

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Provozní měření emisí motorových vozidel

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Martin Černý

Vedoucí práce: Ing. Martin Kotek Ph.D.

2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Martin Černý

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Provozní měření emisí motorových vozidel

Název anglicky

Measuring motor vehicles emissions under operational conditions

Cíle práce

Analyzovat a experimentálně ověřit možnosti měření emisí motorových vozidel během reálného provozu. Na základě experimentálních jízd posoudit jednotlivé vlivy ovlivňující emise motorových vozidel.

Metodika

1. provést literární rešerši v oblasti dané problematiky s vlastními komentáři a stanovisky
2. konzultovat práci s institucemi a výrobci zabývající se danou problematikou
3. provést vlastní experimenty, stanovit závěry a uvést případná doporučení

Doporučený rozsah práce

50-60 stran textu včetně tabulek a obrázků

Klíčová slova

emise, analyzátor, provozní měření, PEMS

Doporučené zdroje informací

FREY, H.C., et al.: On-Road Measurement of Vehicle Tailpipe Emissions Using a Portable Instrument, Journal of the Air & Waste Management Association (53), 2003, pp. 992–1002, ISSN 1047-3289
HROMÁDKO, J.: Spalovací motory, Grada Publishing a.s., Praha, 2011, 296s, ISBN 978-80-247-3475-0
M., Šterba P.: Diagnostika spalovacích motorů, Computer Press, Brno, 2007, ISBN 978-80-251-1697-5
TAKATS, M.: Měření emisí spalovacích motorů. ČVUT, Praha, 1997, 111 s., ISBN 80-01-01632-3
VLK, F.: Diagnostika motorových vozidel Vlk, Brno, 2006, 576s., ISBN 80-239-7064-0

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 30. 3. 2015

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval sám pod vedením Ing. Martina Kotka, Ph.D. a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 31.3.2016

Chtěl bych tímto poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Martin Kotkovi, Ph.D. za ochotu, trpělivost, vstřícnost a poskytnuté cenné rady.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá analyzováním a experimentálním ověřením možnosti měření emisí motorových vozidel v reálném provozu. Obsahuje literární řešení problematiky se zaměřením na ovlivnění zdraví člověka emisemi motorových vozidel, metody měření obsahu emisí, konstrukční řešení snižování emisí na vozidle a vývoj a aktuální stav emisních předpisů. Na základě experimentálních jízd posuzuje vlivy ovlivňující emise motorových vozidel.

Klíčová slova:

Emise, analyzátor, provozní měření, PEMS

Summary:

This thesis deals with analysing and experimental verification of a possibility of measuring emissions of motor vehicles in real traffic. It contains literary searches of the issues focusing on the influence of motor vehicle emissions on human health, methods of measuring emission content, constructional solutions of vehicle emission reduction and current state of emission regulations. Based on experimental drives, the factors affecting the emissions of motor vehicles are evaluated.

Key words:

Emission, analyzer, portable measurement, PEMS

Obsah

Úvod	1
1 Složení výfukových plynů	2
1.1 Popis emisí	2
1.1.1 Oxid uhličitý	3
1.1.2 Oxid uhelnatý	3
1.1.3 Oxidy dusíku	3
1.1.4 Uhlovodíky	4
1.1.5 Pevné částice	4
1.1.6 Oxidy síry	5
1.2 Mechanismus vzniku	5
1.2.1 Oxid uhličitý	5
1.2.2 Oxid uhelnatý	5
1.2.3 Oxidy dusíku	6
1.2.4 Nespálené uhlovodíky	6
1.2.5 Pevné částice	7
1.3 Opatření pro snížení emisí	7
1.3.1 Emisní předpisy	7
1.3.2 Konstrukční opatření	9
2 Diagnostika a měření emisí	18
2.1 Druhy analyzátorů	18
2.1.1 Absorpce infračerveného záření (NDIR)	18
2.1.2 Absorpce ultrafialového záření	19
2.1.3 Chemická luminiscence (CLA)	20
2.1.4 Změna elektrické vodivosti vodíkového plamene (FID)	21
2.1.5 Měření magnetických vlastností	22
2.1.6 Měření kouřivosti	22

2.1.7	Opacimetrie	23
2.1.8	Přímé měření hmotnosti	23
2.1.9	Ostatní metody.....	24
2.1.10	Servisní analyzátory	25
3	Mobilní analyzátory PEMS	26
4	Palubní diagnostika (EOBD).....	27
4.1	Konstrukce a provedení	27
5	Standardní metody měření emisí	29
5.1	Homologační zkoušky	29
5.2	Emisní kontroly.....	32
5.2.1	Zážehový motor bez řízeného emisního systému.....	32
5.2.2	Zážehový motor s řízeným emisním systémem	32
5.2.3	Vznětový motor	32
6	Spotřeba paliva	32
7	Cíle práce.....	34
8	Metodika práce	35
8.1	Měřený automobil.....	35
8.2	Měření EOBD	36
8.3	Analyzátor.....	37
8.4	Postup měření	40
8.4.1	Měření tunelu Blanka – trasa 1.....	40
8.4.2	Měření Suchdolského kopce – trasa 2	41
9	Experiment	43
9.1	Data.....	43
9.1.1	Tunel Blanka	44
9.1.2	Suchdolský kopec	46
9.2	Vyhodnocení experimentu.....	48

9.2.1	Tunel Blanka	48
9.2.2	Suchdolský kopec	50
	Závěr	53
	Seznam zdrojů:	1
	Seznam použitých zkratk:	3
	Seznam obrázků:	5
	Seznam tabulek:	5
	Seznam grafů:	6

Úvod

Pro zajištění trvale udržitelného rozvoje je důležité úroveň znečištění ne jen držet na minimální hodnotě, ale tuto hodnotu i snižovat a nalézat různá alternativní řešení, která budou šetrnější pro životní prostředí. V dnešní době je nutnost přepravy velmi vysoká, a proto je rozvoj dopravy enormní. Narůstají tak zdroje znečištění a emise. Jednotlivé složky emisí ovlivňují lidské zdraví přímo vdechováním a působením na tělo nebo nepřímo znečištěním zdrojů potravy a prostředí, ve kterém člověk žije. Je velmi důležité určit, jaké množství nebezpečných látek je hraniční pro negativní ovlivnění lidského zdraví. Tento poznatek se pak využívá pro stanovování hodnot limitů.

Legislativní omezení množství emisí, které jsou produkovány, má největší vliv na jejich snížení. Jsou kladeny požadavky na výrobce, kteří jsou nuceni vytvářet nová konstrukční řešení, aby emise snížili. Takový přístup nelze používat stále. Jak se ukazuje, v některých oblastech v současné době jsou vyčerpány možnosti nebo jsou příliš nákladné. Jednou z možností výrobce je konstruování hybridních pohonných jednotek nebo využívání alternativních pohonů.

Dosáhnout nižších emisí lze i výstavbou staveb, které mají vliv na samotný dopravní proud, a ovlivňují tak dopravu v širším měřítku. Řidiči jsou nuceni upravit svůj styl jízdy. Tato řešení jsou ale velmi nákladná a časově náročná.

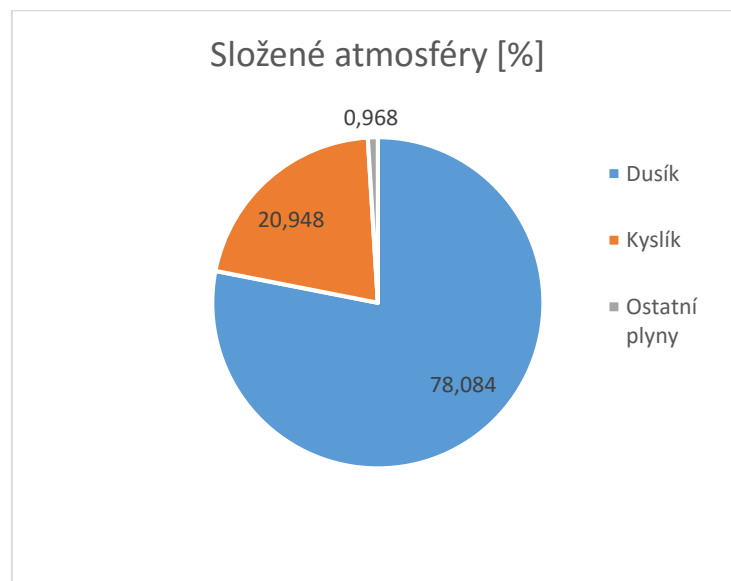
Konečný vliv na množství emisí má řidič. Chování řidiče určuje, zda se bude pohybovat na limitních hodnotách, které mu dovolí konstrukce automobilu nebo zvolí způsob jízdy, který bude produkovat méně emisí.

Úvod práce je věnován škodlivým emisím a jejich vlivu na lidské zdraví. Uvádí přehled škodlivých látek, které spadají pod obecný název emise. Dále se zaměřuje na legislativní omezení emisí, konstrukční řešení snižování emisí na automobilech, metody měření koncentrace jednotlivých složek emisí, analyzátory PEMS, funkce palubní diagnostiky, homologační zkoušky vozidel a metody měření paliva. V závěru je popsán experiment, ve kterém je zjišťován vliv výstavby komunikace na produkci emisí, chování řidiče a porovnání emisí vznikajících v provozu s limitními hodnotami danými legislativou.

1 Složení výfukových plynů

U osobních automobilů se dnes využívají uhlovodíková paliva. Při jejich spalování můžeme děj rozdělit do dvou procesů. První proces se nazývá dokonalá oxidace. Tou se rozumí spálení směsi uhlovodíkových paliv a vzduchu, přičemž vznikne oxid uhličitý a voda. Druhý proces se nazývá nedokonalá oxidace. Při tomto procesu spalování vznikají navíc ještě oxid uhelnatý a vodík.

Ve výfukových plynech se vyskytují i plyny jako kyslík, síra, dusík a uhlovodíky. Kyslík se může objevit v případě, že motor pracuje s přebytkem vzduchu nebo bylo zabráněno procesu oxidace a nebyl využit. Množství síry je zapříčiněné její přítomností v některých palivech. Ve výfukových plynech se objevují jako oxidy síry. Největší složkou spalin je dusík. Je to určeno hlavně složením zemské atmosféry (viz graf 1). Uhlovodíky se mohou vyskytovat ve dvou stavech. Kapalný stav je způsoben nepříznivými podmínkami při spalování. Pevný stav uhlovodíků je důsledkem nedostatku kyslíku za přítomnosti vysokých teplot při spalování.



Graf 1: Složení atmosféry [4]

1.1 Popis emisí

Emise jsou látky v pevném, kapalném nebo plynném stavu, které jsou obsaženy ve výfukovém plynu. Zdrojem znečištění se v této práci rozumí motor automobilu. Tyto látky jsou škodlivé a mají různé vlastnosti a účinky na lidské zdraví.[15]

1.1.1 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý označovaný jako CO_2 je bezbarvý plyn bez zápachu. Při nadechnutí ve větším množství působí štiplavě na sliznici a vytváří kyselou chuť. Do pevného skupenství se dostává po ochlazení na $-78\text{ }^\circ\text{C}$. Vzniká pak bílá tuhá látka známá pod názvem suchý led. V kapalném skupenství může existovat při vyšším tlaku než 500 kPa. Látka je nehořlavá a málo reaktivní. Hustota je zhruba 1,5x těžší než vzduch a je ukazatelem dokonalosti procesu spalování.[16], [17]

Přímý vliv na člověka má až při koncentracích vytěsňujících kyslík. Nepřímý vliv má skrze životní prostředí. Patří mezi tzv. skleníkové plyny, jejichž koncentrace vytvářejí clonu, která omezuje sdílení tepla atmosféry s okolím. Zvyšování koncentrace neblaze ovlivňuje klima a teplotu na planetě.[4]

1.1.2 Oxid uhelnatý

Je to hořlavý, bezbarvý a prudce jedovatý plyn bez zápachu, označovaný CO . Je hlavním produktem nedokonalého spalování fosilních paliv (paliv s obsahem uhlíku). Teplota varu je $-192\text{ }^\circ\text{C}$ a hustotu má velmi blízkou vzduchu.[17]

Oxid uhelnatý se snadněji váže na hemoglobin v lidské krvi než kyslík. Tím dochází k poškození orgánů nedostatkem kyslíku. Je také příčinou tzv. letního smogu.[4]

1.1.3 Oxidy dusíku

Pod tímto pojmem se skrývají plyny oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO_2), oxid dusitý (N_2O_3), tetraoxid dusíku (N_2O_4) a oxid dusičný (N_2O_5). Nejvýznamnější z oxidů jsou pak NO a NO_2 .

- Oxid dusnatý (NO)

Je to bezbarvý, jedovatý a leptající plyn bez zápachu.[19]

- Oxid dusičitý (NO_2)

Červenohnědý agresivní, velice jedovatý plyn. Při tuhnutí vytváří bezbarvé krystaly.

Patří k plynům způsobujícím kyselou dešť.[17]

Oxidy dusíku jsou velmi málo škodlivé, kromě oxidu dusičitého a oxidu dusnatého. Ten se při styku s vlhkostí a sliznicí mění na kyselinu dusičitou. Ta naleptává sliznice a dráždí dýchací cesty, které se začnou stahovat. Následkem je kašláním a pocit dušení, a to i při velmi nízkých koncentracích.[4]

1.1.4 Uhlovodíky

Ve výfukových plynech se uhlovodíky objevují jako produkt nedokonalého spalování a také jako uhlovodíky, které nebyly spálené. Označují se HC nebo C_nH_m . [18]

- Nespálené uhlovodíky
 - o Parafín
Je to bílá a v surovém stavu nažloutlá až nahnědlá směs nasycených uhlovodíků (alkanů). Je bez chuti a zápachu, ve vodě nerozpustná.
 - o Olefiny, acetyleny
Látky s nevýrazně nasládlou vůní, které se značně podílejí na tvorbě smogu.
 - o Aromatické uhlovodíky
Tato skupina má charakteristický zápach, jak vypovídá její název. Jsou nerozpustné ve vodě, vesměs hořlavé a jsou jedovaté. U některých byly zjištěny karcinogenní účinky. Dnes se nazývají areny. [18]

- Spálené uhlovodíky (polycyklické aromatické uhlovodíky – PAU)
 - o Aldehydy, ketony apod.
Tato skupina plynů dráždí oči a nos už při malých koncentracích. Jsou další příčinou smogu. Vliv na to má složení paliv, a proto se rozdělují na metanová a nemetanová paliva. [6], [11]

1.1.5 Pevné částice

Skládají se z primárního uhlíku, organického uhlíku a menších koncentrací sulfátu, dusíku, vody a některých složek, které se nedají identifikovat. Jádro se skládá z popela a uhlíku. Organické uhlíky, sulfáty, dusík a vodní páry jsou absorbovány povrchem. Liší se velikostí, která je udávána typem motoru. Pevné částice vznikají výhradně u vznětových motorů a jsou označovány PM (particulate matter).

Při krátkém vystavení mohou způsobovat podráždění oka, dýchací soustavy a nervových zakončení v ústech a hltanu. Dlouhodobé vystavení pak může způsobit změny v plicních tkáních. Tělo je schopné zachytit částice o různých velikostech v různých částech dýchacího ústrojí. Velké částice (přibližně do 0,1 μm) se zachycují v horních cestách dýchacích a lze je odstranit polykáním. Částice menší než 0,1 μm mohou dosáhnout plic a usuzovat se v plicních sklípcích a průdušnicích. Nejmenší částice (okolo 1 nm) na sebe v atmosféře

mohou navázat PAU nebo jiné karcinogenní látky, které mohou proniknout skrze sklípky do krevního řečiště nebo lymfatického systému.[4], [10]

1.1.6 Oxidy síry

Tyto oxidy se vyskytují hlavně u vznětových motorů, a to především kvůli obsahu síry v palivu. To ovšem klesá, a tak klesá i podíl síry. Celkový obsah oxidů síry je zanedbatelný.[4]

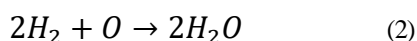
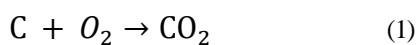
Při vdechování se téměř nedostávají do plic a rozpouštějí se ve vodních roztocích na sliznicích. Ve velkých koncentracích způsobují otoky hrtanu a plic.[10]

1.2 Mechanismus vzniku

Při spalovacím procesu je velice důležitá přítomnost kyslíku. U automobilů je množství kyslíku určováno pomocí součinitele přebytku vzduchu λ . Udává poměr skutečného množství vzduchu, který se účastní spalovacího procesu, a množství teoreticky potřebného množství vzduchu. Pokud je $\lambda < 1$ nazýváme směs bohatou (bohatá na palivo), a tedy je v ní méně kyslíku. V případě, že $\lambda > 1$ se směs nazývá chudá (chudá na palivo). Stechiometrickou směsí se pak nazývá případ, kdy je $\lambda = 1$.

1.2.1 Oxid uhličitý

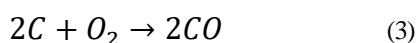
Při dostatku kyslíku vzniká oxidací uhlíku. Chemické rovnice udávají ideální průběh spalování uhlovodíkových paliv.



Tohoto procesu se nezúčastní žádné další plyny obsažené v atmosféře.[4], [10]

1.2.2 Oxid uhelnatý

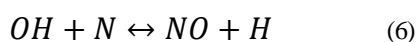
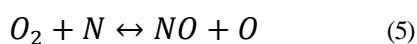
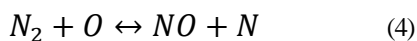
Z důvodu nedostatku kyslíku (bohatá směs) dochází k nedokonalému spalování. Nevytváří se tak oxid uhličitý ale oxid uhelnatý.



