

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

Bc. JAKUB ZEMAN

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

**MOŽNOSTI SNÍŽENÍ EMISÍ U MIMOSILNIČNÍCH
STROJŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2015

AUTOR: Bc. Jakub Zeman
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Roman Graja

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub Zeman**
Osobní číslo: **D130025**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury:
Ochrana životního prostředí v dopravě**
Název tématu: **Možnosti snížení emisí u mimosilničních strojů**
Zadávatel katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Osnova :

Úvod

1. Analýza současného stavu

2. Cíle a použité metody práce

3. Výsledky řešení - Výběr vhodných postupů a metod, jejich vzájemné porovnání

Závěr

Rozsah grafických prací: podle pokynů vedoucího práce
Rozsah pracovní zprávy: 50- 60 stran textu a přílohy
Forma zpracování diplomové práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

Použitá literatura:

- VLK, František: Stavba motorových vozidel. Brno. Nakladatelství Vlk, 2003, ISBN 80-238-8757-2
- TESAŘ, Miroslav, Ševčík Ivo, Konstrukce vozidlových spalovacích motorů 1. vyd. Univerzita Pardubice 2003, ISBN 80-7194-550-1
- Snižování obsahu oxid dusíku ve spalínách. In: VŠCHT [online]. 2008 [cit. 2012-04-16]. Dostupné z : http://www.vscht.cz/uchop/velebudice/ovzdusi/oxidy_dusiku.htm

Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Graja
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Datum zadání diplomové práce: 25. února 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 22. května 2015



doc. Ing. Ivo Drakotský, Ph.D.
děkan

L.S.



doc. Ing. Michael Lata, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2015

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 25. 11. 2015

Bc. Jakub Zeman

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kteří mi s touto prací jakkoli pomohli, poradili, poskytli podklady nebo své praktické zkušenosti a rady, panu Ing. Romanu Grajovi za vedení práce a pomoc při zpracování. Dále chci poděkovat panu Bc. Petru Vybíralovi za poskytnuté informace a možnost konzultace zpracování technických informací.

Anotace

Diplomová práce se zabývá celkovými možnostmi snížením emisí u mimosilničních strojů a realizaci snížení emisí na praktickém příkladu motoru MMZ D 245.2S3B. Zahrnuje především současnou problematiku při hledání technologie ke splnění daného emisního limitu.

Klíčová slova

Emise, emisní limit, mimosilniční stroje, výsledné hodnoty, systém k následné úpravě výfukových plynů

Title

Options reduction of emissions from non-road machines

Anotation

This thesis deals with the possibilities of reducing overall emissions for non-road machinery and implementation of emission reduction on a practical example of the engine MMZ D 245.2S3B. It consists mainly of current issues in search technology to meet the emission limit.

Keywords

Emissions, emission limit, off road equipment, resulting values, Exhaust aftertreatment system

Obsah

Obsah	9
Úvod	12
1. Analýza současného stavu.....	13
1.1 Vliv emisí spalovacího motoru na ovzduší.....	13
1.2 Emise vznětového motoru	14
1.3 Popis jednotlivých složek výfukových plynů	16
1.3.1. Zdraví neškodné složky výfukových plynů	16
1.3.2. Zdraví škodlivé složky výfukových plynů.....	17
1.4 Příčiny vzniku jednotlivých škodlivin	20
1.4.1 Vznik oxidu uhelnatého	20
1.4.2 Vznik oxidů dusíku	20
1.4.3 Vznik nespálených uhlovodíků.....	21
1.4.4 Vznik pevných částic	21
1.5 Emisní limity.....	22
1.5.1 Historie emisních limitů.....	22
1.5.2 Emisní limity mimosilničních strojů.....	23
1.5.2.1 Evropské emisní limity pro mimosilniční stroje	24
1.6 Metodika měření emisí	26
1.6.1 Měření pomocí NRSC cyklu.....	27
1.6.2 Měření pomocí NRTC cyklu.....	28
1.7 Analyzátoři na určování plynných koncentrací jednotlivých složek výfukových plynů.....	29
1.7.1 Měření založení na principu absorpce infračerveného záření.....	29
1.7.2 Měření založení na principu absorpce ultrafialového záření	30
1.7.3 Měření s využitím chemické luminiscence	31
1.7.4 Měření založené na principu změny elektrické vodivosti vodíkového plamene.....	32

1.7.5	Měření kouřivosti motoru	33
1.7.5.1	Měření kouřivosti motoru filtrační metodou	34
1.7.5.2	Opacimetrie	34
1.7.5.3	Přímé měření koncentrace částic	35
1.8	Možnosti snížení emisí	36
1.8.1	Primární možnosti snížení emisí motoru.....	37
1.8.1.1	Vstřikování paliva	37
1.8.1.2	Víření směsi.....	38
1.8.1.3	Přeplňování.....	38
1.8.1.4	Recirkulace výfukových plynů – EGR.....	39
1.8.2	Sekundární možnosti snížení emisí motoru	40
1.8.2.1	Dieselový oxidační katalyzátor	40
1.8.2.2	Filtr pevných částic - DPF.....	41
1.8.2.3	Selektivní katalytická redukce - SCR.....	42
2.	Cíle a použité metody práce	45
3.	Výsledky řešení – výběr vhodných metod, jejich vzájemné porovnání.....	46
3.1	Vlastní měření.....	46
3.1.1	Motor MMZ D245.2S3B	47
3.1.2	Zařízení použitá k měření motoru MMZ D245.2S3B.....	48
3.1.2.1	Dynamometr Horiba Titan HT460	48
3.1.2.2	Snímače	50
3.1.2.3	Emisní analyzátory	53
3.1.2.4	Dynamická váha paliva	55
3.1.2.5	Kouřoměr.....	56
3.2	Příprava měření.....	56
3.2.1	Uchycení motoru na brzdové stanoviště	57
3.2.2	Instalace snímačů na motoru.....	59

3.2.3	Připojení ostatního příslušenství nezbytného k provozu motoru	60
3.3	Výsledky měření	64
3.3.1	Úvodní měření.....	64
3.3.2	Optimalizace vstřikovacího systému.....	66
3.3.3	Optimalizace pomocí exhaust aftertreatment system.....	67
3.3.4	Zhodnocení výsledků	70
	Seznam použité literatury	72
	Seznam internetových odkazů	72
	Seznam obrázků:.....	74
	Seznam tabulek	76
	Seznam grafů	77
	Přílohy.....	77

Úvod

Nečistoty v ovzduší patří k základním ekologickým problémům, které viditelně ovlivňují zdraví a životy lidí. Množství škodlivin, které se v ovzduší nalézají, je způsobeno především činností člověka. K největším změnám docházelo v průběhu 20. století. Znečištění ovzduší dosáhlo svého nejhoršího stavu v období průmyslové revoluce. Bylo to v důsledku zvýšené těžby uhlí a jeho následného spalování, které způsobovalo intenzivnější výskyt oxidu siřičitého, sazí a popela ve vzduchu. Největší katastrofou byl takzvaný londýnský smog v roce 1952, kdy znečištění dosáhlo takového stupně, že na následky chorob dýchacích cest zemřelo přibližně 2000 lidí. S postupným omezením užívání uhlí jako paliva a přijetí různých emisních limitů se stav ovzduší zlepšuje. Abnormální výskyt znečišťujících látek v ovzduší je nejčastěji způsoben již zmiňovanými spalovacími tepelnými elektrárnami (spalování uhlí, plynu, ropy) a automobilovou dopravou.

Na vrcholu žebříčku největších zdrojů emisí se střídá průmysl s lokálními topeništi a dopravou. Doprava se stala významným faktorem ve společnosti, působícím jak pozitivně (přeprava osob, nákladu) tak negativně (dopravní nehody, emise). Rychlý nárůst vozidel způsobil zvyšující se zátěž na životní prostředí. Nejčastěji se v souvislosti s touto problematikou hovoří o znečištění ovzduší, avšak neméně zanedbatelný má doprava také podíl na další složky životního prostředí. Stavěním infrastruktury dochází k záboru půdy a fragmentaci krajiny, dále je také ovlivněna kvalita podzemních a povrchových vod, půda i biota. S vrůstajícím počtem občanů vlastnících automobil je toto téma stále aktuálnější. Škodliviny, které zatěžují ovzduší nejvíce, jsou např. oxid uhelnatý, nespálené uhlovodíky, oxidy dusíku, oxid siřičitý, částice sazí a jemný prach obsahující těžké kovy. Vhodné opatření pro zachování čistoty vzduchu jsou např. používání bezolovnatého paliva, montáž katalyzátoru a používání částicových filtrů u diesellových motorů.

Dobrou zprávou je, že emise většiny látek z dopravy postupně klesají, a to i přesto, že přepravní výkony osobní i nákladní dopravy zatím rostou. Souvisí s tím především vývoj technologií a uplatňování moderních postupů při výrobě a montáži vozidel zlepšující jejich „ekologické“ vlastnosti.

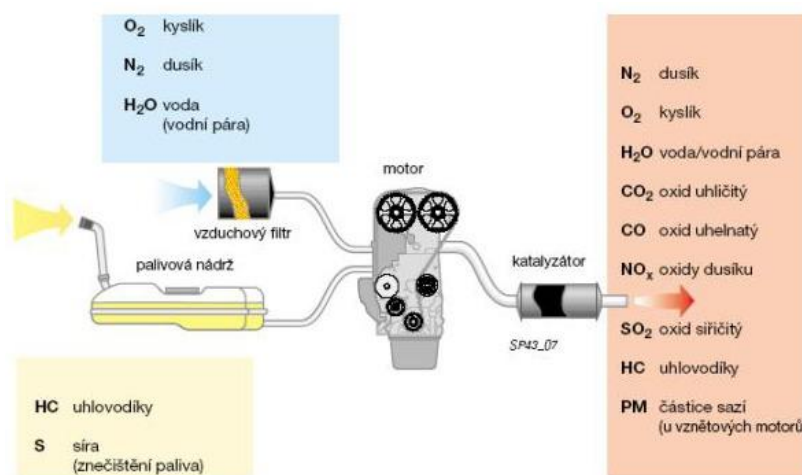
Největší projev ekologičnosti je určitě splnění daného emisního limitu, a proto se tato diplomová práce zabývá emisními limity mimosilničních strojů.

1. Analýza současného stavu

Kategorie mimosilničních pracovních strojů (NRMM - Non - Road Mobile Machinery) pokrývá rozsáhlou skupinu strojů s rozmanitým použitím pohonů spalovacími motory. Tyto stroje jsou používány pro jiné účely, než je přeprava osob nebo zboží. Vznětové motory jsou v případě NRMM montovány do traktorů, buldozerů, generátorů a dalších obdobných strojů. Ve shodě s environmentální politikou EU je dlouhodobým cílem postupné snižování emisí a vyloučení provozu zastaralých, nevyhovujících zařízení.

1.1 Vliv emisí spalovacího motoru na ovzduší

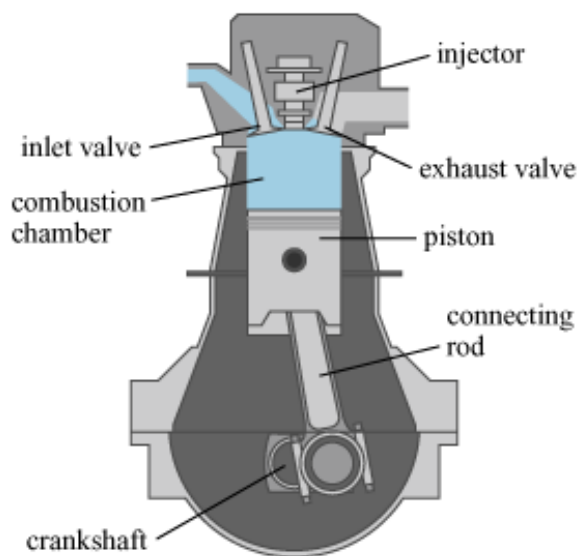
Během hoření dochází ke vzájemným reakcím jednotlivých složek za vysokých teplot a tlaků při uvolňování tepelné a tlakové energie. Na průběh spalování mají vliv tepelné, tvarové a vírové vlastnosti spalovacího prostoru a především způsob a kvalita vstřikování paliva. Podle dosavadních analýz obsahují výfukové plyny pístových spalovacích motorů téměř 160 jednotlivých složek. Spalovací motory jsou zodpovědné za více než 70% globální produkce CO emisí a 19% CO₂. Mimo produktů dokonalého spalování tzn. CO₂, H₂O, přebytku kyslíku, zbytkového dusíku, které tvoří dominantní zastoupení se vyskytuje celá řada plynů a pevných látek z nichž největší pozornost se věnuje: oxidu uhelnatému CO, nespáleným uhlovodíkům HC (Hydrocarbons = parafiny, olefiny, aromatické uhlovodíky), částečně spáleným uhlovodíkům (aldehydy, ketony), produktům štěpení (acetylen, ethylen, vodík, saze), oxidům dusíku NO_x (NO – oxid dusnatý, N₂O oxid dusný, NO₂ – oxid dusičitý) a pevným částicím PM (Partikelmasse, Particulate Matter). [3]



Obrázek 1 Vstupní a výstupní složky procesu spalování[4]

1.2 Emise vznětového motoru

Vznětové motory nemají karburátor ani elektrickou iniciaci spalování. Zapálení paliva se dosahuje jeho vstřikováním do stlačeného vzduchu, jehož teplota je v důsledku tzv. adiabatické komprese tak vysoká, že převyšuje mez zápalnosti paliva (motorové nafty). Vznětové motory pracují s podstatně vyšším přebytkem vzduchu (až 600 %), než zážehové. Důsledkem toho je spalování dokonalejší a z hlediska emise škodlivin v mnohých ohledech lepší. Vysoká teplota a velký přebytek vzduchu má však za následek zvýšenou tvorbu oxidů dusíku. [4]

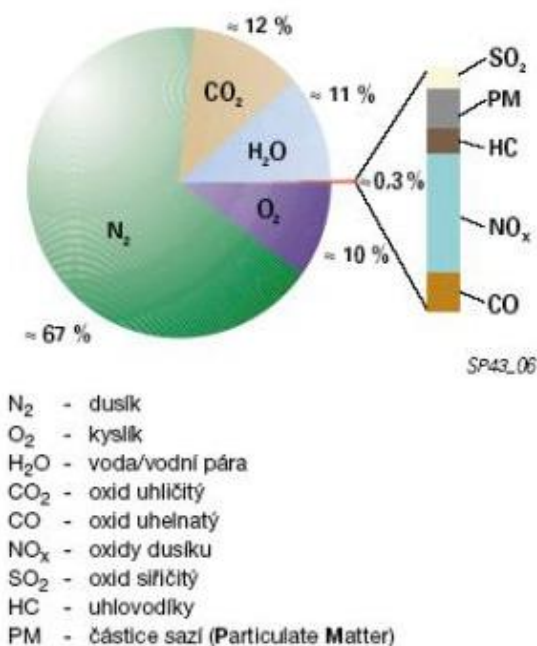


Obrázek 2 Vznětový motor[7]

Vznětové motory jsou vhodné pro pohon motorových vozidel v důsledku nízké spotřeby paliva a nízké koncentrace plynných polutantů ve výfukových plynech. Emise uhlovodíků a oxidu uhelnatého u vznětových motorů leží v současnosti pod hodnotami zážehových motorů s řízeným katalyzátorem. Kromě toho si moderní vznětové motory zachovávají výhodné emisní hodnoty i při velkém počtu najetých kilometrů a nevykazují téměř žádná zhoršení. [2]

Výfukové plyny jsou komplexní směsí chemických látek vznikajících při spalování uhlovodíkových paliv ve spalovacích motorech. Množství výfukových plynů emitovaných z výfukového potrubí závisí na mnoha faktorech, zejména na typu paliva, tvaru spalovacího prostoru, způsobu tvoření směsi, typu a stavu spalovacího zařízení a na užití zařízení ke snížení emisí.[5]

Mezi nejvýznamnější složku spalín patří dusík (N₂). Při dokonalém spalování vzniká oxid uhličitý (CO₂) a voda (H₂O). V reálném procesu spalování jsou však emitovány i složky nedokonalého spalování, především oxid uhelnatý (CO), nespálené uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (NO_x), oxidy síry (SO_x) a makroskopické pevné látky (PM).



Obrázek 3 Složení výfukových plynů vznětových motorů[4]

U vznětových motorů představují škodlivé látky přibližně 0,3 % z celkového objemu výfukových plynů (viz obrázek 3). Typické složení výfukových plynů vznětových motorů se od složení výfukových plynů zážehových motorů liší podstatně větším přebytkem vzduchu.

Míra škodlivosti jednotlivých složek ve výfukových plynech se někdy uvádí srovnáním se škodlivostí oxidu uhelnatého CO. Objektivní vyjádření jednotlivých úrovní škodlivosti je jistě obtížné, za nejzávažnější škodlivinu výfukových plynů jsou však považovány tuhé částice. V porovnání se škodlivostí CO se míra škodlivosti částic uvádí v násobku několika desítek, pro oxidy dusíku se škodlivost uvádí rovněž více jak desetinásobná a u nespálených uhlovodíků se uvažuje násobek škodlivosti v jednotkách. [3]

Nebezpečnými emisemi u vznětových motorů jsou kouř a pevné částice. Jednou součástí emisí pevných částic jsou tzv. saze, dalšími složkami jsou sulfáty a komponenty z mazacího oleje a paliva. Hlavní podíl částic má velikost 0,1 – 0,3 μm. Tyto malé částice znečišťují přízemní vrstvu atmosféry a vnikají při dýchání do plic. Byl prokázán jejich karcinogenní účinek. [4]

1.3 Popis jednotlivých složek výfukových plynů

Pokud jsou složky emisí výfukových plynů označeny jako škodlivé, mělo by být snahou nejen konstruktérů, ale i provozovatelů dopravních prostředků, jejich výrazné omezení. Snižování např. jedné ze složek emisí však s sebou může přinést zhoršení jiné složky, proto je nutné hledat optimální složení exhalací tak, aby jejich škodlivost byla minimální.

1.3.1. Zdraví neškodné složky výfukových plynů

- **Kyslík** – O_2 je vysoce reaktivní a bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Kyslík je nejvýznamnější součástí naší atmosféry (významný biogenní prvek) a je nezbytný pro proces spalování v motoru a motorem je také nasáván.



Obrázek 4 Kyslík[4]

- **Dusík** – N_2 je nehořlavý, bezbarvý nejedovatý plyn bez zápachu. Dusík je hlavní součástí vzduchu (78% N_2 , 21% O_2 , 1% ostatní plyny), takže je také s kyslíkem nasáván do motoru. Převážná část se po skončení spalovacího procesu vrací ve výfukových plynech zpět do ovzduší. Malá část reaguje s kyslíkem a vznikají oxidy dusíku NO_x (N_2O – oxid dusný, NO – oxid dusnatý, NO_2 – oxid dusičitý)[5]



Obrázek 5 Dusík[4]

- **Voda** – H_2O je jako vodní pára nasávána spolu se vzduchem. Kromě toho vzniká kondenzací vlivem „studeného“ spalování během ohřevu motoru.



Obrázek 6 Voda[4]

- **Oxid uhličitý** – CO_2 je bezbarvý plyn, bez chuti a bez zápachu. Na lidské zdraví nemá žádný podstatný vliv, avšak patří mezi nejdůležitější skleníkové plyny (způsobují globální změnu podnebí). Nejvíce CO_2 u nás vyprodukuje silniční doprava - téměř 93,0 %, kdežto železniční doprava jen kolem 4,4 %.

Množství oxidu uhličitého, emitovaného do ovzduší spalovacími motory, je přímo určeno spotřebou paliva. Snižování emisí CO_2 je tedy možné pouze snížením spotřeby paliva motoru a je tedy značně problematické.[5]



Obrázek 7 Oxid uhličitý[4]

1.3.2. Zdraví škodlivé složky výfukových plynů

- **Oxid uhelnatý** – CO Oxid uhelnatý je hořlavý a prudce jedovatý bezbarvý plyn, bez chuti a bez zápachu. V normálních koncentracích v ovzduší poměrně brzy oxiduje na oxid uhličitý (CO_2).

Hlavní negativní efekt pro člověka spočívá v blokování přísunu kyslíku ke tkáním. Z tohoto důvodu jsou nejvyšší zdravotní rizika pro orgány závislé na vydatném zásobování kyslíkem, tzn. pro srdce a mozek. CO se váže na hemoglobin v krvi mnohem lépe než kyslík a proto způsobuje deficit okysličení krve. Má toxické účinky a při zvýšení hladiny CO, vázaného na hemoglobin v krvi nad 40% COHb již hrozí akutní nebezpečí smrti.[6]

Klasickými příznaky otravy CO jsou bolesti hlavy a závrať, srdeční obtíže a malátnost. Nejvíce poškozuje srdce, cévy, nervový systém a nenarozený plod v matčině těle. Jak omezení schopnosti hemoglobinu vázat kyslík, tak jeho neochota uvolňovat vázaný kyslík způsobuje deficit zásobování tkání kyslíkem a snižuje výkonnost, zvyšuje únavu. $5000\mu\text{g}/\text{m}^3$ je norma nejvyšší přípustné průměrné denní koncentrace CO v ovzduší. [6]



Obrázek 8 Oxid uhelnatý[4]

Koncentrace CO ve výfukových plynech výrazně vzrůstá při nedostatku kyslíku, který se vyskytuje u zážehových motorů. Při spalování chudých směsí (vznětové motory, plynové motory) je obsah CO nízký.

