

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra vozidel a pozemní dopravy

**Vliv technického stavu výfukové soustavy na
produkci emisí**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Diplomant: Bc. Milan Svoboda

PRAHA 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Milan Svoboda

Technika a technologie v dopravě a spojih

Název práce

Vliv technického stavu výfukové soustavy na produkci emisí

Anglický název

The influence of exhaust system's technical factors on emission production

Cíle práce

Cílem práce je analyzovat vliv technického stavu komponentů výfukových soustav spalovacích motorů osobních vozidel na produkci emisí. Provést experimentální ověření vybraných poruch součástí výfukových systémů z hlediska jejich vlivu na skladbu a produkci emisí.

Metodika

- prostudovat základní literaturu, normy, internetové odkazy a další dostupné prameny z celého světa a provést literární rešerši v oblasti výfukových soustav vozidel a jejich vlivu na produkci emisí
- vyhledat a kontaktovat významné instituce, výrobce, a servisní organizace zabývající se problematikou výroby a servisu výfukových systémů vozidel
- provést vlastní analýzu závislosti produkce emisí vozidel na technickém stavu komponentů výfukových systémů a uvést případně nové teoretické předpoklady a názory pro řešení dané problematiky
- provést experimentální ověření závislosti produkce emisí u vybraných poruch komponentů výfukových soustav vozidel
- vypracovat závěry a doporučení

Rozsah textové části

50-60 str.

Klíčová slova

emise, katalyzátor, lambda-sonda, tlumič hluku, výfuková soustava, výfukové plyny

Doporučené zdroje informací

1. TAKATS, M.: Měření emisí spalovacích motorů. ČVUT, Praha, 1997, 111 s., ISBN 80-01-01632-3
2. BOSCH, kol.: Automotive Handbook. Robert Bosch. Plochingen, 2004. ISBN 0-7680-1513-8
3. VLK, F.: Diagnostika motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2006. ISBN 80-239-7064-X
4. PEJŠA, L. – KADLEČEK, B. – JURČA, V. – aj.: Technická diagnostika. Vysokoškolská skripta. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta. ISBN 80-213-0249-6
5. VLK, F.: Příslušenství vozidlových motorů. Nakladatelství a vydavatelství VLK Brno. 2002. 338 s. ISBN 80-238-8755-6
6. HENSON, P.: Evaluating Vehicle Emissions Inspection and Maintenance Programs National Research Council. National Academy Press, Washington, 2001, 260 pp., ISBN 0-309-07446

Vedoucí práce

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2014

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2014

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan TF ČZU

V Praze dne 20. 12. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv technického stavu výfukové soustavy na produkci emisí“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Kotka, Ph.D. a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

V Praze, dne 27. března 2015

A handwritten signature in black ink, reading "Milan Svoboda", written over a horizontal dotted line.

Bc. Milan Svoboda

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Martinovi Kotkovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za vedení během experimentu v dílně Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze a také za odborné konzultace, rady a připomínky, které mi poskytoval v průběhu zpracování diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Markovi Malečkovi, specialistovi funkčních zkoušek motorů ve společnosti ŠKODA AUTO, a.s., za odborné vedení během experimentu uskutečněného v motorovém centru společnosti ŠKODA AUTO, a.s.

Poděkování patří také Ing. Radko Valáškov, Ph.D., vedoucímu projektů firmy DIZ Bohemia s. r. o., Liberec za kontrolu a cenné připomínky ke zpracování diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Janu Šilhovi, technikovi v STK - PECHA v.o.s., který mi poskytl odbornou konzultaci k měření emisí ve stanici technické kontroly.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je analýza vlivu technického stavu komponentů výfukových soustav spalovacích motorů osobních vozidel na produkci emisí. Kapitola „Historický vývoj výfukových soustav“ pojednává o vzniku a vývoji jednotlivých komponentů výfukových soustav. Kapitola „Současný stav v konstrukci výfukových systémů“ je zaměřena na současně používané typy jednotlivých komponentů výfukových soustav, jejich charakteristiku a funkci. V kapitole „Analýza poruch výfukových systémů“ jsou popsány současné poruchy jednotlivých komponentů včetně příčin jejich vzniku a nežádoucích následků. Kapitola „Metody a zařízení pro diagnostiku výfukových systémů“ uvádí metody a zařízení sloužící k efektivnímu odhalení případných poruch. V kapitole „Experimentální ověření vlivu vybraných poruch komponentů výfukových soustav vozidel na produkci emisí“ jsou experimentálně ověřeny vybrané poruchy komponentů výfukových soustav vozidel z hlediska produkce emisí a jejich porovnání s legislativními předpisy. Práce je ukončena shrnutím dané problematiky a doporučením do budoucna.

Klíčová slova: výfuková soustava, výfukové plyny, tlumič hluku, emise, hluk, katalyzátor, lambda-sonda

The influence of exhaust systems' technical factors on emission production

Summary: This dissertation aims to analyse the influence of the components' technical condition in combustion engine exhaust systems of passenger vehicles on the emission production. The chapter "Historical development of exhaust systems" describes the invention and development of individual components of exhaust systems. The chapter "The current state of the exhaust system" is focused on the individual components used in all types of exhaust systems, their characteristics and function. In the chapter "Analysis of exhaust systems failures" current failures of the individual components including causation and undesirable consequences are described. The chapter "Methods and apparatus for exhaust systems diagnostics" shows methods and apparatus used for effective detection of potential failures. In the chapter "Experimental verification of influence of selected failures of vehicle exhaust systems components on emission production" the selected failures of vehicle exhaust systems components are experimentally verified from the point of view of the emission production and its comparison with legislative regulations. The dissertation is completed by an issue summary and recommendation towards the future.

Key words: exhaust system, exhaust gases, noise silencer, emissions, noise, catalyst, lambda probe

Obsah

1	ÚVOD.....	1
2	HISTORICKÝ VÝVOJ VÝFUKOVÝCH SYSTÉMŮ VOZIDEL	3
3	SOUČASNÝ STAV V KONSTRUKCI VÝFUKOVÝCH SYSTÉMŮ.....	5
3.1	SBĚRNÉ VÝFUKOVÉ POTRUBÍ.....	5
3.2	KATALYZÁTOR.....	6
3.3	LAMBDA SONDA	9
3.4	FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC	13
3.5	RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ.....	14
3.6	SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE.....	16
3.7	SENZORY NO _x A PEVNÝCH ČÁSTIC	18
3.8	TLUMIČE HLUKU	19
4	ANALÝZA PORUCH VÝFUKOVÝCH SYSTÉMŮ	22
4.1	ANALÝZA PORUCH VÝFUKOVÉ SOUSTAVY JAKO CELKU A TLUMIČŮ VÝFUKU.....	22
4.2	ANALÝZA PORUCH KATALYZÁTORU.....	24
4.3	ANALÝZA PORUCH LAMBDA SONDY	25
4.4	ANALÝZA PORUCH FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC	27
4.5	ANALÝZA PORUCH RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ.....	28
4.6	ANALÝZA PORUCH SELEKTIVNÍ KATALYTICKÉ REDUKCE (SCR).....	29
5	METODY A ZAŘÍZENÍ PRO DIAGNOSTIKU VÝFUKOVÝCH SYSTÉMŮ	30
5.1	DIAGNOSTIKA TĚSNOSTI VÝFUKOVÉ SOUSTAVY.....	30
5.2	DIAGNOSTIKA LAMBDA SOND	30
5.3	DIAGNOSTIKA KATALYZÁTORŮ.....	31
5.4	ANALÝZA EMISÍ ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ	32
5.5	ANALÝZA EMISÍ VZNĚTOVÝCH MOTORŮ	35
5.6	MĚŘENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO TLAKU.....	37
6	EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ Vlivu Vybraných Poruch Komponentů Výfukových Soustav Vozidel na Produkci Emisí	38
6.1	Vliv poškozeného katalyzátoru na obsah emisí.....	41
6.2	Vliv nefunkční lambda sondy na obsah emisí.....	50
6.3	Vliv netěsnosti výfukového potrubí na obsah emisí	55
6.4	Zkouška těsnosti výfuku	57
7	ZÁVĚR.....	58
	POUŽITÁ LITERATURA	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	67
	SEZNAM PŘÍLOH.....	69

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá analýzou vlivu technického stavu komponentů výfukových soustav spalovacích motorů osobních vozidel na produkci emisí. Výfuková soustava je nedílnou součástí systému vlastní pohonné jednotky automobilu – spalovacího motoru. Jejím úkolem je tlumit hluk vznikající ve spalovacím prostoru pomocí tlumičů hluku, redukovat škodliviny ve výfukových plynech pomocí katalyzátoru a dalších komponentů, odvádět bezpečně výfukové plyny dozadu ke straně tak, aby nemohlo dojít k jejich vnikání do vnitřního prostoru vozidla, a v neposlední řadě vytvářet zvuk odpovídající typu vozidla (tzv. sound design).

Právě v dnešní době je kladen důraz na ekologii a nutnost radikálního omezení znečištění ovzduší s ohledem na zatěžování životního prostředí. Škodliviny vznikají nedokonalým spalováním paliva se vzduchem v spalovacím motoru, hluk vzniká rázy při nepravidelném proudění výfukových plynů z jednotlivých válců spalovacího prostoru a při silných impulzech (třesnutí). Pro optimální funkci pohonné jednotky musí být výfuková soustava dobře navržena a musí být v odpovídajícím technickém stavu, aby byla schopna plnit svou funkci v celém rozsahu otáček a zatížení spalovacího motoru, kdy se mění parametry výfukových plynů, zejména pak průtokové poměry ve výfukovém potrubí.

Je třeba zajistit v požadovaných režimech pohonné jednotky řádnou funkci výfukové soustavy. Jedná se o zařízení, která jsou silně namáhána, neboť pracují ve vysokých a střídajících se teplotách a v silně korozním prostředí. Proto návrh výfukové soustavy musí být pro každou aplikaci proveden optimálním způsobem. Dále musí být zajištěny pravidelné kontroly výfukových soustav, aby nedocházelo k nadměrnému vypouštění škodlivin do okolního prostředí vlivem špatného technického stavu jednotlivých komponentů.

Snaha omezovat nepříznivé účinky automobilů na životní prostředí a na člověka se stala významnou součástí základních požadavků na vývoj nových typů automobilů. V dnešní době komplexního přístupu, formulovaného řadou předpisů nebo norem většinou s mezinárodní platností, tomu ani nemůže být jinak. Aby bylo v provozu možné efektivně omezovat nepříznivé účinky automobilů na životní prostředí a na člověka, je nutné, aby

byla výfuková soustava optimálně navržena a byla v odpovídajícím technickém stavu po celou dobu životnosti vozidla.

Na životnost výfukové soustavy má vliv mnoho veličin, jako jsou: vysoké výkyvy teplot, koroze, vibrace, údržba, použité palivo, povětrnostní vlivy, vlhkost výfukových plynů a další jak chemické, tak i mechanické vlivy. Působení těchto veličin může vést k jedné nebo více poruchám výfukového systému, jejichž příčiny a následky spolu s jejich diagnostikou jsou také součástí této práce.

2 Historický vývoj výfukových systémů vozidel

O vynalezení prvního tlumiče hluku pro automobilové motory se zasloužil Milton O. Reeves. Protože první automobily byly velmi hlasité a jejich hluk děsil koně a obtěžoval obyvatele, nastal požadavek tento hluk omezit. Milton O. Reeves v roce 1896 navrhl systém přepážek, který tlumil hluk přicházející z motoru. 11. května 1897 získal Milton O. Reeves a Marshal T. Reeves patent na tlumič výfuku pro motory. Postupem let začali vývojáři pro tlumení hluku také používat materiál, který je schopen absorbovat hluk a vznikly tak absorpční tlumiče, které se začaly používat spolu s reflexními tlumiči hluku. [1, 2]

Katalyzátor je dalším zařízením, které v historickém vývoji následovalo. Je to zařízení, které na základě chemicko-tepelné reakce zabezpečuje snižování některých složek emisí, aniž by se samo opotřebovávalo, protože se vlastních chemických reakcí přímo neúčastní. [8] Vynálezcem katalyzátoru, který byl patentován v roce 1962, byl Francouz Eugene Houdry. Již tento katalyzátor byl schopen účinně snížit emise oxidu uhličitého a uhlovodíků. [3] Na začátku sedmdesátých let minulého století se v USA a Japonsku začaly používat bezolovnaté benzíny (olovo způsobovalo zanášení pórů aktivní vrstvy), které umožnily nasazení tehdy ještě neřízených katalyzátorů, a tím začalo docházet ke snižování škodlivých složek emisí. Vznik těchto inovací podpořily mimo jiné také první komplexnější emisní předpisy, které tehdy přijal americký stát Kalifornie. Za oběma vynálezy stál koncern General Motors, jehož velkosériově vyráběný katalyzátor z roku 1973 byl ovšem velmi citlivý na směšovací poměr paliva se vzduchem. Tento poměr při běhu motoru hodně kolísal a nepříjemně se odchyloval od ideálního stechiometrického poměru. Technik značky Volvo Stephen Wallman proto přišel s elegantním řešením. Ve spolupráci s firmou Bosch použil její sondu, kterou německá společnost již v roce 1968 vyvinula k měření obsahu kyslíku při výrobě akumulátorů a zamontoval ji do výfukového potrubí. Zde měřila zbytkové množství kyslíku a zjištěná data předávala řídicí jednotce vstřikování. Ta podle nich následně upravila množství paliva ve směsi, později také zapalování. Přesnější dodržení stechiometrického poměru vedlo k tomu, že katalyzátor nebyl tolik ohrožen a zvýšila se jeho účinnost. Na podzim roku 1976 automobil Volvo 244, díky těmto řešením, zlikvidoval 95 procent škodlivých emisí. Vznikl tak pojem řízený katalyzátor. O šest let později Bosch připravil novou, vyhřívanou verzi lambda sondy, která začala fungovat do minuty od nastartování studeného motoru

a zároveň měla dvojnásobnou životnost. Rok 1994, kdy bylo aplikováno v automobilech již přes 50 miliónů sond, znamenal použití keramiky a uspíšení funkčnosti na 10 sekund. Od roku 2002 se lambda sondy objevují také ve vznětových motorech. [4, 5]

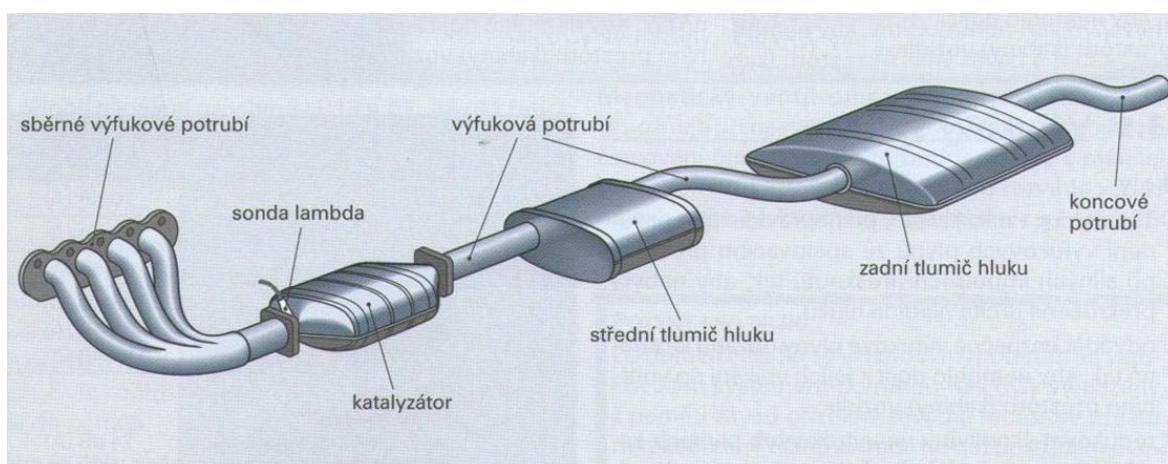
Dalším významným konstrukčním opatřením pro snížení emisí výfukových plynů se stal systém recirkulace výfukových plynů. První systémy pracovaly na principu současného otevření sacího a výfukového ventilu (tzv. vnitřní recirkulace) a přinášely mnoho problémů jako je obtížné spouštění motoru, nerovnoměrný chod motoru na volnoběh a snižovaly výkon motoru. Od roku 1973 se začaly používat EGR ventily řízené podtlakem, které odváděly již vytlačené výfukové plyny zpět z výfukového potrubí do oblasti sání a přípravy paliva. Tyto ventily se spouštěly pouze za určitých podmínek (při dosažení určité teploty motoru) a díky sofistikovanějším řídicím systémům, které se stále vyvíjely, uvedené problémy z převážné části vymizely. [6]

Filtr pevných částic, sloužící k zachycení a shromáždění pevných částic, vznikajících při spalovacím procesu u vznětových motorů, byl používán u stacionárních strojů již v roce 1980. Do automobilů se dostal mnohem později, dá se říct, že až s rozšířením vznětových motorů pro osobní automobily a se zpřísněním emisních předpisů. První sériově montovaný filtr pevných částic se objevil u nové generace motorů HDi (Peugeot a Citroen) relativně nedávno, v roce 2000. Jeho prosazení do sériové výroby lze považovat za srovnatelně významný krok, jako bylo zavedení katalyzátorů. [7]

3 Současný stav v konstrukci výfukových systémů

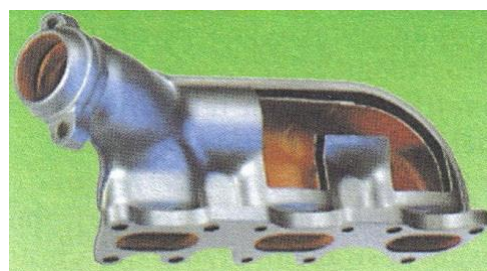
Výfuková soustava je u současných vozidel složena ze sběrného výfukového potrubí, výfukového potrubí, katalyzátoru, lambda sondy, jednoho nebo několika tlumičů hluku (např. z předřazeného – středního a koncového – zadního tlumiče hluku) a koncové trubky. U vznětového a zážehového motoru s přímým vstřikováním paliva je navíc soustava zpětného vedení výfukových plynů; u vznětových motorů také ještě filtr pevných částic. Přední výfukové potrubí je připojeno přírubou na sběrné výfukové potrubí na hlavě válce motoru a ústí do katalyzátoru. Katalyzátor je dále spojen spojovacím potrubím s tlumiči hluku. Z nich jsou výfukové plyny vedeny koncovým potrubím do volného prostoru stranou za vozidlo. Příklad konstrukce výfukové soustavy viz obr. 1.

Obr. 1 Příklad konstrukce výfukové soustavy [11]



3.1 Sběrné výfukové potrubí

V současné době se používá sběrné potrubí vyrobené jako odlitek z litiny nebo častěji dvouplášťové sběrné výfukové potrubí (obr. 2) vyrobené z žárupevného chromniklového ocelového plechu, kde mezera mezi pláští je vyplněna vzduchem, který má velmi dobré tepelně izolační vlastnosti, což vede ke snížení tepelných ztrát a tím rychlejšímu zahřátí katalyzátoru na provozní teplotu. Použití ocelového plechu je výhodné i z hlediska snížení hmotnosti. [8]



3.2 Katalyzátor

Podle koncepce snižování množství škodlivin ve výfukových plynech se u zážehových motorů používají dva systémy; jeden používá jednokomorový oxidační (dvoucestný) katalyzátor a druhý oxidačně-redukční (třicestný) jednokomorový katalyzátor. Ne příliš rozšířenou koncepcí se stal dvoukomorový katalyzátor používaný především americkými výrobci vozidel. U motorů s přímým vstřikováním benzínu musí být navíc z důvodu zvýšeného výskytu oxidů dusíku (NO_x) buď použit selektivní katalyzátor DeNO_x , nebo zásobníkový (absorpční) katalyzátor. [8, 9] Vznětové motory pracují ve směsi palivo-vzduch s přebytkem vzduchu ($\lambda^1 > 1$). Čištění výfukových plynů dodatečným spalováním u vznětových motorů přebírá oxidační katalyzátor. K dodatečnému spalování se využívá zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. Obsah uhlovodíků (HC) a oxidu uhelnatého (CO) se tím znatelně sníží. Katalyzátor v tomto případě přeměňuje jen ty složky výfukových plynů, které je možno měnit oxidací. Dusíkaté složky výfukových plynů se následným spalováním nijak nezmění. [10]

3.2.1 Jednokomorový oxidační (dvoucestný) katalyzátor

Oxidační katalyzátor pracuje s přebytkem vzduchu a používá se u vznětových motorů. Dvoucestný bývá nazýván proto, že přeměňuje dvě složky škodlivin. Pomocí oxidace (tj. spalování) přeměňuje oxid uhelnatý na oxid uhličitý (CO_2) a dále nespálené uhlovodíky z cca 90 % na oxid uhličitý a vodu (H_2O). Ke snížení oxidů dusíku oxidačními katalyzátory prakticky nedochází kvůli přebytku vzduchu. [11]

3.2.2 Dvoukomorový katalyzátor

Dvoukomorový katalyzátor je složen ze dvou sériově řazených katalyzátorů. Aby byla zajištěna správná funkce dvoukomorového katalyzátoru, tak musí být motor poháněn bohatou směsí, tj. s přebytkem paliva ($\lambda < 1$). Výfukové plyny přivedené od motoru nejprve prochází přes redukční a následně oxidační katalyzátor. V prostoru mezi nimi dochází k přifukování vzduchu potřebného k oxidačnímu procesu, při kterém se spotřebovává

¹ Součinitel přebytku vzduchu vyjadřuje poměr mezi skutečným množstvím vzduchu při spalování a množstvím vzduchu teoreticky potřebným pro dokonalé spalování, které je dáno stechiometrickým směšovací poměrem ($\lambda=1$). Pokud je $\lambda < 1$ jedná se o bohatou směs paliva se vzduchem (nedostatek vzduchu), pokud $\lambda > 1$ jedná se o chudou směs (přebytek vzduchu).

kyslík. V prvním (redukčním) katalyzátoru se redukují oxidy dusíku a ve druhém (oxidačním) dochází k přeměně uhlovodíků a oxidu uhelnatého.

Provoz motoru v oblasti $\lambda < 1$ (bohatá směs) má nepříznivý vliv na spotřebu paliva; katalyzátor však může být realizován s jednoduchým systémem přípravy směsi bez použití elektronického řízení. Kromě zvýšené spotřeby je další nevýhodou vznik amoniaku (NH_3) při redukcí oxidů dusíku za nedostatku vzduchu v prvním katalyzátoru, a následně po přífukování sekundárního vzduchu pro oxidační proces dochází ke vzniku oxidů dusíku. Oproti jednodukomorovému tříceštnému katalyzátoru s regulací lambda zde dochází k výrazně horší redukcí oxidů dusíku. Velmi často je nasazen společně s regulací lambda při stechiometrickém složení směsi ($\lambda = 1$). Díky tomu odpadá nevýhoda zvýšené spotřeby paliva, která byla u bohaté směsi. Ovšem tato koncepce s regulací lambda je velmi náročná a nevýhodná díky výše popsaným emisím oxidu dusíku.

Dvukomorový katalyzátor je velmi často používán v USA americkými výrobci vozidel. Evropsší výrobci ho prakticky nepoužívají a to ani u vozidel, která jsou exportována do USA a Japonska. [9]

3.2.3 Jednodukomorový oxidačně-redukční (tříceštný) katalyzátor

V současné době je u zážehových motorů nejvíce používán oxidačně-redukční (tříceštný) katalyzátor. Tento katalyzátor snižuje všechny tři škodlivé složky (oxid uhelnatý, uhlovodíky a oxidy dusíku – z toho pochází název tříceštný, resp. tříšložkový/trojčinný katalyzátor). Předpokladem správné funkce tohoto katalyzátoru a tím jeho vysoké účinnosti je to, aby složení směsi příváděné do válců odpovídalo stechiometrickému poměru².

Tříceštný katalyzátor může být použit buď bez lambda regulace (neřízený tříceštný katalyzátor) nebo ve spojení s lambda regulací (řízený tříceštný katalyzátor). V prvním

² Stechiometrický poměr je přibližně 1:14,7, což znamená, že pro dokonalé spálení 1 kg benzínu je potřeba asi 14,7 kg vzduchu. Skutečný směšovací poměr se však liší v závislosti na teplotě, otáčkách a zatížení motoru. Stechiometrickému směšovacímu poměru odpovídá již dříve zmíněný vzdušný součinitel λ (pozn. 1). Při nedostatečném množství vzduchu 5–10 % ($\lambda = 0,95–0,90$; bohatá směs) dosahují zážehové motory nejvyšších výkonů. Při nedostatku vzduchu není palivo dokonale spáleno, tím se zvyšuje měrná spotřeba paliva a zvyšuje se podíl oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech. Při 5–10 % přebytku vzduchu ($\lambda = 1,05–1,1$; chudá směs) je měrná spotřeba paliva nejnižší, výkon motoru je však nižší a podíl oxidů dusíku ve výfukových plynech je velmi vysoký, viz příloha 1. [8, 11]

případě neřízeného třicestného katalyzátoru je možné při použití bezolovnatých benzínů snížit obsah škodlivin až o 50 %. Bez lambda regulace je používán v omezené míře jako doplněk pro vybavení motorů s karburátorem. Nejúčinnějším způsobem redukce škodlivých emisí za motorem je použití řízeného třicestného katalyzátoru, kde lambda regulace zajišťuje přibližně stálý stechiometrický poměr, při kterém se dosahuje největšího snížení škodlivých emisí výfukových plynů. [9, 11] V literatuře Gscheidle [11] k tomuto typu katalyzátoru uvádí: „V závislosti na provozní teplotě přeměňuje katalyzátor NO_x , CO a HC v oblasti $\lambda = 0,995-1,005$ (okno lambda) až z 98 % na CO_2 , H_2O a N_2 .“

3.2.4 Selektivní katalyzátor DeNO_x

Selektivní katalyzátor DeNO_x se používá u zážehových motorů s přímým vstřikováním benzínu. U těchto motorů je zvýšený výskyt oxidů dusíku ve výfukových plynech způsobený pracovním procesem, který probíhá převážně v oblasti vrstvené chudé směsi. Tento zvýšený výskyt oxidů dusíku není schopen klasický třicestný katalyzátor redukovat. Aby docházelo k odstranění škodlivin i v tomto případě, tak aktivní katalytická vrstva obsahuje kromě platiny také iridium, které je schopno pracovat s vyšším koeficientem přeměny než současně používané rhodium. Redukční reakce v tomto katalyzátoru jsou také podporovány přítomností nespálených složek. Dostatek uhlovodíků a oxidu uhelnatého je zajištěn např. uměle zhoršením spalování ve válcích, obohacením směsi při zrychlování nebo dodatečným vstřikem paliva po jeho vyhoření. Iridiový katalyzátor DeNO_x je schopný pracovat s dobrou účinností pouze v úzkém teplotním pásmu. [8]

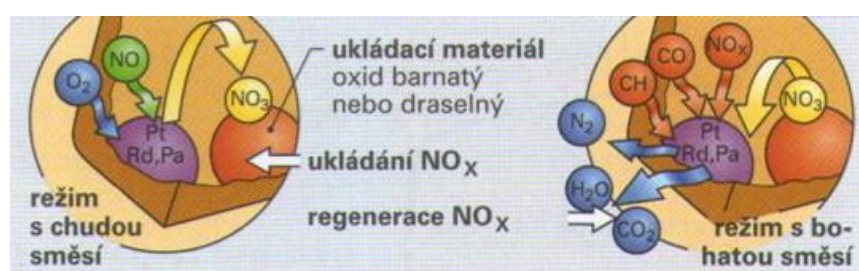
3.2.5 Zásobníkový (absorpční) katalyzátor

Další možnost snížení množství NO_x ve výfukových plynech, které vznikají z důvodů popsaných v předchozí stati, představuje zásobníkový (absorpční) katalyzátor. Kromě vrstev z platiny, paladia a rhodia má ještě speciální přísady, které mohou ukládat oxidy dusíku. Nejčastějším zásobníkovým materiálem jsou oxidy barya, případně oxidy draslíku aj. Princip je takový, že v režimu chudé směsi ukládací materiály vážou (absorbují) oxidy dusíku, dokud nedojde k jejich nasycení. Když je absorpční materiál nasycen, tak to rozezná senzor NO_x a dojde krátkodobě k obohacení směsi. Po jejím shoření se nespálené uhlovodíky spolu s oxidem uhelnatým dostávají do katalyzátoru, kde

opět uvolňují oxidy dusíku, které za přítomnosti vzácných kovů (rhodia) se redukuje na dusík, jak je znázorněno na obr. 3.

