



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

EMISNÍ SYSTÉMY OSOBNÍCH AUTOMOBILŮ  
SE VZNĚTOVÝM MOTOREM

AN AFTERTREATMENT SYSTEM FOR THE PASSENGER VEHICLES WITH A DIESEL  
ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Stráník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michael Böhm

BRNO 2022

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Daniel Stráník**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Michael Böhm**  
Akademický rok: 2021/22

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:

### **Emisní systémy osobních automobilů se vznětovým motorem**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Práce rešeršní povahy zaměřená na současná řešení emisních systémů vznětových motorů v osobních automobilech.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Popsat možné konfigurace emisního systému u moderního osobního automobilu se vznětovým motorem.

Pojednat o funkci a konstrukčním řešení jednotlivých komponent, jejich parametrech a řízení.

Zhodnotit dopad jednotlivých komponent na emise výfukových plynů a na spotřebu paliva.

Navrhnout vlastní možné úpravy a řešení z hlediska ekonomie a ekologie provozu.

V závěru vše zhodnotit a nastínit další možný vývoj v této oblasti.

#### **Seznam doporučené literatury:**

STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3rd edition. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. 641 s. ISBN 0768004950.

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. 794 s. ISBN 1-56091-734-2.

KÖEHLER, Eduard. Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors. 3. verb. Aufl. Braunschweig [u.a.]: Vieweg, 2002. 548 s. ISBN 3-528-23108-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou emisních systémů osobních automobilů se vznětovým motorem. Cílem práce je rozbor těchto systémů, popis jejich konstrukce i řízení, vysvětlení funkce a také určit jejich vliv na jednotlivé složky výfukových plynů a spotřebu paliva. V závěru práce je pak uveden návrh vlastní koncepce emisního systému.

## KLÍČOVÁ SLOVA

vznětový motor, emisní systémy, oxidační katalyzátor, filtr pevných částic, selektivní katalytická redukce, recirkulace spalin

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of emission systems of diesel engines. The aim of this work is to analyse these systems, describe their construction and their controlling, explain the function, and determine their effect on the individual components of exhaust gases and average fuel consumption. The work also contains own concept of aftertreatment.

## KEYWORDS

diesel engine, aftertreatment, oxidation catalyst, diesel particulate filter, selective catalytic reduction, exhaust gas recirculation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRÁNÍK, Daniel. *Emisní systémy osobních automobilů se vznětovým motorem* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139750>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michael Böhm.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Michaela Böhma a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Daniel Stráník

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Michaelu Böhmovi za cenné rady a připomínky při tvorbě mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Stráníkovi a Ing. Bedřichu Bodlákovi z firmy Iveco Bus a také Ing. Pavlu Zbořilovi za věnované materiály. Mé poděkování také patří Martinu Hurychovi za poskytnuté měření. Závěrem děkuji své rodině za velkou podporu a trpělivost po celou dobu mého studia.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Paliva pro vznětové motory .....	10
1.1 Motorová nafta .....	10
1.2 Biopaliva .....	12
1.3 Zemní plyn CNG a LNG .....	13
2 Spalování .....	14
2.1 Směšovací poměr .....	14
2.2 Tvorba směsi .....	15
2.3 Kompresní poměr .....	18
3 Emise vznětového motoru .....	19
3.1 Složení výfukových plynů .....	19
3.2 Normy Euro .....	20
3.3 Měření emisí .....	21
4 Opatření na motoru .....	25
4.1 Recirkulace výfukových plynů .....	25
5 Opatření za motorem .....	30
5.1 Oxidační katalyzátor .....	30
5.2 Filtr pevných částic .....	31
5.3 Experimentální měření filtru pevných částic .....	35
5.4 SCR katalyzátor .....	36
6 Moderní koncepce emisních systémů .....	38
6.1 Emisní systém vozidel BMW .....	38
6.2 Emisní systém Audi Q5 .....	39
6.3 Emisní systém IVECO .....	40
7 Zhodnocení poznatků .....	41
8 Návrh vlastní koncepce emisního systému .....	42
Závěr .....	44
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	51



## ÚVOD

Spalovací motor je tepelný stroj, který převádí chemickou energii uloženou v palivu na tepelnou energii. Tepelná energie je pak pístovými motory dále transformována prostřednictvím tlaku spalin na užitečnou práci.

Za historicky prvního tvůrce funkčního spalovacího motoru považujeme Francouze Lenoira. Ten v roce 1860 zkonstruoval motor poháněný svítiplynem [1]. O zkonstruování motoru na těžká paliva se pokoušel Rudolf Diesel. V roce 1892 získal patent na způsob práce a provedení svého motoru. Svůj první prototyp zkonstruoval v roce 1893 a byl poháněn uhelným prachem. O tři roky později přišel se svým druhým prototypem, který byl nejprve poháněný benzínem. Tento motor pak upravil na spalování petroleje. Rok 1897 se považuje za rok, kdy byl zkonstruován první vznětový motor. Byl to třetí prototyp Rudolfa Diesela. Jednalo se o čtyřdobý vznětový motor o výkonu 14,7 kW při 170 min<sup>-1</sup> a jeho účinnost se pohybovala okolo 26 %. Bohužel tyto motory byly velice rozměrné a těžké, proto se nedaly použít v menších vozidlech. Používaly se převážně v lodích a jako motory stacionární. Tento problém vyřešil v roce 1910 James McKechnie, který jako první zkonstruoval hydraulické vstřikovací čerpadlo. Vznětové motory bylo tedy možné použít i v jakémkoliv dalším vozidle. Hydraulickými vstřikovacími čerpadly se zabýval i Robert Bosch, který v roce 1927 spustil jejich sériovou výrobu. To byl počátek velkého rozmachu vznětových motorů [2].

Každý spalovací motor produkuje určité množství výfukových plynů. U vznětových motorů je sice podíl škodlivin ve výfukových plynech pouhých 0,3 %, ale s ohledem na množství vyráběných a již vyrobených vozidel je množství produkovaných škodlivin příliš vysoké, a tudíž je nutné tuto skutečnost náležitě řešit [3]. Pro zdokonalování samotného motoru už nezbývá mnoho prostoru. Jsme téměř na vrcholu ve vývoji spalovacích motorů, proto je nutné redukovat množství škodlivin právě emisními systémy, kterými se zabývá tato práce.

Prvním emisním systémem, který redukoval množství oxidů dusíku, byla recirkulace spalin. Po ní přišel oxidační katalyzátor. Tento systém snižoval množství CO a HC pomocí oxidace. O několik let později přišli vývojáři se systémem, který výrazně redukuje obsah PM ve výfukových plynech. Jedná se o filtr pevných částic. Poslední technologií, která je poměrně nová, je SCR katalyzátor. V tomto katalyzátoru probíhá selektivní katalytická redukce, která napomáhá ke snižování oxidů dusíku.

Jak bylo zmíněno výše, v této práci jsou uvedeny emisní systémy, které snižují množství škodlivin ve výfukových plynech u osobních automobilů se vznětovým motorem. Dále je zde popsána konstrukce a funkce těchto systémů a také jejich parametry, řízení a vliv na průměrnou spotřebu paliva. Na závěr práce jsou pak uvedeny příklady dnešních koncepcí a návrh koncepce inspirovaný technologiemi používanými v energetice, či námořní dopravě.

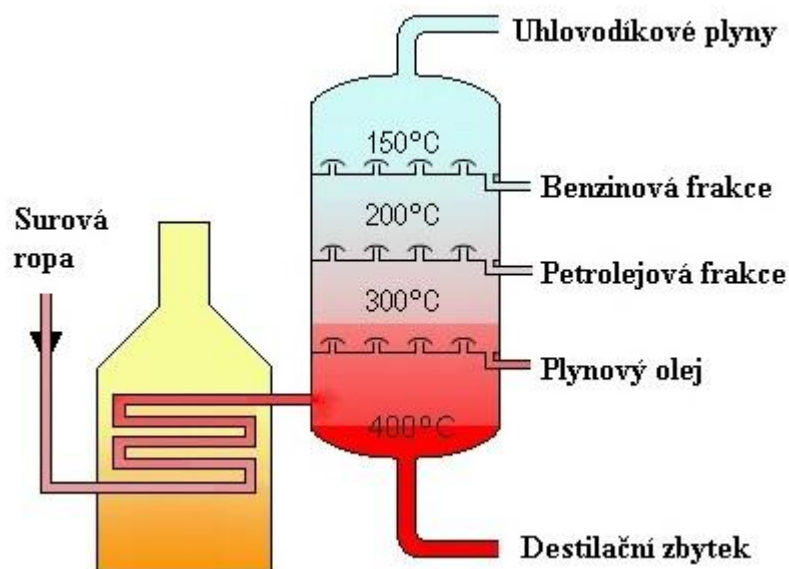
# 1 PALIVA PRO VZNĚTOVÉ MOTORY

Paliva pro vznětové motory se dělí na kapalná a plynná. Kapalná paliva lze modifikovat přidáním biosložek tak, že vzniknou směsná paliva. Biopaliva pak lze přímo vyrábět.

## 1.1 MOTOROVÁ NAFTA

Motorová nafta je nejpoužívanějším palivem, které lze spojit se vznětovými motory v osobních vozidlech. V roce 2019 bylo do České republiky dodáno 5,982 miliard litrů nafty [4]. Toto ovšem neodpovídá množství spotřebovanému osobními vozidly. Větší množství nafty spotřebují nákladní vozy či zemědělské stroje.

Motorová nafta je směs uhlovodíků vznikajících při frakční destilaci v rozmezí 150-380 °C [5]. Rozmezí teplot se v různých zdrojích může nepatrně lišit. Obrázek 1 ukazuje, kde se nachází petrolejová frakce, v této fázi vzniká právě motorová nafta. Jedná se o jednu z posledních fází frakční destilace.



Obrázek 1 Frakční destilace surové ropy; upraveno a převzato z [6]

Po frakční destilaci je možné získat z ropy ještě více nafty. Lze použít náročnější postupy jako je například hydrokrakování [5]. Do hydrokrakování vstupují velmi těžké oleje, které zbyly jako produkt frakční destilace. Z těchto olejů se získávají opět lehčí složky ropy a tím se docílí největšího možného využití surové ropy. Tento proces mění molekulární strukturu těžkých olejů a probíhá za velkých tlaků a teplot [5].

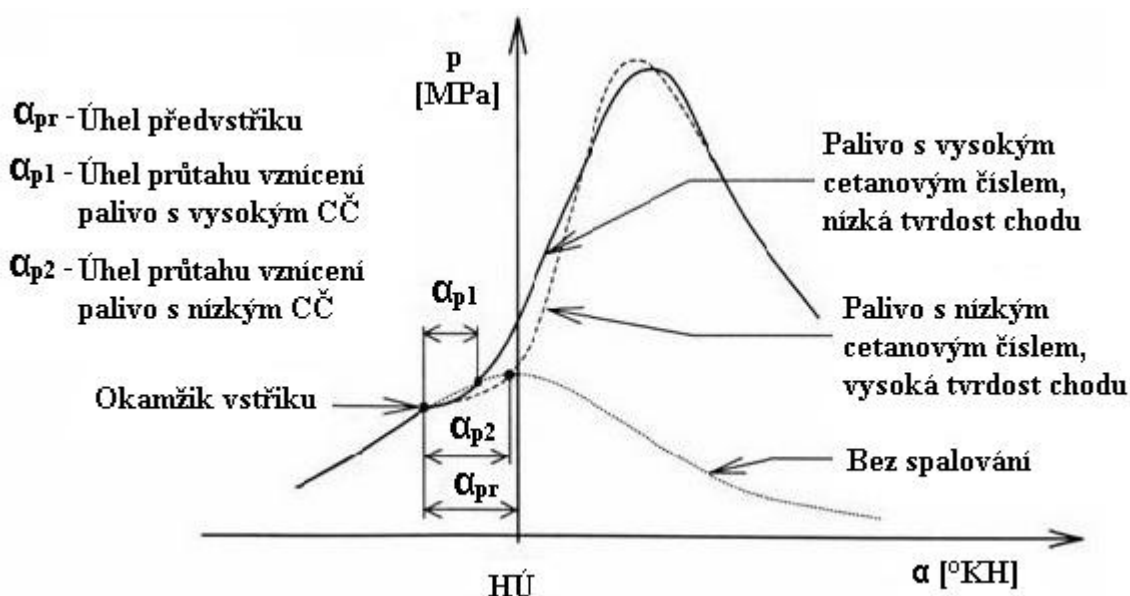
### POŽADAVKY NA MOTOROVOU NAFTU

**Výhřevnost** - Tento parametr vyjadřuje množství tepla získané při spálení určitého množství paliva [7]. Je požadováno, aby výhřevnost nafty byla co největší. Závisí na kvalitě chemického složení a pohybuje se v rozmezí 41,5 MJ.kg<sup>-1</sup> až 42,7 MJ.kg<sup>-1</sup> [8].

**Cetanové číslo** - Značí vznětlivost paliva. Je určováno pomocí jednoválcového motoru, který spaluje směs cetanu a methylnaphtalenu [9]. Místo methylnaphtalenu lze také možné použít heptamethylnonan [2]. Cetan má velmi dobrou vznětlivost a methylnaphtalen naopak špatnou vznětlivost [9]. Toto číslo lze vypočítat podle rovnice uvedené níže.

$$CN = \text{obj. \% hexadekanu (cetanu)} + 0,15 \cdot \text{obj. \% heptamethylnonanu} \quad [10] \quad (1)$$

Cetanové číslo nafty nesmí být ani příliš vysoké, ale ani příliš nízké. Kdyby bylo blízké hodnotě 100, palivo by se vznítlo příliš rychle. Hořelo by blízko vstřikovací trysky, která by se mohla ucpat sazemi. Naopak cetanové číslo blízké nule by způsobilo, že se ve válci rozpráší a odpaří velké množství paliva, které se naráz vznítí. To by vedlo k velkému nárůstu tlaku ve spalovacím prostoru, což by mělo za následek tvrdý a nekultivovaný chod motoru. Hodnota cetanového čísla se u současné motorové nafty pohybuje v rozmezí 45 až 55 [2][16].



Obrázek 2 Vliv cetanového čísla na průběh hoření; upraveno a převzato z [11]

Obrázek 2 zobrazuje průběh tlaku ve spalovacím prostoru v závislosti na úhlu průtahu vznícení. Dále je v grafu znázorněno, jaký má na tlak vliv cetanové číslo. Palivo s nízkým cetanovým číslem dosahuje vyšších tlaků ve spalovacím prostoru, ale zároveň má i tvrdší chod, což může způsobovat nadměrné namáhání součástí.

