



EMISNÍ LIMITY PRO MOBILNÍ A STACIONÁRNÍ SPALOVACÍ MOTORY

Diplomová práce

Studijní program N 2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Jakub Mimra**
Vedoucí práce doc. Ing. Lubomír Moc, CSc.



Místo pro vložení originálního zadání DP

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Anotace

Diplomová práce se zabývá vznikem jednotlivých emisí spalovacích motorů. Řeší také závislost koncentrací jednotlivých složek výfukových plynů na parametrech motoru, a to jak konstrukčních, tak provozních. Pozornost je věnována emisním limitům. Tomuto tématu se práce věnuje podrobně, jelikož popisuje emisní limity pro vozidlové motory (normy EURO), nevozidlové motory (norma ISO 8178) a motory stacionární (regulované vyhláškami). Práce pojednává o vývoji emisních limitů v průběhu let. Rozsáhlá část je věnována vývoji příslušenství motoru (vstřikovací systémy, vstřikovače,...). Práce zmiňuje i principy, na kterých fungují analyzátory výfukových plynů. Konec práce je věnován měření na spalovacím motoru. Cílem je porovnání výsledků naměřených klasickými analyzátory s výsledky získanými spektrometrem.

Klíčová slova: emisní limity, emise, stacionární motor, analyzátor, spektrometr

Annotation

The thesis deals with the formation of particular emissions of combustion engines. It occupies with dependence of exhaust fumes emissions on construction and operating parameters. Attention is paid to emission limits. A lot of attention is paid to this issue, because it describes emission limits for vehicle engines (Norm EURO), non-road vehicle engines (Norm ISO 8178) and stationary engines (regulated by ordinances). This thesis applies to the evolution of emission limits in time. A large part of the thesis is focused on engine equipment evolution (injection systems, injectors,...). This study mentions principles of exhaust fumes analysators. End of this study is focused to experiment on combustion engine. The main aim of this study is to compare the results from classic analyser to results from spectrometer.

Keywords: emission limits, emissions, stationary engine, analyser, spectrometer

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak doc. Ing. Lubomíru Moci, CSc. a konzultantu doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za jejich odborné vedení, konzultování diplomové práce a za cenné rady, které mi poskytovali po celou dobu mého studia. Velmi vděčný jsem také svým rodičům a blízkým za morální a mentální podporu, které se mi dostávalo.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Mobilní a stacionární motory	10
2.1 Kogenerační jednotky	10
2.1.1 Princip kogenerace	10
2.1.2 Konstrukční provedení kogeneračních jednotek	11
2.2 Stacionární motory pro výrobu elektrické energie.....	13
2.3 Stacionární motory jako pohony čerpadel a kompresorů.....	13
3. Spalování uhlovodíkových paliv v pístových spalovacích motorech	14
3.1 Složky výfukových plynů.....	14
3.2 Alternativní paliva mobilních a stacionárních motorů a jejich emise	18
4. Závislost emisí vznětových motorů na technických a provozních parametrech .	21
4.1 Závislost na otáčkách motoru	21
4.2 Závislost na teplotě a tlaku nasávaného vzduchu	21
4.3 Závislost na časování vstřiku paliva	21
4.4 Závislost na kvalitě paliva	22
4.5 Závislost na konstrukci motoru	24
4.6 Vliv velikosti kompresního poměru	25
4.7 Závislost na časování ventilů.....	25
4.8 Závislost na víření směsi ve válci	26
4.9 Závislost na provedení vstřikování a vstřikovačů	26
5. Závislost emisí zážehových motorů na technických a provozních parametrech	28
5.1 Závislost na poměru vzduchu a paliva.....	28
5.2 Vliv časování zážehu.....	29
5.3 Závislost na teplotě směsi	29
5.4 Teplota chladicí kapaliny potažmo teplota motoru.....	30
5.5 Vliv otáček motoru.....	30

5.6	Význam časování sacích ventilů.....	31
5.7	Vliv naplnění válce.....	31
5.8	Zpětný tlak výfukových plynů.....	31
5.9	Usazeniny ve spalovacím prostoru.....	31
5.10	Tvar spalovací komory	31
5.11	Palivový systém	32
6.	Závislost emisí plynových motorů na technických a provozních parametrech ...	33
6.1	Vliv tvaru spalovacího prostoru a víření ve válci.....	33
6.2	Časování vstřiku a zážehu	34
6.3	Vliv velikosti kompresního poměru	34
6.4	Závislost na nasávaném vzduchu.....	35
6.5	Vliv bohatosti směsi.....	36
6.6	Vliv otáček	36
7.	Emisní limity spalovacích motorů	37
8.	Limity stacionárních zdrojů.....	38
8.1	Jednorázové měření stacionárních motorů	38
8.2	Kontinuální měření stacionárních zdrojů	39
8.3	Sazby poplatků a koeficienty úrovně emisí stacionárních zdrojů.....	41
8.4	Vývoj emisních limitů stacionárních zdrojů	42
9.	Emisní limity nesilničních motorů	47
9.1	Současné limity pro nesilniční motory dle NORMY ISO 8178	47
9.2	Vývoj emisních limitů nesilničních motorů	51
10.	Emisní limity automobilových motorů.....	52
10.1	Vývoj emisních limitů v Evropě.....	53
11.	Hlavní konstrukční změny a jejich dopad na emise	56
11.1	Inovace palivových systémů vznětových motorů.....	56
11.2	Inovace palivových systémů zážehových motorů.....	59

11.3	Vývoj systému recirkulace výfukových plynů.....	60
11.4	Vývoj katalyzátorů	61
11.5	Konstrukční úpravy vstřikovačů vznětových motorů.....	62
12.	Přístroje na měření emisí.....	63
12.1	Infračervený spektrometr.....	63
12.2	Analyzátor založený na principu chemické luminiscence - CLA.....	64
12.3	Plamenoionizační analyzátor - FID.....	64
12.4	Infračervený analyzátor – NDIR	65
12.5	Paramagnetický analyzátor	65
12.6	Elektrochemické analyzátory.....	66
12.7	Nejistoty měření analyzátorů	67
13.	Měření emisí spalovacího motoru a porovnání měřicích zařízení.....	68
14.	Závěr	77
	Seznam obrázků.....	78
	Seznam tabulek.....	80
	Zdroje	83

1. Úvod

V současné době prudce narůstá počet osobních automobilů, ale i motorů spalujících uhlovodíková paliva, čímž dochází k nárůstu vyprodukovaných emisí. Vzhledem k tomu, že emise produkované spalováním těchto paliv mají nepříznivé účinky na lidský organismus i na životní prostředí, je nutností tyto emise snižovat. Pro automobily platí v České republice emisní norma EURO, pro nevozidlové aplikace norma ISO 8178 a pro stacionární motory potom vyhláška č. 415/2012 zákona o ochraně ovzduší. Reakcí konstruktérů a výrobců spalovacích motorů je snižování emisí několika způsoby. Asi nejvýraznější vliv na snížení emisí mají katalyzátory.

V současné době je výrazně zvyšováno množství stacionárních motorů jako pohonů generátorů elektrické energie a kogeneračních jednotek. Tyto jednotky pracují s vyšší účinností než automobilové spalovací motory. Uvedená skutečnost je dána tím, že je využíváno i teplo, které je odváděno olejem. Účinnost takových jednotek se pohybuje okolo 90%. Navíc většina stacionárních motorů pracuje s konstantními otáčkami, čímž se dají koncentrace emisí těchto motorů snížit na minimum. Vysoká účinnost a využití kogeneračních jednotek je uplatňováno hlavně ve větších budovách, které mají nárok na současný odběr elektřiny a tepla. Spalovací motory kogeneračních jednotek pracují převážně s plynými palivy (zemní plyn).

Úvodní část této práce se zabývá vznikem emisí, úpravou spalin, vyhláškami a zákony, které regulují jejich maximální množství vypouštěné do ovzduší a popisují metodiku jejich měření. Je zde rozebrán i vývoj emisních limitů v průběhu let. Další část je věnována vývoji příslušenství motorů, které také snižují koncentrace škodlivých látek ve výfukových plynech. Následující část vysvětluje principy analyzátorů a emise, které se dají jednotlivými analyzátoři měřit.

Přínos této práce spočívá v porovnání naměřených hodnot analyzátorů klasických s hodnotami získanými pomocí spektrometru, jež je zmíněn v poslední části. Pro toto porovnání byl využit spalovací motor, na kterém bude pro názornost uveden příklad porovnání měření těmito přístroji.

2. Mobilní a stacionární motory

Mobilní spalovací motory jsou tepelné stroje, které se využívají hlavně v automobilové dopravě (automobily, autobusy, nákladní vozy, atd.). Mezi mobilní spalovací motory však patří všechny jednotky, které jsou pohyblivé nebo přenosné a mají v sobě zabudovaný spalovací motor [1].

Stacionární motory jsou stroje, které se při vlastní činnosti nepohybují. Jsou používány hlavně jako kogenerační jednotky nebo zařízení na výrobu elektrické energie. Dále mohou být použity také jako pohony pro kompresory a čerpadla. Tento druh motorů je v současné době provozován hlavně na plynná paliva (zemní plyn, bioplyn, LPG, eventuálně na směsi plyných paliv), v menší míře také na naftu, bionaftu a další.

2.1 Kogenerační jednotky

Jsou používány pro výrobu tepla a elektřiny v trvalém provozu. Při používání motorů s vyšším výkonem je do soustavy zabudován dvoustupňový mezichladič. Cirkulace vody a teplotní regulace bývá řešena mimo motor. Motory mohou využívat řídicí systém a další volitelné příslušenství (zapalování, regulace otáček, regulace poměru vzduchu a paliva).

2.1.1 Princip kogenerace

Kogenerace je společná výroba tepla a elektřiny za využití až 95 % tepelné energie paliva (velmi obtížně dosažitelné, běžně kolem 80-85 %), čímž se výrazně snižují náklady na palivo [2]. Oproti klasickým elektrárnám, ve kterých je teplo vzniklé při výrobě elektrické energie vypouštěno do okolí, využívá kogenerační jednotka teplo k vytápění. Spalovací motor, jako tepelný stroj, je vhodný k teplotnímu použití. Ve spalovacích motorech je odpadní teplo odebíráno z chlazení oleje (olejový okruh je chlazen vodním okruhem, z něhož je teplo odváděno topnou vodou) [3]. Kogenerační jednotky lze využít u provozovatelů, kde je nárok na současný odběr elektřiny a tepla. Příkladem takového objektu může být škola či zdravotnické zařízení. Teplo vyrobené při kogeneraci se spotřebuje přímo v objektu a elektrická energie se buď spotřebuje, nebo odvede do rozvodné sítě [4]. Velké kogenerační jednotky (výkony 1-10 MW) jsou používány i v teplárnách a centrálních vytápěcích systémech (Jablonec nad Nisou, Desná, Děčín, ...).



1 - spalovací motor, 2 – elektrický generátor, 3 –výměník tepla spaliny/topná voda, 4 –výměník tepla chladicí voda/topná voda

Obrázek 1: Schéma toku energií v kogenerační jednotce [3]

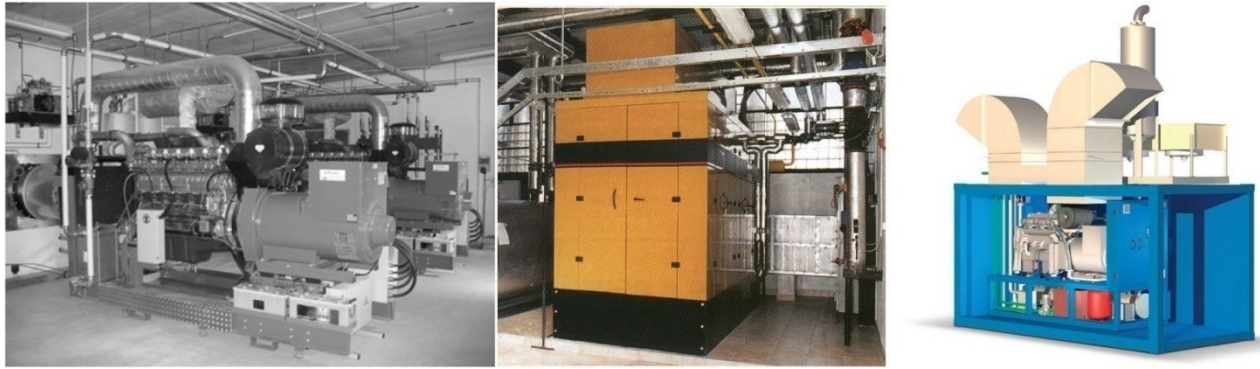
2.1.2 Konstrukční provedení kogeneračních jednotek

Kogenerační jednotky jsou dodávány ve třech konstrukčních provedeních. Tato provedení jsou stavebnicová, modulová nebo kontejnerová.

Pokud se jedná o stavebnicové uspořádání, je provozovateli jednotka dodána rozložená na základní části (motor a generátor na rámu, výměníky, čerpadla, tlumiče hluku výfuku a sání). Instalace jednotky následně závisí na uspořádání prostoru, ve kterém bude pracovat. Propojovací potrubí a elektroinstalace je potom tomuto umístění podřízena. Výhoda stavebnicového uspořádání je ve snazším přístupu pro údržbu a opravy a zároveň v nižších výrobních nákladech. Nevýhodou ovšem je následné odhlučnění pracovního prostoru a další úpravy, které mohou být nákladné. V tomto uspořádání jsou instalovány jednotky převážně vyšších výkonů (více než 1 MW), jelikož mají velké rozměry komplikující přepravu k provozovateli.

Modulové uspořádání je specifické využitím zdroje o jmenovitém výkonu do cca 200 kW. Kogenerační jednotka je dodána jako funkční modul, který obsahuje veškeré komponenty a většinou i protihlukový kryt. Výhodou těchto jednotek je rychlá instalace a případné odhlučnění. Nevýhodou je složitější přístup pro opravy komponentů, jelikož součásti nemají mezi sebou velký rozestup [5].

Kontejnerové uspořádání je určeno k venkovním instalacím mimo obytné či průmyslové budovy. Výhodou je rychlá instalace a odolnost vůči povětrnostním vlivům [6].



Obrázek 2: Uspořádání kogeneračních jednotek
Zleva: stavebnicové, modulové, kontejnerové

V tabulce je zachyceno rozdělení kogeneračních jednotek podle výkonů:

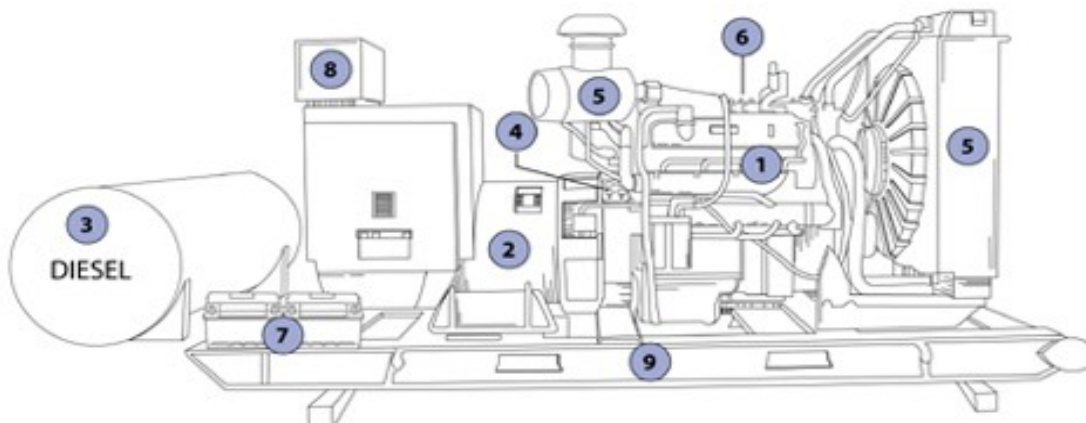
Typ kogeneračního výkonu	Hodnota výkonu jednotky
Mikro-kogenerace	<50 kW
Mini-kogenerace	<500 kW
Kogenerace malého výkonu	<1 MW
Kogenerace středního výkonu	<50 MW
Kogenerace velkého výkonu	>50 MW

Tabulka 1: Rozdělení kogeneračních jednotek podle výkonů

Největším tuzemským výrobcem je společnost TEDOM, která používá k pohonu kogeneračních jednotek vlastní spalovací motory na různá paliva. Výkony kogeneračních jednotek této společnosti jsou v rozmezí od 2 kW do 2 MW [7]. Společnost MOTORGAS je dodavatelem kogeneračních jednotek s motory WAUKESHA a MAN (pro jednotky s nižšími výkony). Tyto jednotky spalují zemní plyn (96 % metanu; výhřevnost 34 MJ/m³), bioplyn (65 % metanu a 35 % oxidu uhličitého; výhřevnost 23 MJ/m³) a skládkový plyn (50 % metanu a 50 % oxidu uhličitého; výhřevnost 18 MJ/m³) [8]. Na českém trhu je několik dalších podniků využívajících pohonné jednotky od hraničních dodavatelů (MOTORGAS PRAHA, MENERGO, GAS KOMPLET) [9], [10].

2.2 Stacionární motory pro výrobu elektrické energie

Elektrická energie je vyráběna pomocí generátoru, který je poháněn mechanickou energií vytvořenou spalováním paliva ve spalovacím motoru. Základem výroby elektřiny v generátoru je otáčivý pohyb rotoru [11]. Tato soustava se nazývá generátorovým ústrojím, které bývá upevněno na společném rámu. U těchto jednotek je vyžadován nepřetržitý provoz, tomu také odpovídá jejich konstrukce.



1 - spalovací motor, 2 - alternátor, 3 - palivový systém, 4 - regulátor napětí, 5 - chladicí a výfukový systém,
6 - mazací systém, 7 - systém akumulátorů, 8 - ovládací panel, 9 - rám

Obrázek 3: Schéma vznětového spalovacího motoru a generátoru elektrické energie [12]

2.3 Stacionární motory jako pohony čerpadel a kompresorů

Pro pohon těchto zařízení slouží stacionární motory jako jednotky s konstantními, ale i proměnnými otáčkami. Motory jsou vybaveny i chlazením výfukového potrubí turbodmychadlem, startérem plynu a elektrickými komponenty [13].

3. Spalování uhlovodíkových paliv v pístových spalovacích motorech

Produktem spalování uhlovodíkového paliva dokonalou oxidací uhlíku a vodíku vzniká CO_2 (oxid uhličitý) a H_2O (voda). Pokud dojde k oxidaci nedokonalé, produktem spalování je CO (oxid uhelnatý) a H_2 (vodík). Při spalování uhlovodíkových paliv za použití kyslíku jako okysličovadla je nejvýznamnější složkou spalin N_2 (dusík). Další složkou výfukových plynů je kyslík (O_2), který se nevyužil na oxidaci paliva, jelikož ho byl přebytek. Při vysokých teplotách spalovacího prostoru vznikají oxidací dusíku ze vzduchu NO_x (oxidy dusíku). Hlavní složkou těchto oxidů je NO (oxid dusnatý) a menší podíl tvoří NO_2 (oxid dusičitý). Při nepříznivých podmínkách oxidace vznikají nespálené uhlovodíky různého složení. Nespálené uhlovodíky se ve výfukových plynech objevují i z důvodu vyplachování obsahu válce, což je způsobeno vnější tvorbou palivové směsi. Při nedostatečném rozprášení palivové směsi se ke středu kapičky paliva nedostane vzduch, čímž následně vznikne pevný uhlík (saze) jako následek dekompozice molekul vodíku. Mimo jiné se ve výfukových plynech objevují i pevné částice, které jsou tvořeny prachem, olejem, popelem, částicemi rzi a podobně. V uhlovodíkových palivech se dále objevuje i minimální množství síry, které při oxidaci vytváří oxidy síry [14].

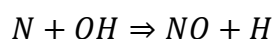
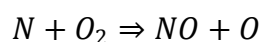
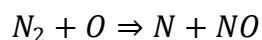
3.1 Složky výfukových plynů

Oxid uhelnatý (CO) – produkt nedokonalého spalování při nedostatku kyslíku, vznikající disociací produktů chemických reakcí při teplotách nad $2000\text{ }^\circ\text{C}$. Dále vzniká při spalování u stěn válce (zhášecí zóny), následkem nedokonalé homogenity směsi.

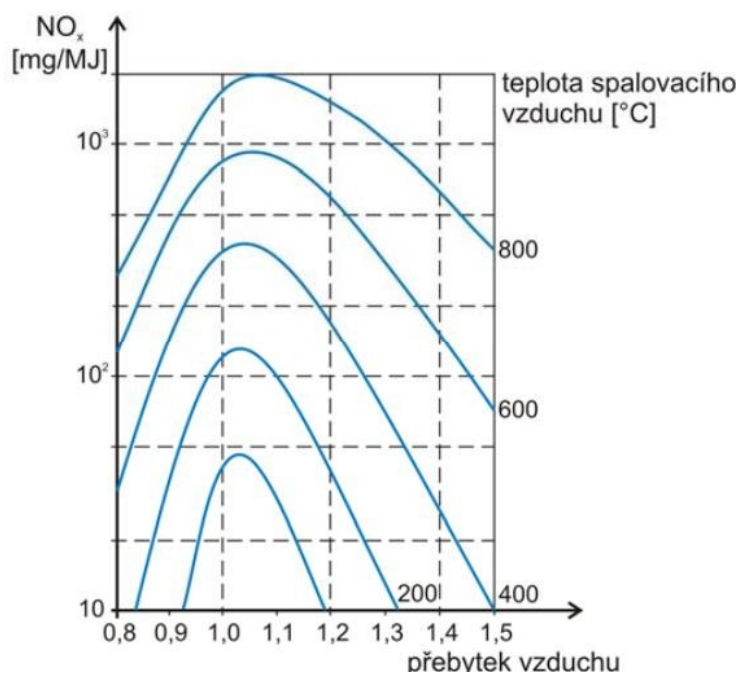
Nespálené uhlovodíky (HC) – vznikají, pokud dojde k předčasnému zastavení oxidačních reakcí v určitých zónách spalovacího prostoru, nebo jako produkt tepelných krakovacích a jiných chemických reakcí, jež byly zakončeny dříve, než proběhl kompletní proces jejich oxidace. Obsah nespálených uhlovodíků závisí hlavně na teplotním režimu motoru, na konstrukci spalovacího prostoru, potažmo konstrukci pístu. Důležitým faktorem podílejícím se na obsahu nespálených uhlovodíků je bohatost směsi. Nejmenší podíl nespálených uhlovodíků je v oblasti

$\lambda=1,2 - 1,3$ (oblast mírně chudé směsi). Další skupinu, živým organismům škodlivých, uhlovodíků tvoří produkty oxidace mazacího oleje, které patří mezi nejtěžší polycyklické aromatické uhlovodíky. Tyto částice jsou dále vázány na pevné částice.

Oxidy dusíku (NO_x) – při spalování vznikají především termickým mechanismem a v daleko menší míře potom způsobem promptním. Termickým způsobem vzniká oxid dusnatý, který popisuje Zeldovičův termický mechanismus:

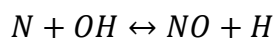
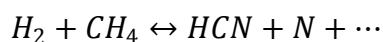


Oxidy dusíku vznikají ve spalovacím procesu při vysokých teplotách (nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$) a tlacích, což je hlavně na začátku oxidace ve frontě plamene [15].

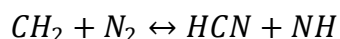


Obrázek 4: Závislost tvorby termického oxidu dusného na teplotě a přebytku vzduchu [16]

Promptní oxid dusnatý vzniká reakcí dusíku (složka vzduchu) s uhlovodíkovými radikály v oblastech plamene bohatých na palivo. Vznik tímto způsobem vypořádal Fenimore. Následující reakce popisují promptní mechanismus vzniku NO:



První z těchto tří rovnic je považována za dominantní, jelikož přibližně 90% z celkového podílu vytvořených promptních NO je výsledkem této reakce. Nejdůležitější radikály reagující s molekulárním dusíkem jsou CH a CH₂ (metylen), jak naznačují následující rovnice:



Promptní mechanismus tvorby NO se často zanedbává z důvodu složitosti reakcí dusíku s palivem za současného propojení s oxidací dusíku. Vzhledem k tomu, že tyto NO vznikají právě v oblastech velmi bohatých na palivo, je jejich podíl malý (často do 10 %). Oxid dusičitý vzniká následnou oxidací oxidu dusnatého [16].

Všechny čtyři předchozí složky výfukových plynů jsou souhrnně označovány jako plynné emise. Koncentrace těchto složek je silně závislá na vlastnostech spalované směsi, zejména na její bohatosti a homogenitě.

Částice PM – jsou částice, které se vyskytují v plynné i kapalně fázi. Do této skupiny patří saze, karbon, popel, oxidy síry, sírany kovů a aerosoly (mikrokapičky nespálených uhlovodíků z paliva a motorového oleje, voda a polotmavá frakce uhlovodíků). Množství pevných částic je závislé na kvalitě paliva, obsahu síry, konstrukčním řešení motoru (spotřeba mazacího oleje) a v neposlední řadě i na technickém stavu motoru. Při vstupu do atmosféry mají tyto částice schopnost vázat se k sobě. Tento jev je způsoben prudkým ochlazením výfukových plynů. Většina škodlivých částic má rozměr 0,3-1 μm, na jejichž povrchu dochází k usazování těžko odpařitelných skupin nespálených uhlovodíků. Ke Snižování emisí pevných částic přispívá konstrukční řešení motoru tak, aby byla minimalizována spotřeba mazacího oleje [15].

Benzen (C₆H₆) – jeho hlavním zdrojem v ovzduší jsou právě spalovací motory motorových vozidel, proto došlo ve většině zemí k omezení jeho podílu v benzínu (na 5 %). V současné době má většina benzinů obsah benzenu pod hranicí 2-3 %. Produkce této organické sloučeniny při spalování je zapříčiněna dvěma způsoby. Prvním typem je nespálený zbytek benzenu v palivu. Druhým způsobem benzen vzniká z nespálených aromatických uhlovodíků. Poměr zastoupení benzenu oproti ostatním aromatickým uhlovodíkům v palivu je asi 1:10. Pokud by došlo k většímu

snížení obsahu benzenu v palivu, došlo by zároveň také ke zhoršení spalovacích vlastností paliva, jelikož bude snížena hodnota oktanového čísla. Tato látka je karcinogenní, proto je důležité, aby její produkce byla co nejvíce omezena.

Mezi další škodliviny obsažené ve výfukových plynech, které nepodléhají přímým kontrolám emisních předpisů, patří sloučeniny olova a agresivní kyseliny.

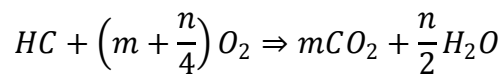
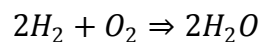
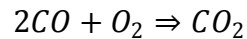
Sloučeniny olova – olovo se dříve přidávalo do benzínu jako antidetonační přísada na zvýšení oktanového čísla v podobě alkylolova. Obsah olova v současném benzínu poklesl z 0,4 - 0,6 g/l na 0,15 g/l. Při spalování se část olovnatých látek oxiduje na oxid olovnatý a část organotvorných sloučenin olova neprojde změnou. Do atmosférického vzduchu se tak dostává 10-80 % z celkového množství olova v palivu. Velikost částic olova se pohybuje od 0,01 μm do 10 μm . Vysoká hmotnost těchto molekul zapříčiňuje ukládání olova v blízkosti silnic a dálnic. Z tohoto důvodu existují takzvaná ochranná pásma podél komunikací, kde se nesmí pěstovat plodiny. Olovo a jeho deriváty působí na člověka jako těžké nervové jedy [17].