Ukládací schopnost zásobníkového katalyzátoru je závislá na teplotě a je nejvyšší v rozsahu teplot 300 až 400 °C. Z tohoto důvodu je nutné pro katalytické čištění výfukových plynů používat dva oddělené katalyzátory. Jeden poblíž motoru třicestný (předřadný) katalyzátor a jeden zásobníkový (hlavní) katalyzátor umístěný dále od motoru. [11, 12]

Obr. 3 Ukládání a regenerace NO_x [11]



3.3 Lambda sonda

V současnosti se používá několik druhů a provedení lambda sond. Nejrozšířenější se stala lambda sonda s aktivní keramikou (s oxidem zirkoničitým), která pracuje na principu galvanického článku a měřítkem pro množství kyslíku je naměřené napětí. Další používanou lambda sondou je odporová lambda sonda (s oxidem titaničitým), která má podobnou konstrukci jako předchozí sonda, ale měřenou veličinou pro množství kyslíku je elektrický odpor. Pro měření rozsáhlých oblastí λ (od chudé do bohaté směsi) se používá širokopásmová lambda sonda, která díky svému rozsahu a přesnému měření je vhodná i pro plynové a vznětové motory. Poslední zmíněnou sondou je planární lambda sonda, která se skládá z několika keramických fólií s vestavěným vyhříváním. Dosahuje své provozní teploty dvakrát rychleji než předchozí lambda sondy a během fáze studeného startu může tudíž snížit emise na polovinu.

V dnešní době se obvykle používá lambda regulace s dvěma kyslíkovými sondami. Druhá lambda sonda (monitorovací sonda) je umístěná za katalyzátorem a slouží ke kontrole jeho správné funkce. [11, 12, 13, 14]

3.3.1 Lambda sonda s aktivní keramikou (s oxidem zirkoničitým)

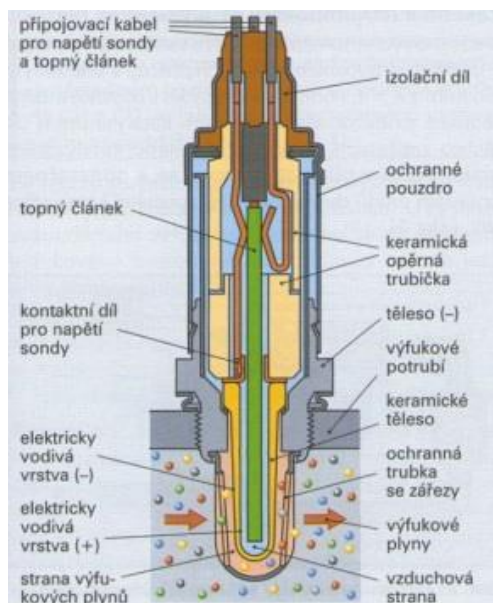
Lambda sonda s oxidem zirkoničitým neboli sonda se skokovou charakteristikou (obr. 4) se skládá z keramického tělesa – oxid zirkoničitý (ZrO_2), které nepropouští plyn a je oboustranně opatřeno tenkou, vzduch propouštějící vrstvou platiny. Vnitřní prostor sondy je spojen s okolním vzduchem a vnější je vsunut do proudu výfukových plynů.

Princip této sondy je založen na galvanickém kyslíkovém článku. Keramický materiál sondy začíná být vodivý pro kyslíkové ionty od teploty $350\text{ }^\circ\text{C}$. Protože je na obou stranách keramického materiálu sondy odlišný poměr obsahu kyslíku, vzniká na vrstvě platiny rozdílný elektrický potenciál. Toto napětí je měřítkem pro množství kyslíku na obou stranách sondy.

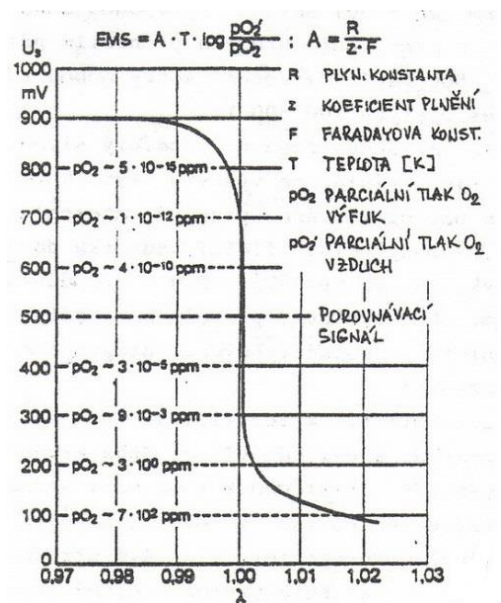
Doba vstřiku se prodlužuje nebo zkracuje na základě napěťových signálů U_s kyslíkové sondy vedených do řídicí jednotky. V řídicí jednotce kyslíkové sondy je naprogramováno tzv. referenční napětí (obvykle 500 mV). Napětí U_s kyslíkové sondy a napětí referenční jsou průběžně porovnávána. Jestliže je napěťový signál z lambda sondy větší ($U_s > 500\text{ mV}$), dochází ke zmenšení dávky paliva, pro $U_s < 500\text{ mV}$ je dávka paliva zvětšena, jak je zřejmé z obr. 5.

V současné době se tato sonda vyrábí výhradně vyhřívaná, aby dosáhla co nejrychleji své provozní teploty. [11, 13, 15]

Obr. 4 Lambda sonda z oxidu zirkoničitého [11]



Obr. 5 Napěťový signál λ sondy [15]

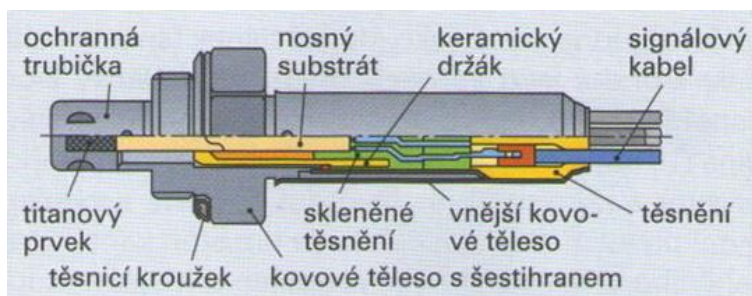


3.3.2 Odporová lambda sonda (s oxidem titaničitým)

Konstrukce a funkce odporové lambda sondy (obr. 6) je v podstatě stejná jako u lambda sondy s aktivní keramikou. Rozdíl je pouze v tom, že oxid titaničitý (TiO_2), použitý jako speciální aktivní keramika, nereaguje na rozdíl v množství kyslíku jako galvanický článek (nevytváří elektrické napětí), ale skokem mění svůj elektrický odpor. Oproti sondě z oxidu zirkoničitého nepotřebuje srovnávací (referenční) vzduch.

Princip je takový, že na kyslíkovou sondu je z řídicí jednotky přiváděno stabilizované napětí a na základě jeho poklesu řídicí jednotka hodnotí složení spálené zápalné směsi. Podle tohoto napětí vyhodnocuje také teplotu kyslíkové sondy, kterou reguluje zapínáním a vypínáním vyhřívacího elektrického proudu. [8]

Obr. 6 Lambda sonda z oxidu titaničitého [11]



3.3.3 Chudá sonda

Protože jsou keramické sondy v oblasti chudé směsi neúčinné a vypínají se, jsou pro tuto oblast řízení činnosti motoru konstruovány tzv. chudé sondy. Jsou to speciální zařízení, jejichž činnost je stabilizována nasazením výkonného zahřívání (18 W) a tím je umožněna činnost sondy v oblasti složení chudé směsi odpovídající $\lambda =$ až do 1,5. Tato sonda je použitelná pouze pro motory pracující převážně v režimu chudé směsi. U motorů pracujících v režimech chudé, bohaté nebo smíšené směsi je výhodnější použití širokopásmové sondy. [13]

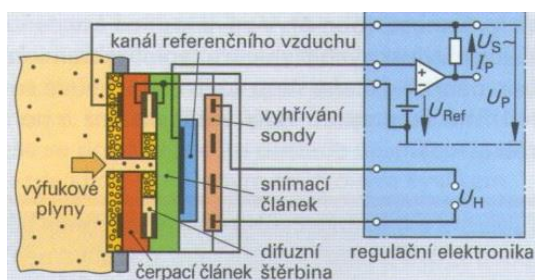
3.3.4 Širokopásmová lambda sonda

Je kombinací chudé sondy s principem hraničního proudu a sondy keramické z dioxidu zirkonia. Se širokopásmovou lambda sondou (obr. 7) je možné plynule měřit hodnoty λ v rozsáhlé oblasti ($\lambda = 0,7-2,5$) – proto je vhodná i pro plynové a vznětové motory. Oba články sondy jsou z oxidu zirkoničitého. Jeden článek slouží jako měřicí (snímací článek) a druhý jako čerpací článek. Články jsou uspořádány tak, že je mezi nimi minimální difuzní štěrbinu (10 až 50 μm). Tato difuzní štěrbinu slouží jako měřicí prostor a je nasávacím otvorem spojena s výfukovými plyny. V měřicím článku je umístěn kanál referenčního vzduchu, který je propojen s vnějším vzduchem.

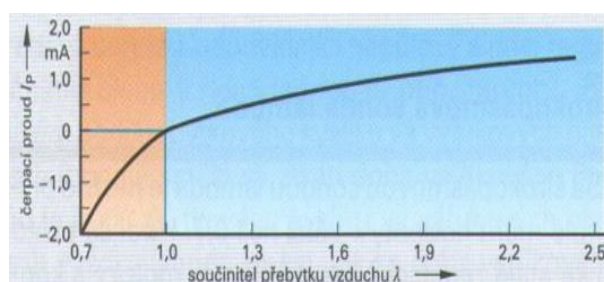
Čerpací článek pracuje na principu, kdy od určité teploty je možné vytvořit pohyb iontů kyslíku (tzv. čerpací proud) připojením napětí k pevnému elektrolytu sondy. Směr pohybu iontů kyslíku přitom závisí na polaritě (+/-) připojeného napětí.

Měřicím článkem (snímacím článkem), který pracuje na principu sondy s aktivní keramikou, se určí zbytkový obsah kyslíku ve výfukových plynech. Například při chudé směsi přečerpává čerpací článek ionty kyslíku ven z měřicí mezery, dokud není v měřicím článku $\lambda = 1$. Potřebný čerpací proud je přitom úměrný zbytkové koncentraci kyslíku ve výfukových plynech, viz obr. 8. Čerpací proud tak slouží jako měřicí veličina pro okamžitou hodnotu lambda. Tím řídicí jednotka motoru, v závislosti na uložené charakteristice, stále vytváří požadovaný směšovací poměr. [9, 11, 14]

Obr. 7 Širokopásmová λ sonda [11]



Obr. 8 Charakteristika širokopásmové sondy [11]



3.3.5 Planární lambda sonda

Planární lambda sonda je dalším vývojem lambda sondy s aktivní keramikou. Je složena z několika keramických fólií. Planární znamená, že na rozdíl k předchozí sondě u této sondy tvoří rovinné fólie elektrolyt v pevné fázi. Planární element sondy má tvar dlouhé destičky s obdélníkovým průřezem. Funkční vrstvy se vyrábějí sítotiskovou technologií. Laminováním (překrytím) různých potištěných fólií je umožněno integrovat také vyhřívaný element do elementu snímače. Keramický těsnící svazek drží planární element snímače v tělese sondy. Dvouplášťová ochranná trubka chrání element snímače obzvláště účinně před termickým a mechanickým zatížením. [12] Planární lambda sondy dosahují své provozní teploty dvakrát rychleji (za dobu kratší 5 sekund) než předchozí lambda sondy a během fáze studeného startu mohou tudíž snížit emise až na polovinu. [14]

3.4 Filtr pevných částic

Filtr pevných částic (obr. 9) slouží k zachycení a shromáždění pevných částic (sazí), které vznikají při spalovacím procesu u vznětových motorů. Je tvořen z keramického voštinového filtračního tělesa (z karbidu křemíku), které je uloženo v kovovém obalu. Filtrační tělesa se také vyrábějí ze slinutých kovů. Keramické těleso se skládá z porézních kanálek, které jsou střídavě přepaženy z jedné nebo druhé strany. Průchod mezi jednotlivými kanálky je možný pouze boční porézní stěnou kanálku, ve které jsou mikroskopicky malé otvory, kterými projdou pouze plynné složky výfukových plynů, ale pevné částice zde zůstanou zachyceny. Pevné částice tak pomalu ucpávají póry filtru. Protitlak plynů pozvolna roste, což způsobuje zvýšení spotřeby paliva a snížení výkonu motoru. Filtr se proto musí regenerovat.

Při regeneraci se přeměňují nashromážděné pevné částice na oxid uhličitý a vodní páru. Teplota spalování pevných částic se pohybuje okolo 550 °C. Za normálních podmínek provozu motoru se však dosahuje maximálních teplot výfukových plynů cca 400 °C. K regeneraci filtrů pevných částic se nejčastěji využívá následujících třech způsobů. Prvním způsobem je snížení teploty spalování pevných částic pomocí aditiv. Aditivum se přidává dávkovací jednotkou k palivu v nádrži a tím se teplota spalování pevných částic cca o 100 °C sníží. Druhým způsobem je zvýšení teploty výfukových plynů – tzv. aktivní regenerace. Teplota výfukových plynů se zvýší cíleným následným vstříkem a zvýšením požadovaného točivého momentu, např. kompresorem klimatizace

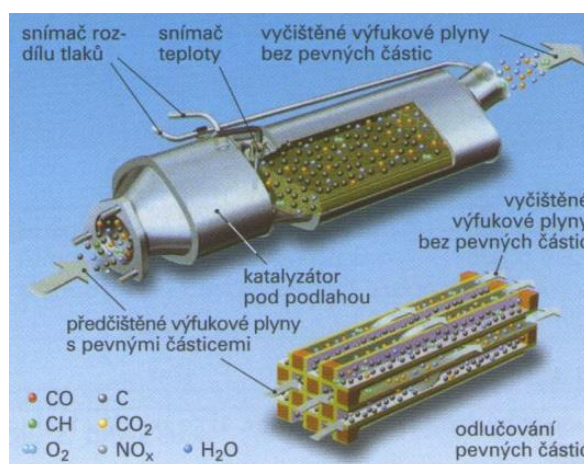
a alternátorem. U třetího způsobu jsou pevné částice postupně odstraňovány spalováním bez zásahu řídicí jednotky motoru. Do filtru pevných částic, který je uložen v bezprostřední blízkosti motoru, je integrován oxidační katalyzátor a s filtrem tvoří jeden celek. Výhodou tohoto systému je, že díky bezprostřední blízkosti uložení filtru pevných částic u motoru dochází k průběžné regeneraci (pasivní regeneraci) vlivem vysoké teploty výfukových plynů, která je k okamžitému spalování sazí dostatečná. Integrací oxidačního katalyzátoru a filtru pevných částic do jednoho celku je docíleno i zmenšení zastavěného prostoru ve vozidle.

U prvního a druhého způsobu, popsaného v předchozím odstavci, se regulace regeneračního procesu provádí pomocí snímače rozdílu tlaků. Snímač rozdílu tlaků zjistí rozdíl tlaků před a za filtrem pevných částic. Pokud je filtr pevných částic plný, je naměřen vyšší rozdíl tlaků a následně se zahájí

regenerace. Teplota během regenerace je zjišťována snímačem teploty a nesmí překročit 700 °C.

Po 80–240 tis. km dochází k zanesení filtru částicemi popela. Údržba je řídicí signalizována kontrolkou na přístrojové desce. [10, 11]

Obr. 9 Filtr pevných částic [11]



3.5 Recirkulace výfukových plynů

Dalším opatřením k dosažení současných emisních norem je recirkulace výfukových plynů (též nazýváno zpětné vedení výfukových plynů). Jedná se o velmi účinnou metodu snižování oxidů dusíku u vznětových, a také zážehových motorů s přímým vstřikováním paliva.

Výfukové plyny se chovají jako tzv. inertní plyny, nezúčastňují se tedy spalování zápalné směsi. Snižují koncentraci kyslíku v nově nasávaném vzduchu pro přípravu směsi, čímž je přímo ovlivněno snížení rychlosti prohoření paliva. Při zpomalení procesu vyhoření dochází ke snížení hraničních hodnot teploty hoření a tím i k redukcí teplotně závislých emisí oxidů dusíku. Do určitého bodu může zvyšování podílu zbytkových plynů působit pozitivně na přeměnu energie a tím na spotřebu paliva. Další zvyšování podílu

zbytkových plynů vede k redukci maximální teploty při spalování a následkem toho ke snížení tvorby oxidů dusíku. Zároveň však zvýšení podílu zbytkových plynů nad jistou hranici vede k nedokonalému spalování a tím ke zvýšení emisí uhlovodíků (také pevných částic u vznětových motorů), spotřeby paliva a nerovnoměrnosti chodu motoru. Tyto faktory určují horní hranici recirkulace (podíl výfukových plynů v nasávané směsi vzduchu a plynů), která se pohybuje okolo 15 až 20 % u zážehových motorů a až 40 % u motorů vznětových.

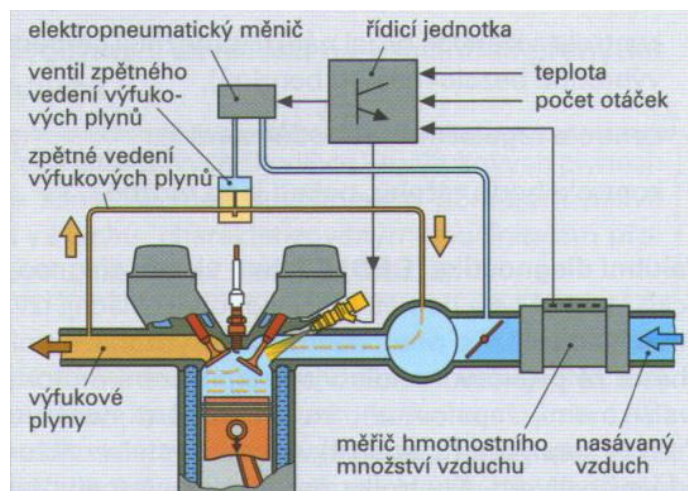
Zpětné vedení výfukových plynů se používá u motoru zahřátého na provozní teplotu v oblasti částečného zatížení a $\lambda = 1$. Vypíná se vždy, když se spaluje bohatá směs paliva a vzduchu, při které vzniká málo sloučenin oxidů dusíku, např. při spouštění studeného motoru, jeho ohřívání na provozní teplotu, akceleraci, plném zatížení, apod. Při běhu motoru naprázdno se zpětné vedení výfukových plynů kvůli klidnému chodu motoru u zážehových motorů vypíná. U vznětových motorů lze tento zhoršený chod motoru vyrovnávat systémy regulace volnoběhu. Záporný dopad recirkulace výfukových plynů na výkon motoru není nijak velký vzhledem k tomu, že se recirkulace využívá především v oblasti částečného zatížení.

Množství výfukových plynů pro přípravu směsi lze buď ovlivňovat variabilním časováním (překrytím otevření ventilů motoru, kdy sací a výfukový ventil jsou současně otevřeny). V tomto případě se jedná o tzv. „vnitřní“ recirkulaci spalin. Většího ovlivnění podílu inertních plynů lze dosáhnout „vnější“ recirkulací spalin pomocí AGR (z něm. Ab-Gas-Rückführ-Ventil), popř. EGR (z angl. Exhaust Gas Recirculation) ventilů. Podíl zpětného vedení výfukových plynů lze také zvýšit chlazením zpětně přivedených výfukových plynů. Recirkulace se řídí v závislosti na teplotě, zatížení a otáčkách motoru. [11, 12, 13]

Ventily zpětného vedení výfukových plynů (AGR, EGR – ventily) odvádějí již vytlačené výfukové plyny zpět z výfukového potrubí do oblasti sání a přípravy paliva, jak je vidět na obr. 10. Většina těchto ventilů je ovládána podtlakem – jedná se tedy o pneumatické AGR ventily. Používají se jednoduché membránové ventily, příp. jednomembránové ventily se snímačem teploty nebo se snímačem jejich polohy pomocí potenciometru. V poslední době se také používají čím dál častěji elektromagnetické AGR ventily. Tyto ventily pracují až desetinásobně větší rychlostí

a mohou být přesněji ovládány řídicí jednotkou. Jsou také konstrukčně jednodušší vzhledem k tomu, že se obejdou bez podtlaku. [8, 16]

Obr. 10 Zpětné vedení výfukových plynů (vnější recirkulace) [11]



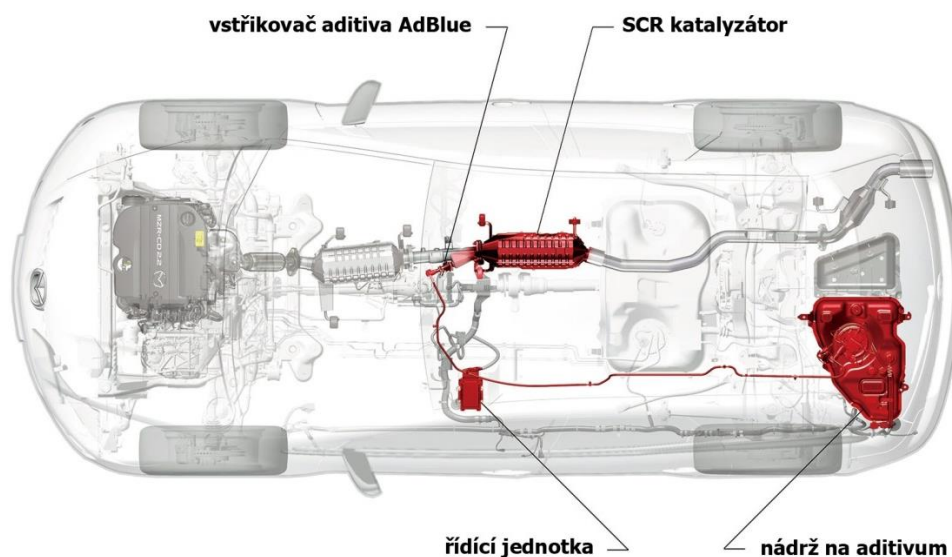
3.6 Selektivní katalytická redukce

Stále se zpřísnující normy si vyžadují nové a zdokonalené cesty ke snižování obsahu škodlivin ve výfukových plynech. Jednou z účinných a v dnešní době rozvíjejících se cest jak snížit množství oxidů dusíku ve výfukových plynech je selektivní katalytická redukce (SCR) využívající vstřikování močoviny (obchodním názvem tzv. AdBlue³) do výfukového potrubí. Tato metoda je již dlouhá léta využívána u nákladních automobilů a dochází k jejímu rozšíření na osobní a užitková vozidla.

Princip je takový, že výfukové plyny, které prošly oxidačním katalyzátorem a filtrem pevných částic, následně procházejí procesem selektivní katalytické redukce, viz obr. 11. Při této redukci dochází ke vstřikování aditiva AdBlue na bázi močoviny před SCR katalyzátor do výfukového potrubí. Aditivum se vlivem teploty výfukových plynů přeměňuje na čpavek, který začne reagovat s NO_x . Oxidy dusíku se za pomoci chemické reakce rozkládají na dusík a vodní páru. Elektronická řídicí jednotka ovládá dávkovací systém a s jeho pomocí tak zajišťuje přesnou regulaci dávkovaného množství aditiva v závislosti na parametrech motoru, otáčkách motoru a provozní teplotě. [27, 28]

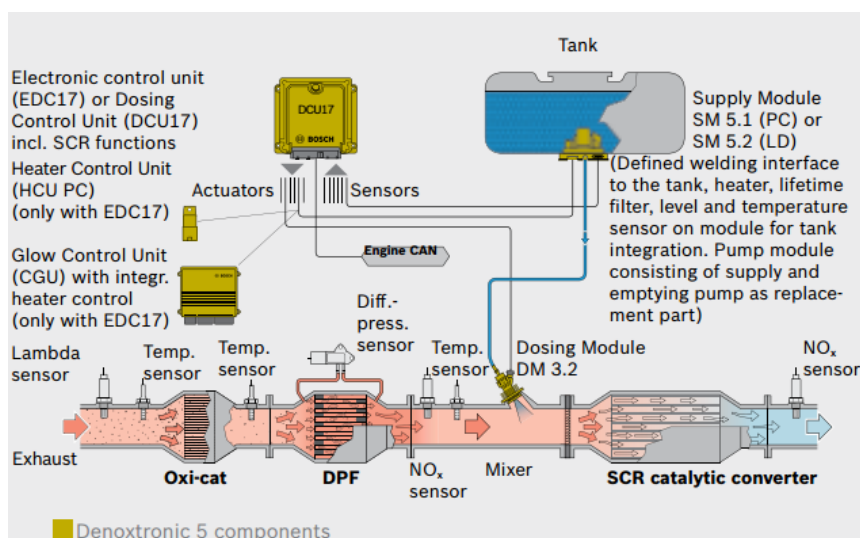
³ AdBlue je netoxický 32,5 % roztok močoviny s vodou. [29]

Obr. 11 Umístění součástí SCR ve vozidle [27]



Existuje více variant tohoto systému od různých výrobců např. MAN AdBlue® a BlueTec od Mercedes Benz. Oba zmíněné systémy jsou využívány především u nákladních vozidel. V současné době společnost Bosch vyvinula systém zvaný Denoxtronic (obr. 12) i pro použití v osobních vozidlech.

