



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VYUŽITÍ OXIDU DUSNÉHO PRO ZVÝŠENÍ VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

THE USE OF NITROUS OXIDE TO INCREASE THE PERFORMANCE PARAMETERS OF AN SI ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Dobeš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Beran

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tomáš Dobeš**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Beran**
Akademický rok: 2022/23

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

Využití oxidu dusného pro zvýšení výkonových parametrů zážehového motoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vypracovat rešerši popisující problematiku použití oxidu dusného za účelem zvýšení výkonových parametrů zážehového motoru.

Cíle bakalářské práce:

Dostupná rešerže v oblasti použití oxidu dusného pro zážehové motory.

Základní rozbor pro zadanou aplikaci, pojmy stechiometrie, plnicí účinnost, posouzení vlivu paliv-oxidu dusného na zvýšení spalovacích tlaků, spalovacích teplot, vliv na detonační hoření.

Shrnutí výhod a nevýhod (limitující faktory) použití oxidu dusného pro zážehový motor.

Na základě zadaných parametrů provést základní návrhový výpočet pro použití vstřikování oxidu dusného pro zvolený motor.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (3): Motory. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-15-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím oxidu dusného (N_2O) ke krátkodobému zvýšení výkonu zážehového motoru. Téma jsem si zvolil, protože mě motorsport zajímá obecně. Sám jsem se několikrát zúčastnil amatérských automobilových závodů ve slalomu jako řidič i jako mechanik. Proto je mi téma krátkodobé zvyšování výkonu motoru blízké. Hlavní náplní této práce je určení vhodného množství oxidu dusného k dosažení požadovaného výkonu, protože při neúměrném množství oxidu dusného může dojít k trvalému poškození motoru. Práce je rozdělena na dvě části. V první části se bakalářská práce zabývá obecnou historií, principem činnosti motoru a zároveň jsou uvedeny možnosti, jak lze zvýšit výkon zážehového motoru. Já jsem se zaměřil na zvýšení krátkodobého výkonu motoru pomocí oxidu dusného. V druhé části se zaměřuje na výpočet optimálního množství oxidu dusného pro požadované krátkodobé zvýšení výkonu motoru, aniž by došlo k jeho poškození. Očekává se, že výsledky této práce přinesou nové poznatky o využití oxidu dusného ve spalovacích motorech a může sloužit jako podklad pro další výzkum.

KLÍČOVÁ SLOVA

oxid dusný, zážehový motor, výkon, krátkodobé zvýšení výkonu, motorsport

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the utilization of nitrous oxide (N_2O) for short-term performance enhancement of spark-ignition engines. I chose this topic because I have a general interest in motorsports. I have personally participated in amateur car racing events, both as a driver and a mechanic, which makes the subject of short-term power increase particularly relevant to me. The main objective of this thesis is to determine the appropriate amount of nitrous oxide required to achieve the desired performance, as excessive amounts of nitrous oxide can lead to permanent engine damage. The thesis is divided into two parts. The first part provides a general overview of the history and operation principles of the engine, along with various methods of increasing spark-ignition engine performance. I specifically focus on utilizing nitrous oxide for short-term power enhancement. In the second part, the thesis delves into calculating the optimal amount of nitrous oxide for the desired short-term performance increase, while ensuring the engine's integrity. The results of this work are expected to contribute new insights into the application of nitrous oxide in combustion engines and serve as a foundation for further research.

KEYWORDS

nitrous oxide, gasoline engine, performance, short-term power increase, motorsports

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOBEŠ, T. Využití oxidu dusného pro zvýšení výkonových parametrů zážehového motoru. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Martin Beran. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149828>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Berana a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 10. května 2023

.....

Tomáš Dobeš

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Martinu Beranovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za vedení a zájem, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, přátelům a blízkým za velkou míru trpělivosti a podpory při psaní bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Teoretická část	11
1.1 Zážehový motor	11
1.1.1 Stručná historie zážehových motorů.....	11
1.1.2 Princip činnosti čtyřdobého zážehového motoru.....	13
1.1.3 Pracovní cykly čtyřdobého zážehového motoru.....	14
1.2 Způsoby zvyšování výkonu u zážehového motoru	16
1.2.1 Zvýšení zdvihového objemu motoru	16
1.2.2 Zvýšení otáček motoru	17
1.2.3 Výměna vzduchového filtru	17
1.2.4 Vhodná paliva ke zvýšení výkonu	18
1.2.5 Zvýšení plnicí (objemové) účinnosti	22
1.2.6 Ideální směšovací poměr	23
1.3 Využití oxidu dusného ke zvyšování výkonu.....	25
1.3.1 Oxid dusný ve zdravotnictví.....	25
1.3.2 Aplikace oxidu dusného ve spalovacích motorech.....	26
1.4 NOS (nitrous oxide systems).....	28
1.4.1 Pracovní princip oxidu dusného při spalování:	31
1.4.2 Rozvod oxidu dusného a přídavného paliva.....	32
1.4.3 Filtr oxidu dusného	33
1.4.4 Tlakové lahve N ₂ O.....	33
1.4.5 Výhody použití oxidu dusného pro zážehový motor.....	34
1.4.6 Nevýhody použití oxidu dusného pro zážehový motor	34
2 Návrhový výpočet použití systému NOS pro zvolený motor	35
2.1 Motor Honda D16Z6	35
2.2 Výpočet tlaků ve válci motoru D16Z6	36
2.2.1 Ottův cyklus.....	36
2.2.2 Určení kompresního tlaku ve válci	36
2.2.3 Určení spalovacího tlaku ve válci.....	38
2.2.4 Určení potřebné hmotnosti paliva pro maximální dovolený spalovací tlak	39
2.3 Výpočet potřebné hmotnosti oxidu dusného	40
Závěr	42
Použité informační zdroje	43
Seznam použitých zkratk a symbolů	47

ÚVOD

Zájem o motorsport byl hlavním důvodem k výběru daného tématu bakalářské práce. Na střední škole jsem se poprvé zúčastnil amatérského závodu na okruhu v Brně, kde jsem se setkal s využitím oxidu dusného pro krátkodobé zvýšení výkonu motoru. Touha o dosažení těch nejlepších výsledků mě vedla k tomu, že jsem se pokusil aplikovat oxid dusný do vlastního vozu. Nedopadlo to však úspěšně. V té době jsem neměl dostatečné znalosti ani zkušenosti, tudíž po aplikaci neúměrného množství oxidu dusného došlo k trvalé deformaci motoru na mém závodním voze.

Oxid dusný je kryogenní plyn složený ze 2 molekul dusíku a 1 molekuly kyslíku. Hmotnostní poměr je 64% dusíku a 36 % kyslíku. Plyn je za normálních podmínek nehořlavý, bezbarvý a má nasládlou vůni a chuť. Triviální název oxidu dusného je rajský plyn. Má anestetické a analgetické účinky a je v medicíně hojně používaným plynem. Bohatě uplatnění má i v potravinářském průmyslu. Oxid dusný (v tomto kontextu často jen „nitrous“ nebo „nitro“) je vstříkovan do sacího potrubí (nebo těsně před sacím potrubím), aby se zvýšil krátkodobý výkon motoru. Oxidem dusným obohatíme nasávaný vzduch o kyslík, což umožňuje motoru spálit více paliva. Navíc, protože oxid dusný je skladován jako kapalina, odpařování kapalného oxidu dusného v sacím potrubí způsobuje velký pokles teploty sacího vzduchu.

Práce se tedy zabývá komplexní rešerší problematiky použití oxidu dusného s cílem zvýšit výkonové parametry zážehového motoru a zároveň základním návrhovým výpočtem pro použití systému pro zvolený motor. Během rešerše budou zkoumány a analyzovány klíčové pojmy jako stechiometrie, plnicí účinnost a vliv paliv-oxidu dusného na zvýšení spalovacích tlaků, spalovacích teplot a možnosti vzniku detonačního hoření. Dále bude práce popisovat výhody a nevýhody použití oxidu dusného. Základní návrhový výpočet bude zahrnovat optimalizaci dávkování oxidu dusného s cílem dosáhnout maximálního dovoleného spalovacího tlaku aniž by se poškodil motor.

1 TEORETICKÁ ČÁST

V následující části budou uvedeny základní pojmy související s tématem této závěrečné práce. Bude provedena dostupná rešerše oblasti použití oxidu dusného u zážehových motorů, vysvětleny základy fungování čtyřdobého zážehového motoru a popsána jeho stručná historie. Pro účely této práce je použit zážehový čtyřdobý motor automobilky Honda s označením D16Z6.

1.1 ZÁŽEHOVÝ MOTOR

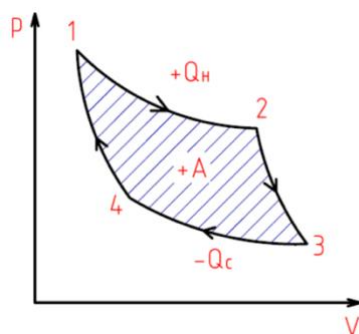
Čtyřdobý zážehový motor se řadí do skupiny pístových motorů, které jsou v dnešní době nejpoužívanějším pohonem automobilů. Při jeho činnosti dochází k přeměně energie chemické směsi paliva na mechanickou energii pohybujícího se pístu, kinetickou a tepelnou energii výfukových plynů. V neposlední řadě se část energie přemění na ztráty, které nedokážeme využít. [1]



Obrázek 1: Spalovací motor Honda D16Z6 [32]

1.1.1 STRUČNÁ HISTORIE ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

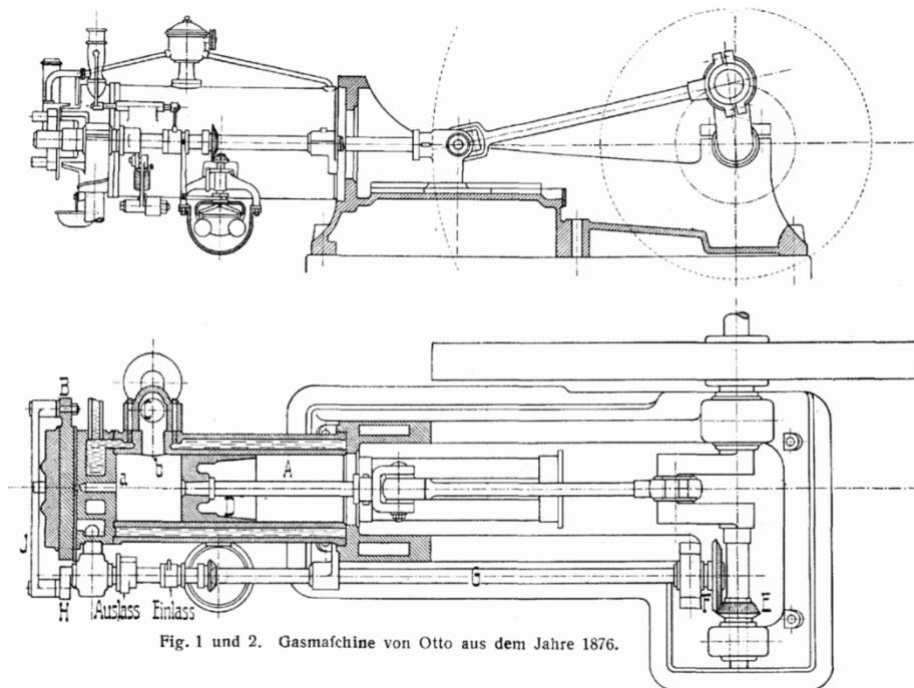
Již v 17. století se několik experimentátorů poprvé pokusilo provozovat čerpadla s horkými plynnými produkty. V roce 1820 v Anglii sestrojili motor, ve kterém v komoře explodovala směs vodíku a plynu. Komora se poté ochladila, aby se vytvořilo vakuum, které působilo na píst. Ačkoliv byly motory těžké a hrubé, obsahovaly základní prvky mnoha pozdějších, úspěšnějších spalovacích zařízení. V roce 1824 francouzský inženýr Sadi Carnot publikoval svou dnes již klasickou brožuru pod názvem *Úvahy o tepelné energii*, v níž nastínil základní teorii spalovacího motoru (obrázek 2). [26]



Obrázek 2: Přímý Carnotův cyklus v p-V diagramu

V roce 1862 teorie výrazně pokročila zveřejněním popisu ideálního pracovního cyklu spalovacího motoru. Autor, francouzský inženýr Alphonse Beau de Rochas, předepisuje pro optimální účinnost následující podmínky: maximální objem válce s minimálními chladicími plochami, maximální expanzní rychlost, maximální expanzní poměr a maximální tlak zapálené náplně. Požadovaný sled operací popsal jako (1) sání během celého zdvihu pístu, (2) stlačení během následujícího zdvihu, (3) zapálení v úvrati a na dalším vnějším zdvihu (silový zdvih) během expanze a (4) odvod spálených plynů během dalšího zdvihu. [33] Více doplněné v kapitole 1.1.2 Princip činnosti čtyřdobého zážehového motoru.

