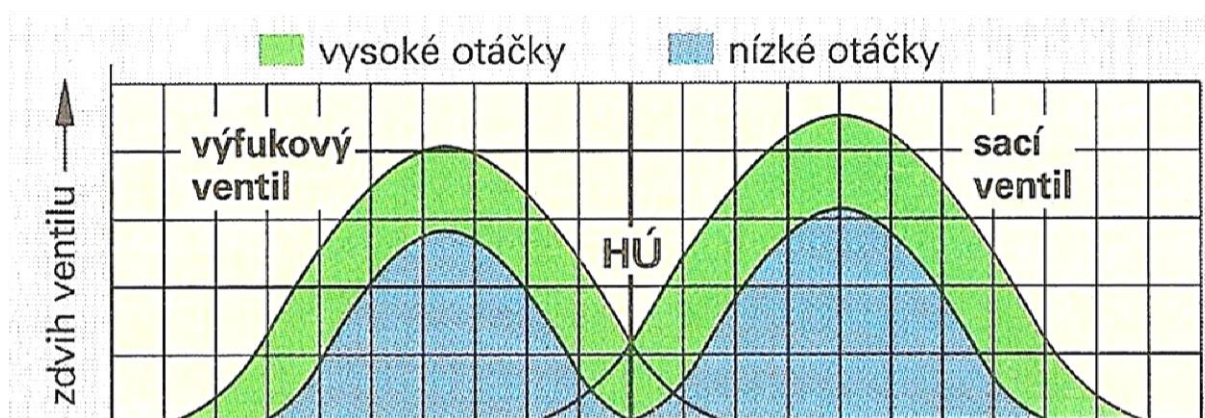
Správným nastavením časování ventilů lze v určitých provozních otáčkách zlepšit průběh točivého momentu, zvýšit výkon motoru, zlepšit tvorbu směsi a snížit tak škodliviny obsažené ve výfukových plynech, snížit spotřebu paliva a také hlučnost chodu motoru. [2]



Obrázek 11: Tvary vačkové hřídele [1]

#### 2.4.1 Zdvih ventilů

Dávkování palivové směsi lze provádět pomocí zdvihu ventilů. Čím bude zdvih ventilu větší, tím větší bude průtokový průřez a klesne rychlost proudění směsi. Proměnný zdvih ventilů tak nahradí funkci škrticí klapky. Odebráním škrticí klapky dojde ke snížení ztrát prouděním a k poklesu spotřeby. Tohoto mechanismu se využívá u motorů s jednou vačkovou hřídelí, kde nelze řídit překrytí natočením sací vačkové hřídele vůči výfukové. [2]

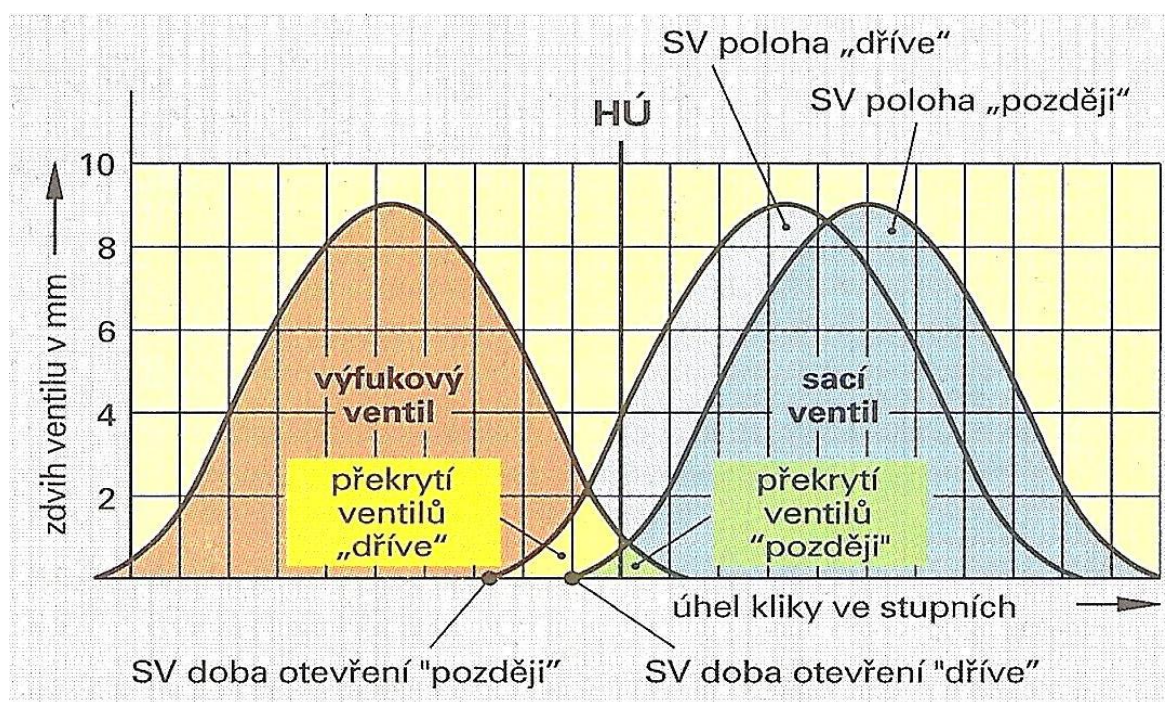


Obrázek 12: Zdvihová křivka ventilů při nízkých a vysokých otáčkách [1]

## 2.4.2 Možnosti ovládání a časování ventilů

Regulace časování ventilů optimalizuje rozdílné potřeby motoru. U motorů se dvěma vačkovými hřídeli lze změnit překrytí natočením jedné z hřídeli vůči druhé. Motory s jednou vačkovou hřídelí mění překrytí změnou zdvihu a zároveň se zdvihem ventilů mění i tvar vaček. V nižších otáčkách je malý zdvih, krátký interval otevření a vačky mají mírný oblouk. Naopak při vyšších otáčkách se využívá vaček se strmými boky, větším zdvihem a delším otevřením.

Nejlepší regulovatelnost mají motory bez vačkové hřídele, které pracují s 16ti ventily (u čtyřválcových motorů), kde jsou sací a výfukové ventily řízeny elektromagnetickými nastavovači. Každý ventil je vybaven samostatným nastavovačem. Konec dřívku je upevněn v disku armatury a disk je zavěšen ve středu válcového tělesa nastavovače dvěma pružinami, jednou nahoře a druhou dole. Každá strana disku je opatřena elektromagnetem, kterým se ventil otvírá, nebo uzavírá. Ventily jsou nastaveny tak, aby dosedaly do armatury s nulovou rychlostí a tím snížily hlučnost. [2]



Obrázek 13: Zdvihová křivka ventilu [1]

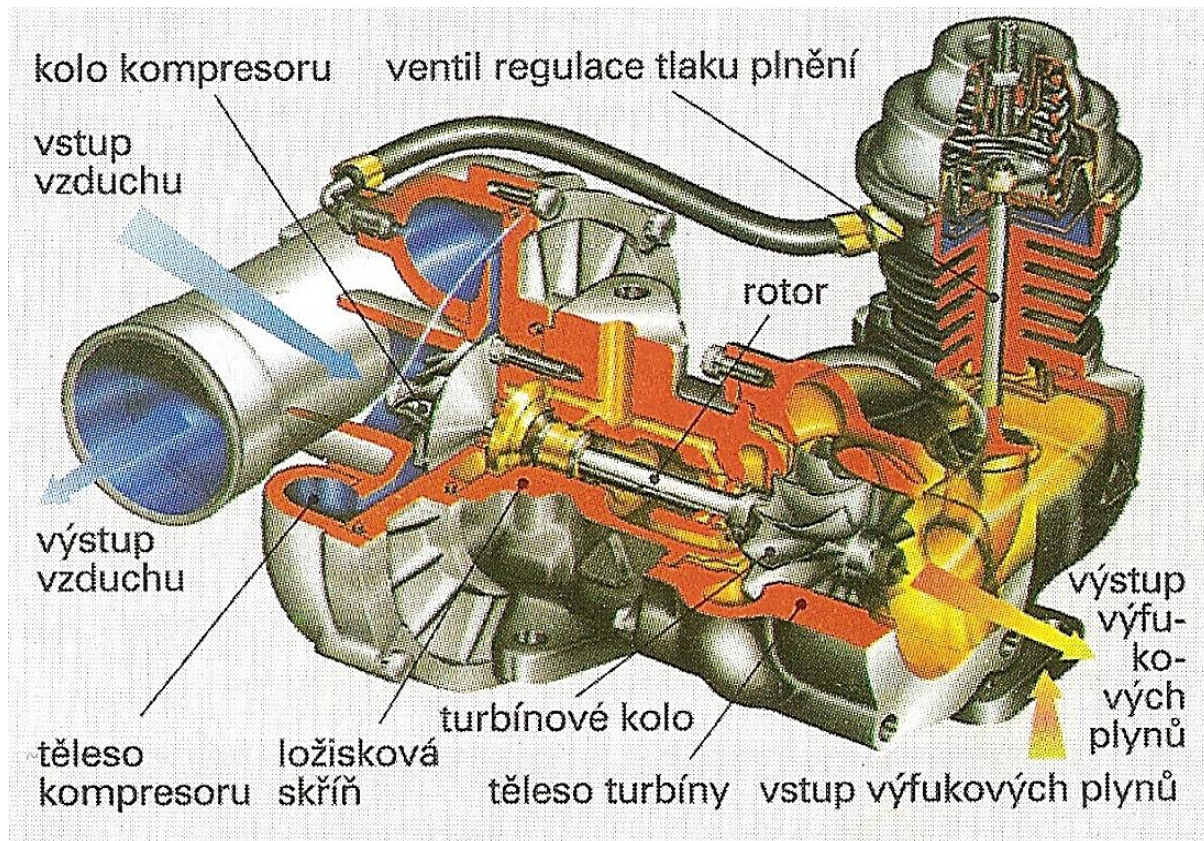
## 3 Přepřívání a výkonová charakteristika motoru

Přepřívání válců je dosahováno zvýšením tlaku v sacím potrubí motoru. Jeho cílem je dopravit do válce větší množství vzduchu a tím větší množství  $O_2$ , který je nezbytný pro oxidační proces uhlovodíků a následné uvolnění tepelné energie. Současně se zvýšením hmotnosti nasátého vzduchu, musíme pro zajištění optimálního průběhu spalovacího procesu dodat do válce odpovídající množství paliva, které je potřebné k dosažení správného směšovacího poměru. Jedině při takovém složení směsi proběhne ve válci dokonalé spálení směsi a maximální uvolnění energie, potřebné pro dosažení požadovaného výkonu.