Oxid uhličitý (CO_2) - V současné době asi nejdiskutovanější skleníkový plyn, který však není pro automobily regulovaný evropskou emisní normou EURO (1-6). Naproti tomu v některých státech USA je jeho produkce regulována. Oxid uhličitý je produktem dokonalé oxidace a jeho přítomnost je důsledkem kvalitního spalovacího procesu. Tento plyn nemá žádný zápach ani barvu, je stabilní a téměř nereaktivní. Jeho negativní působení na lidský organismus se projevuje až ve chvíli, kdy jeho koncentrace ve vdechovaném vzduchu začne vytěsňovat kyslík. Tento skleníkový plyn způsobuje vznik radiační clony, která omezuje sdílení tepla Země s okolím. Tento jev se nazývá skleníkový efekt a způsobuje zvyšování teploty na naší planetě, čímž dochází i ke změně klimatických poměrů (dochází mimo jiné i k tání ledovců a zvyšování hladiny oceánů) [18].

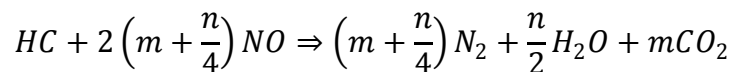
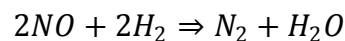
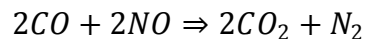
Nositeli energie v palivu jsou uhlík, vodík a síra. Jestliže dojde k dokonalé oxidaci takového paliva, produkty jsou oxid uhličitý, voda a oxid siřičitý (SO_2). Nedojde-li k dokonalé oxidaci paliva, vznikají oxid uhelnatý a vodík. Při spálení 1 kg uhlíku vznikne asi 3,7 kg CO_2 , ať jde o jakékoli palivo. Hlavním parametrem porovnání paliv je jejich výhřevnost, proto se posuzuje i z hlediska vyprodukovaného množství CO_2 na jednotku energie [19].

Oxid uhličitý dále vzniká i následnou reakcí v katalyzátoru, kde se redukuje obsah škodlivých složek výfukových plynů jak pro vozidlové, tak pro stacionární motory. Oxid uhličitý vzniká katalytickými reakcemi hlavně v katalyzátorech třícestných u zážehových motorů a v katalyzátorech oxidačních u vznětových motorů.

Základní rovnice probíhající v oxidačním katalyzátoru:



Následující rovnice popisují chemické reakce probíhající v redukčních katalyzátorech:



Katalyzátor, ve kterém probíhají jak oxidační, tak redukční reakce se nazývá třícestný, jelikož redukuje emise oxidu uhelnatého, oxidů dusíku a uhlovodíků. Pro tento katalyzátor je velmi důležité, aby spalovaná směs ležela v blízkosti $\lambda=1$ [18].

Kyslík (O₂) – kyslík je nejedovatý plyn obsažený ve výfukových plynech, který sám o sobě není produktem spalování, ale ve výfuku se objevuje při spalování chudé směsi (kyslík nemá potřebné množství paliva k oxidaci a je v přebytku) [20].

3.2 Alternativní paliva mobilních a stacionárních motorů a jejich emise

Stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas) – uvolňuje při spalování výrazně méně emisí než benzin. Díky tomuto faktu je celkové snížení emisí produkovaných spalovacími motory na dosah. V České republice ovšem stojí v cestě velmi řídká infrastruktura [21]. Stlačený zemní plyn je oproti LPG lehčí než vzduch, což má

za následek samovolné odvětrání při úniku z nádrže například v podzemních garážích. Stlačený zemní plyn má oktanové číslo 105 a vyznačuje se i stálou kvalitou. Z odpadů a obnovitelných zdrojů lze získat také BioCNG a BioMetan. Nevýhodou je přestavba vozidla, jelikož je nákladnější, než u LPG. Stlačený plyn se používá pouze pro zážehové motory a to i v městských autobusech. Další nevýhodou jsou i vyšší pořizovací náklady na nový vůz při stejném výkonu motoru [22], [24]. Plyn obsahuje přes 90 % metanu, 1-6 % etanu dále také dusík a oxid uhličitý [18]. Uchovávání je zajištěno bezpečnými tlakovými nádobami, které prochází kontrolami na únik plynu a na mechanické poškození (koroze, oděrky, promáčkliny, atd.).



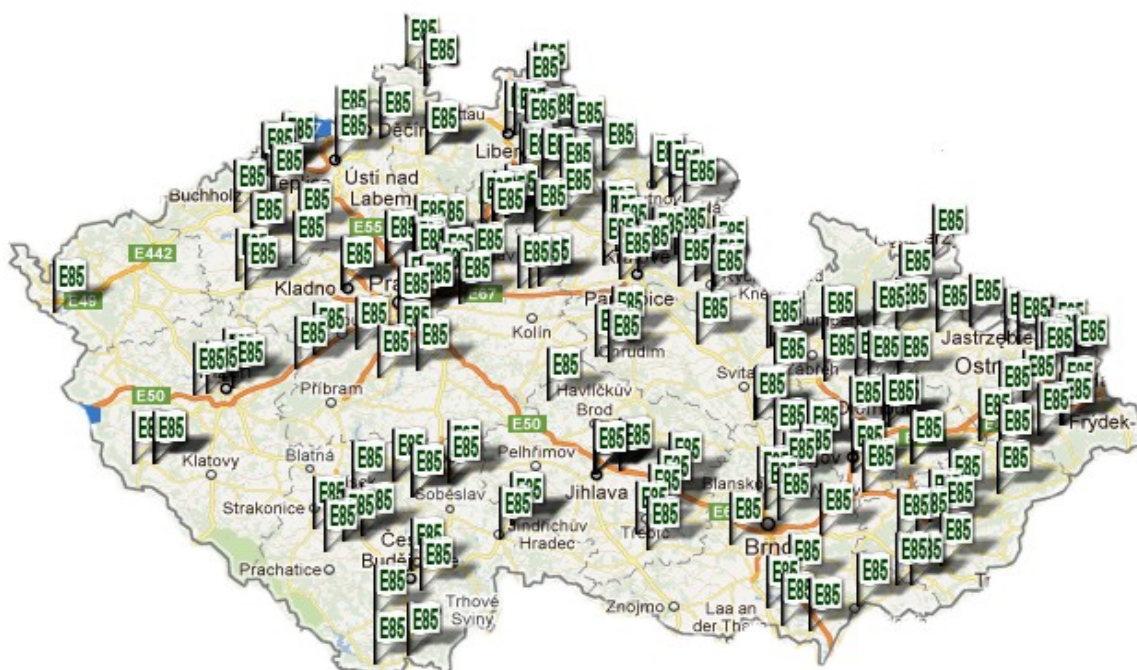
Obrázek 5: Schéma automobilu poháněného palivem CNG [23]

Zkapalněný ropný plyn (LPG) - je vedlejším produktem při těžbě ropy. Způsobuje problémy při úniku do okolí, jelikož je těžší než vzduch, proto bývají u vjezdu do podzemních garáží dopravní značky zakazující vjezd vozidel poháněných právě LPG. Zkapalněný plyn se vyznačuje vyšší litrovou spotřebou, ale nižšími emisemi než konvenční paliva. Výhodou LPG je hustší síť čerpacích stanic než v případě CNG a nižší pořizovací náklady.

Bionafta – je používána jako náhrada za fosilní naftu. Bionafta je palivo rostlinného původu, které je vyrobené z rostlinných olejů. Hlavní oleje pro výrobu bionafty jsou řepkový a slunečnicový (v České republice hlavně z řepky olejné). V případě dopravní nehody má její únik malý vliv na životní prostředí. Při spalování bionafty je snížena kouřivost a emise vznětových motorů. Při porovnání množství

vyprodukovaného množství emisí, vychází bionafta pro životní prostředí příznivěji. Její důležitou vlastností je cetanové číslo, zároveň ale i vyšší energetická náročnost výroby. Samotná bionafta neobsahuje aromatické látky, ale při jejím spalování jsou vyšší emise uhlovodíků. Při výrobě tohoto paliva jsou zmenšovány osevní plochy pro potraviny, protože její výroba je zajištěna právě z rostlinných olejů. Pro používání stoprocentní bionafty ve spalovacím motoru je třeba souhlas výrobce. V současné době je v České republice do standardní nafty přimícháváno 5 % bionafty.

Bioetanol (alkohol) – označení pro etanol vyrobený z biomasy, nebo ekologicky odbouratelných podílů odpadů. Pohonnou látkou je etanol v palivových článcích. Ve spalovacích motorech se běžně mísí v 5% podílu. Problémem tohoto paliva v současné době je skutečnost, že je vyráběno z potravin a krmiva (cukrová třtina), jejichž cena roste. Dalším řešením může být výroba bioetanolu druhé generace z rostlinných odpadních látek a speciálních energetických rostlin [24]. Má vysoké oktanové číslo a jeho použití pro zážehové motory nepředstavuje závažný problém. Vyznačuje se nízkou výhřevností, což je kompenzováno nárůstem spotřeby paliva (cca 40 %). Pro vznětové motory má nízké cetanové číslo, díky čemuž je nutné upravit motor. Pro vznícení etanolu je nutné zvýšit kompresní poměr na hodnotu minimálně 23 a následně zvýšit dávku paliva [18].



Obrázek 6: Síť čerpacích stanic nabízejících palivo E85 (rok 2012) [25]

4. Závislost emisí vznětových motorů na technických a provozních parametrech

Závislost emisí vznětových motorů na provozních podmínkách byla posuzována z hlediska proměnlivosti otáček motoru, teploty a tlaku nasávaného vzduchu, průběhu vstřiku a na parametrech ovlivňujících kvalitu paliva.

4.1 Závislost na otáčkách motoru

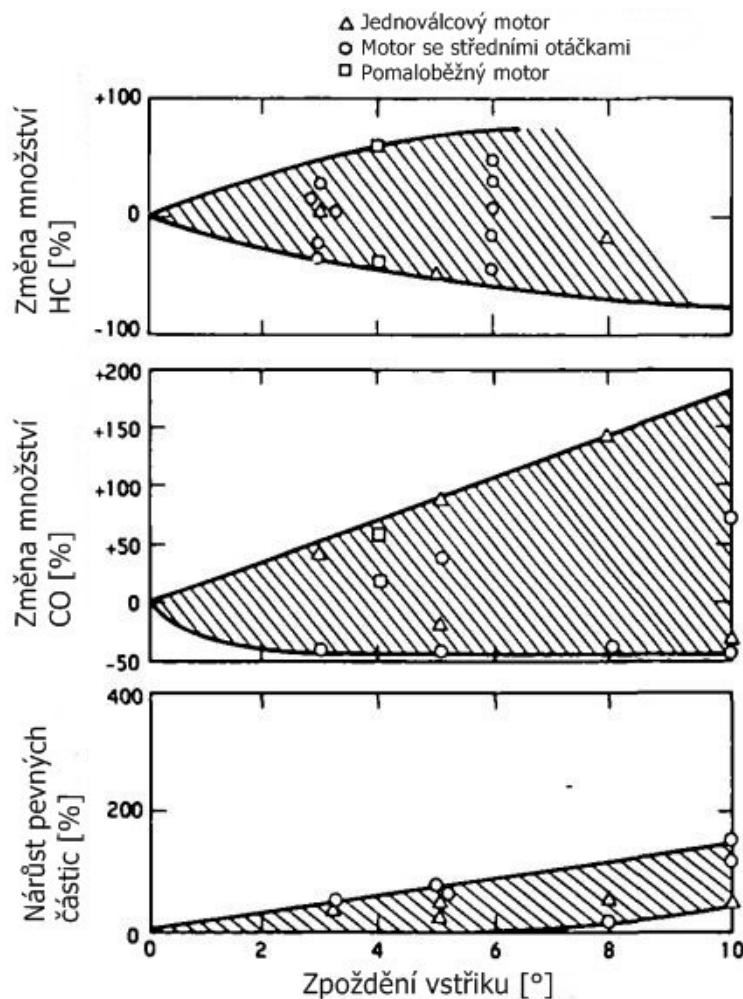
Snižování zatížení při konstantních otáčkách vede ke zvýšení množství emisí uhlovodíků a oxidů dusíku, ale zároveň ke snížení koncentrace oxidu uhelnatého. Pokud motor pracuje s konstantním zatížením a postupně jsou snižovány otáčky, dochází ke snižování emisí HC a NO_x, naproti tomu však k nárůstu CO. Tento jev je obrácen, jestliže vznětový motor pracuje v režimu velmi nízkého zatížení a případně na volnoběh.

4.2 Závislost na teplotě a tlaku nasávaného vzduchu

Pokud je snižována teplota nasávaného vzduchu, dochází i ke snižování tvorby oxidů dusíku. Snižování teploty nasávaného vzduchu má ovšem vliv na vznícení směsi ve válci (snížení teploty prodlužuje prodlevu vznícení směsi). Nižší teplota vzduchu vstupujícího přímo do spalovacího prostoru má ovšem nepříznivý vliv na koncentrace oxidu uhelnatého a uhlovodíků, které rostou zároveň s emisemi pevných částic z motoru. Zvyšování teploty v sání nemá velký význam, jelikož se sníží hmotnostní naplnění válce, ale mohou vzniknout teplotní špičky zapříčiňující vyšší tvorbu oxidů dusíku.

4.3 Závislost na časování vstřiku paliva

Pro vznětové motory je tento parametr jedním z nejdůležitějších. Brzký vstřik paliva má za následek zvýšení spalovacího tlaku a teplot náplně ve válci, výsledkem je nárůst množství NO_x. Oproti tomu zpoždění vstřiku snižuje hodnoty naměřených NO_x. V zásadě zpoždění vstřiku nemá na další složky výfukových plynů zásadní vliv, kromě toho, že snižuje hospodárnost spotřeby paliva.

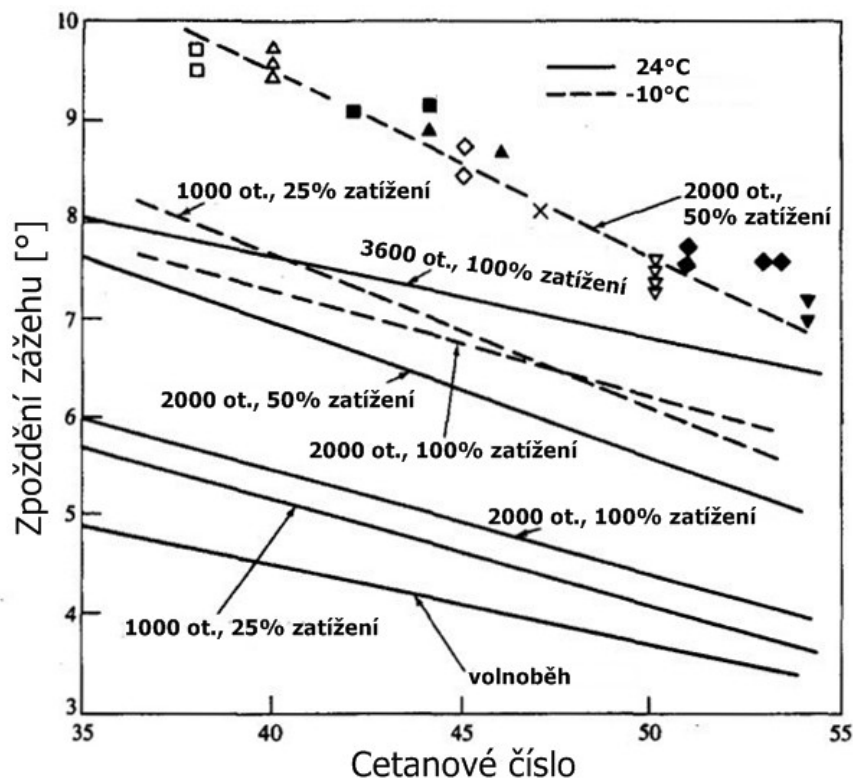


Obrázek 7: Závislost změn složek emisí na zpoždění vstřiku paliva [26]

4.4 Závislost na kvalitě paliva

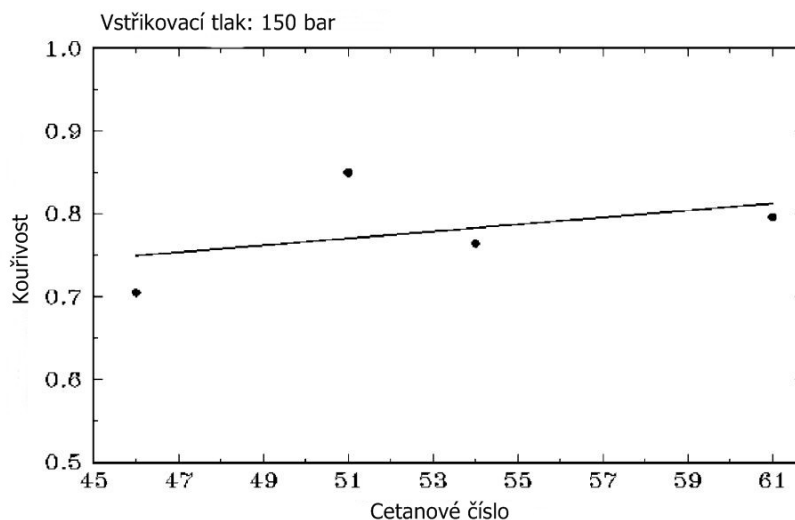
Bylo prokázáno, že použití odlišných typů paliv vede k malé variaci v produkovaných emisích. Tyto výsledky jsou ovlivněné ovšem i různými provozními podmínkami a technickým stavem motoru. Dalším faktem je, že mírné odlišnosti v kvalitě paliva nepatrně mění i samotnou charakteristiku motoru. Ve výsledku má však větší vliv na vzniklé produkty spalování samotná konstrukce motoru a spalovacího prostoru, než kvalita paliva (z pohledu snazší dosažitelnosti) [26]. Vznícení směsi má značný vliv chemické složení, které ovlivňuje cetanové číslo. Vznícení paliva podporují alkany, které mají schopnost snadného vznícení, hůře na tom jsou aromatické sloučeniny, které mají tuto schopnost nižší, stejně jako alkoholy. Isoalkany naopak prodlužují dobu vznícení směsi. Cetanové číslo závisí

na frakční destilaci ropy a případných aditivech usnadňujících vznícení. U zážehových motorů potom zvyšují odolnost proti klepání a samozápalům. Pro zvýšení schopnosti zapálení se používají hlavně peroxidy a nitridy (0,5 % v objemovém měřítku zvýší cetanové číslo až o 10 jednotek). Fyzikální charakteristika paliva neovlivňuje významně vznícení směsi (pro zahřátý motor). Závislost schopnosti vznícení směsi nezávisí ani na viskozitě paliva [27].

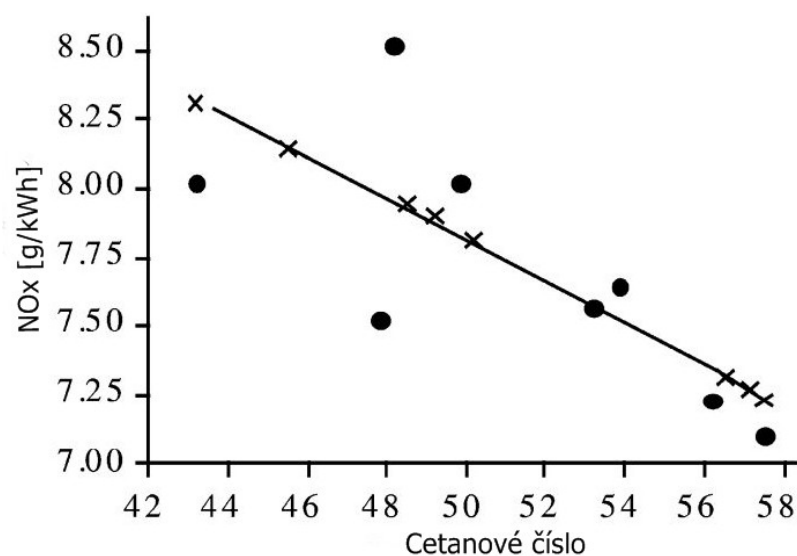


Obrázek 8: Závislost zpoždění vznícení směsi na cetanovém čísle při různých režimech motoru [27]

Prokázána byla i závislost množství celkových emisí (HC, CO, NO_x) na velikosti cetanového čísla paliva. Následkem zvyšování cetanového čísla je snížení celkového množství emisí, ale zvýšení kouřivosti motoru (způsobeno větší stabilitou paliv s vyšším cetanovým číslem).



Obrázek 9: Závislost kouřivosti motoru na cetanovém čísle [28]



Obrázek 10: Závislost produkce NO_x na velikosti cetanového čísla [28]

4.5 Závislost na konstrukci motoru

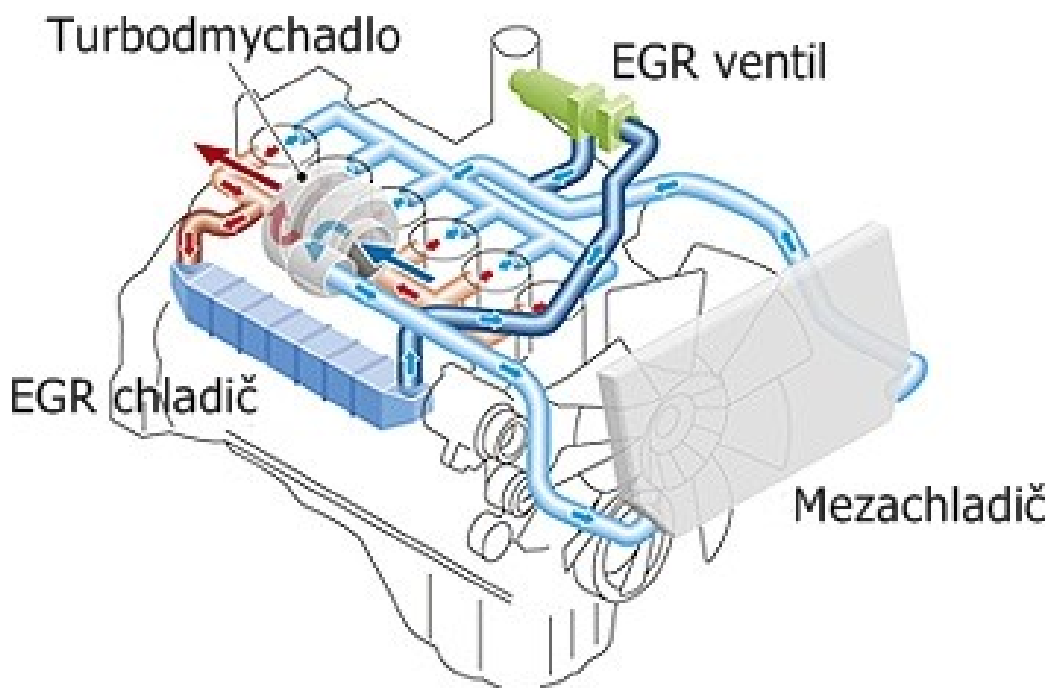
Množství produkovaných emisí během spalovacího procesu závisí na tvaru spalovacího prostoru, na kompresním poměru, časování ventilů a víření směsi. Výzkumy prokázaly, že emise NO_x závisí i na konstrukčním provedení dna pístu. Specifický je poměr vrtání ku vstupnímu průřezu spalovacího prostoru. Pokud je tento poměr vyšší, dojde k nárůstu kouřivosti a zároveň k lepšímu rozložení teplot ve spalovacím prostoru. Pozitivní vliv byl při zvýšení toho poměru projevující se snížením množství emisí uhlovodíků a oxidů dusíku.

4.6 Vliv velikosti kompresního poměru

Emise uhlovodíků značně klesají se zvyšujícím se kompresním poměrem, zatímco snížení oxidů dusíku je mírné (od hodnoty přibližně 1:16 už dále neklesá). Vyšší kompresní poměr ovšem znamená i vyšší mechanická zatížení součástí motoru. Pro velké spalovací motory je nejvyšší kompresní poměr kolem 18:1. Následkem vysokého kompresního poměru a malé vzdálenosti mezi hlavou motoru a pístem je zkomplikování směšovacího děje. Při spalování v takovém motoru však dochází ke snížení spotřeby paliva. Pro moderní vznětové motory je spalovací prostor tvořen právě ve dně pístu, což při snížení vůle mezi hlavou motoru a pístem příznivě ovlivňuje velikost emisí uhlovodíků [26].

4.7 Závislost na časování ventilů

Časování ventilů ovlivňuje míru proplachování obsahu válce a účinnost spalování. Dříve byly motory navrhovány tak, aby byla minimalizována spotřeba při velkém teplotním zatížení součástí. V současné době je ve vznětových motorech hojně využíván systém EGR (recirkulace výfukových plynů), čímž dochází ke snižování koncentrací NO_x [26]. První náznak využití této metody byl už v roce 1940, ale první experimenty začaly až v 50. letech minulého století. Snížení emisí oxidů dusíku při využití EGR systému je na úkor nákladů, množství pevných částic a spotřeby paliva [29].



Obrázek 11: Schéma toku výfukových plynů systémem EGR [31]

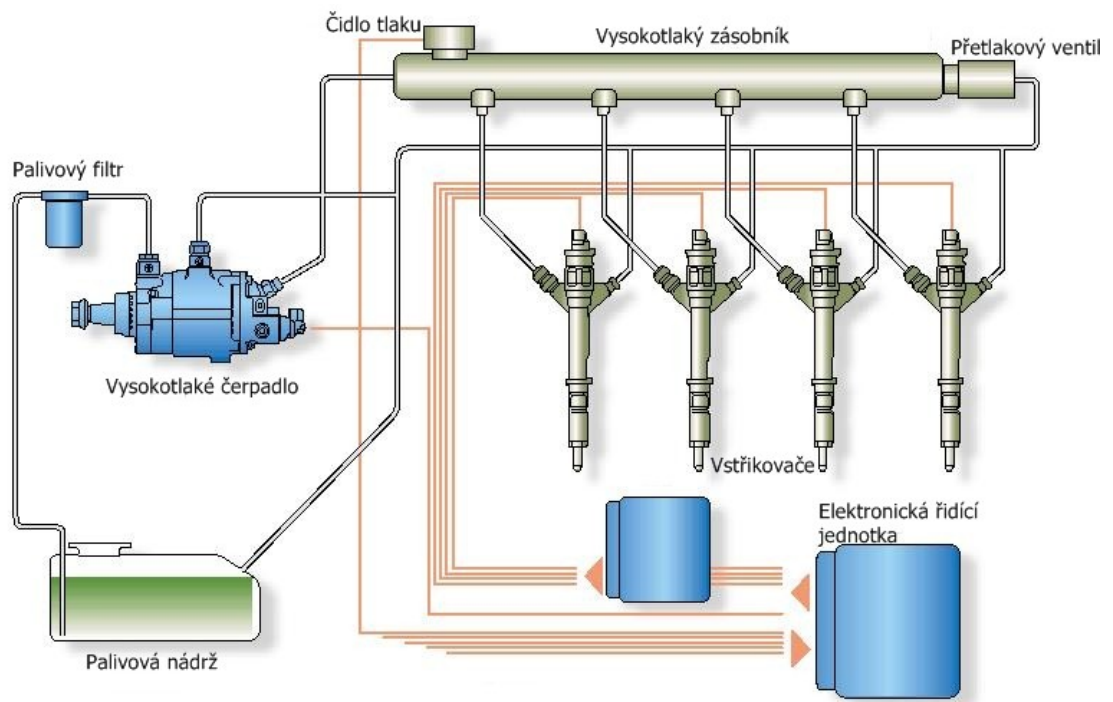
Při spalování určité části výfukových plynů dochází k navýšení množství sazí, jelikož jsou sníženy spalovací teploty. Značný podíl na tomto zvýšení má právě nahrazení samotného vzduchu výfukovými plyny. Snížená spalovací teplota zároveň snižuje reaktivitu sazí, které se postupně začnou usazovat na stěnách válců, pístních kroužcích a na ventilech, což sníží výkon motoru. Při dalších spalovacích cyklech dochází k reakcím těchto usazenin na stěnách válce, čímž je povrch válce narušován. Systém EGR je ovšem kompromis, který díky snížení oxidů dusíku zvyšuje koncentraci nespálených uhlovodíků. S rostoucím poměrem recirkulovaných plynů však rostou i koncentrace oxidu uhelnatého [30].