Vzniká při spalování uhlíkatých paliv za nízké teploty a nedostatku spalovacího vzduchu (kyslíku), kdy nedochází k úplné oxidaci uhlovodíků na oxid uhličitý a vodní páru. [5]

- **Oxidy dusíku** – NO_x jsou nejrozšířenější škodlivinou z výfukových zplodin automobilů. NO₂ působí jako dráždivý plyn a je vstřebáván v plicích až z 90% a spolu s ostatními součástmi NO_x může být příčinou zánětlivých procesů sliznice nosu, hrtanu, průdušek a plic. [6]

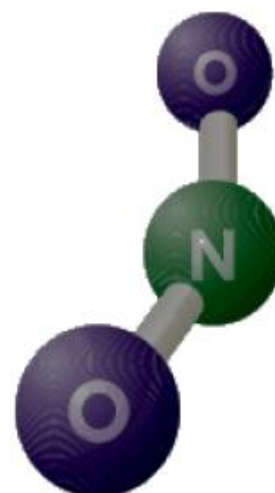
Oxidy dusíku vznikají při vysokých teplotách a tlacích ve spalovacím prostoru a jejich tvorba je tedy závislá na bohatosti směsi a koncentraci kyslíku. Největší zastoupení má oxid dusnatý z 95 %, který je také toxický.[3]

Při vdechování se na stěnách sliznice tvoří kyselina dusičná (HNO₃). Dýchací soustava reaguje na vdechování HNO₃ jako na začínající hoření a automaticky přivírá přístup vzduchu do plic. Důsledkem toho je pocit dušení a nucení ke kašli.[5]

Kromě nepříznivého působení na jedince způsobují v podobě „kyselých“ dešťů i devastaci vegetace a staveb – napadají stavební materiály.

- **Nespálené uhlovodíky** – HC tyto látky jsou směsí různých skupin uhlovodíků, které vstupují, jako palivo do oxidačního procesu kde vznikají tzv. lokální místa nespálených uhlovodíků.

Některé uhlovodíky společně s oxidy dusíku zapříčiňují vznik troposférického ozónu.



Obrázek 9 Oxid dusičitý[4]



Obrázek 10 Nespálené uhlovodíky[4]

Do výfukových plynů se dostávají např. při vyplachování spalovacího prostoru, nebo při vynecháním či poruchou spalování. [6]

Řadíme sem alkany, alkoholy, aldehydy, ketony a aromatické uhlovodíky. Stejně jako oxid uhelnatý vznikají uhlovodíky při nedokonalém spalování. Spolu s oxidy dusíku se podílejí na tvorbě smogu a přízemního ozonu. Nejmenší vliv na lidský organismus mají uhlovodíky, které jsou obsaženy v palivech. Další uhlovodíky působí dráždivě při malých koncentracích i při nízkých expozičních dobách, některé jsou karcinogenní . např. benzen.

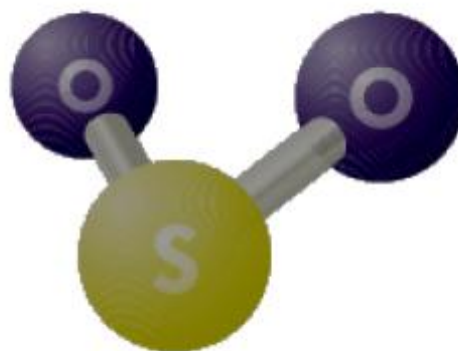
Aldehydy způsobují charakteristický zápach výfukových plynů. Nespálené uhlovodíky působí v lidském organismu škodlivě na sliznice, vedou k poruchám podmíněných reflexů a poškozují dýchací cesty. Spolu s oxidy dusíku se podílejí na tvorbě smogu a přízemního ozonu.[5]

- **Oxid siřičitý** – SO_2 vzniká spalováním paliva s obsahem síry a je to bezbarvý štiplavě páchnoucí jedovatý plyn. Oxid siřičitý (SO_2) vzniká slučováním síry (S) s kyslíkem (O_2) obsaženým v nasávaném vzduchu. Síra (S) je obsažena v palivu, přičemž limitní hodnoty jsou vyšší u motorové nafty než u benzínu. Sloučením SO_2 s vodou (H_2O) vznikají siřičité kyseliny, které škodí životnímu prostředí ve formě tzv. „kyselých dešťů“. SO_2 dráždí nosní sliznice i plíce a s vyššími koncentracemi způsobuje i otok plic a hrtanu.[6]

Množství oxidu siřičitého ve výfukových plynech není legislativně přímo omezeno, ale normami Evropské unie je stanoveno maximální množství síry v motorové naftě, kde mezní hodnoty jsou vyšší u motorové nafty než u benzínu.

K produkci těchto sloučenin dochází hlavně u vznětových motorů. Podíl emisí plynoucích ze spalovacích motorů je na celkovou produkci zanedbatelný, neboť obsah síry v motorové naftě neustále klesá.

Sektor dopravy se na emisích oxidů síry podílí (v porovnání s např. tepelnými elektrárnami na fosilní paliva) relativně málo.



Obrázek 11 Oxid siřičitý[4]

1.4 Příčiny vzniku jednotlivých škodlivin

1.4.1 Vznik oxidu uhelnatého

Oxid uhelnatý vzniká u spalovacích motorů především při bohaté směsi ($\lambda < 1$), díky nedostatečnému obsahu kyslíku potřebnému pro oxidaci uhlíku na neškodlivý oxid uhličitý (CO_2). Koncentrace CO jsou u vznětových motorů desetinné ve srovnání se zážehovými motory. K výraznějšímu nárůstu dochází v oblastech vyššího zatížení. V oblasti přebytku paliva (bohaté směsi) stoupá objemový obsah CO s klesající hodnotou λ prakticky lineárně. V oblasti přebytku vzduchu, tzn. chudé směsi, je objemový obsah CO nízký a na hodnotě λ prakticky nezávislý.

V oblasti stechiometrického složení směsi – součinitel přebytku vzduchu $\lambda = 1$ – je objemový obsah CO přibližně 0,3 – 0,5 % a je určen především nehomogeností rozdělování směsi pro jednotlivé válce a kolísáním složení směsi při jednotlivých cyklech. Je-li směs v některých válcích bohatší a v některých chudší, je průměrná výsledná hodnota objemového obsahu CO vyšší, než kdyby byla ve všech válcích směs se stejnou hodnotou λ . [6]

1.4.2 Vznik oxidů dusíku

Vysoká teplota a tlak ve spalovacím prostoru vedou k oxidaci dusíku obsaženého v nasávaném vzduchu. Kromě oxidu dusnatého (NO) vznikají v malých množstvích také oxid dusičitý (NO_2) a oxid dusný (N_2O).

V oblasti přebytku paliva stoupá se stoupající hodnotou λ i hodnota emisí oxidů dusíku a to především díky zvyšující se koncentraci kyslíku. V oblasti chudé směsi emise oxidů dusíku klesají se zvyšující se hodnotou λ , protože s chudší směsí klesá teplota ve spalovacím prostoru a tím se omezují podmínky pro vznik NO_x . Nejvyšších teplot se dosahuje spalováním mírně bohatých směsí. Podmínkou vysokých koncentrací NO_x je však kromě vysoké teploty také dostatečný obsah kyslíku. Z tohoto důvodu je maximum koncentrace NO_x při $\lambda = 1,05$ – $1,1$. [6]

U vznětových motorů je výskyt NO_x nižší ve srovnání se zážehovými (při optimalizaci z hlediska energetických vlastností). Důvodem je větší přebytek vzduchu. S rostoucím přebytkem vzduchu jejich koncentrace klesá vlivem zředění přebytečným vzduchem a poklesem spalovacích teplot. Přesto patří k problematickým škodlivinám s ohledem

na plnění zákonných předpisů. U komůrkových motorů jsou emise NO_x nižší než u přímo vstříkových motorů vlivem výraznějšího vrstvení směsi a pomalejší rychlosti hoření.[5]

1.4.3 Vznik nespálených uhlovodíků

Vznikají v důsledku předčasně zastavených oxidačních reakcí v některých zónách spalovacího prostoru (nejčastěji na chladnějších stěnách válce) nebo vynecháním či poruchou spalování. Stejně jako u emisí CO stoupá hodnota HC v oblasti bohaté směsi s klesající hodnotou λ . Důvodem je přebytek paliva a neúplné spalování a tím i zvýšená hodnota emisí nespálených a částečně spálených uhlovodíků.

Optimální směšovací poměr z hlediska obsahu HC je v oblasti chudé směsi při přebytku vzduchu $\lambda = 1,1-1,2$. Nižší i vyšší součinitel přebytku vede ke zvyšování koncentrace HC ve výfukových plynech.[5]

1.4.4 Vznik pevných částic

Primární uhlík se tvoří při spalování neodpařených kapek paliva v prostředí s vysokou teplotou a při extrémně nízkých lokálních hodnotách přebytku vzduchu. Emise PM tedy souvisí zejména s kvalitou rozprášení paliva při jeho vstříkávání do válce. Je zřejmé, že přísun kyslíku k částicím paliva se zlepšuje se zvětšováním celkového množství vzduchu, proto se emise částic snižuje s jeho rostoucí hodnotou.

Organické složky pevných částic (SOF – Soluble organic fraction) pocházejí z nespáleného paliva, motorového oleje, z produktů částečného spalování a pyrolýzy (tepelného rozkladu). SOF vznikají v případě, že je nespálené palivo a mazací olej uvězněny ve štěrbinách válce nebo v chladných bodech uvnitř válce bez možnosti oxidace nebo pyrolýzy. Při vysokých teplotách ve výfukovém potrubí jsou tyto směsi v plynné formě, ale při zchlazení a zředění některé z méně těkavých organických sloučenin mohou sorbovat na povrch částic. Jestliže je málo adsorpčních míst, organické sloučeniny mohou kondenzovat např. kyselinu sírovou a tvořit jádra nanočástic.[5]

Obsah pevných částic ve výfukových plynech lze účinně snižovat např. vhodným návrhem plnicího systému, konstrukčními úpravami pro snížení spotřeby mazacího oleje a omezením obsahu síry v palivu. Mimo těchto opatření se pevné částice mohou zachycovat v tzv. „filtr pevných částic“, které jsou součástí výfukových systémů spalovacího motoru.

1.5 Emisní limity

Všechna nově vyráběná vozidla i stroje musí splňovat stále přísnější hodnoty emisí ve výfukových plynech. Z tohoto důvodu se provádí před samotným uvedením do provozu náročná schvalovací měření tzv. homologační zkoušky. V Evropě se mezní hodnoty pro mimosilniční stroje snižují podle směrnice 97/68/ES. Pro splnění zpřísněných mezních hodnot emisí ve výfukových plynech je třeba učinit vnitřní a vnější optimálně vzájemně vyladěná opatření v motoru. Existuje mnoho předpisů a norem upravující emisní limity. Mezi nejznámější patří normy Tier a Stage, které regulují množství vyprodukovaných emisí v Severní Americe a v zemích Evropské unie.

1.5.1 Historie emisních limitů

První emisní normy začaly vznikat na konci 60. let 20. století a to v USA. Později se emisemi začali zabývat i v Evropě a na začátku 70. let 20. století vyšla norma EHK 15, která již kontrolovala emise výfukových plynů u silničních vozidel, a výrobci se museli této normě přizpůsobit. Poté se začali tvořit další normy s označením EURO a k tomu číslo dané normy. Čím vyšší číslo, tím je norma novější a také přísnější. S každou další emisní normou EURO se množství škodlivých látek, ať už se jedná o plyny nebo pevné částice, které vycházejí z výfukového systému, snižuje. Vždy v přibližně čtyřletých intervalech vychází aktualizovaná verze této normy.[8]

S rostoucími požadavky na ochranu životního prostředí se postupem času dostaly i vozidla nesilniční, mezi něž řadíme i zemědělské a lesnické traktory. Emisní normy pro nesilniční pojízdné stroje jsou označovány názvem „Stage“ (Stupeň) a římskou číslicí označující danou etapu, přičemž v každé etapě jsou emisní limity nastavovány vzhledem k výkonu motoru.

Předpisy norem Stage I a Stage II byly vyhlášeny dne 16. prosince 1997 (podle směrnice 97/68/ES) Stage I vešla v platnost v roce 1999 a Stage II od roku 2001 do roku 2004 (v závislosti na výkonu motoru). Na motory používané v lodích, lokomotivách, letadlech se emisní normy Stage I a II nevztahují.

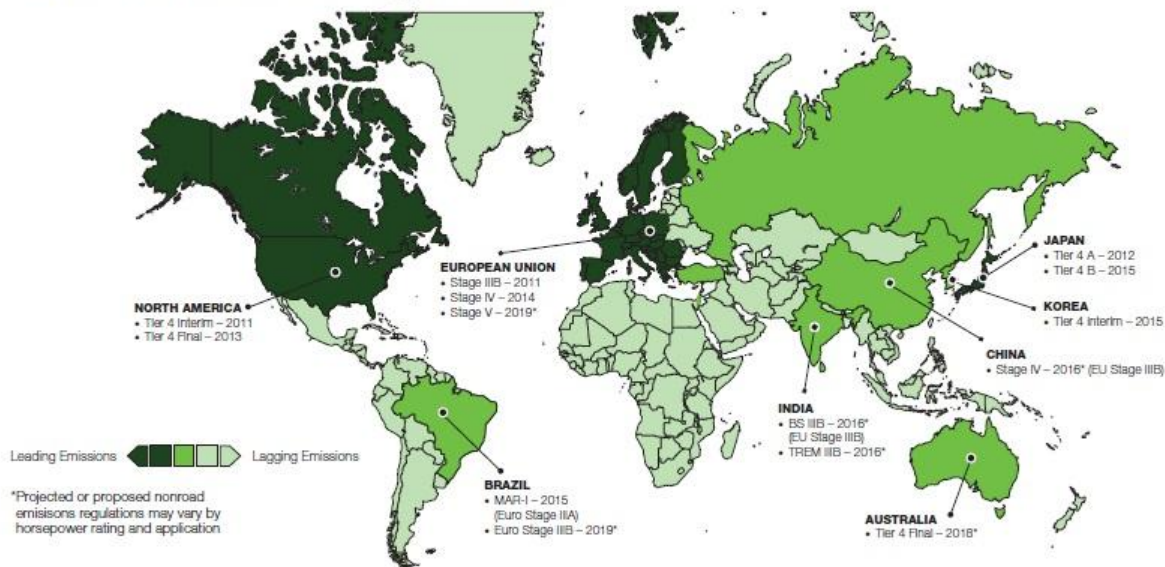
Předpis norem Stage III a IV pro non road motory byly přijaty Evropským parlamentem dne 21. dubna 2004 (směrnice 2004/26/ES) a pro zemědělské a lesní stroje dne 21. února 2005 (směrnice 2005/13/ES).

1.5.2 Emisní limity mimosilničních strojů

Emisní limity jsou stanovovány příslušnými vládami, které je obvykle přejímají v plném znění nebo s výhradami, případně posunutou platností do své legislativy od organizací jejichž členy jsou. Mezi tyto organizace patří OSN resp. Evropská hospodářská komora EHK OSN, EU a EPA, které mají největší vliv na tvorbu legislativy v této oblasti průmyslu. Tato globalizace usnadňuje výrobcům spalovacích motorů jejich nastavování a opatření pro redukci emisí. V rámci EU platí směrnice 97/68/ES z roku 1997 novelizovaná v roce 2004/26 EC, která se týká opatření proti emisím plyných znečišťujících látek a znečišťujících částic ze spalovacích motorů určených pro nesilniční pojízdné stroje. Do této skupiny patří traktorové motory, lodní motory, motory pro lokomotivy atd. Emisní limity se vyjadřují pro stanovený rozsah výkonu motoru a období platnosti a uvádí se v g/kW.h. Limitovanými emisemi jsou oxid uhelnatý CO, uhlovodíky, resp. těžké organické sloučeniny HC, suspendované částice PM a oxidy dusíku NOx. Pro emisní limity se používá v EU výraz STAGE, zatímco v USA TIER. S tím jak se limity s přibývajícím roky zpřísňují, dochází ke snižování obsahu síry v motorové naftě. Snižování obsahu síry je důležité z pohledu používaných technologií na následnou úpravu limitovaných emisí např. filtry na pevné částice, u kterých působí síra snižování účinnosti jejich práce a životnosti.

Pro různé státy světa jsou emisní normy rozdílné viz. Obrázek 12

Global Emissions Regulations.



Obrázek 12 Platné emisní limity v různých státech světa[9]

1.5.2.1 Evropské emisní limity pro mimosilniční stroje

Evropské emisní limity pro diesellové motory byly zpracovány do několika úrovní známých jako Stage I až Stage V.

- **Stage I/II**

První evropské právní předpisy upravující emise pracovních strojů byly vyhlášeny 16. prosince 1997. Jednalo se vydanou směrnicí 97/ 68/ ES. Omezení pro diesellové motory byly představeny ve dvou etapách. Stage I vešla v platnost v roce 1999 a Stage II byla implementována od roku 2001 do roku 2004, v závislosti na výkonu motoru. Tyto předpisy se vztahovaly na širokou škálu strojů pro stavební, zemědělské a další účely, přičemž všechny tyto stroje měly společné předpisy, pouze u zemědělských a lesnických traktorů byly jiné lhůty pro provedení (směrnice 2000/ 25/ ES). Dne 9. prosince 2002 přijal Evropský parlament směrnici 2002/ 88/ ES, která změnila směrnici 97/ 68/ ES ve smyslu přidání emisních předpisů pro malé, benzínové motory do výkonu 19 kW, užívané pro pohon účelových strojů. Směrnice rovněž rozšířila uplatnění Stage II pro motory pracující při konstantních otáčkách. Emise pro malé užitkové motory byly do značné míry sjednoceny s americkými emisními standarty. [5]

Tabulky 1 a 2 udávají hodnoty emisí motorů pro normy Stage I a Stage II, které nesmí být přesáhnuty. Uvedené lhůty platí pro motory, které byly uvedeny na trh po tomto datu.

Výkon Pn [kW]	Nox g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Datum platnosti
	Nox + NMHC				
Stage I					
35≤P<75	9,2	1,3	6,5	0,85	04/1999
75≤P<130	9,2	1,3	5	0,7	01/1999
130≤P≤560	9,2	1,3	5	0,54	01/1999

Tabulka 1 Stage I

Výkon Pn [kW]	Nox g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Datum platnosti
	Nox + NMHC				
Stage II					
18≤P<37	8	1,5	5,5	0,8	01/2001
35≤P<75	9,2	1,3	5	0,4	01/2004
75≤P<130	9,2	1	5	0,3	01/2003
130≤P≤560	9,2	1	3,5	0,2	01/2002

Tabulka 2 Stage II

- **Stage III/IV**

Emisní limity Stage III/IV pro stroje byly přijaty Evropským parlamentem dne 21. dubna 2004 (Směrnice 2004/26/ES). Dvě další směrnice byly přijaty v roce 2010. Směrnice 2010/26/ EU, která přináší další technické podrobnosti o testování a schválení motorů Stage IIIB a Stage IV. Směrnice 2010/ 22/ EU mění předchozí právní předpisy vztahující se na zemědělské a lesnické stroje.[9]

Emisní norma označovaná jako Stage III se dělí na Stage IIIa a Stage IIIb, které postupně vstupují v platnost od roku 2006 až do roku 2013. Stage IV vstoupila v platnost v roce 2014. Právní úprava pro Stage III/IV se vztahuje pouze na nová vozidla, zařízení a na náhradní motory pro použití v již provozovaných zařízeních. Tabulky 3 až 5 udávají hodnoty měřených emisí, které nesmí být přesáhnuty.[5]

Výkon Pn [kW]	Nox g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Datum platnosti
	Nox + NMHC				
Stage IIIa					
19≤P<37	7,5		5,5	0,6	01/2007
35≤P<75	4,7		5	0,4	01/2008
75≤P<130	4		5	0,3	01/2007
130≤P≤560	4		3,5	0,2	01/2006

Tabulka 3 Stage IIIa

Výkon Pn [kW]	Nox g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Datum platnosti
	Nox + NMHC				
Stage IIIb					
37≤P<56	4,7		5	0,025	01/2013
56≤P<75	3,3	0,19	5	0,025	01/2012
75≤P<130	3,3	0,19	5	0,025	01/2012
130≤P≤560	2	0,19	3,5	0,025	01/2011

Tabulka 4 Stage IIIb

Výkon Pn [kW]	Nox g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Datum platnosti
	Nox + NMHC				
Stage IV					
56≤P<130	0,4	0,19	5	0,025	10/2014
130≤P<560	0,4	0,19	3,5	0,025	01/2014

Tabulka 5 Stage IV

Normy Stage IV představil velmi přísnou NOx limit 0,4 g / kWh, která vyvolala široké využití následného zpracování výfukových plynů (typicky močovina-SCR).

- **Stage V**

Dne 25. září 2014 Evropská komise navrhla emisní předpisy Stage V. Návrh zavádí řadu důležitých změn. Navrhované emisní limity Stage V pro motory nonroad stroje (kategorie NRE), jsou uvedeny v tabulce 6. Tyto normy se vztahují i na motory od 0 do 56 kW, na které se nevztahovala norma Stage IV. Předpisy Stage V by měl zavést nový limit pro emise pevných částic. Pevné částice (PM) by měli být sníženy oproti Stage IV z 0,025 g / kWh na 0,015 g / kWh.[9]

Výkon Pn [kW]	Nox g/kWh	HC g/kWh	CO g/kWh	PM g/kWh	Datum platnosti
	Nox + NMHC				
Stage V					
P<8	7,5		8	0,4	2/2019
8≤P<19	7,5		6,6	0,4	2/2019
19≤P<37	4,7		5	0,015	2/2019
37≤P<56	4,7		5	0,015	2/2019
56≤P<130	0,4	0,19	5	0,015	2/2019
130≤P<560	0,4	0,19	3,5	0,015	2/2019
P<560	3,5	0,19	3,5	0,045	2/2019

Tabulka 6 Stage V

1.6 Metodika měření emisí

Metodika měření emisí je popsána ve směrnici 97/68/ES při použití vznětového motoru, jehož netto výkon (80/1269/EEC) je nejméně 19 kW, avšak není větší než 560 kW, a který je provozován s měnícími se otáčkami spíše než se stálými otáčkami. Metodika měření zahrnuje dva testovací cykly:

- **cyklus NRSC** (Non-road steady cycle) (stacionární zkouška nesilničních pojízdných strojů) se použije pro etapy I, II a III A a společně s NRTC i pro etapy III B a IV v případě plynných znečišťujících látek

- **cyklus NRTC** (Non-road transient cycle) (dynamická zkouška nesilničních pojízdných strojů) se použije k měření emise částic pro etapy III B a IV u všech motorů s výjimkou motorů s konstantními otáčkami.

