



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

DIAGNOSTIKA EMISNÍCH SYSTÉMŮ MODERNÍCH VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

DIAGNOSTICS OF EMISSION SYSTEMS OF MODERN DIESEL ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stefan

Hlawiczka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Beran

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Stefan Hlawiczka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Beran
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Diagnostika emisních systémů moderních vznětových motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku diagnostiky správné funkce emisních systémů moderních vznětových motorů splňující normu euro 5 a výše. Jedním z hlavních cílů práce je rešerše a detailní vysvětlení principu funkce jednotlivých komponent souvisejících se systémem dodatečné úpravy spalin ve vozidle. Součástí práce je zhodnotit odborné metody diagnostiky těchto emisních systémů jak pomocí sériové diagnostiky, tak prostřednictvím paralelního měření fyzikálních veličin. Porovnání odborných servisních metod, zjištění správné funkce emisních systémů v kontextu s legislativními emisní zkouškou při schvalování technické způsobilosti vozidla.

Cíle bakalářské práce:

Provedení dostupné rešerše v oblasti snižování produkce škodlivin ve výfukových plynech moderních vznětových motorů osobních vozidel.

Stručné shrnutí současné legislativní metodiky hodnocení produkce škodlivin ve výfukových plynech vznětových motorů.

Popis a detailní vysvětlení funkčního principu jednotlivých systémů pro dodatečnou úpravu spalin pro vznětový motor plnící alespoň emisní normu EURO 6.

Zhodnotit odborné metody diagnostiky těchto emisních systémů jak pomocí sériové diagnostiky, tak prostřednictvím paralelního měření fyzikálních veličin.

Shrnutí zadané problematiky a zhodnocení dosažených závěrů.

Seznam doporučené literatury:

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

SKOTSKY, Alexander A. Automotive Engines. Springer Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00163-5.

JAN, Zdeněk a ŽDÁNSKÝ, Bronislav. Automobily (3): Motory. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. ISBN 978-80-87143-15-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá emisními systémy automobilů se vznětovými motory. Zaobírá se motivací pro jejich zavedení v podobě stručného přehledu škodlivých látek ve výfukových plynech a legislativního hodnocení, jak z pohledu homologace vozidla, tak i periodické emisní kontroly v ČR. Hlavní obsah práce tvoří popis funkčního principu a konstrukce jednotlivých systémů omezujících emisi škodlivých látek do ovzduší. Na základě provedené rešerše a možností diagnostického přístroje byly navrženy obecné postupy pro diagnostiku typických poruch filtru pevných částic (DPF) a systému selektivní katalytické redukce (SCR). Při navrhování postupu byla vyvinuta snaha o co nejlepší využití sériové diagnostiky a následné řešení dané opravy. Vliv teploty na vypalování sazí a korelace mezi tlakovou ztrátou na filtru a zátěží motoru byla experimentálně ověřena diagnostickými přístroji.

KLÍČOVÁ SLOVA

emisní systémy, SCR, DPF, EGR, AdBlue, diagnostika systému dodatečné úpravy spalin

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the emission systems of cars with diesel engines. It discusses the motivation for their introduction, including a summary of harmful substances in the exhaust gases, and evaluates the relevant legislation in terms of vehicle homologation and periodic emission control in the Czech Republic. The fundamental content of the thesis is a description of the functional principles and designs of individual systems limiting the emissions of harmful substances into the air. Based on conducted research and the capabilities of the diagnostic device, general procedures for diagnosing typical failures of the diesel particulate filter (DPF) and the selective catalytic reduction (SCR) system were proposed, with an effort to optimize the use of diagnostic tools and provide effective repair solutions. The required temperature for DPF regeneration and the correlation between filter pressure drop and engine load were experimentally verified using diagnostic tools.

KEYWORDS

emission systems, SCR, DPF, EGR, AdBlue, diagnostics of the exhaust aftertreatment system

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLAWICZKA, Stefan. *Diagnostika emisních systémů moderních vznětových motorů*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Martin Beran. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149767>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Martina Berana a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

.....

Stefan Hlawiczka

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Martinu Beranovi za jeho přínosné rady, možnost konzultace mé práce a poskytnutí diagnostického nástroje.

OBSAH

Úvod.....	7
1 Emise vznětových motorů.....	8
1.1 Oxid uhelnatý.....	9
1.1.1 Vliv, CO na zdraví.....	9
1.1.2 Vznik, CO ve vznětovém motoru.....	9
1.2 Nespálené uhlovodíky – HC.....	9
1.2.1 Vliv HC na zdraví.....	9
1.2.2 Vznik HC ve vznětovém motoru.....	9
1.3 Pevné částice.....	10
1.3.1 Vliv PM na zdraví a životní prostředí.....	10
1.3.2 Vznik PM ve vznětovém motoru.....	10
1.4 Oxidy dusíku – NO _x	11
1.4.1 Vliv NO _x na zdraví a životní prostředí.....	12
1.4.2 Vznik NO _x ve vznětovém motoru.....	12
2 Homologační měření emisí.....	13
2.1 Emisní limity osobních vozidel s vznětovým motorem.....	13
2.2 Testovací cykly.....	14
2.2.1 ECE 15 + EUDC.....	14
2.2.2 NEDC.....	15
2.2.3 WLTP.....	15
2.2.4 RDE.....	16
3 Emisní kontrola v České Republice.....	17
4 Snižování emisí NO_x.....	18
4.1 Časování vstřiku a rozdělení dávky paliva na více vstříků.....	18
4.2 Snížení kompresního poměru.....	18
4.3 Recirkulace spalin.....	18
4.3.1 Vysokotlaký okruh EGR.....	19
4.3.2 Nízkotlaký okruh EGR.....	19
4.3.3 Ventil EGR.....	19
4.4 Selektivní katalytická redukce.....	20
4.4.1 Princip funkce SCR.....	20
4.4.2 Konstrukce systému SCR.....	21
4.5 Adsorbéry NO _x	22
4.5.1 Aktivní adsorbéry NO _x	22
4.5.2 Pasivní adsorbéry NO _x	22
5 Snižování emisí pevných částic.....	24
5.1 Vysoký vstřikovací tlak paliva.....	24
5.2 Filtr pevných částic.....	24
5.2.1 Konstrukce systému DPF.....	24
5.2.2 Regenerace DPF.....	25

6	Snižování emisí HC a CO	27
7	Diagnostika systémů dodatečné úpravy spalin.....	28
7.1	Diagnostika filtru pevných částic	28
7.1.1	Vyčtení paměti závad.....	28
7.1.2	Kontrola snímačů	28
7.1.3	Zaplnění filtru pevných částic.....	31
7.1.4	Poškození filtračního média.....	33
7.2	Diagnostika systému SCR.....	33
7.2.1	Vyčtení paměti závad.....	33
7.2.2	Kontrola snímačů	34
7.2.3	Kontrola těsnosti systému	35
7.2.4	Kontrola vstřikovače	35
	Závěr	36
	Použité informační zdroje	37
8	Bibliografie	Chyba! Záložka není definována.
	Seznam použitých zkratk a symbolů	44
	Seznam příloh.....	Chyba! Záložka není definována.

ÚVOD

Problematika emisí vznětových motorů patří, v době zpřísnujících se emisních norem, k velice aktuálním tématům. Vznětový motor je z důvodu svých emisí často démonizován, přestože díky své konstrukci disponuje vyšší účinností než motor zážehový. K negativnímu vnímání vznětových motorů přispívají velkou mírou vozidla ve špatném stavu nebo ilegálně upravená, které z výfuku vypouštějí velké množství černého dýmu. I osoba neorientující se v problematice emisí spalovacích motorů intuitivně cítí, že takto znečištěný vzduch není pro dýchání vhodný.

Pro splnění emisních limitů jsou výrobci nuceni optimalizovat proces spalování, pro co nejnižší produkci škodlivých látek a aplikovat čím dál tím komplexnější systémy dodatečné úpravy výfukových plynů. Nové automobily vypouštějí znatelně méně škodlivých látek než ty vyrobeny v minulých letech. Větší množství dílů, složitější management a nové technologie logicky přinášejí spolu s benefity vyšší riziko poruchy a finanční náročnost servisu a údržby vozidla.

Někteří se uchylují k extrémní variantě, a to k odstranění těchto systémů, z důvodu finanční úspory nebo nedostatečné znalosti systému vedoucí k neschopnosti správné opravy. Takto neprofesionálně upravené vozy jsou pak skutečným ohrožením životního prostředí a zdraví osob.

Hlavním cílem této práce je detailní popis emisních systémů a navržení metody diagnostiky systémů dodatečné úpravy spalin. Dílčím cílem práce je stručné shrnutí legislativního hodnocení spalin.

Motivací pro napsání této práce byla potřeba diagnostiky závady projevující se zvýšenou kouřivostí na mém osobním vozidle.

1 EMISE VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

Spalovací motor při provozu spaluje vzduch s palivem. U vznětových motorů je jako palivo použita obvykle motorová nafta složená primárně z uhlovodíků a odpadem při práci motoru jsou výfukové plyny. Některé složky těchto plynů mají prokazatelně negativní vliv jak na okolní prostředí, tak na zdraví živých bytostí.

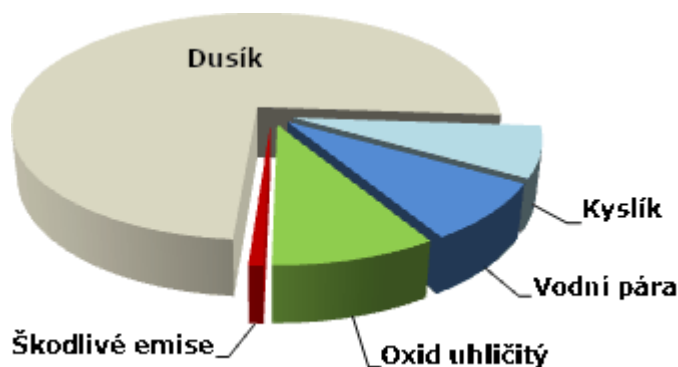
Podíl škodlivých látek ve výfukových plynech je závislý na kvalitě spalování. Při spalování je snaha o dosažení dokonalé oxidace a v ideálním případě by pak výfukové plyny tvořil pouze dusík v nezměněné podobě, stejný na vstupu i výstupu, oxid uhličitý a voda.

Jelikož přeplňované vznětové motory pracují se značně chudou směsí, tak ve výfukových plynech se vždy v podstatném množství vyskytuje kyslík. Z důvodu vysokých teplot a výskytu kyslíku tvoří dusík oxidy označované jako NO_x , a při nedokonalé oxidaci vzniká oxid uhelnatý neboli CO, vodík a nespálené uhlovodíky (CH). Při hoření kapiček paliva u vznětových motorů a zážehových motorů s přímým vstřikem se tvoří pevné částice (PM) [1].

Výfukové plyny mohou taktéž obsahovat, obvykle v nízké koncentraci, i jiné látky, které v některých případech bývají vysoce toxické. Jedná se například o kovy a různé látky uvolňující se při opotřebení motoru, substance prchající z katalyzátorů pro regulaci emisí z důvodu mechanického opotřebení nebo odpařováním pevných sloučenin při vysokých teplotách spalin. Katalyzátory mohou také umožnit tvorbu nových látek, zejména pokud se jedná o katalyzátory působící přímo ve spalovací komoře, tedy katalytická aditiva v palivu. Na příklad některé aditiva napomáhající regeneraci filtru pevných částic (DPF) byla spojena s emisí vysoce toxických dioxinů a furanů. Každé aditivum, ať už katalytického nebo jiného charakteru, přidávané do paliva, oleje nebo výfukových plynů může mít vliv na výsledné emise.

Dalším zdrojem škodlivin mohou být nežádoucí substance v palivu nízké kvality. S tímto problémem se setkává například lodní doprava, kde se ve velkých lodních motorech používá zbytkový olej obsahující těžké kovy a jiné nežádoucí, zdraví a životnímu prostředí škodlivé látky [2].

Pokud CO_2 , které je výsledným produktem dokonalé oxidace, nepovažujeme za jedovatý plyn, pak škodlivé látky tvoří pouze 0,3 % spalin, jak je znázorněno na obr. 1 [1].



Obr. 1 Obsah výfukových plynů [2]

1.1 OXID UHELNATÝ

Oxid uhelnatý je jedovatý bezbarvý plyn, lehčí než vzduch, bez chuti a zápachu. Přírodní koncentrace se pohybuje v setinách až desetínách mg/m^3 vzduchu. Krátkodobě, v místě s vysokou hustotou dopravy nebo v dopravních tunelech, může koncentrace CO ve vzduchu, vystoupat nad desítky mg/m^3 . V uzavřených prostorách při nesprávném provozu spalovacích zdrojů, jako je například plynový sporák, mohou být tyto hodnoty i několikanásobně vyšší [3].

1.1.1 VLIV, CO NA ZDRAVÍ

Po inhalaci se CO dostává do krve, kde se váže na hemoglobin a znemožňuje tak navázání kyslíku, jelikož schopnost slučování hemoglobinu s CO, je 200 až 250krát vyšší než s kyslíkem. Důsledkem je omezená okysličovací schopnost krve a tím pádem potíže způsobené jeho nedostatkem. Příznaky začínají od bolesti hlavy, přes zvracení a mdloby. V extrémních případech, hrozí smrt [3].

1.1.2 VZNIK, CO VE VZNĚTOVÉM MOTORU

Oxid uhelnatý vzniká nedokonalým spalováním neboli oxidací. Nejvyšší emise oxidu uhelnatého vznikají při nízkém zatížení vozidla, kdy se tvoří u stěn válce, zejména pokud motor není na své provozní teplotě [1]. Vznik CO během práce studeného motoru, je dále podpořen zvýšenou bohatostí směsi při startu a v prvních několika minutách práce.

1.2 NESPÁLENÉ UHLOVODÍKY – HC

Skupina uhlovodíků zahrnuje všechny látky složené pouze z uhlíku a vodíku. Největší pozornost je věnovaná polycyklickým aromatickým uhlovodíkům (PAHs) z důvodu jejich toxicity. Jedná se o uhlovodíky ve formě benzenových jader. Mezi nejvíce známé patří naftalen, fluoranten nebo benzo(a)pyren. Maximální povolená koncentrace látek skupiny PAHs ve vzduchu, které se často vážou na prach, je $0,2 \text{ mg}/\text{m}^3$. Emise uhlovodíků v plynném nebo tuhém stavu vznikají vždy, kdy proces spalování produkuje černý kouř a saze. Mezi zdroje PAHs patří, mimo spalování fosilních paliv, zejména rafinérie, požáry, výroba koksu, cementu nebo asfaltu [4].