Obr. 12 Denoxtronic 5 [29]



Bosch uvádí, že s pomocí systému Denoxtronic dochází ke snížení emisí NO_x až o 95 procent a je s ním možné plnit přísné emisní normy Euro 6. Navíc motor vybavený

systemem Denoxtronic může spalovat chudší směs a díky tomu dochází ke snížení spotřeby paliva o 5 procent, což může vyrovnat větší počáteční náklady. [29, 30]

3.7 Senzory NO_x a pevných částic

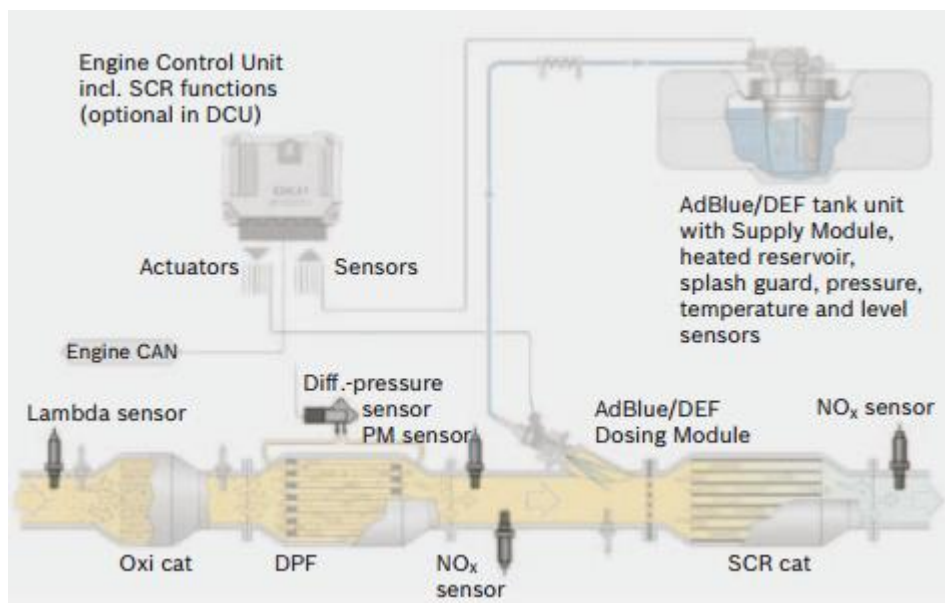
Pro diagnostiku systému čištění výfukových plynů jsou v současnosti používány senzory NO_x a pevných částic. V provedení od výrobce Bosch mají vlastnosti popsané v dalších odstavcích.

Senzor NO_x je umístěný za SCR katalyzátorem a měří obsah oxidů dusíku ve výfukových plynech. Senzor komunikuje se řídicí jednotkou motoru a napomáhá přesné regulaci vstřikovaného množství močoviny v závislosti na skutečné potřebě. Má velmi dobrou povrchovou úpravu, která zaručuje odolnost proti velkým výkyvům teplot a hromadění usazenin. Senzor NO_x funguje na amperometrickém principu dvojité komory, tzn. na měření proudu mezi dvěma elektrodami ponořenými do roztoku elektrolytu s použitím tzv. Clarkovy měřicí cely.

Senzor pevných částic je umístěný za filtrem pevných částic, kde sleduje jeho účinnost a případné poruchy. Senzor má velmi vysokou citlivost a je tedy schopen spolehlivě pracovat i při malých průtocích výfukových plynů. Senzor pevných částic funguje na principu měření odporu: absorbované pevné částice tvoří vodivé cesty mezi hřebeny elektrod, kterými prochází elektrický proud. Senzor je pravidelně regenerován pomocí vyhřívacího tělesa.

Kromě těchto senzorů nalezneme ve výfukovém systému vznětového motoru λ sondu, senzor rozdílu tlaku a teplotní senzory. [38, 39, 40, 41] Umístění senzorů ve výfukovém systému vznětového motoru je zobrazeno na obr. 13.

Obr. 13 Umístění senzorů ve výfukovém systému vznětového motoru [39]



3.8 Tlumiče hluku

V současné době se ve výfukovém systému používá jeden nebo několik tlumičů hluku, např. střední a zadní tlumič hluku. Tyto tlumiče jsou konstruovány jako reflexní, absorpční nebo kombinované. Reflexní tlumiče tlumí střední a nižší frekvence hluku, absorpční tlumiče pohlcují vlny vysokých frekvencí hluku. Velmi často se používá kombinovaný systém se dvěma až třemi tlumiči a s propojovacím potrubím. První a střední tlumič je obvykle reflexní, případně rezonanční, poslední tlumič je zpravidla konstruován jako absorpční. [15]

3.8.1 Reflexní tlumič hluku

Reflexní tlumič hluku (obr. 14) se skládá z různě velkých komor, které jsou spolu spojeny na obou stranách otevřenými vnitřními trubkami, které jsou proti sobě přesazené, čímž je vynuceno obrácení proudu plynů v komorách tlumiče hluku. Tyto trubky bývají také perforované. Při množství změn průtočných průřezů se zvukové vlny odrážejí a zároveň tlumí. Reflexním tlumičem hluku se ve výfukové soustavě tlumí hluky středních a nižších frekvencí.

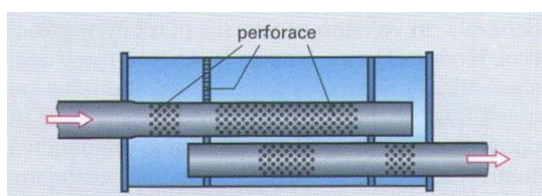
3.8.1.1 Rezonanční efekt

Při změnách průřezů probíhají zvukové vlny vícekrát tam a zpět a vytvářejí podle okolností rezonance. Podle toho, jestli se rezonanční vlnění vytváří v hlavní větvi nebo odbočce, hovoříme o řadovém rezonátoru nebo o odbočkovém rezonátoru. S rezonátory lze dosáhnout silného útlumu hluků určitých frekvencí.

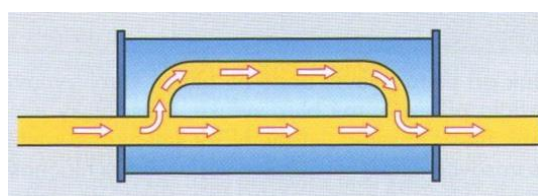
3.8.1.2 Interferenční efekt (obr. 15)

Jestliže se rozdělí proud výfukových plynů v tlumiči hluku a potom se zvukové vlny po uražení rozdílně dlouhých drah zase spojují, tak se při setkání zvukové vlny částečně ruší. [11]

Obr. 14 Reflexní tlumič hluku [11]



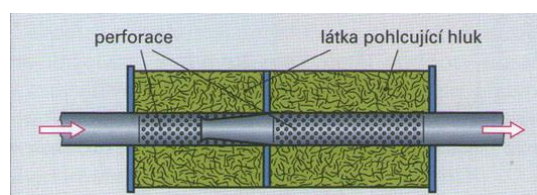
Obr. 15 Interferenční efekt [11]



3.8.2 Absorpční tlumič hluku

Absorpční tlumič hluku (obr. 16) se skládá z jedné nebo několika komor, které jsou naplněny látkou pohlcující hluk (minerální vatou nebo skelnými vlákny). Proud výfukových plynů je uvnitř tlumiče veden děrovanou trubkou a může proudit tlumičem hluku téměř bez překážek. Zvukové vlny ale pronikají bočními otvory až do absorpčního materiálu, ve kterém se pohlcují. Absorpční tlumiče hluku tlumí především zvukové vlny vyšších frekvencí a používají se především jako koncové tlumiče. [11]

Obr. 16 Absorpční tlumič hluku [11]

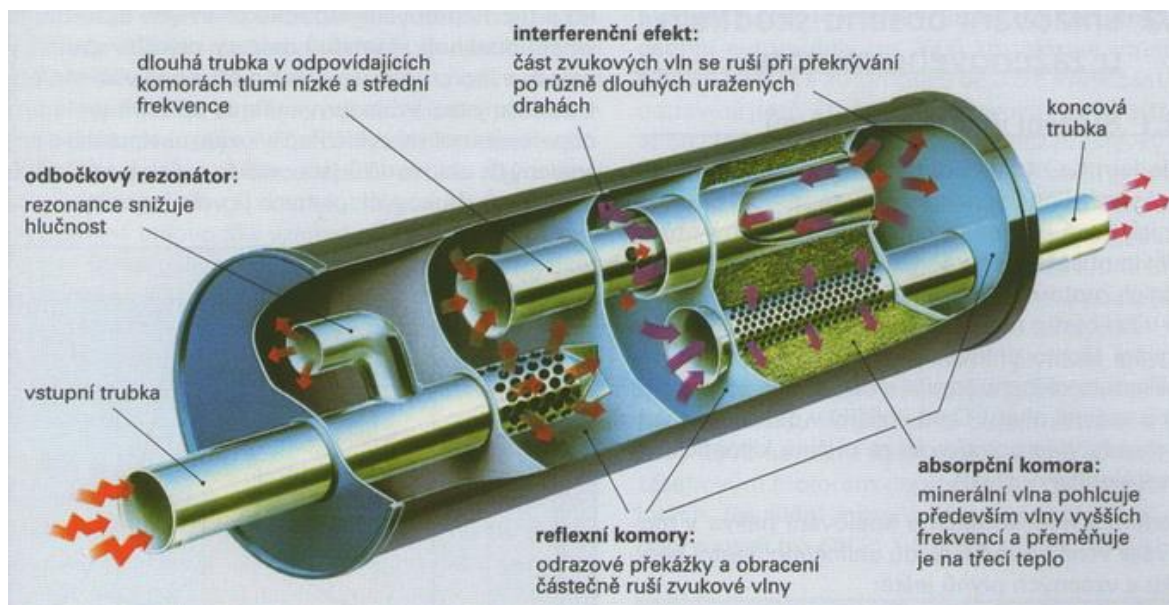


3.8.3 Kombinovaný reflexně-absorpční tlumič hluku

Reflexní tlumiče hluku mohou být dobře vyladěny na tlumení nízkých frekvencí. Absorpční tlumiče hluku působí až v horní oblasti frekvencí. Většinou se proto používají oba tlumiče současně, a to buď jednotlivě nebo ve společném pouzdře, viz obr. 17. [11]

Při použití společného pouzdra se musí brát na zřetel prostorové poměry podvozku a také to, že objem a hmotnost kombinovaného tlumiče má své hranice. [8]

Obr. 17 Kombinovaný reflexně-absorpční tlumič hluku [11]



4 Analýza poruch výfukových systémů

Výfuková soustava je důležitou součástí automobilu. Její konstrukce a technický stav se významnou měrou podílí na skladbě emisí vypouštěných do vnějšího prostředí.

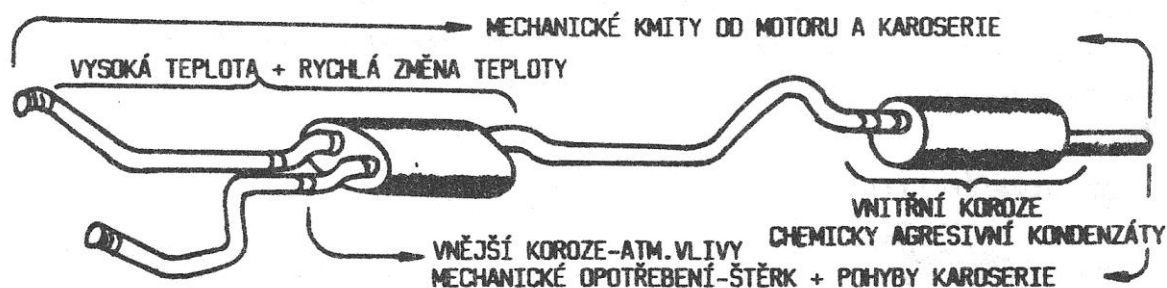
Základním požadavkem, který je nutno zajistit, je plynutěsnost. Všechny části výfukové soustavy musí být plynutěsné, aby únik spalin neovlivňoval tlumení hluku a produkty spalování nemohly vnikat do vnitřního prostoru vozidla. Těsnost potrubí má také vliv jak na spotřebu paliva, výkon motoru a jeho teplotu, tak i na plnění válců motoru a jejich výplach vytvářením protitlaku. Rovněž se klade důraz na co nejnižší odpor výfukové soustavy, který je zapříčiněn prouděním plynů výfukovým potrubím, a tím tedy na optimalizaci výkonu motoru. [11, 13]

Životnost výfukové soustavy je ovlivněna mnoha veličinami, jako jsou: vysoké výkyvy teplot, koroze, vibrace, údržba, použité palivo, povětrnostní vlivy, vlhkost výfukových plynů a různé chemické a mechanické vlivy. [17] Působení těchto veličin může vést k jedné nebo více poruchám výfukového systému. V následujících kapitolách je popsána analýza těchto jednotlivých poruch, příčiny jejich vzniku a z toho vyplývající nežádoucí následky.

4.1 Analýza poruch výfukové soustavy jako celku a tlumičů výfuku

Životnost výfukové soustavy je podmíněna mechanickým, chemickým a tepelným zatížením jak je znázorněno na obr. 18.

Obr. 18 Vliv jednotlivých účinků na výfukový systém [15]



Přední část výfukového systému je zatížena teplotou a teplotními změnami. Jedná se především o vysoký teplotní spád mezi vnitřním prostorem výfukového systému a jeho okolím. Nepříznivě působí jak rozdílná tepelná roztažnost jednotlivých částí systému, tak i častá změna teplot, která zapříčiňuje opalování povrchu, čímž dochází k zeslabování tloušťky materiálu.

Po celé délce výfukového systému působí vnější koroze vznikající v důsledku povětrnostních změn (působení vlhkosti a posypových materiálů) a zároveň vnitřní koroze, která je způsobena agresivními kondenzáty výfukových plynů (voda, sírné kyseliny). Vnitřní korozi jsou ohroženy převážně zadní chladnější části výfukového potrubí. Přední tlumič je vzhledem ke svému umístění blízko motoru zatížen převážně vysokými teplotami a rychlou změnou teplot. Zadní tlumič, který je studenější, více trpí vlivem vnitřní koroze. Působením koroze včetně opalování povrchu dochází k zeslabení použitého materiálu, což po určité době vede ke vzniku netěsností, kterými začnou výfukové plyny unikat a začne se tak snižovat účinnost výfukové soustavy. Netěsnosti vedou ke zvýšené hladině hluku, která nejen obtěžuje posádku vozu, ale může také dojít k otravě výfukovými plyny, které mohou vnikat do vnitřního prostoru vozidla.

Dále je výfukové potrubí namáháno mechanickými rázy, které se přenáší přes pružné závěsy z motoru a karoserie. K tomu přistupují vlivy pulzujícího proudu výfukových plynů. Pružné závěsy, které jsou přetržené nebo zdeformované, nejsou schopny držet některou část výfuku v dané poloze a vlivem vlastní hmotnosti mohou vzniknout na extrémně zatížených částech praskliny nebo může dojít k úplnému rozpojení výfukového potrubí (viz obr. 19). K rozpojení běžně dochází za přírubovým spojením, v oblasti sváru a na místech, kde jsou pružné závěsy. K mechanickému poškození dochází také vlivem nečistot na cestách, jako jsou například kameny. [8, 15, 17]

Obr. 19 Zkorodovaný a rozpojený výfuk [26]



Všechny tyto vlivy představují značné zatížení výfukového systému. Míra vlivu jednotlivých účinků závisí na technickém provedení systému a jeho umístění na vozidle, a dále na provozních podmínkách motoru. Díky častým studeným startům, městskému

a krátkodobému provozu dochází k vysoké vnitřní korozi vlivem agresivních kondenzátů ve výfukových plynech. Při delších jízdách není tento typ koroze tolik významný. K vnitřní korozi nedochází nejen při provozu vozidla, ale i v době mimo provoz. Vnitřní koroze je tedy funkcí času, zatímco tepelné a mechanické vlivy jsou závislé na době provozu vozidla. [15]

4.2 Analýza poruch katalyzátoru

K poruše katalyzátoru může dojít při použití nesprávného paliva, poškozeným zapalováním, poškozenou lambda sondou a uvolněným nebo poškozeným výfukem. V případě poškození katalyzátor přestává plnit svoji funkci a stává se neprůchodným. Tím dochází ke zvýšenému množství škodlivin ve výfukových plynech a současně ke snížení výkonu motoru a zvýšení spotřeby paliva. [17]

Obr. 20 Roztavený katalyzátor [11]

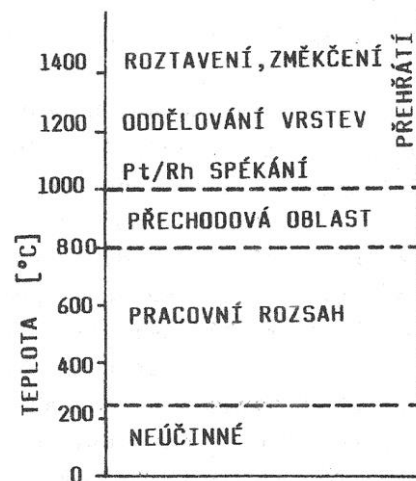


Ke snížení účinnosti katalyzátoru dochází vlivem zanesení aktivní hmoty. Tento jev se také nazývá „otrávení“ katalyzátoru. Dochází k němu v případě, že jsou přidávány do benzínu olovnaté sloučeniny. Rovněž zbytky spalování z motorového oleje se mohou usazovat na katalyticky aktivní vrstvě katalyzátoru a tím snižovat jeho účinnost.

Porucha může také vzniknout při roztlačování vozidla, kdy se do katalyzátoru může dostat nespálená směs paliva, která pak poškodí aktivní hmotu a omezí její funkčnost.

Účinnost katalyzátoru významně závisí na jeho teplotě. Katalyzátor začíná fungovat přibližně od teploty 250 °C, přičemž jeho optimální teplota potřebná k dosažení vysoké účinnosti a dlouhé životnosti by se měla pohybovat v teplotním rozsahu 400 °C až 800 °C. Pracovní teplota je závislá na konstrukčním řešení. Čas pro dosažení této teploty lze významně zkrátit umístěním katalyzátoru blíže

Obr. 21 Tepelný rozsah činnosti katalyzátoru [15]



k motoru, použitím sběrného potrubí se vzduchovou tepelnou izolací a vyhříváním katalyzátoru po spuštění. V teplotním rozmezí 800 °C až 1000 °C dochází k rozsáhlému teplotnímu stárnutí katalyzátoru, kdy dochází ke spékání vzácných kovů a nosné vrstvy, a tím snížení jeho aktivní povrchové vrstvy. Při teplotách nad 1000 °C dochází k rychlému stárnutí katalyzátoru, což vede k jeho úplné nefunkčnosti. Pokud dojde k poruše motoru jako např. vynechání zapalování, tak se teplota katalyzátoru může dostat přes hranici 1400 °C. Tato vysoká teplota vede k „zapečení“ nosného materiálu a tím k úplnému zničení, viz obr. 20. V extrémních případech může dojít i k jeho propálení. [8, 13, 15] Tepelný rozsah činnosti katalyzátoru je znázorněn na obr. 21.

4.3 Analýza poruch lambda sondy

Stejně jak tomu je u katalyzátoru, tak i lambda sonda potřebuje pro správnou funkci určitý rozsah teplot. Tento teplotní rozsah se pohybuje podle typu sondy mezi 250–950 °C. [12] Pokud je horní hranice tohoto teplotního rozsahu překročena, dochází ke snížení životnosti lambda sondy. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby byla lambda sonda umístěna ve výfukovém potrubí tak, aby při dlouhodobém plném výkonu motoru nebyla překročena teplota 850 °C a krátkodobě 930 °C. Z tohoto důvodu je výhodnější použití vyhříváných lambda sond elektrickým topným tělesem, které mohou být umístěny ve větší vzdálenosti motoru a nejsou poté ohroženy přehřátím při dlouhodobém provozu na plný výkon.

K poruchám lambda sondy může také dojít vlivem silného mechanického namáhání a dále nerovnoměrným pulsujícím průtokem výfukových plynů od jednotlivých válců motoru.

Na keramické části sondy dochází k usazování zbytků hoření, a také částic zinku a fosforu pocházejících z motorového oleje. Tyto usazeniny mohou vést k nefunkčnosti sondy. Obdobně jako u katalyzátoru musí být použit bezolovnatý benzín, aby nedocházelo k zanášení katalyticky aktivní vnější platinové elektrody. [9, 15]

Další příčinou poškození lambda sondy může být tepelný šok. K tepelnému šoku dojde při vstříknutí vody na rozpálenou lambda sondu. V případě pravidelného prudkého ochlazování horké sondy vodou by mohlo dojít vlivem tepelných šoků ke vzniku trhlin v keramice sondy, což by vedlo k jejímu vyřazení z provozu. [13]

Pokud je lambda sonda vystavena delší dobu příliš vysokým teplotám, tak reaguje podle okolností pomaleji na změny poměru ve směsi palivo-vzduch. Na základě toho dochází ke zvětšování doby periody dvoubodového regulátoru. Řídicí jednotka kontroluje tuto regulační frekvenci a indikuje příliš dlouhé chování sondy rozsvícením kontrolky na přístrojové desce. Pomocí napětí a proudu se kontroluje žhavicí odpor lambda sondy. Pokud vznikají nevěrohodné signály, jsou poruchy ukládány jako chybové kódy do paměti chyb. [12]

Ostatní poruchy, které mohou nastat, jsou uvedeny níže.

- Ohnutá sonda vlivem nesprávné instalace.
- Roztavený kabel nebo přípojka po kontaktu s rozpáleným povrchem některé části výfukové soustavy.
- Karbonové usazeniny vzniklé z příliš bohaté směsi, opotřebených ventilů nebo z netěsností ve výfukovém systému (obr. 22).
- Zkorodované kontakty nebo utržená kabeláž.
- Bílé nebo šedé nánosy z přísad do paliva nebo ze spáleného oleje (obr. 23). [25]

Pokud nastane jedna z těchto poruch, je nutné lambda sondu vyměnit za novou.

Obr. 22 Karbonové usazeniny na lambda sondě [25]



Obr. 23 Bílé nebo šedé nánosy na lambda sondě [25]

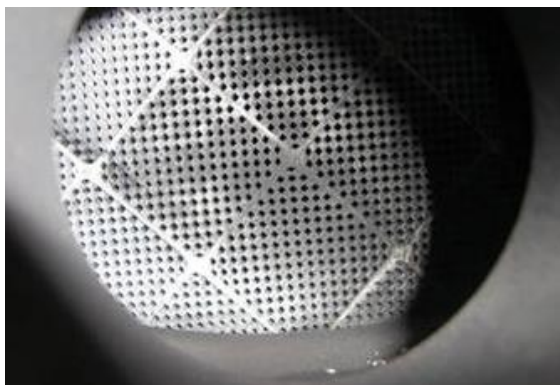


K vysoce účinné přeměně škodlivých složek výfukových plynů dochází pouze ve velmi malém rozsahu složení směsi v tzv. „lambda oknu“ ($\lambda = 0,99$ až $1,00$), jak je znázorněno v příloze 1. [8] Z toho lze odvodit, že netěsnost výfukového potrubí před sondou bude mít vliv na její funkci, na funkci katalyzátoru a tím na účinnost přeměny škodlivých složek výfukových plynů.

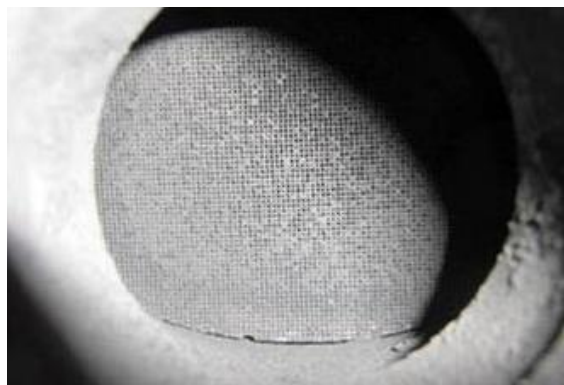
4.4 Analýza poruch filtru pevných částic

Filtr pevných částic zachycuje pevné částice, které postupně zacpávají jeho póry. Po určitém počtu kilometrů je potřebná regenerace, k níž se používá několik způsobů, které jsou popsány v kapitole 3.4. Při spalování pevných částic během regenerace dochází ke vzniku malého podílu popela, který se shromažďuje s částicemi ve filtru a postupem času filtr ucpává, čímž je mimo jiné snižován výkon motoru. Ucpání je signalizováno kontrolkou na přístrojové desce vozidla. Pokud k tomu dojde, je nutná demontáž filtru a jeho vyčištění nebo výměna. K této situaci dochází obvykle po 80 000 až 240 000 km v závislosti na systému a způsobu jízdy. [11] Na obr. 24 a obr. 25 je porovnání nezanešeného a zanešeného filtru pevných částic.

Obr. 24 Nezanešený DPF [18]



Obr. 25 Zanešený DPF [18]



V současné době mnoho majitelů vozidel řeší problém jak s ucpaným filtrem naložit. Cena nového filtru se pohybuje v desítkách tisíc na základě typu vozidla a může přijít až na 1/5 pořizovací ceny vozidla. Kromě zakoupení nového filtru se v současnosti jako alternativa nabízí renovace nebo dokonce úplné odstranění starého filtru.

Renovace (vyčištění) DPF by měla být prováděna jen renomovanými firmami. V případě neodborného zásahu může dojít k narušení struktury povrchu filtru, čím se velmi sníží jeho další životnost nebo se stane rovnou nefunkčním.

Na trhu se vyskytuje řada firem, které nabízejí úplné odstranění DPF. Nelákají pouze na úsporu nákladů vynaložených na nový filtr, ale také na zvýšení výkonu a snížení spotřeby paliva. Tento zákrok je pro majitele vozidel nezákonný a také dochází k několikanásobnému nárůstu škodlivin vypouštěných do okolního prostředí. Tyto vozy přitom emisními kontrolami projdou kvůli mírným normám, špatnému vybavení měřicích stanic nebo díky podvodu. V případě odstranění DPF se navíc upravuje software automobilu, aby diagnostika nekontrolovala zanesení filtru. Tato softwarová úprava může mít negativní vliv na další parametry řízení motoru. [19, 20, 21]

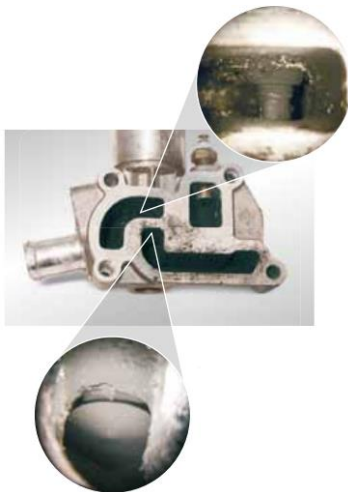
4.5 Analýza poruch recirkulace výfukových plynů

Všechny systémy recirkulace popsané v kapitole 3.5 trpí znečištěním potrubí a ventilů pevnými částicemi z výfukových plynů, jak je znázorněno na obr. 26. To vede s přibývajícím časem k poklesu recirkulujícího množství výfukových plynů. [15] Takový stav se řeší vyčištěním nebo výměnou daného dílu.