Nedostatek kyslíku může být lokální nebo globální. Vznětové motory pracují s vysokým přebytkem vzduchu (použití turbodmychadla), a proto CO oxiduje na CO₂. Množství CO je velice nízké ve srovnání se zážehovými motory. Koncentrace se výrazně zvýší při vysokém zatížení, které se dá přirovnat k prudkému sešlápnutí akceleračního pedálu.[4]

1.2.3 Oxidy dusíku

Tvorba oxidu dusného (NO) je popsána Zeldvičovou řetězovou reakcí. Důležitá je vysoká teplota (1 900 až 2 000 °C), koncentrace prvků N, O a H a doba trvání reakce. Pokud je čas krátký, dochází k zamrznutí reakcí a oxidy nevznikají.



Pro vznik NO_x je důležité určité množství kyslíku a nejvyšších teplot se dosahuje u mírně bohaté směsi. Důležitost obsahu kyslíku převládá nad klesající teplotou. Největší koncentrace jsou dosaženy při $\lambda = 1,05 - 1,1$.

U vznětových motorů jsou z důvodu vyšší koncentrace kyslíku nižší než u zážehových (optimalizace z energetického hlediska). Zážehové motory jsou typické vyšší koncentrací NO a nízkou koncentrací NO₂. [4]

1.2.4 Nespálené uhlovodíky

Nespálené uhlovodíky vznikají předčasným zastavením reakcí nebo vynecháním zážehu z důvodu závady v zapalovací soustavě nebo dosažení velmi chudé směsi. Jsou to produkty krakování a dalších chemických reakcí, které byly zastaveny a neproběhla celá oxidace až do konce. Vlivy na vznik emisí uhlovodíku mají:

- Konstrukce spalovacího prostoru (zhášecí prostory)

Zhášecími prostory se rozumějí místa, která mají nižší teplotu. Ochladí tak reakci hoření a zastaví ji.

- Množství paliva (bohatost směsi)

Při příliš bohaté směsi palivo neprohoří z důvodu nedostatku kyslíku. Srovnatelné emise vznikají při spalování extrémně chudé směsi.

- Závada

V případě závady v zapalovací soustavě nedojde k zapálení uhlovodíkového paliva. Obdobný případ nastane u vznětových motorů při nesprávném seřízení.

Souhrnně to znamená, že palivo, které mělo být přeměněno na mechanickou práci, je nevyužito. Snižuje se tak práce a množství využité energie obsažené v palivu.[1]

1.2.5 Pevné částice

Pevné částice jsou emise vzniklé z prohoření povrchu kapky a pevného uhlíku s popelem vzniklým uvnitř kapky. Za vysoké teploty není k jádru kapky uhlíkového paliva přístup umožněn kyslíku ($\lambda = 0$). Emise pevných částic klesají při vyšším obsahu kyslíku ve spalovacím prostoru a při vyšší kvalitě rozprašování paliva.[1], [4], [10]

1.3 Opatření pro snížení emisí

Historicky první legislativní omezení produkce výfukových plynů u osobních vozidel bylo zavedeno ve státě Kalifornie v roce 1968. Dnes trendy jak legislativní, tak technické udávají Japonsko, evropské státy a USA.

1.3.1 Emisní předpisy

Na území Evropské unie (EU) existují dva paralelní legislativní systémy. První systém je povinný pro všechny členské státy EU. Dokumenty se nazývají směrnice EU a jsou označovány písmenem „e“ v kroužku.

Druhým systémem jsou předpisy Evropské hospodářské komise (EHK). Nejen předpisy, které se týkají emisí, jsou označovány značkou „E“. Schvalují je zástupci zainteresovaných států. Schválení a vydání zajišťuje OSN. EHK předpisy jsou dobrovolné pro jednotlivé země EU, které si stanovují termín a přijetí na základě svých možností.

Na základě těchto systémů se mohou státy Evropy dělit na:

- státy, které dobrovolně přejímají předpisy EHK,
- státy, které musí povinně plnit směrnice EU,
- státy, které zavedly přísnější emisní limity, než jsou dány legislativou EU.

V rámci EHK platí pro snížení emisí následující předpisy:

Předpis EHK 15 přijatý v ČR roku 1972 by nahrazen předpisem EHK 83 v roce 1989. Předpis obsahuje změny v limitech emisí CO, HC, NO_x pro vozidla kategorie M1 a N1 do 3,5 t celkové hmotnosti. Po revizi EHK 83.01 byl předpis doplněn o limity pevných částic vznikajících ve vznětovém motoru. Zkoušky podle předpisu EHK 83 se provádějí na válcové zkušebně, kde probíhá simulace jízdního cyklu souhrnně nazvaná NEDC (New European Driving Cycle). Emise jsou kumulovány do sběrných vaků po celou dobu trvání testu a výsledné koncentrace jsou uváděny v g/km.

Předpis EHK 49 obsahuje limity emisí CO, HC, NO_x a pevných částic pro vozidla kategorie M2, M3, N1, N2 (vozidla kategorie N1 lze homologovat jak podle EHK 83.01, tak podle EHK 49). Jsou zkoušeny tzv. třináctibodovým testem. Ten obsahuje 13 předem definovaných režimů motoru měřených pomocí dynamometru. Ve výsledcích je uveden poměr jednotlivých režimů na produkci emisí tzv. váhovým poměrem, který udává důležitost jednotlivých režimů testu.

Předpis EHK 24 limituje emise viditelných škodlivin neboli kouřivost. Omezuje vozidla všech kategorií (M1 až N3) pohaněných vznětovým motorem.

Předpisy EHK se postupem času mění a revidují. Revize mění, zpřísňují nebo rozšiřují limity složek emisí. Jsou známé pod názvem Euro, doplněným číslicí udávající pořadí předpisu. Euro I vyšlo v roce 1992 a od té doby jsou každých 4 až 5 let vydávány novější, jak udává tabulka 1.[4], [7]

Předpis	Rok zavedení	Druh motoru	CO g/km	HC + NO _x g/km	HC g/km	NO _x g/km	PM g/km
Euro I	1992	zážehový	2,72	0,97	-	-	-
		IDI		0,97			0,14
		DI		1,36			0,20
Euro II	1996	zážehový	2,20	0,50	-	-	-
		IDI	1,00	0,70			0,08
		DI	1,00	0,90			0,10
Euro III	2000	zážehový	2,30	-	0,20	0,15	-
		vznětový	0,64	0,56	-	0,50	0,05
Euro IV	2005	zážehový	1,00	-	0,10	0,80	-
		vznětový	0,50	0,30	-	0,25	0,025
Euro V	2009	zážehový	1,00	-	0,10	0,06	0,005
		vznětový	0,50	0,23	-	0,18	0,005
Euro VI	2015	zážehový	1,00	-	0,10	0,06	0,005
		vznětový	0,50	0,17	-	0,08	0,005

Tabulka. 1: Legislativně stanovené hodnoty limitů emisí[4]

1.3.2 Konstrukční opatření

Snížení emisí motoru lze docílit konstrukčním opatřením, která dělíme na 3 základní typy:

- Před motorem
- V motoru
- Za motorem

Změny se liší, jsou-li provedeny u motoru zážehového nebo vznětového. Hlavní důvody jsou rozdílnost paliv, rozdíly v konstrukci a množství přebytku kyslíku ve spalínách.[4]

1.3.2.1 Konstrukční opatření zážehového motoru

1.3.2.1.1 Před motorem

Směšovací poměr

Při volbě směšovacího poměru je možné snížit jen některé emise. Pro snížení emisí CO je určujícím faktorem množství kyslíku. V případě snížení λ ($\lambda < 1$) je ve směsi přítomno méně kyslíku, a tím dochází k nedokonalému spalování. Zároveň při velkém ochuzení směsi může dojít k vynechání zápalu, což vede ke zvýšení emisí HC.

V případě konstrukce zážehového motoru s nepřímým vstřikováním paliva je nutné pro dosažení co nejlepších hodnot dokonale rozprášit optimální dávku paliva se vzduchem, a docílit tak požadovaného součinitele λ . [1], [2], [4]

1.3.2.1.2 V motoru

Konstrukce spalovacího prostoru

Spalovací prostor obsahuje tzv. zhášecí zóny. Jsou to místa, která snižují teplotu směsi a zamezují jejímu prohoření. Tím se zvyšují emise HC.

Volbou kompaktnějšího spalovacího prostoru a snižování plochy zhášecích zón se emise HC snižují. [4]

Volba kompresního poměru

Kompresní poměr ovlivňuje teploty spalování. Tím dokáže působit na emise NO_x . Snižováním kompresního poměru dosahujeme nižších teplot, a tedy i nižších emisí NO_x . Při spalování stechiometrické směsi se snižuje i emise HC. Zvyšování kompresního poměru snižuje výkon, zhoršuje tepelnou účinnost, zvyšuje měrnou spotřebu paliva, a tím přispívá i k vyšším měrným emisím. [4]

Energie a předstih zážehu

Zvyšováním energie zápalu se zvyšuje jistota zapálení směsi. Tím se potlačuje vnik emisí HC.

Zmenšením úhlu předstihu zapalování pod optimální hodnotu dochází ke snížení termické účinnosti, zvýšení měrné spotřeby, snížení maximální teploty a zvýšení teploty výfukových plynů. Optimální úhel je volen v závislosti na vyloučení klepání motoru, na nízké spotřebě paliva, maximálním momentu motoru a nízkých emisích. Těchto podmínek nelze dosáhnout najednou a volí se kompromis. [4]

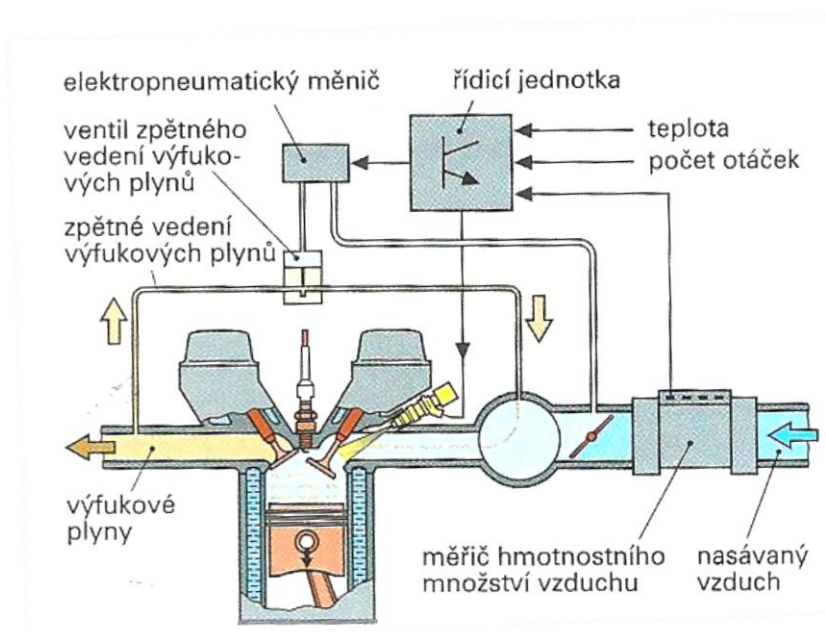
Recirkulace výfukových plynů

Využívá spaliny, které vstupují do procesu spalování jako inertní plyn a zároveň absorbují teplo. Tím snižují maximální teplotu hoření a dochází ke snížení emisí NO_x . Recirkulaci můžeme rozdělit na vnitřní a vnější.

Při pohybu pístu do horní úvratě při už otevřeném sacím ventilu dochází k promísení nasávaného vzduchu a spalin. Při pohybu pístu do dolní úvratě při ještě otevřeném

výfukovém ventilu dochází k nasátí spalín. Oba tyto procesy jsou závislé na překrytí sacího a výfukového ventilu. Velikost překrytí není možné zvyšovat libovolně, neboť se může zhoršit stabilita chodu motoru a vynechat zápal, a tím se zvýší emise HC. Nejvíce se překrytí projeví při volnoběžném chodu. Využívají se tedy minimálně dvoustavové režimy, při kterých se ve volnoběžných otáčkách překrytí blíží k nule, zatím co při jiných stavech se dosahuje hodnot blízkých optimálním.

Vnější recirkulace spočívá v propojení výfukového a sacího potrubí a množství přepuštěných spalín je regulováno ventilem označovaným jako EGR ventil. Ten je ovládán pod tlakem ze sání nebo elektronicky. Množství přepuštěných spalín se udává v % EGR (Exhaust Gas Recirculation). Vnější recirkulaci lze snížit emise NO_x o 50 až 60% a zároveň dochází ke zvýšení emisí HC. V rozmezí 10 až 15% spaliny nemají vliv na spotřebu paliva.[1], [4]



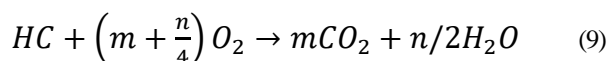
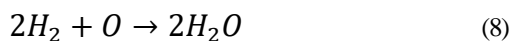
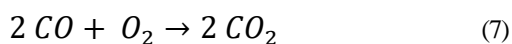
Obrázek. 1: Vnější recirkulace spalín[8]

1.3.2.1.3 Za motorem

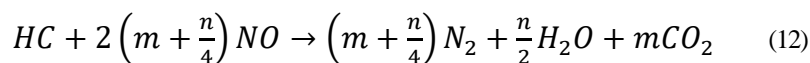
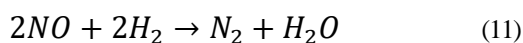
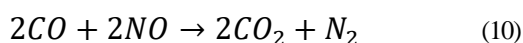
Úpravami spalovacího prostoru a nastavením parametrů spalování nelze odstranit emise do té míry, ve které jsou požadovány emisními předpisy v mnoha vyspělých zemích. Proto je nutné do konstrukce přidat zařízení na úpravu spalín. Pro mnoho systémů je nutný snímač λ -sonda, který zjišťuje množství kyslíku ve spalínách a určuje, zda směs ve válci je nebo byla bohatá, chudá nebo stechiometrická. Podle směsi se pak určuje, jaká chemická reakce může proběhnout.[2], [4], [6]

Chemické reakce jsou rozdělovány do dvou druhů:

- Oxidace

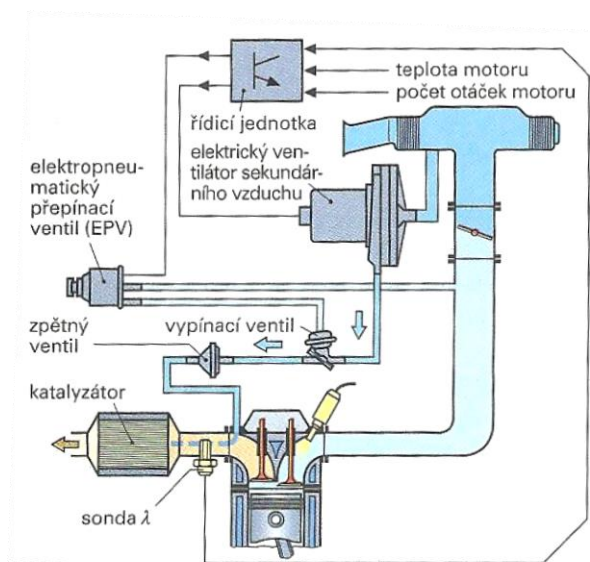


- Redukce



System přidávání sekundárního vzduchu

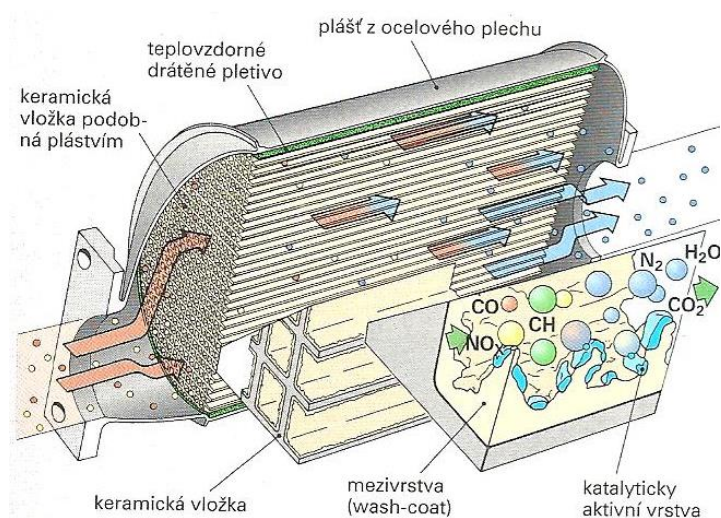
Při spalování bohaté směsi jsou výfukové plyny chudé na kyslík a mají vysokou teplotu. Pro dodatečné spálení emisí HC a CO je do výfukového potrubí přiváděn sekundární vzduch. Ke spalování dochází v případě, že je teplota výfukových plynů vyšší než 600 °C. K dodávání vzduchu se využívá elektromagnetický ventil nebo čerpadlo sekundárního vzduchu. System je využíván pro některé motory s vícebodovým vstřikováním.[2], [4], [8]



Obrázek. 2: System sekundárního vzduchu[8]

System oxidace-redukce katalyzatoru

Nazyva se take tricestny katalyzator a označuje se TWC (Three Way Catalyst). Jako katalyzator se označuje látka, která zajisti nebo urychluje reakci bez toho, aby do ni vstupovala. U tricestneho katalyzatoru se pouziva keramika nebo vzacne kovy, jako je platina, rhodium a palladium. Pričemz palladium a platina podporuji oxidacni reakci a rhodium reakci redukni. Aktivni vrstva pokrývající nosnou část dosahuje velké plochy pomoci velkého množství kanálků a zvrásnění povrchu.