1.2.1 VLIV HC NA ZDRAVÍ

Jak již bylo zmíněno, nejvíce škodlivé jsou polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs). Jejich nebezpečnost je zesílená schopností se vázat na pevné částice [1]. Je prokázáno, že tyto látky jsou karcinogenní. Na příklad benzo(a)pyren narušuje genetickou informaci buněk. PAHs vázané na pevné částice menší než desítky nanometrů se vdechováním dostávají do plicních sklípků a jsou nejčastější příčinou rakoviny plic [4].

1.2.2 VZNIK HC VE VZNĚTOVÉM MOTORU

Palivo spalovacího motoru, benzín i motorová nafta, je složeno primárně z uhlovodíků. Při práci motoru, není nikdy spáleno celé množství dodaného paliva [1]. Uhlovodíky ve výfukových plynech pochází přímo z paliva v nezměněné formě, jako produkt částečné oxidace nebo z motorového oleje. Emise PAHs jsou ovlivněny především kvalitou spalování

a používaným palivem [5]. Některé studie dokazují, že biosložka v motorové naftě může tyto emise znatelně snížit [6].

1.3 PEVNÉ ČÁSTICE

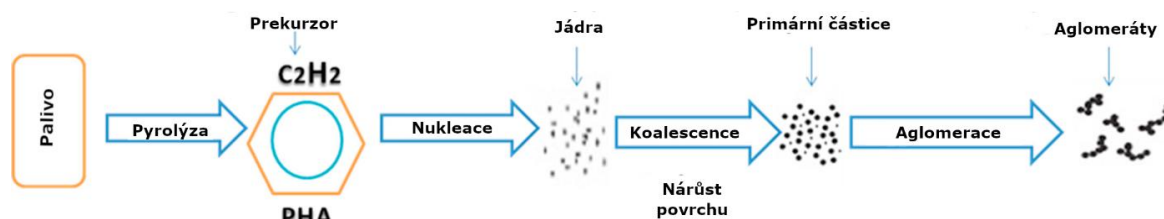
Pevné částice (PM) jsou velice komplexní látky složené z mnoha prvků. Na rozdíl od plynných emisních složek výfukových plynů, jejich přesný proces vzniku a složení stále nejsou plně popsány. PM jsou důvodem černého kouře spojovaného obvykle se vznětovými motory a patří, společně s oxidy dusíku, k nejvíce sledovaným a regulovaným emisím [7]. Dominantním prvkem je uhlík tvořící až tři čtvrtiny obsahu, dále pevné částice obsahují vodu, sulfáty, dusík a neidentifikovatelné složky. Jádrem pevné částice tvoří právě uhlík a popel, na něj se vážou další prvky jako PAHs, sulfátové směsi a jiné látky [1]. S normou EURO 7 se pojem pevné částice, v kontextu emisí dopravních prostředků, rozšiřuje taktéž na prachové emise vznikající z otěru brzd a pneumatik.

1.3.1 VLIV PM NA ZDRAVÍ A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Pevné částice jsou zdraví nebezpečné při vdechnutí a mohou být odpovědné za bronchitidu, astma a řadu dalších problémů dýchacích cest. Obecně jsou nejnebezpečnějšími částice menší než 10 nm, které se mohou usadit až hluboko ve plicích. Skrze plíce se mohou nejmenší částice dostat až do krve a jsou spojovány s arytmií srdce a nefatálními infarkty [8]. Odhadovaná maximální koncentrace ve vzduchu, která nezpůsobí rakovinotvorný efekt ani při dlouhodobé expozici, je 5 mg/m³ [1]. Jak již bylo zmíněno výše, na pevné částice se nabalují jiné látky, jako jsou například velmi nebezpečné PAHs, což značně zvyšuje zdravotní rizika při jejich vdechnutí. Částice s vyšším obsahem PAHs mají znatelně silnější karcinogenní a zánětlivý účinek [9]. PM mohou rovněž přispívat ke zvýšené aciditě vod, tvorbě kyselých dešťů, poškozovat zeminu a nepříznivě ovlivňovat různé ekosystémy. Jemné částice o průměru menším než 2,5 nm při vysoké koncentraci ve vzduchu mohou snížit viditelnost [8].

1.3.2 VZNIK PM VE VZNĚTOVÉM MOTORU

Saze, jež jsou hlavní složkou PM, se tvoří z neodpařených kapiček paliva při spalování s velice nízkým obsahem kyslíku s vysokou teplotou, tedy v lokálních extrémech, kde je směs příliš bohatá. Pro nízké emise PM je tedy klíčová co nejvyšší homogenita směsi. K sazím se přidávají organické složky pocházející z nedokonalého nebo vůbec nespáleného paliva a oleje [1]. Tvorbu pevných částic z kapalných uhlovodíků lze rozdělit do pěti fází, jmenovitě pyrolýza, nukleace, koalescence a aglomerace. Přičemž v každé z těchto fází může probíhat oxidace. [10]. Kompletní proces je zobrazen na *obr. 2*



Obr. 2 Proces tvorby pevných částic [10]

1.3.2.1 PYROLÝZA

Během pyrolýzy organické složky paliva procházejí molekulární změnou při vysoké teplotě při nedostatku kyslíku. Pyrolýza je prvním krokem ke tvorbě sazí, přičemž jejich množství je závislé na teplotě, množství dostupného kyslíku a volných radikálů O, O₂ a OH. Vliv má také typ plamene. Při kinetickém plameni vzniká obecně méně sazí než při difuzním. Důvodem je vyšší obsah kyslíku v plamenu kinetickém [10].

1.3.2.2 NUKLEACE

Nukleace je proces, při kterém se z reaktantů v plynné fázi vytvářejí částice. Radikálovou adicí vznikají z uhlovodíků menšího rozměru velké aromatické molekuly. Vzniklá jádra částic mají malý podíl na celkové hmotnosti sazí, ale mají velký vliv na finální hmotnost částic, jelikož poskytují aktivní místa pro růst povrchu [10].

1.3.2.3 NÁRŮST POVRCHU

V této fázi se na vytvořená jádra vážou jiné látky, přičemž celkový počet částic zůstává stejný [10]. Nárůst povrchu má největší vliv na celkovou hmotnost částic [11]. Rychlost růstu je ovlivněna velikostí částic. Malé částice se zvětšují rychleji než ty větší [12].

1.3.2.4 KOALESCENCE A AGLOMERACE

Koalescence a aglomerace jsou procesy ve kterých částice do sebe narážejí a spojují se ve větší celky, což má za následek zvětšení jejich velikosti a zmenšení celkového počtu [10].

1.3.2.5 OXIDACE

Saze mohou oxidovat v každé fázi tvorby za přítomnosti O, O₂ a OH radikálů [12]. Kyslík je nejprve adsorbován na povrch částice a následně dochází k desorpci produktu oxidace [10].

1.4 OXIDY DUSÍKU – NO_x

Pojem NO_x, v kontextu emisí spalovacích motorů, označuje dva plyny: oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂). Mimo to může dusík tvořit i jiné oxidy jako je třeba oxid dusný (N₂O). NO je bezbarvý plyn bez zápachu. NO₂ je hnědočervený plyn o nepříjemném zápachu, dráždivý dýchací cesty. NO₂ je více toxický a je mu tedy věnována větší pozornost [13]. Koncentrace NO_x v neupravených spalinách vznětového motoru dosahuje běžně rozmezí od 0,05 do 1 promile z celkové hmotnosti spalin. Starší atmosférické vznětové motory bez oxidačního katalyzátoru produkovaly emise v poměru NO₂ k NO_x blízké 5 %. Přepřehování a použití oxidačního katalyzátoru zvýší tento poměr až na hodnoty kolem 70 %.

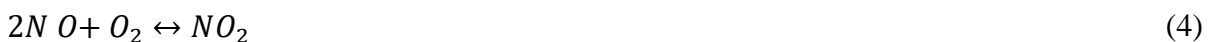
K další oxidaci NO na NO₂ dochází samovolně v atmosféře [14]. Typické úrovně NO_x v mezní vrstvě atmosféry se pohybují od 5×10⁻⁹ ‰ v odlehlých mořských a polární lokalitách, přes 1 až 2×10⁻⁵ ‰ v příměstském prostředí až po více než 2×10⁻⁴ ‰ u krajnic hlavních silnic [13].

1.4.1 VLIV NO_x NA ZDRAVÍ A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Oxidy dusíku, zejména vysoce reaktivní NO₂, reagují v atmosféře s jinými prvky, což může vést k vytvoření přízemního ozónu, jenž je hlavním komponentem smogu. Smog je často spojován s řadou zdravotních potíží, zejména dýchacích cest. Vysoké koncentrace NO_x způsobují rovněž kyselá deště. Oxidy dusíku jsou skleníkovými plyny, obzvláště problematický je N₂O. Jedna molekula oxidu dusného má 300krát větší dopad na skleníkový efekt než molekula oxidu uhličitého [15].

1.4.2 VZNIK NO_x VE VZNĚTOVÉM MOTORU

Oxid dusnatý vzniká v motoru oxidací dusíku za přítomnosti vysoké teploty v plameni ve spalovací komoře. Další oxidací vzniká oxid dusičitý. Množství vyprodukovaného NO_x je závislé primárně na teplotě, času spalování a množství kyslíku, v menší míře na výskytu volných radikálů. Hlavním zdrojem jak kyslíku, tak dusíku je vzduch, dalším významným zdrojem může být i palivo [16]. Emise NO_x jsou nejvyšší prvních několik minut chodu motoru, a to z důvodu nižší efektivity pohonné jednotky a velice nízké účinnosti systému úpravy spalin. Mendoza a kolektiv provedli emisní test nákladního vozidla emisní třídy EURO VI N3 za reálného městského provozu trvajících 154,8 km a 10712 s. Bylo zjištěno, že až 63,4 % NO_x bylo emitováno v prvních 300 s od nastartování vozidla [17].



2 HOMOLOGAČNÍ MĚŘENÍ EMISÍ

V rámci ochrany životního prostředí a lidského zdraví, byly zavedeny limity pro emise výfukových plynů. Každé vozidlo musí před vstupem na trh projít homologačním měřením emisí a splnit aktuální limity pro danou kategorii vozidla. První evropská emisní norma pro osobní vozidla, EURO 1, vstoupila v platnost v roce 1991 [18]. Kromě emisí výfukových plynů jsou rovněž kontrolovány emise způsobené odpařováním provozních kapalin a norma EURO 7, vstupující v platnost v roce 2025, rozšiřuje emisní kontrolu i na prachové částice vznikající z otěru brzd a pneumatik [19].

2.1 EMISNÍ LIMITY OSOBNÍCH VOZIDEL S VZNĚTOVÝM MOTOREM

U vozidel se vznětovými motory mezi měřené složky výfukových plynů patří: CO, NO_x a PM. V roce 2000, s příchodem normy EURO 3, byly stanoveny samostatné limity pro NO_x, jehož množství bylo doposud měřeno společně s CH. Norma EURO 5b vcházející v platnost v roce 2011 přinesla další způsob vyhodnocení množství pevných částic, a to měření nejen jejich hmotnosti ale i počtu a až doposud tento limit nebyl zpřísněn [20]. Použití filtrů pevných částic, umožňujících plnění této normy, spolu s moderním managementem spalování, je považováno za řešení problému pevných částic ve výfukových plynech, a dále je kladen důraz na snižování emisí NO_x [21]. EURO 7 sjednocuje limity pro všechny automobily nezávisle na druhu jejich pohonu, přičemž limity jsou převzaté z normy EURO 6 a to vždy ty nejnižší pro danou složku výfukových plynů [22]. Nejvíce znatelné bude tedy 50% snížení limitu CO pro automobily se zážehovým motorem a o 25 % nižší limit NO_x pro vznětové motory [20]. Samotné limity, uvedené v *tab. 1*, však nejsou dostatečně vypovídajícím parametrem při porovnávání jednotlivých norem, jelikož způsoby měření a testovací cykly byly mnohokrát měněny a aktualizovány [20].

Tab. 1 Emisní limity EURO 1 až EURO 7 pro osobní automobily s vznětovým motorem [20], [22]

Norma	Platnost	CO	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
		g/km				
EURO 1	1992.07	2.72	0.97	-	0.14	-
EURO 2, IDI	1996.01	1.0	0.7	-	0.08	-
EURO 2, DI	1996.01	1.0	0.9	-	0.10	-
EURO 3	2000.01	0.64	0.56	0.50	0.05	-
EURO 4	2005.01	0.50	0.30	0.25	0.025	-
EURO 5a	2009.09	0.50	0.23	0.18	0.005	-
EURO 5b	2011.09	0.50	0.23	0.18	0.005	6.0×10 ¹¹
EURO 6	2014.09	0.50	0.17	0.08	0.005	6.0×10 ¹¹
EURO 7	2025.07	0.50	0.16	0.06	0.005	6.0×10 ¹¹

2.2.2 NEDC

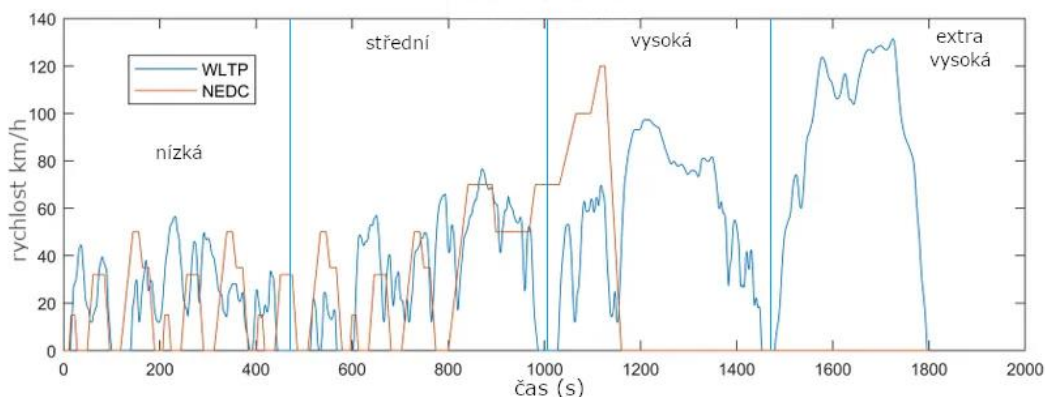
New European Driving Cycle, který vstoupil v platnost v roce 2000 spolu s normou EURO 3, je téměř shodný s předchozím cyklem, který nahrazuje s jedním zásadním rozdílem. V cyklu NEDC měření emisí začíná v okamžiku startu vozidla. Zakazuje tedy dříve povolenou 40s fázi volnoběhu [24]. Tímto se do testu zařadily emise vznikající v době, kdy katalyzátor má znatelně sníženou účinnost.