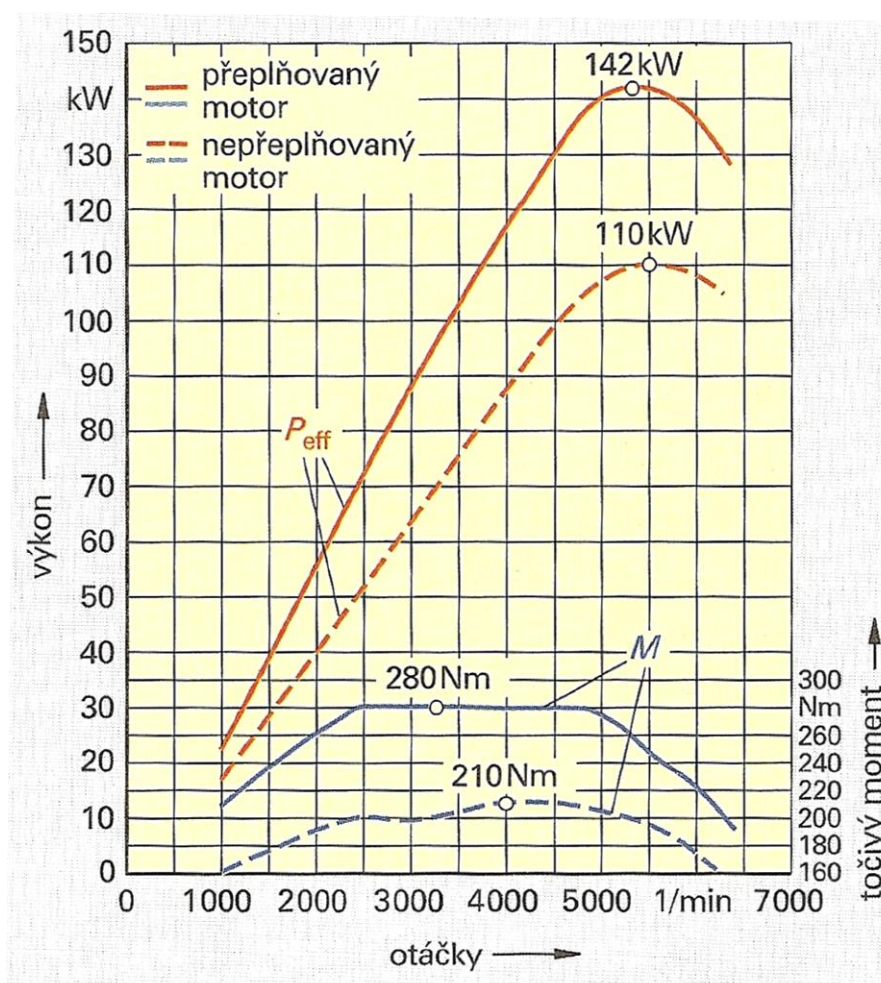
Spálením většího množství směsi při každém pracovním zdvihu získáme větší množství tepelné energie a tím i předpoklad pro zvýšení výkonu motoru při daném obsahu válců. To nám pak umožňuje konstruovat motory s menším obsahem válců, dostatečným výkonem, točivým momentem, nižší spotřebou paliva a především nižším obsahem škodlivin ve výfukových plynech. [1], [13]

### 3.1 Přeplňování turbodmychadlem

Principe přeplňování turbodmychadlem byl na počátku 20 století navržen švýcarským konstruktérem Alfredem Büchinem. K praktickému využití došlo již před 2. Světovou válkou v leteckém průmyslu (bombardéry B17). V automobilovém průmyslu bylo turbodmychadlo poprvé použito v roce 1963 v modelu Chevrolet Corvaire a Oldsmobile Jetfire. Ovšem kvůli vysoké poruchovosti byly tyto modely brzo staženy. Průkopníkem v sériové výrobě byl model Porsche 911 turbo, kde turbodmychadlo sloužilo především ke zvýšení výkonu motoru. Dnes je snaha využít potenciál turbodmychadla ke zmenšení objemu motoru při současném zachování výkonu, snížení spotřeby paliva a zároveň omezení emisí (CO<sub>2</sub>). [12], [14]



Obrázek 14: Turbodmychadlo poháněné výfukovými plyny [1]



Obrázek 15: Porovnání momentové a výkonové charakteristiky motoru o konstantním zdvihovém objemu s přepřňovaným [1]

### 3.1.1 Přepřňování zážehových motorů

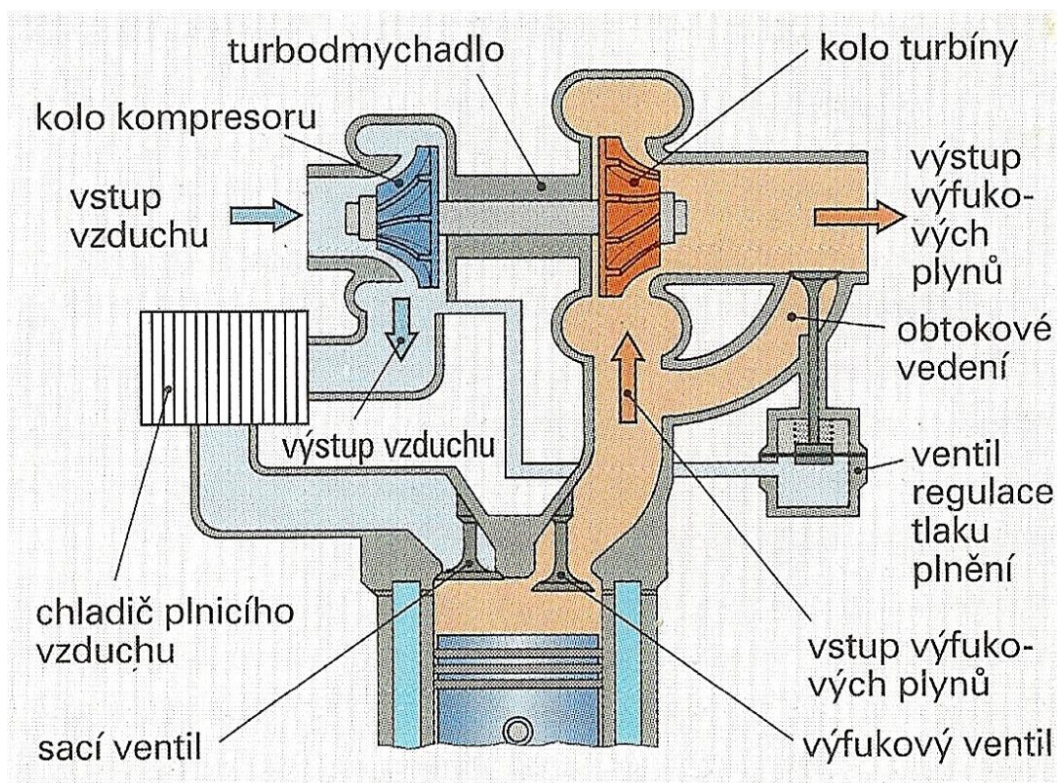
Přepřňování turbodmychadlem umožní použít stavebně menšího přepřňovaného motoru při zachování stejného výkonu jako u atmosféricky plněného motoru. Tím dosáhneme menšího objemu motoru a vyšší výkonové hmotnosti. Principem turbodmychadla je zvýšení plnicího tlaku válce a tím dosažení vyšších točivých momentů a výkonů se zachováním dobré účinnosti a snížení spotřeby paliva.

Turbodmychadlo je složeno z kompresoru a turbíny, jež jsou uloženy na společné hřídeli. Turbína je roztáčena odcházejícími výfukovými plyny. Přeměnou energie výfukových plynů na rotační pohyb turbíny dochází k rotaci kompresoru a následnému nasávání vzduchu, který je stlačen a přes chladič doveden do sacího potrubí. Ochlazením stlačeného vzduchu se zvyšuje plnicí účinnost. Těleso turbíny je kvůli požadavku dosahovat při nízkých otáčkách vysokého točivého momentu přizpůsobeno menšímu hmotnostnímu průtoku výfukových plynů. Při vyšších otáčkách by mohlo docházet k příliš velkému hmotnostnímu průtoku a tím zvětšení plnicího tlaku. Proto jsou přebytečné výfukové plyny regulovány obtokovým ventilem. Obtokový ventil je integrován do turbodmychadla a otevírán elektromagnetickým ventilem, který je ovládán řídicí jednotkou motoru.

Další způsob, jak regulovat přílišné zvětšení hmotnostního průtoku a plnicího tlaku je aplikace pneumaticko-mechanické regulace. Akční člen je ovládán plnicím tlakem z výstupu kompresoru. Zde ovšem není velký rozsah volitelnosti točivého momentu v závislosti na otáčkách a při zrychlení z nižších otáček dochází ke zpomalené reakci turbodmyhadla tzv. turboefekt. Turboefekt je časová prodleva při stlačení plynového pedálu a rozběhnutí turbodmyhadla. Zpoždění je způsobeno časem, který je potřebný k dosažení vyššího tlaku a rotační setrvačností turbodmyhadla.

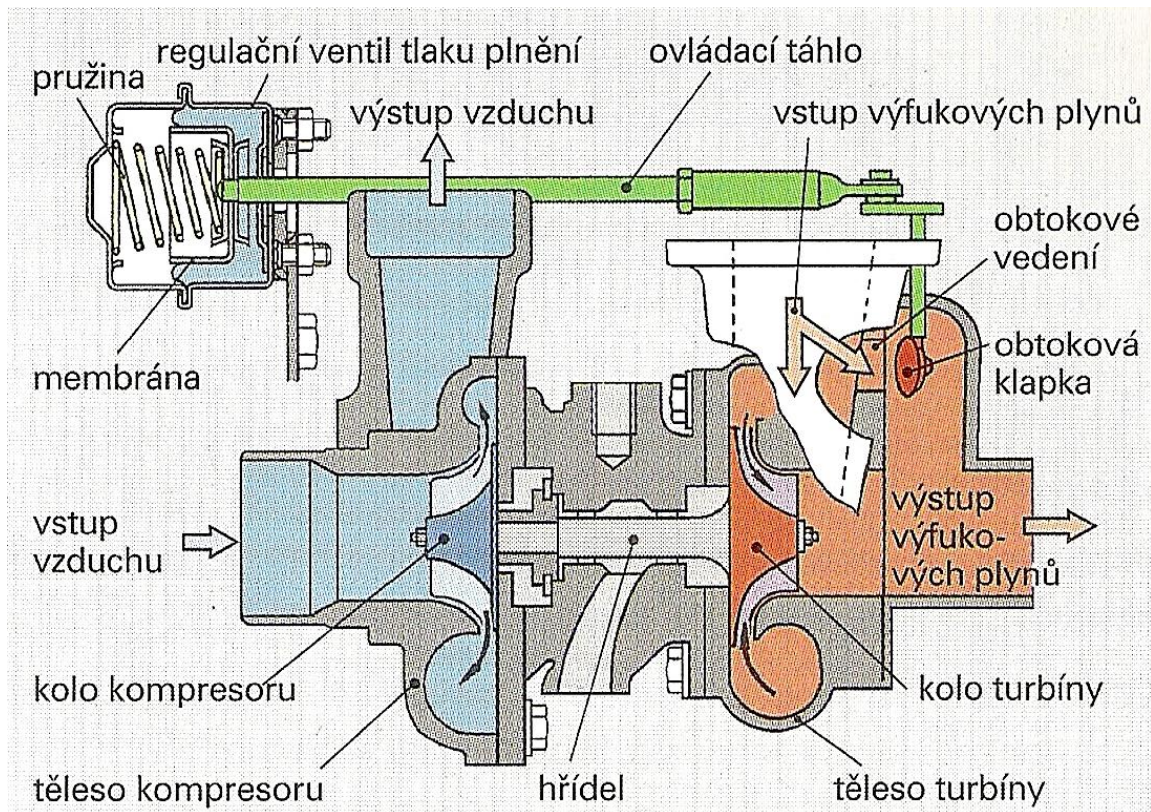
Tomu lze předejít právě elektronickou regulací plnicího tlaku, kdy lze v určitých rozmezech snížit spotřebu paliva. Regulované otvírání obtokového ventilu se projeví snížením výtlačné práce motoru a výkonu turbíny, snížením tlaku a teploty na výstupu z kompresoru a snížením tlakových spádů na škrticí klapce.