**Filtrovatelnost** – Dříve se používalo označení bod tuhnutí nebo bod zákalu [2]. Tato vlastnost je velice důležitá. Za nízkých teplot totiž dochází k vylučování parafinu. Pokud teplota překročí teplotu filtrovatelnosti, dojde k ucpaní palivového filtru parafinem a k úplnému přerušení dodávky paliva do motoru. Proto jsou do čerpacích stanic dodávány nafty podle ročních období s odpovídajícím množstvím aditiv zvyšujících teplotu filtrovatelnosti.

Motorové nafty se dělí na letní, zimní a přechodové. Letní nafta je označována písmenem B a je filtrovatelná až do 0 °C. Písmeno D značí naftu přechodovou, používá se na jaře a na podzim a její filtrovatelnost je do -10 °C. Zimní nafty jsou označovány písmenem F a jejich

filtrovatelnost je do  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Existují i speciální arktické nafty do velkých mrazů a je pro ně vyhrazena třída 2. Filtrovatelné jsou až do  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  [12].

## 1.2 BIOPALIVA

Rozlišujeme biopaliva I. generace a II. generace. Liší se hlavně tím, z čeho jsou vyráběna. Způsob výroby je také odlišný a u biopaliv II. generace i energeticky náročný a složitý [13]. Při spalování těchto paliv dochází k tvorbě  $\text{CO}_2$ , jako při spalování jakéhokoliv jiného paliva na bázi uhlíku, ale vzniklý plyn pak rostliny zase vstřebají do svých tkání. Jednoduše je zase vstřebán ekosystémem. Samotné spalování biopaliv tedy nepřispívá k nárůstu  $\text{CO}_2$  v atmosféře. Biopaliva neumožňují 100 % redukci skleníkového plynu. To zapřičiňují technologie, jakými jsou tato paliva produkována, protože  $\text{CO}_2$  při jejich výrobě vzniká také. Paliva I. generace redukuje produkci  $\text{CO}_2$  zhruba o 50 %, zatímco paliva II. generace až o 90 % [2]. Vzhledem k této skutečnosti je dobré dále pokračovat ve vývoji biopaliv, která by  $\text{CO}_2$  redukovala ještě více.

**Biopaliva I. generace** – Vyrábějí se z potravinářské biomasy. Typické suroviny potřebné k výrobě jsou kukuřice, cukrová řepa, škrob a obilniny. Tato biomasa je ale využívána při výrobě krmiv či potravin, proto velká spotřeba těchto surovin na výrobu biopaliv zapřičiňuje navyšování ceny u některých potravin [13]. V Evropě se nejčastěji vyrábí řepkový olej, ze kterého esterifikací dostáváme methylester řepkového oleje MEŘO [2]. Do skupiny biopaliv I. generace patří i další rostlinné oleje.

Tyto rostlinné oleje ale nelze použít jako palivo pro vznětový motor. Mají příliš vysokou hustotu. To znamená, že by olej nebyl schopný projít skrz otvory vstříkovací trysky a nebyl by ani kvalitně rozprášen [14].

**Biopaliva II. generace** – Tato paliva se vyrábějí z nepotravinářské biomasy, jako je například zemědělský odpad, těžební zbytky nebo biologický odpad. Tyto suroviny mají vysoký transformační potenciál na biopaliva. Jejich výroba je energeticky náročná. Mezi paliva II. generace patří syntetická motorová nafta, která vzniká při Fischer-Tropschově syntéze [13].

### 1.2.1 ROSTLINNÉ OLEJE A JEJICH ESTERY

Aby bylo možné rostlinné oleje použít v klasickém vznětovém motoru je nutná jejich esterifikace. Esterifikací se sníží jejich viskozita a takovýto olej po smíchání se vzduchem bude odpovídat použití motorové nafty. Například z řepkového oleje esterifikací dostaneme již zmiňovaný methylester řepkového oleje (MEŘO) [2].

Čistý MEŘO se pak označuje jako bionafta. Jeho spalováním poklesne výkon motoru o 5 až 10 %. V tomto se hodnoty z různých zdrojů nepatrně liší. Dojde také k navýšení měrné spotřeby paliva zhruba o 4 %. Jeho filtrovatelnost je zaručena pouze do  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Emise  $\text{CO}$  a  $\text{HC}$  se téměř nezmění, ale dojde k nárůstu produkce oxidů dusíku  $\text{NO}_x$  [2]. Jeho velkou nevýhodou je, že při dlouhých dobách skladování dochází k jeho stárnutí. Toto stárnutí se projevuje sedimentací, vytváří se usazeniny, které mohou ucpat palivovou soustavu [15].

Efektivní způsob využití esterů rostlinných olejů je vytvoření směsi s motorovou naftou. Tato směs se pak nazývá směsná motorová nafta. MEŘO v naftě zaujímá 30 % objemu, což zlepšuje některé vlastnosti, například kvalitu mazání [2]. Vzroste tím i úspora nafty a tudíž i ropy samotné. K této úspoře dojde, když čistou naftu naředíme esterem některého z olejů.

Ze stejného množství čisté nafty dostaneme větší množství směsné nafty. A při zahrnutí větší měrné spotřeby stále dochází k úspoře ropy. Nevýhodou směsné nafty je nižší hmotnostní výhřevnost a vyšší teplota vzplanutí, než má čistá motorová nafta.

Tabulka 1 Porovnání rostlinných olejů a motorové nafty; upraveno a převzato z [2][16]

Parametr		Motorová nafta	Methylester řepkového oleje	Řepkový olej
Kinematická viskozita [mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	-25 °C	5 - 30	-	300
	0 °C	3 - 14	10	180 - 220
	20 °C	2 - 8	6,3 – 8,1	65 - 100
	100 °C	0,7 - 2	1,7	6 - 8
Hmotnostní výhřevnost [MJ/kg]		42,5	37,1 – 40,7	37,4
Cetanové číslo		45 - 55	54 – 55 (58)	35 - 50
Bod vzplanutí [°C]		Min. 55	130	300 - 330
Bod tuhnutí [°C]		-12 - 0	-7	-18 - 0
Molekulová hmotnost		200	850 - 900	300

Tabulka 1 porovnává důležité parametry některých používaných biopaliv a motorové nafty. Z tabulky je patrné, že hodnoty cetanového čísla se příliš neliší a výhřevnost je také téměř stejná, ovšem biopaliva mají vyšší bod vzplanutí a s touto skutečností se musí při jejich používání počítat.

### 1.3 ZEMNÍ PLYN CNG A LNG

CNG (Compressed natural gas) i LNG (Liquified natural gas) značí, že se jedná o zemní plyn. CNG je stlačený zemní plyn a LNG zemní plyn zkapalněný. Tato paliva se používají jako alternativa místo motorové nafty. Aby je mohl motor spalovat, je nutná jeho přestavba na zážehový. Směs vzduchu a zemního plynu se musí zapalovat zapalovací svíčkou. Přestavba se týká i nádrže a vstřikovacího systému.

**CNG** – Stlačený zemní plyn má velké oktanové číslo. Jeho přesná hodnota je 128. Má i vysokou výhřevnost, zhruba 50 MJ.kg<sup>-1</sup> při 15 °C a atmosférickém tlaku [17]. Výkon motoru spalující CNG je pak srovnatelný s výkonem vznětového motoru spalující naftu [18]. Velkou výhodou je, že při spalování zemního plynu vzniká až o 30 % méně CO<sub>2</sub> oproti spalování nafty [19]. Nevýhodou je, že je nutný velký zástavbový prostor pro tlakovou nádrž, ve které je plyn stlačený na 20 MPa.

**LNG** – Oktanové číslo a výhřevnost je stejná jako u CNG, jelikož se jedná také o zemní plyn. Velkou výhodou je, že při zkapalnění se asi 600 krát zmenší jeho objem. To umožní do nádrže vměstnat více paliva [18]. Aby bylo možné plyn zkapalnit, je nutné ho podchládit na teplotu -162 °C [19]. Jeho nevýhodou ale je, že k velkému zástavbovému prostoru se ještě přidává nutnost použití kryogenní nádrže.

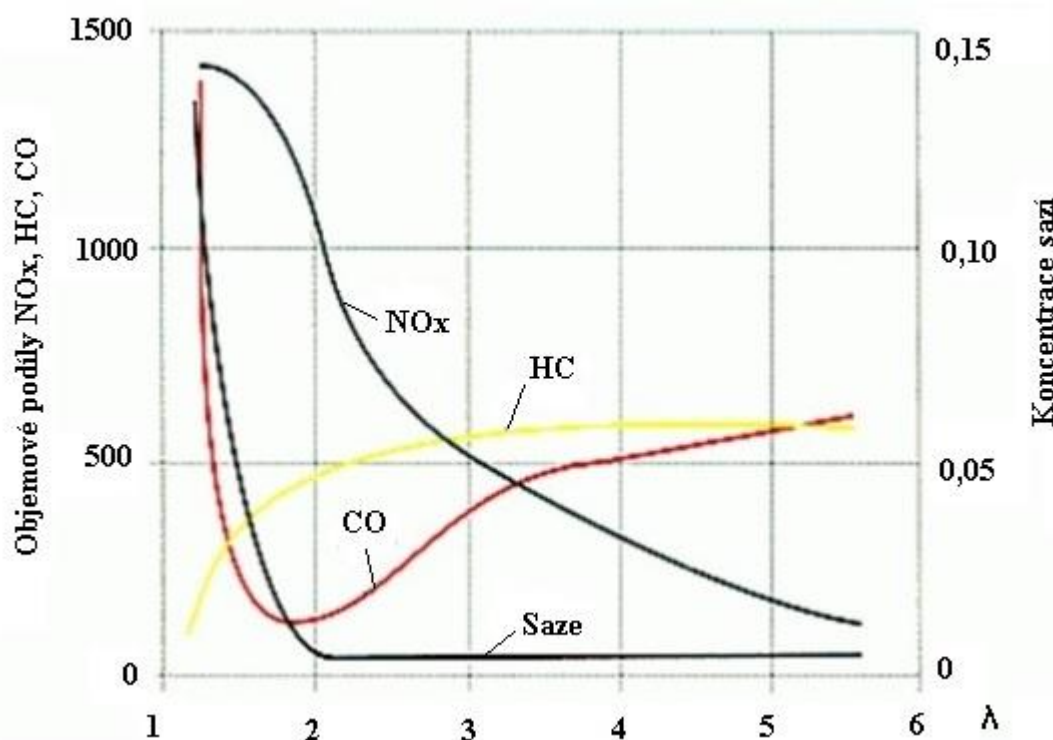
## 2 SPALOVÁNÍ

Emise vznětového motoru jsou závislé na kvalitě spalování paliva. Je vyžadováno, aby ve spalovacím prostoru docházelo k dokonalé oxidaci. Při takovém spalování totiž dosahujeme nejmenší produkce škodlivých plynů.

### 2.1 SMĚŠOVACÍ POMĚR

Vznětové motory pracují s velkým přebytkem vzduchu. Dříve se používaly motory s označení SDI, které byly atmosférické. Ovšem z důvodu velkých emisí je dnes už nelze využít, proto jsou dnešní motory přeplňované [20]. Vzduch je do spalovacího prostoru vtlačován přetlakem pomocí turbodmychadla nebo kompresoru. Ve válci motoru se tedy nachází mnohem více vzduchu než paliva. To znamená, že dochází ke spalování výrazně chudé směsi. Bohatost nebo chudost směsi vyjadřuje poměr  $\lambda$ . Aby bylo dosaženo chudé směsi, musí být  $\lambda > 1$ .

Běžná hodnota směšovacího poměru  $\lambda$  pro vznětové motory je  $\lambda = 1,1$  až 10 [2]. Směšovací poměr se mění v závislosti na zatížení motoru. Tím se liší od motorů zážehových, které pracují se směšovacím poměrem okolo  $\lambda = 1$ . Využívají jak chudou, tak i bohatou směs.



Obrázek 3 Závislost tvorby emisí na směšovacím poměru  $\lambda$ ; upraveno a převzato z [21]

Obrázek 3 ukazuje, že největší množství oxidů dusíku a oxidu uhelnatého bude vznikat okolo  $\lambda = 1,1$ . S rostoucím směšovacím poměrem bude produkce oxidů dusíku klesat, ale bude se zvětšovat množství nespálených uhlovodíků. Zhruba od  $\lambda = 2$  poroste i produkce CO.

Výpočet směšovacího poměru: 
$$\lambda = \frac{\text{hmotnost přivedeného vzduchu [kg]}}{\text{teoretická hmotnost vzduchu [kg]}} \quad (2)$$

Teoretická hmotnost vzduchu vyjadřuje potřebnou hmotnost vzduchu ke spálení jednoho kila paliva. To odpovídá právě stechiometrickému poměru a 14,5 kg vzduchu na 1 kg paliva [22].

## 2.2 TVORBA SMĚSI

Rozlišujeme dva druhy tvorby směsi u vozidel se vznětovým motorem. První, starší způsob, je nepřímé vstřikování. Druhý a také dnes nejvíce používaný způsob je přímé vstřikování.

### 2.2.1 NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Je také možné se setkat s pojmem IDI (indirect injection), narazit na toto označení můžeme hlavně v anglické literatuře.

Spalovací prostor je zde tvořen komůrkou, která může být tlaková nebo vířivá [23]. Do této komůrky ústí vstřikovací tryska a žhavicí svíčka. Palivo je do komůrky vstřikováno jednotvorovou či dvoutvorovou tryskou [2]. Vstříknuté palivo je z větší části usazené na stěnách komůrky. Zbytek paliva je promíchán s vířícím vzduchem a následně vzplane. Toto hoření pak ohřeje palivo na stěnách komůrky natolik, že vzplane také. Tento způsob vstřikování je tepelně ztrátový, a proto tyto motory mají oproti přímému vstřikování menší účinnost [23]. Tyto motory mají tichý a kultivovaný chod, ovšem dnes už se nepoužívají. Byly zcela nahrazeny motory s přímým vstřikováním.

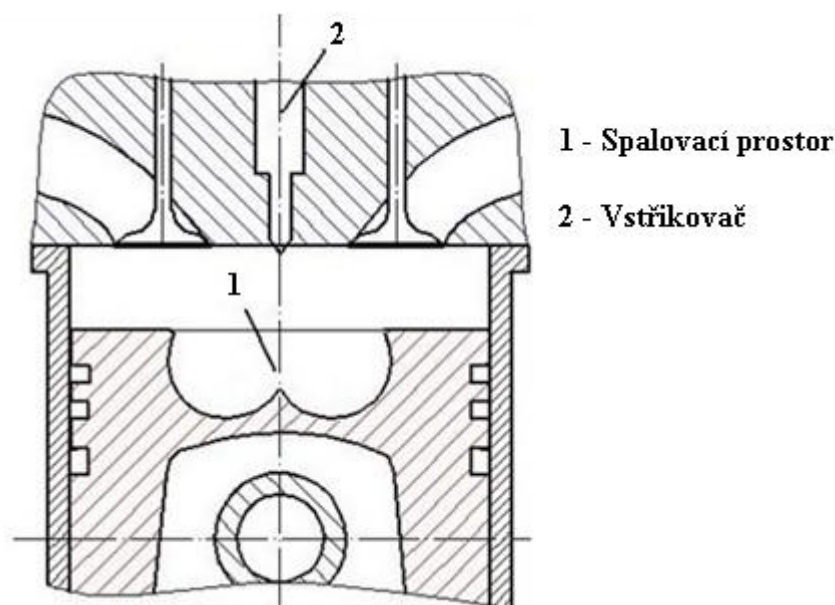


Obrázek 4 Dělený spalovací prostor; upraveno a převzato z [24]

### 2.2.2 PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Přímé vstřikování bývá také označované jako DI (direct injection). V dnešní době jde o nejpoužívanější způsob vstřikování nafty.