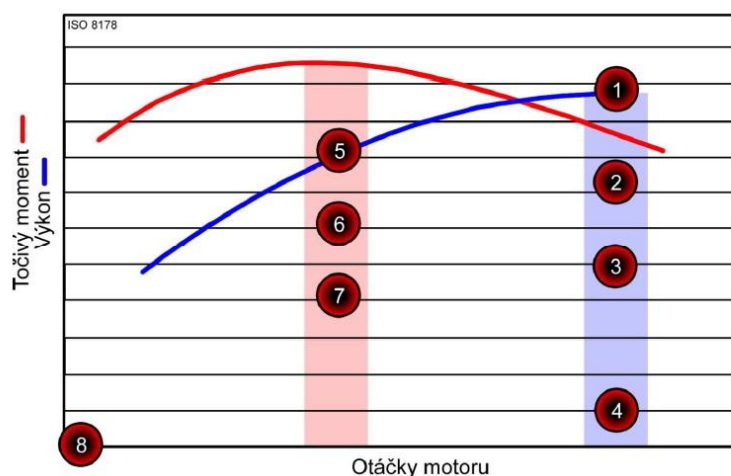
1.6.1 Měření pomocí NRSC cyklu

V případě zkoušek NRSC se používá metodika tzv. 8 bodového testu, při kterém se zatěžuje samostatný motor na zkušební stoličce na různé otáčky a točivý moment. Tento cyklus plně odpovídá normě ISO 8178-4 C1 pro motory Off road vehicles s proměnlivým zatížením a otáčkami. Každý z 8 bodů má svoji váhu vyjádřenou konstantou, kterou se násobí naměřené hodnoty emisí. Váhové faktory udávají podíl, jakým příslušný režim přispívá do celkového výsledku testu a tím i důležitost daného režimu v testu. Přehled o velikosti momentů, otáček, váhových konstantách je uveden v tabulce 7. V případě zkoušení traktorů se používá metodika tzv. 8 bodového testu. [3]

Bod testu	1	2	3	4	5	6	7	8
Točivý moment [%]	100	75	50	10	100	75	50	0
Otáčky motoru	Jmenovité otáčky motoru				Mezilehlé otáčky motoru			Volnoběh
Váhový faktor	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15

Tabulka 7 Cyklus NRSC

Mezilehlé otáčky se stanovují na základě velikosti otáček při nejvyšším točivém momentu ve vztahu k jmenovitým otáčkám. Jedna z možností je, že to mohou být otáčky při max. točivém momentu ležící mezi 60 – 75 % jmenovitých otáček motoru. Další možnosti jsou blíže specifikovány v předpisu 97/68/ES. Pro každý měřicí bod je zapotřebí měřit přesně deset minut času při ustáleném režimu. Hodnoty plyných emisí z výfuku se změří a zaznamenávají v průběhu posledních tří minut režimu.[3]



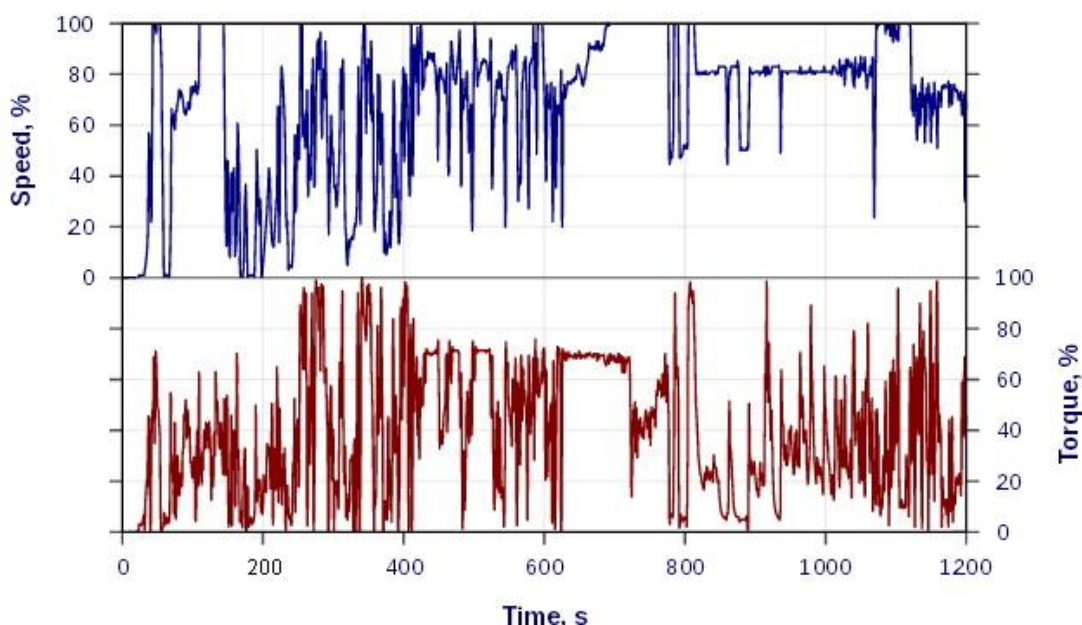
Obrázek 13 Průběh měření NRSC cyklu[3]

1.6.2 Měření pomocí NRTC cyklu

Zkouška NRTC je neustálený jízdní cyklus pro mobilní vznětové motory nonroad vyvinutý US EPA ve spolupráci s orgány v Evropské unii (EU). Test se používá mezinárodně pro emisní schválení certifikace / typu nonroad motorů. Cyklus NRTC je povinný od etapy IIIB pro výkonovou kategorii 130 – 560 kW. Měření se provádí u studeného motoru, ale také u zahřátého motoru na provozní teplotu. Emise (v g/kWh) se měří v průběhu obou režimů. Vážená kombinovaná hodnota emisí se vypočítá vážením výsledků získaných při startu za studena faktorem 0,10 a výsledků získaných při startu za tepla faktorem 0,90. [3]

Měření probíhá na dynamometru u samostatného motoru stejně jako v předchozím případě. Zatěžování probíhá automaticky podle sestavené datové tabulky, ve které se mění velikost otáček motoru a točivého momentu. Okamžité hodnoty nastavovaných tzv. normalizovaných otáček a točivého momentu se zjišťují podle algoritmu uvedeného ve směrnici 97/68/ES. Cyklus je ve formě neustáleného jízdního plánu v celkové délce 1238 sekund, se změnou každou sekundu.

Hodnoty emisí se dopočítávají při tomto testu podobně jako u NRSC cyklu, z naměřené koncentrace plynných složek násobené okamžitým hmotnostním průtokem výfukového plynu. Normalizované otáčky motoru a točivý moment v průběhu zkoušky NRTC jsou uvedeny na obrázku 14.



Obrázek 14 Průběh měření NRTC cyklu[9]

1.7 Analyzátoři na určování plynných koncentrací jednotlivých složek výfukových plynů

Existuje mnoho metod, kterými se určují složky výfukových plynů. Zakládají se hlavně na principu elektrickém, chemickém a optickém.

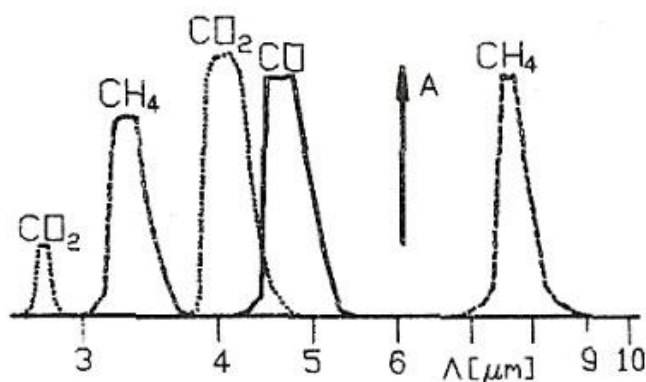
1.7.1 Měření založení na principu absorpce infračerveného záření

Infračervená spektrometrie (IR) je analytická technika molekulové vibrační spektrometrie, která se zabývá studiem pohybů atomů v molekulách, tj. molekulových vibrací. Tato nedestruktivní analytická technika zaznamenává pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem.



Obrázek 15 Popis absorpce[10]

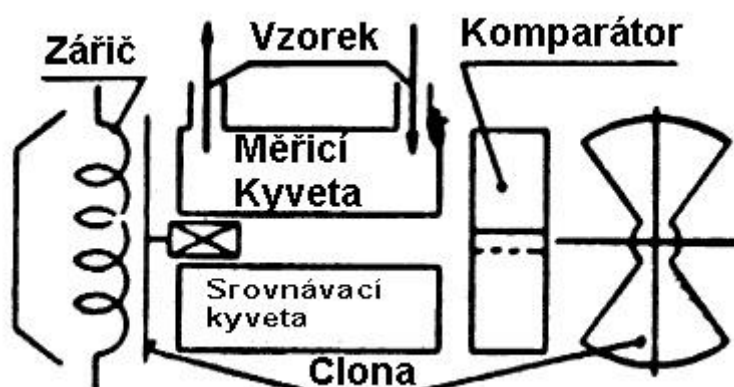
Při průchodu elektromagnetického záření vrstvou plynu je část procházející energie pohlcena. Pro zjišťování přítomnosti individuálního plynu v analyzované směsi se využívá skutečnost, že závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce záření je individuální vlastností plynů, které obsahují v molekule alespoň dva různé atomy. [10]



Obrázek 16 Absorpční spektrum[10]

Absorpci individuálního plynu tedy určuje plocha pod křivkou Λ označenou na obr. 16 chemickým vzorcem příslušného plynu. Špičky vibračních absorpčních spekter leží v rozsahu vlnových délek (nebo frekvencí), pro které se používá označení infračervená oblast (odtud název metody)

Infračervené záření emitované zářičem prochází kyvetami s okny z materiálu propustného pro příslušné vlnové délky. Měřicí kyveta se proplachuje vzorkem analyzovaného plynu, přičemž část procházejícího záření je případně pohlcena. Rozdíl v intenzitě záření je tedy měřítkem koncentrace všech absorpčně činných plynů ve vzorku. Selektivnost přístroje se dosáhne komparátorem složeným ze dvou komor naplněných plynem, jehož koncentrace v analyzované směsi se zjišťuje. Plyn v komparátoru pak absorbuje pouze v oblasti individuálního absorpčního spektra a náplň komor se ohřívá rozdílně v závislosti na koncentraci sledované složky ve vzorku.[10]



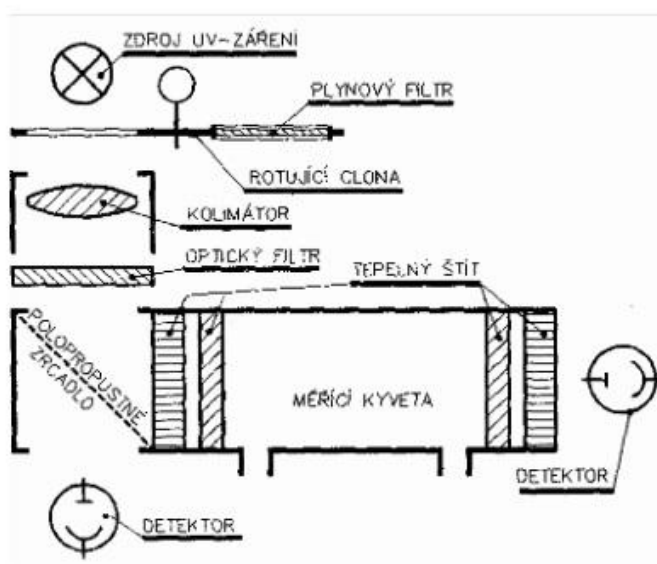
Obrázek 17 Infraanalyzátor výfukových plynů

Infraanalyzátor se používá při měření výfukových plynů ke stanovení hodnot plynů CO, CO₂, a je nejjednodušší a také nejlevnější analyzátor s vlastnostmi, které se hodí k nasazení do výzkumu a vývoje.

1.7.2 Měření založení na principu absorpce ultrafialového záření

Stejně jako infraanalyzátoři patří do skupiny optických analyzátorů. Jako zářič je zde použita plynová výbojka s dutou katodou. Ultrafialové záření prochází měřicí kyvetou, kde dochází k pohlcení části záření absorpčně aktivními složkami přítomnými ve výfukových plynech, jimiž je kyveta kontinuálně proplachována. Referenční paprsek je veden přímo

na korekční detektor. Selektivita přístroje je zajištěna volbou plynové náplně výbojky a náplně plynového filtru. V elektronických obvodech se generuje napětí, které je lineární funkcí koncentrace sledované složky plynu. Tento typ přístroje se užívá především na určování koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech. Jejich životnost je omezena plynovou náplní výbojky, která se při provozu spotřebovává. [10]



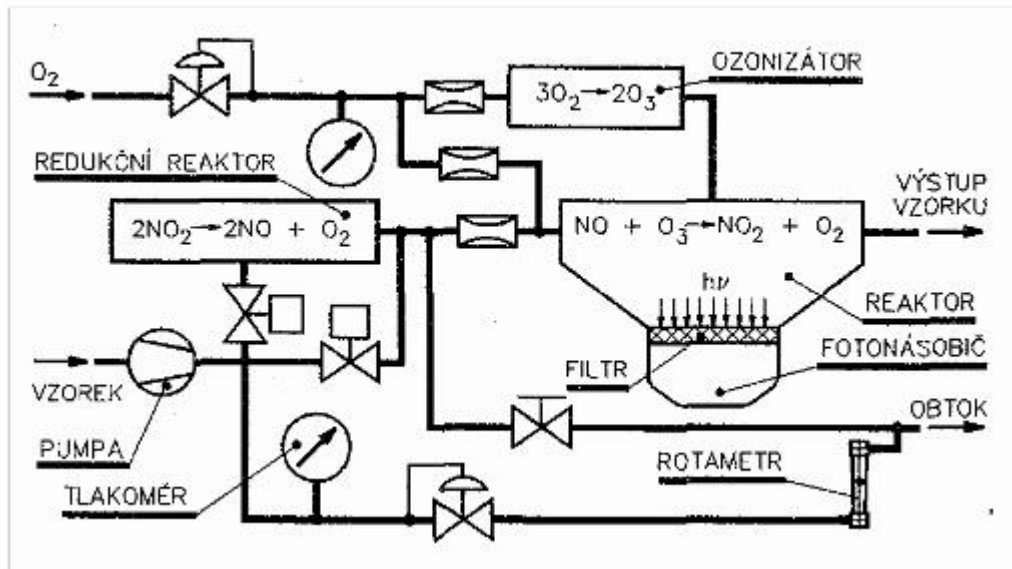
Obrázek 18 Ultrafialový analyzátor výfukových plynů [10]

1.7.3 Měření s využitím chemické luminiscence

Chemická luminiscence je emise specifických energetických kvant (fotonů) provázející některé chemické reakce. Při analýze výfukových plynů spalovacího motoru se tato metoda používá pro stanovení koncentrace oxidů dusíku. Do chemické reakce kromě oxidů dusíku vstupuje také ozón, který je vyráběn v přístroji. Z oxidů dusíků vstupuje do reakce pouze NO. Pro zjištění celkové emise oxidů dusíku ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) se přepnou elektromagnetické ventily tak, aby vzorek procházel vyhřívaným katalytickým reaktorem, ve kterém dochází k redukci oxidu dusičitého na dusnatý. Přístroj tedy může pracovat v režimu měření koncentrace NO, nebo v režimu měření koncentrace NO_x . Koncentraci NO_2 lze zjistit jako rozdíl hodnot naměřených v obou režimech při analýze stále stejného vzorku. Redukční reaktor je přesně temperován na teplotu, při níž je průběh redukční reakce optimální. [10]

Chemiluminiscenční analyzátor (CLA - ChemiLuminiscent Analyser) je velmi citlivý a selektivní (prakticky nevykazuje příčnou citlivost na jiné složky) a možnosti změn měřicího rozsahu jsou značné. Stejný přístroj lze dokonce používat k měření emisních hodnot

(maximální rozsah např. 1 %, ten se ovšem při experimentech na spalovacích motorech použije jenom v etapě zjišťování základních souvislostí v atypických režimech – motor s takovou emisí NOX nemůže vyhovět ani nejmírnějším požadavkům na ekologické vlastnosti) i k měření imisí (tedy kontaminace ovzduší - nejmenší rozsah je např. 2 ppm). [10]



Obrázek 19 Chemiluminiscenční analyzátor[10]

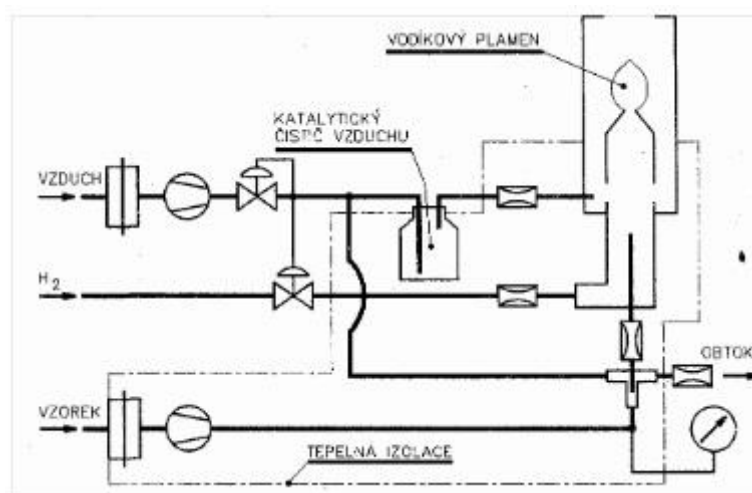
Při provozu analyzátoru musí být zajištěn trvalý přísun kyslíku (pro měření nižších koncentrací NOX lze použít i syntetický nebo alespoň suchý vzduch) z tlakové láhve přes redukční ventil. Tlak kyslíku lze obvykle nastavovat (kontrolovat) pomocí tlakoměru vestavěného do chemiluminiscenčního analyzátoru. [10]

1.7.4 Měření založené na principu změny elektrické vodivosti vodíkového plamene

Po připojení elektrického potenciálu na vodíko-vzduchový plamen vzniká velmi malý (šumový) proud iontů. Přivedením organicky vázaného uhlíku do zóny hoření proud iontů narůstá úměrně průtočnému množství uhlovodíků. Na tomto principu pracuje analyzátor, který se původně vyvinul jako detektor chromatografu a proto se nazývá plamenoionizační detektor (FID - Fláme Ionization Detector).[10]

Difúzní vodíkový plamen se zapaluje při spuštění přístroje žhavící svíčkou. Spalovací vzduch nasávaný z atmosféry se zbavuje případně přítomných organických

sloučenin v katalytickém čističi. Část vzduchu se mísí s vodíkem před vstupem do hořáku, aby se podle koncentrace kyslíku ve vzorku neměnil příliš tvar plamene. [10]



Obrázek 20 Plamenoionizační detektor[10]

Tlak vodíku se reguluje v závislosti na tlaku spalovacího vzduchu, aby se zajistil trvale přiměřený směšovací poměr. Proud iontů se snímá dvojicí elektrod, z nichž jedna je obvykle tvořena samotným tělesem hořáku, druhá je umístěna na plameni a má tvar šroubovice proměnlivým průměrem, nebo jen jednoduchý rovný drát či těleso trubkového tvaru. Celé vedení vzorku (včetně filtru, pumpy, hořáku) je umístěno v termostatu a může být temperováno např. až na 200 °C. Jinou možností je podtlakové uspořádání s umístěním (nevyhřívaně) pumpy na výstupu spalin ze spalovací komory přístroje. [10]

1.7.5 Měření kouřivosti motoru

Na rozdíl od plyných škodlivin je kouření vznětového motoru pozorovatelné i bez měřících přístrojů a proto se stalo předmětem všeobecného zájmu jako první ze skupin jevů, kterými spalovací motor působí negativně na okolí.[10]

První metoda na zjišťování kouřivosti motoru je založena na zachycení částic kouře na filtračním papírku.

Druhá metoda je přímé zjišťování pohltivosti světla sloupcem výfukových plynů definované délky. Měřená veličina se nazývá opacita (pohltivost světla) spalin a příslušný měřicí přístroj je opacimetr.

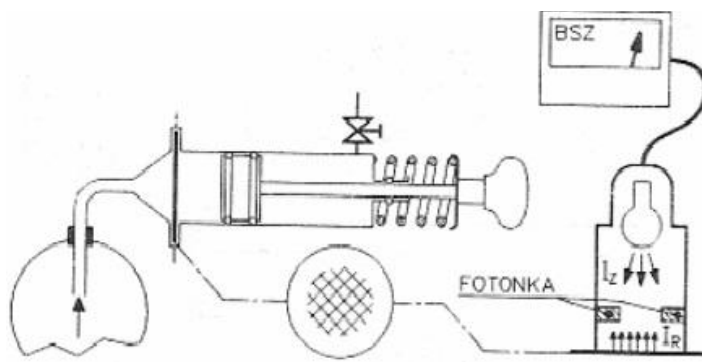
Třetí metoda je přímé hmotnostní měření koncentrace částic gravimetrickou metodou, která je založena na zachycování pevných částic do filtru ze skelných vláken.

