



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

SYSTÉMY PRO SNIŽOVÁNÍ MNOŽSTVÍ OXIDŮ DUSÍKU VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH

TECHNOLOGIES FOR NOX CUT-DOWN IN EXHAUST GASES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Drábik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Michal Drábik
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Radim Dundálek, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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:

Systémy pro snižování množství oxidů dusíku ve výfukových plynech

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Vysvětlení principu činnosti redukce oxidů dusíku ve výfukových plynech. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje pohonných jednotek s ohledem na snižování škodlivin ve výfukových plynech.

Cíle bakalářské práce:

Uvedení přehledu systémů pro snižování oxidů dusíku ve výfukových plynech, popis jejich konstrukčního řešení. Výhody a nevýhody s ohledem na provozní spolehlivost a životnost. Popis specifických součástí. Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

Seznam doporučené literatury:

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

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou znižovania množstva emisií oxidov dusíka vo výfukových plynoch a vysvetľuje princípy ich redukcie. Hlavným cieľom práce je analýza a popis systémov, ktoré sú určené na znižovanie ich množstva. Ďalšia časť uvádza príklady riešenia týchto systémov u konkrétnych pohonných jednotiek. V závere práce sa nachádza zamyslenie nad možným budúcim vývojom v tejto oblasti.

KLÍČOVÉ SLOVÁ

Oxidy dusíka, výfukové plyny, redukcia oxidov dusíka, SCR, katalytický konvertor, EGR

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of reducing nitrogen oxides emissions in exhaust gases and explains the principles of their reduction. The main aim of the thesis is to analyse and describe systems that are designed to reduce their amount. The following chapter provides examples of solutions for these systems for specific drive units. At the end of the thesis, there is a reflection on possible future development in this sphere.

KEYWORDS

Nitrogen oxides, exhaust gases, reduction of nitrogen oxides, SCR, catalytic converter, EGR

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

DRÁBIK, M. *Systémy pro snižování množství oxidů dusíku ve výfukových plynech*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 30 s. Vedoucí bakalářské práce: Radim Dundálek.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 24. mája 2019

.....

Michal Drábik

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval Ing. Radimovi Dundálkovi, Ph.D. za odborné vedenie práce, cenné rady a pripomienky. Poďakovanie patrí aj rodičom a všetkým, ktorí ma podporovali pri písaní práce aj počas celého štúdia.

OBSAH

Úvod	9
1 Emisie výfukových plynov a ich regulácia.....	10
1.1 Zloženie výfukových plynov	10
1.2 Závislosť zloženia emisií na súčiniteli prebytku vzduchu	11
1.2.1 Zážihový motor	12
1.2.2 Vznětový motor	12
1.3 Emisné normy	13
2 Znižovanie množstva NO _x vo výfukových plynoch	15
2.1 Zážihový motor	15
2.1.1 Vnútoraná recirkulácia výfukových plynov	15
2.1.2 Katalyzátory	15
2.2 Vznětový motor	18
2.2.1 Vonkajšia recirkulácia výfukových plynov	19
2.2.2 Selektívna katalytická redukcia	21
3 Systémy u konkrétnych pohonných jednotiek.....	24
Záver	27

ÚVOD

Už v minulom storočí sme mohli pozorovať výrazný rast a rozvoj automobilového priemyslu a dopravy, čo prispelo k zvýšeniu mobility a zlepšeniu životnej úrovne ľudstva. Spolu so spomínaným rozvojom sa však prejavili aj negatívne účinky, ktoré súvisia so znečisťovaním životného prostredia. Za tento fakt sú zodpovedné výfukové plyny, prostredníctvom ktorých sa do ovzdušia dostáva vysoké množstvo škodlivých látok. Tieto látky prispievajú ku klimatickým zmenám a pri vyšších koncentráciách, ako napríklad vo veľkých mestách, môžu mať vplyv na zdravie človeka. Aby sa tieto negatívne dopady obmedzili, začali sa vydávať rôzne právne predpisy a emisné normy, ktoré stanovujú maximálne povolené množstvo škodlivín vo výfukových plynch. Aj vďaka týmto nariadeniam, ktoré sú pravidelne aktualizované, je nutné aby jednotliví výrobcovia automobilov prichádzali stále s novými a modernými riešeniami, ktoré pomôžu tento problém eliminovať.

Medzi škodlivé výfukové plyny radíme oxid uhoľnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), uhľovodíky (HC) a pevné častice (PM). Aby bol ich podiel v ovzduší čo najnižší, je potrebné využívať rôzne systémy a technológie, ktoré toto zníženie umožňujú, ako napríklad systém recirkulácie výfukových plynov, prítomnosť katalyzátorov alebo filtrov pevných častíc. Dôležitým faktorom pri produkcii emisií je aj kvalita spaľovacieho procesu a pohonných hmôt.

1 EMISIE VÝFUKOVÝCH PLYNOV A ICH REGULÁCIA

Hlavnou príčinou produkcie emisií v oblasti dopravy je nedokonalý proces spaľovania palív. Ich množstvo a zloženie je závislé na viacerých faktoroch, ako je napríklad druh motoru, jeho zdvihový objem, druh používaného paliva, spôsob jazdy vodiča, hustota premávky, alebo na použití zariadení a rôznych systémov, ktoré sú na znižovanie škodlivín z emisií priamo určené. Predpokladá sa, že koncentrácia emisií z motorovej dopravy vo veľkých mestách je až 10-násobne vyššia než koncentrácia emisií vznikajúcich z iných zdrojov. V snahe zlepšiť tento stav sa postupne pristúpilo k znižovaniu zdvihového objemu motorov (downsizing), tie sú však vďaka použitiu turbodúchadiel schopné vyvinúť maximálny výkon [6].

1.1 ZLOŽENIE VÝFUKOVÝCH PLYNOV

Pri dokonalom spaľovaní zmesi paliva a vzduchu vzniknú dokonalou oxidáciou oxid uhličitý (CO_2) a vodná para (H_2O). Reálny spaľovací proces je však nedokonalý, tým pádom vznikajú aj látky nežiadúce, ktoré sú často škodlivé. Tieto látky zastupujú oxid uhoľnatý (CO), oxidy dusíka (NO_x), nespálené uhlíkovodíky (HC), oxid siričitý (SO_2) a pevné častice (PM) [7].

OXID UHOĽNATÝ (CO)

Oxid uhoľnatý je jedovatý plyn bez chuti a zápachu, ktorý má tendenciu viazať sa v krvi na hemoglobín a vytvárať tak karboxyhemoglobín. Tým zabraňuje transportu kyslíku z pľúc do krvného obehu a dochádza k poškodeniu orgánov. Vdýchnutím CO najviac trpí srdce, cievy a nervový systém [5].

OXID UHLIČITÝ (CO_2)

Oxid uhličitý je stabilný, bezfarebný plyn bez zápachu. Vzniká pri dokonalej oxidácii a jeho prítomnosť v spalinách vypovedá o kvalítom prevedení spaľovacieho procesu. Pre človeka nie je v bežných koncentráciách vdychovaného vzduchu škodlivý, ale je nutné podotknúť, že CO_2 patrí medzi plyny podieľajúce sa na vzniku skleníkového efektu [8].

OXIDY DUSÍKA (NO_x)

K oxidom dusíka prítomným vo výfukových plynch zaradujeme oxid dusnatý (NO). Jedná sa o pomerne málo škodlivý plyn, ktorý však následne v atmosfére oxiduje na oxid dusičitý (NO_2). Vdýchnutím čo i len malého množstva NO_2 sa vystavujeme riziku poškodenia dýchacích ciest, čo sa môže prejaviť zápalom sliznice alebo pocitom dusenia. Ďalšou negatívnou vlastnosťou NO_x je ich podiel na tvorbe smogu a kyslých dažďov. Vznik NO_x je podmienený hlavne vysokými teplotami a dostatočným obsahom kyslíka O_2 v spaľovacom priestore, pričom dochádza k oxidácií dusíka N_2 na NO_x [8].

UHLĽOVODÍKY (HC)

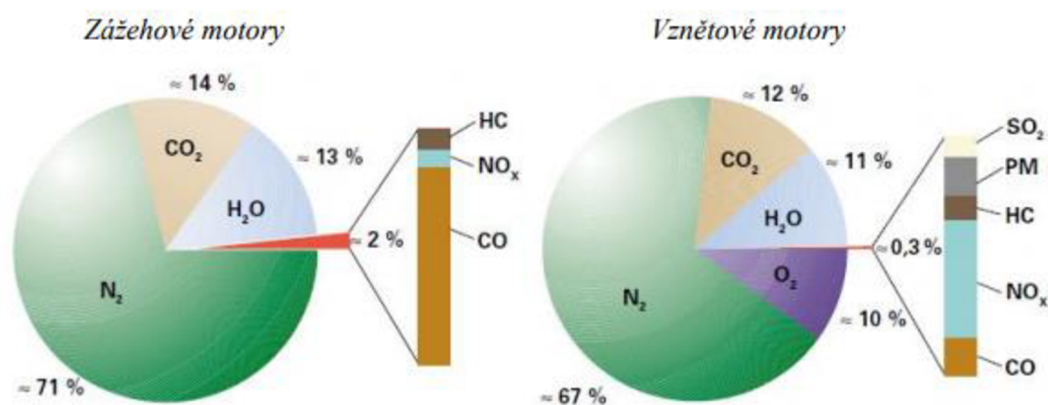
Nespálené uhľovodíky predstavujú zlúčeniny nespáleného alebo len čiastočne spáleného paliva vo výfukových plynoch, v dôsledku predčasne ukončených oxidačných reakcií. Pod týmto pojmom si môžeme zároveň predstaviť aj zlúčeniny, ktoré vznikli vďaka termochemickým reakciám počas spaľovania. Pri kombinácii s ostatnými zložkami výfukových plynov dochádza ku vzniku nebezpečných, často až karcinogénnych látok. Za najnebezpečnejšie pre zdravie človeka sa považujú polycyklické aromatické uhľovodíky (PAH) [8].