Spalovací prostor je v tomto případě tvořen dnem pístu. Palivo je do něj vstřikováno víceotvorovou tryskou tlakem větším než 200 MPa [22][23]. Rozprášené palivo by se nemělo dotknout stěny pístu, aby nedošlo k jeho ochlazení. To by způsobilo velký nárůst nespálených uhlovodíků HC [2]. Tyto motory bývaly hlučné a měly tvrdší chod, ale dnes se toto daří řešit předvstříkem, který kultivovanost motoru zlepšuje [23]. Mají také větší účinnost oproti motorům s nepřímým vstřikováním.



Obrázek 5 Nedělený spalovací prostor; upraveno a převzato z [25]

## SHRNUTÍ

Jak už bylo zmíněno výše, vznětový motor pracuje s přebytkem vzduchu a chudou směsí. Vzduch je vtačován do spalovacího prostoru přetlakem, který vytváří turbodmychadlo nebo kompresor. Vzduch je pak dále stlačován až do momentu, kdy dosáhneme teploty potřebné ke vznícení paliva. Do takto ohřátého vzduchu je vstříknuto palivo pod vysokým tlakem. Při stlačování narůstá i tlak vzduchu ve válci, ten po vzplanutí směsi ještě vzroste. Způsob vstřikování závisí na druhu vstřikovací soustavy.

### 2.2.3 PALIVOVÁ SOUSTAVA S TLAKOVÝM ZÁSOBNÍKEM

Moderní vznětové motory používají vstřikovací systém Common-Rail. Jeho velkou výhodou je, že dokáže vstříknout do válce palivo tlakem 200 až 248 MPa [22]. Tento systém je charakteristický „lištou“, kterou ukazuje Obrázek 6. Lišta slouží jako zásobník paliva pro vstřikovače. Vstřikovače jsou ovládány řídicí jednotkou a využívají tzv. piezoelektrického jevu, nebo jsou ovládány elektromagnety. Z toho vyplývá jeho druhá velká výhoda, tyto vstřikovače mohou dávkovat palivo do válce nezávisle na poloze vačkového či klikového hřídele. Tím se docílí kvalitního spalování, tichého a kultivovaného chodu.

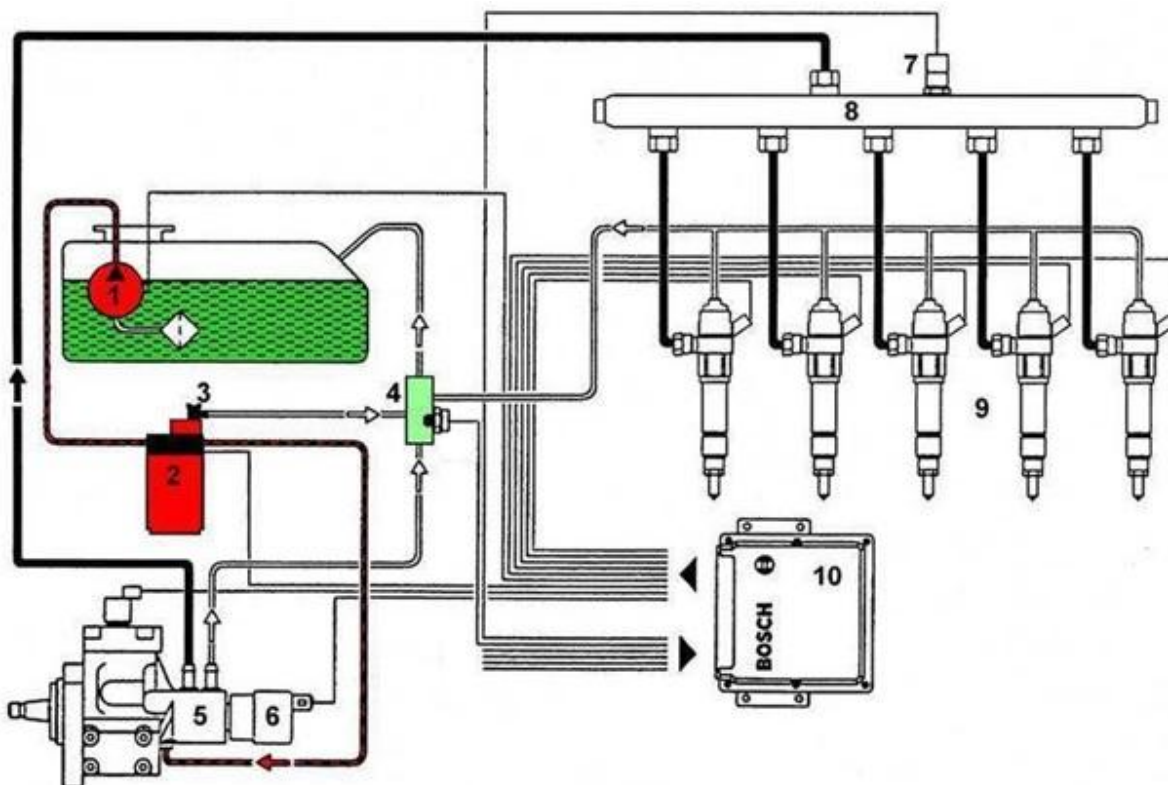
### NÍZKOTLAKOVÁ ČÁST

Nízkotlaková část se skládá z nádrže, ve které je umístěné podávací čerpadlo. To nasává naftu a vede ji přes čistič a předehřev paliva do vysokotlakového čerpadla. Součástí nízkotlakové části systému Common-Rail je i zpětné vedení paliva a chladič paliva [23]. Před vrácením přebytečného paliva zpět do nádrže je nutné jeho ochlazení.



## VYSOKOTLAKOVÁ ČÁST

Vysokotlaká část začíná u vysokotlakého čerpadla. Toto čerpadlo je poháněno rozvodovým řemenem, či řetězem motoru. Palivo stlačují tři malé písty. Takto stlačené palivo proudí vysokotlakým potrubím až do zásobníku paliva. Poslední částí jsou samotné vstřikovače, ty mohou být ovládány elektromagnety nebo piezokrystaly [23].



1 - Elektrické palivové čerpadlo; 2 - Palivový filtr; 3 - Pojistný ventil; 4 - Sběrač zpětných vedení; 5 - Vysokotlakové čerpadlo CPI; 6 - Ventil regulace tlaku; 7 - Snímač tlaku paliva v liště "Rail"; 8 - Lišta "Rail"; 9 - Vstřikovací ventily; 10 - Řídicí jednotka motoru

Obrázek 6 Schéma vstřikovací soustavy Common-Rail; upraveno a převzato z [26]

## FUNKCE SYSTÉMU COMMON-RAIL

Správnou funkci celého systému zajišťuje řídicí jednotka motoru. Ta je schopna měnit tlak paliva v závislosti na zatížení motoru. K tomu potřebuje různé snímače a akční členy. Důležitým snímačem je snímač tlaku paliva. Přímou na zásobníku bývá umístěn i regulační ventil, který reguluje tlak paliva. Dalším akčním členem jsou samotné vstřikovací ventily. Vstřikovače systému Common-Rail umožňují tzv. vícefázové vstřikování [23]. Toto vstřikování se skládá z předvstřiku, hlavního vstřiku a dodatečného vstřikování. To napomáhá k tichému chodu motoru. Dodatečný vstřik pak zlepšuje regeneraci filtru pevných částic, protože se nafta vstříkne ve chvíli, kdy už je výfukový ventil otevřený a palivo dohořívá až ve výfukovém potrubí.

## 2.3 KOMPRESNÍ POMĚR

Na proces spalování má vliv i kompresní poměr. Kompresní poměr značí poměr mezi pracovním objemem a objemem, který vznikne po stlačení vzduchu ve spalovacím prostoru. Pracovní objem je rozmezí mezi horní a dolní úvratí.

**Výpočet kompresního poměru:** 
$$\varepsilon = \frac{V_z + V_k}{V_k} \quad [-], \quad (3)$$

kde:

$V_k$  - objem kompresního prostoru [ $\text{cm}^3$ ]

$V_z$  – pracovní objem válce [ $\text{cm}^3$ ]

Při stlačování vzduchu se zvyšuje i jeho teplota. Aby se nafta ve válci vznítla, je potřeba dosáhnout přesně specifikované hodnoty. Teplota vzduchu po stlačení je okolo  $900\text{ }^\circ\text{C}$  [22], což je dostačující teplota pro vznícení nafty. U motorů s nepřímým vstřikováním paliva je kompresní poměr větší než u motorů s přímým vstřikováním. To je způsobeno poměrně velkou plochou komůrky, do které je palivo vstřikováno. Přes tuto plochu je během komprese odvedeno velké množství tepla, proto se kompresní poměr  $\varepsilon$  u takového motoru pohybuje v rozmezí 19 až 30. Motory s přímým vstřikováním mají kompresní poměr  $\varepsilon$  v rozmezí 14 až 23 [22][23].

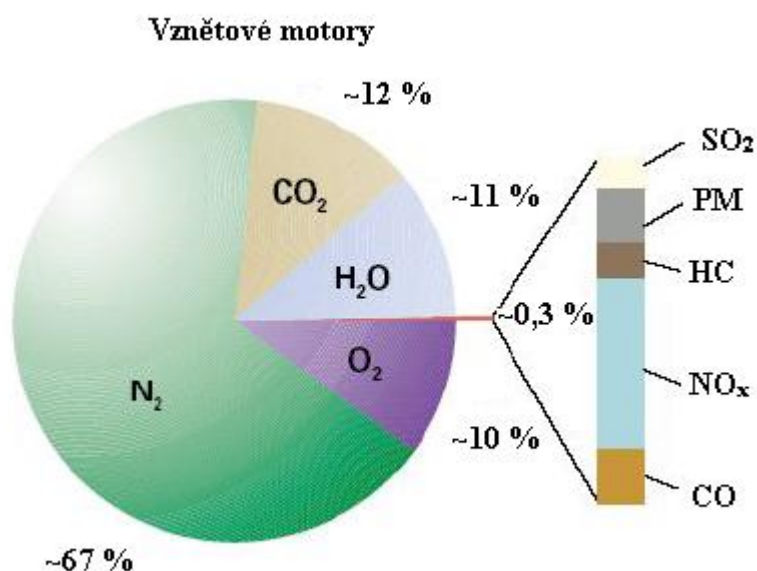
Kompresní poměr přímo neovlivňuje tvorbu škodlivin. Ale při správné volbě hodnoty kompresního poměru je možné dosáhnout vysoké teploty stlačeného vzduchu, jak nám určuje stavová rovnice. Vysoká teplota vzduchu ve válci totiž napomáhá k lepšímu spalování molekul paliva ve spalovacím prostoru, což vede k nižším emisím.

### 3 EMISE VZNĚTOVÉHO MOTORU

Uvnitř spalovacího motoru dochází ke spalování vzduchu s palivem. Ve vznětovém motoru je tímto palivem motorová nafta nebo některé z alternativních paliv uvedených výše. Při spalování dochází k chemickým reakcím, které mají za následek tvorbu výfukových plynů. Některé složky těchto plynů mají ovšem negativní dopad nejen na okolní prostředí, ale i na lidský organismus. Množství těchto složek závisí na kvalitě procesu spalování. Je-li spalování dokonalé, vzniká nejmenší možný podíl škodlivin ve výfukových plynech.

#### 3.1 SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Podíl škodlivin ve výfukových plynech je zhruba 0,3 %. Jsou produktem nedokonalého spalování. Kdyby docházelo čistě k dokonalému spalování, vznikal by pouze oxid uhličitý  $\text{CO}_2$  a voda  $\text{H}_2\text{O}$  [3].



Obrázek 7 Složení výfukových plynů; upraveno a převzato z [3]

Obrázek 7 zobrazuje složení výfukových plynů. Nejsledovanější složky z hlediska emisí jsou právě ty škodlivé tj.  $\text{SO}_2$  oxid siřičitý, PM pevné částice, HC nespálené uhlovodíky,  $\text{NO}_x$  oxidy dusíku, CO oxid uhelnatý. Mezi škodlivé látky patří i  $\text{CO}_2$  oxid uhličitý, protože se jedná o skleníkový plyn.

**Oxid uhličitý  $\text{CO}_2$**  – Jedná se o bezbarvý plyn, který je také bez zápachu. Je produktem dokonalé oxidace. Oxid uhličitý je skleníkový plyn, který se podílí na zvyšování teploty zemské atmosféry [2].

**Oxid uhelnatý CO** – Oxid uhelnatý je jedovatý plyn, který se z velké části podílí na tvorbě smogu. Při vystavení lidského organismu velké koncentraci tohoto plynu dojde k poškození orgánů z důvodu nedostatku kyslíku. Je produktem nedokonalého spalování. U vznětových motorů při přebytku vzduchu pak oxiduje na oxid uhličitý. V porovnání se zážehovými motory je produkce vznětovými motory minimální. Emise CO rostou se zvyšujícím se zatížením motoru. Než motor dosáhne maximální produkce CO, dojde k překročení hranice kouřivosti a řídicí jednotka upraví množství vstříkované nafty do motoru [2].

**Oxid siřičitý SO<sub>2</sub>** – Emise tohoto plynu se dají považovat za zanedbatelné. V současnosti klesá množství síry v motorové naftě, a tudíž klesají i emise spojené s touto složkou [2].

**Pevné částice PM** – Složení pevných částic je závislé na typu motoru. Jádro částice se skládá z pevného uhlíku a popele. Dlouhodobé vystavení pevným částicím má vážné následky na lidský organismus. Některé mohou být i rakovinotvorné. Vznikají nedokonalým spalováním jako neodpařené kapky paliva. Jejich produkce závisí na kvalitě rozprášení paliva. Nejnižší produkce PM nastává při velkém přebytku vzduchu v motoru [2]. Z Obrázek 3 je patrné, že největší množství pevných částic vzniká při  $\lambda = 1,1$ . Hustota pevných částic je při tomto směšovací poměru zhruba  $0,14 \text{ g.m}^{-3}$ .