1.7.5.1 Měření kouřivosti motoru filtrační metodou

Tato metoda je založena na zachycení částic kouře na filtrační papírek, přes který se prosaje definované množství výfukových plynů definovanou rychlostí. Množství částic se vyhodnocuje opticky podle zčernání filtračního papírku v porovnání s novým papírkem. [10]

Kontaminovaný papírek se vyhodnotí reflektivním fotometrem, který je citlivý na množství světla odražené od plochy papírku v místě povlečeném vrstvou zachycených sazí. Výsledkem je stupeň zčernání. [10]

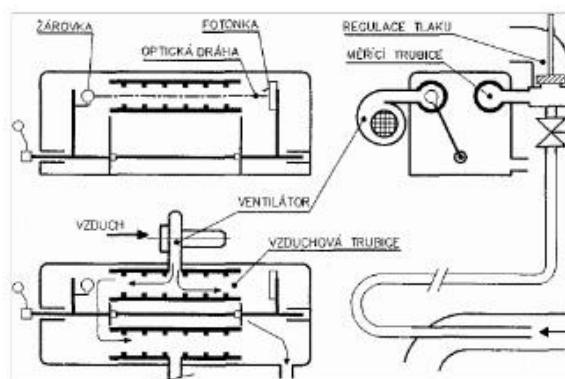
Pro dynamické měření spalovacích motorů je tato metoda nevhodná.



Obrázek 21 Filtrační kouřoměr[10]

1.7.5.2 Opacimetrie

Samotné prosvícení sloupce spalin viditelným světlem a zjištění prošlého podílu záření nepředstavuje zvláštní problém. Nutno se ovšem vypořádat s nebezpečím pokrytí povrchu zdroje a čidla povlakem částic, jehož opacita by zkreslila údaj přístroje. [10]



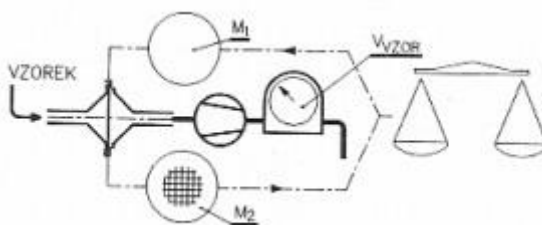
Obrázek 22 Opacimetr hartridge[10]

Za provozu přístroje je optická dráha většinou souosá se vzduchovou trubicí a přívod spalin do přístroje je uzavřen na vstupu. Pouze při vlastní měřicí proceduře se překlopí optická dráha do osy měřicí trubice, do které se současně vpouští vzorek spalin. Po uskutečnění odečtu hodnoty se opět držák se žárovkou a fotonkou překlopí do polohy, kde intenzivní omývání čistým vzduchem udržuje povrch rozhodujících prvků přístroje prostý úsad (a přísun výfukových plynů se opět uzavře). Při vlastním měření brání pouze dostatečný tlak spalin pronikání vzduchu do měřicí trubice. [10]

1.7.5.3 Přímé měření koncentrace částic

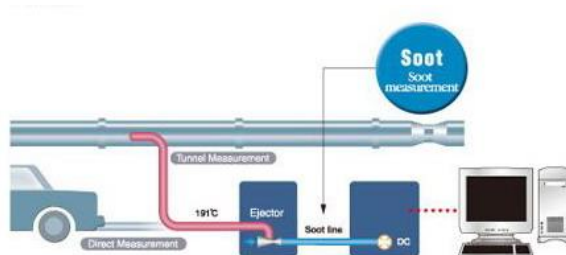
Při měření přímé koncentrace částic se využívají dvě metody:

- Gravimetrická metoda princip gravimetrického stanovení obsahu pevných částic ve výfukových plynech je jednoduchý. Filtrační element je ze skelných vláken potažených teflonem, jeho hmotnost se zjistí na přesných laboratorních vahách, pak se instaluje do příslušného držáku a pumpou se přes něj prosává vzorek spalin. Po ukončení měření se filtr (vzorek) i se zachycenými částicemi opět zváží a stanoví se hmotnostní koncentrace částic ve vzorku. [10]



Obrázek 23 Gravimetrické měření obsahu částic[10]

- Metoda real – time, je metoda zaměřená na kontinuálním měření v reálném čase. Měří se koncentrace pevných částic SOOT i pevných částic navázaných na kapalné uhlovodíky tzv. saze SOF. Podrobněji je tato metoda rozebrána v kapitole 3.1.2.3



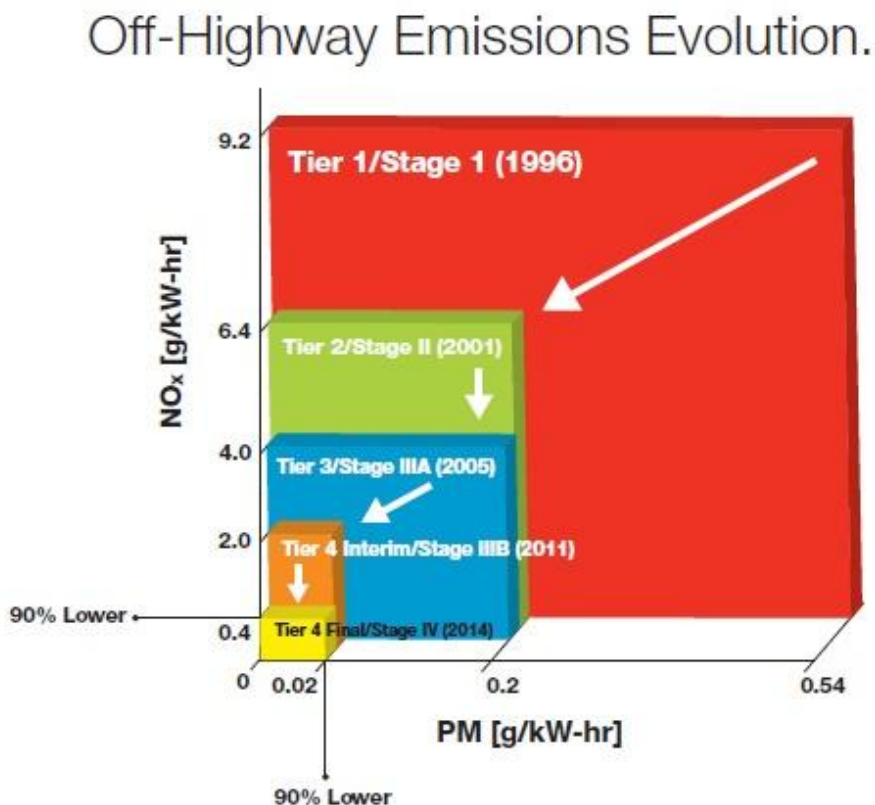
Obrázek 24 Princip real- time měření

1.8 Možnosti snížení emisí

Zatím poslední norma Stage IV stanovuje mezní hodnoty především oxidu dusíku a pevných částic na tak nízkou úroveň, že aby bylo možné těmto limitům vyhovovat, je nutné použití nejmodernější technologií jak v oblasti spalování, tak v oblasti následné úpravy výfukových plynů. Na obrázku 25 je vidět vývoj emisních limitů jednotlivých složek (NO_x , PM), v průběhu zavádění jednotlivých emisních norem.

Snižování emisí škodlivin ve výfukových plynech na přijatelné hodnoty lze realizovat více způsoby. Podle toho, kde se jednotlivé prostředky pro snižování nacházejí, rozdělujeme tyto prostředky na aktivní a pasivní.

- Primární prostředky působí před nebo přímo ve spalovacím prostoru.
- Sekundární prostředky redukují obsah škodlivin ve výfukových plynech a působí tedy až za spalovacím prostorem.



Obrázek 25 Vývoj emisních limitů[9]

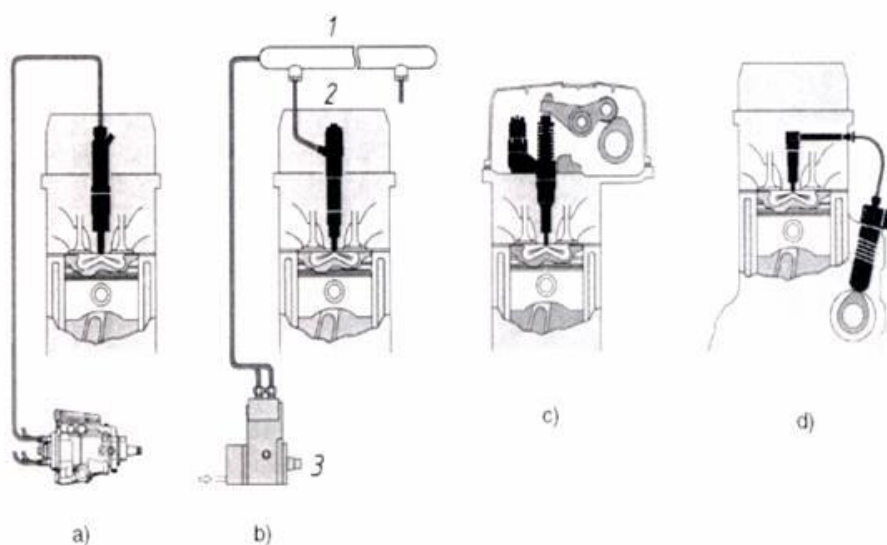
1.8.1 Primární možnosti snížení emisí motoru

Princip primárních možností pro snižování emisí spočívá v úpravě paliva a spalovacího procesu. Použitím kvalitnější vstřikovací soustavy dochází k rovnoměrnějšímu spalování, zvyšuje se účinnost paliva a klesá jeho spotřeba, emise částic a uhlovodíků. Na druhou stranu se dosahuje vyšší spalovací teploty a vyšších vstřikovacích tlaků, což sebou přináší nárůst produkce NO_x .

1.8.1.1 Vstřikování paliva

Základním předpokladem účinného spalování je vznik homogenní směsi vzduchu a paliva, které musí být rozprášeno co nejjemněji. Zapotřebí je tedy výkonné vstřikovací zařízení, které pracuje s vysokými vstřikovacími tlaky a umožňuje přesně regulovat počátek vstřiku a množství paliva např. systém comon rail.[5]

Důležité je rovněž geometrické provedení vstřikovacích otvorů. Vstřikovaný paprsek paliva musí dosáhnout i do vzdálených míst spalovacího prostoru, ale nesmí dopadat na povrch stěn, což by vedlo k vysokým emisním hodnotám nespálených uhlovodíků a sazí. Pro dobré využití vzduchu je rovněž nutné použít trysky s více otvory, zajistit usměrněný pohyb náplní a přizpůsobit tvar vstřikovaného paprsku kompresnímu prostoru. [5]



Obrázek 26 Vstřikovací systémy vznětových motorů a) přímý vstřik s rotačním čerpadlem, b) comon rail, c) systém PD d) samostatné čerpadlo s cizím pohonem[11]

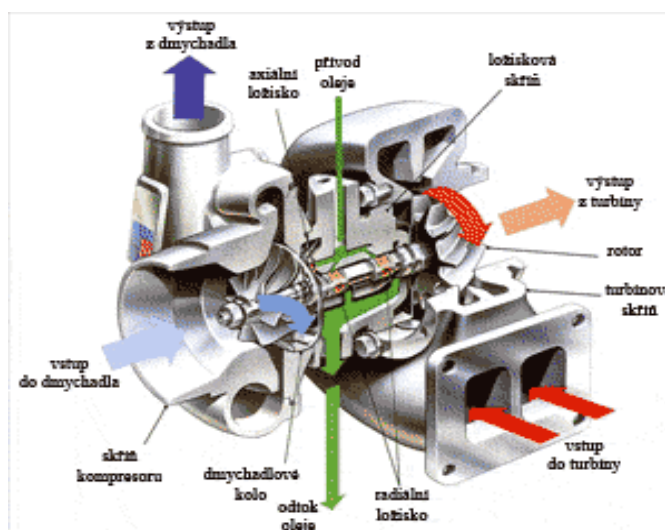
1.8.1.2 Víření směsi

Důležitým faktorem pro dokonalé hoření směsi je, aby směs plnicího vzduchu ve válci rotovala. Na druhou stranu ale víření náplně sebou přináší vyšší spotřebu energie a znamená větší tepelné ztráty. Neméně důležitou podmínkou pro správné víření je i vhodné tvarování sacích kanálů v hlavě válců. Zároveň by nemělo docházet ke zkřížení jednotlivých paprsků vstříkovaného paliva, protože by to vedlo ke vzniku nehomogenní směsi a znamenalo nárůst produkce oxidu uhelnatého, nespálených uhlovodíků a sazí. Tvar spalovacího prostoru ve dně pístu hraje rovněž důležitou roli během přípravy náplně a průběhu hoření.[5]

1.8.1.3 Přepřňování

K přepřňování vznětových motorů se používají výhradně turbodmychadla poháněná výfukovými plyny. Turbodmychadlo se skládá ze dvou hlavních částí – turbínové a kompresorové. Turbína pohánějící kompresor je roztáčena výfukovými plyny vystupujícími z motoru a je umístěna na stejné hřídeli.

Dmychadlo stlačuje vzduch vstupující do motoru a výrazně tak zvyšuje jeho objemovou účinnost oproti klasickému nepřepřňovanému motoru. V porovnání s motory s atmosférickým sáním mají motory přepřňované podstatně vyšší výkon při poměrně malém zvýšení spotřeby paliva a také menší množství emisí škodlivin ve výfukových plynech. Rostoucí plnicí tlak totiž způsobuje vyšší teploty spalování, což se kladně odráží na množství emisí oxidu uhelnatého, uhlovodíků a sazí. Na druhou stranu však vyšší teploty ve spalovacím prostoru znamenají zvýšenou tvorbu oxidů dusíku. [5]



Obrázek 27 Turbodmychadlo[5]

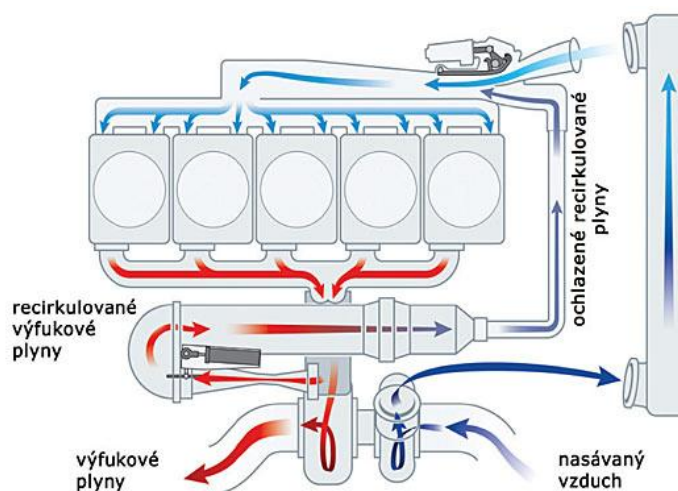
1.8.1.4 Recirkulace výfukových plynů – EGR

System EGR (Exhaust Gas Recirculation) spočívá v přisátí určitého množství výfukových plynů do sacího potrubí. Toto vedení výfukových plynů slouží ke snížení emisí NOX. Přimísením výfukových plynů do nasávaného vzduchu se sníží přiváděný podíl kyslíku a sníží se teplota hoření směsi. Součásti výfukových plynů se již neúčastní spalování a navíc pohlcují teplo. Tím klesá maximální teplota spalování a snižují se emise oxidu dusíku. Podíl recirkulace výfukových plynů může činit až 40%. Při používání recirkulace výfukových plynů se snižují na jedné straně emise NOX, ale na druhé straně se však nafta již nespáluje dokonale. Kvůli nedostatku kyslíku opět silně roste podíl nespálených uhlovodíků (HC) a pevných částic (PM).[4]

Přesné množství přepouštěných výfukových spalin do saní je ovládáno EGR ventilem a řízeno řídicí jednotkou motoru v závislosti na provozním stavu motoru. Recirkulace se řídí podle informací o teplotě motoru, plnicím tlaku, teplotě nasávaného vzduchu, zatížení (moment) a počtu otáček.

Podíl zpětného vedení výfukových plynů lze zvýšit chlazením zpětně přiváděných výfukových plynů. Navíc mohou být do směšovací komory namontovány klapky regulace tlaku. Zavřením klapky regulace tlaku se vytvoří větší pokles tlaku mezi sacím a výfukovým potrubím a tím se zvýší podíl zpětného vedení výfukových plynů.

Výhodou této technologie je absence potřeby další provozní kapaliny např. AdBlue (cena čínidla, prostor a hmotnost nádrže, distribuční síť,...). Nevýhodou je jisté snížení výkonu motoru a zvýšení spotřeby paliva, ve srovnání se stejným motorem bez částečné recirkulace výfukových plynů.



Obrázek 29 Recirkulace výfukových plynů – EGR[4]

1.8.2 Sekundární možnosti snížení emisí motoru

Sekundární prostředky jsou zařízení, která se nacházejí za spalovacím prostorem. Princip jejich fungování spočívá v zachytávání škodlivin vzniklých předchozím spalováním v motoru.

1.8.2.1 Diesellový oxidační katalyzátor

Katalyzátor je zařízení pro katalytické čištění výfukových spalin motorových vozidel. Oxidační katalyzátory byly poprvé použity v roce 1975 v USA. Svou konstrukcí odpovídá třicestnému katalyzátoru (zážehové motory). Katalyzátor se skládá z nerezového plechového obalu a tělesa (nosiče) obsahujícího aktivní katalytickou vrstvu. Na keramickém, popř. kovovém tělese je pro zvětšení účinného povrchu nanесena vrstva z oxidu hliníku. Těleso (nosič) tvoří několik tisíc jemných kanálků, kterými proudí výfukové plyny. Keramické i kovové nosiče jsou potaženy nosnou vrstvou alumina, která zvětšuje nosnou plochu katalyzátoru 7000 x. Na ní je nanесena katalyticky účinná vrstva platiny nebo palladia v množství asi 2g.

Oxid uhelnatý (CO) se přeměňuje na oxid uhličitý (CO₂) a nespálené uhlovodíky (HC) z 90% na oxid uhličitý (CO₂) a vodu (H₂O). Redukce oxidů dusíku (NO_x) je kvůli přebytku vzduchu možná jen ve velmi omezené míře. Z důvodu vysokého obsahu kyslíku ve výfukových plynech začíná oxidační katalyzátor účinkovat již při 170°C. Optimální provozní teplota je mezi 250 až 350°C. Moderní katalyzátory snižují množství škodlivin ve spalinách až o 90 %.[4]



Obrázek 28 Oxidační katalyzátor[4]

1.8.2.2 Filtr pevných částic - DPF

Vznětové motory mají ve výfukových plynech poměrně vysoký obsah karcinogenních mikročástic (pevných částic). Tato vysoce škodlivá složka nejde odbourat pomocí klasického katalyzátoru, a proto byl vyvinut tzv. filtr pevných částic, který je schopen zachytit více jak 95% těchto uhlíkových mikročástic. Filtry pevných částic se v naftových motorech zabydlely v roce 2000, od poloviny minulého desetiletí některé značky (BMW, Mercedes) začaly tuto „výbavu“ dodávat na západoevropské trhy standardně pro všechny modely.

Jedná se o speciální filtr, který zachytává nečistoty vzniklé při spalování. Toto zařízení umožňuje vznětovým motorům dosáhnout nižší produkce pevných částic a plnit tak emisní předpisy. Jeho název je převzat z anglického jazyka Diesel Particulate Filter (DPF).

Konstrukce filtru pevných částic se skládá většinou z keramického voštinového filtračního tělesa. Používají se také filtrační tělesa ze slinutých kovů. Kanálky filtru pevných částic jsou střídavě uzavřeny. Výfukový plyn musí proudit přes porézní filtrační stěny. Pevné částice se tak zachytí a pomalu ucpávají póry. Filtr je čištěn spálením sazí zachycených sítkem - úplným nebo na částice menší, které sítkem projdou - vysokou teplotou, které je dosaženo dvěma způsoby, pasivní nebo aktivní regenerací. Při regeneraci se přeměňují nashromážděné pevné částice na oxid uhličitý (CO₂) a vodní páru (H₂O).[4]

Regenerace:

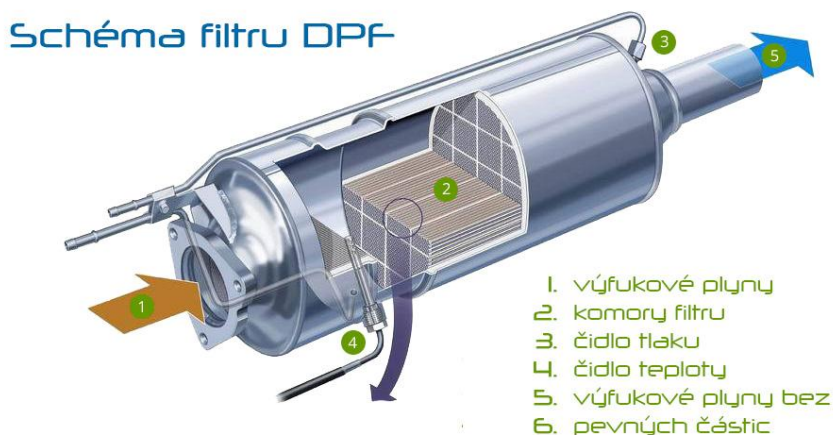
- **Pasivní regenerace** - probíhá samovolně vždy, když pracovní podmínky motoru odpovídají teplotám výfukových plynů přibližně 350-500 °C a teplota uvnitř DPF tak umožní hoření zachycených částic. Takovéto provozní podmínky odpovídají režimu konstantně vyššího zatížení motoru (setrvání motoru ve vyšších otáčkách a vyšším zatížení po delší dobu), například při jízdě po dálnici.

- **Aktivní regenerace** - probíhá po 300-1000 km, pokud nenastala možnost pasivní regenerace (tj. např. v městském provozu) a filtr se blíží svému naplnění. Teplota výfukových plynů je uměle zvýšena na asi 600° C - používá se k tomu změna časování vstříků motoru tzv. dostřik nebo vstřikovačem na exhaust aftertreatment systému.