Systém Monotric s elektronickou regulací plnicího tlaku používá předepsané hodnoty tlaku, hmotnosti, nebo množství vzduchu podle použitého snímače zatížení. Zjištěné hodnoty jsou ukládány v poli charakteristik v závislosti na úhlu natočení škrticí klapky a otáčkách motoru. Poté členy regulačního obvodu srovnají rozdíly naměřených hodnot a porovnávají s nastaveným polem charakteristik. Každý provozní stav má své pole charakteristik. Pokud jsou zjištěny rozdíly mezi naměřenými a přednastavenými hodnotami, dochází k regulaci pomocí elektromagnetického, obtokového ventilu. [14], [15], [16], [17]

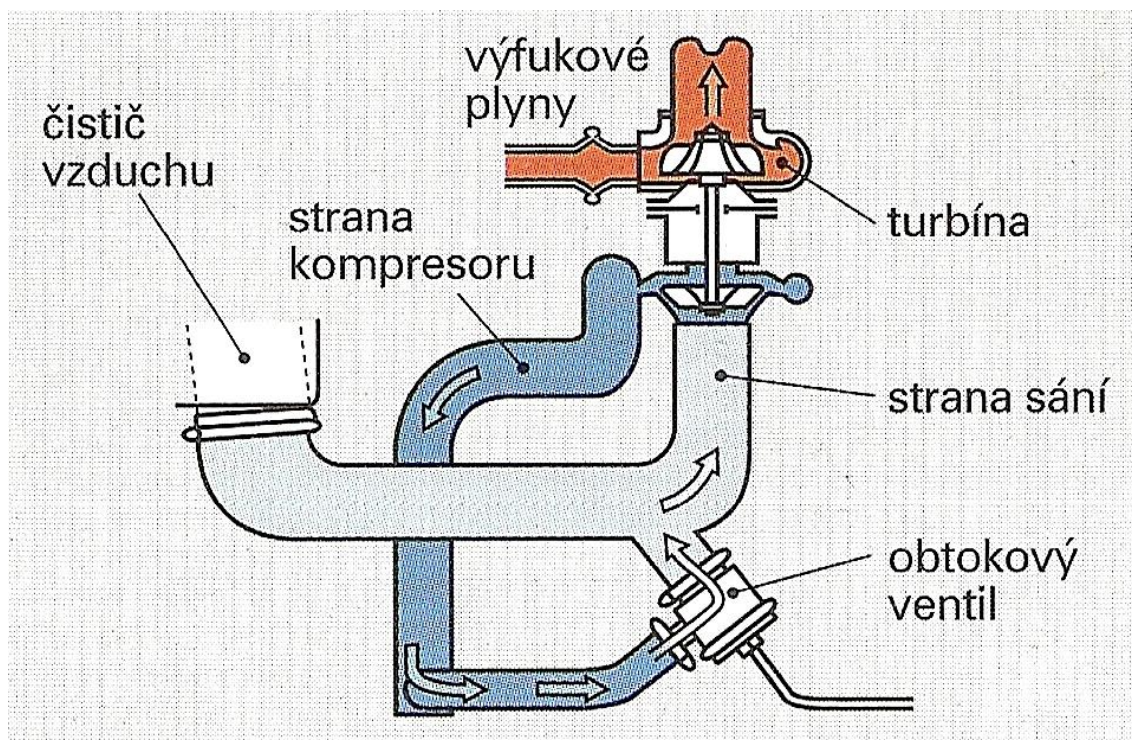


Obrázek 16: Schéma motoru s turbodmychadlem poháněným výfukovými plyny [1]





Obrázek 17: Regulace plnicího tlaku s obtokovou klapkou [1]



Obrázek 18: Obtokový ventil [1]

### 3.1.2 Přeplňování vznětových motorů

Turbína turbodmychadla je poháněna odcházejícími výfukovými plyny ze spalovací komory. Výfukové plyny roztáčí turbínu na společné hřídeli s kompresorem, který vhání nasátý vzduch přes chladič do sacího systému motoru a lze tak zvýšit množství paliva v jednom pracovním oběhu. Důsledkem bude vyšší točivý moment a výkon. Výkon je možno zvýšit v rozmezí 20% – 90 % a proto mohou být motory menší, s nižší spotřebou a lepším spalováním, což se projeví nižším podílem vypouštěných škodlivin. Měrná hmotnost motoru se při zvýšení výkonu o 100% sníží o polovinu.

Přeplňování může být nízkotlaké (0,029-0,049MPa), středotlaké (0,049-0,078MPa) a vysokotlaké (0,078MPa a více). Vyšší tlaky a zatížení motoru vyžadují zesílení konstrukce a to především klikového mechanismu. Turbodmychadlo pracuje v rozsahu 10 000 – 300 000 otáček za minutu. Vysoké otáčky kladou značné požadavky na vyvážení hřídele (turbíny a kompresoru), přesnost výroby, uložení a mazání. Hřídel bývá zpravidla uložena v plovoucích kluzných pouzdrech, která jsou napojena na tlakový mazací systém motoru. Turbínové kolo je kvůli vyšším teplotám výfukových plynů vyrobeno ze žáropevné niklové slitiny. Oběžné kolo a těleso kompresoru je ze slitiny hliníku, skříň ložisek a těleso turbíny je z temperované šedé litiny.

Při snížení otáček dochází k rychlému poklesu plnicího tlaku a vzniká tak turboefekt. Tuto prodlevu lze částečně eliminovat použitím turbíny s naklápěcími lopatkami nebo pohyblivou stěnou vstupní skříň vzduchu. Pro regulaci plnicího tlaku vzduchu lze použít obtokový ventil, nebo ztrátovou regulaci odpouštěním stlačeného vzduchu ventilem. [12], [17]

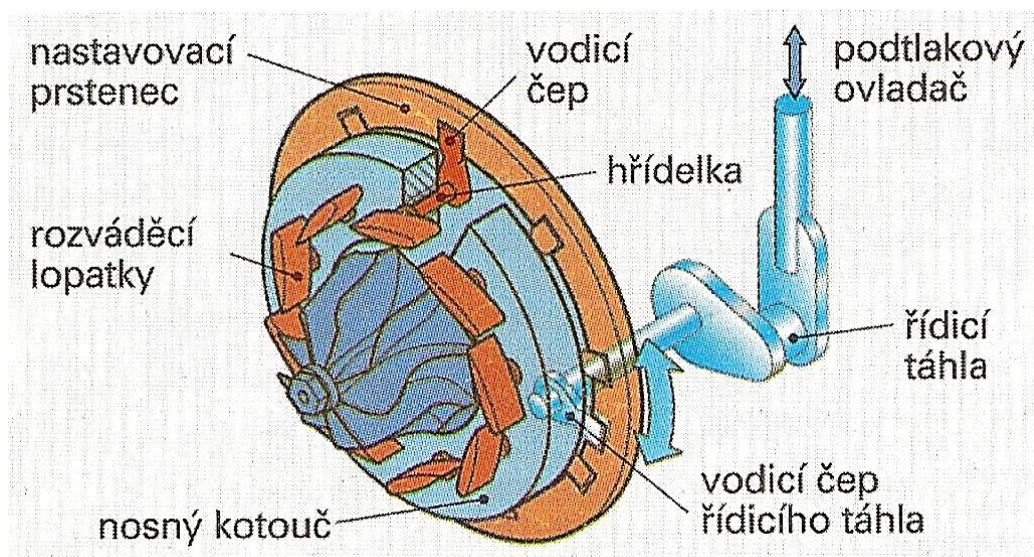
#### 3.1.2.1 Variabilní turbodmychadlo

Variabilní turbodmychadlo (obrázek 19) pracuje na principu rovnice kontinuity, kde rychlost proudícího plynu trubici o konstantním objemu je tím větší, čím menší průřez trubice.

Natáčením rozváděcích lopatek turbíny se mění průřez a turbína tak pracuje nezávisle na otáčkách motoru. Při chodu motoru v nízkých otáčkách je dosaženo požadovaného plnicího tlaku zúžením průřezu. Následkem zúžení vzroste tlak, zvýší se otáčky turbíny a tím dosáhneme vysokého točivého momentu v nízkých otáčkách. Naopak - při chodu motoru ve vysokých otáčkách dojde ke zvětšení průřezu a snížení otáček turbíny tak, aby nebyl překročen maximální dovolený plnicí tlak. V porovnání s obtokovým ventilem, lze natáčením lopatek zajistit potřebný plnicí tlak při průchodu stálého objemu výfukových plynů. [12], [18]

#### 3.1.2.2 Turbodmychadlo s regulačním šoupátkem

Turbodmychadlo s regulačním šoupátkem pracuje na principu plnění proudového kanálu v závislosti na pohybu posuvného šoupátka. Menší průtočný průřez kanálu má za následek zvýšení otáček turbíny vlivem velké průtokové rychlosti. Při dosažení maximálního plnicího tlaku dojde k otevření prvního průtokového kanálu (pohyb prvního šoupátka). Při dalším nárůstu plnicího tlaku (první šoupátko je otevřeno) je otevírán druhý průtokový kanál (pohyb druhého šoupátka). Přebytečné výfukové plyny jsou vedeny, mimo turbínu integrovaným obtokovým kanálem, který je řízen řídicí jednotkou. [12]



Obrázek 19: Nastavení rozváděcích lopatek variabilního turbodmyhadla [1]

### 3.1.2.3 Dvoustupňové přeplňování

Dvoustupňové přeplňování využívá dvou různě velkých v sérii řazených jednostupňových turbodmyhadel. Dmyhadla jsou nastavena tak, aby při velmi nízkých otáčkách pracovalo pouze menší dmyhadlo, které zajistí dostatečný plnicí tlak při rozběhu motoru. V oblasti středních otáček jsou zapojena obě dmyhadla. Ve vysokých otáčkách je menší dmyhadlo vypnuto a pracuje pouze velké dmyhadlo. Regulace výfukových plynů je řízena obtokovým ventilem. Důležitým doplňkem je chladič stlačeného vzduchu. Ochlazením stlačeného vzduchu se zvýší jeho objemové množství. Vzduch je zchlazen přibližně na stejnou teplotu jakou měl před stlačením. [12]

## 3.2 Turbocompounding

Turbocompounding je výkonová turbína, která využívá většího podílu tepelné energie výfukových plynů. Poprvé byl použit v leteckém průmyslu ve 40 letech 20 století a jako první byl patentován Scanií v roce 1980. Výkon turbíny byl přenášen hydrodynamickou spojkou na setrvačnick motoru.