2.2.3 WLTP

Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure mezi roky 2017 a 2019 postupně nahradil v Evropské Unii v té době používaný cyklus NEDC a ke dnešnímu dni je WLTP používán rovněž ve Švýcarsku, Lichtenštejnu, Islandu, Turecku, Izraeli, Japonsku, Indii a Číně [25]. Zkratka WLTP bývá občas chybně zaměňována se zkratkou WLTC, tedy World Harmonized Light vehicles Test Cycles. WLTP v sobě zahrnuje cyklus WLTC i další procedury nutné k homologaci vozidla. WLTP je oproti NEDC značně náročnější test, který by měl více odpovídat reálnému provozu vozidel [26]. Je rozdělen do 4 částí: nízké, střední, vysoké a extra vysoké rychlosti. Základní rozdíly mezi těmito cykly, jsou zobrazeny v *tab. 2* a na *obr. 5*.

Tab. 2: Porovnání cyklů NEDC a WLTC [24], [25], [26]

Veličina	NEDC	WLTC	jednotky
Celkový čas	1180	1800	s
Čas stání	267	242	s
Průměrná rychlost včetně stání	33,4	46,5	km/h
Průměrná rychlost bez stání	43,1	53,8	km/h
Maximální rychlost	120	131,3	km/h
Mrůměrné zrychlení	0,5	0,39	m/s ²
Maximální zrychlení	1,04	1,58	m/s ²



Obr. 5 rychlostní profil NEDC a WLTC [27]

2.2.4 RDE

Real Driving Emissions je první emisní test mimo laboratoř zaměřující se zejména na emise NO_x . Jedná se o jízdu za normálních podmínek v reálném provozu s mobilním měřicím přístrojem neboli PEMS. Tato metoda se osvědčila jako velice efektivní nástroj pro motivaci výrobců k zavedení účinnějších metod redukce emisí NO_x vznětových motorů a sehrála podstatnou roli v plošném zavedení filtrů pevných částic u zážehových jednotek. RDE bylo poprvé vyžadováno v normě EURO 6d-TEMP a jeho limity jsou dány jako součin emisního limitu ustanoveného pro měření na válcové zkušební a koeficientu shody, který dosahoval hodnot od 2,1 pro NO_x a 1,5 pro PN v normě EURO 6d-TEMP [28] až po 1,1 pro NO_x a 1,34 pro PN v normě EURO 6e, která je v platnosti od dubna 2023 [29].

3 EMISNÍ KONTROLA V ČESKÉ REPUBLICE

Pro zajištění správné funkce vozidla a jeho emisních systémů i po letech jejich provozu, byla v ČR zavedena povinná technická kontrola a měření emisí. První povinná kontrola osobního automobilu je 4 roky po první registraci vozidla. Poté se periodicky opakuje každé 2 roky. Emisní kontrola automobilu poháněného vznětovým motorem se systémy řízenými protokolem OBD je rozdělena do 4 částí [30].

- Vizualní kontrola komponent ovlivňujících tvorbu spalin jejich kompletnost, těsnost a ověření, zda pohonná jednotka vozidla nebyla nepřipustně modifikována nebo nepřiměřeně opravena. Pozornost je obzvláště věnována výfukovému potrubí a systémům dodatečné úpravy spalin. Kontrolováno je rovněž sání, palivová soustava, odvětrání klikové skříně a elektroinstalace [30].
- Vizualní kontrola kontrolky motoru MIL, zda svítí, či zhasne, eventuálně jestli neproblikne [30].
- Měření kouřivosti se provádí na automobilu zahřátém na provozní teplotu po kontrole regulace volnoběhu. Měřená je pouze kouřivost pomocí opacimetru, tedy množství saze ve výfukových plynech. Před samotným měřením je třeba ověřit referenční otáčky, tedy funkci omezovače a je doporučený proplach výfukového systému. Propláchnutí se provádí třemi akceleracemi motoru při plném sešlápnutí akceleračního pedálu. Doporučuje se dosáhnout alespoň 2/3 otáček, ve kterých má hnací agregát maximální výkon nebo do omezovače. Samotné měření se provádí rychlým sešlápnutím akceleračního pedálu, bez kick-downu, až do tolerančního pásma referenčních otáček. Za výslednou hodnotu se považuje nejvyšší změřená hodnota kouřivosti v průběhu akcelerace motoru. Měření lze opakovat [30].
- V rámci kontroly řídicího programu motoru při použití diagnostického přístroje se kontroluje zejména, jak dlouho svítí MIL, status filtru pevných částic a systému SCR, readiness kódy a paměť závad, kde se vyhodnocuje pouze emisně relativní závady. Při této kontrole se postupuje primárně dle doporučení výrobce [30].

Pro úspěšné splnění zkoušky je teda nutné, aby vozidlo nehlásilo žádnou emisně podstatnou chybu a emisní systémy fungovaly. Zjednodušeně řečeno, nesmí svítit kontrolka motoru, DPF nebo SCR. Emisní systémy nesmí být z vozidla odstraněny a auto nesmí mít vysokou kouřivost. Četnost firem, nabízejících odstranění těchto systémů sama o sobě naznačuje, že je možné uspět u emisní zkoušky i bez některých emisních systémů. Tuto skutečnost potvrzuje i asociace emisních techniků a opravářů. Pro příklad, uveďme deaktivaci recirkulace plynu, které se tato práce věnuje v podkapitole 4.3, tento ilegální zákrok podstatně zvýší emise NO_x , ty ale nejsou při emisní zkoušce měřeny a tato úprava tedy neovlivní výsledek emisní zkoušky, pokud není provedená viditelným způsobem. Ta samá organizace upozorňuje, že stanice kontroly emisí nedisponují přístroji, které by byly schopné odhalit částečně poškozený filtr pevných částic [31].

4 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ NO_x

Jak již bylo zmíněno v první kapitole, vznik oxidů dusíků je závislý především na teplotě, době spalování a množství kyslíku ve spalované směsi. Kyslíku je ve vznětovém motoru vždy dostatečně, jelikož pracuje s velmi chudou směsí a použití bohaté směsi by nebylo přínosné z mnoha důvodů [19]. Proto většina opatření pro snížení tvorby NO_x ve vznětové agregátu funguje na principu snížení teploty a doby hoření. Tyto metody se často kombinují se selektivní katalytickou redukcí neboli systémem SCR.

4.1 ČASOVÁNÍ VSTŘIKU A ROZDĚLENÍ DÁVKY PALIVA NA VÍCE VSTŘIKŮ

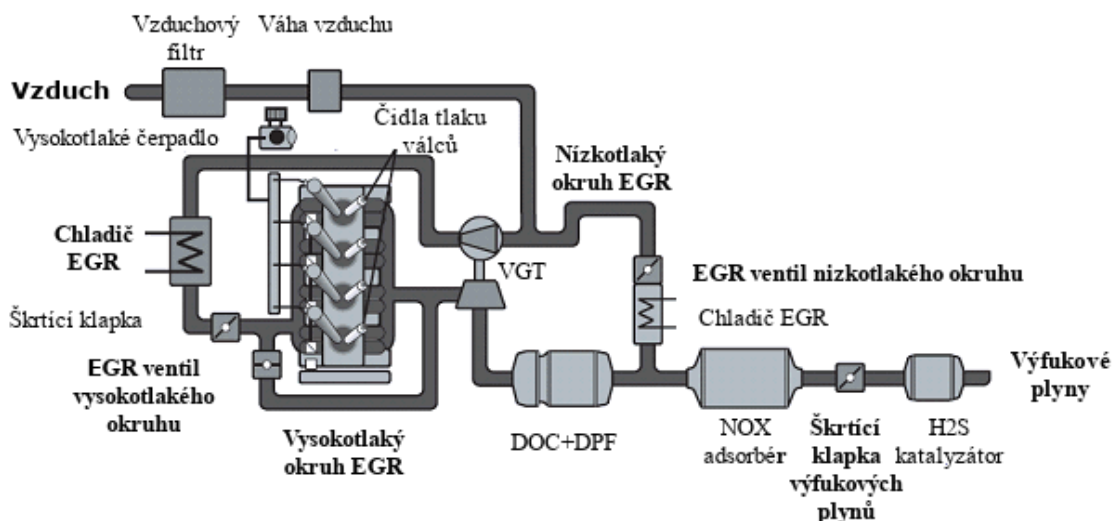
Čas vstřiku hraje zcela zásadní roli při produkci NO_x, jelikož ovlivňuje jak maximální teplotu, tak i dobu spalování. Opoždění vstřiku razantně snižuje koncentraci NO_x ve výfukových plynech [32]. V některých případech změna časování v rozsahu 10 ° otáčky klikového hřídele, může snížit tvorbu NO_x na méně než polovinu původní hodnoty, ale je to vykoupeno sníženou efektivitou práce a větší kouřivostí [33]. K optimalizaci časování se využívá rozdělení palivové dávky do více vstřiků, kterou umožňuje palivový systém common rail. Dobře zvolenou strategií rozdělení vstřikovaného paliva v čase lze snížit emise NO_x i sazí bez velké penalizace účinnosti a s lepší kulturou chodu motoru [34].

4.2 SNIŽENÍ KOMPRESNÍHO POMĚRU

Další možností, jak snížit teplotu spalování a s tím spojené emise NO_x je snížení kompresního poměru motoru. Tato strategie funguje, ale spolu s benefity v podobě snížených emisí NO_x a vyšší kultivovaností práce přináší sníženou účinnost a vyšší emise všech zbylých škodlivých látek přítomných ve výfukových plynech [35]. Mimo to je zřejmý trend snižujících se kompresních poměrů u vznětových motorů. Za reprezentativní příklad použijme čtyřválcové 16 ventilové motory objemu 1,9 až 2,2 l používané ve vozidlech Fiat, Alfa Romeo a Lancia pod označením JTDm. Motory plnící normu EURO 3 a EURO 4 pracovaly s kompresním poměrem 17,5:1, s příchodem normy Euro 5 se kompresní poměr snížil na 16,5:1 a motor navrhnutý pro EURO 6 má ještě větší škodný objem s finálním kompresním poměrem 15,5:1 [36]. Podobný trend lze sledovat i u konkurenčních značek [37].

4.3 RECIRKULACE SPALIN

Systém recirkulace spalin (EGR) byl zaveden pro snížení teploty hoření směsi. Kromě čerstvého vzduchu jsou v době komprese ve spalovací komoře přítomny výfukového plyny z předchozích cyklů s nižší koncentrací kyslíku. Objem pracovního plynu zůstává stejný, ale nižší koncentrace kyslíku má za následek redukcí teploty spalování [19]. Moderní systémy EGR jsou schopny extrémně snížit emise NO_x. Za určitých podmínek se jedná o redukcí až o 80 %. Takto výrazné snížení tvorby oxidů dusíku je vykoupeno značným nárůstem tvorby pevných částic a částečným zvýšením spotřeby paliva. Toto agresivní využití systému EGR si mohou výrobci dovolit díky vysoké efektivitě filtru pevných částic [38]. Přítomnost spalin ve spalovací komoře před pracovním cyklem lze zajistit buďto překrytím doby otevření sacího a výfukového ventilu v době výměny náplně, tedy vnitřně, nebo vnějším způsobem při pomoci EGR ventilu umístěného ve výfukové soustavě. Vnitřní recirkulace není na běžných vznětových motorech používána, mimo jiné z důvodu absence systému variabilního časování ventilů a nedostačující míry recirkulace [19]. Proto se jí tato práce nebude zabývat. Vnější systém EGR lze rozdělit na dva typy, vysokotlaký a nízkotlaký (*obr. 6*) [39].



Obr. 6 Kombinovaný systém EGR [39]

4.3.1 VYSOKOTLAKÝ OKRUH EGR

Vysokotlaký okruh recirkulace odebírá část výfukových plynů před turbínou turbodmychadla a spaliny vpouští do sání za turbínou a mezichladičem stlačeného vzduchu. Recirkulované plyny procházejí kapalinou chlazeným chladičem [39]. Pokud jsou na motoru použity oba typy recirkulace, pak tato kratší větev nemusí být chlazená, jelikož je v provozu ve fázi studeného motoru, kdy nechlazené spaliny napomáhají rychlejšímu zahřátí motoru [38], a při nízkém zatížení. Pro vytvoření dostatečného tlakového rozdílu systém využívá regulaci variabilní geometrie turbodmychadla a škrťící klapky [39]. Pro splnění moderních emisních norem, má vysokotlaký okruh nedostatečný průtok, proto se jako adice k vysokotlakému okruhu začal používat nízkotlaký okruh [38], [39].

4.3.2 NÍZKOTLAKÝ OKRUH EGR

Nízkotlaký okruh začíná za filtrem pevných částic, což snižuje riziko zanášení sání sazemi, následuje chladič a spaliny ústí do sání před turbodmychadlo. Pro dosažení požadované míry recirkulace systém využívá škrcení spalin realizované klapkou, nacházející se ve výfukovém potrubí za místem připojení okruhu EGR, pro získání správného tlakového spádu a EGR ventilu pro přesné dávkování [39]. Pro zajištění čistoty spalin procházejících kompresorem turbodmychadla a dalšími částmi motoru je v nízkotlakém EGR systému použit filtr zachycující zbylé částice, které prošly DPF [40]. Tento okruh je v provozu zejména při střední a vyšší zátěži [39].

4.3.3 VENTIL EGR

Ventil systému EGR je zcela zásadní komponentou u obou okruhů. Může být ovládaný pneumaticky podtlakem, nebo elektronicky. Míru jeho otevření, obvykle sledovanou čidlem, a tím i míru recirkulace, reguluje řídicí jednotka motoru, přičemž se spoléhá primárně na informace ze širokopásmové lambda sondy [19]. Ventil je uzavřen při startech a vysoké zátěži, aby byl zajištěn dostatek kyslíku a byla omezena kouřivost motoru. Otevírá se především při volnoběhu a nízké zátěži [41].

4.4 SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE

Princip selektivní katalytické redukce (SCR) spočívá v přeměně oxidů dusíku na dusík v speciálně k tomu určeném katalyzátoru za přítomnosti přídavné látky. V 90 letech byla snaha vyvinout systém fungující na redukcí NO_x při použití uhlovodíků. Výhodou oproti dnes již rozšířené redukcí amoniakem (NH₃) bylo, že nebylo třeba přidávat do systému žádnou novou provozní kapalinu, jelikož bylo možné využít palivo. Přesto se nepodařilo vyvinout systém na tolik funkční, aby se rozšířil v komerční sféře [42]. Naopak SCR používající k redukcí amoniak, díky ostrým limitům NO_x našlo využití nejdříve v nákladních vozidlech. První modely vybavené touto technologií se objevily na trhu již v roce 2005. Dalším milníkem byl příchod normy EURO 6 a měření emisí v režimu RDE, kdy výrobci osobních automobilů začali tuto metodu nivelace škodlivých plynů masivně využívat [43], [42]. V mobilních aplikacích se nepoužívá čpavek jako plyn, ale roztok syntetické močoviny v Evropě označovaný jako AdBlue, který se termolýzou v horkých výfukových plynech rozloží na amoniak a vodu [19]. Velkou výhodou SCR je, že jeho použití nezvyšuje produkci PM, HC a ani přímo nezvyšuje spotřebu paliva, což nelze říci ani o jedné z výše uvedených metod snížení emisí NO_x. Naopak snižuje počet pevných částic aglomerací. Zvětšuje koncový rozměr částic a tím redukuje zdravotní rizika, které PM představují [44]. U nákladních vozidel s emisní normou EURO IV a EURO V byl často SCR systém používán jako jediný prvek omezující emisi NO_x a motor byl naladěný na vysokou efektivitu a nízkou emisi PM [45].