Filtr pevných částic mají aktivní vrstvy pokryty vzácnými kovy např. silicium, cordientu, spékané kovy atd. Tyto materiály jsou velmi citlivé na kontakt se sírou. Ta je obsažena jak v palivu, jejichž zastoupení se výrazně snižuje, ale především v motorovém oleji kde má velmi důležitou funkci spojenou s aditivou, která ovlivňuje např. filtrovatelnost, čistou únosnost olejového filmu, zabraňuje pěnivosti atd. Proto se při použití filtru na pevné částice (jsou tvořeny i zbytky motorového oleje) musí použít oleje s nízkým obsahem síry a fosforu,

což se projevuje nižším obsahem aditiv, která snižují životnost komponentů spalovacího motoru.[3]

Při spalování pevných částic vzniká malý podíl popela. Ten se shromažďuje s částicemi ve filtru a postupem času filtr ucpává. Filtr se pak musí demontovat a vyčistit. Podle systému a způsobu jízdy je to nutné po 80 000 až 240 000 km. Údržba je řidiči signalizována kontrolkou.



Obrázek 30 Schéma filtru pevných částic – DPF[12]

1.8.2.3 Selektivní katalytická redukce - SCR

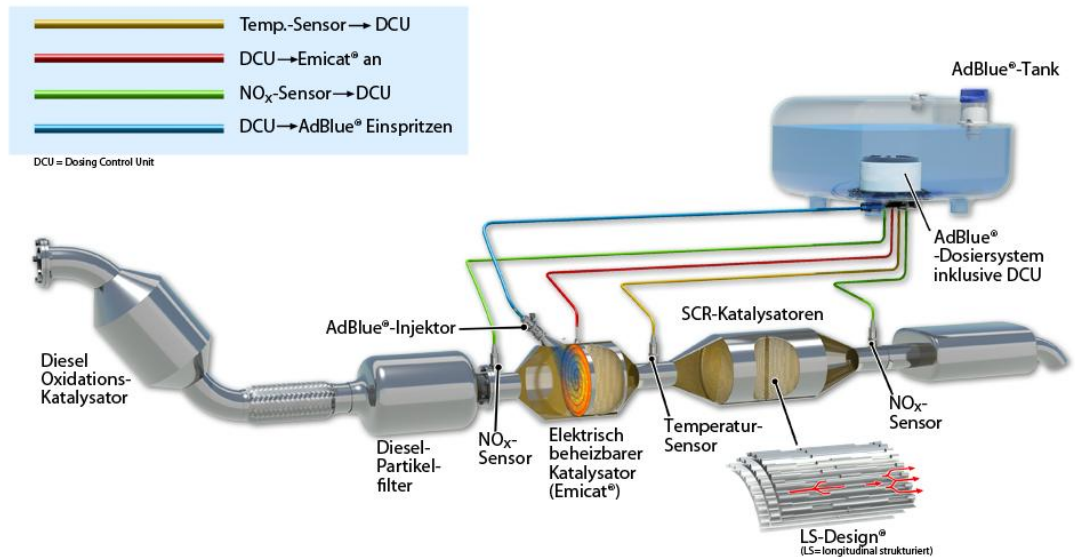
System SCR je určený pro snižování NOx prostřednictvím chemických reakcí za působení vhodného katalyzátoru např. oxidů zirkonia mezi oxidy dusíku a amoniaku, a jejich přeměně na dusík N₂ a vodu H₂O. Technologie SCR je patentována od roku 1957 a implementována do konstrukce nákladních i osobních vozidel.[3]

Podstatou této technologie je použití kapalného aditiva AdBlue, což je 32,5% vodný roztok močoviny. Obvykle je koncept navržen tak, aby nádrž na palivo bylo cca 3 – 5 x větší než AdBlue. AdBlue je u vozu uloženo v samostatné vyhřívané nádrži, oddělené od nádrže s naftou a je dávkováno buď do proudu stlačeného vzduchu, který jej dopravuje do výfukového potrubí nebo přímo do výfukových plynů před katalyzátor SCR.

Zařízením SCR se výrazně snižuje podíl NOx. Z tohoto důvodu lze počátek vstřiku posunout směrem „dříve“, čímž lze o asi 6% snížit spotřebu paliva. Vzniklý vyšší podíl NOx se poté redukuje v zařízení SCR.

Z nádrže je kapalina dopravována pomocí membránového čerpadla dále do okruhu. Z čerpadla je AdBlue vedeno přes hlavní filtr a dvoucestný ventil do vstřikovacího modulu,

který se nachází na výfukovém potrubí. Dvoucestný ventil, přes který přechází AdBlue umožňuje v jedné poloze dopravu kapaliny do vstřikovacího modulu a ve druhé poloze zpětné odvedení kapaliny do nádrže po vypnutí spalovacího motoru. Je to z toho důvodu, aby se zabránilo omezení průtoku při nižších teplotách, kdy může dojít k zamrznání.[3]



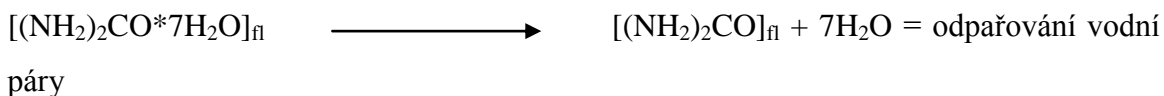
Obrázek 31 Selektivní katalytická redukce – SCR[13]

Plnicí tlak z čerpadla dosahuje 5 bar, který je i tlakem vstřikovacím. Vstřikovací modul obsahuje vstřikovací ventil, podobně jako u vstřikování paliva v zážehových motorech. Množství vstřikované AdBlue je dáno dobou otevření ventilu. Po vstřiknutí AdBlue dochází k odpaření vody a průběhu chemických reakcí označovaných jako termolýza a hydrolýza, při kterých se uvolňuje čpavek, který je touto látkou potřebnou pro snižování NOx při vhodném působení katalyzátoru. Získaný čpavek ve výfukovém potrubí je unášen proudem výfukových plynů do katalyzátoru, kde dochází k reakci čpavku, oxidu dusíku a katalyzátoru na přeměnu NOx do N₂ a H₂O.[3]

Amoniak je toxická látka a z toho důvodu se získává až chemickou cestou po vstřiknutí kapaliny „AdBlue“ do výfukového potrubí. Kvalita AdBlue závisí především na teplotě skladování a platí zde stejné podmínky skladování jako pro motorovou naftu.

Chemické reakce v SCR katalyzátoru:

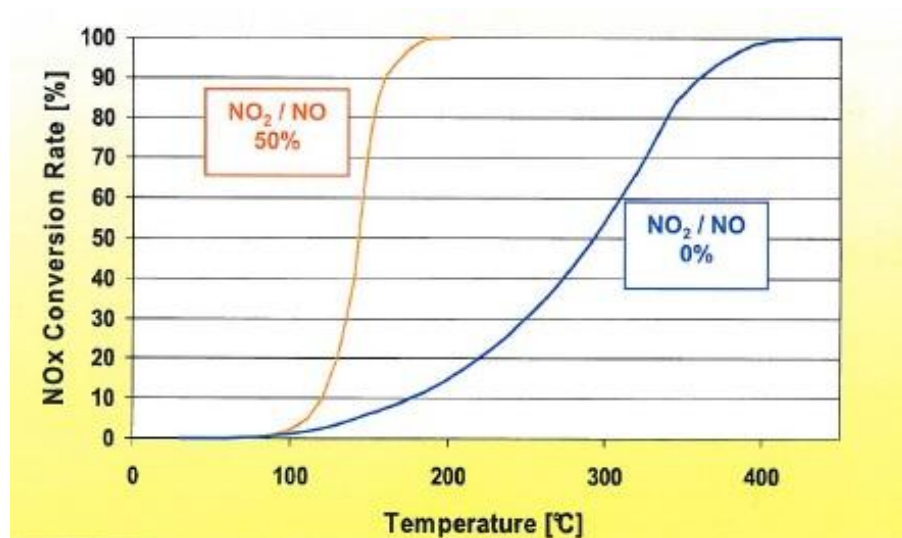
- Vytvoření NH_3



- Redukce NO_x



Před a za katalyzátorem se nachází snímače teplot a také snímač obsahu koncentrace NO_x , aby řídicí jednotka měla přehled o účinnosti konverze oxidů dusíků na N_2 . Zařazením SCR katalyzátoru tak může docházet k jejich snižování o více než 90% a k poklesu pevných částic o 30%. Pokles pevných částic způsobuje režim práce motoru.



Graf 1 Redukce emisí NO_x v závislosti na teplotě

2. Cíle a použité metody práce

Tato diplomová práce analyzuje otázku emisí a jejich následné snížení u mimosilničních vozidel.

Hlavním cílem této diplomové práce je popsání možných způsobů snížení emisí mimosilničních vozidel, následné měření emisí na konkrétním motoru a výběr vhodné technologie pro dosažení emisního limitu Stage IV.

Metody práce:

- Analýza současného stavu možností snížení emisí,
- Výběr a popis měřeného motoru MMZ D245.2S3B,
- Popis jednotlivých zařízení potřebných k měření emisí motoru,
- Změření, zhodnocení vstupního měření a následný výběr dalšího technologického, postupu pro snížení emisí na požadovanou hodnotu emisního limitu Stage IV,
- Aplikace vybrané technologie pro snížení emisí na požadovanou hodnotu emisního limitu Stage IV,
- Zhodnocení vstupního měření s optimalizovaným měřením a procentuální vyjádření snížení všech měřených emisních hodnot.

3. Výsledky řešení – výběr vhodných metod, jejich vzájemné porovnání

V první části této kapitoly bude tato diplomová práce popisovat přípravu měření. Měření probíhalo na traktorovém motoru Minského motorového závodu MMZ. Technologie a použité přístroje budou popsány v kapitole 3.1

Ve druhé části se tato diplomová práce bude popisovat přesná příprava a postup měření podle směrnice 97/ 68/ ES. Porovnání naměřených výsledků s použitou technologií a určení dalšího postupu ke splnění emisního limitu Stage IV.

Výsledkem předchozích kapitol bude výběr a zhodnocení nejvhodnější technologie pro splnění požadovaného emisního limitu Stage IV na motoru MMZ.

3.1 Vlastní měření

Měření probíhalo na motoru MMZ D245.2S3B, který je aplikován do vozidel Minského traktorového závodu MTZ. Motor MMZ D245.2S3B je používán ve vozidlech MTZ např. v traktoru Belarus – 922.5 viz obrázek 32. Tento motor byl vybrán nejen pro jeho vysokou flexibilitu a možnost použití v různých mimosilničních vozidlech, od traktorů až po speciální stroje, ale hlavně z důvodů mého působení ve firmě Motorpal a.s., která je předním dodavatelem vstřikovacího zařízení do motorů MMZ.



Obrázek 32 Traktor MTZ Belarus – 922.5

3.1.1 Motor MMZ D245.2S3B

Parametry motoru MMZ D245.2S3B

• Počet válců	4 válce
• Objem válců	4750 cm ³
• Průměr válce	110 mm
• Zdvih válce	125 mm
• Výkon	90 kW
• Nominální otáčky	2200 1/min
• Moment, nominální otáčky	390 Nm
• Otáčky maximálního točivého momentu	1600 1/min
• Maximální točivý moment	500 Nm
• Specifická spotřeba paliva při jmenovitém výkonu	220 g/kW
• Turbodmychadlo	ČZ C15(Strakonice)



Obrázek 33 Motor D245.2S3B

3.1.2 Zařízení použitá k měření motoru MMZ D245.2S3B

V této kapitole budou popsána všechna zařízení použitá k měření a vyhodnocování naměřených hodnot. Toto vybavení bylo vybráno z důvodu použití výhradně vybavením, kterým disponuje firma Motorpal a.s

Základní vybavení motorových zkušeben:

- Základová deska s rámem a systémem pro uchycení motoru a dynamometru. Popřípadě různé paletové systémy, např. (firmy Horiba) viz kapitola 3.2.1,
- Dynamometr (různé druhy uvedené dále v práci), pro měření výkonových parametrů motoru viz kapitola 3.1.2.1,
- Stanoviště operátora s ovládacími prvky a zobrazovacími systémy viz kapitola 3.2.3,
- Emisní analyzátory viz kapitola 3.1.2.3,
- Měřicí zařízení pro stanovení spotřeby paliva viz kapitola 3.1.2.4,
- Snímače, převodníky a zesilovače pro měření např. otáček klikového hřídele, teploty nasávaného vzduchu, teploty chladicí kapaliny, teploty oleje, teploty paliva, teploty výfukových plynů, barometrického tlaku, tlaku oleje, tlaku výfukových plynů viz kapitola 3.1.2.2,
- Vzduchotechnika sloužící k odvodu spalin a přívodu čerstvého vzduchu viz kapitola 3.2.3.

3.1.2.1 Dynamometr Horiba Titan HT460

Dynamometry jsou zařízení, které neměří přímo výkon motoru, nýbrž točivý moment motoru, který se zde maří, a současně se snímají otáčky motoru. Snímání momentu je založeno na vážení reakce výkyvného statoru.

Motor MMZ D245.2S3B byl vyrovnán, pružně uchycen se základní deskou a spojen přes pružnou spojku Voit s dynamometrem **Horiba Titan HT460**

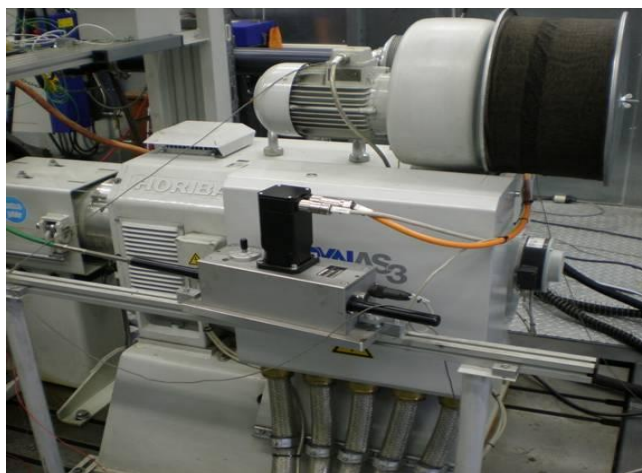
Zařízení dynamometru Horiba Titan HT460 se skládá z těchto částí:

- **Asynchronní elektromotor,**
- **Konvertor,**

- Ovládací jednotka.

Asynchronní motor

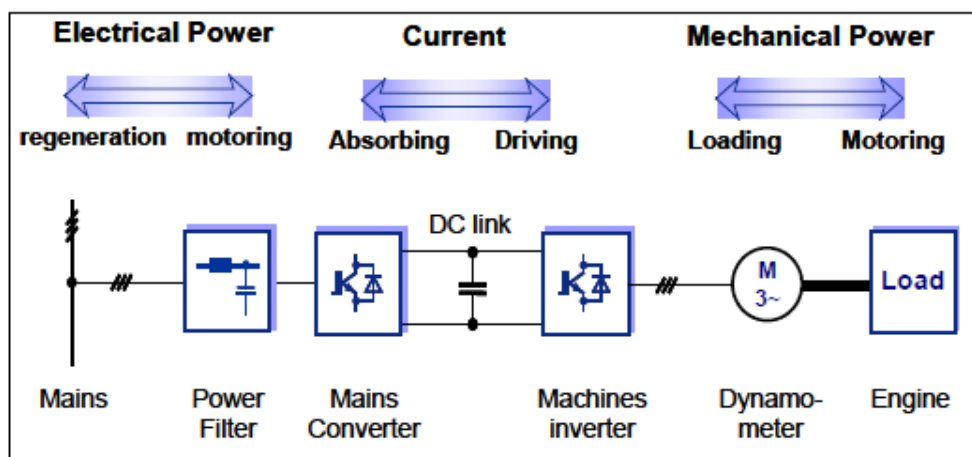
Asynchronní motoru, který je použit u dynamometru Horiba Titan HT460 je navržen jako robustní motor s kotvou na krátko, který se vyznačuje velkou dynamickou odezvou v širokém rozsahu otáček a momentů, což je pro měření motorů non – road aplikací požadováno.



Obrázek 34 Asynchronní motor dynamometru Horiba Titan HT460

Konvertor

Je řídicí prvek dynamometru reagující na podmínky ovládací jednotky. Při spouštění motoru funguje jako napájecí zdroj z elektrické soustavy pro asynchronní motor dynamometru. Jestliže se nachází motor v chodu a je zatížen, funguje konvertor jako rekuperační jednotka elektrické energie a dodává elektrický proud zpátky do sítě.



Obrázek 35 Schéma funkce konvertoru

Ovládací jednotka

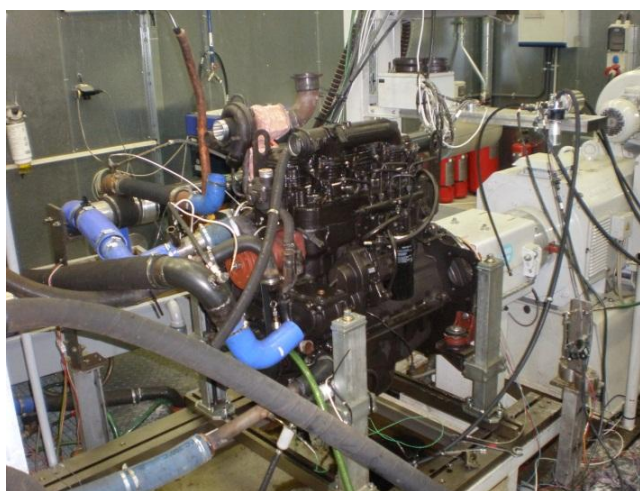
Přes ovládací jednotku pomocí povelů obsluhy dochází k řízení samotného dynamometru. Nastavují se zde i hodnoty servopohonu pro řízení polohy plynového pedálu. Obsluha vyhodnocuje možnosti daného motoru a porovnává s údaji o otáčkách a momentech zobrazených na monitoru ovládací jednotky. Snímače otáček a momentu jsou kalibrovány a instalovány na dynamometr výrobcem. Ovládací jednotka je pro přívětivější uživatelské rozhraní propojena s počítačem.



Obrázek 35 Ovládací jednotka dynamometru

3.1.2.2 Snímače

Po připojení motoru s dynamometrem byla provedena instalace snímačů, ke zjištění a kontrole stavu motoru v průběhu testu. Měří se teploty a tlaky na předem normou definovaných místech.

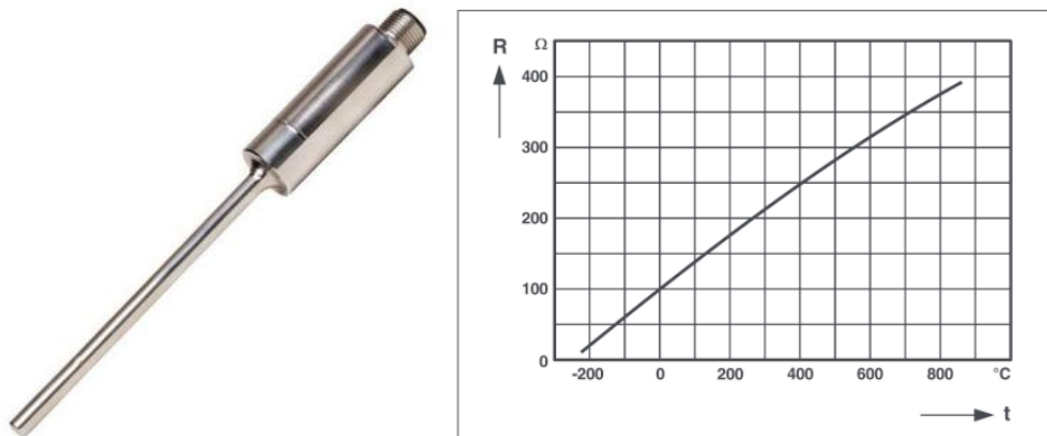


Obrázek 36 Připojení motoru MMZ D245.2S3B s dynamometrem

Teploty jsou měřeny pomocí dvou druhů snímačů. Pro měření menších teplot s větší přesností se používají snímače druhu Pt 100. Při měření větších teplot (výfukové zplodiny) se používají termočlánky, které odolávají vysokým teplotám, ale mají menší přesnost. Tlak se měří tlakovými snímači SML Nagano.

Teplotní snímač - Pt 100

Měření teploty snímačem Pt 100 je založeno na vlastnosti společné všem vodičům a polovodičům, kterou je závislost jejich elektrického odporu (dále jen odporu) na teplotě. Tato vlastnost víceméně závisí na konkrétním materiálu.



Obrázek 37 Teplotní snímač - Pt 100 a **Obrázek 38** Závislost odporu na teplotě snímače Pt 100

Relativní změna odporu v závislosti na teplotě (dR/dt), je známa jako teplotní koeficient, jeho hodnota obvykle není konstantní v rozsahu měřených teplot, ale je funkcí teploty. Výsledkem je matematický vztah mezi odporem a teplotou, který má formu mnohočlenu vyššího řádu. Odporové teploměry patří k nejpřesnějším snímačům teploty. Nejen že poskytují dobrou přesnost, ale je to také výborná stabilita a opakovatelnost. Při měření odporovými teploměry je nutné brát v úvahu, že hodnota měření je ovlivňována odporem vodiče, kterým je přístroj připojen. Běžně jsou používány 3 typy obvodů: **2, 3 a 4 vodičové**.

Nejpřesnějších měření dosáhneme použitím obvodu se 4 vodiči. V tomto případě není měření ovlivněno odporem připojovacího vodiče či teplotou v jeho okolí.

Odporové teploměry mohou být používány v rozsahu teplot od -220°C do 600°C .