Obrázek. 3: Konstrukce oxidace-redukce katalyzatoru[4],[8]

Pokud mají být odstraněny všechny tři složky emisí (CO, HC, NO_x) tak se spálená směs musí pohybovat co nejbliže stechiometrické ($\lambda=1$). Tím je zajištěn dostatečný obsah kyslíku pro oxidacni reakce a obsah HC a CO pro redukni reakce.

Pro svou činnost potrebuje katalyzator dosáhnout teploty mezi 250 až 800 °C. Doba zahřátí na účinnou teplotu je přibližně 30 až 90 sekund po startu. V době náběhu (teploty nižší než 600°C) dochází ke zvýšenému zanášení. V případě vyšších teplot (> 800 °C) může dojít k termickému stárnutí vrstev, a tedy ke snižování jeho životnosti.[4], [9]

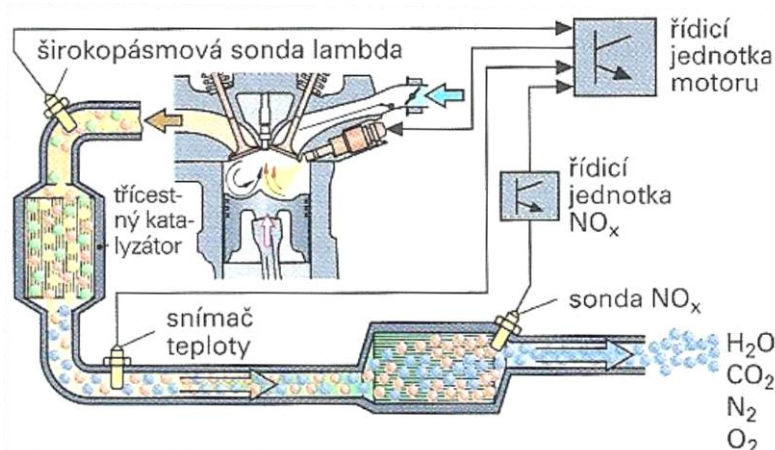
Vysoký vliv na účinnost má i umístění katalyzatoru vůči spalovacímu prostoru. Pokud je blízko, snižuje se doba náběhu, ale později může dosáhnout vysokých teplot, a snižovat se tak jeho životnost. Další způsob je umístit katalyzator dál od spalovacího prostoru a využít cizí zdroj k zahřátí. Tím se zvyšuje životnost a nedochází k velkému rozdílu doby náběhu jako v případě nevyužití cizího zdroje.

Selektivní katalyzátor

Zatímco u třístného katalyzátoru je spalovaná směs upravovaná na stechiometrickou směs, je selektivní katalyzátor (označovaný DeNO_x) schopný pracovat účinně i při chudé směsi. Je toho docíleno přidáním iridia nebo oxidů hliníku místo rhodia do aktivní vrstvy. Iridium je schopno pracovat s vyšší účinností (koeficientem přeměny) než rhodium. Reakci podporují nespálené složky HC a CO. Toho je dosaženo při akceleraci, snížením předstihu nebo zvýšením vstřiku paliva. Tato metoda je citlivá na obsah síry v palivu.[4]

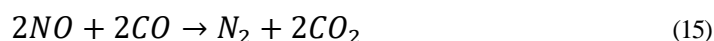
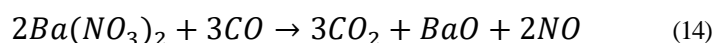
Sběrný katalyzátor NO_x

Při spalování chudé směsi ($\lambda > 1$) u motoru s přímým vstřikem vzniká vysoký obsah emisí NO_x, které třístný katalyzátor není schopen účinně odstranit důvodů uvedených výše. Proto je za něj zapojen sběrný katalyzátor a pracuje stejně jako třístný katalyzátor při $\lambda = 1$. V režimu chudé směsi se NO_x váží na oxidy barya, a vytvářejí se tak dusičnany barya. Jelikož má katalyzátor omezenou kapacitu, musí se každých 30 až 60 sekund regenerovat.



Obrázek. 4: Umístění sběrného katalyzátoru NO_x[8]

Do režimu regenerace se řídicí jednotka přepne na základě signálu čidla NO_x umístěného ve sběrném katalyzátoru. Režim upraví směs na bohatou po dobu 1 až 2 sekund a redukčními reakcemi „vyprázdní“ absorpční vrstvu. Dochází tak ke zvýšení spotřeby paliva (přibližně o 2 %) a oproti selektivnímu katalyzátoru je účinnější (až o 90 %), ale je také náchylnější na obsah síry v palivu, která ničí absorpční vrstvu.[2]



1.3.2.2 Konstrukční opatření vznětového motoru

1.3.2.2.1 Před motorem

Úpravy sání se provádějí hlavně z hlediska proudění, aby bylo docíleno co nejkratší doby promísení vzduchu se vstříkovaným palivem a optimální hoření paliva. Důležitost těchto úprav je tím vyšší, čím nižší jsou energie vstříkovaného paliva, počet vstříkovacích otvorů a nižší plnicí tlaky (atmosféricky plněné motory).

Účinnost lze zlepšit různými stupni přeplnění a zařazením mezichladiče nasávaného vzduchu. Při přeplňování dochází k zahřátí vzduchu a snížení jeho hustoty. Toto chlazení má za následek zvýšení výkonu, snížení teploty pracovního cyklu. Tím se snižují emise NO_x . [4]

1.3.2.2.2 U motoru

Tlak vstříkovaného paliva

Vznětové motory využívají vstříkování paliva přímo do spalovacího prostoru. Doba promísení paliva je tedy kratší než u motorů zážehových s nepřímým vstříkem. Vznětový motor také pracuje v oblasti vyšších tlaků, a jsou tedy nutné i vyšší vstříkovací tlaky. Pokud jsou zvyšovány vstříkovací tlaky, zvyšuje se promísení paliva, snižuje se velikost kapek paliva, a tím se snižuje produkce pevných částic. [8]

Vstříkovací zařízení

Tvar trysky vstříkovače může být otevřený (není uzavírán jehlou) nebo uzavřený (jehla uzavírá otvor). Uzavřený tvar snižuje škodný prostor a dostřík. Tím je možné snížit emise HC až o 75 %.

Množství a velikost vstříkovacích otvorů trysky přímo ovlivňuje promísení a spotřebu paliva.

Rozdělení dávky paliva do více menších dávek, předvstříku a dostříku nabízí přesnější dávkování paliva, lepší časování, a tedy i vyšší účinnost. Tím se snižují emise HC a NO_x . Například u piezoelektrických vstříkovačů inline dochází k úspoře paliva o 3 %, ale ke snížení emisí o 20 % oproti vstříkovačům PD (Pumpdüse). [8], [4]

Úhel předvstříku

Ovlivňuje nárůst tlaku ve spalovacím prostoru. Pokud je nastaven na optimální hodnotu, tak dochází k lepšímu prohoření paliva, a tím ke snížení emisí HC a pevných částic.

Vnější recirkulace

Vznětové motory převážně pracují s chudou směsí, tudíž produkují vysoké množství emisí NO_x . Proto jsou vnější recirkulací (sací potrubí je spojeno přepouštěcím kanálem s výfukovým) nasávány spaliny. Obdobně jako u zážehových motorů. Rozdíly jsou v míře recirkulace. Vznětové motory recirkulují při volnoběžných otáčkách až 50 % vzduchu. Tím nahrazují nadbytečné množství kyslíku. Zvyšování množství recirkulovaného vzduchu je limitováno směšovací poměrem na hranici kouřivosti. Nemůžeme tedy recirkulovat při plném zatížení, kde je produkce emisí NO_x nejvyšší.[1], [2], [4], [9]

1.3.2.2.3 Za motorem

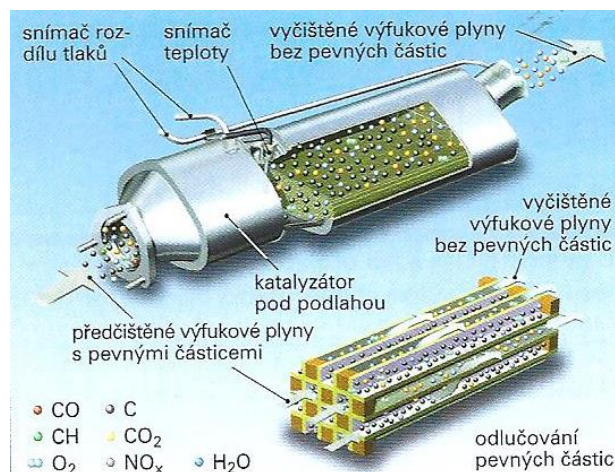
Vznětový motor může pracovat pouze s přebytkem vzduchu, a tedy využívat pouze oxidační reakce. To sice snižuje emise HC a CO, ale na snížení emisí NO_x a PM musí být použita jiná zařízení.

Oxidační katalyzátor

Jak je výše zmíněno, katalyzátor využívá pouze oxidační reakce. Dochází tak k reakcím vyvolaných vzácnými kovy (palladium a platina). Získání co nejvyšší účinnosti je dosahováno co největší aktivní plochou nanesenou na keramický monolit nebo na kovové články.[2], [4], [9]

Filtr pevných částic

Ke snížení obsahu PM ve výfukových plynech se používá filtr, který fyzicky zachytává částice. Částice se chytají na porézní strukturu z oxidu křemíku. Ta je po určité době naplněna a je nutné ji regenerovat.



Obrázek 5: Konstrukce filtru pevných částic[8]

Regenerace probíhá spalováním zachycených částic uhlíku. Teplota pro počátek regenerace je 550 °C výfukových plynů ve filtru. Za normálního režimu se těchto teplot nedosahuje. Existují dvě řešení, jak těchto teplot docílit. První je využití systému Common-Rail, který umožní dostřik paliva. To je spalováno ve výfukovém potrubí, a zvýší tak teplotu spalin o 200 až 250 °C. Za oxidačním katalyzátorem dochází k dalšímu hoření nespáleného paliva z dostřiku. Tím se zvýší teplota výfukových plynů o dalších 100 °C.

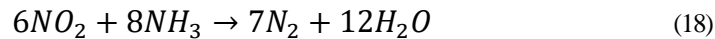
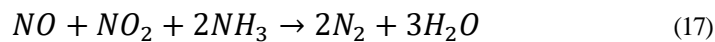
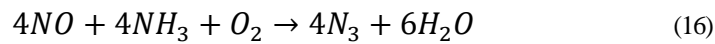
Druhým řešením je přidání aditiva (Eolys) do paliva. To sníží limitní teplotu spalování PM na 450 °C.

Regenerace se rozděluje na dva druhy:

- Pasivní regenerace, která probíhá bez zásahu řídicí jednotky do dodatečného vstřiku paliva. Dochází k tomu při vysokém zatížení (jízda na dálnici).
- Aktivní regenerace spaluje PM po zásahu řídicí jednotky do řízení motoru. Dochází k tomu po 400 až 500 kilometrech a trvá 2 až 3 minuty. Určující veličinou je signál snímače diferenčního tlaku, který snímá tlak před a za filtrem. Určuje tak procento zanesení.[1], [4], [8]

Selektivní katalytická redukce

Pro snížení emisí NO_x se vstřikuje amoniak (od firmy Scania) nebo roztok močoviny a vody (adBlue od firmy Bosch) do výfukových plynů. Tím se hydrolýzou vytváří ve výfukovém potrubí redukční činidlo. Roztok je vstřikován proti proudu spalin, a dojde tak k promísení. V případě firmy Bosch se používá selektivní redukční (SCR) katalyzátor, na kterém dochází k reakci oxidu dusíku a amoniaku.[1]



Může být docíleno až 85 % snížení NO_x a asi 40 % snížení emisí. AdBlue se skládá z 32,5 % močoviny a 67,5 % vody.[1], [4]

2 Diagnostika a měření emisí

2.1 Druhy analyzátorů

2.1.1 Absorpce infračerveného záření (NDIR)

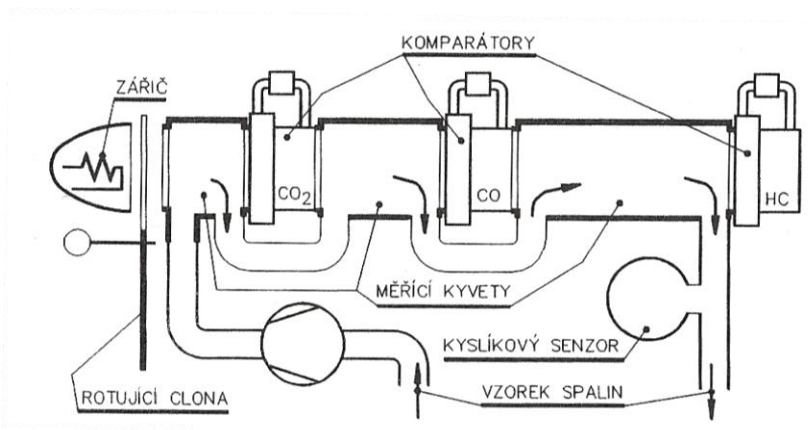
Metoda absorpce infračerveného záření se označuje NDIRA (Non Dispersive Infrared Analyser) někdy jen NDIR, a využívá skutečnost, že při průchodu elektromagnetického záření vrstvou plynu je část energie pohlcena. Každý plyn pak pohltí individuální vlnovou délku záření.

Konstrukce využívá elektromagnetický zářič, který skrze měřicí a srovnávací kyvetu svítí na komparátor. Zatímco měřicí kyveta je proplachována měřenými plyny, má srovnávací kyveta stálou náplň plynu, který záření nepohlcuje. V komparátoru je fyzicky rozdělen na dvě komory, mezi nimiž je membrána potažená kovovou mřížkou, která tvoří jednu desku kondenzátoru. Komory jsou naplněny měřeným plynem. Ten absorbuje záření o vlnové délce vlastní měřenému plynem, a tím dochází ke změně teploty, která pohybuje membránou. Aby vlivem stálého osvětlování komparátoru nedocházelo k dosažení rovnovážného stavu mezi přívodem energie a ztrátám ze sdílení tepla, je mezi zářič a kyvetu umístěna rotující clona. Tím se stává průběh teplot periodický, a tedy amplituda teplot je úměrná koncentraci měřeného plynu.

Při měření může nastat problém, jestliže se špičky amplitudy jednotlivých složek plynů překryjí. Například při měření CO bude měření ovlivněno přítomností CO₂. Lze to odstranit filtrační kyvetou zařazenou mezi clonu a kyvetu. Ta je naplněna „rušícím“ plynem, který odfiltruje interferenční vlnové délky.[6]

Metoda NDIR se dnes standardně konstruuje s měřicími kyvetami o různé délce a komparátory umístěnými za sebou. Využívá se tak pro měření více složek plynu při jednom

měření. Měřené složky jsou CO, CO₂ a HC. U emisí HC se využívá pouze pro měření celkových koncentrací.[6], [5]

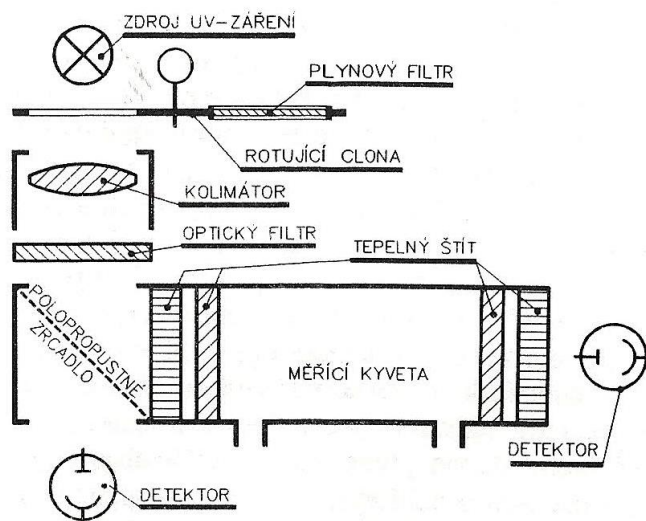


Obrázek 6: Metoda NDIR s kyvetami uspořádanými za sebou[6]

2.1.2 Absorpce ultrafialového záření

Zdrojem záření je plynová výbojka s dutou katodou, za kterou je umístěna rotující clona. Clona zajišťuje časovou modulaci a je vybavena plynovým filtrem. Volbou náplně výbojky a filtru lze měnit měřené složky. Záření z výbojky usměrněné optickým filtrem se částečně odrazí a částečně prochází polopropustným zrcadlem. Odražené záření prochází měřící kyvetou, ve které je částečně pohlceno a dopadá na jeden ze dvou detektorů (fotonásobič). Záření, které prošlo zrcadlem, dopadá kontinuálně na druhý detektor. Rozdíl dopadajících záření generuje napětí mezi detektory, které je lineárně úměrné funkci koncentrace měřené složky plynu.

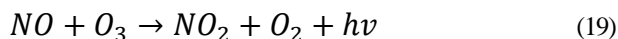
Tato metoda se využívá pro měření koncentrací oxidů dusíku a je méně rozšířená než metoda CLA (viz kap. 2.1.3). Hlavním důvodem jsou vyšší náklady na provoz způsobené spotřebou náplně plynové výbojky.[6]



Obrázek 7: Uspořádání měřidla pro metodu absorpce ultrafialového záření [6]

2.1.3 Chemická luminiscence (CLA)

Metoda je označována CLA (ChemiLuminiscent Analyser) a využívá jev, že při některých chemických reakcích dochází k emisím specifických energetických kvant (fotonů). Reakce probíhá v reaktoru a měří se s ní koncentrace oxidů dusíku.



hv energetické kvantum

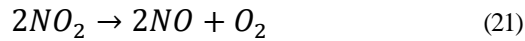
h Planckova konstanta

ν frekvence

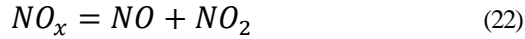
Emise jsou snímány fotonásobičem. Výstupní signál je úměrný množství dopadajících kvant a je zpracováván elektronikou přístroje. Touto metodou lze měřit pouze koncentrace NO. Ozon nutný pro reakci se vyrábí odděleně v ozonizátoru, který předchází reaktoru. Děje se tak za působení vysokonapěťového elektrostatického pole na molekuly kyslíku.