Motor popsaný Beau de Rochasem má tedy čtyřdobý cyklus, na rozdíl od dvoudobého cyklu motoru. Beau de Rochas nikdy nepostavil svůj motor a více než deset let tu nebyl žádný čtyřdobý motor. Nakonec v roce 1876 sestrojil německý inženýr Nikolaus A. Otto spalovací motor (obrázek 3) na principech popsaných Beau de Rochasem. Ottův čtyřdobý motor zaznamenal okamžitý úspěch. I přes vysokou hmotnost a špatnou hospodárnost se za 17 let prodalo téměř 50 000 motorů o celkovém výkonu asi 200 000 koňských sil (koňská síla byla dříve používána jako jednotkou výkonu), poté následoval prudký vývoj různých typů motorů stejného typu. Ottův motor byl ve Spojených státech patentován v roce 1877 a jeho výroba začala o rok později v roce 1878.[33]

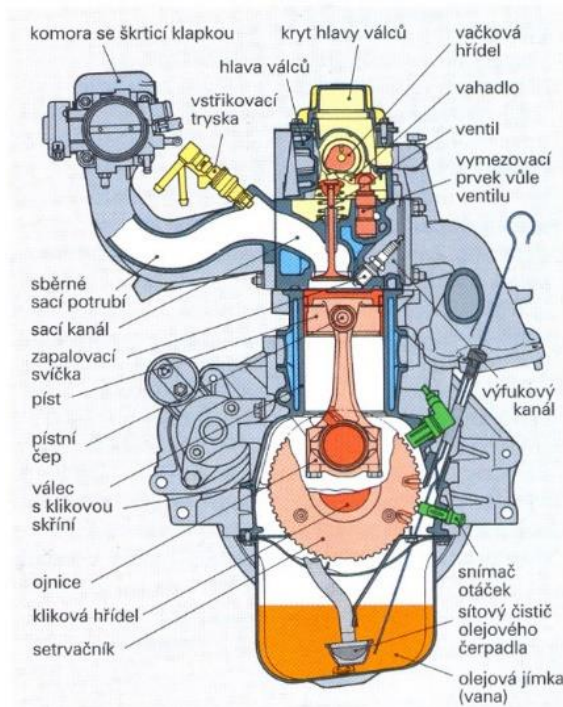


Obrázek 3: Spalovací Ottův motor z roku 1876 [35]

O osm let později Ottovi bývalí partneři Gottlieb Daimler a Wilhelm Maybach vyvinuli první úspěšný vysokorychlostní čtyřdobý motor a vynalezli karburátor, který umožňoval používat benzín jako palivo. Používali motory k pohonu jízdních kol (snad první motocykly na světě) a později kočárů. Přibližně ve stejné době další německý strojní inženýr Karl Benz sestrojil jednoválcový benzínový motor pro pohon toho, co je často považováno za první praktický automobil. Daimler, Maybach a Mercedes vyráběli v podstatě stejné motory, jako jsou dnešní základní benzínové motory. [35]

1.1.2 PRINCIP ČINNOSTI ČTYŘDOBÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Základem činnosti čtyřdobého zážehového motoru (obrázek 4) je jeho pracovní cyklus, který se skládá ze čtyř dob (cyklů). K provedení jednoho pracovního cyklu jsou tedy zapotřebí čtyři zdvihy pístu a dvě otáčky klikové hřídele [1]. Upřesnění jednotlivých cyklů můžeme vidět v tabulce 1.



Obrázek 4: Schéma čtyřdobého zážehového motoru s nepřímým vstřikováním benzínu, stejný systém je využit u motoru D16Z6 [33]

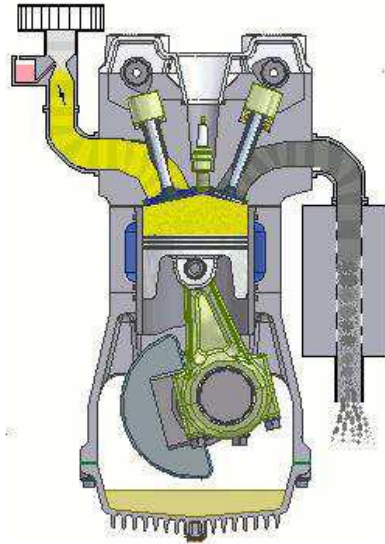
Tabulka 1: Parametry činnosti čtyřdobého zážehového motoru [33]

Čtyřdobý zážehový motor.		Stupeň komprese 8 až 11,5 při vstřikování do sacího potrubí, 11,5 až 12,5 při přímém vstřikování.			
		Účinnost využití tepelné energie obsažené v palivu 25 až 35 %. Měrná spotřeba paliva 230 až 260 g/kWh			
Doba	Název doby	Směr pohybu pístu z úvratí směrem	Činnost ventilů HÚ - horní úvrat', DÚ - dolní úvrat'	Nejvyšší teplota v pracovním prostoru válce [°C]	Nejvyšší tlak v pracovním prostoru válce [MPa]
1.	Sání	Dolů	Sací otevírají 10 až 45° před HÚ; zavírají 35 až 90° za DÚ	80 až 130	0,08 při atm. plnění 0,12 - 0,16 při přeplňování
2.	Komprese	Nahoru	Ventily zavřeny	400	0,8 až 1,8
3.	Expanze	Dolů	Ventily zavřeny	2000	5,5 až 6
4.	Výfuk	Nahoru	Výfukové otevírají 40 až 90° před DÚ; zavírají 15 až 25° za HÚ	800 až 1000	Zbytkový tlak před otevřením výfukového ventilu 0,3 až 0,5

1.1.3 PRACOVNÍ CYKLY ČTYŘDOBÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Nasávání

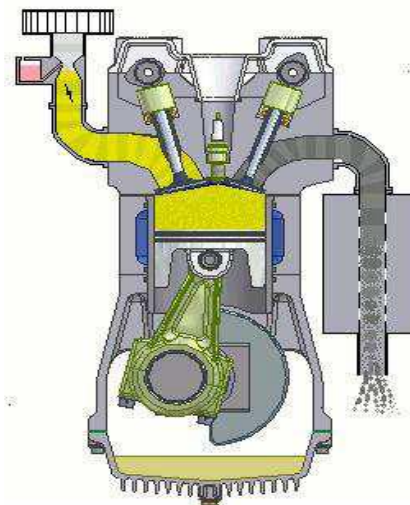
Při pohybu pístu z horní úvratě do dolní úvratě vznikne ve válci podtlak 10kPa až 20kPa. Vzhledem k tomu, že tlak v okolí je vyšší než tlak ve válci, je vzduch nasáván do sacího systému, ve kterém dochází ke smíchání paliva se vzduchem (Obrázek 5). [2]



Obrázek 5: Princip nasávání [1]

Komprese

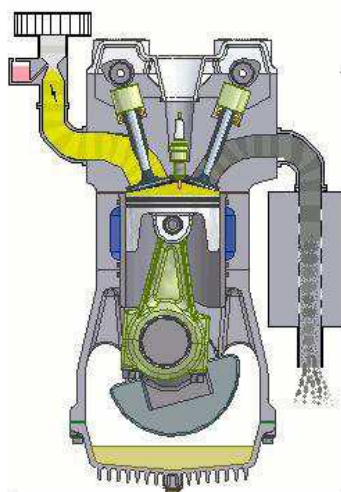
Při pohybu pístu z dolní úvratě do horní úvratě dochází ke stlačení čerstvé náplně. Pod vlivem stlačení se ve válci zvýší teplota, která na konci kompresního zdvihu dosahuje hodnot 350–450 °C. Současně se také zvýší i tlak ve válci až na 1,8MPa. V této době dochází vlivem zvyšující se teploty k odpařování paliva a smíchání jeho výparů se vzduchem (Obrázek 6). [2]



Obrázek 6: Princip komprese [1]

Expanze

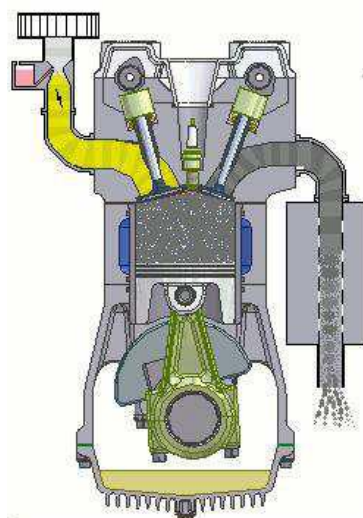
Expanze se bere jako jediná pracovní doba čtyřdobého spalovacího motoru. Směs vzduchu a paliva ve válci je zažehnuta elektrickým výbojem (tzv. jiskrou) mezi elektrodami svíčky. Díky rozpínajícím se plynům následuje pohyb pístu z horní úvratě do dolní, přičemž se tepelná energie přeměňuje na mechanickou práci. Výsledná síla se přenáší prostřednictvím ojnice na klikovou hřídel a následně na hnací ústrojí kol (Obrázek 7). [2]



Obrázek 7: Princip expanze [1]

Výfuk

Při pohybu pístu z dolní úvratě do horní a současně s otevřením výfukového ventilu dochází k vytlačování spalin z pracovního prostoru válce do výfukového potrubí. Přesněji řečeno, většina spalin se odvede vlivem přetlaku ihned po otevření výfukového ventilu. Vlivem téměř okamžitého úniku spalin vzniká ráz, který eliminuje tlumič ve výfukové soustavě. [3]

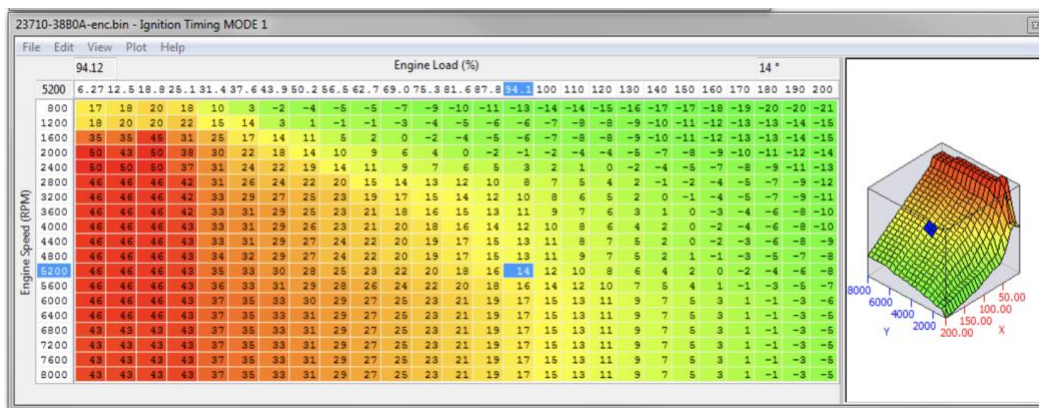


Obrázek 8: Princip výfuku [1]

1.2 ZPŮSOBY ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU U ZÁŽEHOVÉHO MOTORU

Zvyšování výkonu motoru bylo v minulosti využíváno hlavně u sportovních a závodních vozů. V těchto případech bylo cílem dosáhnout co největších výkonnostních parametrů motoru. V dnešní době mají výrobci snahu konstruovat spalovací motory tak, aby splnily všechny ekologické a ekonomické podmínky. [30]

U starších generací bylo možné nastavit bohatost směsi ručně, tedy mechanickými nastavovacími prvky. U novějších generací automobilů se spalovacím motorem jsou na přípravu směsi potřebné prvky, které již mají elektronické řízení. Správný chod motoru, nebo stechiometrický poměr palivo/vzduch, zajišťuje počítač tzv. řídicí jednotka motoru (ECU) na základě informací získaných ze senzorů. Sensory posílají informace na vstupní sběrnici řídicí jednotky motoru, a podle toho počítač vypočítá množství a čas vstříkovaného paliva a míru pootvření akčních členů. Tato data se počítají pomocí palivových map (Obrázek 9), které jsou uloženy v paměti řídicí jednotky (RJ) motoru. [30]



Obrázek 9: Palivová mapa [22]

Zvyšování výkonu spalovacích motorů je legalizováno pouze tehdy, pokud se při změně parametrů neporušuje žádný právní předpis. Porušení zákona nastává, pokud je řídicí jednotka spalovacího motoru (ECU) automobilu upravena tak, že přesahuje emisní hraniční hodnoty motoru určené výrobcem. V případě, že jsou emisní limity překročeny, automobil se považuje za technicky nezpůsobilý pro silniční dopravu. Majitel kromě toho může přijít i o záruku, pokud je vozidlo v záruční době [30]. My se ale zabýváme úpravami výkonu pro sportovní účely, ne do běžného provozu.