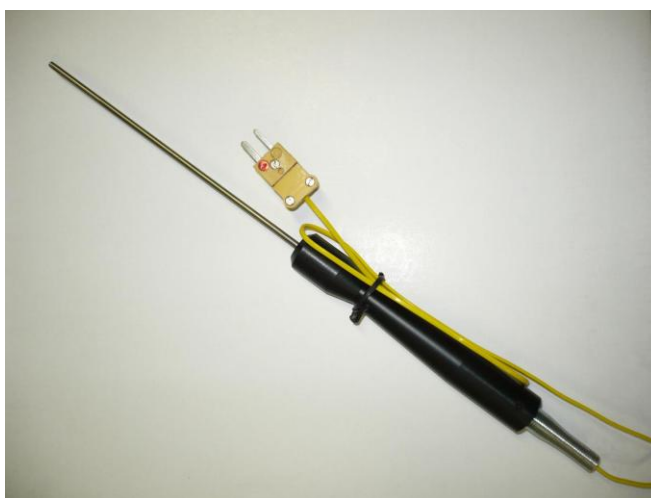
Teplotní snímač - Termočlánek

Termočlánek se skládá ze dvou vodičů z různých materiálů spojených k sobě na jednom konci (měrný spoj). Protější 2 volné konce tvoří kompenzační bod resp. referenční spoj.

Napětí na termočlátku, které se zobrazuje u referenčního spoje, závisí na materiálech ze kterých je termočlánek vyroben a na rozdílu teplot mezi měrným spojem a referenčním spojem. Termočláanky se nejčastěji vyrábějí z měděných slitin např. Cu-CuNi, Fe-CuNi.

Většina termočláneků je dodávána k přímému použití, tzn. v ochranném pouzdře proti mechanickému poškození nebo poškození chemikáliemi. V negativním rozsahu teplot, mohou být termočláanky používány do -200°C . Při teplotách nad 1000°C jsou používány termočláanky z platiny a slitiny platiny a rhodia.

Tyto snímače jsou použity k měření teploty výfukových plynů, protože teplota může dosahovat až 800°C . Přesnost termočláanky je nižší než je přesnost snímače Pt 100.



Obrázek 39 Teplotní snímač – Termočlánek

Tlakový snímač – SML Nagano

Snímač tlaku převádí tlak na analogový elektrický signál. Ačkoliv existují různé typy snímačů tlaku, jeden z nejvíce rozšířených je tenzometrický snímač. Převod tlaku na elektrický signál je proveden pomocí fyzikální deformace tenzometrů nalepených na membráně snímače tlaku a zapojených do Wheatstoneova můstku. Tlak přivedený na snímač způsobí průhyb membrány, který vyvolá pnutí na tenzometrech. Toto pnutí způsobí změnu elektrického odporu úměrnou tlaku.

Snímače s napěťovým výstupem na úrovni voltů mají vestavěný převodník zajišťující tuto mnohem vyšší úroveň signálu, než je tomu u předchozích modelů. Obvykle je výstup na úrovni 0 - 5V_{ss} nebo 0 - 10V_{ss}. Tento výstup nezávisí přímo na změnách napájecího napětí. Je tu často vyhovující nestabilizované napájecí napětí, pokud neklesá na úroveň výše uvedených rozsahů.



Obrázek 40 Tlakový snímač – SML Nagano

3.1.2.3 Emisní analyzátory

Ke zjištění emisí motoru MMZ D245.2S3B byly použity tyto emisní analyzátory:

Horiba EXSA 1500L

EXSA 1500L je analyzátor, kterým se měří koncentrace plynných složek výfukových plynů. Využívá všechny metody měření, které byly popsány výše v kapitole 1.7 pro měření jednotlivých složek výfukových plynů.



Obrázek 41 Emisní analyzátor Horiba EXSA 1500L

Druhy a metody měření jednotlivých složek:

Druh	Metoda měření	Měřený rozsah
CO	Infračervená spektrometrie (NDIR)	0-5000 ppm, 0-10 vol%
CO2	Infračervená spektrometrie (NDIR)	0-10/20 vol%
NO/Nox	Chemická luminiscence (CLD)	0-100/500/1000/5000 ppm
THC	Plamenoionizační detektor (FID)	0-100 to 50000 ppmC

Tabulka 8 Druhy a metody měření jednotlivých složek emisním analyzátozem Horiba EXSA 1500L

Horiba MEXA 1230PM

Jedná se o emisní analyzátor, který měří přímé koncentrace pevných částic ve výfukových plynech. Přesné měření je způsobeno měřením metodou real-time, což znamená tzv. kontinuální měření v okamžitém čase. Metoda real-time má jednu nespornou výhodu a to že doba mezi měřením a výsledkem je takřka zanedbatelná. Analyzátor Mexa 1230PM dokáže měřit jednotlivě jak koncentrace pevných částic SOOT tak i pevných částic navázaných na kapalné uhlovodíky SOF.

Sloučeniny typu SOOT se měří difúzní nabíječkou (DC). Vzorek se zředí ejektorovým čerpadlem. Koncentrace SOOT se vypočítá měřením elektrického proudu iontů připojených na povrch nabitých částic.

Sloučeniny typu SOF jsou stanoveny dvěma plamenoionizačními detektory (FID). Koncentrace SOF se vypočítá jako rozdíl mezi signály ze dvou FID, k jednomu FID je vzorek přiveden linií vyhřívanou na 47 ° C, a k druhému FID je vzorek přiveden linií vyhřívanou na 191 ° C



Obrázek 42 Emisní analyzátor Horiba MEXA 1230PM

Druh	Metoda měření	Měřený rozsah
SOOT	Difuzní nabíječka (DC)	0-15/75/150 mg/m ³
SOF	Plamenoionozační detektor (FID)	0-150 mg/m ³

Tabulka 9 Druhy a metody měření pevných částic emisním analyzátozem Horiba MEXA 1230PM

3.1.2.4 Dynamická váha paliva

Pro přesné určení spotřeby paliva byly použity **AVL váhy paliva 733S**. tyto váhy jsou určeny pro všechny obvykle používané benzíny a nafty stejně jako i pro čistý alkohol.

Váha paliva AVL 733S pracuje na gravimetrickém principu. Motor je přitom zásobován palivem z měřicí nádoby, jejíž hmotnost je průběžně měřena.

Funkční princip:

- Zjištění hmotnosti paliva v jedné na pružině zavěšené měřicí nádobě,
- Převedení hmotnosti na dráhu bez tření a hystereze,
- Bezkontaktní kapacitní snímač dráhy převádí dráhu na napětí,
- Mikroprocesor vyhodnotí napětí a řídí plně automaticky průběh měření a kalibrace,
- Zobrazení a obsluha se provádí pomocí nadřazeného počítače,

S váhou AVL 733S lze měřit spotřebu od 0 – 150 kg/hod s přesností přístroje 0,1%.



Obrázek 43 Dynamická váha paliva AVL 733S

3.1.2.5 Kouřoměr

Kouřoměr je přístroj pro měření obsahu sazí ve výfukových plynech dieselových motorů. V tomto případě byl použit kouřoměr AVL 415, který měří kouřivost motoru filtrační metodou, což je metoda zachytávání částic na filtrační papír viz kapitola 1.7.5.1.

Naměřený výsledek se uvádí v jednotkách FSN (filtrační číslo kouřivosti). Měřicí rozsah kouřoměru AVL 415 je 0 – 10 FSN.



Obrázek 44 Kouřoměr AVL 415

3.2 Příprava měření

Tato kapitola se bude zabývat jednotlivými kroky, které musí být splněny před spuštěním samotného měření. Všechny kroky jsou prováděny pečlivě a několikrát kontrolovány, z důvodu možného uvolnění motoru a jeho následné poškození nebo poškození brzdového stanoviště.

Motorové zkušebny jsou vybaveny řadou zařízení a přístrojů, které umožňují spalovací motor uchytit, zatěžovat a měřit předepsaným způsobem jeho parametry viz kapitola 3.1.2.

Příprava měření jak již bylo zmíněno výše je soubor úkonů které musí mít daný postup, protože jednotlivé kroky na sebe navazují a nelze je mezi sebou měnit. Postup měření podle jednotlivých kroků se stručným popisem daného úkonu je zobrazen v tabulce 10.

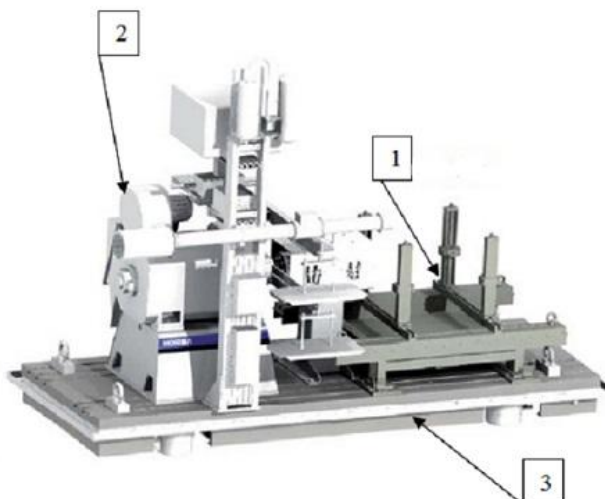
Příprava měření		
Číslo kroku	Název	Popis
1.	Uchycení motoru na brzdové stanoviště	stabilizace polohy motoru vůči paletovému systému a spojení motoru pružnou spojkou s dynamometrem
2.	Instalace snímačů na motor	připojení potřebných snímačů na motor a spojení přes interface s ovládacím softwarem
3.	Připojení ostatního příslušenství nezbytného k provozu motoru jako je např. chlazení, vzduchotechnika, ovládací software, přívod paliva	Ostatní zařízení, bez kterého není provoz motoru možný nebo nepřipojením toho zařízení může dojít k poškození motoru

Tabulka 10 Postup přípravy měření

3.2.1 Uchycení motoru na brzdové stanoviště

První operace po nezbytném proclení a dalších administrativních úkonech je uchycení motoru na brzdovém stanovišti.

Motor byl k brzdovému stanovišti potažmo k její základní desce upevněn přes paletový systém firmy Horiba. Systém je kompaktně dodáván k danému typu dynamometru a tvoří spolu jeden celek. Tento systém umožňuje precizní seřízení polohy motoru k naprosto přesnému spojení motoru přes pružnou spojkou s dynamometrem.

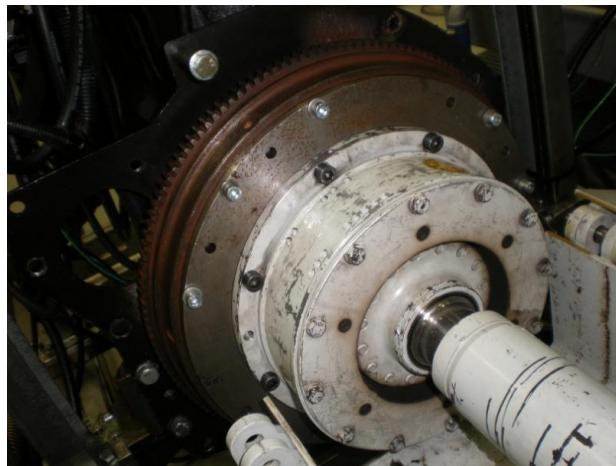


Obrázek 45 Celková sestava brzdového stanoviště

Celková sestava brzdového stanoviště se skládá, viz obrázek 45 :

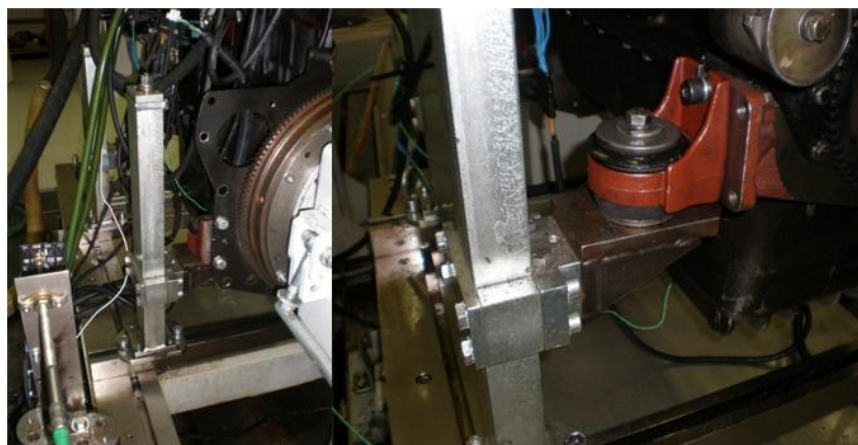
1. Paletový systém,
2. Dynamometr Horiba Titan HT460,
3. Základní deska s přesnými drážkami pro dokonalé ukotvení paletového systému a spojení paletového systému s dynamometrem přes pružnou spojku.

Spojení motoru s dynamometrem bylo provedeno přes pružnou spojku, která byla připevněna pevnostními šrouby k motorovému setrvačnicku viz obrázek 46. Spojení přes pružnou spojku bylo z důvodu možných drobných osových nepřesností mezi osami dynamometru a motoru. Další výchylky motoru jsou způsobeny např. drobnými nevyváženými místy na setrvačnicku projevující se při vysokých otáčkách.



Obrázek 46 Uchycení pružné spojky s motorovým setrvačnickem

Pro eliminování rázů způsobených činností a provozem motoru, musel být paletový systém spojen s motorem pružně přes tzv. silentbloky viz obrázek 47.



Obrázek 47 Detailní pohledy uchycení motoru k paletovému systému

3.2.2 Instalace snímačů na motoru

Po připojení a ustálení motoru na brzdovém stanovišti následuje další krok, kterým je instalace snímačů na motor. Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.1.2.2., byly použity snímače teplotní i tlakové viz obrázek 48.



Obrázek 48 Příklad umístění snímačů na motoru MMZ D245.2S3B

Měřená místa se nachází většinou na vstupu a výstupu z motoru, potažmo ostatních zařízení potřebných k provozu motoru (chladič chladicí kapaliny, mezichladič), aby byl viditelný rozdíl hodnot způsobený prací motoru. Snímače po instalaci na motoru byly propojeny s ovládacím zařízením pomocí tzv. interface. Interface je systém, který umožní komunikaci se snímači. Dokáže z nich vyčítat hodnoty a odesílá je do ovládacího zařízení, kde jsou zobrazovány obsluze brzdového stanoviště.



Obrázek 49 Interface pro komunikaci ovládacího zařízení se snímači

Instalované snímače na motoru MMZ D245.2S3B			
Druh	Název	Označení	Typ
Tlak	Tlak vzduchu před kompresorem	p0k	Nagano
Tlak	Tlak vzduchu za kompresorem/ před mezichladičem	p2k	Nagano
Tlak	Tlak vzduchu za mezichladičem	p2kc	Nagano
Tlak	Tlak výfukových plynů před turbínou	p0t	Nagano
Tlak	Tlak výfukových plynů za turbínou	p2t	Nagano
Tlak	Tlak oleje	poil	Nagano
Teplota	Teplota vzduchu před kompresorem	T0k	Pt100
Teplota	Teplota vzduchu za kompresorem/ před mezichladičem	T2k	Pt100
Teplota	Teplota vzduchu za mezichladičem	T2kc	Pt100
Teplota	Teplota výfukových plynů před turbínou	T0t	Pt100
Teplota	Teplota výfukových plynů za turbínou	T2t	Termočlánek
Teplota	Teplota oleje	Toil	Termočlánek
Teplota	Teplota paliva	Tf	Termočlánek
Teplota	Teplota chladicí kapaliny na vstupu do motoru	Twi	Termočlánek
Teplota	Teplota chladicí kapaliny na výstupu z motoru	Two	Pt100

Tabulka 11 Přehled snímačů použitých pro měření na motoru MMZ D245.2S3B

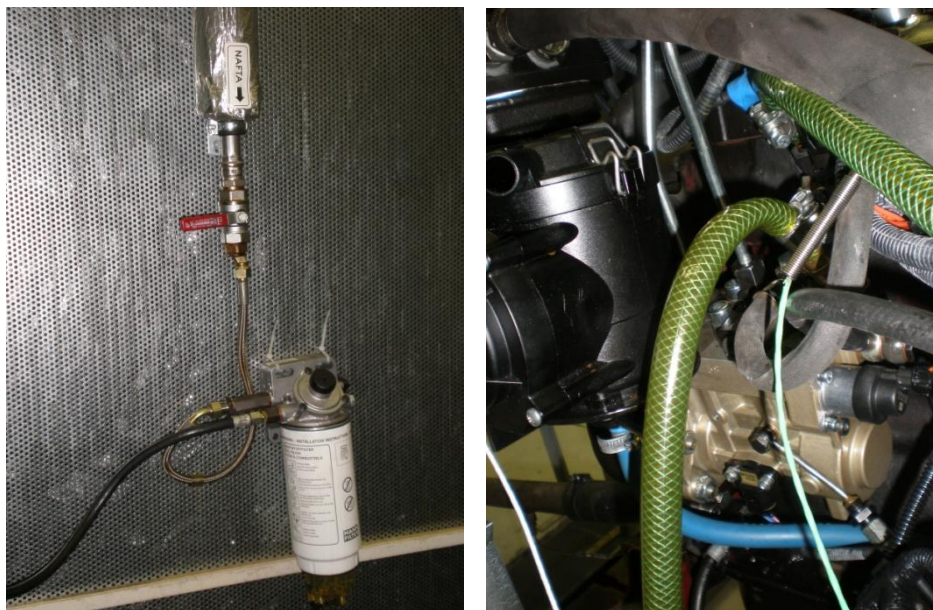
Snímače nám nejen podávají potřebné informace o stavu, v jakém se motor nachází, ale mají i bezpečnostní charakter např. kontrola tlaku oleje. Hodnoty ze všech snímačů jsou zobrazeny na monitoru ovládacího zařízení, pod přiřazeným označením viz Tabulka č. 10.

3.2.3 Připojení ostatního příslušenství nezbytného k provozu motoru

Motor uchycený na brzdovém stanovišti musí být napojen k dalším zařízením, aby bylo možné jeho testování.

Mezi nezbytné příslušenství potřebné k provozu motoru patří:

- **Zásobování a doprava paliva k vysokotlakému čerpadlu** – Doprava paliva je vedena pomocí tlakových palivových hadic od AVL váhy paliva 733S vnitřním čerpadlem které vytváří potřebný tlak na vstupu vysokotlakého čerpadla. Na palivo v tomto případě na naftu, a obzvláště když je použit vstřikovací systém common rail, jsou kladeny největší nároky čistoty. Čistota paliva má vliv na správnou funkci vstřikovacího systému a tím pádem i na vznikající emise, které chceme splnit. Čistota paliva je zde docílena používáním různých druhů filtrů. Používají se hrubé filtry s odlučovačem vody až po jemné filtry umístěny na motoru.



Obrázek 50 Přívod paliva s hrubým filtrem

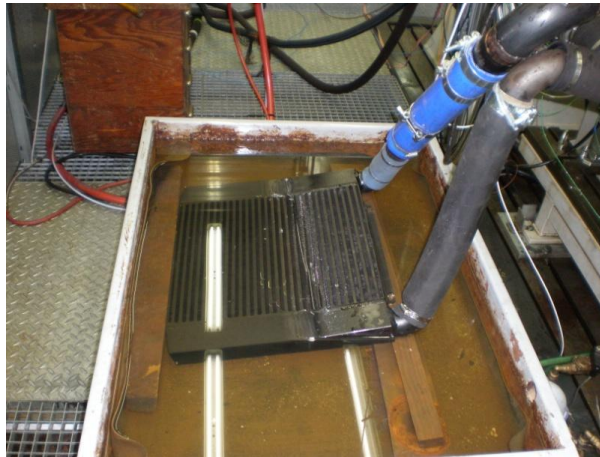
Obrázek 51 Tlakové palivové hadice u vysokotlakého čerpadla

- **Chlazení motoru a mezichladiče** – Pro chlazení motoru je zde použit otevřený systém naplněný chladicí kapalinou, který udržuje nastavenou teplotu kapaliny připouštěním do okruhu chladnější chladicí kapalinou. Teplota chladicí kapaliny je potřeba udržovat ve stálé hodnotě, pro lepší podmínky práce motoru. Systém se skládá s chladicí nádobou, která je připojena na motor a k tomu je ještě připojena na okruh s chladnější chladicí kapalinou. Chladicí nádoba funguje, jako tzv. výměník kde se mísí teplá chladicí kapalina z motoru s chladnější chladicí kapalinou z vnějšího okruhu.



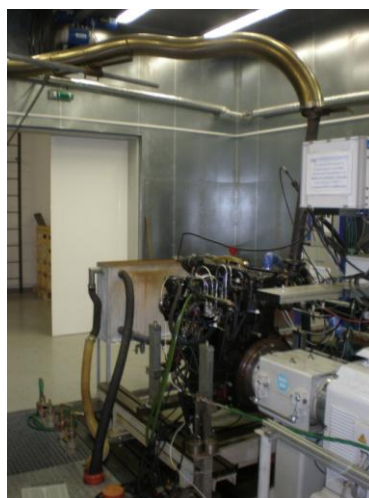
Obrázek 52 Připojená chladicí nádoba k motoru a vnějšímu okruhu

Vnější chladicí okruh je používán i pro chlazení vzduchu proudícím mezichladičem. Mezichladič je ponořen do chladicí nádoby, která je připojena na vnější chladicí okruh. Při překročení nastavené teploty je do chladicí nádoby vpuštěna chladnější chladicí kapalina a proud vzduchu proudící skrz mezichladič je zchlazen.



Obrázek 53 Mezichladič ponořen v chladicí nádobě

- **Vzduchotechnika** – Dalším zařízením nezbytné k provozu motoru je vzduchotechnika. Vzduchotechnika je zařízení, které má vedení pro odvod spalin, ale obsahuje i vedení pro přívod čerstvého vzduchu. Odvod spalin je udělán pomocí nerezové ohebné trubice, která dokáže odolávat vysokým teplotám. Trubice začíná spojením na výfuku a končí na komínu, který je vyveden z bezpečnostních důvodů ven z budovy. Na výfuku jsou přidělané snímače na měření teploty a tlaku, ale hlavně jsou zde připevněny vyhřívané hadice vedoucí k emisním analyzátorům.



