

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Diplomová práce**

**2014**

**Marek SVOBODA**

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra vozidel a pozemní dopravy**

**Analýza systémů na dodatečnou úpravu spalin**

**Diplomová práce**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Hromádko, Ph.D.**

**Diplomant: Marek Svoboda**

**Praha 2014**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Svoboda Marek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

**Analýza systémů na dodatečnou úpravu spalin**

Anglický název

**Systems analysis for additional flue gas treatment**

### Cíle práce

Cílem práce je analyzovat systémy sloužící k dodatečné úpravě spalin.

### Metodika

- prostudovat základní literaturu v oblasti systémů sloužících k úpravě spalin
- kontaktovat významné organizace zabývající se danou problematikou
- provést globální literární rešerši v dané problematice
- experimentálně ověřit vliv některých systémů na dodatečnou úpravu spalin na produkci škodlivých emisí
- návrh doporučení a předpokládaný vývoj v dané oblasti

### Osnova práce

1. Úvod
2. Současný stav řešené problematiky
3. Cíl a metodika diplomové práce
4. Vyhodnocení experimentu
5. Doporučení a závěr

## Rozsah textové části

50 - 60 stran formátu A4

## Klíčová slova

zážehový motor, vznětový motor, škodlivé emise, výfukové plyny

## Doporučené zdroje informací

1. Hromádko J., Hromádko J., Hönig, V., Miler P.: Spalovací motory, Nakladatelství Grada, Praha, 2011, ISBN 978-80-247-3475-0
2. Rauscher, J.: Spalovací motory, Studijní opory, VUT FSI Brno, 2004
3. Macek, J.: Spalovací motory I, ČVUT Praha, 2007, ISBN 978-80-01-03618-1
4. Beroun, S.: Vozidlové motory. Studijní opory, TU Liberec
5. Vlček, F.: Vozidlové spalovací motory. Nakladatelství a zasilatelství Vlček, Brno, 2002. ISBN 80-238-8756-4

## Vedoucí práce

Hromádko Jan, Ing., Ph.D.

## Termín zadání

listopad 2012

## Termín odevzdání

duben 2014

**doc. Ing. Boleslav Kadleček, CSc.**

Vedoucí katedry



**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan fakulty

V Praze dne 18.3.2013

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Jana Hromádka, Ph.D.  
a použil jen uvedených pramenů a literatury.

Souhlasím, aby moje práce byla k dispozici ČZU v Praze.

V Praze, dne .....

.....

vlastnoruční podpis

**Poděkování:**

Úvodem mé práce bych chtěl poděkovat všem, jenž mi při tvorbě této práce pomohli, zejména pak, vedoucímu práce, panu Ing. Janu Hromádkovi, Ph.D. za cenné náměty a připomínky.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Kotkovi, Ph.D. za pomoc a ochotu při měření praktické části této práce. Panu Ing. Tomáši Kotkovi děkuji za zapůjčení jeho automobilu jako hlavního subjektu mého experimentu.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině za morální a časovou podporu během celého mého studia.

**Anotace:** Cílem této práce je seznámení čtenáře se systémy na dodatečnou úpravu spalin. První část práce, která je zpracována jako teoretická rešerše, obsahuje popis složení výfukových plynů spalovacích motorů a jejich nepříznivý vliv na živé organismy a globální ekosystém. Dále jsou popsány, výše zmíněné, systémy na dodatečnou úpravu spalin pro konvenční zážehově a vznětové motory.

Experimentální část je věnována systému s tzv. řízeným třícestným katalyzátorem. Autor práce se, pomocí měřicího vybavení, snaží dokázat vliv proběhu katalyzátoru na účinnost přeměny škodlivin.

**Klíčová slova:** emise, spalovací motor, výfukové plyny, lambda sonda, katalyzátor, recirkulace, SCR

## **Systems analysis for additional flue gas treatment**

**Abstract:** The main purpose of this thesis is to acquaint the reader with the additional systems for flue gas treatment. The first part incorporates a theoretical research, focused on description of the composition of the exhaust gases of the combustion engines and their harmful influence on the living organisms and global ecosystem. Furthermore, there is a description of the additional flue gas treatment systems for conventional gasoline and diesel engines.

The last part of the thesis is experimental and is dedicated to controlled three-way catalytic converter. The author of the thesis was trying, by using measurement devices, to prove the influence of the mileage catalytic convertor on the efficiency of the exhaust gas transformation.

**Keywords:** emissions, combustion engine, exhaust gases, lambda sensor, catalytic converter, EGR, SCR

1.	Úvod.....	1
2.	Současný stav řešené problematiky .....	2
2.1	Emise spalovacích motorů.....	2
2.1.1	Složení výfukových plynů.....	3
2.1.2	Mechanismy vzniku hlavních škodlivin .....	8
2.2	Lambda sonda, lambda regulace .....	12
2.2.1	Historie .....	12
2.2.2	Princip funkce .....	12
2.2.3	Součinitel přebytku vzduchu.....	12
2.2.4	Druhy používaných sond.....	13
2.2.4.1	Lambda sonda s oxidem zirkoničitým .....	13
2.2.4.2	Odporová lambda sonda .....	15
2.2.4.3	Chudá sonda .....	15
2.2.4.4	Širokopásmová sonda.....	16
2.2.5	Lambda regulace.....	17
2.2.5.1	Adaptivní regulace .....	17
2.2.5.2	Spojité regulace se širokopásmovou sondou.....	19
2.2.5.3	Lambda regulace s více sondami .....	19
2.3	Katalyzátory.....	21
2.3.1	Oxidační katalyzátor .....	21
2.3.2	Dvoulůžkový katalyzátor .....	21
2.3.3	Třícestný katalyzátor (Three-Way Catalyst) .....	23
2.3.4	Technické provedení katalyzátorů.....	23
2.3.4.1	Monolitický keramický nosič.....	24
2.3.4.2	Kovový nosič.....	25
2.3.4.3	Vrstvy katalyzátoru .....	25
2.4	Zpětné vedení výfukových plynů (recirkulace) .....	27
2.4.1	Vnitřní recirkulace (nedokonalé vyplachování).....	27



2.4.2	Vnější recirkulace.....	27
2.5	Snižování emisí škodlivin u zážehových motorů s přímým vstřikem benzínu .....	29
2.5.1	Selektivní katalyzátor DeNOx.....	29
2.5.2	Zásobníkový katalyzátor .....	30
2.6	Filtr pevných částic .....	31
2.6.1	Životnost filtru .....	32
2.6.2	Filtr pevných částic pro zážehové motory s přímým vstřikem benzínu.....	32
2.7	Selektivní katalytická redukce (SCR) .....	33
3.	Cíl a metodika diplomové práce .....	35
3.1	Cíl diplomové práce .....	35
3.2	Metodika diplomové práce .....	35
4.	Vyhodnocení experimentu .....	36
4.1	Popis použitého vybavení při experimentu .....	37
4.2	Postup měření .....	42
4.3	Měření produkce emisí.....	43
4.3.1	Emisní kontrola.....	43
4.3.1.1	Naměřené hodnoty.....	44
4.3.2	Homologační test.....	45
4.3.2.1	Zpracování naměřených dat .....	46
4.4	Vyhodnocení.....	50
5.	Doporučení a závěr .....	52
6.	Použitá literatura.....	54
6.1	Seznam obrázků .....	57
6.2	Seznam tabulek .....	59

## 1. Úvod

Na konci 18. století byl poprvé sestrojen parní stroj. Od té doby začal intenzivní výzkum a vývoj nových agregátů, které měly v prvopočátku spíše usnadňovat práci lidem v továrnách v podobě transformace namáhavé manuální výroby na poloautomatizovanou výrobu. První motory byly proto využity jak v průmyslovém odvětví, tak i v zemědělské výrobě a vlastně všude tam, kde usnadňovaly a zefektivňovaly lidskou práci.

Dnes se motory využívají v největším měřítku v dopravě a jejich počet neustále narůstá. Největší světoví výrobci pohonných agregátů (Toyota, General Motors, Volkswagen Group a další.) se zabývají základní otázkou, jak přes rostoucí výrobu automobilů snížit spotřebu paliva a emise. Stále přísnější emisní limity tlačí automobilky, aby přicházely se stále ekologicky šetrnějším provozem automobilů a nutí je přinášet nová technická řešení.

První část práce shrne poznatky o složkách spalin, především jejich účinek na živé organismy a ekosystém. V následující kapitole budou rozepsány v dnešní době nejspíše sledované složky spalin, a které faktory nejvíce ovlivňují jejich vznik a množství. Dále pak budou konkrétně popsány jednotlivé systémy na úpravu spalin, jejich funkce a regulace pomocí součinitele přebytku vzduchu lambda.

V dnešní době jsme se již dostali do bodu, kdy jsou nové systémy na úpravu spalin velice složité, a tudíž lze předpokládat, že s přibývajícím časem buď dojde k jejich poruše, nebo bude klesat jejich účinnost. S tímto faktem počítá legislativa a v daných intervalech nařizuje vlastníkům automobilů, aby nechali své vozidlo zkontrolovat, jestli je schopné k provozu na pozemních komunikacích. V rámci této kontroly se zkouší činnost systémů na úpravu spalin jednoduchým testem, kdy se měří složení spalin při nezatíženém motoru, kde jediné odpory, které musí překonávat, jsou jeho vlastní. S poznatkem, že koncentrace většiny škodlivých látek ve výfukových plynech se dosahuje při maximálním zatížení motoru, lze logicky usoudit, že tyto emisní kontroly nejsou příliš objektivní, protože nesimulují provoz vozidla a jeho chování ve skutečném provozu.

Zdali je tato jednoduchá úvaha pravdivá se autor pokusí dokázat v experimentální části této práce.

## 2. Současný stav řešené problematiky

### 2.1 Emise spalovacích motorů

Snaha omezovat nepříznivé účinky motorů na životní prostředí se stala v posledních desetiletí součástí základních požadavků na vývoj nových typů automobilů. Normy a předpisy omezují nejen vlastní produkci škodlivin při provozu vozidla, ale i ve výrobním procesu a v poslední době už stanovují pravidla nutná pro ekologicky přijatelnou likvidaci starých vozidel.[1]

#### Výfukové plyny

Souhrnným názvem „výfukové plyny“ označujeme všechny produkty spalování zápalné směsi ve spalovacích motorech.

#### Emise škodlivin

*„Podíly plynných, kapalných a pevných částí (složek), obsažených ve výfukových plynech motoru, u nichž je škodlivý účinek prokázán nebo se předpokládá.“[1]*

#### Plynné emise škodlivin

Jsou to především tyto látky obsažené ve výfukových plynech v plynné formě:

- oxid uhelnatý CO,
- uhlovodíky HC,
- oxidy dusíku NO<sub>x</sub>.

#### Škodlivé částice

Znamenají všechny kapalné a pevné složky, zachycené na přesně určeném filtru po zředění výfukových plynů ze spalovacího motoru čistým filtrovaným vzduchem tak, aby teplota nepřesáhla 52°C.

Základní podíly škodlivých částic tvoří tyto látky:

- saze (asi 50 %),
- palivo (5 % - 10 %),
- olej (10 % - 20 %),
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + ostatní složky.

### **Karcinogenní látky**

Jsou to zejména polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) s rakvinotvorným účinkem.[2]

### **Mutagenní látky**

Jsou to látky, způsobující dědičné změny na živých organizmech.

### **Ideální průběh spalování**

Je to děj kdy atomy uhlíku (C) a vodíku (H) obsažené v palivu reagují úplně s kyslíkem obsaženým v nasávaném vzduchu. Výsledkem spalování budou v tomto případě pouze vodní páry (H<sub>2</sub>O) a oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). Toto úplné spalování proběhne pouze za „ideálních“ podmínek během spalovacího procesu, je-li k dispozici dostatečně dlouhá reakční doba bez nepříznivých vnějších vlivů.

Ostatní látky obsažené ve vzduchu se procesem spalování nezúčastní a zůstávají ve výfukových plynech v nezměněné formě.

### **Skutečný průběh spalování**

Ve spalovacím prostoru zážehového motoru však nepanují ideální poměry.

Tepelné ztráty, velmi krátká reakční doba a ne zcela dokonalé promísení paliva se vzduchem vytvářejí spolu s dalšími nepříznivými vlivy podmínky pro „skutečné spalování.“ Vedle vodních par (H<sub>2</sub>O), oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a dusíku (N<sub>2</sub>) budou výfukové plyny obsahovat také oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>), pevné částice a sirné sloučeniny. [1]

#### **2.1.1 Složení výfukových plynů**

Kromě zdravích neohrožujících látek se ve výfukových plynech spalovacích motorů vyskytuje několik desítek až stovek látek, u nichž byly škodlivé účinky na okolní prostředí prokázány nebo se předpokládají. Obsah těchto látek je rozdílný, udává se v procentech a u některých dokonce v miliontinách celku. Tato práce se bude zabývat především základními složkami výfukových plynů.

#### **Oxid uhličitý CO<sub>2</sub>**

Oxid uhličitý vzniká dokonalým spálením (oxidací) uhlíku (C) obsaženého v palivu prostřednictvím kyslíku (O<sub>2</sub>), který se nachází v nasávaném vzduchu. Oxid uhličitý je nejedovatý produkt spalování.

Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> ve vzduchu se u lidí a suchozemských živočichů projevuje zvýšením kyselosti krve. Jejím projevem může být únava, zvýšení krevního tlaku a poruchy ve struktuře kostí.[4]

Negativně působí CO<sub>2</sub> na životní prostředí vytvářením radiační clony omezující sdílení tepla ze zeměkoule sáláním. To má vést k průběžnému zvyšování teploty a posunu klimatických poměrů s celou řadou fatálních důsledků (tání ledovců => zvýšení hladiny oceánů). Obecně vžitý název pro popsany jev je „skleníkový efekt.“ [2]

Naměřená hodnota CO<sub>2</sub> je nejen měřítkem kvality spalování, ale i např. těsnosti výfukového potrubí. Jinak řečeno, čím více se blíží hodnota CO<sub>2</sub> maximu, tím dokonalejší je spalování a je nižší podíl CO a HC. Naopak jsou-li obsahy CO a HC nízké a hodnota CO<sub>2</sub> je rovněž nízká, může být spalování v pořádku, ale výfukový systém je netěsný a výfukové plyny jsou ředěny vzduchem. [1]

### **Vodní páry H<sub>2</sub>O**

Voda vzniká slučováním vodíku (H<sub>2</sub>) obsaženém v palivu s kyslíkem (O<sub>2</sub>) obsaženém v nasávaném vzduchu.

### **Dusík N<sub>2</sub>**

Dusík ve výfukových plynech pochází z nasávaného vzduchu. Nepatří mezi škodlivé prvky. Převážná část dusíku se po skončení spalovacího procesu vrací ve výfukových plynech zpět do ovzduší. Malá část reaguje s kyslíkem za vzniku oxidů dusíku NO<sub>x</sub>.

### **Kyslík O<sub>2</sub>**

Volný kyslík ve výfukových plynech pochází z nasávaného vzduchu. Používá se pro výpočet hodnoty lambda, která se kontroluje při měření funkce katalyzátoru.[9]

Ve zvětšené míře se volný kyslík vyskytuje ve výfukových plynech zážehových motorů tehdy, jedná-li se o spalování chudé směsi s přebytkem vzduchu (součinitel přebytku vzduchu  $\lambda > 1$ ).

### **Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>**

Názvem oxidy dusíku označujeme směs oxidu dusnatého (NO), oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>) a v malé míře oxidu dusného (N<sub>2</sub>O).[4]

Objem vzduchu je tvořen asi 78 % dusíku (N<sub>2</sub>) a 21 % kyslíku (O<sub>2</sub>), zbytek tvoří vzácné plyny. Chemickou sloučeninu vytváří dusík (N<sub>2</sub>) a kyslík (O<sub>2</sub>) ve spalovacím prostoru za vysokých teplot a tlaků. Čím větší je teplota a tlak ve spalovacím prostoru motoru, tím více se tvoří NO, což je plyn bez barvy i bez zápachu. NO se pak slučuje se vzdušným kyslíkem (O<sub>2</sub>) a vzniká NO<sub>2</sub>. Je to ostře páchnoucí červenohnědý jedovatý plyn napadající plíce a sliznice.[5]

Plíce na NO<sub>2</sub> ve vdechovaném vzduchu (resp. na přítomnost kyseliny dusičné (HNO<sub>3</sub>), která vzniká pohlcením NO<sub>2</sub> ve vodě na stěnách sliznice) reagují jako na začínající hoření a automaticky přivírají přístup vzduchu. Důsledkem je pocit dušení a nucení ke kašli. Tento nežádoucí jev nastává již při velmi nízkých koncentracích, resp. při krátkých expozičních dobách.[2][8]

Ve spalovacím motoru vzniklé NO<sub>x</sub> tvoří z 90 % NO, který v přírodě oxiduje na NO<sub>2</sub> (zejména za přítomnosti O<sub>3</sub>). Oxidy dusíku se spolu s uhlovodíky (HC) podílí na tvorbě tzv. „letního smogu.“[5]

### ***Oxid uhelnatý CO***

Oxid uhelnatý (CO) je velmi jedovatý plyn, bez barvy a bez zápachu. Na krevní barvivo se váže intenzivněji než kyslík za vzniku karboxyhemoglobinu (COHb). Tím je funkce dýchacích barviv (tedy distribuce kyslíku) blokována a jednotlivé orgány jsou poškozovány nedostatkem kyslíku. Nejdříve je poškozován mozek, a proto je označován jako nervový plyn. Již koncentrace 0,5 % ve vzduchu, který vdechujeme, může být během 30 minut smrtelná. Nižší koncentrace způsobují bolest hlavy, únavu a ovlivňují smyslové vnímání. Jelikož výfukové plyny jsou těžší než vzduch, nebezpečí hrozí zejména u podlahy a v montážních jámách. Za zvýšené koncentrace nejedovatého CO<sub>2</sub> je účinek CO zvýšen. [2][5][22][33]

CO jako významná složka výfukových plynů má značnou vypovídací schopnost ohledně složení zápalné směsi, ať už je připravována karburátorem nebo elektronicky řízeným vstřikováním.

### ***Uhlovodíky HC (hydrocarbon)***

Skládají se z velkého množství různých sloučenin vodíku a uhlíku. Ve výfukových plynech se objevují jednak nespálené uhlovodíky a jednak uhlovodíky jako produkt nedokonalého spalování zápalné směsi.[22]

K nespáleným uhlovodíkům (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) patří především:

**Parafiny** - látky prakticky bez zápachu, ale s narkotickým působením a slabě dráždíci pokožku.

**Olefiny, acetyleny** - látky s nevýrazně nasládlou vůní, slabě dráždíci pokožku. Značně se podílejí na tvorbě smogu a ovlivňují stav ozónu.[9]

**Aromatické polycyklické sloučeniny (PAH)** - látky s charakteristickým zápachem a narkotickým působením, známé jako nervové jedy s rakovinotvorným působením např. **benzopyren**. [5]

K částečně spáleným uhlovodíkům patří:

**Aldehydy** (např. velmi jedovatý **formaldehyd**  $C_nH_mCOH$ ), **ketony** ( $C_nH_mCO$ ) apod. I v malé koncentraci dráždí sliznice a oči. Poznají se podle zápachu.

### **Oxid siřičitý $SO_2$**

Štiplavě páchnoucí, bezbarvý plyn. Silně napadá sliznice, potlačuje odolnost vůči infekcím. 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 siřné kyseliny, které škodí životnímu prostředí (především lesním porostům) ve formě tzv. „kyselých dešťů“. [5][11]

### **Pevné částice PM (particulate matter)**

Částicemi rozumíme jednak pevné částice - saze a popel (v malé míře prach, rez, otěr), a jednak kapalné částice - uhlovodíky a sulfáty.

Saze jako čistý uhlík obecně neohrožují zdraví člověka, ovšem mohou obtěžovat a omezovat viditelnost.

Pokud jsou součástí sazí i uhlovodíky, počítáme je mezi škodlivé částice. Pokud se malé částice sazí (o průměru asi  $1 \mu m$ ) dostanou hluboko do plic, mohou při velké koncentraci nastat stejné potíže (mechanické podráždění) jako při vdechování jemných prachových částic. Usazeniny sloučenin HC (aromatické uhlovodíky) na uhlovodíkové jádro jsou považovány za karcinogenní případně mutagenní. [1]

### **Sloučeniny olova**

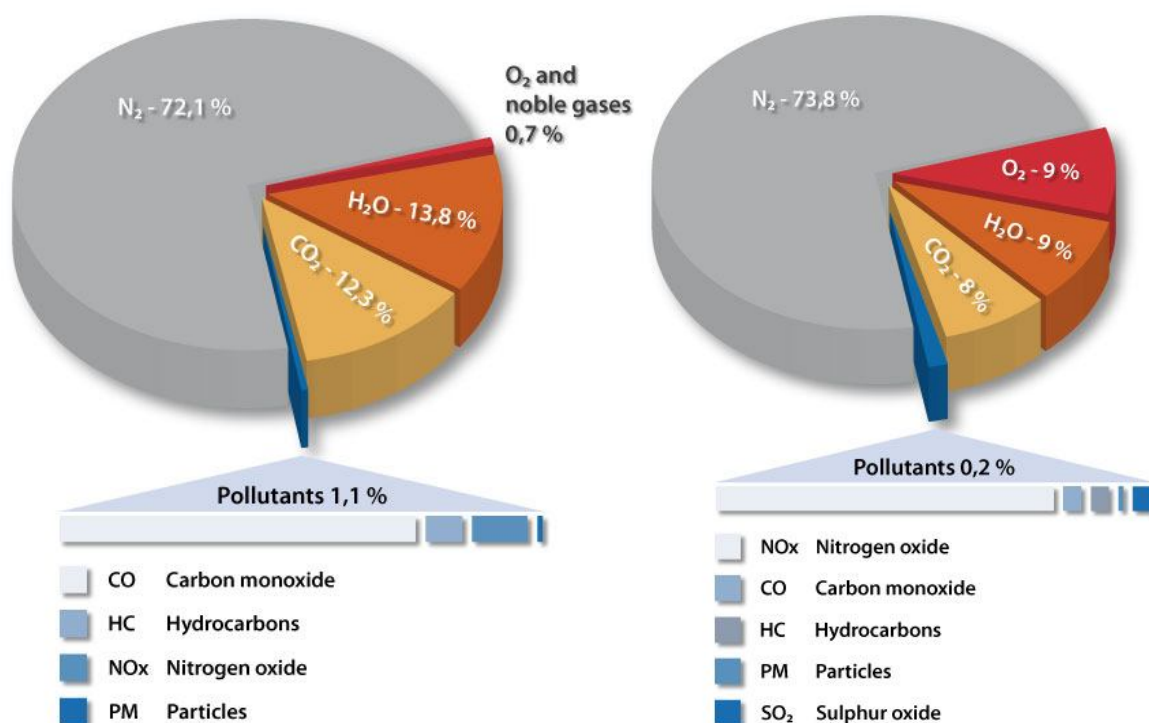
Olovo je těžký kov, který se kumuluje v živých organismech. Sloučeniny olova působí v lidském organismu jako silný jed, napadající krevní buňky, kostní dřeň a nervový systém. Olovnaté sloučeniny vznikají při spalování paliv pro zážehové motory starších vozidel, do kterých jsou přidávány pro zvýšení antidekonační odolnosti (snížení citlivosti na klepání motoru). U moderních motorů se používá pouze bezolovnatých paliv. [5][9]

### **Ostatní emitované škodliviny**

Mezi další škodlivé prvky emitované provozem vozidel patří emise vznikající opotřebením jak součástí spalovacího motoru, podvozkových částí a pneumatik, tak i vlastním obrušováním povrchu vozovky.