OXID SIRIČITÝ (SO₂)

Oxid siričitý je jedovatý plyn, ktorý je špecifický svojím štipľavým zápachom. Jeho vznik pramení zo zlučovania síry, obsiahnutej v palive a kyslíka z nasávaného vzduchu. Je známe, že za produkciu SO₂ sú zodpovedné najmä vznetrové motory a v súčasnosti je možné pozorovať klesajúci trend obsahu síry v motorovej naftě, tým pádom sa znižuje celkový dopad tejto emisie na životné prostredie [5].

PEVNÉ ČASTICE (PM)

Pevné častice sú škodlivinou, ktorej výskyt zaznamenávame u vznetrových motorov. Ich hlavnou zložkou je primárny uhlík (takmer 75 %). Ďalej sa v nich nachádza malé množstvo sulfátov, dusíka, vody a iných neidentifikovateľných zložiek. Tvorba primárneho uhlíka nastáva pri spaľovaní neodparených kvapiek paliva v prostredí s vysokou teplotou a pri extrémne nízkom obsahu kyslíka. Množstvo PM závisí na kvalite rozprášenia paliva v priebehu vstrekovania do valca [8].



Obr. 1 Zloženie výfukových plynov spaľovacích motorov [9]

1.2 ZÁVISLOSŤ ZLOŽENIA EMISÍ NA SÚČINITELI PREBYTKU VZDUCHU

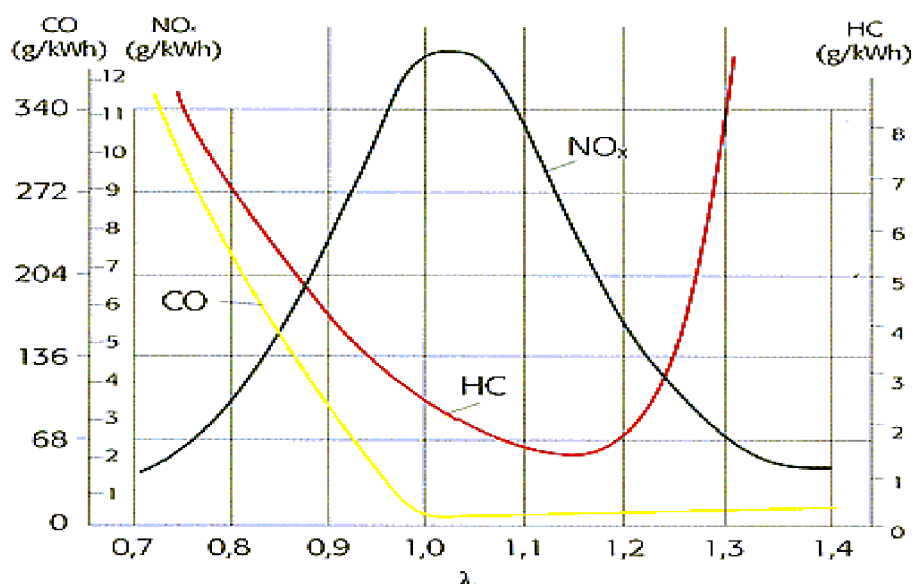
Na ideálne spálenie 1 kg paliva bez vzniku škodlivých látok je potrebné priviesť presne určené množstvo vzduchu. Tento pomer je označovaný ako stechiometrický zmiešavací

pomer, ktorý je v prípade zážihových motorov rovný 1:14,7. To znamená, že množstvo vzduchu potrebné k ideálnemu spáleniu 1 kg benzínu je 14,7 kg. Stechiometrický zmiešavací pomer vznetrových motorov je 1:14,5 [6].

Súčiniteľ prebytku vzduchu λ udáva, koľkokrát viac vzduchu je v zmesi v porovnaní s ideálnym stavom. Hodnota $\lambda > 1$ charakterizuje prebytok vzduchu a nedostatok paliva, tým pádom sa jedná o chudobnú zmes. Naopak bohatá zmes je určená hodnotou $\lambda < 1$, čiže sa jedná o nedostatok vzduchu a prebytok paliva. V prípade presne stechiometrického pomeru zmesi je $\lambda = 1$ [10].

1.2.1 ZÁŽIHOVÝ MOTOR

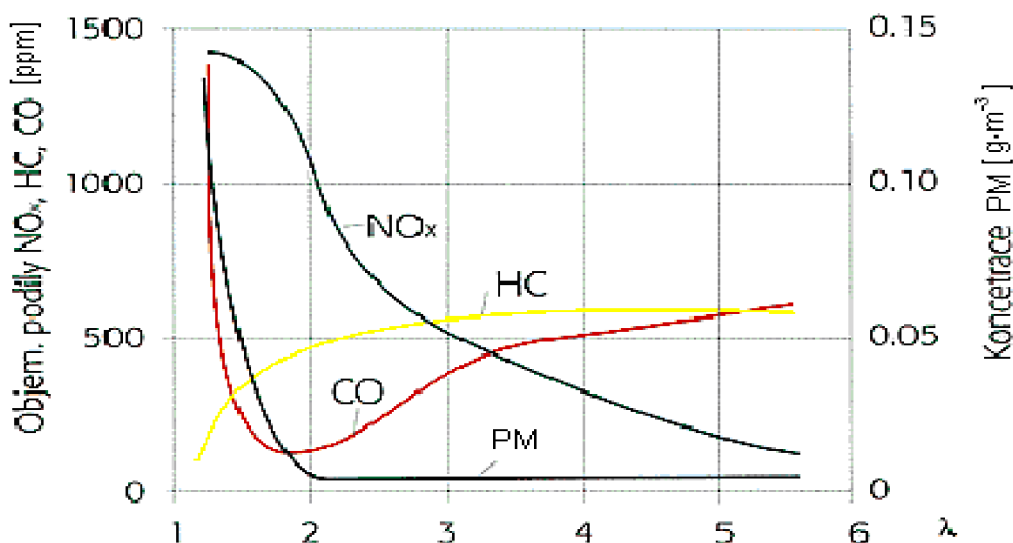
V priebehu reálneho spaľovacieho procesu pri inej hodnote λ než 1 nedochádza k úplnej oxidácii na CO_2 ani ku dokonalému spáleniu uhľovodíkov. Taktiež je možné pozorovať tvorbu oxidov dusíku zlučovaním voľného dusíka s kyslíkom. Zaujímavosťou je, že krivka závislosti emisií na súčiniteli prebytku vzduchu je pre NO_x opačná ako krivka pre HC a CO. Maximálne množstvo emisií NO_x je možné pozorovať pri spaľovaní chudobných zmesí, konkrétne v okolí hodnoty $\lambda = 1,05$. Najvyšší výkon motor dosahuje pri mierne obohatenej zmesi, zhruba pri $\lambda = 0,85$ [1].



Obr. 2 Zloženie emisií u zážihového motora v závislosti na súčiniteli prebytku vzduchu λ [8]

1.2.2 VZNETOVÝ MOTOR

Vznetový motor funguje s prebytkom vzduchu ($\lambda > 1$). Tento prebytok sa odvíja od aktuálneho režimu, v ktorom sa motor nachádza. Jeho hodnota sa pohybuje od $\lambda = 5$ a viac, pri malých zaťaženiach a chode naprázdno, až do $\lambda = 1,25$ pri plnom zaťažení. Nebezpečnými produktmi spaľovania tohto druhu motora sú okrem látok spomenutých pri zážihových motoroch aj ďalšie zložky, predovšetkým pevné častice a oxidy síry [4, 2].



Obr. 3 Zloženie emisií u vznetového motora v závislosti na súčiniteli prebytku vzduchu λ [8]

1.3 EMISNÉ NORMY

V nedávnej minulosti sme boli svedkami rýchleho rozvoja a rastúceho trendu výroby v automobilovom priemysle, ktorý sa zachoval dodnes. Dlhodobým následkom tohto vzostupu sa však stalo stúpajúce riziko znečistenia ovzdušia. Z dôvodu ochrany životného prostredia a zdravia človeka bolo nutné zaviesť a postupne sprísňovať emisné predpisy, ktoré priamo regulujú povolené množstvo škodlivín vo výfukových plynch. Takto regulovanými emisiami sú oxid uhoľnatý (CO), uhľovodíky (HC), oxidy dusíka (NO_x) a pevné častice (PM) [7].