Turbocompounding využívá zbytkové energie výfukových plynů prostřednictvím další výfukové turbíny. Účinnost motoru je zvýšena převedením otáček výkonové turbíny přes pružný převod na klikovou hřídel. Výkonová turbína je stejného typu jako turbodmyhadlo a ve výfukovém potrubí je umístěna za turbodmyhadlem a výfukovou brzdou

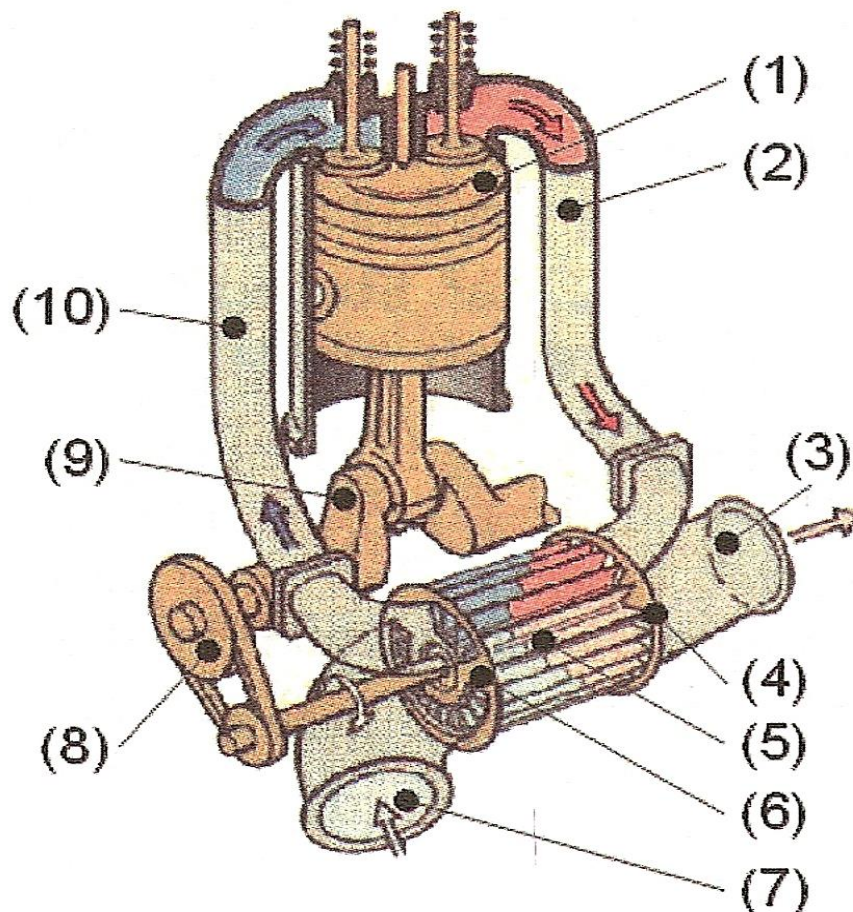
Turbína turbodmyhadla je roztáčena výfukovými plyny a současně kompresor dodává stlačený vzduch do motoru. Výfukové plyny dále putují do výfukové brzdy a poté roztácejí výkonovou turbínu turbocompoundu otáčkami kolem  $50\,000\text{ min}^{-1}$  při  $1\,800\text{ min}^{-1}$  motoru. Výkonová turbína převádí výkon pomocí hydrodynamické spojky na setrvačnick motoru a do převodovky. Hydrodynamická spojka synchronizuje obvodové rychlosti mezi klikovou hřídelí a turbínou. Mazací olej je pro výkonovou turbínu přiváděn z olejové náplně motoru.

Výhodou turbocompoundingu je zvýšení výstupního výkonu a točivého momentu a snížení spotřeby paliva oproti motorům bez turbocompoundingu. Nevýhodou je složitá konstrukce a vyšší pořizovací cena. [12]

### 3.3 Přeplňování tlakovými vlnami

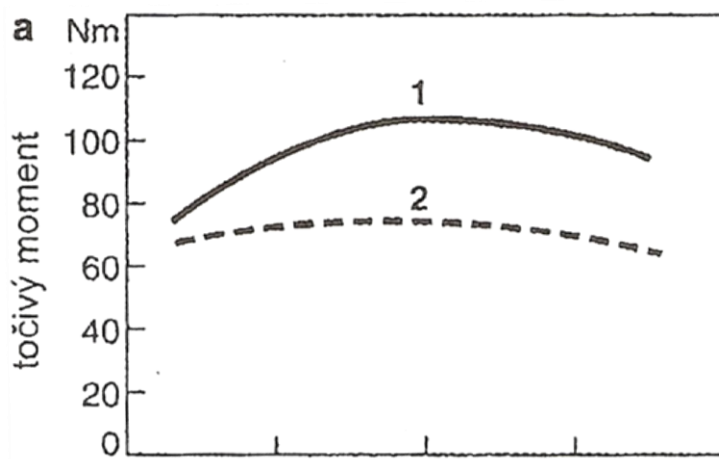
Systém pracuje na principu expanze a komprese. Rotor je poháněn přes klínový řemen a radiálně rozdělen na mnoho komůrek, které se v průběhu otáčení postupně naplňují a vyprazdňují.

Výfukové plyny vstupují do komory, kde stlačí nasávaný vzduch a vytvoří tak tlakovou vlnu pohybující se rychlostí zvuku. Po naplnění tří čtvrtin komory výfukovým plynem následuje otočení rotoru tak, aby v okamžiku, kdy tlaková vlna dosáhne konce komory, mohl stlačený vzduch přejít do plnicího potrubí. Na otevřeném konci komory se tlaková vlna odrazí, vytvoří podtlak a zároveň dochází k otočení rotoru na výfukovou stranu. Výfukové plyny opouští komoru při současném nasávání vzduchu a cyklus se dále opakuje. Výhodou přeplňování tlakovými vlnami je rychlejší reakce na změny provozních režimů. [15], [19]

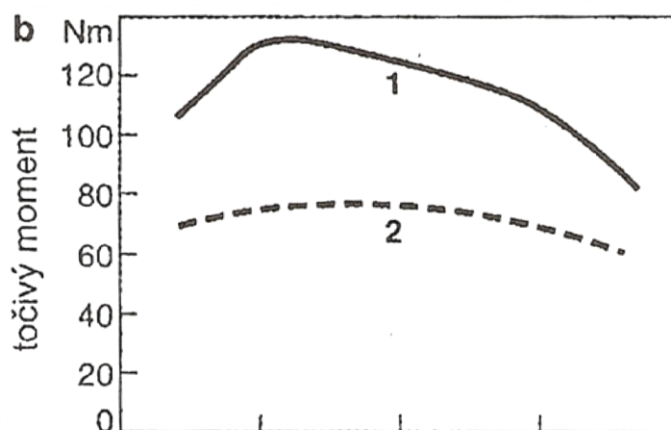


(1) píst, (2) vysokotlaké výfukové potrubí, (3) nízkotlaké výfukové potrubí, (4) skříň na výfukové straně, (5) lopatkový rotor, (6) skříň na plnicí straně, (7) čerstvý nasávaný vzduch, (8) ozubený řemen, (9) klikový hřídel, (10) plnicí potrubí)

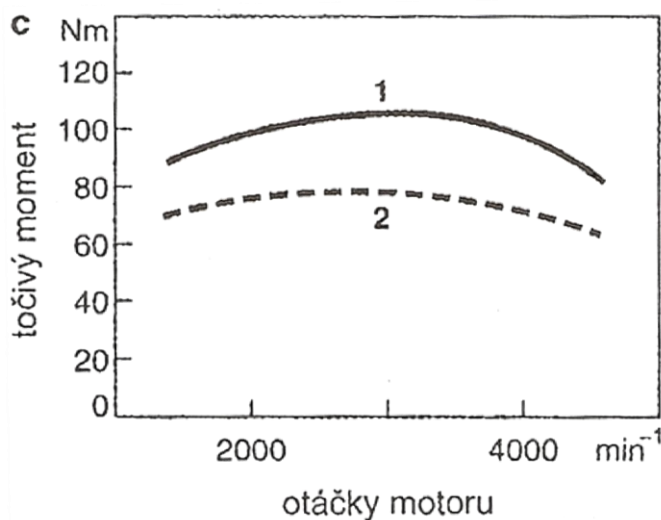
Obrázek 20: Přeplňovací zařízení Comprex vznětového motoru Mazda 626 2.0 [15]



Obrázek 21: Porovnání nepřepřňovaného motoru (1) s přepřňovaným (2) pomocí turbodmychadla [6]



Obrázek 22: Porovnání nepřepřňovaného motoru (1) s přepřňovaným (2) tlakovými vlnami [6]



Obrázek 23: Porovnání nepřepřňovaného motoru (1) s přepřňovaným (2) pomocí mechanického dmychadla [6]

## 4 Zhodnocení trendů ve vývoji vozidlového spalovacího motoru

Cílem každého vývojového centra je nahrazení nebo vylepšení a zdokonalení stávajících systémů. V automobilovém průmyslu je vždy během několika málo roků představen nový facelift úspěšné modelové řady dané značky. Rozvojem nových technologií a neustále narůstajícími požadavky ze strany zákazníků, jejich bezpečnosti, a nových předpisů jsou vyvíjeny a aplikovány nové technologie. Snahou automobilového průmyslu je vývoj nových atraktivních modelů s vysokou bezpečností, které budou vynikat nízkou spotřebou a zároveň vysokým výkonem, spolehlivostí a šetrností k životnímu prostředí.

Poslední trendy vývoje spalovacích motorů reagují na stále se zpřísňující emisní limity, limity CO<sub>2</sub> a na relativně vysoké ceny pohonných hmot. Obecně jsou zde snahy zachovat co nejmenší zdvihové objemy motorů současně se zajištěním jejich vysokého výkonu a točivého momentu motoru, nízké spotřeby, zajímavého designu při splněním všech předpisů. Z těchto důvodů jsou téměř všechny nově vyvíjené spalovací motory vybaveny různými druhy a kombinacemi přeplňování, nebo jsou využívány s kombinací alternativního pohonu.