Pro měření emisí NO_x (celkové množství oxidů dusíku) musí být pozměněn průtok měřených plynů tak, že proudí do vyhřívaného katalytického reaktoru, ve kterém dochází k redukci oxidu dusičitého na oxid dusnatý.



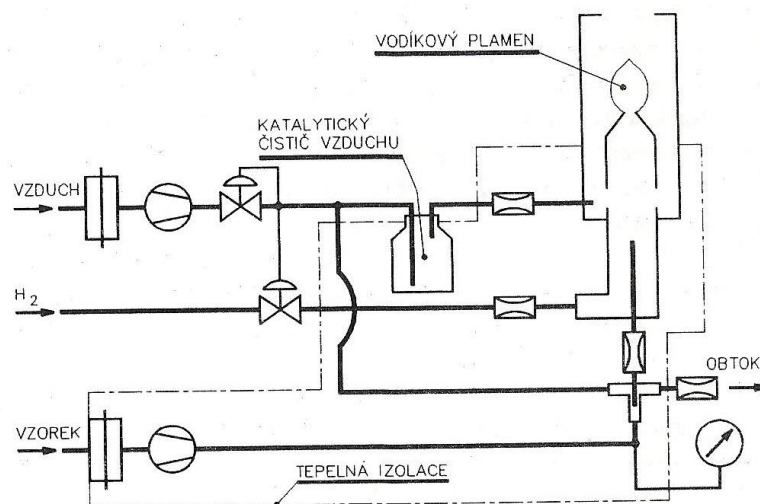
Koncentraci oxidu dusičitého zjistíme z rozdílu naměřených koncentrací oxidů dusíku.



Citlivost této metody je vhodná jak pro měření emisí, tak pro měření imisí.[5], [6]

2.1.4 Změna elektrické vodivosti vodíkového plamene (FID)

Princip analyzátoru je nazýván plamenoionizační (FID – Flame Ionization Detector). Přivedením elektrického potenciálu na vodíkovo-vzduchový plamen se vytváří velmi malý proud iontů. Přidáním uhlíku, který je organicky vázán, do oblasti proudu iontů narůstá úměrně průtočné množství iontů. Metoda je vhodná pro měření koncentrace emisí HC, ale je částečně citlivá na množství O_2 . Je tedy nutné udržovat podmínky v optimálních hodnotách (teplota plamene, tlak přivedeného vzduchu a vodíku, tvar plamene, zdroj vzduchu atd.).



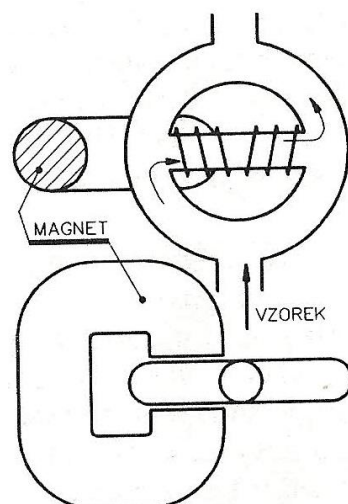
Obrázek 8: Schéma analyzátoru FID[6]

Proud iontů je snímán dvojicí elektrod, přičemž jedna bývá zpravidla tvořena samotným tělesem hořáku a druhá drátem rovného, spirálového nebo trubkového tvaru. Proud iontů vzniká pouze v určité oblasti, a proto je velmi důležité přesně umístit druhou elektrodu do této oblasti.

2.1.5 Měření magnetických vlastností

Princip magnetické metody je založen na skutečnosti, že kyslík má z plynů nejvyšší permoabilitu, a proto je tato metoda využívána pro jeho měření. Látky s vysokou permoabilitou jsou vtahovány do magnetického pole.

Nutnou konstrukční součástí je přítomnost permanentního magnetu nebo elektromagnetu.



Obrázek 9: Konstrukce magnetického analyzátoru[6]

Z obrázku 9 je vidět, že na příčném kanálu jsou umístěna dvě odporová vinutí s vysokým koeficientem odporu. Kyslík, který je vtahován magnetickým polem z levého kanálu prstence, zvyšuje svou teplotu, tím snižuje svůj magnetismus a je vytlačován přísunem studeného kyslíku (magnetický vítr). Vlivem strhávání okolními nemagnetickými molekulami se vytvoří stabilní průtok příčným kanálem. Levé vinutí je více ochlazováno (vlivem proudu vzduchu) než pravé (magnetický vítr je už zahřátý). Rozdíl teplot vinutí je úměrný koncentraci kyslíku v měřeném plynu. Při předávání tepla mezi plynem a vinutím je důležitá tepelná vodivost. Ta je závislá na koncentraci dalších složek plynu, zejména CO_2 .

2.1.6 Měření kouřivosti

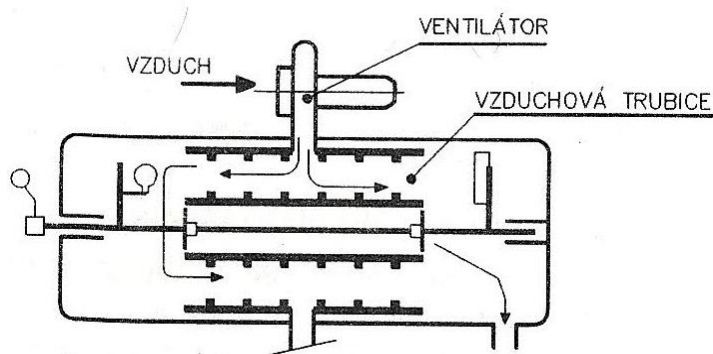
Pomocí pístu o definovaných rozměrech je přes čistý filtrační papír nasát vzduch z výfukového potrubí. Píst vykoná pouze 1 zdvih rychlostí, již určuje pružina, která působí na píst, a určuje tak množství nasátého vzorku plynů. Kontaminace papírku je vyhodnocována fotometrem citlivým na množství odraženého světla od povrchu papírku. Výsledná hodnota se nazývá stupeň zčernání a udává se v °Bosch nebo je uváděna názvem veličiny. Nepřesnost metody by mohla být způsobena působením podložky papírku na

odrazivost. Ta je eliminována podložením kontaminovaného papírku 5 vrstvami čistých papírků, kterými je také nastavována nulová hodnota.[6]

2.1.7 Opacimetrie

Princip opacimetrie spočívá v prosvícení výfukových plynů viditelným světlem. Měření je podíl světla dopadajícího na fotonku a vyzářeného zdrojem. Konstrukce přístroje musí mít vyřešeny problémy se zanášením zdroje světla a fotonky, teplotou plynů a udržení tlaku v optimálních hodnotách.

Příkladem takového řešení může být přístroj HARTRIDGE. Pomocí pákového mechanismu odstraňuje zdroj a fotonku z proudu výfukových plynů. Vybavením přístroje škrticí klapkou do výfukové větve je zamezeno poklesu tlaku pod minimální hodnotu a otevření pojistného ventilu určuje tlak maximální.[6]



Obrázek 10: Schéma opacimetru[5]

2.1.8 Přímé měření hmotnosti

Gravimetrické měření obsahu pevných částic spočívá ve zvážení čistého filtračního elementu. Ten je následně instalován do držáku a po celou dobu měření jím prochází část spalin. Po ukončení měření je filtrační element opět zvážen. Hmotnostní koncentrace částic se stanoví jako podíl hmotnosti zachycených částí a objemu vzduchu proteklého elementem.

$$C_{M,PE} = \frac{M_2 - M_1}{V_{VZOR}} \quad (23)$$

$C_{M,PE}$	hmotnostní koncentrace
M_1, M_2	hmotnost nového, resp. kontaminovaného filtru
V_{VZOR}	objem prosátého množství spalin

Tato metoda má význam, pokud se podaří simulovat podmínky pro kondenzaci různých složek uhlovodíků a jejich ukládání na částicích sazí. Z toho důvodu se výfukové plyny ředí vzduchem dávkovaným dmychadlem měřiče.

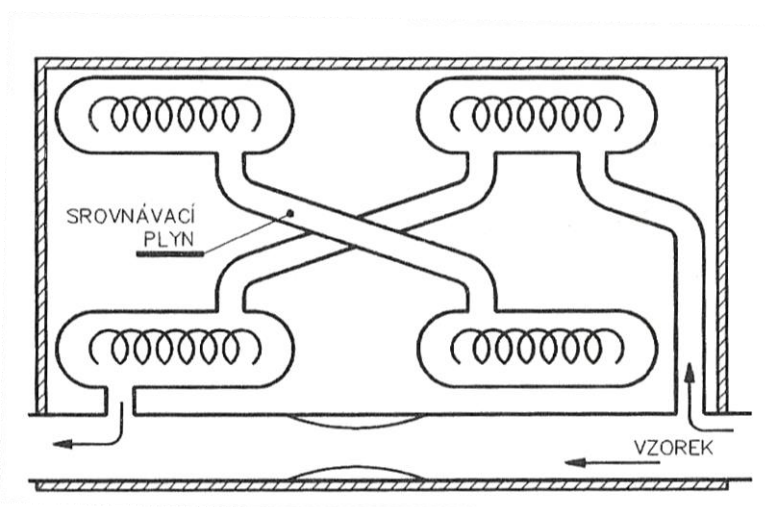
Z důvodu snížení množství vzduchu k dostatečnému zředění spalin se zavedlo uspořádání s dvojitým ředěním. První ředění nedosahuje požadovaných poměrů. Z primárně zředěných plynů je odebráno malé množství k sekundárnímu ředění, které dosahuje specifikovaných poměrů.

Při snaze zachování specifikovaných poměrů a zároveň snížení nákladů na provoz byla vyvinuta konstrukce s minutunelem. Z výfukového potrubí jsou odebírány 2 až 4% spalin, které jsou přiváděny do minutunelu. V minutunelu jsou pomocí dmychadla na vstupu a výstupu nastaveny parametry charakterizující rychlost spalin v plném průřezu. Tím se docílí specifikovaných poměrů.[6]

2.1.9 Ostatní metody

- Princip tepelné vodivosti

Do obdélníkového tvaru těla termostatu jsou umístěny 4 odporové spirály. Diagonálně je kanály propojena vždy jen dvojice spirál. Jedna dvojice je omývána vzorkem výfukových plynů a druhá dvojice je vložena a umístěna do porovnávacího plynu. Odporové spirály mají topnou funkci a funkci odporových teploměrů. Napětí, které vzniká na diagonále zapojeného můstku, je závislé na poměru tepelných vodivostí porovnávacího plynu a analyzovaného vzorku. Výběrem srovnávacího plynu lze zjistit obsah složek vzorku. Pravděpodobně jedinou výhodou této metody je nízká cena přístroje.[2], [6]



Obrázek 11: Analyzátor pro měření tepelné vodivosti[6]

- Elektrochemický převodník

Princip práce převodníku je stejný jako elektrochemický článek. Výkon převodníku je úměrný množství kyslíku ve vzorku plynu. Tím je vhodný pro určování obsahu kyslíku ve spalinách. Nízká životnost a špatná zjistitelnost dožívání pak může znehodnotit celé série měření. Proto někteří výrobci používají doplňková měřidla k λ -sondě.[2], [6]

2.1.10 Servisní analyzátory

Analyzátory, které jsou používány v provozu nebo v servisech, se od analyzátorů v odst. 2.1 liší vyšší robustností, menšími rozměry, nižšími nároky na kvalifikaci obsluhy a nižší cenou. Tyto změny mají vliv na nižší přesnost výsledků, menší rozsah měření a nižší rozlišovací schopnosti. Obecně jsou využívány koncentrace plynů pro diagnostiku spalovacího motoru.

Vícesložkový infraanalyzátor

Velmi rozšířeným servisním analyzátozem je vícesložkový infraanalyzátor. V konstrukci analyzátoru je využíván spojitý zářič, neselektivní detektor a kmitající clona osazená filtry. Filtry na cloně je zajišťující selektivitu. Ze získaného signálu je určována koncentrace CO, CO₂ a HC. Pro koncentraci O₂ je používá elektrochemické čidlo umístěné v měřící kyvetě.

NDIRA

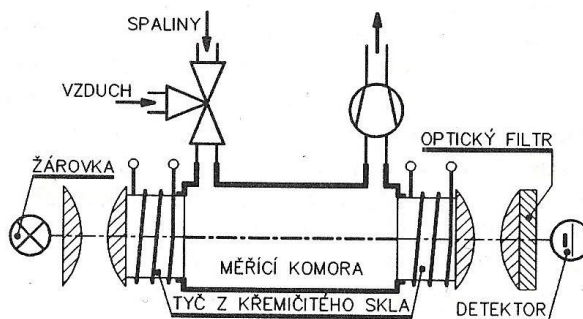
Konstrukce analyzátoru využívá řazení komparátorů a měřících kyvet za sebou. Komparátory blíže ke zdroji záření slouží jako interferenční filtry. Tloušťka absorbující vrstvy komparátoru pro jednotlivé složky je součet délky všech kyvet, které jsou v dráze paprsku před daným komparátorem.

Analyzátor se využívá pro určování hodnot CO, CO₂, HC a O₂. Vnitřním procesorem je dopočítávána hodnota λ a pro korekci naměřených hodnot je dopočítávána CO_{cor}. Hodnota CO_{cor} eliminuje případnou netěsnost sacího potrubí.

Servisní opacimetr

U provozních opacimetrů je kladen důraz na snadnou manipulaci při přípravě měření (zavedení sondy do výfukového systému) a měření (vnitřní procesory a vybavení otáčkoměrem pro udržení otáček v požadovaném rozmezí hodnot). Rozdíl oproti konstrukci v odst. 2.1 spočívá ve vybavení dmyhadla pro zajištění stálého průtoku spalin. Umístění

vyhříváných křemičitých skel do dráhy paprsku na obě strany měřicí komory zabraňuje usazování pevných částic do dráhy paprsku halogenového zdroje záření. Spektrální citlivost je dosahována optickým filtrem umístěným před detektor.



Obrázek 12: Servisní opacimetr[6]

3 Mobilní analyzátořy PEMS

Měření emisí v provozu musí splňovat určité požadavky, aby byla dosažena přesnost dat. Charakteristické pro měření je umístění měřicího přístroje uvnitř automobilu nezávisle na jeho poloze, včetně všeho příslušenství (hadice, kabely, sondy).

Za jízdy je zařízení vystavené vlivům, které znemožňují některé metody měření spotřeby paliva (gravitační), průtok vzduchu, vystavení zařízení vibracím a zrychlení. Například firma AVL umístila měřidla do odpruženého rámu, vybaveného chladícím zařízením a vnitřním vyhříváním. Chlazení nejenže zabraňuje znehodnocení, ale i zvětšuje rozsah měření. Vnitřní vyhřívání umožňuje měřit jak při nízkých teplotách, tak při studených startech. Obdobné řešení má i výrobce SEMTECH, který doplňuje svá zařízení o odlučovač vlhkosti a prachu. Pokud je zařízení takto řešeno, jeho rozměry už přestávají být zanedbatelné.

Největší vliv na rozměry vozidla mají využívané metody měření emisí (viz odst. 2.1). Zatím co metoda NDIR nebo UV jsou prostorově nenáročné, metoda FID pro svou funkci potřebuje nádrž s vodíkem a přívod vzduchu. Tím rozměry zařízení narůstají.

Menší zařízení lze umístit na zadní sedadlo spolujezdce. Zařízení s většími rozměry je nutné dát do zavazadlového prostoru nebo na více zadních sedadel. Upevnění zařízení musí být spojené s vozidlem tak, aby nedošlo k jeho posunu a následné poruše nebo přerušení vedení a znehodnocení dat.

Výběr měřících metod pak určuje přesnost měření. Například při měření průtoku vzduchu může být umístěn průtokoměr ve výfukovém potrubí. Tím je přesně zjištěn průtok měřených

spalin. Při umístění průtokoměru do sacího potrubí nebo využívání signálu snímače polohy klapky sacího potrubí může být metoda nepřesná. Nepřesnosti vytvářejí systémy obohacení směsi odvětráváním nádrže, vnější recirkulace nebo nasávání sekundárního vzduchu. Metody s průtokoměrem umístěným v sacím potrubí pracují na předpokladu založeném na rovnici kontinuity.[20], [21]

4 Palubní diagnostika (EOBD)

U moderních spalovacích motorů se v USA pro kontrolu složení emisí výfukových plynů vyvinul systém OBD (On-board diagnostics). Hlavní funkce:

- snižovat obsah emisí po celou dobu provozu,
- zjistit a zaznamenávat závady na systémech ovlivňující emise,
- optimalizovat chod motoru,
- upozornit řidiče na závadu kontrolkou MIL (Malfunction indicator light).

Nástupcem systému OBD se stal systém OBD II, který standardizuje obsazení pinů, umístění zásuvky, komunikační protokoly, strukturu kódů závad, označení jednotlivých komponentů (snímače, akční členy) a jejich průběžné testy.

