



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  

---

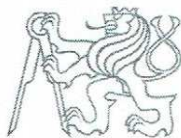
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Petr Prouza

VÝVOJ SPALOVACÍHO MOTORU A JEHO  
ÚČINNOSTI

Diplomová práce

**ROK ODEVZDÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE 2015**



**K616.....Ústav dopravních prostředků**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Petr Prouza**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Vývoj spalovacího motoru a jeho účinnost**

Název tématu (anglicky): The development of internal combustion engine and its effectiveness

### **Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Konstrukční prvky spalovacího motoru a jejich vliv na účinnost
- Vývoj konstrukčních prvků v čase a souvislost s účinností
- Vývoj spalovacího prostoru a vliv na účinnost
- Možnosti zvyšování účinnosti konstrukcí spalovacího prostoru
- Možnosti zvyšování účinnosti konstrukčními materiály spalovacího motoru

Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: REMEK, Branko. Vývoj automobilu a spalovacího motoru. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2004, ISBN 9788001029398, 8001029395.  
VLK, František. Vozidlové spalovací motory. Vyd. 1. Brno, 2007, ISBN: 9788023887563, 8023887564.  
MACEK, Jan. Spalovací motory I. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2007.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří First**

Datum zadání diplomové práce: **26. června 2014**

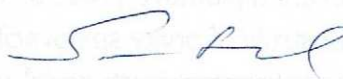
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2015**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
- b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.  
vedoucí  
Ústavu dopravních prostředků



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Petr Prouza  
jméno a podpis studenta

V Praze dne ..... 2. června 2015

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Jiřímu Firstovi za odborné vedení a konzultování diplomové práce a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. V neposlední řadě je mou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání 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 (autorský zákon).

V Praze dne 28. listopadu 2015

.....

Podpis

---

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

---

## FAKULTA DOPRAVNÍ

### VÝVOJ SPALOVACÍHO MOTORU A JEHO ÚČINNOSTI

**diplomová práce**

listopad 2015

Bc. Petr Prouza

#### **Abstrakt**

Diplomová práce řeší veškerá konstrukční řešení a vhodná nastavení pro dosažení co nejvyšší možné účinnosti pístového spalovacího motoru (zážehového a vznětového). Mnoho prostoru je věnováno spalovacímu prostoru, neboť právě v něm se odehrávají nejdůležitější děje celého motoru. Cílem práce je sjednotit veškeré vědění ohledně zvyšování účinnosti.

#### **Abstract**

This thesis solves all design and appropriate settings to achieve the highest possible efficiency of the internal combustion engine (petrol and diesel engine). Much space is dedicated to the combustion chamber. The most important parts of the process is happening there. Aim of the thesis is to describe all part of increasing the efficiency of the engine.

*Klíčová slova:* pístový spalovací motor, spalovací prostor, válec, píst, hlava válce, účinnost, hoření, konstrukční materiály, zážeh, ventil, tryska, palivo

*Keywords:* piston engine, combustion chamber, cylinder, piston, cylinder head, efficiency, combustion, construction materials, ignition, valve, nozzle, fuel

## Obsah

Úvod.....	9
1 Konstrukční prvky spalovacího motoru a jejich vliv na účinnost.....	10
1.1 Teorie účinnosti .....	10
1.2 Účinnost spalovacího motoru.....	11
1.2.1 Princip činnosti spalovacího motoru .....	11
1.2.2 P-V diagram čtyřdobého zážehového motoru.....	13
1.2.3 Termická účinnost spalování .....	15
1.2.4 Sankeyuv diagram .....	15
1.3 Konstrukční prvky ovlivňující účinnost .....	16
1.3.1 Paliva .....	18
1.3.2 Kompresní poměr .....	25
1.3.3 Hoření.....	27
1.3.4 Zážeh.....	37
2 Vývoj konstrukčních prvků v čase a souvislost s účinností .....	40
2.1 Historické automobily se spalovacím motorem.....	40
2.1.1 Isaac de Rivaz .....	40
2.1.2 Benz Patent-Motorwagen .....	41
2.2 Historické vynálezy zvyšující účinnost .....	42
2.2.1 Karburátor.....	42
2.2.2 Elektrické zapalování – Bosch.....	44
2.2.3 Ventilové rozvody .....	45
2.2.4 Vstřikování paliva.....	48
2.2.5 Přepřehování (turbo).....	51
2.2.6 Řízený předstih.....	53
2.2.7 Přehled konstrukčních prvků v čase .....	53
3 Vývoj spalovacího prostoru a vliv na účinnost.....	55
3.1 Spalovací prostor .....	55
3.1.1 Vznětové motory.....	55
3.1.2 zážehové motory .....	58
4 Možnosti zvyšování účinnosti konstrukcí spalovacího prostoru .....	60
4.1 Kompresní poměr .....	60
4.1.1 Antidetonační konstrukce spalovacího prostoru .....	60
4.2 Víření .....	61

4.3	Vstříkovací trysky .....	62
4.3.1	Otvorové trysky .....	62
4.3.2	Čepové trysky .....	63
4.3.3	Dvojité vstříkování.....	64
5	Možnosti zvyšování účinnosti konstrukčními materiály spalovacího motoru ..	65
5.1	Součásti tvořící plochy spalovací komory a jejich konstrukční materiály	66
5.1.1	Válce.....	66
5.1.2	Hlava válce .....	68
5.1.3	Píst .....	68

## Seznam použitých symbolů, veličin a fyzikálních jednotek

$A$	Atkinsonův poměr [-]
$C$	uhlík
$^{\circ}C$	Celsiův stupeň (jednotka teploty)
$CO$	oxid uhelnatý
$CO_2$	oxid uhličitý
$E$	energie [J], [W.s], [kWh]
$E_K$	kinetická energie [J]
$E_P$	potenciální energie [J]
$H$	vodík
$H_U, H_u$	dolní výhřevnost paliva
$HC$	uhlovodíky
$H_2O$	voda
$i_1$	primární proud [A]
$J$	joule (jednotka práce a energie)
$K$	kelvin (jednotka termodynamické teploty)
$kg$	kilogram (jednotka hmotnosti)
$kWh$	kilowatthodina (jednotka energie)
$L_t$	teoretická spotřeba vzduchu [ $kg \cdot kg^{-1}$ ]
$L_s$	skutečná spotřeba vzduchu [ $kg \cdot kg^{-1}$ ]
$m$	hmotnost tělesa [kg]
$m_L$	hmotnost vzduchu [kg]
$m_e, m_{pe}$	měrná spotřeba paliva [ $g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$ ]
$M_C$	molární hmotnost C [kg]
$M_{H_2}$	molární hmotnost $H_2$ [kg]
$M_S$	molární hmotnost S [kg]
$M_{O_2}$	molární hmotnost $O_2$ [kg]
$M_K$	točivý moment kola [N.m]
$M_p$	hmotnost spotřebovaného paliva (vzduchu) [kg]
$M_t$	točivý moment motoru, moment síly na výstupním hřídeli [N.m]
$min$	minuta (jednotka času)
$n$	otáčky motoru, klikového hřídele [ $s^{-1}$ ], [ $min^{-1}$ ]
$N$	dusík
$N$	newton (jednotka síly)
$O$	kyslík
$p$	tlak [Pa]



$p_1$	<i>tlak v sacím potrubí [Pa]</i>
$p_2$	<i>tlak za kompresorem [Pa]</i>
$p_i$	<i>střední indikovaný tlak [daN/cm<sup>2</sup>]</i>
$p_z$	<i>tlak v zásobníku [Pa]</i>
$P$	<i>užitečný výkon motoru [W]</i>
$P_e, P_{ef}$	<i>efektivní užitečný výkon [W]</i>
$P_i$	<i>indikovaný užitečný výkon [W]</i>
$P_m$	<i>výkon motoru [W]</i>
$Pa$	<i>Pascal (jednotka tlaku)</i>
$p_s$	<i>tlak nasávaného vzduchu [Pa]</i>
$Q$	<i>teplo [J]</i>
$Q_s$	<i>spalné teplo [J.kg<sup>-1</sup>]</i>
$Q_v$	<i>výhřevnost [J.kg<sup>-1</sup>]</i>
$r$	<i>měrná plynová konstanta [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]</i>
$r$	<i>střední poloměr svazku vinutí na rotoru [m]</i>
$r_d$	<i>dynamický poloměr kol [m]</i>
$r_k$	<i>poloměr rotujících částí [m]</i>
$r_s$	<i>měrná plynová konstanta vzduchu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]</i>
<i>rad</i>	<i>radián (jednotka rovinného úhlu)</i>
$s$	<i>sekunda (jednotka času)</i>
$t$	<i>čas [s]</i>
$T$	<i>termodynamická teplota [K]</i>
$T_1$	<i>teplota nasávaného vzduchu [K]</i>
$T_z$	<i>teplota vzduchu v zásobníku [K]</i>
$T_s$	<i>teplota nasávaného vzduchu [K]</i>
$U$	<i>vnitřní energie [J]</i>
$V_k$	<i>kompresní objem</i>
$V_n$	<i>pracovní objem jedné komory [m<sup>3</sup>]</i>
$V_z$	<i>zdvihový objem válce [m<sup>3</sup>]</i>
$V_\alpha$	<i>změna objemu pracovního válce nad pístem [m<sup>3</sup>]</i>
$W$	<i>práce [J]</i>
$W$	<i>watt (jednotka výkonu)</i>
$W_i$	<i>práce indikovaná [J]</i>
$W_{už}$	<i>práce užitečná [J]</i>
$W_z$	<i>práce ztrátová [J]</i>
$\alpha$	<i>úhel stoupání, úhel natočení klikového hřídele</i>

$\alpha_P$	<i>otevření přepouštěcího kanálu</i>
$\alpha_S$	<i>otevření sacího kanálu</i>
$\alpha_V$	<i>otevření výfukového kanálu</i>
$\delta_{max}$	<i>úhel výkyvu pístu</i>
$\varepsilon$	<i>kompresní poměr</i>
$\mathcal{E}_A$	<i>skutečný kompresní poměr [-]</i>
$\eta$	<i>účinnost [%], [-]</i>
$\eta_e$	<i>efektivní účinnost, též celková [%], [-]</i>
$\eta_i$	<i>indikovaná účinnost [%], [-]</i>
$\eta_m$	<i>mechanická účinnost [%], [-]</i>
$\eta_{mch}$	<i>účinnost mezichladiče [-]</i>
$\eta_{t,T}$	<i>účinnost motoru termická [%], [-]</i>
$\eta_{TD}$	<i>účinnost turbodmychadlem přeplňovaného porovnávacího oběhu [-]</i>
$\kappa$	<i>Poissonova konstanta</i>
$\lambda$	<i>součinitel přebytku vzduchu [-]</i>
$\eta_{pl}$	<i>plnicí účinnost [-]</i>
$\rho_s$	<i>hustota nasávaného vzduchu [kg.m<sup>-3</sup>]</i>
$\varphi$	<i>stupeň zvětšení objemu (izobarický přívod tepla) [-]</i>
$\psi$	<i>stupeň zvýšení tlaku (izochorický přívod tepla) [-]</i>

## Seznam použitých zkratk

CČ	cetanové číslo
CNG	stlačený zemní plyn a bioplyn
DÚ	dolní úvrať
EEŘO	ethylester řepkového oleje
ETBE	ethyl-terc. Butyl ether
HÚ	horní úvrať
LNG	zkapalněný zemní plyn a bioplyn
LH	zkapalněný vodík
LPG	Liquefied Petroleum Gas
max.	maximální
MĚRO	methylester řepkového oleje
min.	minimální
MTBE	methyl-terc. Butyl ether
OČ	oktanové číslo
OHC	Over Head Camshaft (typ ventilového rozvodu pístového motoru)
OHV	Over Head Valves (typ ventilového rozvodu pístového motoru)
SV	Side Valves (typ ventilového rozvodu pístového motoru)
SV	sací ventil
VV	výfukový ventil

## Úvod

Pístové spalovací motory provázejí denně životy téměř všech lidí v dnešních vyspělých zemích světa. Setkáváme se s nimi všude a za téměř jakýchkoliv okolností. Setkáme se s nimi na silnicích, na polích, v lesích, na vodě i ve vzduchu. Potřebujete je při cestě do zaměstnání, na dovolenou, k lékaři, na nákupy, při cestě k příbuzným atd... Již více jak 100 let podávají lidstvu pomocnou ruku v budování ještě vyspělejší civilizace.

Práce se bude věnovat výhradně pístovým spalovacím motorům zážehovým a motorům vznětovým pro svou nejvyšší četnost v celosvětovém motorovém zastoupení. Okrajově bude popsána historie spalovacích motorů s vývojovými stupni zvyšování účinností. Zpočátku se budou nárůsty účinností zvyšovat o veliké skoky řádově několika % s každým novým vynálezem či uspořádáním. Postupně však začnou tyto skoky zpomalovat, až se budou blížit dnešní limitní hranici.

Převážná část práce bude věnována dnešním spalovacím motorům a jejich konstrukčnímu uspořádání, vlivům a nastavením, konstrukčním materiálům a limitům všech těchto prvků při vztažení k účinnosti. Teoretická nejvyšší účinnost se rovná jedné, což znamená, že se využije 100 % energie paliva v motoru přeměněné na kinetickou energii. To však v praxi není možné, protože vzniká enormní množství nejrůznějších ztrát a získaná účinnost klesá až do hodnot jedné třetiny.

Cílem této diplomové práce je zjistit veškeré limity všech prvků spalovacího motoru, výhradně spalovací komory, které mají vliv na účinnost a dále co je nutné udělat proto, aby se účinnost nadále zvyšovala. Bude prozkoumáno, zda je možné účinnost ještě zvýšit, nebo jestli konstrukce pístového spalovacího motoru dosáhla své limitní hranice, kterou již nepůjde překročit.

# 1 Konstrukční prvky spalovacího motoru a jejich vliv na účinnost

Spalovací motory jsou velmi složitá zařízení s mnoha konstrukčními součástmi. V této kapitole budou tyto součásti, všechny důležité prvky a jevy, které mají co dočinění s vlivem na účinnost spalovacího motoru, představeny a popsány. Určité součásti se budou vyskytovat ve více kapitolách, proto se může stát, že zde budou stručně popsány s odkazem na danou kapitolu, kde je zaobíráno danou problematikou více dopodrobna.

## 1.1 Teorie účinnosti

Účinnost udává, jak efektivně je daný systém (spalovací motor) schopen převádět energii z různých forem. V případě spalovacího motoru energii chemickou na energii kinetickou. Snaha je dosáhnout co nejvyšších hodnot účinnosti, ideální případ by dosahoval hodnoty 1, přepočteno na procenta 100%. Toho však v praxi u pístových spalovacích motorů nelze vlivem ztrát a dalších jevů docílit, účinnost se v dnešní době pohybuje v rozmezí pouhých 25 – 35%. Zbylá energie přechází do jiných forem energie, kterou nedokážeme pro pohon vozidla využít, např. velká část energie přechází do tepla. [1]

### *Definice účinnosti spalovacího motoru*

Účinnost spalovacího motoru se popisuje jako poměr mezi užitečným výkonem motoru a množstvím energie přivedené palivem za jednotku času. Energie paliva se určuje součinem dolní výhřevnosti  $H_u$  a hmotností paliva  $M_p$  přivedené za jednotku času. [24]

$$\eta = \frac{P}{M_p \times H_u}$$

$\eta$  – účinnost [-]

$P$  – užitečný výkon motoru [W]

$M_p$  – hmotnost spotřebovaného paliva [kg]

$H_u$  – dolní výhřevnost paliva [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]

Uvedená účinnost je celková, tedy efektivní účinnost. Pro detailní poznání účinnosti je toto možno charakterizovat jako součin více účinností.

U spalovacího motoru se rozlišují tři druhy účinnosti:

- a) Indikovaná účinnost ( $\eta_i$ )
- b) Mechanická účinnost ( $\eta_m$ ) – vyjadřuje mechanické ztráty motoru, je udávána poměrem efektivního a indikovaného výkonu motoru (0,75 – 0,9)

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = \frac{\eta_e}{\eta_i}$$

$$\eta_i = \frac{P_i}{M_p \times H_u}$$

- c) Efektivní účinnost ( $\eta_e$ ) – vyjadřuje celkovou účinnost spalovacího motoru

$$\eta_e = \frac{P_e}{M_p \times H_u}$$

$$\eta_e = \eta_i \times \eta_m = \frac{3600}{m_{pe} \times H_u}$$

$\eta_i$  – indikovaná účinnost [-]

$\eta_m$  – mechanická účinnost [-]

$\eta_e$  – efektivní účinnost [-]

$P_i$  – indikovaný užitečný výkon [W]

$P_e$  – efektivní užitečný výkon [W]

$m_{pe}$  – měrná spotřeba paliva [kgkWh<sup>-1</sup>]

3600 – tepelný kvocient jedné kWh [kJ]

$H_u$  – dolní výhřevnost paliva [Jkg<sup>-1</sup>]

[1]

## 1.2 Účinnost spalovacího motoru

Čtyřdobý spalovací motor je založen na čtyřech po sobě navazujících dobách, probíhajících během dvou otáček klikového hřídele. Veškerá práce se odehrává nad pístem a výměna náplně ve válci je prováděna pomocí ventilů, které jsou ovládány vačkovým hřídelem. [24]

### 1.2.1 Princip činnosti spalovacího motoru

V dnešní době je velké množství spalovacích motorů (jak lze vyčíst z obrázku č. 1), avšak naprosto převládají čtyřdobé pístové spalovací motory vznětové a zážehové, proto se bude tato práce nadále zabývat pouze jimi.

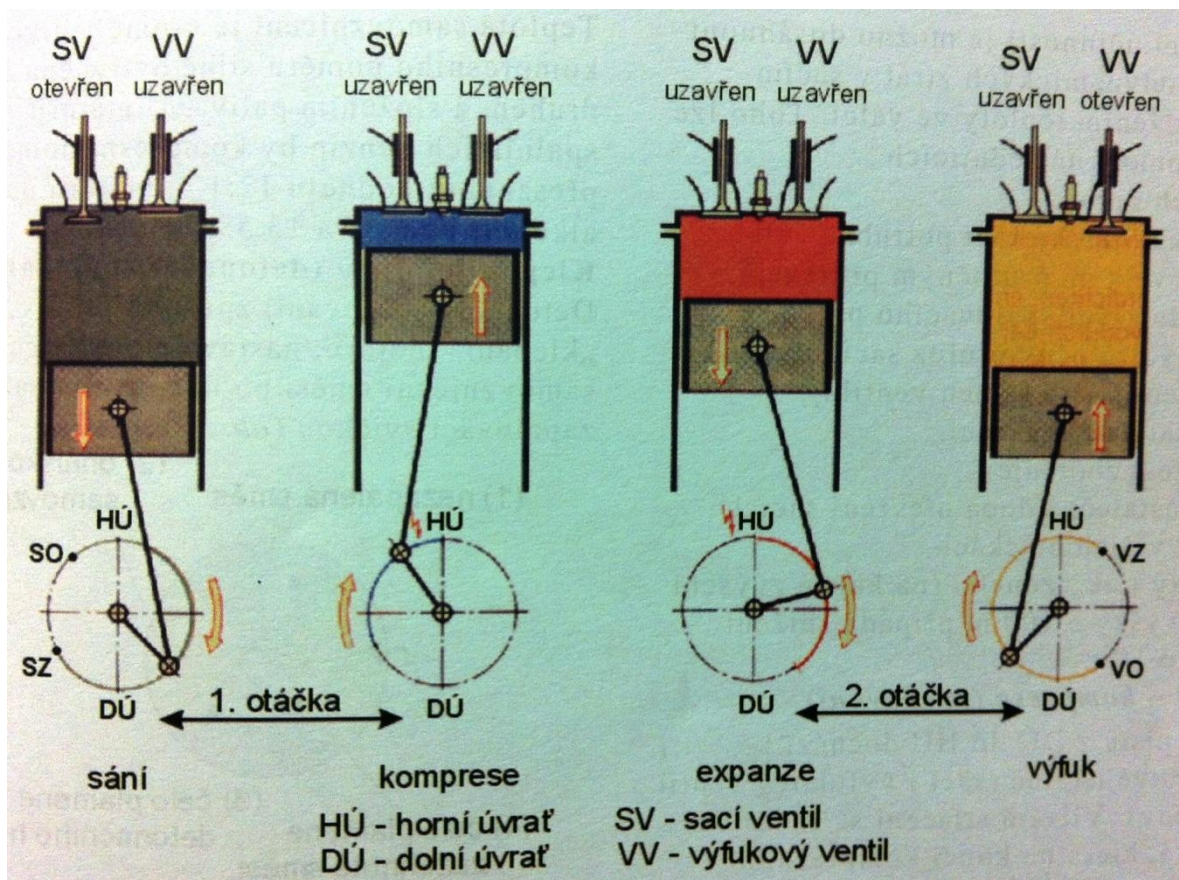


Obrázek 1 - Přehled druhů spalovacích motorů [1]

Funkce čtyřdobých motorů je popsána následujícími dobami:

- Sací doba
- Kompresní doba
- Expanzní doba
- Výfuková doba

Graficky jsou tyto doby pro lepší představu znázorněny na **obrázku č. 2**.



Obrázek 2 - Fáze čtyřdobého zážehového motoru [2]

### **Sací doba**

Při pohybu pístu dolů směrem do dolní úvratě dochází k sání směsi paliva a vzduchu skrze otevřený sací ventil přímo do válce motoru. Pro optimální účinek sání je sací ventil otevřen o chvíli dříve, než píst dosáhne horní úvratě. Jedná se o předstih a činí několik stupňů úhlu otočení kliky. Po dosažení pístu své dolní úvratě je sací ventil ještě okamžik otevřený, aby bylo dosaženo největšího stupně plnosti. Uzavření sacího ventilu je zpožděno o několik stupňů úhlu otočení kliky po dosažení spodní úvratě.

Na počátku sání zůstává otevřen výfukový ventil, aby byly z válce odstraněny veškeré zbytky spálené směsi paliva (opět zpožděno o několik stupňů úhlu otočení kliky).

### **Kompresní doba**

Pohybem pístu směrem vzhůru je stlačována směs ve válci. Ještě před dosažením pístu horní úvratě dojde k zápalu zapalovací svíčkou. Pro nejlepší poměr stupně plnosti ve válci je ještě na začátku komprese otevřený sací ventil (do několika stupňů úhlu otočení kliky).

### **Expanzní doba**

Po zapálení směsi dochází ve válci k nárůstu teploty a tlaku. Krátce po dosažení horní úvratě dosahuje tlak nejvyšších hodnot a vlivem rozpínání plynů je píst tlačěn dolů, čímž je konána práce.

Spalování je ukončeno krátce po dosažení nejvyššího tlaku a výfukový ventil se otevírá již před dosažením dolní úvratě, aby se spalované plyny rozproudily velikou rychlostí a sání sebou strhlo výfukové plyny.