Dále může dojít naopak ke zvýšení rychlosti průtoku recirkulujících výfukových plynů, což může být způsobeno poškozeným nebo znečištěným snímačem hmotnosti vzduchu, viz obr. 27. Dalšími částmi, u kterých může nastat porucha, jsou: potenciometr ventilu, snímač tlaku, teplotní snímač nebo elektrické vedení. [22]

Ucpaný nebo nefunkční EGR ventil může vést k nepravdělnosti chodu motoru. To se může projevat neklidným volnoběhem nebo klepáním. Pokud se EGR ventil z nějakého důvodu nezavírá a zůstává otevřen, může nastat problém se startováním motoru. [23, 24]

Obr. 26 Zanesený EGR ventil [22]



Obr. 27 Ucpaný snímač hmotnosti vzduchu [22]



4.6 Analýza poruch selektivní katalytické redukce (SCR)

Systémy selektivní katalytické redukce se potýkají se dvěma hlavními problémy, které mohou v provozu nastat.

Prvním problémem je provoz při nízkých teplotách. Jak již bylo popsáno v kapitole 3.6, tak používaným aditivem je tzv. AdBlue, které je 34,5 procentní roztok močoviny s vodou. Aditivum může během zimního období zamrznout při teplotách nižších než $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud dojde k zamrznutí, tak po startu motoru dojde po několika málo minutách k rozmrznutí a plné funkčnosti systému. Výrobce uvádí, že všechny části systému jsou pro tento stav dimenzovány a neměly by být z tohoto důvodu jakýmkoliv způsobem poškozeny.

Druhým problémem je nemožnost nastartování s prázdnou nádrží AdBlue. Podle typu systému a vozidla se AdBlue doplňuje po několika málo desítkách tisíc kilometrů. Doplňování obvykle probíhá v rámci pravidelných servisních intervalů. Stav množství aditiva je monitorován řídicí jednotkou a je signalizován pomocí kontrolky na přístrojové desce. Pokud z důvodu zanedbané údržby nebo netěsnosti dojde k vyprázdnění nádrže AdBlue, tak u některých vozidel není možné nastartovat motor. [27, 29, 31]

5 Metody a zařízení pro diagnostiku výfukových systémů

5.1 Diagnostika těsnosti výfukové soustavy

Provádí se orientační zkouška těsnosti za pomoci vhodného přípravku, kterým se přicpe koncovka výfuku a sleduje se chování motoru. Pokud má motor tendenci se zastavit, je s největší pravděpodobností těsný. Naopak když otáčky téměř neklesají nebo je z jakékoliv části výfukového potrubí slyšet syčení plynů, tak je ve výfukovém potrubí netěsnost, kterou můžeme lokalizovat. Problémem této orientační zkoušky může být, že u vozidel s OBD může být tento stav zaregistrován v ECU. [32]

5.2 Diagnostika lambda sond

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.3, lambda sonda potřebuje pro svoji správnou funkci určitou teplotu. Teplotní rozsah, při kterém lambda sonda vykonává svoji funkci, je podle typu sondy 250–950 °C. Aby byl dosažen její co nejrychlejší náběh po startu studeného motoru, je lambda sonda vybavena vyhřívacím tělískem. To je schopno lambda sondu vyhřát na teplotu až 300 °C, přičemž se její příkon pohybuje okolo hodnoty 16 W. Tento údaj slouží ke zjištění správné funkce topného elementu sondy.

Keramické těleso lambda sondy, které je v kovovém pouzdře, má dvě elektrody. Vnitřní je v prostředí okolního vzduchu s obsahem kyslíku cca 20,8 % a druhá vnější aktivní keramika je vnořena do toku výfukových plynů, kde se hladina kyslíku pohybuje kolem 0,3–3 %. Elektrické napětí je snímáno z obou stran a jeho změna signalizuje velikost směšovacího poměru. Napětí je snímáno přes kontaktní část mezi keramikou sondy a opěrnou trubkou. Všechny výše uvedené části se proměřují a kontroluje se jejich neporušenost. Správná funkce lambda sondy se kontroluje odvozením velikosti odporu podle tabulek. Napětí sondy se mění s hodnotou vnitřního odporu s teplotou. [13, 15]

Pokud dojde k poruše v okruhu lambda sondy (zkrat, přerušování signálu), tak dojde k zaznamenání této skutečnosti do paměti závad, aniž by byl ukončen chod motoru. Dochází však k vyřazení činnosti regulace, která se např. při zkratu v okruhu neprojeví ani zvýšením spotřeby, protože regulace přejde na náhradní naprogramovanou hodnotu. [13]

Výrobci automobilů předepisují použití diagnostických přístrojů a v příručkách uvádějí přesné hodnoty kontrolních dat. V praxi se používá řada přístrojů např. SP 300730 nebo LST 02. Přístroj SP 300730 (obr. 28) pracuje na tom principu, že registruje signály, které lambda sonda vysílá do řídicí jednotky. Má tři LED-diody: levá červená signalizuje chudou směs, střední zelená optimální směs a pravá červená bohatou směs. Je-li lambda sonda v pořádku, pak při otáčkách motoru cca 3000 min^{-1} obě červené diody střídavě rychle blikají. [33]

Obr. 28 Přístroj na zkoušení funkce lambda sondy SP 300730 [33]



5.3 Diagnostika katalyzátorů

Kontrolu činnosti katalyzátoru ve zkušebně lze provést dvěma způsoby:

- 1) Měřením emisí před a za katalyzátorem pomocí emisního analyzátoru – naměřené výsledky jsou závislé na teplotě katalyzátoru. Čím bude vyšší, tím bude vyšší i jeho účinnost.
- 2) Měřením doby náběhu po studeném startu – výsledky jsou ovlivněny řízením motoru po jeho startu a v době jeho ohřívání. Lze konstatovat, že pokud katalyzátor nenaběhne do 1 minuty po startu motoru, je buď poškozený tak, že neplní svoji základní funkci a nebo byl při výměnách v provozu špatně zvolen.

Pokud je vyžadována komplexní kontrola katalyzátoru, tak je vhodné skloubit oba výše uvedené způsoby dohromady. [32]

Kontrolu stavu katalyzátoru provádějí řídicí jednotky vybavené OBD pomocí druhé lambda sondy, umístěné za katalyzátorem. Signál a jeho amplituda z lambda sondy dává obraz o schopnosti katalyzátoru pojmout kyslík. Podíl poměru zadní a přední amplitudy je měřítkem účinnosti. U provozuschopného katalyzátoru naměříme rozkmit napětí na lambda sondě před katalyzátorem, zatímco na lambda sondě za katalyzátorem téměř žádný. Nevýhodou může být, že se tato kontrola provádí výhradně na zahřátém motoru, zatímco zhoršená účinnost se projeví v první řadě při nízkých teplotách po startu motoru. Tímto způsobem je monitorován stav katalyzátoru přímo v provozu. [13, 32]

V příloze 2 jsou zobrazeny průběhy napětí na lambda sondách před a za funkčním/nefunkčním katalyzátorem.

5.4 Analýza emisí zážehových motorů

Pro provozní měření emisí zážehových motorů se používají tzv. servisní analyzátory neboli 4složkové infraanalyzátory typu NDIR (nedispersní infračervená spektroskopie), umožňující legislativou požadované stanovení obsahu CO, HC a hodnoty lambda. Tyto přístroje pracují s určitou nepřesností, která ale je pro daný charakter měření dostačující. Na obr. 30 je znázorněn princip čtyř-složkového analyzátoru Bosch a na obr. 29 samotný analyzátor Bosch BEA 850.

Kromě výše zmíněných legislativou požadovaných složek měří také CO₂ a jsou také doplněny elektrochemicky působícím kyslíkovým čidlem, které snímá koncentrace O₂. Na základě této veličiny přístroje počítají hodnotu součinitele přebytku vzduchu λ pomocí tzv. Brettschneiderova vzorce:

$$\lambda = \frac{\text{CO}_2 + \frac{\text{CO}}{2} + \text{O}_2 + \left(\frac{\text{H}_{\text{cv}}}{4} * \frac{3,5}{3,5 + \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2}} - \frac{\text{O}_{\text{cv}}}{2} \right) * (\text{CO}_2 + \text{CO})}{\left(1 + \frac{\text{H}_{\text{cv}}}{4} - \frac{\text{O}_{\text{cv}}}{2} \right) * (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{K1} * \text{HC})} \quad [-], \quad (1)$$

kde	CO [objemová %]	–	oxid uhelnatý,
	CO ₂ [objemová %]	–	oxid uhličitý,
	HC [objemová %]	–	uhlovodíky,
	O ₂ [objemová %]	–	kyslík,
	K1 [-]	–	faktor konverze z měření NDIR na FID (dle výrobce analyzátoru),
	H _{cv} [-]	–	poměr atomové hmotnosti vodíku a uhlíku (1,7261 pro benzín),
	O _{cv} [-]	–	poměr atomové hmotnosti kyslíku a uhlíku (0,0175 pro benzín).

Kromě složek výfukových plynů přístroje dále měří otáčky motoru a teplotu motorového oleje. Pro měření otáček motoru se používá např. induktivní snímač impulzů na kabelu zapalování. Dokonalejší analyzátoři mohou získávat otáčky z tzv. „zvlnění palubní sítě vozidla“ (snímač se připojuje k napětí palubní sítě pomocí adaptéru pro akumulátor nebo kabelem pro zásuvku zapalovače) nebo dalších signálů přivedených na diagnostickou zásuvku. Pro měření teploty oleje se použije teplotní snímač, který se aplikuje místo olejové měrky a nebo je teplota snímána u novějších vozidel přes diagnostickou zásuvku stejně tak jako otáčky motoru.

Teplota oleje, při které je možno provádět vlastní měření je stanovena legislativou a liší se pro různé typy vozidel a různé motorizace (obvykle se pohybuje kolem hodnoty 80° C). Při této teplotě lze měření prohlásit za věrohodné, protože je zajištěna správná funkce katalyzátoru a lambda sondy. Pokud není dosažena požadovaná teplota oleje, není možné v měření pokračovat, viz obr. 31.

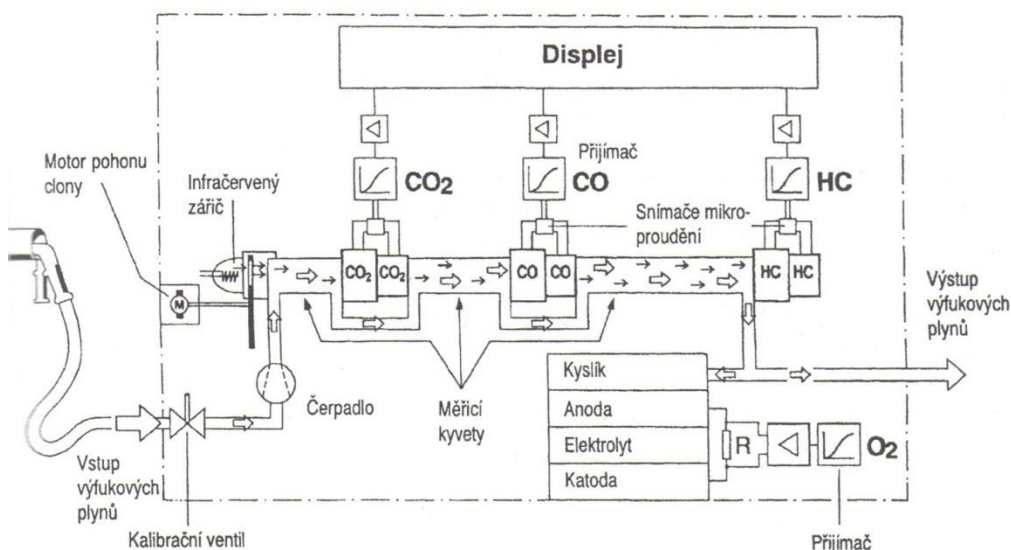
Měření pomocí infračervené metody je založeno na vlastnostech emisí CO, CO₂ a HC, které absorbují infračervené záření s určitou a pro příslušný plyn charakteristickou vlnovou délkou.

Předepsaný průběh zkoušek je určen legislativou a probíhá zcela automaticky. Bezchybný průběh měření je dán dodržováním pokynů a předpisů výrobce. [32, 34, 35]

Obr. 29 Analyzátor Bosch BEA 850



Obr. 30 Princip čtyř-složkového analyzátoru Bosch [9]



Obr. 31 Kontrola dosažení požadované teploty oleje při měření emisí



Vlastní měření se provádí při volnoběhu a při zvýšeném volnoběhu. Taková analýza ale slouží pouze jako základní orientační měření. Pokud bude v pořádku, je nutné provést důkladnější analýzu na válcové zkušební, kde bude motor zatěžován. Tabulka v praxi využívaných jízdních režimů je v příloze 3.

Analyzátoři typu NDIR jsou nevhodné pro měření celkových koncentrací HC. Z celkového spektra jsou schopny zachytit jen jejich část a navíc měření bude závislé na

teplotě vzorku (při nízkých teplotách HC kondenzují v hadicích a vstupních filtrech). Navíc nezachytí ani uhlovodíky vznětových motorů, které jsou zastoupeny vyššími řády uhlovodíkového spektra. Z těchto důvodů se při homologačních měřeních používají analyzátoři typu FID (plamenný ionizační detektor), které jsou schopny analyzovat celé spektrum HC a navíc mají vyhřívané odběrové sondy a hadice. [32]

V následující tab. 1 jsou uvedeny možné závady výfukového systému zážehového motoru a jejich vliv na emise.

Tab. 1 Vliv závad výfukového systému zážehového motoru na emise [32]

Závada	CO	CO ₂	HC	λ	NO _x	O ₂
Nefunkční lambda sonda ¹⁾	vysoké	nižší	vysoké	<1	nízké	nízké
Vadný katalyzátor ²⁾	zvýšené	snížené	zvýšené	-	zvýšené	-
Malé otevření EGR	-	-	-	-	vysoké	-
Přílišné otevření EGR	vyšší	nižší	vyšší	-	nízké	-

¹⁾ Naměřené hodnoty budou záviset na řídicí strategii ECU.

²⁾ Podle míry poškození, malá poškození se při volnoběhu nemusí projevit.

5.5 Analýza emisí vznětových motorů

5.5.1 Analýza emisí

Pro provozní měření emisí vznětových motorů se používají obdobné analyzátoři, jako tomu bylo u zážehových motorů. K analýze CO a CO₂ je možné použít analyzátoři typu NDIR, k analýze NO_x analyzátoři CLD (chemoluminiscenční detektor) a jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole 5.4, pro měření obsahu HC je nutné použít analyzátoři typu FID, jinak nebude měření věrohodné. Dále je oproti měření výfukových soustav zážehových motorů nutné implementovat filtry do odběrné sondy, aby nedošlo k zanesení analyzátorů pevnými částicemi. Také je nutné teplotně stabilizovat odběrnou sondu, aby nedocházelo ke kondenzaci škodlivin ještě před jejich vstupem do přístrojů.

U vznětových motorů se nepočítá hodnota součinitele přebytku vzduchu λ , neboť se bude pohybovat, s výjimkou plného zatížení, nad hodnotou vyšší než jedna (běžně $\lambda = 2-2,5$). [32, 34]

V následující tab. 2 jsou uvedeny možné závady výfukového systému vznětového motoru a jejich vliv na emise.

Tab. 2 Vliv závad výfukového systému vznětového motoru na emise [32]

Závada	CO	CO ₂	HC	NO _x	Kouřivost
Vadný katalyzátor	zvýšené	snížené	zvýšené	-	-
Malé otevření EGR	-	-	-	vysoké	nižší
Přílišné otevření EGR	vysoké	nižší	vysoké	nízké	vyšší

5.5.2 Měření kouřivosti

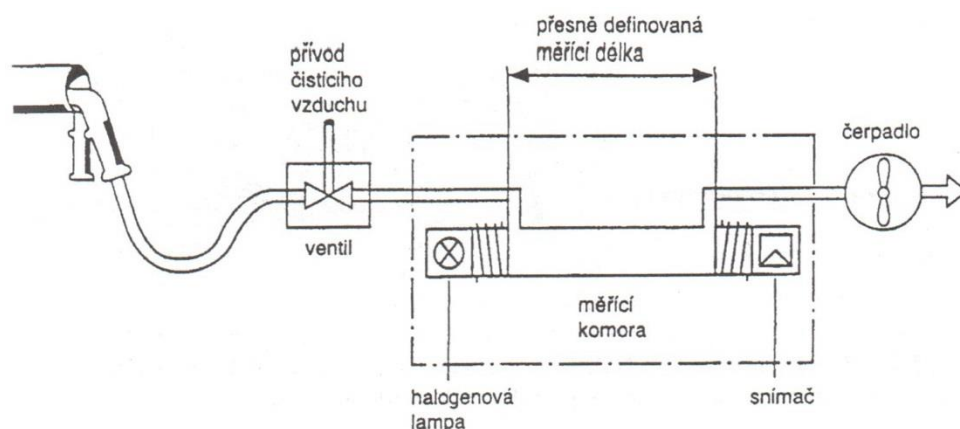
Kromě výše uvedených škodlivin se u vznětových motorů měří kouřivost, která se měří pomocí opacimetrů (obr. 32) a je obvykle vyjadřována opacitou. Opacimetry měří průchodnost světelného paprsku sloupcem výfukových plynů a na základě získaných výsledků je možné usuzovat na potenciální závady motoru.

Měřicí komora opacimetru principiálně vypadá tak, že na jednom konci je fotodioda a na druhém je umístěna lampa. Fotodioda měří, kolik světla vyzářeného lampou na ní dopadne. Pokud bude v komoře opacimetru např. čistý vzduch, pak světlo nebude pohlcováno a hodnota opacity bude 0 %.

Pohlcování světelného záření ve výfukových plynech je způsobeno jak pevnými částicemi vytvářejícími černý kouř, tak i mazacím olejem, který zabarvuje kouř do modra. Bílý kouř vzniká z vodních par a společně s modrým kouřem může být také následkem nespáleného nebo částečně spáleného paliva.

Hodnota kouřivosti je stanovena výrobcem motoru a je možno ji nalézt např. na štítku nebo v dokumentaci k vozidlu. Pokud je hodnota kouřivosti překročena, ale s každým dalším měřením se bude hodnota zlepšovat, tak lze usuzovat na málo zahřátý motor. Naopak, pokud budou hodnoty s každým měřením stoupat, lze soudit, že dochází k průnikům oleje do výfukového systému. Dále je možno na základě porovnání naměřených hodnot kouřivosti a kouřivosti stanovené výrobcem vozidla předpokládat například tyto poruchy: nesprávně nastavený vstřikovač, netěsnost některého válce, vysoká dodávka paliva apod. [32, 35, 36]

Obr. 32 Opacimetr Bosch RTT 110



5.6 Měření hladiny akustického tlaku

Metody a zařízení pro měření motorových vozidel v současné době upravuje Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 540/2014 ze dne 16. dubna 2014 o hladině akustického tlaku motorových vozidel a náhradních systémech tlumení hluku. Na základě tohoto nařízení se schvalují nová motorová vozidla nebo náhradní systémy tlumení hluku⁴.

Měření probíhá pomocí dvou metod a to: u vozidla za jízdy a u stojícího vozidla. Pro měření se použije přesný hlukoměr nebo rovnocenný měřicí systém, který splňuje požadavky dané normy. Popis metodiky měření je poměrně rozsáhlý a přesáhl by doporučený rámec této práce, a proto jej neuvádím. [37]

Současně schválené mezní hodnoty hladiny akustického tlaku jsou uvedeny v příloze 4.

⁴ „Náhradním systémem tlumení hluku“ se rozumí kterýkoli díl systému tlumení hluku nebo jeho konstrukčních částí určený k používání na vozidle, jiný než díl typu namontovaného na toto vozidlo při jeho přistavení k EU schválení typu podle tohoto nařízení. [36]

6 Experimentální ověření vlivu vybraných poruch komponentů výfukových soustav vozidel na produkci emisí

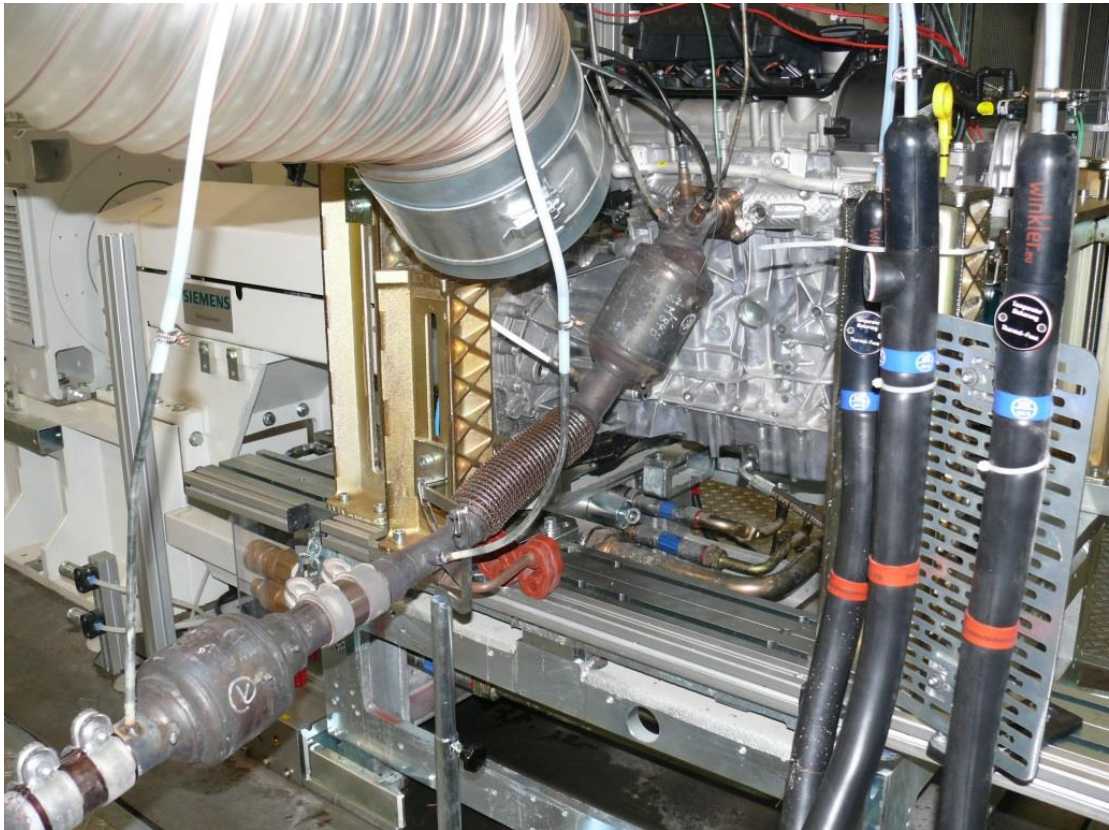
Experimentální ověření vlivu vybraných poruch komponentů výfukových soustav vozidel na produkci emisí probíhalo na dvou různých pracovištích a dvou různých motorech. V rámci experimentů byl ověřen vliv technického stavu katalyzátoru, funkce lambda sondy a netěsnosti výfukového potrubí na obsah emisí.

První experiment se konal v novém Motorovém centru společnosti ŠKODA AUTO, a.s., v Mladé Boleslavi. Pro experiment byl použit CNG motor o obsahu 1,6 l MPI 81 kW z řady EA211, který pracoval v režimu zkoušky na benzín (Super bleifrei – 95 RON) a byl připojen k sériově dodávané výfukové soustavě s dvěma katalyzátory, sloužící ke splnění emisní normy EURO 6, viz obr. 34. Motor byl připojen k motorové brzdě SIEMENS (obr. 35), která umožnila měřit emisní parametry při různých otáčkách a zatíženích. Brzda a motor byly ovládány řídicím softwarem Venus, vyvinutým pro koncern VW a softwarem Siemens Simos 15 z řídicího stanoviště (obr. 36). K měření byl použit emisní analyzátor AVL AMA i60 (obr. 33), určený pro *Obr. 33 AVL AMA i60 [43]* homologační měření a vývoj, umožňující měřit hodnoty THC, CH₄, NO/NO_x, CO, CO₂ a N₂O v závislosti na konfiguraci na čtyřech různých místech současně. Měření proběhlo v klimatizované zkušebně (obr. 35), kde se teplota prostoru pohybovala v rozmezí 15–19 °C, teplota nasávaného vzduchu 23–25 °C, relativní vlhkost 46–52 % a barometrický tlak byl 988 mbar.

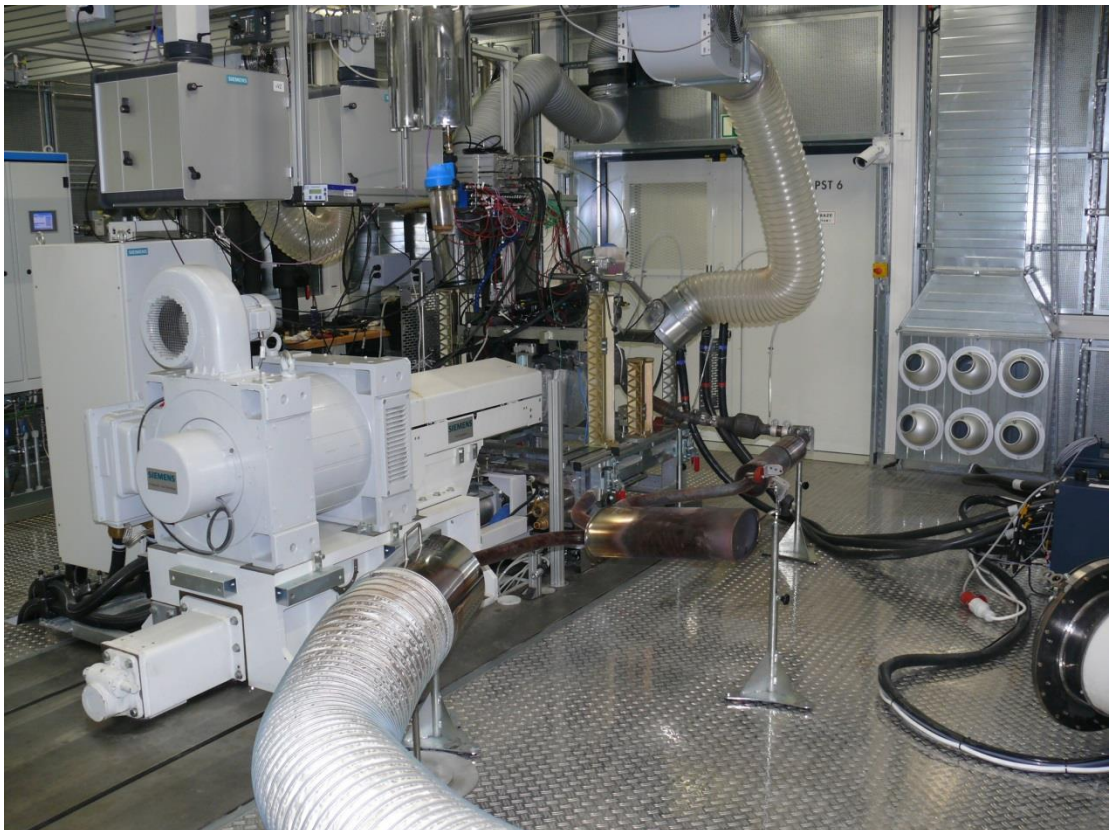


V rámci tohoto experimentu byly provedeny dvě série měření. V první sérii měření se zjišťoval vliv technického stavu katalyzátoru na přeměnu škodlivých emisí na méně škodlivé a v druhé vliv nefunkční (resp. odpojené) lambda sondy na složení emisí. Měření se uskutečnilo ve vybraných režimech, kde proměnnými veličinami byly otáčky a zatížení vyjádřené točivým momentem motoru. Všechny naměřené hodnoty, týkající se technického stavu katalyzátoru, jsou uvedeny v příloze 6 a v příloze 7 jsou naměřené hodnoty z měření s nefunkční lambda sondou.