1.2.1 ZVÝŠENÍ ZDVIHOVÉHO OBJEMU MOTORU

Zvýšení zdvihového objemu se v praxi dosahuje větším vrtáním válců. Tato metoda je technicky náročná a vrtání nemůžeme zvětšovat příliš, protože jsme limitováni konstrukcí motoru. V praxi je tato metoda málo používaná [25]. Zdvihový objem je dán vztahem:

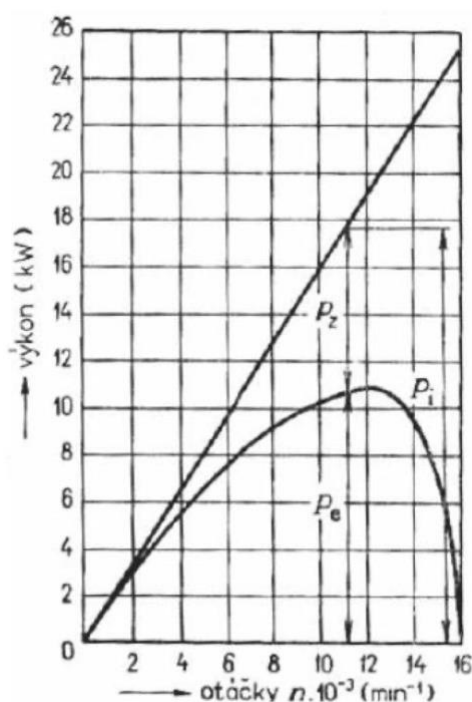
$$V_z = \frac{\pi \times D^2}{4} \times L \quad (1)$$

Kde: V_z je zdvihový objem [m^3]
 D je vrtání válce [m]
 L je zdvih válce [m]

1.2.2 ZVÝŠENÍ OTÁČEK MOTORU

Při zvyšování otáček motoru dochází k vyššímu počtu cyklů za jednotku času, což má za následek zvýšení výkonu motoru. Tato metoda má několik nevýhod. Jednou z nich je, že při nárůstu otáček motoru narůstá i jeho hlučnost, což je velmi nežádoucí efekt. [25]

Dalšími nevýhodami je fakt, že při nárůstu otáček dochází ke zvyšování třecích a ventilačních ztrát, kdy důsledkem je horší plnění válců a následné snížení středního efektivního tlaku. Pokud bychom zvyšovali otáčky dál nad kritickou hodnotu, docházelo by již jen ke nárůstu ztrátového výkonu a efektivní výkon by se snižoval, což by bylo zbytečné a neekonomické. Při zvyšování výkonu motoru touto metodou je třeba vzít v úvahu i zvýšení setrvačných sil pohyblivých částí motoru, které mohou mít za následek jeho poškození. [25]



Obrázek 10: Růst ztrátového výkonu s rostoucími otáčkami [36]

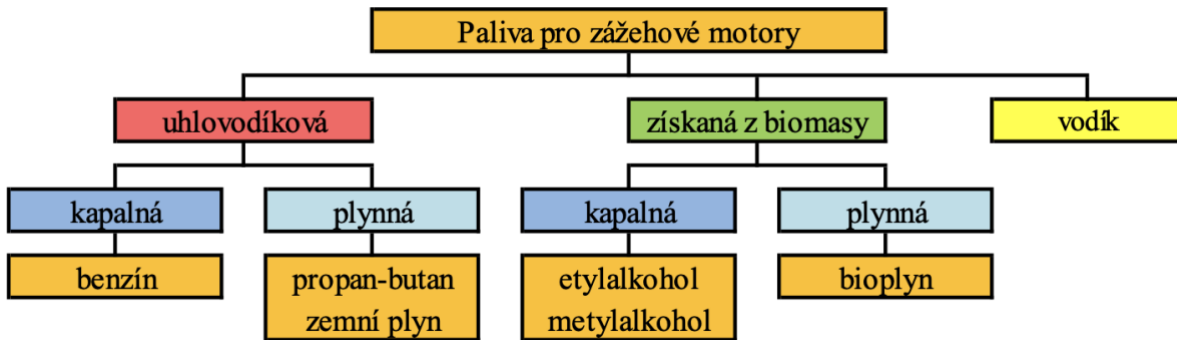
1.2.3 VÝMĚNA VZDUCHOVÉHO FILTRU

Vzduchový filtr zabraňuje nasátí nečistot do válců motoru, tlumí hluk vzniklý při proudění vzduchu a zabraňuje šíření podtlakových vln v sacím potrubí. Pokud má vzduchový filtr příliš velký průtokový odpor, je vhodné jej vyměnit za filtr s menším průtokovým odporem.

Tímto dosáhneme zmenšení odporu, který vzniká při sacím zdvihu proti pohybu pístu do dolní úvratě. Tento jev má za následek zvýšení ztrátového výkonu motoru. Musíme však dbát na to, aby neměl použitý čistič vzduchu až příliš malou schopnost zachytávat nečistoty. Nečistoty nasáté do motoru mohou v kombinaci s mazacím olejem vytvořit jemnou brusnou pastu, která způsobuje nadměrné opotřebení válce, pístu a pístních kroužků. [27]

1.2.4 VHODNÁ PALIVA KE ZVÝŠENÍ VÝKONU

Pro zážehové motory osobních automobilů se nejčastěji používají kapalná paliva, které jsou získávány destilací ropy. Základem paliv je uhlík (C) a vodík (H) (tyto uhlovodíky podporují spalovací proces). [37]



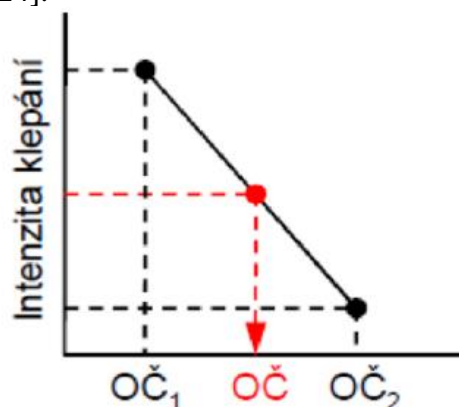
Obrázek 11: Rozdělení paliv dle zdroje, ze kterého jsou vyrobena [37]

Jednou z nejdůležitějších charakteristických vlastností je oktanové číslo, které je definováno jako schopnost paliva odolávat samovznícení v dosud nespálené směsi paliva a vzduchu [39]. Je dáno vztahem:

$$OČ = \frac{C_8H_{18}}{C_7H_{16}} \quad (2)$$

Kde: C_8H_{18} je Izooktan ($OČ=100$)
 C_7H_{16} je Heptan ($OČ=0$)

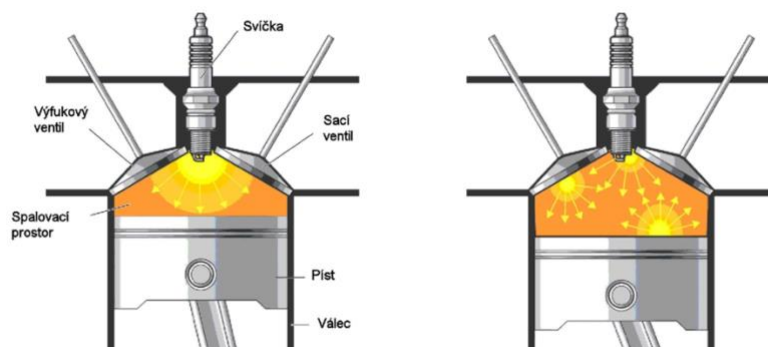
Pokud by nastal děj, při kterém by se palivo samo vznítilo, nazýváme ho detonační hoření (v některých starších literaturách ho můžeme najít taky pod pojmem klepání). Správné spalování probíhá tak, že se směs zapálí elektrickou jiskrou a čelo plamene se šíří dále ve spalovacím prostoru a zapálí nespálenou část směsi. Plamen ohřeje nespálenou směs na teplotu nad zápalnou teplotou, čímž dojde k jejímu vznícení s krátkým zpožděním zážehu a rychlost šíření plamene je přibližně 30 m/s [24].



Obrázek 12: Závislost oktanového čísla na klepání motoru

Paliva náchylná k detonačnímu hoření (nižší oktanové číslo) mohou způsobit překročení zápalné teploty nespálené části směsi ještě před čelem plamene, což má za následek prudké nekontrolované hoření s rychlostmi šíření plamene až 1000 m/s. To se projevuje jako klepající motor. Závislost klepání motoru a oktanového čísla je lineární (obrázek 12). [39]

Nebezpečí detonačního hoření lze zmírnit ochlazením horkého místa spalovací komory a zajistit nejkratší dráhu čela plamene (tvar spalovací komory) dobrým promícháním směsi a správným umístěním svíček. Můžeme tedy říct, že čím vyšší máme oktanové číslo, tím je nižší pravděpodobnost samovznícení, a tudíž detonačního hoření (obrázek 13). [24]



Obrázek 13: Detonační hoření [24]

V různých částech světa se používají různé typy benzínu s různými oktanovými čísly. V některých zemích se používá například benzin s oktanovým číslem 91 nebo 95, zatímco v jiných zemích se může používat benzin s oktanovým číslem 87 nebo 93. V České republice je nejčastěji používán benzin s označením E5 (dříve označovaný Natural 95 nebo Natural 98, kde číselná hodnota určuje velikost oktanového čísla) [39]. Parametry E5 můžeme odečíst z tabulky 2.

Tabulka 2: Parametry benzínu

PARAMETR		Benzín
hustota	kg.dm ⁻³	0,73
bod varu	°C	38 ÷ 204
spodní výhřevnost	MJ.kg ⁻¹	44,9
spodní výhřevnost	MJ.m ⁻³	32700
stechiometrický poměr	kg.kg ⁻¹	14,8
zápalná teplota	°C	257
rychlost hoření	m.s ⁻¹	0,34

Dalším způsobem zlepšení oktanového čísla je mísení benzínu s metanolem. Metanol je organická sloučenina s chemickým vzorcem CH_3OH a je označován jako jednoduchý alkohol, který je bezbarvý, hořlavý a jedovatý. Metanol také poskytuje relativně čisté spalování a produkuje nižší emise některých škodlivých látek ve srovnání s benzínem. Bez ohledu na své výhody představuje používání metanolu jako paliva pro spalovací motory určité překážky. Z energetického hlediska se metanol nevyrovná benzínu, protože má nižší výhřevnost (tabulka 3). [24]

Tabulka 3: Porovnání parametru Metanolu s benzínem

Vlastnosti paliva	Metanol	MTBE	Benzin
Rel. molekulová hmotnost (g/mol)	32	88	111
Oktanové číslo (RON)	110	116	97
Oktanové číslo (MON)	92	100	86
Cetanové číslo	5	-	8
Tlak par podle Reida (kPa)	31,7	57,0	75,0
Hustota 15°C (g/cm ³)	0,79	0,74	0,75
Výhřevnost (MJ/kg)	19,8	35,2	41,3
Výhřevnost (MJ/l)	15,6	26,0	31,0
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	6,5	-	14,7
Bod varu (°C)	65	55,3	30-190

V posledních letech se také rozvíjí alternativní paliva pro zážehové motory, jako je například etanol. Etanolová směs, která se často označuje jako E85, obsahuje až 85 % etanolu a zbytek benzínu. Tato směs může být použita v některých vozech s flexibilními palivovými systémy[21]. Porovnání oktanového čísla a etanolu můžeme vidět v tabulce 4.

Tabulka 4: Porovnání parametru Etanolu s benzínem

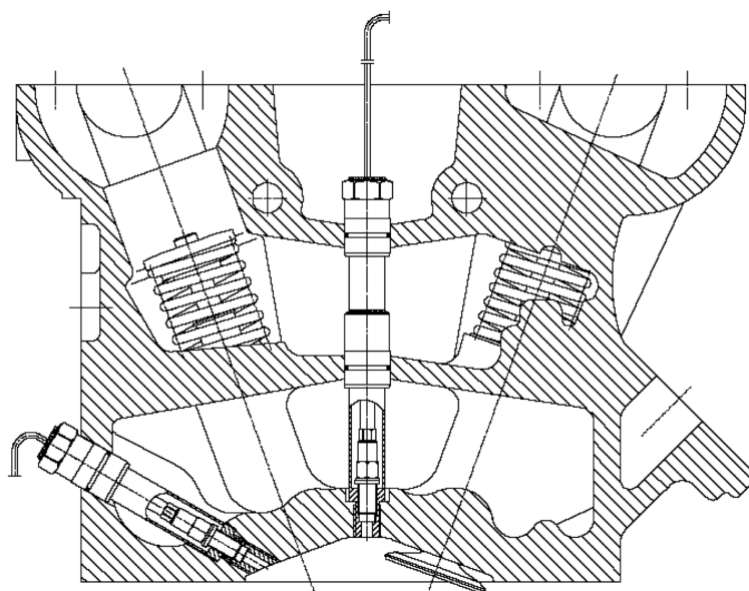
Vlastnosti paliva	Etanol	ETBE	Benzin
Rel. molekulová hmotnost (g/mol)	46	102	111
Oktanové číslo RON / MON	109 / 92	118 / 105	96 / 85
Cetanové číslo	11	-	8
Tlak par podle Reida (kPa)	16,5	28,0	75,0
Hustota 15°C (g/cm ³)	0,80	0,74	0,75
Výhřevnost (MJ/kg)	26,4	36,0	41,3
Výhřevnost (MJ/l)	21,2	26,7	31,0
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	9,0	-	14,7
Bod varu (°C)	78	72	30 - 190
Zápalná teplota (°C)	425		>280
Bod vzplanutí (°C)	12	-19	-35
Meze výbušnosti D / H (% v/v)	3,5 / 15	1,2 / 9,1	1,3 / 7,6

Je důležité vzít v úvahu, že správný druh paliva pro konkrétní zážehový motor závisí na jeho specifikaci a požadavcích výrobce. Pokud řešíme palivo pro závodní motory, je pro nás důležité dosáhnout co nejvyššího oktanového čísla a nejlépe i výhřevnosti. Před použitím alternativních paliv je vhodné se poradit s odborníkem.