### **Výfuková doba**

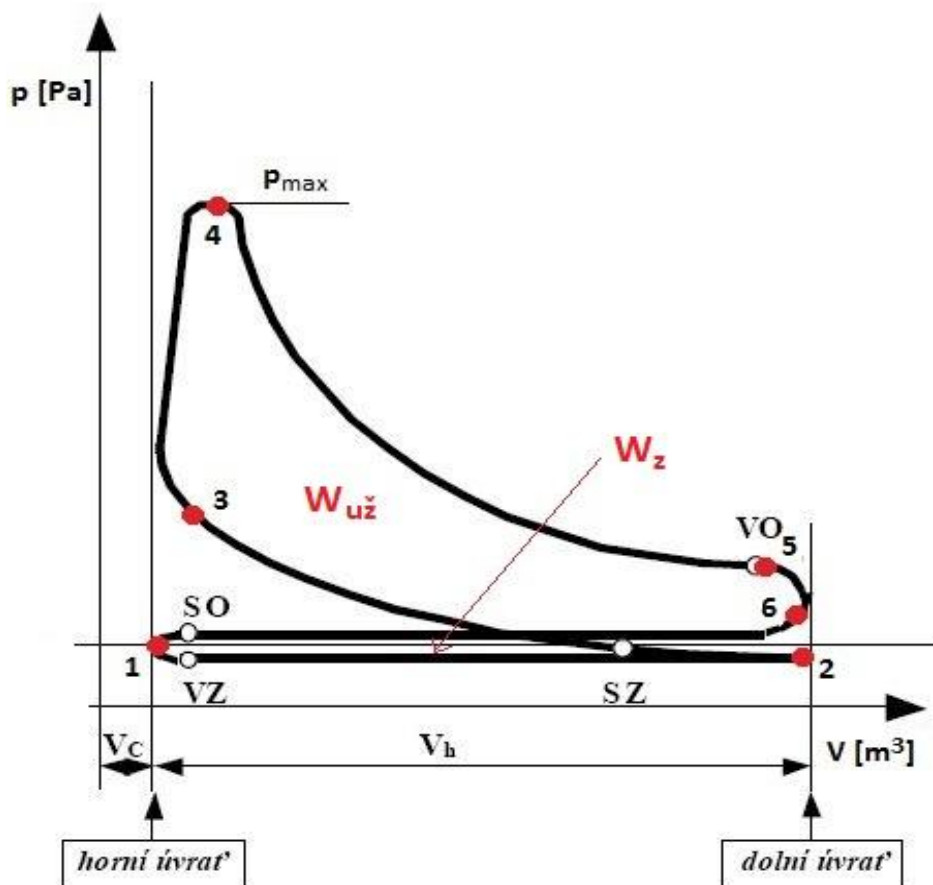
Píst pohybem k horní úvratě vytlačuje ven výfukové plyny, ještě před jejím dosažením dochází k otevření sacího ventilu, aby mohly proudit čerstvé plyny bez jakékoli prodlevy do válce během doby sání. Výfukový ventil se uzavírá krátce po dosažení horní úvratě.

[24]

## **1.2.2 P-V diagram čtyřdobého zážehového motoru**

P-V diagram (obrázek č. 3) graficky znázorňuje změny tlaku ve válci v závislosti na změně vnitřního objemu pracovního prostoru válce zapříčiněného pohybem pístu.





Obrázek 3 - p-V diagram čtyřdobého zážehového motoru [3]

Krátce před bodem 1 (v obr. č. 3) dojde k otevření sacího ventilu, jímž je nasávána směs paliva a vzduchu do pracovního válce až do bodu 2 (isobarické sání), kde píst dosáhne dolní úvratě a započíná adiabatická komprese. Po několika stupních úhlu pootočení klikového hřídele se sací ventil uzavírá a komprese pokračuje až do téměř horní úvratě pístu (bod 3), kde dojde k zápalu směsi. Z bodu 3 do bodu 4 dochází k izochorickému hoření směsi, čímž prudce vzrůstá tlak ve válci. Po překonání horní úvratě dochází k prudké adiabatické expanzi, která zatlačí píst dolů. Před dosažením pístu dolní úvratě dojde k otevření výfukového ventilu. V bodě 5 až do bodu 6 dochází k izochorickému výfuku. Nadále je ventil otevřen a dochází k izobarickému výfuku spalin. Ventil se uzavírá za bodem 1 po několika stupních úhlu pootočení klikového hřídele. [30]

Ohraničená plocha označená jako  $W_{už}$  (obr. č. 3) je užitečná práce, ve které se koná práce, jež je nadále převáděna (pohon kol). Označená plocha  $W_z$  je ztrátová práce, ve které se spotřebovává část užitečné práce  $W_{už}$ . Indikovaná práce  $W_i$  činí rozdíl mezi  $W_{už}$  a  $W_z$ . [24]

Velikost indukované práce zjistitelné z P-V diagramu:

$$W_i = W_{už} - W_z$$

$W_i$  – indukovaná práce [J]

$W_{už}$  – užitečná práce [J]

$W_z$  – ztrátová práce [J]

### 1.2.3 Termická účinnost spalování

Termická účinnost je poměrem práce ku přivedenému teplu. Mnohdy se vyjadřuje jako poměr ploch p-V diagramu skutečného k ideálnímu. (Clausius-Rankinův oběh). [1]

Termická účinnost je vyjádřitelná pomocí kompresního poměru a Poissonovy konstanty.

Pro zážehový motor platí:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}, \text{ kde}$$

$\eta_t$  - účinnost motoru termická [%], [-]

$\kappa$  - Poissonova plynová konstanta

$\varepsilon$  - kompresní poměr

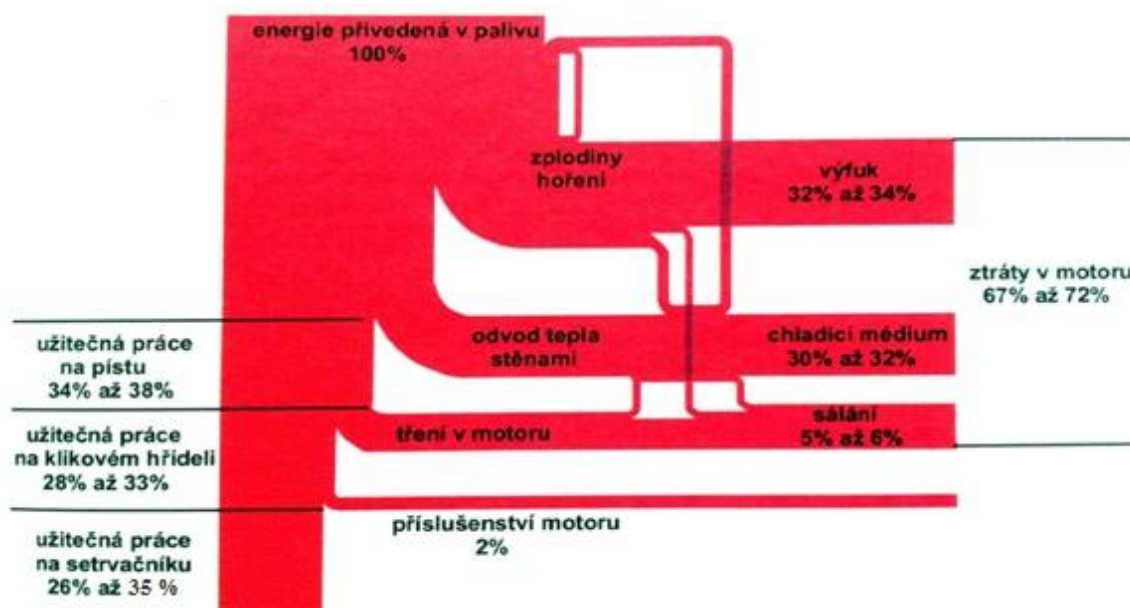
Pro vznětový motor platí:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} * \frac{\varphi^{\kappa-1}}{\kappa * (\varphi-1)}, \text{ kde}$$

$\varphi$  – stupeň izobarického zvýšení

### 1.2.4 Sankeyuv diagram

Sankeyuv diagram znázorňuje využitelnost tepelné energie paliva u čtyřdobého zážehového motoru. Graficky vyjadřuje velikost účinnosti spalovacího motoru a jeho ztráty vlivem chodu motoru (patrné z **obrázku č. 4**).



Obrázek 4 - Sankeyuv diagram čtyřdobého zážehového motoru [2]

V dnešní vyspělé době je využití energie obsažené v palivu pro zážehové motory stále ještě nedokonalé. Ztráty energie výfukem činí 32 – 34 %, chlazením 30 – 32 %, třením 5 – 7 % a další 2 % jsou využita k chodu příslušenství motoru (olejové čerpadlo, vodní čerpadlo, alternátor,...). Ze 100 % přivedené energie v palivu se na kinetickou energii pro pohon vozidla přemění pouze 26 – 35 % energie.

Ztrátovou energii chlazením můžeme částečně využít k vytápění dopravního prostředku a u přeplňovaných motorů můžeme využít kinetickou a tepelnou energii k pohonu turbodmychadla. [2]

### 1.3 Konstrukční prvky ovlivňující účinnost

Účinnost spalovacího motoru je ovlivněna mnoha faktory. Některé (například termická účinnost  $\eta_t$ ) lze konstrukčně ovlivnit jen málo, jiné lze ovlivňovat zásadně.

Dokud se v dřívějších dobách nebral zřetel na emise, zvyšování účinnosti probíhalo extenzivně. Účinnost se zvyšovala například vynecháním tlumiče hluku, lidé si však stěžovali na zvýšenou hlučnost motorů. Nebrání ohledu na množství vylučování CO, to však mělo neblahý vliv na životní prostředí a mnoho dalších způsobů zvyšování účinnosti, které jsou dnes nepřijatelné. V dnešní době je tedy nutno brát zřetel na různá omezení.

### **Omezení konstrukčních úprav:**

- *Bezpečnost*
- *Emise (exhalace, hluk, vibrace, elektromagnetické záření,...)*
- *Životnost*
- *Výrobní náklady a dostupnost*

**Bezpečnost** – kdyby nemusel být brán zřetel na bezpečnost, jezdilo by se na atomový pohon, který je mnohem efektivnější, než spalovací motory, představovalo by to však obrovská rizika při poruchách a haváriích, proto jsou stále nejlepší formou pohonu automobilu spalovací motory a elektromotory, které sice nejsou tak účinné, ale jsou bezpečné.

**Emise** – V dnešní době, kdy jsou na silnicích milióny aut, je snaha snižovat emise z důvodu šetrnosti k životnímu prostředí a pro vyšší úroveň žití obyvatelstva v obydlených lokalitách.

**Životnost** – Ve velké míře není přípustné zvyšovat výkony motorů na úkor jejich životnosti. Takové motory jsou vhodné pouze do motorsportu, kde jsou určeny na několik závodů a pak se vymění (Formule 1). Pro běžnou silniční dopravu je třeba, aby motory vydržely stovky tisíc kilometrů, než dojde k jejich zničení. Nejlépe je mít motor o takové životnosti, která bude odpovídat životnosti automobilu, to je však velmi individuální dle způsobu jízdy a druhu použití automobilu. Je tedy důležité zachovat optimální poměr životnost / výkon motoru.

**Výrobní náklady a dostupnost** – Pro zvýšení účinnosti je možné použít lepších materiálů, avšak bylo by to za mnohonásobně zvýšenou cenu, nýbrž tyto lepší materiály (např. titan) nejsou tak dostupné, jako běžně užívané materiály a zpracovávají se mnohem obtížnějšími technologickými postupy. Z tohoto důvodu se automobilovému průmyslu nevyplatí používat takové materiály pro běžné automobily.

Zásadním cílem konstrukčních úprav je vyšší nebo dokonalejší přeměna na energii kinetickou. Přeměna energie spalováním je podmíněna dokonalostí hoření. Ideální stav je, kdy je v procesu hoření všechno teplo předáno systému převodu kinetické energie.

**Seznam prvků ovlivňující účinnost:**

- Tvorba směsi a složení paliva
- Kompresní poměr
- Rychlost hoření
- Plnění

### 1.3.1 *Paliva*

Paliva jsou nezbytnou součástí motorových soustav, dodávají motoru energii, jež je potřebná pro samotný chod motoru a následnou vykonanou práci. Nejrozšířenějším druhem paliv jsou uhlovodíková (benzín, nafta). Vyrábí se z ropy, která vznikla z fosilií živých organismů, proto se také přezdívají jako fosilní paliva. Výzkum alternativních zdrojů paliv z obav vyčerpání veškeré ropy a z důvodu hledání paliv šetrnějších k životnímu prostředí dal ke vzniku mnoho dalších paliv pro spalovací motory (viz. následující seznam). Tato práce se zabývá pouze benzínovými a dieselovými motory, proto budou podrobně popsány jen tyto dva druhy paliv. [31]

Podle zdroje, ze kterého se palivo získává, se paliva rozdělují na paliva z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů. Neobnovitelným zdrojem je ropa, jak již bylo zmíněno v předchozím odstavci a označují se také jako fosilní paliva. Ostatní druhy paliv si člověk dokáže sám vyrobit z obnovitelných zdrojů.

Rozdělení druhů paliv dle původu zdroje:

- Neobnovitelné zdroje (fosilní paliva)
  - kapalná
    - benzín
    - nafta
    - petrolej
  - plynná
    - propan-butan LPG
    - zkapalněný zemní plyn LNG
    - stlačený zemní plyn CNG
- Obnovitelné zdroje
  - vodík
    - zkapalněný vodík LH
    - stlačený vodík H2

- alkoholy
  - metanol
  - etanol
- ethery
  - methyl-terc. Butyl ether MTBE
  - ethyl-terc. Butyl ether ETBE
- estery
  - methylester řepkového oleje MĚŘO
  - ethylester řepkového oleje EEŘO
- Biopaliva
  - Bioplyn
  - Bionafta (MĚŘO)
  - Bioethanol (líh z biomasy)

### **Uhlovodíková paliva**

Uhlovodíková neboli fosilní paliva nachází svůj původ v ropě. Vznikají různým druhem destilací ropy nebo v případě zemního plynu odčerpáváním plynu přímo ze země.

### **Plynná paliva**

Plynná paliva se vyznačují oproti kapalným palivům lepšími vlastnostmi. Snadněji dochází k promísení směsi a lépe se dodržuje směšovací poměr, tím je snížen obsah škodlivých látek ve výfukových plynech. Nedochází k ředění oleje v klikové skřině a ke smývání olejového filmu ze stěn válce. Ve spalovacím prostoru nevznikají karbonové úsady a antidetonační vlastnosti jsou příznivější.

Nízké užití těchto paliv je zapříčiněno pouze nesnadným skladováním, distribucí a velmi malou energetickou hustotou, která vyžaduje velmi velký zastavěný prostor pro umístění zásobníků paliv na vozidle. Dnes se nejčastěji setkáváme s užitím plyných paliv u autobusů městské hromadné dopravy.

### **Vodíková paliva**

Nejšetrnější palivo k životnímu prostředí je vodík, který za sebou zanechává jen vodu a malé množství kyslíčků dusíku. Naneštěstí je směs vodíku a vzduchu silně výbušná a výroba samotného vodíku je velmi drahá. Z těchto důvodů je použití vodíku zatím velmi omezené.

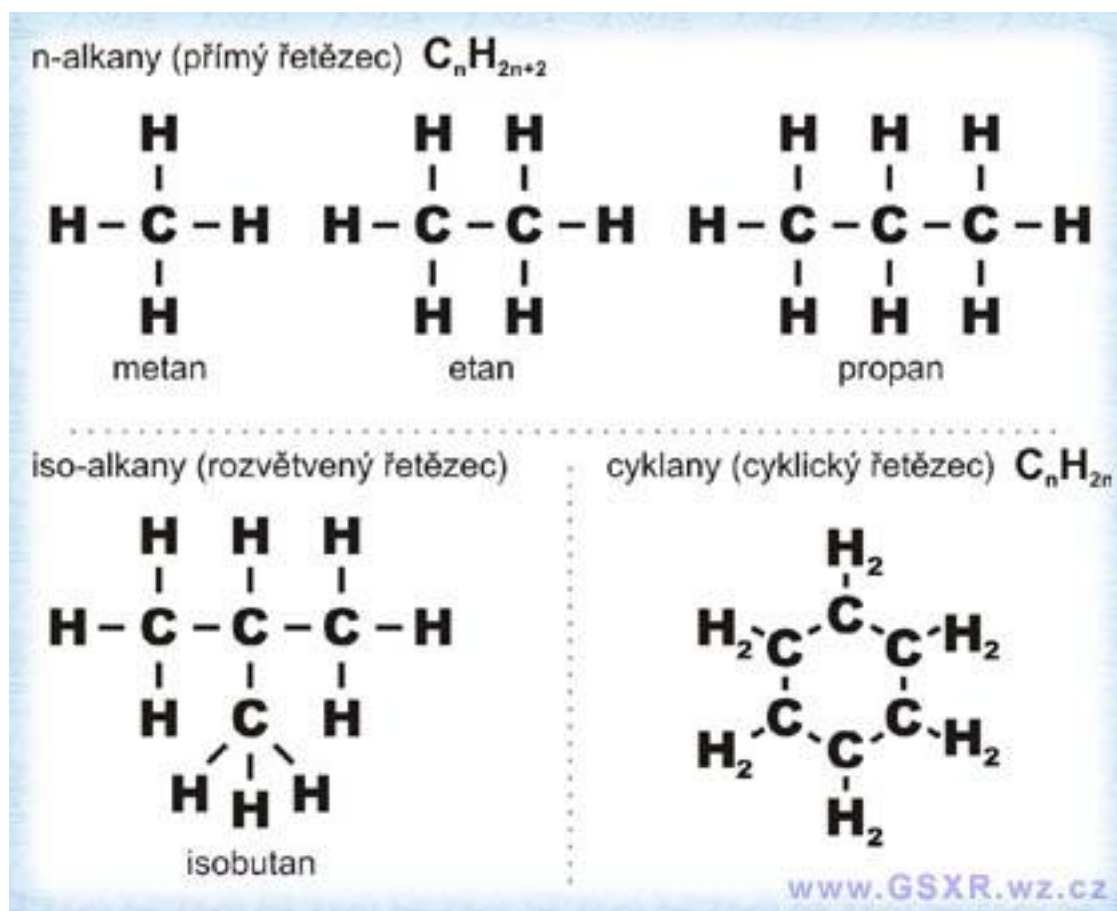
## Biopaliva

Biopaliva použitá pro potřeby spalovacího motoru jsou alkoholy a rostlinné oleje, které se získávají z biomasy. Energie obsažená v biomase je energie naakumulovaná ze sluneční energie.

Biomasa je organického původu a vzniká za pomoci dopadající sluneční energie (růst rostlin díky slunečnímu záření). Hlavním zdrojem pro výrobu biopaliv je v podmínkách střední Evropy řepka olejná, v jižnějším pásmu Evropy je to slunečnice. [31]

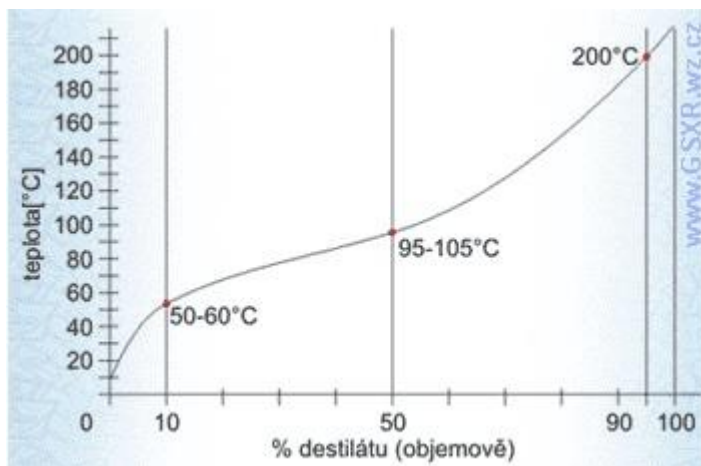
### 1.3.1.1 Benzín

Benzín se vyrábí destilací ropy za teplot v rozmezí 40 – 200 °C bez přístupu vzduchu. Skládá se ze směsi uhlovodíků (alkanů, cykloalkanů, aromatických uhlovodíků, alkenů) a dalších látek (parafíny, olefiny a aromatické látky). Používá se jako palivo u zážehových spalovacích motorů. Chemické vzorce uhlovodíků obsažených v benzínu je možno vidět na **obrázku č. 5**. [31]



Obrázek 5 - Chemické vzorce uhlovodíků obsažených v benzínu [4]

Důležitou vlastností benzínu je jeho **odpornost**, je vyjádřena destilační křivkou (**obr. 6**). Destilační křivka má na vodorovné ose odpařená procenta objemu paliva a na svislé ose teplotu. Bod 10 % odpaření hmotnosti paliva udává nejnižší možnou teplotu pro start. Teplota se pohybuje okolo 50 – 60 °C, což umožňuje nastartování motoru při okolní teplotě - 20 °C. 50 % bod odparnosti určuje rychlost nárůstu otáček a ohřevu motoru. 95 % bod by neměl překročit teplotu 200 °C, páry paliva kondenzují na stěnách válce a smívají olejový film, díky čemuž může dojít k mechanickému poškození.



Obrázek 6 - Křivka odporosti paliva [5]

### **Oktanové číslo benzínu**

Základní charakteristikou pro benzínová paliva je oktanové číslo. Udává odolnost proti samozápalu paliva při kompresi ve válci, kdy při stlačování směsi dochází k nárůstu teploty. Oktanové číslo udává procentuální obsah iso-oktanu s n-heptanem. Iso-oktan má určeno oktanové číslo 100 a n-heptan 0. Palivo však může mít oktanové číslo vyšší jak 100, znamená to, že palivo je odolnější k samozápalu než 100 % iso-oktan.

Oktanové číslo se uvádí v názvu samotného druhu paliva např. Special 91, Natural 95, Super plus 98,... Znamená to, že např. Special 91 s oktanovým číslem 91 je stejně odolný proti samozápalu, jako směs složená z 91 % iso-oktanu a 9 % n-heptanu. [32]

Zjišťování oktanového čísla se v praxi provádí dvěma metodami, při obou metodách se porovnává na testovacím motoru chování zkoumaného benzínu a referenčního paliva.

- Výzkumná metoda
- Motorová metoda

### **Výzkumná metoda ke zjištění OČ**



Výzkumná metoda je spíše založena na podmínky městského provozu, testovací motor se udržuje na 600 otáčkách za minutu, teplota přehřáté směsi vzduchu 52 °C, předstih zapalování 13° a proměnlivý kompresní poměr jako hodnotící kritérium. Metoda simuluje nízkou rychlost a častou akceleraci. [32]

### **Motorová metoda ke zjištění OČ**

Při této metodě se oktanové číslo zjišťuje na testovacím motoru při 900 otáčkách za minutu, teplotou přehřáté směsi vzduchu 149 °C, automatickým proměnným předstihem 19 °- 26 ° a proměnlivým kompresním poměrem jako hodnotícím kritériem. Zkoumá chování motoru oproti výzkumné metodě při vyšších rychlostech, čímž se přibližuje více realitě. Zjištěné oktanové číslo u motorové metody bývá o 10 bodů nižší, než zjištěné oktanové číslo u výzkumné metody. [32]

### **Legislativní požadavky**

Pro každý z typů benzínu je legislativně určena celá řada parametrů, kterým musí vyhovovat. Ukázka parametrů pro bezolovnatý benzin viz tabulka 1.

Tabulka 1 - Parametry paliva – bezolovnatý benzín [29]

Parametr	Jednotka	Limity		Testovací metoda č. normy
		Minimum	Maximum	
Oktanové číslo výzkumnou metodou RON		95	-	EN 25164
Oktanové číslo motorovou metodou, MON		85	-	EN 25163
Hustota při 15°C	kg.m <sup>-3</sup>	748	762/775	ISO 3675
Tlak par podle Reida	kPa	56	60,1/95	EN 12
<b>Destilace</b>				
počátek varu	°C	24	40	EN-ISO 3405
odpaření při 100°C	% obj.	49,0	57,0	EN-ISO 3405
odpaření při 150°C	% obj.	81,0	87,0	EN-ISO 3405
konec varu	°C	190	215	EN-ISO 3405
zbytek	%	-	2	EN-ISO 3405
<b>Analýza uhlovodíků</b>				
olefiny	% obj.	-	10	ASTM D 1319
aromáty	% obj.	28,0	40,0	ASTM D 1319
benzen	% obj.	-	1,0	Pr. EN 12177
alkany	% obj.	-	zbytek	ASTM D 1319
<b>Poměr uhlík/vodík</b>				
Oxidační stálost	min.	480	-	EN-ISO 7356
Obsah kyslíku	% hmotn.	-	2,3	EN 1601
Živičné látky	mg.ml <sup>-1</sup>	-	0,04	EN-ISO 6246
Obsah síry	mg.kg <sup>-1</sup>	-	100	EN-ISO/DIS 14596
Koroze mědi při 50°C		-	1	EN-ISO 2160
Obsah olova	g.l <sup>-1</sup>	-	0,005	EN 237
Obsah fosforu	g.l <sup>-1</sup>	-	0,0013	ASTM D 3231

### 1.3.1.2 Motorová nafta (Diesel)

Jedná se o směs ropných kapalných uhlovodíků vroucích při teplotě 150 °C – 360 °C. Pro zlepšení užitečných vlastností se do motorové nafty přidávají přísady (detergenty, depresanty, inhibitory koroze, maziva, přísady proti pění,....).