4.8 Závislost na víření směsi ve válci

Víření směsi má zásadní vliv na spalovací proces a následné emise. Zvýšení víření ve válci má pozitivní vliv na kouřivost motoru, ale negativní na množství oxidů dusíku (jelikož dochází k lokálnímu zvýšení spalovacích teplot). Vliv víření je podstatný hlavně u motorů nepřepřihovaných (v současné době už jsou vznětové motory spíše přepřihované, a proto není úprava hlavy motoru kvůli víření nutná). Citlivost motorů spalujících dieselové palivo na víření je nižší i proto, že pracují s vyšším hmotnostním naplněním válce.

4.9 Závislost na provedení vstřikování a vstřikovačů

Vstřikovací systém jako takový má zásadní vliv na celkovou produkci emisí, množství pevných částic a dále i na kouřivost motoru. Důležitým parametrem tohoto systému je tlak a doba vstřiku (předvstřik, hlavní vstřik). U vstřikovačů potom závisí na konstrukci a provedení jehly. Hlavními parametry vstřikovací jehly jsou hlavně počet, průměr a rozptyl vstřikovacích otvorů [26].



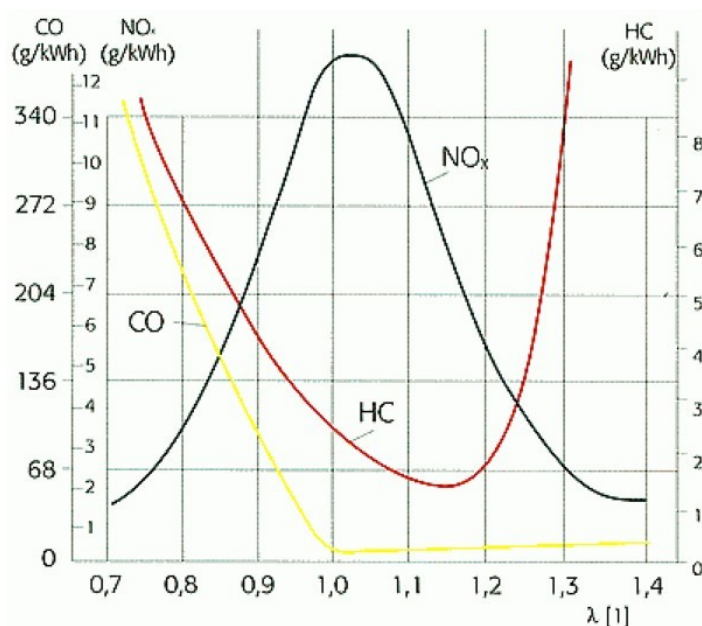
Obrázek 12: Schéma vstřikovacího systému common rail [32]

5. Závislost emisí zážehových motorů na technických a provozních parametrech

Produkce emisí zážehových motorů závisí hlavně na součiniteli přebytku vzduchu λ , časování zážehu, kompresním poměru, teplotě směsi a okamžité teplotě motoru, otáčkách a naplnění válce, časování ventilů, na zpětném tlaku výfukových plynů a případně na usazeninách ve spalovacím prostoru.

5.1 Závislost na poměru vzduchu a paliva

Tento poměr má zásadní vliv na výsledné emise. Pokud je směs bohatá na palivo ($\lambda < 1$, směs má nedostatek vzduchu na spálení dané dávky paliva), výsledkem jsou nižší emise oxidů dusíku a vyšší hodnoty emisí oxidu uhelnatého, uhlovodíků a spotřeby paliva. V současných motorech je standardně využíván katalyzátor, který pro správnou funkci vyžaduje, aby spalovaná směs byla v úzkém pásmu kolem $\lambda = 1$ (cca 14,7 kg vzduchu na 1 kg benzínu). V této oblasti dosahují koncentrace CO a HC svých minim, zatímco NO_x dosahují maxima [26].



Obrázek 13: Graf závislosti emisí na součiniteli přebytku vzduchu [33]

Vrstvená směs – režim, při kterém motor běží na volnoběh nebo při nízkých otáčkách (do 2500 min^{-1}). Nasávaný vzduch je veden obtokem kolem škrticí klapky kvůli snížení energetických ztrát. Směs, která je v motoru spalována, je velmi chudá, což znamená, že musí být dokonale rozvrstvená, aby došlo k jejímu zapálení. Palivo je

vstřikováno do proudu vzduchu až na konci kompresního zdvihu, proto je možné zapálit i směs s celkovým směšovací poměrem až 40:1. V okolí svíčky je směs bohatá, po zapálení směsi v této oblasti pokračuje fronta plamene až do míst s chudou směsí [34].



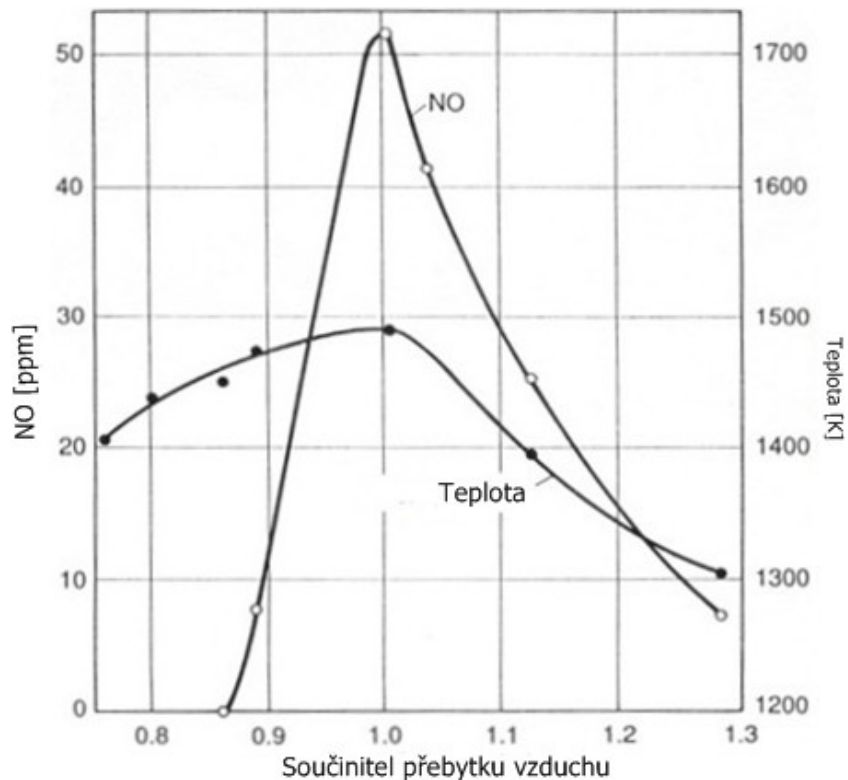
Obrázek 14: Princip zapálení vrstvené směsi [34]

5.2 Vliv časování zážehu

U zážehových motorů má okamžik zážehu vliv hlavně na produkci uhlovodíků a oxidů dusíku. V zásadě dochází k tomu, že dojde k podstatnému snížení těchto dvou složek emisí, jestliže se zvýší prodleva zážehu. Efekt zpoždění zážehu na množství uhlovodíků je velmi složitý, protože se součinitelem přebytku vzduchu se mění i reaktivita paliva (při spalování vzniká různé množství uhlovodíků).

5.3 Závislost na teplotě směsi

Vliv této veličiny na škodlivé látky vystupující z výfuku je citelný. S teplotou nasávaného vzduchu ovšem souvisí i jeho hustota a vlhkost. Dalšími faktory, které by se daly zahrnout, jsou tepelná kapacita, odpar paliva a množství tepla předaného mezi vzduchem a sacím potrubím. Přestup tepla a vypařování paliva v sacím potrubí motoru ovlivňuje teplotu vstupu do válce. Ohřívání sacího potrubí, a tím způsobené ohřátí nasávaného vzduchu, je způsobeno ohříváním hlavně od výfukového potrubí. Pokud je do válce nasávána neohříváná směs (tepelně odstíněné výfukové potrubí), dojde k redukci oxidů dusíku. Na druhé straně však dojde k mírnému nárůstu uhlovodíků, ale pouze v nízkých otáčkách. Produkce oxidu uhelnatého potom narůstá velmi značně. Vyšší koncentrace HC a CO jsou však způsobeny spíše mírnou nehomogenitou směsí a ovlivněním spalování od zhášecích oblastí.



Obrázek 15: Závislost vyprodukovaných emisí NO na teplotě spalování [35]

5.4 Teplota chladicí kapaliny potažmo teplota motoru

Pokud je spalovací motor chlazen chladicí kapalinou značně převyšující pracovní teplotu, dochází ke klepání motoru. Tento jev je způsoben vznikem samozápalů od přehřátých míst spalovacího prostoru. Zároveň běh motoru mimo pracovní teplotu mění stupeň přehřátí vzduchu vstupujícího do válce, což mění koncentrace spalin při hoření. Pokud jsou stěny válce naopak studené, začne se na nich palivo usazovat. Tím se zpomalí nebo zastaví oxidační reakce a tyto sedimenty jsou následně vyfukovány z válce při výfukovém zdvihu. Vliv teploty stěny válce na tvorbu uhlovodíků je nezanedbatelný. Při nízké teplotě je tvorba uhlovodíků přibližně 2x vyšší, než pro motor pracující na pracovní teplotě. Koncentrace oxidů dusíku rostou s rostoucí teplotou motoru (dáno principem vzniku NO_x). Oxidy uhlíku klesají s klesající teplotou chladicí kapaliny, tento jev je ovšem skoro zanedbatelný.

5.5 Vliv otáček motoru

Při zvyšování otáček motoru rostou i koncentrace oxidů dusíku jako následek zvyšování teploty spalování. Pokud se jedná o uhlovodíky, se zvyšováním otáček jejich koncentrace klesá.

5.6 Význam časování sacích ventilů

Načasování ventilů působí na hmotnostní naplnění válce. Není-li spalovací motor vybaven variabilním časováním ventilů, jeho časování je nastaveno pro celý rozsah otáček stejně. Při konstrukci s variabilním časováním ventilů nedochází pouze ke zvýšení účinnosti v určitých otáčkách, ale navíc dojde i ke snížení emisí (způsobeno překrytím ventilů). Další výhodou je, že se sníží teploty spalování, což snižuje emise uhlovodíků a oxidů dusíku.

5.7 Vliv naplnění válce

Zvýšením plnicího tlaku vzrůstají emise dusíků a teploty spalování. Tento parametr má na množství dalších složek zanedbatelný vliv. Na vznik uhlovodíků má větší význam zkoumat spíše zhášecí zóny.

5.8 Zpětný tlak výfukových plynů

Předmětem mnoha studií je následek velikosti tlaku výfukových plynů vracejících se zpět do válce na velikost emisí. Bylo prokázáno, že zvýšení tohoto tlaku má pozitivní vliv na snížení koncentrací uhlovodíků. Další složky eliminované tímto způsobem jsou oxidy dusíku. Pokud se zvýší překrytí ventilů, je vliv významnější.

5.9 Usazeniny ve spalovacím prostoru

Následkem usazování sedimentů na stěně válce dochází ke zvyšování koncentrací uhlovodíků a oxidů dusíku.

5.10 Tvar spalovací komory

Tvar spalovacího prostoru neovlivňuje pouze množství emisí, ale i spotřebu paliva a výkon. Tvar a umístění ventilů ovlivňuje proudění vzduchu, stupeň turbulence a rychlost šíření plamene. Velmi intenzivní turbulence vede k tomu, že nedohoří všechno palivo vstříknuté do válce a dochází k následnému dohořívání. Vyšší turbulentní proudění zvyšuje přestup tepla do válce, což vede k teplotním špičkám a následné tvorbě NO_x . Dále dochází k vyšší tendenci vzniku uhlovodíků kvůli přehřátí od stěn válce. Významným poměrem pro tvorbu oxidů dusíku je poměr povrch/objem spalovacího prostoru. Následkem zvyšující se hodnoty tohoto poměru je snižování jejich koncentrací.

5.11 Palivový systém

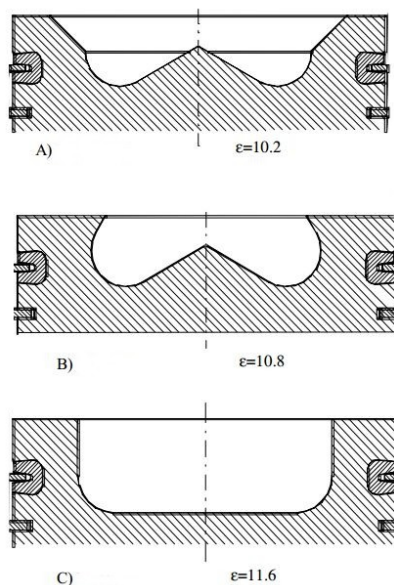
V současné době je u zážehových motorů využíváno vstřikování paliva místo dřívějších karburátorů. Motory využívající vstřikovače se následně dají přebudovat i na spalování LPG nebo zemního plynu. Dalším způsobem tvorby směsi je využití směšovače vzduchu a plynu. Účelem úprav palivového systému je navýšení výkonu a snížení spotřeby paliva. Palivový systém je zaměřen hlavně na hospodárnost a vytvoření homogenní směsi. Další nutností je zpětná vazba kvůli vytváření stechiometrické směsi ($\lambda=1$). V současné době se využívá hlavně vrstvená směs pro určité režimy, případně vyšší dávka paliva kvůli ochlazení katalyzátoru [26].

6. Závislost emisí plynových motorů na technických a provozních parametrech

Výhody plynového motoru oproti vznětovému spočívají v nižší produkci emisí celkově (HC, NO_x, CO), a to i pevných částic. Další nespornou výhodou těchto konstrukcí je tišší chod. Pro tvorbu emisí jsou hlavními faktory vytváření směsi a její spalování. Snížení polutantů u těchto motorů je dosažitelné dvěma cestami. Tou první je spalování stechiometrické směsi za využití třísložkového katalyzátoru a tou druhou je vytváření a následné spalování vrstvené směsi.

6.1 Vliv tvaru spalovacího prostoru a víření ve válci

Samotný tvar spalovacího prostoru ovlivňuje i víření ve válci. Důležitou proměnnou byla úprava vybrání pístu, jež disponuje zásadním vlivem na proudění směsi. Na obrázku číslo 16 jsou tři tvary vybrání pístu. Pro tvar A je nejnižší víření. Oproti tomu tvary B a C mohou dosáhnout vyšších kompresních poměrů. Tvar pístu C dosahuje hodnot víření několikanásobně vyšších, než píst prvního typu. V konečném důsledku úpravou pístu dojde ke značnému snížení emisí, navýšení výkonu a snížení spotřeby paliva. Z výzkumu také vyplynulo, že motor spalující plyná paliva má až desetkrát nižší emise pevných částic než vznětový motor disponující stejným výkonem. K razantnímu snížení koncentrací však došlo i u uhlovodíků [36].



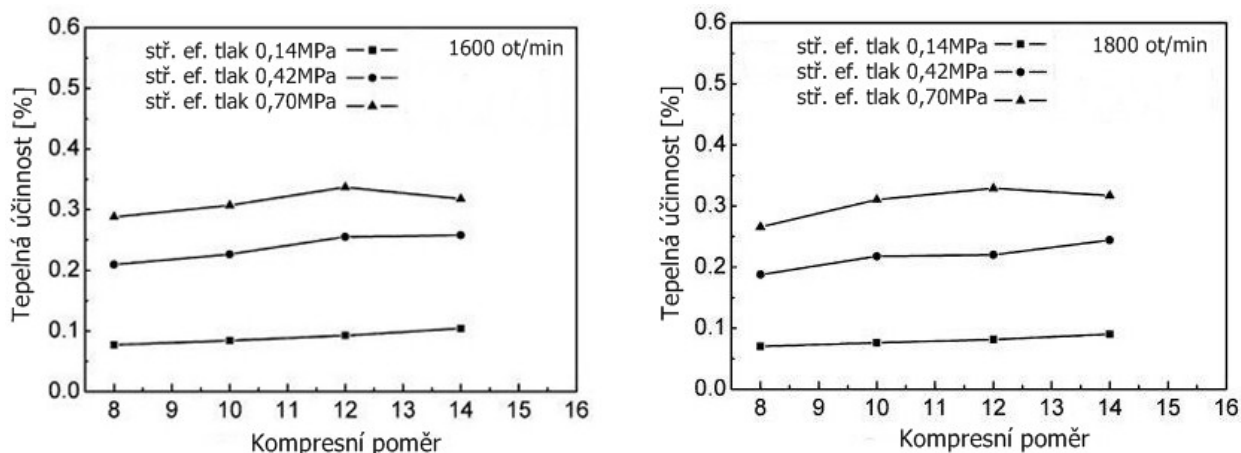
Obrázek 16: Tvary pístů a hodnoty kompresních poměrů [36]

6.2 Časování vstřiku a zážehu

Experimentální studie došly k závěrům, že při úpravě okamžiku vstřiku zemního plynu dojde k razantnímu zkrácení hoření (za využití víření ve válci). Úpravou vstřiku je myšleno zkrácení doby mezi vstřikováním paliva a zapálením svíčky. Následkem úpravy časování je sice zvýšení koncentrací oxidů dusíku, ale snížení množství oxidu uhelnatého. Pro stechiometrickou směs dále platí, že naroste množství nespálených uhlovodíků [37].

6.3 Vliv velikosti kompresního poměru

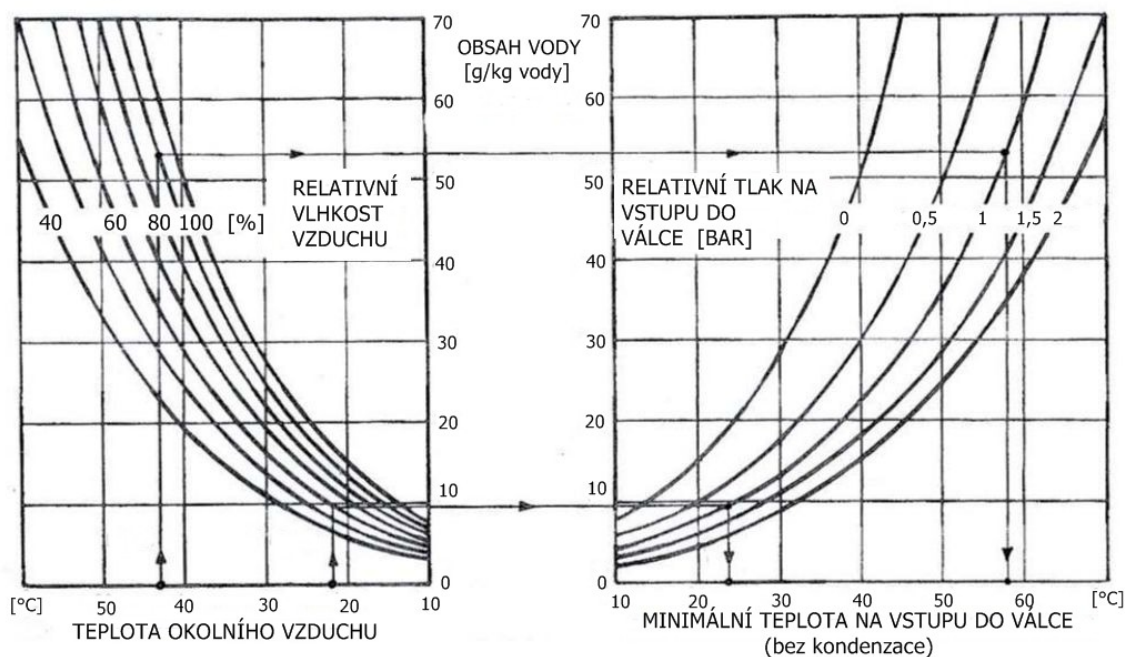
Významný podíl na výkonových parametrech spalování a produkci emisí má právě velikost kompresního poměru. V důsledku zvyšování kompresního poměru dochází ke vzniku vrstvené směsi, snížení vzdálenosti mezi vstřikovačem a pístem, ale hlavně ke zvýšení tepelné účinnosti. Zvyšování hodnoty ϵ (kompresní poměr) vede zároveň k rychlejšímu spalování směsi. Spalování vrstvené směsi při využití víření ve válci a optimálního okamžiku vstřiku vede k vyšší tepelné účinnosti a příznivě nízkým emisím. Při ideálním rozvrstvení spalované směsi ve válci dojde k tomu, že se u stěn spaluje směs velmi chudá, a tím je sníženo klepání motoru. V důsledku zvyšování kompresního poměru jsou snižovány koncentrace uhlovodíků a oxidu uhelnatého, proti tomuto trendu však jdou koncentrace oxidů dusíku. Po provedených měřeních bylo zjištěno, že z hlediska tepelné účinnosti a množství emisí je nejvýhodnější $\epsilon=12$ (plynové motory s přímým vstřikováním).



Obrázek 17: Závislost tepelné účinnosti motoru na velikosti kompresního poměru při různých středních efektivních tlacích

6.4 Závislost na nasávaném vzduchu

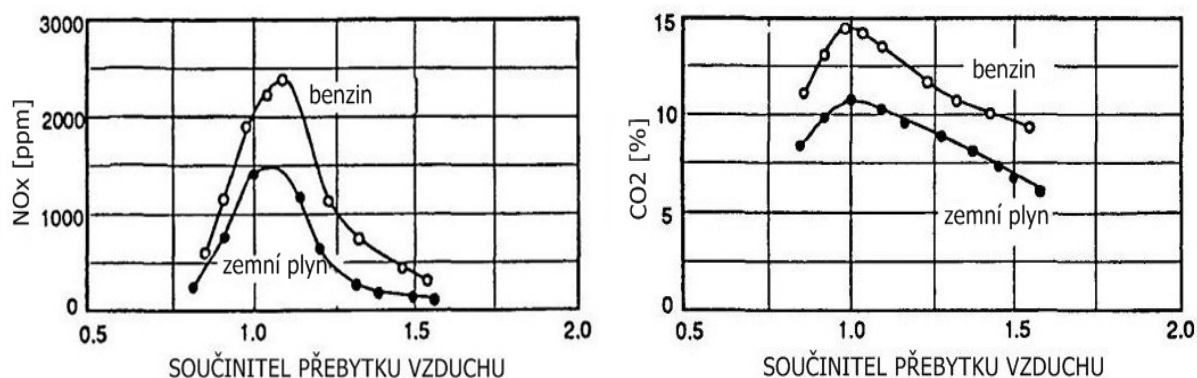
Nasávaný vzduch obsahuje určité množství vlhkosti. Pro význam ve spalování se užívá vliv absolutní vlhkosti vzduchu. S rostoucím podílem vlhkosti vzduchu klesá rychlost spalování a maximální spalovací teplota. Zároveň dochází ke snižování koncentrací oxidů dusíku, ale sniží se i účinnost motoru. Význam hraje i nadmořská výška, jelikož klesá hustota vzduchu, který obsahuje méně kyslíku důležitého pro spalování paliva ve válci. Nadmořská výška nejvíce ovlivňuje přeplňované motory, jelikož turbodmychadlo musí plnit pod vyšším tlakem, má-li udržovat stejný výkon na výstupu z motoru. Vzduch ovlivňující spalování se dělí na tři fáze. První fází je vzduch v okolí automobilu, druhou je vzduch na vstupu do turbodmychadla a třetí je vzduch vstupující přímo do válce. Teplota okolí nemá významný vliv na výkon motoru, způsobuje však rozdíly teplot vzduchu před turbodmychadlem nebo ovlivňuje výkon chladiče chladicí kapaliny. Vysoká teplota na vstupu do turbodmychadla ovšem snižuje jeho výkon, účinnost a v krajních situacích může vést až tomu, že bude turbodmychadlo pracovat v nestabilní oblasti. Teplota vzduchu (směsi) před vstupem do válce přímo ovlivňuje spalování. Pokud se tato teplota výrazně liší od intervalu, jenž je udáván výrobcem, dochází k prudkému nárůstu emisí oxidů dusíku a ke snížení účinnosti motoru. Obrázek 18 zachycuje závislost minimální teploty vstupující do válce potřebné k tomu, aby nedošlo ke kondenzaci v sání, jako funkci relativního tlaku na vstupu do válce a okolní teplotě [39].



Obrázek 18: Závislost minimální teploty vstupující do válce jako funkce relativního tlaku a vlhkosti vzduchu vstupujícího do válce a okolní teploty [39]

6.5 Vliv bohatosti směsi

Při spalování chudé směsi je snížena produkce všech tří hlavních polutantů, pokud ovšem není směs velmi chudá až nezapalitelná, kdy vzniká velké množství nespálených uhlovodíků. Poměr vzduchu a paliva je nejpodstatnější faktor ovlivňující produkci oxidu uhelnatého. Závislost NO_x na součiniteli přebytku vzduchu je taková, že nejvyšších koncentrací je dosahováno právě při spalování stechiometrické směsi.



Obrázek 19: Porovnání emisí NO_x a CO_2 při spalování benzínu a zemního plynu při různém součiniteli přebytku vzduchu [40]

6.6 Vliv otáček

Při zvyšování otáček motoru dojde ke snížení tepelné výměny za jeden cyklus, čímž roste množství vyprodukovaných oxidů dusíku. Zvýšením počtu otáček však dochází ke zvýšení víření ve válci, kdy dochází ke snižování koncentrací nespálených uhlovodíků [40].

7. Emisní limity spalovacích motorů

Spalovací motory jsou rozlišovány podle aplikace, ve které jsou využívány. Ať jde o motory do automobilu, motory nevozidlové nebo motory stacionární, metody měření a emisní limity jsou různé. Stacionární motory jsou motory, které pracují s konstantními otáčkami, popřípadě ve velmi malém rozsahu provozních otáček. Optimalizací je možné snadněji produkci emisí těchto motorů snížit na minimum. Naproti tomu automobilové motory pracují ve velmi širokém rozsahu provozních otáček, čímž je snížení produkce emisí v celém rozsahu obtížnější. Motory nevozidlové jsou motory pracující například v dolech, zemědělství, potom také jako generátory a podobně. Tyto motory většinou zastávají i velkou skupinu motorů pomaloběžných. V České republice platí pro automobilové motory inovovaná emisní norma EURO, konkrétně její šestá generace. Stacionární motory jsou regulovány vyhláškou číslo 415/2012 zákona o ochraně ovzduší (jednorázové a kontinuální měření) a nevozidlové motory potom normou ČSN EN ISO 8178.