Vliv paliv na spalovací tlaky a spalovací teploty

Spalovací tlaky a teploty zážehového motoru jsou silně ovlivněny palivy. Různorodé hořlavé vlastnosti různých paliv značně ovlivňují výsledné tlaky a teploty spalovacího procesu.

Spalovací cyklus ve spalovacím motoru vytváří určitý tlak ve válcích, známý jako spalovací tlak. Volba použití paliv s vyšším oktanovým číslem může přispět k rychlejšímu a efektivnějšímu spalování, což má za následek zvýšený spalovací tlak. Velikost spalovacího tlaku je omezena konstrukcí motoru. Naopak použití paliv s nižším oktanovým číslem může vést k neúplnému a opožděnému spalování, což nakonec snižuje spalovací tlak. Pro přesné měření spalovacích tlaků využíváme tzv. Piezoelektrické snímače (obrázek 14). [40]



Obrázek 14: Na obrázku můžeme vidět instalaci Piezoelektrických snímačů k měření tlaku ve válci motoru [40]

Teplota dosažená spalováním paliva uvnitř spalovacího motoru se nazývá teplota spalování. Paliva s vyšší výhřevností mají za následek vyšší teploty při spalování. Tyto zvýšené teploty mohou negativně ovlivnit výkon motoru a zvýšit emise oxidu dusíku. Existují však určitá paliva, jako je například metanol, která mohou během spalování ochladit spalovací komoru a v konečném důsledku snížit teplotu. [39]

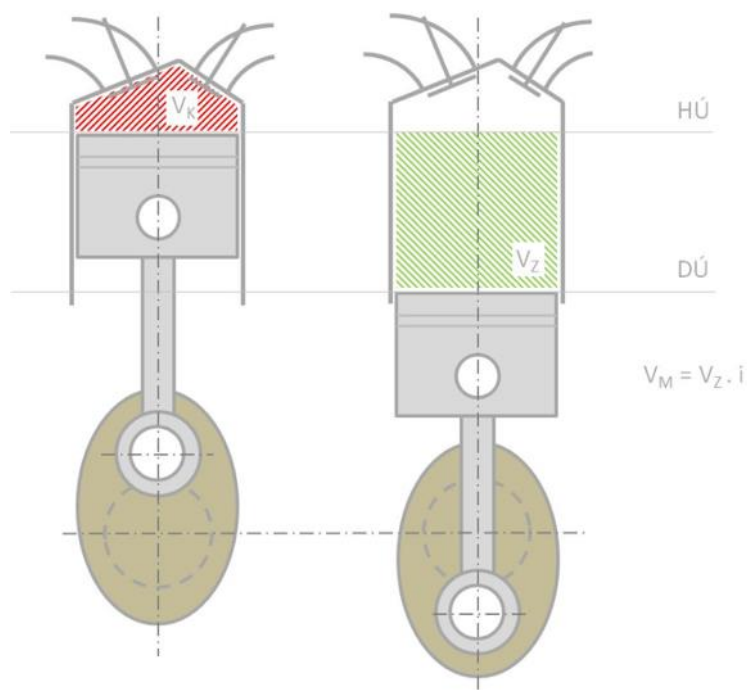
Musíme ale dbát na to, že nejen paliva ovlivňují spalovací tlaky a spalovací teploty. Důležitým faktorem je konstrukce a parametry zážehového motoru. Jedním z nejdůležitějších faktorů je kompresní poměr. Tato veličina se označuje písmenem řecké abecedy ϵ a rovná se poměru objemu spalovací komory a celkového pracovního objemu válce (obrázek 15).

Je dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{V_z + V_k}{V_k} \quad (3)$$

Kde: ε je kompresní poměr
 V_z je zdvihový objem [m³]
 V_k je kompresní objem [m³]

Účinnost spalovacího motoru je sice rostoucí se zvyšováním kompresního poměru, je však třeba poznamenat, že tento nárůst není lineární. Například u benzínových motorů nemá význam překračovat kompresní poměr 13:1, protože nejsme schopni dodávat kvalitní palivo s dostatečně vysokým oktanovým číslem, a tím tedy zabránit již zmíněnému detonačnímu hoření. [41]



Obrázek 15: Červená oblast V_k popisuje kompresní objem a zelená oblast V_z objem zdvihový [33]

1.2.5 ZVÝŠENÍ PLNÍCÍ (OBJEMOVÉ) ÚČINNOSTI

Množství vzduchu, které je spalovací motor schopen použít k úplnému spálení paliva, se měří podle jeho účinnosti plnění. Plnicí účinnost je dána poměrem množstvím nasávaného vzduchu a množstvím vzduchu potřebného k úplnému spálení paliva [41]. Je dána vztahem:

$$\eta_{pl} = \frac{m_z}{V_z \times \rho_{pl}}, \quad (4)$$

kde: η_{pl} je plnicí (objemová) účinnost [-],
 m_z je hmotnost čerstvé náplně [kg],
 ρ_{pl} je hustota plnicího vzduchu [kg.m⁻³].

Vysoká plnicí účinnost znamená, že motor efektivně využívá každou jednotku paliva a nasávaného vzduchu, což má za následek lepší výkon, nižší spotřebu paliva a méně emisí. Na druhou stranu nízká plnicí účinnost znamená, že motor spaluje palivo méně efektivně, což má za následek snížený výkon, zvýšenou spotřebu paliva a zvýšené emise. [24]

Plnicí účinnost spalovacího motoru může být zlepšena pomocí několika opatření, včetně lepšího návrhu ventilů, optimalizace palivového systému, zvýšení výkonu turbodmychadla a optimalizace procesu spalování. [25]

1.2.6 IDEÁLNÍ SMĚŠOVACÍ POMĚR

V kontextu spalovacího motoru se směšovací poměr týká poměru paliva a vzduchu. Směšovací poměr je důležitým parametrem, který ovlivňuje hoření paliva a výkon motoru. [41]

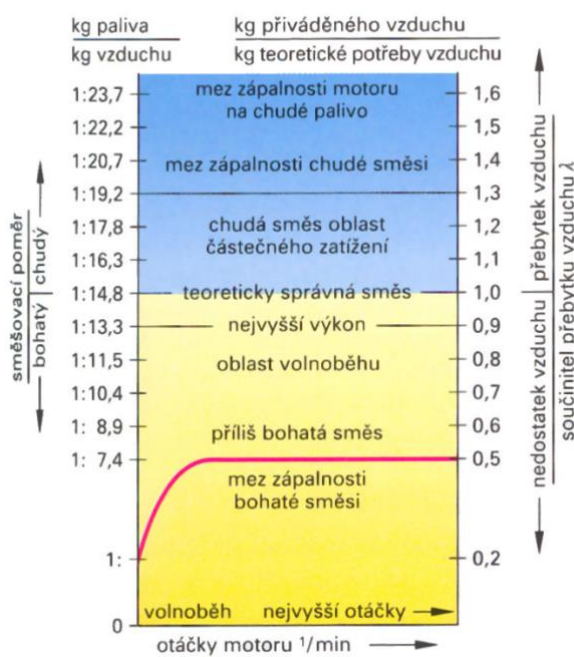
Ideálním poměrem je dosaženo procesu, že veškerá dostupná chemická energie paliva se přemění na tepelnou energii. Je tedy nutné vytvořit směs paliva a vzduchu s ideálním poměrem kyslíku a hořlavin v celém objemu směsi. [41]

Součinitel přebytku vzduchu λ úzce souvisí se směšovacím poměrem, který představuje poměr hmotnosti vzduchu přiváděného do válce k hmotnosti vzduchu potřebné pro stechiometrické spalování. Poměr přebytku vzduchu určuje rozdíl mezi skutečným poměrem vzduch-palivo a teoreticky požadovaným poměrem vzduch-palivo. [39]

$\lambda = 1$ – hmotnost vzduchu přiváděného odpovídá teoretické spotřebě vzduchu

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

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



Obrázek 16: Graf závislosti směšovacího poměru a součinitele přebytku vzduchu na chudé a bohaté směsi [28]

Veličinu λ jsme schopni měřit pomocí lambda sondy, která je instalována ve výfuku a dává impuls vstříkovací jednotce kolik má vstříknout paliva. [28]

Stechiometrický výpočet optimálního směšovacího poměru

Stechiometrie u spalovacích motorů se týká poměru vzduchu a paliva (A/F) potřebného pro úplné spálení paliva v motoru. Tento poměr lze použít k vytvoření palivových směsí a určení nejúčinnějšího způsobu provozu motoru. [18][19]

Pro následující výpočet vycházíme ze zdroje [42]

Teoretická spotřeba kyslíku ke spálení 1kg paliva je dána vztahem:

$$O_t = \frac{8}{3}M_c + 8 \times M_{H_2} + M_s - M_{O_2} \quad [\text{kg kyslíku/ kg paliva}] \quad (5)$$

Kde: M_c je molární hmotnost C [kg]
 M_{H_2} je molární hmotnost H_2 [kg]
 M_s je molární hmotnost S [kg]
 M_{O_2} je molární hmotnost O_2 [kg]

Teoretická spotřeba vzduchu ke spálení 1kg paliva je dána vztahem:

$$L_t = \frac{O_t}{0,23} = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}M_c + 8 \times M_{H_2} + M_s - M_{O_2} \right) \quad [\text{kg vzduchu/ kg paliva}] \quad (6)$$

Výpočet vzduchu s obsahem 23% kyslíku pro úplné spálení 1kg benzínu:

$$L_t = \frac{O_t}{0,23} = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}0,8575 + 8 \times 0,1378 + 0,0005 - 0,0042 \right) = \mathbf{14,72 \text{ [kg/ kg]}}. \quad (7)$$

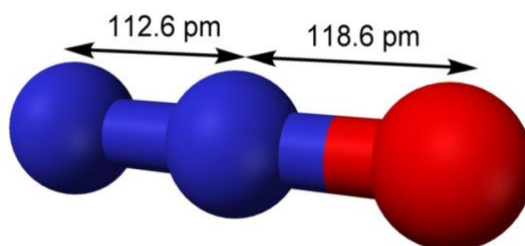
Podle výsledku předchozího vzorce nám vyplývá, že optimální směšovací poměr daného benzínu a vzduchu je **14,72 kg vzduchu na kg benzínu**.

Dále už se bakalářská práce bude zabývat využitím oxidu dusného pro krátkodobé zvyšování výkonu spalovacího motoru.