Ako prvá bola v Európe prijatá norma EHK 15 v roku 1971. Tá sa postupom času upravovala, až kým v roku 1992 neprišla do platnosti norma s označením Euro 1, platná pre všetky členské štáty EÚ. V praxi predstavuje maximálne povolené hodnoty škodlivín unikajúcich do ovzdušia zo zážihových a vznetových motorov v závislosti hmotnosti škodlivín na urazenej vzdialenosti. Poradie noriem je pri osobných automobiloch označované arabskými číslicami, pri nákladných vozidlách a autobusoch rímskymi číslicami. Okrem toho je v platnosti norma Stage, určená pre mimocestné vozidlá na území EÚ. Tie sú rozdelené do kategórií podľa výkonu [7, 4].

Tab. 1 Emisné limity osobných motorových vozidiel [11]

Norma	Platnosť od	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
		[g/km]				
Zážihové motory						
Euro 1	1992	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	1996	2,2	-	0,5	-	-
Euro 3	2000	2,3	0,2	-	0,15	-
Euro 4	2005	1	0,1	-	0,08	-
Euro 5	2009	1	0,1	-	0,06	0,005
Euro 6	2014	1	0,1	-	0,06	0,005
Vznetové motory						
Euro 1	1992	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2	1996	1	-	0,7	-	0,08
Euro 3	2000	0,64	-	0,56	0,5	0,05
Euro 4	2005	0,5	-	0,3	0,25	0,025
Euro 5	2009	0,5	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	2014	0,5	-	0,17	0,08	0,005

Meranie emisií osobných automobilov využívalo viacero testovacích cyklov. Cyklus NEDC (New European Driving Cycle), používaný od roku 2000, bol z dôvodu nedostatočného dosahovania reálnych jazdných podmienok, odlišnej spotreby paliva a produkcie emisií nahradený v septembri roku 2018 novou testovacou metódou WLTP (Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Procedure). Tá je založená na meraní štyroch fáz rýchlostí na valcovom dynamometri po studenom štarte (do 60, do 80, do 100 a nad 130 km/h), pri priemernej rýchlosti 47 km/h. Celý jazdný cyklus WLTP trvá približne 30 minút a testovacia dráha je dlhá 23 km. Začiatkom roku 2020 sa plánuje prijatie ďalšieho sprísneného testovacieho režimu RDE (Real Drive Emission) [12, 13].

2 ZNIŽOVANIE MNOŽSTVA NO_x VO VÝFUKOVÝCH PLYNOCH

Ako bolo vyššie spomínané, vysoká teplota a tlak pri spaľovaní sú hlavnými činiteľmi pri oxidácii dusíka N₂ na jeho oxidy NO_x, ktoré majú negatívny dopad na človeka aj prírodu. Aby bolo množstvo tejto škodliviny, rovnako ako množstvo ostatných emisií, čo najviac minimalizované, pristupuje sa k rôznym konštrukčným a technickým úpravám. Tieto úpravy môžeme pozorovať už pri tvorbe spaľovanej zmesi, kedy sa jedná o takzvané opatrenia pred motorom. Ďalej sú vývojári schopní ovplyvniť priebeh spaľovania (opatrenia pri motore) a na záver dodatočne zredukovať množstvo exhalátov prostredníctvom opatrení za motorom [8].

2.1 ZÁŽIHOVÝ MOTOR

Pre dosiahnutie čo najväčšieho zníženia obsahu škodlivín je dôležité zamerať sa na dokonalé rozprášenie a premiešanie optimálneho množstva paliva so vzduchom. Tým sa stanoví presná hodnota súčiniteľa prebytku vzduchu λ , ktorá sa musí dodržiavať. Ďalším ovplyvniteľným faktorom je voľba kompresného pomeru. Čím je tento pomer nižší, tým sú nižšie maximálne teploty spaľovania a to sa prejaví zníženou tvorbou NO_x [8, 3].

2.1.1 VNÚTORNÁ RECIRKULÁCIA VÝFUKOVÝCH PLYNOV

Recirkuláciu výfukových plynov rozdeľujeme na vnútornú a vonkajšiu. Vnútnú je možné využívať prevažne pri zážihových, vonkajšiu prevažne pri vznetrových motoroch. Z toho dôvodu sa práca bude venovať najskôr vnútornej recirkulácii a vonkajšej následne v podkapitole o vznetrových motoroch. Je však potrebné uvedomiť si, že obe možnosti recirkulácie sú využiteľné rovnako pri zážihových, tak aj pri vznetrových motoroch.

Metódu recirkulácie výfukových plynov označujeme ako EGR (Exhaust Gas Recirculation). Základom je zmiešanie nasávaného vzduchu s časťou výfukových plynov, ktoré spoločne s palivom prechádzajú procesom spaľovania. Tieto plyny sa spaľovania nezúčastňujú a chovajú sa v zmesi ako inertný plyn, avšak preberajú časť tepla uvoľňovaného pri horení. Tým sa redukuje maximálna teplota horenia a tiež aj množstvo emisií NO_x [2].

Vnútna recirkulácia závisí na prekrytí otvorenia výfukového a sacieho ventilu v okamihu výmeny obsahu valca. V momente, keď piest prechádza do hornej úvrati odchádza časť spalín do sania, pretože sací ventil je už otvorený. Podobne pri presune piestu do dolnej úvrate je možné pozorovať nasávanie častí výfukových plynov, ktoré je zapríčinené ešte stále otvoreným výfukovým ventilom. Vo valci tak evidujeme stále zvýšené množstvo spalín. Systém má nízke nároky na zástavbový priestor a je finančne nenáročný [2].

2.1.2 KATALYZÁTORY

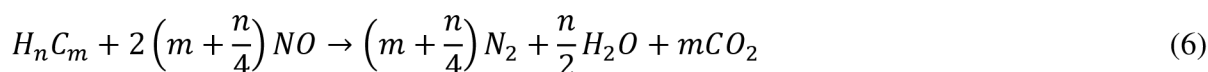
Katalyzátory, alebo katalytické konvertory sú zariadenia určené na znižovanie emisií vo výfukových plynov. Z chemického hľadiska sa jedná o látky, ktoré ovplyvňujú priebeh chemických reakcií bez toho, aby dochádzalo k ich premene. Pri týchto reakciách dochádza k premene produktov nedokonalého spaľovania (CO, HC, NO_x) na menej škodlivé, až neškodné látky, prostredníctvom oxidácie a redukcie. Aby tento proces prebiehal čo najlepšie,

musí byť zabezpečené správne množstvo a zloženie spalín. To je možné dosiahnuť pri stechiometrickom spaľovacom pomere. Automobilové katalyzátory sú charakteristické obsahom vzácnych kovov (platina, ródium), ktoré sú nanosené na špeciálny keramický materiál. Platina je využívaná ako oxidačná časť, ródium ako redukčná. Katalyzátory sa delia na oxidačné, redukčné a trojcestné. Použitie oxidačného katalyzátora prakticky nemá vplyv na znižovanie oxidov dusíka [14].

Oxidácia prebieha podľa rovníc:



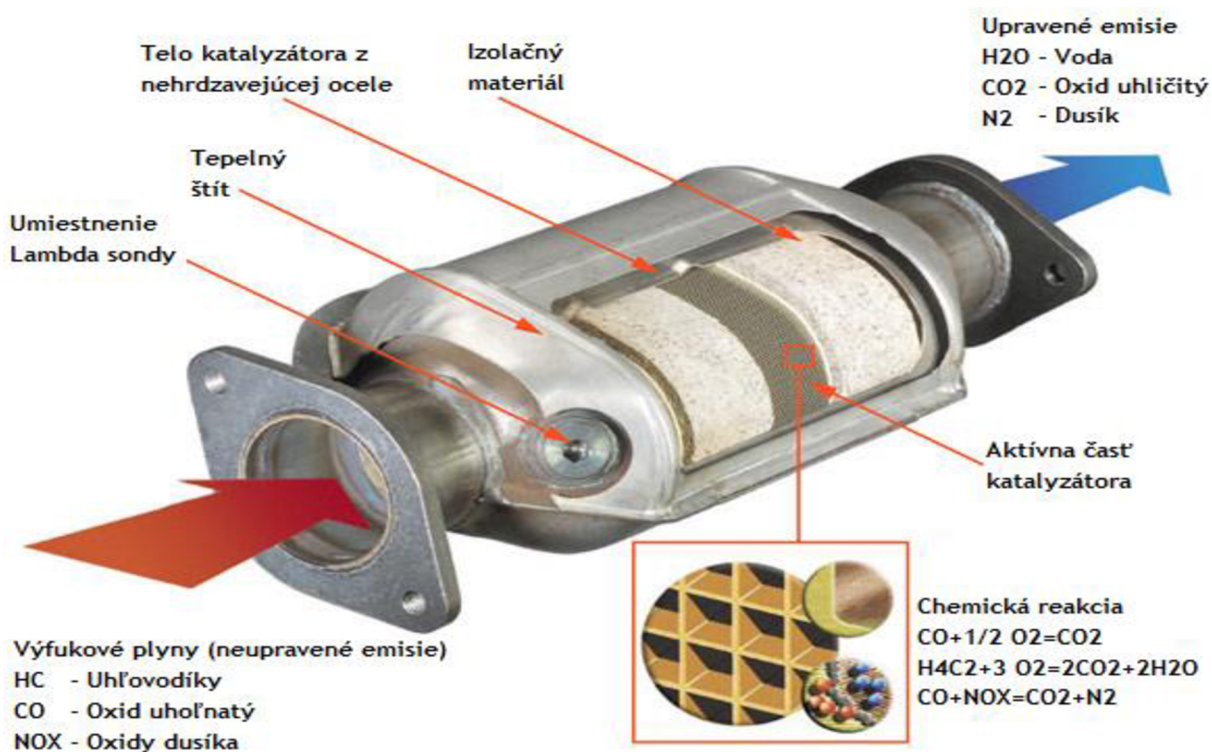
Redukcia prebieha podľa rovníc:



TROJCESTNÝ KATALYZÁTOR

Trojcestný katalyzátor je prístroj, pomocou ktorého je možné účinne znižovať všetky tri hlavné zložky (CO, HC, NO_x) škodlivých výfukových plynov zároveň. Hlavným predpokladom jeho správnej činnosti je to, aby zloženie zmesi bolo čo najbližšie k stechiometrickému pomeru, kedy súčiniteľ prebytku vzduchu $\lambda = 1$. Len pri tomto zložení katalyzátor dosahuje vysokú mieru účinnosti, pretože vo výfukových plynach je dosť kyslíka na oxidáciu a rovnako sú prítomnosťou dostatočného obsahu CO a HC vytvorené vhodné podmienky na redukciu oxidu dusnatého. Keďže pomer $\lambda = 1$ je pomerne obtiažne udržať, umiestňuje sa pred katalyzátor lambda sonda, ktorá slúži na meranie množstva kyslíka v spalínach. Od toho sa potom odvíja množstvo dodávaného paliva [2].

Spojenie trojcestného katalyzátora s reguláciou lambda (riadený trojcestný katalyzátor) predstavuje vysoko účinný systém na znižovanie emisií a využíva ho väčšina sériovo vyrábaných vozidiel. Účinnosť premeny škodlivých látok, na látky ktoré sú pre ovzdušie prijateľnejšie dosahuje hodnôt 94 až 98 %. Účinnosť katalyzátora, ktorý lambda sondu nevyužíva je nižšia, približne na úrovni 60 % [6].



Obr. 4 Konštrukcia a princíp činnosti trojcestného katalyzátora [14]

Trojcestný katalyzátor sa skladá z telesa (nosiča) obsahujúceho aktívne katalytické vrstvy a plechového krytu, ktorý ho chráni pred mechanickým poškodením. Používané sú dva druhy nosičov, konkrétne keramické a kovové. Keramické nosiče (monolity) sú telesá vyrobené z keramiky, na povrchu ktorých sa nachádza množstvo drobných kanálov. Na tých sú nanosené aktívne katalytické vrstvy a prúdia cez ne výfukové plyny. Kovové nosiče majú využitie hlavne v blízkosti motora ako predradené katalyzátory. V porovnaní s keramickými sú kvalitnejšie, avšak v dôsledku vysokej ceny sú menej používané. Obidva druhy monolitov sú opatrené vrstvou oxidu hlinitého (Al₂O₃), ktorá je prekrytá vrstvou z ušľachtilých kovov [2].

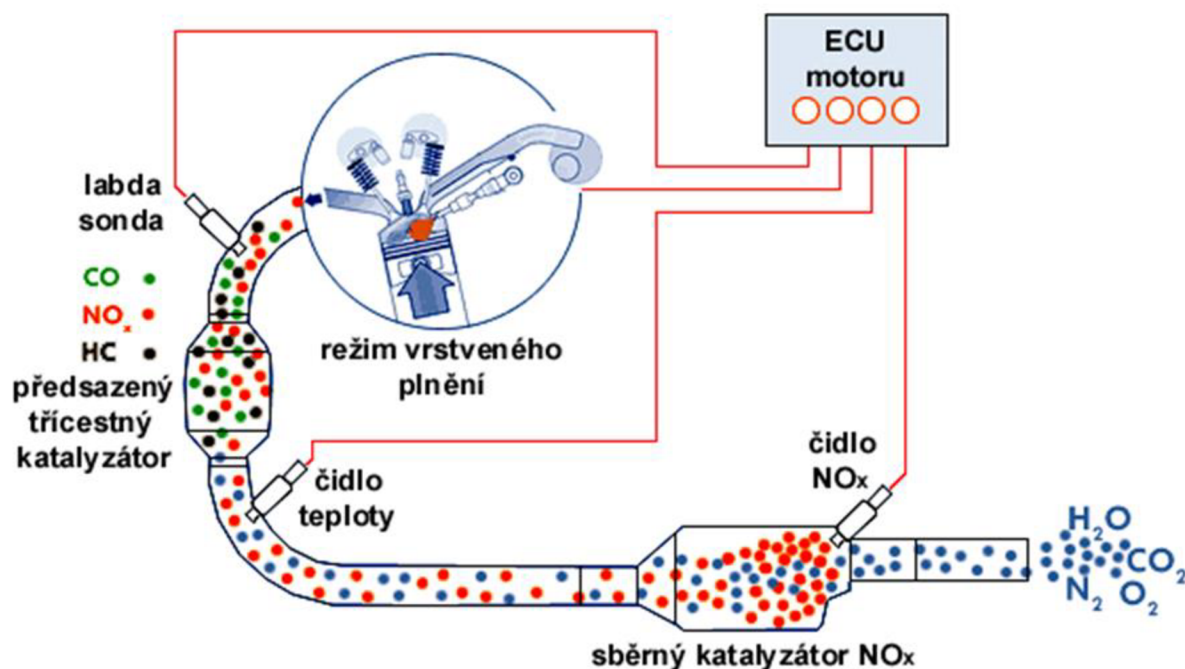
ZÁSOBNÍKOVÝ KATALYZÁTOR NO_x

Zásadným princípom fungovania je zachytávanie oxidov dusíka v zásobníku a jeho následná regenerácia. Zásobníkový katalyzátor sa používa pri zážihových motoroch s priamym vstrekom paliva, označovaných ako FSI (Fuel Stratified Injection). Tieto motory sa vyznačujú tým, že pracujú s prebytkom vzduchu a tak je pre ne trojcestný katalyzátor málo účinný. Okrem toho sa tento systém využíva aj pri vznetrových motoroch [15].

Konštrukcia zásobníkového katalyzátora je tvorená nosičom z keramického, prípadne kovového monolitu, rovnako ako pri trojcestnom katalyzátore. Na ich povrchu sa ale nachádza okrem vrstiev platiny a ródia aj vrstva oxidu bárnateho (BaO), ktorý zachytáva a uchováva oxidy dusíka. Tie vďaka platine oxidujú na NO₂. Následná reakcia s kyslíkom a BaO spôsobuje vznik dusičnanu bárnateho Ba(NO₃)₂ [15].

Akonáhle v katalyzátore dôjde k naplneniu kapacity zásobníka, musí nastať fáza regenerácie. V tom momente riadiaca jednotka zvyšuje množstvo vstrekaného paliva a motor prechádza do režimu s bohatou zmesou. Procesom nedokonalého spálenia tejto zmesi sa zvyšuje podiel CO a HC vo výfukových plynoch. V prostredí so zvýšenou koncentráciou CO a HC sa dusičnany stávajú nestabilnými a rozpadnú sa na NO. Na záver prostredníctvom chemických reakcií vzniká N₂, CO₂ a H₂O. Po skončení regenerácie je katalyzátor znovu schopný ukladať NO_x. Priebeh regenerácie trvá len niekoľko sekúnd a opakuje sa približne po 1 až 3 minútach. Výhodou tohto systému je jeho nenáročnosť na údržbu a využitý priestor, naopak hlavnú nevýhodu vytvára zvýšená spotreba paliva, ktoré je potrebné pri regenerácii [15].

V praxi sa často využíva súčasné zapojenie trojcestného aj zásobníkového katalyzátora. Trojcestný je situovaný v blízkosti motora a až za ním je umiestnený katalyzátor, slúžiaci ako zásobník NO_x. Celá zostava je potom schopná pracovať v režime $\lambda = 1$ [6].