8. Limity stacionárních zdrojů

8.1 Jednorázové měření stacionárních motorů

Jednorázové měření se provádí při prvním uvedení stacionárního zdroje do provozu, při každé změně paliva, suroviny, nebo tepelně zpracovaného odpadu, ale také při každém konstrukčním zásahu do konstrukce nebo vybavení, který by mohl mít vliv na množství polutantů. Toto měření je prováděno buď jednou za kalendářní rok (u zdrojů nad 5 MW), nebo jedenkrát za tři kalendářní roky. Měření jednou za tříletý interval je konáno u stacionárních zdrojů spalujících plynná paliva o celkovém jmenovitém příkonu od 1 MW do 5 MW. Tento způsob kontroly je však platný pro stacionární zdroje spalující pevná paliva s celkovým jmenovitým tepelným příkonem od 0,3 MW do 1 MW. Pro stacionární motory spalující odpad (v případě těžkých kovů) je měření prováděno během prvních 12 měsíců činnosti jedenkrát za tři měsíce a následně dvakrát za kalendářní rok. Měření emisí je dvakrát ročně prováděno i u zdrojů se jmenovitým tepelným příkonem 50 MW a vyšším.

Způsob a zjišťování úrovně znečišťování jednorázovým měřením – měření je prováděno manuálními metodami se samostatnými odběry na sebe navazujících vzorků, nebo přístroji pro kontinuální měření emisí. V rámci jednotlivého měření jsou vzorky vyhodnocovány jednotlivě, použité měřicí metody však musí stanovit koncentrace škodlivých látek alespoň v intervalu od 10% do 200% specifického emisního limitu. Pro toto měření platí, že pokud je stacionární zdroj s neměnnými provozními podmínkami, provedou se nejméně 3 jednotlivá měření. Pro motory s proměnnými provozními podmínkami se provádí měření šest. Měření však musí být provedeno tak, aby u periodického, přerušovaného nebo šaržovitého způsobu výroby byl měřen vždy celý interval (minimálně 30 minut, maximálně 8 hodin). Pokud z nějakých důvodů (např. technických) nelze dosáhnout jmenovitého výkonu, provede se jednorázové měření při maximálním dosažitelném výkonu. U spalovacích stacionárních zdrojů o celkovém tepelném příkonu do 5 MW včetně, spalujících výhradně lehký topný olej, naftu, zemní plyn, degazační plyn, zkapalněný zemní plyn, vodík nebo zkapalněný ropný plyn a jejich směsi lze jednorázové měření oxidu uhelnatého a oxidů dusíku provádět potenciometricky přímým měřením (analyzátoři s elektrochemickými převodníky). U stacionárního zdroje vybaveného technologií ke snižování tuhých znečišťujících látek (pevných částic) s výstupní hodnotou nižší

než 50 mg/m³ za provozních stavových podmínek a se stanoveným emisním limitem, jsou provedena 3 jednotlivá měření těchto polutantů.

Vyhodnocení jednorázového měření – manuální metody vyhodnocují hodnotu váženého průměru podle doby odběru jednotlivých vzorků a to po přepočtu na stanovené stavové a referenční podmínky. Při použití přístrojů pro kontinuální měření jsou vyhodnoceny průměrné hodnoty za každých 30 minut měření (přepočtené na stavové a referenční podmínky a jako aritmetický průměr hodnot za celé měření). Pokud je pro měření použito přístrojů s elektrochemickými články, jsou vyhodnocovány hodnoty za každých 15 minut měření a opět přepočteny na stavové a referenční podmínky, z nichž je vypočítán aritmetický průměr. Vyhodnocení jednorázového měření obsahuje údaje o hmotnostní koncentraci znečišťujících látek a jejich hmotnostním toku zpracované tak, aby bylo možné výsledek porovnat s emisními limity. Dále obsahuje i specifikaci provozních a stavových podmínek, za nichž bylo měření provedeno. Emisní limit se považuje za dodrženy, pokud průměr výsledků jednotlivých měření koncentrace znečišťující látky za celé jednorázové měření je menší nebo rovno emisnímu limitu a současně každá hodnota koncentrace zjištěná jednotlivým měřením je menší než 120 % emisního limitu.

8.2 Kontinuální měření stacionárních zdrojů

Pro tento typ měření se používá přístroj umožňující stanovení koncentrace polutantů alespoň v intervalu od 10 % do 250 % specifického emisního limitu. Z hodnot naměřených v intervalech ne kratších než 1 minuta se jako aritmetický průměr středních hodnot zaznamenaných po dobu nejméně 20 minut ze sledovaného třicetiminutového intervalu vypočte průměrná hodnota koncentrace příslušné znečišťující látky při stanovených stavových podmínkách. Z půlhodinových průměrných hodnot koncentrace se vypočte průměrná hodnota denní koncentrace znečišťující látky při stanovených stavových podmínkách. Denní výsledky kontinuálního měření jsou uchovávány elektronicky a jsou vytištěny v případech, kdy dojde k překročení emisního limitu. V první pracovní den a také po skončení kalendářního roku jsou zpracovány úhrnné výsledky za kalendářní rok, jež jsou uchovávány v elektronické podobě.

Vyhodnocení emisních limitů při kontinuálním měření – emisní limit je splněn, pokud žádná platná měsíční průměrná hodnota nepřekročí hodnotu specifického emisního limitu a zároveň žádná platná denní hodnota nepřekročí 110 % hodnoty

specifického emisního limitu. Další nutnou podmínkou pro splnění emisního limitu stacionárního zdroje je to, že žádná platná půlhodinová hodnota nepřekročí 200 % hodnoty specifického emisního limitu [41].

Plynové motory (zážehové)									
Druh Paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]								
	> 0,3 – 1 MW			> 1 – 5 MW			> 5 MW		
	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO
Kapalné palivo	500	-	650	500	130	650	500	130	650
Zemní a degazační plyn	500	-	650	500	-	650	500	-	650
Plynné palivo obecně	1000	-	1300	500 1000 ³⁾	130	1300	500	130	650

Tabulka 2: Specifické emisní limity platné do 31. 12. 2017 pro plynové motory [41]

Vznětové motory									
Druh Paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]								
	> 0,3 – 1 MW			> 1 – 5 MW			> 5 MW		
	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO
Kapalné palivo	4000	-	650	500 600 ²⁾ 4000 ³⁾	130	650	500 600 ²⁾ 2000 ³⁾	130	650
Zemní a degazační plyn ¹⁾	4000	-	650	500 4000 ³⁾	-	650	500 2000 ³⁾	-	650
Plynné palivo obecně	4000	-	1300	500 4000 ³⁾	130	1300	500	130	650

Tabulka 3: Specifické emisní limity platné do 31. 12. 2017 pro vznětové motory [41]

Vysvětlivky:

- 1) Se vstříkovacím zapalováním
- 2) Platí pro těžký topný olej
- 3) Platí pouze pro pístové spalovací motory, jejichž stavba či přestavba byla zahájena před 17. květnem 2006

8.3 Sazby poplatků a koeficienty úrovně emisí stacionárních zdrojů

V následující tabulce jsou uvedeny zpoplatněné škodlivé látky a vývoj poplatků za jejich produkci do ovzduší (Kč/t).

Znečišťující látka	2013 - 2016	2017	2018	2019	2020	2021 a dále
TZL	4 200	6 300	8 400	10 500	12 600	14 700
SO ₂	1 350	2 100	2 800	3 500	4 200	4 900
NO _x	1 100	1 700	2 200	2 800	3 300	3 900
VOC	2 700	4 200	5 600	7 000	8 400	9 800

Tabulka 4: Znečišťující látky podléhající zpoplatnění a sazby poplatků v jednotlivých letech

Výše tohoto poplatku dále závisí na koeficientu úrovně emisí podle dosahovaných emisních koncentrací v celém poplatkovém období. Výše tohoto poplatku je potom vyjádřena v procentech této částky podle procentuální produkce specifického emisního limitu [41].

Koncentrace produkované znečišťující látky [% specifického emisního limitu]	Koeficient poplatku příslušící dané koncentraci
50-60	0,2
60-70	0,4
70-80	0,6
80-90	0,8
>90	1

Tabulka 5: Koeficienty výše poplatku za znečišťování ovzduší podle dosahovaných koncentrací [41]

8.4 Vývoj emisních limitů stacionárních zdrojů

Tepelný výkon [MW]	TZL [mg/m ³]	SO ₂ [mg/m ³]	NO ₂ [mg/m ³]	CO [mg/m ³]	Organické látky – suma uhlíku [mg/m ³]	Referenční obsah kyslíku [%] O ₂
>0,2 ¹⁾	130 ²⁾	Závisí na palivu	2000 ³⁾ 4000 ⁴⁾ 500 ⁵⁾	650	150 ⁶⁾	5 ⁷⁾

Tabulka 6: Emisní limity platné od 29. 5. 1997 [42]

- 1) Kogenerační jednotky jsou tříděny podle tepelného příkonu
- 2) Při použití kapalných paliv
- 3) U vznětových motorů s tepelným příkonem vyšším než 5 MW
- 4) U vznětových motorů s tepelným příkonem do 5 MW včetně
- 5) U zážehových motorů
- 6) Úhrnná koncentrace všech látek s výjimkou metanu při hmotnostním toku vyšším než 3 kg/h
- 7) Pro oxid uhelnatý a oxidy dusíku platí emisní limit pro suchý plyn; pro TZL a organické látky platí limit pro vlhký plyn

V roce 2002 následně vyšlo nové nařízení vlády, které tyto limity upravilo do následující podoby.

Jmenovitý tepelný příkon [MW] ¹⁾	Emisní limit [mg/m ³] - vztaženo na normální stavové podmínky a suchý plyn					Referenční obsah kyslíku [%]
	TZL	Oxid siřičitý	Oxidy dusíku NO ₂	Oxid uhelnatý	Organické látky jako suma uhlíku	
≥0,2 a menší než 50 MW	130 ²⁾	Závisí na palivu	2000 ³⁾ 4000 ⁴⁾ 500 ⁵⁾	650	150 ⁶⁾	5 ⁷⁾

Tabulka 7: Emisní limity platné pro stacionární zdroje od 3. 7. 2002 [43]

- 1) Kogenerační jednotky jsou tříděny podle tepelného výkonu
- 2) Při použití kapalných paliv
- 3) U vznětových motorů s příkonem vyšším než 5 MW
- 4) U vznětových motorů s příkonem do 5 MW včetně
- 5) U zážehových motorů
- 6) Úhrnná koncentrace všech látek s výjimkou metanu při hmotnostním toku vyšším než 3 kg/h
- 7) Pro oxid uhelnatý a oxidy dusíku platí emisní limit pro suchý plyn; pro TZL a organické látky platí limit pro vlhký plyn

Pro nové pístové spalovací motory platily emisní limity pro NO_x uvedené v tabulce 9. Tyto limity vstoupily v platnost 1. 1. 2008.

	Emisní limit ¹⁾ [mg/m ³] – vztaženo na normální stavové podmínky a suchý plyn
Zážehové motory, 4-taktní, nad 1 MW jmenovitého tepelného příkonu	
motory spalující chudou směs	250
ostatní motory	500
Vznětové (Dieselové) motory	
Palivo: zemní plyn se vstříkovacím zapalováním	500
Palivo: Těžký topný olej	600
Palivo: dieselový nebo plynový olej	500

Tabulka 8: Emisní limity NO_x pro nové (od roku 2007) stacionární motory [43]

1) Tyto emisní limity se nevztahují na motory provozované méně než 500 h/r. Vztažný obsah kyslíku je 5 %.

Další úprava zákona o ochraně ovzduší byla vydána v roce 2007.

Zážehové motory															
Druh Paliva	Emisní limit podle jmenovitého tepelného příkonu vztažený na normální stavové podmínky a suchý plyn pro TZL a suma uhlíku vztaženo na vlhký plyn [mg/m ³], při referenčním obsahu kyslíku 5 %														
	0,2 – 1 MW					> 1 – 5 MW					> 5 MW				
	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO
Kapalné palivo	2)	500	130	-	650	2)	500	130	150	650	2)	500	130	150	650
Zemní a degazační plyn	2)	500	-	-	650	2)	500	-	150	650	2)	500	-	150	650
Bioplyn, skládkový plyn	2)	1000	130	-	1300	2)	1000	130	150	1300	2)	500	130	150	650

Tabulka 9: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (zážehové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena před 17. květnem 2006 [44]

Vznětové motory															
Druh Paliva	Emisní limit podle jmenovitého tepelného příkonu vztažený na normální stavové podmínky a suchý plyn pro TZL a suma uhlíku vztaženo na vlhký plyn [mg/m ³], při referenčním obsahu kyslíku 5 %. 1) úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou metanu při hmotnostním toku vyšším než 3 kg/hod)														
	0,2 – 1 MW					> 1 – 5 MW					> 5 MW				
	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO
Těžký topný olej	2)	4000	130	-	650	2)	4000	130	150	650	2)	2000	130	150	650
Zemní a degazační plyn ³⁾	2)	4000	130	-	650	2)	4000	130	150	650	2)	2000	130	150	650
Plynné palivo obecně	2)	4000	130	-	1300	2)	4000	130	-	1300	1)	2000	130	-	650

Tabulka 10: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (vznětové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena před 17. květnem 2006 [44]

Zážehové motory															
Druh Paliva	Emisní limit podle jmenovitého tepelného příkonu vztažený na normální stavové podmínky a suchý plyn pro TZL a suma uhlíku vztaženo na vlhký plyn [mg/m ³], při referenčním obsahu kyslíku 5 %														
	0,2 – 1 MW					> 1 – 5 MW					> 5 MW				
	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO
Kapalné palivo	2)	500	130	-	650	2)	500	130	150	650	2)	500	130	150	650
Zemní a degazační plyn	2)	500	-	-	650	2)	500	-	150	650	2)	500	-	150	650
Bioplyn, skládkový plyn	2)	1000	130	-	1300	2)	500	130	150	1300	2)	500	130	150	650

Tabulka 11: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (zážehové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena po 17. květnu 2006 [44]

Vznětové motory															
Druh Paliva	Emisní limit podle jmenovitého tepelného příkonu vztažený na normální stavové podmínky a suchý plyn pro TZL a suma uhlíku vztaženo na vlhký plyn [mg/m ³], při referenčním obsahu kyslíku 5 %														
	0,2 – 1 MW					> 1 – 5 MW					> 5 MW				
	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO	SO ₂	NO _x	TZL	Σ C ¹⁾	CO
Kapalné palivo	2)	4000	130	-	650	2)	500 600 ⁴⁾	130	150	650	2)	500 600 ⁴⁾	130	150	650
Zemní a degazační plyn ³⁾	2)	4000	130	-	650	2)	500	130	150	650	2)	500	130	150	650
Plynné palivo obecně	2)	4000	130	-	1300	2)	500	130	-	1300	2)	500	130	-	650

Tabulka 12: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (vznětové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena po 17. květnu 2006 [44]

- 1) Úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou metanu při hmotnostním toku vyšším než 3 kg/h.
- 2) Obsah síry v palivu nesmí překročit limitní hodnoty obsažené v jiném právním předpisu stanovujícím požadavky na kvalitu paliv z hlediska ochrany ovzduší. V motorové naftě nesmí obsah síry překročit 0,05 % hmotnostních. V bioplynu, skládkovém, kalovém a pyrolýzním plynu nesmí obsah síry překročit 2200 mg.m⁻³ v přepočtu na obsah metanu, nebo 60 mg.MJ-1 tepla přivedeného v palivu.
- 3) Se vstřikovacím zapalováním.
- 4) Emisní limit pro NO_x 600 mg.m⁻³ platí pro těžký topný olej.

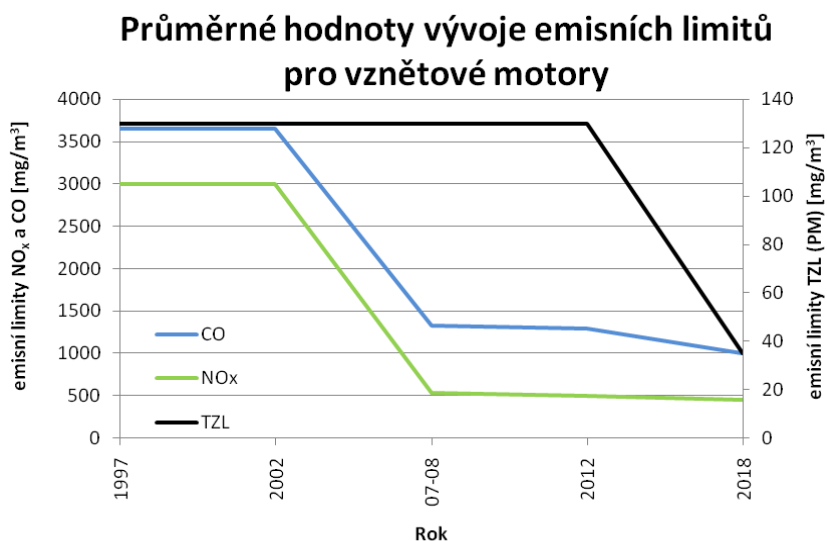
Limity pro spalovací zdroje s pístovými spalovacími motory, jejichž stavba či přestavba byla zahájena po 17. květnu 2006, doznala úprav v množství koncentrací oxidů dusíku pro jednotky malého a vyššího výkonu [44].

Následující úprava emisních limitů byla v roce 2012, uvedená v tabulce 2 a 3 na straně 40. Od 1. 1. 2018 začnou platit nové emisní limity, které jsou vyobrazeny v následující tabulce [45]. Tyto limity však také doznaly úprav, kteréžto vstoupily v platnost 1. srpna 2014 [46].

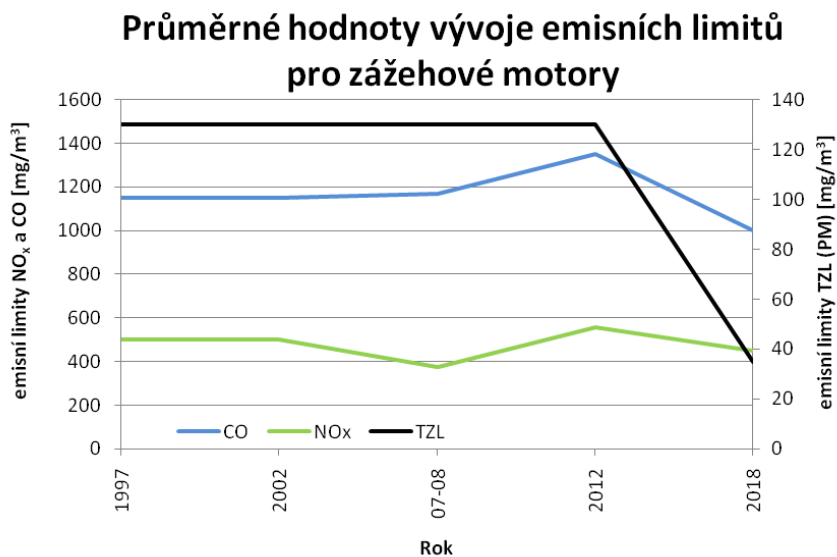
Druh paliva	Specifické emisní limity [mg/m ³]								
	> 0,3 – 1 MW			> 1 – 5 MW			> 5 – 50 MW		
	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO	NO _x	TZL	CO
Kapalné palivo	400	-	450	400	50	450	400	20	450
Plynné palivo a zkapalněný plyn	500	-	650	500	-	650	500	-	650

Tabulka 13: Emisní limity vstupující v platnost 1. 1. 2018 [45]

Na následujících obrázcích jsou zachyceny vypočtené průměrné hodnoty emisních limitů pro stacionární zdroje. Mírné navýšení těchto hodnot je způsobeno započtením všech limitovaných paliv používaných pro stacionární zdroje (původně paliva nebyla rozlišována).



Obrázek 20: Průměrné hodnoty vývoje emisních limitů vznětových stacionárních zdrojů



Obrázek 21: Průměrné hodnoty emisních limitů zážehových stacionárních zdrojů

9. Emisní limity nesilničných motorů

Norma ISO 8178 je mezinárodně uznávána pro velké množství nesilničných motorů a aplikací a je používána jak v USA, EU, tak i v Japonsku. Tento předpis je sbírkou testů rozdělených podle tříd motorů a jejich využití. Pro splnění emisních limitů byly předepsány dva typy režimových cyklů (stacionární a dynamický). Dále norma obsahuje tabulku s váhovými faktory jednotlivých bodů zatížení pro emisní limity. Motory podléhající této normě jsou nesilniční motory všech velikostí (výkon, zdvihový objem), motory se širokou škálou konstrukčních provedení a také motory pracující v zemědělství či průmyslu. Definice nesilničního motoru dle společnosti EPA je každý spalovací motor, který není používán ve vozidlech. Dále závisí na pohyblivosti či přenositelnosti, s čímž se pojí také to, jestli spalovací motor při vlastní práci pohání a pohybuje celým strojem. Do této skupiny patří například buldozery, traktory, kolové nakladače, vysokozdvizné vozíky, naftové traktůrkové sekačky atd. Naopak vozidla pracující v dolech nebo stroje s objemem nižším než 50 cm³ na válec mají vlastní emisní limity.

První návrh emisních limitů pro tento typ motorů byl vytvořen v roce 1994 a začal platit v roce 1996 (Úroveň 1). Toto nařízení platilo nejprve pro motory s výkonem vyšším než 37 kW. Dohoda byla vytvořena mezi společnostmi EPA (Agentura pro ochranu životního prostředí USA), California ARB (Agentura čistého ovzduší Kalifornie) a výrobci motorů (Cummins, Isuzu, Komatsu, New Holland, ...). V roce 1998 byla vytvořena regulace i pro motory s výkonem nižším než 37 kW a zároveň vznikly Úrovně 2 a 3, které byly mnohem přísnější. Tyto dvě aktualizované verze vstoupily v platnost v roce 2000. První 3 úrovně platily pro motory, které pracovaly bez úpravy výfukových plynů, nebo měly pouze oxidační katalyzátory.

9.1 Současné limity pro nesilniční motory dle NORMY ISO 8178

V květnu roku 2004 společnost EPA vytvořila Úroveň 4, jež je platná od roku 2008 (do 2015). Předpis je ve své podstatě takový, že snížení emisí TZL (PM) a oxidů dusíku je více než devadesátiprocentní. Aby došlo k takto razantnímu snížení produkovaných emisí, je nutné, aby byla spalovaná směs správně rozvrstvena, zapálena ve správný okamžik a výfukové plyny byly následně upraveny v katalyzátorech a filtrech pevných částic. Obsahem této normy je i úprava množství

síry v motorové naftě. Pro splnění Úrovně 4 byl předepsán maximální obsah síry v motorové naftě 500 ppm pro lokomotivy, lodě a nesilniční motory (platný od roku 2007). Od roku 2010 limit stanovuje maximální obsah síry 15 ppm pro nesilniční motory a stejný limit platný od roku 2012 pro lokomotivy a lodě. Význam snižování obsahu síry je v udržování funkčnosti a životnosti zařízení na úpravu spalín (katalyzátory a DPF).

Norma zároveň stanovuje maximální limity kouřivosti zachycené v následující tabulce.

Opacita [%]	Režim motoru
20	akcelerace
15	Decelerace
50	špičky výkonu

Tabulka 14: Limity kouřivosti podle normy ISO 8178

Opacita je míra zeslabení intenzity světla při průchodu dýmem.

Tabulka současných limitů Úrovně 4 (Tier 4) pro motory s výkonem nižším než 560 kW (jednotky polutantů jsou uvedeny v g/kWh, jednotky uvedené v závorkách jsou g/bhp-h):

Výkon motoru	Rok	CO [g/kWh] [(g/bhp-h)]	Nemetanové uhlovodíky [g/kWh] [(g/bhp-h)]	Nemetanové uhlovodíky +NO _x [g/kWh] [(g/bhp-h)]	NO _x [g/kWh] [(g/bhp-h)]	TZL (PM) [g/kWh] [(g/bhp-h)]
kW<8 (hp<11)	2008	8 (6)	-	7.5 (5.6)	-	0.4 ^a (0.3)
8≤kW<19 (11≤hp<25)	2008	6.6 (4.9)	-	7.5 (5.6)	-	0.4 (0.3)
19≤kW<37 (25≤hp<50)	2008	5.5 (4.1)	-	7.5 (5.6)	-	0.3 (0.22)
	2013	5.5 (4.1)	-	4.7 (3.5)	-	0.03 (0.022)
37≤kW<56 (50≤hp<75)	2008	5 (3.7)	-	4.7 (3.5)	-	0.3 ^b (0.22)
	2013	5 (3.7)	-	4.7 (3.5)	-	0.03 (0.022)
56≤kW<130 (75≤hp<175)	2012-2014 ^c	5 (3.7)	0.19 (0.14)		0.4 (0.3)	0.02 (0.015)
130≤kW≤560 (175≤hp≤750)	2011-2014 ^d	3.5 (2.6)	0.19 (0.14)		0.4 (0.3)	0.02 (0.015)

Tabulka 15: Současné emisní limity podle normy ISO 8178

- Ručně startované, vzduchem chlazené motory s přímým vstřikováním mohou splňovat pouze Úroveň 2 (2009) s volitelným limitem TZL 0,6 g/kWh (2010).
- 0,4 g/kWh (Úroveň 2) jestliže výrobce vyhoví 0,03 g/kWh (2012)
- TZL a CO vyhovění předpisu od 2012. NO_x a HC - 1. možnost:50 % motorů musí vyhovět v roce 2012 – 2013; 2. možnost:25 % motorů musí vyhovět v letech 2012-2014 s platností od 31. 12. 2014.
- PM a CO splnění od 2011; NO_x a HC 50 % motorů musí vyhovět od 2011-2013

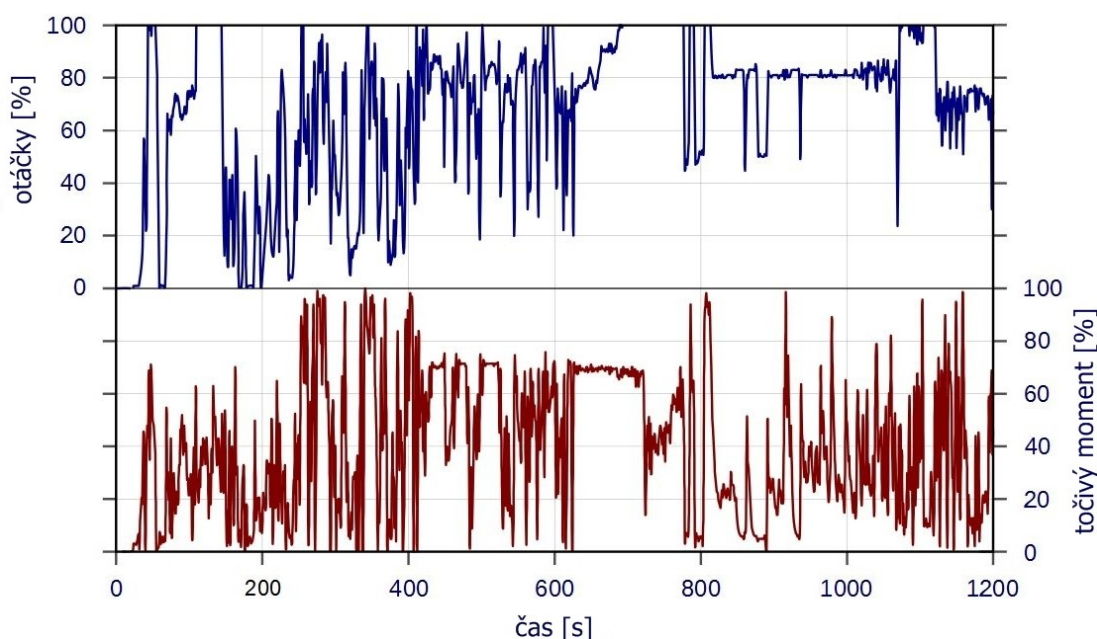
Testovací cykly pro jednotlivé druhy motorů jsou vyobrazeny v následující tabulce, kde jsou rovněž zachyceny i váhové faktory jednotlivých cyklů. Testovací cyklus C1 je zároveň nazýván Stacionárním cyklem NRSC (Non-Road Steady Cycle).