**Nespálené uhlovodíky HC** – Jsou produktem nedokonalého spalování. Jedná se o nespálené palivo, u kterého byla předčasně zastavena oxidace. Vznikají také při poruchovém spalování. Některé mohou být i karcinogenní a ve spojení s pevnými částicemi může být jejich škodlivost extrémní. Optimální produkce při přebytku vzduchu se dosahuje při směšovacím poměru  $\lambda = 1,1 - 1,2$  [2].

**Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>** – Při vdechování těchto plynů se na stěně sliznice vytváří kyselina dusičná. Lidský organismus na tuto situaci reaguje tak, že omezí přístup kyslíku do těla, to má za následek dušnost a kašel. Kvůli emisím těchto plynů vznikají kyselé deště a také se tyto plyny podílí na vzniku smogu. Jejich vznik závisí na teplotě a je popsán Zeldvičovou rovnicí [2].



Největší množství oxidů dusíku vzniká při směšovacím poměru  $\lambda = 1,05 - 1,1$ . Vznětový motor produkuje méně oxidů dusíku než motor zážehový, ale není možné použít třicestný katalyzátor, který by tuto složku výfukových plynů eliminoval, tudíž emise spojené s NO<sub>x</sub> představují veliký problém [2].

Oxidy dusíku a nespálené uhlovodíky jsou komplementárně spojeny. To znamená, že tvorba jedné z těchto složek ovlivňuje tvorbu té druhé. Nejvíce oxidů dusíku vzniká právě při velké teplotě, ale při takto velké teplotě je podíl HC minimální. Platí to i naopak, když poklesne teplota spalování, vzroste tvorba HC, ale poklesne množství NO<sub>x</sub> ve výfukových plynech [27].

### 3.2 NORMY EURO

Normy Euro byly přijaty z důvodu stanovení limitů produkce emisí. Tabulka 2 ukazuje, že se povolené množství emisí od roku 1992 dramaticky snížilo. Pro automobilky je stále náročnější vyvinout takový emisní systém, který by vyhovoval dnešním normám. Nejnovější normy Euro 6 proto nelze dosáhnout bez technologie SCR Selective Catalytic Reduction, neboli selektivní katalytické redukce. Tato technologie využívá tekutinu AdBlue, která výrazně redukuje množství oxidů dusíku. AdBlue je kapalina známá také pod pojmem močovina a skládá se z amoniaku NH<sub>3</sub> a destilované vody.

Tabulka 2 Emisní normy EURO; upraveno a převzato z [3][28][29]

Předpis	Platnost	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM	CO <sub>2</sub>
<b>Diesel</b>	<b>[g/km]</b>					
<b>EURO 1</b>	1992	2,72	-	-	0,14	-
<b>EURO 2 - IDI</b>	1996	1	-	-	0,08	-
<b>EURO 2 - DI</b>	1999	1	-	-	0,1	-
<b>EURO 3</b>	2000. 01	0,64	-	0,5	0,05	-
<b>EURO 4</b>	2005. 01	0,5	-	0,25	0,025	-
<b>EURO 5</b>	2009. 09	0,5	-	0,18	0,005	-
<b>EURO 6</b>	2014. 09	0,5	-	0,08	0,005	-
<b>EURO 6b</b>	2015	0,5	-	0,08	0,0045	130
<b>EURO 6c</b>	2018	0,5	-	0,08	0,0045	130
<b>EURO 6d - TEMP</b>	2019	0,5	-	0,08	0,0045	130
<b>EURO 6d</b>	2021	0,5	-	0,08	0,0045	95

V souvislosti s emisemi dopravních prostředků je v současnosti nejdiskutovanějším tématem Green Deal, tzv. „Zelená dohoda“ a s tím spjaté přijetí normy Euro 7. Cílem této dohody je dosáhnout klimatické neutrality, tzn. nulového znečištění po celé Evropě. Tato skutečnost by měla příznivý vliv na silně znečištěná města, kde by se ovzduší výrazně zlepšilo. Evropská Unie proto tlačí automobilový průmysl směrem k nulovým emisím. Klimatické neutrality by pak chtěla EU dosáhnout do roku 2050 [30].

Současná norma Euro 6 byla modifikována a nyní je nutné pro nově homologovaná vozidla provádět testy RDE. Ovšem zjistilo se, že i nadále jsou vyprodukované emise příliš vysoké. Toto by měla vyřešit další přísnější norma Euro 7. Jejím cílem by bylo zajistit nízké emise za všech podmínek po celou dobu životnosti vozidla. Vozidla by tedy byla vybavena palubním monitorováním emisí. Stávající limity by se zpřísnily a přijaly by se i nové, pro ještě neregulované složky výfukových plynů. Od těchto opatření se očekává pozitivní vliv na klima [30].

### 3.3 MĚŘENÍ EMISÍ

Měření emisí se dělí na dvě skupiny. První skupinou je kontrola emisí. Tato kontrola se provádí pravidelně spolu s technickou kontrolou vozidla. Druhá skupina je homologační měření. Toto měření se provádí vždy při uvádění nového vozidla na trh [2]. Než bude možná jeho sériová výroba, musí dané vozidlo projít těmito testy. Tato měření se od sebe liší jak metodou měření a vyhodnocování, tak i legislativně.

V současné době jsou emise nejdiskutovanějším tématem v souvislosti se spalovacími motory, proto se na tato měření klade velký důraz.

#### 3.3.1 KONTROLA EMISÍ

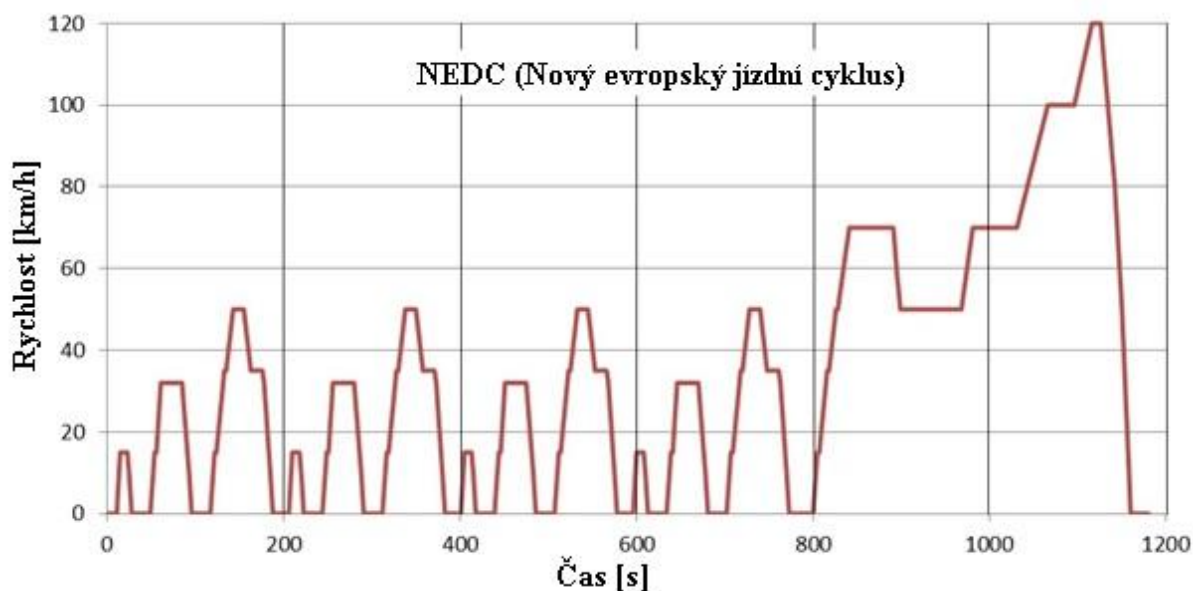
Součástí pravidelné technické kontroly je i kontrola emisí. Před samotným měřením je nutné provést několik věcí. Nejprve je nutné identifikovat vozidlo, to spočívá v kontrole označení VIN. Dále se provede vizuální kontrola emisních systémů a výfukového potrubí, zde se kontroluje hlavně těsnost a nadměrné poškození systémů. Poté se diagnostický přístroj napojí

na systém řízení motoru. V tomto kroku se sleduje správná funkce kontrolky MIL (Malfunction Indicator Light), načte se paměť závad a zkontrolují se readiness kódy [31]. Načtením těchto kódů se kontroluje správná funkce elektrických zařízení, které ovlivňují složení výfukových plynů. Po vyčtení těchto kódů se na monitoru objeví čísla 1 nebo 0. Číslo 0 znamená, že diagnostika těchto zařízení proběhla úspěšně, a 1 naopak, že diagnostika byla přerušena [32]. Tato první část kontroly emisí je pro zážehové i vznětové motory stejná.

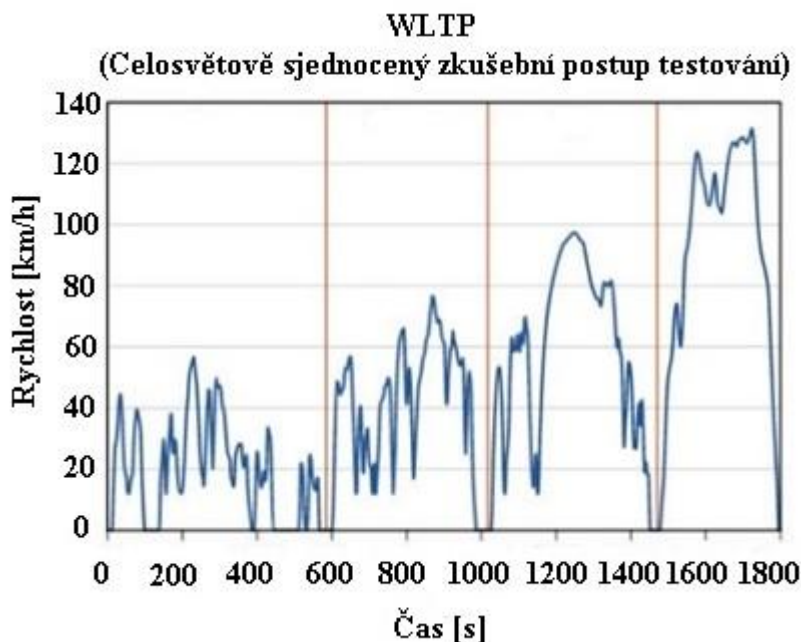
U vznětových motorů se provádí měření kouřivosti. Před samotným měřením je dobré provést akcelerační proplach. Při proplachu se plynový pedál stlačí do maximální polohy a zase se uvolní. Zpravidla se toto zopakuje ještě dvakrát, tyto pokusy se nezapočítávají do počtu měření. Samotné měření je v podstatě to samé. Plynový pedál se stlačí do maximální polohy a uvolní se až v momentu, kdy se motor dostane do tolerančního pásma referenčních otáček (omezovač). Naměřená hodnota kouřivosti je pak nejvyšší hodnotou naměřenou za celé měření [31].

### 3.3.2 HOMOLOGACE DO 3,5 TUNY PRO ČR A EU

Každý nově homologovaný vůz musí podstoupit homologační kontrolu emisí. Ta se oproti emisní kontrole velice liší. Měření probíhá na válcové zkušebně, kde vozidlo jede podle předepsaných jízdních cyklů. Obrázek 8 ukazuje průběh cyklu NEDC, který se dnes už nepoužívá. Dnes ho zcela nahradil cyklus WLTP, jehož průběh zobrazuje Obrázek 9. WLTP je oproti starému cyklu více dynamický, delší a dosahuje se při něm vyšších rychlostí. Jízdní cyklus se dělí na městský a mimoměstský. Měření se provádí pomocí aparatury CVS (Constant Volume Sampling) [33].

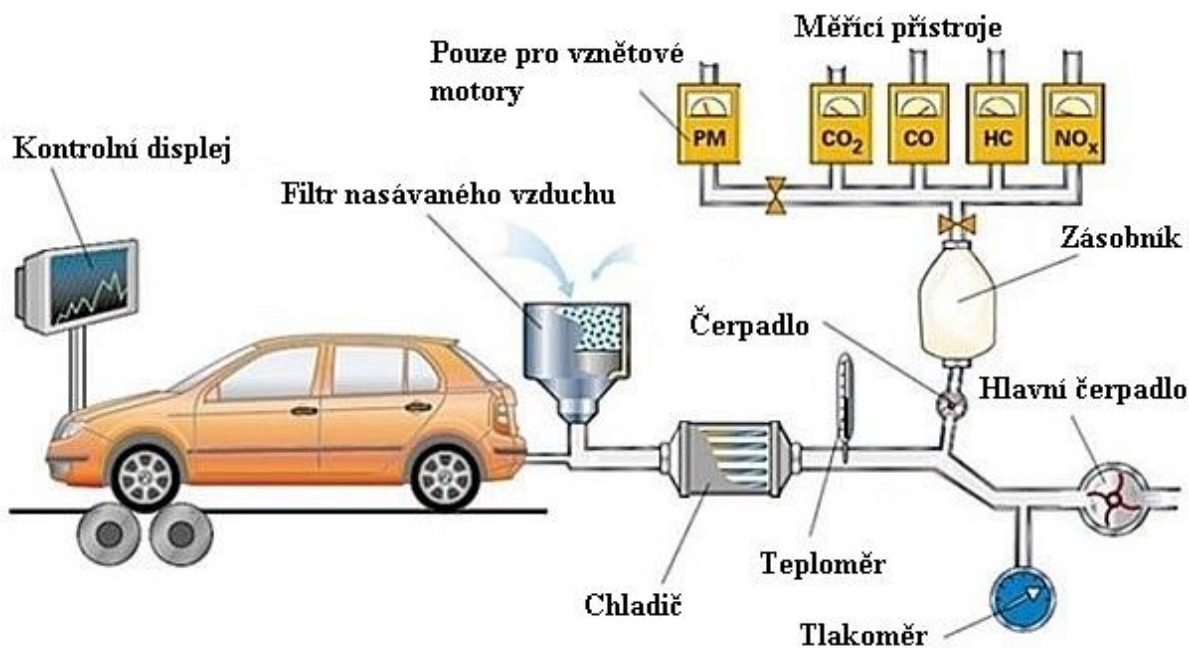


Obrázek 8 Jízdní cyklus NEDC; upraveno a převzato z [34]



Obrázek 9 Jízdní cyklus WLTP; upraveno a převzato z [35]

Hodnoty emisí se stanovují pomocí metody CVS. Obrázek 10 ukazuje schéma celé aparatury. Vozidlo jede na válcové zkušební pomoci výše uvedeného cyklu. Z výfuku vozidla jsou odsávány výfukové plyny, které jsou ředěny filtrovaným vzduchem [2]. Když je emisí méně, dodává se vzduchu více, a naopak když je emisí více, tak se vzduchem ředí jen málo [33]. Směs emisí a vzduchu se shromažďuje v zásobníku, ze kterého je odebrán vzorek. Pro každou škodlivou látku má tato metoda zvlášť měřicí přístroj, pro vznětové motory je zde měřicí přístroj na pevné částice. Naměřené hodnoty se udávají v  $\text{g.km}^{-1}$  [2]. Z naměřených hodnot pak lze vypočítat průměrnou spotřebu paliva.