4.4.1 PRINCIP FUNKCE SCR

Cílem přidání amoniaku do katalyzátoru je realizovat následující reakce [43]:



Na zvláštní pozornost zasluhuje rovnice reakce (9), která probíhá velice rychle a umožňuje efektivní funkci systému SCR i při nižší teplotách. Poměr NO₂ k NO je za normálních podmínek příliš nízký, proto je snaha o zvýšení tohoto poměru při nízkých teplotách katalyzátoru, ale pokud koncentrace NO₂ dosáhne vyšší koncentrace, než NO pak může dojít ke tvorbě N₂O. Z důvodu hojného množství kyslíku v systému, jsou možné i tyto nežádoucí reakce [43]:



Nejméně problematická je reakce zobrazená v rovnici (11) kde dochází pouze k mrhání redukčního činidla. Na druhé straně spektra škodlivosti je reakce dle rovnice (12), kde vzniká

NO, sloučenina, kterou se snažíme z výfukových plynů odstranit. Ještě závažnější problém představuje tvorba látky NH₄NO₃, která vzniká při vstřiku močoviny při nízkých teplotách, přibližně pod 100 až 200 °C. NH₄NO₃ se usazuje v kapalně nebo pevně fázi v pórech katalyzátoru, což vede k jeho dočasné deaktivaci. Tomuto procesu popsanému rovnicí (13) je možné zabránit zamezením vstřiku redukčního činidla při nižších teplotách katalyzátoru. Podobný jev mohou způsobit i oxidy síry v kombinaci s amoniakem. Jsou schopné deaktivovat systém přeměny NO_x při teplotách nižších než 250 °C [43].



Stechiometrický poměr NO_x k NH₃ je roven jedné. Tento poměr může být upraven v závislosti na požadovaných výsledcích. Je třeba podotknout, že SCR katalyzátor má schopnost akumulace NH₃. Tento jev je významný především pro nižší teploty katalyzátoru kdy se naakumulovaný reduktant podílí na výše zmíněných reakcích [43].

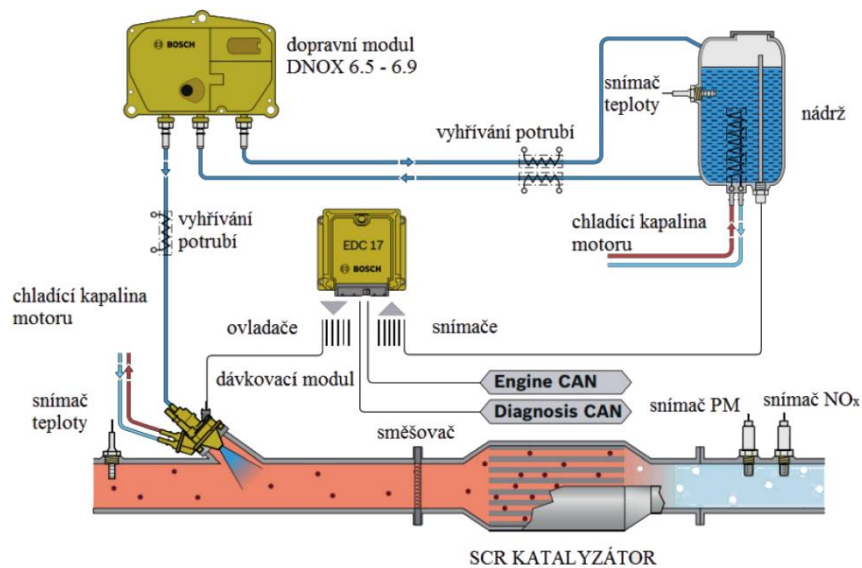
4.4.2 KONSTRUKCE SYSTÉMU SCR

Základem SCR je katalyzátor, který zajistí vhodné podmínky pro žádané reakce. Nejčastěji používané jsou keramické katalyzátory voštinové struktury [46] s funkční látkou na bázi vanadia. V teplotách v rozsahu 300 až 400 °C jejich účinnost může přesahovat 90 %. V porovnání s katalyzátory s molekulárním sítem na bázi železa a mědi mají nižší výrobní náklady a vyšší odolnost na látky obsahující síru, ale jsou méně stabilní ve vysokých teplotách a jsou náchylnější na hydro-termické stárnutí, které má na svědomí sníženou efektivitu katalyzátoru, zvláště při vysokých teplotách. Molekulární katalyzátory mají větší rozsah pracovních teplot a vysokou účinnost při velkém průtoku [47]. SCR katalyzátor může mít vlastní obal a keramickou vložku, nebo může být spojen s filtrem DPF [46].

Množství vstřikované kapaliny určuje řídicí modul SCR spolupracující s řídicí jednotkou motoru (ECU) na základě informací o teplotě a složení plynů získaných z čidel ve výfukovém potrubí a kvalitě redukční kapaliny, která se může znatelně zhoršit stárnutím nebo nesprávným skladováním [46]. Základní informací pro řídicí systém je především teplota katalyzátoru, aby mohla vyhodnotit, zda je žádoucí vstřikovat močovinu, a senzor NO_x pro určení vhodného množství redukčního prvku. V ideálním případě, jsou NO_x senzory před i za SCR katalyzátorem. Dle prvního senzoru se určuje množství vstřikované kapaliny a druhým se kontroluje účinnost procesu a na základě zpětné vazby může řídicí modul upravit dávku dle reálných hodnot. V rámci snížení nákladů se setkáváme s nahrazením reálného senzoru virtuálním. Virtuální čidla mohou být přínosná i pro přechodné podmínky kdy měřicí hardware není plně funkční [48]. Výpočtový model lze použít jako náhradu prvního nebo druhého senzoru. Nahrazení obou fyzických senzorů virtuálními by mohlo způsobit neadekvátní chování systému, zejména při poruše nebo opotřebení některé z komponent. ECU má rovněž povinnost zabránit provozu vozidla, pokud by byla nádrž s močovinou prázdná, aby uživatelé nejezdili bez funkčního systému SCR [45]. Obvyklým řešením je zabránění startu motoru v případě, že nebylo vyhověno předchozím výzvám o doplnění [19].

Z důvodu tuhnutí močoviny při teplotě -11° C je nutné, aby všechny komponenty přicházející s ní do styku odolávaly tlaku způsobenému jejím zmrznutím. Pro správnou funkci systému je nutné, aby močovina byla v kapalně podobě a vypařila se kontrolovaným způsobem až ve výfukovém potrubí. Proto nádrž s kapalinou a vedení k trysce musí mít výhřevný systém, a naopak samotná tryska, která má přímý kontakt s horkými plyny musí být chlazená,

aby se redukční kapalina neodpařila předčasně [46]. Kompletní systém SCR je vyobrazen na obr. 7.



Obr. 7 Systém SCR [1]

4.5 ADSORBÉRY NO_x

Adsorbéry NO_x byly vyvinuty pro omezení emisí oxidů dusíku při práci s chudou směsí. Jedná se o katalyzátory na bázi barya [49] zachycující NO_x, aby ho následně vypustily při regeneraci za vysoké teploty nebo/a při obohacení směsi. Tyto adsorbéry mohou být buďto pasivní nebo aktivní [50].

4.5.1 AKTIVNÍ ADSORBÉRY NO_x

Aktivní adsorbér se periodicky regeneruje obohacením směsi realizovaným dodatečným vstříkem paliva v pozdní fázi pracovního cyklu motoru a uvolněné NO_x je přeměňuje na dusík podobným systémem jako v oxidačně-redukčním katalyzátoru zážehového motoru. Tento systém byl na vznětových motorech bez SCR ve větší míře využíván pouze do doby, kdy byly automobily testovány pouze v laboratoři, v cyklech, kde motor pracoval pouze s nízkým až středním zatížením. Efektivita tohoto systému při vyšší zátěži, objevující se v RDE testu, rychle klesá, jelikož se adsorbér zregeneruje [50]. Pouze hrstka vznětových automobilů, splňujících normu EURO 6d, používá adsorbér NO_x jako samostatnou úpravu výfukových plynů v kontextu emisí NO_x. Jedná se zejména o vozidla s příznivým poměrem hmotnosti k výkonu motoru o objemu do 2 l. Tento systém rovněž nepříznivě ovlivňuje spotřebu paliva a ve dnešní době se používá převážně pro snížení emisí po studeném startu často v kooperaci se SCR katalyzátorem [49].

4.5.2 PASIVNÍ ADSORBÉRY NO_x

Pasivní adsorbér funguje na jednodušším principu. K regeneraci nevyužívá obohacení směsi, ale pouze vysokou teplotu. Sám v sobě není schopen snížit emise NO_x, ale je schopen

je zachytit do doby, než se dostane SCR katalyzátor na svou provozní teplotu a následně je vypustit. Využívá se tedy pouze pro podmínky studeného startu vždy jako podpora SCR systému [50].

5 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ PEVNÝCH ČÁSTIC

Většina metod pro snížení emisí NO_x popsaných v minulé kapitole přímo ovlivňovala i tvorbu pevných částic. Bohužel v negativním slova smyslu. Výjimkou je rozdělení palivové dávky do dílčích vstříků, kde je možné docílit snížení obou škodlivin a systém SCR, který nijak neovlivňuje vznik PM, ale přispívá ke snížení jejich počtu aglomerací jednotlivých částic uniklých z DPF. Z důvodu kompromisního charakteru mezi produkcí NO_x a PM, nelze příliš upravovat charakteristiku spalování s cílem snížit emisi PM. Mělo by to nepříznivý efekt na koncentraci NO_x . Momentální strategie eliminace PM z ovzduší značně spoléhá na dodatečnou úpravu spalin a přípravu směsi [19].

5.1 VYSOKÝ VSTŘIKOVACÍ TLAK PALIVA

Vstřikování paliva pod vysokým tlakem až 250 MPa přes vstřikovací trysku s mikro otvory umožňuje atomizaci paliva na velice vysoké úrovni. Se zvyšujícím se tlakem paliva se kapičky paliva zmenšují a prodlužuje se doba penetrace aerosolu, což vede k téměř dokonalému spalování a rapidnímu snížení tvorby pevných částic [10]. Velikost vstřikovacího tlaku má vliv na velikost pevných částic [19] a při tlaku vyšším než 250 MPa jsou emitovány tak malé částice, že v současné době je problém je zachytit. Proto vyšší tlaky nejsou používány [51].

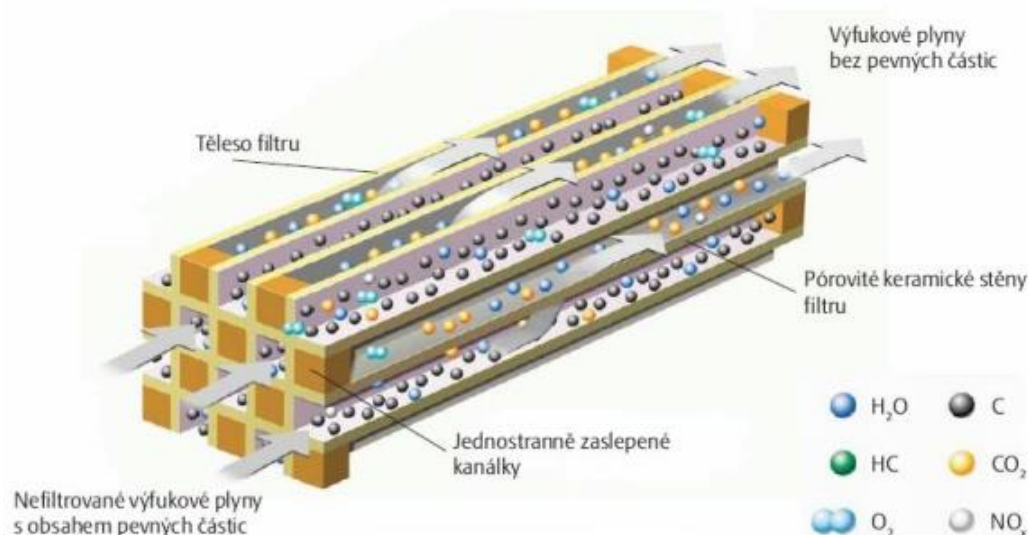
5.2 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

Filtr pevných částic, označovaný při použití ve vznětových motorech jako DPF nebo FAP, je velice účinným nástrojem pro snížení emisí PM. Jeho filtrační schopnost saze je téměř ideální s efektivitou překračující 90 %. DPF rovněž disponuje schopností přibližně 70% redukce PAHs [10], [44]. Filtr sám v sobě představuje odpor a tlakovou ztrátu ve výfukovém potrubí, která se stupněm zanesení roste, proto je nutné filtr regenerovat a obnovovat, a tím obnovovat jeho kapacitu. Provedení efektivní regenerace představuje největší výzvu při návrhu tohoto systému [52]. Zásadní nevýhodou filtru DPF je zvýšená spotřeba paliva spojená se zvýšeným odporem ve výfukovém systému a procesem regenerace [19]. Tento problém je možné částečně vyřešit umístěním katalyzátoru a DPF před turbodmychadlo [53]. Bohužel, tato konfigurace značně zpomaluje reakci turbodmychadla [54] a dá se předpokládat, že při prasknutí keramické vložky takto umístěného DPF, může dojít k destrukci turbíny turbodmychadla. Proto toto řešení není komerčně používáno. Dalším problémem je drastický nárůst emisí PN a NO_x během aktivní regenerace [55].