Motorová nafta se výhradně používá u vznětových motorů a dále u některých typů plynových turbín. Vyrábí se mícháním petroleje s plynovým olejem. Kvalita motorové nafty je dána cetanovým číslem, které udává vznětovou charakteristiku dané nafty. [24]

### **Cetanové číslo**

Kvalitu motorové nafty z hlediska vznětové charakteristiky udává cetanové číslo (CČ). Jedná se o ochotu vznícení nafty po jejím vstříknutí do spalovacího prostoru. Dá se říci, že cetanové číslo (CČ) je ekvivalentem k oktanovému číslu (OČ) u benzínových paliv. Spalování paliv s vyšším cetanovým číslem je doprovázeno lepším startováním, lepším výkonem, chod motoru je tišší a hladší, emisní složení výfukových plynů je lepší a při užití kvalitnější nafty klesá měrná spotřeba paliva.

Důležitým parametrem je **průtah vznícení**, což je uplynulá doba mezi vstříkem paliva do spalovacího prostoru a okamžikem vznícení směsi. Tento parametr je ovlivněn právě chemickým složením nafty (cetanovým číslem) a konstrukcí vstřikovacího zařízení spalovacího motoru.

Minimální hodnota cetanového čísla podle české a evropské normy musí být alespoň 51. Na trhu s pohonnými hmotami se nejčastěji vyskytuje motorová nafta s cetanovým číslem v rozmezí 51 – 55. Špičkové motorové nafty se dnes pohybují kolem hodnot CČ 58 – 61. Cetanové číslo se stejně jako oktanové číslo u benzínů dá zvyšovat přísadami (alkylnitráty, di-terc-butylperoxid,...). Při zvyšování CČ nad 60 již není příliš doporučováno, protože účinnost motoru se od této hodnoty příliš nemění.

### **Nízké cetanové číslo**

Nízké cetanové číslo způsobuje dlouhou prodlevu vznícení, to má za následek, že v okamžiku vznícení je ve spalovacím prostoru rozprášeno a odpařeno velké množství paliva. To vyvolá příliš prudký nárůst tlaku ve spalovacím prostoru motoru a dochází k takzvanému tvrdému chodu motoru, roste hlučnost.

### **Vysoké cetanové číslo**

Vysoké cetanové číslo způsobuje krátkou prodlevu vznícení, to má za následek, že se palivo vznítí velmi blízko u vstřikovací trysky. Palivo je nedostatečně promíseno se vzduchem, čímž dochází k nedokonalému hoření ve spalovacím prostoru a vzniku sazí. Výskyt plamene u vstřikovací trysky může mít za následek její spečení, ucpání karbonovými usazeninami.

### **Stanovení velikosti cetanového čísla**

Stejně jako při měření oktanového čísla se měření cetanového čísla uskutečňuje na testovacím motoru. Jedná se o jednoválcové vznětové motory, kde se porovnává měřený

vzorek paliva s referenčním vzorkem. Sleduje se shoda vznětu paliva při změnách kompresního poměru. [31]

### Legislativní požadavky

Pro dieselová paliva je legislativně určena celá řada parametrů, kterým musí vyhovovat. Ukázka parametrů motorové nafty v tabulce č. 2.

Tabulka 2 - Parametry paliva – diesel [29]

Parametr	Jednotka	Limity		Testovací metoda
		Minimum	Maximum	
Cetanové číslo		52	54	EN-ISO 5165
Hustota při 15 °C	kg.m <sup>-3</sup>	833	837	
50 % objemu	°C	245	-	EN-ISO 3405
95 % objemu	°C	345	350	EN-ISO 3405
Konec varu	°C	-	370	EN-ISO 3405
Bod vznícení	°C	55	-	EN-ISO 3405
CFPP	°C	-	-5	EN 116
Viskozita při 40 °C	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	2,5	3,5	EN-ISO 3104
Polycyklické aromatické uhlovodíky	% hmotn.	3	6,0	IP 391
Obsah síry	mg.kg <sup>-1</sup>	-	300	Pr. EN-ISO/DIS 14596
Koroze mědi		-	1	EN-ISO 2160
Kondrasonův uhlík (10 % DR – zbytek)	% hmotn.	-	0,2	EN-ISO 10370
Obsah popelu	% hmotn.	-	0,01	EN-ISO 6245
Obsah vody	% hmotn.	-	0,05	EN-ISO 12937
Neutralizační číslo (silná kyselina)	mg.KOH.g <sup>-1</sup>	-	0,02	ASTM D 974-95
Oxidační stálost	mg.ml <sup>-1</sup>	-	0,025	EN-ISO 12205
Nové a lepší metody pro polycyklické aromaty ve vývoji	% hmotn.	-	-	EN 12916

### 1.3.2 Kompresní poměr

Jednou ze základních charakteristik spalovacího motoru je kompresní poměr, někdy označovaný jako stupeň stlačení, značí se řeckým písmenem  $\epsilon$ . Udává poměr mezi objemem směsi nasáté a objemem směsi stlačené ve válci. U dnešních motorů vstřikování paliva obstarává řídicí jednotka, která hlídá ideální kompresní poměr a dle požadavků upravuje vstřiky paliva.

Výhody řízení vstřikování paliva řídicí jednotkou oproti karburátoru u zážehových motorů:

- přesnější odměření paliva ke vzduchu

- jemnější rozptýlení
- snížení spotřeby
- redukce obsahu škodlivin ve výfukových plynech [24]

Výpočet kompresního poměru:

$$\mathcal{E} = \frac{V_z + V_k}{V_k}, \text{ kde}$$

$V_z$  – zdvihový objem

$V_k$  – kompresní objem

$\mathcal{E}$  - kompresní poměr

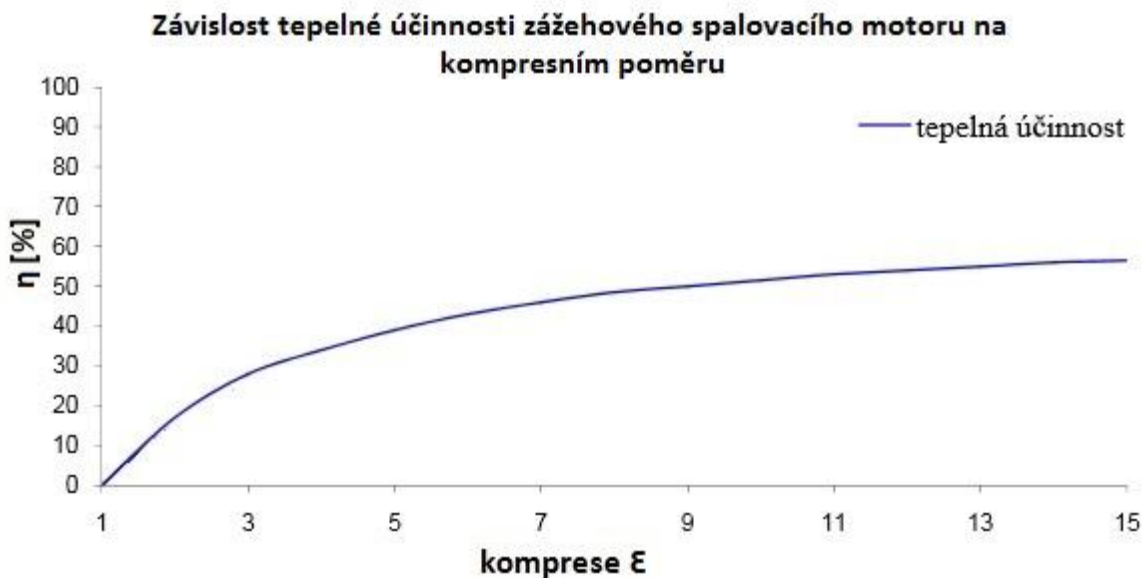
### Velikost kompresního poměru

U zážehových motorů se kompresní poměr pohybuje v rozmezí od 8:1 až 14:1.

U vznětových motorů se kompresní poměr pohybuje v rozmezí od 14:1 až 23:1. [33]

### Vliv kompresního poměru na účinnost motoru

Účinnost spalovacího motoru roste s růstem kompresního poměru. Tento růst je však nelineární a u zážehového motoru nemá smysl překročit kompresní poměr 14:1, při vyšším kompresním poměru přestává dostačovat kvalita paliva, hrozí předčasné samovznícení vlivem nedostatečného oktanového čísla, které vyjadřuje odolnost paliva oproti samozápalu. Tento nedostatek částečně řeší čidlo klepání, které zaznamenává detonační spalování a řídicí jednotka tak může upravit dávku paliva a především předstih zážehu. U zážehového motoru navíc skutečné stlačení směsi ve spalovacím prostoru za běžných jízdních podmínek neodpovídá spočítané teorii. Maximální hodnotu kompresního poměru udávaného výrobcem lze docílit jen za předpokladů plného otevření škrtkové klapky při maximálním točivém momentu. Při korigování škrtkové klapky, tedy částečném zatížení, klesá účinnost naplnění válce a kompresní poměr by se mohl pohybovat kolem poloviny výrobcem udávané hodnoty. Tím se zhoršuje dále tepelná účinnost. U vznětových motorů je důležitá vyšší komprese pro větší teplotu vzduchu a následného vznícení paliva, tím i dokonalejšího hoření, které má za následek vyšší tepelnou využitelnost energie vzniklé při spalování. Závislost tepelné účinnosti zážehového spalovacího motoru na kompresním poměru na **obr. 7**. [24]



Obrázek 7 - Grafické znázornění obecné tepelné účinnosti zážehového spalovacího motoru na kompresním poměru [6]

Výpočet termické účinnosti v závislosti na kompresním poměru:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}, \text{ kde}$$

$\eta$  - účinnost

$\kappa$  - Poissonova plynová konstanta

$\epsilon$  - kompresní poměr

Poissonova konstanta - vyjadřuje poměr měrných nebo molárních tepelných kapacit plynu.

### 1.3.3 Hoření

Účinnost energetické přeměny je silně závislá na dokonalosti hoření směsi paliva a vzduchu. K dokonalému shoření a předání tepelné energie je nezbytné dodržet:

- Směšovací poměr
- Ideální spalovací prostor

#### 1.3.3.1 Směšovací poměr

Směšovací poměr je poměr vzduchu vstupujícího do válce k množství paliva za stejný časový okamžik.

Ideální směšovací poměr dosahuje takového průběhu, kde se přemění veškerá využitelná chemická energie paliva na teplo. Je potřeba vytvořit směs paliva a vzduchu s ideálním poměrem kyslíku a hořlavín v celém objemu směsi.

Se směšovacím poměrem souvisí součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ , který udává poměr mezi hmotností vzduchu přivedeného do válce k hmotnosti vzduchu potřebného pro stechiometrické spalování. Tento součinitel přebytku vzduchu určuje, jak se odlišuje skutečný poměr vzduchu a paliva od teoreticky nutného. [24]

$\lambda = 1$  – hmotnost vzduchu přivedeného odpovídá teoretické potřebě

$\lambda > 1$  – jedná se o chudou směs z důvodu přebytku vzduchu

$\lambda < 1$  – jedná se o bohatou směs z důvodu nedostatku vzduchu

Veličinu  $\lambda$  zjišťuje sonda ve výfuku a oznamuje zpětně řídicímu centru pro vstřikovací jednotku. Na hodnotě  $\lambda$  závisí i účinnost katalyzátoru.

### **Stechyometrický výpočet optimálního směšovacího poměru**

Určuje spotřebu kyslíku (vzduchu) pro úplné spálení všech složek paliva (C, H<sub>2</sub>, S, ...)

Teoretická spotřeba kyslíku k úplnému spálení 1 kg paliva:

$$O_t = \frac{8}{3}M_C + 8 \times M_{H_2} + M_S - M_{O_2} \quad [\text{kg kyslíku} / \text{kg paliva}]$$

$M_C$  - molární hmotnost C [kg]

$M_{H_2}$  - molární hmotnost H<sub>2</sub> [kg]

$M_S$  - molární hmotnost S [kg]

$M_{O_2}$  - molární hmotnost O<sub>2</sub> [kg]

Teoretická spotřeba vzduchu k úplnému spálení 1 kg paliva:

$$L_t = \frac{O_t}{0,23} = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3}M_C + 8 \times M_{H_2} + M_S - M_{O_2} \right) [\text{kg vzduchu} / \text{kg paliva}] [1]$$

Př. výpočet vzduchu s podílem kyslíku 23% pro úplné spálení 1 kg benzínu:

$$L_t = \frac{O_t}{0,23} = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3}0,8575 + 8 \times 0,1378 + 0,0005 - 0,0042 \right) = \mathbf{14,72 [kg/kg]}$$

Jak vyplývá z vypočteného vzorce pro určitý druh benzínu a vzduchu, optimální směšovací poměr je **14,72 kg vzduchu na 1 kg benzínu**.

### **Řízení směšovacího poměru**

O řízení směšovacího poměru se stará elektronická řídicí jednotka, která podle informací z  $\lambda$  sondy upravuje množství vstřikovaného paliva do spalovacího prostoru za účelem zachování optimálního směšovacího poměru.

$\lambda$  sonda je základním informačním členem řídicího systému a je umístěna ve výfuku. Podává informace řídicí jednotce o průběhu spalování, zda dochází k dokonalému hoření nebo zda jsou ve výfukových plynech zbytky nespálené směsi. [1]

Více o systému řízení vstřikování v kapitole (2.2.4).

### **1.3.3.2 Spalovací prostor**

Spalovací prostor slouží ke spálení směsi paliva a vzduchu za účelem přetvoření energie do jiné formy.

#### **Hlavní požadavky na konstrukci spalovacího prostoru** [zmněno v kap. 1.3.3.2]

Dosažení optimální doby spalování – urychlení spalovacího procesu se dosáhne menších tepelných ztrát povrchem spalovacího prostoru a tento proces pak není v takové míře náchylný ke vzniku detonací. Na oplátku se motor projevuje velmi tvrdým chodem.

Minimalizace povrchu – při spalovacím procesu vzniká teplo, jehož část odchází stěnami spalovacího prostoru do bloku motoru. Je to bráno jako čistá ztráta, nýbrž se toto teplo nijak nevyužije, naopak je třeba se tohoto tepla zbavit, a proto je třeba vynaložit další energii na funkci chlazení. Z tohoto důvodu se spalovací prostor s menší plochou vyznačuje vyšší účinností.

Důležitým faktorem spalovacích komor je rychlost hoření, která by měla být co nejvyšší, ovšem ne zas tak vysoká, aby nedocházelo k detonačnímu hoření. Při **detonačním spalování** vzniká tlaková vlna, která se šíří spalovacím prostorem nadzvukovou rychlostí a při dopadu na stěny spalovacího prostoru vznikají rázy, které se označují za tzv. klepání motoru. Tímto spalováním se omezuje zvyšování výkonu a hrozí mechanické poškození pístu, hlavy válce a jejího těsnění. Optimální rychlost hoření je 30 – 40 m/s. [31]



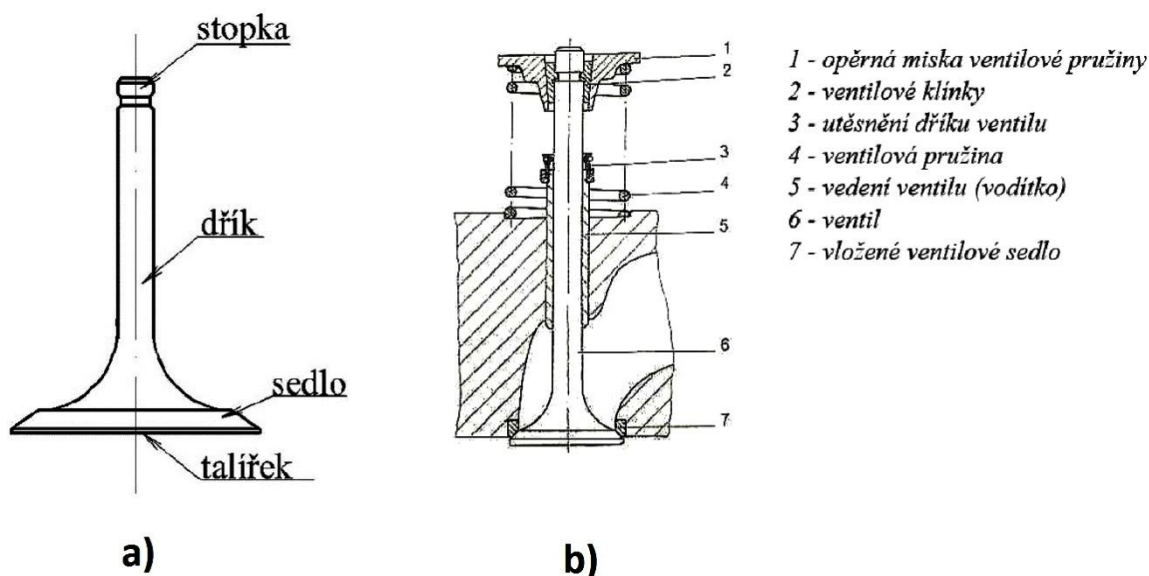
### 1.3.3.3 Příprava směsi

U starších typů motorů se směs připravovala v karburátoru, kde se mísil vzduch a palivo v požadovaném poměru. Podrobnější popis funkce karburátoru viz. kapitola **(2.2.1 Karburátor)**. V dnešní době se karburátory u nových motorů již přestaly používat. Vytlačili je vstříkovací systémy, které jsou dopodrobna rozebrány v kapitole **(2.2.4 Vstříkování paliva)**.

### 1.3.3.4 Ventily

Ventily slouží k řízenému průchodu nasávané směsi a odvodu spalin. Nasávaná směs proudí přes sací ventily, spaliny se odvádí přes výfukové ventily. Každý spalovací prostor u čtyřdobého motoru musí obsahovat nejméně jeden sací ventil a jeden výfukový ventil.

Ventily musejí být navrženy tak, aby v otevřeném stavu kladly co nejmenší odpor proudícím plynům. Průměr ventilu v sedle a ventilový zdvih udává průtočnou plochu ventilu. Sací ventily mají běžně větší průměr talířku oproti výfukovým ventilům, zdvih ventilu je 7,5 – 10 mm. Při maximálních otáčkách motoru by rychlost nasávání směsi v sedle ventilu neměla překročit 100 m/s. Pro lepší plnicí účinnost se používá většího množství ventilů (nejčastěji 2 ventily sací a 2 ventily výfukové). Ventily jsou mechanicky velmi namáhaná součást motoru, za chodu je ventil otevřen a opět uzavřen za pomoci ventilové pružiny i 50 x za jednu vteřinu (vyjma ventilů desmodromických, ty neobsahují pružiny). Talířky ventilů jsou namáhány vysokými teplotami, obzvláště výfukových ventilů, proto bývají tyto ventily oproti sacím ventilům menší, přijímají tak méně tepla. U zážehových motorů dosahují hlavy výfukových ventilů teploty 800 – 850 °C, u vznětových motorů 600 – 650 °C. Tyto vysoké teploty mají vliv na poškození ventilů propálením, působením deformací, korozí,... Sací ventily jsou chlazeny nasávanými plyny, a proto jejich tepelné namáhání není tak vysoké, jako výfukových ventilů. Ventil se skládá z 3 částí (**obr. 8**). Hlava ventilu (talířek), stopka a dřík. [7]



Obrázek 8 - a) ventil a jeho popis, b) upevnění ventilu [7]

Ventily jsou součástí ventilových rozvodů, jichž je několik typů lišící se svým uspořádáním (SV, OHV, OHC, F). O ventilových rozvodech více v kapitole **(2.2.3 Ventilové rozvody)**.

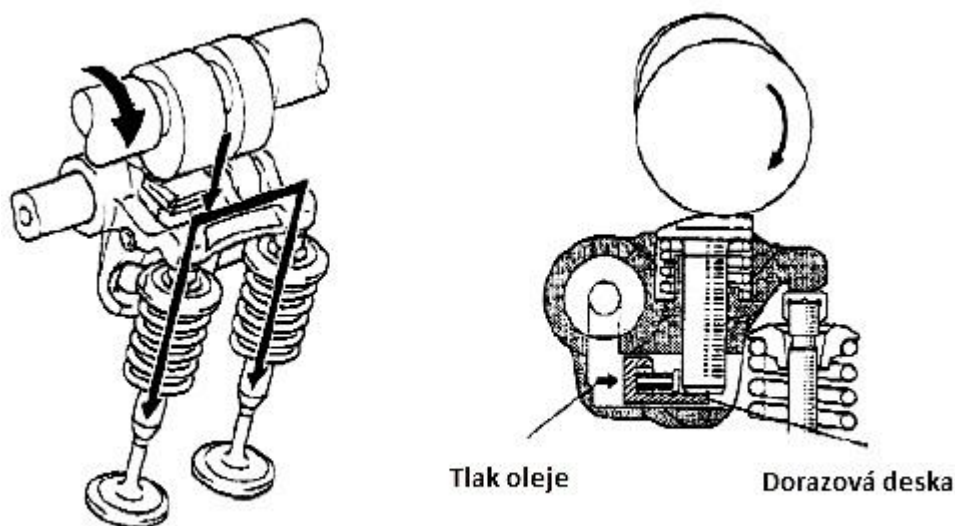
### Časování ventilů

Pro správnou funkčnost výměny náplně spalovacího prostoru je třeba, aby se výfukové i sací ventily otvíraly a zavíraly v přesný okamžik ve vztahu k úhlu natočení klikového hřídele (poloze pístu). Při otevření sacích ventilů příliš brzo dochází ke zpětnému toku spalin do sacího potrubí, při předčasném a pozdním uzavření se zase snižuje účinnost naplnění spalovacího prostoru. Při předčasném otevření výfukového ventilu dochází k úniku tlaku expandujících spalin, které by byly jinak využity pro pohon pístu. Pozdní i předčasné uzavření výfukového ventilu způsobuje, že v dalším cyklu hrozí nárůst zbytkových spalin. Z těchto důvodů je velmi důležité mít správné načasované otevírání ventilů, aby nedocházelo ke snižování účinnosti.