Na území EU byla zavedena modifikovaná verze OBD II pod názvem EOBD (Euro on-board diagnose), která vyhovuje přísnějším emisním předpisům. Zavedena byla postupně směrnicí 98/69/ES, která určuje povinné vybavení vozidel se zážehovými motory od roku 2000, auta se vznětovými motory od roku 2003 a pro motory na LPG a CNG od roku 2007.[2], [5], [6], [8]

4.1 Konstrukce a provedení

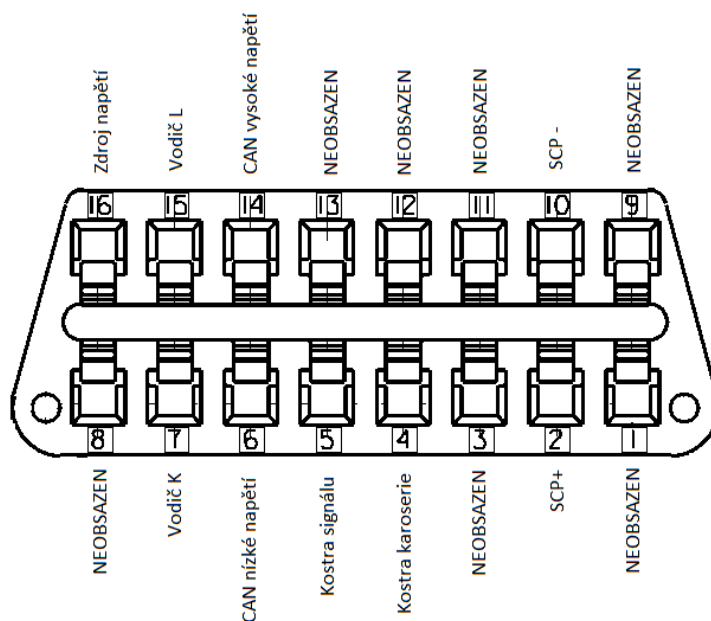
EOBD za pomoci snímačů získává fyzikální veličiny, které porovnává s hodnotami uloženými v paměti řídicí jednotky. Pokud řídicí jednotka vyhodnotí, že nastala závada, uloží kód závady do paměti a informuje řidiče kontrolkou MIL.[2], [6], [8]

Diagnostická přípojka

Diagnostická přípojka EOBD umožňuje provedení kontroly úřadům (policii), které mohou číst data relevantní pro emise a bezpečnost provozu a zda vozidlo neporušuje limity a technické parametry stanovené legislativou. Zároveň je využívána pro servisní a měřicí účely. To zajišťují PID (Parameter IDs) data, která musí být interpretovatelná zkušebním testerem, a to je:

- aktuální stav monitorovaného komponentu,
- aktuální data ze snímačů,
- aktuální stav akčních členů,
- vypočítané diagnostické hodnoty za snímačů.

Standardizovaná 16pinová diagnostická přípojka musí být umístěna v dosažitelné vzdálenosti od sedadla řidiče. Funkce jednotlivých pinů je označena na obrázku 13.[5], [7], [8]



Obrázek 13: Obsazení 16pinové diagnostické přípojky[7]

Chybové kódy

V případě závady je uložen chybový kód závady ve standardizovaném tvaru 5 znaků uvedený v tabulce 2.[7]

první pozice		druhá pozice		třetí pozice	čtvrtá a pátá pozice	
P	Motor (Powertrain)	0	Generický kód (jednotné pro všechny výrobce)	1	Příprava směsi/sekundární vzduch	01-99 odentifikace podsystému
B	Karoserie (Body)	1	Chybový kód výrobce (ne zcela jednotný)	2	vstřikování	
C	Podvozek (Chassis)	2	Chybový kód výrobce (Každý výrobce vlastní)	3	zapalování	
U	Komunikace (Unfinid/Network)	3	Rezervované chybové kódy	4	přídavná regulace směsi	
				5	řízení volnoběhu a rychlosti	
				6	vstupní a výstupní signály/řídící jednotka	
				7	převodovka	
				8	převodovka	
				0	systém celkové	

Tabulka 2: Význam standardizovaného zápisu chybových kódů[7]

5 Standardní metody měření emisí

Hodnoty emisí určují schvalování automobilů již od roku 1966, kdy v USA ve státě Kalifornie byl zaveden cyklus nazývaný Cal. 1966. Upravená a přísnější verze byla zavedena v Evropě roku 1971 předpisem EHK R15. Vývoj legislativních předpisů je zřejmý z odst. 1.3.1. V průběhu času byly zpřísnovány homologační a emisní zkoušky. Rozdíl mezi zkouškami vytvářejí nejen legislativní předpisy, ale i limity emisí, metodiky měření, přesnost měření, pořizovací a provozní náklady, technická úroveň měřicí techniky a statutární zajištění.[6]

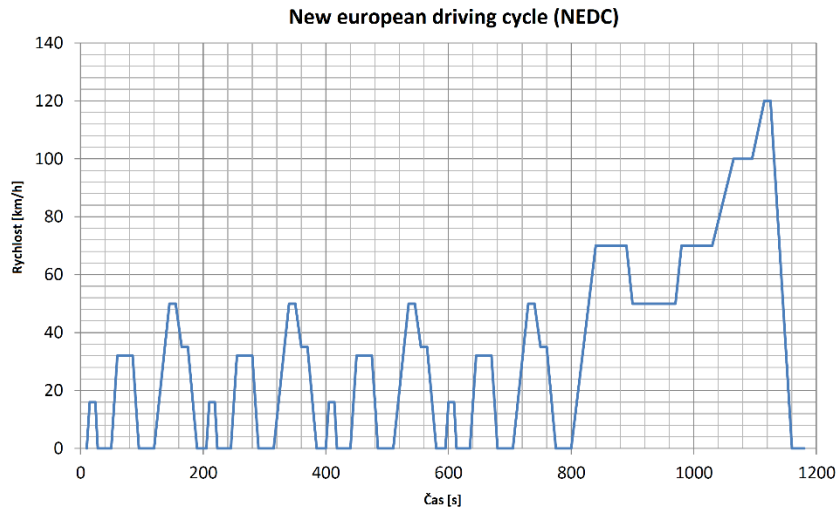
5.1 Homologační zkoušky

Cílem homologačních zkoušek je schvalování nových nebo prvně uvedených vozidel do provozu.

Homologace vozidel do 3,5 t

Homologační zkoušky se skládají z jednotlivých cyklů, kterými mají být simulovány jízdy v různých jízdních režimech a prostředích. Dnes využívaný cyklus se nazývá New european driving cycle (NEDC). Skládá se ze 4 základních městských cyklů Urban driving cycle

(UDC) a jednoho mimoměstského Extra urban driving cycle (EUDC) měřeného na řízeném dynamometru. Zkouška se provádí na studeném motoru temperovaném na teplotu 20 až 30 °C. Stanovení je kumulativní (sběrný vak) a přepočítává se na g/km.[4], [8]

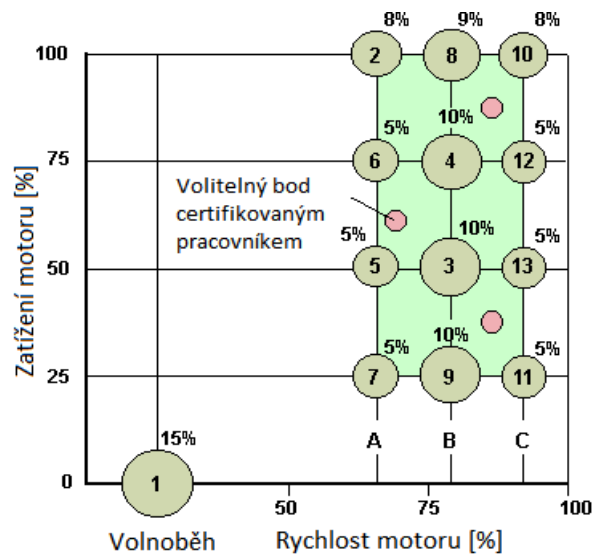


Graf 2: Nový evropský jízdní cyklus (NEDC)[4], [6]

Homologace vozidel nad 3,5 t

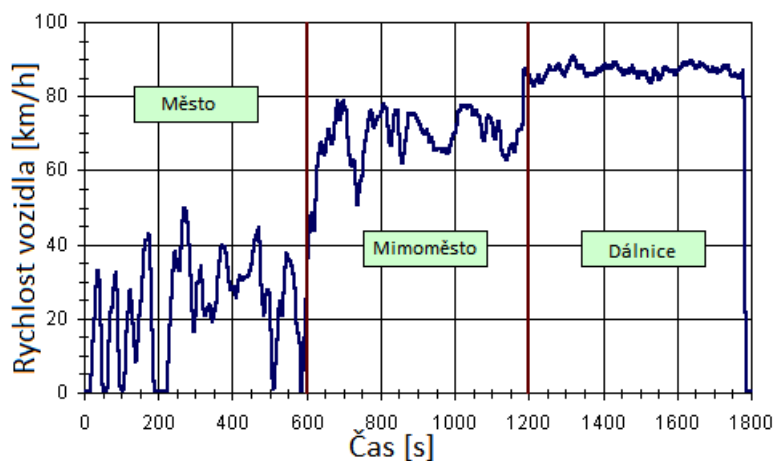
Pro tuto skupinu jsou využívány testy European stationary cycle (ESC), European load response (ELR) a test European transient cycle (ETC).

Test ESC spočívá ve zkoušení samotného motoru umístěného na zkušebním stanovišti. Základem je zatěžování motoru 13 předepsanými režimy otáček a zatížení. Každý režim má přiřazenou procentuální důležitost (váhu) zohledňující ve výpočtech emise v jednotkách g/kWh.



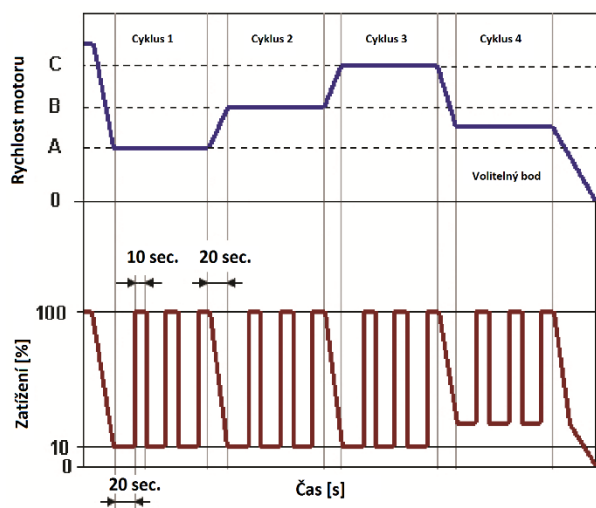
Graf 3: Evropský stacionární cyklus (ESC)[4]

Společně s testem ESC byl zaveden test ETC. Stejně jako u testu ESC je měřen samostatný motor na stanovišti. Rozdíl je v průběhu testu, který se skládá z městské, mimoměstské a dálniční části. Postupně nahradil 13bodový test jelikož více respektuje reálný provoz nákladních vozidel.



Graf 4: Evropský přechodný cyklus (ETC)[4]

Posledním teste je ELR, který se skládá ze 3 úrovní zátěže měřených při 4 úrovních otáček. Zatěžovací úrovně jsou volené v rozmezí 10 až 100 % maximálního zatížení motoru. Skládá se tedy ze 4 cyklů, přičemž u posledního cyklu jsou parametry voleny (zatížení a otáčky).[4]



Graf 5: Evropský test přechodné zátěže (ELR)[4]

5.2 Emisní kontroly

5.2.1 Zážehový motor bez řízeného emisního systému

Před vlastním měřením hodnot emisí se provádí vizuální kontrola dílů, které ovlivňují tvorbu emisí, těsnost palivové, sací a výfukové soustavy. Následně se kontroluje seřízení zahřátého motoru na provozní teplotu. Kontrola se provádí za volnoběžných otáček a otáček v rozmezí 2 500 až 2 800 ot/min (pokud výrobce nestanoví jinak). Měří se úhel sepnutí přerušovače, úhel předstihu zážehu, obsah CO a HC. Naměřené hodnoty se porovnávají s legislativně stanovenými.[4], [6]

5.2.2 Zážehový motor s řízeným emisním systémem

Ve stejném rozsahu jako v odst. 3.2.1 se provádí vizuální kontrola dílů rozšířená o kontrolu stavu katalyzátoru, λ -sond, doplňkových systémů pro snížení emisí a elektroinstalace náležící k systémům. Kontrola funkce emisního systému se provádí čtením z paměti závad řídicích jednotek za pomoci palubního diagnostického zařízení.

Při měření se zjišťují hodnoty emisí CO a přebytku vzduchu, a to ve stejných režimech jako v odst. 3.2.1.

5.2.3 Vznětový motor

U vznětového motoru se provádí vizuální kontrola a kontrola diagnostického zařízení stejně jako v odst. 3.2.2. Liší se kontrolou pravidelnosti chodu při volnoběžných otáčkách, maximálních otáčkách (kontrola regulátoru otáček) a měření kouřivosti motoru metodou volné akcelerace.

6 Spotřeba paliva

Ze spotřeby paliva lze určit hospodárnost motoru, ale také technický stav. Nejvíce vypovídajícím ukazatelem je měrná spotřeba [g/kWh], která udává poměr mezi spotřebovaným palivem a vykonanou prací. Ke zjištění této hodnoty se využívají různé metody, u kterých záleží na provedení palivové soustavy.[2], [4]

Konstrukce palivových soustav

Zatímco u starších konstrukcí motoru (vznětový motor s neprůplachovou palivovou soustavou a zážehový motor s karburátorem) bylo připojení měřicího přístroje velmi jednoduché, u novějších motorů (vznětový a zážehový motor s průplachovou palivovou soustavou) je nutné uzpůsobit měřicí metody tak, aby palivo z odtoku neovlivnilo měření při zachování nenarušené činnosti palivové soustavy (zážehový motor – stálý tlak).[2], [4]

Měření v provozu

Pro měření motoru v provozu je nutné použít takové zařízení, které nebude ovlivňovat jízdní parametry. Například zařízení Datron DFL je založeno na principu objemového čerpadla. Jeho využití je vhodné pro již zmíněné starší konstrukce motoru. Novější konstrukce motoru pak využívají upravené zařízení (Datron DFL 2) doplněné o čerpadlo, zjišťující stálý tlak a výměník tepla. Jeho montáž je složitější, jelikož je nutné rozpojit sací a odtokovou větev palivové soustavy a propojit je pouze přes průtokoměr.[4]

Měření na zkušebním stanovišti

Při měření paliva na zkušebním stanovišti je využívána metoda objemového a hmotnostního měření paliva. Objemová metoda využívá zubové čerpadlo (objemové měřidlo) a rozdíl tlaků před a za měřidlem. Pokud je tlak v obou větvích stejný, pak je objem úměrný otáčkám zubového čerpadla. Pokud je průtok změněn, nastane rozdíl tlaků a otáčky zubového čerpadla jsou upraveny tak, aby byly tlaky vyrovnány.[4]

Hmotnostní měření paliva

K hmotnému měření paliva je využívána váha, která je na jedné straně vybavena měřicí nádobou spojenou s odtokem a přítokem palivem a na druhé straně pákového mechanismu je umístěn kapacitní senzor. Toto provedení využívá metodu měření času spotřeby stanoveného množství paliva.[2], [4]

Homologační měření paliva

Pro homologaci vozidel do 3,5 t se používá metoda výpočtu spotřeby paliva měřením obsahu emisí motoru. Spaliny jsou odsávány a několikanásobně ředěny množstvím ředícího vzduchu. Metoda je založena na ustáleném průtoku. Při změně zatížení motoru se mění koncentrace emisí za stálého průtoku. Je zřejmé, že metoda vyžaduje výkonné ventilační zařízení. Hodnoty emisí jsou propočítávány z emisí CO, CO₂ a HC.[4]

Benzinový motor:

$$FC = \frac{0,118}{\rho} [(0,848 * M_{HC}) + (0,429 * M_{CO}) + (0,273 * M_{CO_2})] \quad (24)$$

FC spotřeba paliva [l/100km]

M_{HC} měrné emise nespálených uhlovodíků [g/km]

M_{CO} měrné emise oxidu uhelnatého [g/km]

M_{CO₂} měrné emise oxidu uhličitého [g/km]

ρ hustota zkušební paliva [kg/dm³]

Vznětový motor:

$$FC = \frac{0,116}{\rho} [(0,861 * M_{HC}) + (0,429 * M_{CO}) + (0,273 * M_{CO_2})] \quad (25)$$

FC spotřeba paliva [l/100km]

M_{HC} měrné emise nespálených uhlovodíků [g/km]

M_{CO} měrné emise oxidu uhelnatého [g/km]

M_{CO₂} měrné emise oxidu uhličitého [g/km]

ρ hustota zkušební paliva [kg/dm³]

7 Cíle práce

Experiment využívá metodu měření emisí za provozu pomocí analyzátoru PEMS doplněného o snímání GPS polohy a čtení dat z řídicí jednotky vozidla pomocí laptopu. Takto vybavené vozidlo absolvuje dvě různé části experimentu.

Cíle první části experimentu:

- **Zjistit vliv stavby tunelu Blanka na množství produkovaných emisí v městském provozu.**
- **Jaký je podíl různých jízdních režimů v městském provozu a při jízdě po městském okruhu.**

Cíle druhé části experimentu:

- **Určit, zda produkuje více emisí rychlé dosažení maximální povolené rychlosti, a dále jízda konstantní rychlostí nebo pozvolná akcelerace po delší časový úsek.**

Měření se týká jízdních způsobů. Jaké množství emisí produkuje agresivní, a tedy rychlá akcelerace na povolenou rychlost a jaké množství produkuje defenzivní, a tedy pomalá akcelerace na povolenou rychlost.

- **Prokázat vliv akcelerace na produkci emisí.**
- **Porovnat množství reálně produkovaných emisí s limity emisí danými legislativou.**

Porovnání, zda produkce emisí v reálném provozu odpovídá limitním hodnotám emisí určeným legislativou.