Mezi tyto prvky lze stále řadit například olovo (Pb), které se vyskytuje jako výplňový materiál v pneumatikách, nebo jako přísada do maziv a ložisek. Dalším těžkým kovem, který lze nalézt v pneumatikách, je kadmium (Cd). Zdrojem toxických kovů je také brzdové a spojkové obložení. Zde lze nalézt např. nikl (Ni) nebo chrom (Cr). Z katalyzátorů je pak možné uvolňování platinových kovů, jako je platina (Pt), rhodium (Rh) či palladium (Pd).[6]

Při středním zatížení a středních otáčkách spalovacího motoru představují emise všech škodlivin zážehového motoru asi 1 % objemu výfukových plynů (Obr. 1). Oproti tomu emise vznětového motoru pouze 0,2 % (Obr. 2).



Obr. 1: Složení výfukových plynů zážehového motoru.[3]

Obr. 2: Složení výfukových plynů vznětového motoru.[3]

Citlivost osob k jednotlivým plynům je velmi rozdílná. Některé předpokládané účinky (snížení odolnosti proti infekcím dýchacích cest, karcinogenní působení velmi nízkých koncentrací částic, podíl na vzniku alergií atd.) nebyly dosud jednoznačně prokázány, ale jsou velmi pravděpodobné.[5]



## 2.1.2 Mechanismy vzniku hlavních škodlivin

Průběh spalování ve spalovacích motorech je velice složitý děj, který je v každém okamžiku ovlivňován právě existujícími koncentračními, teplotními a proudovými poli. Jednodušší je posouzení podmínek u motorů, spalujících homogenní směsi (palivo je odpařeno). V této kapitole bude provedeno pouze stručné základní posouzení vzniku hlavních škodlivin u zážehových a vznětových motorů.

### Oxid uhelnatý CO

Vzniká především u zážehových motorů nedokonalým spalováním při nedostatku kyslíku ( $\lambda < 1$ ). Koncentrace oxidu uhelnatého při spalování bohaté směsi v zážehovém motoru dosahuje řádově jednotky %, výjimečně (při spalování extrémně bohaté směsi) může překročit 10 %.[2]

Nedostatek kyslíku může být místní (v některých válcích nebo v některých oblastech motoru) nebo časový (při hodnotě  $\lambda = 1$  - stechiometrická směs - se v některých pracovních obězích spaluje bohatá směs, jako důsledek fluktuace směšovacího poměru). Oxid uhelnatý je pak přítomen ve spalínách spolu s kyslíkem. Globální nebo lokální nedostatek kyslíku lze pak označit za hmotově-bilanční příčinu emise CO. Za vysokých teplot v plameni reakce probíhající téměř do nastavení rovnováhy. Během expanze při snížené teplotě (pod cca 1700°C) reakce „zamrznou“ s konzervací obsahu CO ve výfukových plynech. U chudých směsí „zamrzají“ větší objemy pomalu hořící náplně s relativně nízkou teplotou plamene, což vede k překvapivému nárůstu koncentrace CO.[5][8]

U vznětových motorů, při vesměs velkých přebytecích vzduchu, CO oxiduje na CO<sub>2</sub>. Koncentrace CO jsou desetinové ve srovnání se zážehovými motory viz Obr. 1 a Obr. 2. K výraznějšímu nárůstu dochází v oblastech vyššího zatížení. Dříve než se však projeví vlivem vysokého zatížení prudký nárůst emisí CO, je dosažena hranice kouřivosti, na kterou se nastavuje maximální dodávka paliva řídicí jednotkou. Nejvyšší produkce emise CO se tvoří u spalovacích systémů s tvorbou směsi ze stěny (komůrkové motory) při nízkém zatížení (běh na prázdno). Tvorba směsi je nepříznivě ovlivněna nízkou teplotou stěny.[2][8]

V oblasti bohaté spalovací směsi platí lineární závislost, což znamená, že s klesající hodnotou lambda přímo úměrně stoupá obsah CO. V oblasti chudé směsi je vlivem přebytku vzduchu obsah CO na hodnotě lambda nezávislý a je nízký. V oblasti stechiometrického složení směsi je obsah CO asi 0,3 - 0,5 %.[9]

## Uhlovodíky HC

Optimální směšovací poměr z hlediska obsahu nespálených uhlovodíků je v oblasti chudé směsi  $\lambda = 1,1 - 1,2$  nižší i vyšší součinitel přebytku vzduchu vede ke zvyšování koncentrací HC ve výfukových plynech. Obdobně jako CO i HC klesají se zvyšujícím se zatížením motoru. Objemový obsah HC ve výfukových plynech zážehového motoru je významným diagnostickým parametrem. Jelikož podíl HC je značně menší než CO, měří se pomocí analyzátorů výfukových plynů v ppm (parts per milion = počet částic na 1 milion).[8][9]

Platí:

100 % objemu = 1 000 000 ppm

1 % objemu = 10 000 ppm

Nespálené uhlovodíky se tvoří v místech s nízkou teplotou plamene a s pomalou rychlostí hoření vlivem příliš bohaté nebo chudé směsi. Dalšími příčinami může být vynechání zážehu, zhasnutí zapálené směsi v důsledku její nízké teploty nebo nedostatečná energie elektrického výboje, případně i nerovnoměrného rozdělení směsi ve válci. Vznikají v lokálních místech spalovacího prostoru, především ve štěrbinách a v blízkosti stěn, kde jsou nízké teploty plamene. V těchto zónách vznikají částečně oxidované nebo krakované uhlovodíky. Lokální výskyt koncentrace HC v závislosti na vzdálenosti od stěn spalovacího prostoru má přibližně hyperbolický charakter. Kromě nedokonalého hoření paliva je příčinou obsahu nespálených uhlovodíků i pronikání motorového oleje do spalovacího prostoru netěsnostmi (typický modrý kouř při špatné funkci pístních kroužků). Při dostatku kyslíku a vysoké teplotě mohou nespálené uhlovodíky v průběhu expanze nebo ve výfuku dohořovat.[32]

Všechny škodliviny, ale především emise HC jsou velmi ovlivněny způsobem tvorby směsi, průběhem hoření, tvarem spalovacího prostoru, teplotou spalovacího prostoru (příznivý vliv vyšší teploty).

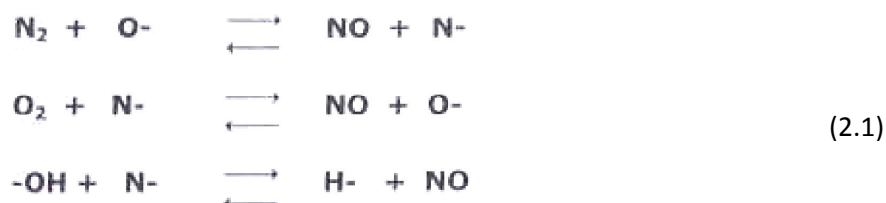
U vznětových motorů je tvorba HC odlišná s ohledem na způsob tvoření směsi (nehomogenní směs) a na jiné chemické složení paliva. Koncentrace HC se obvykle zvyšuje s rostoucím  $\lambda$ . Vznětové motory s přímým vstřikem vykazují zpravidla vyšší hodnoty emisí škodlivin než motory komůrkové. Vzhledem k vysokým přebytkům vzduchu však při provozní teplotě motoru koncentrace zdaleka nedosahují hodnot zážehových motorů a obvykle nejsou problematické. [7]

Na absolutní výši emisí HC má silný vliv vynechávání zapalování, špatné seřízení motoru, jeho celkový technický stav a mechanické poškození součástí.[9]

## Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>

NO vzniká z větší části pomalou řetězovou reakcí Zeldovičova mechanismu, takže se nedosahuje rovnovážných koncentrací, zejména při nižších teplotách, kdy se rozklad NO zastaví („zamrzne“).

Mechanismus doplnil Lavoie pro obsah radikálů při spalování uhlovodíků (obvykle se určují z rovnovážných reakcí)



Pro jejich znatelnou tvorbu je zapotřebí vysokých teplot nad cca 1700°C, tlak tyto reakce ovlivňuje málo; zřejmě je vazba na přítomnost hydroxylového radikálu -OH (objeví se při spalování látek, obsahujících vodík či při rozkladu vody). Důležitá je nejen teplota plamene, ale také další teplotní historie spalin po shoření paliva v určitém místě, kdy se oxidy dusíku stále tvoří. Je třeba vzít v úvahu místní, nikoli střední teplotu. NO se za přebytku kyslíku dále oxiduje na NO<sub>2</sub>, tato oxidace probíhá při malém obsahu kyslíku ve spalinách až v atmosféře (tvorba imisí z emisí). [7]

Nejvyšších teplot plamene dosahují mírně bohaté směsi, v nichž však relativně pomalou reakcí vzniku NO brzdí nedostatek kyslíku, rychleji vázaného oxidací paliva. Proto je maximum tvorby NO posunuto vždy do mírně chudé směsi při  $\lambda = 1,05 - 1,1$ . Na tvorbu má vliv i poloha hoření vůči HÚ a jeho délka. Nejvyšší střední teploty přináší rychlé hoření poblíž HÚ, neovlivněné ještě intenzivní expanzí. Tím více jsou ovlivněny nejdříve shořelé vrstvy náplně, které mohou být dokonce po hoření ještě komprimovány. Proto je rychlost hoření spolu s předstihem zážehu dalším význačným faktorem tvorby NO. Teploty plamene lze snížit nezávisle na  $\lambda$  přimísením nehořícího plynu s malým obsahem kyslíku do směsi, např. spalin (recirkulace výfukových plynů).[5]

Produkce NO<sub>x</sub> souvisí také s charakterem spalování - jednofázová homogenní směs, byť s lokálně se vyskytujícími rozdílnými koncentracemi, s převažující kinetickou fází hoření produkci významně zvyšuje. To je typické pro zážehové motory. Emise NO jsou vysoké a emise NO<sub>2</sub> velmi nízké. [7]

U vznětových motorů je výskyt NO<sub>x</sub> nižší ve srovnání se zážehovými motory (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 nižší emise  $\text{NO}_x$  než u motorů s přímým vstřikem vlivem výraznějšího vrstvení směsi a pomalejší rychlosti hoření.[8]

### **Emise částic**

Saze se tvoří při spalování neodpařených kapek paliva v prostředí s vysokou teplotou a při extrémně nízkých lokálních hodnotách přebytku vzduchu. Dochází ke krakování (polymerizaci uhlovodíků odštěpením makromolekul bohatých na uhlík). Tvorba sazí se zvětšuje s klesajícím přebytkem vzduchu.[1]

Emise pevného uhlíku tedy souvisí zejména s kvalitou rozprášení paliva při jeho vstřikování do válce vznětového motoru. Je zřejmé, že přísun kyslíku k částicím paliva se zlepšuje se zvětšováním celkového množství vzduchu, proto se emise částic snižuje s rostoucí hodnotou  $\lambda$ . Vznětové motory pracují tedy i při plné přípustí paliva s hodnotami součinitele přebytku vzduchu, jejichž použití u zážehového motoru by bylo označeno za provoz s (extrémně) chudou směsí.[2]

U motorů pracujících s homogenní směsí je produkce částic nevýznamná, nejvíce se podílí popel ze spalovaného mazacího oleje.

Ve výfukových plynech se vyskytují jak v pevné, tak v kapalně fázi. Pevné částice jsou složeny zejména ze sazí, karbonu, popela, sloučenin síry a kovů (zejména síranů), nitridů, oxidů síry a vody, vázané na sloučeninách síry. Kapalné částice jsou tvořeny kapénkami uhlovodíků a pocházejí jak z paliva, tak i z motorového oleje. Při vstupu výfukových plynů do atmosféry dojde účinkem rychlého ochlazení výfukových plynů jejich zředěním atmosférickým vzduchem ke spojování těchto částic, přičemž výsledný rozměr takto emitovaných pevných částic mnohonásobně převyšuje rozměr původních částic ve spalinách. Ve většině případů se rozměr škodlivých částic pohybuje v rozsahu 0,3 - 1  $\mu\text{m}$ , ve výfukových plynech však může mít menší množství škodlivých částic velikost až 5 - 30  $\mu\text{m}$ , na stěnách spalovacího prostoru a výfukového systému motoru mohou škodlivé částice vytvářet seskupení i větších rozměrů.[10]

### **Oxid uhličitý $\text{CO}_2$**

Oxid uhličitý je produktem dokonalé oxidace uhlíku a pro dané složení směsi je jeho vysoký obsah ve výfukových plynech indikátorem dokonalé uskutečněného spalovacího procesu. Protože jeho hodnota obsahu odpovídá dokonalému spalování, je měřítkem dokonalého utěsnění výfukového potrubí. Při velmi nízkých hodnotách a správném obsahu  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  je vadný, dřevavý výfuk. Cesta ke snižování produkce  $\text{CO}_2$  vede přes snižování spotřeby paliva, případně používání paliva s menším podílem uhlíku.[2][9]

## 2.2 Lambda sonda, lambda regulace

Zjišťování hodnoty součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  je v současné době pro regulaci složení výfukových plynů jednou z nejdůležitějších věcí. K jeho stanovení se používají lambda-sondy.

### 2.2.1 Historie

Fyzikální princip je v případě lambda sondy známý již od minulého století. Objevil jej německý fyzik a chemik Walter Nernst. Ten již v roce 1897 zkonstruoval tzv. „Nernstovu lampu“, tedy přístroj, sestávající z keramické tyčky, která je vyhřívána elektrickým proudem, pomocí které je možné získat velmi bílé světlo.

Nernst přišel na to, že keramický materiál (oxid zirkoničitý  $ZrO_2$ ) se od určité teploty stává vodivým a že takto je možné měřit obsah kyslíku v plynech.[9]

### 2.2.2 Princip funkce

Keramická trubička se ohřeje, a když je uvnitř a vně rozdílný obsah kyslíku v plynech, dojde k pohybu kyslíkových iontů a tím ke vzniku elektrického napětí. Na jedné straně keramiky pak může být jako referenční plyn atmosférický vzduch s přirozeným obsahem kyslíku 21 %. Velikost napětí je měřítkem obsahu kyslíku v plynech.

Myšlenka využití tohoto principu u automobilu se stala nutností v době, kdy začal být aktuální požadavek regulovat tvorbu směsi paliva se vzduchem a s využitím požadavku na snížení procenta exhalací ve výfukových plynech. V roce 1972 obdržela firma Bosch první patenty v oblasti měření kyslíku ve výfukových plynech automobilových motorů. Po dlouhém konstrukčním hledání, kdy se řešily např. konstrukce ochranné trubice, konstrukce vnitřních a vnějších kontaktů a teplotní parametry, se podařilo v roce 1976 dokončit první lambda sondu. Pod názvem Bosch-sonda se objevila zabudovaná v americkém provedení vozů Volvo. Za úspěšnou aplikaci obdržela firma Volvo v roce 1977 jako první cenu USA za ochranu životního prostředí, součástí byla i sonda.[9]

### 2.2.3 Součinitel přebytku vzduchu

Součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  je poměr mezi skutečným množstvím vzduchu při spalování a množstvím vzduchu teoreticky potřebným pro dokonalé spalování, které je dáno stechiometrickým směšovací poměrem (minimální množství vzduchu).

$$\text{Součinitel přebytku vzduchu } \lambda = \frac{\text{množství vzduchu v kg}}{\text{teoretická potřeba vzduchu v kg}}$$

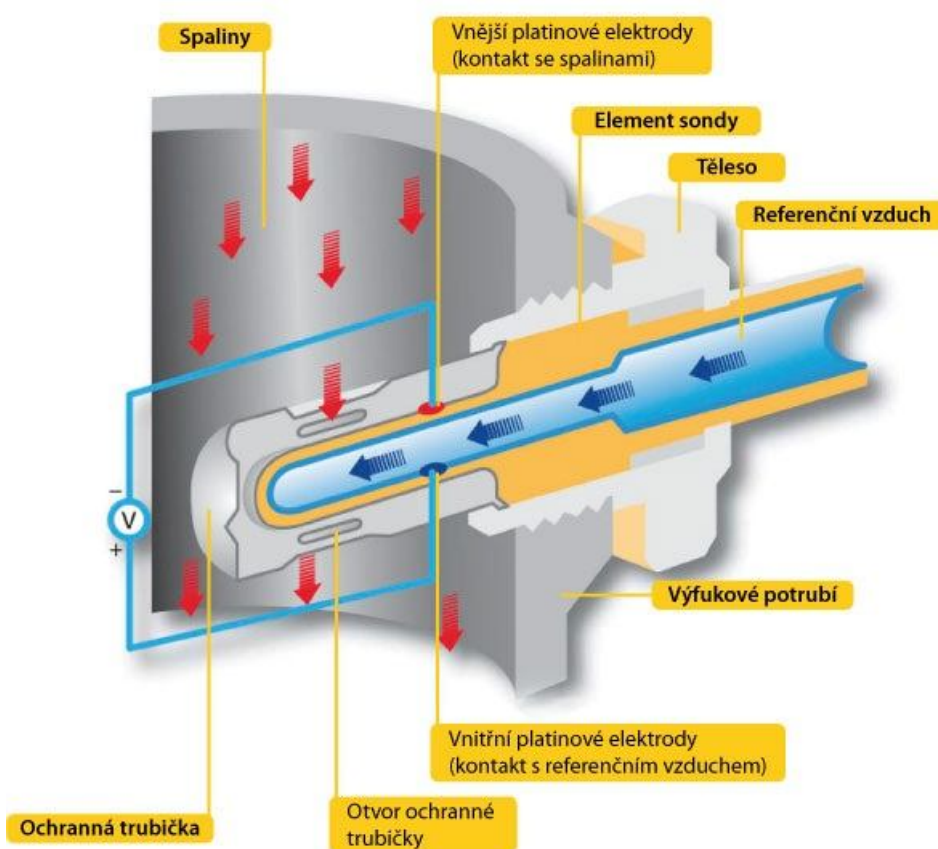
Při teoretickém směšovacím poměru 1 : 14,7 je součinitel přebytku vzduchu  $\lambda = 1$ . Při něm získá motor přesně tolik vzduchu, kolik je pro dokonalé spálení paliva potřebné.

## 2.2.4 Druhy používaných sond

### 2.2.4.1 Lambda sonda s oxidem zirkoničitým

Je založena na principu galvanického kyslíkového článku. Pevný elektrolyt se skládá z jednostranně uzavřeného, pro plyn neprůchodného, keramického tělesa (oxid zirkoničitý  $ZrO_2$ ), který je stabilizován oxidem yttria ( $Y_2O_3$ ). Povrchové plochy jsou oboustranně opatřeny elektrodami z tenké, vzduch propouštějící platinové vrstvy. Proti nečistotám je navíc chráněna průchodnou porézní vrstvou keramického materiálu.[16]

Vnitřní prostor sondy je spojen s okolním vzduchem, který slouží jako referenční plyn. Vnější je vsunut do proudu výfukových plynů.



Obr. 3: Princip funkce lambda sondy z oxidu zirkoničitého.[14]

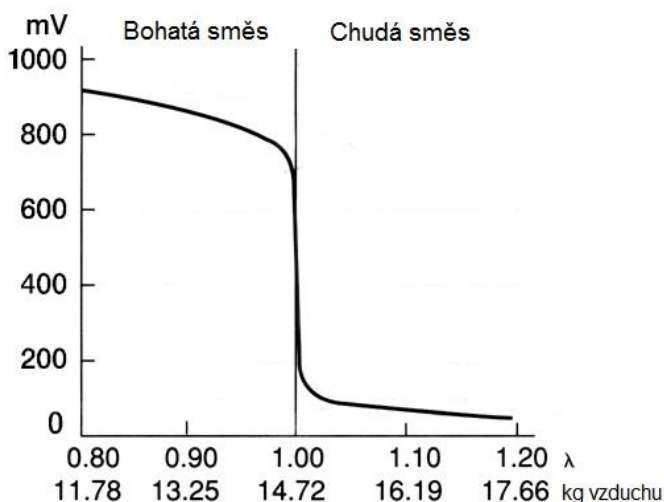
Činnost této sondy je na principu vodivosti materiálů. Keramický materiál se stává vodivým od teploty  $350^{\circ}C$  pro ionty kyslíku. Protože na obou stranách keramického materiálu sondy je poměr obsahu kyslíku rozdílný, vzniká tak mezi platinovými elektrodami rozdílný elektrický potenciál. Velikost napětí je závislá na obsahu kyslíku ve výfukových plynech a na teplotě snímače. Toto napětí je měřítkem pro rozdíl kyslíku na obou stranách sondy.[16]

Zbytkový obsah kyslíku je ve výfukových plynech závislý v největší míře na směšovací poměru paliva a vzduchu. Dokonce i při provozu s přebytkem paliva ( $\lambda < 1$ ) je ve výfukových plynech obsažen zbytkový kyslík. Při  $\lambda = 1$  je obsah kyslíku ve výfukových plynech na hodnotě 0,2 - 0,3 objemových %. Z těchto důvodů je možné brát kyslík jako měřítko pro vyhodnocení hodnoty součinitele přebytku vzduchu ve spálené směsi paliva a vzduchu.[9][16]

Tohoto faktu využívají katalyticky aktivní lambda sondy, které vytvoří termodynamickou rovnováhu plynů. Platinová elektroda na vnější straně účinkuje jako malý katalyzátor. V tomto případě má charakteristika této lambda sondy při hodnotě  $\lambda = 1$  skokový průběh. Při vysokých koncentracích, kdy není sonda již schopna udržovat termodynamickou rovnováhu, vykáže určité hodnoty napětí, které vykazují posun poměru přebytku vzduchu, jeho součinitele. Napětí na lambda sondě je tak závislé na obsahu kyslíku ve výfukových plynech.[17]

**Při jednotlivých režimech chodu motoru pak dosahuje:**

- při bohaté směsi hodnoty napětí jsou v rozsahu 800 - 1000 mV
- při provozu chudé směsi je hodnota napětí cca 100 mV
- v přechodové fázi se napětí mění skokově
- v oblasti  $\lambda = 1$  je napětí v rozsahu 450 - 500 mV



Obr. 4: Napěťový skok lambda sondy při 600°C.[16]

Napětí referenční a napětí lambda sondy je porovnáváno průběžně. Na tomto základě porovnání je prováděna korekce doby vstřikování paliva. Regulace je plynulá. Při nízkých otáčkách integrátor regulaci zpomaluje a její četnost je při volnoběhu asi 1,0 - 1,5 s. Při vyšších otáčkách a zvýšeném zatížení probíhá až 70x za sekundu. Směšovací poměr palivo/vzduch zůstává v rozmezí hodnot

$\lambda = 0,99 - 1,002$ . To je velmi malé pásmo a velmi úzce opisuje hodnoty stechiometrického poměru. Jedná se tedy o shodu s teoretickým směšovací poměrem.