Obrázek 10 Aparatura pro měření metodou CVS; upraveno a převzato z [3]

V posledních letech se ale začalo používat měření v běžném provozu. Test RDE byl představen v roce 2017. Jeho cílem je předejít tomu, aby při měření na válcové zkušebně mohla řídicí jednotka upravit emise [36].

Princip měření je jednoduchý. Na vozidlo se namontují veškeré snímače emisí a množství škodlivin ve výfukových plynech se měří přímo v běžném provozu. Přístroj pro tuto metodu se nazývá PEMS. Je zapotřebí, aby měl přístroj svůj vlastní napájecí zdroj. Kdyby byl napájen ze sítě vozidla, došlo by k většímu namáhání motoru a ke zkreslení výsledků měření [3].

Protože je tato metoda poměrně nová, zavedl se koeficient, podle kterého lze množství emisí přepočítat tak, jako by měření probíhalo na válcové zkušebně. Ovšem se zvyšujícími se nároky na emise bude hodnota tohoto koeficientu snižována až na hodnotu 1 [3].



## 4 OPATŘENÍ NA MOTORU

Opatřením na motoru se rozumí technologie nacházející se přímo na samotném motoru. Těmito technologiemi lze efektivně snižovat některé složky výfukových plynů.

Emise výfukových plynů lze ovlivnit výběrem způsobu tvorby směsi. U přeplňovaných motorů se dají snížit emise  $\text{NO}_x$  ochlazením plnicího vzduchu. A pokud je ve spalovacím prostoru malý přebytek vzduchu, budou malé i emise oxidů dusíku. Vznik nespálených uhlovodíků ovlivňuje druh vstřikovací soustavy a provedení vstřikovací trysky. Oxidy dusíku a nespálené uhlovodíky lze pak také snížit rozdělením dávky paliva na více dávek. Přebytek vzduchu ve spalovacím prostoru a kvalita rozprášení paliva pak silně ovlivňuje kouřivost vozidla. Velmi dobrého rozprašování lze docílit při vysokém vstřikovacím tlaku [2].

Další možností jak snížit škodlivé látky ve výfukových plynech, je optimalizování spalovacího prostoru, počátku vstřiku a množství vstříknutého paliva. Zlepšení lze docílit také použitím víceventilové techniky a řízení sacích kanálů [23].

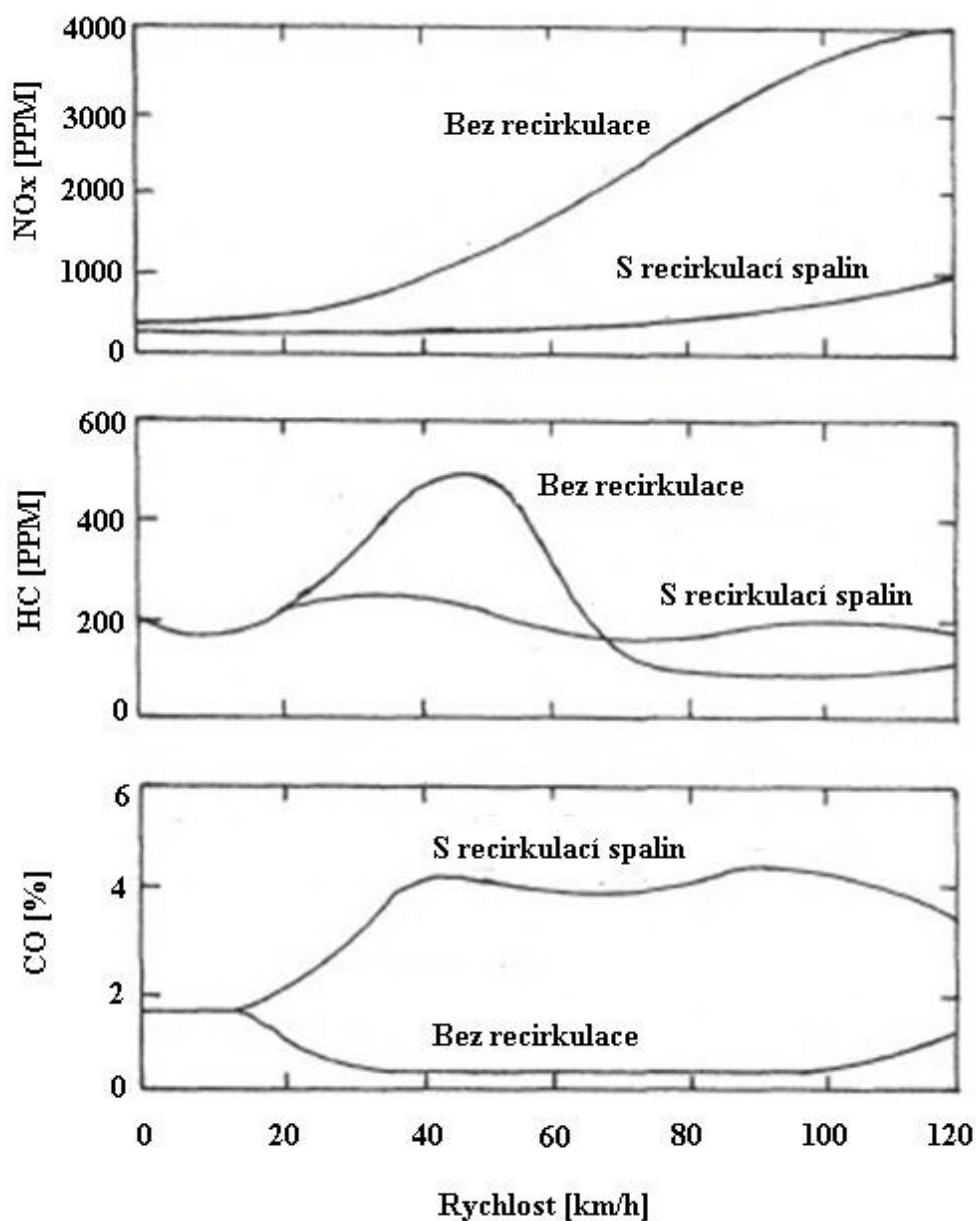
### 4.1 RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Recirkulace výfukových plynů umožňuje návrat částečného množství spalin zpět do spalovacího prostoru. Pozitivní efekt nastává pouze do určitého poměru spalin a přivedeného vzduchu. Tento poměr závisí na provozním režimu motoru. Do spalovacího prostoru lze přivést až 40 % výfukových plynů, což vede ke snižování emisí oxidů dusíku [37]. Oxidy dusíku vznikají už při teplotě 1370 °C [39]. Teplota spalování je ale mnohem vyšší, u vznětových motorů se při spalování dosahuje teploty až 2000 °C. To se negativně projevuje na tvorbě oxidů dusíku, jejich množství totiž exponenciálně roste s teplotou [39]. Motory vybavené turbodmychadlem a přímým vstřikováním mají vysoký kompresní poměr, to znamená, že mají i vysokou teplotu spalování a velké emise  $\text{NO}_x$ . Proto mají vznětové motory recirkulaci výfukových plynů s chlazením. Ochlazením výfukových plynů docílíme toho, že se spálí více spalin a sníží se teplota spalování, což značně zredukuje množství oxidů dusíku. Pokud by ale docházelo k výraznému snížení teploty spalování, začaly by narůstat emise nespálených uhlovodíků [37].

K recirkulaci výfukových plynů dochází při otevírání EGR ventilu. Aktivuje se při volnoběhu u zahřátého motoru nebo při částečném zatížení. Jakmile je recirkulace aktivní, začne motor nasávat menší množství vzduchu. Při plném zatížení je nutné, aby k recirkulaci spalin nedocházelo, jinak by nebylo možné dosáhnout maximálního výkonu a točivého momentu z důvodu nedostatku vzduchu [23].

System recirkulace spalin snižuje tvorbu oxidů dusíku. Ovšem ovlivňuje i tvorbu nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého. Obrázek 11 ukazuje závislost tvorby emisí na rychlosti vozidla. Při zvyšující se rychlosti vznik oxidů dusíku narůstá jen mírně, nespálené uhlovodíky se drží zhruba na konstantní hodnotě, ale emise oxidu uhelnatého výrazně narůstají.

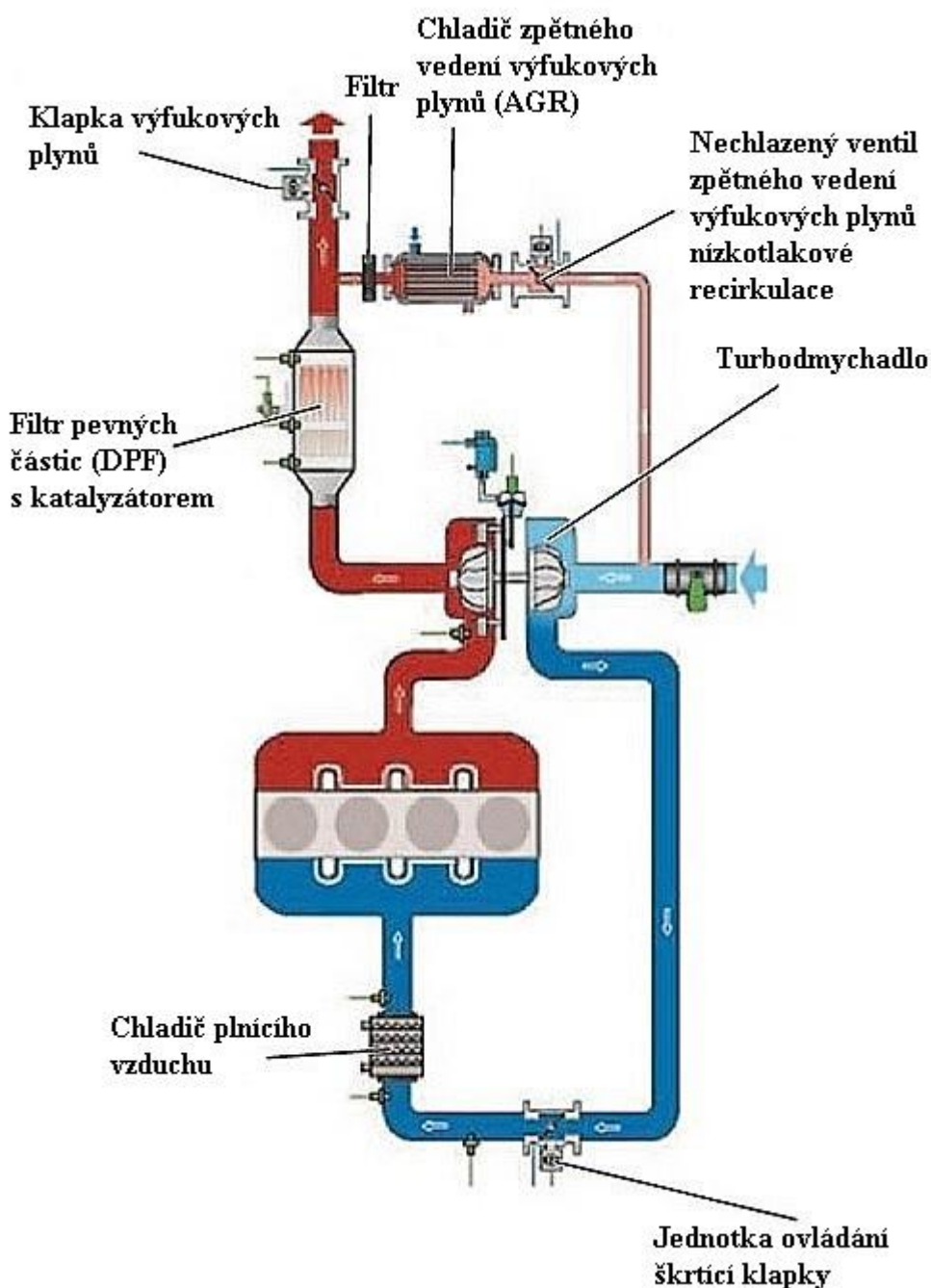
V kapitolách 4.1.1 a 4.1.2 jsou uvedeny způsoby vnější recirkulace výfukových plynů. Existuje také jednodušší řešení. Prostým časováním sacích a výfukových ventilů lze dosáhnout tzv. vnitřní recirkulace. Při vnitřní recirkulaci dochází k tomu, že se sací ventil otevře dříve nebo výfukový ventil zůstane déle otevřený. V sací fázi motoru se pak do válce nasaje i část spalin. Tento způsob ale není příliš účinný, a proto jsou moderní vznětové motory vybaveny i vnější recirkulací [38].