8 Metodika práce

8.1 Měřený automobil

Měření bude provedeno na vozidle Volkswagen Golf 5. generace vyrobeném roku 2007 s karoserií hatchback. Vozidlo je vybaveno benzinovým čtyřválcovým motorem, atmosféricky plněným o zdvihovém objemu 1 390 cm³ se šestnácti ventily, označeným kódem výrobce BUD. Výkon motoru je 59 kW při 5 000 ot/min. Vozidlo splňuje parametry dané směrnicí EHS/ES 2003/76B, což lze označit jako splnění limitů EURO IV. Na vozidle byl proveden servis s větším rozsahem prací. Vyměněn byl ozubený rozvodový řemen, drážkový řemen, zapalovací svíčky, motorový olej (5W40), olejový filtr, palivový filtr, vzduchový filtr nasávaného vzduchu, pilový filtr, vlnovec výfukového potrubí a první díl výfukového potrubí. Měření bude probíhat na letních pneumatikách.



Obrázek 14: Měřené vozidlo VW Golf 5. generace

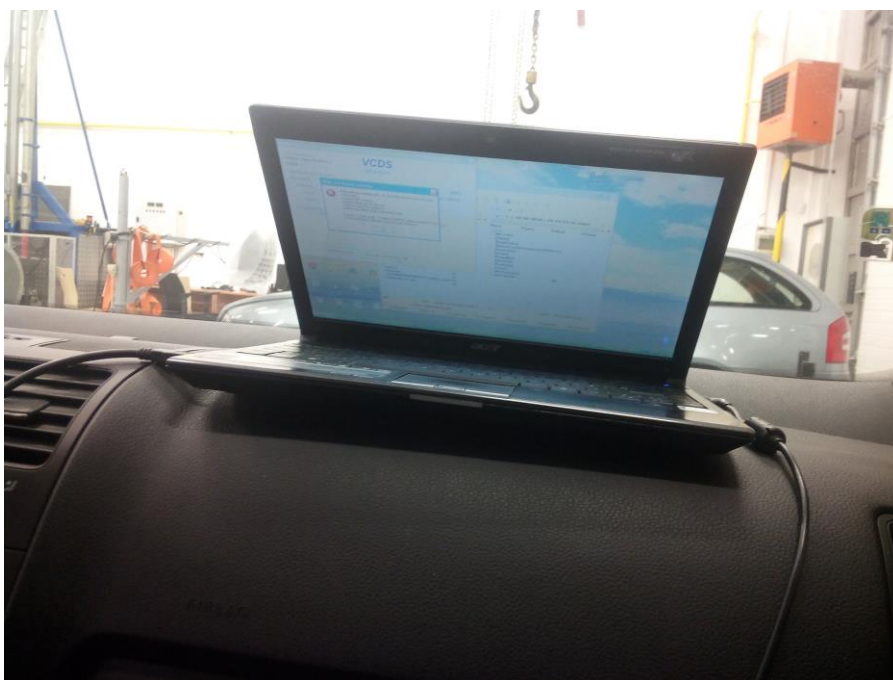
8.2 Měření EOBD

Automobil je vybaven řídicí jednotkou, ze které je možné číst aktuální hodnoty snímaných a přepočítávaných veličin. Hodnoty z EOBD budou přes diagnostickou přípojku EOBD, kabel a přes USB port posílány do laptopu. Komunikaci laptopu a řídicí jednotky bude zajištěna programem VAG-COM 12.12.0. Aby nedošlo k vypnutí a ztrátě dat, bude laptop napájen ze sítě automobilu.



Obrázek 15: Umístění 16pinové diagnostické přípojky

Minimální hardwarové a softwarové požadavky programu VAG-COM jsou tak nízké, že lze použít běžně dostupný laptop. Pro měření bude použit laptop Acer.



Obrázek 16: Laptop, užívaný při měření

8.3 Analyzátor

K měření emisí bude používán analyzátor VMK vlastní výroby. Měřená data budou zapisována na flashdisk. Před každým měřením bude vynulován. Vynulování spočívá v pročištění analyzátoru vzduchem a změření nulové koncentrace plynů (trvá cca 3 minuty). Tím bude nastavena nulová hladina plynů. Tuto funkci má analyzátor automaticky nastavenou pod tlačítkem.



Obrázek 17: PEMS analyzátor

Výfuková sonda bude umístěna do konce výfukového potrubí a výfuková hadice bude vedena otvorem ve spodku prostoru pro rezervní pneumatiku a připojena do analyzátoru. Při měření nebude rezervní pneumatika vyndána a bude využita k vymezení vůle tak, aby nedošlo k posunu výfukové hadice jízdními vlivy. Pro zamezení pohybu se hadice upevní plastovou páskou.



Obrázek 18: Umístění a uchycení výfukové sondy

Analyzátor využívá k odvodu vodních par samostatnou hadici, u které je nutné dodržet převýšení, aby docházelo k samovolnému odtoku vlivem gravitace. Tato hadice bude vedena, stejně jako výfuková hadice, okolo rezervní pneumatiky otvorem vně automobilu.



Obrázek 19: Vyvedení a uchycení výfukové a odtokové hadice

Analyzátor bude umístěn na sklopeném opěradle zadního sedadla spolujezdce a zajištěn proti pohybu fixací popruhem. Napájení analyzátoru bude řešeno přes kabel samostatnou autobaterií umístěnou na pravé části zavazadlového prostoru a fixován proti pohybu. Autobaterie bude před měřením plně nabitá.



Obrázek 20: Upevnění autobaterie v zavazadlovém prostoru

Součástí analyzátoru je snímač GPS, který bude umístěn magneticky na střeše automobilu a propojen kabelem. Kabel bude „skřípnut“ dveřmi. Data budou zapisována na flashdisk. GPS snímač je od firmy Garmin typ 18x – 5Hz s připojením přes USB port.[13]



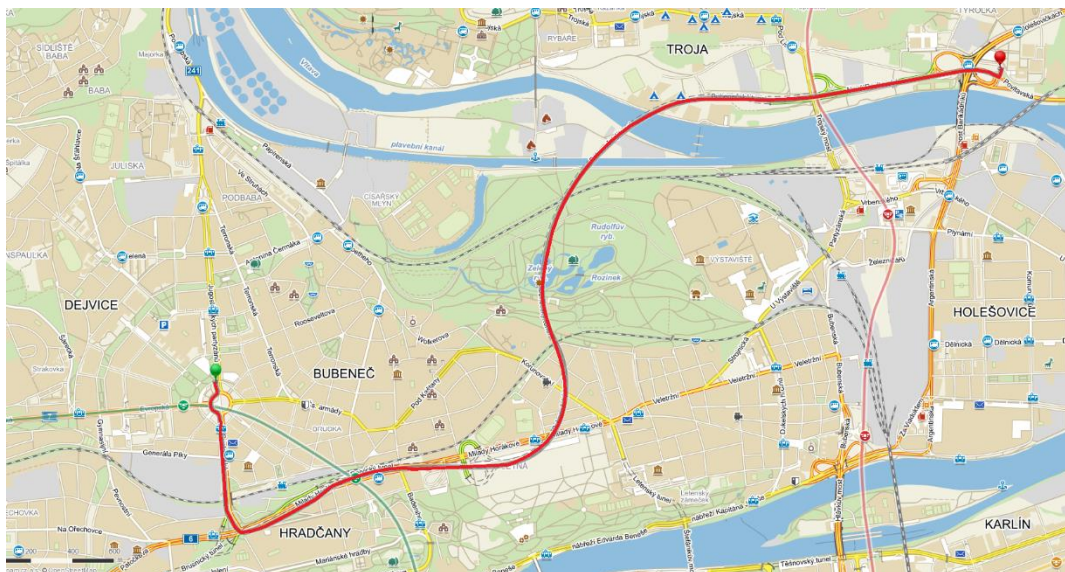
Obrázek 21: Umístění GPS snímače na střeše vozidla

8.4 Postup měření

Při měření bude v automobilu přítomen spolujezdec, který bude obsluhovat analyzátor (kontrola funkce a vynulování), kontrolovat dat z OBD a obsluhovat počítač (funkce GPS). Řidič bude projíždět zadané trasy a udržovat dva jízdní styly. První jízdní styl bude defenzivní, který se vyznačuje ostražitostí a předvídavostí provozu. Tím by mělo být dosaženo menší nutnosti brzdit a nižších hodnot zrychlení. Druhý jízdní styl bude agresivní. Agresivní styl bude charakterizován maximálním možným zrychlením do dosažení maximální povolené rychlosti a udržování minimální vzdálenosti od automobilu jedoucím před měřeným automobilem.[12]

8.4.1 Měření tunelu Blanka – trasa 1

Na trase 1 (Šolínova/Jugoslávských partyzánů – Pátkova) bude řidič udržovat pouze defenzivní styl jízdy. Pro měření budou využity dvě varianty. Varianta 1 o přibližné délce 5,9 km povede Dejvickým a Bubenským tunelem.



Obrázek 22: Mapa trasy 1 – varianta 1

Varianta 2 o přibližné délce 5,8 km povede na povrchu dříve dostupnými koridory (Milady Horákové, Veletržní, Železničářů, Argentinská a most Barikádníků).



Obrázek 23: Mapa trasy 1 – varianta 2

Varianty se projedou obousměrně.

8.4.2 Měření Suchdolského kopce – trasa 2

Na trase 2 (okružní křižovatka Kamýcká/Roztocká -> Kamýcká/K Vinici) bude měřený automobil zrychlovat od okružní křižovatky defenzivním a agresivním stylem jízdy. Měření bude prováděno bez ovlivnění provozem. Tedy, měření proběhne ve chvíli, kdy žádný automobil nebo jiný účastník provozu nebude omezovat jízdu vpřed. Trasa 2 se bude měřit

pouze směrem od okružní křižovatky na Suchdol. Před měřením agresivního a defenzivního způsobu bude předcházet jízda, při které bude měřeno maximální zrychlení na měřeném úseku.

- Měření maximálního zrychlení za provozu

Na začátku měřeného úseku bude zařazen 2. rychlostní stupeň. Plynový pedál bude sešlápnut do maximální polohy. K přeřazení na 3. rychlostní stupeň dojde v rozmezí 4000 až 4500 ot/min. Po přeřazení bude plynový pedál sešlápnut do maximální polohy až do konce měřeného úseku.

- Agresivní způsob

Na začátku měření bude zařazen 2. rychlostní stupeň. Plynový pedál bude sešlápnut do maximální polohy do dosažení 50 km/h. Při dosažení této rychlosti bude přeřazeno na 3. rychlostní stupeň a udržována rychlost 50 km/h. V místě změny rychlostního limitu na 70 km/h bude sešlápnut plynový pedál do maximální polohy do dosažení rychlosti 70 km/h a udržování rychlosti.

- Defenzivní způsob

Na začátku měřeného úseku bude mít řidič zařazený 2. rychlostní stupeň a plynový pedál sešlápnut do poloviční polohy. Po dosažení rychlosti 50 km/h na palubním přístroji přeřadí na 3. rychlostní stupeň a bude udržovat rychlost 50 km/h až do místa změny rychlostního limitu. V místě změny rychlostního limitu na 70 km/h sešlápnut řidič plynový pedál na polovinu a bude zrychlovat až do rychlosti 70 km/h. Po jejím dosažení bude udržovat rychlost. Při tomto měření nesmí být plynový pedál sešlápnut více než na polovinu.



Obrázek 24: Mapa trasy 2

9 Experiment

9.1 Data

Vzhledem k tomu, že emisní analyzátor vyhodnocuje produkci emisí v objemových koncentracích, je z hlediska porovnatelnosti výsledků vhodné výsledky přepočítat na hmotnostní produkci. K tomu je zapotřebí znát hmotnostní průtok výfukových plynů. Vzhledem k tomu, že tento průtok je poměrně obtížně zjistitelný, lze tuto hodnotu nahradit hmotnostním průtokem nasávaného vzduchu. Do výpočtu se tím sice zaneší nepřesnost, ale díky relativnímu srovnávání dosažených výsledků lze tuto systematickou chybu zanedbat. V rovnicích se objevuje hodnota hmotnosti nasávaného vzduchu označovaná palubní diagnostikou jako MAF (Manifold air flow). Tato hodnota se získává pomocí snímače hmotnosti vzduchu. K přepočtu emisí CO z % na g/s se využila rovnice (26).

$$CO_{přep} = \frac{MAF * CO}{100 * 1,25} \quad (26)$$

$CO_{přep}$	přepočítané hodnoty naměřených emisí CO [g/s]
MAF	hmotnost nasávaného vzduchu [g/s]
CO	naměřené hodnoty emisí CO [%]

Přepočet hodnot CO_2 v % na jednotky g/s je uveden v rovnici (27).

$$CO_{2přep} = \frac{MAF * CO_2}{100 * 1,964} \quad (27)$$

$CO_{2přep}$	přepočítané hodnoty naměřených emisí CO_2 [g/s]
CO_2	naměřené hodnoty emisí CO_2 [%]

Přepočet hodnot NO z jednotek ppm na jednotky g/s je uveden v rovnici (28).

$$NO_{přep} = \frac{MAF * NO}{\frac{100 * 2,05}{10000}} \quad (28)$$

$NO_{přep}$	přepočítané hodnoty naměřených emisí NO [g/s]
NO	naměřené hodnoty emisí NO [ppm]

Přepočet hodnot emisí HC z jednotek ppm na jednotky G/s je uveden v rovnici (29).

$$HC_{přep} = \frac{MAF \cdot HC}{\frac{100 \cdot 0,616}{10000}} \quad (29)$$

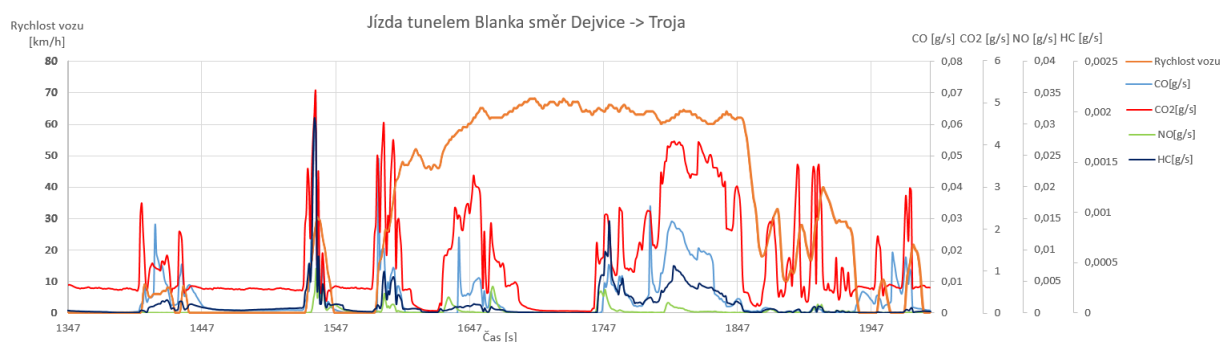
$HC_{přep}$ přepočítané hodnoty naměřených emisí HC [g/s]

HC naměřené hodnoty emisí HC [ppm]

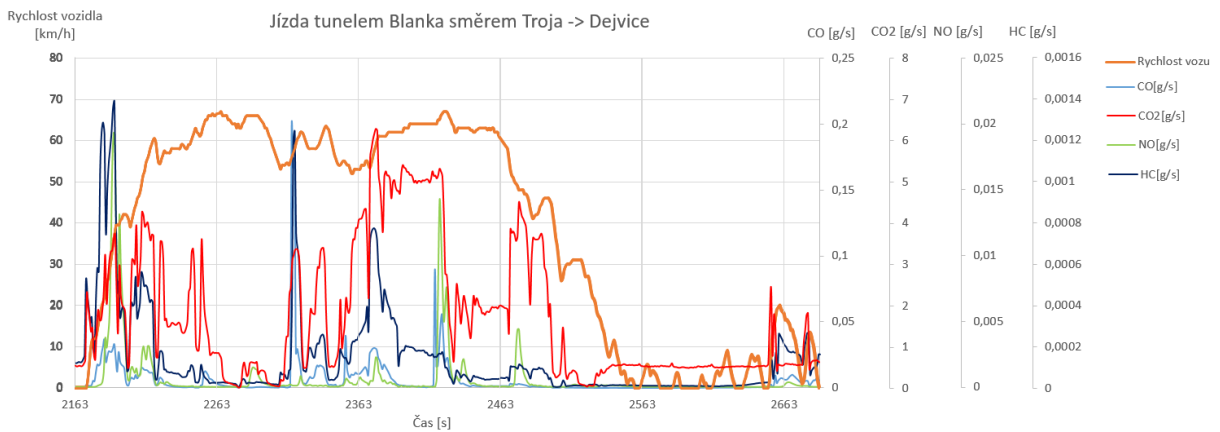
9.1.1 Tunel Blanka

Měření bylo provedeno na trase 1 (viz odst. 8.4) v době odpolední špičky. Trasa 1 je rozdělena do dvou variant. Pro obě varianty je zvolen stejný počáteční a konečný bod. Řidič na měřených úsecích udržoval větší odstup od vozidel před sebou, zrychlování bylo pozvolné, při brzdění využíval podřazování a za jízdy řadil vyšší rychlostní stupně, aby motor měl nižší otáčky. Tyto vlastnosti jsou charakteristické pro defenzivní způsob jízdy. Během jízdy spolujezdec kontroloval nahrávání dat a zapisoval doplňující informace o jízdě. Na měřeném úseku převažuje směrem z Dejvic do Troje klesání.