### Proměnné časování ventilů

Označováno jako VVT (Variable valve timing). Cílem této technologie je optimalizovat parametry ventilového rozvodu. Proměnným časováním ventilů je možné řídit okamžik otevření ventilů a dobu trvání, po které zůstanou ventily otevřeny, a také zdvih ventilu. V závislosti na otáčkách je možné použít kombinaci těchto parametrů. Změny časování a zdvihu ventilů probíhají buďto plynule nebo v několika krocích. Ovládání je zajištěno převážně hydraulicky nastavenou změnu tlaku oleje, který má vliv na otáčky vačkového

hřídele nebo na zdvihátko ventilu (**obr. 9**). Ve sportovních vysokootáčkových vozech např. F1, se ventily ovládají pneumaticky (stlačeným vzduchem), to však není pro klasická auta běžné. Tímto přenastavením ventilů dle konkrétních požadavků se dosahuje v závislosti na otáčkách příznivějšího průběhu výkonu, nebo snížení spotřeby pohonných hmot. To se projeví ve snížení emisí výfukových plynů. [8]



Obrázek 9 - Hydraulické ovládání ventilů [8]

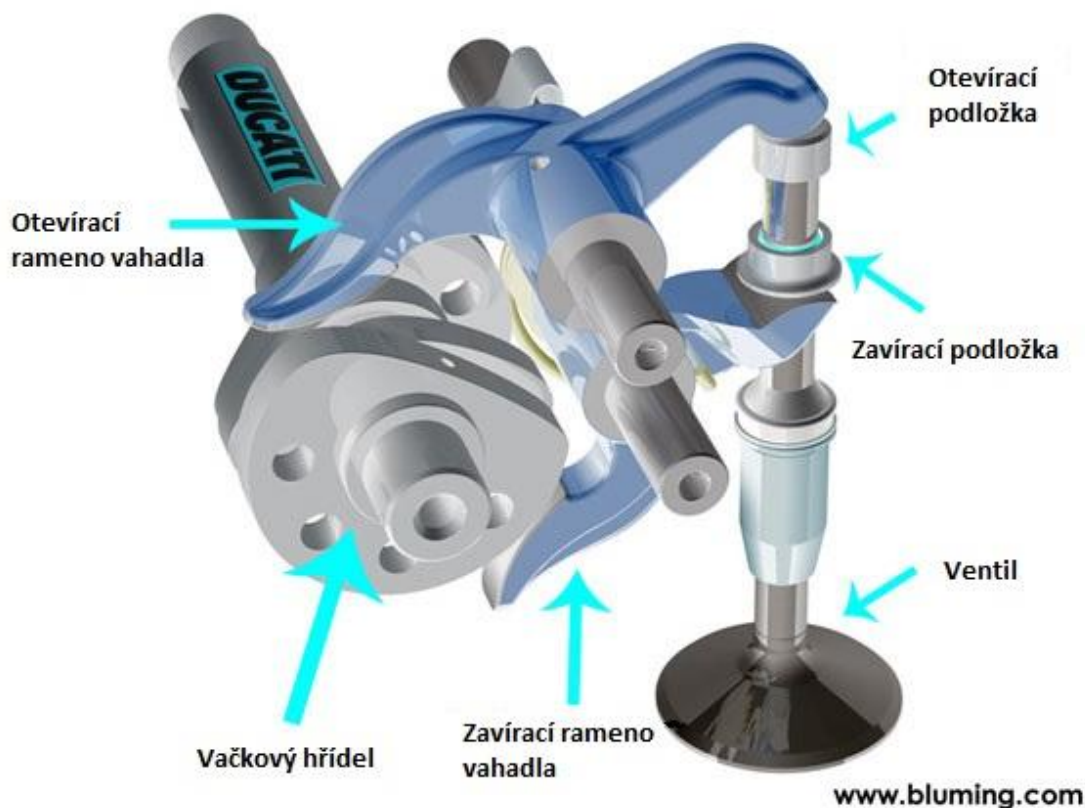
### Desmodromické ovládání ventilů

Desmodromický rozvod není vybaven vratnými pružinami, jako klasické rozvody, namísto toho je vybaven druhou vačkou, která se stará o zdvih. Desmodromicky ovládané ventily fungují na principu dvěma vačkami ovládaného vahadla, které otevírá a zavírá ventily. Tento systém snižuje mechanické ztráty a dovoluje dosažení vyšších otáček než rozvody s pružinami. To má kladný vztah na průběh účinnosti. Desmodromický způsob ovládání ventilů je mnohem náročnější na výrobu, údržbu i seřízení, a proto se používá převážně u závodních speciálů a motocyklů značky Ducati. [19]

Výhodou desmodromických rozvodů je schopnost otevírat a zavírat ventily velmi rychle, což umožňuje ponechat ventily otevřené delší dobu, zlepšuje se tak plnění motoru a dosahuje se menších ztrát oproti pružinovým rozvodům.

Nevýhodou je, jak již bylo naznačeno, vysoká složitost a nutná přesnost dílů, což přímo souvisí s cenou tohoto rozvodu. Náročná údržba a seřízení znamená, že je třeba precizně

seřadit dvě vůle pro každý ventil namísto jedné, je vhodné užívání kvalitnějších mazných olejů. Desmodromický ventilový rozvod na **obrázku č. 10**. [19]



Obrázek 10 - Desmodromické ovládání ventilu u motocyklu Ducati [9]

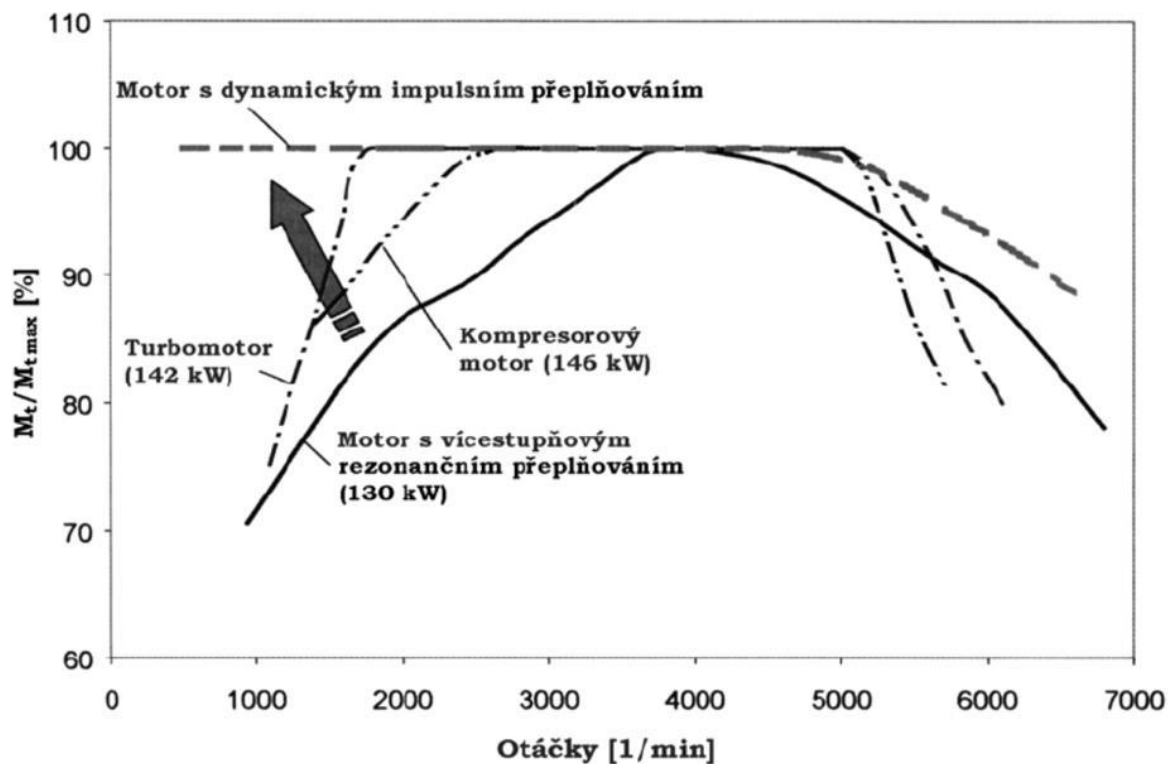
### 1.3.3.5 Víření

Víření je důležitý faktor pro promísení směsi a vzduchu ve spalovacím prostoru a jeho rovnoměrném rozmístění. Počátek víření může být vyvolán již v sacím potrubí, nebo následně v spalovacím prostoru dle tvaru dopadové plochy, popřípadě kombinace obojího, aby došlo k optimálnímu rozvíření směsi v celém objemu komory. Více o víření v kapitole [4.2]

### 1.3.3.6 Přepřňování

Přepřňováním se zvyšuje za stejného zdvihového objemu výkon motoru. Přepřňované motory se vyznačují menšími rozměry o nižší hmotnosti. Z menších rozměrů vyplývají nižší třecí ztráty oproti klasickým atmosférickým motorům totožného výkonu. K přepřňování se používají kompresory poháněné prací motoru, turbodmychadla využívající nevyužitou energii výfukových plynů a rezonanční přepřňování využívajících

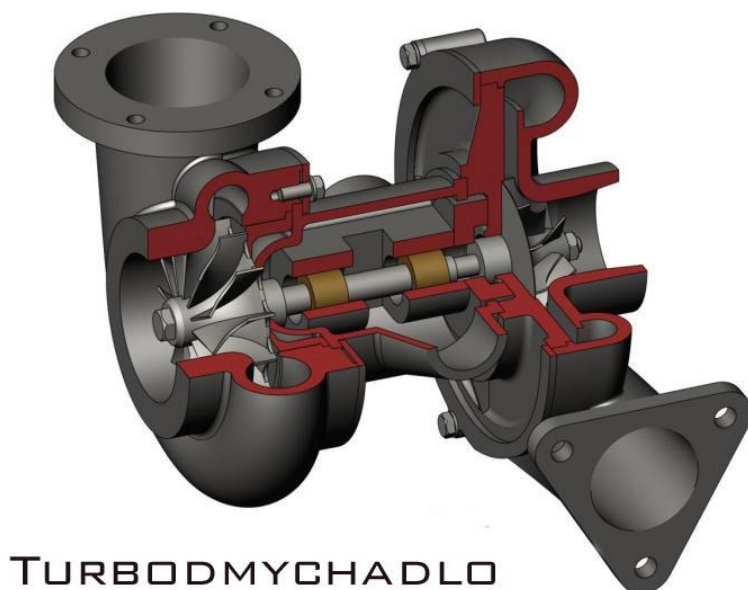
tlakových pulzů ze sacího potrubí. Použití kompresoru je však omezené, neboť ušetření třecích ztrát v motoru je vykompenzováno nově vzniklými ztrátami v kompresoru. Porovnání točivých momentů motorů přeplňovaných různými způsoby k vidění na **obrázku č. 11**. [34]



Obrázek 11 - Grafické porovnání točivých momentů pro různé způsoby přeplňování [10]

Z grafu (**obr. 11**) vyplývá, že nejlepší účinnost dle otáček má dynamické impulsní přeplňování. V praxi se však tento způsob kvůli technické náročnosti a vyšší odebírané práci při sacím zdvihu nepoužívá. Nejvíce využívaným způsobem přeplňování je použití turbodmychadla (**obr. 12**).

Hlavní výhody turbodmychadla jsou, že je nezávislé na přívodu mechanické práce z motoru a vyznačuje se vysokou výkonností již při nízkých otáčkách motoru. Nevýhodou je pak prodleva nárůstu plnicího tlaku po sešlápnutí plynového pedálu, nutnost regulace turbíny podle provozního režimu motoru (proměnlivá geometrie lopatek, obtokový ventil) a chemicko-tepelné namáhání v důsledku horkých plynů vstupujících do turbíny.



Obrázek 12 - Turbodmychadlo[11]

Při přeplňování dochází k nárůstu výkonu vlivem zvýšené hmotnosti (hustoty) vzduchu nasátého do spalovacího prostoru, čímž je umožněno spálit větší množství paliva. Mezi dmychadlo a motor se umísťuje chladič, který snižuje teplotu stlačeného plnicího vzduchu. Pokles teploty stlačeného vzduchu zvyšuje objemové množství vzduchu tlačенého do válce motoru. Stlačený vzduch se ochlazuje na teplotu blízkou teplotě vzduchu nestlačeného. [11]

Výpočet hmotnosti směsi nasáté jedním válcem:

$$m_L = \eta_{pl} * \rho_s * V_Z * \frac{\mathcal{E}_A}{\mathcal{E}_A - 1} = \eta_{pl} * \frac{p_s}{r_s * T_s} * V_Z * \frac{\mathcal{E}_A}{\mathcal{E}_A - 1} \quad [kg]$$

$m_L$  = hmotnost vzduchu [kg]

$\eta_{pl}$  = plnicí účinnost [-]

$\rho_s$  = hustota nasávaného vzduchu [kg.m<sup>3</sup>]

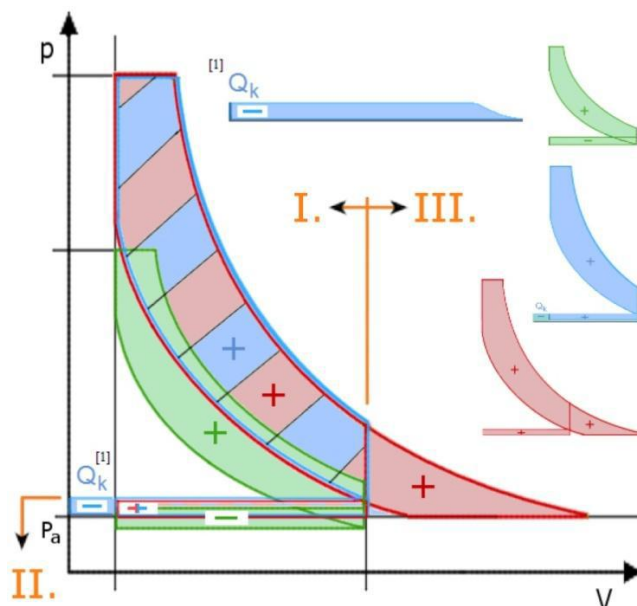
$V_Z$  = zdvihový objem válce [m<sup>3</sup>]

$\mathcal{E}_A$  = skutečný kompresní poměr [-]

$p_s$  = tlak nasávaného vzduchu [Pa]

$r_s$  = měrná plynová konstanta vzduchu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>1</sup>]

$T_s$  = teplota nasávaného vzduchu [K]



Obrázek 13 - : p - V diagramy Sabatova oběhu: atmosférického (zelená), přeplňovaného kompresorem (modrá), přeplňovaného turbodmyčadlem [12]

Z grafického zobrazení p – V diagramu Sabatova oběhu (**obr. 13**) nepřepřňovaného motoru, přeplňovaného motoru kompresorem a přeplňovaného motoru turbodmyčadlem jednoznačně vyplívá, že nejvyšší účinnost dosahuje motor přeplňovaný turbodmyčadlem. [34]

Výpočet tepelné účinnosti obecného oběhu přeplňovaného turbodmyčadlem:

$$\eta_{TD} = 1 - \frac{\left(\frac{1}{\epsilon_T^{\kappa}} - 1\right) * \left(A - \frac{1}{\epsilon_A}\right) * (1 - \kappa) + \kappa * [2 - \varphi * \psi^{\frac{1}{\kappa}} * \epsilon_T^{1-\kappa} + (1 - 2 * \epsilon_T^{\kappa-1}) * (\epsilon_T^{\kappa-1} - \eta_{mch} * \epsilon_T^{\kappa-1} + \eta_{mch})^{-1}]}{\epsilon_A^{\kappa-1} * (1 - \psi + \kappa * \psi - \kappa * \varphi * \psi)}$$

$\eta_{TD}$  = účinnost turbodmyčadlem přeplňovaného porovnávacího oběhu [-]

$\mathcal{E}_T$  = kompresní poměr plnicího kompresoru [-]

A = Atkinsonův poměr [-]

$\mathcal{E}_A$  = skutečný kompresní poměr [-]

$\kappa$  = Poissonova plynová konstanta

$\varphi$  = stupeň zvětšení objemu (izobarický přívod tepla) [-]

$\psi$  = stupeň zvýšení tlaku (izochorický přívod tepla) [-]

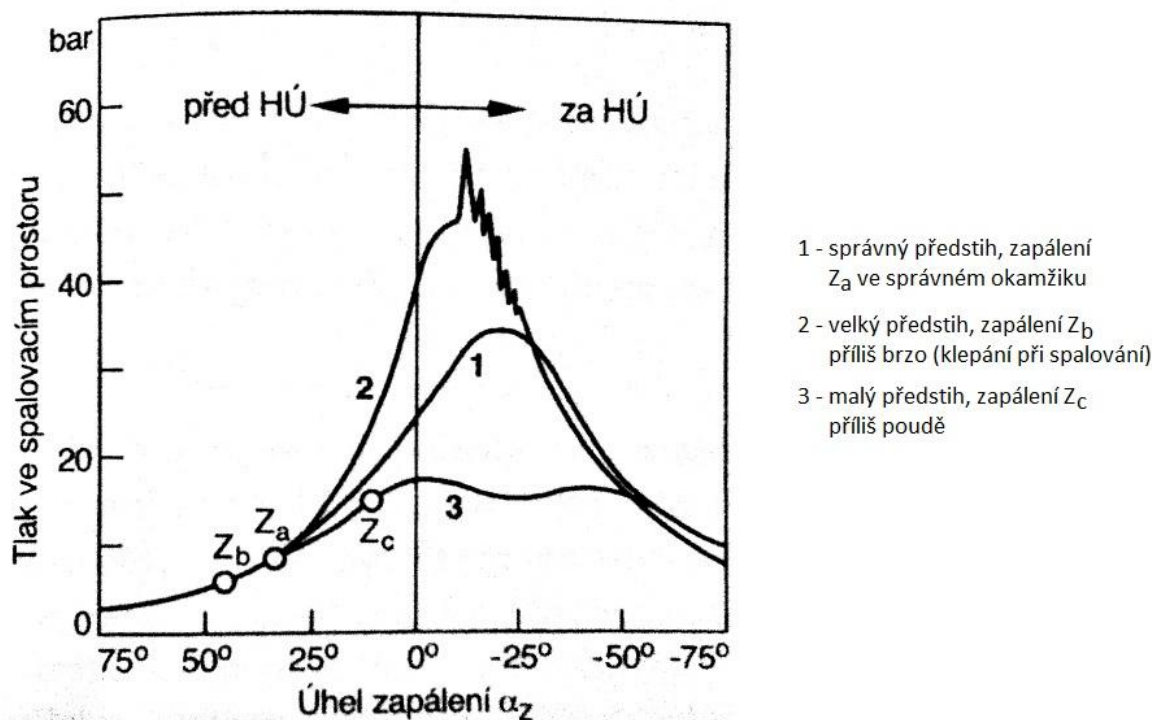
$\eta_{mch}$  = účinnost mezichladiče [-]

### 1.3.4 Zážeh

Zážeh neboli okamžik zapálení závisí na množství otáček motoru a jeho zatížení. Závislost na otáčkách je způsobena tím, že doba prohoření směsi je při konstantním plnění a konstantním poměru vzduch-palivo konstantní a proto musí dojít se stoupajícími otáčkami k dřívějšímu zapálení. Závislost na zatížení je ovlivněna ochuzením směsi zbývajícími množstvím zbytkových plynů při nízkém zatížení a menším naplněním válce. Tento vliv způsobí zvýšení prodlevy hoření a nižší rychlost prohořívání směsi, takže okamžik zapálení musí být přesunut do polohy „dříve“ tzn. do polohy většího předstihu. [24]

#### 1.3.4.1 Předstih

Pro dosažení maximální účinnosti pracovního oběhu motoru je nezbytné správné načasování vývinu tepla hoření paliva. Z důvodu průtahu spalování je nezbytné, aby k jeho započatí došlo ještě před dosažením horní úvratě pístu, přičemž maximum tlaku ve válci by mělo ležet na počátku expanzního zdvihu. Zážehové motory k tomuto účelu využívají regulaci okamžiku vývinu jiskry zapalovací svíčkou, u vznětových motorů předstih závisí na časování vstřikovacího systému. Vliv načasování předstihů patrný z obrázku č. 14.



Obrázek 14 - Vliv předstihu zážehu na průběh spalovacích tlaků ve válci [13]



Při zpožděném zážehu není ve spalovací komoře již dostatečný tlak a účinnost výbuchu je menší. Předčasný zážeh působí zvětšený tlak proti pohybu pístu a opět dochází ke zmenšení účinnosti.

Teoreticky nejvhodnější okamžik pro zapálení pohonné směsi v pracovním válci je takový okamžik, který umožňuje, aby spalovací proces měl dostatek času k vytvoření maximálního tlaku a to právě v době, kdy se píst nachází v horní úvratě. Z toho plyne, že k vlastnímu zážehu musí dojít v určitém předstihu, tj. o něco dříve, než píst dosáhne horní úvratě.

Předstih se udává buďto v milimetrech dráhy pístu, než píst dosáhne horní úvratě, nebo ve stupních pootočení klikového hřídele, než píst dosáhne horní úvratě. [26]

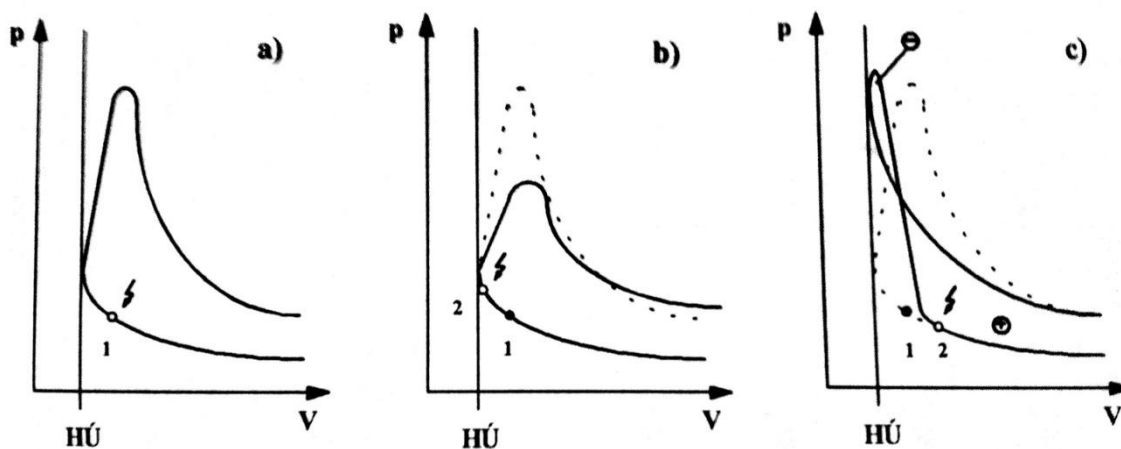
Rychlost hoření zápalné směsi ve spalovacím prostoru se odvíjí od bohatosti směsi. Chudá směs hoří pomaleji a bohatá rychleji. Při změnách otáček motoru dochází také ke změnám rychlosti pohybu pístu ve válci. Předstih je tedy poměrná veličina a jeho velikost (mm, stupně) musíme během provozu motoru vhodně upravovat a to podle podmínek, ve kterých se motor právě nachází. Tomuto všemu nejprve předchází nastavení velikosti základního předstihu na hodnoty dané výrobcem a to za klidu motoru. Potom, při chodu motoru dochází k přenastavování této hodnoty základního předstihu. Toto vše zajišťuje tzv. automatika regulace předstihu zážehu.

Předstih závisí na:

- otáčkách motoru,
- bohatosti směsi,
- oktanovém čísle,
- kompresním poměru,
- teplotě motoru a nasávaného vzduchu.