Obrázek 11 Porovnání vzniku škodlivin bez a s recirkulací spalin; upraveno a převzato z [39]

#### 4.1.1 NÍZKOTLAKOVÁ RECIRKULACE SPALIN

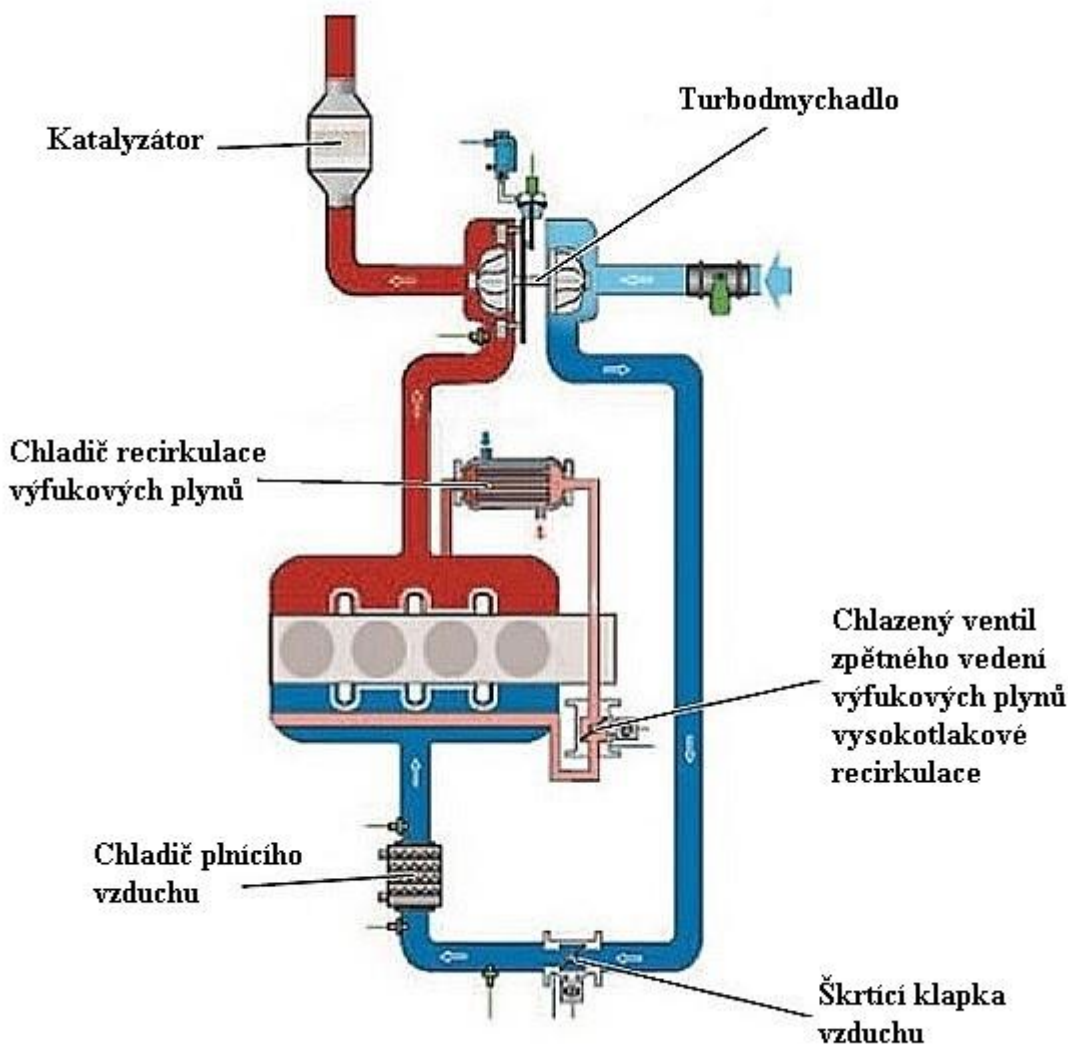
Nízkotlakou recirkulací spalin využívají vozy Škoda splňující normu Euro 5. Schéma celé soustavy znázorňuje Obrázek 12. Spaliny se odebírají až z místa za filtrem pevných částic, kde se nachází i klapka výfukových plynů. Tato klapka zajišťuje tlak pro zpětné vedení. Plyny jsou vedeny zpět přes filtr a vodní chladič výfukových plynů (AGR). Ochlazené spaliny jsou pak vedeny přes nechlazený ventil výfukových plynů až před turbodmychadlo, kde se mísí s přiváděným vzduchem. Směs výfukových plynů a vzduchu je ochlazována chladičem plnicího vzduchu a dodávána do spalovacího prostoru [40].



Obrázek 12 Nízkotlaková recirkulace spalin; upraveno a převzato z [40]

#### 4.1.2 VYSOKOTLAKOVÁ RECIRKULACE SPALIN

Vysokotlakou recirkulaci spalin využívají vozy Škoda splňující normu Euro 4. Tyto vozy jsou vybaveny pouze oxidačním katalyzátorem bez filtru pevných částic. Výfukové plyny jsou odebírány přímo z výfuku ještě před katalyzátorem a prochází přes chladič výfukových plynů. Skrz hlavu válců se dostávají až do chlazeného ventilu výfukových plynů a ústí do sacího potrubí před motorem. Obrázek 13 popisuje schéma celé soustavy [40].

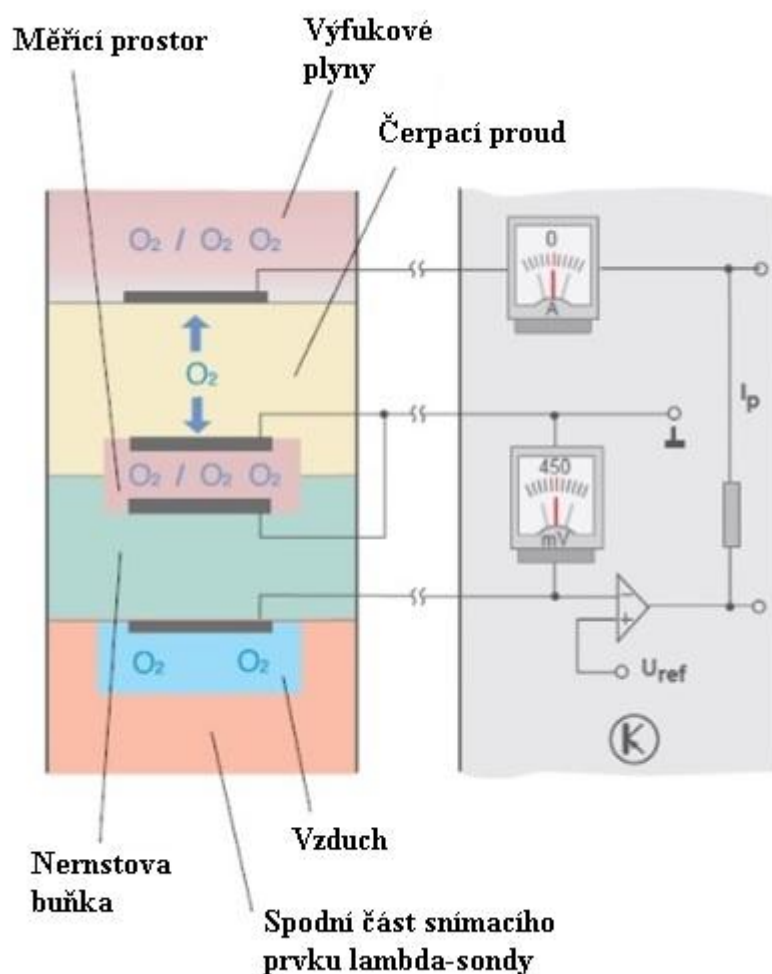


Obrázek 13 Vysokotlaková recirkulace spalín; upraveno a převzato z [40]

Pro splnění normy Euro 6 bylo nutné použít kombinaci obou systémů [40]. Systém recirkulace spalín byl nejčastěji řízen tlakem plnicího vzduchu, ale dnes se využívá elektronického řízení pomocí širokopásmové lambdasondy [2]. Dříve se používalo i řízení pomocí vakua [39].

#### 4.1.3 ŠIROKOPÁSMOVÁ LAMBDA SONDA

Touto lambdasondou lze měřit hodnoty  $\lambda > 0,7$ , což je pro vznětové motory ideální. Její optimální provozní teplota je 700 až 800 °C a je umístěna před katalyzátorem. Sonda se skládá ze dvou lambdasond z oxidu zirkoničitého se skokovou charakteristikou. Jedna sonda pracuje jako měřicí článek a druhá jako čerpací článek. Mezi nimi se nachází difuzní štěrbin, která plní funkci měřicího prostoru a nasávacího otvoru. Velikost štěrbin se pohybuje mezi 10 a 50  $\mu\text{m}$ . V měřicím článku je umístěný kanál referenčního vzduchu a je propojený s vnějším vzduchem. Tato sonda určuje zbytkový kyslík ve výfukových plynech. Okamžitou hodnotu  $\lambda$  zjišťuje řídicí jednotka z čerpacího proudu  $I_p$  [23]. Obrázek 14 vyobrazuje schéma této sondy.



Obrázek 14 Širokopásmová lambda sonda; upraveno a převzato z [41]

## SHRNUTÍ

System recirkulace spalin je účinná technologie, která snižuje emise oxidů dusíku tím, že navrácí část výfukových plynů zpět do spalovacího prostoru. Výfukové plyny snižují teplotu spalování. Ve spalovacím prostoru se tudíž nachází méně vzduchu a může také shořet méně paliva, což má za následek snížení měrné spotřeby paliva [42]. Ovšem tento systém není schopen samostatně dosáhnout normy Euro 6, proto je nutné jej doplnit o další emisní systémy.

## 5 OPATŘENÍ ZA MOTOREM

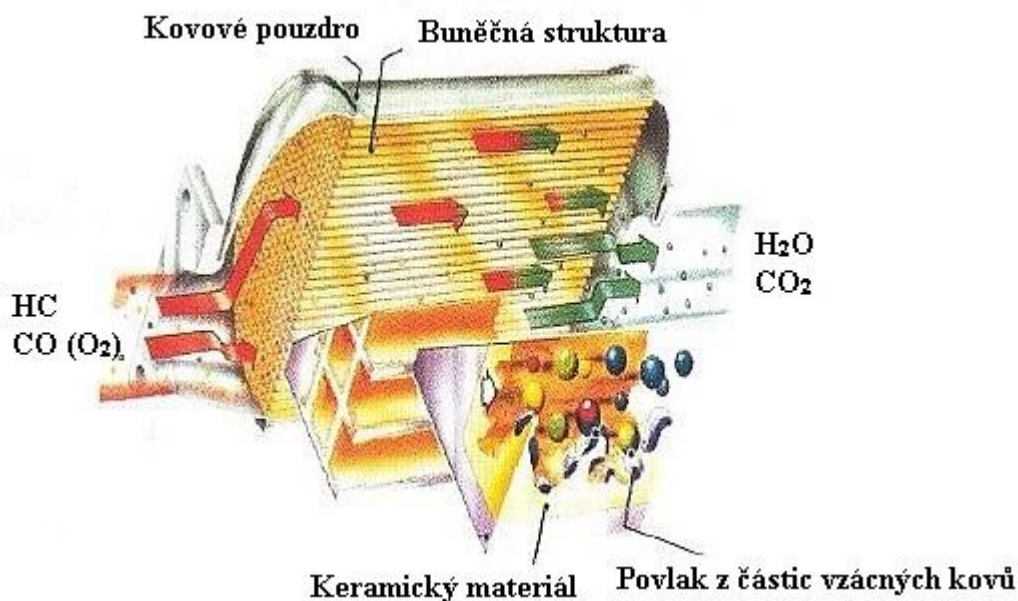
Opatřením za motorem se rozumí ty emisní systémy, které snižují obsah škodlivých látek až ve výfukovém potrubí. Doposud byly vyvinuty tři takové systémy, které lze aplikovat na vozidlo se vznětovým motorem.

Mezi tyto systémy se řadí oxidační katalyzátor. Je také často označován jako dvoucestný, protože na rozdíl od třicestného katalyzátoru, který se nachází ve vozidlech se zážehovým motorem, neumí eliminovat oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ . Dalším charakteristickým systémem pro vznětové motory je filtr pevných částic, který zachytává většinu vytvořených pevných částic. Následně je tento filtr spaluje. Pro splnění normy Euro 6 už ale na eliminaci oxidů dusíku nestačila samotná recirkulace spalin a muselo se přijít s nějakým novým systémem, který by tyto škodliviny srazil až na dovolenou hodnotu. Touto technologií je SCR katalyzátor, který společně s látkou AdBlue snižuje emise  $\text{NO}_x$ .

### 5.1 OXIDAČNÍ KATALYZÁTOR

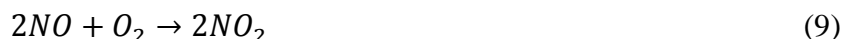
Jak už bylo zmíněno výše, u vznětových motorů lze použít pouze oxidační katalyzátor. V anglické literatuře se pro něj objevuje zkratka DOC (Diesel Oxidation Catalyst). Tento katalyzátor snižuje množství nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého ve výfukových plynech. Protože vznětový motor pracuje s velkým přebytkem vzduchu, jedná se o katalyzátor neřízený. Reakce v něm tudíž probíhají samovolně a nejsou nijak řízeny na rozdíl od třicestných katalyzátorů, kde jsou reakce řízeny množstvím přivedeného zbytkového kyslíku.

V katalyzátoru se nachází keramická matrice, která tvarem připomíná včelí plástev, viz Obrázek 15. Tato matrice je pokovená vrstvou drahých kovů. Jedná se o kovy, které zajišťují průběh oxidační reakce. Těmito kovy jsou paladium a platina [2]. Pro pokovení celé matrice stačí 1 až 2 g kovu, protože při reakcích se tento kov nespotřebává [23]. Keramická matrice je opatřena kanálky, které zvětšují účinnou plochu katalyzátoru. Počet kanálků je zhruba 60 na  $\text{cm}^2$ , celková účinná plocha katalyzátoru je pak velká asi jako fotbalové hřiště [2]. Katalyzátor má obal z nerezové oceli, aby se předešlo porušení obalu vlivem koroze a následnému úniku výfukových plynů.



Obrázek 15 Oxidační katalyzátor; upraveno a převzato z [3]

Účinnost katalyzátoru stoupá s jeho teplotou [43]. Pro průběh reakce je nutné dosáhnout alespoň teploty 170 °C, ale optimální provozní teplota je mezi 250 °C až 350 °C [23]. Po dosažení minimální potřebné teploty pak v katalyzátoru probíhají tyto reakce:

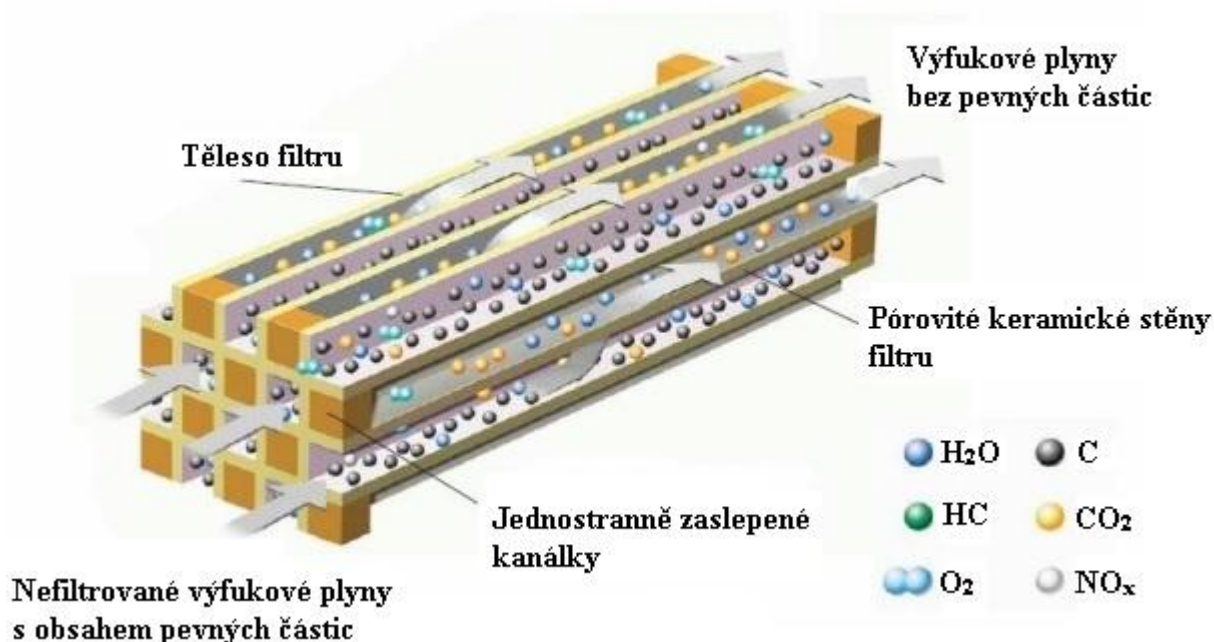


Oxidací se v katalyzátoru za pomoci kyslíku mění oxid uhelnatý na oxid uhličitý, nespálené uhlovodíky se mění také na oxid uhličitý a na vodní páru. Poslední rovnice popisuje změnu oxidu dusnatého na oxid dusičitý. Ovšem nedochází zde k eliminaci ani jednoho z oxidů dusíku.