Délka varianty 1 je 5,9 km a doba jízdy z křižovatky ulic Šolínova a Jugoslávských partyzánů (Dejvice) tunelem Blanka do ulice Pátkova (Troja) trvala 10,8 minut. V opačném směru trvala jízda 8,75 minut. Data získaná experimentem jsou uvedena v grafech 6 a 7. Při měření této varianty nelze využívat data rychlosti z GPS snímače z důvodu ztráty signálu při vjetí do tunelu. Proto jsou v grafech 6 a 7 uvedena data rychlosti získaná z palubní jednotky vozidla.

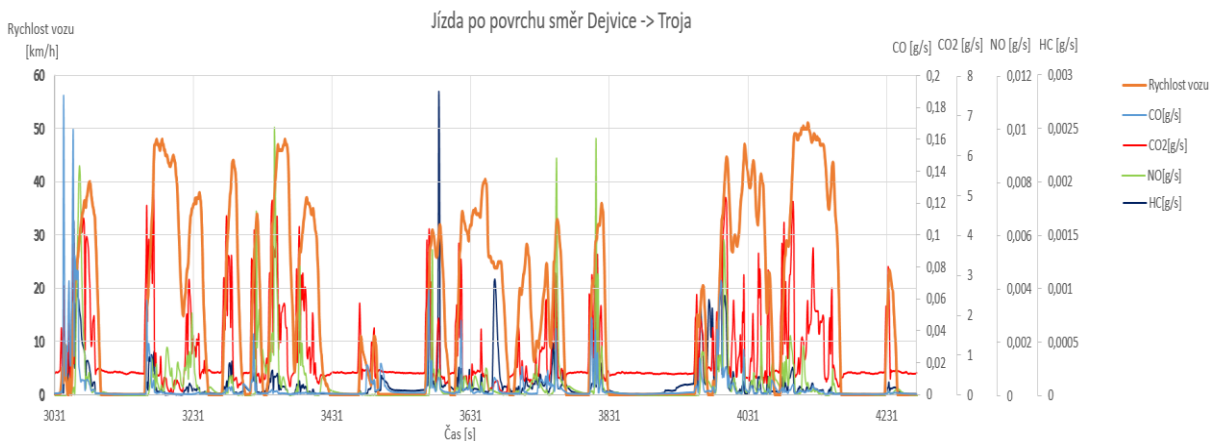


Graf 6: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 1 směr Dejvice -> Troja

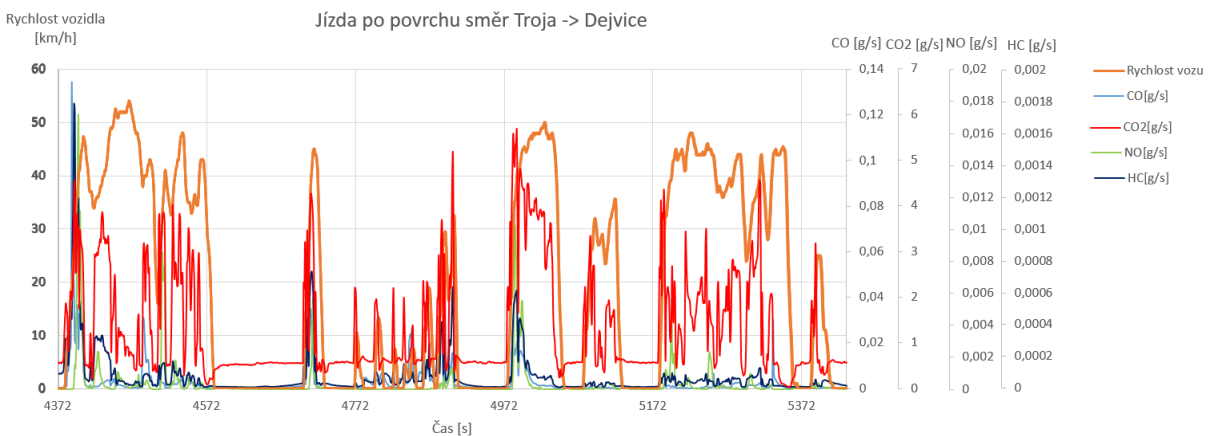


Graf 7: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 1 směr Troja -> Dejvice

Délka varianty 2 je dlouhá 5,8 km a jízda z Vítězného náměstí (Dejvice) do ulice Pátkova (Troja) trvala 20,7 minut. V opačném směru trvalo měření 17,7 minut. Aby byla data porovnatelná, rychlost použitá v grafech 8 a 9 je zobrazena z dat získaných z jednotky automobilu.



Graf 8: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 2 směr Dejvice -> Troja



Graf 9: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 2 směr Troja -> Dejvice

9.1.2 Suchdolský kopec

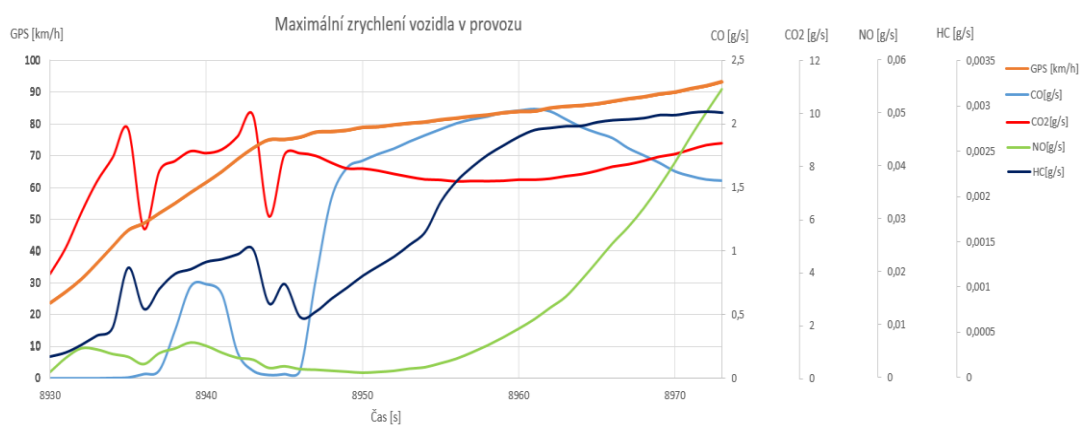
Měření bylo provedeno 12. 11. 2015 na trase 2 (viz odst. 8.4.). Úsek měření byl vybrán tak, aby došlo k jasnému projevení nárůstu emisí při akceleraci. Jasnější zobrazení je způsobeno převýšením měřeného úseku, které zvyšuje zatížení motoru. Při měření došlo k ovlivnění několika jízd provozem, špatným řazením a nevhodným zacházením s akceleračním pedálem. Uvedená data jsou data, která splňují podmínky uvedené v odst. 8.4. Počátek měření se nachází v nadmořské výšce 188 metrů a konec ve výšce 252 metrů nad mořem. Celkové převýšení je tedy 64 metrů na vzdálenosti 920 metrů. Po vzdálenosti 337 metrů od startu na komunikaci dochází k rozšíření o jeden jízdní pruh. Snižuje se tak možnost ovlivnění měření provozem.

Při měření byly využity různé způsoby řízení, které měly simulovat různé chování řidiče a jeho vliv na produkci emisí za jízdy. Spolujezdec zapisoval data a doplňující informace a kontroloval řidiče, který udržoval způsob jízdy podle pokynů (viz odst. 8.4).

Na začátku měření byl vždy zařazen 2. rychlostní stupeň. Při měření 2. a 3. způsobem docházelo k přeřazování z 2. rychlostního stupně na 3. rychlostní stupeň při dosažení rychlosti 50 km/h.

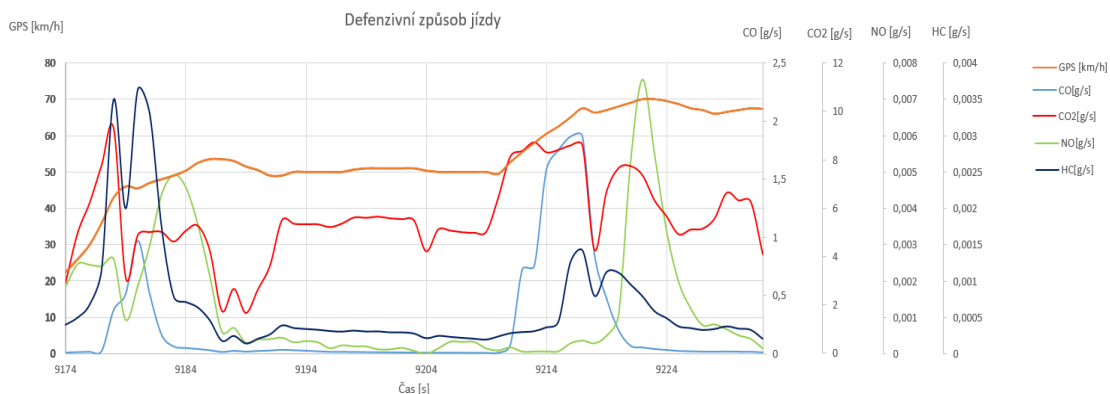
Řidič udržoval rychlost podle palubního přístroje.

1. způsob jízdy je výše popsán jako měření maximálního zrychlení na měřeném úseku. Při měření byl na začátku úseku sešlápnut plynový pedál do maximální polohy. K řazení došlo v rozmezí 4 000 až 4 500 ot/min a plynový pedál byl opět posunut do maximální polohy. Průběh naměřených a přepočtených dat je zobrazen v grafu 10.



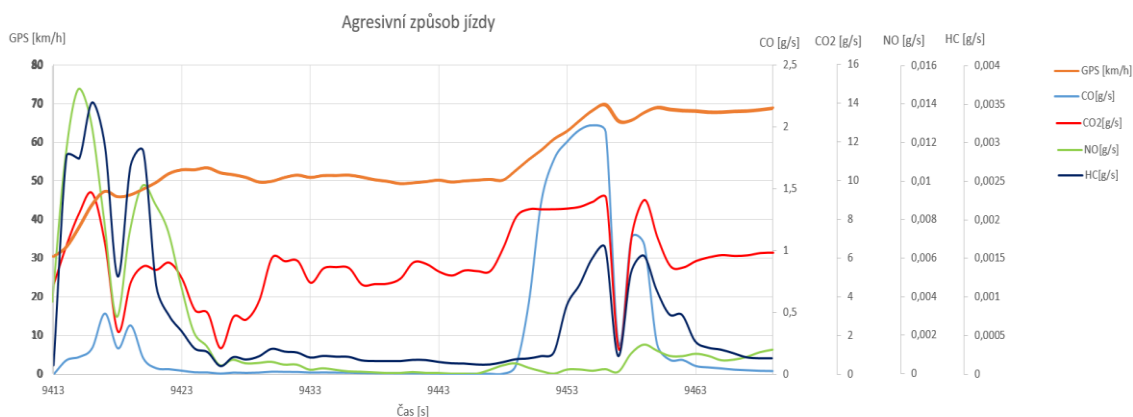
Graf 10: Přepracované hodnoty emisí – trasa 2 - maximální zrychlení vozidla v provozu

2. způsob jízdy je výše popsán jako defenzivní styl jízdy. Je charakteristický pozvolným zrychlováním na povolenou rychlost. Při měření bylo dosahováno 50 km/h po delší dobu sešlápnutím plynového pedálu do poloviny. Po dosažení 50 km/h byla rychlost udržována do místa změny rychlostního limitu na 70 km/h. Rychlosti 70 km/h bylo dosahováno stejným sešlápnutím plynového pedálu do poloviční polohy. Průběh naměřených dat je zobrazen v grafu 11.



Graf 11: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 2 – defenzivní způsob

3. způsob jízdy je výše popsán jako agresivní styl jízdy. Je charakteristický rychlým dosáhnutím maximálních povolených rychlostí na daném úseku. Při měření bylo dosaženo 50 km/h maximálním sešlápnutím plynového pedálu, tato rychlost byla udržována až do místa zvýšení povolené rychlosti na 70 km/h, nato bylo rychle dosaženo 70 km/h maximálním sešlápnutím plynového pedálu a tato rychlost byla udržována do konce měřeného úseku. Průběh naměřených dat je zobrazen v grafu 12.



Graf 12: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 2 – agresivní způsob

Přepočítané hodnoty emisí z % a ppm na g/s můžeme porovnávat data uvedená v tabulce 3.

	CO[g]	CO ₂ [g]	NO[g]	HC[g]
Maximální	1,175	7,822	0,01143	0,00172
Defenzivní	0,229	5,614	0,00127	0,00066
Agresivní	0,296	5,808	0,00201	0,00071

Tabulka 3: Množství vyprodukovaných emisí měřením trasy 2

9.2 Vyhodnocení experimentu

9.2.1 Tunel Blanka

Varianta 1 – jízda tunelem Blanka

Na grafu 6 v čase 1 347 až 1 609 sekund je zachycen městský provoz před vjezdem do tunelu. Každý nárůst hodnot v této oblasti dat se shoduje s akcelerací vozidla. Profil této oblasti je dán jízdou v dopravní špičce a stání na červenou. Zřetelné maximum v této oblasti způsobilo rychlejší akcelerování dané dopravní situací (připojování do pruhu).

Oblast dat v čase 1 609 až 1 884 sekund odpovídá jízdě v tunelu. V první polovině byla naměřena akcelerace nutná pro plynulé zařazení do dopravního proudu v tunelu a pozdější jízda byla plynulá a vzrůstání rychlosti nebylo vždy doprovázeno zvýšenými emisemi. To bylo způsobeno klesáním tunelu v první polovině. Ve druhé polovině je zachyceno stoupání tunelu doprovázené zvýšenými emisemi.

Oblast dat 1 884 až 1 991 sekund jsou data na výjezdu z tunelu, kde se vozidlo dostalo do kongesce.

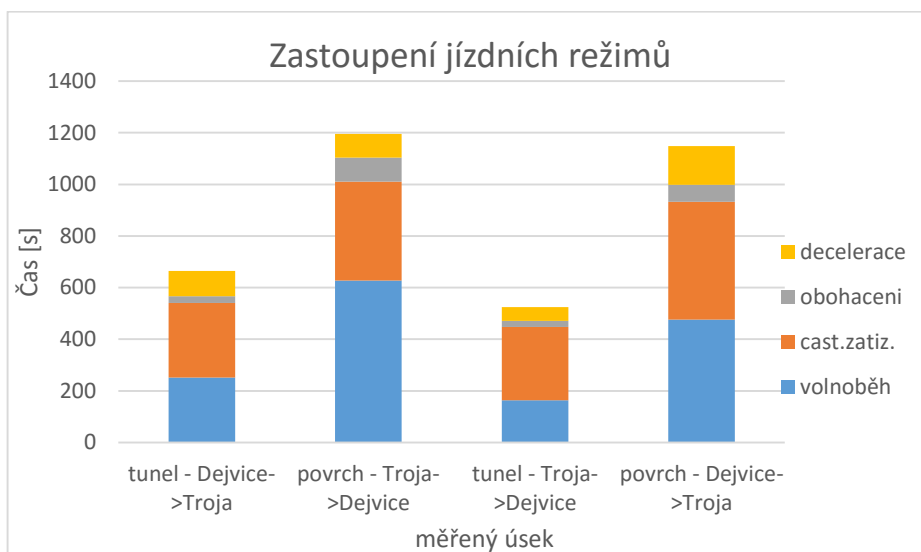
Emise produkované jízdou opačným směrem (tunelem Blanka směrem do Dejvic) jsou zobrazeny v grafu 7. Graf 7 zobrazuje oblast jízdy tunelem a jízdu městským provozem. Jízda tunelem je charakteristická vyšší rychlostí, plynulostí a absencí úplného zastavení. Oblast městského provozu od času 2 560 sekund tímto směrem neprodukuje výrazně vysoké emise z důvodu klesání komunikace.

Varianta 2 – jízda po povrchu

Na grafech 8 a 9 je zobrazen městský provoz. Charakteristické jsou krátké úseky jízdy střídané úseky úplného zastavení. Celková rychlost je nižší a jízda není plynulá. Při měření oběma směry došlo k zastavení z důvodu uzavření železničního přejezdu u křižovatky ulic Strojnická a Bubenská. Toto zastavení leží na grafu 8 mezi 3 842 a 3 958 sekundami a na grafu 9 mezi 4 573 a 4 698 sekundami.

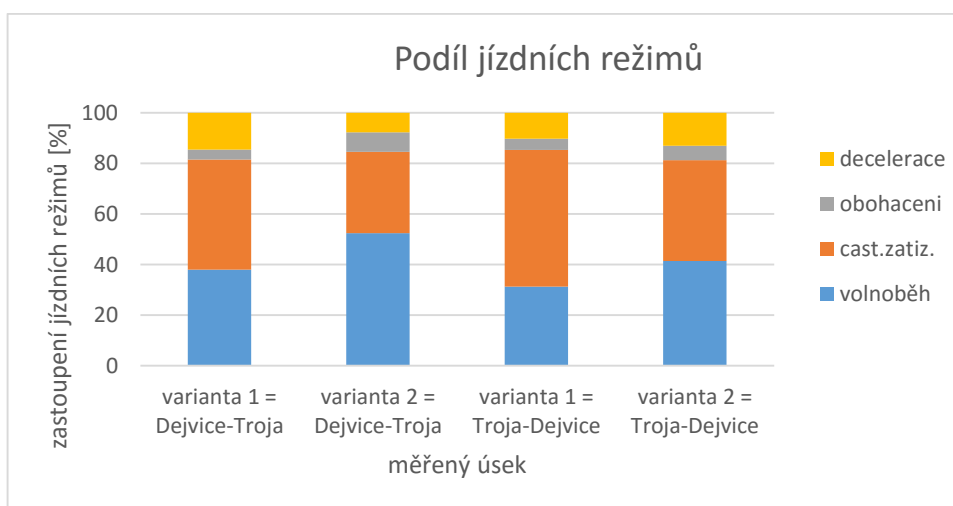
Porovnání hodnot

Následující graf 13 zobrazuje časové zastoupení jednotlivých jízdních režimů.