### 4.1 BMW X6 M50d šestiválec třemi turbodmychadly

Automobilka BMW vyrábí dieselové motory od roku 1983 a od té doby se stala jedním z průkopníků v této oblasti. Trojice turbodmychadel byla v roce 2012 osazena na řadový šestiválec pod označením 50D a svými parametry se dostaly na úroveň dieselových osmiválců.

Princip přeplňování vychází z dvoustupňového přeplňování (dvou turbodmychadel rozdílných velikostí). Motor osazený trojicí turbodmychadel se skládá ze dvou menších vysokotlakých turbodmychadel a jedno většího turbodmychadla. Tato soustava turbodmychadel je zkonstruována tak, aby dodávala plynulý plnicí tlak ve všech provozních stavech.

K roztočení prvního turbodmychadla dojde okamžitě nad volnoběžnými otáčkami a díky variabilní geometrii lopatek dosáhne malé setrvačnosti, která se projeví v rychlé odezvě. Připojení velkého turbodmychadla probíhá kolem 1500 min<sup>-1</sup>. Činností jednoho malého a velkého turbodmychadla dosáhneme maximálního točivého momentu 740 Nm od 2000 min<sup>-1</sup>

Třetí malé turbodmychadlo je stejně jako první vybaveno variabilní geometrií lopatek. Je umístěno v samostatném kanálu výfukového potrubí, který je otevírán podtlakově ovládanou klapkou. Klapka je otevírána při výraznějším sešlápnutí plynového pedálu v otáčkách nad 2700 min<sup>-1</sup>, takže se při nižších otáčkách nepoužívá. Díky stejným vlastnostem jako první turbodmychadlo přispívá variabilní geometrie lopatek k nízké setrvačnosti a rychlé odezvě.

Při zvýšení otáček pracuje paralelně s malým turbodmychadlem i druhé velké turbo. Dalším zvyšování otáček dochází u prvního turbodmychadla k dosažení maximálního přetlaku. Protože již nedokáže využít všechnu energii výfukových plynů, dojde k otevření klapky a připojení třetího turbodmychadla. Zapojením třetího turbodmychadla se zároveň eliminují zpětné tlaky ve výfukovém potrubí, které jsou v případě potřeby regulovány obtokovým ventilem.

Výsledný výkon je 280 kW při otáčkách 4000 až 4400 min<sup>-1</sup> a oproti motoru Audi 4,2 V8 TDI s výkonem 258 kW má výkon o 22kW vyšší. Maximálního točivého momentu 740 Nm je dosaženo mezi 2000 - 3000 otáčkami za minutu. Tento přeplňovaný šestiválec je omezen

otáčkami na  $5400 \text{ min}^{-1}$ . Vysokého výkonu bylo rovněž dosaženo zvýšením tlaku ve spalovacích prostorech na 200 bar. Zvýšení tlaku s sebou nese větší namáhání motoru, a proto byla zesílena ložiska klikové hřídele. Blok a hlava motoru je vyrobeny pomocí vysokotlakého odlévání HIP a rovněž je upraven tvar klikové hřídele a ojnice. V důsledku zvýšení tlaků ve spalovacím prostoru došlo k úpravě vstřikování, kdy systém Common rail vstřikuje palivo do válců až na osmkrát. Motor splňuje normy EURO 6, je vybaven filtrem pevných částic, oxidačním katalyzátorem a katalyzátorem na odbourávání dusíku  $\text{NO}_x$ . [20], [21]

Model	X6 M50d
Převodovka	8A
Zdvihový objem [ $\text{cm}^3$ ]	2993
Válce/ventily	6.4
Největší výkon [ $\text{kW}/\text{min}^{-1}$ ]	280/4000-4400
Největší toč. mom. [ $\text{Nm}/\text{min}^{-1}$ ]	740/2000-3000
Max. rychlost [ $\text{km}/\text{h}$ ]	250
Zrychlení 0-100 $\text{km}/\text{h}$ [s]	5,3
Komb. spotřeba [ $\text{l}/100 \text{ km}$ ]	7,7

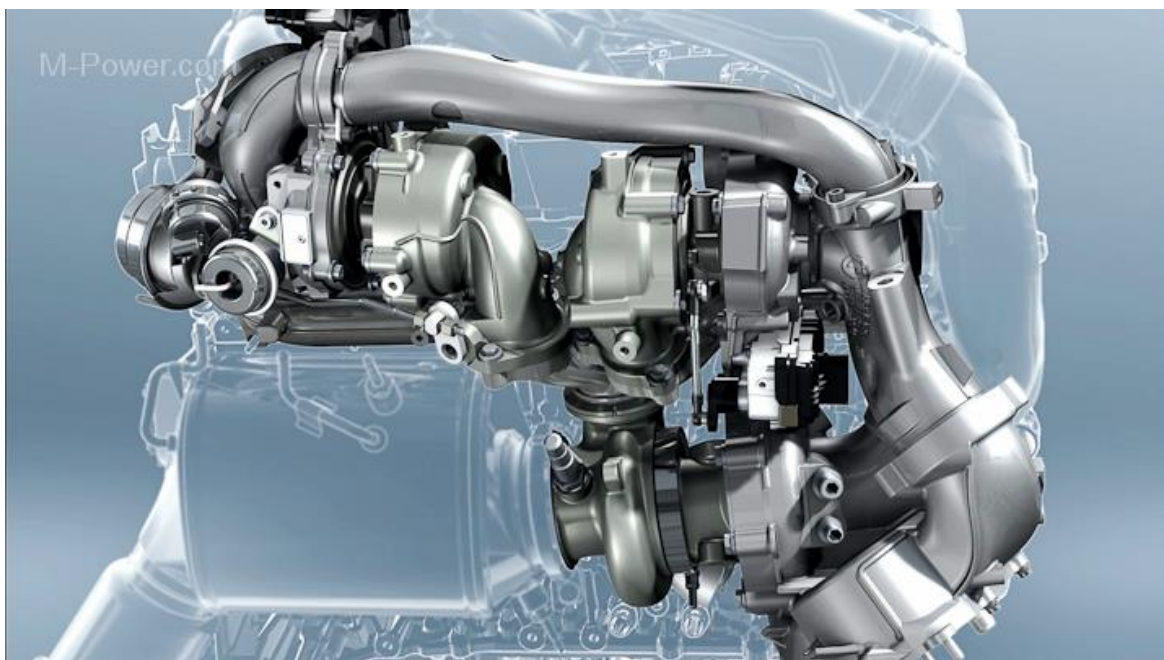
Tabulka 2: technické údaje BMW M50d [20]



Obrázek 24: BMX X6 M50b [22]

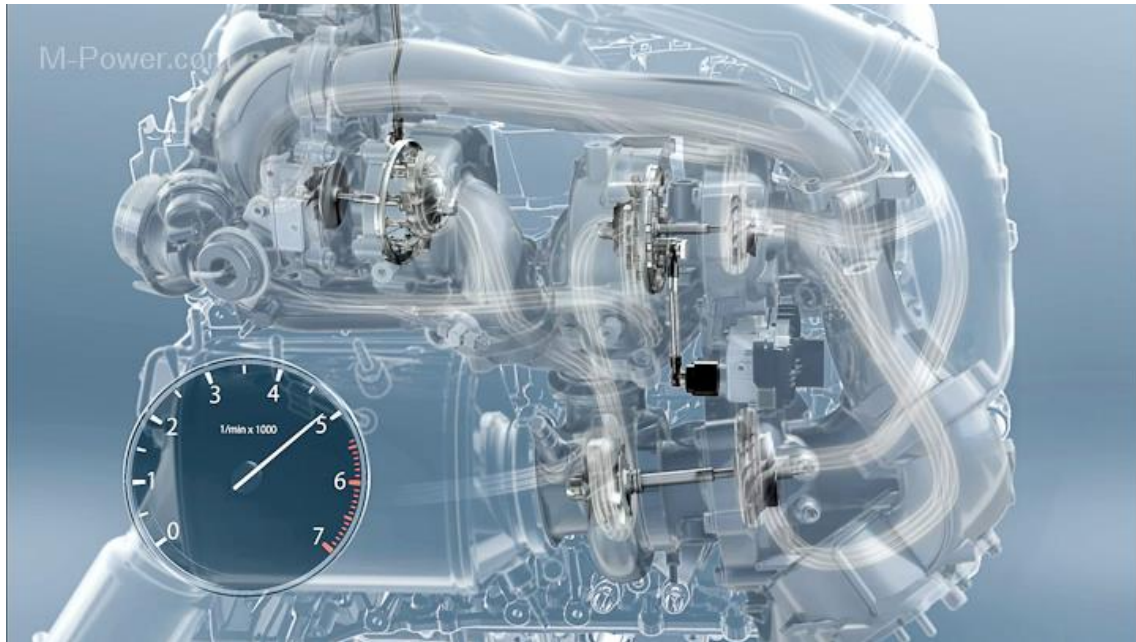


Obrázek 25: Motor BMW X6 M50d [23]

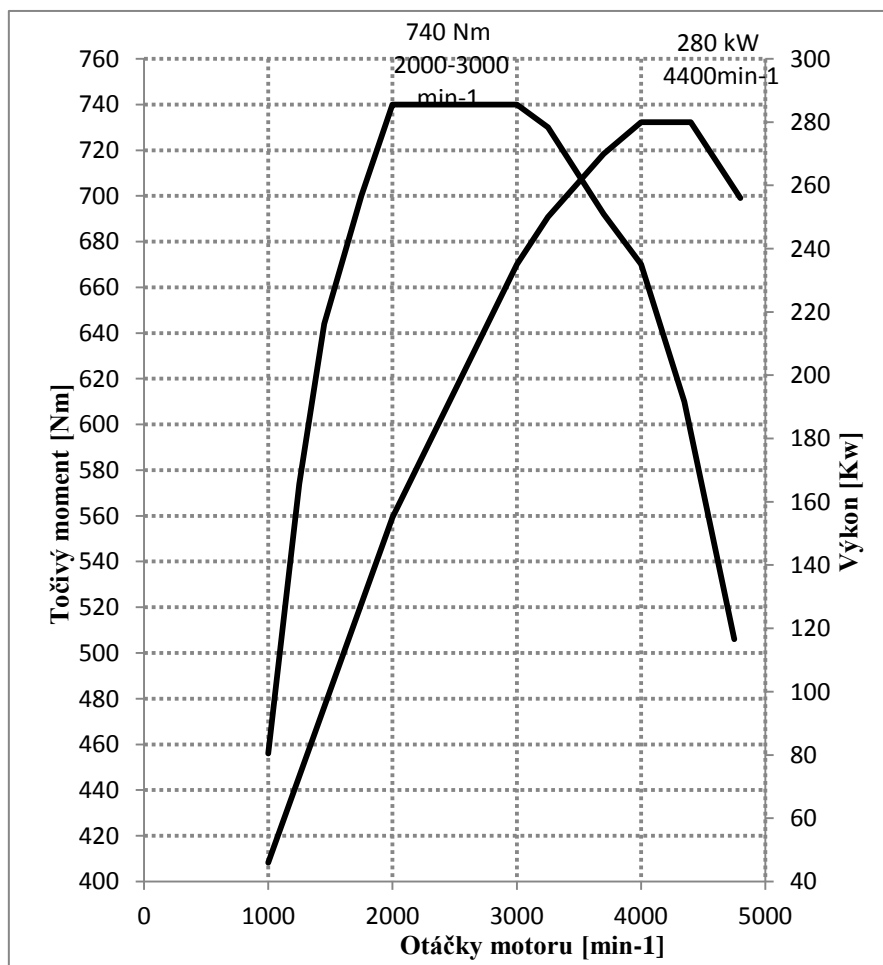


Obrázek 26: Turbodmychadla modelu BMW X6 M50D [23]