Obr. 5 Katalytický systém motoru FSI [8]

2.2 VZNETOVÝ MOTOR

Vznetové motory sú nebezpečnejšie z hľadiska obsahu NO_x vylučovaného prostredníctvom výfukových plynov do ovzdušia. Tieto motory sa vyznačujú tým, že palivo je dávkované v širokom rozsahu zmiešavacieho pomeru paliva so vzduchom a preto pri nich nie je možné využívať trojcestný katalyzátor. Využitie tu ale nachádza zásobníkový, alebo oxidačný katalyzátor, ktorý býva súčasťou zložitejších systémov v spolupráci s filtrom pevných častíc, prípadne s technológiou selektívnej katalytickej redukcie. Podobne ako pri zážihových motoroch aj pri vznetových sa proces znižovania množstva NO_x začína vhodnou prípravou zmesi, vhodným priebehom spaľovania a končí dodatočnou úpravou výfukových plynov. Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim tvorbu NO_x je kompresný pomer. Jeho zníženie vyvolá pokles teploty spaľovania a úbytok spomínaného druhu emisií, avšak táto úprava má aj svoju

negatívnu stránku. Tou je znížená termická účinnosť, ktorá má vplyv na zhoršené štartovanie motoru v chladnejších podmienkach [4, 3].

Ďalším faktorom je vstrekovanie paliva. To by malo byť do spaľovacieho priestoru rozprašované čo najjemnejšie, preto sa používajú vysokotlakové vstrekovače. Zároveň by sa palivo malo dostať aj do vzdialených častí, pričom je vhodné vyvarovať sa dopadaniu na povrch stien valca. Tento kontakt spôsobuje zvýšenie množstva HC a PM. Celkovú produkciu emisií ovplyvňuje okrem priebehu vstrelu aj jeho počiatok. Napríklad oneskorenie počiatku vstrekovania sa prejaví znížením množstva NO_x následkom nižšej spaľovacej teploty. V súčasnosti je vo veľkej miere stretávame s vysokotlakovým vstrekovacím systémom Common Rail s tlakovým zásobníkom. Tento systém pracuje s tlakom až 250 MPa a je presne riadený riadiacou jednotkou [2].

2.2.1 VONKAJŠIA RECIRKULÁCIA VÝFUKOVÝCH PLYNOV

Recirkulácia výfukových plynov, alebo EGR (Exhaust Gas Recirculation) zabezpečuje znižovanie emisií oxidov dusíka vznikajúcich pri vysokých teplotách spaľovania. Vonkajšia recirkulácia funguje na princípe spätného vedenia časti výfukových plynov do spaľovacieho priestoru, kde sa zmiešajú s nasávaným vzduchom a palivom. Podiel spalín privedených späť do sania sa pohybuje v rozsahu 10 až 20 % z objemu nasávaného vzduchu, čo umožňuje zníženie množstva NO_x až o 40 %. Odber spalín je realizovaný pomocou spätného vedenia s ventilom EGR, ktoré vytvára prepojenie medzi výfukovým a sacím potrubím. Otvorením ventilu vzniká podtlak, vďaka ktorému si sacie potrubie načerpá potrebné množstvo spalín z výfukového potrubia. Tie pri opakovanom procese spaľovania napomáhajú k zníženiu teploty horenia, čím prispievajú k nižšej tvorbe NO_x. Ak bude podiel recirkulovaných plynov v saní príliš veľký, začnú sa prejavovať negatívne dopady v podobe výrazného nárastu CO, HC a pevných častíc PM [16].

Ventil EGR je presne regulovaný pomocou riadiacej jednotky motora na základe jeho prevádzkových režimov. To znamená, že ventil býva otvorený vtedy, keď je motor zahriaty na prevádzkovú teplotu a pracuje v režime čiastočného zaťaženia. Spaľovanie bohatej zmesi, plné zaťaženie, alebo režim štartovania a následného zahrievania spôsobujú, že ventil EGR zostáva uzavretý a k recirkulácii nedochádza. Regulácia ventilu teda závisí na teplote, zaťažení a otáčkach motora [16].

Hlavné výhody tvorí účinnosť v oblasti znižovania množstva NO_x, jednoduchá inštalácia a nenáročnosť prevádzky systému (nie je nutné pridávať žiadne aditíva). K nedostatkom tohto systému patrí zanášanie sacieho potrubia rôznymi nečistotami z výfukových plynov. Tým sa znižuje jeho priechodnosť a celková životnosť. Negatívnym účinkom je aj čiastočné zníženie výkonu motora spôsobené nižším obsahom kyslíka v spaľovanej zmesi [16].

Podľa chladenia recirkulovaných plynov možno vonkajšiu EGR rozdeliť do troch skupín [17]:

- EGR bez ochladzovania
- EGR s plným ochladením
- EGR s čiastočným ochladením

V prípade recirkulácie bez ochladzovania spaliny neprechádzajú cez výmenník tepla a tým zvyšujú teplotu nasávaného vzduchu. Jedná sa o jednoduché riešenie, pri ktorom redukcia NO_x nedosahuje vysokých hodnôt [17].

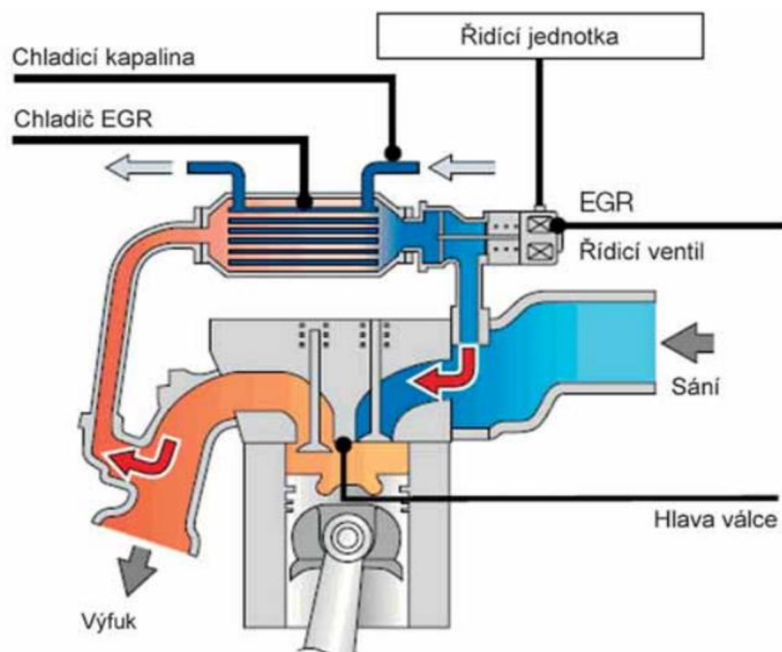
EGR s plným ochladením umožňuje výfukovým plynom prechod cez výmenník tepla, chladený vzduchom alebo vodou. Vysoká účinnosť je sprevádzaná komplikovanejším prevedením a hrozbou kondenzácie vody v potrubí [17].

Posledným typom je EGR s čiastočným ochladením. Pri tomto riešení iba časť výfukových plynov prechádza cez výmenník, vďaka čomu sa eliminuje hrozba kondenzácie a zachováva sa vysoká účinnosť. Nevýhodou sú vyššie náklady na realizáciu [17].

Z hľadiska miesta odberu spalín z výfukového potrubia rozlišujeme vysokotlakovú a nízkotlakovú recirkuláciu [4].

VYSOKOTLAKOVÁ RECIRKULÁCIA

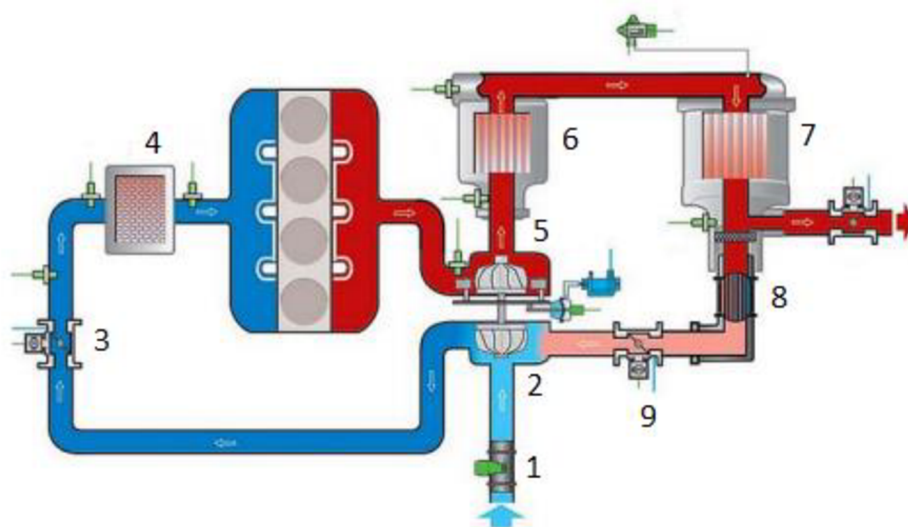
Pri vysokotlakovej recirkulácii sa odber spalín uskutočňuje v časti výfukového potrubia medzi motorom a turbínou turbodúchadla. Nasleduje proces ochladenia a presunu do sacieho potrubia, odkiaľ po zmiešaní s nasávaným vzduchom putujú do spaľovacieho priestoru. EGR ventil je umiestnený buď pred tepelným výmenníkom, alebo až za ním. Riadiaca jednotka motora v závislosti od jeho aktuálneho režimu vyhodnotí množstvo recirkulovaných spalín a otvára EGR ventil [4].