1.3 VYUŽITÍ OXIDU DUSNÉHO KE ZVYŠOVÁNÍ VÝKONU

Oxid dusný (N_2O), také známý jako dinitrogenmonoxid, rajský plyn nebo jednoduše nitrous, je jeden ze série oxidů dusíku. Jedná se o bezbarvý plyn s příjemnou sladkou vůní a chutí. Oxid dusný byl objeven anglickým chemikem Josephem Priestleym v roce 1772 a později pojmenován a ukázán pro jeho fyziologický účinek jiným anglickým chemikem Humphry Davyem. [4]

Struktura molekuly oxidu dusného je lineární řetězec atomu dusíku vázaného na druhý dusík, který je zase vázán na atom kyslíku (obrázek 17). [5]



Obrázek 17: 3D schéma molekuly N_2O [6]

Oxid dusný (N_2O) by neměl být zaměňován s jinými oxidy dusíku, jako je oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2). Oxid dusný lze použít k výrobě dusitanů smícháním s vroucími alkalickými kovy a k oxidaci organických sloučenin při vysokých teplotách. Přípravuje se reakcí zinku s ředěnou dusičnou kyselinou, reakcí hydroxylaminu hydrochloridu ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) s dusitanem sodným (NaNO_2) nebo nejčastěji rozkladem dusičnanu amonného (NH_4NO_3). [7]

1.3.1 OXID DUSNÝ VE ZDRAVOTNICTVÍ

Oxid dusný má euforický účinek na tělo, což vysvětluje jeho přezdívku "rajský plyn". Je to nejslabší inhalované anestetikum, které potřebuje koncentraci 104 % k dosažení minimální alveolární koncentrace (MAC). Proto nemůže být použit jako samostatné anestetikum a často se kombinuje s výkonnějším, volatilnějším (inhalačním) anestetikem. Kombinace analgetických a anestetických účinků ho však dělá cenným pomocníkem. Oxid dusný má nízkou rozpustnost v krvi (koeficient rozdělení krve a plynu 0,47), což vede k rychlému nástupu a ústupu účinků. Tento efekt se nazývá druhým plynným efektem a způsobuje koncentraci aplikovaných volatilních látek v plicích. [8]

Oxid dusný se používá k celkové anestezii, zubní anestezii a léčbě silné bolesti. V porovnání s jinými anestetickými látkami má minimální účinky na dýchání a hemodynamiku (proudění v krevním oběhu), snižuje objemové dýchání a zvyšuje respirační frekvenci, zároveň ale minimalizuje celkovou ventilaci. Přímá deprese srdečního svalu se u něj vyskytuje, ale sympatikus aktivuje a snižuje tento efekt, takže celkový efekt je minimální. Na rozdíl od jiných volatilních anestetik nemá oxid dusný žádné vlastnosti uvolňování svalů. [9]

Oxid dusný se také zkoumá jako možný prostředek pro léčbu rezistentní deprese, ale pro další použití je potřeba provést rozsáhlé výzkumy. V situacích, jako jsou porodnická oddělení nebo pohotovostní oddělení, se obvykle podává směs s 50 % kyslíkem. [10]

1.3.2 APLIKACE OXIDU DUSNÉHO VE SPALOVACÍCH MOTORECH

První zkušenosti s aplikací oxidu dusného ke krátkodobému zvýšení výkonu motoru se datují až do druhé světové války, kde se používal k udržení výkonu leteckých motorů při vysokých nadmořských výškách s nižší hustotou vzduchu. Tuto technologii používali specializované letouny, jako byly výškové průzkumné letouny a vysokorychlostní bombardéry. Někdy se technologie využívala s kombinací vstřikování metanolu a vody, zejména u prototypu stíhačky Focke-Wulf Ta 152H. [11]



Obrázek 18: Focke-Wulf Ta 152H [11]

Vstřikování vody a metanolu (nebo pouze vody) do sacího traktu se dá brát jako alternativa vstřikování oxidu dusného. Tato technologie se v motorsportu označuje jako vodo-metanolová injekce, která zahrnuje vstřikování vody a metanolu do zážehového motoru. Je implementován za účelem dosažení různých cílů, jako je zvýšení výkonu, snížení emisí a zlepšení chlazení motoru, na rozdíl od leteckých motorů, kde přebytek výkonu motoru v bojovém manévru rozhodoval mezi životem a smrtí. Dnes se využívá zejména zvýšení plnicí účinnosti a chlazení v problematických provozních režimech motoru vzhledem k detonačnímu hoření (vysoká teplota a spalovací tlak)

Díky vstřikování se snižuje spalovací teplota a také zvyšuje hustota nasávaného vzduchu, což umožňuje vyšší kompresní poměr a v konečném důsledku lepší spalování paliva. Aplikací vodo-metanolové injekce lze zvýšit výkon až o 10-30 %, ale největší efekt má u přeplňovaných motorů. Kompletní kit na úpravu motoru je znázorněn na obrázku 19. [45]



Obrázek 19: Kit na vstřikování vody-metanolu do spalovacího motoru [45]

Největší úspěch vstřikování oxidu dusného (v motorsportu často nazývané vstřikování dusíku), ke zvýšení krátkodobého výkonu, je dodnes u dragsterů. Dragster (obrázek 20) je závodní speciál uzpůsobený k závodům na krátkou vzdálenost s pevným startem. Hlavním úkolem upraveného speciálu je dosáhnout co nejvyššího zrychlení v co nejkratším časovém úseku, k čemuž je aplikace oxidu dusného žádoucí. Nejsilnější speciály dosahují výkonu přes 4400 W při 8000 otáčkách za minutu a přetížení při zrychlení může přesáhnout 5G. Držitelkou rekordu v závodech dragsterů je Kitty O'Neilová, která v roce 1977 dosáhla rychlosti 628,85 km/h za pouhých 3,72s. [46]



Obrázek 20: Závodní speciál Dragster [46]

Zájem o dosažení velkých rychlostí v krátkém časovém úseku v automobilech vedl k vytvoření NOS (Nitrous oxide systems). Původně byl NOS využíván pouze k závodním účelům, později se však ukázalo, že lze aplikovat a tím jednoduše zvýšit i výkon sériových motorů. [12]

1.4 NOS (NITROUS OXIDE SYSTEMS)

Vstřikováním N₂O (oxidu dusného) do sacího potrubí benzinového motoru je možné dosáhnout krátkodobého vyššího výkonu za použití relativně málo finančních prostředků. Nárůst výkonu je však krátkodobý (10-15 vteřin). Při špatné aplikaci může dojít k poškození motoru. Také se doporučuje vstřikovat oxid dusný pouze při zcela otevřené škrtící klapce, tedy plném plynu. [5]

Muž, který položil základní kámen k používání oxidu dusného ke krátkodobému zvýšení výkonu, je zakladatel společnosti NOS (Nitrous Oxide Systems) Mike Thermos (Obrázek 21). Nejenže popularizoval N₂O jako bezpečný a spolehlivý zdroj přídavného výkonu, ale je uznávanou osobností v autosportu. Nikdo nikdy nepomohl závodníkům překonávat výkonostní bariéry a vyhrávat mistrovské tituly, jako Mike Thermos. [12]



Obrázek 21: Mike Thermos, zakladatel společnosti Nitrous Oxide Systems [12]

Z principu funkce by se daly systémy rozčlenit na:

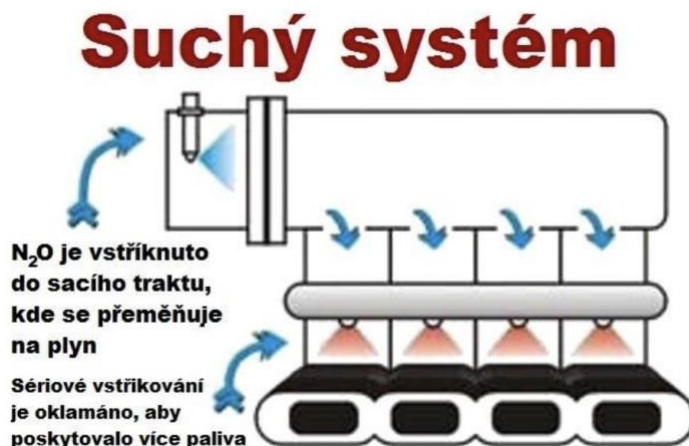
1. Suchý systém

Suchý systém využívá vstřikování oxidu dusného do suchého vzduchu, tedy bez přidání paliva. Pro tento princip vstřikování oxidu dusného se využívá jednocestný vstřikovač (obrázek 22). [14]



Obrázek 22: *Vstřikovač* pro použití v suchém systému vstřikování NOS [14]

Po sepnutí spínače vstřikovač směšuje N_2O s přiváděným vzduchem a k tomu je dodáváno potřebné množství paliva pro udržení rovnováhy spalovacího procesu (obrázek 23). Do válce se však může dostat příliš chudá směs, která obsahuje větší množství kyslíku což může způsobit podpálení ventilů. Primární část sání je v tomto případě udržována v suchu bez paliva. [13]



Obrázek 23: Schéma instalace suchého vstřikovacího systému NOS

2. Mokrý systém

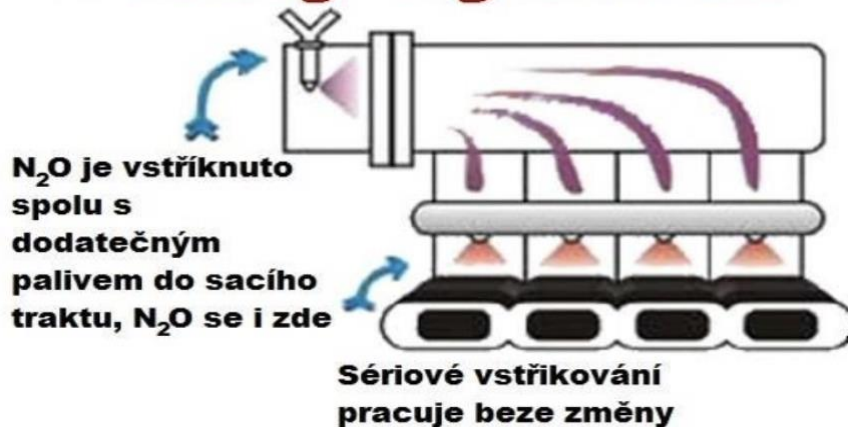
Mokrý systém je způsob vstřikování směsi paliva a oxidu dusného přímo do primární části sání motoru za pomoci dvoucestného vstřikovače (obrázek 24). [14]



Obrázek 24: Dvoucestný vstřikovač pro mokrý systém NOS [14]

Tento systém poskytuje více chemické energie než suchý systém. Vstřikování N_2O nastane ihned po stisknutí spínače, tudíž správně zavedený mokrý systém je nejlepší způsob, jak vstřikovat oxid dusný do motoru. [13]

Vlhký systém

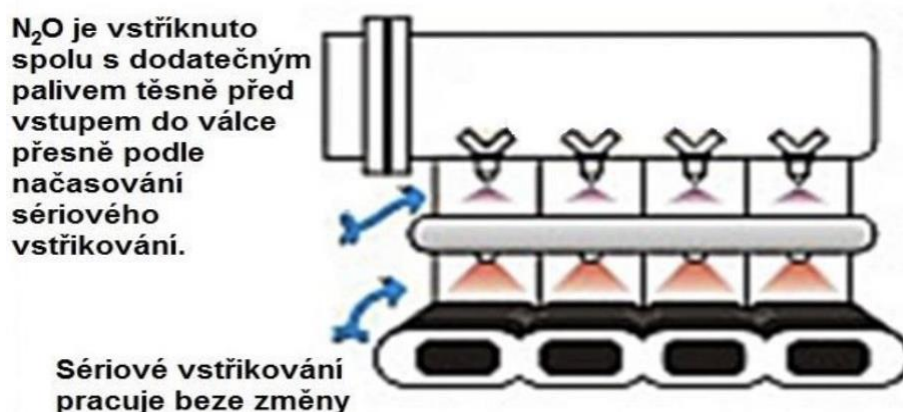


Obrázek 25: Schéma mokrého systému NOS [43]

3. Přímé vstřikování oxidu dusného do sacího traktu motoru

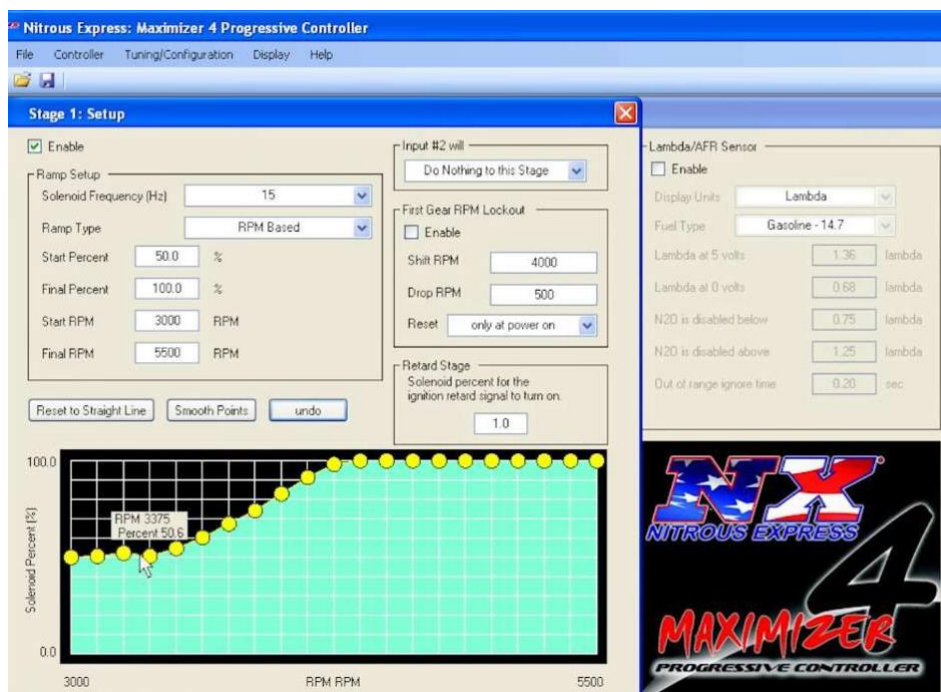
Jedná se o neúčinnější systém vstřikování oxidu dusného. Oxid dusný je spolu s potřebným dodatečným palivem vstřikován těsně před vstupem do válce za pomoci dvoucestného vstřikovače (obrázek 26), přičemž sériové vstřikování pracuje beze změny. Navzdory tomu se jedná o systém s nejsložitější montáží. Musíme navrtat sání, a tudíž ho trvale zdeformujeme. Přímým vstřikováním dosáhneme nejvyššího krátkodobého nárustu výkonu motoru, ale nesmíme zapomenout na úpravu ostatních částí motoru (písty, pístní kroužky, ventily). Sériově vyrobené součásti by se při nárustu výkonu zdeformovali.