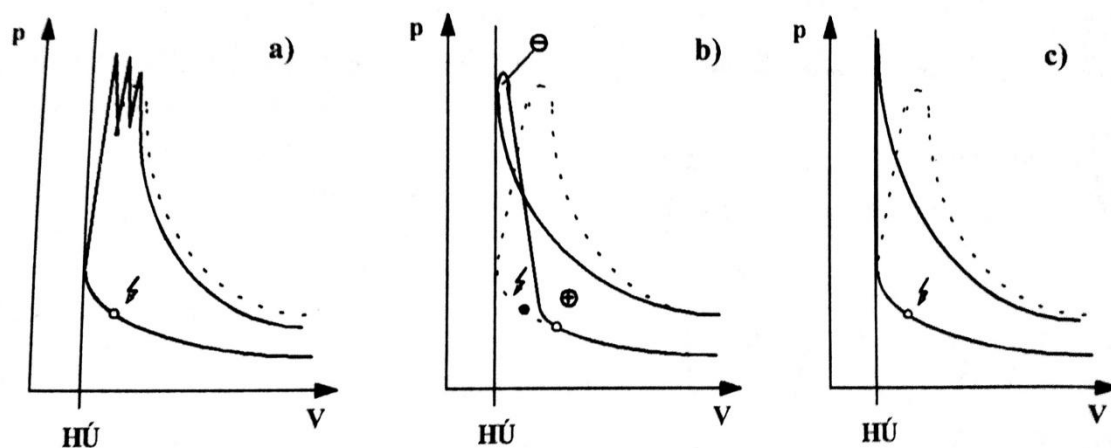
Správné načasování zážehu má vliv také na produkci škodlivin a tepelné namáhání součástí motoru. Nebezpečný je pak zejména pozdní zážeh, který výrazně zvyšuje teplotu výfukových plynů a tedy i tepelné namáhání výfukových ventilů. Průběh předstihů znázorněná v p-V diagramu k vidění na **obr. 15**. [24]

Vliv předstihů zanesený do p-V diagramu k vidění na **obrázku 15**. Je velmi patrné, jak velký vliv má správné načasování zážehu na správném chodu motoru.



Obrázek 15 - Předstih zážehu: a) optimální, b) pozdní, c) předčasný [31]

Následující **obr. 16** znázorňuje v p-V diagramu chybné průběhy hoření, které mohou nastat a mají veliký vliv na účinnost spalovacího motoru.



Obrázek 16 - Chybné průběhy hoření: a) detonační hoření, b) předzápaly, c) samozápaly [31]

## 2 Vývoj konstrukčních prvků v čase a souvislost s účinností

V této kapitole bude představeno několik automobilů z počátků rozvoje aut poháněných spalovacími motory a následný historický vývoj konstrukčních prvků a systémů, které měly vliv na zlepšení účinnosti motoru.

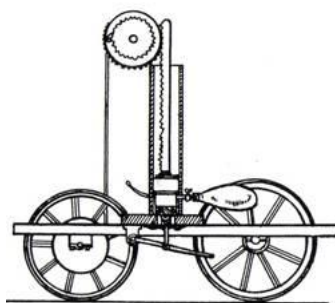
### 2.1 Historické automobily se spalovacím motorem

V prvopočátcích automobilů byl jako pohon užíván parní stroj, ten ovšem dosahoval velice malých účinností, a proto se vynálezci začali vydávat jinou cestou. Postupně se začaly objevovat spalovací motory, které zpočátku také neoplývaly vysokou účinností, ale dalším vývojem se dosahovalo čím dál uspokojivějších výsledků.

#### 2.1.1 *Isaac de Rivaz*

První automobil se spalovacím motorem vynalezl francouzsko-švýcarský vynálezce Isaac de Rivaz. Vynález pochází z roku 1807 a jednalo se o automobil se spalovacím motorem, který byl poháněn svítiplynem nebo vodíkem. Fosilní paliva, o kterých je v této diplomové práci řeč, ještě nebyla vynalezena.

Isaac de Rivaz (**obr. 17**) bylo konstrukčně velmi jednoduché vozidlo, postrádající jakékoliv řízení. Motor se vyznačoval velmi vysokou pístnicí (1520 mm), ve které byl píst o průměru 365 mm. Po zapálení směsi vzduchu a plynu byl píst zvedán vzhůru pístnicí, po ochlazení a vypuštění spalin píst klesal zpátky vlastní tíhou do původní polohy a za pomoci rohatkového mechanismu pootáčel s bubnem, který byl propojen řetězovým převodem s poháněnou nápravou. [35]



Obrázek 17 - Isaac de Rivaz [14]

*Parametry Isaac de Rivaz:*

$$m_e = 600 - 800 \text{ [g/kw h]}$$

$$\eta = 3 - 4 \text{ [%]}$$

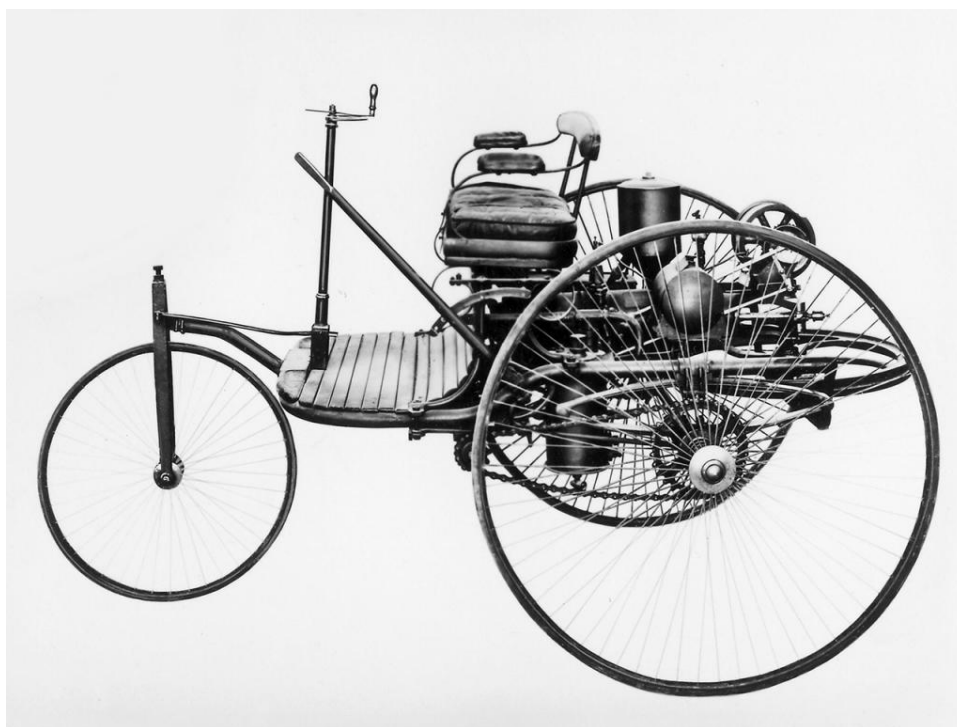
$m_e$  – měrná spotřeba paliva

*Tyto parametry jsou odhadnuté za pomoci odborníka pana Ing. Jiřího Firsta, přesné hodnoty totiž nejsou k dohledání.*

### 2.1.2 **Benz Patent-Motorwagen**

Prvním automobilem poháněným benzínovým motorem byl Benz Patent-Motorwagen (**obr. 18**), veřejnosti ho představil roku 1885 jeho vynálezce Karl Friedrich Michael Benz. O rok později na tento automobil dostal jeho konstruktér Karl Benz patent, po němž následovala první sériová výroba tohoto vozu.

Auto bylo tříkolové konstrukce a vybaveno jednoválcovým čtyřdobým motorem inspirovaným podle patentu Ottova motoru (958 cm<sup>3</sup>). Byl vybaven elektrickým zapalováním, vodním chlazením a karburátorem. Rám vozu byl zhotoven z posvařovaných trubek.



Obrázek 18 - Benz Motorwagen [15]

*Technické parametry Benz Patent-Motorwagen:*

*Délka:* 3200 mm

*Šířka:* 1650 mm

*Výška:* 1750 mm

*Hmotnost:* 265 kg

*Rozvor:* 1650 mm

*Maximální rychlost:* 12,8 – 16 km/h

$m_e = 500 - 600$  [g/kw h]

$\eta = 6 - 8$  [%]

[35]

*Účinnost a měrná spotřeba paliva je opět pouze odhadnuta, jako v předchozím případě.*

## 2.2 Historické vynálezy zvyšující účinnost

Následující prvky přispívaly ke zvyšování účinnosti v průběhu času, o některých z nich již byla řeč v minulých kapitolách, zde budou však probrány více dopodrobna.

- Karburátor
- Elektrické zapalování
- Ventilové rozvody
- Vstřikování paliva
- Přepřňování
- Řízený předstih

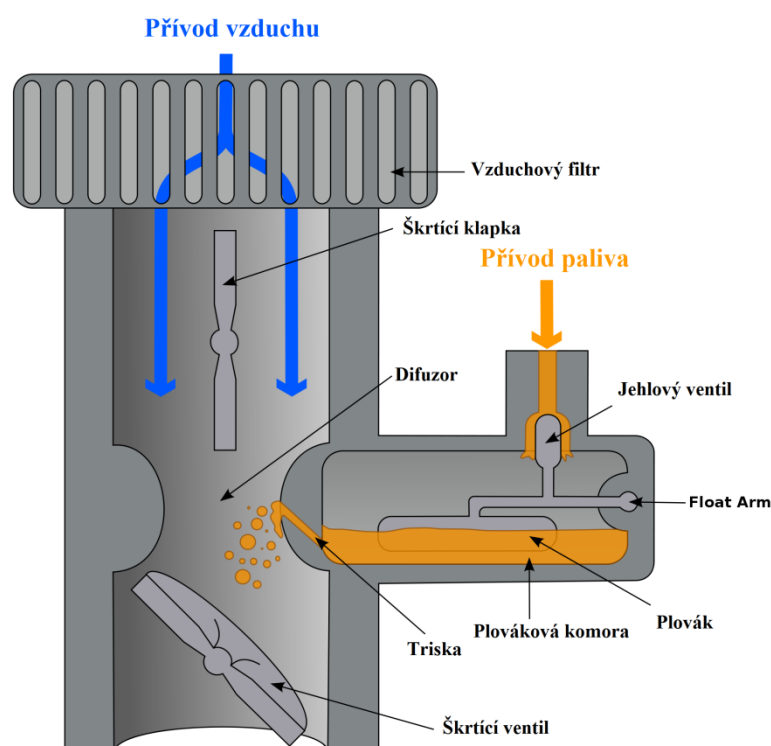
### 2.2.1 *Karburátor*

Karburátor slouží k vytvoření směsi paliva a vzduchu před vstupem do spalovací komory. Používal se u zážehových motorů. V dnešní době je překonán vstřikovacími systémy. Tento systém tvorby směsi vynalezl Maybach roku 1893, ale již v předešlých letech si s podobnou myšlenkou pohrával belgický vynálezce Jean Lenoir, avšak nešlo o benzínový motor.

Karburátor (k vidění na **obr. 19**) připravuje zápalnou směs benzínu a vzduchu v potřebném poměru a množství v závislosti na otáčkách motoru a jeho zatížení. Rozprašuje jemné kapičky benzínu do nasávaného proudu vzduchu směřujícího do spalovací komory motoru.

Karburátor se skládá z několika základních částí:

- Směšovací komora
- Difuzor
- Plováková komora
- Plovák
- Odvzdušňovací ventil
- Jehlový ventil
- Rozprašovací trubice
- Škrticí klapka



Obrázek 19 - Schéma jednoduchého karburátoru [16]

### Popis funkce karburátoru

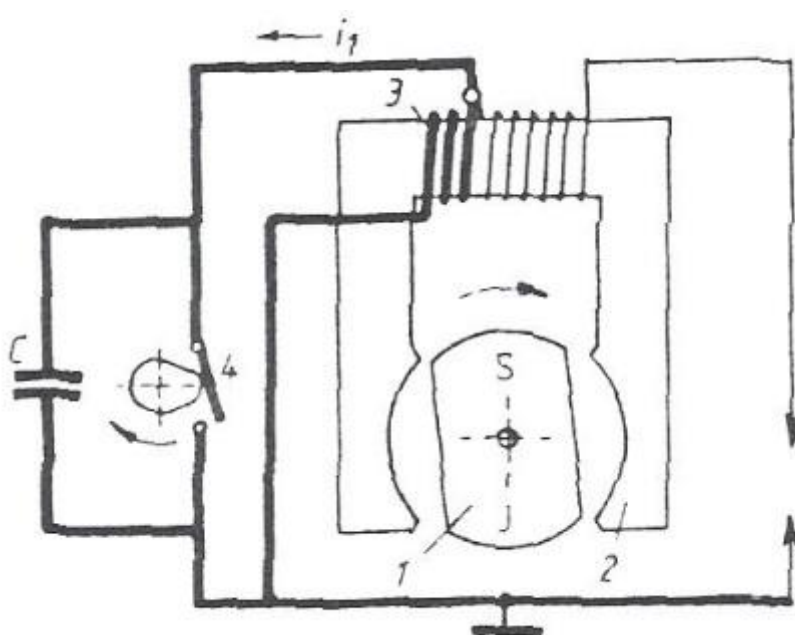
Vzduch proudící karburátorem prochází zúženým místem, označovaným jako difuzor. V difuzoru vlivem Bernulliovy rovnice stoupá rychlost proudícího vzduchu a zároveň vzniká podtlak, který z trysky (injektoru) umístěné v difuzoru, přisává palivo z komory karburátoru a rozprašuje ho na drobné kapičky. Odsátím části paliva z plovákové komory dojde k poklesu plováku a tím k pootevření palivového potrubí skrze jehlový ventil. Po doplnění paliva se jehlový ventil vlivem zvednutí plováku opět uzavře. [16]

S používáním karburátorů stoupla účinnost prvních automobilů odhadem až na 10%.

### 2.2.2 Elektrické zapalování – Bosch

V roce 1902 vynalezl Robert Bosch elektrické zapalování pomocí magnetu, čímž vznikl první spolehlivý systém zapalování směsi.

Energie pro jiskru se získávala z otáčivého pohybu magnetu. Vysoké napětí se získávalo akumulací magnetické energie do primárního vinutí a následného uvolnění přerušením primárního proudu. Schéma na obr. 20.



Obrázek 20 - Schéma magnetoelektrického zapalování [17]

- 1 - rotor (permanentní magnet)
- 2 - stator (transformátorové plechy)
- 3 - zapalovací cívka
- 4 - přerušovač
- $i_1$  – primární proud [A]

Při otáčení rotoru (permanentního magnetu) dochází ke změně velikosti i směru magnetického toku v obvodu statoru a vzniká střídavý magnetický tok, který ve vinutí zapalovací svíčky generuje napětí. Takto vzniklé napětí není dostatečně velké, aby došlo na zapalovací svíčke k přeskočení jiskry, ale způsobí, že primárním vinutím teče proud  $i_1$ .

Tento vzniklý proud  $i_1$  zapříčiňuje akumulaci magnetické energie v primárním vinutí. Při přerušení proudu se rychle ztrácí magnetická energie v primární cívce a v sekundární cívce se generuje vysoké napětí, které již dostačuje k přeskočení jiskry. [17]

### 2.2.3 Ventilové rozvody

Jedná se o mechanické zařízení, které zařizuje výměnu obsahu látek ve spalovacím prostoru motoru. Ventilový rozvod se stará o otevírání a zavírání ventilů včetně správného načasování. Dvoudobé motory ventily téměř nepoužívají, proto bude řeč pouze o čtyřdobých motorech.

Ventilový rozvod může být poháněn ozubenými koly, řetězem nebo řemenem. Motorem hnanou částí je vačková hřídel, která řídí otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů. Děje se tak přímo, nebo za pomoci zdvihátek, tyček či vahadel. U čtyřdobých motorů dochází při čtyřech dobách ke dvěma otáčkám vačkového hřídele. [24]

#### Druhy ventilových rozvodů:

- F - Head
- SV (Side Valves)
- OHV (Over Head Valves)
- OHC (Over Head Camshaft)

#### 2.2.3.1 Rozvod F

Tento rozvod se vyznačuje umístěním jednoho ventilu v hlavě válce a druhého v bloku motoru. Používal se

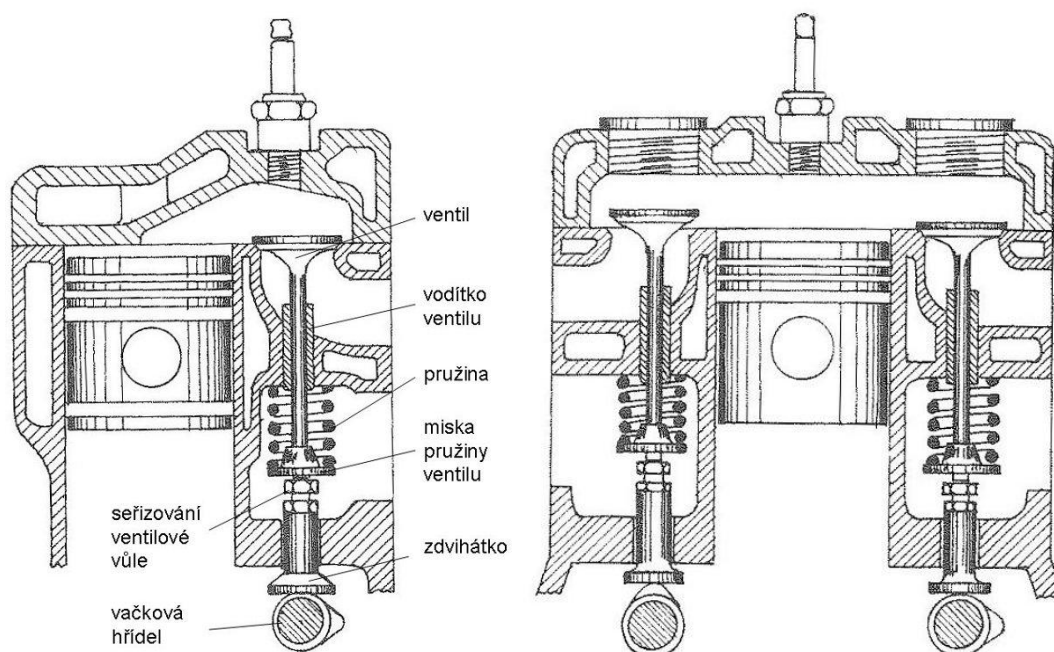
Výhody:

#### 2.2.3.2 Rozvody SV (Side Valves)

Jedná se o rozvod s postraními ventily. Toto uspořádání ventilů se vyznačovalo malou hmotností a jednoduchostí výroby. Umístění ventilů zamezovalo střetnutí s válcem, avšak velmi těžko se dosahovalo vysokého kompresního poměru, tvar spalovacího prostoru nebyl ideální, proto nebyl perfektní přenos tlaku spalin na píst. Tento typ motoru dosahoval malé plnicí účinnosti. Kompresní poměr se pohyboval pouze okolo hodnoty 1:7. [19]



Toto uspořádání (**obr. 21**) je v dnešní době značně nevýhodné, a proto se používá pouze zřídka u některých levných benzinových sekaček.

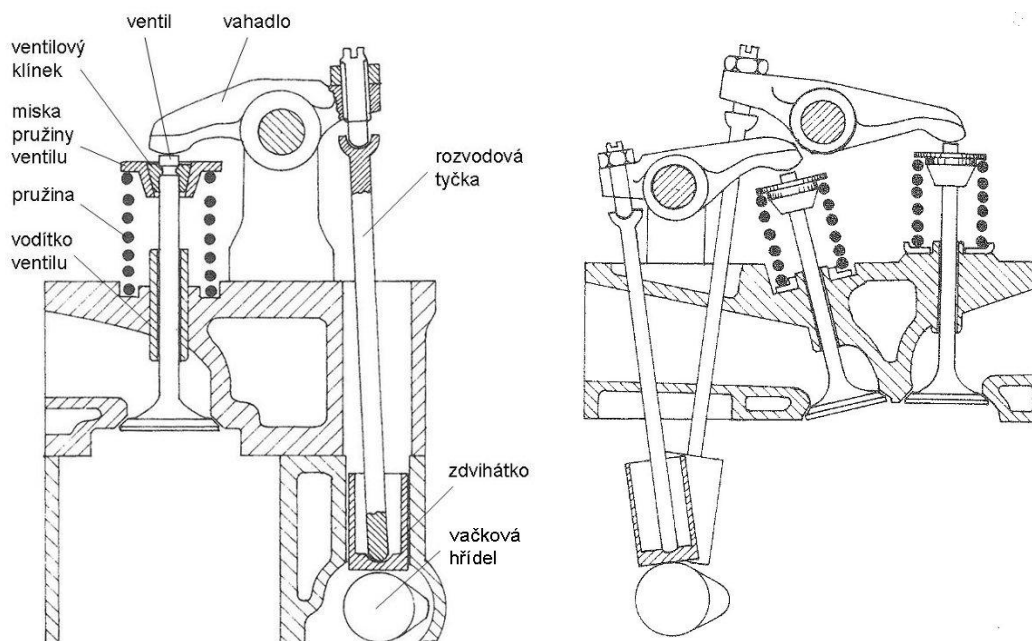


Obrázek 21 - Schéma rozvodu SV [18]

### 2.2.3.3 Rozvody OHV ( Over Head Valves)

Tento druh rozvodu je oproti SV novější, přesto pro dnešní dobu zastaralý. Ventily jsou u tohoto typu motoru umístěny v hlavě válců a vačková hřídel se nachází v bloku motoru. Kvůli relativně velké vzdálenosti ventilů a vačkového hřídele je nutné zajistit přenos pohybu z vačkové hřídele na ventily dalšími prvky a to zdvihátkem, zdvihací tyčkou a vahadlem. OHV rozvod (**obr. 22**) obsahuje velké množství součástek, což má vliv na jeho tuhost. Výhodou tohoto rozvodu je umístění vačkového hřídele v blízkosti klikového hřídele a tím snazší přenos sil ozubením, nebo řetězem. To má kladný vliv na životnost a spolehlivost motoru. Kvůli mnoha dílům se OHV rozvody nehodí na vysokootáčkové motory. [19]

Kompresní poměr se při tomto rozložení rozvodů zvýšil na 1 : 9 až 10. Stejně jako v předchozím případě je převodový poměr klikového hřídele oproti vačkovému 2:1.



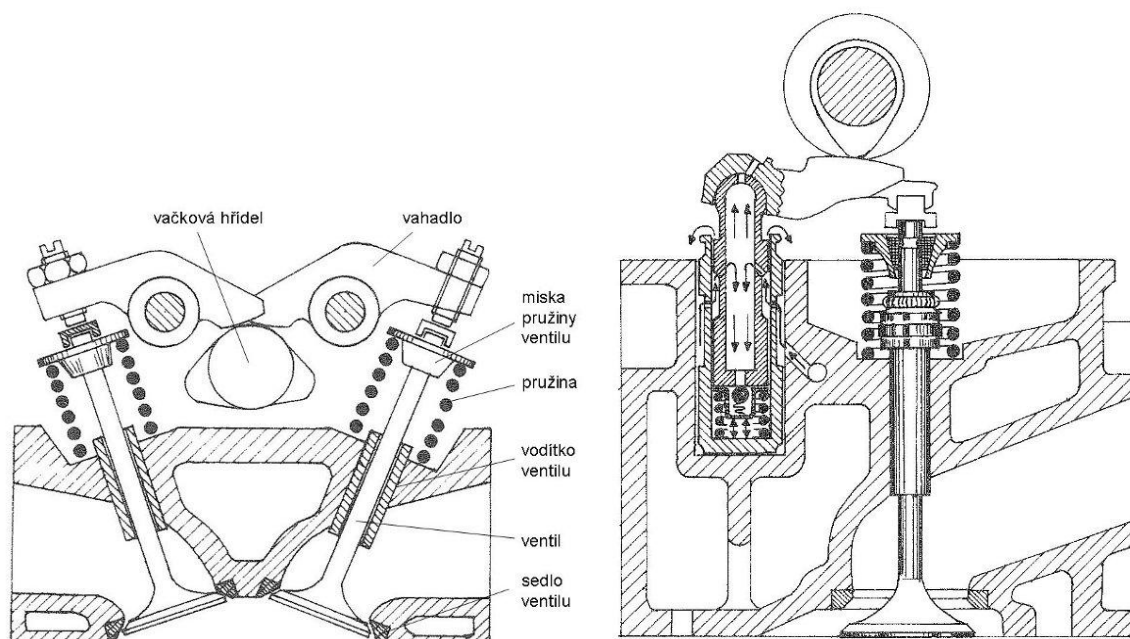
Obrázek 22 - Schéma rozvodu OHV [19]

#### 2.2.3.4 Rozvody OHC (Over Head Camshaft)

Tento druh rozvodu obsahuje ventily i vačkovou hřídel v hlavě válce. Díky blízkému umístění vačkové hřídele a ventilu není nutné používat vahadla ani zdvihací tyčky, ale postačí použití samotného zdvihátka potřebného k seřízení ventilové vůle. Menší počet použitých součástí zaručuje větší tuhost a menší rozptyl vůlí, menší hmotnost a setrvačnost, což je potřebné pro dosažení dobré účinnosti u vysokootáčkových motorů.