Obrázek 27: Činnost turbodmychadel při otáčkách pod  $5000 \text{ min}^{-1}$  [23]



Obrázek 28: Výkonová a momentová charakteristika motoru BMW X6 M50d [22]

## 4.2 Elektricky poháněné turbodmychadlo Valeo

Technologie elektricky poháněného turbodmychadla VTES (Variable Torque Enhancement System) vyvinutá britskou firmou CPT (Controlled Power Technologies) se při akvizici stala součástí francouzské firmy Valeo.

Dnes jsou pro zvýšení výkonu motorů nejčastěji využívány dva principy přepřívání. Turbodmychadlo roztáčené výfukovými plyny, které ovšem vykazuje ztráty ve výfukovém potrubí a současně zpožděnou reakci na pohyb plynového pedálu a mechanické dmychadlo hnané rozvodovým řetězem, který snižuje účinnost motoru.

Technologie přepřívání elektricky poháněného turbodmychadla tak představuje nový směr vývoje. Využití elektrického pohonu turbodmychadla dojde především ke snížení odporů a odstranění turbo efektu. Elektromotor roztočí turbodmychadlo na  $70\,000\text{ min}^{-1}$  za 350 milisekund. Další výhodou je přesnost regulace dávkování směsi paliva se vzduchem a minimalizace výkonových ztrát, kdy není potřeba vyšší výkon motoru. Turbodmychadlo lze napájet brzdou rekuperační energií, nebo solárními panely. Výsledným efektem bude nižší spotřeba paliva, emise  $\text{CO}_2$  a cena ve srovnání s např. dvoustupňovým přepříváním.

Turbodmychadlo Valeo bylo zkonstruováno především pro zvýšení výkonu za nízkých otáček u automobilů vybavených systémem Start/Stop. V současné době je aplikováno a testováno na přepřívávaných i nepřepřívávaných zážehových motorech a turbodieselech. Elektricky poháněná dmychadla budou aplikována v automobilech s elektrickými okruhy 12 V a 48 V.

Turbodmychadlo Valeo bylo testováno na voze LC Super Hybrid, jehož základem je Volkswagen Passat vybavený přepříváním zážehovým čtyřválcem Volkswagen 1,4 l se systémem Start/Stop a olovenými akumulátory společnosti Exide. Testovací data ukazují, že přidáním těchto technologií došlo ke zvýšení výkonu o 17,5 kW a točivého momentu o 75 Nm, ke snížení doby zrychlení z 0 na 100 km/h o 2,4 s a ke snížení průměrné spotřeby paliva 0,9 l/100km. Zvýšením výkonu se motor o objemu 1,4 l dostal na úroveň motorů o objemu 1,8 l při spotřebě o 3,4 l/100km nižší. [24], [25]



Obrázek 29: Elektrické dmychadlo Valeo [24]

### 4.3 Koncept Audi RS5 TDI

Během posledního čtvrt století prošly vznětové motory výrazným vývojem. Převažují systémy s přímým vstřikováním a s přeplňováním pomocí dmychadla s variabilní geometrií rozváděcích lopatek.

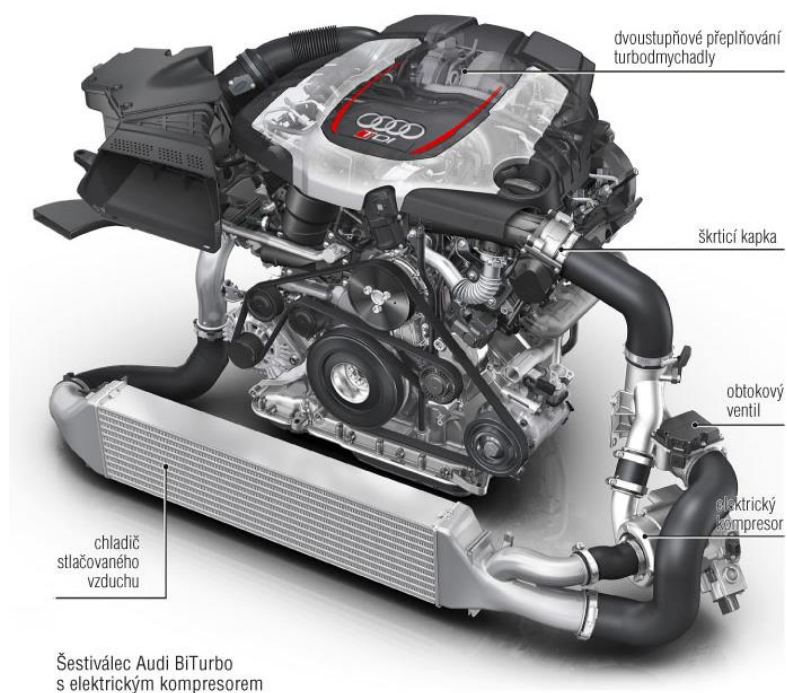
Automobilová společnost Audi přišla jako jedna z prvních se studií modelu Audi RS5 TDI concept, kde je elektricky poháněné dmychadlo integrováno do sacího traktu. Koncept je připraven ve dvou variantách 3.0 TDI. V prvním případě je v motoru integrováno jedno elektricky poháněné dmychadlo. A6 TDI concept dosahuje výkonu 240 kW a točivého momentu 650 Nm v rozmezí 1500 – 3500 otáček za minutu.

U druhé výkonnější verze RS5 TDI concept disponuje objemem 2967 cm<sup>3</sup> o výkonu 283 kW a točivém momentu 750Nm v rozmezí 1250 až 2000 otáček za minutu. V nízkých otáčkách je zapojeno elektrické dmychadlo, které pracuje zároveň s malým turbodmychadlem. Spojením dvou turbodmychadel je odstraněn turboefekt a zajištěna okamžitá reakce při změně otáček. Ve vysokých otáčkách je motor přeplňován velkým turbodmychadlem, které je umístěno v zadní části motoru. Vzduch je veden mimo elektrické dmychadlo a je dosahováno plnicího tlaku 2,4 baru. Audi RS5 concept vybaven osmistupňovou samočinnou převodovkou a pohonem všech kol dosahuje zrychlení z 0 na 100 km/h přibližně za 4s a z 0 na 200 km/h za 16s. Při kombinované spotřebě 5,3 l/100km představují emise CO<sub>2</sub> okolo 140 g/km. Elektrické turbodmychadlo dosahuje otáček 72 000 min<sup>-1</sup> za 250 milisekund. Elektrické turbodmychadlo je napájeno samostatným elektromotorem o výkonu 7 kW, tedy zcela nezávisle a bez odebrání výkonu motoru. V době, kdy je motor vypnutý je dodána elektrická energie kompaktním akumulátorem Li-Ion za použití elektrické sítě o napětí 48V.

Důležitou roli představuje akumulátor Li-Ion, jenž umožní využití výkonnějšího alternátoru (až 10kW) a tím se zvětší účinnost rekuperace kinetické energie. Elektrická přenosová síť se 48V přenese více energie a je tak připravena na připojení dalších elektronicky ovládaných systémů, které řídí elektricky poháněná zařízení. Jako příklad uvedeme připojení elektronicky řízeného vodního a olejového čerpadla, elektrického topení, elektricky poháněné turbodmychadlo apod. Do palubní sítě o 12V se elektrická energie přenáší přes měnič stejnosměrného napětí DC/DC. Přenos většího napětí znamená menší proudy, proto lze zmenšit průřezy použitých kabelů a tím částečně vykompenzovat hmotnost elektrické soustavy. [26]

V květnu 2015 byl u rakouského jezera Wörthersee představen koncept Audi TT clubsport turbo, ve kterém je kromě klasického turbodmychadla použito elektricky poháněné dmychadlo. Díky této kombinaci přeplňování dosahuje 2,5 litrový benzínový pětiválec TFSI výkonu 440 kW a točivého momentu 650Nm. Zrychlí z 0 na 100 km/h za 3,6s. [27]

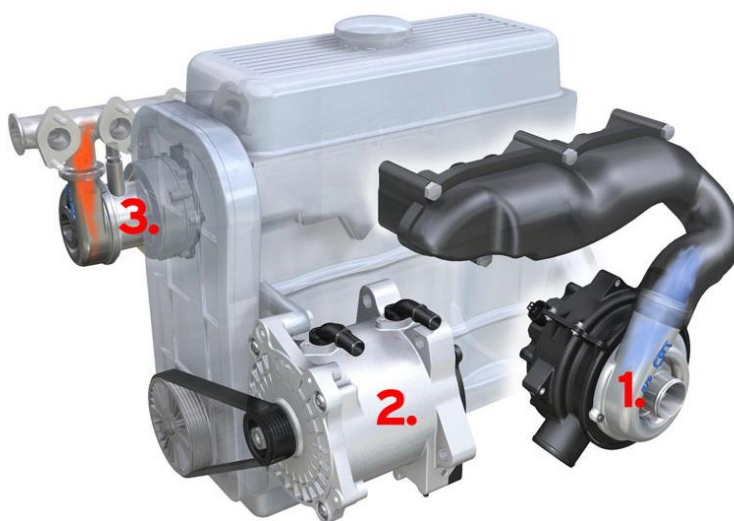
Mezi chystané novinky se řadí sportovní model SUV značky Audi řady SQ7, které by mělo být poháněno dieslovým osmiválcem o objemu 4,0 l, nebo 4,2 l. Pohon bude doplněn dvěma elektrickými dmychadly, která zajistí ostrou odezvu na plyn a odstraní turboefekt. Dalším přínosem elektrických dmychadel je úspora paliva přibližně o 7 až 20 procent. Nevýhodou tohoto systému jsou vyšší pořizovací náklady a ztráty při roztáčení dmychadla. Předpokládá se, že výkon se bude pohybovat nad hranicí 294 kW a zrychlení z 0 na 100 za 5,5 s. Oficiální odhalení modelu Audi SQ7 by mělo proběhnout v roce 2016. [28], [29]



Obrázek 30: Motor Audi RS5 TDI Concept [26]

#### 4.4 Ideální motor podle Controlled Power Technologies

Koncept ideálního motoru firmy CPT využívá zbytkové energie plynů a elektrické turbodmychadlo. Zbytková kinetická energie výfukových plynů je v turbogenerátoru přeměněna na elektrickou energii, která může být využita k pohonu elektrického turbodmychadla. Výhodou elektrického turbodmychadla je okamžité zvýšení plnicího tlaku válců už od nízkých otáček a odstranění turboefektu. Vodou chlazený startér generátor slouží jako zdroj energie pro elektrické turbodmychadlo. Využití elektricky poháněného turbodmychadla a turbogenerátoru zvyšuje účinnost motoru, snižuje spotřebu paliva a přispívá k nižší produkci emisí.