Přímé vstřikování



Obrázek 26: Schéma systému s přímým vstřikováním NOS [43]

Mezi doplňky, pro systémy vstřikování oxidu dusného, patří progressive controller. Jedná se o programovatelný mikropočítač, který snímá otáčky motoru, zároveň je napojen na akční členy a určuje velikost dodávky paliva a oxidu dusného. Mikropočítač lze připojit k PC přes USB a pomocí programu Maximizer (obrázek 27) můžeme naprogramovat různé objemy dodávky v závislosti na otáčkách motoru. Tato jednotka se primárně používá pro závodní účely.



Obrázek 27: Program Maximizer [43]

1.4.1 PRACOVNÍ PRINCIP OXIDU DUSNÉHO PŘI SPALOVÁNÍ:

Cílem oxidu dusného je získat vyšší výkon motoru v krátkodobém časovém úseku, čehož lze dosáhnout dvěma způsoby. Za prvé, oxid dusný obsahuje 36% kyslíku oproti běžným 23% kyslíku ve vzduchu. Nutno podotknout, že oxid dusný funguje pouze jako okysličovadlo a bez paliva by tento systém nebyl funkční.

Druhým způsobem, jak oxid dusný zlepšuje výkon motoru, je ochlazení přívodního vzduchu v sání, a to z důvodu změny z kapalného stavu oxidu dusného na plynný. [7]

Jedním z nejdůležitějších aspektů, jak udržet motor bez poškození při používání oxidu dusného, je zajistit, aby běžel ve správném poměru vzduch-palivo. Provoz při příliš chudé směsi může způsobit explozi, která má za následek poškození částí motoru (pístů, ventilů). Příliš bohatý chod může také ovlivnit výkon a poškodit součásti motoru. Při bohaté směsi vznikají možné výpadky zapalování a kvůli oplachu stěn válce přebytečným palivem dochází vlivem ředění oleje k přidření válce. Je třeba dbát na to, aby byl systém navržen tak, aby nedodával více oxidu dusného, než je motor schopný konstrukčně zvládnout. [15]

Výkon systému lze dále zlepšit úpravou tlaku paliva a velikosti průměru otvorů palivových trysek. Navíc se systémem přímého sání dusíku lze každý válec jemně vyladit tak, aby optimalizoval výkon a překonal bohaté nebo chudé spalování každého válce. Spalovací motor je v podstatě atmosférické čerpadlo a jeho schopnost pumpovat vzduch je jedním z faktorů, který určuje, jaký výkon dokáže vyrobit. [15]

Zvýšení plnicí účinnosti a změna směšovacího poměru

Podle hmotnosti obsahuje oxid dusný 36 procent kyslíku, zatímco vzduch obsahuje pouze 23 procent. Kombinace oxidu dusného se vzduchem spálí více paliva než stejné množství vzduchu, čímž se nám rapidně zvyšuje **plnicí účinnost**. Protože oxid dusný obsahuje více kyslíku než vzduch, doporučený směšovací poměr vzduch-palivo je 9,5 dílů oxidu dusného na 1 díl paliva (9,5:1). To znamená, že pokud se dodává oxid dusný obohacený kyslíkem, musí se pro udržení optimálního poměru dodat i další palivo. Bez přídavného paliva může být směs velmi chudá – situace, která téměř vždy vede k vážným a nákladným škodám. [5]

Vliv použití oxidu dusného na spalovací tlaky, spalovací teploty a detonační hoření

Ačkoli se teplota nasávaného vzduchu ochladí po vstříknutí oxidu dusného, dostaneme do válce více kyslíku (příčina popsána v předchozím odstavci), tudíž je zapotřebí dodávat více paliva, a tím se nám zvýší spalovací tlaky a spalovací teploty. Pokud bychom vstříkovali neúměrné množství oxidu dusného, došlo by určitě k nevratné destrukci motoru. Vyšší spalovací tlaky nám ale i zvyšují pravděpodobnost výskytu detonačního hoření (popsáno v kapitole Vhodná paliva ke zvýšení výkonu), proto musíme pro získání vyššího nárustu výkonu dodávat i kvalitní palivo s co možná nejvyšším oktanovým číslem. Případně obohatit palivo palivem s lepším oktanovým číslem nebo ho smísit s aditivou pro zvýšení oktanového čísla. [40]

1.4.2 ROZVOD OXIDU DUSNÉHO A PŘÍDAVNÉHO PALIVA

Pro správnou funkci systému je velmi důležité zvolit adekvátní potrubí. V motorsportu je běžně používáno pro přívod paliva teflonové potrubí. Přívod oxidu dusného je veden v teflonových hadicích s nerezovým opletem a označeny jsou modrou barvou. Dodatečný přívod paliva je taktéž vedený v teflonových hadicích s nerezovým opletem, ale jsou označeny barvou červenou (obrázek 28). [16]



Obrázek 28: Teflonové potrubí pro rozvod oxidu dusného a paliva [16]

1.4.3 FILTR OXIDU DUSNÉHO

Funkcí filtru (obrázek 29) v soupravě N₂O je zachytit veškeré usazeniny a nečistoty. Na rozdíl od palivových filtrů typu OE jsou in-line filtry účinnější. [16]



Obrázek 29: Filtr přívodu N₂O [16]

1.4.4 TLAKOVÉ LAHVE N₂O

První průkopníci oxidu dusného skladovali svůj N₂O v různých nádobách – od potápěčských láhví až po ocelové acetylenové láhve. To vše se změnilo na konci 70. let, kdy Mike Thermos, zakladatel společnosti Nitrous Oxide Systems, oslovil společnost Luxfer Manufacturing Company (která se specializovala na lehké láhve na hasicí plyn) a informoval se na možnost výrobu láhví na N₂O. Tlakové 1800 psi (anglosaská jednotka tlaku) láhve N₂O (obrázek 30) jsou vyrobeny z lehkého hliníku s průmyslovým standardem DOT-3AL-1800. Jedná se o certifikovanou hliníkovou láhev na N₂O, původně dostupnou v modré barvě s logem firmy NOS. Tato láhev má tloušťku stěny 0,8mm, váží 6,4 kg prázdná a 10,9 kg plná. [16]



Obrázek 30: Tlaková láhev na N₂O [16]

1.4.5 VÝHODY POUŽITÍ OXIDU DUSNÉHO PRO ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Jelikož dusík a kyslík tvoří velkou část naší atmosféry, poskytuje to hned několik výhod [16]:

- Jednou z největších výhod instalace oxidu dusného je jeho schopnost poskytnout okamžitý výkon pouhým stisknutím tlačítka, když je to naléhavě potřeba.
- Pokud jde o zvýšení výkonu spalovacího motoru, oxid dusný je cenově přípustnou možností, která překonává všechny známé alternativy.
- Tento systém poskytuje znatelně větší výkon než turbodmychadlo, kompresor, nová sada hlav válců nebo záměna sériového vačkového hřídele za ostrý.
- S nastavitelnou sadou lze přidat více výkonu, pokud to motor, převodovka a hnací ústrojí vozidla konstrukčně vydrží, a to pouhou výměnou trysek.
- Ve srovnání s jinými úpravami pro zvyšování výkonu je instalace NOS systému relativně snadná.

1.4.6 NEVÝHODY POUŽITÍ OXIDU DUSNÉHO PRO ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Použití oxidu dusného pro zážehový motor má ale také několik nevýhod [16]:

- Pokud se dusíková láhev přehřeje nebo zahřeje příliš rychle, dojde ke katastrofické explozi (obrázek 31).
- Tekutý dusík může způsobit vážné trvalé poškození kůže omrzlinami.
- Vdechnutí oxidu dusného může způsobit udušení a okamžitou smrt.
- Systém dusíku je navržen tak, aby fungoval při 1100 psi, tlaky nad tuto hodnotu způsobí, že směs bude příliš chudá a způsobí vážné poškození motoru.
- Pokud záložní palivový systém nedodává motoru dostatek paliva, směs bude příliš chudá a způsobí vážné poškození motoru.
- Aktivace systému oxidu dusného může způsobit výbuch při nastartování motoru.



Obrázek. 31: Exploze motoru vlivem špatné instalace NOS [17]

2 NÁVRHOVÝ VÝPOČET POUŽITÍ SYSTÉMU NOS PRO ZVOLENÝ MOTOR

V této kapitole se budeme zabývat určením potřebného množství oxidu dusného pro krátkodobé zvýšení výkonu daného motoru. Výpočet bude vyhotoven na základě předpokladu maximálního dovoleného spalovacího tlaku, který je dán konstrukcí motoru.

2.1 MOTOR HONDA D16Z6

Motor Honda D16Z6 je pohonná jednotka s objemem 1,6 litru, která byla vyráběna automobilkou Honda v letech 1992 až 1995. Tento motor byl používán v modelu Honda Civic 5. generace s označením ESI. Jednalo se o předchůdce motoru D15Z6, který byl použit v pozdější 6. generaci Hondy Civic [44]

Motor D16Z6 je vybaven technologií VTEC (Variable Valve Timing and Lift Electronic Control), který se aktivuje při 5500 otáčkách za minutu a zapříčiní změnu časování ventilu a zdvihu. Dále je vybaven jedním vačkovým hřídelem a čtyřmi válci. Každý z válců má velikost zdvihu 90mm a vrtání 75mm. Jeho výkon dosahuje při 6600 otáčkách 92 Kw a kroutící moment činí 141 Nm při 5200 otáčkách za minutu. Pohonná jednotka má kompresní poměr 9,2:1 a palivo mu dodává programovatelné vstřikování PGM-FI. [44]



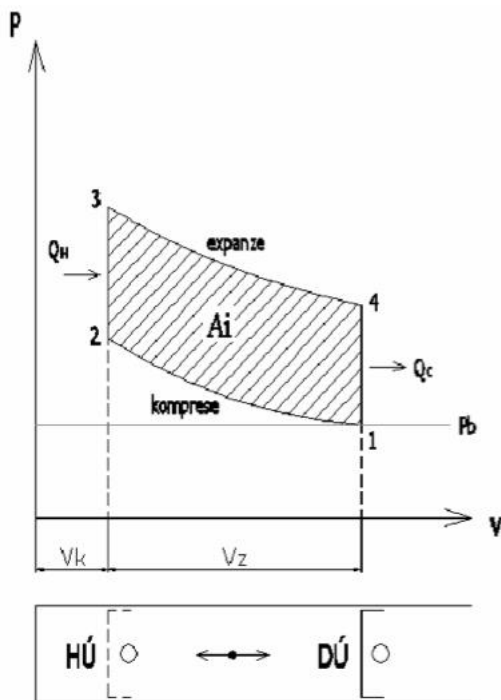
Obrázek. 32: Kompletní motor Honda D16Z6

2.2 VÝPOČET TLAKŮ VE VÁLCI MOTORU D16Z6

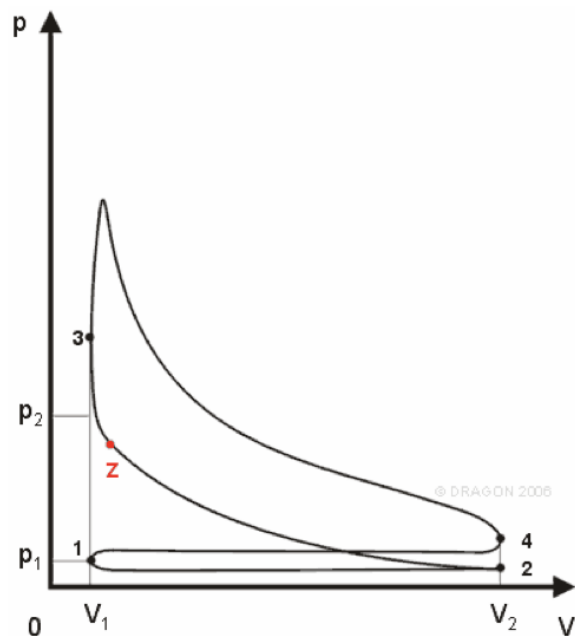
V této kapitole určíme maximální spalovací tlak ve válci motoru pomocí Ottova p-V diagramu. Je důležité myslet na to, že výpočtové tlaky se počítají za předpokladu ideálního průběhu Ottova cyklu.