Obr. 34 Motor EA211 1,6 l MPI 81 kW



Obr. 35 Brzda Siemens a miestnosť brzdové zkušebny



Obr. 36 Řídicí stanoviště brzdové zkušebny



Druhý experiment se uskutečnil v technických prostorách Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Měření probíhalo na motoru 1.2 HTP 40 kW z řady EA 111 (obr. 38), připojeného k sériově dodávané výfukové soustavě. K měření byl použit čtyř-složkový emisní analyzátor Atal AT505 řízený personálním počítačem, který je určen k měření zážehových motorů. Analyzátor umožňuje měření hodnot CO, CO₂, HC, O₂ pomocí kyslíkového čidla, a dále vypočítává součinitel přebytku vzduchu λ podle Brettschneiderova vzorce uvedeného v kapitole 5.4. Data pro zpracování jsou přenášena z modulu analyzátoru přes rozhraní RS232 do PC, kde se ukládají a tisknou. Modul analyzátoru je viditelný na obr. 37. Technická specifikace emisního analyzátoru AT505 je v příloze 5.

Obr. 37 Emisní analyzátor AT505



V rámci tohoto experimentu se zjišťoval vliv netěsnosti výfukového potrubí na obsah emisí a lambda regulaci. Dále proběhla zkouška těsnosti výfuku při jeho zneprůchodnění. Měření bylo uskutečněno nejprve při volnoběžných otáčkách cca 800 1/min a následně při zvýšených volnoběžných otáčkách cca 2500 1/min.

Obr. 38 Motor Škoda Fabia 1.2 HTP



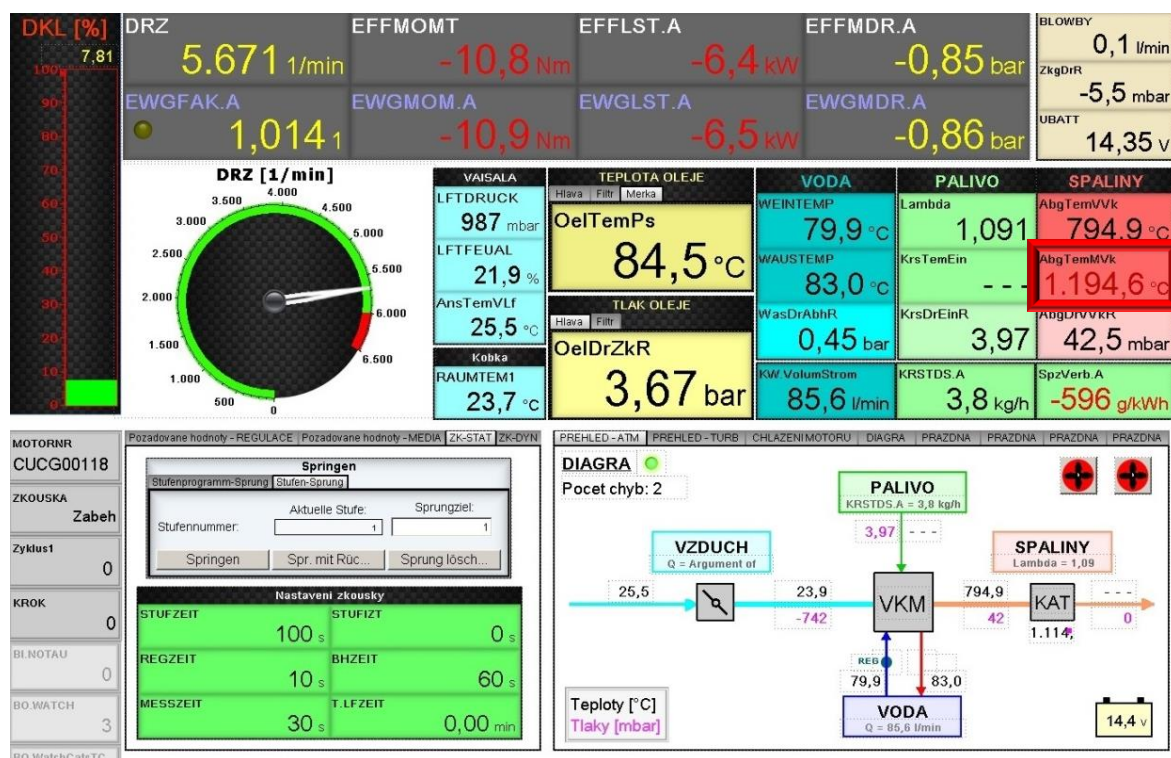
6.1 Vliv poškozeného katalyzátoru na obsah emisí

Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jaký vliv má částečné vnitřní poškození katalyzátoru na obsah emisí. Byly uskutečněny dvě série měření, které se realizovaly na stejné výfukové soustavě se dvěma katalyzátory (určené k dosažení emisní normy EURO 6), která byla již dlouhou dobu používaná na motorové zkušebně a bylo tudíž možno ji za účelem experimentu poškodit.

První část experimentu byla provedena na výfukové soustavě, která nebyla nijak zdatelně poškozená, a proto naměřené hodnoty sloužily k porovnání s výfukovou soustavou s poškozeným prvním katalyzátorem. Pro druhé měření bylo nutné provést poškození katalyzátoru. Bylo provedeno několik pokusů s cílem vytvořit tepelné poškození katalyzátoru. Prvním z nich bylo vstříknutí benzínu přímo před katalyzátor skrz odběrné místo pro měření tlaku. Tento postup vedl ke zvýšení teploty výfukových plynů v katalyzátoru o cca 60 °C na hodnotu 910 °C, která však nebyla dostačující pro zdatelné poškození katalyzátoru, jak je znázorněno na obr. 21. Další pokusem bylo odpojení zapalování na jednom válci. Na tento zásah však okamžitě reagovala řídicí jednotka

motoru odpojením příslušného vstřikovacího ventilu. Posledním úspěšným pokusem bylo odpojení jedné cívky a následně vstříknutí benzínu do sání přímo do prostoru škrticí klapky pomocí injekční stříkačky. V tomto případě teplota výfukových plynů v katalyzátoru dosáhla 1195 °C, viz obr. 39. To odpovídá teplotě, při které již dochází ke spékání vzácných kovů Pt a Rh v katalyzátoru, jak je patrné z obr. 21. Působení této teploty bylo zachováno po dobu 5 minut setrváním na přibližně stejných vysokých otáčkách.

Obr. 39 Zvýšení teploty katalyzátoru vyobrazený v systému Venus



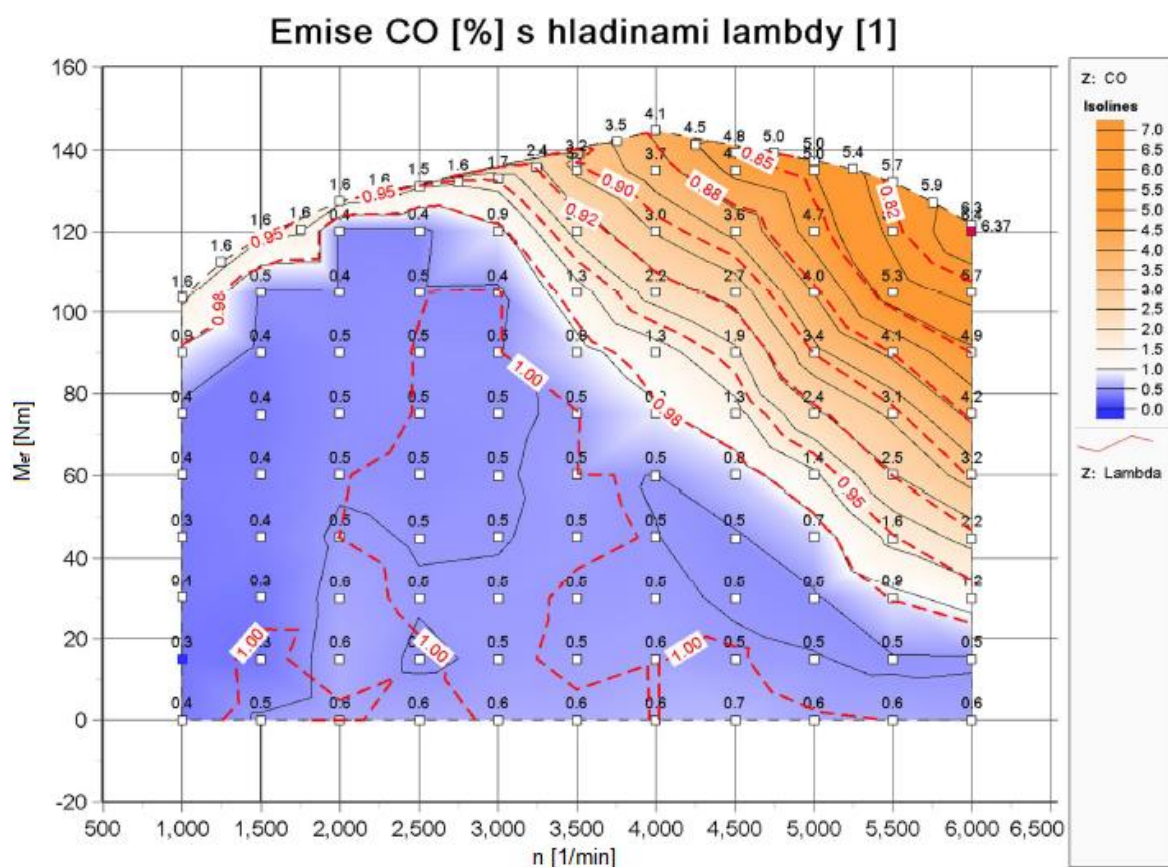
Pro měření bylo vybráno 7 měřicích bodů, které se lišily otáčkami a zatížením. Body byly vybrány na základě již naměřených celkových závislostí jednotlivých složek emisí na otáčkách a zatížení daného motoru (obr. 40, 41 a 42), kde směrodatné byly nejvyšší hodnoty jednotlivých emisí.

Z grafu na obr. 40 je zjevné, že nejvyšší hodnota CO je v oblasti maximálních otáček 6000 1/min a maximálního zatížení 125 Nm. Pro hodnoty 5000 1/min a 142 Nm je hodnota CO stále vysoká.

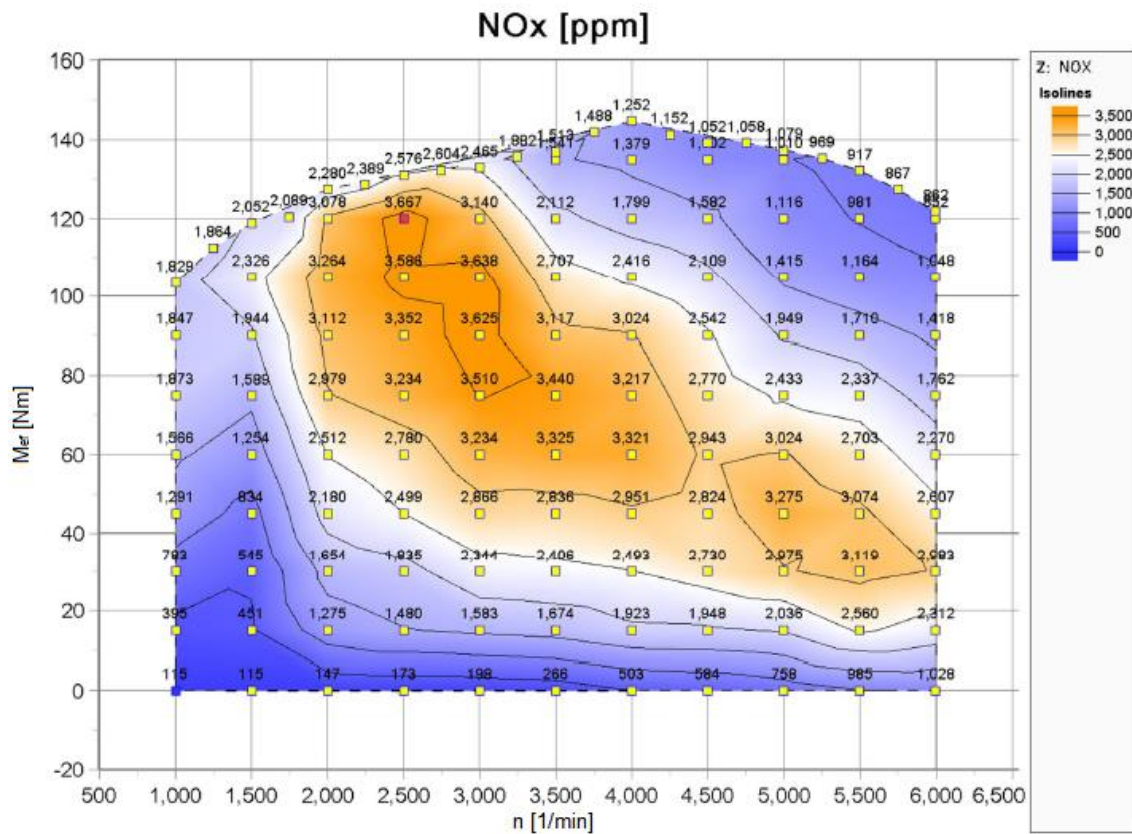
Nejvyšší hodnota NO_x byla naměřena při otáčkách 2500 1/min a točivém momentu motoru 120 Nm, viz obr. 41. Dalším zajímavým bodem pro hodnoty NO_x je bod s otáčkami 5000 1/min a točivým momentem 45 Nm.

Nejvyšší hodnoty HC bylo dosaženo při otáčkách 2500 1/min a nulovém točivém momentu, dále byly rovněž vysoké při otáčkách 1000 1/min a točivém momentu 114 Nm, viz obr. 42. Měření také probíhalo při volnoběžných otáčkách 780 1/min a zvýšených volnoběžných otáčkách 2500 1/min, ze kterých bylo možné určit, zda by daný motor s touto výfukovou soustavou prošel měřením emisí při pravidelných technických kontrolách.

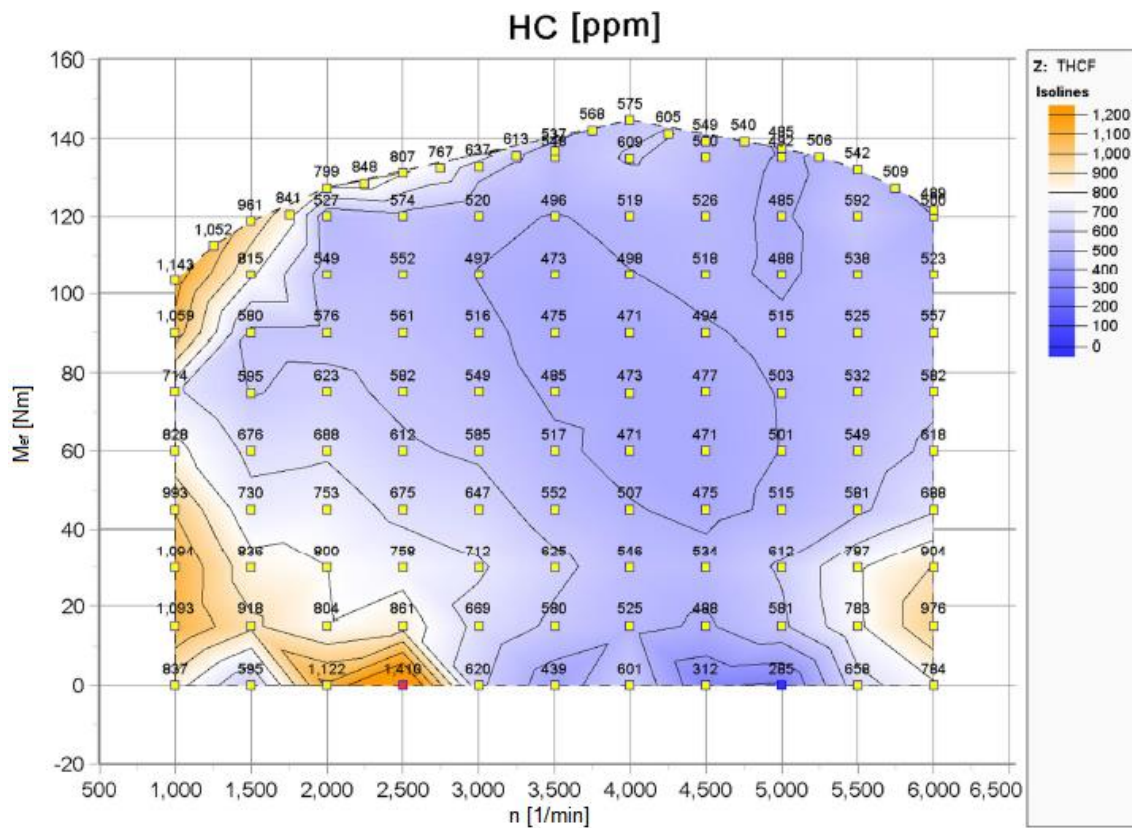
Obr. 40 Závislost CO na otáčkách motoru a M_{ef} [44]



Obr. 41 Závislost NO_x na otáčkách motoru a M_{ef} [44]



Obr. 42 Závislost HC na otáčkách motoru a M_{ef} [44]



K měření byl použit emisní analyzátor AVL AMA i60, jehož pomocí byly měřeny hodnoty emisí prostřednictvím navařených odběrných míst současně před prvním katalyzátorem, mezi prvním a druhým katalyzátorem a za druhým katalyzátorem, jak je vidět na obr. 43 a v detailu na obr. 44. Dále byly měřeny teploty výfukových plynů teplotními senzory před prvním katalyzátorem a v jeho tělese. Navíc byl měřen tlak výfukových plynů před prvním katalyzátorem, který slouží jako indikátor stupně poškození a zanesení katalyzátoru. Příčiny možných poruch katalyzátoru jsou uvedeny v kapitole 4.2.

Obr. 43 Měřená výfuková soustava osazená teplotními senzory a emisními výstupy



Obr. 44 Měřená výfuková soustava osazená teplotními senzory a emisními výstupy – detail

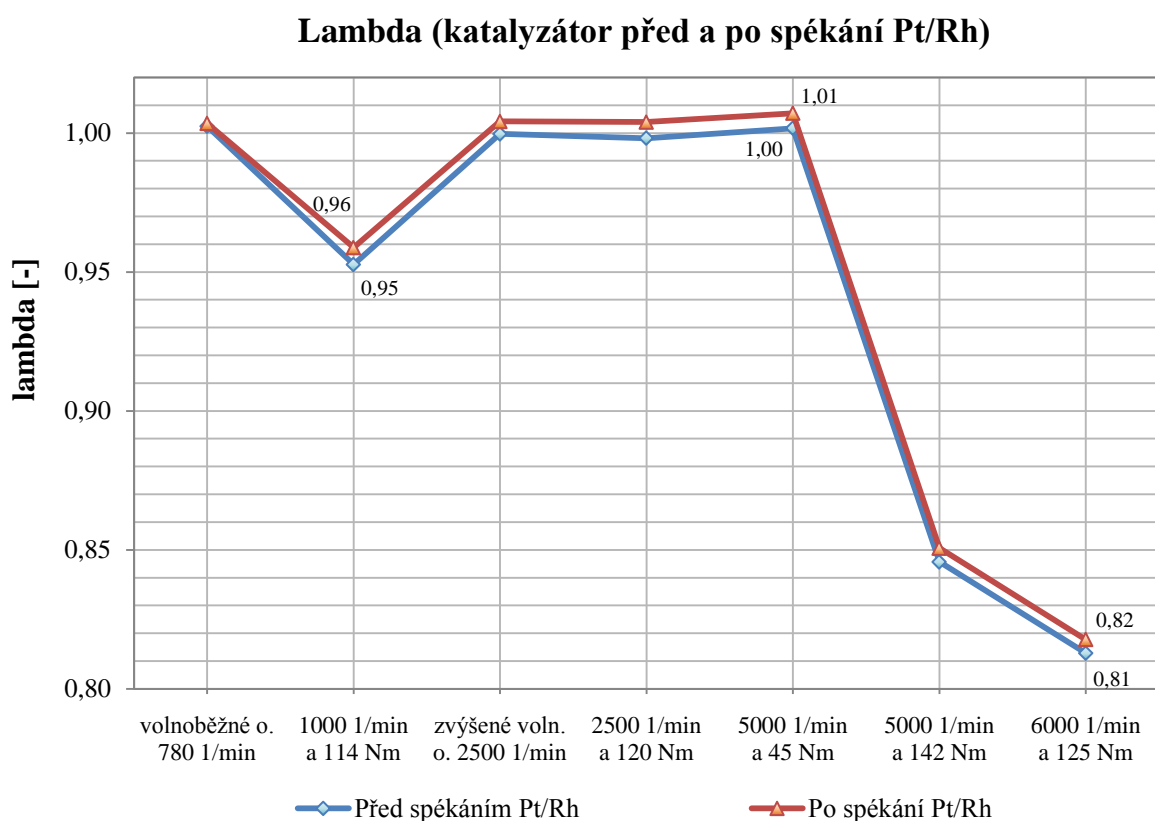


Hodnoceny byly následující veličiny: součinitel přebytku vzduchu λ , oxid uhelnatý CO_{zpk} , oxid uhličitý $\text{CO}_{2\text{ zpk}}$, oxidy dusíku $\text{NO}_x_{\text{vzpk}}$ a uhlovodíky HC_{vzpk} (kde index „zpk“ znamená „za prvním katalyzátorem“ a index „vzpk“ znamená „vlhká složka emisí za prvním katalyzátorem“). Ostatní naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce v příloze 6.

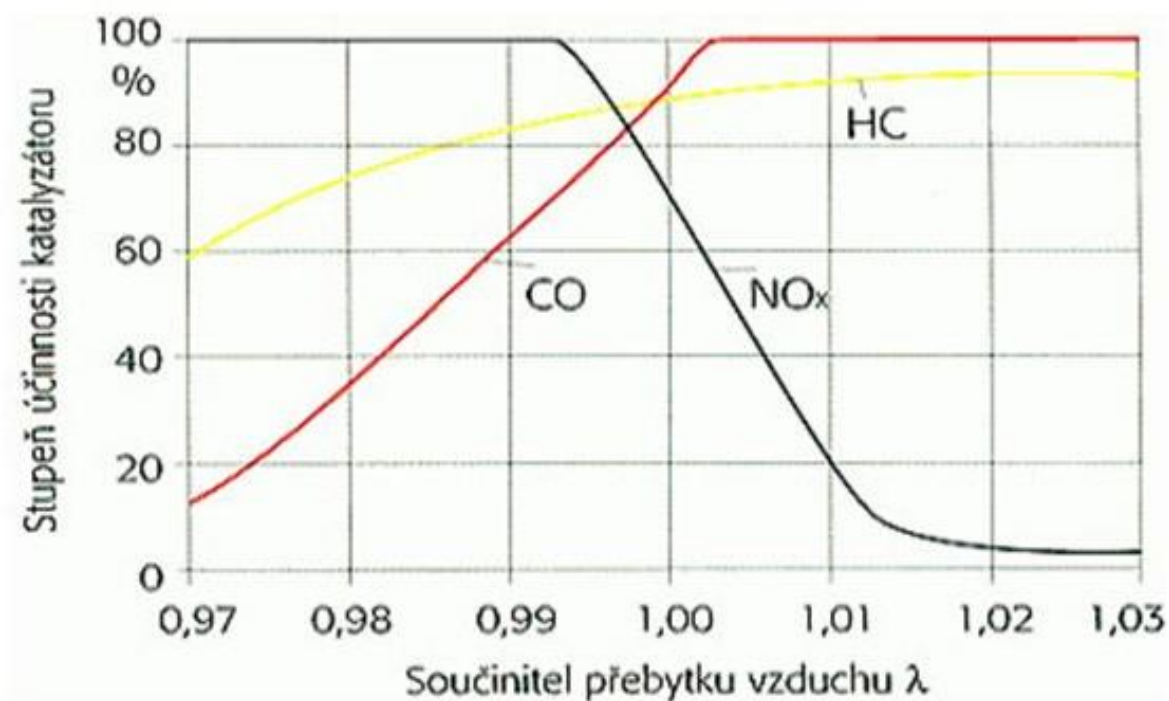
Z grafických znázornění na obr. 45, 47, 48 vyplývá, že spékání vzácných kovů platiny a rhodia v katalyzátoru v rámci provedeného pokusu nemělo významný vliv na hodnotu lambda, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého.

Přípustná hodnota CO je vyhláškou 302/2001 Sb. stanovena na 0,3 % při volnoběžných otáčkách a 0,2 % při zvýšených otáčkách. Součinitel přebytku vzduchu λ musí dle stejné vyhlášky dosahovat hodnoty $1 \pm 0,03$. Je tedy zřejmé, že by daný motor v tomto případě po provedení tepelného poškození prošel emisní zkouškou jak z hlediska součinitele přebytku vzduchu λ (obr. 45), tak i hodnoty CO (obr. 47). Limity CO₂, HC, a NO_x nejsou vyhláškou a ani výrobcem pro tento motor stanoveny.