Otáčky	jmenovité					střední					n_{vol}
Točivý moment [%]	100	75	50	25	10	100	75	50	25	10	0
Číslo cyklu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Název cyklu											
Typ motorů: Nesilniční vozidla											
Typ C1	0,15	0,15	0,15	-	0,10	0,10	0,10	0,10	-	-	0,15
Typ C2				0,06		0,02	0,05	0,32	0,30	0,10	0,10
Typ motorů: S konstantními otáčkami											
Typ D1	0.30	0.50	0.20	-	-	-	-	-	-	-	-
Typ D2		0.05	0.25	0.30	0.10	-	-	-	-	-	-
Lokomotivy											
Type F	0.25	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-	0.60
Náčiní pro zahradu, sekačky atd.											
Typ G1	-	-	-	-	-	0.09	0.20	0.29	0.30	0.07	0.05
Typ G2	0.09	0.20	0.29	0.30	0.07	-	-	-	-	-	0.05
Typ G3	0.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10
Námořní a lodní doprava											
Typ E1	0.08	0.11	-	-	-	-	0.19	0.32	-	-	0.30
Typ E2	0.20	0.50	0.15	0.15	-	-	-	-	-	-	-
Lodní aplikace využívající lodní šrouby - Typ E3											
Číslo cyklu	1	2	3	4							
Výkon [%]	100	75	50	25							
Otáčky [%]	100	91	80	63							
V. f.	0.2	0.5	0.15	0.15							
Lodní aplikace využívající lodní šrouby - Typ E4											
Číslo cyklu	1	2	3	4	5						
Výkon [%]	100	80	60	40	0						
Otáčky [%]	100	71,6	46,5	25.3	n_{vol}						
V. f.	0,06	0,14	0,15	0,25	0,4						
Lodní aplikace využívající lodní šrouby - Typ E4											
	1	2	3	4	5						
Výkon [%]	100	80	60	40	0						
Otáčky [%]	100	71,6	46,5	25.3	n_{vol}						
V. f.	0,06	0,14	0,15	0,25	0,4						

Tabulka 16: Váhové faktory pro jednotlivé cykly normy 8178

Poznámka: n_{vol} – volnoběžné otáčky; V. f. – Váhový faktor

Dynamický testovací cyklus pro vznětové nesilniční motory (NRTC) je platný od roku 2011, a to pro motory s výkonem od 130 kW do 150 kW. V následujících letech začínal postupně platit i pro slabší motory. Motory s výkonem vyšším než 560 kW však nejsou tímto režimem testovány. Tento testovací cyklus je při zkoušení proveden dvakrát. Prvně je tento test proveden se studeným startem, jež má váhový faktor 5 %. Při zahřátém startu je naopak váhový faktor 95 %. Následující obrázek zachycuje průběh dynamického cyklu. Zkušební režim trvá 1238 s.



Obrázek 22: Profil dynamického testu pro nesilniční motory

Nesilniční motory splňující Úroveň 4 také musí zároveň splnit NTE standard. Tímto standardem je míněna životnostní zkouška, při které emise nesmějí překročit více než 1,25 násobek limitu dané znečišťující látky. Toto nařízení začalo platit v roce 2011 pro nesilniční motory s výkonem vyšším než 130 kW. V dalších letech byly vydány stejná nařízení i pro motory jiných výkonových kategorií. Tato zkouška je časově náročná, jelikož simuluje životnost motoru, čímž se předchází zvýšení produkce emisí následkem opotřebením motoru. Díky těmto opatřením je odhadováno, že bude ušetřeno až 12 000 předčasných úmrtí.

Pro splnění těchto testů jsou používána paliva s odlišnou kvalitou. Úroveň 1-3 využívala palivo s maximálním obsahem síry 2000 ppm. Oproti tomu Úroveň 4 už může mít maximální obsah této nečistoty 7-15 ppm (od roku 2011).

9.2 Vývoj emisních limitů nesilničních motorů

V tabulce jsou zachyceny Úrovně 1-3 emisní normy 8178 a to od roku 1996.

Výkon motoru	Úroveň	Rok	CO	HC	Nemetanové uhlovodíky +NO _x	NO _x	TZL (PM)
kW<8 (hp<11)	1	2000	8,0 (6,0)	-	10,5 (7,8)	-	1,0 (0,75)
	2	2005	8,0 (6,0)	-	7,5 (5,6)	-	0,8 (0,6)
8≤kW<19 (11≤hp<25)	1	2000	6,6 (4,9)	-	9,5 (7,1)	-	0,8 (0,6)
	2	2005	6,6 (4,9)	-	7,5 (5,6)	-	0,8 (0,6)
19≤kW<37 (25≤hp<50)	1	1999	5,5 (4,1)	-	9,5 (7,1)	-	0,8 (0,6)
	2	2004	5,5 (4,1)	-	7,5 (5,6)	-	0,6 (0,45)
37≤kW<75 (50≤hp<100)	1	1998	-	-	-	9,2 (6,9)	-
	2	2004	5,0 (3,7)	-	7,5 (5,6)	-	0,4 (0,3)
	3	2008	5,0 (3,7)	-	4,7 (3,5)	-	*
75≤kW<130 (100≤hp<175)	1	1997	-	-	-	9,2 (6,9)	-
	2	2003	5,0 (3,7)	-	6,6 (4,9)	-	0,3 (0,22)
	3	2007	5,0 (3,7)	-	4,0 (3,0)	-	*
130≤kW<225 (175≤hp<300)	1	1996	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54 (0,4)
	2	2003	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2 (0,15)
	3	2006	3,5 (2,6)	-	4,0 (3,0)	-	*
225≤kW<450 (300≤hp<600)	1	1996	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54 (0,4)
	2	2001	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2 (0,15)
	3	2006	3,5 (2,6)	-	4,0 (3,0)	-	*
450≤kW<560 (600≤hp<750)	1	1996	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54 (0,4)
	2	2002	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2 (0,15)
	3	2006	3,5 (2,6)	-	4,0 (3,0)	-	*
kW≥560 (hp≥750)	1	2000	11,4 (8,5)	1,3 (1,0)	-	9,2 (6,9)	0,54 (0,4)
	2	2006	3,5 (2,6)	-	6,4 (4,8)	-	0,2 (0,15)

*Limit není stanoven, motory musí splňovat Úroveň 2 pro TZL

Tabulka 17: Vývoj emisních limitů podle NORMY 8178

Jednotky jednotlivých polutantů jsou g/kWh, jednotky uvedené v závorkách jsou g/bhp·h.

Jak je vidět, pro většinu motorů byly emisní limity velmi zpřísněny. Důvodem tak rapidního snížení množství polutantů v ovzduší je i současně narůstající počet nesilničních motorů, jež by mohl mít neblahý vliv na stav ozonové vrstvy [47].

10. Emisní limity automobilových motorů

V Evropě jako první platila emisní norma EHK 15 (1971). Až v roce 1992 byla norma nahrazena normou EURO 0, která se do současné doby upravila až do podoby šesté generace. Dle této normy jsou automobily rozděleny do několika emisních kategorií (M, N₁, N₂ a také dle způsobu zapálení směsi)¹. Pro osobní automobily a lehká užitková vozidla je norma značena arabskými číslicemi, pro nákladní automobily a autobusy se používají číslice římské [48].

Následující tabulka zachycuje současnou podobu emisních limitů pro osobní automobily emisní normy EURO 6.

Kat.	Tř.	Referenční hmotnost RM [kg]	Mezní hodnoty												
			Hmotnost CO		Hmotnost HC		Hmotnost nemetan. uhlovodíků		Hmotnost NO _x		Hmotnost THC+NO _x		Hmotnost částic (1)		Počet částic [# / km] (2)
			[mg/km]												
			Z	VZ	Z	VZ	Z	VZ	Z	VZ	Z	VZ	Z (3)	VZ	VZ (4)
M ₁	-	Všechna	1000	500	100	-	68	-	60	80	-	170	5/4,5	5/4,5	6x10 ¹¹
N ₁	I	≤1305	1000	500	100	-	68	-	60	80	-	170	5/4,5	5/4,5	6x10 ¹¹
	II	1305 < RM ≤ 1760	1810	630	130	-	90	-	75	105	-	195	5/4,5	5/4,5	6x10 ¹¹
	III	1760 < RM	2270	740	160	-	108	-	82	125	-	215	5/4,5	5/4,5	6x10 ¹¹
N ₂	-	-všechna	2270	740	160	-	108	-	82	125	-	215	5/4,5	5/4,5	6x10 ¹¹

Tabulka 18: Emisní norma EURO 6 [49]

- 1) Před používáním mezní hodnoty 4,5 bude zavedená revidovaná metoda měření
- 2) Před používáním této mezní hodnoty bude zavedena nová metoda měření
- 3) Norma je použita pouze u motorů s přímým vstřikem paliva
- 4) Před používáním této mezní hodnoty bude zavedena nová metoda měření

Počet částic pro zážehové motory byl stanoven na 6x10¹¹.

Důvodem vytvoření tak přísných emisních limitů je zvýšení kvality inhalovaného vzduchu, ale také stále se zvyšující počet osobních a užitkových vozů (s motory zážehovými i vznětovými). Pro tyto emisní limity byly vytvořeny zkušební testy UDC a EUDC.

UDC – Urban driving cycle – režim simulující městský provoz (780 s)

EUDC – režim simulující mimoměstský provoz (400 s)

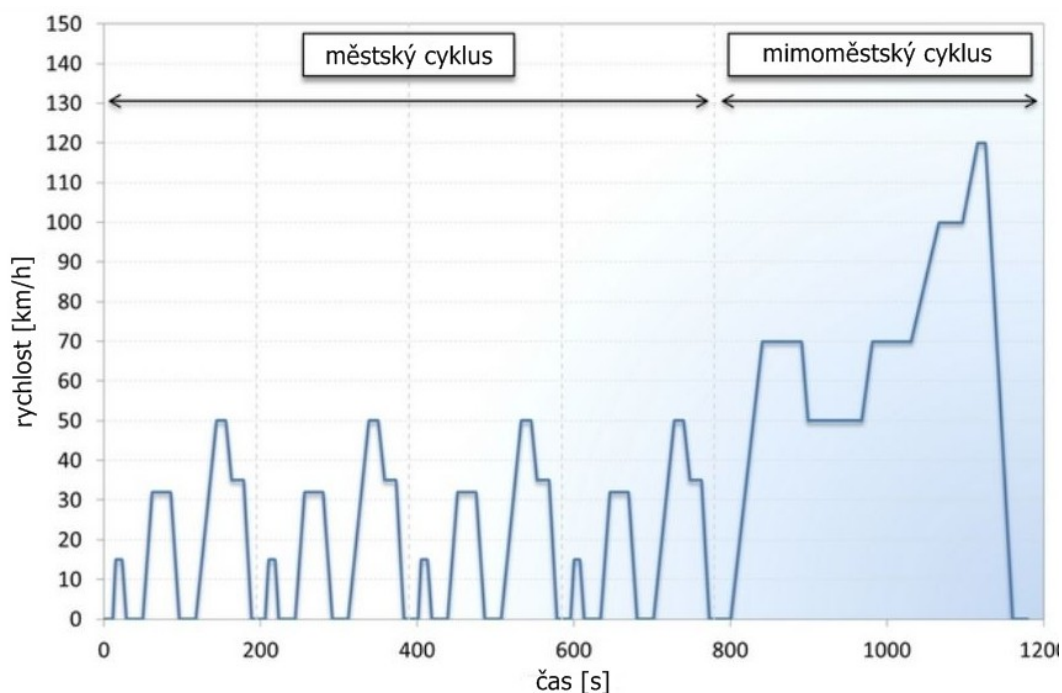
¹ M – Motorová vozidla kategorie M se čtyřmi koly, tříděná dle zákona č. 56/2001

N₁ – Vozidla s hmotností do 3500kg

N₂ – Vozidla s hmotností od 3500kg do 12 000kg

Z – zážehové motory; VZ – vznětové motory

Tyto dva cykly dohromady tvoří New European driving cycle (NEDC), který trvá 1180s, dosahuje rychlosti až 120km/h a celková ujetá vzdálenost je 11,023 m [50].



Obrázek 23: Evropský cyklus NEDC [51]

10.1 Vývoj emisních limitů v Evropě

První předpis platný v Evropě byla směrnice EHK 15, jež vstoupila v platnost v roce 1971. Na konci 80. let vznikl předpis EHK 83, výsledek mnoha přepracování směrnice EHK 15. Počátkem 90. let v rámci jednotné legislativy ve státech Evropské unie vyšly nové emisní předpisy, pro které byl základem předpis EHK 83. Moderní směrnice už nesly název dle zvyklostí EU. V současné době jsou tyto předpisy už známější spíše pod názvem EURO x, kde x představuje číslo předpisu. Následující tabulka zachycuje vývoj emisních limitů EURO od roku 1992 [52].

předpis	Rok a měsíc	CO g/km	HC g/km	HC+NO _x g/km	NO _x g/km	PM g/km	Množství částic Počet/km
Euro 1	1992/07	2,72	-	0,97	-	0,14	-
Euro2 IDI	1996/01	1	-	0,7	-	0,08	-
Euro 2 DI	1996/01	1	-	0,9	-	0,1	-
Euro 3	2000/01	0,64	-	0,56	0,5	0,05	-
Euro 4	2005/01	0,5	-	0,3	0,25	0,025	-
Euro 5a	2009/09	0,5	-	0,23	0,18	0,005	-
Euro 5b	2011/09	0,5	-	0,23	0,18	0,005	6,0x10 ¹¹
Euro 6	2014/09	0,5	-	0,17	0,08	0,005	6,0x10 ¹¹

Tabulka 19: Vývoj emisních limitů EURO pro osobní automobily [53]

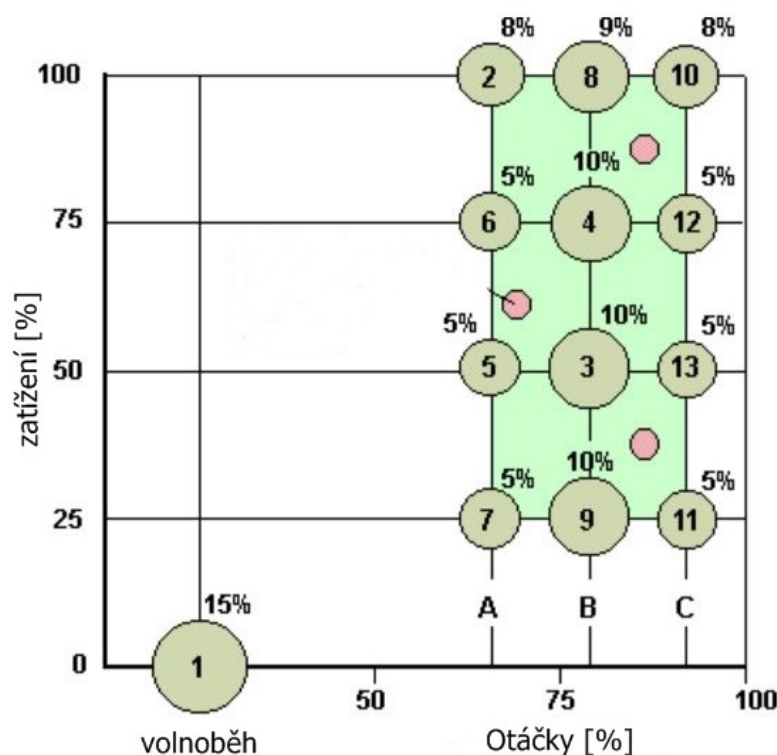
Na ukázkou je uveden vývoj emisních limitů pro užitkové automobily se vznětovým motorem od roku 2005 (g/km).

Předpis a rok	CO		NO _x		PM ^a		HC	Nemetan. uhlovodíky	CH ₄ ^c
	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	ESC	ETC	ETC
EURO IV 2005	1,5	4,0	3,5	3,5	0,02	0,46	0,03	0,55	1,10
EURO V 2008	1,5	4,0	2,0	2,0	0,02	0,46	0,03	0,55	1,10
EURO VI 2013	1,5	4,0	0,4	0,46	0,01	0,13	0,01	0,16 ^b	0,50

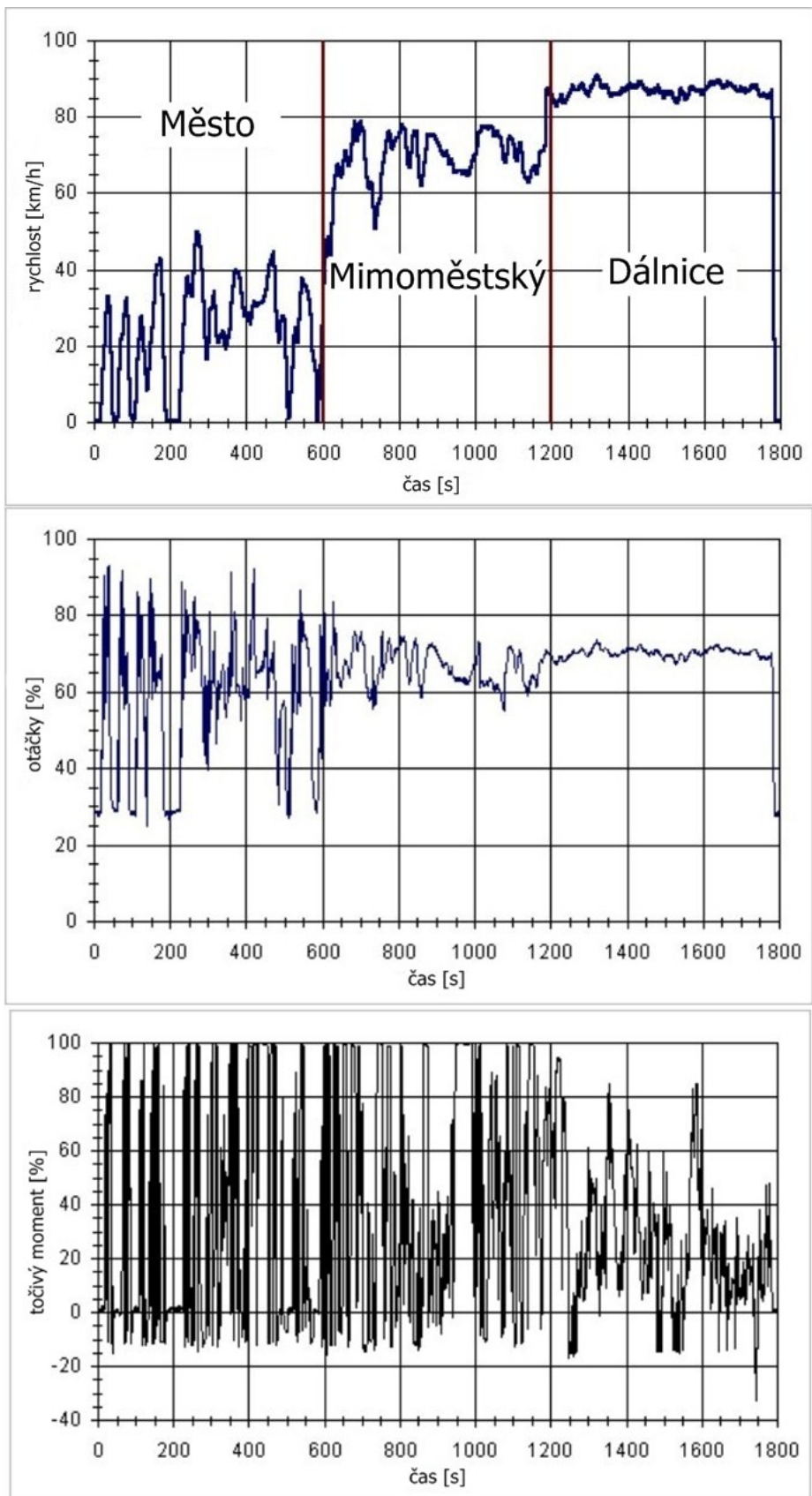
Tabulka 20: Vývoj emisních limitů užitkových automobilů [53]

- a) neplatné pro motory spalující zemní plyn
- b) suma všech uhlovodíků vznětových motorů
- c) platné pouze pro motory spalující zemní plyn; pro EURO VI platné i pro LPG

Pro užitkové automobily byly vytvořeny dva cykly (ESC – Evropský stacionární cyklus; ETC – Evropský dynamický cyklus). Stacionární cyklus je měřen s různými zatíženími a při různých otáčkách ve vyměřených časových intervalech. Oproti tomu dynamický cyklus je složen ze tří částí s různými průměrnými rychlostmi. U tohoto cyklu je zároveň měněno zatížení a otáčky [54] [55].



Obrázek 24: Schéma Evropského stacionárního cyklu [54]

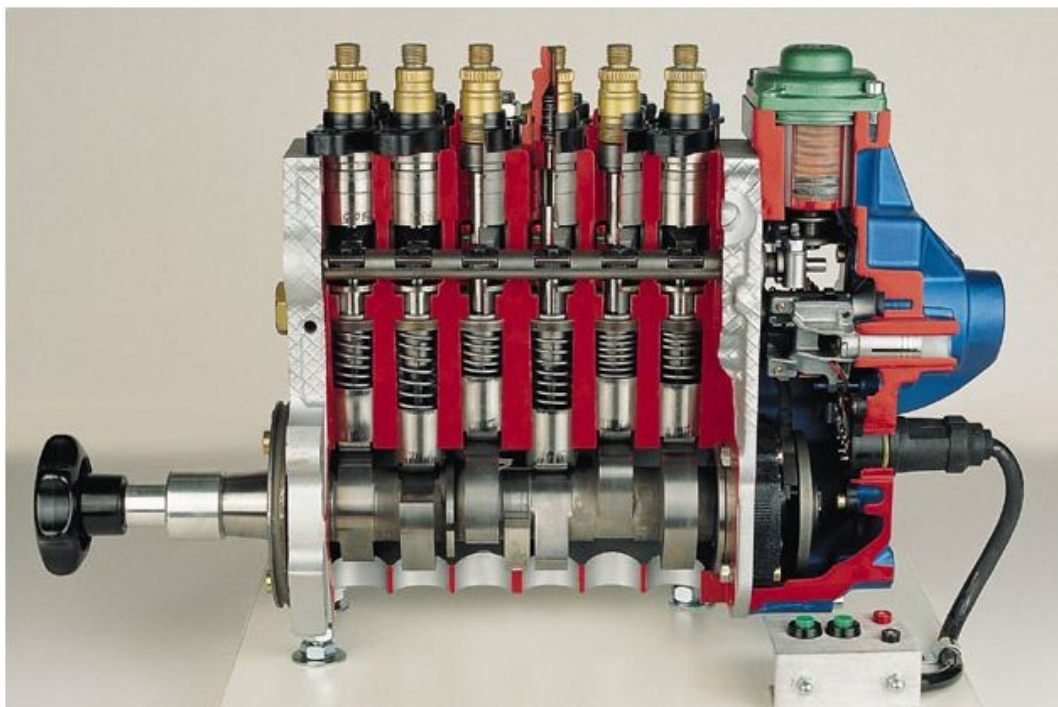


Obrázek 25: Evropský dynamický cyklus [55]

11. Hlavní konstrukční změny a jejich dopad na emise

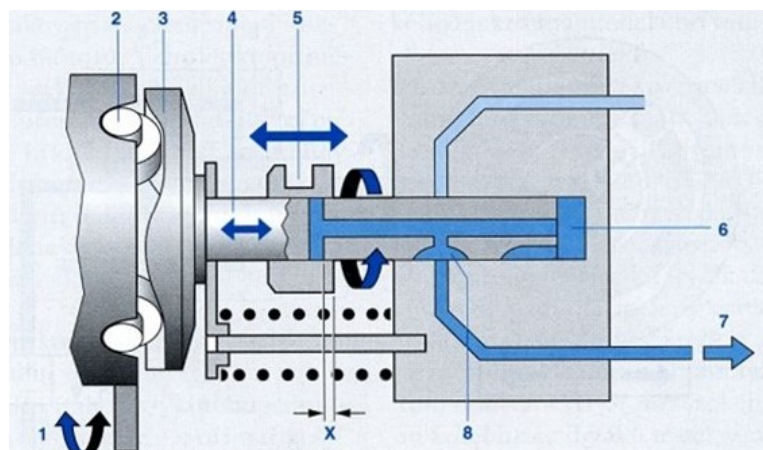
11.1 Inovace palivových systémů vznětových motorů

Jako první bylo zkonstruováno řadové vstřikovací čerpadlo. Toto čerpadlo disponovalo vstřikovacími tlaky v rozmezí 60-135 MPa. Řadová vstřikovací čerpadla mají pro každý válec jeden element, který se skládá z válce a pístu čerpadla. Píst čerpadla se pohybuje ve směru dodávky nahoru působením vačkového hřídele, integrovaném ve vstřikovacím čerpadle poháněném motorem a vrací se zpět působením pružiny pístu. Jednotlivé elementy čerpadla jsou převážně uspořádány v řadě. Zdvih pístu řadových čerpadel je neměnný. Řadové vstřikovací čerpadlo se zdvihovým šoupátkem má kluzně uložené šoupátko na pístu čerpadla [56].



Obrázek 26: Řadové vstřikovací čerpadlo šestiválcového motoru [57]

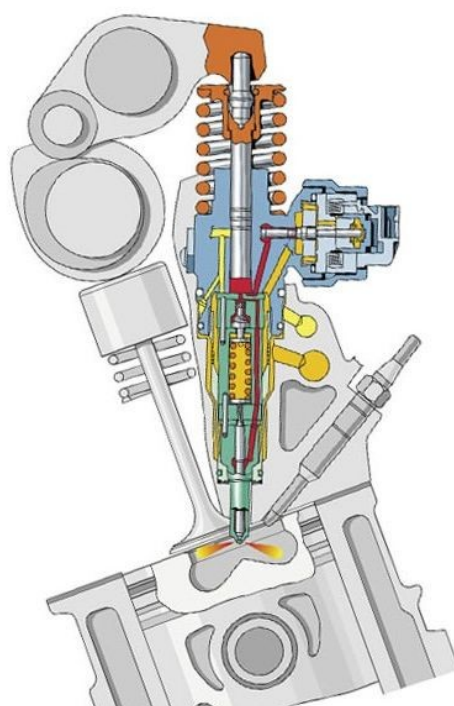
Následnou inovací bylo zkonstruováno rotační čerpadlo. Rotační čerpadla disponují vstřikovacím tlakem až 180 MPa. Od řadového vstřikovacího čerpadla se liší tím, že mají pouze jeden vysokotlaký element pro všechny válce. Palivo je dopravováno do vysokotlakového prostoru pomocí lopatkového čerpadla. Vytváření vysokého tlaku převezme axiální píst (nebo více radiálních). Rotující centrální rozváděcí píst otvírá a zavírá přívod kanály vedoucí palivo k jednotlivým válcům. Trvání doby vstřiku lze měnit regulačním šoupátkem nebo vysokotlakým elektromagnetickým ventilem.