2.2.1 OTTŮV CYKLUS

Určení ideálního a reálného indikátorového diagramu Otova cyklu:



Obrázek. 33.1: Ideální p-V diagram



Obrázek. 33.2: Reálný p-V diagram

2.2.2 URČENÍ KOMPRESNÍHO TLAKU VE VÁLCI

V této kapitole bylo čerpáno ze zdroje [42]

Určení zdvihového objemu:

$$V_z = \frac{\pi \times D^2}{4} \times L \quad (8)$$

Kde: V_z je zdvihový objem [m^3]
 D je vrtání válce [m]
 L je zdvih válce [m]

$$V_z = \frac{\pi \times 0,075^2}{4} \times 0,09 = 3,976 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Určení kompresního objemu:

$$\varepsilon_z = \frac{V_z + V_k}{V_k} \quad (9)$$

Kde: ε_z je kompresní poměr
 V_z je zdvihový objem [m^3]
 V_k je kompresní objem [m^3]

$$V_k = \frac{V_z}{\varepsilon_z - 1} = \frac{3,976 \times 10^{-4}}{9,2 - 1} = 4,84878 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Určení kompresního tlaku ve válci:

Z ideálního p-V diagramu Ottova cyklu vyplývá, že mezi stavem 1 a stavem 2 probíhá adiabatický děj, který lze určit následujícím vzorcem:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa \Rightarrow p_1 \times V_1^\kappa = p_2 \times V_2^\kappa \quad (10)$$

Zadané hodnoty: Poissonova konstanta $\kappa = 1,4$
 Barometrický tlak $p_b = p_1 = 101325 \text{ Pa}$

Celkový objem:

$$V_1 = V_z + V_k \quad (11)$$

$$V_1 = 3,976 \times 10^{-4} + 4,84878 \times 10^{-5} = 4,4244878 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Kompresní objem:

$$V_2 = V_k \quad (12)$$

$$V_2 = 4,84878 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Ze vztahu číslo (10) určíme vztah:

$$p_2 = \frac{p_1 \times V_1^\kappa}{V_2^\kappa} \quad (13)$$

$$p_2 = \frac{101325 \times (4,4244878 \times 10^{-4})^{1,4}}{(4,84878 \times 10^{-5})^{1,4}} = 2238923,958 \text{ Pa} = 2,238923958 \text{ MPa}$$

2.2.3 URČENÍ SPALOVACÍHO TLAKU VE VÁLCI

Z ideálního p-V diagramu Ottova cyklu vyplývá, že mezi stavem 2 a stavem 3 probíhá izochorický přívod tepla. Pro určení maximálního spalovacího tlaku je potřeba znát přivedené teplo mezi stavy 2 a 3 při jednom cyklu:

$$Q = m_{pa} \times H_u \quad (14)$$

Kde: Q je přivedené teplo [J]
 m_{pa} je hmotnost paliva [kg]
 H_u spodní výhřevnost paliva [J/kg]

Hmotnost vzduchu (její hodnotu určíme ze stavové rovnice):

$$m_v = \frac{p_1 \times V_1}{r \times T_1} \quad (15)$$

Zadané hodnoty: měrná plynová konstanta pro vzduch $r = 287 \text{ J/kg} \times K$
 teplota nasávaného vzduchu $T_1 = 293,15 \text{ K}$

$$m_v = \frac{101325 \times 4,4244878 \times 10^{-4}}{287 \times 293,15} = 0,53285 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Dále určíme potřebné množství paliva při dodržení stechiometrického poměru vzduch/palivo 14,7:1. Předpokládáme, že spalovací proces pracuje při součiniteli přebytku vzduchu $\lambda = 1$

$$m_{pa} = \frac{m_v \times \frac{1}{14,7}}{\lambda} \quad (16)$$

$$m_{pa} = \frac{0,53285 \times 10^{-3} \times \frac{1}{14,7}}{1} = 4,027589 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

Kde: m_{pa} je hmotnost paliva [kg]
 m_v je hmotnost vzduchu [kg]
 λ součinitel přebytku vzduchu [-]

Pro určení celkového přivedeného tepla Q dosadíme spodní výhřevnost paliva H_u (pro benzín má hodnotu 43,2MJ/kg) a hmotnost paliva m_{pa} do rovnice:

$$Q = m_{pa} \times H_u \quad (17)$$

$$Q = 4,027589 \times 10^{-5} \times 43,2 \times 10^6 = 1739,918 J$$

Předpokládáme, že z celkového přivedeného tepla Q využije zážehový motor asi 32% tepla. Znaménková konvence nám značí, zdali se jedná o teplo přivedené nebo odvedené:

$$Q_{23} = -Q \times 0,32 \quad (18)$$

$$Q_{23} = -1739,918 \times 0,32 = -556,77376 J$$

Výpočet spalovacího tlaku ve válci:

$$p_3 = p_2 - \frac{Q_{23}}{V_k} \times (\kappa - 1) \quad (19)$$

$$p_3 = 2,238923958 + \frac{556,77376}{4,84878 \times 10^{-5}} \times (1,4 - 1) = 6982343 Pa = 6,982343 Mpa$$

2.2.4 URČENÍ POTŘEBNÉ HMOTNOSTI PALIVA PRO MAXIMÁLNÍ DOVOLENÝ SPALOVACÍ TLAK

Z předchozí kapitoly můžeme odvodit, že čím vyšší bude přivedené teplo, tím vyšší bude spalovací tlak. Pro zvýšení přivedeného tepla je při stejné výhřevnosti paliva nutné zvýšit hmotnost paliva. Maximální dovolený spalovací tlak $P_{3,max}$ ve válci jsme po konzultaci s Ing. Martinem Beranem zvolili 9,5MPa. Tato hodnota je zvolena z důvodu dobrého konstrukčního řešení chlazení motoru Honda D16Z6 a za předpokladu jeho dobré kondice. Takové zvýšení spalovacího tlaku (spalovacích teplot) je z mé vlastní zkušenosti motor schopný zvládnout za předpokladu dobrého technického stavu motoru.

Nejdříve vypočítáme potřebné přivedené teplo pro maximální spalovací tlak:

$$Q_{max} = \frac{V_k \times (P_2 - P_{3,max})}{\kappa - 1} \quad (20)$$

$$Q_{max} = \frac{4,84878 \times 10^{-5} \times (2,238923958 - 9,5)}{1,4 - 1} = -880,18 J$$

Ze vztahu (18) víme, že vypočítané teplo potřebné k vytvoření maximálního spalovacího tlaku je pouhých 32% z celkového přivedeného tepla. Musíme ale pro výpočet skutečné potřebné hmotnosti paliva znát 100% dodávaného tepla:

$$Q_{max,celkové} = Q_{max} \times \frac{100}{32} = -2750 \times \frac{100}{32} = -2750,5625 \text{ J} \quad (21)$$

Potřebná hmotnost paliva pro zvýšení spalovacího tlaku na maximální dovolený spalovací tlak je:

$$m_{pal,max} = \frac{Q_{max,celkové}}{H_u} \quad (22)$$

$$m_{pal,max} = \frac{2750,5625}{43,2 \times 10^6} = 6,367 \times 10^{-5} \text{ kg}$$

Palivo dáme do poměru s původním potřebným palivem. Potřebujeme zjistit o kolik procent se nám zvýší hmotnost potřebného paliva pro dosažení maximálního spalovacího tlaku, a tudíž musíme o tolik procent navýšit dodávaný kyslík.

$$\frac{m_{pal,max}}{m_{pa}} = \frac{6,367 \times 10^{-5}}{4,027589 \times 10^{-5}} = 1,58 \quad (23)$$

Musíme dodat o 58% více paliva, tudíž i kyslíku.

2.3 VÝPOČET POTŘEBNÉ HMOTNOSTI OXIDU DUSNÉHO

V této fázi výpočtu budeme výsledné hodnoty brát pouze jako orientační. Vycházíme z předpokladu, že pokud se nám zvýší potřebné palivo k dosažení maximálního dovoleného spalovacího tlaku o 58%, musíme dodat i o 58% kyslíku více. Toho můžeme docílit vstříkáním oxidu dusného. Je nutno dodat, že zanedbáváme snížení teploty nasávaného vzduchu po vstříknutí oxidu dusného (změna teploty je zapříčiněna přeměnou z kapalného skupenství na plynné skupenství). Dále předpokládáme, že tlak P_1 , tedy tlak nasávaného vzduchu bude atmosférický a celkový objem nasávaného vzduchu/oxidu dusného se nemění. Výpočet je vztahován na 1kg paliva při směšovacím poměru vzduch/palivo 14,7:1.

Nejdříve určíme, kolik kg kyslíku je potřeba dodat pro spálení 1kg paliva při součiniteli přebytku vzduchu $\lambda = 1$ (obsah kyslíku ve vzduchu je 23%).

$$O_2 = 0,23 \times 14,7 = 3,381 \text{ kg} \quad (24)$$

Dále víme, že potřebujeme dodat o 58% kyslíku více:

$$O_{2,max} = 1,58 \times 3,381 = 5,34531 \text{ kg} \quad (25)$$

Ze dvou rovnic o dvou neznámých jsme schopni dopočítat kolik kg vzduchu a oxidu dusného bude potřeba k navýšení kyslíku o 58%:

$$0,23x + 0,36y = 5,34531 \quad (26)$$

$$x + y = 14,7 \quad (27)$$

$$x = 14,7 - y$$

Kde: x je hmotnost kyslíku [kg]
 y je hmotnost oxidu dusného [kg]

$$0,23 \times (14,7 - y) + 0,36y = 5,34531$$

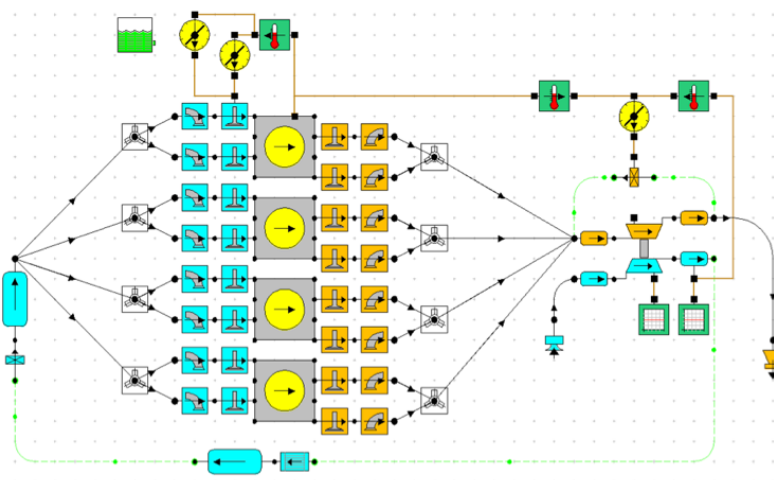
$$3,381 - 0,23y + 0,36y = 5,34531$$

$$0,13y = 1,96431$$

$$y = 13,26 \text{ kg oxidu dusného}$$

$$x = 0,74 \text{ kg vzduchu}$$

Výsledkem je, že musíme dodat 0,74 kg vzduchu a 13,26 kg oxidu dusného pro úplné spálení 1kg paliva a navýšení spalovacího tlaku na maximální dovolený. Je zřejmé, že je zapotřebí opravdu velkého množství okysličovačla, nesmíme ale zapomenout, že výsledek je ovlivněn zanedbáním snížení teploty vlivem vstříkovaní oxidu dusného. Pro určení přesnějších hodnot je opravdu nutné pracovat s reálnými indikovanými hodnotami, které jsme schopni změřit na válcové brzdě. Druhou možností, jak dosáhnout přesnějších výsledků, je sestavení kompletního matematického modulu v programu Lotus, kde jsme schopní vyčíslit spalovací tlaky, spalovací teploty a jiné důležité hodnoty pro přesný výpočet.



Obrázek. 34: Schéma čtyřválcového motoru v programu Lotus

ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byla provedena komplexní rešerše, která se zabývala problematikou použití oxidu dusného (N₂O) s cílem zvýšit výkonové parametry zážehového motoru. Hlavním cílem práce bylo zhodnotit dostupné rešerše v oblasti využití oxidu dusného pro zážehové motory a provést důkladný rozbor pro tuto konkrétní aplikaci.

Během rešerše byly pečlivě zkoumány a analyzovány klíčové pojmy, jako je stechiometrie, plnicí účinnost a vliv paliv-oxidu dusného na zvýšení spalovacích tlaků a teplot, včetně jejich dopadu na detonační hoření. Byla studována široká škála relevantních studií a experimentů zaměřených na využití oxidu dusného pro zážehové motory. Cílem bylo získat hlubší porozumění přínosů a omezení této technologie.

Výsledkem rešerše je zjištění, že použití oxidu dusného pro zážehové motory může přinést několik výhod. Mezi tyto výhody patří zvýšení výkonu, optimalizace spalování. Použití oxidu dusného může přispět k efektivnějšímu spalování paliva. Nicméně, je třeba zohlednit také určité nevýhody a limitující faktory. Mezi ně patří možný negativní vliv na životnost motoru, náročnost na dodávku oxidu dusného a potřeba správného řízení směsi paliva a oxidu dusného.