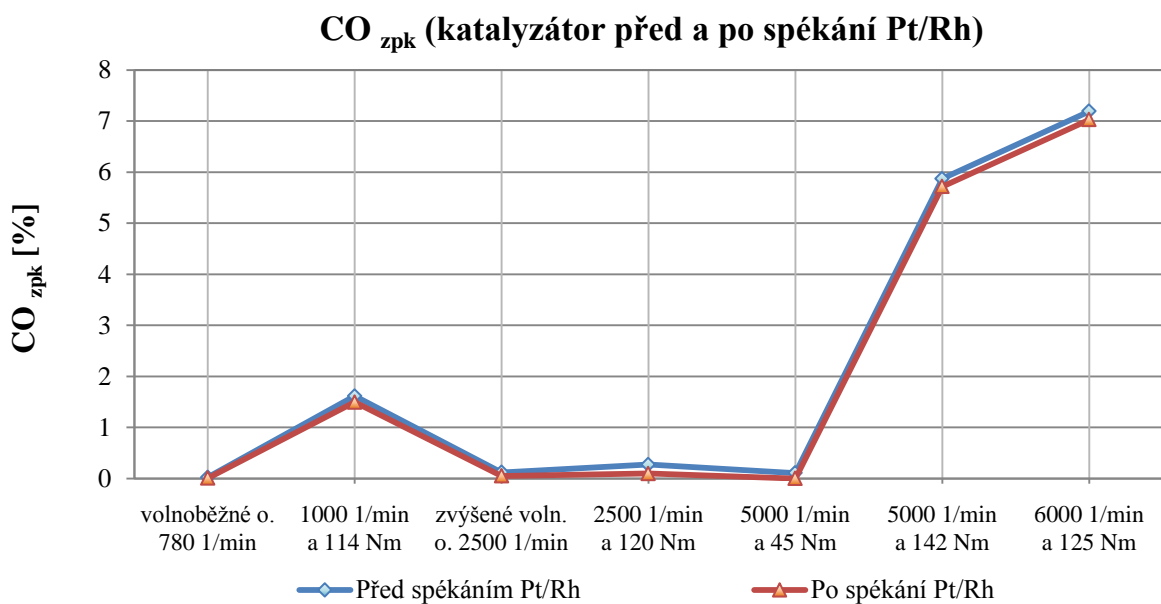
Obr. 45 Graf závislosti lambda na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)



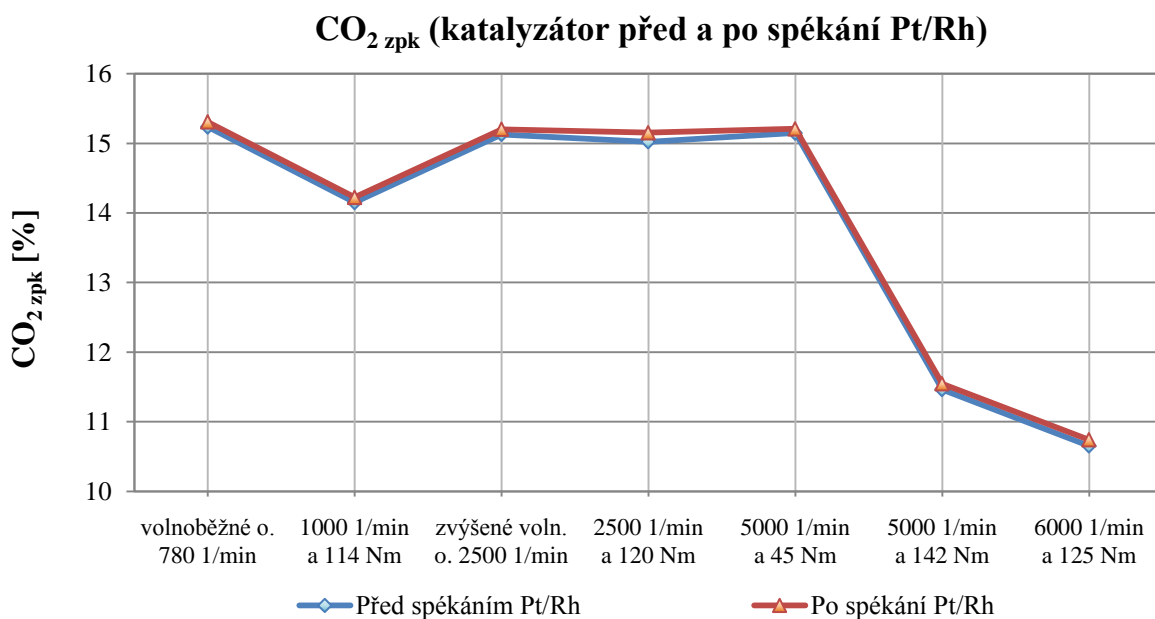
Obr. 46 Účinnost katalyzátoru [45]



Obr. 47 Graf závislosti CO_{zpk} na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)



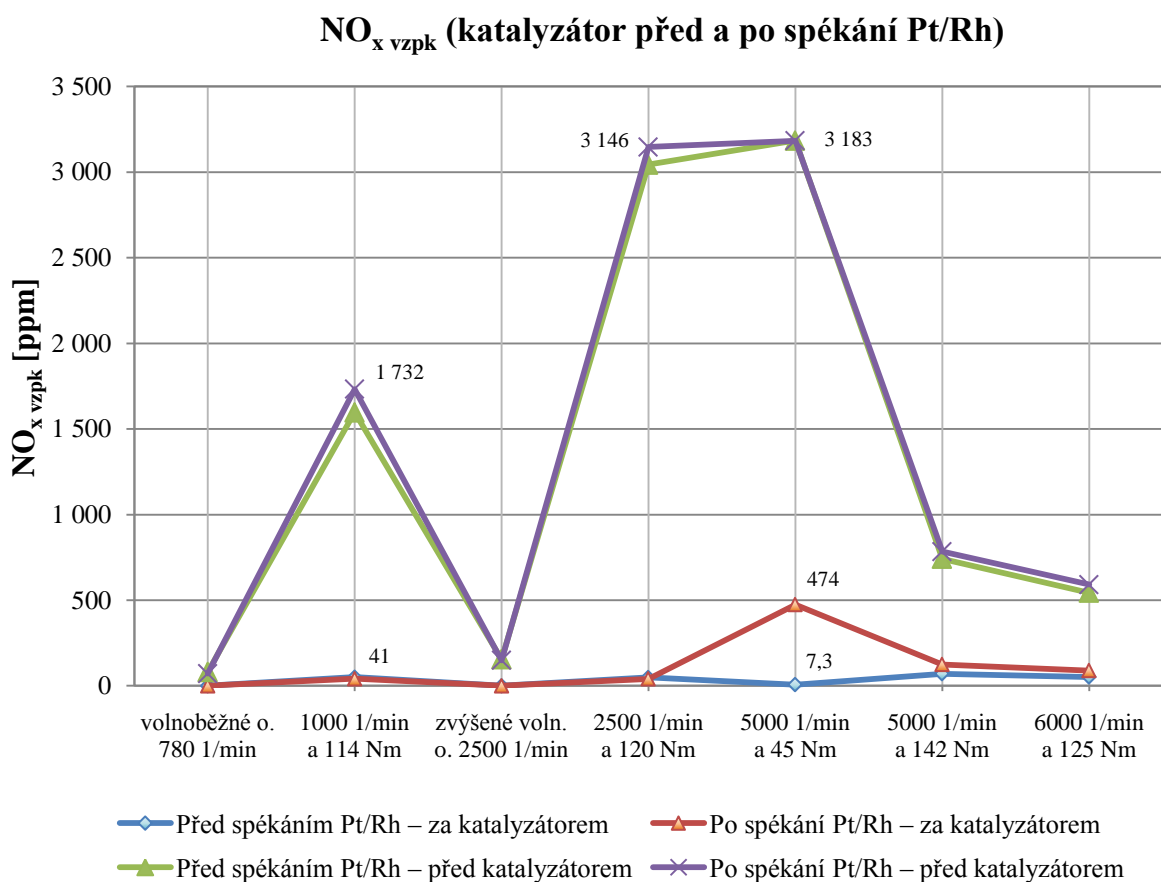
Obr. 48 Graf závislosti $CO_{2\text{ zpk}}$ na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)



Z grafu oxidů dusíku na obr. 49 je evidentní, že dané tepelné poškození katalyzátoru nemělo prakticky žádný vliv na emise NO_x ve všech měřených pracovních režimech s výjimkou režimu s otáčkami 5000 1/min a nízkým zatížením 45 Nm, ve kterém emise NO_x výrazně vzrostly. Mohlo by se zdát, že za tento markantní nárůst z hodnoty 7,3 ppm na hodnotu 474 ppm může výše zmíněné poškození katalyzátoru. Po hlubším zkoumání však bylo zřejmé, že za tento nárůst může s největší pravděpodobností změna součinitele přebytku vzduchu λ z hodnoty 1,00 na hodnotu 1,01. Jak je možné vidět na obr. 46, tak již takto malá změna v řádu jedné setiny hraje obrovskou roli v účinnosti katalyzátoru pro přeměnu emisí NO_x . Zatím co se při hodnotě $\lambda = 1,00$ účinnost katalyzátoru pro přeměnu NO_x pohybuje okolo 70 %, tak u $\lambda = 1,01$ je to pouhých 20 %. Je to dáno tím, že NO_x potřebují pro svoji přeměnu CO, který je v důsledku přebytku vzduchu ($\lambda = 1,01$) se 100 % účinností v katalyzátoru přeměňován a je ho potom nedostatečné množství pro redukci NO_x .

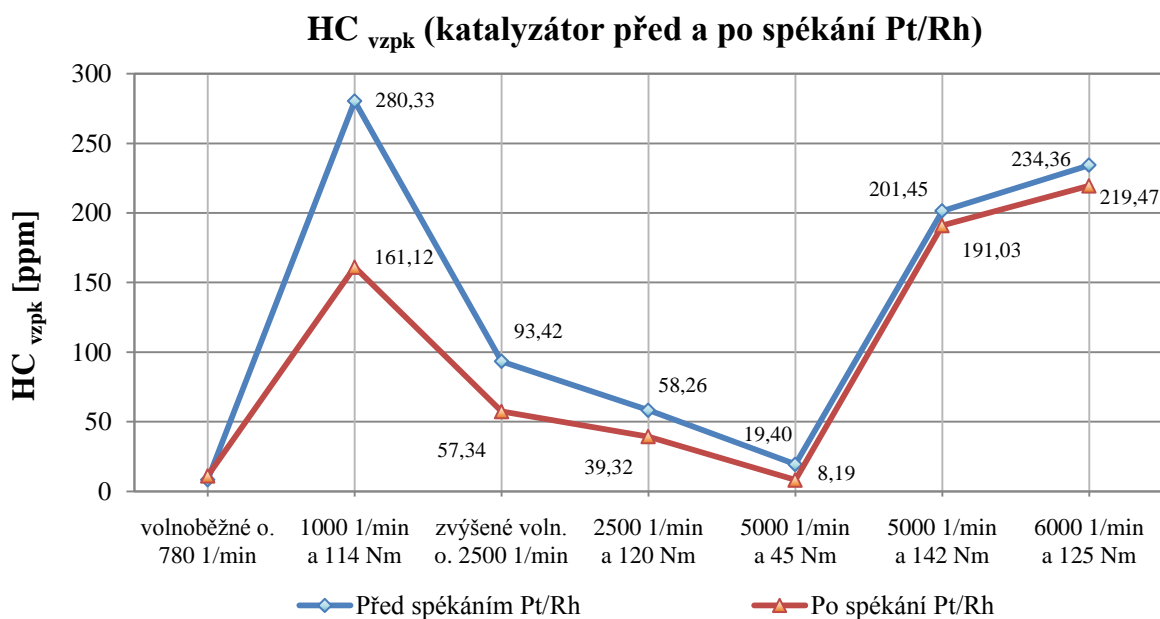
Pro názornost byly do grafu přidány hodnoty emisí před katalyzátorem, na kterých je možné vidět, že i při 20 % účinnosti katalyzátoru je rozdíl oproti původnímu obsahu emisí enormní.

Obr. 49 Graf závislosti NO_x vzpk na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)



V případě nespálených uhlovodíků, zobrazených na obr. 50, je situace obdobná. Největší nárůst uhlovodíků je možné pozorovat v bodě s nízkými otáčkami 1000 1/min a maximálním zatížením. Nezanedbatelné zvýšení je také viditelné ve zvýšených volnoběžných otáčkách, případně při otáčkách 2500 1/min a maximálním zatížení. Ve volnoběžných otáčkách a ostatních měřených bodech je rozdíl nevýznamný. Vyšší obsah nespálených uhlovodíků ve všech bodech je opět daný nízkou účinností katalyzátoru (ovlivněnou změnou hodnoty λ o cca 0,01 do bohaté směsi), viz obr. 46.

Obr. 50 Graf závislosti HC_{vzpk} na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)



Z naměřených hodnot lze usoudit, že uměle vyvolaná teplota $1200 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$ v katalyzátoru působící po dobu 5 minut, neměla prakticky žádný vliv na poškození vnitřní struktury katalyzátoru a ani vzácných kovů. Na druhou stranu je z tohoto pokusu dobře vidět, jak velký vliv má nepatrná změna součinitele přebytku vzduchu λ na přeměnu emisí v katalyzátoru a tím tedy jeho účinnost.

6.2 Vliv nefunkční lambda sondy na obsah emisí

Tento experiment měl za úkol zjistit vliv nefunkční lambda sondy na obsah jednotlivých složek emisí. Simulace nefunkční lambda sondy byla uskutečněna jejím odpojením v místě před prvním katalyzátorem. Proběhly dvě série měření. První z nich byla s připojenou a druhá s odpojenou lambda sondou. Je nutno poznamenat, že měření probíhalo na jiné výfukové soustavě, která byla na brzdové zkušebně v provozu méně hodin, nežli v případě prvního experimentu týkajícího se poškozeného katalyzátoru. Výsledky z obou experimentů není tedy možné porovnávat.

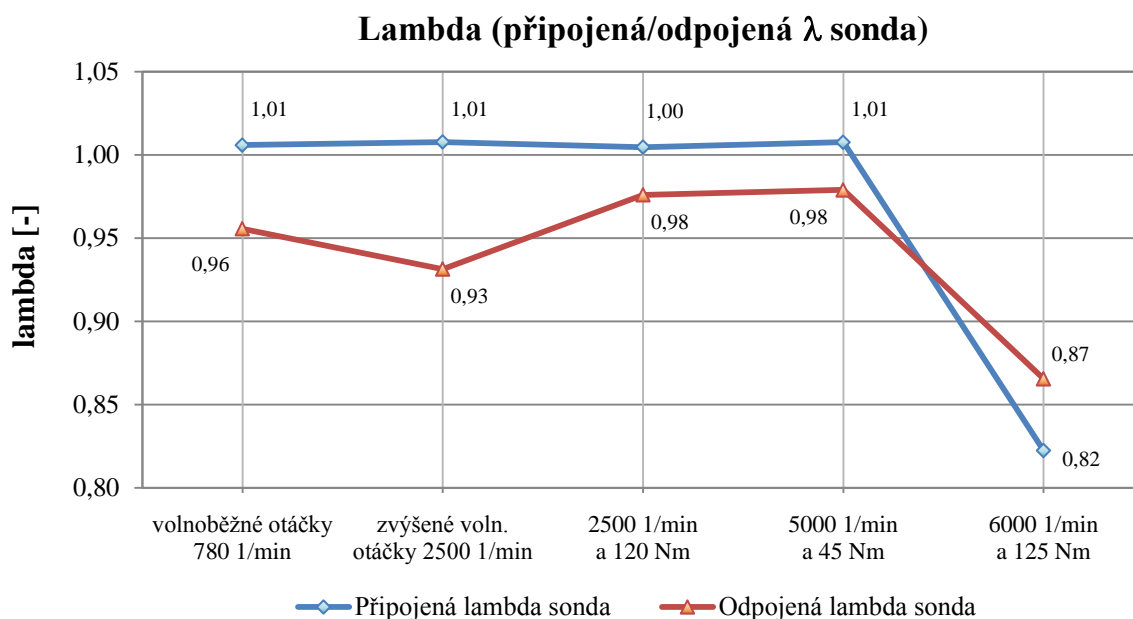
Oproti experimentu v kapitole 6.1 bylo z časových důvodů vybráno o dva měřicí body méně (celkem 5 měřicích bodů), které však dostatečně vypovídají o vlivu nefunkční lambda sondy na obsah emisí obsažených ve výfukových plynech. Opodstatnění výběru těchto měřicích bodů bylo již popsáno v kapitole 6.1. Příčiny poruch lambda sond jsou uvedeny v kapitole 4.3.

Hodnoceny byly stejné veličiny jako v předchozím experimentu: součinitel přebytku vzduchu λ , oxid uhelnatý CO_{zpk} , oxid uhličitý CO_2_{zpk} , oxidy dusíku $\text{NO}_x_{\text{vzpk}}$ a uhlovodíky HC_{vzpk} (kde index „zpk“ znamená „za prvním katalyzátorem“ a index „vzpk“ znamená „vlhká složka emisí za prvním katalyzátorem“). Ostatní naměřené veličiny jsou uvedeny v tabulce v příloze 7.

K tomu, aby bylo dosaženo správné funkce třícestného katalyzátoru, motor musí spalovat stechiometrickou směs s hodnotou $\lambda = 0,995-1,005$ (tzv. lambda okno), jak již bylo uvedeno v kapitole 3.2.3. V moderních motorech s přímým vstřikováním paliva je stále obtížné dodržet tuto hodnotu ve všech režimech chodu motoru. Aby byla tato hodnota co nejlépe dodržena, je nutné použít lambda sondu, díky které je udržováno složení směsi palivo vzduch v optimální oblasti. Je tedy jasné, že nefunkční nebo poškozená lambda sonda bude mít vliv na stechiometrický poměr a tím na efektivní přeměnu škodlivých emisí v třícestném katalyzátoru. Princip funkce jednotlivých lambda sond je uveden v kapitole 3.3.

V případě, že elektronická řídicí jednotka ECU nedostane signál z lambda sondy, není schopna rozpoznat, jaké je aktuální složení spalované směsi. Na tuto situaci obvykle reaguje tak, že se přepne do nouzového režimu (pracuje podle svých naprogramovaných palivových map) a začne automaticky obohacovat směs z důvodu zajištění požadovaného výkonu a ochrany dílů před přehřátím, jak je evidentní na obr. 51. Tato reakce vede ke značnému zvýšení spotřeby paliva a především k omezení správné funkce třícestného katalyzátoru, což je patrné z následujících grafů.

Obr. 51 Graf závislosti lambda na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)



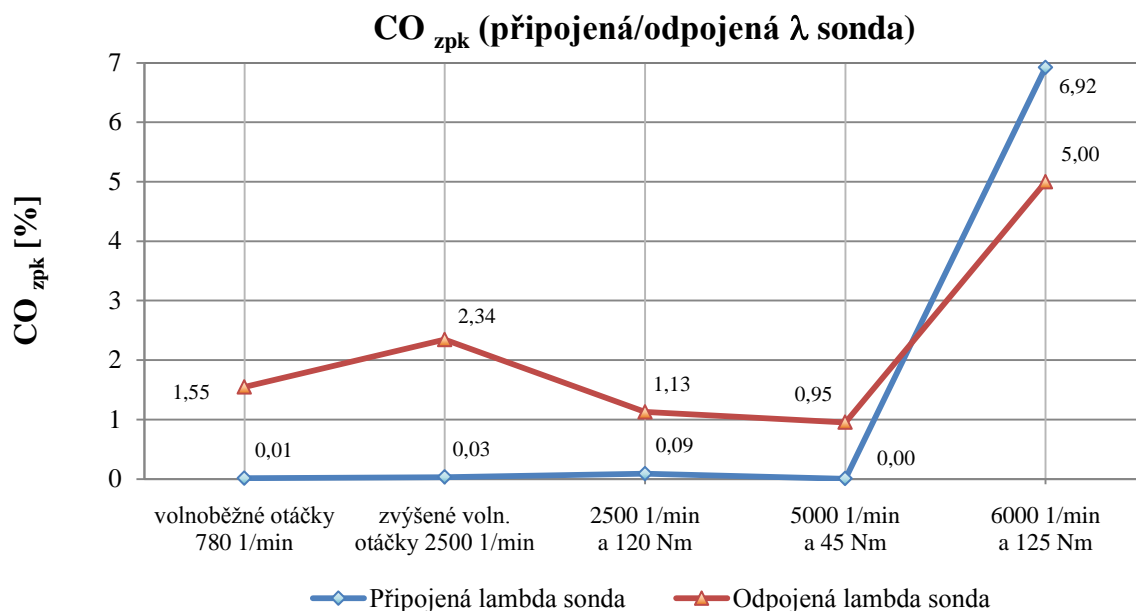
Ve všech měřených bodech markantně stouply emise CO (ve zvýšených volnoběžných otáčkách až o 78 násobek) vlivem výše popsané změny součinitele přebytku vzduchu λ směrem do bohaté směsi řídicí jednotkou motoru, které vedlo ke snížení účinnosti katalyzátoru. Toto je typickým projevem špatného řízení složení směsi, kdy systému chybí zpětná vazba v podobě signálu od lambda sondy. Jak je vidět z obr. 51, tak při maximálních otáčkách a maximálním zatížení byl motor nucen pro svůj chod přepnout do bohaté směsi bez ohledu na lambda regulaci, čemuž odpovídá nárůst emisí CO na obr. 52. V tomto režimu měl dokonce součinitel přebytku vzduchu λ vyšší hodnotu bez lambda regulace než s ní. To mohlo být způsobeno neodladěnými palivovými mapami nahanými v ECU. Správně by měl systém běžet na stejnou bohatou směs, jako v případě připojené lambda sondy, nebo by spíše ECU s odpojenou lambda sondou měla přepnout do „nouzového režimu“ a nedovolit motoru fungovat v těchto vyšších otáčkových režimech. Takto však ECU během experimentu nezareagovala.

Emise CO jsou tím vyšší, čím je bohatší směs, protože se zvyšující se bohatostí směsi klesá účinnost katalyzátoru pro jejich oxidaci, daná nedostatkem kyslíku.

Přípustná hodnota CO je vyhláškou 302/2001 Sb. stanovena na 0,3 % při volnoběžných otáčkách a 0,2 % při zvýšených otáčkách. Součinitel přebytku vzduchu λ musí dle stejné vyhlášky dosahovat hodnoty $1 \pm 0,03$. Je tedy patrné, že by daný motor

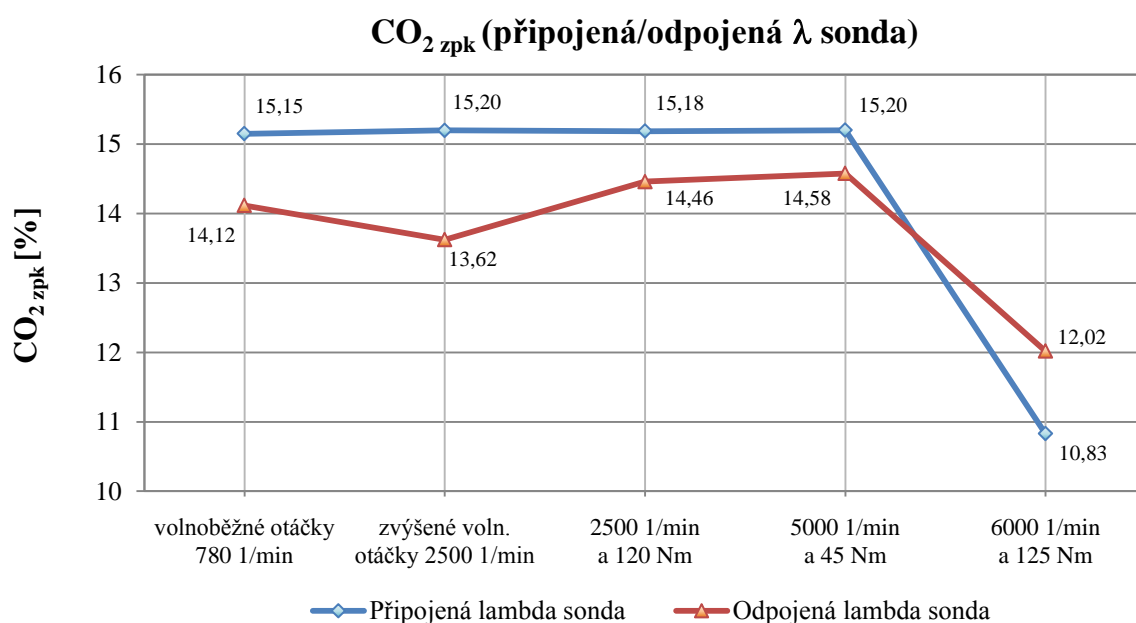
s nefunkční lambda sondou emisním testem neprošel, jak z hlediska součinitele přebytku vzduchu λ (obr. 51), tak i hodnoty CO (obr. 52).

Obr. 52 Graf závislosti CO_{zpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)



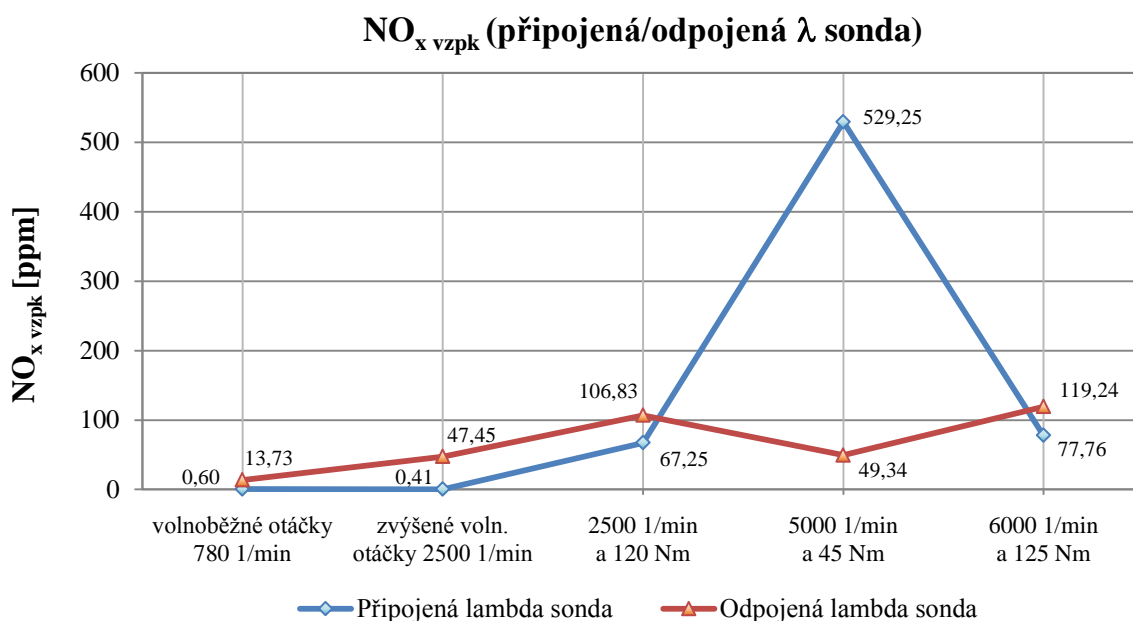
Z grafů CO (obr. 52) a CO_2 (obr. 53) je jasně viditelná oxidace CO na CO_2 . Nižší hodnota CO_2 s odpojenou lambda sondou opět indikuje sníženou účinnost katalyzátoru a tím nižší přeměnu CO na CO_2 z důvodu nedodržení stechiometrické směsi v tzv. lambda oknu.