Obrázek 54 Vyhřívané hadice připojené k výfuku

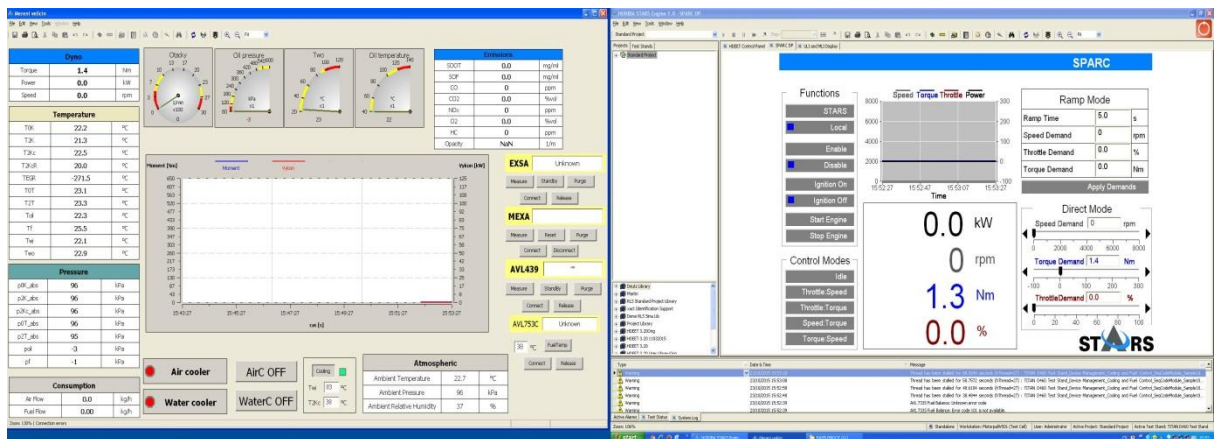
Obrázek 55 Ohebná nerezová trubice vedoucí spaliny z motoru

- **Ovládací systém** – ovládací systém slouží ke komunikaci mezi obsluhou a brzdovým stanovištěm. Ovládací systém je umístěn ve vedlejší místnosti tzv. velínu. Tato místnost zajišťuje veškerý komfort obsluhy i pro dlouhodobé zkoušení motorů. Pomocí výpočetní techniky je softwarově řízeno ovládání, sledování chodu a ukládání měřených parametrů motoru. V tomto případě byl použit ovládací systém Sparc od firmy Horiba. Systém Sparc má pro uživatele přívětivé grafické prostředí, které si může každý uživatel upravit podle svého.



Obrázek 56 Ovládací systém ve velínu s výhledem na zkoušený motor

Ovládací systém Sparc se zobrazuje pro svoji lepší přehlednost na dvou monitorech. První monitor zobrazuje přehled o řízení dynamometru. Zde si uživatel vybere režim, v jakém bude motor provozován a posuzuje hodnoty vykazované ze snímačů na dynamometru (otáčky, zatížení, výkon).



Obrázek 57 Ovládací systém zobrazený na dvou monitorech

Druhý monitor zobrazuje všechny hodnoty měřené na instalovaných snímačích, z emisních analyzátorů a informace o spínání chlazení motorů i mezichladiče. Snímače jsou zobrazeny v tabulce a každý má přiřazeno své označení viz tabulka 11.

V této chvíli je motor a potažmo i celé brzdové stanoviště připraveno na provádění testů a zkoušek ke splnění emisního limitu Stage IV.

3.3 Výsledky měření

Po přípravě k měření, která je popsána v kapitole 3.2, byl motor připraven na provedení emisních zkoušek. Emisní zkoušky prováděné na motoru MMZ D 245.2S3B vychází ze směrnice Evropského parlamentu 97/68/ES pro měření motorů non – road aplikací. Plynné emise byly měřeny analyzátozem EXSA 1500, a pevné částice analyzátozem MEXA 1230PM.

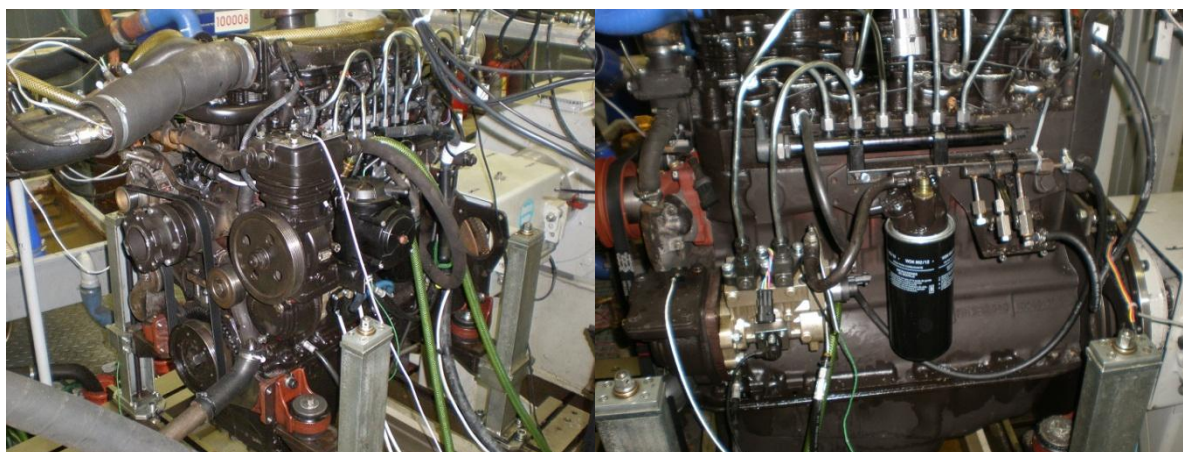
Výsledky měření		
Číslo kroku	Název	Popis
1.	Úvodní měření	výchozí měření, z kterého vyházejí možnosti použití další technologie pro snížení emisí na emisní limit Stage IV
2.	Optimalizace vstřikovacího systému	optimalizace pro snížení emisí pouze vstřikovací soustavou
3.	Optimalizace pomocí exhaust aftertreatment system	připojení a optimalizace dalšího zařízení pro snížení emisí na požadovaný emisní limit Stage IV
4.	Zhodnocení výsledků	zhodnocení vstupních a výstupních emisí

Tabulka 12 Postup měření ke snížení emisí na emisní limit Stage IV

3.3.1 Úvodní měření

Jako úvodní měření, ke zjištění daného stavu motoru, byl vybrán NRSC, tzv. osmibodový test. Měření motoru pomocí NRSC testu je popsán ve směrnici 97/68/ES viz kapitola 1.6.1. NRSC test je nejpřesnější ukazatel parametrů motoru, jelikož měření každého bodu se provádí až po ustálení všech měřených hodnot motoru. Měření jednotlivých bodů je popsáno v normě jako měření posledních třech minut z celkových deseti po dosažení požadovaných hodnot.

Motor byl osazen kompletním systémem common rail firmy Motorpal a.s. se základním nastavením. Naměřené výsledky z úvodního měření jsou vstupními hodnotami, bez jakýchkoliv zásahů do motoru nebo vstříkovacího zařízení v průběhu zkoušky. Hodnoty se dále používají pro posouzení postupů ke splnění emisního limitu Stage IV. Výsledek se provádí dle směrnice 97/68/ES kde výsledné hodnoty jsou v g/kWh, pro všechny emisní složky.



Obrázek 58 Ustavení motoru na dynamometru

Obrázek 59 Vysokotlaké čerpadlo Motorpal na motoru MMZ

<i>Výsledky měření</i>	<i>Nox [g/kWh]</i>	<i>HC [g/kWh]</i>	<i>CO [g/kWh]</i>	<i>PM [g/kWh]</i>
Naměřené hodnoty	12,64	0,42	0,09	0,017
Hodnoty normy Stage IV	0,4	0,19	5	0,025
Hodnota nesplnění normy	12,24	0,23	-	-
Hodnota splnění normy	-	-	4,91	0,008

Tabulka 13 Výsledné emise úvodního měření

Výsledek úvodního měření ukazuje, potřebu optimalizace nejen aktivních možností snížení emisí (např. úprava předstříku), ale protože je norma Stage IV velmi přísná bude použita i pasivní možnost snížení emisí (např. SCR, DOC).

3.3.2 Optimalizace vstřikovacího systému

První část optimalizace se bude zabývat příliš vysokými emisemi oxidu dusíku Nox. Zkusíme snížit emise Nox na požadovanou hodnotu ke splnění emisního limitu Stage IV úpravou časování vstřikování. Vstříknutí paliva blíž před horní úvrat' se dosahuje lepších emisí Nox, ale zhoršujeme emise pevných částic PM. Další technologie, která zde byla použita pro zlepšení emisí Nox je použití tzv. pilotních vstříků.

Pilotní vstřík je vstříknutí poměrně malé dávky před hlavním vstříkem do spalovacího prostoru, kterým se docílí plynulejšího průběhu spalování. Plynulejším průběhem spalování se dosahuje menších teplot hoření, která příznivě ovlivňuje emise Nox.

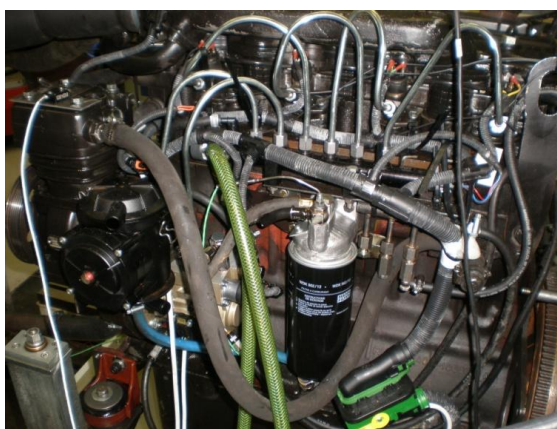
<i>Výsledky měření</i>	<i>Nox [g/kWh]</i>	<i>HC [g/kWh]</i>	<i>CO [g/kWh]</i>	<i>PM [g/kWh]</i>
Naměřené hodnoty	10,43	0,71	0,34	0,033
Hodnoty normy Stage IV	0,4	0,19	5	0,025
Hodnota nesplnění normy	10,03	0,52	-	0,008
Hodnota splnění normy	-	-	4,66	-

Tabulka 14 Výsledné emise optimalizovaného měření

Výsledky optimalizovaného měření ukázali možnost snížení emise Nox pouze změnou časování vstříku.

Snížení bylo pouze o 2,21 g/kWh na hodnotu 10,43 g/kWh, která zdaleka neodpovídá hodnotě 0,4 g/kWh pro splnění emisního limitu Stage IV.

Úpravou časování vstřikování došlo i ke zhoršení emisí pevných částic PM, které už nesplňují hodnoty pro emisní limit Stage IV.



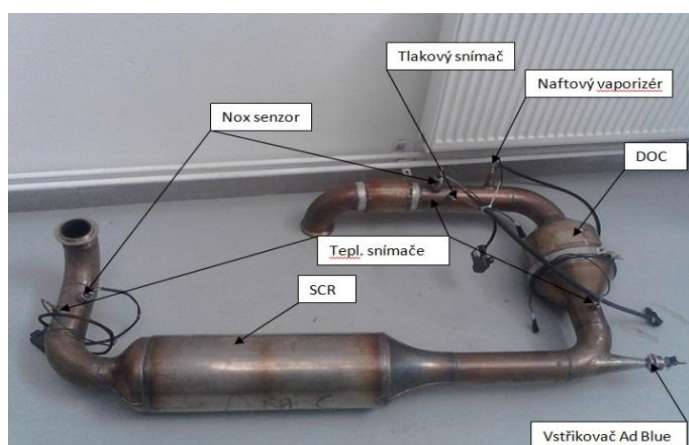
Obrázek 60 Systém Motorpal common rail na motoru MMZ

Další postup ke splnění emisního limitu Stage IV bude použití systému k následné úpravě výfukových plynů (**exhaust aftertreatment system**).

3.3.3 Optimalizace pomocí exhaust aftertreatment system

Pro použití exhaust aftertreatment systémů budeme vycházet z naměřených výsledků při první optimalizaci vstřikovacího systému na snížení Nox emisí.

Systém k následné úpravě výfukových plynů, je kombinací několika zařízení obsažených v kapitole 1.8.2 Sekundární možnosti snížení emisí motoru. Tento systém je sofistikované zařízení, ve kterém je přesně daná pozice jednotlivých součástí viz **obrázek 46**.



Obrázek 61 Exhaust aftertreatment systém

Nox senzor – nejdůležitější snímač a ukazatel účinnosti SCR katalyzátoru, protože měří emise Nox na vstupu do systému a na výstupu ze systému. Podle tohoto rozdílu ovládá řídicí jednotka přesné vstřikování kapaliny AdBlue, pro dosažení co možná nejmenších emisí Nox.

Teplotní snímače – v systému jsou snímače tři, kvůli lepšímu sledování úbytků teploty na jednotlivých součástech systému.

Tlakový snímač – měří tlak v celém systému a kontroluje průchodnost všech filtrů.

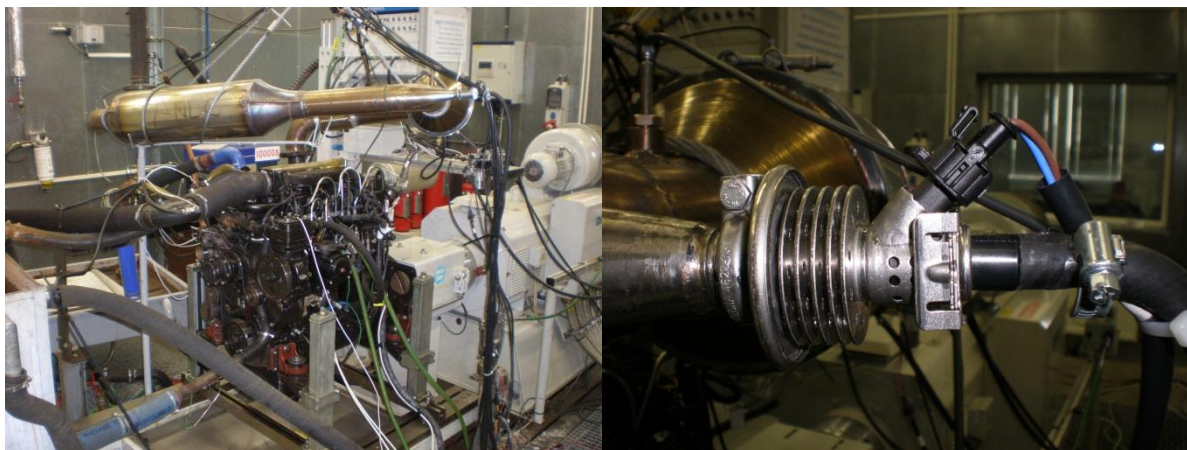
SCR – Katalyzátor selektivní katalytické reakce viz kapitola 1.8.2.4.

Naftový vaporizér – používá se ke vstříknutí malého množství nafty do systému ke zvýšení teploty oxidačního katalyzátoru. Další použití vaporizéru je pro zvýšení teploty výfukových plynů při aktivní regeneraci DPF filtru.

DOC – Diesellový oxidační katalyzátor viz kapitola 1.8.2.1.

Vstřikovač AdBlue – je ovládán řídicí jednotkou, podle které vstřikuje do systému kapalinu AdBlue.

Exhaust aftertreatment systém se připevňuje co nejbližší výstupu výfukových plynů z motoru, kvůli omezení ztrát teploty výfukových plynů. Na motoru MMZ D245.2S3B byl tento systém připevněn na výstupu výfukových plynů z turbodmychadla.



Obrázek 62 Exhaust aftertreatment systém připojen k motoru

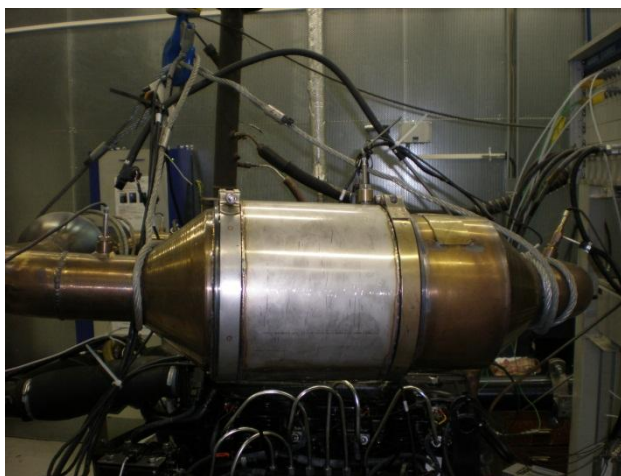
Obrázek 63 Vstřikovač kapaliny Ad Blue

<i>Výsledky měření</i>	<i>Nox [g/kWh]</i>	<i>HC [g/kWh]</i>	<i>CO [g/kWh]</i>	<i>PM [g/kWh]</i>
Naměřené hodnoty	0,71	0,04	0,08	0,040
Hodnoty normy Stage IV	0,4	0,19	5	0,025
Hodnota nesplnění normy	0,31	-	-	0,015
Hodnota splnění normy	-	0,15	4,92	-

Tabulka 15 Výsledné emise s Exhaust aftertreatment systémem

Výsledek měření stále neodpovídá hodnotám emisního limitu Stage IV. Projevilo se viditelné zlepšení u Nox emisí z 10,43 g/kWh na 0,71 g/kWh a u HC emisí, ale u emisí pevných částic došlo k mírnému zhoršení, nikoliv ke zlepšení.

Následná úprava Exhaust aftertreatment systému pro splnění emisního limitu Stage IV bude přidání DPF filtru pro snížení emisí pevných částic PM. DPF filtr nejen že minimalizuje hodnotu emisí pevných částic PM, ale díky tomu umožní i optimalizaci SCR katalyzátoru pro snížení emisí Nox.



Obrázek 64 Připojení DPF filtru do systému mezi DOC a SCR

<i>Výsledky měření</i>	<i>Nox [g/kWh]</i>	<i>HC [g/kWh]</i>	<i>CO [g/kWh]</i>	<i>PM [g/kWh]</i>
Naměřené hodnoty	0,35	0,06	0,08	0,010
Hodnoty normy Stage IV	0,4	0,19	5	0,025
Hodnota nesplnění normy	-	-	-	-
Hodnota splnění normy	0,05	0,13	4,92	0,015

Tabulka 16 Výsledné emise s Exhaust aftertreatment systémem

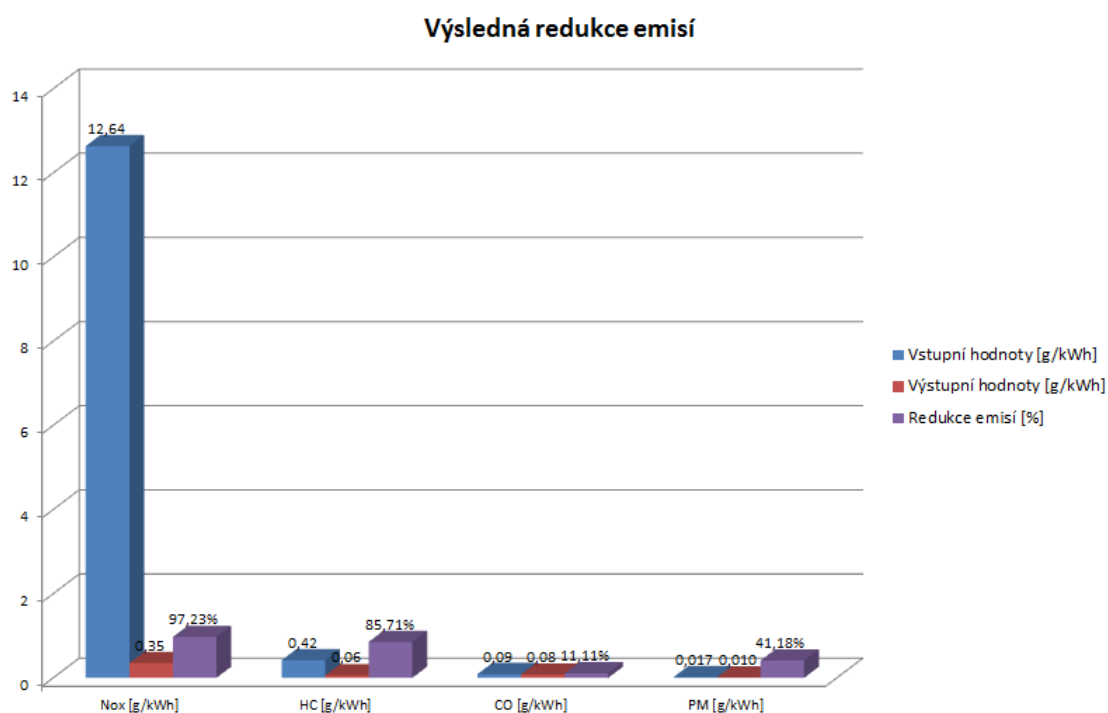
DPF filtr byl umístěn mezi DOC katalyzátor a SCR katalyzátor, kde je jeho nejlepší umístění vzhledem k redukci emisí pevných částic viz obrázek 49. Systém po přidání DPF filtru je výrazně dražší a motor je méně hospodárný než systém bez DPF filtru, ale pouze pomocí DPF filtru je schopen tento motor splnit nejprísnější limit Stage IV. Limitu bylo dosaženo i bez použití technologie EGR, která by v tomto případě byla již zbytečná.

3.3.4 Zhodnocení výsledků

Z výsledku je patrné, že pomocí optimalizace vstřikování a exhaust aftertreatment systému je možné docílit výsledných emisí, které odpovídají hodnotám pro splnění emisního limitu Stage IV. Všechny výsledné emise jsou minimalizovány o desítky procent, ale největší snížení je u emisí Nox a to o 97,23% pomocí SCR katalyzátoru viz Graf 1.

Výsledky měření	Nox [g/kWh]	HC [g/kWh]	CO [g/kWh]	PM [g/kWh]
Vstupní hodnoty	12,64	0,42	0,09	0,017
Výstupní hodnoty	0,35	0,06	0,08	0,010
Redukce emisí	97,23%	85,71%	11,11%	41,18%

Tabulka 17 Srovnání výsledné redukce emisí



Graf 2 Výsledná redukce emisí

V této kompozici je motor MMZ D245.2S3B připraven podstoupit homologační zkoušku na emisní limit Stage IV u specializované testovací laboratoře např. TÜV SÜD Czech.