Oxidační katalyzátor bývá často umístěn do bezprostřední blízkosti filtru pevných částic a tento systém je umístěn co nejbližší motoru, aby katalyzátor co nejrychleji dosáhl pracovní teploty. Dohromady pak zvyšují průměrnou spotřebu paliva vozidla zhruba o 2 % [44].

## 5.2 FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

Tento filtr je umístěn za oxidačním katalyzátorem a co nejbližší k němu, aby nedocházelo k velkým teplotním ztrátám. Je určený ke snížení množství pevných částic ve výfukových plynech. Nejčastěji se skládá z keramického porézního voštinového válce s kanálky, které jsou střídavě uzavřeny a otevřeny, viz Obrázek 16 [23]. Existuje i filtr pevných částic, vyvinutý firmou Bosch, který má filtrační válec ze spěkaných kovů a díky svojí geometrii umožňuje rovnoměrné ukládání pevných částic [2].



Obrázek 16 Filtr pevných částic; upraveno a převzato z [45]

### 5.2.1 DPF FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

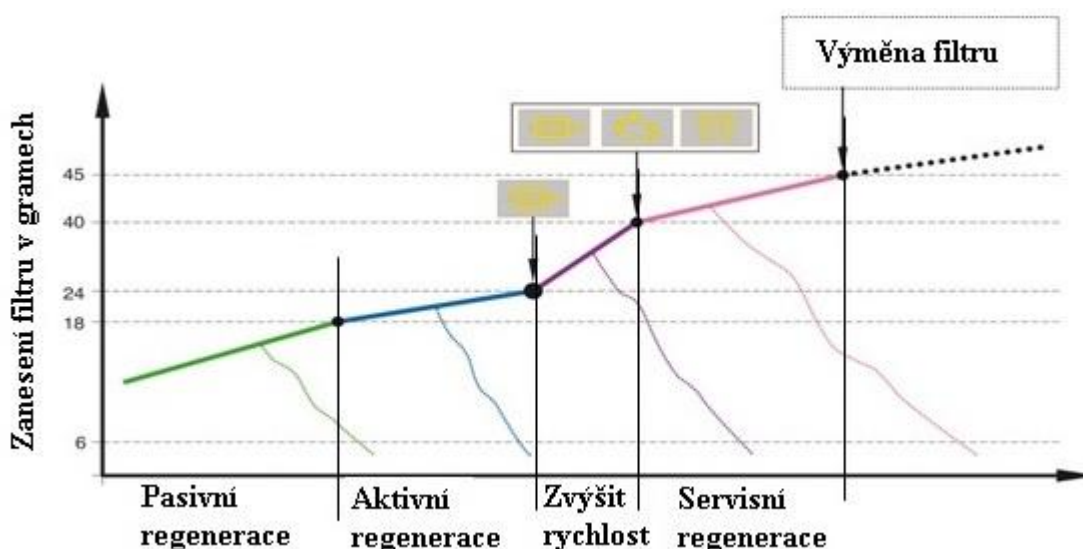
Výfukové plyny proudí skrz porézní stěny keramického válce a pevné částice pomalu ucpávají póry. U čistého filtru je rozdíl tlaku před a za filtrem 20 až 150 mbar při 1000 až 4500 min<sup>-1</sup> [39]. Tato hodnota se ale u každého výrobce filtru liší. Když je filtr čistý, nemá jeho přítomnost ve výfukovém potrubí vliv na činnost motoru a jízdní vlastnosti vozidla [46]. Při postupném zanášení filtru dochází ke zvyšování protitlaku a ke zvyšování průměrné spotřeby a zároveň ke snížení výkonu motoru [23]. Usazené částice je třeba spalovat, jenomže teplota hoření pevných částic se pohybuje okolo 550 °C a běžnou jízdou se této teploty dosahuje jen velmi obtížně [2]. Toto lze řešit regenerací filtru. K regeneraci dochází buď samovolně, nebo pokud řídicí jednotka naměří velký diferenční tlak na filtru, tj. když je filtr příliš zaplněný.

**Pasivní regenerace** – K pasivní regeneraci dochází, když teplota výfukových plynů při běžné jízdě dosáhne teploty hoření pevných částic, ty se pak začnou samovolně vypalovat [47].

**Aktivní regenerace** – Aktivní regenerace je spuštěna pokud se běžnou jízdou nedosáhne potřebné teploty pro spálení částic. Tato regenerace spočívá v dodatečném vstříknutí paliva do výfukového potrubí v době, kdy je otevřený výfukový ventil. Tímto lze zvýšit teplotu výfukových plynů natolik, že dojde k vypalování pevných částic usazených ve filtru [47]. Další možností je umístění vstříkovačívho ventilu přímo do výfukového potrubí.

**Asistovaná regenerace** – Tato regenerace je aktivována, neproběhne-li správně aktivní regenerace. Zvýší se zanesení filtru a rozsvítí se kontrolka filtru pevných částic. Na palubním počítači se pak objeví pokyn ke zvýšení rychlosti a otáček motoru. Zároveň se do výfukového potrubí začne dodatečně vstříkovat palivo, aby se teplota výfukových plynů zvýšila na potřebnou teplotu.

**Servisní regenerace** – Když ani asistovaná regenerace neproběhne správně, rozsvítí se ještě kontrolka motoru, jak ukazuje Obrázek 17, a je nutné vyhledat odbornou pomoc. Pomocí diagnostického přístroje se nastaví zvýšené otáčky motoru a regenerace probíhá, dokud se diferenční tlak nesníží na požadovanou hodnotu. Když ani tato regenerace nebude dostatečně účinná, lze filtr demontovat a nechat propláchnout. Poslední možností je výměna za nový díl.



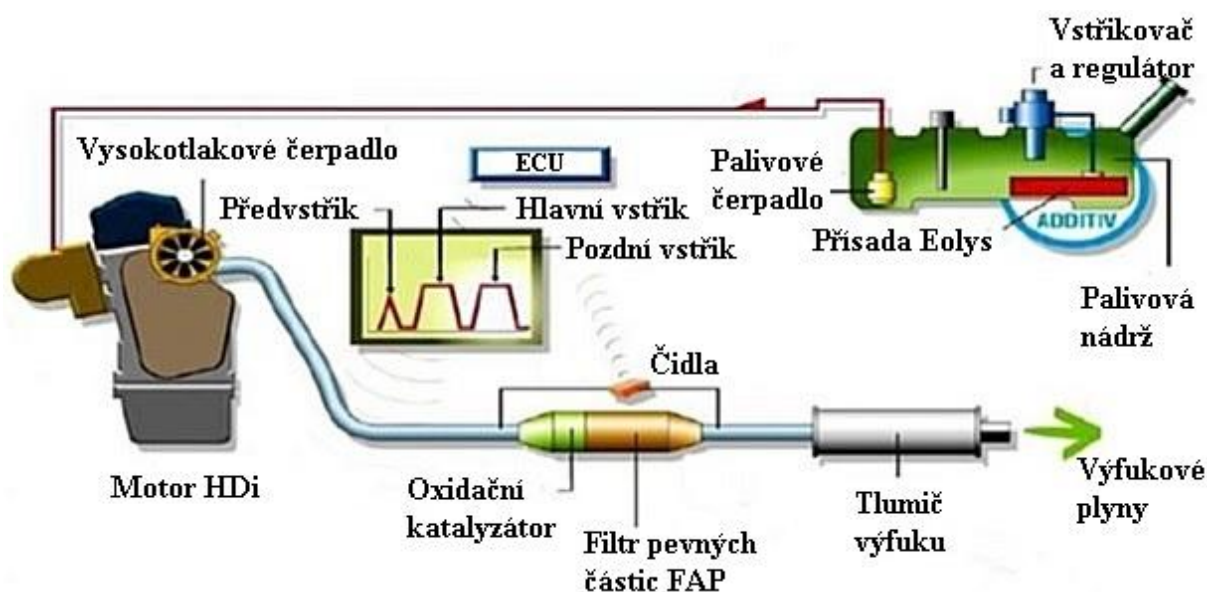
Obrázek 17 Regenerace v závislosti na zanesení filtru; upraveno a převzato z [48]



Při regeneraci filtru a spalování pevných částic dochází k tvorbě oxidu uhličitého a vodní páry, nesmí být ale překročena teplota 700 °C. Zároveň dochází k zanášení filtru popelem, který už nelze vypálit [23]. Při úplném zanesení popelem se rozsvítí kontrolka filtru pevných částic a je potřeba filtr vypláchnout. Pokud dojde k překročení životnosti filtru, opět se rozsvítí kontrolka a je nutné ho vyměnit za nový díl. Životnost se pohybuje okolo 200 000 km.

### 5.2.2 FAP FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

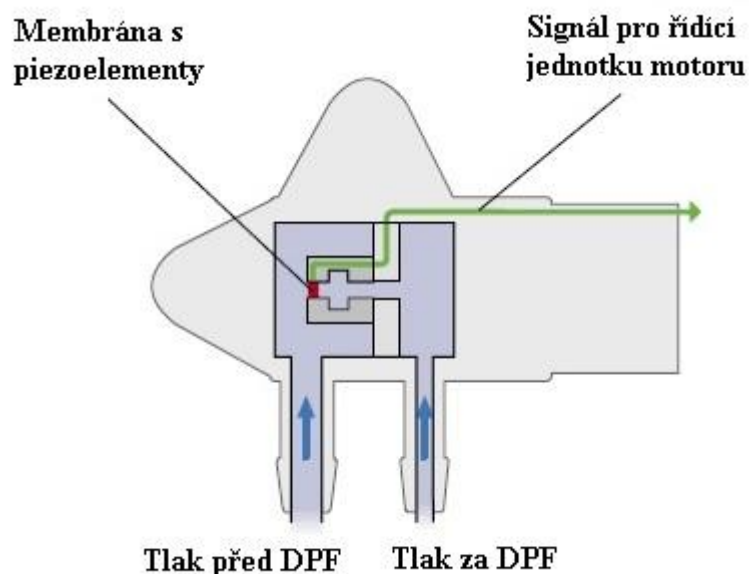
Tento filtr využívá koncern PSA (automobilky Peugeot a Citroen). Prvně byl použit v roce 2000 [46]. Konstrukce a funkce filtru FAP je stejná jako u filtru DPF. Jediný rozdíl je v tom, že filtr FAP pracuje s tzv. studenou regenerací, protože využívá speciálního aditiva Eolys, které je schopné snížit teplotu spalování pevných částic až na 450 °C [2]. Dnes existují čtyři generace tohoto aditiva. Eolys je do nádrže dávkován řídicí jednotkou vždy při tankování, viz Obrázek 18, proto musí být vozidlo opatřeno snímačem otevření víčka nádrže. Jedna dávka aditiva je vstříknuta za každých 10 natankovaných litrů nafty, tudíž je nutné natankovat alespoň 10 litrů, jinak nedojde k aplikování aditiva do nádrže [46]. Tento filtr snižuje množství pevných částic ve výfukových plynech až o 95 % a pro jeho správnou funkci je nutná pravidelná regenerace [2].



Obrázek 18 Schéma systému dávkování aditiva Eolys; upraveno a převzato z [3]

### 5.2.3 SNÍMAČ DIFERENČNÍHO TLAKU FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Jak už bylo zmíněno výše, tento snímač slouží ke snímání hodnot tlaku spalin před a za filtrem pevných částic. Na vozidle je namontován tak, aby ho nijak nepoškodila vysoká teplota výfukového potrubí. S filtrem je spojen pomocí dvou silikonových hadiček, kterými do snímače proudí spaliny [49]. Snímač je rozdělen na dvě části, které jsou od sebe odděleny membránou osazenou piezoelementy, viz Obrázek 19. Měření rozdílu tlaků je založeno na piezoelektrickém jevu, to znamená, že podle velikosti hodnoty rozdílu tlaků se membrána zdeformuje. Piezoelementy, kterými je membrána opatřena, se na základě toho také zdeformují a vygenerují napětí. Toto napětí poté vyhodnocuje řídicí jednotka motoru. Pokud bude diferenční tlak příliš vysoký, ihned spustí regeneraci filtru [37].



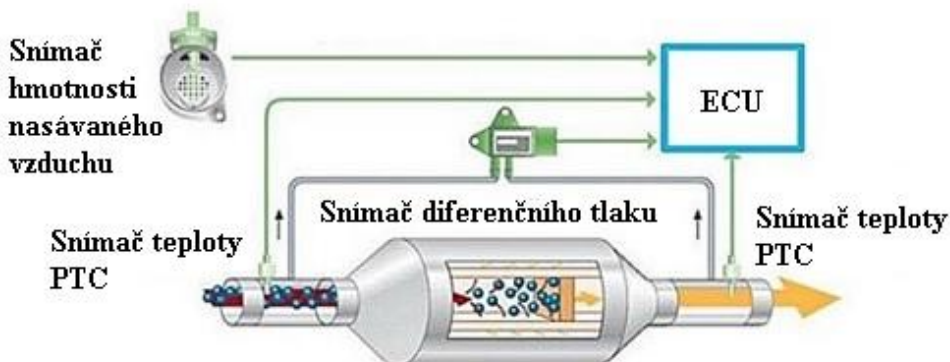
Obrázek 19 Schéma snímače diferenčního tlaku; upraveno a převzato z [37]

#### 5.2.4 SNÍMAČ TEPLoty VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Tento snímač měří teplotu výfukových plynů ve výfukovém potrubí a tím i nepřímo teplotu filtru pevných částic. Podle naměřené teploty pak řídicí jednotka vyhodnocuje, zda nastaly vhodné podmínky pro spuštění regenerace [50].