Reakční doba souvisí s měnícím se složením směsi výfukových plynů a jejich teplotě. Při teplotě keramiky pod  $350^{\circ}\text{C}$  reaguje sonda v oblasti sekundových časových hodnot, při teplotě okolo  $600^{\circ}\text{C}$  pak v časech menších než 50 ms.

Po startu je regulace vypnuta do zahřátí na teplotu min.  $350^{\circ}\text{C}$ . Vysoké teploty nad  $900^{\circ}\text{C}$  vedou k destrukci materiálu sondy a jejímu poškození. Provozní teplota sondy by neměla překročit  $850^{\circ}\text{C}$ . Sonda snese krátkodobé zatížení teplotou až  $930^{\circ}\text{C}$ .

Současné sondy jsou opatřeny vyhříváním. Pomocí odporového tělíška je teplota keramického materiálu upravena v průběhu 20 - 30 sekund na provozní teplotu lambda sondy (cca  $200^{\circ}\text{C}$ ) a může tak být zahájena lambda regulace podstatně dříve. Současné je prodloužena vlastní životnost lambda sondy až na 150 tis. km. Vyhříváním je dosaženo optimálního provozu sondy a dosaženo i stabilních hodnot regulace v nejkritičtější době pro tvorbu emisí, v oblastech studeného spouštění, zahřívání a přechodových stavech. Při chodu motoru je vyhřívání stále v činnosti. Pro bezporuchový provoz sondy je důležité dodržet poslední podmínku, a to je použití bezolovnatého benzínu.[9]

#### **2.2.4.2 Odporová lambda sonda**

Oxidační polovodiče, oxid titaničitý ( $\text{TiO}_2$ ) nebo titanid stroncia mění objemovou vodivost se změnou koncentrace prázdných míst na mřížce  $\text{O}_2$  oxidu. Tento efekt je závislý na teplotě a z toho plyne, že hodnota lambda souvisí s kvalitou řízení a regulace vyhřívání. Tento typ odporové lambda sondy se používá u vozidel BMW se systémem řízení MS40. Odpor sondy je závislý na tlaku kyslíku ve výfukových plynech (partikulární tlak). Ten je vyhodnocován přes pokles napětí na odporu, zapojeném do série. Změna odporu je opět skoková při hodnotě  $\lambda = 1$ . [9]

Skoková změna odporu se projeví v hodnotě napětí, které je od 3,8 V při bohaté směsi a 0,4 V při chudé směsi. Integrované zahřívání zajistí rychlé dosažení provozní teploty sondy ( $500^{\circ}\text{C}$ ). Ze signálu sondy je nepřímo odvozována teplota výfukových plynů. Při dosažení teploty nad  $700^{\circ}\text{C}$  elektronika upraví předstih zážehu, nebo provede jiný zákrok, aby předešla poškození sondy a katalyzátoru.[16]

#### **2.2.4.3 Chudá sonda**

Protože keramická sonda je v oblasti provozu chudé směsi neúčinná a vypíná se, jsou pro tuto oblast řízení činnosti motoru konstruovány tzv. chudé sondy. Jedná se o speciální zařízení, které stabilizuje činnost sondy nasazením výkonného zahřívání (18 W) a tím umožní její činnost i v oblasti složení chudé směsi odpovídající  $\lambda =$  až do 1,5. Tato sonda umožňuje použití pouze pro motory, pracující

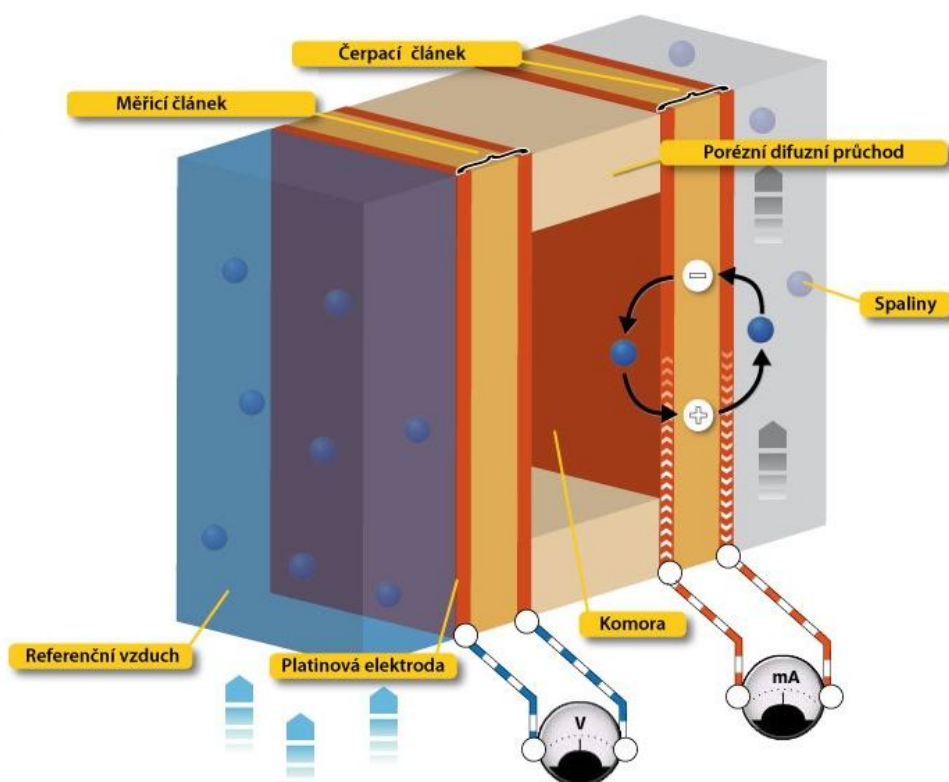


převážně v režimu chudé směsi. Pro koncepcce motorů s činností v režimech chudé, bohaté nebo smíšené směsi je výhodnější používat širokopásmovou sondu.[9]

#### 2.2.4.4 Širokopásmová sonda

Je kombinací chudé sondy s principem hraničního proudu a sondy keramické (oxid zirkoničitý). Jako dvoučlánekový snímač předává v široké oblasti ( $\lambda = 0,7 - 2,5$ ) velmi jednoznačný, lineárně vzrůstající signál.

Mezi oběma články (čerpacím a koncentračním)  $ZrO_2$  je vrstva dvou platinových elektrod uspořádaných tak, aby mezi nimi vznikla mezera 10 - 15 mm. Tato detekční komora je v pevném elektrolytu přes otvor pro vstup plynu propojena s okolním vzduchem. Otvor zároveň řídí difuzní bariéru, která určuje hraniční (mezní) proud. Elektronický okruh reguluje napětí tak, aby složení plynu v detekční komoře zůstávalo konstantně na  $\lambda = 1$  a to odpovídá napětí 450 mV. Čím větší je odchylka vstupujících spalin od této hodnoty, tím větší bude také proud čerpacího článku a tedy také výstupní signál sondy. Přečerpávací proud je proporcí potřeby kyslíku. Integrovaný topný článek vyhřívání zajišťuje provozní teplotu sondy minimálně 600°C.[15][16]



Obr. 5: Širokopásmová lambda sonda.[15]

### 2.2.5 Lambada regulace

Lambda sonda odevzdává elektronické řídicí jednotce signál napětí, jehož hodnota signalizuje potřebu obohacení nebo ochuzení směsi palivem. Skokový signál keramické lambda sondy je vhodný pro dvoubodovou regulaci.

V řídicí jednotce jsou nastaveny prahové hodnoty napětí v rozsahu okolo 500 mV. Signály pod touto hodnotou jsou pro chudou směs, nad touto hodnotou pro bohatou směs. Na tomto základě je pak prováděna regulace délky otevření vstřiku paliva, obohacení nebo ochuzení směsi. Pro zajištění plynulého chodu motoru není regulace skoková jako signál, ale pomocí integrátoru řídicí jednotky je ovlivněn signál pro otevření (zavření) vstřikovacího ventilu. Ovlivnění tak probíhá časově i funkčně pozvolna.

Stechiometrické složení směsi není možné udržet jako konstantní. Důvodem je tzv. „mrtvý čas“. Jde o okamžik od vytvoření nové směsi daného poměru a změřením složení směsi spalin ve výfukových plynech lambda sondou. Ten je dán dopravou směsi do válce, dobou trvání pracovního cyklu, cestou spálených plynů k sondě apod. Tento čas je závislý na rychlosti otáčení motoru, provozním zatížení. Ve volnoběžných otáčkách a nezatíženém stavu může být okolo jedné sekundy. Ve vysokých otáčkách a zatíženém stavu v řádu milisekund. Záleží i na vzdálenosti lambda sondy od motoru. Proto musí být skokový signál upravován, protože jinak by měl za následek skokové zvyšování obsahu emisí ve výfukových plynech.[9]

Charakteristika integrátoru je v závislosti na zatížení a otáčkách motoru, s nastavením průměrné konstantní regulační amplitudy (křivky), která je optimalizována s ohledem na nízké hodnoty emisí a dobré jízdní vlastnosti.[7]

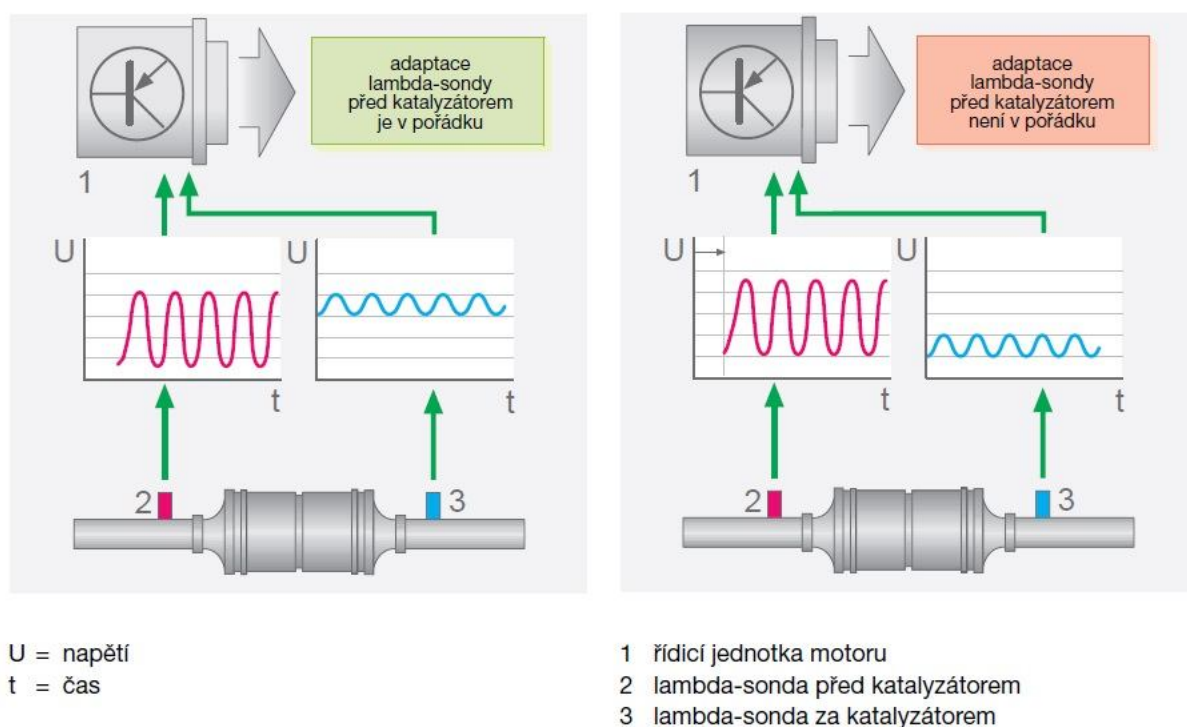
#### 2.2.5.1 Adaptivní regulace

Časové posunutí regulace lambda není možné žádným způsobem obejít. Proto se vyskytují při „náběhu“ nového provozního bodu určité odchylky od  $\lambda = 1$ , které jsou další regulací stále vyrovnávány.

Pro udržení nízkých hodnot emisí je v řídicí jednotce, její paměti přednastavena regulace lambda sondy. Přednastavení je pevně určeno pro přizpůsobení k motoru a pole charakteristik hodnot lambda je uloženo do paměti ROM (pevná paměť). V průběhu doby používání vozidla se však mohou vyskytovat „výkyvy“, jež potřebují jiná přednastavení. Těmito výkyvy se rozumí např. změny hustoty nasávaného vzduchu nebo kvality paliva, ale i opotřebení nebo zanesení vstřikovacích trysek apod.

Dalším výkyvem může být zestárnutí nebo otrávení lambda sondy před katalyzátorem, která vede k posunutí napěťové křivky (Obr. 6). Adaptace přednastavení rozpozná, že lambda regulace musí v určitých rozsazích otáček pod zatížením provádět stále stejné korekce. Zkoriguje tedy přednastavení v tomto rozsahu a zapíše je do paměti RAM (trvalá paměť), která je pod stálým napájecím proudem. Při dalším nastartování může být proto použito toto korigované přednastavení předtím, než dojde k aktivaci lambda regulace.

Při přerušení dodávky proudu pro řídicí jednotku se začíná adaptace od neutrální hodnoty. Touto adaptivní regulací řízení činnosti motoru jsou vybaveny všechny elektronické systémy řízení současných motorů.[16][17]



Obr. 6: Posun napěťové křivky lambda sondy.[21]

### **2.2.5.2 Spojitá regulace se širokopásmovou sondou**

Širokopásmová lambda sonda dodává spojitý napěťový signál. Podle signálu se může nejen rozlišit, zda je směs bohatá nebo chudá, ale také odchylka od  $\lambda = 1$ . Svým měřením zajistí kontinuální regulaci v této oblasti ve spojení s vysokou dynamikou. Parametry této regulace jsou vypočítány a uloženy v paměti řídicí jednotky, v závislosti na jednotlivých bodech provozního chodu a zatížení motoru. Širokopásmová lambda sonda na rozdíl od dvoustavové regulace může spojitě reagovat i na různé poměry vzduch/palivo.

Spojitá lambda regulace je proto používána při provozu s chudou a bohatou směsí, u motorů s přímým vstřikováním benzínu a se zásobníkovým katalyzátorem pro redukci oxidů dusíku  $\text{NO}_x$ . U zásobníkových katalyzátorů se používá krátkodobého obohacení směsi k jejich regeneraci po vyčerpání ukládacích možností a zavádění střídavě obohacené a ochuzené směsi při jejich odsiřování.[16]

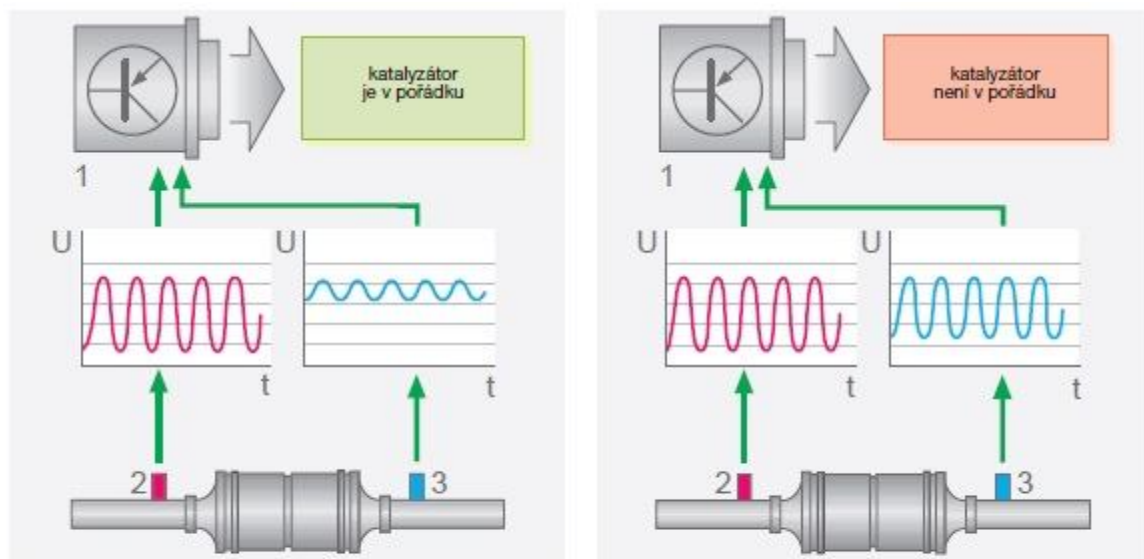
### **2.2.5.3 Lambda regulace s více sondami**

Lambda regulace s lambda sondou umístěnou před katalyzátorem má omezenou přesnost vlivem vystavení silným vlivům agresivního prostředí za vysokých teplot (stárnutí lambda sondy). Použití dvou lambda sond, z nichž jedna je umístěna před katalyzátorem a druhá za ním, umožňuje zvýšit přesnost lambda regulace, potřebou u zpřísněných emisních limitů.

Z těchto důvodů se sonda umísťuje i za katalyzátor, protože je méně vystavena vlivům působení škodlivin a je zároveň používána jako řídicí regulační člen. Princip regulace pomocí dvou sond vychází z toho, že přednastavení (např. chudé/bohaté směsi) se postupně mění pozvolna pomocí přepočtu korekční regulační smyčkou. Takto je kompenzováno posunutí nastavení u stárnoucí lambda sondy, která reaguje vlivem stárnutí materiálu pomaleji a opožděně.

Vzhledem ke zpřísněním emisních předpisů a nutnosti udržení co nejstabilnějšího složení směsi je velmi důležitá časová konstanta přednastavení regulačního členu.[16]

Tento systém se dá použít i jako diagnostika správné činnosti katalyzátoru viz Obr. 7. Stárnutím ztrácí katalyzátor schopnost ukládat kyslík a může oxidovat méně CO a HC. Řídicí jednotka motoru porovnává napětí na lambda sondě před katalyzátorem s napětím na lambda sondě za katalyzátorem a vytváří poměrnou veličinu. Jestliže se tato poměrná veličina odlišuje od povoleného rozsahu, vyhodnotí to řídicí jednotka jako závadu a uloží ji do paměti. Nastane-li tento případ, je o tom řidič informován kontrolkou emisí.[21][22]



U = napětí  
t = čas

1 řídicí jednotka motoru  
2 lambda-sonda před katalyzátorem  
3 lambda-sonda za katalyzátorem

Obr. 7: Diagnostika činnosti katalyzátoru.[21]

## 2.3 Katalyzátory

Katalyzátory, přesněji katalytické konvertory, jsou zařízení pro snižování obsahu emisí ve výfukových plynech. Již řadu let se používají v různých technologických zařízeních v chemickém průmyslu. Chemicky je katalyzátor látka, která ovlivňuje průběh reakce (snižuje její energetický nárok), aniž se jí zúčastňuje. Katalyzátor tedy není filtr, který zachycuje nečistoty, ale působí svojí přítomností.[7][39]

Rozdělujeme je na:

- oxidační katalyzátor,
- dvoulůžkový katalyzátor,
- třícestný katalyzátor.

### 2.3.1 Oxidační katalyzátor

Pracuje s přebytkem vzduchu a mění pomocí oxidace (spalování) oxid uhelnatý a uhlovodíky na vodní páru a oxid uhličitý.

Ke snížení obsahu oxidu dusíku u tohoto katalyzátoru prakticky nedochází. Pokud je použit u motoru se vstřikováním paliva, přebytkového kyslíku pro spalování se získává vytvářením chudé směsi s přebytkem vzduchu. U karburátorových motorů je dodáván sekundární vzduch před katalyzátor pomocí zvláštního podtlakového ventilu nebo odstředivého čerpadla. Poprvé byly použity v 70. letech v USA.[12][1]

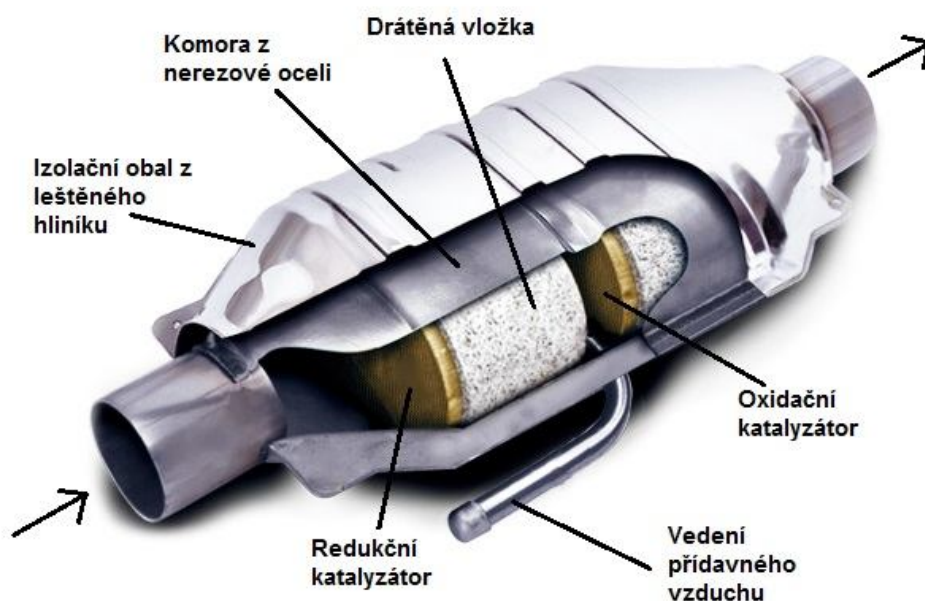
Oxidační katalyzátory dnes již nesplňují přísné emisní předpisy pro obsah oxidů dusíku u zážehových motorů. S úspěchem se ale používají u motorů vznětových v kombinaci s filtrem pevných částic (DPF). Snížení množství oxidů dusíku se zde dosahuje recirkulací výfukových plynů.[1]

### 2.3.2 Dvoulůžkový katalyzátor

Ke snižování úrovně emisí oxidu dusíku se používá jiného procesu než oxidace. Je to redukce, při níž katalyzátor redukuje oxidy dusíku na dusík a vodní páry. K tomu je potřebná bohatá nebo stechiometrická směs. Pro dosažení redukce  $\text{NO}_x$  je tedy potřebné nastavení směsi na  $\lambda < 1$ .