Závěr

Výsledkem této diplomové práce je studie o emisích výfukových plynů, evropských emisních limitech, způsobech snižování emisí ve výfukových plynech a praktický způsob snížení emisí u motoru MMZ D245.2S3B na emisní limit Stage IV. V tomto případě byla pro snížení emisí Nox použita pouze technologie SCR. Kombinace technologii SCR a EGR by byla zbytečná a kontraproduktivní, protože oproti technologii SCR zvyšuje technologie EGR spotřebu paliva motoru.

Evropské limity STAGE se týkají většinou vznětových motorů vozidel určených pro nesilniční provoz. V dnešní době již existuje řada prostředků ke snižování emisí. Neustálý vývoj emisních limitů však tlačí na výrobce motorů a vstřikovacích systémů vyvíjet stále lepší a účinnější prostředky ke snížení emisí výfukových plynů.

Hlavním cílem praktické práce bylo změřit emisní parametry vznětového motoru MMZ D 245.2S3B a snížit hodnoty emisí aby splňovaly emisní limit Stage IV. Mezi sledované složky výfukových plynů patřil oxid uhelnatý (CO), nespálené uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (Nox) a pevné částice (PM). Jak je z výsledku patrné, tak největší problém u vznětových motorů jsou emise oxidu dusíku (Nox) a pevných částic, které jsou limitem Stage IV redukovány na velmi nízké hodnoty. Kvůli tomu je potřeba používat na motorech ke splnění těchto přísných limitů, systém úpravy výfukových plynů tzv. exhaust aftertreatment systém. Tento sofistikovaný systém častokrát dokáže snížit emise na požadovaný emisní limit, ale je to minimálně za cenu vyšší ceny údržby vozu, provozu vozu a potřeby doplňování další kapaliny (AdBlue) do vozidla, což jsou položky, s kterými se musí do budoucna počítat u každého vozidla vybaveným diesellovým motorem.

Se vzrůstajícím počtem obyvatelstva roste i počet vozidel v provozu produkující emise výfukových plynů. Z toho vyplývá, že redukování škodlivých emisí ve výfukových plynech je velice aktuální a důležité téma, obzvláště teď kdy se řeší kauza kolem úpravy emisních výsledků vozů Volkswagen tzv. aféra Diesel Gate.

Volkswagen používal software, který poznal, že vozidlo prochází testem na válcové zkušebně, a upravil chod motoru tak, aby vyhověl americkým limitům na emise oxidů dusíku.

Jak už bylo popsáno výše, motory pro mimosilniční stroje jsou jinak testovány než motory silničních strojů, ale to vůbec nemění nic na tom, že emisní výsledky by neměly být upravovány ani nějak manipulovány i za cenu vyšších spotřeb motorů. Poctivé zacházení s emisními výsledky by mělo být standardem všech světových výrobců motorů, protože emise výfukových plynů mají neblahý dopad nejen na životní prostředí, ale i na zdraví člověka.

Seznam použité literatury

[1] **VALA M., TESAŘ M.**, *Teorie a konstrukce silničních vozidel I. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. 1. vyd. 229 s. ISBN 80-7194-503-X.*

[2] **ROLF GSCHIEDLE a kolektiv**, *Příručka pro automechanika: Sobotáles, 2001. ISBN 80-85920-76-X.*

Seznam internetových odkazů

[3] **Ing. Tomáš Šmerda, Ph.D., Ing. Jiří Čupera, Ph.D.**, *Emise vznětového motoru a systém SCR*, [citace: 29. října 2015] Dostupné z: <http://www.agrics.cz/obrazky-soubory/emise-vznetoveho-motoru-a-system-scr-4107d3.pdf?redir>

[4] **Ing. Jaromír Stejskalík**, *Snižování emisí škodlivin u vznětových motorů*, 2012, [citace: 9. listopadu 2015] Dostupné z: <http://www.ssamp-krnov.cz/upload/soubory/00032.pdf>

[5] **Jakub Nevτίpil**, *Emisní limity*, 2013, [citace: 6. listopadu 2015] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64901

[6] **Roman Melzer**, *Exhaláty ve výfukových plynech*, 2001, [citace: 20. října 2015] Dostupné z: envi.upce.cz/pisprace/ks_pce/Melzer.doc

[7] **Physics World**, *Energy efficiency of vehicles*, online [citace: 20. listopadu 2015] Dostupné z: www.hk-phy.org

[8] **Aleš Velešík**, *Emisní normy EURO 6*, 2013, [citace: 6. listopadu 2015] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65735

[9] **Diesel Net**, *Emission Standards Europe Nonroad Engines*, 2015 [citace: 16. listopadu 2015] Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/>

[10] **Jílek Petr, Jarošík Jan, Jůza Štěpán, Kusák Marek**, *Emise spalovacích motorů, jejich vliv na životní prostředí a přehled analyzátorů emisí*, 2003 [citace: 12. listopadu 2015] Dostupné z: http://envi.upce.cz/pisprace/prezencni/04/28_03_09.pdf

[11] **Katedra dopravního stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava**, *Konstrukční řešení silničních vozidel v MHD*, online [citace: 20. listopadu 2015] Dostupné z: <http://kds.vsb.cz/mhd/konstrukce-vstrikovace.htm>

[12] **Cleantaxx**, *Jak funguje filtr pevných částic*, online [citace: 10. října 2015] Dostupné z: <http://www.dpf-ftg.cz/funkce-dpf/>

[13] **Autolexikon.net**, *SCR (Selective Catalytic Reduction)*, online [citace: 1. října 2015] Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/scr-selective-catalytic-reduction/>

Seznam obrázků:

Obrázek 1 Vstupní a výstupní složky procesu spalování[4]	13
Obrázek 2 Vznětový motor[7].....	14
Obrázek 3 Složení výfukových plynů vznětových motorů[4].....	15
Obrázek 4 Kyslík[4]	16
Obrázek 5 Dusík[4]	16
Obrázek 6 Voda[4]	16
Obrázek 7 Oxid uhličitý[4].....	17
Obrázek 8 Oxid uhelnatý[4]	17
Obrázek 9 Oxid dusičitý[4]	18
Obrázek 10 Nespálené uhlovodíky[4]	18
Obrázek 11 Oxid siřičitý[4].....	19
Obrázek 12 Platné emisní limity v různých státech světa[9]	23
Obrázek 13 Průběh měření NRSC cyklu[3]	27
Obrázek 14 Průběh měření NRTC cyklu[9].....	28
Obrázek 15 Popis absorpce[10].....	29
Obrázek 16 Absorpční spektrum[10]	29
Obrázek 17 Infraanalyzátor výfukových plynů.....	30
Obrázek 18 Ultrafialový analyzátor výfukových plynů[10]	31
Obrázek 19 Chemiluminiscenční analyzátor[10]	32
Obrázek 20 Plamenoionizační detektor[10]	33
Obrázek 21 Filtrační kouřoměr[10].....	34
Obrázek 22 Opacimetr hartridge[10]	34
Obrázek 24 Princip real- time měření	35
Obrázek 25 Vývoj emisních limitů[9].....	36

Obrázek 26 Vstřikovací systémy vznětových motorů a) přímý vstřik s rotačním čerpadlem, b) comon rail, c) systém PD d) samostatné čerpadlo s cizím pohonem[11]	37
Obrázek 27 Turbodmychadlo[5]	38
Obrázek 29 Recirkulace výfukových plynů – EGR[4]	39
Obrázek 28 Oxidační katalyzátor[4]	40
Obrázek 30 Schéma filtru pevných částic – DPF[12]	42
Obrázek 31 Selektivní katalytická redukce – SCR[13].....	43
Obrázek 32 Traktor MTZ Belarus – 922.5	46
Obrázek 33 Motor D245.2S3B.....	47
Obrázek 34 Asynchronní motor dynamometru Horiba Titan HT460	49
Obrázek 35 Schéma funkce konvertoru	49
Obrázek 35 Ovládací jednotka dynamometru	50
Obrázek 36 Připojení motoru MMZ D245.2S3B s dynamometrem	50
Obrázek 37 Teplotní snímač - Pt 100 a Obrázek 38 Závislost odporu na teplotě snímače Pt 100	51
Obrázek 39 Teplotní snímač - Termočlánek	52
Obrázek 40 Tlakový snímač – SML Nagano	53
Obrázek 41 Emisní analyzátor Horiba EXSA 1500L	53
Obrázek 42 Emisní analyzátor Horiba MEXA 1230PM.....	54
Obrázek 43 Dynamická váha paliva AVL 733S	55
Obrázek 44 Kouřoměr AVL 415	56
Obrázek 45 Celková sestava brzdového stanoviště.....	57
Obrázek 46 Uchycení pružné spojky s motorovým setrvačником	58
Obrázek 47 Detailní pohledy uchycení motoru k paletovému systému	58
Obrázek 48 Příklad umístění snímačů na motoru MMZ D245.2S3B	59
Obrázek 49 Interface pro komunikaci ovládacího zařízení se snímači	59
Obrázek 50 Přívod paliva s hrubým filtrem	61
Obrázek 51 Tlakové palivové hadice u vysokotlakého čerpadla	61

Obrázek 52 Připojená chladicí nádoba k motoru a vnějšímu okruhu.....	61
Obrázek 53 Mezichladič ponořen v chladicí nádobě	62
Obrázek 54 Vyhřívané hadice připojené k výfuku.....	62
Obrázek 55 Ohebná nerezová trubice vedoucí spaliny z motoru	62
Obrázek 56 Ovládací systém ve velínu s výhledem na zkoušený motor	63
Obrázek 57 Ovládací systém zobrazený na dvou monitorech.....	63
Obrázek 58 Ustavení motoru na dynamometru.....	65
Obrázek 59 Vysokotlaké čerpadlo Motorpal na motoru MMZ.....	65
Obrázek 60 Systém Motorpal common rail na motoru MMZ.....	66
Obrázek 61 Exhaust aftertreatment systém	67
Obrázek 62 Exhaust aftertreatment systém připojen k motoru	68
Obrázek 63 Vstříkovač kapaliny Ad Blue.....	68
Obrázek 64 Připojení DPF filtru do systému mezi DOC a SCR.....	69

Seznam tabulek

Tabulka 1 Stage I.....	24
Tabulka 2 Stage II	24
Tabulka 3 Stage IIIa	25
Tabulka 4 Stage IIIb	25
Tabulka 5 Stage IV	25
Tabulka 6 Stage V	26
Tabulka 7 Cyklus NRSC	27
Tabulka 8 Druhy a metody měření jednotlivých složek emisním analyzátozem Horiba EXSA 1500L.....	54
Tabulka 9 Druhy a metody měření pevných částic emisním analyzátozem Horiba MEXA 1230PM.....	55

Tabulka 10 Postup přípravy měření	57
Tabulka 11 Přehled snímačů použitých pro měření na motoru MMZ D245.2S3B	60
Tabulka 12 Postup měření ke snížení emisí na emisní limit Stage IV	64
Tabulka 13 Výsledné emise úvodního měření	65
Tabulka 14 Výsledné emise optimalizovaného měření.....	66
Tabulka 15 Výsledné emise s Exhaust aftertreatment systémem.....	68
Tabulka 16 Výsledné emise s Exhaust aftertreatment systémem.....	69
Tabulka 17 Srovnání výsledné redukce emisí	70

Seznam grafů




Graf 1 Redukce emisí Nox v závislosti na teplotě.....	44
Graf 2 Výsledná redukce emisí.....	70

Přílohy

Výsledek vstupního emisního testu.....	78
Výsledek konečného emisního testu.....	79
Možnosti snížení emisí jednotlivých emisních složek.....	80

Emissions measurement		Test : EU_Stage_Nonroad_Engines		Stage IV		R Directive 97/68/ES from 6.12.2012 (Consolidate)		Protocol nos	
Engine	D246.2S	MMZ	Injection system	via: LZ12/20		Injector:	Motopral		
No.:			Type:	MPCR		Nozzle:		Date:	1.00
Power [kW]:	90		TBD:			Opening pressure:		Diagram:	9.9.2015
Cylinder bore[mm]:	110		Camshaft:			HPP:		Vapour pressure [kPa]:	2.66
Stroke [mm]:	125		Injection unit:			TC:	C2 C15 505 01	P _{amb} [kPa]:	96.2
Cylinder number [-]:	4		Valve:			Intercooler:	38°C	P _{amb} [mmHg]:	723.5
Clutch [l]:	4.752		ECU:	MOTORPAL v4.05		EGR - Ypr:	NONE	Measured:	Zemian
Supercharged:	YES		St. Inj. Timing BTDC:			Exhaust bypass:	no	Processed:	Zemian
Input of spec dev. [kW]						Others:			
Parameters									
Point of test	1	2	3	4	5	6	7	8	
Speed [rpm]	2200	2200	2200	1600	1608	1694	800	800	
Load [%]	100	75	50	10	100	75	50	0	
Power									
Torque [Nm]	398.7	293.0	193.8	39.0	498.8	378.3	248.8	1.2	
Power [kW]	89.1	87.5	44.7	9.0	83.5	83.3	41.7	0.1	
Consumptions									
FC [g/kWh]	19.8	15.7	11.5	5.1	18.8	12.9	9.0	0.7	
BSPC [g/kWh]	221.8	232.8	256.4	587.9	201.5	203.9	215.3	687.9	
Deliver str. [mg/kWh]	89.7	71.3	52.0	23.1	105.0	80.2	56.1	8.9	
Temperatures									
Exhaust Tz [°C]	337.2	271.7	231.2	182.2	358.8	314.1	271.9	132.5	
Air Tzk (cool) [°C]	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	38.0	
Air Tzk (cool) [°C]	145.9	136.6	114.2	76.8	128.2	104.1	80.7	31.6	
Air intake [°C]	21.5	21.8	21.7	21.5	21.7	21.3	21.4	21.1	
Pressures									
Bar pressure [mBar]	982.2	982.2	982.3	982.3	982.3	982.3	982.4	982.3	
Air Pzk [Pa]	139.7	129.4	104.0	58.3	135.3	103.2	72.9	6.2	
Air Pzkc (cool) [Pa]	135.8	126.4	99.5	55.6	132.5	103.7	69.4	2.7	
Exhaust Pz [Pa]	214.8	205.8	185.7	99.8	186.2	126.1	88.8	6.1	
Exhaust Pz [Pa]	3.7	3.4	2.3	0.9	1.8	1.4	0.9	-0.1	
Ambient									
Humidity [%]	33.8	32.8	33.8	33.8	34.5	34.7	32.4	32.8	
Air density [kg/m ³]	1.145	1.145	1.145	1.145	1.145	1.145	1.145	1.145	
Open EGR [mm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Notes: engine D246.35E4 w/o Aftertreatment									
Measured values									
Stage IV									
not meet									
meet									
Test result									
Nox	[g/kWh]	12.64	0.42	13.06	0.09	0.017	230.8	0.0	
HC	[g/kWh]	0.19	0.23	-	-	-	-	-	
NOx+HC	[g/kWh]	-	-	-	-	-	-	-	
CO	[g/kWh]	4.97	0.008	-	-	-	-	-	
PM	[g/kWh]	-	-	-	-	-	-	-	
SFC	[g/kWh]	-	-	-	-	-	-	-	
Smoke	[FSN]	-	-	-	-	-	-	-	

Emissions measurement		Test :		EU_Stage_Nonroad_Engines		Stage IV		R Directive 97/68/ES from 6.12.2012 (Consolidate)		Protocol v08								
Engine	D245.2S	MMZ	Injection system	viz. LZ12/20		Injector:	Motorpal	fa	1.03	PASS								
No.:			Typ:			Nozzle:		Date:	9.9.2014									
Power [kW]:	90		TBD:			Opening pressure:		Diagram:										
Cylinder bore[mm]:	110		Camsshaft:			HPP:		Vapour pressure [kPa]:										
Stroke [mm]:	125		Injection unit:			TC:	CZ CT1XXX	P _{amb} [kPa]:	720.3	P _{amb} [mmHg]:	53.9							
Cylinder number [-]:	4		Valve:			Intercooler:	TATRA - 38°C	P _{amb} [°C]:	25.3	T _{amb} [K]:	298							
ECU:			ECU:	MOTORPAL v4.05		EGR - typ:	NONE	Measured:	Zeman									
Supercharged:	YES		St. Inj. Timing BTDC:	die 53B		Exhaust bypass:	no	Processed:	Zeman									
Input of spec dev [kW]						Others:												
Parameters																		
Point of test	1	2	3	4	5	6	7	8										
Speed [rpm]	2200	2200	2200	2200	1600	1600	1600	802	Nox [ppm]	19.00	12.00	13.00	149.00	31.00	34.00	59.00	129.00	
Load [%]	100	75	50	10	100	75	50	0	HC [ppm]	1.00	1.00	5.00	8.00	1.00	1.00	3.00	8.00	
Power	389.9	293.9	193.3	38.0	495.6	377.5	249.8	2.5	CO [ppm]	-26.00	-25.00	-15.00	-7.00	-20.00	-37.00	-22.00	-1.00	
Torque [Nm]	89.8	67.7	44.5	8.8	83.0	63.3	41.9	0.2	CO2 [%]	7.20	5.70	4.40	2.40	8.80	7.00	5.70	1.20	
Power [kW]	89.8	67.7	44.5	8.8	83.0	63.3	41.9	0.2	HC [ppm]	16.30	9.77	9.81	85.41	19.10	19.61	28.65	18.56	
Consumptions									HC [g/hood]	-13.86	-13.56	-7.52	-2.67	-8.21	-14.23	-7.12	-0.10	
FC [kg/hood]	19.7	15.6	11.4	4.9	17.3	13.2	9.2	0.8	HC [g/hood]	0.85	0.81	3.73	4.54	0.61	0.57	1.44	1.13	
BSEC [g/kWhood]	219.4	230.4	256.0	559.7	208.3	208.7	219.8	3809.2	Part.pressure [kPa]	3.18	3.30	3.22	3.06	3.36	3.44	3.32	3.10	
Deliv.per.str. [mm3/c]	89.4	70.8	51.7	22.2	107.9	82.3	57.4	10.0	Exhaust gas flow [kg/h]	588.50	561.30	518.70	394.50	424.70	398.00	335.10	98.70	
Temperatures									Air [g/hood]	568.80	545.70	507.30	389.60	407.40	384.80	325.90	97.90	
Exhaust T2 [°C]	427.3	352.2	282.1	182.9	435.4	361.2	308.0	150.2	Air [m3/h]	505.34	484.61	450.70	346.13	361.94	341.87	289.54	86.98	
Air T2k (cooled) [°C]	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	Exhaust gas flow [m3/h]	505.36	484.83	450.71	346.14	361.96	341.88	289.55	86.98	
Air T2k [°C]	98.7	95.0	88.3	58.2	95.1	86.6	66.4	28.9	Q [m3/h]	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	
Air intake [°C]	25.0	25.6	25.2	24.4	25.9	26.3	25.7	24.6	Nox [g/h*WtP]	2.45	1.46	1.47	8.54	1.91	1.96	2.86	2.78	
Pressures									HC [g/h*WtP]	0.13	0.12	0.56	0.45	0.06	0.06	0.06	0.14	
Bar. pressure [mBar]	959.0	958.0	958.0	958.0	958.0	958.0	958.0	957.0	CO [g/h*WtP]	-2.08	-2.03	-1.13	-0.27	-0.82	-1.42	-0.71	-0.01	
Air P2k [kPa]	89.5	81.7	72.6	34.8	86.5	73.6	47.1	3.5	WFI x Pe	13.47	10.16	6.68	0.88	8.30	6.33	4.19	0.03	
Air P2k (cooled) [kPa]	85.1	80.6	71.8	32.6	82.0	71.4	46.3	3.3	WFI x Smoke	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exhaust P2k [kPa]	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	PM [mg/m3]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Exhaust P2k [kPa]	18.2	14.6	11.2	5.6	12.0	9.3	6.5	0.8	PM [g/hood]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ambient									PM [g/h*WtP]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Humidity [%]	28.3	26.4	27.6	27.6	26.4	26.0	26.2	28.4	FC [g/h*WtP]	2955.00	2340.00	1710.00	490.00	1730.00	1320.00	920.00	120.00	
Air density[kg/m-3]	1.126	1.125	1.125	1.126	1.125	1.125	1.125	1.126	Test result									
Open EGR [mm]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Nox	0.35	0.06	0.41	0.08	0.08	0.010	0.010	231.6	
Notes:										Measured values								
w/o PM measure										Stage IV	0.4	0.19	-	5	0.025	-	-	-
										not meet	0.05	0.13	-	4.92	0.015	-	-	
										meet								

Exhaust Gas Components	Why Bad?	Primary: Engine-Internal Solutions	Secondary: Off-Engine Solutions	Fuel Solutions
Nitrogen Oxides (NOx) 	Ground ozone formation Respiratory issues Acid rain	Reduce temperature during the combustion process Exhaust Gas Recirculation (EGR)	Aftertreatment technology (e.g. SCR)	Natural Gas
Sulfur Oxides (SOx) 	Respiratory issues Acid rain	Fuel injection control	Aftertreatment technology (e.g. Scrubbers)	Natural Gas, Low Sulfur Fuels, Bio-Fuels
Particulate Matter (PM) 	Air pollution Respiratory and heart issues	Fuel injection control	Aftertreatment technology (e.g. DPF)	Natural Gas, Low Sulfur Fuels, Bio-Fuels
Hydrocarbons (HC)	Volatile Organic Compounds (VOCs)	Fuel injection control and engine maintenance	Oxidation Catalyst	Natural Gas
Carbon Monoxide (CO)	Toxic Ground ozone formation	Fuel injection control Low load avoidance	Oxidation Catalyst	Natural Gas
Carbon Dioxide (CO₂)	Greenhouse Gas/ Global warming	Various measures reducing total fuel consumption per ton-mile		