1 – Elektricky poháněné dmychadlo, 2 – startér – generátor, 3 - turbogenerátor

Obrázek 31: Ideální motor podle CPT [30]

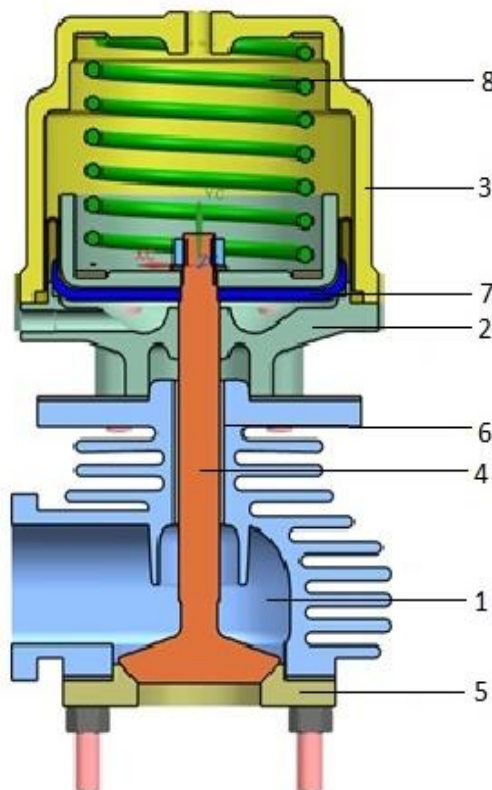
## 5 Konstrukční řešení

Zadání: Vytvořit sestavu obtokového ventilu a navrhnout materiál ventilu.

Hlavní funkcí obtokového ventilu je regulace tlaku turbodmychadla. Turbodmychadlo je navrženo tak, aby se i při malých otáčkách motoru dosáhlo efektu přeplňování. Při vysokých otáčkách motoru proudí přes turbodmychadlo velké množství výfukových plynů a mohlo by dojít k přetížení. Tomuto stavu lze zabránit několika způsoby: mechanicko pneumatickou regulací, elektronickou regulací a změnou průtočného průřezu u nastavitelných rozváděcích lopatek.

Mechanicko pneumatická regulace snižuje výkon turbíny odvedením části výfukových plynů obtokem do výfukového potrubí. Stavební strukturu obtokového ventilu lze rozdělit na tři části: skříň, mezikus a kryt. Ve skříni je uloženo ventilové vedení, kde se pohybuje ventil, který dosedá na sedlo ventilu. Mezi krytem a mezikusem je vložena tlaková membrána, která je pomocí šroubového spoje připevněna k ventilu. Ventil je k ventilovému sedlu přitlačován předepnutou pružinou.

Zdvih ventilu je ovládán plnicím tlakem turbodmychadla. Tlak působí proti předepnuté pružině na tlakovou membránu. Při překonání předepínací síly pružiny dojde ke zdvihu ventilu a odvedení výfukových plynů mimo turbínu.



1 skříň, 2 mezikus, 3 kryt, 4 ventil, 5 sedlo ventilu, 6 ventilové vedení, 7 membrána, 8 pružina

Obrázek 32: Řez modelu obtokového ventilu s mechanicko pneumatickou regulací [31]

Ventily spalovacích motorů jsou vysoce namáhané součásti, na které jsou kladeny vysoké požadavky. Jsou vystaveny vysokému teplotnímu, chemickému a mechanickému namáhání. Teploty ve válci motoru se u zážehových motorů pohybují v rozmezí 800 °C – 850 °C a u vznětových motorů v rozmezí 600 °C – 650 °C. Takto vysoké teploty mohou způsobovat deformace, propálení ventilu a přispívat ke korozi povrchu. Materiál nesmí při vysokých teplotách ztrácet tvrdost ani pevnost, musí mít velkou vrubovou houževnatost a dobrou tepelnou vodivost. Zároveň by měl odolávat korozním účinkům zplodin, být odolný proti opotřebení a málo náchylný k opalování. [6], [32]

Obtokový ventil je ve výfukové soustavě umístěn mezi turbínou turbodmychadla a spalovací komorou. Lze předpokládat mírné snížení teploty výfukových plynů při cestě ze spalovací komory k obtokovému ventilu.

Na základě materiálových požadavků, provozním prostředí a namáhání lze použít následující materiály:

INCONEL X750

NIMONIC 80A

Slitiny titanu

Ocel austenitického složení (Fe 0,5 C 0,3 Si 9 Mn4 Ni21 Cr 0,5)

Z těchto materiálů se zaměříme na superslitinu INCONELX750 a NIMONIC 80A. Porovnáním jejich vlastností bude vybrán konečný materiál pro ventil.

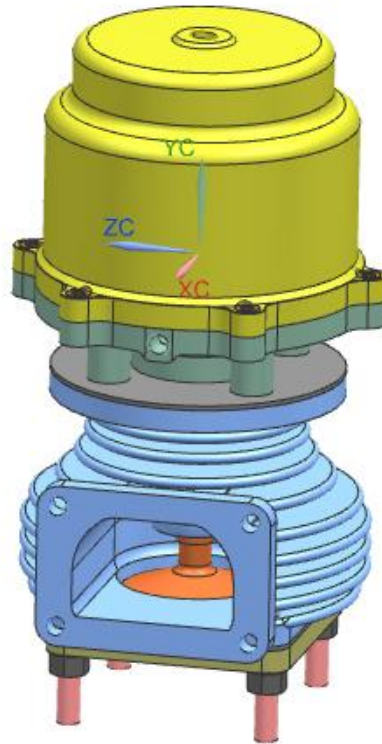
INCONEL X750 (Ni + Co min 70% 0,08C 14-17Cr 5-9Fe 0,4-1Al 1Ti ), precipitačně vytvrzená. [33]

NIMONIC 80A je nikl-chromová, precipitačně vytvrzená Al a Ti. Slitina vhodná do teplot 815°C s dobrou odolností proti korozi a oxidaci. [34]

Název veličiny	Měrná hmotnost	Mez pevnosti	Mez kluzu 0,2%	Tažnost	Teplota do
Jednotky	[g/cm <sup>3</sup> ]	[MPa]	[MPa]	[%]	[°C]
Inconel X750	8,28	1110	634	22	816
Nimonic 80A	8,19	1241	793	30	815

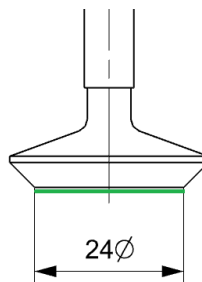
Tabulka 3: mechanické vlastnosti vybraných materiálů [34], [35]

Na základě mechanických vlastností (tabulka 1) byl vzhledem k vyšší mezi pevnosti a kluzu vybrán materiál NIMONOC 80A. Z tohoto materiálu bude vyroben ventil a ventilové sedlo obtokového ventilu.



Obrázek 33 Model obtokového ventilu [31]

Kontrolní tlakový výpočet plynu působícího na čelo ventilu. Maximální tlak, který bude působit na čelo ventilu před jeho zdvihem zvolíme  $p = 2 \text{ MPa}$ , koeficient bezpečnosti  $k=1,5$



Obrázek 34 Zobrazení čela ventilu

$$\sigma_{max} \leq \sigma_D$$

$$p \leq \sigma_D$$

$$\sigma_D = \frac{Re}{k} = \frac{793 \cdot 10^6}{1,5} = 396,5 \cdot 10^6$$

$$2 \cdot 10^6 \leq 396,5 \cdot 10^6$$

$\sigma_{max} \leq \sigma_D$  ..... Tlak působící na čelo ventilu vyhovuje

## 6 Závěr

Při vývoji spalovacích motorů je snaha dosáhnout co největší účinnosti celého spalovacího procesu a maximálního využití vzniklé energie. Proto je potřeba se v každém provozním stavu co nejvíce přibližovat dokonalému spalování, zajistit potřebný směšovací poměr paliva a vzduchu, správné načasování ventilů, vstřikování a efektivní přeplňování. Dále pak co nejlépe využít veškerou možnou energii uvolněnou při spalovacím procesu pro pohon automobilu. Pro srovnání lze použít příklad dvoustupňového přeplňování, kdy první menší turbodmychadlo částečně odstraňuje turboefekt a elektricky poháněné dmychadlo Valeo, které je řízeno elektronickou řídicí jednotkou automobilu a je schopno okamžité reakce v závislosti na zatížení motoru.

Vývojem nových technologií dochází k postupnému zdokonalování, nebo nahrazení stávajících systémů. Jako příklad lze zvolit mechanicky poháněné olejové čerpadlo, které je poháněno motorem a odebírá mu určitou energii. Vzhledem k mechanickému propojení s motorem je závislé na otáčkách a nastaveno tak, aby i při nízkých otáčkách dodávalo dostatečný mazací tlak. Při vyšších otáčkách tlak roste a jeho zvýšení již nezlepší účinnost mazání. Proto je vhodné mechanicky poháněné olejové čerpadlo nahradit elektronicky řízenými čerpadly. Ta jsou řízena řídicí jednotkou motoru tak, aby v každém provozním stavu dodávala potřebný tlak. Maximální využití energie zvýší účinnost celého spalovacího motoru, a proto lze předpokládat, rozšíření a využití potenciálu elektrického turbodmychadla v sériové výrobě.

V konstrukčním návrhu byla vytvořena sestava obtokového ventilu. Materiál ventilu a sedla ventilu byl s ohledem na vysoké požadavky ventilu zvolena superslitina NIMONIC 80A.