1 – Dráha přesuvníku vstříku na unášeči s kladkami, 2 – kladka, 3 – axiální vačka 4 – axiální píst, 5 – regulační šoupátko, 6 – vysokotlaký prostor, 7 – přívod paliva k trysce, 8 – řídicí drážka, x – využitelný zdvih

Obrázek 27: Princip funkce rotačního čerpadla [56]

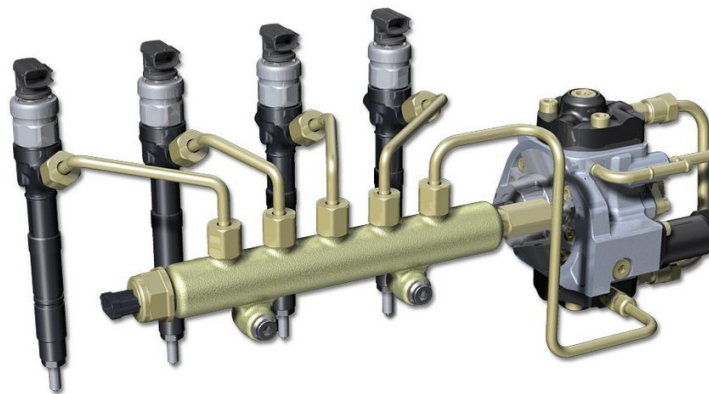
Dalším pokrokem bylo vytvoření sdružených vstřikovacích jednotek, jež dosahují maximálních vstřikovacích tlaků až 220 MPa. Systém je nazýván UIS (Unit Injection System), popřípadě PD (Pumpdüse). U tohoto systému tvoří vstřikovací čerpadlo a vstřikovací tryska jednu jednotku. Pro každý válec je v hlavě motoru jedna tato jednotka, jež je poháněna přímo přes zdvihátko nebo nepřímo přes vahadlo od vačkového hřídele. Vzhledem k tomu, že tento systém nevyužívá žádná vysokotlaká vedení, je možné dosáhnout tak vysokých tlaků. Vstřik je ovládán elektronickou řídicí jednotkou a řízen vysokotlakým elektromagnetickým ventilem [56].



Obrázek 28: Řez systémem UIS [58]

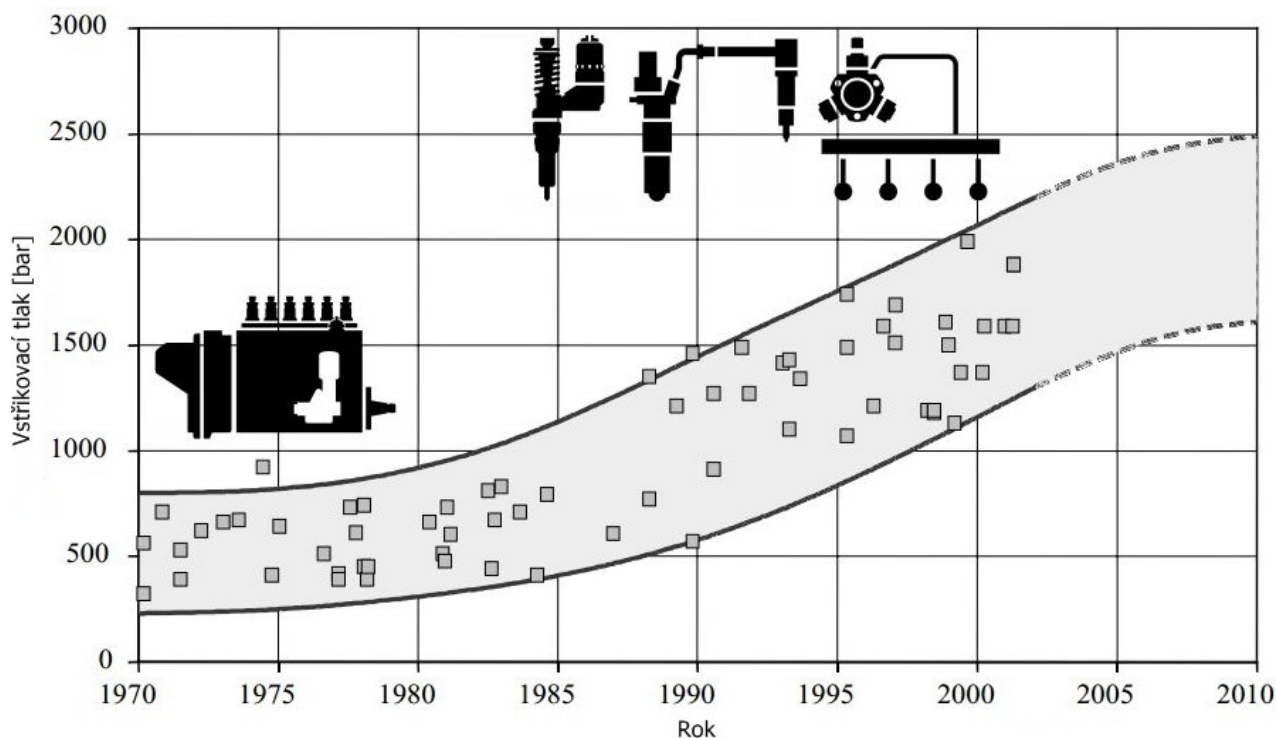
Dalším vylepšením systému PD byl vytvořen systém PLD (čerpadlo-vedení-tryska), hlavní výhodou oproti původnímu systému je snadná montáž a menší prostorové nároky v hlavě motoru. Stlačené palivo je čerpadlem vedeno k trysce krátkým vysokotlakým vedením.

Nejmodernějším systémem používaným ve vznětových motorech je systém s tlakovým zásobníkem (Common Rail), jež je schopen vytvořit maximální vstřikovací tlak přes 250 MPa. V tomto systému je od sebe oddělena sekce vytváření tlaku a sekce vstřikování. Vstřikovací tlak vytváří a realizuje vysokotlaké čerpadlo nezávisle na otáčkách motoru a vstřikovaném množství. Tlakové palivo je připraveno v zásobníku tlaku (Rail). Každý válec má zabudovaný vlastní vstřikovač, který je ovládán pomocí elektromagnetického ventilu nebo na principu piezoelektrického jevu [56].



Obrázek 29: Komponenty systému Common Rail [59]

Hlavní výhodou zvyšování vstřikovacích tlaků je velmi jemné rozprášení paliva, jeho rychlé odpaření a vznik kvalitní směsi. Spalování motoru je zároveň ekonomičtější za snížení produkce škodlivých emisí. Systém Common Rail snížil produkci oxidů uhlíku o 40 %, uhlovodíků o 50 % a pevných částic až o 60 % oproti předchozím druhům vstřikování. Nespornou výhodou je snížení měrné spotřeby paliva a s tím související snížení produkce oxidu uhličitého (cca 20 %) [60].



Obrázek 30: Vývoj vstříkovacích tlaků pro jednotlivé vstříkovací systémy [61]

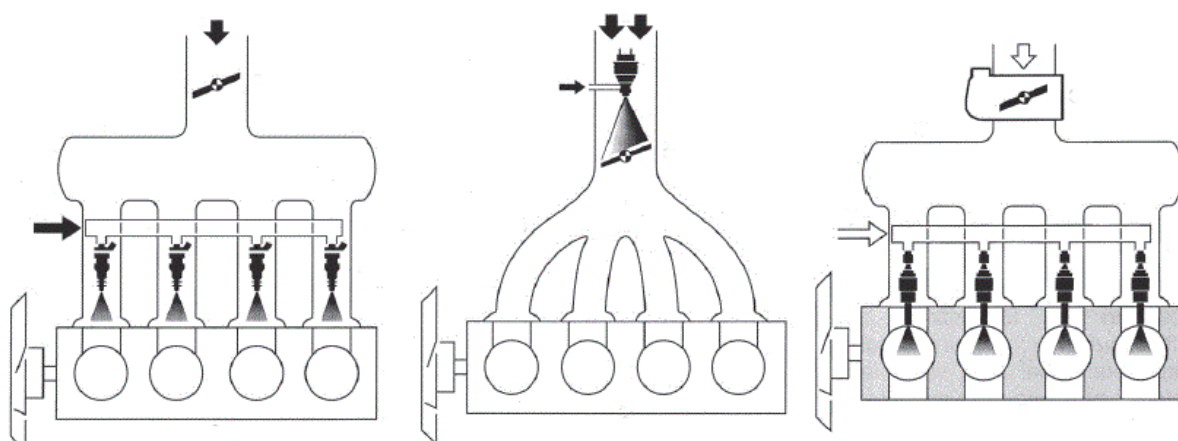
11.2 Inovace palivových systémů zážehových motorů

Jako první byly pro směšování vzduchu a paliva používány karburátory. V první fázi byly karburátory odpařovací, u kterých nasávaný vzduch prostupoval vrstvou paliva a sytil se jeho parami. Zvětšení odparu bylo způsobeno ohřevem od výfukových plynů nebo chladicí kapaliny. Takto vytvořená směs je velmi bohatá a je ředěna přidavným šoupátkem nebo klapkou. Až roku 1893 byl zaveden princip rozprašování paliva do proudícího vzduchu. Palivo bylo přiváděno tryskou umístěnou v nejmenším průřezu difuzoru. Množství směsi se zde řídí ručním šoupátkem. Tento princip je základem všech karburátorů, které se používají v dnešní době už spíše v zahradních sekačkách a dalších nástrojích [56]. Tento systém je však nedokonalý, jelikož směs není správně zhomogenizována a tlak paliva je velmi nízký. Nevýhodou tohoto systému jsou i vyšší emise v řádu desítek procent ale také konstrukční složitost posledních generací karburátorů používaných například v automobilech [62].

Další vývoj směřoval směrem nepřímého vstříkávání, které už bylo plně elektronicky řízené. Pro regulaci směsi bylo využíváno měření množství nasávaného vzduchu pomocí tlakového čidla. Tento systém byl prvně zaveden v roce 1967. U tohoto systému jsou vstříkované přerušované dávky paliva před sací ventil do sacího potrubí pomocí elektromagnetických ventilů. Dávka paliva je řízena

elektronickou řídicí jednotkou, která zpracovává informace o podtlaku v sacím potrubí, otáčkách motoru, poloze škrtkové klapky a provádí korekci dle naprogramovaných hodnot.

Poslední generací vstřikování je přímý vstřik do válce, kde je směs paliva a vzduchu vytvářena přímo ve válci. Při otevření sacího ventilu proudí sacím kanálem pouze vzduch a palivo je vstřikováno do válce speciálními vstřikovacími ventily. Přímé vstřikování je známé už dlouhou dobu, ale zejména kvůli složitému konstrukčnímu řešení bylo nedostatečně rozšířené. Vzhledem ke zvyšujícím se nárokům ze strany ochrany ovzduší jsou tyto systémy v současné době standardem, a to hlavně kvůli výraznému snížení emisí a zároveň i spotřeby paliva. Vstřikovací tlak tohoto systému je až 12 MPa, což způsobí kvalitní homogenizaci směsi. Součástí systému je i vysokotlaké čerpadlo, které zvýší tlak paliva dopravovaného do zásobníku na 5-12 MPa [56].



Zleva: nepřímé vícebodové vstřikování, jednobodové nepřímé vstřikování, přímé vstřikování do válce

Obrázek 31: Systémy vstřikování paliva [63]

11.3 Vývoj systému recirkulace výfukových plynů

Velmi důležitým prvkem snižování emisí oxidů dusíku spalovacích motorů je právě systém EGR (Exhaust Gas Recirculation), který vrací část výfukových plynů zpátky do spalovacího prostoru. Princip recirkulace spočívá v tom, že výfukové plyny s malým obsahem kyslíku lze považovat za inertní plyn, což znamená, že se nezúčastňují spalování přímo, ale pouze přejímají teplo vzniklé při hoření. Při snížení spalovacích teplot zároveň dochází ke snížení produkce NO_x [56]. Na druhou stranu je značnou nevýhodou zanášení potrubí vedoucího výfukové plyny zpět do válce

pevnými částicemi. Následující tabulka zachycuje vývoj systému EGR jako reakci na zpřísnění emisních limitů.

Předpis	Limit NO_x	Systém EGR
Osobní automobily		
EURO 1,2	NO _x +HC=0,97-0,7 g/km	Hlavní systém snížení NO _x u vznětových motorů, systém nevyužíval chlazení výfuk. plynů.
EURO 3,4	NO _x = 0,5-0,25 g/km	Chlazení EGR zároveň byl zaveden jako standard pro osobní automobily splňující EURO 4
Užitkové automobily		
EURO IV	NO _x =3,5 g/kWh	Zavedeno některými automobilkami s využitím technologie SCR a močoviny
EURO V	NO _x =2 g/kWh	
EURO VI	NO _x =0,4 g/kWh	Zavedení technologie SCR a močoviny většinou výrobci
Nesilniční motory		
Úroveň 3	NO _x =4,0 g/kWh	John Deere zavedl chlazený systém EGR, většina výrobců využívala nechlazený
Úroveň 4	NO _x =4 g/kWh	Většina výrobců používá chlazený systém EGR spolu s močovinou a SCR technologií

Tabulka 21: Vývoj systému EGR jako reakce na zpřísnění emisních limitů [64]

11.4 Vývoj katalyzátorů

První vozidlové katalyzátory využívaly přisávání vzduchu kvůli snížení množství uhlovodíků a oxidů uhlíku (pro bohatou směs). Katalyzátor byl podlouhlého tvaru s kruhovým průřezem, který nebyl výhodný kvůli samotnému proudění výfukových plynů. Díky tomuto tvaru a samotné konstrukci neměl katalyzátor tak vysokou účinnost. Zvýšení účinnosti bylo dosaženo alternativou, která se používá dodnes. Současné katalyzátory jsou složeny z keramického monolitu, nosné konstrukce a schránky z ocelového nerezového plechu. Na keramickém monolitu je nanášena aktivní vrstva z drahých kovů, která vyvolává a urychluje katalytické reakce. Tloušťka této vrstvy je asi 20-150 μm a plocha, kterou pokrývá je přibližně stejně velká jako fotbalové hřiště. Nosič je tvořen z materiálů, které mají malou tepelnou roztažnost, aby nedocházelo k popraskání monolitu vlivem teplotního namáhání. Ochranná schránka katalyzátoru je svary spojena s dalšími částmi výfukového potrubí [65].

Ke zpřísnění emisních limitů dochází pravidelně každých několik let, což je dáno pokrokem výrobců motorů, kteří dokážou snížit produkci škodlivých emisí pod emisní limit s dostatečnou rezervou. Tyto nižší hodnoty vyprodukovaných emisí jsou následně základem diskuzí pro další zpřísnění emisních limitů. Výhodou tohoto

přístupu je, že v průběhu 2-3 let nejsou nutné velmi zásadní konstrukční změny. Samotný vývoj je však neúnavným bojem s konkurencí. Další zásadní problém spočívá v produkci CO₂, která není legislativou regulována. Samotní výrobci motorů a automobilů však mají tendenci tento produkt spalování a katalytických reakcí omezit.

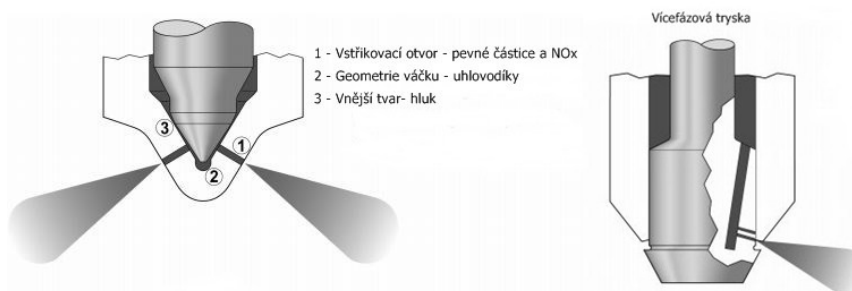
V současnosti je velkým problémem produkce emisí na začátku měření cyklu NEDC, jelikož je začínán studeným startem. Při tomto režimu je až 80% z celkových emisí uhlovodíků vyprodukováno během prvních 200 s cyklu. Tato část cyklu představuje nejčastější jízdní režim v městských oblastech. Většina takových jízd není delší než 3 km (cesta do zaměstnání, nákup,...). Rapidního zlepšení kvality ovzduší ve městech by se tedy dosáhlo, pokud by byl katalyzátor ohřátý na pracovní teplotu okamžitě, popřípadě s malou prodlevou od studeného startu [66].



Obrázek 32: Řez katalyzátorem [67]

11.5 Konstrukční úpravy vstřikovačů vznětových motorů

Závislost vzniku emisí na konstrukčním provedení vstřikovače a jehly hrají u vznětových motorů významnou roli. Parametry jako průměr, délka, vnitřní hrana a celková geometrie vstřikovacího otvoru mají velký význam. Samotný vstřikovač zasahuje do spalovacího prostoru a má výrazný vliv i na parametry hoření. Tvar vstřikovacích otvorů má vliv hlavně na tvorbu oxidů dusíku a pevných částic, zatímco provedení vnějšího tvaru vstřikovače ve spalovacím prostoru má vliv na hlučnost. Pokud je konstrukce s menším objemem spodního váčku vstřikovače, dochází ke snížení emisí uhlovodíků. Optimální průměr vstřikovacích otvorů snižuje obsah sazí. Při použití vícefázové trysky jsou razantně sníženy i emise pevných částic [61].



Obrázek 33: Konstrukční řešení vstřikovačů [61]

12. Přístroje na měření emisí

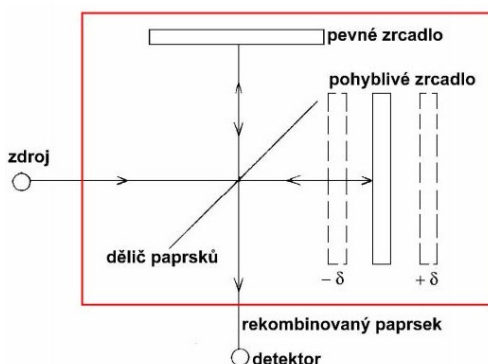
Přístrojů na měření emisí je celá řada. Pro měření na spalovacím motoru bude použit infračervený spektrometr, elektrochemický analyzátor a dále sestava plamenoionizačního s infračervenými analyzátoři.

12.1 Infračervený spektrometr

Infračervený spektrometr měří vzorek nedestruktivně a poskytuje informaci o jeho složení. Spektrometr získává hodnoty vibračních energií, které souvisí s pevností chemických vazeb a molekulovou geometrií vzorku.

Zdroj emituje spojité světlo v infračervené oblasti, které dopadá na dělič paprsků, pevné a pohyblivé zrcadlo. Děličem paprsků je polopropustné zrcadlo. Záření ze zdroje dopadá na dělič s 50% propustností pod úhlem 45° , kterým projde paprsek na pohyblivé zrcadlo. Druhá část vstupního záření je odražena na pevné zrcadlo. Paprsky se od obou zrcadel odrážejí zpátky na dělič, kde společně interferují. Interference se dělí na konstruktivní a destruktivní. Konstruktivní interference je jev, kdy je rozdíl obou vracejících se paprsků na děliči celým násobkem vlnové délky procházejícího záření.

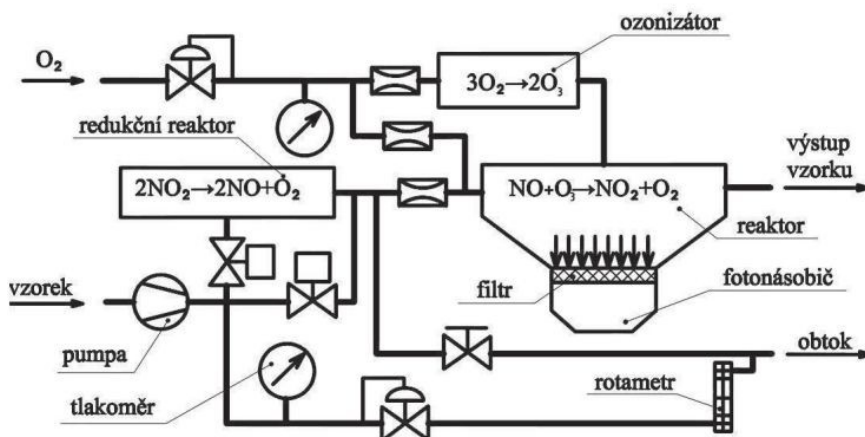
Pokud není tento rozdíl celým násobkem, dochází k interferenci destruktivní, což má za následek redukci intenzity. Rychlost pohybu zrcadla musí být přizpůsobena časové odezvě detektoru. Z jednoho pohybu zrcadla je zjištěn jeden interferogram, který je pomocí Fourierovy transformace převeden z časové oblasti na vlnočtové spektrum, které odpovídá jednomu pohybu zrcadla. S opakovaným pohybem zrcadla je následně spočítán průměrný interferogram. Přístroj pracuje jako jednopaprskový, proto dochází k porovnání paprsku dopadajícího na vzorek a paprsku, který vzorkem projde [68].



Obrázek 34: Schéma interferometru [68]

12.2 Analyzátor založený na principu chemické luminiscence - CLA

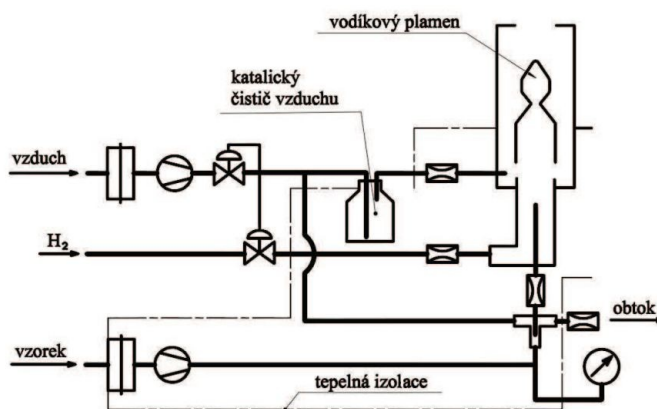
Tento typ analyzátoru se používá pro měření koncentrací oxidů dusíku. Princip jeho funkce vychází z předpokladu, že při některých chemických reakcích jsou vyzařovány fotony. Do chemické reakce vstupuje i ozon (O_3), který je vyráběn přímo v přístroji. Látkou vstupující do reakce je pouze oxid dusnatý. Pro zjištění koncentrace oxidů dusíku dojde k přepnutí elektromagnetických ventilů. Následně vzorek prochází katalyzátorem, kde dochází k redukci oxidu dusičitého na oxid dusnatý. Koncentrace NO_2 se zjistí rozdílem NO a NO_x [69].



Obrázek 35: Schéma chemiluminiscenčního analyzátoru [69]

12.3 Plamenoionizační analyzátor - FID

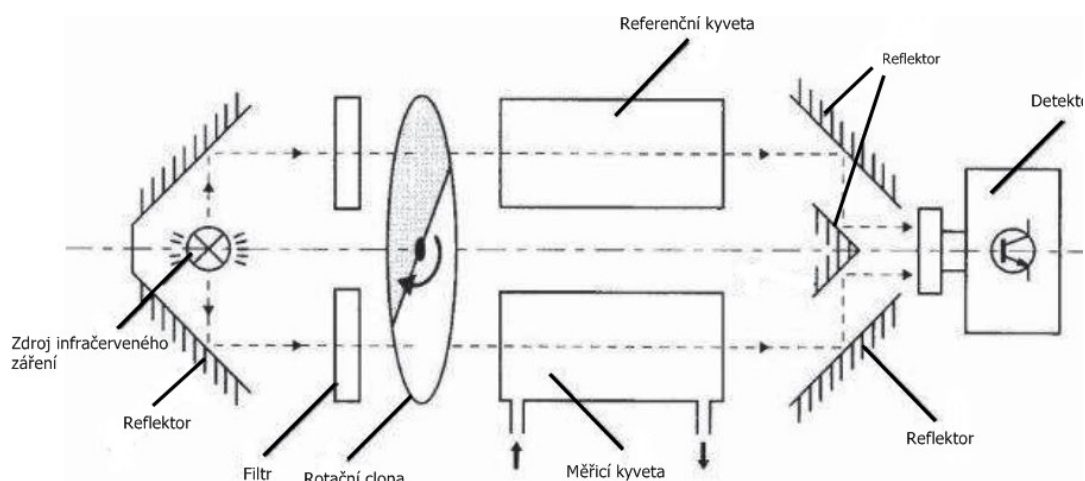
Analyzátor určený pro měření koncentrací uhlovodíků. Metoda je založena na principu měření elektrického proudu, který prochází ionizovaným plynem. Do plamene se přivádí vodík se syntetickým vzduchem (palivo) a měřený vzorek. Kolem plamene se vytvoří ionizovaný plyn, na kterém se měří proud. Proud je přímo úměrný množství uhlovodíků. Aby nedocházelo ke změně plamene, je vzduch s vodíkem mísen ještě před vstupem do hořáku [69].



Obrázek 36: Schéma plamenoionizačního analyzátoru [69]

12.4 Infračervený analyzátor – NDIR

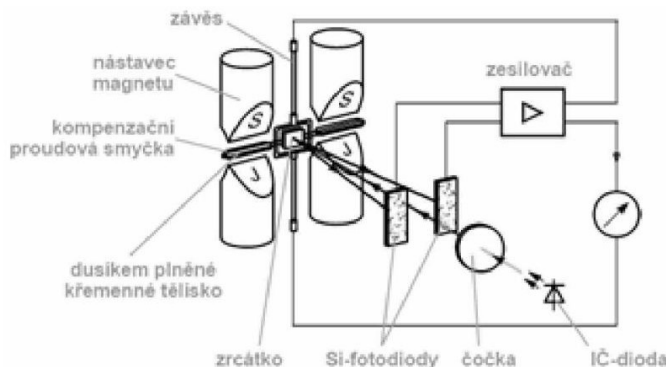
Analyzátor pro zjišťování koncentrací oxidu uhelnatého a uhlíčitého. Jeho princip vychází ze závislosti absorpčního koeficientu na vlnové délce záření. Tento koeficient je specifickou vlastností plynů obsahující minimálně dva různé atomy. Velkou nevýhodou tohoto analyzátoru je závislost na teplotě, kdy by při nižších teplotách mohlo docházet ke kondenzaci vzorku [69].



Obrázek 37: Schéma infračerveného analyzátoru [69]

12.5 Paramagnetický analyzátor

Tento analyzátor je určen k měření koncentrací kyslíku. Jeho princip je založen na paramagnetických vlastnostech kyslíku. Molekuly O_2 jsou ovlivňovány silným magnetickým polem. Sensor analyzátoru je složen ze dvou symetricky rozmístěných magnetických polí. Při průchodu kyslíku senzorem dojde k rotačnímu pohybu uvnitř senzoru. K rotující části senzoru je připojeno zrcadlo, na které dopadá paprsek světla. Tento paprsek se od zrcadla odráží ke dvěma fotodiodám. Díky otáčení senzorů vzniká krouticí moment, který je kompenzován momentem vytvořeným pomocí proudové smyčky. Moment je velmi malý, proto se používají fotodiody. Proud ve smyčce je přímo úměrný koncentraci kyslíku [70].