Obr. 6 Vysokotlaková recirkulácia výfukových plynov [17]

NÍZKOTLAKOVÁ RECIRKULÁCIA

Nízkotlaková recirkulácia sa odlišuje miestom odberu výfukových plynov, ktoré je situované až za turbínou turbodúchadla a prostriedkami určenými na ich dodatočnú úpravu (oxidačný katalyzátor, filter pevných častíc). Takto upravené spaliny nespôsobujú problémy so zanášaním potrubia. Výfukové plyny majú po prechode cez spomínané zariadenia nižšiu tlak a teplotu, takže nie je potrebné ochladzovať ich v takej miere, ako pri vysokotlakovej recirkulácii. V porovnaní s vysokotlakovou recirkuláciou umožňuje nízkotlakový systém prívod väčšieho množstva spalín, pri zachovaní rovnakej hodnoty súčiniteľa prebytku vzduchu λ . Vyššie množstvo spalín vyžaduje dostatočné množstvo čerstvého vzduchu, čo nie je problém zabezpečiť. Nevýhodou je pomerne komplikované prevedenie a kondenzácia vodných pár v medzichladiči výfukových plynov [4].



Obr. 7 Nízkotlaková recirkulácia výfukových plynov [18]

- 1) Prívod vzduchu, 2) Kompresorové kolo, 3) Škrtiaca klapka, 4) Medzichladič stlačeného vzduchu, 5) Turbínové kolo, 6) Oxidačný katalyzátor, 7) Filter pevných častí, 8) Medzichladič výfukových plynov, 9) EGR ventil

2.2.2 SELEKTÍVNA KATALYTICKÁ REDUKCIA

Selektívna katalytická redukcia (SCR) je ďalším zo systémov, ktoré spracovávajú výfukové plyny za účelom zníženia množstva NO_x. K tomu dochádza prostredníctvom chemických reakcií prebiehajúcich vo výfukovom potrubí. Tie sú vyvolané vstrekaním redukčnej kvapaliny s obchodným názvom AdBlue do výfukového potrubia. Postupnými reakciami vzniká amoniak (NH₃), ktorý následne reaguje s oxidmi dusíka a transformuje ich na vodnú paru a dusík [19].

Kvapalina AdBlue je tvorená syntetickou močovinou a demineralizovanou vodou. Presný obsah týchto zložiek je 32,5 % močoviny a 67,5 % demineralizovanej vody. Správne fungovanie celého systému SCR je podmienené čistotou roztoku AdBlue a jeho správnym skladovaním. Pri reálnej prevádzke musí byť vozidlo vybavené samostatnou nádržou, do ktorej sa AdBlue plní a dávkovacím mechanizmom na vstrekovanie do výfukových plynov.

Keďže pod teplotou -11 °C nastáva zamrznutie tohto redukčného činidla, je potrebné aby boli nádrž, aj vedenie ktorým AdBlue prúdi vyhrievané. Objem týchto nádrží sa líši a v závislosti od typu vozidla sa pohybuje približne od 8 do 30 litrov. Spotreba sa taktiež odvíja od viacerých faktorov, ako sú typ motora, alebo spôsob jazdy. Priemerná hodnota je približne 1 liter na 1000 km. Na nedostatok činidla v nádrži je vodič včas upozornený (zhruba 2500 km pred vyčerpaním). Toto upozornenie je sprevádzané postupným znižovaním maximálneho výkonu a maximálnych otáčok motora, až kým sa AdBlue znova nedoplní [15].

Vstrekovanie AdBlue do výfukových plynov je realizované do priestoru pred SCR katalyzátor. Pôsobením vysokých teplôt sa z roztoku odparuje voda, čo je nasledované rozkladom močoviny na amoniak vplyvom termolýzy a hydrolýzy. Rozklad prebieha ideálnym spôsobom v teplotnom rozmedzí od 250 °C do 360 °C [4].

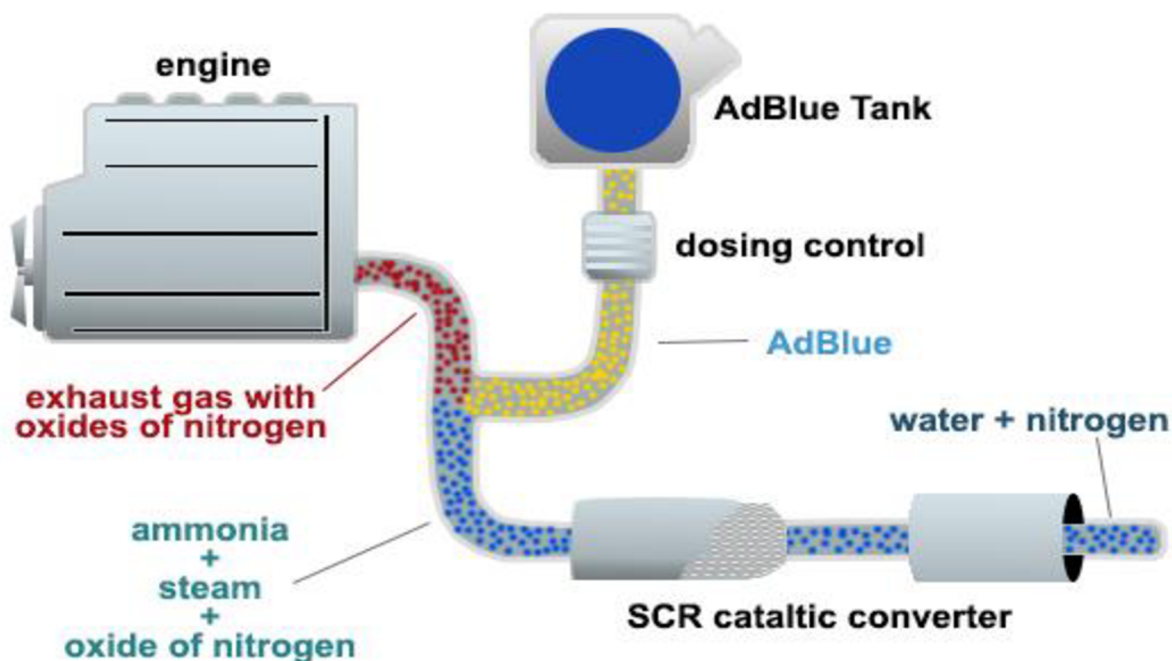
Prvou reakciou je termolýza. Prebieha ešte pred katalyzátorom a jej produktmi sú amoniak a kyselina izokyanatá (HNCO) [4].



Po nej prichádza na rad hydrolýza, ktorá nastáva až vo vnútri katalyzátora. Kyselina izokyanatá reaguje s vodnou parou za vzniku amoniaku a oxidu uhličitého [4].



V závere dochádza k spomínanej reakcii amoniaku s oxidmi dusíka a ich transformácii na vodnú paru a dusík [4].



Obr. 8 Popis systému SCR [20]

Roztok AdBlue nachádzajúci sa vo vyhrievanej nádrži je dávkovacím mechanizmom pripravený na vstrekovanie do výfukových plynov. Samostatná riadiaca jednotka vstrekovania vždy pripraví potrebné množstvo redukčného činidla v závislosti na množstve NO_x v spalinách. Proces závisí aj od výšky teploty, ktorá nesmie klesnúť pod 200 °C inak nie je systém funkčný. Emisie NO_x sú priebežne kontrolované za pomoci snímačov umiestnených pred aj za SRC katalyzátorom [4].

Proces SCR môže byť sprevádzaný taktiež nežiadúcimi chemickými reakciami. Príkladom je neselektívna reakcia amoniaku s voľným kyslíkom, ktorého je v systéme veľké množstvo. Tieto reakcie môžu podporovať tvorbu ďalších emisií, alebo spotrebúvať amoniak, čo sa vo výsledku negatívne odrazí na účinnosti procesu selektívnej katalytickej redukcie. Rovnako ani prítomnosť síry v motorovej naftě nemá pozitívny účinok a vplyvom jej spaľovania a následných reakcií môže urýchliť degradáciu celého systému [4].

Účinnosť SCR závisí na množstve vstrekovanej močoviny do výfukových plynov, rovnako ako na teplote prebiehajúcich chemických reakcií. Pri nedostatočnom množstve redukčného činidla je účinnosť redukcie NO_x nižšia. Pri jeho nadmernom vstrekaní sa močovina plne nespotrebuje a nastáva únik amoniaku do ovzdušia (ammonia slip). Z toho dôvodu je možné za systém SCR dodatočne umiestniť katalyzátor ASC (Ammonia Slip Catalyst), ktorý je schopný prevádzať zostávajúci amoniak na dusík [4].

Na fungovaní celého systému SCR je pozitívne hodnotená hlavne jeho vysoká účinnosť redukcie NO_x, ktorá za ideálnych podmienok dosahuje až 90 %. Negatívom je nutnosť inštalácie dodatočnej nádrže a jej pravidelného dopĺňania, z čoho vyplýva potreba väčšieho zástavbového priestoru a vyššie finančné náklady spojené s výrobou a prevádzkou [15].