Potlačení všech tří škodlivých složek výfukových plynů se dosáhne zařazením obou druhů katalyzátorů za sebou. Výfukové plyny proudí nejprve přes redukční a poté přes oxidační katalyzátor.

Oxidační katalyzátor potřebuje pro svoji činnost kyslík. Protože směs přicházející do motoru je bohatá, musí být kyslík dodán přídatným vzduchem vháněným před oxidační katalyzátor. Takové uspořádání bylo používáno před zavedením třicestných katalyzátorů pod označením dvouložkový katalyzátor (Dual Bed Catalyst).[16]



Obr. 8: Dvouložkový katalyzátor.[19]

Jeho nevýhodou je:

- vznik amoniaku ( $\text{NH}_3$ ) vlivem nedostatku kyslíku při redukci oxidů dusíku
- vliv na nepříznivé poměry spotřeby paliva, vlivem činnosti oblasti bohaté směsi
- redukce oxidů dusíku je výrazně nižší než u jednokomorového katalyzátoru s regulací lambda.

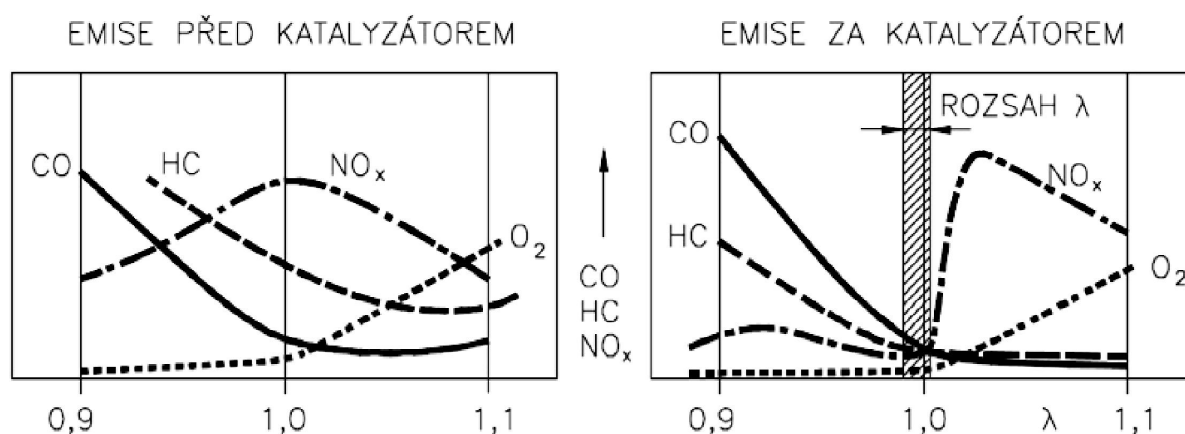
U evropských výrobců není prakticky využíván, nejvíce jej používají výrobci amerických vozidel. Je nasazen s regulací lambda, kde funguje v oblastech stechiometrického složení směsi a tím odpadá nevýhoda zvýšené spotřeby. Nepoužívá se pro složitost koncepce, nevýhody a emisím oxidů dusíku.[9]

### 2.3.3 Třícestný katalyzátor (Three-Way Catalyst)

Tento katalyzátor odstraňuje všechny tři škodlivé složky (CO, HC a NO<sub>x</sub>) současně s vysokou účinností (až 95 %).

Předpokladem vysoké účinnosti je použití lambda regulace, pomocí které je do motoru přiváděna zápalná směs o stechiometrickém složení ( $\lambda = 1$ ). Pokud se použije třícestný katalyzátor u motorů bez lambda regulace je jeho účinnost pouze asi 50 %, mluvíme o neřízeném katalyzátoru.[1][9]

Použití bezolovnatého benzínu je základní podmínkou pro dlouholetou a bezchybnou činnost katalyzátoru.



Obr. 9: Snižování emisí škodlivin v třícestném katalyzátoru.[10]

### 2.3.4 Technické provedení katalyzátorů

Rychlost požadovaných reakcí v katalyzátoru je závislá na velikosti styku aktivní hmoty s reagujícími látkami a na prostorové rychlosti průtoku výfukových plynů katalytickou komorou. Ta se mění v širokém rozmezí v závislosti na velikosti obsahu komory, objemu motoru a provozním režimu motoru. Velikost katalyzátoru se určuje individuálně pro daný typ motoru.[7]

Základní požadavky na katalyzátory:

- vysoká chemická aktivita již při nižších teplotách výfukových plynů. Tento požadavek je zajištěn použitím ušlechtilých kovů Pt, Pd, Rh. V průběhu stárnutí dochází k zanášení porů aktivní plochy. Provoz s olovnatým benzinem může vést k výraznému snížení účinnosti katalyzátoru. V současné době se již vyrábí benzin s dostatečně vysokým oktanovým číslem s přísadami, nezávadnými pro provoz katalyzátorů. Kromě olova se nepříznivě projevují



nežádoucí příměsi fosforu a síry. Podobně se projevují rovněž přísady do mazacích olejů, jako jsou sloučeniny manganu, baria, zinku a vápníku,

- malý hydraulický odpor při velké činné ploše katalyzátoru,
- mechanická odolnost proti rázům a vibracím,
- vysoká tepelná odolnost. Katalyzátor by měl pracovat s maximální stálou pracovní teplotou do 850°C a vydržet krátkodobé tepelné špičky do 1050°C,
- odolnost proti náhlým změnám pracovní teploty,
- zachování chemické aktivity po maximální dobu provozu, minimálně 100 tis. km.

Katalyzátor je tvořen z nerezového plechového obalu, nosiče a vlastní aktivní katalytické vrstvy. S ohledem na vytvoření co největší plochy se aktivní vrstva nanáší na vnější povrch chemicky inertních materiálů, které nazýváme nosiče. Podle provedení nosiče rozlišujeme katalyzátory na monolitické keramické nebo kovové.[1][7]

#### **2.3.4.1 Monolitický keramický nosič**

Je to keramické těleso, které je protaženo tisíci drobnými kanálky. Keramika je složena ze silikátu magnézia a alumina (hořčík, hliník), který je odolný proti vysokým teplotám. Monolit nosiče citlivě reaguje na napětí a musí být pevně uložen v obalu. Mezi obalem a nosičem je elastická kovová vložka z vysocelegovaného drátu (průměr 0,25 mm). Jejím úkolem je zachycovat a eliminovat nepříznivě působící vlivy roztažnosti materiálu vlivem teploty, mechanické namáhání provozem, tlak výfukových plynů apod. Pro snížení tepelných ztrát je použita izolace z hliníku a silikátu. Je třeba věnovat značnou pozornost dokonalému utěsnění, aby co nejvíce výfukových plynů procházelo vlastní katalytickou hmotou. Vymezení axiální polohy keramického tělesa je zajištěno buď tvarováním pláště, nebo vymezení kovovými kroužky. Velmi důležité je věnovat pozornost přivádění výfukových plynů do katalyzátoru. Navedení proudu by mělo zajistit průtok nosičem tak, aby byl zatopen celý příčný průřez.[7][12]

#### 2.3.4.2 *Kovový nosič*

Je vyroben ze spirálně vinutých vrstev, které střídají vlnitý a hladký plech tloušťky 0,04 mm. Velmi tenké stěny takového tělesa kladou výfukovým plynům menší odpor než kanálky v keramickém monolitu. Používá se materiálu s vysokou odolností vůči vysokým teplotám (až 1300°C) a korozi.[7][32]

Používal se u předřazených nebo startovacích katalyzátorů, které byly umístěny před hlavním katalyzátorem, protože po spuštění motoru dosahují rychleji provozní teploty. Tím je dosaženo vyšší účinnosti katalytické přeměny krátce po startu. I přes vyšší cenu, oproti keramickým katalyzátorům, se právě z tohoto důvodu používají stále častěji i jako jediné (hlavní) katalyzátory. Další výhodou je možnost vytvoření větší plochy průchozích kanálků, necitlivost vůči vibracím a rychlým změnám teploty.[1][12]

Kovové katalyzátory jsou vhodné pro benzínové a dieselové motory i motory poháněné alternativním pohonem LPG/CNG.[20]

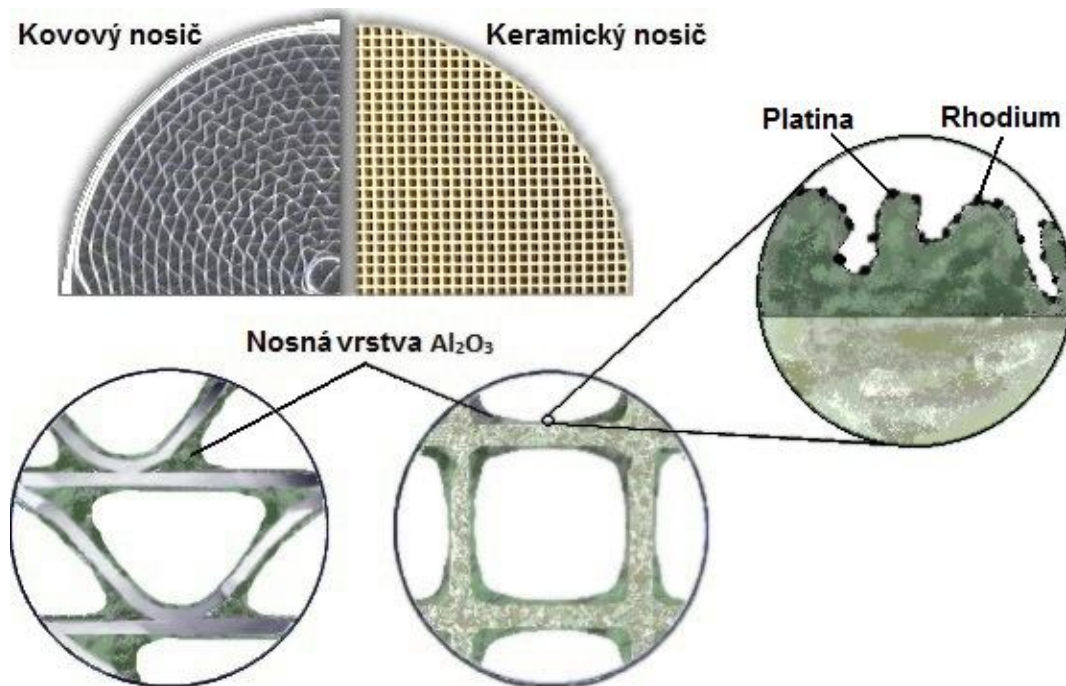
#### 2.3.4.3 *Vrstvy katalyzátoru*

Povrch keramických i kovových nosičů je opatřen základní nosnou vrstvou (podkladem) z porézního oxidu hlinitého  $Al_2O_3$  („wash-coat“), která vzhledem ke svému nerovnému povrchu zvětšuje plochu nosiče až 7000 krát (Obr. 10).[1]

Na této vrstvě je nanášena katalyticky aktivní vrstva:

- u oxidačních katalyzátorů - platina a palladium
- u třícestných katalyzátorů - platina a rhodium.

Platina urychluje reakci oxidace uhlovodíků a oxidu uhelnatého, rhodium ovlivňuje redukci oxidů dusíku. Obsah ušlechtilých prvků (kovů) obsažených v jednom katalyzátoru je 2 - 3 g.[12]



Obr. 10: Detail kovových a keramických nosičů.[18]

Důležitou úlohu, stejně jako u lambda sondy, hrají podmínky pro činnost katalyzátoru. Základní je teplotní zatížení a jejich provozní teplota. Přeměna škodlivin začíná až od teploty 250°C. Ideální provozní podmínky pro vysoký stupeň přeměny a dlouhou životnost katalyzátoru je provozní teplota kolem 400 - 800°C. Zesílení stárnutí je při provozování v oblasti tepelného režimu mezi 800 - 1000°C, kdy dochází ke spékání ušlechtilých kovů a nosné vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , což vede ke zmenšování povrchu aktivní hmoty (tepelné stárnutí). Důležitou roli hraje i čas provozu v tomto teplotním režimu. Nad 1000°C se velmi silně urychluje tepelné stárnutí katalyzátoru, které vede k jeho nefunkčnosti.[1]

Tyto vlastnosti jsou důležité pro umístění katalyzátoru do výfukového potrubí. Nalezením kompromisu, který je v kritické oblasti kolem 950°C. Za příznivých podmínek se dosahuje jeho životnosti kolem 150 tis. km.

Vlivem chybných funkcí motoru, např. vynecháváním zápalu může dohoříváním nespáleného paliva v katalyzátoru zvýšit teplotu až nad 1400°C. Taková teplota vede k roztavení nosiče katalyzátoru a k jeho úplnému zničení. Totéž nastane při použití nevhodného paliva (olovnatý benzin, nafta). Také zbytkové spálené i nespálené oleje se usazují v pórech katalyzátoru a zneprůchodňují aktivní vrstvu, dochází k tzv. „otravě“ katalyzátoru. Pro dokonalou a bezporuchovou funkci a dlouhodobou životnost je tedy nutná dokonalá a perfektní údržba motoru, jeho seřízení a technický stav, hlavně pístové skupiny.[1][7]

## 2.4 Zpětné vedení výfukových plynů (recirkulace)

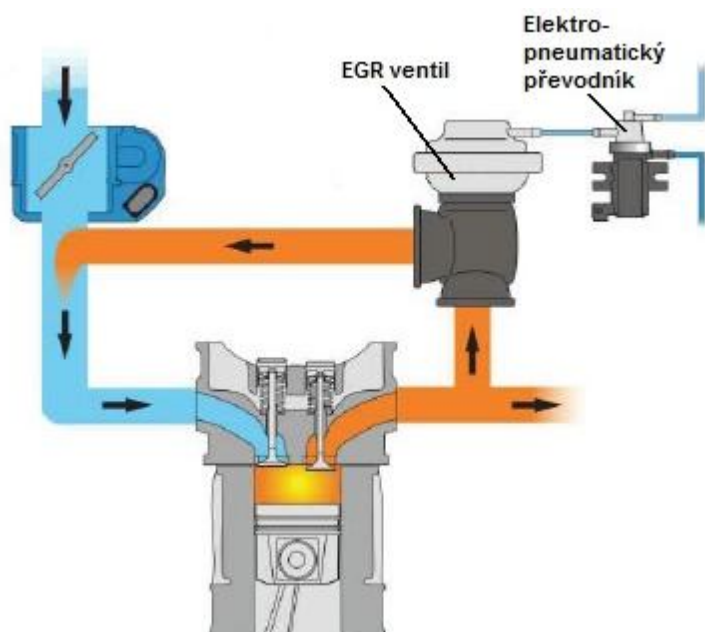
Velmi účinnou metodou snižování oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) u zážehových i vznětových motorů je recirkulace spalin. Výfukové plyny s malým obsahem  $\text{O}_2$  je možno považovat za inertní, tedy nehořlavý plyn, který se mísí s čerstvou směsí, nezúčastňuje se spalování, přejímá teplo a tím snižuje špičkovou spalovací teplotu. Můžeme toho docílit **vnitřní** nebo **vnější recirkulací**. [1][7][16]

### 2.4.1 Vnitřní recirkulace (nedokonalé vyplachování)

U vnitřní recirkulace dochází k překrytí otevření sacího a výfukového ventilu v okamžiku výměny náplně válce. Sací ventil otevírá ještě před uzavíráním výfukového ventilu. Podle velikosti tohoto překrytí se výfukové plyny tlačí do sacího kanálu výtlačným pohybem pístu, částečně jsou nasávány do válce z výfukového kanálu. Výsledkem je zvýšené množství zbytkových plynů ve válci. Motory s velkým úhlem překrytí ventilů mají relativně nízké emise  $\text{NO}_x$ . Překrytí ventilů nemůžeme libovolně zvyšovat, neboť se zhoršuje stabilita chodu motoru, dochází k vynechávání zápalů a růstu emisí HC. K dosažení požadovaného snížení emisí  $\text{NO}_x$  zákonodárnými předpisy však vnitřní recirkulace obvykle nestačí, a proto se stále více rozšiřuje vnější recirkulace. [7][16]

### 2.4.2 Vnější recirkulace

Vnější recirkulace přivádí výfukové plyny do sacího potrubí nezávisle na postavení ventilů motoru. Množství recirkulovaných plynů se řídí EGR ventilem, zařazeným v jejich zpětném vedení. Ventil dávkuje množství v závislosti na různých parametrech provozního stavu motoru a je řízen elektropneumatickým převodníkem.



Obr. 11: Schéma funkce vnější recirkulace výfukových plynů. [23]

Elektropneumatický převodník je proporcionální ventil, který podle signálu z řídicí jednotky nastavuje velikost podtlaku přiváděného do pružinové komory EGR ventilu. Pokud podtlak nepřekoná sílu pružiny, působící na membránu ventilu, recirkulace neprobíhá. Zvětšováním podtlaku se řídicí ventil otevírá a zvětšuje se dávka recirkulovaných plynů.[16]

Starší typy vnější recirkulace používají pneumatické nebo mechanické regulace. Regulace dávkují množství recirkulovaných plynů v závislosti na poloze škrticí klapky, podtlaku v sacím potrubí nebo protitlaku v potrubí výfukovém. Jejich nedostatkem je poměrně značná nepřesnost dávkování při vyšším množství recirkulovaných plynů. Je to příčinou zhoršení jízdních vlastností vozidla a zvýšení emisí HC. Proto se recirkulované množství omezuje na 10 - 15 % celkového množství plynů v čerstvé směsi.[16]

Naproti tomu elektronická regulace umožňuje spolu s použitím dalších opatření zvýšit množství recirkulovaných plynů na 60 - 70 %. Doplnujícími opatřeními bývají řízení pohybu směsi ve válci, oddělený přívod nasávaného vzduchu a recirkulovaných plynů do válce kdy dochází k vrstvení směsi a použití zvýšeného výkonu zapalování, aby směs i při větším množství recirkulace dobře shořela.

Spojení vyššího množství recirkulovaných výfukových plynů s vrstvením směsi nebo s vytvořením turbulence, je u některých soustav využíváno pro dávkování paliva i nasávaného vzduchu. Vzniklá směs bude blízká stechiometrické a pro úpravu výfukových plynů postačí třícestný katalyzátor.[16]

Při spalování vzniká výrazně méně oxidů dusíku (až o 60 %). Se zvyšujícím se podílem recirkulujících výfukových plynů se zvyšuje jak obsah nespálených uhlovodíků HC, tak i spotřeba paliva. [22]

Zpětné vedení výfukových plynů se používá při motoru zahřátém na provozní teplotu v oblasti částečného zatížení a  $\lambda = 1$ . Vypíná se vždy, když může nepříznivě ovlivňovat pravidelnost chodu motoru, především při volnoběhu, nízkých otáčkách a zatíženích a při studeném motoru. Rovněž při požadavku plného výkonu je nevýhodná, protože ho snižuje. Kromě toho se v těchto režimech posouvá součinitel přebytku vzduchu do oblasti bohaté směsi s nízkými emisemi  $\text{NO}_x$ . Uplatňuje se tedy především při částečných zatíženích motoru. Ovšem i zde je třeba množství recirkulujících výfukových plynů řídit v závislosti na provozním režimu motoru.[7][22]

## 2.5 Snižování emisí škodlivin u zážehových motorů s přímým vstřikem benzínu

Problémem zážehových motorů s přímým vstřikováním paliva je, že jejich pracovní proces probíhá převážně v oblasti vrstvené směsi ( $\lambda > 1$ ), kde si osvědčená koncepce třícestného katalyzátoru s lambda regulací (tzv. „řízený“ třícestný katalyzátor) nedokáže poradit se zvýšeným výskytem oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) ve výfukových plynech.[1][8]

Technologií zpětného vedení (recirkulace) výfukových plynů je dosaženo snížení obsahu  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech asi o 70 %. Pro splnění neustále se zpřísnujících emisních limitů je však nutné další dodatečné zpracování emisí  $\text{NO}_x$ . V současné době se používají dva základní způsoby:

- selektivní katalyzátor DeNO<sub>x</sub>,
- zásobníkový katalyzátor.

### 2.5.1 Selektivní katalyzátor DeNO<sub>x</sub>

Dnes už i v praxi používaný katalyzátor DeNO<sub>x</sub> patří do kategorie katalyzátorů typu SCR (Selective Catalytic Reduction - selektivní katalytická redukce).

U klasického třícestného katalyzátoru je do spalovacího prostoru motoru nasávána zápalná směs upravená tak ( $\lambda = 1$ ), že škodliviny ve výfukových plynech jsou prakticky odstraněny. Aby tomu tak bylo i při spalování chudé směsi ( $\lambda > 1$ ) s principiálně vyšším podílem oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), obsahuje aktivní katalytická vrstva kromě platiny také iridium. Iridium je schopno pracovat s vyšším koeficientem přeměny (vyšší účinnosti) než současně používané rhodium. Kromě india přicházejí v úvahu i oxidy hliníku a zeolitové krystaly.