Graf 13: Zastoupení jízdních režimů v závislosti na čase

Z grafu vyplývá, že vozidlo při jízdě městským provozem po povrchu strávilo více času v režimu obohacení a stání než při jízdě tunelem. Režim obohacení představuje akceleraci vozidla. Celkový podíl režimu obohacení při jízdě uvádí graf 14.



Graf 14: Celkový podíl jízdních režimů

Ačkoli ve směru z Dejvic ve variantě 2 převažuje klesání, vzniká při ní více emisí (viz tabulka 4). Tato skutečnost je dána omezováním provozem a nutností častěji akcelarovat.

varianta = směr	CO[g]	CO2[g]	NO[g]	HC[g]
varianta 1 = Dejvice-Troja	3,101164	772,012	0,180891	0,053991
varianta 2 = Dejvice-Troja	5,101517	1286,283	0,55128	0,131347
varianta 1 = Troja-Dejvice	3,351854	921,673	0,327181	0,077116
varianta 2 = Troja-Dejvice	4,080138	1381,312	0,382979	0,077085

Tabulka 4: Množství vyprodukovaných emisí měřením trasy 1

Nejenže jízda variantou 1 produkuje méně emisí, jak lze vyčíst z tabulky 4, ale poskytuje i časovou úsporu.

9.2.2 Suchdolský kopec

Počáteční rychlosti v kapitole 7.3.2 jsou odlišné. Je to způsobeno průjezdem okružní křižovatky před počátkem měření. Z téměř lineárního průběhu rychlosti je zřejmé, že vozidlo nebylo ničím omezeno při jízdě vpřed.

Měření maximálního zrychlení vozidla v provozu je orientačním měřením možností vozidla. Ukazuje hodnoty emisí při jízdě s akceleračním pedálem v maximální poloze. Na grafu 10 je zřetelně vidět, že v čase 8 944 sekund došlo k přeřazení na vyšší rychlostní stupeň. To způsobilo vyšší zatížení motoru, ovlivněné posunem otáček motoru dále od bodu maximálního výkonu. Řídící jednotka poté nastavila směr na více bohatou, aby vyhověla požadavku řidiče daného polohou akceleračního pedálu. To mělo za následek zvýšení emisí CO a HC ve výfukových plynech. Emise vyprodukované tímto měřením jsou velmi vysoké v porovnání s defenzivním a agresivním způsobem.

Defenzivní způsob

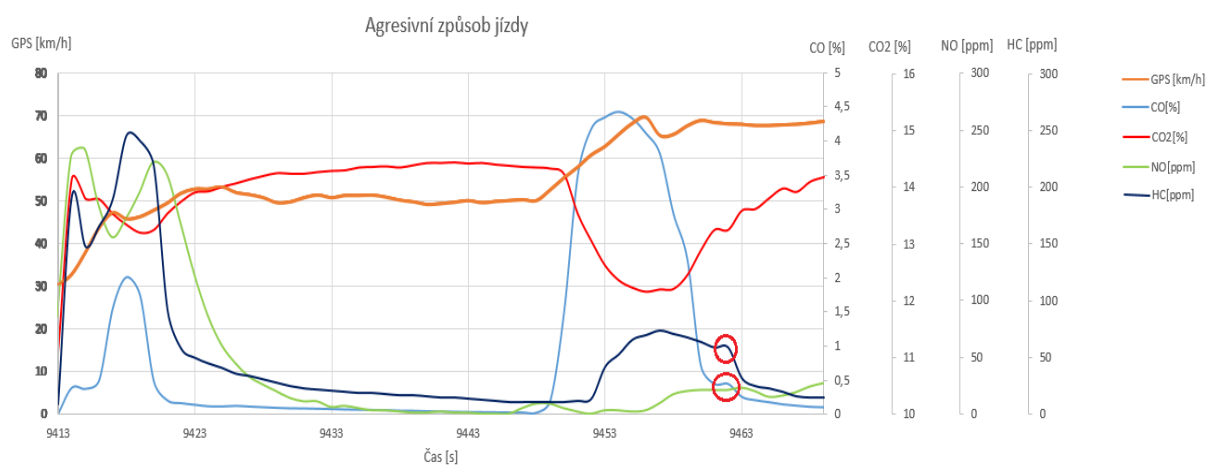
Nárůst hodnot emisí CO, HC a NO v čase 9 177 sekund vlivem akcelerace po přeřazení na 3. rychlostní stupeň. Následně při ustálení rychlosti okolo 50 km/h došlo ke snížení a ustálení na nízkých hodnotách. Z ustálených hodnot je zřejmé, že je vozidlo stále pod zatížením jízdními odpory. V čase 9 210 sekund začalo vozidlo opět pozvolna zrychlovat na rychlost 70 km/h, a tím došlo k nárůstu emisí CO, HC a následně NO.

Průběh rychlosti v grafu 12 ukazuje dvě odchylky od pokynů uvedených v odst. 8.4. První odchylka je překročení rychlosti 50 km/h. Ta je způsobena časovou prodlevou GPS snímače. Druhá odchylka je snížení rychlosti při těsně před rychlostí 70 km/h. Ta je způsobena citlivostí akceleračního pedálu.

Agresivní způsob

Hodnoty emisí CO, HC a NO v čase 9 414 sekund jsou následkem prudké akcelerace po začátku měření. Hodnoty emisí následně poklesly vlivem přeřazení na 3. rychlostní stupeň a začaly opět stoupat po nastavení akceleračního pedálu do maximální polohy. Hodnoty se začaly snižovat při ustálení rychlosti okolo 50 km/h. V čase 9 448 sekund začal automobil opět zrychlovat. Emise CO, HC a NO začaly stoupat vlivem akcelerace a po dosažení rychlosti 70 km/h se začaly ustalovat podobně jako po dosažení 50 km/h.

Malý výkyv hodnot po dosažení rychlosti 70 km/h je dan citlivostí akceleračního pedálu. Tento výkyv způsobil změny emisí, které jsou označeny na grafu 18. Množství emisí, které vzniklo, je ale zanedbatelné, a proto se při výpočtech nezavedla žádná korekční opatření. Na grafu 15 je jasně zřetelná oblast udržované rychlosti 70 km/h.



Graf 15: Vliv zpomalení způsobeného citlivostí akceleračního pedálu

Z experimentu vyplývá, že nejvyšší podíl na vzniku emisí má akcelerace. Je zřejmé, že při defenzivním způsobu jízdy dochází k menší produkci emisí, jak uvádí tabulka 5.

	CO[g/km]	CO2[g/km]	NO[g/km]	HC[g/km]
Maximální	58,42	388,79	0,568	0,086
Defenzivní	15,33	375,67	0,085	0,044
Agresivní	19,41	380,67	0,132	0,047
Euro IV	1,00	-	0,8	0,1

Tabulka. 5: Porovnání emisí za provozu s legislativními limity Euro IV

Doba měření defenzivního způsobu jízdy je delší než doba měření agresivního způsobu jízdy. To vyplývá z pomalejší akcelerace na požadované rychlosti. Data jsou porovnatelná i

navzdory odchylkám při měření, které jsou způsobené stejnými chybami v obou případech a proto je lze považovat za systematické. Stejné výkyvy zvýrazněné na grafu 14 jsou v menší míře i na grafu 12.[3]

Při porovnání průměrných hodnot z tabulky 1 a tabulky 5 vychází, že hodnoty CO v reálném provozu překračují legislativní limity Euro IV několikanásobně. Hodnoty NO a HC nebyly při měření překročeny. Při jízdě s maximálním zrychlením byly hodnoty CO až 58x vyšší, než udávají limity Euro IV.

Závěr

Měření emisí v provozu přináší skutečný náhled na produkci škodlivin. V první části experimentu bylo provedeno měření, které zjišťovalo vliv typu komunikace na produkci emisí. K porovnání byl vybrán nově vystavěný tunel Blanka a městské komunikace, které byly využívány řidiči doposud oběma směry. Z naměřených dat vyplývá, že při variantě 1, tedy varianta jízdy tunelem, dochází k nižší produkci všech měřených složek emisí.

U vozidla v městském provozu dochází častěji ke změně jízdních režimů, a nedochází tak k ustálenému zatížení motoru.

Ve druhé části experimentu se určoval vliv akcelerace na produkci emisí při jízdě, vliv prudké akcelerace za pomoci jízdních stylů a porovnání výsledků s legislativními limity.

Z naměřených dat vyplývá, že akcelerace má nejvyšší vliv na produkci emisí. Měřené jízdní styly prokázaly, že pokud řidič bude volit defenzivní styl jízdy (jízdni styl s nižšími hodnotami zrychlení) dojde k menší produkci emisí. Akcelerace vysvětluje tak vyšší produkci emisí při jízdě městským provozem.

Porovnáním hodnot emisí naměřených v provozu a legislativních limitů bylo zjištěno, že v provozu jsou několikanásobně překročeny limity emisí CO. Limity HC a NO_x byly při jízdě dodrženy.

Seznam zdrojů:

Literatura:

- [1] Šmerda, T.: Vznětové motory vozidel, CPress, Brno, 2013, ISBN 978-80-264-0160-5
- [2] Vlk, F.: Vozidlové spalovací motory, Brno, 2003, ISBN 80-238-8756-4
- [3] FREY, H. C. et al.: On-Road Measurement of Vehicle Tailpipe Emissions Using a Portable Instrument, Journal of the Air & Waste Management Association (53), 2003, pp. 992–1002, ISSN 1047-3289
- [4] HROMÁDKO, J.: Spalovací motory, Grada Publishing a. s., Praha, 2011, ISBN 978-80-247-3475-0
- [5] M., Šterba : Diagnostika spalovacích motorů, Computer Press, Brno, 2007, ISBN 978-80-251-1697-5
- [6] TAKATS, M.: Měření emisí spalovacích motorů, ČVUT, Praha, 1997, ISBN 80-01-01632-3
- [7] Vlk, F.: Diagnostika motorových vozidel, Brno, 2006, ISBN 80-239-7064-0
- [8] Gscheidle, R. a kol.: Příručka pro automechanika, EUROPA-SOBOTÁBLES cz., Praha, 2007, ISBN 978-80-86706-17-7
- [9] Ferenc, B.: Spalovací motory, Computer Press, Brno, 2009, ISBN 978-80-251-2545-8
- [10] Johnson, J. H.: Diesel particulate emissions: landmark research 1994-2001, Society of Automotive Engineers, Warrendale, 2002, ISBN 978-07-680-0998-9
- [11] Červínka O., Dědek, V., Ferles M.: Organická chemie, Praha, 1991, ISBN 80-85427-03-6

Internetové zdroje:

- [12] Webové stránky bezpečnosti silničního provozu BESIP [online]. [cit. 2015-06-28], Dostupné z WWW: <<http://www.ibesip.cz>>
- [13] Webové stránky manuálu snímače Garmin [online]. [cit. 2015-08-22], Dostupné z WWW: <<http://www.manualslib.com/manual/413938/Garmin-Gps-18x.html#manual>>
- [14] Internetový portál Meteocentrum.cz [online]. [cit. 2015-09-11], Dostupné z WWW: <<http://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/encyklopedie/slozeni-atmosfery-země>>

- [15] Thorž, F.: Emise, jejich měření a principy konstrukce systémů pro jejich snižování [online]. [cit. 2015-10-07], Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38838>
- [16] Pexa, M.: učební látka [online]. [cit. 2015-10-07], Dostupné z WWW: <<http://tf.czu.cz/~PEXA/Budejovice/Prednasky/P-Emise.pdf>>
- [17] Integrovaný registr znečišťování [online]. [cit. 2015-10-15], Dostupné z WWW: <<http://www.irz.cz/node/20>>
- [18] Hladný, R.: učební látka [online]. [cit. 2015-10-15], Dostupné z WWW: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwioq5-z6-bLAhXn33IKHWD1CcwQFggdMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.sossoukyjov.cz%2Fstudovna%2Fsilnicni_vozidla%2Fprodukty_spalovani_emise_a_jejich_snizeni.doc&usg=AFQjCNGnniCz0W3IgjfSt4LP6k34mIdMMg&sig2=q_bPxpKN0WOMR-YmA10m3A&bvm=bv.118353311,d.bGQ&cad=rja>
- [19] Pindur, A.: Oxid dusnatý a jeho úloha v organismu [online]. [cit. 2015-10-15], Dostupné z WWW: <https://is.muni.cz/th/380785/fsps_b/>
- [20] SEMTECH [online]. [cit. 2015-11-18], Dostupné z WWW: <<http://www.sensorsinc.com/onboard.html>>
- [21] AVL [online]. [cit. 2015-11-18], Dostupné z WWW: <<https://www.avl.com/>>

Seznam použitých zkratek:

$C_{m,pe}$	Hmotnostní koncentrace částice
CLA	ChemiLuminiscent Analyser
CNG	Stlačený zemní plyn
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
CO _{2přep}	Přepočítané hodnoty naměřených emisí CO ₂
CO _{cor}	Korekce hodnoty CO
CO _{přep}	Přepočítané hodnoty naměřených emisí CO
ČR	Česká republika
DeNO _x	Selektivní katalyzátor
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EHK	Evropská hospodářská komise
ELR	European load response
EOBD	European on-board diagnostic
ES	Evropská směrnice
ESC	European stationary cycle
ETC	European transient cycle
EU	Evropská unie
EUDC	Extra urban driving cycle
Euro	Emisní limity
FID	Flame ionization detector
GPS	Global position system
h	Planckova konstanta
HC	Nespálené uhlovodíky
HC _{přep}	Přepočítané hodnoty naměřených emisí HC
LPG	Zkapalněný ropný plyn
M ₁	Hmotnost nového filtru
M ₂	Hmotnost kontaminovaného filtru
MAF	Manifold air flow
N ₂ O ₄	Tetraoxid dusíku
N ₂ O ₅	Oxid dusičitý

NDIRA	Non Dispersive Infrared Analyser
NEDC	New European Driving Cycle
NO	Oxidy dusíku, oxid dusičitý
NO ₂	Oxid dusitý
NO _{přep}	Přepočítané hodnoty naměřených emisí NO
NO _x	Oxidy dusíku
OBD	On-board diagnostic
OBD II	On-board diagnostic 2. generace
OSN	Organizace spojených národů
PAU	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PD	Pumpeduse – čerpadlo-tryska
PEMS	Portable emissions measurement system
PID	Parameter ID
PM	Particulate matter
SCR	Selective catalytic reduction
TWC	Three Way Catalyst
UV	Ultrafialové záření
V _{vzor}	Objem prosátého množství spalin
λ	Součinitel přebytku vzduchu
ν	Frekvence
ρ	Hustota zkušebního paliva

Seznam obrázků:

- Obr. 1: Vnější recirkulace spalin
- Obr. 2: Systém sekundárního vzduchu
- Obr. 3: Konstrukce oxidačně-redukčního katalyzátoru
- Obr. 4: Umístění sběrného katalyzátoru NOX
- Obr. 5: Konstrukce filtru pevných částic
- Obr. 6: Metoda NDIR s kyvetami uspořádanými za sebou
- Obr. 7: Uspořádání měřidla pro metodu absorpce ultrafialového záření
- Obr. 8: Schéma analyzátoru FID
- Obr. 9: Konstrukce magnetického analyzátoru
- Obr. 10: Schéma opacimetru
- Obr. 11: Analyzátor pro měření tepelné vodivosti
- Obr. 12: Servisní opacimetr
- Obr. 13: Obsazení 16pinové diagnostické přípojky
- Obr. 14: Měřené vozidlo VW Golf 5. generace
- Obr. 15: Umístění 16pinové diagnostické přípojky
- Obr. 16: Laptop užívaný při měření
- Obr. 17: PEMS analyzátor
- Obr. 18: Umístění a uchycení výfukové sondy
- Obr. 19: Vyvedení a uchycení výfukové a odtokové hadice
- Obr. 20: Upevnění autobaterie v zavazadlovém prostoru
- Obr. 21: Umístění GPS snímače na střeše vozidla
- Obr. 22: Mapa trasy 1 – varianta 1
- Obr. 23: Mapa trasy 1 – varianta 2
- Obr. 24: Mapa trasy 2

Seznam tabulek:

- Tab. 1: Legislativně stanovené hodnoty limitů emisí [4]
- Tab. 2: Význam standardizovaného zápisu chybových kódů [7]
- Tab. 3: Množství vyprodukovaných emisí měřením trasy 2
- Tab. 4: Množství vyprodukovaných emisí měřením trasy 1
- Tab. 5: Porovnání emisí za provozu s legislativními limity Euro IV

Seznam grafů:

Graf 1: Složení atmosféry

Graf 2: Nový evropský jízdní cyklus (NEDC)

Graf 3: Evropský stacionární cyklus (ESC)

Graf 4: Evropský přechodný cyklus (ETC)

Graf 5: Evropský test přechodné zátěže (ELR)

Graf 6: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 1 směr Dejvice -> Troja

Graf 7: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 1 směr Troja -> Dejvice

Graf 8: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 2 směr Dejvice -> Troja

Graf 9: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 1, varianta 2 směr Troja -> Dejvice

Graf 10: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 2 – maximální zrychlení vozidla v provozu

Graf 11: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 2 – defenzivní způsob

Graf 12: Přepočtené hodnoty emisí – trasa 2 – agresivní způsob

Graf 13: Zastoupení jízdních režimů v závislosti na čase

Graf 14: Celkový podíl jízdních režimů

Graf 15: Vliv zpomalení způsobeného citlivostí akceleračního pedálu