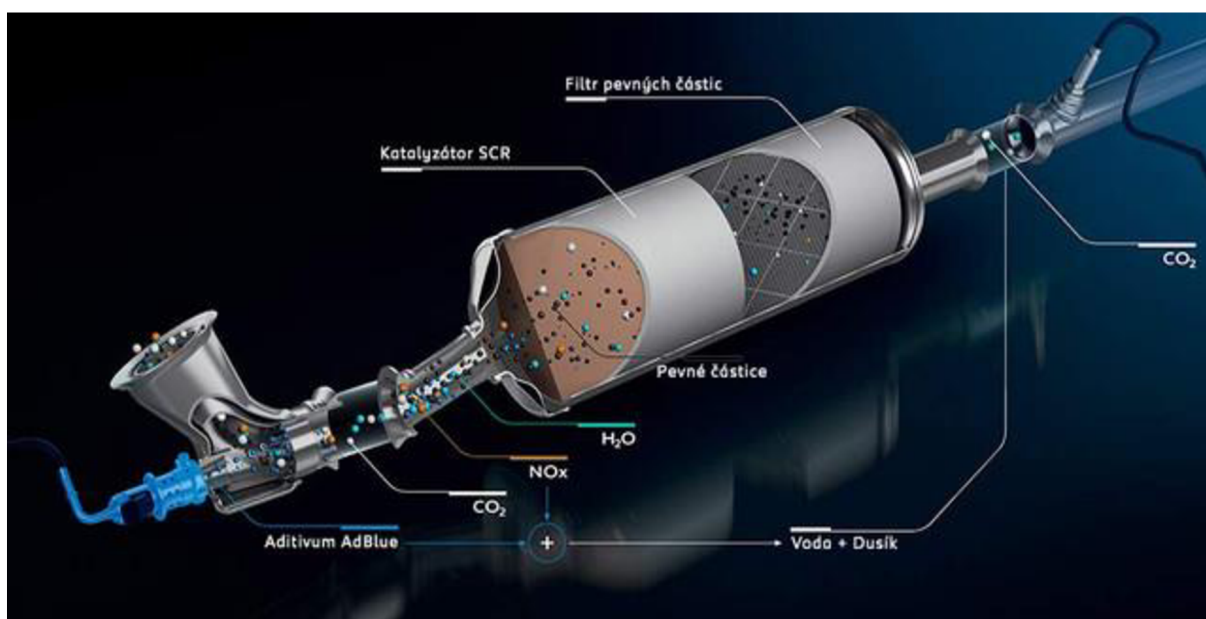
V súčasnosti je vo vývoji nová technológia, ktorá by mala zaručiť účinné fungovanie selektívnej katalytickej redukcie aj pri teplotách nižších ako 250 °C. Jej názov je ACCT (Ammonia Creation and Conversion Technology) [21].

3 SYSTÉMY U KONKRÉTNÝCH POHONNÝCH JEDNOTIEK

Aby bola redukcia oxidov dusíka čo najúčinnnejšia, je nutné na úpravu spalín využívať rôzne kombinácie vyššie uvedených komponentov. Tie sa v závislosti od daného výrobcu automobilov síce líšia, ale pri vznetrových motoroch je základ tvorený systémom SCR. V nasledujúcej časti práce je uvedená charakteristika niekoľkých v súčasnosti používaných technológií.

TECHNOLÓGIA BLUEHDI

Technológiou BlueHDi sú vybavené dieselové motory skupiny PSA. Z konštrukčného hľadiska sa jedná o spojenie systému SCR a filtra pevných častíc, pričom výfukové plyny cez ne prechádzajú v rovnakom poradí. Okrem toho sú tieto motory vybavené systémom Common Rail s priamym vstrekom paliva do spaľovacieho priestoru. BlueHDi v súčasnej dobe predstavuje jedno z najúčinnnejších riešení znižovania obsahu škodlivín. Množstvo eliminovaných oxidov dusíka je 90 % a v prípade pevných častíc sa táto hodnota šplhá až na 99,9 %. Automobilky Peugeot a Citroën spadajúce pod skupinu PSA zaraďujú motory BlueHDi do svojich modelov od roku 2013. Napríklad Peugeot používa pohonné jednotky 1.6 BlueHDi a 2.0 BlueHDi, ktoré poháňajú širokú škálu modelov (medzi ne patria napríklad 208, 308, 508, Partner, alebo Boxer) [22, 23].



Obr. 9 Konštrukcia systému BlueHDi [22]

BLUEPERFORMANCE

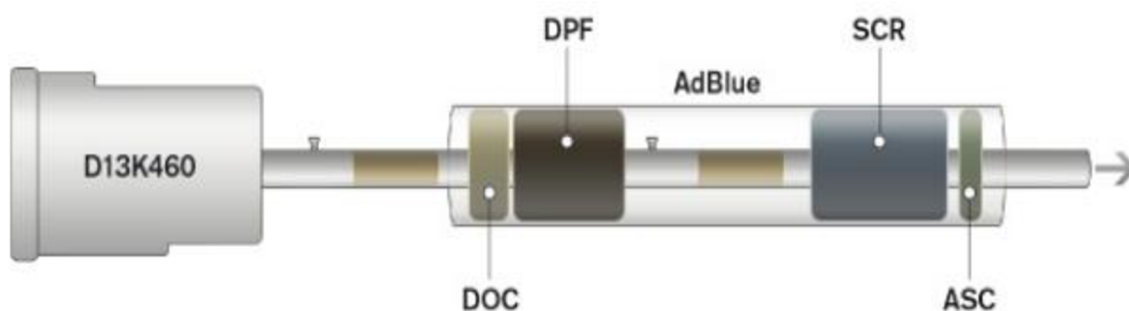
Pojem BluePerformance predstavuje technológiu využívanú automobilkou BMW. Na znižovaní obsahu NOx sa v tomto prípade podieľa zberný katalyzátor NOx. Niektoré modely sú vybavené aj katalyzátorom SCR so vstrekom AdBlue. Samozrejme v systéme nesmie chýbať filter pevných častíc, ktorý je pre vznetrové motory povinný. Technológiou BluePerformance disponuje väčšina sériovo vyrábaných modelov značky BMW [24].

BLUE INJECTION

Alternatívou týchto technológií môže byť napríklad riešenie automobilky Opel. Nazýva sa Blue Injection a tiež sa zakladá na selektívnej katalytickej redukcii. Je umiestnené napríklad v modeli Zafira Tourer pri použití dieselového agregátu 1.6 CDTI ECOTEC, ktorý je známy svojou nízkou spotrebou a nízkou emisnou záťažou pre životné prostredie [25].

TECHNOLÓGIA SPOLOČNOSTI VOLVO TRUCKS

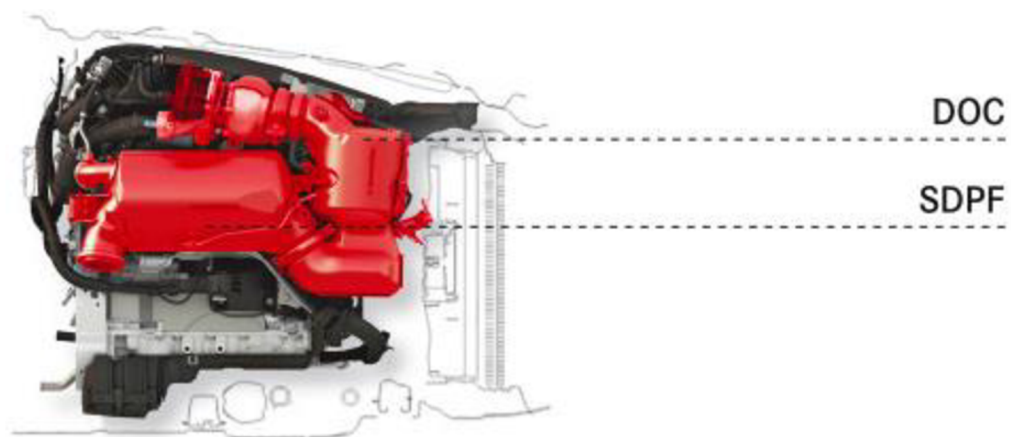
Uvedenú technológiu môžeme detailne popísať napríklad pre príklad usporiadania dodatočnej úpravy výfukových plynov motora Volvo D13K460. Ide o 13 litrový šesťvalec, disponujúci výkonom 460 koní. Obsah NO_x je znižovaný systémom EGR bez ochladzovania, po ktorom nasledujú ďalšie dodatočné úpravy. Tie pozostávajú z prechodu dieselovým oxidačným katalyzátorom DOC (Diesel Oxidation Catalyst), filtrom pevných častíc (DPF), katalyzátorom SCR a na záver katalyzátorom ASC. Posledný spomínaný komponent slúži na odstránenie zvyšného amoniaku, v prípade že nedošlo k úplnej redukcii v katalyzátore SCR. Všetky diely sú situované v jednom tele tlmiča výfuku. Okrem NO_x tento systém pomáha znižovať emisie CO, HC a PM [7, 26].