5.2.1 KONSTRUKCE SYSTÉMU DPF

Nejčastěji používané médium pro filtraci je porézní keramika s kanálky voštinové struktury typu wall-flow (s průtokem stěnou), jehož schéma představuje *obr. 8*. Všechny kanálky jsou zaslepeny na jednom konci a výfukové plyny jsou nuceny při průchodu filtrem proudit pórovitou stěnou. Struktura pórů keramiky je přizpůsobená velikosti částic tak, aby je pojmul. Nejběžnější filtry částic se vyrábí z karbidu křemíku, titaničitanu hlinitého, nebo kordieritu [46]. Pro správnou regeneraci je přínosné umístit DPF co nejbližší motoru hned za oxidačním katalyzátorem. Je to jeden z důvodů proč výrobci často používají jeden obal pro všechny systémy dodatečné úpravy spalin [19]. Ke sledování stavu filtru se používá čidla

diferenčního tlaku měřící aktuální tlakovou ztrátu mezi vstupem a výstupem filtru, teplotní čidlo a výpočtový model, se kterým pracuje řídicí jednotka využívající jak informace ze senzorů přímo na DPF, tak i z dat charakterizujících práci motoru, například vypočtený hmotnostní tok sazí [46].



Obr. 8 Filtr pevných částic typu wall-flow [56]

5.2.2 REGENERACE DPF

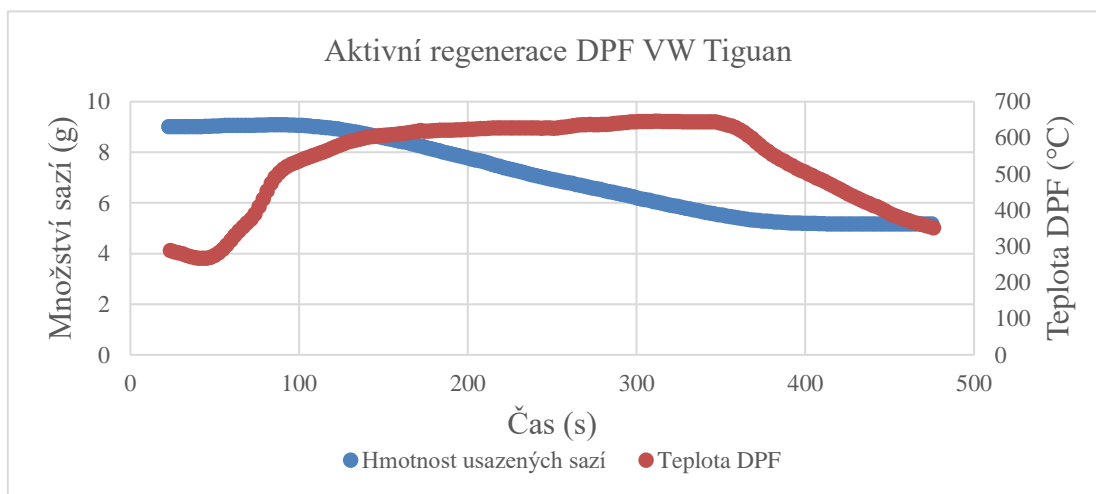
Regeneraci DPF, tedy spálení zachycené saze, lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní regenerace probíhá při normálním běhu motoru bez záměrného zvýšení teploty. Některé systémy spoléhají pouze na pasivní regeneraci zajišťující oxidaci saze NO_2 , jenž probíhá za mnohem nižších teplot než oxidace kyslíkem. Toto řešení vyžaduje použití katalyzátoru pro přeměnu NO na NO_2 a v osobních vozidlech toto řešení není moc populární. Široce rozšířené jsou systémy s aktivní regenerací, které spalováním paliva zvyšují teplotu filtru nad $550\text{ }^\circ\text{C}$, kdy ke oxidaci sazí vystačí kyslík. Nabízí se i řešení ohřevu využívající elektrickou energii, ale ani tento atraktivní přístup zatím není v masové výrobě zastoupen [52].

Aktivní regenerace funguje na principu oxidace sazí kyslíkem. Použití paliva pro zvýšení teploty může být realizováno dodatečným pozdním vstřikem paliva do spalovací komory v době, kdy jsou již výfukové ventily otevřené nebo vstřikovačem umístěným před oxidačním katalyzátorem přímo ve výfukové soustavě [19]. Ke zvýšení teploty mohou být použity i další pomocné kroky jako uzavření EGR, použití žhavení, škrcení vzduchu, použití vyššího tlaku přeplňování, zapnutí výhřevu skel pro zvýšené zatížení alternátoru nebo i bypass mezichladiče stlačeného vzduchu [57].

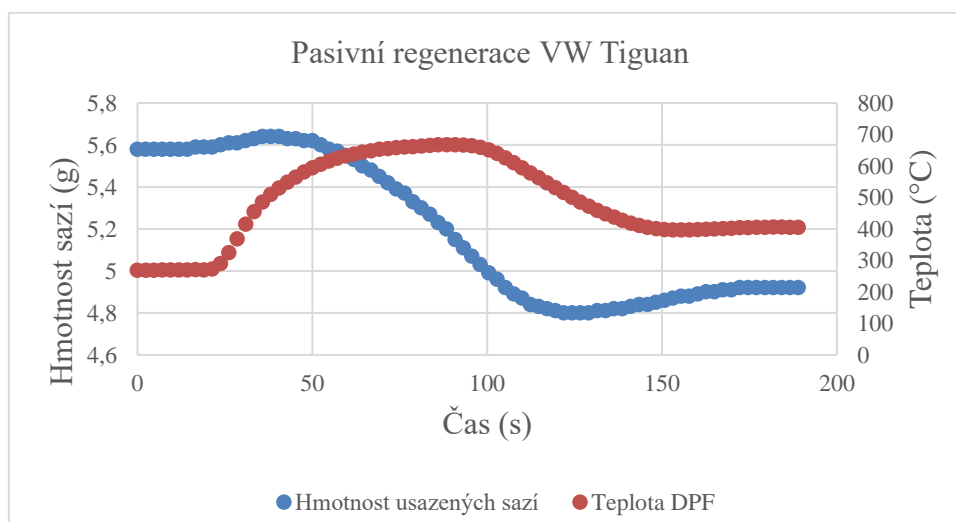
Dosažení teploty kolem $600\text{ }^\circ\text{C}$ způsobuje při běžném provozu značné zvýšení spotřeby paliva a přináší vysoké nároky na odolnost na periodicky se opakující termické zatížení [52]. Bývalý koncern PSA, jehož částmi byly automobilky Citroen a Peugeot se rozhodl pro použití katalyzátoru v podobě aditiva přidávaného do nafty, které snižuje teplotu oxidace saze až na $450\text{ }^\circ\text{C}$ [58]. Tento systém je znám pod zkratkou FAP a použité aditivum dostalo

komerční název Eolys. Mezi nevýhody tohoto řešení patří nutnost doplňování aditiva, zvýšená komplexita systému a popel vznikající z aditiva.

Pasivní regenerace je možná i u aktivních systémů, ale dostatečné teploty spalin je ve většině vznětových motorů dosaženo pouze při velmi vysokých zatíženích [46]. Tento fakt byl ověřen měřením sériovou diagnostikou VCDS na automobilu Volkswagen Tiguan 2.0 tdi 140kW vyrobeném v roce 2017. Pro porovnání byla zaznamenána nejdříve aktivní regenerace za běžného provozu a následně bylo provedeno měření stejných parametrů pod plným zatížením, tedy při jízdě se sešlápnutým akceleračním pedálem v poloze “kick down“ po dobu přibližně 70 s. Hmotnost usazených sazí, se dle řídicí jednotky motoru, v obou měřeních začala snižovat po dosažení teploty filtru mezi 550 a 600 °C, což potvrzuje informace dostupné v literatuře [46], [52]. Výsledky jsou graficky znázorněny na *obr. 9* a *obr. 10*.



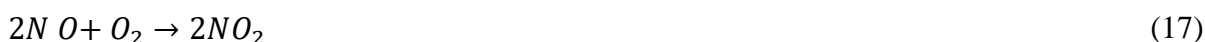
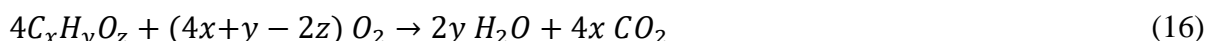
Obr. 9 Graf hmotnosti sazí a teploty DPF v závislosti na čase při aktivní regeneraci



Obr. 10 Graf hmotnosti sazí a teploty DPF v závislosti na čase při pasivní regeneraci

6 SNIŽOVÁNÍ EMISÍ HC A CO

Vznětový motor pracuje s přebytkem vzduchu, takže z logiky věci má emise nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého, v porovnání se zážehovým motorem, velice nízké. Vysoký obsah kyslíku ve výfukových plynech nám navíc umožňuje použití oxidačního katalyzátoru (DOC), který velmi účinně přetvoří tyto jedovaté látky na CO_2 popřípadě vodu a při současných limitech není nutno žádného dalšího opatření [19]. V oxidačním katalyzátoru rovněž v jisté míře oxiduje NO na NO_2 , což je přínosné jak pro regeneraci filtru DPF, tak pro reakce SCR. Oxidace plynů je realizována podle následujících rovnic [46]:



Pro účinnost katalyzátoru je nutné jeho co nejrychlejší zahřátí na provozní teplotu. Nejen z důvodu funkce katalyzátoru, ale rovněž kvůli tomu, že po studeném startu vzniká nejvíce produktů nedokonalého spalování. Proto je DOC umisťován co nejbližší motoru. Další nepřímou metodou snižování emisí je snaha o co nejrychlejší zahřátí motoru, například použitím regulovatelného vodního čerpadla nebo elektrického topení kabiny vozu. Ke katalyzování oxidace slouží vzácné kovy, konkrétně palladium a platina [46].

7 DIAGNOSTIKA SYSTÉMŮ DODATEČNÉ ÚPRAVY SPALIN

Tato část práce se bude věnovat možným poruchám dodatečné úpravy výfukových plynů a navrhne postup pro odhalení jejich příčiny a oprav, se zaměřením na systém SCR a DPF. Jelikož oxidační katalyzátor hraje klíčovou roli v regeneraci DPF, je jeho kontrola součástí diagnostiky filtru pevných částic. Základem moderní diagnostiky vozidel je vyčtení chyb sériovou diagnostikou a pořízení záznamu všech hodnot, které se závadou mohou přímo nebo nepřímo souviset.

7.1 DIAGNOSTIKA FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Filtr pevných částic je navrhován jako bezúdržbové zařízení, v ideálním případě tak, aby o něm běžný uživatel ani nevěděl [52]. Bohužel, životnost a kapacita filtru je omezená. I při správné funkci celého systému vzniká popel z nespalitelných prvků pocházejících z různých aditiv v oleji a palivu, koroze nebo opotřebení motoru. Popel sice částečně zvyšuje filtrační schopnosti, ale podstatně omezuje kapacitu pro ukládání sazí a tím se zkracují intervaly mezi regeneracemi a zvyšuje se průměrná tlaková ztráta [59].

Většina problémů z DPF je důsledkem špatného stavu motoru nebo je spojená se stylem používání, krátké trasy nebo/a nízké zatížení motoru totiž neumožňují dostatečnou regeneraci filtru [60]. Značné omezení životností DPF může způsobit i olej, který není určený pro vozidla vybavené filtrem výfukových plynů [61]. Typické poruchy filtru jsou: nadměrné zanesení, poškození filtračního média a poruchy snímačů.

7.1.1 VYČTENÍ PAMĚTI ZÁVAD

Doporučuje se každou diagnostiku DPF začít vyčtením chyb z řídicí jednotky. Relevantní jsou nejen chyby DPF, ale chyby všech jednotek a komponent, které mohou ovlivnit tvorbu emisí motoru jako je mimo jiné systém EGR, palivová soustava, žhavení, systém sání a samozřejmě všechny chyby spojené s výfukovým systémem. Pro správnou funkci DPF, je zcela nezbytné odstranit všechny příčiny hlášených chyb na motoru a teprve pak přejít k diagnostice a eventuální opravě filtru [62].

7.1.2 KONTROLA SNÍMAČŮ

Pro určení relevance informací, které používáme při vyhodnocování stavu DPF je vhodné provést kontrolu čidel na filtru. Senzor ukazující chybnou hodnotu může vést nejen k nesprávné diagnostice, ale může být i příčinou řešeného problému. V této kapitole bude pozornost věnována čidlům teploty výfukových plynů a diferenčního tlaku, ale závadu DPF mohou způsobit i jiná čidla, která přímo s DPF nesouvisí. Typicky jsou to senzory měřící parametry, na kterých je závislé spuštění aktivní regenerace.

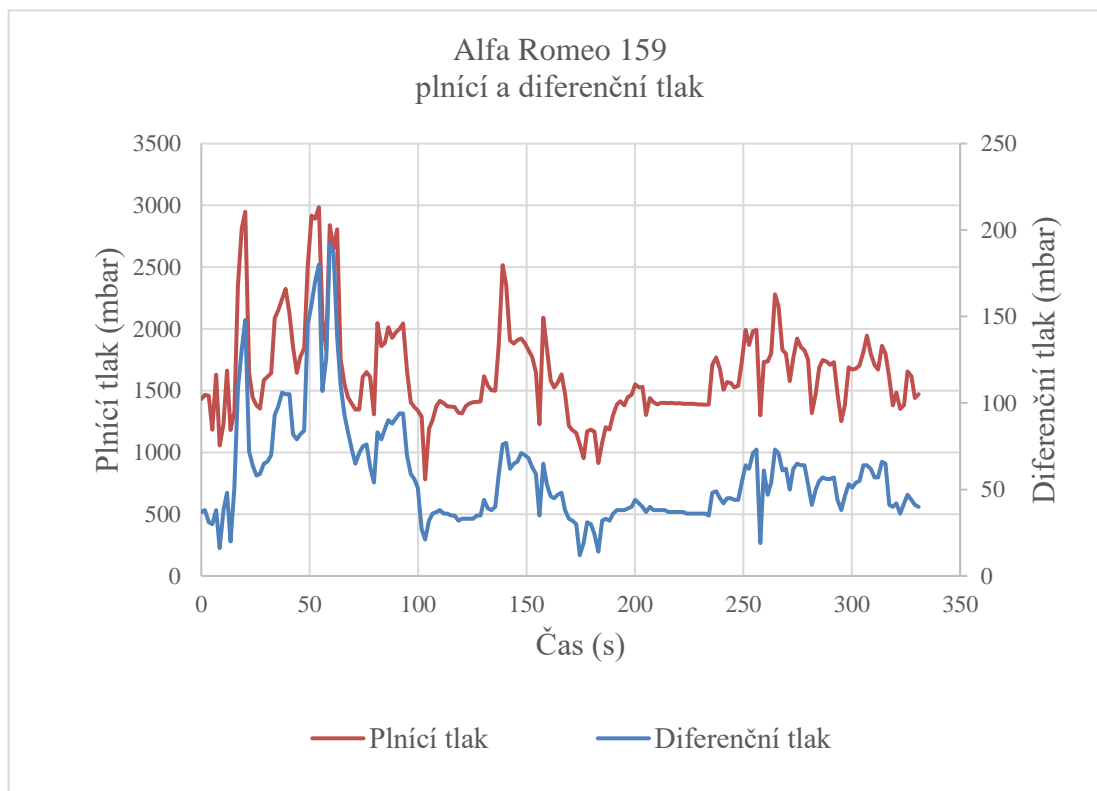
7.1.2.1 DIAGNOSTIKA SENZORU DIFERENČNÍHO TLAKU

Na informacích z čidla diferenčního tlaku je závislá většina managementu systému. Jeho správná funkce je zcela klíčová pro vyhodnocení stavu DPF. Obecně existují tři možné konfigurace. Snímač může měřit rozdíl tlaku před a za DPF, tlak před DPF a ECU ho porovnává s tlakem atmosférickým nebo jsou použity dva senzory porovnávající tlak