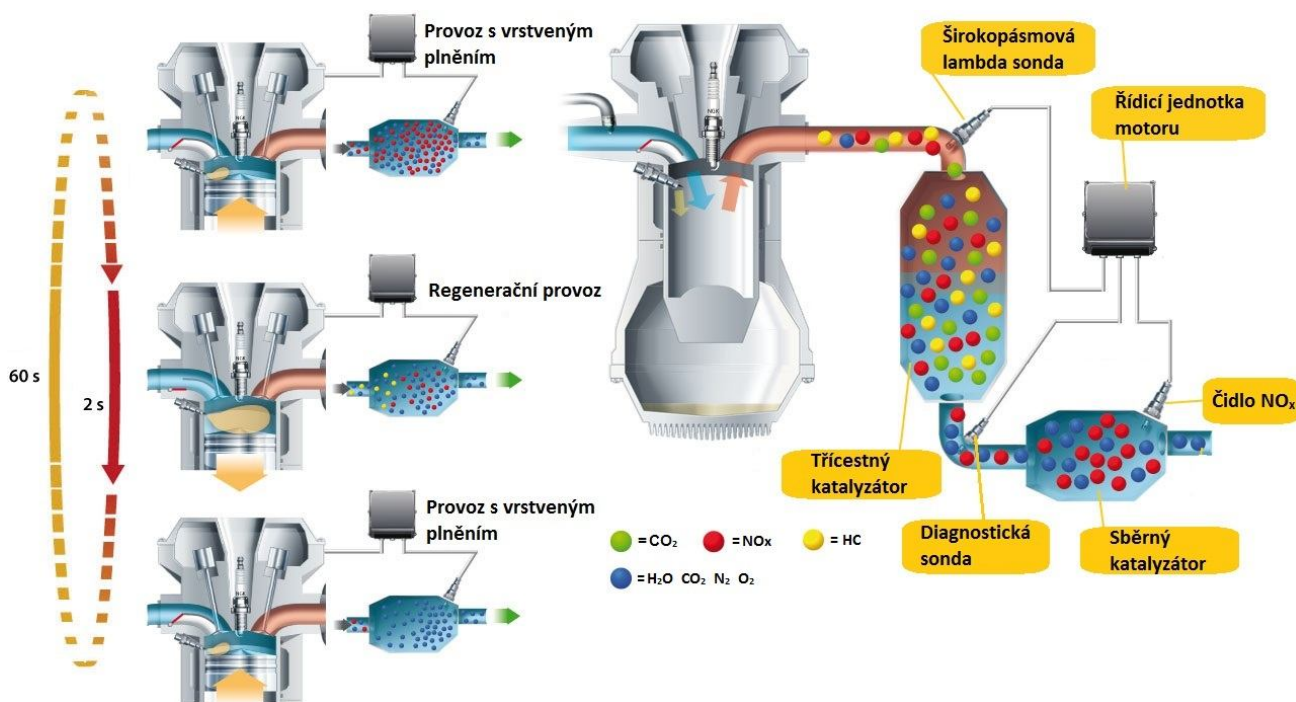
Redukční reakce v katalyzátoru jsou také podporovány přítomností nespálených složek. Dostatek uhlovodíků (HC) a oxidu uhelnatého (CO) je zajištěn např. obohacením směsi při zrychlování, uměle zhoršeným spalováním ve válcích (např. zmenšením úhlu předstihu zážehu), popř. dodatečným vstřikem paliva po jeho vyhoření. Jedná se samozřejmě o velmi malé množství paliva, aby se nezvyšovala spotřeba a také teplota katalyzátoru zůstala ve vyhrazených mezích. Iridiový katalyzátor DeNO<sub>x</sub> pracuje s dobrou účinností pouze v úzkém teplotním pásmu.[1]

Značnou roli hraje přítomnost síry v palivu. Síra v palivu omezuje činnost katalyzátoru a urychluje jeho „stárnutí“.[1]

## 2.5.2 Zásobníkový katalyzátor

Další možností je katalyzátor, který dovede při spalování chudé směsi vázat  $\text{NO}_x$  prostřednictvím absorpčního materiálu (např. oxidů barya) ve formě pevných dusičnanů. Jakmile jsou absorpční schopnosti ukládací schopnosti materiálu, musí být regenerován. Regenerace se provádí při provozu na chudou směs každých 30 - 60 s. Řídicí jednotka přepne na základě signálu z čidla  $\text{NO}_x$  nebo teplotního čidla na 1 - 2 sekundy provoz do režimu s bohatou směsí ( $\lambda = 0,8$ ). Při regeneraci se nespálené uhlovodíky s oxidem uhelnatým (CO) dostávají do katalyzátoru, kde slouží za přítomnosti ušlechtilých kovů jako redukční prostředek a rozloží dusičnany zpět na  $\text{NO}_x$ . Tyto uvolněné  $\text{NO}_x$  reagují s HC a CO za přítomnosti katalytických kovů tak, jak je tomu u třicestných katalyzátorů. Tato jednorázová obohacení zápalné směsi mají za následek zvýšení spotřeby paliva (cca 2 %).[1][8][16]

Katalyzátor tohoto typu má sice ve srovnání s katalyzátorem DeNOx dvojnásobnou účinnost (až kolem 90 %), na druhé straně je daleko citlivější na síru obsaženou v palivu, která reaguje s oxidem barnatým na síran barnatý  $\text{BaSO}_4$ . Ten se časem ukládá v zásobníkovém katalyzátoru, zanáší jeho katalytickou vrstvu a poměrně rychle snižuje jeho účinnost. Pokud při regeneraci nedojde k očekávané reakci, je to známka zanesení katalyzátoru a řídicí jednotka na to reaguje zařazením speciálního programu (odsiřování). Ten spočívá v dalším obohacení zápalné směsi a zmenšení úhlu předstihu zážehu, což vyvolá zvýšení teploty v katalyzátoru asi na  $650^\circ\text{C}$ . Po tom se do něj po několik minut přivádí střídavě bohaté ( $\lambda = 0,95$ ) a chudé ( $\lambda = 1,05$ ) výfukové plyny. Tím se síran barnatý opět rozloží na oxid barnatý a katalyzátor se vyčistí.[1][16]



Obr. 12: Schéma uspořádání a cyklus regenerace systému se zásobníkovým katalyzátorem. [3]

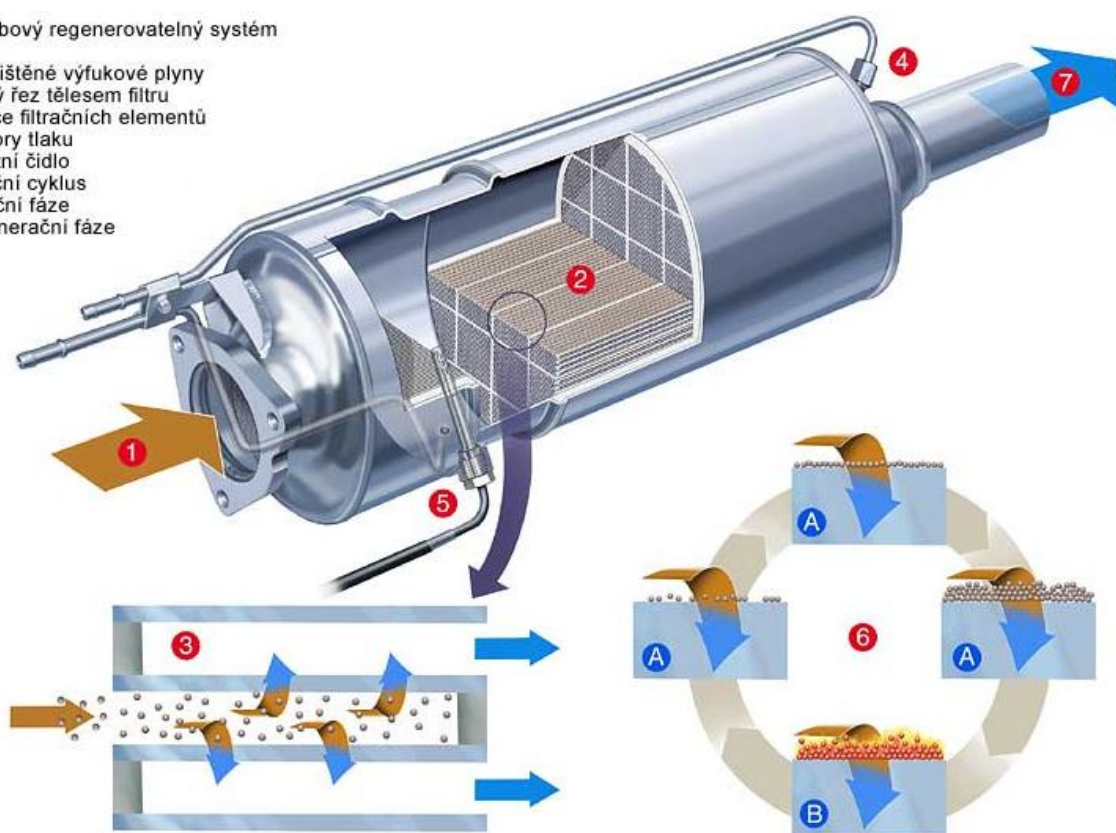
## 2.6 Filtr pevných částic

Úkolem filtru pevných částic DPF (Diesel Particulate Filter), FAP (Filtre á particules) je zachycení škodlivých pevných částic, obsažených ve výfukových plynech **vznětových** motorů a jejich odstranění jednorázovým spálením.

Filtr pevných částic je umístěn za oxidačním katalyzátorem. Látka, z které je filtr pevných částic vytvořen, má porézní strukturu, o velikosti pórů 10 - 15  $\mu\text{m}$ , které zachycují až 90 % pevných částic z výfukových plynů, které jí procházejí. Částice se ve filtru krátkodobě shromažďují a po ujetí každých 400 až 500 km se spalují, čímž dochází k regeneraci filtru. DPF filtr pracuje ve dvou režimech - při tzv. **pasivní regeneraci** dochází automaticky k pomalé oxidaci sazí na  $\text{CO}_2$  při teplotách výfukových plynů 350 - 500°C, tedy například při jízdě dálniční rychlostí. Tzv. **aktivní regenerace** nastává v případě, že motor vozidla pracuje delší dobu v režimu jen částečného zatížení, což je případ městského provozu. Tehdy přistoupí řídicí jednotka k cílenému zvýšení teploty výfukových plynů nad 550°C, při které dochází ke spálení zachycených částic a aktivní regeneraci filtru. Tento proces trvá 2 - 3 minuty, probíhá za běžného provozu a nijak neovlivňuje chování motoru ani vozidla. Míra znečištění filtru a potřeba jeho regenerace je elektronicky sledována kontrolním mechanismem.[17][24]

Bezúdržbový regenerovatelný systém

1. Předčištěné výfukové plyny
2. Příčný řez tělesem filtru
3. Funkce filtračních elementů
4. Senzory tlaku
5. Teplotní čidlo
6. Filtrační cyklus
- A. Filtrační fáze
- B. Regenerační fáze



Obr. 13: Řez DPF a regenerační cyklus.[25]



Čidla filtru sazí hlásí průběžně stav zanesení filtru sazemí. Pokud se přibližuje hodnota zanesení filtru k 60 %, dochází k aktivaci regeneračního procesu prostřednictvím řídicí jednotky motoru. Ta podle technického vybavení motoru krátkodobě seškrtí vzduch a obohatí směs tak, aby došlo ke krátkodobému zvýšení teploty v oblasti oxidačního katalyzátoru, a dojde ke zvýšení teploty ve výfukovém potrubí. Tato zvýšená teplota působí jako „proplach“ celého systému včetně vyhoření zbytkových sazí v systému. Efektivita této metody spočívá na dokonalém seřízení součinností řídicí jednotky s ostatními systémy. Jinak dochází ke ztrátě výkonnosti motoru za současného zvýšení měrné spotřeby paliva.[9]

Pokud nastal stav, kdy řídicí jednotka sama nedokázala DPF vyčistit z důvodu častého přerušování atd., je řidič informován kontrolkou na přístrojovém panelu, aby absolvoval jízdu na minimálně čtvrtý rychlostní stupeň a udržoval motor v otáčkovém rozmezí 2000 - 3000 ot.min<sup>-1</sup> po dobu, dokud kontrolka nezasne. V případě, že řidič nerespektuje kontrolku, která ho vyzývá k regeneraci DPF, je vozidlo po ujetí určité vzdálenosti uvedeno do nouzového režimu. V takovém případě je řidič nucen navštívit servis, kde je regenerace provedena pomocí diagnostického přístroje.[24]

### 2.6.1 Životnost filtru

I když dodržujeme všechny doporučené postupy a pro regeneraci filtru jsou vytvořeny ideální podmínky, filtr se zregeneruje max. na 98 %. Z tohoto důvodu se životnost filtru bez mechanického vyčištění odhaduje na 150 tis. - 200 tis. km.[24]

### 2.6.2 Filtr pevných částic pro zážehové motory s přímým vstřikem benzínu

Nejnovější test provedený německou zkušebnou TÜV Nord na zakázku společnosti Transport & Environment ukazuje, že úsporné zážehové motory s přímým vstřikem benzínu vyprodukují mnohonásobně více škodlivých částic než moderní vznětové motory osazené filtrem pevných částic. Při nízkých otáčkách a nízké zátěži se palivo odpaří přímo ve válci. V režimu vysokého zatížení a při krátké době vstřiku se ovšem část kapek paliva odpařit nestihne a dochází k jejich spečení do formy sazí. Tyto zase by měl zachytit navrhovaný filtr pevných částic uzpůsobený pro zážehové motory.[26][27]

Motory, u nichž je benzín vstřikován přímo do válců, produkuje podle studie TÜV Nord desetkrát až čtyřicetkrát více škodlivin než ty, u kterých je palivo vstřikováno do sacího potrubí. Protože však přímé vstřikování paliva přináší úsporu paliva, podíl takových motorů v automobilech neustále roste a podle odhadů mají do roku 2020 auta s nepřímým vstřikem zmizet v Evropě z nabídky automobilek úplně.[27]

## 2.7 Selektivní katalytická redukce (SCR)

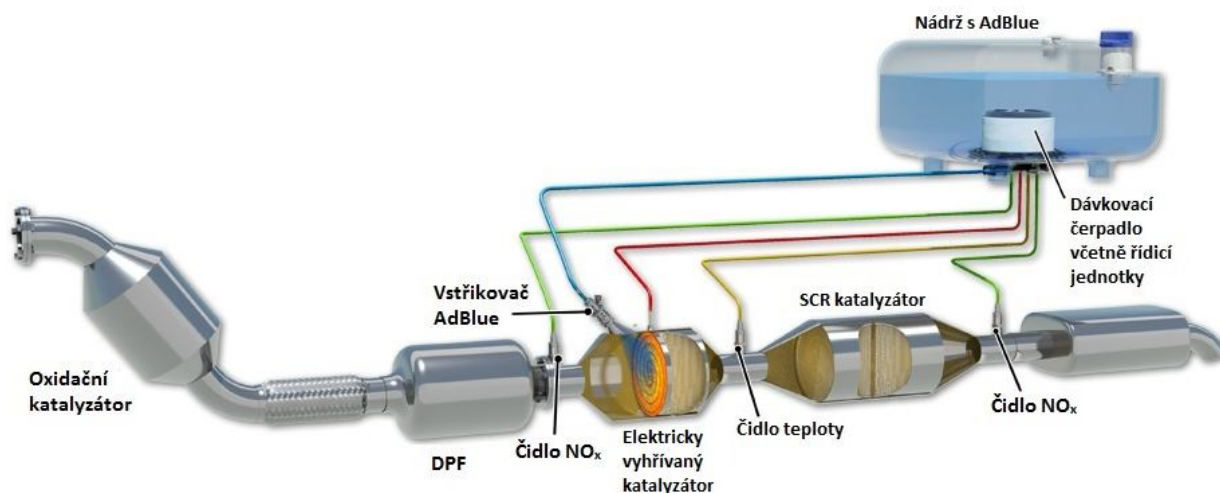
Zkratka SCR (Selective Catalytic Reduction) označuje systém čištění spalin vznětových motorů pomocí selektivní katalytické redukce snižující množství  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech. Oxidy dusíku se díky speciálnímu redukčnímu prostředku na bázi močoviny mění v neškodný dusík a vodní páru. Tento redukční prostředek je znám pod obchodním označením AdBlue.[29]

Technologie SCR byla nejdříve používána v uhelných elektrárnách, poté v roce 2006 tato technologie přešla do evropského trhu s nákladními vozy. Dnes se čím dál častěji začíná objevovat u osobních automobilů se vznětovými motory, u kterých je to jediný způsob, jak vyhovět nadcházející emisní normě Euro 6.[28][29]

AdBlue je čirá nepáchnoucí kapalina sestávající z 32,5 % syntetické močoviny  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  a demineralizované vody. Jakost je dána normou DIN 70070. AdBlue je netoxická kapalina a není nebezpečné pro zdraví člověka ani pro životní prostředí.[17][28]

Močovina je dávkován a do proudu stlačeného vzduchu, kterým je unášeno do výfukového potrubí. V horkých výfukových plynech se AdBlue rozkládá na amoniak  $\text{NH}_3$  a oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ . Uvolněný amoniak pak v SCR katalyzátoru reaguje s  $\text{NO}_x$  za vzniku atmosférického dusíku na vodní páry. Emise oxidů dusíku se tak sníží o 70 %, uhlovodíků o 90 % a částic o 10 %. Množství AdBlue, vstříkované do výfukového potrubí, závisí na zatížení a otáčkách motoru, teplotě výfukových plynů a vlhkosti nasávaného vzduchu. Proto je výfukový systém většinou vybaven čidly teploty na vstupu (někdy i výstupu) z katalyzátoru. Množství AdBlue je dávkováno až po dosažení potřebné teploty reaktoru v množství závislém na signálu  $\text{NO}_x$  senzoru umístěného před, za, nebo na obou místech katalyzátoru podle použitého řízení systému aby nedocházelo ke vzniku páchnoucích sloučenin čpavku, krystalizaci nadbytečné močoviny na výstupu z výfuku nebo překročení legislativního limitu  $\text{NO}_x$  při aplikaci malé dávky.[16][17][28]

Nosná vrstva SCR katalyzátoru je opatřena vrstvou titanu, wolframu a vanadu. Sloučeniny drahých kovů jsou spolu s amonikem( $\text{NH}_3$ ) vhodné k tomu, aby přednostně vyvolaly redukce oxidu dusíku  $\text{NO}_x$  na dusík a na vodu.[31]



Obr. 14: Uspořádání výfukového systému s implementací SCR.[29]

AdBlue se skladuje v nádrži na 15 - 20 litrů umístěné pod podlahou v zavazadlovém prostoru. Tato náplň vydrží na ujetí nejméně 20 tis. km, její doplňování probíhá v rámci pravidelných servisních intervalů. Vzhledem k tomu, že AdBlue zamrzá při teplotě  $-11^{\circ}\text{C}$ , je nutné, aby veškerá vedení byla vyhřívána. Pro toto speciální použití se vyrábí a dodávají pevné a flexibilní vyhřívané systémy hadicového vedení. Plastová vedení jsou ovinuta topným páskem, který prostřednictvím palubního napětí předává potřebný topný výkon a tím zabraňuje zamrznutí systému, popř. napomáhá rozmrazení kapaliny. Kontrolky na palubní desce ukazují množství v nádrži. Při prázdné nádrži močoviny přepne řídicí jednotka do nouzového režimu se sníženým výkonem a po vypnutí motoru už nelze nastartovat.[29][30]

Metoda SCR lze lehce adaptovat pro různá vozidla a modelové varianty a umožňuje snížit objemy oxidů dusíku bez nutnosti ovlivňovat optimální nastavení spalovacího cyklu motoru. Chod motoru může být optimalizován po stránce spotřeby, životnosti i výkonu. Za zmínku stojí především snížení spotřeby (6 %).[8][17][31]

Technologie SCR je novou, zatím málo používanou metodou, zejména kvůli prozatím špatné dostupnosti AdBlue na trhu pohonných hmot. Vzhledem k chemickému složení se předpokládá nízká cena této hmoty a ve spojení s předpokladem zachování optimálního cyklu motoru budou provozní náklady (kromě spotřeby nafty) pravděpodobně stejné jako u motorů se systémem EGR. V Evropě už s produkcí a zaváděním nové provozní hmoty na trh začali všichni velcí dodavatelé pohonných hmot.

## **3. Cíl a metodika diplomové práce**

### **3.1 Cíl diplomové práce**

Cílem diplomové práce je analyzovat účinnost katalyzátoru v závislosti na najetých kilometrech osobního automobilu. Hlavními sledovanými parametry jsou koncentrace jednotlivých emisí ve výfukových plynech měřených za katalyzátorem.

Konkrétním cílem práce je naměřit emise motoru při použití katalyzátoru s proběhem necelých 300 tis. km a následně, stejným postupem a na stejném vozidle, naměřit katalyzátor zcela nový.

### **3.2 Metodika diplomové práce**

Zjišťování účinnosti třícestního katalyzátoru je měřeno přímo na vozidle. Takto je zaručeno, že veškeré naměřené hodnoty budou odpovídat hodnotám, které se vyskytují v provozu.

Na původním katalyzátoru je nejdříve provedena tzv. emisní kontrola emisním analyzátozem, kdy se snímá obsah spalin (především CO) při volnoběžných otáčkách a následně při zvýšených otáčkách při kterých se dále sleduje hodnota součinitele přebytku vzduchu. Poté se s vozidlem zajedou tzv. jízdní cykly na válcové zkušebně. Tyto cykly svými parametry vycházejí z homologačních testů, které se provádějí u nových vozidel. V průběhu zajíždění těchto cyklů se zaznamenává koncentrace výfukových plynů emisním analyzátozem v závislosti na čase. Toto je velkých rozdíl od skutečných homologačních cyklů, kde se výfukové plyny zachycují do sběrného vaku, ze kterého se pak odebere vzorek k analýze.

Tato měření absolvuje stejné vozidlo, pouze s vyměněným katalyzátorem za zcela nový. Postup měření, jízdní cykly i použité měřicí přístroje jsou shodné s prvním měřením, aby naměřená data byla porovnatelná a nebyla tu možnost připisování nějaké odchylky změně parametrů měření.

Data z emisního analyzátozem jsou následně zpracována v programu MS Excel, kde jsou převedena do formy grafů, kvůli lepšímu zhodnocení výsledků a následné analýze.

## 4. Vyhodnocení experimentu

Měření probíhalo na válcové zkušebně katedry Vozidel a pozemní dopravy v prostorách Technické fakulty na České zemědělské univerzitě v Praze viz Obr. 15. Vozidlo určené k měření byla Škoda Felicia Combi LXi s motorem 1,3i. Základní parametry jsou uvedeny v Tab. 1. Vůz byl specifický tím, že měl najeto bezmála 300 tis. km. Vozidlo bylo vybaveno systémem pro jízdu na zkapalněný ropný plyn LPG. Palivem při měření byl pouze bezolovnatý benzín Natural 95, systém dodávky paliva LPG neměl na průběh měření žádný vliv.



Obr. 15: Měřené vozidlo na válcové zkušebně.

<b>Označení motoru</b>	<b>Š 781.136 B</b>
<b>Typ motoru</b>	čtyřválcový, řadový, vodou chlazený
<b>Výroba</b>	09.94 - 08.96
<b>Zdvihový objem (cm<sup>3</sup>)</b>	1289
<b>Max. výkon motoru při ot. (kW/min<sup>-1</sup>)</b>	50 / 5500
<b>Max. točivý moment při ot. (Nm/min<sup>-1</sup>)</b>	100 / 3750
<b>Vrtání (ø v mm)</b>	75,5
<b>Zdvih (mm)</b>	72
<b>Kompresní poměr</b>	9,7 : 1
<b>Příprava směsi</b>	Mono-Motronic
<b>Palivo</b>	N95 – bezolovnatý, LPG
<b>Čištění výfukových plynů</b>	katalyzátor, vyhřívaná Lambda-sonda
<b>Emisní norma</b>	Euro 2

Tab. 1: Parametry motoru Felicia 1,3i.[41]

## 4.1 Popis použitého vybavení při experimentu

### Válcová zkušebna

Jedná se o modernizovanou válcovou zkušebnu určenou pro homologaci vozidel do 3,5 t. Zkušebna byla vyrobena v roce 1983 firmou Schenck.

Zkušebna (Obr. 16) se skládá ze dvou válců propojených řetězem, jeden válec je opatřen protiskluzovým povrchem pro zlepšení adhezních vlastností. K válcům je z pravé strany připojena řemenem sada připojitelných setrvačnicků, jež mají za úkol simulovat setrvačnou hmotnost vozidla. Z druhé strany je k válcům připojen stejnosměrný elektrický motor BBC Brown Boveri řízen měničem frekvence DCS800 firmy ABB. Tento motor o výkonu 56 kW vytváří simulaci jízdních odporů jako je např. odpor vzduchu. Ke druhému válci je připojena vířivá brzda o výkonu 125 kW, jež slouží pro účely statického měření výkonu.