Obr. 53 Graf závislosti CO_{2zpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)



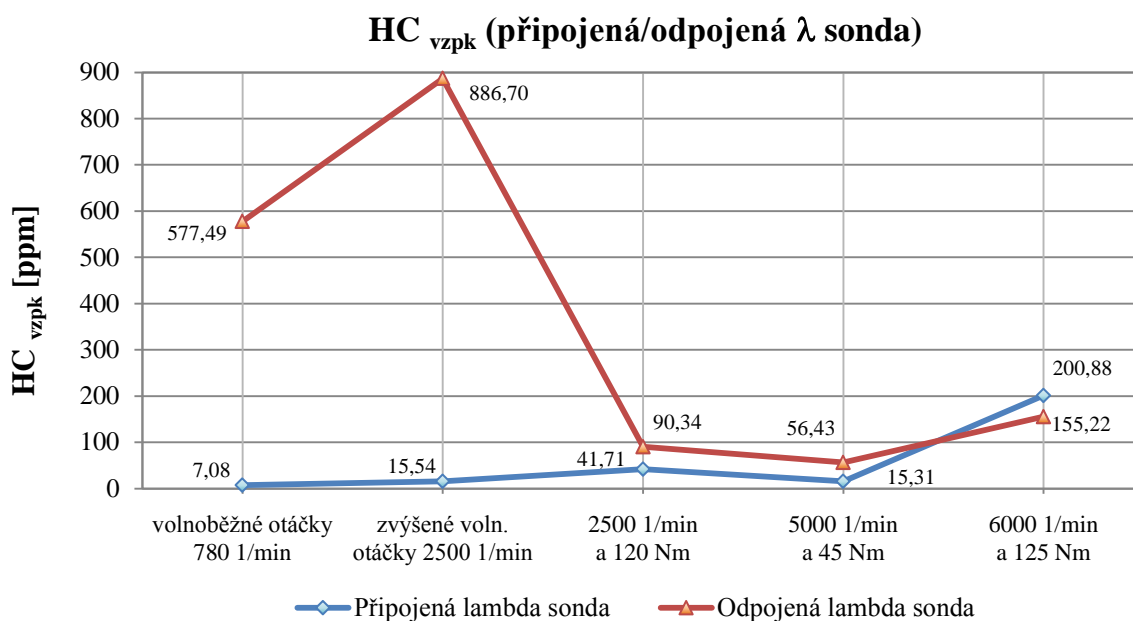
Odpojená lambda sonda měla rovněž vliv na zvýšení emisí NO_x ve všech měřených bodech s výjimkou bodu s otáčkami 5000 1/min a zatížením 45 Nm (obr. 54). V tomto bodě výrazně stouply emise NO_x s funkční lambda regulací. Stejně jako v předchozím experimentu k tomu došlo s největší pravděpodobností z důvodu zvýšení součinitele přebytku vzduchu na $\lambda = 1,01$ a tím snížení účinnosti katalyzátoru pro tuto složku emisí na cca 20 % (obr. 46).

Obr. 54 Graf závislosti NO_x vzpk na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)



Vliv odpojené lambda sondy na nespálené uhlovodíky byl markantní ve volnoběžných otáčkách a zvýšených volnoběžných otáčkách, jak je znázorněno na obr. 55. Opět v bohaté směsi měl katalyzátor nízkou účinnost (v těchto případech nižší než 50 %) kvůli nedostatku vzduchu, který byl nezbytný pro oxidaci HC.

Obr. 55 Graf závislosti HC_{vzpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)



6.3 Vliv netěsnosti výfukového potrubí na obsah emisí

Cílem dalšího experimentu bylo ověřit vliv netěsnosti výfukového potrubí na složení emisí a součinitel přebytku vzduchu λ . Analýza příčin vzniku netěsností je popsána v kapitole 4.1. Netěsnost byla vytvořena v místě za středním tlumičem hluku rozpojením výfukového potrubí, jak je vidět na obr. 56 a v detailu na obr. 57. Měřicí sonda byla umístěna na konci výfukového potrubí.

Z dvou sérií měření bylo první uskutečněno s uvolněnou a druhé se zneprůchodněnou koncovkou výfuku pomocí textilní ucpávky. Tento postup je používán k eliminaci drobných netěsností výfukového potrubí během měření emisí. Předpokladem je, že ve výfukovém potrubí se vytvoří přetlak výfukových plynů, jež eliminuje přísávání okolního vzduchu skrz netěsnost ve výfukovém potrubí. Měření probíhalo při volnoběžných otáčkách (obr. 58) a následně při zvýšených volnoběžných otáčkách (obr. 59). Výsledky měření s ucpávkou viz obr. 60 a obr. 61.

Obr. 56 Místo netěsnosti



Obr. 57 Místo netěsnosti – detail



Obr. 58 Netěsnost/volnoběh



Obr. 59 Netěsnost/zvýšený volnoběh



Obr. 60 Netěsnost/ucpávka/volnoběh



Obr. 61 Netěsnost/ucpávka/zvýšený volnoběh



Z výsledků obou sérií zkoušek výfuku je patrný nárůst kyslíku při volnoběžných otáčkách oproti zvýšeným volnoběžným otáčkám, který má vliv na výpočet součinitele přebytku vzduchu λ , jenž indikuje chudou směs. Se zvyšujícími se otáčkami je postupně eliminován vliv netěsnosti a dochází ke snižování obsahu kyslíku ve výfukových plynech.

To lze přisoudit tomu, že současně se zvýšením otáček stoupá objemový průtok spalín výfukovým potrubím, který vede k omezení přísávání vzduchu do výfukového potrubí netěsnostmi.

V případě utěsněné koncovky výfuku spaliny unikají vzniklou netěsností, což omezuje přísátí vzduchu z venčí. Tento jev je patrný z nižších naměřených hodnot obsahu kyslíku při volnoběžných otáčkách na konci potrubí – obr. 60 a při zvýšených volnoběžných otáčkách obr. 61.

Součinitel přebytku vzduchu λ musí dle vyhlášky 302/2001 Sb. dosahovat hodnoty $1 \pm 0,03$. Z obr. 58 a obr. 59 je tedy zřejmé, že by daný motor nemohl projít emisním testem bez eliminace netěsnosti výfukového potrubí pomocí ucpávky nebo před opravou netěsnosti. Experiment ukázal, že s použitím ucpávky byla hodnota součinitele přebytku vzduchu λ již ve vyhovujících mezích, viz obr. 60 a obr. 61.

Dále byla provedena zkouška netěsnosti výfuku před lambda sondou. Pro toto měření byl ve výfukovém potrubí již předem připravený otvor, který byl otevíratelný pomocí šroubu (těsnost v místě na obr. 57 byla obnovena). Po několika měřeních lze konstatovat, že otvor o průměru 10 mm v tomto místě nemá žádný významný vliv na hodnoty měřených veličin. Lze to přičítat tomu, že je tam takový přetlak vlivem průtoku spalín výfukovým potrubím, kvůli kterému poté prakticky nedochází k přísávání okolního vzduchu.

6.4 Zkouška těsnosti výfuku

Na závěr bylo provedeno ověření orientační zkoušky těsnosti výfuku podle kapitoly 5.1. Zkouška byla provedena tak, že se na krátkou dobu nejprve zneprůchodnila koncovka výfuku. Poté se sledovalo chování motoru při volnoběžných otáčkách s těsným výfukovým potrubím a následně s uměle vytvořenou netěsností v oblasti spojky za středním tlumičem hluku (obr. 56).

V prvním případě těsného výfukového potrubí měl motor tendenci k zastavení a také nebyl slyšet žádný unik výfukových plynů. V druhém testu s netěsným výfukovým potrubím došlo k mírnému zakolísání otáček, ale motor neměl tendenci k zastavení, jako tomu bylo v prvním případě. Spaliny unikaly vytvořenou netěsností s typickým „syčením“, a tak bylo možné jednoduše detekovat místo netěsnosti.

7 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývala analýzou vlivu technického stavu komponentů výfukových soustav spalovacích motorů osobních vozidel na produkci emisí. V jednotlivých kapitolách byl popsán historický vývoj výfukových systémů vozidel, na který navazuje kapitola současného stavu v konstrukci výfukových systémů, dále byly uvedeny metody a zařízení pro diagnostiku výfukových systémů a výsledky experimentálního ověření vybraných poruch součástí výfukových systémů vozidel se zážehovými motory.

Experimentální ověření vlivu vybraných poruch komponentů výfukových soustav vozidel na produkci emisí probíhalo na dvou různých pracovištích a dvou různých motorech. V rámci experimentálních měření byl ověřen vliv technického stavu katalyzátoru, funkce lambda sondy a netěsnosti výfukového potrubí na obsah emisí.

První experiment byl zaměřen na technický stav katalyzátoru a funkci lambda sondy na CNG motoru o obsahu 1,6 l MPI 81 kW, který běžel v režimu zkoušky na benzín a byl připojený k motorové brzdě. Měření bylo uskutečněno ve vybraných režimech, kde byly proměnnými veličinami otáčky a zatížení vyjádřené točivým momentem motoru. Pro realizaci samotného měření byly do jednotlivých částí výfukové soustavy navařeny vstupy pro měření emisí, teplot a tlaku výfukových plynů.

Pro hodnocení technického stavu katalyzátoru bylo nutné provést jeho tepelné poškození. Za tímto účelem byl krátkodobě vystaven působení teploty 1200 ± 20 °C. Po zhodnocení naměřených dat bylo patrné, že teplota a doba jejího působení nebyla dostačující pro měřitelné poškození. Mezi dvěma měřeními však došlo v určitých režimech ke zvýšení součinitele přebytku vzduchu λ z hodnoty 1,00 na hodnotu 1,01 (do oblasti chudé směsi). Pomocí naměřených dat bylo dokázáno, že již takto malý rozdíl v řádu jedné setiny λ vede ke snížení účinnosti katalyzátoru o cca 50 % pro redukci NO_x. O obdobný pokles účinnosti se jednalo i v případě přeměny HC, pokud se hodnota λ snížila o 0,05 (do oblasti bohaté směsi).

Poškození lambda sondy bylo nasimulováno jejím odpojením. V tomto případě řídicí jednotka ECU zareagovala tak, že začala řídit průběh spalování podle

naprogramované strategie a automaticky obohacovala směs z důvodu zajištění požadovaného výkonu a ochrany dílů před přehřátím. Tato reakce pochopitelně vedla k omezení správné funkce třicestného katalyzátoru a to se projevilo markantním nárůstem emisí CO ve všech měřených režimech s výjimkou režimu s maximálními otáčkami a zatížením. Zde byly naměřené hodnoty s připojenou lambda sondou horší. To však bylo zřejmě způsobeno nedokonalou řídicí strategií ECU. Došlo také k velkému zvýšení HC vlivem snížené účinnosti katalyzátoru, což se projevilo především ve volnoběžných otáčkách a zvýšených volnoběžných otáčkách.

Z prvního experimentu je zřejmé, že pro dosažení správné funkce katalyzátoru a tím jeho vysoké účinnosti je důležité, aby složení směsi přiváděné do válců odpovídalo stechiometrickému poměru a hodnota lambda se pohybovala optimálně v oblasti $\lambda = 0,995-1,005$, kde dochází až k 98 % eliminaci všech škodlivin zážehových motorů. Toto rozmezí není v praxi bohužel ve všech režimech práce motoru dosahováno, ať již z důvodu nesprávné funkce lambda sondy, tak i obvyklých výchylek daných řídicí strategií ECU. Vzhledem k výše popsaným problémům s vysokou koncentrací NO_x bych doporučil četnější zavádění zásobníkových (absorpčních) katalyzátorů, které výrazně napomáhají jejich přeměně na méně škodlivé látky svou ukládací schopností v případech, kdy není striktně dodržen stechiometrický poměr. Dalším vhodným způsobem ke snížení NO_x je v současné době také selektivní katalytická redukce SCR. Dále je z mého pohledu vhodné používat soustavu dvou lambda sond sloužících k průběžné kontrole správné funkce katalyzátoru, díky nimž je ECU během provozu schopna rozpoznat jeho sníženou účinnost.

V rámci druhého experimentu, provedeného na motoru o obsahu 1.2 l HTP 40 kW, byl vyhodnocován vliv netěsnosti výfukového potrubí na obsah emisí a lambda regulaci. Netěsnost byla vytvořena v místě za středním tlumičem a měřicí sonda byla umístěna u vyústění výfukového potrubí. Z dvou sérií experimentálních měření bylo první provedeno s průchozí koncovkou výfuku a druhé při jejím zneprůchodnění pomocí textilní ucpávky (tento postup je používán k eliminaci drobných netěsností výfukového potrubí během měření emisí). Měření probíhalo při volnoběžných otáčkách a následně při zvýšených volnoběžných otáčkách.

Z výsledků obou sérií zkoušek netěsnosti výfuku byl viditelný nárůst kyslíku při volnoběžných otáčkách oproti zvýšeným volnoběžným otáčkám, který měl vliv na

nesprávný výpočet součinitele přebytku vzduchu λ , jenž indikoval chudou směs. Se zvyšujícími se otáčkami byl postupně eliminován vliv netěsnosti a docházelo ke snižování obsahu kyslíku ve výfukových plynech. V případě utěsněné koncovky výfuku spaliny unikaly vzniklou netěsností, což omezovalo přísátí vzduchu z venčí. Naměřené hodnoty byly porovnány s legislativními limity a bylo zjištěno, že by motor s netěsnou výfukovou soustavou emisním testem neprošel z hlediska součinitele přebytku vzduchu λ . S použitím ucpávky byla hodnota λ již ve vyhovujících mezích. Z tohoto příkladu je zřejmé, jak jednoduché je provést emisní test i s netěsnou výfukovou soustavou. Dále byla provedena zkouška při netěsnosti výfuku před lambda sondou. Před lambda sondou byl zhotoven otvor o průměru 10 mm. Tato netěsnost se nijak významně v naměřených hodnotách neprojevila. Důvodem byl zřejmě přetlak vzniklý průtokem spalin výfukovým potrubím.

Zkouška těsnosti výfuku následně prokázala, že při těsném výfukovém potrubí a ucpané koncovce výfuku dochází k nerovnoměrnému chodu motoru. Naopak při netěsnosti se volnoběžné otáčky nemění a v místě netěsnosti je slyšitelné typické „syčení“.

Netěsný výfuk ovšem nepředstavuje problém pouze při provedení emisního testu, ale má také vliv na ostatní parametry: ovlivňuje tlumení hluku, ohrožuje posádku vozidla, ovlivňuje plnění válců motoru a jejich výplach vlivem vytváření protitlaku. To rovněž ovlivňuje i spotřebu paliva, výkon motoru a jeho teplotu.

U vznětových motorů je v současnosti největší problém s filtry pevných částic, které se postupně v průběhu své životnosti ucpávají částičky popela vznikajícího při regeneracích. Po jejich ucpání je nutná demontáž spojená s vyčištěním nebo výměnou. Cena nového filtru se obvykle pohybuje v desítkách tisíc a může přijít až na 1/5 pořizovací ceny vozidla. To vede k tomu, že je pro mnoho firem výhodné nabízet úplné odstranění filtrů DPF. Tyto firmy nelákají pouze na úsporu nákladů vynaložených za nový filtr, ale také na zvýšení výkonu a snížení spotřeby paliva. To je zajisté pro mnoho uživatelů výhodná nabídka, na kterou často přistupují. Tento zákrok je nezákonný pouze pro majitele vozidel, nikoliv však pro firmy, které tuto službu poskytují. Tyto vozy emisními kontrolami běžně procházejí, ať již kvůli mírným emisním normám, špatnému vybavení měřicích stanic nebo díky podvodu. V této oblasti bych také viděl prostor pro zlepšení, ať již z hlediska legislativy, tak i technického vybavení stanic měření emisí.

Závěrem bych chtěl konstatovat, že vytčené cíle diplomové práce byly splněny.

Použitá literatura

- [1] REEVES, Milton O.; REEVES, Marshal T.. *Exhaust-Muffler for Engines* [patent]. Indiana. US 582,485. Uděleno 11.5.1897. Dostupné z: http://www.google.com/patents?id=gUBZAAAAEBAJ&printsec=abstract&zoom=4&source=gbs_overview_r&cad=0#v=onepage&q&f=true
- [2] FREDRICK, Hans. The History of Car Mufflers. *eHow* [online]. 8.11.2011 [cit. 2014-08-14]. Dostupné z: http://www.ehow.com/info_12160308_history-car-mufflers.html
- [3] History of the Muffler. *Master Muffler & Brake* [online]. 8.9.2011 [cit. 2014-08-14]. Dostupné z: <http://www.mastermuffler.net/mufflers/history-of-the-muffler>
- [4] SAJDL, Jan. Lambda sonda. *Autolexicon.net* [online]. © 2011 [cit. 2014-08-14]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/lambda-sonda/>
- [5] 35 let lambda sondy. *Auto Tip*. Praha: Ringier Axel Springer Praha, 2011, Číslo 22, s. 74.
- [6] ROSEN, Erwin M. *The Petersen automotive troubleshooting*. New York: Grosset, 1975, 672 s. ISBN 04-481-1946-3.
- [7] SAJDL, Jan. DPF (Diesel Particulate Filter). *Autolexicon.net* [online]. © 2011 [cit. 2014-08-14]. ISSN 1804-2554. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [8] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily 4: Příslušenství*. 5. přeprac. vyd. Brno: Vlk, nakladatelství a vydavatelství, 2002, 286 s. *Automobily*. ISBN 978-80-903671-8-0.
- [9] VLK, František. *Příslušenství vozidlových motorů*. 1. vyd. Brno: Vlk, nakladatelství a vydavatelství, 2002. 338 s. ISBN 80-238-8755-6.
- [10] SCHWARZ, Jiří. *Automobily Škoda Roomster: konstrukce, technika, údržba*. 1. vyd. Praha: Grada, 2007. 344 s. ISBN 978-80-247-1662-6.
- [11] GSCHEIDLE, Rolf, et al. *Příručka pro automechanika*. 3. přeprac. vyd. Praha: Europa - Sobotáles cz, 2007. 688 s. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [12] VLK, František. *Automobilová technická příručka*. 1. vyd. Brno: Vlk, nakladatelství a vydavatelství, 2003. 791 s. ISBN 80-238-9681-4.
- [13] HOREJŠ, Karel a Vladimír MOTEJL. *Příručka pro řidiče a opraváře automobilů: Motory, paliva, emise, diagnostika*. 4.vyd. Brno: Littera, 2009. 392 s. Příručka pro řidiče a opraváře automobilů. ISBN 978-80-85763-52-2.

- [14] *Číslo 1 od samého počátku: sondy lambda Bosch* [online]. [Praha]: Bosch, 2006 [cit. 2014-08-25]. Plakát. Dostupné z: http://aa.bosch.cz/download/formule/formule_plakat_2006_03.pdf
- [15] BAUMRUK, Pavel. *Příslušenství spalovacích motorů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. 236 s. ISBN 80-01-01103-8.
- [16] *Automotive Handbook*. Plochingen: Robert Bosch GmbH, 2007. 7th Edition. ISBN 978-083-7615-400
- [17] Poruchy výfukové soustavy. In: *Josef Mrlina* [online]. 2011 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: http://www.automobily-nahradnidily.cz/?st=clanky_detail&id=121&jm=Poruchy+v%FDfukov%E9+soustavy
- [18] DPF Filter: Cleaning the particulate filter instead of replacing: Efficient & fast. In: *German Engineering Group* [online]. [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.geg.ie/dpf-filter.html>
- [19] Filtry pevných částic jsou časovanou bombou. In: ŠIKL, Petr. *TipCars* [online]. 2010 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.tipcars.com/magazin-filtry-pevnych-castic-jsou-casovanou-bombou-4645.html>
- [20] Vzduch zamořují diesely s odmontovanými filtry. In: CHARVÁT, Jan. *Česká pozice* [online]. 2013 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: http://ceskapozice.lidovky.cz/prasarna-vzduch-zamoruji-diesely-s-odmontovanymi-filtry-pml-/tema.aspx?c=A130228_054000_pozice_99478
- [21] Fakta a mýty DPF filtrů pevných částic: Fakta a mýty o odstraňování a nahrazování filtrů pevných částic. In: *AAAVYFUKY* [online]. [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.aaavyfuky.cz/index.php?stranka=57-fakta-a-myty-dpf-filtru-pevnych-castic#.VF42ujSG-Jo>
- [22] OBD a systém zpětného vedení spalin: Lokalizace chyb a jejich odstranění. In: *Motor Service: KSPG Automotive Group* [online]. 2010 [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: http://download.ms-motor-service.com/ximages/pg_50003971-10_web.pdf
- [23] How Can I Tell if My EGR Valve Needs to be Cleaned or Replaced?. In: *WiseGEEK* [online]. [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: <http://www.wisegeek.com/how-can-i-tell-if-my-egr-valve-needs-to-be-cleaned-or-replaced.htm>
- [24] Diagnostics: Troubleshooting EGR Problems. In: *FUEL PUMP U* [online]. [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: <http://www.fuelpumpu.com/news-diagnostics-troubleshooting-egr-problems>

- [25] Damage patterns on lambda sensors. In: *NGK Spark Plug Europe GmbH* [online]. [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: <http://www.ngk.de/en/technology-in-detail/lambda-sensors/diagnosis/defects/>
- [26] Repair Exhaust & Muffler Shop Onehunga Auckland 09-636-7064. *Geddes Automotive Ltd* [online]. [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: <http://www.geddesautomotive.co.nz/exhaust-leak-repairs-auckland-01.html>
- [27] SCR (Selective Catalytic Reduction). In: SAJDL, Jan. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/scr-selective-catalytic-reduction/>
- [28] Denoxtronic: Diesel - Čištění výfukových plynů. In: *Bosch* [online]. 2011 [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: http://www.bosch-mobility-solutions.cz/cs/cz/component_3/PT_PC_DS_Exhaust-Gas-Treatment_PT_PC_Diesel_877.html?compId=533
- [29] Denoxtronic 5 – Urea Dosing System for SCR systems. In: *Bosch* [online]. 2013 [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: http://www.bosch-automotivetechonology.cn/media/specials/iaa/downloads_1/sauber_sparsam_1/Optimization_diesel_systems_Denoxtronic_5_en.pdf
- [30] Emisní systém Denoxtronic: Bosch snižuje emise oxidů dusíku. *Bosch* [online]. 2013 [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: http://press.bosch.cz/detail.asp?f_id=1145
- [31] SCR katalyzátor AdBlue. In: *Autodiagnostika* [online]. [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: http://www.pc-autodiag.sk/scr_katalizator_adblue.html
- [32] PAPOUŠEK, Miroslav a Pavel ŠTĚRBA. *Diagnostika spalovacích motorů. 2. aktualiz. vyd.* Brno: Computer Press, 2007, 223 s. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-1697-5.
- [33] MOTORTESTY. In: *Autoserva* [online]. 2014 [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: http://www.autoserva.cz/html/diag_motor6.php
- [34] VLK, František. *Diagnostika motorových vozidel. 1. vyd.* Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2006, 444 s. ISBN 80-239-7064-X.
- [35] TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů. 1. vyd.* Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997, 111 s. ISBN 80-010-1632-3.
- [36] HALDERMAN, James D. a Chase D. MITCHELL, JR. *Automotive Engines: Theory and Servicing. 5th ed.* Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005, xx, 636 p. ISBN 01-311-3325-X.

- [37] Nařízení evropského parlamentu a rady (EU) č. 540/2014 ze dne 16. dubna 2014: o hladině akustického tlaku motorových vozidel a náhradních systémů tlumení hluku a o změně směrnice 2007/46/ES a o zrušení směrnice 70/157/EHS. In: [online]. 2014 [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0540&rid=2>
- [38] Mobility Solutions. In: *Bosch* [online]. 2014 [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6885&locale=en>
- [39] Diesel Systems: Sensors for exhaust-gas treatment systems. In: *Bosch* [online]. 2012 [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: http://www.bosch-mobility-solutions.de/media/ubk_europe/db_application/downloads/pdf/antrieb/en_3/DS_Sheet_0VX_Sensors_for_exhaust-gas_treatment_systems_low.pdf
- [40] Sensors for Diesel particulate filters. In: *Bosch* [online]. 2012 [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: http://www.bosch-mobility-solutions.com/en/de/technik/component/PT_PC_DS_Exhaust-Gas-Treatment_PT_PC_Diesel_1537.html?compId=946
- [41] RÖMER, Elise. *Amperometric NOx-sensor for Combustion Exhaust Gas Control*. Enschede, Nizozemsko, 2001. ISBN 9036515734. Dostupné z: <http://doc.utwente.nl/36605/1/t000002c.pdf>. Disertační práce. University of Twente.
- [42] ACTIA CZ S. R.O. *Modul analyzátoru AT505*. Tábor - Horky, 2015. Dostupné z: http://www.atal.cz/data/docs-gas/gas_prospectus_cz.pdf
- [43] AVL AMA i60 COMBI. In: *AVL* [online]. [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <https://www.avl.com/-/avl-ama-i60-combi>
- [44] MALEČEK, Marek. ŠKODA AUTO, a.s. *Parametry motoru EA211 1,6l*. Mladá Boleslav, 2014.
- [45] 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.