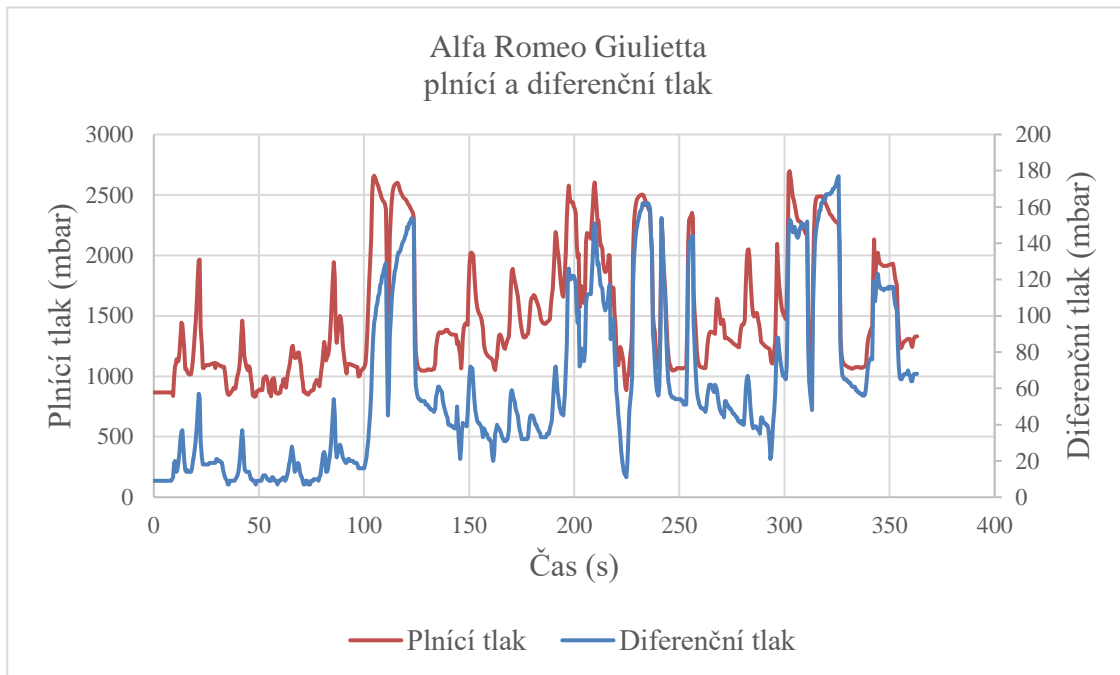
před i za DPF s atmosférickým tlakem. Jsou od sebe lehce rozpoznatelné, jelikož prvně jmenovaná varianta je napojená ke dvěma hadičkám a varianta využívající porovnání s atmosférickým tlakem má pouze jeden vstup [62].

Základní kontrolu senzoru lze provést sériovou diagnostikou. Nejdříve ověříme hodnotu tlakové ztráty se zapnutým zapalováním na stojícím motoru. Jelikož přes motor neproudí žádný plyn, tak z obou stran filtru je atmosférický tlak. Funkční senzor ukáže nulovou hodnotu s možnou odchylkou 3 mbar [63]. Pokud je odchylka větší v přiměřené míře, je možné provést adaptaci. V případě že se naměřená hodnota značně liší od reality, je třeba zkontrolovat spojitost a izolaci vedení mezi čidlem a ECU [62].

Tlaková ztráta je závislá na zatížení motoru. Senzor diferenčního tlaku by tedy měl signalizovat při vyšším zatížení vyšší tlakovou ztrátu. Pro ověření této hypotézy a určení nejvhodnější veličiny pro porovnání s diferenčním tlakem bylo provedeno měření tlakové ztráty a několika dalších parametrů sériovou diagnostikou za provozu. Pro měření byly použity dva vozy značky Alfa Romeo, model 159 s motorem 2.0jtdm 100 kW a Giulietta 1.6jtdm 77 kW. Měření tuto skutečnost prokázalo, přičemž průběh diferenčního tlaku v čase nejvíce koreloval s plnicím tlakem vzduchu. Časový průběh obou veličin je zobrazen na *obr. 11* a *obr. 12*. Pro diagnostiku snímače je toto porovnání přínosné, jelikož je možné porovnáním tvaru křivek poměrných výchylek a jeho hodnot ověřit, zda reaguje správně v celém jeho spektru. Velikost tlakové ztráty je závislá na mnoha parametrech, avšak na základě dostupných informací a provedeného měření by se reálné hodnoty diferenčního tlaku měly pohybovat přibližně 0 až 30 mbar na volnoběhu a 70 až 200 mbar při vysokém zatížení [62], [64].



Obr. 11 Porovnání plnicího a diferenčního tlaku v závislosti na čase na voze Alfa Romeo 159



Obr. 12 Porovnání plnicího a diferenčního tlaku v závislosti na čase na voze Alfa Romeo Giulietta

Pokud senzor vykazuje hodnoty mimo toto pásmo, doporučuje se provést kontrolu těsnosti hadiček připojujících snímač k filtru a test spojitosti a izolace kabeláže, eventuálně i napětí napájení při použití multimetru. Jestliže se kabeláž i hadičky jeví v pořádku, je možné ověřit reálný tlak před filtrem externím manometrem, který lze připojit stejným způsobem jako senzor, jehož funkčnost ověřujeme [62].

Po výměně vadného snímače je potřeba provést kalibraci senzoru a reset samoučících se funkcí.

7.1.2.2 DIAGNOSTIKA TEPLOTNÍHO ČIDLA

Čidla měřící teplotu výfukových plynů poskytují klíčové informace pro řídicí jednotku zejména pro řízení aktivní regenerace a vyhodnocení míry pasivní regenerace [52].

U diagnostiky teplotního čidla postupujeme podobně jako při diagnostice senzoru diferenčního tlaku, tedy na voze s vypnutým motorem vytemperovaným na okolní teplotu zobrazíme na diagnostickém nástroji několik teplotních čidel dostupných ve voze. Pokud je vozidlo dostatečně vytemperované a čidla pracují správně, pak by měla všechna ukazovat přibližně stejnou teplotu, odpovídající teplotě okolí [64]. Následně provedeme kontrolu teplot na motoru zahřátém na provozní teplotu. Orientační reálné teploty v různých místech výfukového systému jsou uvedeny v tab. 3

Tab. 3 Orientační teploty v okolí DPF při jeho správné funkci [57]

Typ zatížení	Teplota katalyzátoru	Teplota před DPF	Teplota za DPF
Volnoběh	170 °C	144 °C	124 °C
Střední zátěž	450-550 °C	350-370 °C	340 °C
Vysoká zátěž	650 °C	444 °C	388 °C

Pokud naměřené teploty výrazně odbíhají od předpokládaných, je třeba provést kontrolu odporu čidla. Běžně všechna teplotní čidla na výfukovém systému jsou stejná, nebo fungují ve stejném rozsahu napětí. Díky tomu lze porovnat odpory čidel mezi sebou. Pokud mají stejnou teplotu, pak by se jejich odpor neměl lišit o více než 5 %, pak následuje kontrola kabeláže stejným způsobem jako u senzoru diferenčního tlaku, tedy test spojitosti a izolace multimetrem [57].

Teploty při vyšším zatížení mohou být vyšší než očekávané i z důvodu nadměrného zaplnění filtru. Po výměně teplotního čidla je vhodný reset samoučících funkcí.

7.1.3 ZAPLNĚNÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Sériová diagnostika umožňuje získat informace ohledně stavu filtru. Zanesení sazemí a popílkem je vyhodnocováno dvěma strategiemi. Jedna se opírá o výpočet produkce saze z většího množství parametrů ze snímačů nepřímo spojených s DPF, jako jsou například dávka paliva, teplota motoru i výfukových plynů, zatížení motoru nebo délka a průměrná rychlost jízdy za provozu. Základem druhé strategie je měření veličin přímo na filtru nebo v jeho těsné blízkosti, konkrétně teploty a tlaku [62]. Díky tomuto jsou skrze sériovou diagnostiku dostupná data vypočtené hmotnosti sazí, měřené hmotnosti sazí a vypočtené hmotnosti zaplnění popílkem. V závislosti na rozhraní daného systému jsou tyto hodnoty zobrazovány buď v grafech spolu s limitní hranicí naplnění, nebo jako poměrné zaplnění v procentech, přičemž maximální možné zaplnění sazemí neodpovídá 100 %, ale ideálnímu zaplnění pro spuštění aktivní regenerace. Dle diagnostického programu Delphi 2015 zaplnění do 200 % stále není patologickým stavem a regeneraci lze provést přirozeným způsobem, tedy bez upozornění řidiče kontrolkou při jízdě. Pro znázornění, v jakých mezích se pohybuje hmotnost saze, je uvedeno v *tab. 4* s uvedenými limitními hodnotami usazených sazí a doporučenou procedurou regenerace pro motor 2.0 TDI s řídicí jednotkou Bosch EDC17C46.

Tab. 4 Tabulka reprezentativních mezí zaplnění DPF sazemí [65]

Mez zaplnění x	$x < 2 \text{ } 4\text{g}$	$2 \text{ } 4\text{g} < x < 4 \text{ } 0\text{g}$	$4 \text{ } 0\text{g} < x < 4 \text{ } 5\text{g}$	$x > 4 \text{ } 5\text{g}$
Možný způsob regenerace	Regenerace za provozu vozidla spuštěna řídicí jednotkou motoru	Nucená regenerace spuštěná sériovou diagnostikou	Nucená regenerace spuštěná sériovou diagnostikou pouze při jedoucím vozidle	Regenerace filtru na vozidle není možná

Při vysokém zaplnění určíme a opravíme jeho příčinu a následně provedeme regeneraci způsobem přiměřeným ke stavu zaplnění. Nadměrné zanesení může být způsobeno nevhodnými podmínkami pro regeneraci, zvýšenou kouřivostí motoru, nefunkčním katalyzátorem nebo vadnými senzory, kterým se tato práce věnuje v podkapitole 7.1.2.

Nevhodné podmínky, tedy zejména krátké trasy při nízké zátěži, nejsou poruchou vozidla jako takového a servis tedy není schopen ji přímo opravit. Jedinou možností je poučení uživatele o funkci systému a doporučení občasných delších tras ve vyšších rychlostech.

Nekonvenční metodou je instalace indikační kontrolky, která informuje o probíhající regeneraci, aby tomu mohl řidič přizpůsobit jízdu nebo zamezit vypnutí motoru. Tato metoda je málo rozšířena a je realizována typicky instalací LED diody do obvodu vyhřívání zrcátek, které se v mnoha případech při regeneraci spouští.

Bez funkčního katalyzátoru nelze dosáhnout požadovaných teplot metodou aktivní regenerace částic. Funkčnost katalyzátoru lze ověřit jeho zahřátím na přibližně 200 °C a následným vstříkem rozprášené nafty nebo podobné látky na jeho povrch. Teplota katalyzátoru by se měla rapidně zvýšit. Pokud se tak nestane, je katalyzátor nefunkční a je třeba ho vyměnit. Ke sledování teploty lze využít sériovou diagnostiku a teplotních čidel ve voze [66]. Stejnou kontrolu lze provést i za provozu vozidla sledováním teplot na začátku aktivní regenerace při konstantním zatížení motoru.

Zvýšená kouřivost může být důsledkem mnoha různých poruch a opotřebení. Je třeba věnovat pozornost zejména palivové soustavě, žhavení, celému systému sání a EGR [64]. Důkladná diagnostika problému zvýšené kouřivosti by vyžadovala hloubkovou analýzu, která by přesahovala rámec této práce, která je zaměřena především na analýzu a diagnostiku komplexních systémů dodatečné úpravy spalin.

Zaplnění popílkem lze posoudit podle maximální hodnoty zapsané v ECU a intervalu regenerace. Interval regenerace je jedním ze základních parametrů určujících, zda DPF a motor fungují správně [59]. Po připojení k řídicí jednotce je dohledatelný sériovou diagnostikou v podobě průměrného nájezdu mezi několika posledními regeneracemi a nájezdu od poslední regenerace. Tyto parametry bývají vyjádřené i jako doba provozu. Dle dostupných informací se interval funkčního systému pohybuje v rozsahu kolem 200 až 1500 km [55], [67], proto je tento parametr nutné posuzovat v kontextu konkrétního vozidla a druhu provozu. Zkrácení intervalů může být důsledkem zaplnění filtru popelem [59], nebo zvýšenou produkcí sazí motorem, eventuálně dlouhodobě špatnými podmínkami pro regeneraci. Příliš časté spouštění aktivní regenerace uživatel vozidla pozná primárně na zvýšené spotřebě pohonných hmot. Mimo to, vysoká frekvence vypalování může způsobit ředění oleje palivem, což může mít při dlouhodobém používání pro motor fatální následky [63], a značné zvýšení emisí.

Pokud diagnostika ukazuje vysoké zaplnění popelem, auto má vysoký nájezd a relativně nízký interval regenerace, pak lze předpokládat, že je filtr na konci své životnosti a je třeba ho vyměnit nebo profesionálně vyčistit. Naopak vysoké vypočtené zaplnění popílkem a velké intervaly mezi regeneracemi mohou signalizovat porušení keramické vložky, kterému se tato práce věnuje v podkapitole 7.1.4.

U systémů využívajících aditivum pro snížení teploty regenerace, je nutná kontrola množství této kapaliny, ideálně jak přes sériovou diagnostiku, tak i vizuální kontrolou nádrže a jeho eventuální doplnění. V případě, že je v nádrže více kapaliny, než udává jednotka je třeba vykonat kontrolu dávkování aditiva, třeba při využití testu akčního členu. Po fyzickém doplnění aditiva, se tento úkon zapisuje v řídicí jednotce diagnostickým nástrojem.