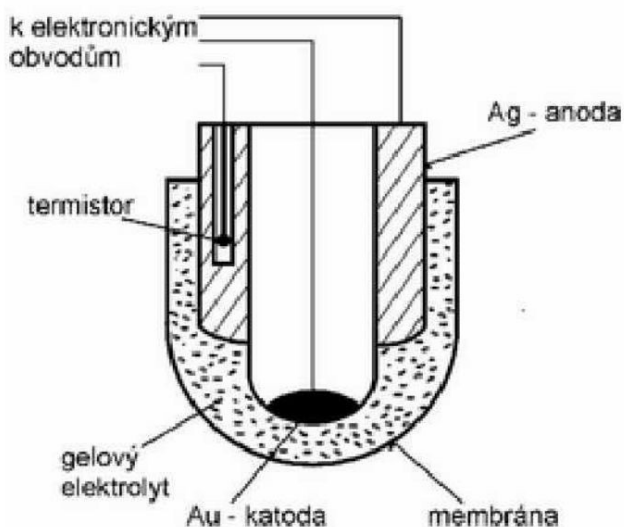
Obrázek 38: Schéma paramagnetického analyzátoru [70]

12.6 Elektrochemické analyzátory

Elektrochemické analyzátory jsou nejčastěji používány s ampérometrickým a galvanometrickým senzorem. Vzhledem k možnostem těchto senzorů jsou tyto analyzátory schopny zjistit koncentrace O_2 , NO_x , CO a CO_2 .

U ampérometrického senzoru je snímání založeno na měření proudu procházejícího mezi dvěma elektrodami. V měřicím obvodu je zdroj stejnosměrného elektrického napětí. Hodnota tohoto napětí musí odpovídat limitnímu proudu určované složky ve vzorku. Velikost limitního proudu je funkcí koncentrace měřené složky. Elektrochemický analyzátor s ampérometrickým senzorem je využíván pro měření koncentrací kyslíku.

Při využití galvanometrického senzoru dochází k přeměně nebo oxidaci měřených plynů na kovovém katalyzátoru (platina, zlato). Citlivost těchto senzorů je přibližně 3-30 ppm. Jsou používány hlavně jako přenosné přístroje na měření koncentrací jak kyslíku, tak toxických plynů [70].



Obrázek 39: Ampérometrický senzor [70]

12.7 Nejistoty měření analyzátorů

Měření emisí analyzátorů je prováděno s určitou nejistotou. Výsledky se zpravidla uvádějí se zárukou 95 % (spolehlivostní odhad měřené emise označovaný jako rozšířená nejistota měření). V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty a vlivy, které tuto nejistotu měření ovlivňují.

Typ analyzátoru	Kalibrační plyn	Repro.	Drift nulového bodu	Drift koncového bodu	Hladina šumu	linearita	Interference CO ₂	citlivost	Vliv tlaku a teploty	CHN
URAS 2T – NDIR – CO ₂	±2%	x	x	x	x	±2%	x	±0,5%	±2%	3,5%
URAS 3E – NDIR – CO	±2%	±0,5%	±1%	x	x	±1%	X	±0,5%	±2%	3,24%
HORIBA CLA150 – CLA	±2%	±1%	±1%	±1%	±1%	±1%	±2%	x	x	3,6%

Repro. – reprodukce; CHN – celková hodnota nejistoty

Tabulka 22: Hodnoty částečných nejistot a jejich původ v analyzátoch použitých pro měření

Výpočet celkové rozšířené nejistoty vzniklé v analyzátoch:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots}$$

Kde u je celková nejistota analyzátoru a u_1, u_2, \dots jsou dílčí hodnoty rozšířených nejistot.

Elektrochemický analyzátor MRU 95/3 CD má dílčí nejistotu při kalibraci ±2 % (rozšířená nejistota při kalibračních plynech, nulový a koncový bod), nejistotu citlivosti 2 %. U tohoto analyzátoru jsou dále uvedeny nejistoty pro jednotlivé měřené složky. Pro kyslík je tato hodnota ≤ 0,2 % absolutně, pro oxid uhelnatý ± 5 %, stejně jako pro NO_x, NO a NO₂. U tohoto analyzátoru jsou však v těchto hodnotách započítány všechny ovlivňující faktory. U oxidu uhelnatého a oxidů dusíku je hodnota nejistoty udávána z naměřené hodnoty.

13. Měření emisí spalovacího motoru a porovnání měřicích zařízení

Měření bylo provedeno dne 15. 5. 2015 na čtyřválcovém motoru. Měření probíhalo v laboratořích KVM TUL v budově L.

Atmosférické podmínky: $p_{atm}=967$ kPa ; $T_{vzduch}=23,7$ °C.

Motor	Zážehový
Počet válců	4
Počet ventilů	16
Zdvihový objem	1598 cm ³
Nejvyšší výkon	76kW při 5700 1/min
Nejvyšší točivý moment	140Nm při 3700 1/min
Vrtání	76,5 mm
Zdvih	86,9 mm
Ventilové rozvody	DOHC

Tabulka 23: Technické parametry měřeného motoru

Tento motor byl napojen na brzdu pracující na principu vířivých proudů. Pro měření byly použity čtyři body z cyklu ESC, konkrétně B9, B3, B4 a B8. Pro výpočet otáček motoru pro tyto režimy měření byl použit následující vztah.

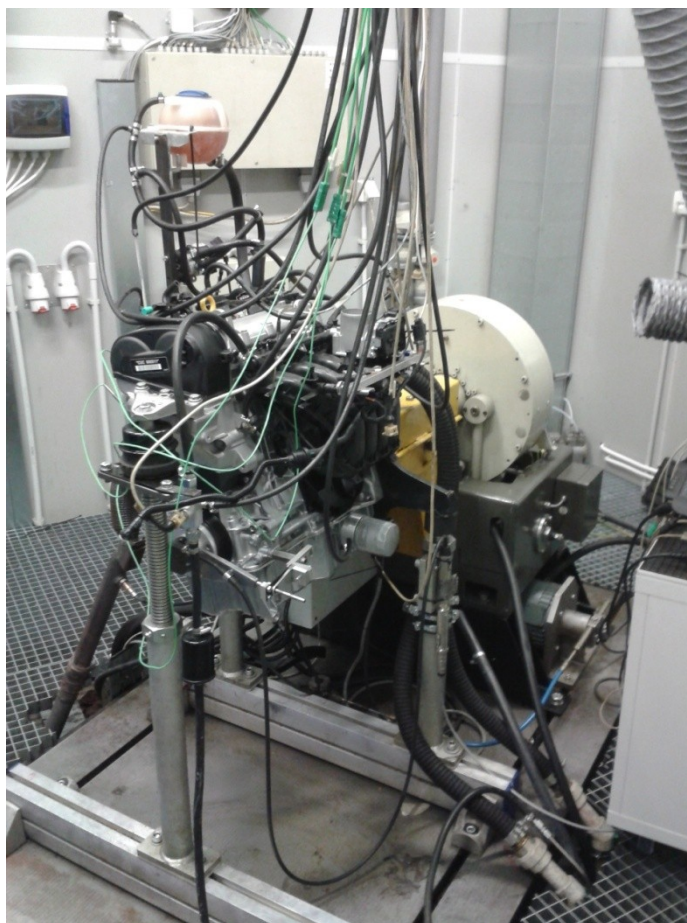
$$n_B = n_{lo} + 0,5(n_{hi} - n_{lo}) = 2750 + 0,5(3700 - 2750) = 3225 \text{ min}^{-1}$$

Kde n_{lo} znamená počet otáček motoru za minutu při 50 % výkonu a n_{hi} počet otáček motoru za minutu při 70 % výkonu. Tyto hodnoty byly odečteny z vnější otáčkové charakteristiky. Bod B9 je měřen s 25% zatížením, bod B3 s 50% zatížením, bod B4 se 75% zatížením a bod B8 se 100% zatížením motoru. Každý bod byl měřen 4 minuty, aby došlo ke stabilizaci přechodových jevů, teploty katalyzátoru, otáček a dalších veličin.

Pro měření byly použity klasické analyzátory CLA - HORIBA 150 a NDIR – HORIBA VIA 510. Dalším měřicím zařízením byl spektrometr ANTARIS IGS. Posledním zařízením byl elektrochemický analyzátor MRU 95/3 DC. Tyto analyzátory

byly zapojeny sériově a to v pořadí - klasické, spektrometr a jako poslední elektrochemický.

Následující obrázek zachycuje sestavu motoru a motorové brzdy.



Obrázek 40: Měřicí stanoviště

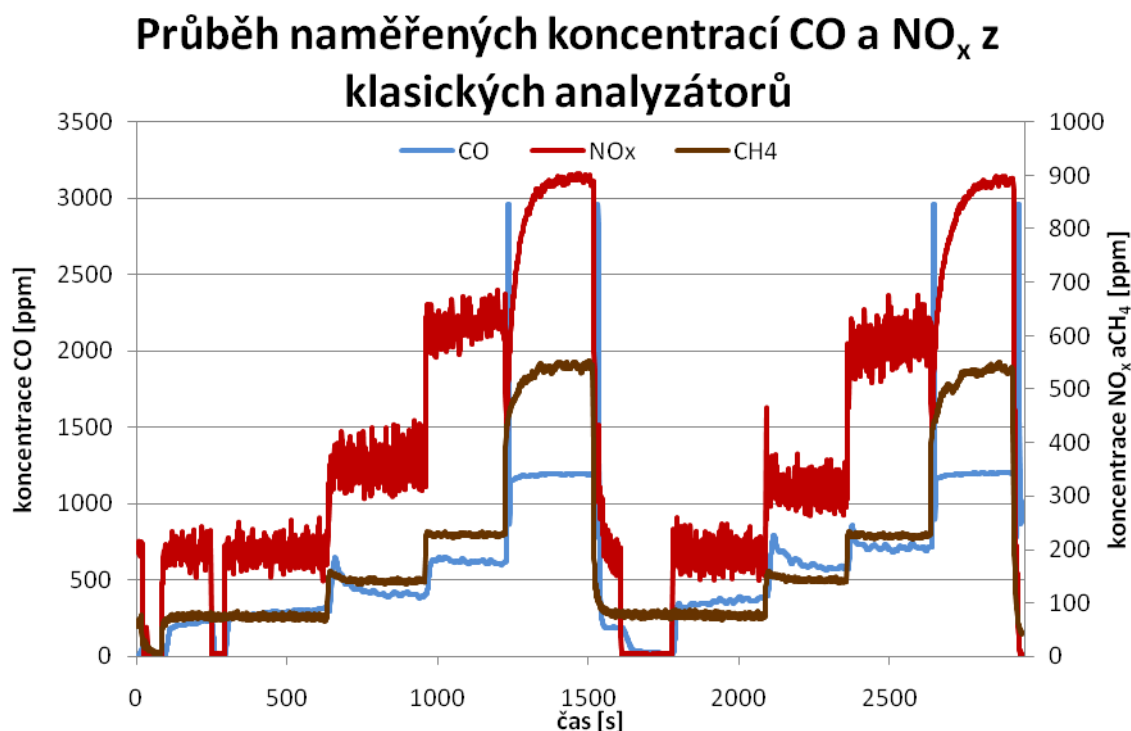
Další fotografie vyobrazuje jednotlivé typy analyzátorů.



Obrázek 41: Jednotlivé analyzátor a spektrometr

Zleva: Klasické analyzátor, spektrometr a elektrochemický analyzátor

Pro porovnání dat naměřených z jednotlivých analyzátorů byly použity stacionární cykly, aby nedocházelo k výrazným odchýlkám naměřených hodnot. Měření se skládalo celkově z osmi bodů tak, že se jednotlivé body dvakrát opakovaly. Následovalo porovnání dle hodnot koncentrací oxidů dusíku a oxidu uhelnatého a jako etalon (100% přesný) byl vzat spektrometr. Na následujícím grafu je zaznamenán průběh celého měření.

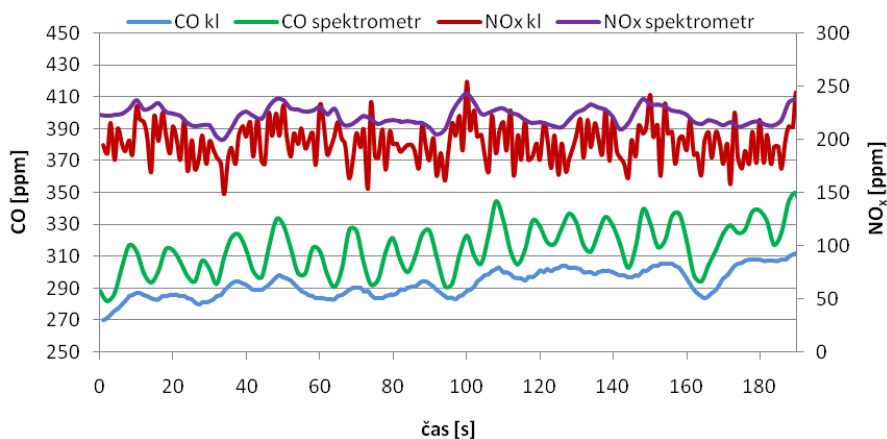


Obrázek 42: Průběh měření z klasických analyzátorů

Na tomto obrázku je patrný konec zahřívací fáze motoru a to v prvních cca 200 s. Následoval malý časový úsek volnoběžných otáček, po němž došlo na nastavení prvního režimu (bod B9). V grafu jsou zaznamenány i přechodové jevy, které jsou parné hlavně při přechodu na maximální zatížení. Pro porovnání byly z každého přístroje vyselektovány stejně dlouhé ustálené časové úseky, aby bylo porovnání věrohodné. Srovnání koncentrací naměřených při maximálním zatížení bylo provedeno pro poslední minutu intervalu. U maximálního zatížení také docházelo k tomu, že měřené koncentrace oxidu uhelnatého byly mimo měřicí rozsah analyzátorů.

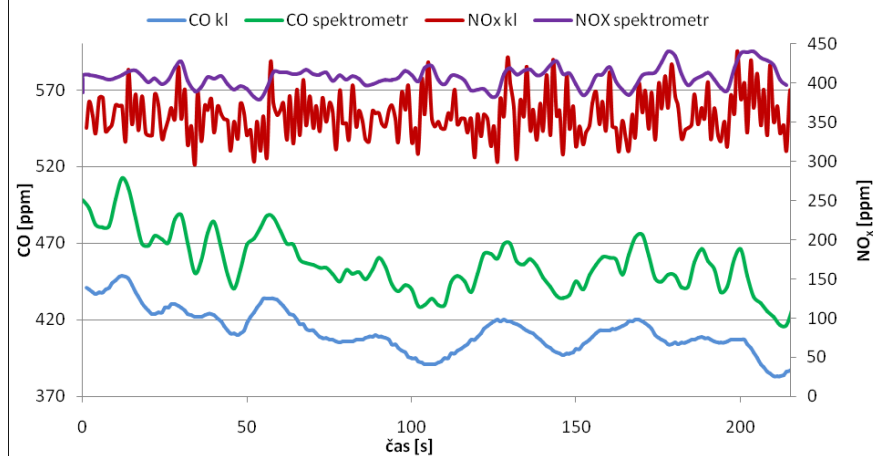
Tyto grafy zachycují ustálené průběhy koncentrací NO_x a CO z klasických analyzátorů a spektrometru pro první čtyři body měření.

1. bod - 25% zatížení



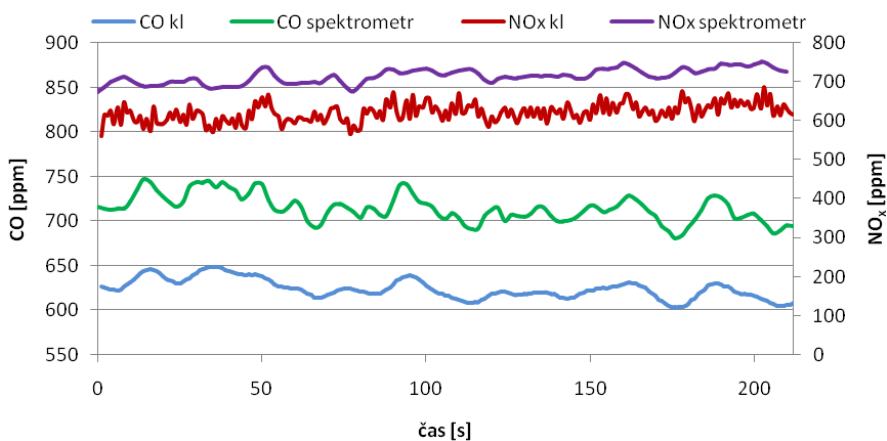
Obrázek 43: První bod měření

2. bod - 50% zatížení

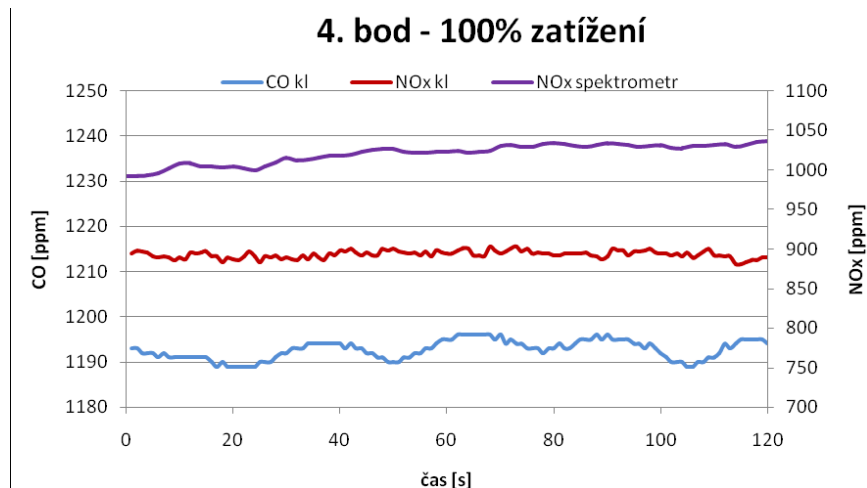


Obrázek 44: Druhý bod měření

3. bod - 75% zatížení



Obrázek 45: Třetí bod měření

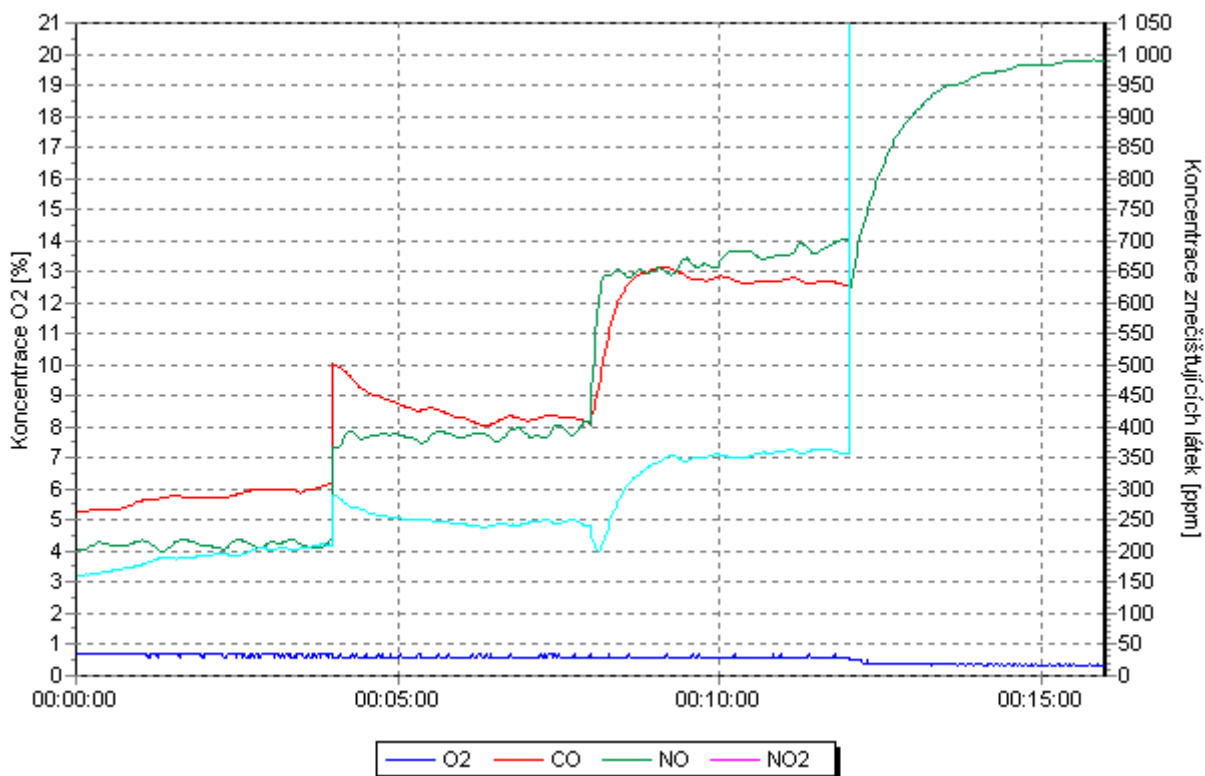


Obrázek 46: Čtvrtý bod měření

Poznámka: CO kl – koncentrace CO naměřená klasickými analyzátoři; NO_x kl – koncentrace NO_x naměřená klasickými analyzátoři

Tyto průběhy byly zpracovány i pro další čtyři měřené zatížení.

Další graf ukazuje průběh hodnot naměřených v prvním cyklu pomocí elektrochemického analyzátoru. Tento přístroj nezaznamenává data v čase, ale pouze zakreslí naměřené hodnoty do grafu. Dále vypíše maximální a minimální koncentrace a jejich průměr.



Obrázek 47: Záznam měření elektrochemického analyzátoru

U tohoto analyzátoru bylo v některých případech nutné hodnoty maximálních a minimálních koncentrací odečíst přímo, jelikož analyzátor zaznamenával nejvyšší a nejnižší hodnoty v daném bodě měření. Jak je vidět z předchozího obrázku, maximální hodnota v bodě dvě (začátek 00:04:00) je výrazně odlišná od ustáleného stavu. Podobně i pro minimální hodnotu pro maximální zatížení motoru (začátek 00:12:00).

Pro jednotlivé body měření byly vypočteny poměrné odchylky od hodnot získaných spektrometrem

Poměrné odchylky byly jednotlivých měření vypočteny dle vztahu:

$$f_{[xMRU]} = \left| \frac{x_{spektrometr} - x_{MRU}}{x_{spektrometr}} \right| \cdot 100 [\%] - \text{pro analyzátor MRU}$$

$$f_{[xKL]} = \left| \frac{x_{spektrometr} - x_{KL}}{x_{spektrometr}} \right| \cdot 100 [\%] - \text{pro klasické analyzátoary}$$

Kde $x_{spektrometr}$ je průměrná hodnota koncentrace naměřená spektrometrem; x_{MRU} je hodnota získaná elektrochemickým analyzátoarem a x_{KL} je průměrná hodnota naměřená klasickými analyzátoary.

Dále byla vypočtena střední směrodatná odchylka jednotlivých měření.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\bar{x} - x_i)^2}$$

Kde n je počet prvků, \bar{x} je průměrná hodnota a x_i je daný prvek.

Pro první měřený bod jsou v tabulce uvedeny průměrné, minimální a maximální hodnoty jednotlivých veličin analyzátoarů. Dále také jejich střední směrodatná odchylka a poměrná diference.

SPEKTROMETR

průměr CO [ppm]	min CO [ppm]	max CO [ppm]	σ [ppm]
316.5	281.7	349.4	15.5
průměr NO [ppm]	min NO [ppm]	max NO [ppm]	σ [ppm]
222.3	200.3	243.3	8.7
průměr NO_x [ppm]	min NO _x [ppm]	max NO _x [ppm]	σ [ppm]
222.5	200.3	243.3	8.8

MRU Elektrochemický

průměr CO [ppm]	min CO [ppm]	max CO [ppm]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]
295.5	282.0	309.0	4.5	6.6
průměr NO=NO_x [ppm]	min NO=NO _x [ppm]	max NO=NO _x [ppm]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]
211.5	201.0	222.0	3.5	4.9

KLASICKÉ ANALYZÁTORY

průměr CO [ppm]	min CO [ppm]	max CO [ppm]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]
294.6	270.0	315.0	9.8	6.9
průměr NOx [ppm]	min NOx [ppm]	max NOx [ppm]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]
196.7	143.0	258.0	19.2	11.6

Tabulka 24: Hodnoty naměřené a vypočtené z prvního bodu měření

Tyto tabulky byly následně zpracovány pro všechny body měření. Následuje shrnutí těchto číselných dat. Hodnoty průměrných koncentrací CO a NO_x jsou uváděny v jednotkách ppm.