Obr. 10 Usporiadanie systémov dodatočnej úpravy výfukových plynov motora Volvo D13K460 [7]

TECHNOLÓGIA AUTOMOBILKY MERCEDES-BENZ

Nemecká automobilka Mercedes-Benz v roku 2016 predstavila spoločne s modelom E 220d aj nový štvorvalcový vznetrový motor OM 654. Ten je z konštrukčného hľadiska výnimočný tým, že všetky komponenty na dodatočné čistenie výfukových plynov má umiestnené priamo na motore. Je vybavený systémom EGR s kombinovaným vysokotlakovým a nízkotlakovým vedením spalín. Ďalšie komponenty sú DOC, SCR katalyzátor a filter pevných častíc [27].



Obr. 11 Schéma motora OM 654 [27]

DOC – oxidačný katalyzátor; SPDF – filter pevných častíc v spojení so systémom SCR

ZÁVER

V práci boli rozobraté škodlivé zložky výfukových plynov, s ktorými úzko súvisí nutnosť ich regulácie. V ďalšom kroku boli vymenované a konštrukčne popísané jednotlivé systémy, určené na znižovanie množstva oxidov dusíka vo výfukových plynoch. Posledná časť následne uvádzala praktické využitie spomínaných systémov pri konkrétnych pohonných jednotkách. Práca však neuvádza detailnejší popis niektorých komponentov, ktoré sú v práci viackrát spomenuté, pretože priamo neznižujú emisie oxidov dusíka a tvoria iba súčasť zložitejších systémov dodatočnej úpravy spalín. Takýmto príkladom je filter pevných častíc.

Systémy dodatočnej úpravy výfukových plynov sú síce z hľadiska znižovania obsahu oxidov dusíka pomerne účinné, ale nie každý spotrebiteľ je ich zástancom. Predmetom kritiky je najmä vysoká cena niektorých zariadení, prípadne náročnosť na údržbu. Niektorí odborníci dokonca vyjadrujú pochybnosti, či procesy súvisiace s vývojom a výrobou týchto komponentov nie sú spojené s ešte vyššou záťažou na životné prostredie. Pravdou však je, spaľovacie motory sú čoraz čistejšie a ekologickejšie v porovnaní s nedávnou minulosťou.

Na rok 2020 je v rámci novej emisnej normy naplánované zavedenie limitného množstva oxidu uhličitého, ktoré je stanovené na hodnotu 95 g/km. To zodpovedá spotrebe 3,54 l nafty, prípadne 4,06 l benzínu na 100 km. Automobilky tak sú nútené vyvíjať komplikovanejšie technológie vedúce k zníženiu spotreby paliva, výsledkom čoho budú vyššie náklady na výrobu a vyššia predajná cena vozidla. Práve zavedenie tohto limitu by mohlo vo výraznejšej miere ovplyvniť budúci vývoj pohonných jednotiek, pretože dosiahnutie tejto hodnoty s použitím klasických pohonov bude pomerne obtiažne. Dá sa predpokladať, že toto obmedzenie podporí rozvoj alternatívnych pohonov vozidiel. Tie v súčasnosti v Českej republike využíva len 2,5 % vozidiel, avšak v najbližšom desaťročí sa očakáva citelný prírastok.

Prípadnou náhradou za vozidlá poháňané spaľovacími motormi by sa mohli stať elektromobily. Tie neprodukujú škodlivé emisie a ich dojazd na jedno nabitie je čoraz väčší. Je však potrebné uvedomiť si, čo je zdrojom elektrickej energie na ich pohon. Pokiaľ je vyrobená z fosílnych palív, prípadne z iného neobnoviteľného zdroja, je použitie elektromobilu za účelom zníženia emisií pomerne diskutabilné. Ekologicky prívetivejšou variantou je použitie elektrickej energie vytvorenej obnoviteľnými zdrojmi energie.

Ďalšou alternatívou môže byť pohon prostredníctvom palivových článkov. Ten predstavuje perspektívnu technológiu, ktorá sa momentálne nachádza vo vývoji. Pri ich činnosti nevznikajú škodlivé emisie, produktom je len vodná para. Najpoužívanejším palivom je vodík, vyrábaný procesom elektrolýzy vody. Negatívom technológie je jej finančná náročnosť.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] GSCHEIDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*, 2. vydání Praha: Sobotáles, 2002, 686 s. ISBN 80-85920-83-2.
- [2] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*, 1. vydání, Brno: Prof. Ing. František Vlk, DrSc, 2003. 578 s. ISBN 80-238-8756-4.
- [3] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. 9th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009, 794 s. ISBN 978-0-340-56822-4.
- [4] KARAFKA, Pavel. *Systém pro snížení NOX*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. David Svída, Ph.D.
- [5] ZMEK, Martin. *Snížování emisí ve výfukových plynech vznětových a zážehových motorů* [online]. Pardubice, 2012 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/49022/ZmekM_SnizovaniEmisi_PJ_2012.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Doprávní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Ing. Petr Jilek, DiS.
- [6] MIKULÁŠEK, Jan. *Emise vozidlových motorů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?./portal_zp.pl%3Fprehled=vyhledavani;podrobnosti_zp=26372;zp=26372;dinfo_jazyk=3;lang=cz. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Sedlák CSc.
- [7] MORAVČÍK, Ľubomír. *Smerovanie emisných predpisov cestných motorových vozidiel* [online]. 2014 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: http://perners-contacts.upce.cz/36_2014/Moravcik.pdf
- [8] ŠTĚTINA, Josef. *Studijní opory do předmětu Teorie spalovacích motorů* [online]. Prednášky vo formáte PDF.
- [9] ŠKODA AUTO A.S. *Škoda - Dílenská učební pomůcka: Emise, 43* [online]. [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: <http://manualy.autooo.eu/cs/skoda-manualy/296-skoda-dielenskeucebne-pomocky>
- [10] *Směšovací poměr a emise* [online]. [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: http://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2018/03/Smesovaci_pomer.pdf
- [11] Dieselnet. *Emission Standards* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>
- [12] Dieselnet. *Emission Test Cycles* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php

- [13] Seat. *WLTP: Nové štandardy pre hodnoty spotreby paliva* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.seat.sk/o-znacke-seat/co-je-to-wltp>
- [14] JANCO, Marcel. *Na čo slúži a ako funguje katalyzátor* [online]. 2011 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/na-co-sluzi-a-ako-funguje-katalyzator/>
- [15] Cars Service. *Močovina, SCR s AdBlue, oxidy dusika NOx, LNT katalyzátor* [online]. 2017 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.cars-service.sk/index.php/udrzba-auta/287-2017-02-27-10-53-32>
- [16] JANCO, Marcel. *EGR ventil, čo je to, ako funguje, poruchy* [online]. 2016 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.autorubik.sk/clanky/co-je-to-a-ako-funguje-egr-ventil/>
- [17] Vznětové motory vozidel. *Recirkulace výfukových plynů* [online]. 2014 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://static.booktook.cz/files/attachments/20849.pdf>
- [18] Volkswagen Group of America Inc. *The EA288 Diesel Engine Family* [online]. 2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://pics3.tdiclub.com/data/517/820433_EA288.pdf
- [19] MAŠEK, František. *Jak funguje systém SCR pro snižování emisí u dieselových motorů?* [online]. 2017 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/aktuality/jak-funguje-system-scr-pro-snizovani-emisi-u-dieselovych-motoru.html>
- [20] AdBlue. *What diesel vehicle owners need to know* [online]. 2016 [cit. 2019-05-14]. Dostupné z: <https://www.rix.co.uk/blog/2018/12/adblue-what-diesel-vehicle-owners-need-to-know/>
- [21] Technológie. *Svetová technológia znižuje škodlivé emisie nafty* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://slo.sciences-world.com/world-first-technology-reduces-harmful-diesel-emissions-28680>
- [22] Peugeot. *Motor BlueHDi: Zpracování výfukových plynů* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.peugeot.cz/znacka-technologie/inovace-a-technologie/efektivita/motory-bluehdi.html>
- [23] AUTODOC BLOG. *HDi, e-HDi, BlueHDi* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.autodoc.cz/info/hdi-e-hdi-bluehdi>
- [24] BMW. *BMW BluePerformance* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.autodoc.cz/info/hdi-e-hdi-bluehdi>
- [25] TRENKLER, Martin. *Nový Opel Zafira Tourer 1.6 CDTI* [online]. 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.autosportfoto.sk/spravodajstvo/clanok/novy-opel-zafira-tourer-1-6-cdti>

- [26] PAVLŮSEK, Ondřej. *Volvo Trucks: Nový motor Euro 6 (video)* [online]. 2012 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/volvo-trucks-novy-motor-euro-6-video-68171>
- [27] MIXMOTOR. *Budúcnosť dieselových motorov ukazuje nový štvorvalec Mercedes-Benz* [online]. 2016 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <http://mixmotor.eu/16039/buducnost-dieselovych-motorov-ukazuje-novy-stvorvalec-mercedes-benz>