Obr. 16: Válcová zkušebna (pohled shora).

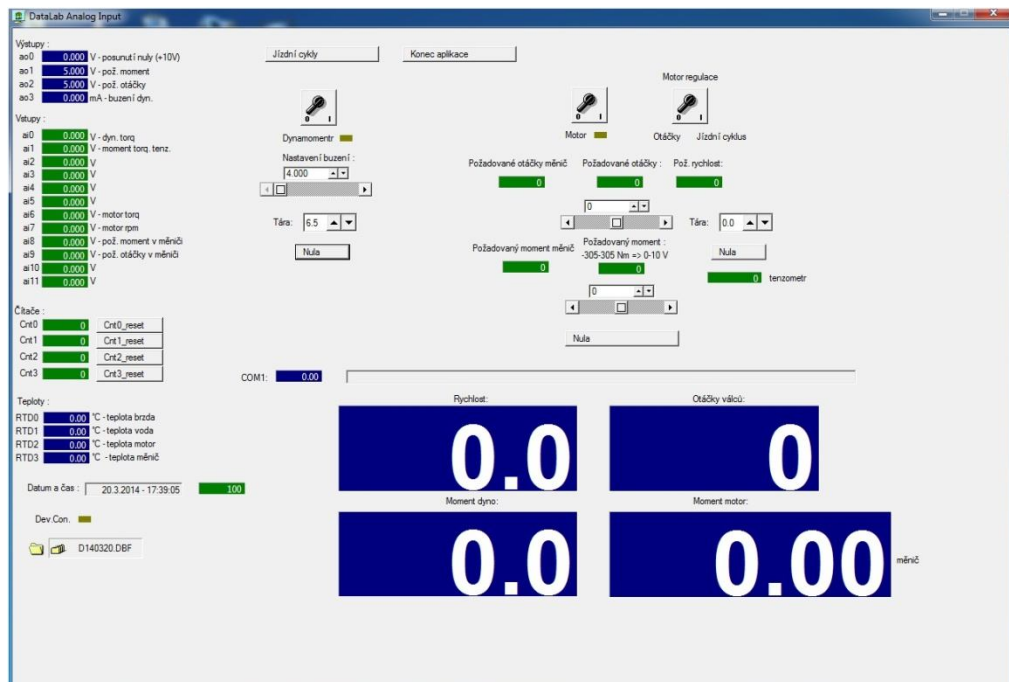
### Parametry válcové zkušebny

DC	Maximální brzdny výkon 56 kW
motorgenerátor	Maximální brzdny moment 305 Nm
	Maximální otáčky 3000 min <sup>-1</sup>
Válce zkušebny	Dva válce umístěny v páru, které slouží k přenosu energie mezi koly vozidla a zkušebnou
	Obvod válců 1145 mm
Setrvačníky	Základní simulovaná hmotnost 680 kg
zkušebny	Přídavné hmotnosti: 900 kg, 450 kg, 225 kg, 120 kg, 112,5 kg.

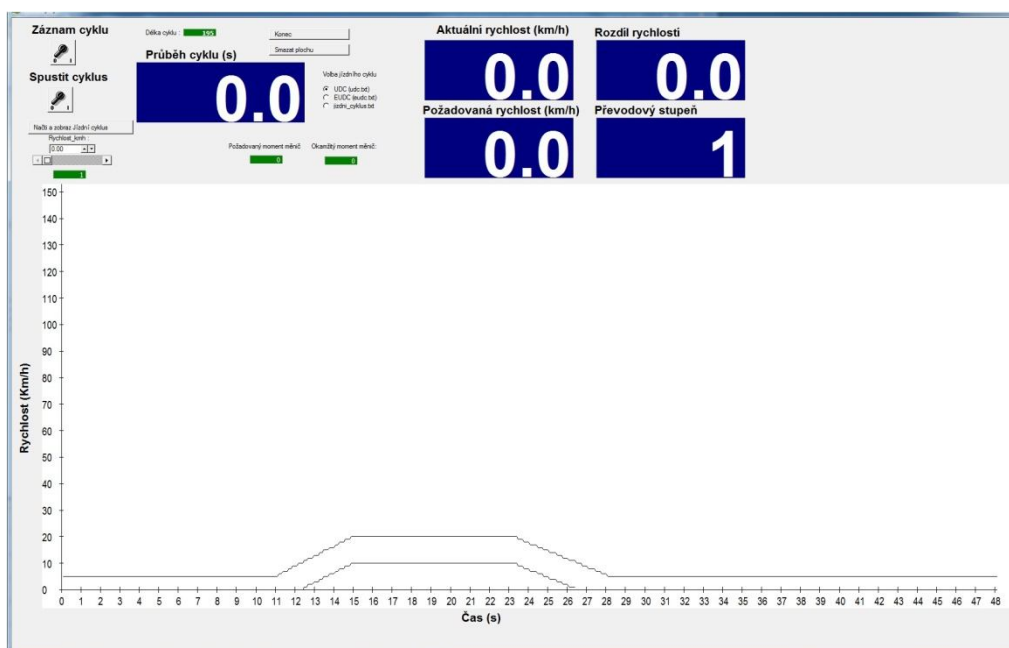
Tab. 2: Parametry válcové zkušebny.

## Ovládací systém válcové zkušebny

Celá válcová zkušebna je ovládána pomocí elektronického systému Datalab od firmy Moravské přístroje a.s., kde byl vytvořen v programovém prostředí ControlWeb vlastní ovládací program (Obr. 17). Pomocí programu je celé pracoviště ovládáno a zároveň se systém také stará o automatický sběr dat. Při zajíždění cyklu prostředí programu ukazuje obsluze rychlost simulované jízdy a převodový stupeň (Obr. 18).



Obr. 17: Prostředí programu ControlWeb.



Obr. 18: Program ControlWeb při měření cyklu UDC.

## Brain Bee AGS-200

Přístroj Brain Bee AGS-200 je emisní analyzátor plynů, umožňuje měřit množství CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a součinitel přebytku vzduchu λ ve výfukových plynech. Tento typ přístroje není vybaven displejem, proto je nutné jej připojit k počítači. Naměřená data jsou sledována a zaznamenávána v počítači nainstalovaným programem Ags1Win.

Princip, na kterém přístroj pracuje, je infračervená absorpční metoda označována jako NDIR (Non-Dispersive InfraRed). Parametry jsou udány v Tab. 3.[33]

Sledovaná položka	Měřicí rozsah		Jednotky	Rozlišení
	od	do		
CO	0	9.99	%	0.01
CO <sub>2</sub>	0	19.9	%	0.1
HC	0	13999	ppm	1
O <sub>2</sub>	0	24.99	%	0.01
NO <sub>x</sub>	0	4999	ppm	10
Lambda	0.5	2		0.001
Otáčky	300	9990	ot.min <sup>-1</sup>	10

Tab. 3: Parametry měřícího analyzátoru Brain Bee AGS-200.[35]



Obr. 19: Emisní analyzátor Brain Bee AGS-200.[36]



## MGT-300

Univerzální otáčkoměr, který detekuje počet otáček benzínových a dieslových motorů. Měření může probíhat buď analýzou impulzů alternátoru při dobíjení akumulátoru, nebo pomocí magnetického čidla vibrací. MGT-300 komunikuje bezdrátově pomocí radiových vln (433 MHz) se všemi analyzátoři i opacimetry Brain Bee. Na měřiči lze nastavit počet válců a počet dob motoru. MGT 300 neobsahuje napájecí zdroj, ke své funkci využívá napětí vozidla (rozsah napětí 10 - 16 V). Kromě měření otáček může toto zařízení rovněž měřit teplotu motorového oleje.[33][34][35]



Obr. 20: Snímač otáček Brain Bee MGT-300.

## Odlučovač vodní páry

Výfukové plyny obsahují vodní páry, které by mohly zkreslovat výsledky měření. Do emisního analyzátoru Brain Bee AGS-200 přicházejí výfukové plyny od odběrové sondy hadicí, na které je od výrobce nainstalován pouze filtr. Proto byla hadice dovybavena odlučovačem vodních par (Obr. 21).



Obr. 21: Odlučovač vodní páry.

## Axiální ventilátor Ventra

Pomocí tohoto ventilátoru bylo zajištěno především chlazení motoru a v menší míře chlazení katalyzátoru, který se nachází pod podlahou vozidla. Tlakem vzduchu byly dále vyfukovány spaliny z prostor válcové zkušebny ven, otevřenými vraty. Ventilátor měl konstantní otáčky, tudíž nešlo simulovat chlazení náporovým vzduchem ve skutečné rychlosti.

TYP	ALM 800-3/32°-4/4,0 VS
V (m <sup>3</sup> /h)	32000
P <sub>st</sub> (Pa)	90
P <sub>t</sub> (Pa)	275
ρ(kg/m <sup>3</sup> )	1,2
P(kW)	4,0
n <sub>vent</sub> (min <sup>-1</sup> )	1 440
n <sub>mot</sub> (min <sup>-1</sup> )	1 440
U(V)	400
I (A)	8,2
f (Hz)	50
IP	55
Rok výroby:	12.07
Počet lopatek:	3

Tab. 4: Parametry axiálního ventilátoru Ventra.



Obr. 22: Axiální ventilátor Ventra.

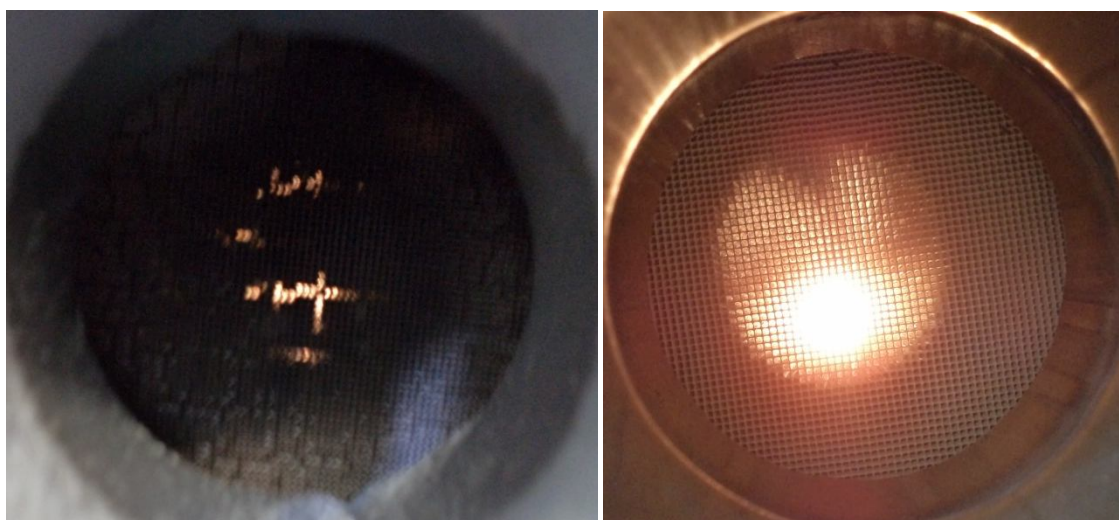
## 4.2 Postup měření

S měřeným vozidlem se najelo na válce a kvůli nízké světlé výšce podvozku musela být dohuštěna přední hnací kola na 3 bary. Po vyrovnání vozu do kolmé pozice k válcům, roztočením kol na první převodový stupeň a volnoběžné otáčky, bylo vozidlo zajištěno ruční brzdou a dvěma popruhy, které byly zachyceny za přední tažné oko. K základnímu setrvačníku (680 kg) byl zařazen druhý setrvačnick o hmotnosti 450 kg. Výsledný součet 1130 kg nejvíce odpovídá hmotnosti vozidla. Na pokyn programu Ags1Win byla u emisního analyzátoru Brain Bee AGS-200 ověřena těsnost systému a hadic, následně byla zavedena odběrová sonda do výfukového potrubí. Na autobaterii byl připojen snímač otáček motoru Brain Bee MGT-300, na kterém byl nastaven odpovídající počet válců a počet dob motoru. Před samotným měřením proběhlo několik akcelerací, čímž byl motor uveden na provozní teplotu a spolu s tím byla zkontrolována funkce válcové zkušebny. Provozní teplota je velice důležitá pro správnou činnost katalyzátoru a lambda sondy, zároveň pro správnou funkci motoru (např. vyřazení obohacování směsi při studeném motoru z činnosti). Po dobu měření každého cyklu bylo zapnuto nahrávání hodnot z emisního analyzátoru klávesou F9 a spolu s tím byl zapnut měnič frekvence DCS800. Po celou dobu, kdy byl motor vozu v činnosti, byl zapnutý ventilátor.

První měření probíhalo dne 11. 3. 2014. Vozidlo bylo opatřeno původním katalyzátorem a na ukazateli ujetých kilometrů byla hodnota 297 986 km.

Druhé měření probíhalo dne 19. 3. 2014. Vozidlo bylo opatřeno zcela novým katalyzátorem. Na ukazateli ujetých kilometrů byla hodnota 298 570 km. Rozestup mezi měřeními byl pouhých cca 600 km, tudíž odchylky měření způsobené dalším opotřebením motoru po tento rozestup jsou zanedbatelné.

U obou katalyzátorů byla provedena optická kontrola průchodnosti světla kanálků keramického tělesa. Starý katalyzátor vykazoval evidentní zanesení katalytické vrstvy viz Obr. 23.



Obr. 23: Porovnání průchodnosti světla keramickým tělesem katalyzátoru.

## 4.3 Měření produkce emisí

Měření produkce emisí lze rozdělit do dvou skupin:

- homologační testy – typové schvalování vozidel nových, nebo poprvé uváděných do provozu,
- emisní kontroly – pravidelná emisní a někdy i technická kontrola všech vozidel v provozu.[8]

Při měření jsme se inspirovali, jak homologačními testy, tak emisní kontrolou.

### 4.3.1 Emisní kontrola

Toto měření bylo inspirováno emisními kontrolami, které se provádějí po čtyřech letech provozu nového vozu a následně každé dva roky. Toto měření provádějí tzv. stanice měření emisí, obecně známé pod zkratkou (SME). Naměřené hodnoty jsou kontrolovány s údaji stanovenými výrobcem vozidla. Pokud tyto hodnoty výrobce nestanoví, postupuje se podle hodnot stanovených v příloze č. 1 vyhlášky 302/2001 Sb.

#### **Výňatek z vyhlášky 302/2001 Sb. příloha č. 1:**

##### Zážehové motory s řízeným emisním systémem a katalyzátorem

U řízených emisních systémů jsou obsah CO ve volnoběhu a obsah CO a součinitel přebytku vzduchu lambda při zvýšených otáčkách považovány za přiměřené ukazatele charakterizující složení výfukových plynů vozidla.

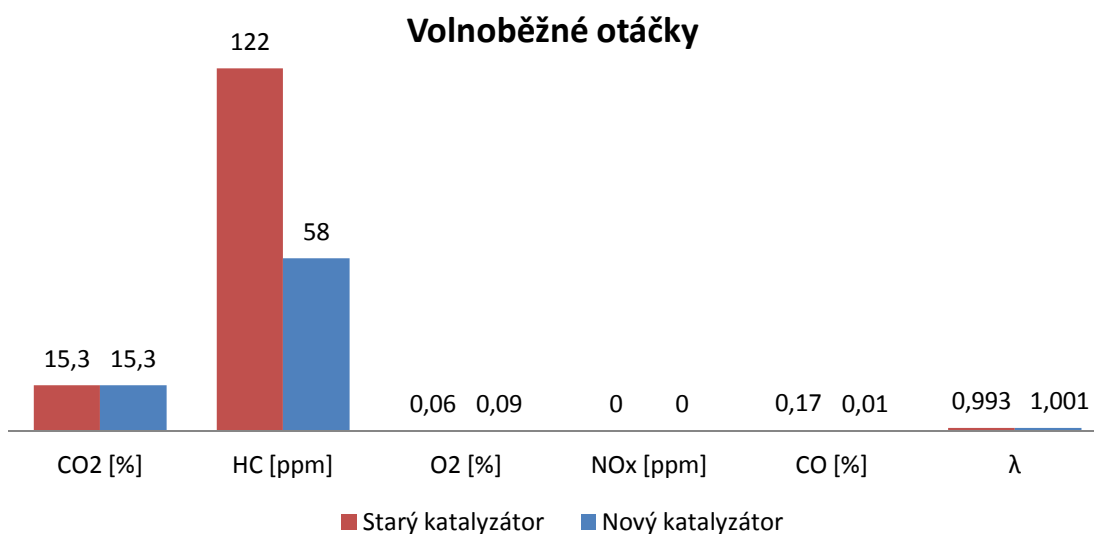
U vozidel registrovaných nebo poprvé uvedených do provozu do 31. prosince 2002:

- 0,5 % obj. CO při volnoběžných otáčkách,
- 0,3 % obj. CO při zvýšených otáčkách; součinitel přebytku vzduchu lambda přitom musí dosahovat hodnoty  $1 \pm 0,03$ . [37]

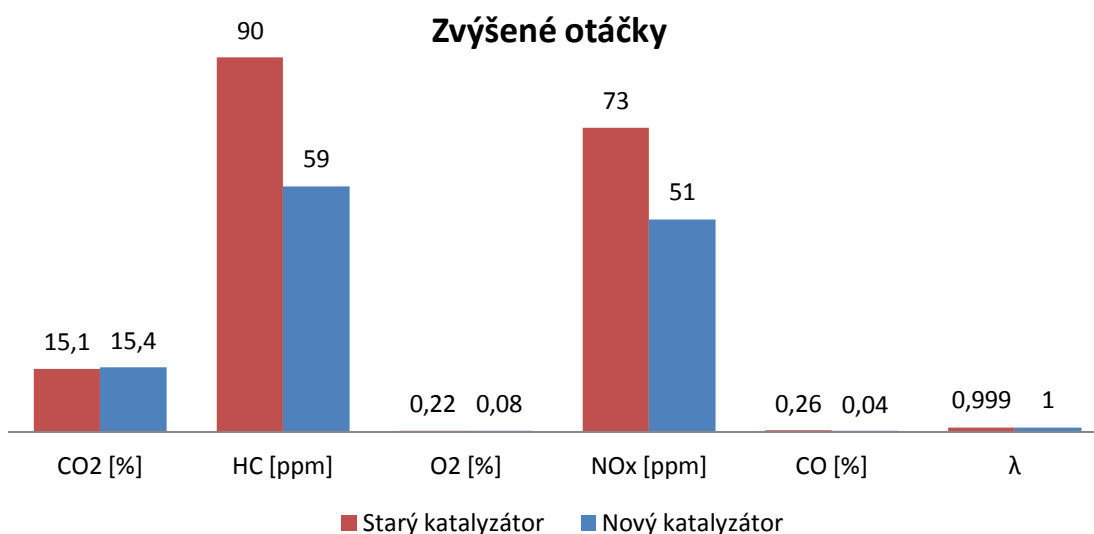
#### 4.3.1.1 Naměřené hodnoty

Starý katalyzátor			Nový katalyzátor		
Otáčky	volnoběžné	zvýšené	Otáčky	volnoběžné	zvýšené
ot.min <sup>-1</sup>	950	2920	ot.min <sup>-1</sup>	830	2600
CO <sub>2</sub> [%]	15,3	15,1	CO <sub>2</sub> [%]	15,3	15,4
HC [ppm]	122	90	HC [ppm]	58	59
O <sub>2</sub> [%]	0,06	0,22	O <sub>2</sub> [%]	0,09	0,08
NO <sub>x</sub> [ppm]	0	73	NO <sub>x</sub> [ppm]	0	51
CO [%]	0,17	0,26	CO [%]	0,01	0,04
λ	0,993	0,999	λ	1,001	1

Tab. 5: Naměřené hodnoty emisí simulace emisní kontroly.



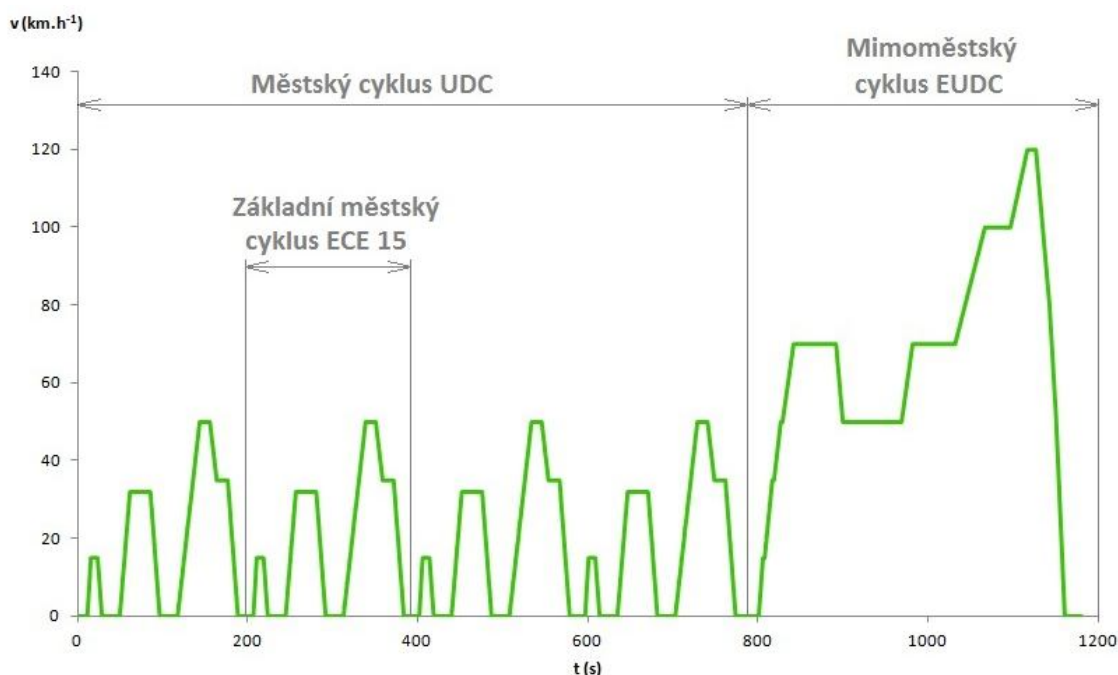
Obr. 24: Porovnání emisí starého a nového katalyzátoru při volnoběžných otáčkách.



Obr. 25: Porovnání emisí starého a nového katalyzátoru při zvýšených otáčkách.