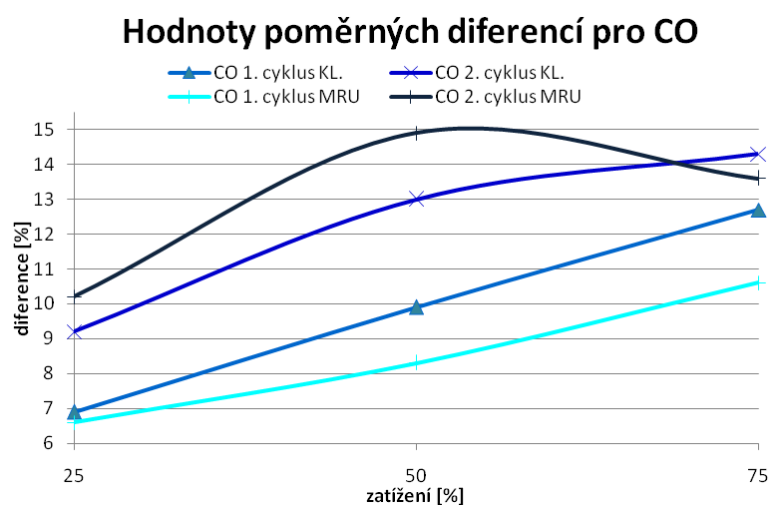
SPEKTROMETR – naměřené hodnoty								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
složka	øCO	øNOx	øCO	øNOx	øCO	øNOx	øCO	øNOx
1. cyklus	316,5	222,3	456,8	407,6	713	714,3	x	1020,4
2. cyklus	399,6	220,5	669,9	356,2	830,3	678,3	x	1021

ANALYZÁTOR ELEKTROCHEMICKÝ								
Naměřené hodnoty								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
složka	øCO	øNOx	øCO	øNOx	øCO	øNOx	øCO	øNOx
1. cyklus	295,5	211,5	419	394	637,5	686,5	M.R.	989
2. cyklus	359	201	570	335	717	645	M.R.	977,5
Vypočtené hodnoty střední směrodatné odchylky a poměrné diference pro CO								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
veličina	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]
1. cyklus	6,6	4,5	8,2	5,3	10,6	2,5	x	x
2. cyklus	10,2	3,7	14,2	3,3	13,6	5,8	x	x
Vypočtené hodnoty střední směrodatné odchylky a poměrné diference pro NOx								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
veličina	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xMRU]}$ [%]	σ [ppm]
1. cyklus	4,9	3,5	3,3	4,7	3,9	5,5	3,1	1,3
2. cyklus	8,8	3,7	6	1,7	4,9	5	4,3	2,5

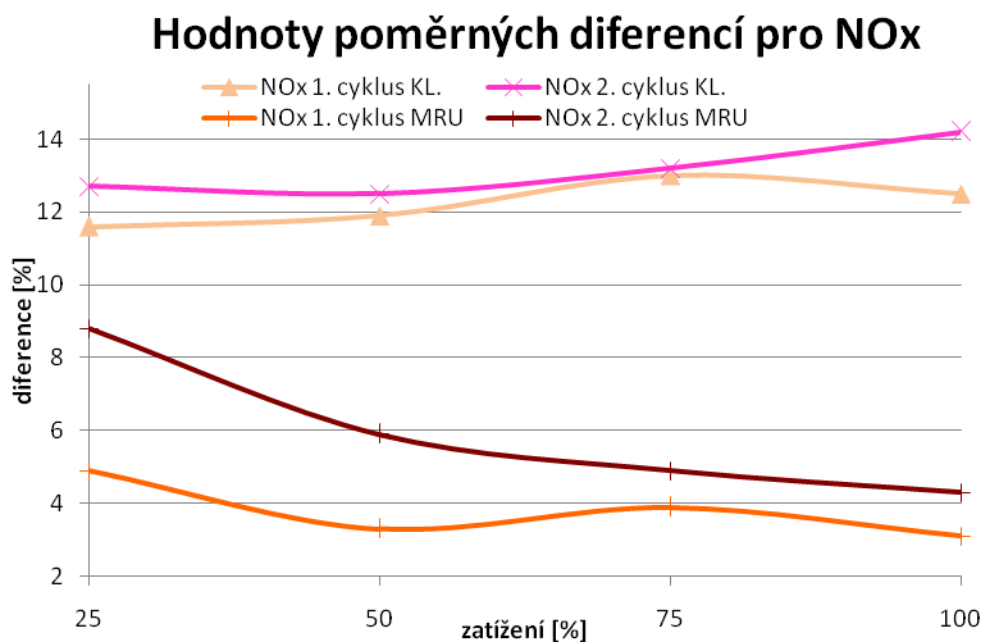
KLASICKÉ ANALYZÁTORY								
Naměřené hodnoty								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
složka	øCO	øNOx	øCO	øNOx	øCO	øNOx	øCO	øNOx
1. cyklus	294,6	196,7	412	358,9	623	622	1192	893,1
2. cyklus	363	192,5	583	312	711,3	588,5	1198,2	876,1
Vypočtené hodnoty pro CO								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
veličina	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]
1. cyklus	6,9	9,8	9,9	14,4	12,7	11,6	x	2,1
2. cyklus	9,2	14,9	13	11	14,3	12,8	x	3,5
Vypočtené hodnoty pro NOx								
zatížení	25%		50%		75%		100%	
veličina	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]	$f_{[xKL]}$ [%]	σ [ppm]
1. cyklus	11,6	19,2	11,9	29,7	13	22,9	12,5	4,6
2. cyklus	12,7	22,2	12,5	27	13,2	30,5	14,2	15,2

Tabulka 25: Shrnutí naměřených a vypočtených hodnot

Vyhodnoceny byly poměrné odchylky dat získaných z klasických analyzátorů a elektrochemického analyzátoru od hodnot naměřených spektrometrem (průměrné hodnoty získané spektrometrem byly u všech bodů nejvyšší). Průměrných hodnot ze spektrometru bylo celkem 16 (8 koncentrací oxidu uhelnatého a 8 koncentrací oxidů dusíku). Při porovnání klasických analyzátorů se spektrometrem vychází 11 hodnot s větší než 10% poměrnou diferencí. Naopak u elektrochemického analyzátoru jsou tyto hodnoty pouze čtyři. Následující grafy zachycují poměrné odchylky hodnot porovnávaných analyzátorů od hodnot naměřených spektrometrem.



Obrázek 48: Poměrné diference měření pro koncentrace CO



Obrázek 49: Poměrné diference pro koncentrace NOx

Z provedeného měření vyplývá, že při porovnání přístrojů na měření koncentrací složek výfukových plynů vůči spektrometru vychází lépe elektrochemický analyzátor. Tento analyzátor měl ve čtvrtině měřených bodů koncentrace s vyšší poměrnou odchylkou než 10 %. Analyzátoři klasické naopak mají velmi vysoké diference. U obou druhů analyzátorů porovnávaných se spektrometrem byly odchylky v prvním cyklu nižší než ve druhém. Tato skutečnost je dána i tím, že mohlo docházet ke změnám stálosti kalibrace popřípadě změně nulových bodů analyzátorů. Nepatrný rozdíl průměrných a krajních hodnot může být způsobem i tím, že spektrometr vyhodnocuje vzorek ve 2s intervalech, kdežto analyzátoři (klasické a infračervené) vyhodnocují v 1s intervalech. Samotné hodnoty koncentrací by měly být ustálené, ale vlivem nepatrných změn otáček motoru, teploty katalyzátoru jsou jednotlivé hodnoty v čase proměnné.

Klasické analyzátoři dále měřily koncentrace metanu. Elektrochemický analyzátor zaznamenával přebytek kyslíku ve výfukových plynech a spektrometr ukládal údaje o větším množství složek. Tyto složky výfukových plynů však nebyly porovnány, jelikož ne všechny analyzátoři tyto složky měří.

14. Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou emisních limitů mobilních a stacionárních motorů. V úvodní části jsou charakterizovány jednotlivé druhy spalovacích motorů. V této části je pozornost dále věnována i kogeneračním jednotkám. Další úsek práce zmiňuje principy vzniku škodlivých emisí při spalování uhlovodíkových paliv a představuje paliva s nižší produkcí škodlivých složek. Nadcházející pasáž vysvětluje vliv konstrukčních a provozních parametrů na množství emisí. Příkladem může být tvar vybrání pístu nebo kompresní poměr. Následující kapitoly popisují emisní limity pro vozidlové, stacionární a nesilniční motory. Pro jednotlivé typy motorů je vytvořena časová posloupnost vývoje limitů škodlivin. Značná část práce se věnuje konstrukčnímu vývoji příslušenství spalovacích motorů a jeho dopadu na množství a tvorbu emisí. V poslední části jsou popsány analyzátory výfukových plynů a jejich funkční principy.

Závěr samotné práce patří měření, které bylo provedeno na třech měřicích přístrojích. Výsledky spektrometru byly porovnány s výsledky získanými pomocí klasických analyzátorů a analyzátoru elektrochemického. Měření probíhalo ve dvou úsecích po čtyřech zatíženích motoru při jednotných otáčkách. Z těchto úseků byly vybrány časové intervaly ustálených hodnot. Jednotlivá zatížení byla vzata z cyklu ESC s tím, že místo ustálení jednoho bodu po dobu dvou minut byl tento interval zvolen čtyřminutový. Takto dlouhé časové ustálení má za následek relativní ustálení všech veličin motoru a koncentrací výfukových plynů. Po spočítání průměrných hodnot koncentrací z analyzátorů a spektrometru následovalo samotné porovnání. K porovnání sloužila velikost poměrné difference. Složky takto porovnané jsou koncentrace oxidu uhelnatého a oxidů dusíku.

Poměrné difference ukázaly, že při první sérii zatížení nedocházelo k tak velkému rozptylu, jako tomu bylo u série druhé. Výsledky dále prokázaly, že elektrochemický analyzátor má nižší hodnoty diferencí než analyzátory klasické. Vyšší hodnoty těchto odchylek při druhé sérii zatížení jsou způsobeny změnou stálosti kalibrace a změnou nulového bodu vlivem doby měření. Dle provedeného měření vychází klasické analyzátory méně přesné, jelikož více jak polovina průměrných koncentrací vychází s diferencí větší než 10 %.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma toku energií v kogenerační jednotce [3]	11
Obrázek 2: Uspořádání kogeneračních jednotek.....	12
Obrázek 3: Schéma vznětového spalovacího motoru a generátoru elektrické energie [12].....	13
Obrázek 4: Závislost tvorby termického oxidu dusného na teplotě a přebytku vzduchu [16]	15
Obrázek 5: Schéma automobilu poháněného palivem CNG [23]	19
Obrázek 6: Síť čerpacích stanic nabízejících palivo E85 (rok 2012) [25].....	20
Obrázek 7: Závislost změn složek emisí na zpoždění vstřiku paliva [26].....	22
Obrázek 8: Závislost zpoždění vznícení směsi na cetanovém čísle při různých režimech motoru [27].....	23
Obrázek 9: Závislost kouřivosti motoru na cetanovém čísle [28]	24
Obrázek 10: Závislost produkce NO _x na velikosti cetanového čísla [28]	24
Obrázek 11: Schéma toku výfukových plynů systémem EGR [31]	25
Obrázek 12: Schéma vstřikovacího systému common rail [32]	27
Obrázek 13: Graf závislosti emisí na součiniteli přebytku vzduchu [33]	28
Obrázek 14: Princip zapálení vrstvené směsi [34].....	29
Obrázek 15: Závislost vyprodukovaných emisí NO na teplotě spalování [35]	30
Obrázek 16: Tvary pístů a hodnoty kompresních poměrů [36]	33
Obrázek 17: Závislost tepelné účinnosti motoru na velikosti kompresního poměru při různých středních efektivních tlacích	34
Obrázek 18: Závislost minimální teploty vstupující do válce jako funkce relativního tlaku a vlhkosti vzduchu vstupujícího do válce a okolní teploty [39]	35
Obrázek 19: Porovnání emisí NO _x a CO ₂ při spalování benzínu a zemního plynu při různém součiniteli přebytku vzduchu [40].....	36
Obrázek 20: Průměrné hodnoty vývoje emisních limitů vznětových stacionárních zdrojů.....	46
Obrázek 21: Průměrné hodnoty emisních limitů zážehových stacionárních zdrojů	46
Obrázek 22: Profil dynamického testu pro nesilniční motory	50
Obrázek 23: Evropský cyklus NEDC [51]	53
Obrázek 24: Schéma Evropského stacionárního cyklu [54].....	54

Obrázek 25: Evropský dynamický cyklus [55].....	55
Obrázek 26: Řadové vstřikovací čerpadlo šestiválcového motoru [57].....	56
Obrázek 27: Princip funkce rotačního čerpadla [56]	57
Obrázek 28: Řez systémem UIS [58]	57
Obrázek 29: Komponenty systému Common Rail [59]	58
Obrázek 30: Vývoj vstřikovacích tlaků pro jednotlivé vstřikovací systémy [61].....	59
Obrázek 31: Systémy vstřikování paliva [63].....	60
Obrázek 32: Řez katalyzátorem [67]	62
Obrázek 33: Konstrukční řešení vstřikovačů [61]	62
Obrázek 34: Schéma interferometru [68].....	63
Obrázek 35: Schéma chemiluminiscenčního analyzátoru [69]	64
Obrázek 36: Schéma plamenoionizačního analyzátoru [69].....	64
Obrázek 37: Schéma infračerveného analyzátoru [69].....	65
Obrázek 38: Schéma paramagnetického analyzátoru [70]	65
Obrázek 39: Ampérometrický senzor [70].....	66
Obrázek 40: Měřicí stanoviště	69
Obrázek 41: Jednotlivé analyzátory a spektrometr	69
Obrázek 42: Průběh měření z klasických analyzátorů	70
Obrázek 43: První bod měření.....	71
Obrázek 44: Druhý bod měření	71
Obrázek 45: Třetí bod měření.....	71
Obrázek 46: Čtvrtý bod měření.....	72
Obrázek 47: Záznam měření elektrochemického analyzátoru.....	72
Obrázek 48: Poměrné difference měření pro koncentrace CO.....	75
Obrázek 49: Poměrné difference pro koncentrace NOx	76

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení kogeneračních jednotek podle výkonů	12
Tabulka 2: Specifické emisní limity platné do 31. 12. 2017 pro plynové motory [41] ...	40
Tabulka 3: Specifické emisní limity platné do 31. 12. 2017 pro vznětové motory [41].	40
Tabulka 4: Znečišťující látky podléhající zpoplatnění a sazby poplatků v jednotlivých letech	41
Tabulka 5: Koeficienty výše poplatku za znečišťování ovzduší podle dosahovaných koncentrací [41]	41
Tabulka 6: Emisní limity platné od 29. 5. 1997 [42]	42
Tabulka 7: Emisní limity platné pro stacionární zdroje od 3. 7. 2002 [43]	42
Tabulka 8: Emisní limity NO _x pro nové (od roku 2007) stacionární motory [43]	43
Tabulka 9: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (zážehové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena před 17. květnem 2006 [44]	43
Tabulka 10: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (vznětové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena před 17. květnem 2006 [44]	44
Tabulka 11: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (zážehové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena po 17. květnu 2006 [44]	44
Tabulka 12: Emisní limity pro spalovací zdroje - pístové spalovací motory (vznětové), jejichž stavba či přestavba byla zahájena po 17. květnu 2006 [44]	44
Tabulka 13: Emisní limity vstupující v platnost 1. 1. 2018 [45]	45
Tabulka 14: Limity kouřivosti podle normy ISO 8178	48
Tabulka 15: Současné emisní limity podle normy ISO 8178	48
Tabulka 16: Váhové faktory pro jednotlivé cykly normy 8178	49
Tabulka 17: Vývoj emisních limitů podle NORMY 8178	51
Tabulka 18: Emisní norma EURO 6 [49]	52
Tabulka 19: Vývoj emisních limitů EURO pro osobní automobily [53]	53
Tabulka 20: Vývoj emisních limitů užitkových automobilů [53]	54
Tabulka 21: Vývoj systému EGR jako reakce na zpřísnění emisních limitů [64]	61
Tabulka 22: Hodnoty částečných nejistot a jejich původ v analyzátoch použitých pro měření	67
Tabulka 23: Technické parametry měřeného motoru	68
Tabulka 24: Hodnoty naměřené a vypočtené z prvního bodu měření	74
Tabulka 25: Shrnutí naměřených a vypočtených hodnot	75

Seznam symbolů a jednotek

t	čas	[s]
V	objem	[m ³]
M _t	točivý moment	[Nm]
L	délka	[m]
P	výkon	[kW; bhp]
n _m	otáčky	[min ⁻¹]
m	hmotnost	[kg]
λ	součinitel přebytku kyslíku	[-]
p	tlak	[Pa]
ε	kompresní poměr	[-]
σ	střední směrodatná odchylka	[ppm]
H _u	výhřevnost	[MJ·kg ⁻¹]
T	teplota	[°C]
u	nejistota analyzátoru	[%]
C _x	koncentrace emisí	[g/kWh; mg/m ³]
C _y	koncentrace látky v benzínu	[g/l]
f _[xMRU]	poměrná diference elektrochemického analyzátoru	[%]
f _[xKL]	poměrná diference klasických analyzátorů	[%]
n _{vol}	volnoběžné otáčky	
n	počet prvků množiny	
\bar{x}	průměrná hodnota	
x _i	hodnoty intervalu	
x _{KL}	hodnota naměřená klasickým analyzátozem	
x _{MRU}	hodnota naměřená elektrochemickým analyzátozem	
x _{spektrometr}	hodnota naměřená spektrometrem	
CO kl	hodnoty oxidu uhelnatého naměřené klasickými analyzátozem	
NO _x kl	hodnoty oxidů dusíku naměřené klasickými analyzátozem	
Kč	Česká koruna	
CNG	stlačený zemní plyn	
LPG	zkapalněný ropný plyn	
TZL	tuhé znečišťující látky	
CHN	celková hodnota nejistoty	

PM	particulate matter	pevné částice
DPF	diesel particulate filter	filtr pevných částic
EGR	exhaust gas recirculation	recirkulace výfukových plynů
SCR	selective catalytic reduction	selektivní katalytická redukce
EPA	Environmental Protection Agency	Agentura ochrany životního prostředí
EHK	Evropská Hospodářská Komise	
UDC	Urban Driving Cycle	režim simulující městský provoz
NEDC	New European Driving Cycle	Nový Evropský Emisní Cyklus
EUDC	Extra Urban Driving Cycle	režim mimoměstského provozu
ESC	European stationary cycle	Evropský stacionární cyklus
ETC	European transient cycle	Evropský dynamický cyklus
V.f.	váhový faktor	

Zdroje

- 1 - Databáze odborných řešení ekologie a ochrany životního prostředí [článek online]. Dostupné z: http://www.enviprofi.cz/33/mobilni-zdroje-podle-zakona-o-ochrane-ovzdusi-niqueidgOkE4NvrWuOKaQDKuox_Z8y6zVzYaAoAOAjUoCP6IWE/
- 2 – Web společnosti TEDOM – Funkce kogenerace [online]. Dostupné z: <http://kogenerace.tedom.com/jak-funguje-kogenerace.html>
- 3 - Informační portál průmyslu a obchodu [online]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/cz/ekis/publikace/2206>
- 4 – Technická zařízení budov [online]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/kogenerace>
- 5 Informační portál průmyslu a obchodu [online]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/cz/ekis/publikace/911>
- 6 - Stránky společnosti TEDOM-kogenerace[online]. Dostupné z: <http://kogenerace.tedom.com/tedom-kogeneracni-jednotky-zemni-plyn.html>
- 7 – Stránky společnosti TEDOM – vývoj kogenerace[online] Dostupné z: <http://kogenerace.tedom.com/hp-tedom-vyvoj.html>
- 8 - Stránky společnosti MOTORGAS – Firemní údaje [online]. Dostupné z: <http://www.motorgas.cz/cz/>
- 9 – Stránky společnosti MENERGO [online] – Firemní údaje. Dostupné z:<http://www.menergo.cz/kogenerace/>
- 10 – Princip kogenerace [online]. Dostupné z:<http://www.mojekogenerace.cz/>
- 11 – Multimediální ročenka životního prostředí [online]. Dostupné z: http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=vyroba_elektricke_energie&site=energie
- 12 – Dieselové služby, agregáty a příslušenství – Princip generátoru elektrického proudu poháněného dieslovým motorem [online]. Dostupné z:http://www.dieselserviceandsupply.com/How_Generators_Work.aspx
- 13 – Stacionární motory pro průmyslové aplikace od společnosti TEDOM [online]. Dostupné z: <http://cz.tedomengines.com/stacionarni-motory.html>
- 14 – Takáts, Michal. Měření emisí spalovacích motorů -kapitola 1.2. Vydavatelství. PRAHA - ČVUT 1997. ISBN 80-01-01632-3
- 15 – Beroun, Stanislav. Vozidlové motory - TUL .Strana95-97
- 16 – Bělohradský, Petr. Metody pro určování charakteristických parametrů procesů spalování na bázi experimentů a modelování. Brno: 2010. Dizertační práce, VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství.
- 17 – Jilek, Petr; Jirošík, Jan; Jůza, Štěpán; Kusák, Marek. Emise spalovacích motorů, jejich vliv na životní prostředí a přehled analyzátorů emisí. Pardubice 2003. Univerzita Pardubice, Fakulta Jana Pernera.
- 18 – Hromádko, Jan. Spalovací motory. Praha 2011. ISBN 978-80-247-3475-0, s. 178
- 19 – Mališ, Jan. Metody snižování oxidu uhličitého. Brno 2007. Diplomovápráce, VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství
- 20 – Jilek, Petr; Jirošík, Jan; Jůza, Štěpán; Kusák, Marek. Emise spalovacích motorů, jejich vliv na životní prostředí a přehled analyzátorů emisí. Pardubice 2003. Univerzita Pardubice, Fakulta Jana Pernera.

- 21 – Zpravodajský portal o dění v Evropské unii snížení emisí oxidu uhličitého [online]. Dostupné z: <http://www.euractiv.cz/obchod-a-export0/clanek/vyrobci-maji-osekat-emise-co2-z-vyfuku-aut-na-rade-jsou-alternativni-paliva-011645>
- 22 – Stránky ekologických paliv – porovnání CNG a LPG [online]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/o-cng/cng-vs-lpg/>
- 23 - Portál zdravého životního průmyslu – porovnání paliv CNG a LPG [online]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/technologie-1/lpg-a-cng/ktere-z-alternativnich-paliv-je-nejvyhodnejsi.aspx>
- 24 - Ocenění energetických projektů – Alternativní paliva [online]. Dostupné z: http://www.energyglobe.com/cs_cz/uspory-energii-1/doprava/alternativni-paliva/
- 25 - Stránky autoservis Skřivan – Mapa čerpacích stanic [online]. Dostupné z: <http://www.autoskrivan.cz/e85-ethanol/cerpaci-stance-e85/>
- 26 - Roessler, W.; Muraszew, A.; Kopa, R.. Assessment of the applicability of automotive emission control technology to stationary engines. N. Carolina 1974. Strana 150-271
- 27 - Heywood, John B.. Internal combustion engine fundamentals. USA 1988. Strana 550
- 28 - Icingur, J.; Altiparmak, D.. Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI diesel performance emissions. Turecko 2002. Strana 1-8
- 29 - Technická příručka – EGR systém [online]. Dostupné z: https://www.dieseln.net/tech/engine_egr.php
- 30 - Hussain, Jaffar; Palaniradja, K. ; Alagumurthi, N. ; Manimaran, R. – Effect of exhaust gas recirculation on performance and emission characteristics of a free cylinder direct injection compression ignition engine. Indie 2012. Strana 1-6.
- 31 – Stránky společnosti Komatsu – systém EGR nákladních automobilů [online]. Dostupné z: <http://www.komatsueq.com/custompage.asp?pg=technology>
- 32 – Internetové stránky s vědeckou tematikou [online]. Dostupné z: <http://asol247.com/diesel-engine-common-rail-direct-injection-crd-fuel-system/>
- 33 – Stránky Vysoké školy chemicko-technologické – znečištění ovzduší z dopravy [online]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/velebudice/ovzdusi/doprava.htm>
- 34 - Stránky s vozidlovou tematikou – Přímé vstřikování benzínu [online]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/gdi-gasoline-direct-injection/>
- 35 - Stránky zaměřené na techniku – Antropogenní zdroje znečištění ovzduší [online]. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/air-quality/anthropogenic-air-pollution-sources>
- 36 - Beroun, Stanislav; Martins, Jorge- The development of gas engines for buses and trucks and their emission a cycle variability characteristics. Liberec 2001, TUL, Katedra vozidel a motorů.
- 37 – Bhandari, Kirti; Bansal, Akhil; Shukla, Anuradha; Khare, Mukesh - Performance and emission of natural gas fueled internal combustion engine. Rok 2005. Strana 335
- 38 – Zheng, J.; Wang, J.; Wang, B.; Huang, Z. – Effect of the compression ratio on performance and combustion of a natural gas direct-injection engine. Rok 2008. Strana 85-90

- 39 - Společnost CIMAC – About the influence of ambient conditions on performance of gas engines. Rok 2009. Strana 1-3
- 40 - Palipana, Susantha – CFD modelling of natural gas combustion in spark ignited engines. Loughborough University. Strana 193-201
- 41 – Vyhláška MŽP č 415 ze dne 21. 11. 2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: Sbírka zákonů České republiky 2012. Částka 151, s. 5226-5336.
- 42 - Vyhláška MŽP č. 117 ze dne 12. 5. 1997, kterou se stanovují emisní limity a další podmínky provozování stacionárních zdrojů znečišťování a ochrany ovzduší. In: Sbírka zákonů České republiky 1997. Částka 41, s. 2314-2376.
- 43 – Nařízení vlády ČR č. 352 ze dne 3. 7. 2002, kterým se stanovují emisní limity a další podmínky provozování spalovacích stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší. In: Sbírka zákonů České republiky 2002.
- 44 – Příloha č. 23 nařízení vlády č. 147 z prosince 2009. In: Sbírka zákonů České republiky 2009. Strana 1-4
- 45 – Vyhláška MŽP č. 415 ze dne 30. 11. 2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: Sbírka zákonů České republiky 2012. Částka 151, s. 5226-5336.
- 46 – Vyhláška MŽP č. 155 ze dne 18. 7. 2014, kterou se mění vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: Sbírka zákonů České republiky 2014. Částka 62, s. 1646-1647.
- 47 - Emisní Norma 8178
- 48 – Stránky s vozidlovou tematikou – Emisní norma EURO.
Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro/>
- 49 – RSA – The introduction of Euro 5 and Euro 6 emission regulations for light passenger and commercial vehicles. Strana 6
- 50 – Internetová encyklopedie – Evropský jízdní cyklus na měření emisí [online].
Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/New_European_Driving_Cycle
- 51 – Stránky zaměřené na automobily a novinky okolo nich – Cyklus NEDC [online].
Dostupné z: <http://www.guillaumedarding.fr/presentation-du-cycle-d-homologation-nedc-8979202.html>
- 52 Hromádko, Jan. Spalovací motory – Praha 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
Strana 193.
- 53 – ANNEX – emission standards for light- and heavy-duty vehicles. Rok 2012, strana 470-471.
- 54 - Technická příručka – Cyklus ESC [online].
Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php>
- 55 - Technická příručka – Cyklus ETC [online].
Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/etc.php>
- 56 - Hromádko, Jan. Spalovací motory – Praha 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
Strana 119–176

- 57 - Technické vzdělávání – Řadové vstřikovací čerpadlo [online]. Dostupné z: <http://www.technolab.org/content/hako/en/index.php?lg=en&rg=en&cmp=hako&id=section9>
- 58 - Portál o automobilech – Vstřikovací systém čerpadlo-tryska [online]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/vstrekovacia-sustava-diesloveho-motora-čerpadlo-tryska-pd-pumpe-duse>
- 59 – Stránky společnosti DENSO – Zvyšování tlaku v systému Commonrail [online]. Dostupné z: <http://www.densodynamics.com/raising-the-bar-on-diesel-common-rail/>
- 60 – Smilek, Tomáš – Možnosti vstřikovacího systému common-rail. Brno 2008. Bakalářská práce, VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- 61 - Mahr, B. – Future and potential of diesel injection systems – Budoucnost a potenciál vstřikovacích systémů vznětových motorů. Rok 2002, strana 2-9.
- 62 – Swanson, Mark – An emission comparison between a carburetor and an electronic fuel injection system for utility engines [online]. Dostupné z: <http://papers.sae.org/911806/>
- 63 – Stránky věnované elektronicky řízeným systémům v automobilech – Vstřikování zážehových motorů [online]. Dostupné z: http://www.automobilove-systemy.wz.cz/rizeni_auta.html
- 64 - Technická příručka – Vývoj EGR systému [online]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/tech/engine_egr.php
- 65 - Twigg, Martyn - Progress a future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions. Rok 2007, Strana 4-6.
- 66 – Koltsaki, Grigoris; Stamatelos, Anastasios – Catalytic automotive exhaust aftertreatment. Rok 1997, strana 6.
- 67 - Stránky s vozidlovou tematikou – automobilový katalyzátor [online]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/katalyzator/>
- 68 – Kania, Patrik – Infračervená spektrometrie [online]. Dostupné z: www.vscht.cz/anl/lach1/7_IC.pdf
- 69 – Thorž, František. Emise, jejich měření a principy konstrukce systémů pro jejich snižování. Brno 2011. Bakalářská práce, VUT, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- 70 – Blecha, Petr – Analýza plynů. Bakalářská práce, Vysoké učení technické, rok 2007, strana 21-22; 25-26.