Přenos sil z klikového hřídele na vačkový hřídel je nejčastěji zajištěn ozubeným řemenem (malá hmotnost a jednoduchost), méně často řetězem, výjimečně ozubeným převodem. Nevýhodou OHC rozvodu (**obr. 23**) je komplikovanější a vyšší hlava válců. Výhody však tento nedostatek převyšují, a proto je použití tohoto rozvodu určené pro nynější automobily. [19]

Kompresní poměr u tohoto rozvodu dosahuje poměru 1:13.



Obrázek 23 - Schéma OHC rozvodu [19]

#### 2.2.4 Vstřikování paliva

Počáteční experimenty se vstřikováním benzínu začaly již okolo roku 1900, ale do aut proniklo až v roce 1925 zásluhou vynálezce Jonase Hesselmana, který zkombinoval zážehový a vznětový princip motoru. K nastartování a studenému chodu byl vstřikován nejdříve benzín, později těžké topné oleje.

Vstřikování paliva v počátcích zvyšovalo účinnost motoru dopravením většího množství paliva do válce, ale nebylo to příliš ekonomické řešení. Nadcházelo mnoho let vývoje a pokusů, než v Evropě počátkem 90. let začalo vstřikování paliva nahrazovat veškeré karburátory. Dokázalo se zajistit zvýšení výkonu na litr paliva o 10 – 20 % a snížit spotřebu paliva o 5 – 15 %. Vstřikováním paliva se zlepšila reakční doba po sešlápnutí pedálu a mohl být odstraněn sytič (přívěra vzduchu).

Vstřikováním paliva se tvoří směs paliva se vzduchem, palivo se vstřikuje do různých částí motoru dle konstrukčního řešení. Vstřikuje se do spalovací komory, komůrky, sacího kanálu, sacího potrubí nebo do válce. Palivo je vstřikováno velmi malým otvorem trysky pod velkým tlakem, aby došlo k rozprášení na co nejmenší kapičky, to zaručuje tvorbu lepší směsi paliva a vzduchu.

U starších vznětových motorů se vstřikování provádělo pneumaticky, kdy bylo palivo s nezvýšeným tlakem dopravováno přes trysku do příslušného místa proudem stlačeného vzduchu. [2]

Rozdělení vstřikování dle typu motoru:

- Zážehové motory – vstřikuje se lehce odpařitelné palivo (benzin)
- Vznětové motory – vstřikování kapalného paliva (nafta)

#### 2.2.4.1 **Systém řízeného vstřiku paliva Jetronic**

Pro zážehové motory se používá systém Jetronic, vynalezený ve firmě Robert Bosch GmbH z roku 1960.

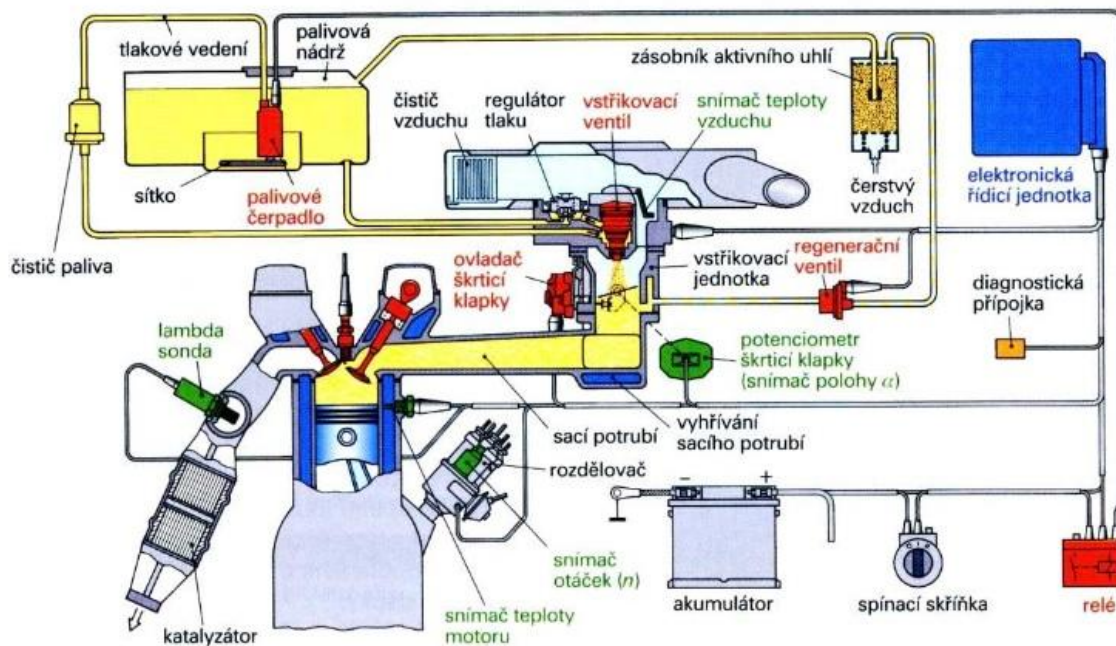
Existuje mnoho variant tohoto systému:

- D – Jetronic (1967 – 1976)
- K – Jetronic (1973 – 1994)
- KE – Jetronic (1985 – 1993)
- L – Jetronic (1974 – 1989)
- Mono – Jetronic (1988 – 1995)

##### **Mono – Jetronic**

Jedná se o elektronicky řízené přerušované nízkotlaké vstřikování benzínu pro zážehové motory s jedním elektromagnetickým vstřikovacím ventilem. Okamžik a délku vstřikování řídí řídicí jednotka v závislosti na poloze škrticí klapky a počtu otáček motoru.

Určení přesného množství vstříknutého paliva vyhodnocuje řídicí jednotka z informací o teplotě motoru, teplotě vzduchu, složení směsi a složení spalin (lambda sonda). Systém Mono – Jetronic k vidění na **obr. 24**. [22]



Obrázek 24 - Vstřikovací systém Mono – Jetronic [22]

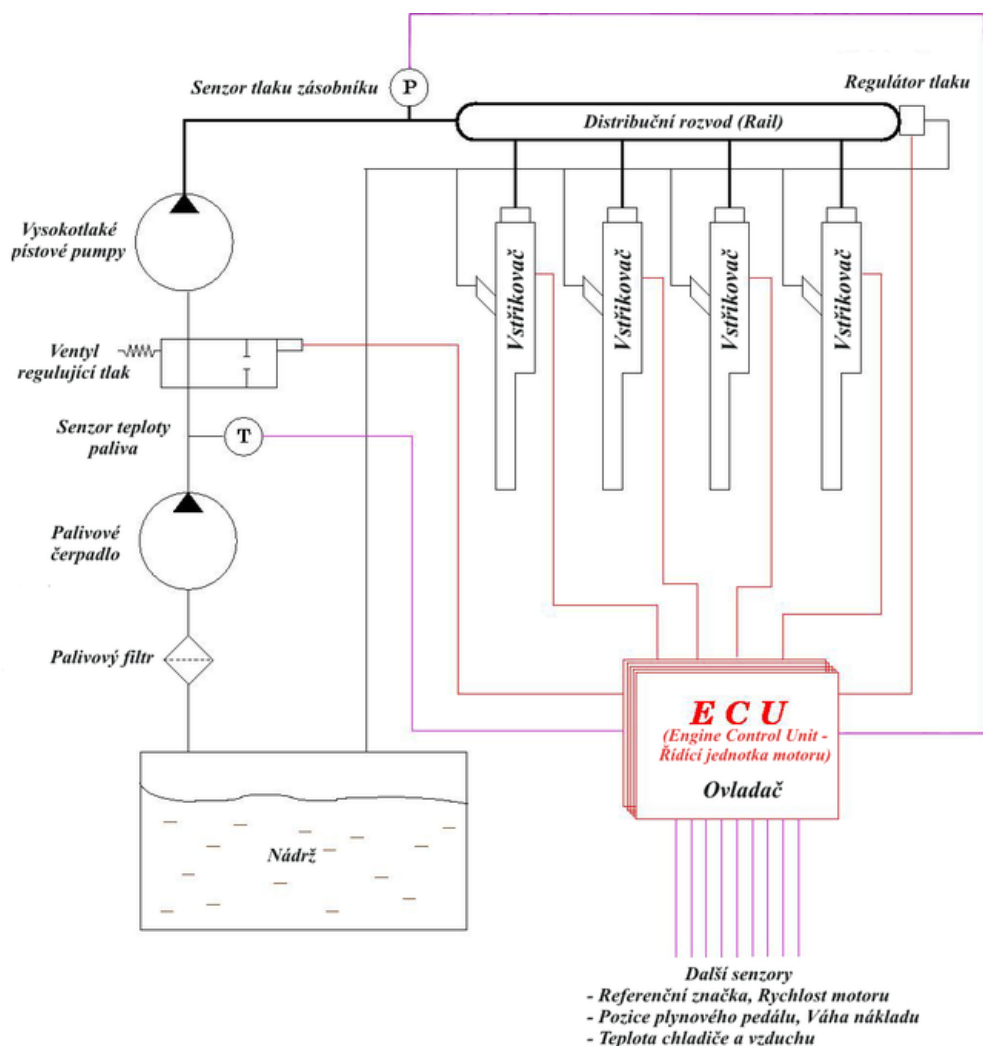
#### 2.2.4.2 Systém řízeného vstřikování Common rail

Jedná se o řízený vstřik paliva u převážně vznětových motorů. Prototyp tohoto systému vynalezl koncem 60. let Robert Huber ze Švýcarska, ale do osobních automobilů sériové výroby se dostal až v roce 1997 u Alfa Romeo 156 1.9 JTD.

Common rail je vysokotlaký zásobník, který udržuje vysoký tlak paliva hnaného pumpou. Palivo se rozprašuje vysokým tlakem větším množstvím menších otvorů ve vstřikovačích, což vytváří lépe hořlavou směs a přispívá tak k lepší účinnosti motoru, točivého momentu, výkonu, snížení hluku, vibrací a emisí.

##### Princip funkce systému Common rail

Z vysokotlakého čerpadla je palivo vedeno do zásobníku tlaku (označovaného jako rail), který je společný (common) pro veškeré válce v motoru. Ze zásobníku je dodáváno palivo do všech vstřikovacích zařízení v každém válci. V systému se nachází jedno vysokotlaké čerpadlo, které je dimenzováno na neustálou dodávku maximálního výkonu k udržení potřebného tlaku pro vstřikování paliva. V zásobníku je tlak hlídán ventilem a přebytečné palivo je vedeno zpátky do nádrže nebo sání čerpadla. První generace systému Common rail použitá v sériové výrobě do automobilů pracovala s tlakem 1350 barů, v dnešní době se pracuje s tlakem až 2500 barů. Schéma systému Common rail na **obr. 25.** [37]



Obrázek 25 - Schéma systému Common rail [21]

### 2.2.5 Přepřívání (turbo)

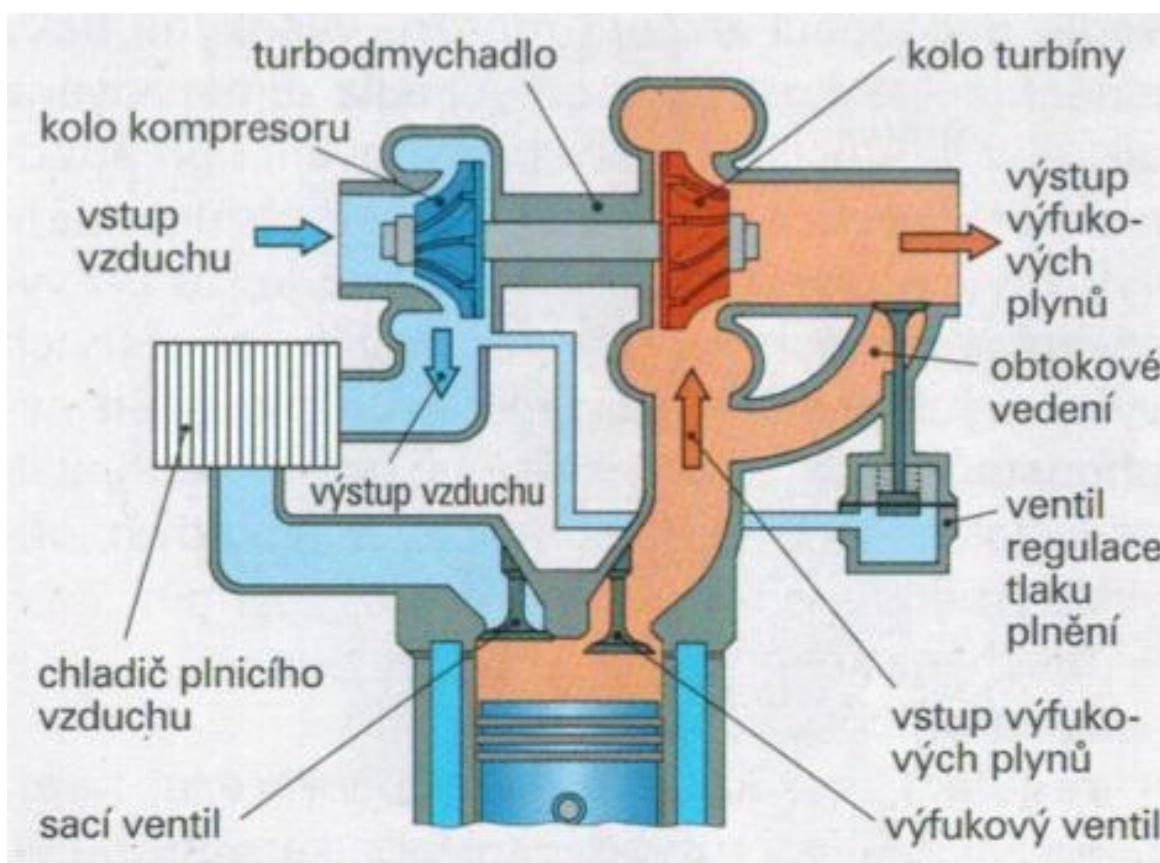
Pro vyšší účinnost motoru je potřeba přivést větší množství paliva a vzduchu do spalovací komory ke spálení. Výkon se dá zvýšit zvýšením otáček motoru, zvětšením zdvihového objemu motoru nebo lepším plněním válců. Při zvětšení zdvihového objemu se musí konstrukčně zvětšit rozměr motoru, což vede k větší hmotnosti. Zvýšení otáček motoru vede ke složitějšímu konstrukčnímu řešení a klade větší nároky na opotřebení motoru. Proto nejlepším způsobem jak zvýšit účinnost motoru je zlepšením plnění válců přepříváním turbodmychadlem. Při přepřívání se do pracovního válce dostává větší množství vzduchu, než při atmosférickém plnění a proto je umožněno vstřikování i většího množství paliva při zachování potřebného směšovacího poměru. Přepříváním se dá dosahovat tedy vyšších výkonů, nebo konstrukčně menších motorů o stejném výkonu. To je velmi příhodné pro osobní dopravu. Přepříváním turbodmychadlem se dá zvýšit výkon motoru v rozsahu od 20 do 90 %. [23]

### 2.2.5.1 Princip turbodmychadla

O turbodmychadlu byla řeč již v předchozí kapitole [1.3.3.6], proto zde budou pouze doplňující základní informace, které tam nebyly uvedeny.

Princip fungování turbodmychadla pochází již z roku 1901 od Švicara Büchimiho. Nejprve byl použit až koncem třicátých let u leteckých motorů a až mnohem později u osobních automobilů.

Funkce turbodmychadla [obr. 26] je taková, že výfukové plyny vycházející z motoru roztáčejí turbínu, která je spojena přímo hřídelí s dmychadlem, které nasává a stlačuje vzduch, jež je dopravován skrze chladič s určitým přetlakem přímo do válce motoru. Vzduch je vlivem stlačení ohřát a pro lepší plnicí účinnost musí být ochlazen. [23]



Obrázek 26 - Schéma vznětového motoru přepřehovaného turbodmychadlem [23]

Další výhody přepřehovaného vznětového motoru turbodmychadlem:

- lepší výkonová hmotnost motoru [kg / kW],
- menší rozměry při stejném výkonu oproti nepřepřehovanému motoru,

- lepší průběh točivého momentu,
- lepší vlastnosti motoru ve vysoké nadmořské výšce (kvůli nižší hustotě vzduchu),
- přeplňované motory jsou tišší oproti nepřepřňovaným stejného výkonu,
- snižuje množství škodlivin. [24]

### 2.2.6 Řízený předstih

Zážehové spalovací motory spalují směs vzduchu a benzínu, která je v určitém okamžiku (předstihu) před dosažením horní úvratě (HÚ) zapálena. Předstih zažehnutí palivové směsi by měl být takový, aby při dosažení HÚ bylo palivo již spáleno. Doba, za kterou urazí píst stejnou vzdálenost, se mění v závislosti na otáčkách motoru, avšak doba hoření směsi je téměř neměnná. Závisí na složení směsi, typu paliva, tlaku, teplotě aj. Z toho tvrzení vyplývá, že nelze dosáhnout optimálního předstihu v celém rozsahu pracovních otáček bez jeho řízení. U automobilových motorů je tento problém řešen odstředivým a podtlakovým regulátorem předstihu anebo inteligentní řídicí jednotkou. Největší předstih zážehu je vyžadován při nejvyšších otáčkách motoru a naopak nejmenší předstih při nejnižších otáčkách.

Předpokládejme pro snazší vysvětlení konstantní dobu hoření směsi 1 ms. Za tuto dobu urazí klikový hřídel motoru při 6000 ot / min úhel  $36^\circ$ , ale při 1000 ot / min pouze  $6^\circ$ . Z toho vyplývá, že nastavíme-li konstantní předstih  $21^\circ$ , bude při 6000 ot / min zážeh opožděn o  $15^\circ$  (malý předstih) a při 1000 ot / min bude o  $15^\circ$  urychlen (velký předstih). Chceme-li řídit předstih na optimální hodnotu v celém rozsahu otáček, je nutné nastavit na snímači otáčení předstih pro nejvyšší pracovní otáčky motoru, tj. např. pro 6000 ot / min  $36^\circ$ . Pak např. pro 1000 ot / min je nutné zpozdít zážeh motoru zpoždovacím členem o dobu, která odpovídá úhlu  $30^\circ$  tak, aby bylo dosaženo žádaného předstihu  $6^\circ$ . [26]

### 2.2.7 Přehled konstrukčních prvků v čase

V následující tabulce (**tabulka 3**) je přehledně znázorněno, jak se zvyšovala účinnost s vývojem a nasazováním nových konstrukčních prvků motoru.



Tabulka 3 - Konstrukční prvky v čase se znázorněním kompresního poměru a účinnosti

Roky	Zavedené prvky do motoru	$\epsilon$	$\eta$ [%]
1900	Rozvod SV, F Poměr vrtání ku zdvihu $D/z < 1$ Odpařovací karburátor Žhavicí zapalování	5 - 6	<b>8 - 10</b>
1920	Ricardo ventilový rozvody OHV elektrické zapalování (Bosch) Poměr vrtání ku zdvihu $D/z < 1$ Karburátor	8	<b>15 - 20</b>
1930	Ventilový rozvod OHC Přepřňování Roots Poměr vrtání ku zdvihu $D/z \approx 1$	8 - 10	<b>20 - 25</b>
1940			
1960	Řízený karburátor (Registr/ SU) Přepřňování - turbodmychadlo		<b>25 - 28</b>
1970	Spalovací prostor CIVIC Elektronické zapalování CDI		<b>28 - 30</b>
1990	Elektronická řídicí jednotka Vstřikování paliva	8 - 14	<b>30 - 35</b>

## 3 Vývoj spalovacího prostoru a vliv na účinnost

V této kapitole bude rozebrán spalovací prostor z konstrukčního hlediska s vlivem k účinnosti. Zmíněn byl již v kapitole [1.3.3.2] a dále bude rozebírán i v kapitole 4 a 5.

### 3.1 Spalovací prostor

Spalovací prostor má důležitý vliv na výkonnost motoru. Konstrukce zahrnuje tvar spalovací komory, umístění zapalovací svíčky, sacích a výfukových ventilů.

O ventilech bylo pojednáno již v kapitolách (1.3.4.2 a 2.2.3) proto se jimi již nadále nebudeme zabývat.

#### 3.1.1 Vznětové motory

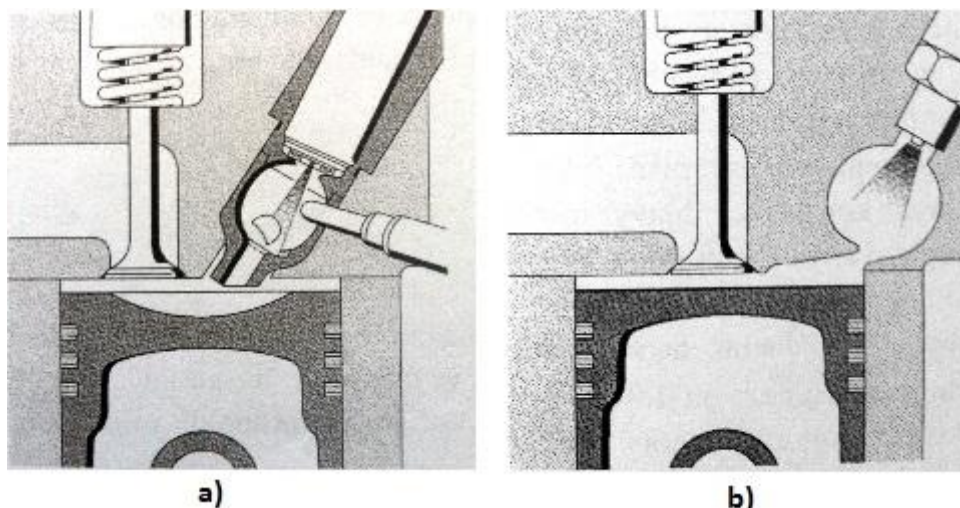
U vznětových motorů se spalovací prostory dělí na dva druhy:

- Dělené spalovací prostory
- Nedělené spalovací prostory

##### Dělené spalovací prostory

Tento typ spalovací komory je tvořen dvěma samostatnými objemy. Palivo se vstříkuje do vytvořené komůrky v hlavě válce motoru. Tato komůrka je propojena s druhou částí spalovací komory, která se nachází ve dnu pístu. Průchod je zajištěn jedním a více kanálky o malém průřezu. Motorům s dělenými spalovacími komorami se také říká motory s **nepřímým vstřikováním paliva**. [obr. 27]

Motory s nepřímým vstřikováním paliva mají pomalejší nárůst tlaku nad pístem, a proto se vyznačují tišším a měkčím chodem motoru. Z těchto důvodů jsou tyto motory upřednostňovány u osobních automobilů pro vyšší komfort cestujících, přesto že se vyznačují vyšší měrnou spotřebou paliva, která je způsobena vlivem tepelných a hydraulických ztrát. Plocha spalovací komory je oproti jednokomorové spalovací komoře větší, a proto dochází k většímu odvodu tepelné energie. Za nízkých teplot se pro vznícení směsi používá žhavicí svíčka. Výhodou těchto motorů je velmi dobré promísení paliva se vzduchem způsobené vířením vzduchu a palivových par v komůrce i ve druhé části spalovací komory ve dnu pístu. Nároky na vstřikovací zařízení nejsou tak značné, jako u přímého vstřikování, postačí jednootvorové trysky a nižší vstřikovací tlaky. [24]



Obrázek 27 - a) dělený miskovitý spalovací prostor s tlakovou komůrkou, b) dělený miskovitý spalovací prostor s vřovou komůrkou [24]

*Výhody motoru s nepřímým vstřikováním paliva:*

- lépe využívají vzduch a tím dosahují vyššího efektivního tlaku ve válci,
- maximální tlaky ve válci jsou naopak nižší, což méně namáhá součásti spalovací komory a motor vykazuje měkčí chod,
- nejsou kladeny takové nároky na vstřikovací zařízení a kvalitu paliva, používají se nižší vstřikovací tlaky a postačují jednotvorové trysky,
- použití u vysokootáčkových motorů, vyšší teploty v komůrce, intenzivnější víření směsi z čehož plyne účinnější spalování.