### 4.3.2 Homologační test

Pro naše měření jsme si vzali jako předlohu v současné době používaný Evropský homologační cyklus NEDC (New European Driving Cycle). Jedná se o jízdní cyklus pro homologační měření emisí vozidel do 3,5 t a skládá se z městského cyklu UDC (Urban Driving Cycle) a mimoměstského cyklu EUDC (Extra Urban Driving Cycle) viz Obr. 26.[40]



Obr. 26: Průběh homologačního cyklu NEDC.[38]

Na rozdíl od homologačního cyklu NEDC, který se měří od studeného startu motoru (20 - 30°C) naše vozidlo zajíždělo cyklus pokaždé se zahřátým motorem na provozní teplotu (90°C). Pro nový a starý katalyzátor byl vždy zjet pouze jeden základní městský cyklus ECE 15 a poté mimoměstský cyklus EUDC. Oba jízdní cykly, jak ECE 15, tak EUDC, byly rozděleny do dvou měření.

Při zajíždění cyklů bylo zapotřebí více lidí, kteří obsluhovali jednotlivé přístroje a měřený subjekt. Jeden člen obsluhy vzal na sebe úlohu řidiče. Tento řidič udržoval, manipulací pedálu akcelérátoru a řazením rychlostních stupňů, ukazatel rychlosti otáčení válců (fiktivní rychlost jízdy) v tolerančním poli diagramu požadovaného časového průběhu rychlosti, posouvaného v jeho zorném poli na displeji monitoru. Další člen obsluhy spouštěl záznam hodnot emisního analyzátoru klávesou F9. Poslední člen zapínal měnič frekvence.

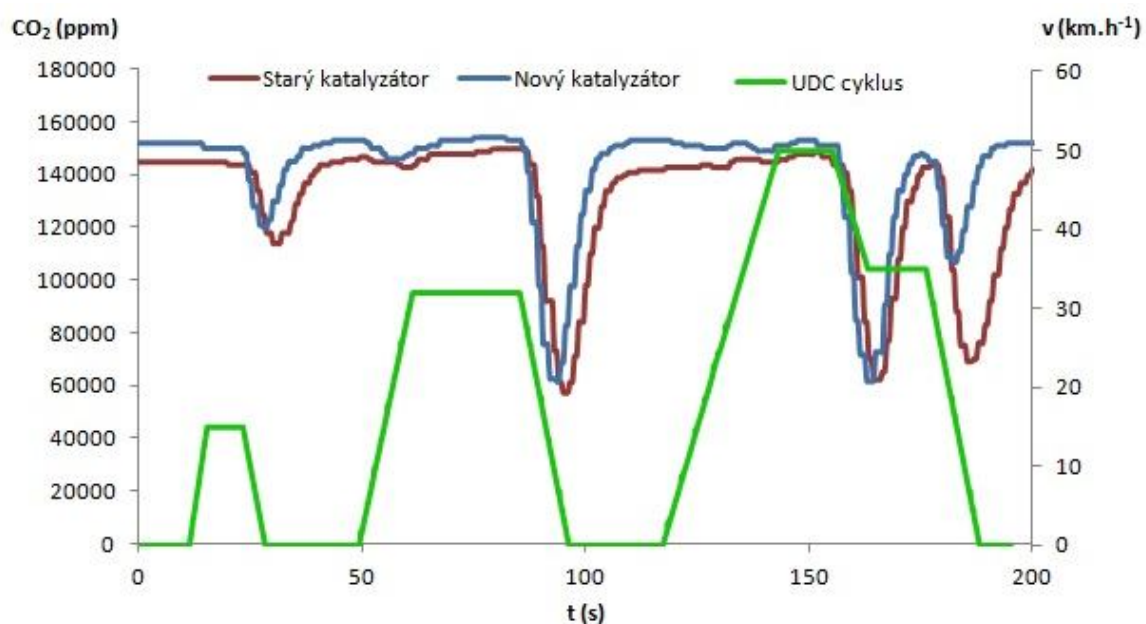
Při porovnání průběhu hodnot z emisního analyzátoru a průběhu zrychlování a zpomalování v jízdním cyklu byla stanovena 10 sekundová prodleva, o kterou byly hodnoty posunuty. Tato prodleva je především zapříčiněna dobou, po kterou se výfukové plyny dostanou od motoru přes výfukové potrubí a odběrové hadice až do analyzátoru. Výrobce Brain Bee zmiňuje prodlevu i ve svých prospektech.

#### 4.3.2.1 Zpracování naměřených dat

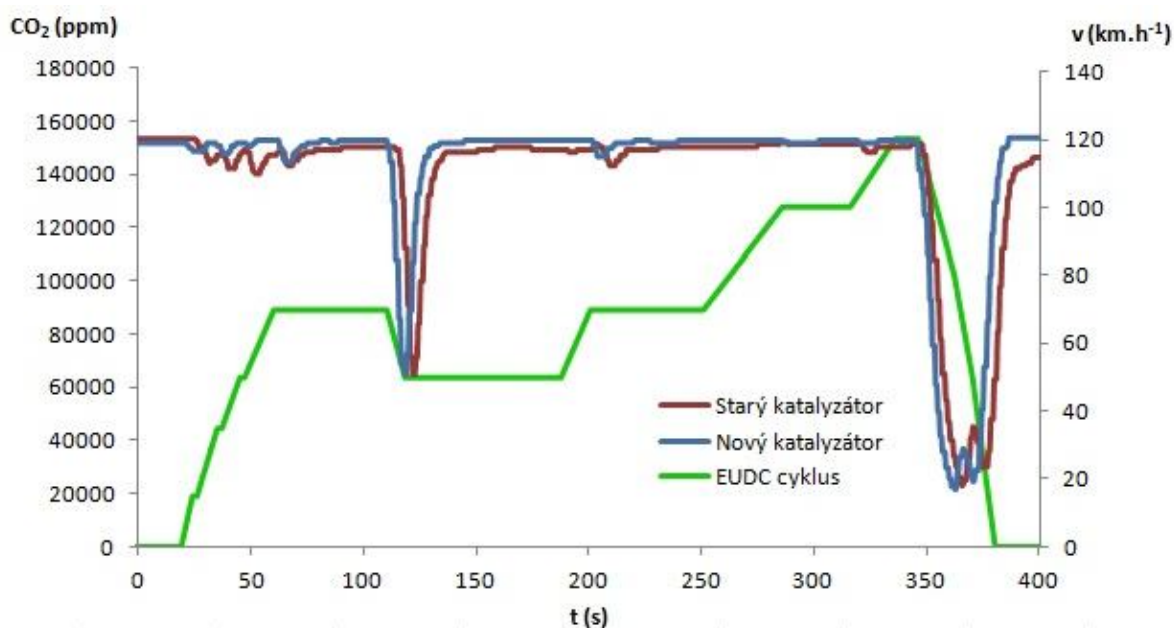
##### Porovnání obsahu CO<sub>2</sub> u obou katalyzátorů v závislosti na jízdních cyklech

Z průběhu hodnot je patrné, že po ubrání dodávky paliva a tzv. brzdění motorem, kdy se uzavře škrticí klapka, dochází k prudkému zmenšení koncentrace CO<sub>2</sub>. Toto je standardní reakce motorů s elektronicky řízeným vstřikováním. Řídicí jednotka pozná, že dochází k brzdění motorem a z úsporných důvodů zastaví dodávku paliva.

Obsah CO<sub>2</sub> je u nového katalyzátoru větší, což značí o dokonalejším průběhu dodatečné oxidace výfukových plynů na aktivní katalytické vrstvě.



Obr. 27: Závislost CO<sub>2</sub> v městském cyklu.



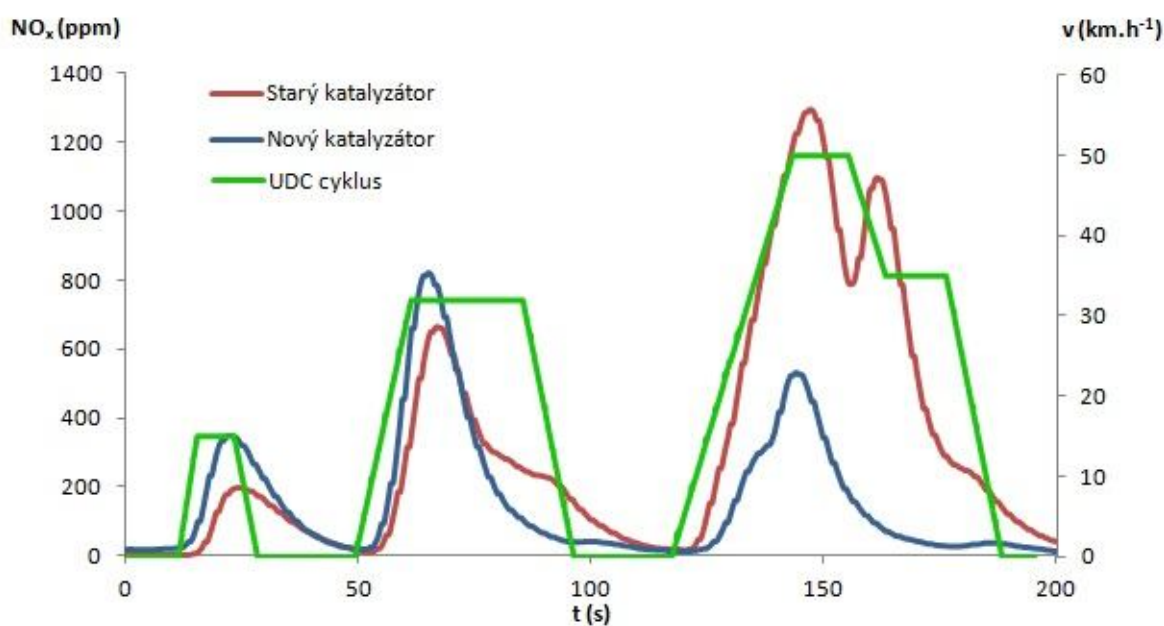
Obr. 28: Závislost CO<sub>2</sub> v mimoměstském cyklu.

### Porovnání obsahu NO<sub>x</sub> u obou katalyzátorů v závislosti na jízdních cyklech

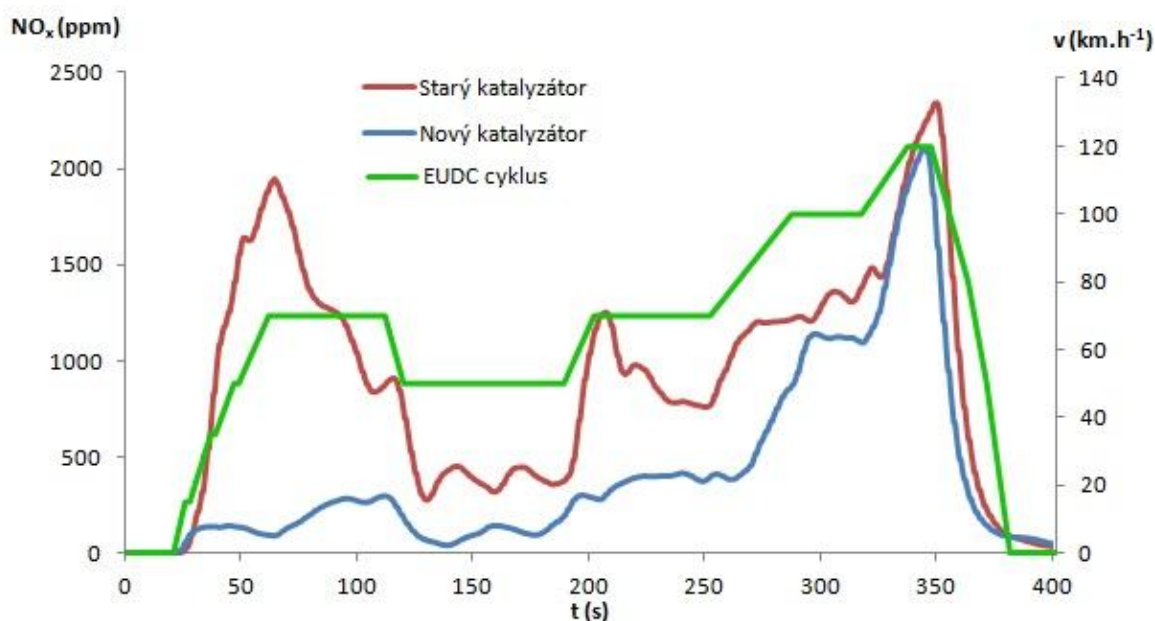
Maximum tvorby NO<sub>x</sub> je posunuto vždy do mírně chudé směsi při  $\lambda = 1,05 - 1,1$  viz Obr. 9, kdy se s dostatkem kyslíku dosahuje největší teploty plamene.[2][5]

Při městském cyklu je vidět znatelnější nárůst NO<sub>x</sub> při krátkých akceleracích kdy dochází k největší spotřebě paliva. V mimoměstském cyklu je největší nárůst při dosažení maximální rychlosti, kdy jsou velké otáčky motoru a zároveň zvýšená dodávka paliva.

Při spalování (výrazně) bohaté směsi je intenzita oxidace dusíku do jisté míry snížena nedostatkem kyslíku, proto NO<sub>x</sub> nenabíhá tak razantně jako CO.[2]



Obr. 29: Závislost NO<sub>x</sub> v městském cyklu.

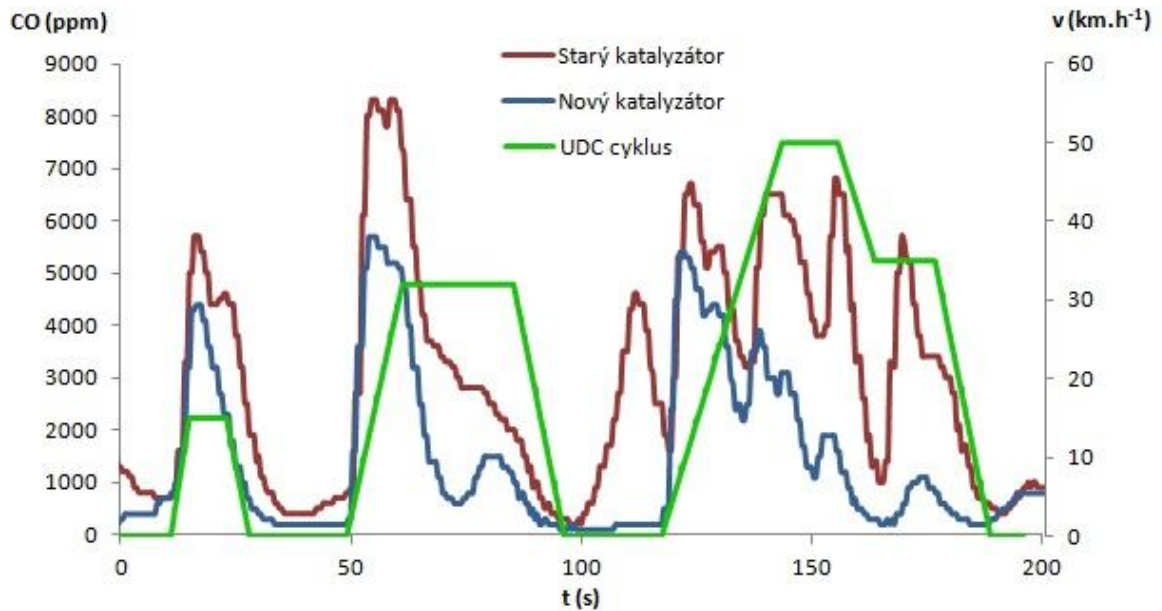


Obr. 30 Závislost NO<sub>x</sub> v mimoměstském cyklu.

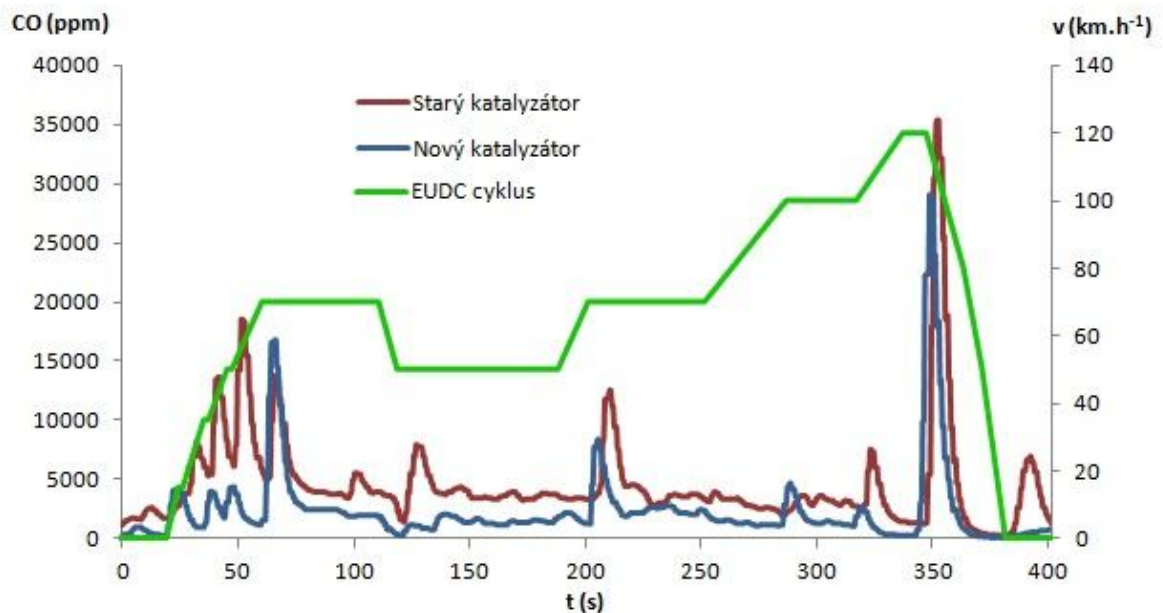


### Porovnání obsahu CO u obou katalyzátorů v závislosti na jízdních cyklech

Nárůst obsahu CO prakticky kopíruje počátky akcelerace, tedy zvýšení bohatosti směsi paliva proti stechiometrickému poměru. Snížený obsah vzduchu vede k nedokonalé oxidaci CO na  $\text{CO}_2$ .



Obr. 31: Závislost CO v městském cyklu.

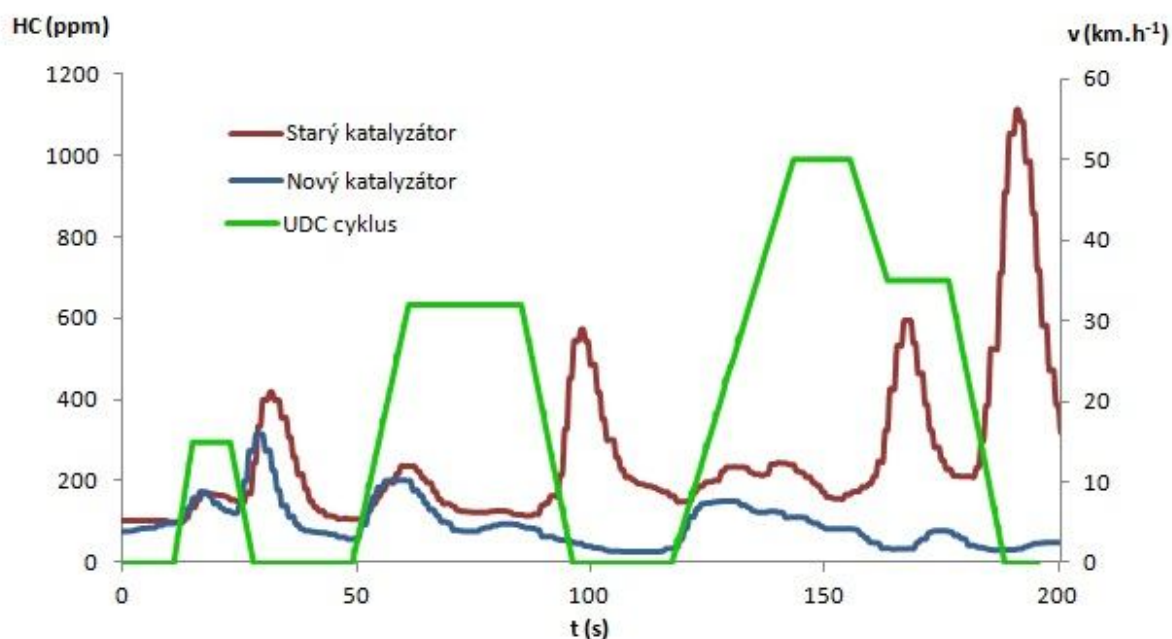


Obr. 32: Závislost CO v mimoměstském cyklu.

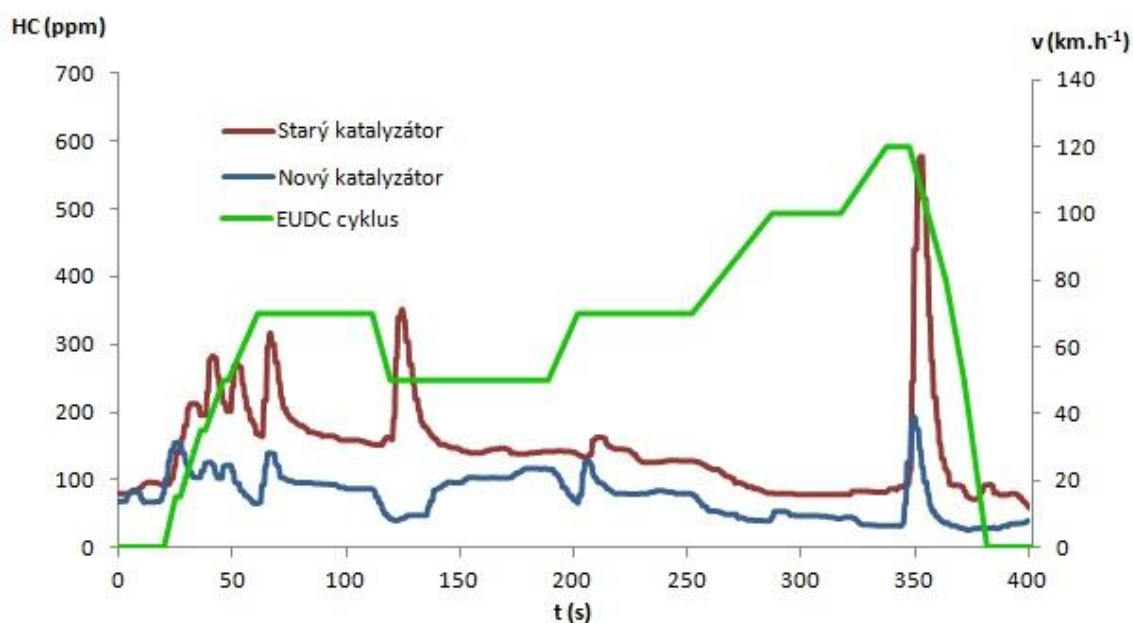
### Porovnání obsahu HC u obou katalyzátorů v závislosti na jízdních cyklech

HC stoupá stejně jako CO při  $\lambda < 1$  viz Obr. 9.