Před výměnou filtru je třeba provést kontrolu všech komponent schopných ovlivnit kouřivost a zvýšenou spotřebu oleje, aby se nový filtr předčasně nezanesl. Mezi nejzásadnější komponenty vyžadující kontrolu patří vstříkovače, turbodmychadlo, žhavení, systém EGR, ale i separátor oleje odvětrání klikové skříně. Vhodná by byla rovněž kontrola toho, zda se ve vozidle používá olej výkonnostní třídy typu C dle evropské normy ACEA s nízkým

obsahem popelovin předepsaný výrobcem [68]. Po výměně filtru je nutné tento fakt zapsat v ECU za použitím diagnostického přístroje, aby bylo resetováno zaplnění filtru popílkem [64].

7.1.4 POŠKOZENÍ FILTRAČNÍHO MÉDIA

Keramická část filtru může prasknout nebo se roztavit. Poškození filtru je nejčastěji následkem neřízené regenerace nebo poruchy některé z komponent před filtrem, nicméně jsou známy i případy samovolné poruchy. Praskání filtru je způsobeno teplotním gradientem generovaným rozdílem průchodností kanálků vycházejících z nerovnoměrného zaplnění filtru, přičemž prasklina má obvodový směr. K roztavení dochází z důvodu vysoké teploty [60].

Obě tyto poruchy zdatelně ovlivňují emisi pevných částic a snižují hodnotu diferenčního tlaku, ale pokud filtr není poškozen v extrémní míře a zároveň je již částečně zanesen, je tento problém velmi těžce zjizitelný běžným servisními postupy. Zanesení popílkem a sazemi může vyvažovat hodnotu snížení odporu způsobené prasklinou nebo roztavením a výsledná tlaková ztráta, na které se ve velké míře opírá řídicí jednotka [57], je v normálních mezích. Nabízí se vizuální kontrola filtru, ta bohužel často selhává, jelikož bez destrukce filtru máme možnost vidět pouze čelní plochy filtru, kde poškození nemusí být zjevné [60], a v mnoha případech pouze zadní plochu, jelikož před přední plochou je umístěn oxidační katalyzátor blokující výhled. Na základě dostupných studií nebylo možné určit neinvazivní metodu, se kterou bychom mohli s jistotou potvrdit, že je keramická vložka neporušena bez přístroje pro měření počtu částic nebo hmotnosti částic eventuálně rentgenovým zařízením [60], [31]. Opacimetr, používaný na stanicích emisní kontroly, často v tomto směru selhává. Proto byla kontaktována firma DPF24 [69], zabývající se čištěním filtrů pevných částic a jiných komponent. Dle jejich sdělení, poskytnutého obchodním zástupcem, je vizuální kontrola čelních ploch filtru zkušeným technikem při využití inspekční kamery a následný test diferenčního tlaku na specializovaném přístroji dostačující pro odhalení podstatných porušení filtru. Dle asociace emisních techniků a opravářů lze potvrdit poruchu filtru, pokud se v koncovce výfuku vozidla sbírají při provozu saze [31].

7.2 DIAGNOSTIKA SYSTÉMU SCR

Mezi typické poruchy systému SCR patří chyby senzorů, katalyzátoru, funkčních členů potrubí nebo kabeláže. Zásadním problémem může být i kvalita nebo kontaminace DEF. SCR systém přímo neovlivňuje chod motoru, tedy příznaky většiny jeho závad nejsou při provozu zdatelné a problém se začíná řešit až při signalizaci závady na přístrojové desce.

Mnoho závad tohoto systému je způsobených jeho nedokonalým návrhem konkrétních součástí nebo jejich rozmístěním. Jsou typické pro daný model vozidla a provedením rešerše lze diagnostiku závady mnohdy zjednodušit.

7.2.1 VYČTENÍ PAMĚTI ZÁVAD

Prvním krokem k identifikaci problému je vyčtení závady uložené v řídicí jednotce při použití sériové diagnostiky. Chyba může signalizovat nadměrnou spotřebu redukčního prvku, nedostatečné přeměny NO_x nebo přímo určit vadnou komponentu, eventuálně přerušený elektrický okruh.

Některé řídicí jednotky umožňují test systému, kdy stojící vozidlo několik minut sbírá data za chodu motoru, jehož parametry jsou automaticky upravovány. Výsledkem je vyhodnocení účinnosti systému a eventuálních závad.

Pokud je uloženo větší množství závad spojených se systémem SCR, je vhodné zkontrolovat řídicí modul, který může být poškozen třeba vodou z důvodu nevhodného umístění nebo nedostatečné těsnosti v okolí odvzdušňovacího otvoru. Před výměnou modulu, takto poškozeného modulu se nabízí otázka, zda by nebylo vhodné změnit lokalizaci nebo zvýšit stupeň ochrany této komponenty před vnějšími vlivy.

7.2.2 KONTROLA SNÍMAČŮ

Pro ověření relevantnosti hlášené chyby nejdříve zkontrolujeme snímače, na které se systém spoléhá. Diagnostikou teplotního čidla spalin se již zabývala podkapitola 7.1.2.2, proto se v této části zaměříme na kontrolu snímače NO_x a senzoru kvality DEF.

7.2.2.1 SENZOR NO_x

Kontrolu reálnosti měřených hodnot za katalyzátorem je možné provést za jízdy vozidla po studeném startu. Senzor NO_x začíná fungovat až po dosažení přibližně 100 °C [70], ale pracovní teplota SCR katalyzátoru je vyšší než NO_x senzoru. Koncentraci NO_x je vhodné měřit právě v době, kdy senzory již fungují, ale SCR katalyzátor stále není na své provozní teplotě a roztok močoviny není vstřikován, jelikož by mohl ovlivnit výsledek měření. Tyto senzory NO_x totiž reagují nejen na NO_x, ale bohužel i na zvýšenou koncentraci NH₃. Pokud není realizován vstřik redukčního prvku, pak senzor za katalyzátorem by měl vždy ukazovat hodnotu nižší nebo stejnou jako senzor před katalyzátorem, protože katalyzátor není schopen zvýšit koncentraci NO_x. Jestli tento fakt nekoresponduje s naměřenými daty, pak je jeden ze senzorů defektní. Nabízí se možnost kontroly za stavu, kdy s jistotou víme, že koncentrace NO_x je nulová. Když za jízdy vozidla uvolníme plynový pedál a zároveň máme zařazený rychlostí stupeň (brzdíme motorem) není v spalováno žádné palivo. Reálná koncentrace NO_x je v takové situaci nulová a nulovou hodnotu by měly ukázat i oba senzory (pokud ve vozidle není jenom jeden). Tyto měření mohou být obtížněji proveditelné, pokud je v emisním systému obsažen adsorbér NO_x, který může měření ovlivnit. Hodnoty senzoru před katalyzátorem lze porovnávat i s vypočtenou koncentrací NO_x.

Dále lze provést kontrolu napájení a spojitosti obvodu multimetrem, ale jelikož sonda NO_x je napojena na vlastní modul, který mění druh signálu, je ke kontrole signálu za modulem nutné použít osciloskop.

Jednou z příčin špatné funkce čidla může být jeho zanesení sazemí a v některých případech stačí čidlo vyčistit.

7.2.2.2 SENZOR KVALITY DEF

Senzor kvality DEF je umístěn v horní části nádrže a je schopný určit nejen kvalitu, ale i množství kapaliny a často bývá spojen i s čidlem teploty. Funguje na principu ultrazvuku. Vysílá vlny, které se odrazí od hladině kapaliny a dle času návratu vypočte množství a hustotu DEF.

Při výskytu závady kvality DEF v řídicí jednotce, je vhodné kvalitu ověřit. Koncentrace močoviny v roztoku lze ověřit refraktometrem, přesným vážením nebo hustoměrem [71]. Pro potřeby servisu je vhodný zejména ruční refraktometr, jelikož k měření stačí jedna kapka

roztoku močoviny. Při manipulaci s DEF hrozí kontaminace ropnými produkty, čistotu roztoku lze ověřit identifikačními papírky [71].

7.2.3 KONTROLA TĚSNOSTI SYSTÉMU

Netěsnost v systému může být signalizována jako nízký tlak redukčního prvku, nízká efektivita přeměny nebo nadměrná spotřeba DEF. Únik kapaliny hrozí nejen vysokým úbytkem kapaliny a kontaminací okolí, ale i poškozením čerpadla a zanesením komponent vozidla roztokem močoviny.

Únik DEF je relativně dobře dohledatelný, jelikož v okolí úniku tvoří bílou krystalickou strukturu [71].

7.2.4 KONTROLA VSTŘIKOVAČE

Pro efektivní přeměnu NO_x je potřebná dobrá úroveň atomizace vstřikovaného DEF. Ta může být značně omezená krystalizací DEF v okolí vstřikovače. Řídící jednotka pak může vyhodnotit závadu jako nedostatečnou efektivitu katalyzátoru, příliš vysoký tlak nebo nadměrnou spotřebu DEF. Oprava spočívá ve vyčištění trysky a vstupního otvoru do katalyzátoru.

Kontrolu čerpadla a vstřikovače zároveň lze provést testem akčního členu, kde na vymontovaném vstřikovači sledujeme, zda skutečné dávkované množství odpovídá předepsanému. Vizually lze rovněž posoudit rozprášení kapaliny.

7.2.5 KONTROLA VYHŘÍVÁNÍ

Při problémech se zamrzáním nebo přehříváním směsi může být na vině kabeláž a topná tělesa při systému s elektrickým ohřevem, nebo termostat a vedení chladicí kapaliny při použití vodního okruhu, eventuálně špatná koncentrace močoviny.

7.2.6 DIAGNOSTIKA KATALYZÁTORU

Katalyzátor ve špatném stavu se projevuje sníženou efektivitou práce, na kterou může mít vliv i celá řada jiných komponent. Z důvodu vysoké ceny katalyzátoru se postupuje vylučovací metodou a teprve po vyloučení všech jiných příčin následuje jeho výměna.

ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů práce bylo vytvoření detailního popisu systémů snižujících emise spalín ze vznětových motorů v automobilech splňujících normu EURO 6. Mezi další cíle patřilo zejména zhodnocení odborných metod diagnostiky systémů dodatečné úpravy spalín pomocí sériové diagnostiky i paralelního měření fyzikálních veličin. Dílčím cílem bylo stručné shrnutí současné legislativní metodiky hodnocení škodlivin ve výfukových plynech vznětových motorů a porovnání odborných servisních metod, pro zjištění správné funkce emisních systému v kontextu emisní zkoušky při schvalování technické způsobilosti vozidla.

Byla provedena rešerše v oblasti emisních plynů a částic. Byl popsán princip jejich vzniku i jejich negativní vliv na zdraví člověka a životní prostředí. Dále byly představeny současné Evropské emisní limity, které musí splnit každý nově vyráběný automobil, a historický vývoj limitů a testovacích cyklů.

Postup při emisní zkoušce, která je součástí schvalování technické způsobilosti vozidla, byl stručně popsán. Současnou emisní kontrolu lze považovat za zastaralou, adekvátní maximálně pro automobily třídy EURO 5a. Měří se pouze hodnota kouřivosti opacimetrem. Měření počtu částic se neprovádí, proto kontrolou procházejí i auta s poškozeným DPF. Fakt, že tato kontrola se vůbec nezabývá koncentrací NO_x , může v kontextu stále zpřísnujících se homologačních norem působit jako paradox.

Hlavní část práce tvoří důkladný popis funkce a konstrukce systémů EGR, DPF a SCR. Mimo to byl vysvětlen vliv tlaku, časování a rozdělení vstříkované dávky paliva na emise se zaměřením na NO_x a PM. V rámci ověření informací převzatých z literatury, bylo provedeno pomocí diagnostického přístroje měření teploty DPF při aktivní i pasivní regeneraci. Zajímavým pokusem by mohlo být použití výkonného SCR katalyzátoru a pasivního adsorbéru NO_x jako jediných emisních systémů a nastavení vstříkování na vysokou účinnost motoru a nízkou emisí PM. Podobná strategie je používána v nákladních vozidlech emisní třídy EURO IV a EURO V.

Na základě popsaných funkčních principů DPF a SCR, možností nabízených diagnostickým přístrojem, informací získaných z literatury a osobních zkušeností, byly navrženy postupy diagnostiky těchto systémů. Metodiku navrhnoutou pro DPF lze považovat za kompletní. V případě diagnostiky SCR je vhodné navrhnoutý postup kombinovat s informacemi o typických závadách konkrétního modelu vozidla.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠTĚTINA, Josef. *TEORIE SPALOVACÍCH MOTORŮ - QTS EMISE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ*. Brno: VUT FSI v Brně, 2021. Dostupné také z: https://docs.google.com/presentation/d/1Cy_Ez77V8zewjAORrESiX_xbk7vRbTH87b2h2KWfNVY/edit#slide=id.gef159955da_0_118
- [2] MAJEWSKI, W. Addy. What Are Diesel Emissions. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2012 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/emi_intro.php
- [3] Oxid uhelnatý. In: <https://szu.cz/> [online]. Praha [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://szu.cz/tema/zivotni-prostredi/ovzdusi/vnitni/oxid-uhelnaty/>
- [4] HAVEL, Milan a Petr VÁLEK. Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs). In: *Arnika.org* [online]. Praha: Arnika, 2010 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://arnika.org/toxicke-latky/databaze-latek/polycyklicke-aromaticke-uhlovodiky-pahs>
- [5] *Polycyclic aromatic hydrocarbons in automotive exhaust emissions and fuels* [online]. Brussels: Concawe, 1998, [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/rpt_98-55-2004-01306-01-e.pdf
- [6] HE, Chao, Yunshan GE, Jianwei TAN, Kewei YOU, Xiukun HAN a Junfang WANG. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons emissions of diesel engine fueled with biodiesel and diesel. *Fuel* [online]. 2010, **89**(8), 2040-2046 [cit. 2023-04-15]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2010.03.014
- [7] Exhaust Particulate Matter: What Are Exhaust Particulates. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2019 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/tech/dpm.php#size>
- [8] Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). In: *Epa.gov* [online]. Washington, DC: EPA, 2022 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- [9] ZERBONI, Alessandra, Tommaso ROSSI, Rossella BENGALLI, Tiziano CATELANI, Cristiana RIZZI, Marco PRIOLA, Simone CASADEI a Paride MANTECCA. Diesel exhaust particulate emissions and in vitro toxicity from Euro 3 and Euro 6 vehicles. *Environmental Pollution* [online]. Elsevier, 2022, **2022**(297) [cit. 2023-04-20]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2021.118767
- [10] MOHANKUMAR, S. a P. SENTHILKUMAR. Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **2017**(80), 1227-1238 [cit. 2023-04-22].

ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.05.133

- [11] WU, Weidong, James SAMET, Andrew GHIO a Robert DEVLIN. Activation of the EGF receptor signaling pathway in airway epithelial cells exposed to Utah Valley PM. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology* [online]. American Physiological Society, 2001, **201**(281), 483-489 [cit. 2023-04-27]. ISSN 1040-0605. Dostupné z: doi:10.1152/ajplung.2001.281.2.L483
- [12] SMITH, Owen I. Fundamentals of soot formation in flames with application to diesel engine particulate emissions. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1981, **1981**(7), 275-291 [cit. 2023-04-27]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/0360-1285(81)90002-2
- [13] BLOSS, William. Measurement of Air Pollutants. In: *Encyclopedia of Environmental Health* [online]. Second edition. Michigan: Elsevier, 2019, s. 247-256 [cit. 2023-03-31]. ISBN 978-0-444-63952-3. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.11354-5
- [14] Gaseous Emissions. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2020 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/emissions_gas.php
- [15] BONINGARI, Thirupathi a Panagiotis SMIRNIOTIS. Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NO_x abatement. *Current Opinion in Chemical Engineering* [online]. 2016, **13**, 133-141 [cit. 2023-03-31]. ISSN 22113398. Dostupné z: doi:10.1016/j.coche.2016.09.004
- [16] MASTEN, Susan. ENE 489 Spring 2021: NO_x Formation and Control. In: *Youtube.com* [online]. East Lansing, 2021 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=rueOIWTMTGU&ab_channel=SusanMasten
- [17] MENDOZA-VILLAFUERTE, Pablo, Ricardo SUAREZ-BERTOIA, Barouch GIECHASKIEL, Francesco RICCOBONO, Claudia BULGHERONI, Covadonga ASTORGA a Adolfo PERUJO. NO_x, NH₃, N₂O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions. *Science of The Total Environment* [online]. 2017, **2017**(609), 546-555 [cit. 2023-04-01]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.07.168
- [18] Document 31991L0441. In: *Eur-lex.europa.eu* [online]. Brusel: Evropská unie, 1991 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX:31991L0441>
- [19] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů QTS 2022/23 Emise. In: *Youtube.com* [online]. Brno, 2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=wquaJTAIq4Y&t=8362s&ab_channel=Josef%C5%A0t%C4%9Btina
- [20] Emission Standards: EU: Cars and Light Trucks. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z:

<https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php#intro>

- [21] Ricardo testing shows Euro 6d diesels remarkably clean. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/news/2020/01ricardo.php>
- [22] European Commission proposes Euro 7/VII emission standards. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint Inc., 2022 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/news/2022/11eu.php>
- [23] Euro 6 compliance and emission standards – the 2023 guide. In: *Motorway.co.uk* [online]. Motorway Online [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://motorway.co.uk/sell-my-car/guides/euro-6-emission-standards-compliance>
- [24] ECE 15 + EUDC / NEDC. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2013 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: https://dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- [25] An overview of WLTP. In: <https://www.volkswagenag.com/> [online]. Wolfsburg: © Volkswagen Aktiengesellschaft, 2017 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: https://www.volkswagenag.com/presence/konzern/group-fleet/dokumente/WLTP_Basic_Knowledge.pdf
- [26] Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC). In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2019 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- [27] ROMANO, Luigi. Pros and Consumption: NEDC and WLTP cycles compared. In: *Wevolver.com* [online]. Gothenburg: Wevolver, 2019 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/pros.and.consumption>
- [28] Emission Standards: RDE Testing. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://dieselnet.com/standards/eu/ld_rde.php
- [29] EU TCMV approves Euro 6e amendments. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/news/2022/08tcmv.php>
- [30] Metodický postup pro měření emisí motorových vozidel. In: *Www.mdcz.cz* [online]. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2022 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.mdcz.cz/Dokumenty/Silnicni-doprava/SME/Metodicky-postup-pro-mereni-emisi-motorovych-vozid?returl=/Dokumenty/Silnicni-doprava/SME>
- [31] Emisní kontrola nefunkční filtr částic neodhalí!. In: *Asem.cz* [online]. Kosmonosy: ASEM, 2022 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <http://www.asem.cz/blog/emisni-kontrola-nefunkcni-filtr-castic-neodhali>
- [32] ZARE, Ali, Svetlana STEVANOVIC, Mohammad JAFARI et al. Analysis of cold-start NO₂ and NO_x emissions, and the NO₂/NO_x ratio in a diesel engine powered with

- different diesel-biodiesel blends. *Environmental Pollution* [online]. 2021, **2021**(290) [cit. 2023-04-01]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2021.118052
- [33] HOW, H.G., H.H. MASJUKI, M.A. KALAM a Y.H. TEOH. Influence of injection timing and split injection strategies on performance, emissions, and combustion characteristics of diesel engine fueled with biodiesel blended fuels. *Fuel* [online]. 2018, **2018**(213), 106-114 [cit. 2023-05-17]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2017.10.102
- [34] SINDHU, R., G. AMBA PRASAD RAO a K. MADHU MURTHY. Effective reduction of NO_x emissions from diesel engine using split injections. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2018, **2018**(57), 1379-1392 [cit. 2023-05-18]. ISSN 11100168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2017.06.009
- [35] ROSHA, Pali, Saroj MOHAPATRA, Sunil MAHLA, HaengMuk CHO, Bhupendra CHAUHAN a Amit DHIR. Effect of compression ratio on combustion, performance, and emission characteristics of compression ignition engine fueled with palm (B20) biodiesel blend. *Energy* [online]. 2019, **2019**(178), 676-684 [cit. 2023-05-18]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2019.04.185
- [36] Motore Multijet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://it.wikipedia.org/wiki/Motore_Multijet
- [37] Volkswagen Golf Generations Specs. In: *Www.ultimatespecs.com* [online]. ultimatespecs.com [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Volkswagen-models/Volkswagen-Golf>
- [38] LAPUERTA, Magín, Ángel RAMOS, David FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ a Inmaculada GONZÁLEZ-GARCÍA. High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a Euro 6 diesel engine with lean-NO_x trap: Effectiveness to reduce NO_x emissions. *International Journal of Engine Research* [online]. 2019, **2019**(20), 155-163 [cit. 2023-05-18]. ISSN 1468-0874. Dostupné z: doi:10.1177/1468087418817447
- [39] EGR Systems & Components. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: EGR Systems & Components
- [40] LP EGR filter inhibits particles, not performance. In: *Filtsep.com* [online]. England: Mark Allen Group, 2014 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.filtsep.com/content/features/lp-egr-filter-inhibits-particles-not-performance/>
- [41] The basics of EGRs - what they do, how they work, how to troubleshoot. In: *Delphiautoparts.com* [online]. Borg Warner, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.delphiautoparts.com/en-us/resource-center/article/the-basics-of-egrs---what-they-do-how-they-work-how-to-troubleshoot>

- [42] MAJEWSKI, W. Addy. Lean NO_x Catalyst (HC-SCR). In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/cat_lean-nox.php
- [43] MAJEWSKI, W. Addy. Selective Catalytic Reduction. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/cat_scr.php
- [44] APICELLA, Barbara, Ezio MANCARUSO, Carmela RUSSO, Antonio TREGROSSI, Maria OLIANO, Anna CIAJOLO a Bianca VAGLIECO. Effect of after-treatment systems on particulate matter emissions in diesel engine exhaust. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2020, **2020**(116) [cit. 2023-05-20]. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2020.110107
- [45] MAJEWSKI, W. Addy. SCR Systems for Diesel Engines. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/cat_scr_diesel.php
- [46] *Automotive Handbook*. 11th edition. Karlsruhe: Wiley, 2022. ISBN 978-1119911906.
- [47] TAN, Pi-qiang, Shu-chen ZHANG, Shi-yan WANG, Zhi-yuan HU a Di-Ming LOU. Simulation on catalytic performance of fresh and aged SCR catalysts for diesel engines. *Journal of the Energy Institute* [online]. 2020, **2020**(93), 2280-2292 [cit. 2023-05-20]. ISSN 17439671. Dostupné z: doi:10.1016/j.joei.2020.06.011
- [48] QUÉREL, C., A. BONFILS, O. GRONDIN a Y. CREFF. Control of a SCR system using a virtual NO_x sensor. *IFAC Proceedings Volumes* [online]. 2013, **2013**(46), 9-14 [cit. 2023-05-20]. ISSN 14746670. Dostupné z: doi:10.3182/20130904-4-JP-2042.00073
- [49] MAJEWSKI, W. Addy. NO_x Adsorber Applications. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint Inc., 2020 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/cat_nox-trap_applications.php
- [50] MAJEWSKI, W. Addy. NO_x Adsorbers. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/cat_nox-trap.php#pperf
- [51] Technologie vstřikování nafty - druhy vstřikovacích čerpadel. In: *Autonorma.cz* [online]. Opava: Remante Group, 2021 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.autonorma.cz/blog/post/27-technologie-vstrikovani-nafty-druhy-vstrikovacich-cerpadel>
- [52] MAJEWSKI, W. Addy. Diesel Filter Systems. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/dpf_sys.php
- [53] *Diesel Exhaust Emission Control Modeling* [online]. United States: Borg Warner, 2009 [cit. 2023-05-21]. ISBN 2009-01-1276. ISSN 0148-7191. Dostupné z:

<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2009-01-1276/>

- [54] BERMÚDEZ, Vicente, José SERRANO, Pedro PIQUERAS a Enrique SANCHIS. On the Impact of Particulate Matter Distribution on Pressure Drop of Wall-Flow Particulate Filters. *Applied Sciences* [online]. 2017, 7(3) [cit. 2023-05-21]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7030234
- [55] HUANG, Junfeng, Jianbing GAO, Yufeng WANG, Haibo CHEN, Juhani LAURIKKO, Ari-Pekka PELLIKKA, Ce YANG a Chaochen MA. Insight into the penalty of exhaust emissions and fuel consumption by DPF regeneration of a diesel passenger car. *Chemosphere* [online]. 2022, 2022(309) [cit. 2023-05-22]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2022.136629
- [56] SAJDL, Jan. DPF (Diesel Particulate Filter): řez filtrem pevných částic. In: *Https://www.autolexicon.net/cs/* [online]. autolexicon, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [57] Understanding DPF System - Crash Training. In: *Youtube.com* [online]. San Bruno: YouTube, 2021 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_4TBaWsc22A&list=PL8jWNQtMuEPOGUQZQpgit5p1XDG_uLraM&index=25&ab_channel=GarageGurus
- [58] SCHOBER, Sigurd a Martin MITTELBACH. Influence of diesel particulate filter additives on biodiesel quality. *European Journal of Lipid Science and Technology* [online]. 2005, 107(4), 268-271 [cit. 2023-05-21]. ISSN 1438-7697. Dostupné z: doi:10.1002/ejlt.200401115
- [59] SAPPOK, Alexander G. Ash Accumulation in Diesel Particulate Filters. In: *Dieselnet.com* [online]. Mississauga: ECOpoint, 2013 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/dpf_ash.php
- [60] CHO, Insu, Iljoo MOON, Daekuk KIM, Taeyoung PARK, Dokyeong LEE a Jinwook LEE. Experimental Investigation on OBD Signal and PN Emission Characteristics by Damaged-DPF Types of 2.0 L Diesel Vehicle. *Applied Sciences* [online]. 2022, 2022(12) [cit. 2023-05-23]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12157853
- [61] EVERYTHING YOU SHOULD KNOW ABOUT DIESEL PARTICULATE FILTERS. In: *Https://www.valvolineglobal.com/en-eur/* [online]. Valvoline, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.valvolineglobal.com/en-eur/everything-about-diesel-particulate-filters/>
- [62] Understanding DPF systems Diagnosis. In: *Youtube.com* [online]. San Bruno: YouTube, 2021 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=7yBDnNawpDI&ab_channel=GarageGurus
- [63] Test diferenčního senzoru tlaku filtru částic (DPF/FAP). In: *Youtube.com* [online]. San Bruno: YouTube, 2016 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z:

<https://www.youtube.com/watch?v=DCn8aDQcAuQ>

- [64] Diagnostika problémů s filtrem částic (DPF / FAP). In: *Youtube.com* [online]. San Bruno: YouTube, 2016 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=xYEj1Hdop9o>
- [65] Jak na filtr pevných částic DPF. In: *Motofocus.cz* [online]. Havířov: Motofocus EU, 2018 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://motofocus.cz/technika/35568,jak-na-filtr-pevných-castic-dpf>
- [66] Test funkčnosti katalyzátoru před DPF na vozidle. In: *Youtube.com* [online]. San Bruno: YouTube, 2016 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=U3AJvQQNpBw&ab_channel=FCDGARAGE-Czech
- [67] VŠE DŮLEŽITÉ O FILTRECH PEVNÝCH ČÁSTIC A KATALYZÁTORECH. In: *Dpf-cat.cz* [online]. Nová Hradečná: DPF-CAT Systems, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.dpf-cat.cz/jak-funguje-dpf-cat>
- [68] Výkonnostní třídy automobilových motorových olejů. In: *Oleje.cz* [online]. Brno: Eko lube, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vykonnostni-tridy-automobilovych-motorovych-oleju>
- [69] Dpf24.cz. In: *Dpf24.cz* [online]. Praha: DPF24, 2019 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: https://www.dpf24.cz/?gad=1&gclid=CjwKCAjw67ajBhAVEiwA2g_jELS8LYaHvMqtStvyRc2pcVk4cw8Vy8ahuViHF_uQW4iw0l828VIIHRoCtoYQAvD_BwE
- [70] NOx-Probe 24 V 1500 ppm. In: *Www.enginesens.com* [online]. Viernheim: EngineSens Motorsensor, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: http://www.enginesens.com/html/nox_sensor.html
- [71] BÍNA, Lukáš. *Analýza možných závad systému SCR na vozidlech MAN a jejich diagnostika*. Pardubice, 2010. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Doprvní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Milan Graja.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

DEF	<i>diesel exhaust fluid</i> – roztok močoviny (Adblue)
DPF	<i>Diesel particulate filter</i> – filtr pevných částic
ECU	<i>Engine control unit</i> – řídicí jednotka motoru
EGR	<i>Exhaust gas recirculation</i> – recirkulace spalin
EUDC	<i>Extra urban driving cycle</i> – mimoměstský jízdní cyklus
FAP	<i>Filtre à particules</i> – filtr pevných částic
MIL	<i>Malfunction indicator lamp</i> – varovná kontrolka chyby
NEDC	<i>New european driving cycle</i> – nový evropský jízdní cyklus
OBD	<i>On board diagnostic</i> – palubní diagnostika
PAHs	polycyklické aromatické uhlovodíky
PM	<i>particulate matter</i> – pevné částice
PN	<i>particle number</i> – počet částic
RDE	<i>Real driving emissions</i> – reálné emise za jízdy
SCR	<i>Selective catalytic reduction</i> – selektivní katalytická redukce
WLTC	<i>Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle</i> – světově unifikovaný testovací cyklus pro lehké osobní či užitková vozidla
WLTP	<i>Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure</i> – světově unifikovaný testovací postup pro lehké osobní či užitková vozidla