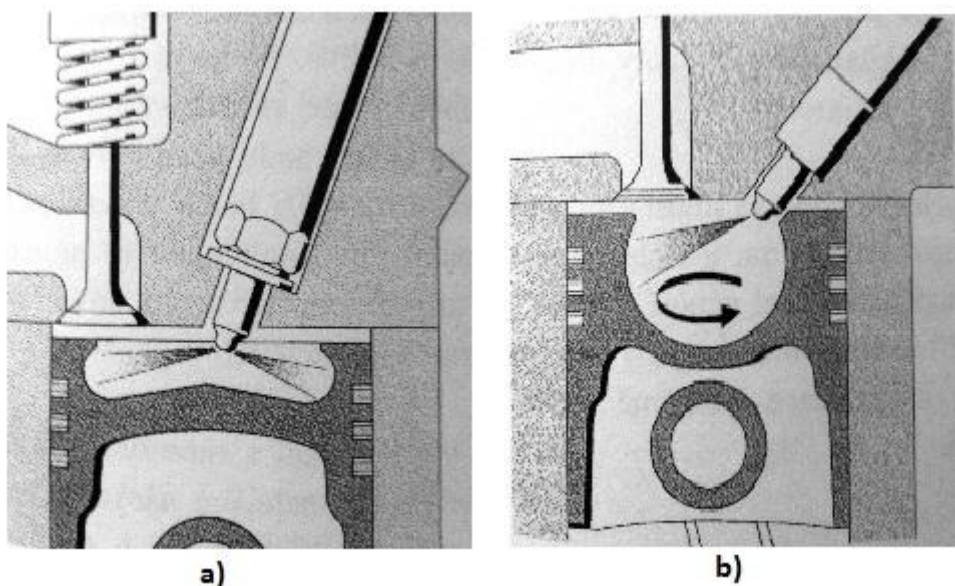
*Nevýhody motoru s nepřímým vstřikováním paliva:*

- vykazují vyšší měrnou spotřebu paliva,
- studený motor se hůře startuje, vyžaduje žhavení vlivem tepelných ztrát větším odvodem tepla a nižší teplotou na konci kompresního zdvihu,
- konstrukčně je hlava s komůrkou mnohem složitější a tedy i dražší, musí odolávat většímu mechanickému a tepelnému namáhání.

### **Nedělené spalovací prostory**

V tomto typu spalovacího prostoru najdeme pouze jednu spalovací komůrku, která se nachází ve dně pístu. Palivo je vstřikováno přímo do prostoru ve dně pístu a po vznícení prudce shoří. Vstřikem paliva přímo do válce, označujeme tyto motory jako motory s **přímým vstřikováním paliva**. [obr. 28]

Motory s přímým vstřikováním paliva mají nižší měrnou spotřebu pohonných hmot. Jsou tedy ekonomičtější a snadněji se startují při nízkých teplotách, mají nižší tepelné a hydraulické ztráty vlivem menšího povrchu spalovací komory. Konstrukce hlavy motoru je jednodušší. Avšak vlivem přímého vstřiku dochází k rychlejšímu nárůstu tlaku nad pístem, čímž je způsobena vyšší hlučnost a vibrace motoru. Při přímém vstřikování jsou kladeny vyšší nároky na vstřikovací zařízení a kvalitu použitého paliva (zejména cetanové číslo CČ). Je třeba dosáhnout co nejjemnějšího rozprášení paliva, proto se používají víceotvorové trysky a vyšší vstřikovací tlaky paliva. [24]



Obrázek 28 - : a) nedělený prstencový spalovací prostor motoru s přímým vstřikem paliva, b) nedělený kulovitý spalovací prostor motoru s přímým vstřikem paliva [24]

Výhody motorů s přímým vstřikem paliva:

- vykazují nižší měrnou spotřebu paliva,
- za nižších teplot lépe startovatelné,
- konstrukce hlavy motoru je jednodušší.

Nevýhody motorů s přímým vstřikem paliva:

- nižší střední efektivní tlak způsobený větším přebytkem vzduchu,
- větší namáhání součástí spalovací komory a větší tvrdost chodu motoru zapříčiněno vyššími maximálními tlaky ve válci motoru,
- vyšší nároky na konstrukci a druh vstřikovacího zařízení kvůli požadavku velmi jemného rozprášení, vyšší vstřikovací tlaky, víceotvorové trysky,
- požadavky na kvalitu paliva jsou vyšší.

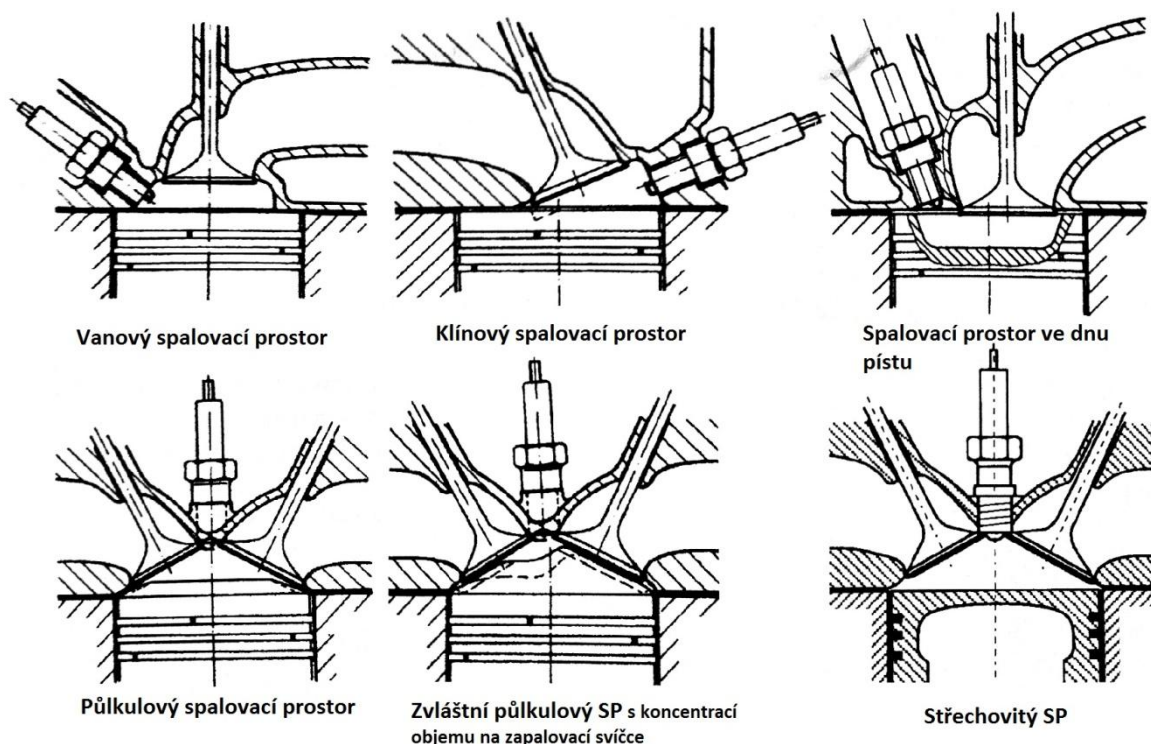
### 3.1.2 ***zážehové motory***

Tvar spalovacího prostoru motoru rozhoduje o průběhu spalování. S tím souvisí spotřeba pohonných hmot, obsah škodlivých látek ve spalinách, hluchnost a průběh točivého momentu motoru. Tvar také poskytuje odolnost proti detonacím a určuje maximální možný kompresní poměr pro dané palivo.

Požadavky na tvarování spalovacího prostoru:

- kompaktnost – omezení tepelných ztrát, to má za následek zvýšení tepelné účinnosti,
- víření – poskytuje dobré promísení náplně válce a zajišťuje dokonalé prohoření směsi,
- použití více ventilů, nebo použití ventilů s většími průměry talířů,
- zapalovací svíčka umístěna v místě, kde je po kompresním zdvihu bohatá směs a šířící se plamen nezpůsobuje detonační hoření,
- potlačení vzniku horkých bodů, ve kterých by mohlo docházet k předzápalům, koutů a štěrbin napomáhajících vzniku detonačního hoření.

Stejně jako u vznětových motorů mohou mít zážehové motory spalovací prostor jak v hlavě válce, tak ve dně pístu, popřípadě v obou těchto místech. Spalovací prostor v hlavě válce bývá u motorů s nepřímým vstřikováním a ve dně pístu s přímým vstřikováním. Tvary spalovacích komor na **obr. 29**. [24]



Obrázek 29 - Různé typy spalovacích prostor zážehových motorů [24]

Spalovací prostor vytvořený v hlavě válce musí zajistit dokonalé prohoření směsi, malé tepelné ztráty vzniklé přechodem tepla do stěn spalovací komory, příznivé podmínky pro zapálení okolí zapalovací svíčky a neposledně zajistit dokonalé vypláchnutí spalovacího prostoru čerstvou směsí. Na tvaru spalovací komory závisí odolnost proti detonacím a také maximální možný kompresní poměr pro dané palivo. [24]

### **Umístění zapalovací svíčky ve spalovací komoře**

Zapalovací svíčky se v spalovacím prostoru umísťují tak, aby zapalovací elektrody svíčky nebyly v místě nejvyššího proudění rozvířené směsi vzduchu a paliva. Zároveň nesmí být v tomto místě velká koncentrace zbytkových spalin. Zapalovací svíčka se umísťuje co nejbližší geometrickému středu, aby plamen dosáhl co nejdříve i nejvzdálenějších míst ve spalovacím prostoru. U nových konstrukcí spalovacích prostor se mnohdy volí pro zajištění lepší účinnosti větší množství zapalovacích svíček, mnohdy i 2 až 3. To zajišťuje zvýšení rychlosti hoření směsi ve spalovací komoře, dokonalé spálení směsi a tím i využití rychle narůstajícího tlaku spalin. [3]

## 4 Možnosti zvyšování účinnosti konstrukcí spalovacího prostoru

Spalovací prostor je vymezen stěnami válce, dnem hlavy a pístu. Na účinnost spalovacího prostoru má velký vliv jeho tvar, umístění zapalovací svíčky v případě zážehového spalovacího motoru (žhavicí svíčky v případě vznětového motoru) a umístění ventilů. Všechny tyto činitele ovlivňují průběh spalování, využití energie z užitého paliva a vznik spalin nebo vypláchnutí paliva. [26]

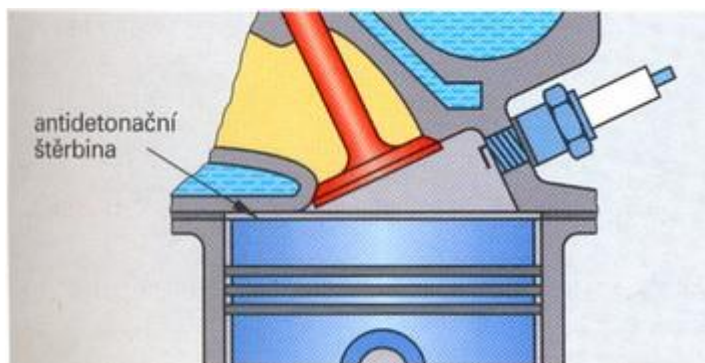
### 4.1 Kompresní poměr

Možnosti zvyšování účinnosti spalovacího prostoru může být docíleno užitím maximálního možného kompresního poměru těsně před hranicí samozápalu a následného detonačního hoření. Nežádoucí vliv samozápalu v p-V diagramu je patrný z obrázku [16c], předejít těmto nežádoucím vlivům se dá těmito způsoby:

- konstrukcí spalovacího prostoru
- vířením
- časování a tvar vstřiku

#### 4.1.1 Antidetonační konstrukce spalovacího prostoru

Antidetonační tvar spalovacího prostoru obsahuje antidetonační štěrbinu, ze které se těsně před dosažením pístu horní úvratě (HU) začne velmi rychle vytlačovat směs paliva a vzduchu. To má za následek rozvíření a lepší promíchání směsi, která následně lépe a rychleji prohoří. Ve štěrbině naopak zbylá směs prohoří nepatrně déle a tím zabrání detonacím. Díky lepšímu províření se může zvýšit kompresní poměr a zkrátit předstih. Dokonalejším prohořením směsi se zmenšuje podíl nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech. Antidetonační štěrbinu k vidění na **obr. 30**. [25]

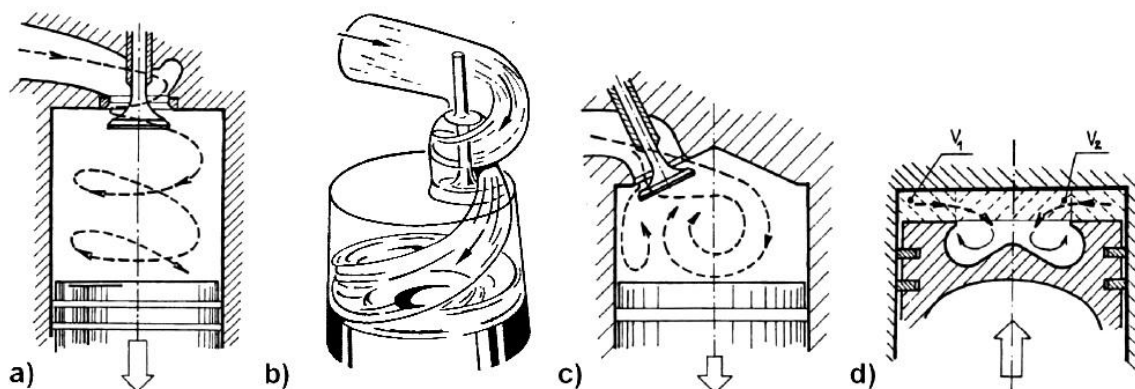


Obrázek 30 - Antidetonační štěrbina u zážehového motoru [25]

Důležitý faktor tvaru spalovacího prostoru se týká vyplachování vyhořelé směsi čerstvou směsí. Je potřeba, aby byl zajištěn takový tvar a proudění směsí, aby byly veškeré spaliny vypláchnuty ze všech míst spalovací komory a zároveň aby nedocházelo ke ztrátám čerstvé směsi. Různé tvary spalovací komory viz. kapitola [3.1]. [25]

## 4.2 Víření

Díky tvaru sacího potrubí a tvarování dna pístu dochází vlivem sání a komprese k víření. Víření je důležité k rovnoměrnému promísení směsi ve spalovacím prostoru a tím k dokonalému hoření a zkrácení doby hoření. Při zvyšování otáček se zvyšuje rychlost víření. Tato rychlost však není dostačující k zachování totožné úhlové dráhy spalování, průběh tlaku ve válci není optimální. Tento problém se u zážehových motorů řeší větším předstihem zapalování. U vznětových motorů se víření používá pro lepší promísení směsi paliva a vzduchu. Víření má velký vliv na účinnost spalovacího motoru. Způsoby víření prezentovány na obr. 31. [26]



Obrázek 31 - a) obvodový vír za šroubovým kanálem, b) spirálový sací kanál, c) příčný vír, d) symetrický toroidní vír na konci komprese [26]



## 4.3 Vstřikovací trysky

Vstřikováním paliva se zabývala kapitola [2.2.4]. Nebyla však věnována pozornost přímo tryskám a tvaru jejich vstřiku.

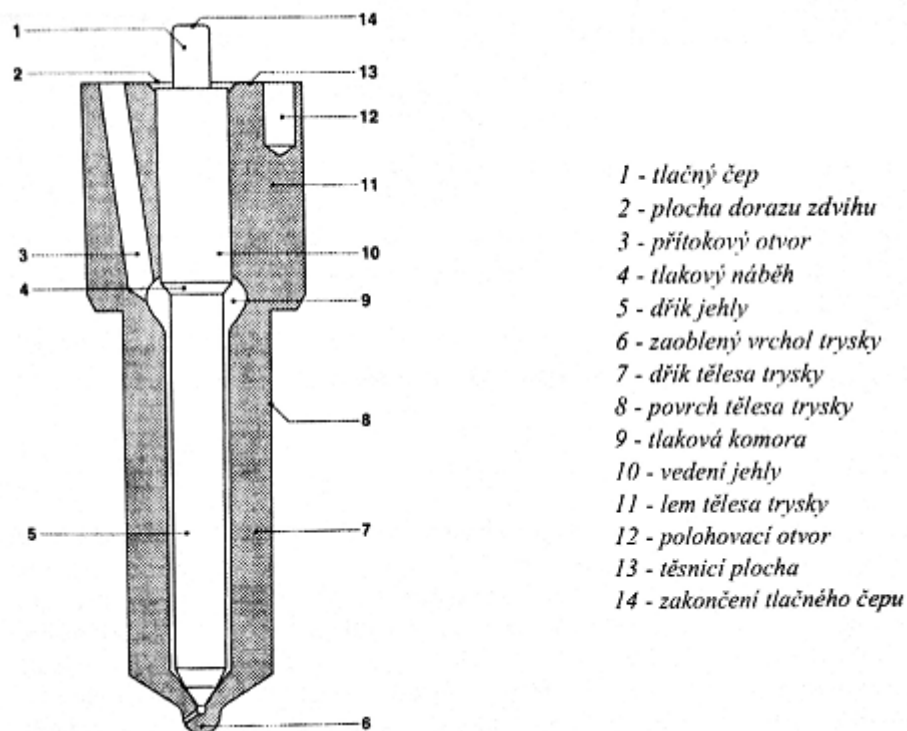
Trysky jsou posledním článkem palivové soustavy. Nachází se v hlavě motoru a ústí přímo do spalovací komory v případě přímého vstřikování. Nepřímo do spalovací komory přes komůrku při nepřímém vstřikování. Trysky musejí být navrženy tak, aby byly schopny odolat vysokému tlakovému a teplotnímu namáhání. Vstřikovací tlaky se liší dle toho, zda se jedná o přímé nebo nepřímé vstřikování, pohybují se na hodnotách i vyšších 20 MPa. Tvar otvoru, velikost průměru otvoru, délka a nasměrování paprsku paliva má vliv na přípravu směsi, čímž ovlivňuje výkon motoru, spotřebu užitého paliva a množství škodlivin ve výfukových plynech. [38]

Druhy trysek:

- otvorové
- čepové

### 4.3.1 Otvorové trysky

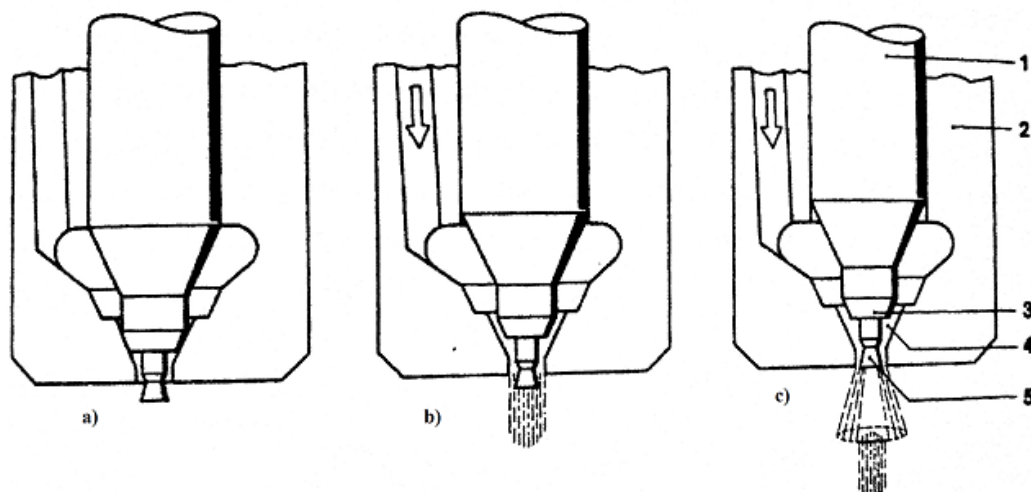
Používají se při přímém vstřikování paliva do spalovacího prostoru, mají 1 – 12 otvorů s velkým úhlem rozstříku. Průměry otvorů se pohybují v rozmezí 0,05 – 0,2 mm. Toto uspořádání zajišťuje rozprášení paliva na jemné částičky, které se snadno odpaří a lépe tak promísí se vzduchem. Počet otvorů, úhel rozstříku i umístění děr je navrženo dle tvaru spalovacího prostoru. Při nesouměrném spalovacím prostoru je i nesouměrné rozmístění děr v trysce. Vše v úzké závislosti pro dokonalou tvorbu směsi ve spalovací komoře. Průtočné množství je závislé na poloze jehly, která otvírá či zavírá průchod palivu. Otvorová tryska na **obr. 32**. [38]



Obrázek 32 - Otvorová tryska [27]

#### 4.3.2 Čepové trysky

Používají se většinou u nepřímého vstřikování, palivo je vstřikováno do komůrky vytvořené v hlavě válce. Palivo je jemně rozprašováno ve tvaru mezikruží o úhlu až 60 °. Množství průchozího paliva je ovládáno zdvihem jehly vstřikovače, jejíž čep na špici otvírá nebo zavírá průchod paliva [obr. 33]. [38]



Obrázek 33 – Čepové trysky: a) zavřená tryska, b) částečně otevřená tryska, c) plně otevřená tryska. 1 – jehla vstříkovače, 2 – těleso trysky, 3 – tlakové osazení, 4 – tlakový prostor, 5 – čep jehly vstříkovače [24]

#### 4.3.3 Dvojitě vstříkování

Přidáním dalšího vstříkovacího zařízení do blízkosti sacího ventilu ve spalovací komoře je umožněno rozprášit palivo na ještě menší kapičky, což má za následek vyšší míru odpaření paliva a tím i menší množství nespáleného paliva. O toto menší množství nespáleného paliva se sníží tvorba škodlivých emisí. Tento způsob se používá u nepřímého vstříkování pro levné motory, protože tento systém cenu nezvyšuje natolik, jako systém přímého vstříkování, kde je nutné instalovat drahá vysokotlaká čerpadla se složitým vedením. Obrázek velikosti vstříkovacích kapiček a uspořádání v motoru na **obr. 32a a 32b**. [28]



Obrázek 34 - a) obrázek znázorňující velikost kapiček pro 2 vstříkovací trysky a pro jednu, b) ukázka uspořádání dvou vstříkovačů umístěných v hlavě motoru [28]

## 5 Možnosti zvyšování účinnosti konstrukčními materiály spalovacího motoru

Velký nedostatek dnešních konstrukčních materiálů používaných ve spalovacích komorách je neschopnost snášet vysoké teploty v důsledku spalovacího procesu. Spalováním palivové směsi vznikají velmi vysoké teploty dosahující až 2500°C. Následným vypláchnutím spalovací komory čerstvou směsí dojde k ochlazení, přesto se teplota ve spalovací komoře pohybuje poměrně vysoko. Aby nedocházelo k přehřátí motoru, je třeba, aby materiály měly velkou tepelnou vodivost a byly schopny rychle předat přebytečné teplo chladicímu médiu. Tento odběr tepla však působí nemalé energetické ztráty, které velmi dobře znázorňuje Sankeyuv diagram z obrázku [č. 3].