Vždy po uzavření škrticí klapky stoupá ve výfukových plynech obsah uhlovodíků, protože se vlivem klesajícího tlaku v sacím potrubí zmenšuje tloušťka palivového filmu na stěnách. Dochází k nedokonalému spalování, které starý katalyzátor, na rozdíl od nového katalyzátoru, nedokáže eliminovat dodatečnou oxidací.[9]



Obr. 33: Závislost HC v městském cyklu.



Obr. 34: Závislost HC v mimoměstském cyklu.

## 4.4 Vyhodnocení

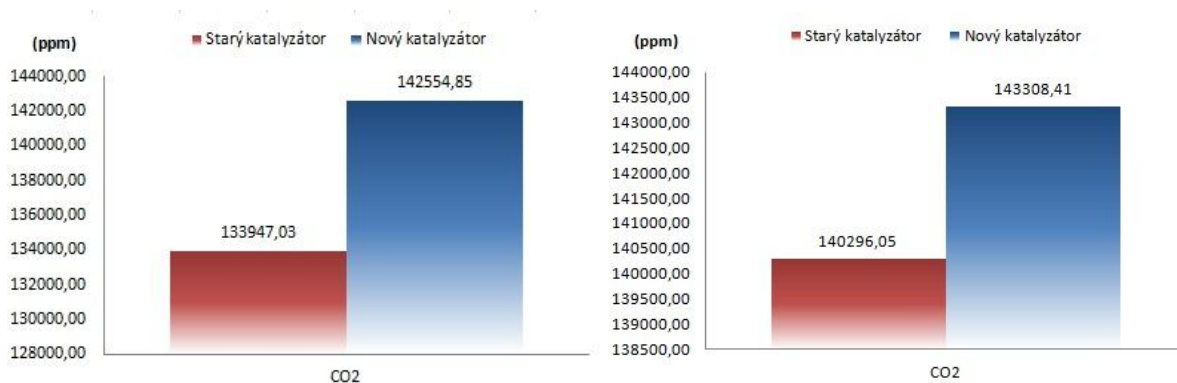
Při zkoušce emisí, podobné emisní kontrole, byla pro měřený vůz podle vyhlášky stanovena maximální koncentrace CO při volnoběžných otáčkách 0,5 %. Starý katalyzátor, s hodnotou 0,17 %, se přiblížil k polovině hodnoty této hranice a nový katalyzátor, s hodnotou 0,01 %, dosáhl padesátiny limitní hodnoty.

U zvýšených otáček je stanovena maximální hodnota CO na 0,3 % a dále se sleduje hodnota přebytku vzduchu, která musí být v rozmezí  $1 \pm 0,03$ . U starého katalyzátoru se hodnota oxidu uhelnatého 0,26 % blížila limitu podstatně více, na rozdíl od měření při volnoběžných otáčkách. Nový katalyzátor opět zajistil velmi malé koncentrace CO, tedy 0,04 %. Součinitel přebytku vzduchu byl se starým katalyzátorem na hodnotě 0,999 a s novým katalyzátorem měl hodnotou 1, což značí ideální stechiometrické složení směsi.

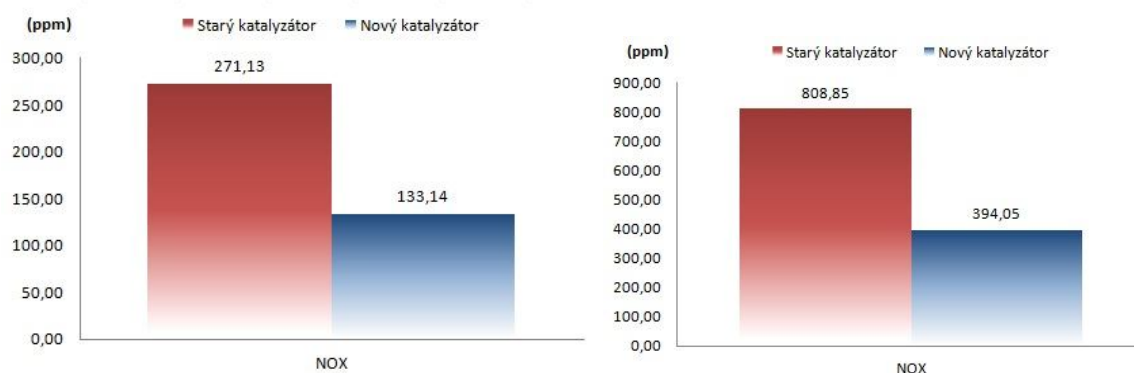
I přes značné rozdíly v hodnotách by oba katalyzátory splnily požadavky emisní kontroly dle vyhlášky.

Homologační test, naopak ukázal velké rozdíly v koncentracích exhalací ve výfukových plynech.

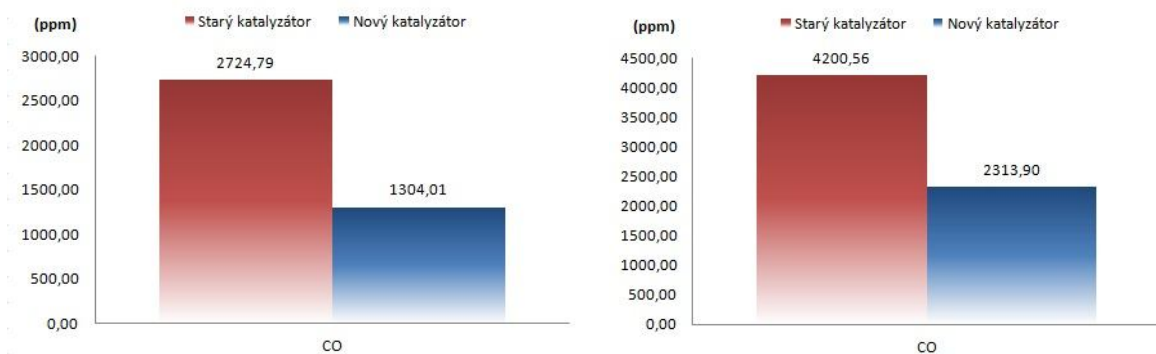
Na následujících grafech je zobrazen rozdíl v průměrné koncentraci jednotlivých složek emisí za ujetý cyklus. Vždy levý graf je městský cyklus a pravý graf mimoměstský cyklus.



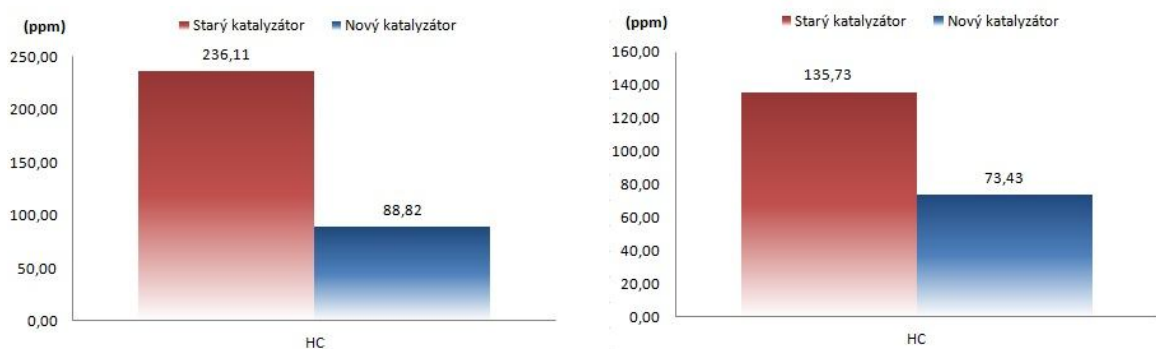
Obr. 35: Srovnání průměrných hodnot CO<sub>2</sub> pro městský a mimoměstský cyklus.



Obr. 36: Srovnání průměrných hodnot NO<sub>x</sub> pro městský a mimoměstský cyklus.



Obr. 37: Srovnání průměrných hodnot CO pro městský a mimoměstský cyklus.



Obr. 38: Srovnání průměrných hodnot HC pro městský a mimoměstský cyklus.

Z grafů průměrných koncentrací je vidět, že při použití nového katalyzátoru je účinnost katalytické vrstvy minimálně o 50 % lepší než u katalyzátoru starého.

## 5. Doporučení a závěr

Množství výfukových plynů, které ohrožují život nebo negativně ovlivňují prostředí na Zemi, je velmi důležitý aspekt a nejen u vozidel nebo jiných přepravních prostředků ale i v průmyslu a výrobě. V globálním měřítku jsou emise produkované automobily jen určitým zlomkem celkového množství. Největší koncentrace exhalací z automobilů se však nachází právě tam, kde je velká hustota obyvatel a to ve městech. Snižování vozidly produkovaných emisí je pouze jedno řešení z mnoha, které jenom snižuje výsledný efekt zvyšování individuální dopravy.

Diplomová práce se zabývá analýzou systémů na dodatečnou úpravu spalin u motorů spalujících konvenční paliva.

V teoretické části jsou tyto systémy, i jejich vlastnosti, podrobně popsány. Část je věnována lambda sondě, která je součástí těchto systémů. Tato sonda dává řídicí jednotce zpětnou vazbu o přebytku vzduchu ve výfukových plynech a díky této informaci se dá lépe určit optimální dávka paliva. Dále jsou popsány systémy na bázi katalytické reakce např.: oxidační katalyzátor a třícestný katalyzátor, které jsou dnes součástí všech automobilů i nákladních vozidel. Recirkulace výfukových plynů je v dnešní době už také standardní systém u všech motorů, bohužel jeho účinnost už pomalu přestává být dostačující, proto následujícím systémem pro snížení obsahu  $\text{NO}_x$  je u zážehových motorů zásobníkový katalyzátor a u vznětových motorů selektivní katalytická redukce (SCR). Pro vznětové motory byl vždy specifický obsah pevných částic. Proto byl vyvinut filtr pevných částic, který tyto jemné částice zachytí a vždy po dosažení shromažďovací schopnosti se provede tzv. regenerace. S postupem času se začínají objevovat studie, které naznačují, že filtr pevných částic (DPF) bude potřeba i u zážehových motorů. Je to dáno tím, že se u zážehových motorů, kvůli snižování spotřeby, začalo používat přímé vstřikování paliva, což vede k nepříznivému tvoření mikročástic ve výfukových plynech.

V experimentální části této práce byla porovnávána účinnost původního katalyzátoru, který byl v činnosti po dobu najetí značného počtu kilometrů vozidla, tudíž se dalo předpokládat, že bude vykazovat špatné hodnoty. Tento starý katalyzátor byl porovnáván s katalyzátorem zcela novým, u kterého nebylo pochyb o jeho správné funkci. I přesto, že měl starý katalyzátor najeto dvakrát větší množství kilometrů než je běžně udávaná životnost, obstál při emisní kontrole, přestože jeho průměrné hodnoty při simulované jízdě jsou dvakrát horší než u katalyzátoru nového. Tato skutečnost by měla být impulzem k přehodnocení dosavadních kontrol vozidel ve stanicích měření emisí. Vozidla, která přesáhnou hodnotu 150 tisíc najetých kilometrů by měla být kontrolována podobnou metodou jako je tomu u homologačních měření. Tato analogie by se měla projevit hlavně

v měření vozidla na měřicích válcích, které budou simulovat skutečný provoz a především budou simulovat reálné zatížení motoru při akceleracích a při vysokých (dálničních) rychlostech. Tyto podmínky zaručí skutečné ověření funkce systémů na dodatečnou úpravu spalín.

Životnost je slovo, které nemá v tržní ekonomice velkou oblibu. Současné znalosti o materiálech a technologie výroby umožňují, už v období návrhu výrobku, určovat jeho životnost. Stejně tak to platí i v automobilovém průmyslu. Automobilky se snaží neustále vytvářet nové a lepší modely svých vozů a legislativa je v dobré vůli limituje hraničními hodnotami emisí. Na první pohled se zdá být vše v pořádku, ale ne každý si uvědomuje, že zejména další produkcí vozidel a nových technologií se zatěžuje životní prostředí. Rozdíl u nové generace automobilů s předchozí je nepatrný, co se produkce emisí i spotřeby paliva týká, ve srovnání s tím je skutečným znečišťovatelem ovzduší a spotřebovatelem přírodních zdrojů výroba nových a likvidace starých funkčních vozidel.

## 6. Použitá literatura

1. JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ Bronislav. *Automobily 4: příslušenství*. 5. vyd. Brno: AVID, 2007, 285s. ISBN 978-80-903671-8-0.
2. TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1997. ISBN 80-010-1632-3.
3. NGK SPARK PLUGS. *NGK Spark Plug Europe GmbH* [online]. 2013 [cit. 2014-03-09]. Dostupné z: <http://www.ngk.de>
4. NÁTR, Lubomír. *Země jako skleník: proč se bát CO<sub>2</sub>?*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2006. ISBN 978-802-0013-620.
5. MACEK, Jan. *Spalovací motory I*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 260 s. ISBN 978-80-01-03618-1.
6. KOTEK, Martin. *Návrh metody provozního měření emisí motorových vozidel*. Praha, 2012. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
7. BAUMRUK, Pavel. *Příslušenství spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 1996. ISBN 80-010-1103-8.
8. HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
9. HOREJŠ, Karel a Vladimír MOTEJL. *Příručka pro řidiče a opraváře automobilů*. Vyd. 4. Brno: Littera, 2009, 386 s. Technické novinky. ISBN 978-80-85763-52-2.
10. BEROUN, Stanislav. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI, fakulta strojní, katedra strojů průmyslové dopravy. *Výfukové škodliviny pístových spalovacích motorů: Výfukové emise*. 2002.
11. JEDELSKÝ, J. - KAPLAN, Z.: *Motory a pohony*. Skripta VUT, 2002.
12. VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2003, 580 s. ISBN 80-238-8756-4.
13. JANCO, Marcel. *Ako funguje a na čo slúži Lambda sonda? Dve lambda sondy v aute?*. In: *Autorubik* [online]. 2011 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/technika/ako-funguje-a-na-co-sluzi-lambda-sonda/>
14. *Lambda sondy s oxidem zirkoničitým*. NGK SPARK PLUGS. *NGK Spark Plug Europe GmbH* [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.ngk.de/cz/produkty-a-technologie/lambda-sondy/technologie-lambda-sond/lambda-sondy-s-oxidem-zirkonicitym/>

15. Širokopásmová lambda sonda. NGK SPARK PLUGS. *NGK Spark Plug Europe GmbH* [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.ngk.de/cz/produkty-a-technologie/lambda-sondy/technologie-lambda-sond/sirokopasmovalambda-sonda/>
16. FERENC, Bohumil. *Spalovací motory: karburátory, vstřikování paliva a optimalizace parametrů motoru*. Vyd. 3. Brno: Computer Press, 2009, 388 s. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-2545-8.
17. VLK, František. *Automobilová elektronika: systémy řízení motoru a převodu*. vyd. 1. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 355 s. ISBN 80-239-7063-1.
18. Cellular Monolith Substrates. DIESELNET. *DieselNet.com* [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: [https://www.dieseln.net/tech/cat\\_substrate.php](https://www.dieseln.net/tech/cat_substrate.php)
19. CATALYTIC CONVERTER USA. *MAGNAFLOW CATALYTIC CONVERTER QUALITY* [online]. 2013 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.catalyticconverterusa.com/catalytic-converter-quality>
20. SAJDL, Jan. Katalyzátor. In: *Autolexicon* [online]. [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/katalyzator/>
21. ŠKODA AUTO A.S. *Dílenská učební pomůcka: Euro On Board Diagnose*. Mladá Boleslav, 2001.
22. GSCHIEDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. Překlad Zdeněk Michňa, Iva Michňová. Praha: Sobotáles, 2001, 629 s. ISBN 80-859-2076-X.
23. PREMIER AUTO TRADE. *EGR Valve Operation on Common Rail Diesel and Direct Petrol Injection* [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://premierautotrader.com.au/news/understanding-EGR-systems-pt-1.php>
24. JANCO, Marcel. Filter pevných částic (DPF/FAP) – ako funguje a čo robíť v prípade problémov?. In: *Autorubik* [online]. 17.5.2013 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/technika/ako-funguje-filter-pevnych-castic-dpf/>
25. ŠTACHA, Jiří. Částicový filtr pro vznětové motory Opel. In: *Auto.cz* [online]. 11.8.2003 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/casticovy-filtr-pro-vznetove-motory-opel-17604>
26. ČERVENKA, Jiří. Studie: Přímovstříkové turbobenzíny čoudí 10x víc než moderní diesely. In: *AutoRevue.cz* [online]. 28.11.2013 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/studie-primovstrikove-turbobenziny-coudi-10x-vic-nez-moderni-diesely>
27. STEHLÍK, Jakub. Benzinový motor čoudí víc než diesel, dostane problematický filtr. In: *IDNES.cz* [online]. 3.12.2013 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/filtr-pevnych-castic-benzinovy-motor-d8n-/automoto.aspx?c=A131201\\_220142\\_automoto\\_fdv](http://auto.idnes.cz/filtr-pevnych-castic-benzinovy-motor-d8n-/automoto.aspx?c=A131201_220142_automoto_fdv)



28. Informazione SCR. In: *FindAdBlue.com* [online]. [cit. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://cz.findadblue.com/adblue/scr/>
29. SAJDL, Jan. SCR (Selective Catalytic Reduction). In: *Autolexicon* [online]. [cit. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/scr-selective-catalytic-reduction/>
30. OLIVÍK, Pavel. Katalyzátor SCR: Euro 6 s nižší spotřebou. In: *AutoRevue.cz* [online]. 10.12.2011 [cit. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/katalyzator-scr-euro-6-s-nizsi-spotrebou>
31. GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3. přeprac. vyd. /. Překlad Iva Michňová, Zdeněk Michňa, Jiří Handlíř. Praha: Europa - Sobotáles, 2007, 685 s. ISBN 978-80-86706-17-7.
32. FERENC, Bohumil. Elektronika a zážehové motory. In: [online]. 2. vyd. 1999 [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://vita.upol.cz/ferenc/om/om.htm>
33. PEXA, Martin. Přednášky v rámci předmětu Technická diagnostika. Česká zemědělská univerzita v Praze.
34. TECHNOLOGY - GARAGE SPOL. S R.O. *Technology - Garage: Váš spolehlivý partner v podnikání* [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.technology-garage.cz/>
35. BRAIN BEE SPA. *Brain Bee Group: Emission Control Line* [prospekt]. 2012. Dostupné z: [www.brainbee.com](http://www.brainbee.com)
36. BrainBee Automotive diagnostic equipment: Mobile Diagnostic Emission tester. *A ECS* [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.aecs.net/products/brainbee/AGS.php>
37. O technických prohlídkách a měření emisí vozidel. In: *Sbírky zákonů*. Ministerstva dopravy a spojů, 302/2001 Sb. Dostupné z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=51610&nr=302~2F2001&rpp=15#local-content>
38. KADLEČEK, Boleslav. *Systém péče o spalovací motory, z hlediska vlivu na životní prostředí a ekonomiky provozu*. Praha, 2003. Habilitační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze.
39. REMEK, Branko. *Provozní údržba a diagnostika vozidel*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 142 s. ISBN 80-010-2615-9.
40. HROMÁDKO, J. – HÖNIG, V. – HROMÁDKO, J. – MILER, P. – SCHWARZKOPF, M. Vliv třicestného katalyzátoru na produkci škodlivých emisí. *Doprava*, 2009, roč. 51, č. 1, s. 27 - 29. ISSN: 0012-5520.
41. COOMBS, Mark. *Údržba a opravy automobilů Škoda Felicia 1.3, 1.3MPi, 1.6MPi a 1.9 diesel od 1995: Jak na to?*. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 1999, 348 s. ISBN 80-723-2093-9.

## 6.1 Seznam obrázků

- Obr. 1: Složení výfukových plynů zážehového motoru.[3]
- Obr. 2: Složení výfukových plynů vznětového motoru.[3]
- Obr. 3: Princip funkce lambda sondy z oxidu zirkoničitého.[14]
- Obr. 4: Napěťový skok lambda sondy při 600°C.[16]
- Obr. 5: Širokopásmová lambda sonda.[15]
- Obr. 6: Posun napěťové křivky lambda sondy.[21]
- Obr. 7: Diagnostika činnosti katalyzátoru.[21]
- Obr. 8: Dvoulůžkový katalyzátor.[19]
- Obr. 9: Snižování emisí škodlivin v třícestném katalyzátoru.[10]
- Obr. 10: Detail kovových a keramických nosičů.[18]
- Obr. 11: Schéma funkce vnější recirkulace výfukových plynů.[23]
- Obr. 12: Schéma uspořádání a cyklus regenerace systému se zásobníkovým katalyzátorem. [3]
- Obr. 13: Řez DPF a regenerační cyklus.[25]
- Obr. 14: Uspořádání výfukového systému s implementací SCR.[29]
- Obr. 15: Měřené vozidlo na válcové zkušebně.
- Obr. 16: Válcová zkušebna (pohled shora).
- Obr. 17: Prostředí programu ControlWeb.
- Obr. 18: Program ControlWeb při měření cyklu UDC.
- Obr. 19: Emisní analyzátor Brain Bee AGS-200.[36]
- Obr. 20: Snímač otáček Brain Bee MGT-300.
- Obr. 21: Odlučovač vodní páry.
- Obr. 22: Axiální ventilátor Ventra.
- Obr. 23: Porovnání průchodnosti světla keramickým tělesem katalyzátoru.
- Obr. 24: Porovnání emisí starého a nového katalyzátoru při volnoběžných otáčkách.
- Obr. 25: Porovnání emisí starého a nového katalyzátoru při zvýšených otáčkách.
- Obr. 26: Průběh homologačního cyklu NEDC.[38]
- Obr. 27: Závislost CO<sub>2</sub> v městském cyklu.
- Obr. 28: Závislost CO<sub>2</sub> v mimoměstském cyklu.
- Obr. 29: Závislost NO<sub>x</sub> v městském cyklu.
- Obr. 30: Závislost NO<sub>x</sub> v mimoměstském cyklu.
- Obr. 31: Závislost CO v městském cyklu.
- Obr. 32: Závislost CO v mimoměstském cyklu.
- Obr. 33: Závislost HC v městském cyklu.

Obr. 34: Závislost HC v mimoměstském cyklu.

Obr. 35: Srovnání průměrných hodnot CO<sub>2</sub> pro městský a mimoměstský cyklus.

Obr. 36: Srovnání průměrných hodnot NO<sub>x</sub> pro městský a mimoměstský cyklus.

Obr. 37: Srovnání průměrných hodnot CO pro městský a mimoměstský cyklus.

Obr. 38: Srovnání průměrných hodnot HC pro městský a mimoměstský cyklus.

## 6.2 Seznam tabulek

Tab. 1: Parametry motoru Felicia 1,3i.[41]

Tab. 2: Parametry válcové zkušebny.

Tab. 3: Parametry měřicího analyzátoru Brain Bee AGS-200.[35]

Tab. 4: Parametry axiálního ventilátoru Ventra.

Tab. 5: Naměření hodnoty emisí simulace emisní kontroly.