Seznam použitých symbolů a zkratek

AGR	(Ab-Gas-Rückführ-Ventil) – ventil pro vnější recirkulaci spalin
CLD	chemoluminiscenční detektor
CNG	(Compressed Natural Gas) – stlačený zemní plyn
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
D	(Drive) – poloha "jízda vpřed" na ovládání automatické převodovky
DeNO _x	selektivní katalyzátor pro snižování oxidů dusíku
DKL	poloha škrticí klapky
DPF	(Diesel Particulate Filter) – filtr pevných částic
ECU	(Electronic Control Unit) – elektronická řídicí jednotka
EGR	(Exhaust Gas Recirculation) – ventil pro vnější recirkulaci spalin
EU	Evropská unie
FID	(Flammen Ionisations Detektor) – analyzátor výfukových plynů pracující na principu plamenné ionizační detekce
H ₂ O	voda
HC	uhlovodíky
H _{cv}	poměr atomové hmotnosti vodíku a uhlíku
HDi	(High Pressure Direct Injection) – označení diesellových motorů se systémem vysokotlakého vstřikování „common rail“
HTP	(High Torque Performance) – označení motoru s vysokým kroutícím momentem
CH ₄	methan
K1	faktor konverze z měření NDIR na FID
λ	součinitel přebytku vzduchu (definován v kap. 3.2 v poznámce pod čarou)
LED	(Light-Emitting Diode) – dioda emitující světlo
M _{ef}	korigovaný točivý moment motoru
M _p	hodinová spotřeba paliva
MPI	(Multi Point Injection) – vícebodové vstřikování
N	neutrál (poloha převodovky)
n	otáčky motoru
N ₂	dvouatomový dusík

N ₂ O	oxid dusný
NDIR	(nondispersive infrared sensor) nedisperzivní infračervený spektrometr
NH ₃	amoniak
NO	oxid dusnatý
NO _x	oxidy dusíku
O ₂	kyslík
OBD	(On Board Diagnostics) – systém palubní diagnostiky
O _{cv}	poměr atomové hmotnosti kyslíku a uhlíku
ot.	otáčky
P _{ko}	korigovaný výkon motoru
ppk	před prvním katalyzátorem
Pt	platina
P _{vpppk}	tlak výfukových plynů před prvním katalyzátorem
Rh	rhodium
RON	(Research Octane Number) – oktanové číslo měřené výzkumnou metodou
SCR	(Selective Catalytic Reduction) – selektivní katalytická redukce
THC	emise uhlovodíků
TiO ₂	oxid titaničitý
t _{opf}	teplota oleje před filtrem
t _{vpvk}	teplota výfukových plynů v katalyzátoru
USA	(United States of America) – Spojené státy americké
voln.	volnoběžné
vppk	vlhké emise před prvním katalyzátorem
VW	Volkswagen AG
vzdk	vlhké emise za druhým katalyzátorem
vzpk	vlhké emise za prvním katalyzátorem
zdk	za druhým katalyzátorem
zpk	za prvním katalyzátorem
ZrO ₂	oxid zirkoničitý

Seznam obrázků

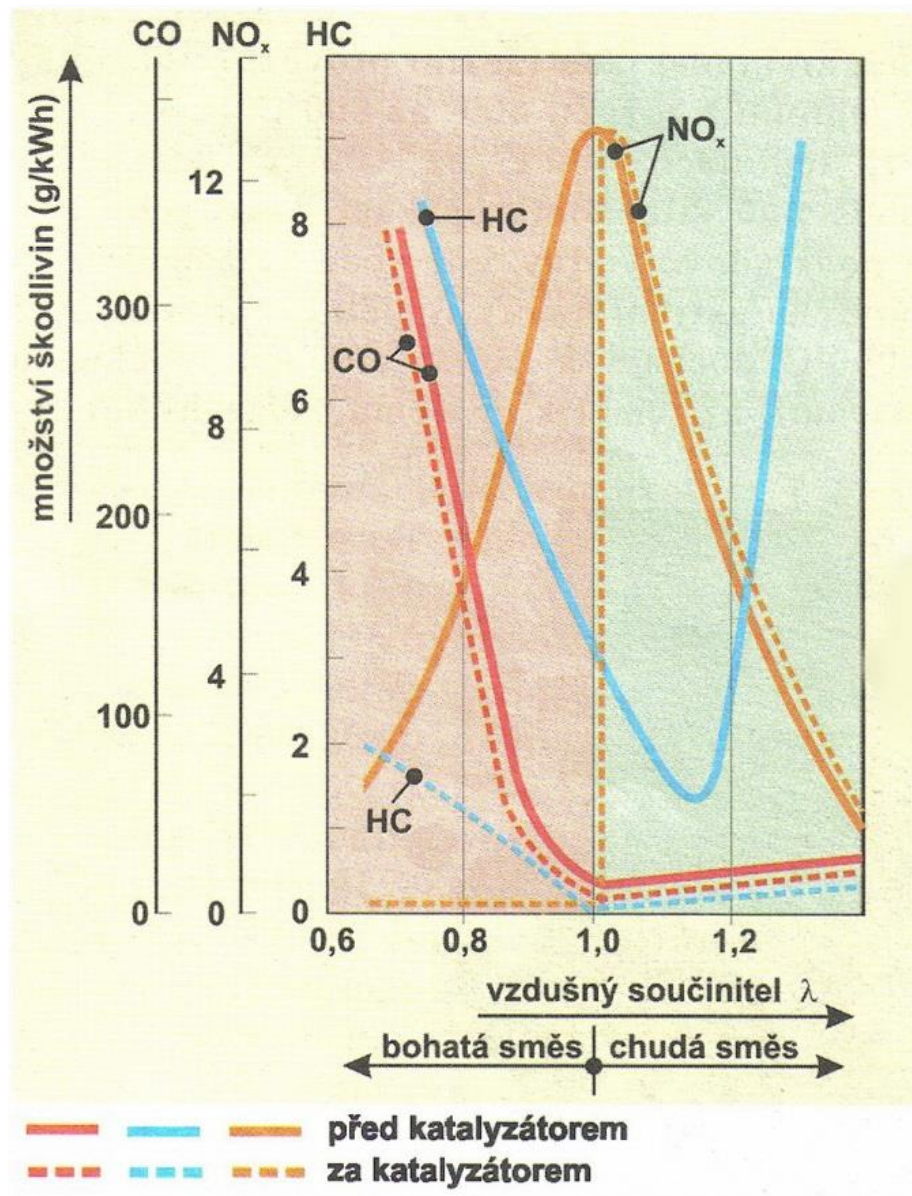
- obr. 1 Příklad konstrukce výfukové soustavy
- obr. 2 Dvouplášťové sběrné výfukové potrubí z ocelového plechu
- obr. 3 Ukládání a regenerace NO_x
- obr. 4 Lambda sonda z oxidu zirkoničitého
- obr. 5 Napěťový signál λ sondy
- obr. 6 Lambda sonda z oxidu titaničitého
- obr. 7 Širokopásmová λ sonda
- obr. 8 Charakteristika širokopásmové sondy
- obr. 9 Filtr pevných částic
- obr. 10 Zpětné vedení výfukových plynů (vnější recirkulace)
- obr. 11 Umístění součástí SCR ve vozidle
- obr. 12 Denoxtronic 5
- obr. 13 Umístění senzorů ve výfukovém systému vznětového motoru
- obr. 14 Reflexní tlumič hluku
- obr. 15 Interferenční efekt
- obr. 16 Absorpční tlumič hluku
- obr. 17 Kombinovaný reflexně-absorpční tlumič hluku
- obr. 18 Vliv jednotlivých účinků na výfukový systém
- obr. 19 Zkorodovaný a rozpojený výfuk
- obr. 20 Roztavený katalyzátor
- obr. 21 Tepelný rozsah činnosti katalyzátoru
- obr. 22 Karbonové usazeniny na lambda sondě
- obr. 23 Bílé nebo šedé nánosy na lambda sondě
- obr. 24 Nezanešený DPF
- obr. 25 Zanešený DPF
- obr. 26 Zanesený EGR ventil
- obr. 27 Ucpaný snímač hmotnosti vzduchu
- obr. 28 Přístroj na zkoušení funkce lambda sondy SP 300730
- obr. 29 Analyzátor Bosch BEA 850
- obr. 30 Princip čtyř-složkového analyzátoru Bosch
- obr. 31 Kontrola dosažení požadované teploty oleje při měření emisí
- obr. 32 Opacimetr Bosch RTT 110

- obr. 33 AVL AMA i60
- obr. 34 Motor EA211 1,6 l MPI 81 kW
- obr. 35 Brzda Siemens a místnost brzdové zkušebny
- obr. 36 Řídicí stanoviště brzdové zkušebny
- obr. 37 Emisní analyzátor AT505
- obr. 38 Motor Škoda Fabia 1.2 HTP
- obr. 39 Zvýšení teploty katalyzátoru vyobrazený v systému Venus
- obr. 40 Závislost CO na otáčkách motoru a M_{ef}
- obr. 41 Závislost NO_x na otáčkách motoru a M_{ef}
- obr. 42 Závislost HC na otáčkách motoru a M_{ef}
- obr. 43 Měřená výfuková soustava osazená teplotními senzory a emisními výstupy
- obr. 44 Měřená výfuková soustava osazená teplotními senzory a emisními výstupy – detail
- obr. 45 Graf závislosti lambda na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)
- obr. 46 Účinnost katalyzátoru
- obr. 47 Graf závislosti CO_{zpk} na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)
- obr. 48 Graf závislosti CO_{2zpk} na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)
- obr. 49 Graf závislosti NO_{xvzpk} na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)
- obr. 50 Graf závislosti HC_{vzpk} na otáčkách a M_{ef} (katalyzátor před a po spékání Pt/Rh)
- obr. 51 Graf závislosti lambda na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)
- obr. 52 Graf závislosti CO_{zpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)
- obr. 53 Graf závislosti CO_{2zpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)
- obr. 54 Graf závislosti NO_{xvzpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)
- obr. 55 Graf závislosti HC_{vzpk} na otáčkách a M_{ef} (připojená/odpojená λ sonda)
- obr. 56 Místo netěsnosti
- obr. 57 Místo netěsnosti – detail
- obr. 58 Netěsnost/volnoběh
- obr. 59 Netěsnost/zvýšený volnoběh
- obr. 60 Netěsnost/ucpávka/volnoběh
- obr. 61 Netěsnost/ucpávka/zvýšený volnoběh

Seznam příloh

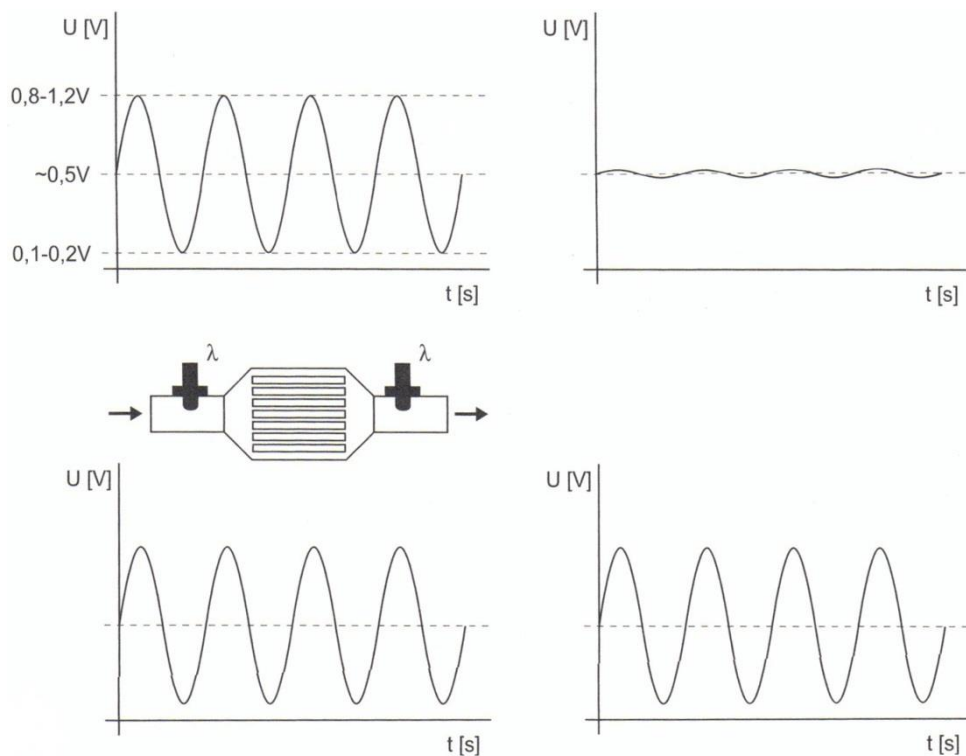
Příloha 1 – Snížení emisí škodlivin v závislosti na složení směsi (součiniteli přebytku vzduchu λ)	I
Příloha 2 – Průběhy napětí na λ sondách před a za funkčním/nefunkčním katalyzátorem	II
Příloha 3 – Tabulka v praxi využívaných jízdních režimů	III
Příloha 4 – Současně schválené mezní hodnoty hladiny akustického tlaku.....	IV
Příloha 5 – Specifikace emisního analyzátoru AT505	V
Příloha 6 – Experiment s katalyzátorem před a po spékání Pt/Rh	VI
Příloha 7 – Experiment s připojenou/odpojenou λ sondou	VII

Příloha 1: Snížení emisí škodlivin v závislosti na složení směsi (součiniteli přebytku vzduchu λ)



Zdroj: [10]

Příloha 2: Průběhy napětí na λ sondách před a za funkčním/nefunkčním katalyzátorem



Na horních grafech jsou znázorněny průběhy napětí na λ sondách před a za funkčním katalyzátorem, na spodních grafech potom u katalyzátoru nefunkčního.

Zdroj: [32]

Příloha 3: Tabulka v praxi využívaných jízdních režimů

režim	rychlost vozidla/výkon pohlcený válcovou brzdou [km·h ⁻¹ /kW]	rychl. stupeň	otáčky motoru [min ⁻¹]
volnoběh	0/0	N	přirozené
zvýšený volnoběh	0/0	N	automobilové 2000–3000 motocyklové 3000–6000
částečné zatížení	50/2–3	III nebo D	-
běžné provozní zatížení	80/7–10	V nebo D	přibližně 1/3 až 1/2 maximálních otáček
plný výkon	dle možností válcové brzdy	zpravidla III nebo IV, dle možností válcové brzdy	maximálního výkonu

Zdroj: [32]

Příloha 4: Současně schválené mezní hodnoty hladiny akustického tlaku

Kategorie vozidla	Popis kategorie vozidla	Mezní hodnoty vyjádřené v dB(A) [decibely(A)]		
		Fáze 1 použitelná pro nové typy vozidel ode dne 1. července 2016	Fáze 2 použitelná pro nový typ vozidla ode dne 1. července 2020 a pro první registraci ode dne 1. července 2022	Fáze 3 použitelná pro nový typ vozidla ode dne 1. července 2024 a pro první registraci ode dne 1. července 2026
M	Vozidla používaná pro přepravu cestujících			
M ₁	poměr výkonu k hmotnosti ≤ 120 kW/1000 kg	72 (1)	70 (1)	68 (1)
M ₁	120 kW/1000 kg < poměr výkonu k hmotnosti ≤ 160 kW/1000 kg	73	71	69
M ₁	160 kW/1000 kg < poměr výkonu k hmotnosti	75	73	71
M ₁	poměr výkonu k hmotnosti > 200 kW/1000 kg počet sedadel ≤ 4 bod R sedadla řidiče ≤ 450 mm od země	75	74	72
M ₂	hmotnost ≤ 2500 kg	72	70	69
M ₂	2500 kg < hmotnost ≤ 3500 kg	74	72	71
M ₂	3500 kg < hmotnost ≤ 5000 kg; jmenovitý výkon motoru ≤ 135 kW	75	73	72
M ₂	3500 kg < hmotnost ≤ 5000 kg; jmenovitý výkon motoru > 135 kW	75	74	72
M ₃	jmenovitý výkon motoru ≤ 150 kW	76	74	73 (2)
M ₃	150 kW < jmenovitý výkon motoru ≤ 250 kW	78	77	76 (2)
M ₃	jmenovitý výkon motoru > 250 kW	80	78	77 (2)

Zdroj: [37]

Příloha 5: Specifikace emisního analyzátoru AT505

Měřený parametr	Rozsah	Rozlišení	Chyba měření	
CO	0 - 10 % vol	0.01 % vol	0.03 % vol	nebo 5 % ČH
CO ₂	0 - 20 % vol	0.1 % vol	0.5 % vol	nebo 5 % ČH
HC _(hex)	0 - 2000 ppm vol	1 ppm vol	10 ppm vol	nebo 5 % ČH
	2001 - 9000 ppm vol	10 ppm vol		5 % ČH
O ₂	0 - 4 % vol	0.01 % vol	0.1 % vol	nebo 5 % ČH
	4 - 21 % vol	0.1 % vol		5 % ČH
CO _{cor}	0 - 10 % vol	0.01 % vol		
NO _x	0 - 5000 ppm vol	1 ppm vol		
Lambda	0.500 - 2.000	0.001		ISO 3929

Sestava „Gas analyser“ AT505 obsahuje:

- Modul analyzátoru
- Odběrová sonda (hadice + kovová koncovka)
- Komunikační kabel AT505/1xRS232
- Napájecí zdroj (úprava) s kabelem
- Software AT505
- Osobní počítač (PC)

Ostatní specifikace:

- Napájecí napětí..... 100 až 240 V AC, 47 až 63 Hz nebo 10 až 18 V DC
- Příkon 40 W max.
- Doba náběhu 10 min max. (při 25°C)
- Komunikační rozhraní RS232 (USB volitelné)
- Provozní teplota 5 až 40 °C
- Provozní vlhkost relativní 90 % nesrážlivá
- Atmosférický tlak 860 až 1060 hPa

Zdroj: [42]

Příloha 6: Experiment s katalyzátorem před a po spékání Pt/Rh

Dlouhodobě používaná výfuková soustava před spékáním Pt/Rh v katalyzátoru																						
P _{vypk} mbar	t _{vypk} °C	DKL %	n 1/min	P _{ko} kW	M _{gr} Nm	λ	M _p kg/h	t _{60pr} °C	CO _{vypk} %	CO _{zdk} %	CO _{2,vypk} %	CO _{2,zdk} %	NO _{x,vypk} ppm	NO _{x,zdk} ppm	O _{2,vypk} %	O _{2,zdk} %	HC _{vypk} ppm	HC _{zdk} ppm				
1,2	500,2	0,0	780	0,0	0,0	1,002	0,53	89	0,55	0,00	14,51	15,24	14,93	80,56	0,54	12,11	0,44	0,01	0,34	377,05	8,38	12,32
25,6	621,3	100,0	1 000	11,9	113,6	0,953	3,33	87	1,81	1,50	13,78	14,15	14,16	1 596,90	51,17	3,39	0,29	0,00	0,04	698,07	280,33	260,10
4,0	583,9	10,2	2 500	0,0	0,0	1,000	1,27	89	0,69	0,12	13,93	15,13	15,09	154,86	0,51	12,67	1,06	0,01	0,15	1 294,53	93,42	77,63
88,0	809,4	42,1	2 500	31,4	120,0	0,998	7,57	97	0,63	0,27	14,48	15,02	15,13	3 043,86	48,69	28,06	0,38	-0,02	-0,02	482,17	58,26	49,74
88,1	861,6	31,9	5 000	23,6	45,0	1,002	7,82	108	0,59	0,11	14,43	15,15	15,18	3 184,11	7,26	3,76	0,47	-0,02	-0,02	436,27	19,40	17,02
359,9	854,8	100,0	5 000	74,2	141,7	0,846	22,31	119	5,90	5,87	11,33	11,46	11,61	741,25	70,16	16,50	0,10	-0,02	-0,03	470,09	201,45	189,34
432,4	849,5	100,0	6 000	78,0	124,1	0,813	25,75	125	7,13	7,19	10,59	10,65	10,75	543,19	51,49	12,21	0,08	-0,02	-0,03	502,88	234,36	216,94
Dlouhodobě používaná výfuková soustava po spékání Pt/Rh v katalyzátoru																						
1,0	455,6	0,0	780	0,0	0,0	1,004	0,48	89	0,41	0,01	14,52	15,31	15,03	71,34	0,50	3,56	0,60	0,04	0,28	429,60	11,15	13,21
26,6	625,1	100,0	1 000	11,9	113,9	0,959	3,29	87	1,57	1,49	13,92	14,23	14,34	1 732,40	41,49	1,74	0,34	0,03	0,08	667,19	161,12	127,12
4,0	585,9	10,2	2 500	0,0	0,0	1,004	1,26	89	0,64	0,05	13,95	15,20	15,07	149,35	0,59	9,41	1,12	0,03	0,24	1 273,59	57,34	57,76
90,0	811,1	42,0	2 500	31,4	120,0	1,004	7,53	97	0,53	0,10	14,54	15,15	15,26	3 146,15	40,65	4,05	0,44	0,02	0,01	459,81	39,32	24,61
88,3	855,6	31,6	5 000	23,6	45,0	1,007	7,77	108	0,51	0,00	14,47	15,21	15,23	3 183,14	474,05	429,49	0,55	0,02	0,02	431,01	8,19	3,35
360,9	855,4	100,0	5 000	74,3	141,9	0,851	22,19	119	5,70	5,72	11,47	11,55	11,78	783,85	124,51	7,94	0,12	0,00	-0,01	466,11	191,03	169,99
433,3	851,8	100,0	6 000	78,0	124,2	0,818	25,56	125	6,97	7,03	10,68	10,74	10,95	591,51	89,09	7,34	0,10	0,00	-0,01	497,16	219,47	192,76

P _{vypk} [mbar]	-	tlak výfukových plynů před prvním katalyzátorem
t _{vypk} [°C]	-	teplota výfukových plynů v katalyzátoru
DKL [%]	-	poloha škrtící klapky
n [1/min]	-	otáčky motoru
P _{ko} [kW]	-	korigovaný výkon motoru
M _{gr} [Nm]	-	korigovaný točivý moment motoru
λ [-]	-	lambda
M _p [kg/h]	-	hodinová spotřeba paliva
t _{60pr} [°C]	-	teplota oleje před filtrem
CO _{vypk} [%]	-	suché emise oxidu uhelnatého před prvním katalyzátorem
CO _{zdk} [%]	-	suché emise oxidu uhelnatého za prvním katalyzátorem
CO _{vypk} [ppm]	-	suché emise oxidu uhelnatého za druhým katalyzátorem
CO _{zdk} [ppm]	-	suché emise oxidu uhelnatého za druhým katalyzátorem
CO _{2,vypk} [%]	-	emise oxidu uhličitého před prvním katalyzátorem
CO _{2,zdk} [%]	-	emise oxidu uhličitého za prvním katalyzátorem
CO _{2,zdk} [ppm]	-	emise oxidu uhličitého za druhým katalyzátorem
NO _{x,vypk} [ppm]	-	vlhké emise oxidů dusíku před prvním katalyzátorem
NO _{x,vypk} [ppm]	-	vlhké emise oxidů dusíku za prvním katalyzátorem
NO _{x,vypk} [ppm]	-	vlhké emise oxidů dusíku za druhým katalyzátorem
O _{2,vypk} [%]	-	kyslík před prvním katalyzátorem
O _{2,zdk} [%]	-	kyslík za prvním katalyzátorem
O _{2,zdk} [ppm]	-	kyslík za druhým katalyzátorem
HC _{vypk} [ppm]	-	vlhké emise uhlovodíků před prvním katalyzátorem
HC _{zdk} [ppm]	-	vlhké emise uhlovodíků za prvním katalyzátorem
HC _{vypk} [ppm]	-	vlhké emise uhlovodíků za druhým katalyzátorem

Příloha 7: Experiment s připojenou/odpojenou λ sondou

Výfuková soustava v bezvadném stavu																						
P_{vypuk} mbar	t_{vypuk} °C	DKL	n	P_{ko} kW	M_{ef} Nm	M_p kg/h	t_{opf} °C	CO_{ppk} %	CO_{zpk} %	CO_{ztk} %	CO_2_{ppk} %	CO_2_{zpk} %	CO_2_{ztk} %	$NO_{X,vppk}$ ppm	$NO_{X,vzpk}$ ppm	$NO_{X,vztk}$ ppm	O_2_{zpk} %	O_2_{ztk} %	HC_{vppk} ppm	HC_{vzpk} ppm	HC_{vztk} ppm	
1,9	611,1	0,0	780	0,0	0,0	1,006	91	0,45	0,01	0,00	14,48	15,15	15,23	82,26	0,60	0,32	0,59	0,04	372,14	7,08	6,49	
5,2	620,5	10,0	2 500	0,0	0,0	1,008	95	0,64	0,03	0,03	13,90	15,20	15,21	147,36	0,41	0,10	1,17	0,04	1 341,78	15,54	15,16	
85,2	816,8	42,2	2 500	31,4	120,0	1,005	102	0,51	0,09	0,08	14,56	15,18	15,23	3 115,63	67,25	18,19	0,41	-0,01	452,09	41,71	26,15	
88,0	876,7	31,5	5 000	23,6	45,0	1,008	112	0,50	0,00	0,00	14,49	15,20	15,21	3 228,10	529,25	594,29	0,52	0,01	416,46	15,31	4,75	
406,8	850,9	100,0	6 000	78,3	124,6	0,822	126	6,94	6,92	6,84	10,71	10,83	10,92	592,83	77,76	10,68	0,08	-0,01	488,33	200,88	150,20	
Výfuková soustava v bezvadném stavu s odpojenou λ sondou																						
1,0	438,1	0,0	780	0,0	0,0	0,955	89	1,75	1,55	1,42	13,88	14,12	14,21	75,55	13,73	5,22	0,24	0,02	719,63	577,49	565,08	
4,6	538,7	7,2	2 500	0,0	0,0	0,931	89	2,32	2,34	2,36	13,47	13,62	13,63	96,66	47,45	36,55	0,28	0,01	1 050,11	886,70	859,19	
79,8	771,7	41,6	2 500	31,4	120,0	0,976	98	1,13	1,13	1,19	14,23	14,46	14,47	2 586,01	106,83	58,10	0,29	-0,01	497,74	90,34	78,20	
82,6	841,8	31,6	5 000	23,6	45,0	0,979	109	1,09	0,95	0,86	14,23	14,58	14,64	2 787,35	49,34	20,64	0,35	-0,02	473,41	56,43	42,31	
410,7	891,3	100,0	6 000	78,2	124,5	0,865	124	5,04	5,00	4,99	11,88	12,02	12,07	1 048,53	119,24	13,93	0,11	-0,01	435,93	155,22	106,91	
P_{vypuk} [mbar]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
t_{vypuk} [°C]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DKL [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
n [1/min]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P_{ko} [kW]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_{ef} [Nm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
λ [-]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M_p [kg/h]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
t_{opt} [°C]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO_{vppk} [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO_{zpk} [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO_{ztk} [%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

tlak výfukových plynů před prvním katalyzátorem
teplota výfukových plynů v katalyzátoru
poloha škrťací klapky
otáčky motoru
korigovaný výkon motoru
korigovaný točivý moment motoru
lambda
hodinová spotřeba paliva
teplota oleje před filtrem
suché emise oxidu uhelnatého před prvním katalyzátorem
suché emise oxidu uhelnatého za prvním katalyzátorem
suché emise oxidu uhelnatého za druhým katalyzátorem
emise oxidu uhličitého před prvním katalyzátorem
emise oxidu uhličitého za prvním katalyzátorem
emise oxidu uhličitého za druhým katalyzátorem
vlhké emise oxidů dusíka před prvním katalyzátorem
vlhké emise oxidů dusíka za prvním katalyzátorem
vlhké emise oxidů dusíka za druhým katalyzátorem
kyslík před prvním katalyzátorem
kyslík za prvním katalyzátorem
kyslík za druhým katalyzátorem
vlhké emise uhlovodíků před prvním katalyzátorem
vlhké emise uhlovodíků za prvním katalyzátorem
vlhké emise uhlovodíků za druhým katalyzátorem