Odvodem tepla přes stěny spalovacího prostoru a následným chlazením přijde vniveč okolo 30% potenciální energie uchované v palivu, která už nemůže být použita k samotnému pohonu. Dalším významným nedostatkem současných konstrukčních materiálů je tepelná stálost. Stálostí se rozumí tepelná dilatace, kdy vlivem vyšších teplot dochází k roztažnosti užitých kovových materiálů. Kvůli teplotní roztažnosti se musí konstruovat motorové součásti s vůlemi, aby při provozní teplotě díky roztažnosti materiálu nedocházelo k nadměrné mechanické zátěži, popřípadě dokonce ke konfliktu součástí motoru. Z těchto důvodů je důležité najít takový konstrukční materiál, který by odebíral co možná nejméně tepla a zároveň splňoval další nezbytná kritéria (viz. následující kapitola) potřebná pro použité materiálu ve spalovacím prostoru.

*Podmínky, které musejí konstrukční součásti splňovat:*

- **žárupevnost** – schopnost materiálu udržet si své mechanické vlastnosti za tepla,
- **korozivzdornost a opaluvzdornost** – schopnost materiálu odolávat chemickému a elektrochemickému působení,
- **odolnost proti křehkému lomu,**
- **odolnost proti tepelné únavě,**
- **odolnost proti erozi,**
- **nízká měrná hmotnost** - nízká měrná hmotnost je nutná zejména u vysokootáčkových motorů pro konstrukci pístu. Při příliš velké hmotnosti za vysokých otáček by vznikalo příliš velké zatížení. [26]

## 5.1 Součásti tvořící plochy spalovací komory a jejich konstrukční materiály

Kromě nízké schopnosti odebírat teplo a tepelné stálosti musí materiál splňovat řadu dalších požadavků. Spalovací komora je velmi nehostinné prostředí, kde dochází k mechanickému, tepelnému a chemickému namáhání. Zároveň musí být dostupný a cenově přijatelný pro možnost masivního použití.

Hlavní konstrukční prvky, které tvoří plochu spalovací komory:

- válce,
- hlava válců,
- písty.

### 5.1.1 Válcce

Válcce před dosažením pístu HU tvoří stěny spalovacího prostoru. Slouží jako vedení pro pohyb pístu a zachycují síly, které se kinematicky vážou na klikový mechanismus. Vytváří kluznou plochu pro pohyb pístu. Povrch válce musí zajišťovat stálý tenký olejový film, který slouží ke snížení tření při pohybu pístu ve válci ve všech pracovních režimech motoru. V neposlední řadě zajišťují odvod tepla z pístu a tím chlazení prostoru vykonávané práce. [24]

*Namáhání:*

- vysoké spalovací tlaky a teploty,
- rychlými změnami teplot vzniklá vysoká teplotní napětí,
- opotřebením ploch válce a pístu s těsníci kroužky vlivem tření,
- neodpařené palivo smývá při spuštění studeného motoru mazací film ze stěny válce.

Síly od tlaku plynů, dynamické účinky rozvodového mechanismu a změna tepelného toku jsou časově proměnné a vyvolávají tak únavové namáhání materiálu.

*Požadavky kladené na vlastnosti materiálů:*

- musí vykazovat vysokou pevnost a prokazovat tvarovou stálost,
- malá tepelná roztažnost při dobrém vedení tepla,
- vysoká odolnost styčné plochy válců oproti opotřebením a dobré kluzné vlastnosti.

*Výroba válců se provádí čtyřmi technologiemi:*

- metodou ALFIN,
- metodou ALUSIL,
- metodou NIKASIL,
- metodou LOKASIL,

### **Metoda ALFIN**

Tato metoda pracuje s šedou litinou a sloučeninami železa a hliníku ( $FeAl_3$ ) přezdívané alfiny. Vložky vyrobené ze šedé litiny jsou potáhnuty slabou vrstvou sloučeniny alfinu a poté se tyto vložky zalévají do forem slitinou o nízké měrné hmotnosti AlSi. Alfin, který se nachází mezi šedou litinou a slitinou hliníku s křemíkem AlSi, zajišťuje lepší spojení mezi šedou litinou a slitinou hliníku s dobrou tepelnou vodivostí. [24]

### **Metoda ALUSIL**

Základem je odlévání bloku motoru z hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku nízkotlakým litím nebo litím do kokil. Plochy válců se po odlití honují, elektrochemicky leptají a lapují pro odstranění měkkého hliníku okolo krystalů křemíku. Tím vzniknou na styčném povrchu václe tvrdé vystupující krystaly, které mají dobrou odolnost proti otěru. Opotřebením pístu se snižuje použitím povrchové úpravy „Ferrocoat“, což je potažení hliníkového pístu tenkou železitou povrchovou vrstvou. [24]

### **Metoda NIKASIL**

Metoda NIKASIL funguje na principu galvanického potahování styčných ploch válců z lehké slitiny vrstvou niklu s krystaly karbidu křemíku. Krystaly karbidu křemíku opět pozitivně působí na odolnost proti otěru. [24]

### **Metoda LOKASIL**

Metoda LOKASIL pracuje s jádru křemíku s keramickým pojivem. Spolu tyto složky vytváří tvarové rozpoložení dutých válců. Jádra o velké porézności se skládají z matrice, která je přehřívána na teplotu kolem 700 °C. Takto přehřívána se umísťují do formy určené na lití. Při tlakovém lití se tlak po naplnění formy pohybuje na hodnotě 70 MPa, což zajišťuje prostoupení hliníkové slitiny do připravených pórů vložených jader. Hliníková slitina lze použít s nižší koncentrací křemíku, jelikož se obohatí z vložených křemíkových jader. Na závěr se provádí honování, které zajistí dokončení povrchu odkrytím jader křemíku. Vzniklý povrch se vyznačuje vysokou odolností proti opotřebením. Stejně jako v případě

metody ALUSIL se používají do takto vytvořených válců písty ze slitiny hliníku s povrchovou úpravou „Ferrocoat“. [24]

### 5.1.2 *Hlava válce*

Hlava válců vytváří vrchní stranu spalovacího prostoru. Kvůli těsnosti je pevně přišroubována k bloku válců s vloženým těsněním. Hlava válce musí konstrukčně umožnit u čtyřdobých spalovacích motorů naplnění a vyprázdnění válce. O to se starají sací a výfukové kanály, ventily a ovládací mechanismy ventilů, které jsou v hlavě válců umístěné. V případě vznětových motorů se v hlavě ještě nachází žhavicí svíčka. V případě zážehového spalovacího motoru zapalovací svíčka. V hlavě válců dochází k silné mechanické a tepelné zátěži kvůli vysokým spalovacím tlakům a teplotám, které vznikají při vznícení či zažehnutí paliva ve spalovací komoře.

Šedá litina se jeví jako výhodná zejména pro svoji vysokou tuhost, pevnost a tepelnou stabilitu při nízkých nákladech na výrobu. Naopak nevýhodná se jeví pro svou vysokou měrnou hmotnost a nízkou tepelnou vodivost. Častěji se tedy využívají hlavy válců zhotovené z hliníkových slitin, ačkoliv blok válců je z litiny. Největší nevýhodou Al slitin je oproti litinám vyšší tepelná roztažnost, která způsobuje náchylnost ke vzniku deformací. [39]

### 5.1.3 *Píst*

Píst zachycuje sílu vyvolanou tlakem plynů, kterou přenáší dále přes pístní čep na ojnici. Aby bylo možné tuto sílu pístem zachytit, musí píst zabezpečit utěsnění prostoru mezi sebou a válcem. Při netěsnosti by se snižovala efektivita práce nehledě na další špatné vlivy průnikem spalin o vysokých teplotách do klikové skříně. To je zajištěno pružnými pístními kroužky a také musí píst zamezit průsaku oleje z klikové skříně do spalovacího prostoru, to zajišťují pístní stírací kroužky. Přehřívání pístu je řešeno předáváním tepla dále do stěn válce a ostřikováním spodku pístu olejem. Jelikož je píst teplotně namáhán více, než snadněji chlazený válec, musí být konstruován s větší vůlí kvůli teplotní roztažnosti. [24]

#### **Dno pístu**

Dno spalovacího prostoru tvoří dno pístu, který bývá vyroben z lehkých slitin hliníku a křemíku o měrné hmotnosti okolo 2700 kg/m<sup>3</sup>, zároveň mají velmi dobrou tepelnou vodivost. Dno pístu je namáháno teplotou 200 – 350°C. Pro zážehové spalovací motory se nejčastěji používá slitina AlSi12. Pro vznětové a přeplňované motory se používají

slitiny odolnější na tepelné namáhání např. AlSi18 nebo AlSi25. Důležitý parametr u hliníkových slitin dna pístu spalovací komory je jeho tloušťka. Čím je dno tlustší, tím lépe odvádí teplo a oblasti pístních kroužků vyrovnává teploty, čím zlepšuje jejich práci. Obsah křemíku ve slitině zajišťuje nižší teplotní roztažnost materiálu. S narůstajícím podílem křemíku ve slitině tedy klesá teplotní roztažnost a opotřebením, ale zároveň se zhoršuje obrobiteľnosť, což vytváří potíže při výrobě. [39]

Pro velmi výkonné přeplňované motory se používají písty, které mají keramické dno. Keramický materiál velmi dobře zvládá vysoké teploty bez známek jakéhokoliv poškození a teplotní roztažnosti keramických materiálů se blíží nule. Keramické materiály se používají jako tepelné štíty kosmických lodí vstupujících do atmosféry (raketoplán). Jeví se tedy jako ideální materiál pro použití do spalovací komory. Ne však všechny jeho vlastnosti jsou příznivé a proto je jeho použití zatím omezené. [39]

*Materiálové požadavky kladené na tepelně a mechanicky namáhaný píst:*

- vysoká pevnost při proměnlivém zatížení za vysokých teplot,
- nízká měrná hmotnost pro malé zatížení setrvačnými silami,
- vysoká tepelná vodivost,
- nízký součinitel tepelné roztažnosti,
- odolnost vůči opotřebením za vysokých teplot a zhoršeném mazání,
- malý součinitel tření. [24]



## Závěr

Z poznatků diplomové práce je jasné, že účinnost spalovacích motorů v budoucnosti ještě vzroste, nebude to však již v řádu mnoha procent, jako tomu bylo v prvopočátku pístových spalovacích motorů. Účinnost se bude zvyšovat velmi pozvolna o velice malé kroky až do doby, než se přejde k jinému konstrukčnímu řešení motorů, ať už třeba na jiné druhy paliv než fosilních. Nejdůležitější pro nárůst účinnosti je zaměřit se na eliminování tak velkých ztrát například chlazením či výfukem. Pouze díky těmto dvěma ztrátovým činnostem přichází více jak 50 % energie obsažené v palivu vniveč. Ztrátová energie z výfuku je částečně řešena použitím turbodmychadla za podmínek, že motor disponuje tímto zařízením. Takto dochází k zužitkování alespoň části energie výfukových spalin, ale ne takové množství, aby to pokrylo veškeré výfukové ztráty. Největší ztráty a tím i problém však činí přeměna chemické energie paliva na teplo. Donutit palivo hořet studeným plamenem a zároveň donutit se rozpínat studené plyny pro pohon pístu není možné, proto se nejlepším řešením na zvýšení účinnosti pístových spalovacích motorů jeví nové konstrukční materiály, které budou vykazovat lepší mechanické, tepelné a chemické vlastnosti, oproti dosavadním.

Tato práce by měla posloužit i jako návod při konstrukčních a systémových úpravách motorů pro individuální tvorbu za cílem navýšení výkonu ať už pouhým přenastavením řídicí jednotky, která se stará o velikost předstihu po vyvrtání antidetonační šterbiny ve spalovacím prostoru (takovéto úpravy vytvářejí zejména motocyklisté).

Věřím, že veškeré poznatky získané při tvorbě diplomové práce využiji i v budoucnosti ve své další práci.

## Seznam použité literatury:

- [1] FIRST, Jiří. *Energetická analýza pozemní dopravy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014. ISBN 978-80-01-05664-6.
- [2] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽĎÁRSKÝ. *Automobily 3 – motory*. Brno: Avid s.r.o., 2006. ISBN 80-903671-1-9.
- [3] *P-V diagram* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C3/pv.jpg>
- [4] *Uhlovodíkové řetězce* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.gsxr.wz.cz/technika/uhlovod.jpg>
- [5] *Křivka odparnosti paliva* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.gsxr.wz.cz/technika/benzin.gif>
- [6] DRAGON, Jan. *Proměnný kompresní poměr u spalovacích motorů*[online]. 2010 [citováno 2015-20-11]. Dostupné z:  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28310](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28310)
- [7] PŘESLIČKA, Jaroslav. *Ventilové rozvody čtyřdobých spalovacích motorů*[online]. 2012 [citováno 2015-20-11]. Dostupné z:  
[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=52038](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52038)
- [8] BOROVIČKA, Jiří. *Spalovací motory motorových vozidel*[online]. 2011 [citováno 2015-20-11]. Dostupné z:  
[https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiihLSHtLbJAhWBliwKHZwZDP8QFgggMAA&url=http%3A%2F%2Fis.mendelu.cz%2Fzp%2Fportal\\_zp.pl%3Fprehled%3Dvyhledavani%3Bpodrobnosti%3D40190%3Bdownload\\_prace%3D1&usg=AFQjCNEkh7BnN7mKqu3s2zOH3Wn\\_NsVtaA&sig2=CiWnGXMzz6AyCosrwJISbw&cad=rja](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiihLSHtLbJAhWBliwKHZwZDP8QFgggMAA&url=http%3A%2F%2Fis.mendelu.cz%2Fzp%2Fportal_zp.pl%3Fprehled%3Dvyhledavani%3Bpodrobnosti%3D40190%3Bdownload_prace%3D1&usg=AFQjCNEkh7BnN7mKqu3s2zOH3Wn_NsVtaA&sig2=CiWnGXMzz6AyCosrwJISbw&cad=rja)
- [9] *Desmodromický rozvod* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:<http://www.bluming.com/>
- [10] HOFMANN, Karel. *Alternativní pohony* [online]. 2003 [citováno 2015-20-11]. Dostupné z:<<http://www.ite.fme.vutbr.cz/opory/Alt.pohony.pdf>>.
- [11] *Turbodmychadlo* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.skodaoctavia.cz/clanek/turbodmychadlo>
- [12] ŠTĚTINA, Josef. *Spalovací motory* [online]. březen 2012 [citováno 2015-20-11]. Dostupné z:<<http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/sew/wp-content/uploads/2012/03/TT-JS2011-12L-13.pdf>>.
- [13] *Diagram předstihu zážehu* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.hotrod.com/news/did-fast-n-loud-make-this-up/>

- [14] *Isaac de Rivaz* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://www.eurooldtimers.com/cze/data/historie/paragraphs/photos/438\\_1.jpg](http://www.eurooldtimers.com/cze/data/historie/paragraphs/photos/438_1.jpg) [15]  
<http://en.autowp.ru/picture/irth9w>
- [15] *Benz Motorwagen* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://en.autowp.ru/picture/irth9w>
- [16] *Karburátor* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://jalopnik.com/how-a-carburetor-works-496394819>
- [17] VALA, Zdeněk. *Magnetoelektrické zapalování* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY\\_32\\_INOVACE\\_6b20.pdf](http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY_32_INOVACE_6b20.pdf)
- [18] *SV rozvod* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://www.autoznanosti.cz/images/stories/motor/SV\\_s\\_popisem.jpg](http://www.autoznanosti.cz/images/stories/motor/SV_s_popisem.jpg)
- [19] *OHV rozvod* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.autoznanosti.cz/index.php/motor/36-ventilove-rozvody-zakladni-rozdeleni.html>
- [21] *Common Rail* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Common\\_rail#/media/File:Common\\_Rail\\_Schema-cs\\_cz.png](http://cs.wikipedia.org/wiki/Common_rail#/media/File:Common_Rail_Schema-cs_cz.png)
- [22] *Mono - Jetronic* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-202\\_24\\_karburatory\\_mono-jetronic.pdf](http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-202_24_karburatory_mono-jetronic.pdf)
- [23] *Turbodmychadlo, schéma* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://www.flexamiauto.cz/upload/obrazky/Schema\\_motoru\\_a\\_turbodmychadla\\_2\\_II.JPG](http://www.flexamiauto.cz/upload/obrazky/Schema_motoru_a_turbodmychadla_2_II.JPG)
- [24] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. Vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství, 2003. ISBN 80-238-8356-4.
- [25] *Spalovací prostor s antidetonační štěrbinou* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<https://publi.cz/books/160/11.html>
- [26] MACEK, Jan. *Spalovací motory I*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 260 s. ISBN 978-80-01-03618-1.
- [27] ZIKMUND, Jaroslav. *Tvorba směsi VIII, vstříkovače* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUK Ewi07Yjv\\_anJAhWBICwKHQ0oDzIQjRwIBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.zlinskedu my.cz%2Fdownload%2F15677-VY\\_32\\_INOVACE\\_2\\_8\\_MV\\_Tvorba\\_smesi\\_8.pdf&psig=AFQjCNHE18UtK8ISHYPI GcUuDIDSw-KaOw&ust=1448486218430506&cad=rja](https://www.google.cz/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUK Ewi07Yjv_anJAhWBICwKHQ0oDzIQjRwIBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.zlinskedu my.cz%2Fdownload%2F15677-VY_32_INOVACE_2_8_MV_Tvorba_smesi_8.pdf&psig=AFQjCNHE18UtK8ISHYPI GcUuDIDSw-KaOw&ust=1448486218430506&cad=rja)

- [28] DUCHOŇ, Jiří. *Oktanové číslo* [online]. 2009 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://www.autorevue.cz/nissan-zavadi-dvojity-neprimy-vstrik\\_6](http://www.autorevue.cz/nissan-zavadi-dvojity-neprimy-vstrik_6)
- [29] FIRST, Jiří. *Zkoušení automobilů a motocyklů*. Praha: S&T CZ s.r.o., 2008. ISBN 978-80-254-1805-5.
- [30] *Průběh p-V zážehového motoru* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://old.uk.fme.vutbr.cz/>
- [31] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. 1. Vyd. Brno: Nakladatelství a vydavatelství, 2006. ISBN 80-239-6461-5.
- [32] SAJDL, Jan. *Oktanové číslo* [online]. 24.2.2012 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.autolexicon.net/cs/articles/oktanove-cislo/>
- [33] SAJDL, Jan. *Kompresní poměr* [online]. 2.8.2013 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
<http://www.autolexicon.net/cs/articles/kompresni-pomer/>
- [34] VONDRÁK, Adam. *Limity zvyšování účinnosti motoru s vnitřním spalováním* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53590](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53590)
- [35] REMEK, Branko. *Vývoj automobilu a spalovacího motoru*. Praha: skladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-02939-8.
- [37] SMILEK, Tomáš. *Možnosti vstřikovacího systému COMMON-RAIL* [online]. [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=5718](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5718)
- [38] *Palivová soustava* [online]. 2.8.2013 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z:  
[http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-205.17\\_radovavstrikovacicerpadla\\_\\_vstrikovace\\_.pdf](http://mechmes.websnadno.cz/dokumenty/pri-teo-205.17_radovavstrikovacicerpadla__vstrikovace_.pdf)
- [39] ZACPAL, Zdeněk. *SPALOVACÍ PROSTOR PISTOVÉHO VYBUSNEHO MOTORU*. Praha: Computer Press, 1984. ISBN 82-202-80-8

### Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Parametry paliva – bezolovnatý benzín [29] .....	23
Tabulka 2 - Parametry paliva – diesel [29].....	25
Tabulka 3 - Konstrukční prvky v čase se znázorněním kompresního poměru a účinnosti	54

## Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Přehled druhů spalovacích motorů [1].....	12
Obrázek 2 - Fáze čtyřdobého zážehového motoru [2] .....	12
Obrázek 3 - p-V diagram čtyřdobého zážehového motoru [3].....	14
Obrázek 4 - Sankeyuv diagram čtyřdobého zážehového motoru [2].....	16
Obrázek 5 - Chemické vzorce uhlovodíků obsažených v benzínu [4] .....	20
Obrázek 6 - Křivka odporosti paliva [5].....	21
Obrázek 7 - Grafické znázornění obecné tepelné účinnosti zážehového spalovacího motoru na kompresním poměru [6].....	27
Obrázek 8 - a) ventil a jeho popis, b) upevnění ventilu [7] .....	31
Obrázek 9 - Hydraulické ovládání ventilů [8].....	32
Obrázek 10 - Desmodromické ovládání ventilu u motocyklu Ducati [9].....	33
Obrázek 11 - Grafické porovnání točivých momentů pro různé způsoby přeplňování [10].....	34
Obrázek 12 - Turbodmychadlo [11] .....	35
Obrázek 13 - : p - V diagramy Sabatova oběhu: atmosférického (zelená), přeplňovaného kompresorem (modrá), přeplňovaného turbodmychadlem [12].....	36
Obrázek 14 - Vliv předstihu zážehu na průběh spalovacích tlaků ve válci [13] .....	37
Obrázek 15 - Předstih zážehu: a) optimální, b) pozdní, c) předčasný [31] .....	39
Obrázek 16 - Chybné průběhy hoření: a) detonační hoření, b) předzápaly, c) samozápaly [31].....	39
Obrázek 17 - Isaac de Rivaz [14] .....	40
Obrázek 18 - Benz Motorwagen [15] .....	41
Obrázek 19 - Schéma jednoduchého karburátoru [16] .....	43
Obrázek 20 - Schéma magnetoelektrického zapalování [17] .....	44
Obrázek 21 - Schéma rozvodu SV [18] .....	46
Obrázek 22 - Schéma rozvodu OHV [19] .....	47
Obrázek 23 - Schéma OHC rozvodu [19] .....	48
Obrázek 24 - Vstřikovací systém Mono – Jetronic [22] .....	50
Obrázek 25 - Schéma systému Common rail [21] .....	51
Obrázek 26 - Schéma vznětového motoru přeplňovaného turbodmychadlem [23] .....	52
Obrázek 27 - a) dělený miskovitý spalovací prostor s tlakovou komůrkou, b) dělený miskovitý spalovací prostor s vírovou komůrkou [24].....	56
Obrázek 28 - : a) nedělený prstencový spalovací prostor motoru s přímým vstřikem paliva, b) nedělený kulovitý spalovací prostor motoru s přímým vstřikem paliva [24] .....	57
Obrázek 29 - Různé typy spalovacích prostor zážehových motorů [24].....	59
Obrázek 30 - Antidetonační šterbina u zážehového motoru [25].....	61

Obrázek 31 - a) obvodový vír za šroubovým kanálem, b) spirálový sací kanál, c) příčný vír, d) symetrický toroidní vír na konci komprese [26] .....	61
Obrázek 32 - Otvorová tryska [27].....	63
Obrázek 33 – Čepové trysky: a) zavřená tryska, b) částečně otevřená tryska, c) plně otevřená tryska. 1 – jehla vstřikovače, 2 – těleso trysky, 3 – tlakové osazení, 4 – tlakový prostor, 5 – čep jehly vstřikovače [24] .....	64
Obrázek 34 - a) obrázek znázorňující velikost kapiček pro 2 vstřikovací trysky a pro jednu, b) ukázka uspořádání dvou vstřikovačů umístěných v hlavě motoru [28].....	64