## Seznam použité literatury:

- [1] Gscheidle, R. *Příručka pro automechanika 3*. Praha : Sobotáles, 2001.
- [2] Ferenc, B. *Spalovací motory*. Brno : Computer Press, 2006.
- [3] Mechmes. *Emise škodlivin výfukových plynů*. [Online] [Citace: 15. 02 2015.] [http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-204\\_01\\_emiseskodlivinvevyfukovychplynech\\_zakladnipojmy.pdf](http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-204_01_emiseskodlivinvevyfukovychplynech_zakladnipojmy.pdf).
- [4] Autolexicon. *Emisní normy*. [Online] [Citace: 20. 02 2015.] [<http://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>].
- [5] Auto cz. *Částicový filtr*. [Online] [Citace: 15. 02 2015.] <http://www.auto.cz/casticovy-filtr-pro-vznetove-motory-opel-17604/foto?foto=0>.
- [6] Vlk, F. *Automobilová technická příručka*. Brno : Nakladatelství a Vydavatelství VLK, 2003.
- [7] Eluc. *Přepřínování motoru*. [Online] [Citace: 01. 03 2015.] <http://eluc.cz/verejne/lekce/1462>.
- [8] Autozine. *Intake and Exhaust*. [Online] [Citace: 06. 03 2015.] [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/Intake\\_exhaust.html](http://www.autozine.org/technical_school/engine/Intake_exhaust.html).
- [9] Autoznanosti. *Vykon a krouticí moment*. [Online] [Citace: 07. 04 2015.] <http://www.autoznanosti.cz/index.php/motor/31-vykon-a-kroutici-moment.html>.
- [10] books. *Automobily Škoda Octavia II*. [Online] [Citace: 09. 03 2015.] <https://books.google.cz/books?id=HjIk-MpmOMAC&pg=PA287&lpg=PA287&dq=variabiln%C3%AD+sac%C3%AD+potrub%C3%AD&source=bl&ots=jJSTCmcAF3&sig=czXkrvibke3YRTxA2ZEaAHVg3gg&hl=cs&sa=X&ei=IU-LVarmC8-XyAS9i4HgBA&ved=0CD0Q6AEwBjgK#v=onepage&q=variabiln%C3%AD%20sac%C3>.
- [11] Coptel. *Rezonanční přepřínování*. [Online] [Citace: 20. 04 2015.] <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=43303&docGroup=-1&cmd=0&instance=4>.
- [12] Vlk, F. *Příslušenství vozidlových motorů*. Brno : Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2002.
- [13] Autoznanosti. *Turbodmychadlo*. [Online] [Citace: 26. 03 2015.] <http://www.autoznanosti.cz/index.php/motor/8-turbodmychadlo.html>.
- [14] Auto cz. *Přepřínování 2 díl: turbodmychadla*. [Online] [Citace: 23. 01 2015.] <http://www.auto.cz/preplnovani-2-dil-turbodmychadla-16765>.
- [15] Jan Z., Ždánský B. *Automobily III*. Brno : Avid, 2006.
- [16] Auto cz. *Přepřínování 1 díl: turbodmychadla*. [Online] [Citace: 23. 01 2015.] <http://www.auto.cz/preplnovani-1-dil-teorie-mechanicke-preplnovani-16778>.
- [17] Wikipedia. *Turbodmychadlo*. [Online] [Citace: 11. 3 2015.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Turbodmychadlo>.
- [18] Turbo-levně. *Variabilní naklápění lopatek*. [Online] [Citace: 09. 04 2015.] <http://www.turbo-levne.cz/navody/variabilni-naklapeni-lopatek>.

- [19] Coptel. *Přepřínování Compreh.* [Online] [Citace: 23. 02 2015.] <http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=43333&docGroup=-1&cmd=0&instance=4>.
- [20] Auto.cz. *Jak pracují tři turbína.* [Online] [Citace: 09. 03 2015.] <http://www.auto.cz/bmw-m50d-280-kw-740-nm-jak-pracuji-tri-turba-64627>.
- [21] Gizmag. *BMW's amazing new 381 bhp 740 Nm 45 mpg triple turbo diesel.* [Online] [Citace: 09. 03 2015.] <http://www.gizmag.com/bmw-adds-four-triple-turbo-diesel-performance-m-cars/21227/>.
- [22] Gizmag. *BMW adds four triple turbo diesel performance M cars.* [Online] [Citace: 09. 03 2015.] <http://www.gizmag.com/bmw-adds-four-triple-turbo-diesel-performance-m-cars/21227/>.
- [23] M-power. *M Performance TwinPower Turbo Inline 6-Cylinder Diesel Engine.* [Online] [Citace: 09. 03 2015.] M Performance TwinPower Turbo Inline 6-Cylinder Diesel Engine.
- [24] Autoweek. *Elektricky poháněné dmychadlo Valeo.* [Online] [Citace: 15. 03 2015.] [http://www.autoweek.cz/cs-trendy-elektricky\\_pohanene\\_dmychadlo\\_valeo-2481](http://www.autoweek.cz/cs-trendy-elektricky_pohanene_dmychadlo_valeo-2481).
- [25] Autorevue. [Online] Elektrické dmychadlo opět blíže skutečnosti. [Citace: 15. 03 2015.] [http://www.autorevue.cz/elektricke-preplnovani-opet-blize-skutecnosti\\_3](http://www.autorevue.cz/elektricke-preplnovani-opet-blize-skutecnosti_3).
- [26] Automobilrevue. *Audi RS5 TDI Concept.* [Online] [Citace: 17. 05 2015.] [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/audi-rs5-tdi-concept-e-kompresor\\_43951.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/audi-rs5-tdi-concept-e-kompresor_43951.html).
- [27] Motorsvět. *Koncept Audi RR Clubsport turbo.* [Online] [Citace: 28. 05 2015.] [http://motorsvet.cz/clanek/koncept\\_audi\\_tt\\_clubsport\\_turbo\\_ma\\_600\\_koni\\_a\\_na\\_stovce\\_je\\_z\\_a\\_3\\_6\\_sekundy](http://motorsvet.cz/clanek/koncept_audi_tt_clubsport_turbo_ma_600_koni_a_na_stovce_je_z_a_3_6_sekundy).
- [28] Autojournal. *Audi Q7 dostane diesel a elektrická turbína.* [Online] [Citace: 28. 05 2015.] <http://www.autojournal.cz/audi-q7-dostane-diesel-a-elektricka-turba>.
- [29] Autoforum. *Audi SQ7 už testují v provozu.* [Online] [Citace: 28. 05 2015.] <http://www.autoforum.cz/predstaveni/audi-sq7-uz-testuji-v-provozu-v8-tdi-e-turbo-doda-400-efektivnich-koni/%5D>.
- [30] Atzoline. *Concept for low-cost low voltage hybridisation.* [Online] [Citace: 08. 02 2015.] <http://www.atzonline.com/Artikel/3/11851/Concept-for-Low-cost-Low-voltage-Hybridisation.html>.
- [31] CAD software Siemens NX.
- [32] Materialing. *Materialy motorových částí.* [Online] [Citace: 30. 05 2015.] [http://www.materialing.com/materialy\\_motorov\\_casti](http://www.materialing.com/materialy_motorov_casti).
- [33] Specialmetals. *INCONEL alloy X750.* [Online] <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20X-750.pdf>.
- [34] Bibus. *Special metals.* [Online] [Citace: 30. 05 2015.] [http://new.bibus.cz/pdf/Special\\_Metals/Nikl/Niklove\\_slitiny.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/Niklove_slitiny.pdf).
- [35] Hightempmetals. *High temp metal.* [Online] [Citace: 30. 05 2015.] <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconelX750data.php>.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Směšovací poměry, podíl vzduchu [2] .....	4
Obrázek 2: Složení výfukových plynů [4] .....	5
Obrázek 3: Částicový filtr pro vznětové motory Opel [6] .....	6
Obrázek 4: Variabilní sací potrubí [10].....	8
Obrázek 5: Výkonová a momentová charakteristika motoru s proměnnou délkou sacího potrubí [2].....	9
Obrázek 6: Točivý moment kombinovaného rezonančního a pulzačního přeplňování [11] ...	10
Obrázek 7: Soustava rezonančního a pulzačního potrubí [2].....	10
Obrázek 8: Rootsovo dmychadlo [12] .....	11
Obrázek 9: Dmychadlo s otočnými písty [12] .....	11
Obrázek 10: Spirálové dmychadlo [12] .....	12
Obrázek 11: Tvary vačkové hřídele [2].....	13
Obrázek 12: Zdvihová křivka ventilů při nízkých a vysokých otáčkách [2].....	13
Obrázek 13: Zdvihová křivka ventilu [2] .....	14
Obrázek 14: Turbodmychadlo poháněné výfukovými plyny [2] .....	15
Obrázek 15: Porovnání momentové a výkonové charakteristiky motoru o konstantním zdvihovém objemu s přeplňovaným [2].....	16
Obrázek 16: Schéma motoru s turbodmychadlem poháněným výfukovými plyny [2] .....	17
Obrázek 17: Regulace plnicího tlaku s obtokovou klapkou [2] .....	18
Obrázek 18: Obtokový ventil [2] .....	18
Obrázek 19: Nastavení rozváděcích lopatek variabilního turbodmychadla [2] .....	20
Obrázek 20: Přeplňovací zařízení Comprex vznětového motoru Mazda 626 2.0 [15] .....	21
Obrázek 21: Porovnání nepřeplňovaného motoru (1) s přeplňovaným (2) pomocí turbodmychadla [7] .....	22
Obrázek 22: Porovnání nepřeplňovaného motoru (1) s přeplňovaným (2) tlakovými vlnami [7] .....	22
Obrázek 23: Porovnání nepřeplňovaného motoru (1) s přeplňovaným (2) pomocí mechanického dmychadla [7].....	22
Obrázek 24: BMX X6 M50b [22] .....	24
Obrázek 25: Motor BMW X6 M50d [23] .....	25
Obrázek 26: Turbodmychadla modelu BMW X6 M50D [23].....	25
Obrázek 27: Činnost turbodmychadel při otáčkách pod $5000 \text{ min}^{-1}$ [23] .....	26
Obrázek 28: Výkonová a momentová charakteristika motoru BMX X6 M50d [22].....	26
Obrázek 29: Elektrické dmychadlo Valeo [24].....	27

Obrázek 30: Motor Audi RS5 TDI Concept [26].....	29
Obrázek 31: Ideální motor podle CPT [30].....	29
Obrázek 32: Řez modelu obtokového ventilu s mechanicko pneumatickou regulací [31].....	30
Obrázek 33 Model obtokového ventilu [31] .....	32
Obrázek 34 Zobrazení čela ventilu.....	32

## Seznam tabulek:

Tabulka 1: Emisní normy (Zážehové motory, vznětové motory) [5].....	5
Tabulka 2: technické údaje BMW M50d [20] .....	24
Tabulka 3: mechanické vlastnosti vybraných materiálů [34], [35].....	31

## Výkresová dokumentace

- BP-01-06-2015-001 OBTOKOVÝ VENTIL, *výkres sestavy*
- BP-01-06-2015-002 VENTIL, *výrobní výkres*
- BP-01-06-2015-003 SEDLO VENTILU, *výrobní výkres*