Na základě stanovených parametrů byl proveden základní návrhový výpočet pro použití systému vstřikování oxidu dusného pro zvolený motor. Tento výpočet zahrnoval optimalizaci dávkování oxidu dusného s cílem dosáhnout požadovaných spalovacích tlaků a minimalizovat potenciální negativní vlivy.

Výsledky této bakalářské práce poskytují ucelený přehled o problematice použití oxidu dusného pro zážehové motory a nabízejí základní návrhový výpočet pro implementaci tohoto systému.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav, Jindřich KUBÁT, Jan a KRENSTETTER. *Automobily*. 4. vydání. Brno: AVID, spol. s r.o., 2022. ISBN 978-80-87143-48-3.
- [2] RAO, G. Amba Prasad a T. Karthikeya SHARMA. *Engine emission control technologies: design modifications and pollution mitigation techniques*. Burlington ON: Apple Academic Press, [2020]. ISBN 978-1-77188-835-6.
- [3] POUCHA, Vít. VÝMĚNA OBSAHU VÁLCE DVOUDOBÉHO MOTORU [online]. Liberec, 2008 [cit.2023-05-01]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/148406/V_02408_S.pdf?sequence=-1. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Lubomír Moc, CSc.
- [4] HŮNOVÁ, Iva a Svatava JANOUŠKOVÁ. Úvod do problematiky znečištění venkovního ovzduší. Praha: Karolinum, 2004. ISBN 80-246-0796-4.
- [5] CHOUDHARY, Vivek, Sarwesh SWARNKAR, Ritesh PATEL, Kishan YADAV a Binita CHOUDHARY. A REVIEW ON NITROUS OXIDE ON ENGINE. In: *Electronics and Telecommunication Engineering* [online]. London, 2016 [cit. 2023-05-01]. ISSN 2349-3585. Dostupné z: <https://www.ijrdt.org/upload/486653A%20REVIEW%20ON%20NITROUS%20OXIDE%20ON%20ENGINE.pdf>
- [6] VOHLÍDAL, Jiří a Karel ŠTULÍK. *Chemické a analytické tabulky*. Praha: Grada, 1999. ISBN 80-716-9855-5.
- [7] Nitrous oxide. *Britannica* [online]. Chicago: Adam Augustyn, 2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/nitrous-oxide>
- [8] ZAFIROVA, Zdravka, Colin SHEEHAN a Leila HOSSEINIAN. Update on nitrous oxide and its use in anesthesia practice. *Britannica* [online]. Chicago: Adam Augustyn, 2018, (2) [cit. 2023-05-01]. ISSN 15216896. Dostupné z: doi:10.1016/j.bpa.2018.06.003
- [9] GALINSKI, Michel, Laure HOFFMAN, Delphine BREGEAUD, et al. Procedural Sedation and Analgesia in Trauma Patients in an Out-of-Hospital Emergency Setting: A Prospective Multicenter Observational Study. *Prehospital Emergency Care* [online]. 2018, 2018(4), 497-505 [cit. 2023-05-01]. ISSN 1090-3127. Dostupné z: doi:10.1080/10903127.2017.1413464
- [10] QUACH, Darin F., Victoria C. DE LEON a Charles R. CONWAY. Nitrous Oxide: an emerging novel treatment for treatment-resistant depression. *Journal of the Neurological Sciences* [online]. 2022, 2022 [cit. 2023-05-01]. ISSN 0022510X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jns.2021.120092
- [11] Focke-Wulf Ta 152: The Story of the Luftwaffe's Late-War, High-Altitude Fighter. Atglen: SCHIFFER PUBLISHING, 1998. ISBN 9780764308604.
- [12] NITROUS SUPPLY. Nitrous supply [online]. Huntington Beach: Nitrous supply, 2004 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://nitrous-supply.com/about>

- [13] BEHERA ET AL, Baishakhi. NITROUS OXIDE SYSTEM (NOS) IN AUTOMOBILES. Trans stellar: International Journal of Automobile Engineering Research and Development [online]. 2016, 2016, 3-4 [cit. 2023-05-01]. ISSN 2278-9413. IJAuERDDEC20161. Dostupné z: <http://www.tjprc.org/search.php>
- [14] TAMURA, Hiro. NOS in Harley Davidson. Harley Davidson blog [online]. Sagamihara: Hiro Tamura, 2016 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <http://hrdhiro.blogspot.com/2016/10/part-2-nitrous-oxide-system.html>
- [15] KUMAR, Manish. EFFECT OF NITROX OXIDE IN AUTOMOBILE. Ajmer, 2015. Bachelor thesis. Engineering college Ajmer. Vedoucí práce Dr. Devendra Choudhary.
- [16] MCCLURG, Bob. Install and Tune Nitrous Oxide Systems. Grand Avenue: McClurg, 2012. ISBN 978-1-61325-094-5.
- [17] WAGNER, Brian. Massive Explosion And Nitrous Fire. Dragzine [online]. Florida: Wagner, 2018, 2018 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.dragzine.com/news/kaboom-grudge-car-experiences-massive-explosion-and-nitrous-fire/>
- [18] TURNER, J.W.G., R.J. PEARSON, E. DEKKER, B. IOSEFA, K. JOHANSSON a K. AC BERGSTRÖM. Extending the role of alcohols as transport fuels using iso-stoichiometric ternary blends of gasoline, ethanol and methanol. Applied Energy [online]. 2013, 102, 72-86 [cit. 2023-05-13]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.07.044
- [19] BÖGNER, W., M. KRÄMER, B. KRUTZSCH, et al. Removal of nitrogen oxides from the exhaust of a lean-tune gasoline engine. Applied Catalysis B: Environmental [online]. 1995, 7(1-2), 153-171 [cit. 2023-05-13]. ISSN 09263373. Dostupné z: doi:10.1016/0926-3373(95)00035-6
- [20] GRANNELL, Shawn M., Dennis N. ASSANIS, Stanislav V. BOHAC, et al. The Fuel Mix Limits and Efficiency of a Stoichiometric, Ammonia, and Gasoline Dual Fueled Spark Ignition Engine. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power [online]. 2008, 130(4), 153-171 [cit. 2023-05-13]. ISSN 0742-4795. Dostupné z: doi:10.1115/1.2898837
- [21] HOFMANN, K. Alternativní pohony. Studijní opory dopravního a automobilního inženýrství. 73 s. [online]. [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <http://www.iae.fme.vutbr.cz/userfiles/ramik/files/Alternativni%20pohony.pdf>
- [22] STECKELBERG, Danilo Brito. DEVELOPMENT OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUEL MAP MODEL BASED ON ON-BOARD ACQUISITION [online]. São Paulo, 2016 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312577762_Development_of_an_internal_combustion_engine_fuel_map_model_based_on_on-board_acquisition. Disertace. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING – POLYTECHNIC SCHOOL CONCENTRATION AREA OF THERMAL AND FLUIDS ENGINEERING. Vedoucí práce Antônio Luiz Pacífico.

- [23] CASISI, Melchiorre, Piero PINAMONTI a Mauro REINI. Increasing the Energy Efficiency of an Internal Combustion Engine for Ship Propulsion with Bottom ORCs. *Applied Sciences* [online]. 2020, **10**(19) [cit. 2023-02-08]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10196919
- [24] HEYWOOD, John. *Internal Combustion Engine Fundamentals 2E*. 1. McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 1260116107.
- [25] HOGLE, Wiliam. *Internal Combustion Engines: a Reference Book for Designers, Operators, Engineers, and Students*. 1. Legare Street Press, 2021.
- [26] LATARCHE, Malcolm. Theory and general principles. In: *Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines* [online]. Elsevier, 2021, 2021, s. 13-58 [cit. 2023-02-01]. ISBN 9780081027486. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102748-6.00002-5
- [27] SEIFI, Mohammad Reza, Seyed Reza HASSAN-BEYGI, Barat GHOBADIAN, Umberto DESIDERI a Marco ANTONELLI. Experimental investigation of a diesel engine power, torque and noise emission using water–diesel emulsions. *Fuel* [online]. 2016, **166**, 392-399 [cit. 2023-02-01]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2015.10.122
- [28] VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*. Brno: Vlk, 2001. ISBN 80-238-6573-0.
- [29] VONG, Chi-Man, Pak-Kin WONG a Yi-Ping LI. Prediction of automotive engine power and torque using least squares support vector machines and Bayesian inference. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* [online]. 2006, **19**(3), 277-287 [cit. 2023-02-01]. ISSN 09521976. Dostupné z: doi:10.1016/j.engappai.2005.09.001
- [30] XIN, Qianfan. *Diesel engine system design*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-715-0.
- [31] English. (2015). International Academy of Engineers (IA-E) March 14-15, 2015 Dubai (UAE). <https://doi.org/10.15242/IAE.IAE0315201>
- [32] Honda Civic D16Z6 engine. Kar King [online]. Ontario: Kar King, 2021 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://karking.com/listing/rebuilt-92-95-honda-civic-1-6l-4cyl-vtec-sohc-d16z6-engine/>
- [33] Gscheidle, R. a kol. (2001): *Příručka pro automechanika*. SOBOTÁLES, Praha, 629 str., ISBN: 80-85920-76-X.
- [34] CROMER, Orville a Charles PROCTOR. Development of gasoline engines. *Britannica* [online]. Chicago: The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2022, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/gasoline-engine>
- [35] CODR, Milan; TŮMA, Jan. *Přemožitelé času sv. 16*. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1989. Kapitola Nicolaus August Otto, s. 75–79.
- [36] MACKERLE, J.: *Motory závodních automobilů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 196 s.

- [37] VRBICKÝ, Jiří. *Název: paliva pro spalovací motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 36 s. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [38] MOORE, Harold. *Liquid Fuels for Internal Combustion Engines*. Londýn: LEGARE STREET PR, 2022. ISBN 101814627X.
- [39] STONE, Richard. *Introduction to internal combustion engines*. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, c2012. ISBN 978-0-230-57663-6.
- [40] BLAŽEN, Josef. *Měření a analýza spalovacích tlaků*. Liberec, 2012. Dostupné také z: http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1681/In-TECH2_mereni_tlaku.pdf
- [41] KOŠTÁL, Jan a Bohuslav SUK. *Pístové spalovací motory*. 1. Praha: Československá akademie věd, 1968.
- [42] KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. první vydání. Praha : SNTL, 1978. 368 s
- [43] Nitrous Oxide & How It Works: *Webové stránky* [online]. 2008 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: http://www.therangerstation.com/tech_library/Nitrous.html
- [44] Honda Motor Co.,Ltd.: *Civic 1992-1995 service manual. USDAM specification*. First Edition 9/91. Honda of America, 1991. 1314 s.
- [45] Holley performance product: *Webové stránky* [online]. 2017 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: https://www.holley.com/products/nitrous/efi_systems/parts/05115NOS
- [46] GISH, Ashley. *Top Fuel Dragsters*. Californie: Creative CO, 2018. ISBN 9781640262867.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ε	[-]	Kompresní poměr
π	[-]	Ludolfovo číslo
κ	[-]	Poissonova konstanta
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
η_{pl}	[-]	Plnicí (objemová) účinnost
ρ_{pl}	[kg.m ⁻³]	Hustota plnicího vzduchu
C_7H_{16}	[-]	Heptan
C_8H_{18}	[-]	Izooktan
D	[m]	Vrtání válce
H_u	[J/kg]	Spodní výhřevnost paliva
L	[m]	Zdvih válce
L_t	[kg]	Teoretická spotřeba vzduchu ke spálení 1kg paliva
M_c	[m]	Molární hmotnost uhlíku
M_H	[m]	Molární hmotnost vodíku
M_{O_2}	[m]	Molární hmotnost kyslíku
m_{pal}	[kg]	Hmotnost paliva
$M_{pal,max}$	[kg]	Hmotnost paliva pro maximální dovolený spalovací tlak
M_S	[m]	Molární hmotnost síry
m_v	[kg]	Hmotnost vzduchu
m_z	[kg]	Hmotnost čerstvé náplně
N_2O	[-]	Oxid dusný
OČ	[-]	Oktanové číslo
O_t	[kg]	Teoretická spotřeba kyslíku ke spálení 1kg paliva
p_1	[Pa]	Tlak nasávaného vzduchu
p_2	[Pa]	Kompresní tlak
p_3	[Pa]	Spalovací tlak
$p_{3,max}$	[kg]	Maximální dovolený spalovací tlak
p_b	[Pa]	Atmosférický tlak
Q	[J]	Přivedené teplo
Q_{23}	[J]	Potřebné teplo k vykonání tepelné energie
$Q_{max,celkove}$	[J]	Teplo potřebné pro vytvoření maximálního spalovacího tlaku
V_k	[m ³]	Kompresní objem válce

V_k	[m ³]	Kompresní objem válce
V_z	[m ³]	Zdvihový objem válce
x	[kg]	Hmotnost vzduchu pro spálení 1kg paliva při použití oxidu dusného
y	[kg]	Hmotnost oxidu dusného pro spálení 1kg paliva při použití oxidu dusného