Existují dva typy těchto snímačů - s pozitivním teplotním koeficientem (PTC) a s negativním teplotním koeficientem (NTC). Snímač NTC vykazuje velký odpor při nízkých teplotách a malý odpor při teplotách vysokých, odpor se tedy s teplotou snižuje. Naopak je to u snímače PTC, jeho odpor s teplotou narůstá, jedná se také o nejčastěji používaný typ teplotního snímače. Řídicí jednotka motoru pak vyhodnocuje velikost odporu a přiřazuje mu odpovídající teplotu [50].

Tento snímač plní několik funkcí. Ochraňuje filtr pevných částic před příliš horkými výfukovými plyny. Řídicí jednotka motoru umí také ze signálu, tvořeným tímto snímačem, vypočítat, jak je velký průtok spalin přes filtr, a při porovnání signálu ze snímače hmotnosti nasávaného vzduchu vyhodnocuje zaplnění filtru sazími [37].



Obrázek 20 Umístění teplotních snímačů na filtru pevných částic; upraveno a převzato z [52]

Těchto snímačů se v celém výfukovém systému může nacházet hned několik. Co se týče filtru pevných částic, zpravidla bývá teplotní senzor umístěný před i za ním, jak ukazuje Obrázek 20.

### 5.3 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC

Pro měření byl použit automobil Ford Mondeo s rokem výroby 2009 a nájezdem 268 952 km. Toto vozidlo je vybaveno vznětovým motorem se zdvihovým objemem 1998 cm<sup>3</sup> a výkonem 103 kW při 3750 min<sup>-1</sup>. Měření bylo provedeno s pomocí diagnostického přístroje Hella Gutmann Mega Macs 56, viz Obrázek 21. Přístroj nebyl vybaven paměťovým modulem, a proto musely být hodnoty diferenčního tlaku měřeny při postupném zvyšování otáček a až poté bylo možné zkonstruovat jejich závislost. Celé měření pak probíhalo na výkonové zkušebně v areálu Střední školy automobilní v Ústí nad Orlicí, viz Obrázek 22.

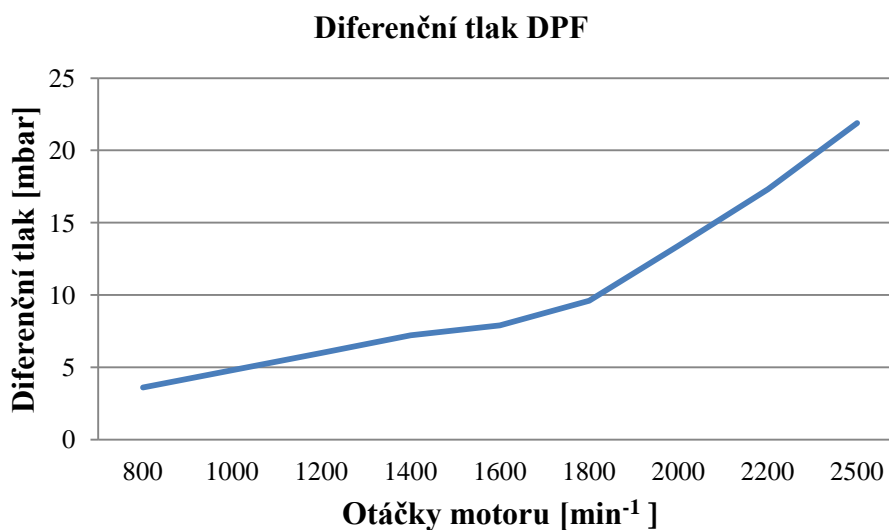


Obrázek 21 Diagnostický přístroj Hella Gutmann Mega Macs 56 [51]

Protože toto vozidlo neumožňuje zjistit množství popela a sazí ve filtru, jedinou cestou, jak poznat zda filtr plní svou funkci správně, je změřit hodnotu diferenčního tlaku při volnoběžných, zvýšených, i maximálních otáčkách.



Obrázek 22 Výkonová zkušebna Střední školy automobilní v Ústí nad Orlicí



Obrázek 23 Průběh diferenčního tlaku v závislosti na otáčkách motoru

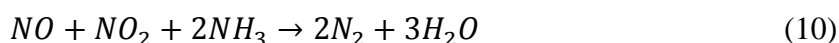
Výrobce Ford udává dovolenou hodnotu diferenčního tlaku při volnoběžných otáčkách  $\Delta p = 0 \div 5$  mbar. Jak ukazuje Obrázek 23, při 800 min<sup>-1</sup> byla naměřena hodnota 3,6 mbar, což spadá do povoleného intervalu. Kdyby byla tato hodnota překročena a dostala by se do intervalu  $\Delta p = 5 \div 15$  mbar, znamenalo by to, že čištění filtru ještě může provést řídicí jednotka motoru pomocí aktivní regenerace. Pokud by ale byl překročen i tento interval a hodnota diferenčního tlaku se nacházela v rozmezí  $\Delta p = 15 \div 25$  mbar, značilo by to, že je filtr zcela naplněn a s vozidlem je nutné navštívit servis.

Při maximálních otáčkách je povolená hodnota diferenčního tlaku až 100 mbar. Při těchto otáčkách byla naměřena hodnota diferenčního tlaku v rozmezí  $\Delta p = 65 \div 87$  mbar. Po provedeném měření je zřejmé, že by filtr pevných částic měl být v pořádku. Při maximálních otáčkách bylo také zjištěno, že se recirkulace spalin zcela uzavře, a tudíž funguje správně.

Jenomže výfuk vozidla byl silně znečištěný saze a kouřivost byla taková, že vozidlo neprošlo přes měření emisí při technické kontrole. To bylo způsobeno tím, že keramická voština byla prasklá a saze procházely skrz filtr. Řídicí jednotka nezjistila žádnou závadu, protože toto vozidlo nemá za filtrem pevných částic žádný další snímač, který by vyhodnocoval složení spalin. Řídicí jednotka porovnává pouze hodnoty diferenčního tlaku a na základě toho nebyla schopná vyhodnotit filtr jako nefunkční.

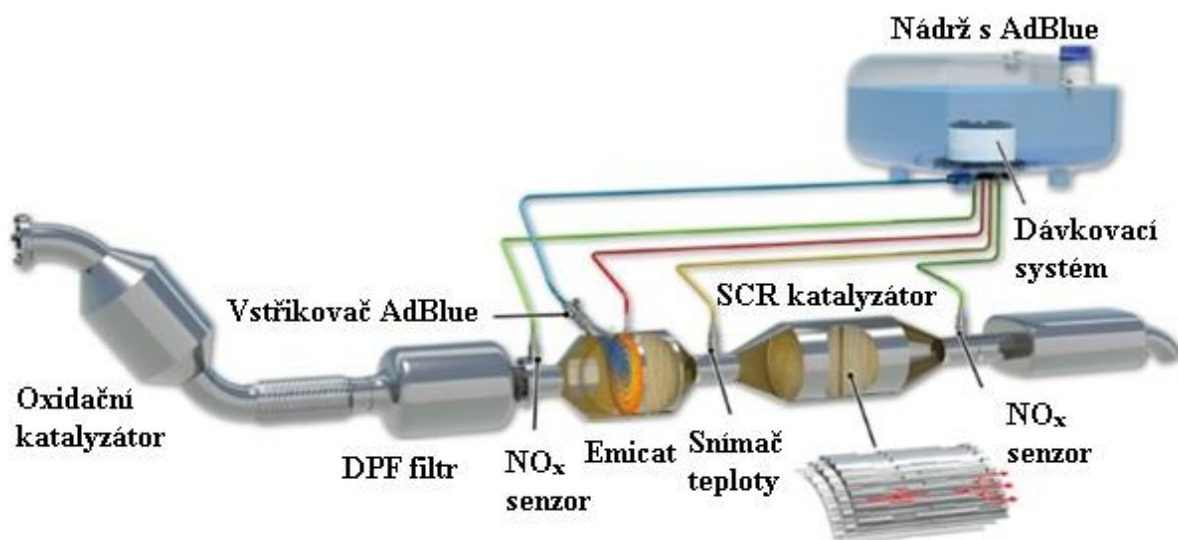
## 5.4 SCR KATALYZÁTOR

Tento systém byl používán nejprve v elektrárnách a nákladních vozidlech [53]. V katalyzátoru probíhá selektivní katalytická redukce a s pomocí kapaliny AdBlue velmi efektivně redukuje emise oxidů dusíku. Uvnitř katalyzátoru se nachází prodyšná keramická vložka potažená drahými kovy, stejně jako u oxidačního katalyzátoru [54]. Kapalina AdBlue se vstřikuje do výfukového potrubí před SCR katalyzátor a proti směru proudění plynů. Vlivem vysokých teplot se pak z kapaliny vyloučí amoniak [55]. Někdy se do systému přidává zařízení Emicat (Electric Heated Catalyst), viz Obrázek 24, díky kterému se amoniak z AdBlue lépe vylučuje. Amoniak pak v katalyzátoru redukuje oxidy dusíku na dusík N<sub>2</sub> a vodní páru H<sub>2</sub>O [55].



Množství vstřikovaného AdBlue závisí na signálu ze snímače hmotnosti nasávaného vzduchu, snímače tlaku v sacím potrubí a na poloze plynového pedálu. Do výfukového potrubí se pak umísťuje ještě snímač oxidů dusíku, který snímá zbylé množství těchto škodlivin [56]. S technologií SCR je pak možné dosáhnout snížení spotřeby o 3 až 4 % [57].

V roce 2019 pak firma Volkswagen přišla s technologií twin dosing (Dvojité dávkování). Princip je jednoduchý, v systému se nachází dva SCR katalyzátory a před každý z nich je vstřikováno AdBlue. Tento systém je schopný snižovat množství  $\text{NO}_x$  až o 80 % [58].



Obrázek 24 Systém vstřikování AdBlue; upraveno a převzato z [59]

#### 5.4.1 ADBLUE

AdBlue je kapalina skládající se z 27 % amoniaku a ze 73 % vody [53]. Často je také označována jako DEF (Diesel Exhaust Fluid), oba tyto názvy jsou uvedeny na zátce hned vedle zátky palivové nádrže [57]. Tato kapalina je nehořlavá a má trvanlivost pouze 2 roky. Nevýhodou je, že zamrzá už při  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tudíž je nutné systém vybavit ohřívačem. Jeden litr této kapaliny by měl vystačit na 1000 km [56]. Vozidlo řidiči podává informaci o množství AdBlue v nádrži. Pokud kapalina zcela dojde, vozidlo by nemělo být možné nastartovat do doby, než bude kapalina opět doplněna.

#### 5.4.2 NOX SENZOR

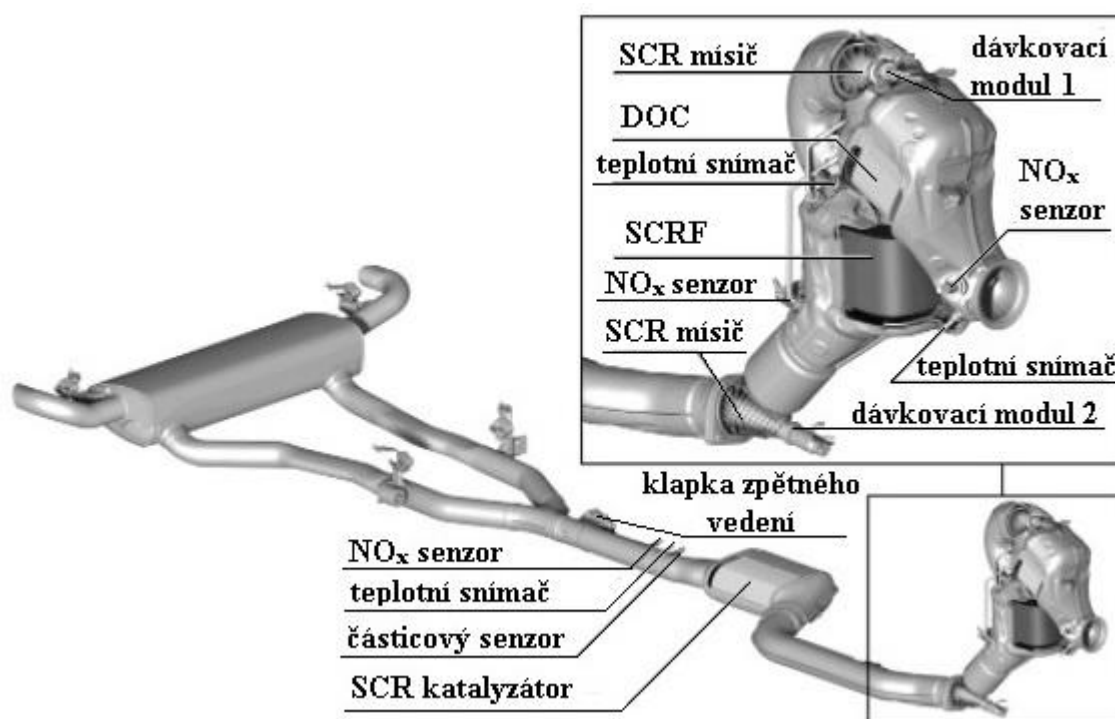
Tento snímač měří množství oxidů dusíku ve výfukových plynech. Obvykle bývají ve výfukovém potrubí dva tyto snímače. První z nich měří množství  $\text{NO}_x$  produkované motorem, druhý pak měří zbylé  $\text{NO}_x$  odcházející z výfukového systému [60]. Je také velmi citlivý na prudké zvýšení teploty. Výfukové plyny ho nejprve ohřejí na  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  a poté je možné zapnout jeho výhřev a snímač se ohřeje až na pracovní teplotu  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  [56].

## 6 MODERNÍ KONCEPCE EMISNÍCH SYSTÉMŮ

V této kapitole bude uvedeno několik příkladů konstrukce emisních systémů používaných automobilkami Audi a BMW. Na závěr je také pro porovnání uveden emisní systém autobusu IVECO.

### 6.1 EMISNÍ SYSTÉM VOZIDEL BMW

Obrázek 25 ukazuje konstrukci emisního systému používaného u vozidel BMW s řadovým šestiválcovým motorem 30d a 40d. Tento motor je vybaven vstřikovacím systémem Common-Rail CRI3-27 s piezokrystalickými vstřikovacími ventily pracujícími s tlakem paliva až 2700 bar. Tato vozidla splňují normu Euro 6d [61].



Obrázek 25 Emisní systém vozidel BMW; upraveno a převzato z [61]

I když Obrázek 25 přímo neukazuje recirkulaci výfukových plynů, motor je tímto systémem vybaven. Výrobci použili recirkulaci opatřenou chlazením, které se skládá ze dvou etap. Chladicí systém recirkulace obsahuje dva elektronicky ovládané bypass ventily a vodou chlazený EGR ventil. Po nastartování je nutné, aby se motor co nejrychleji ohřál, proto nejsou výfukové plyny nijak chlazeny a přes sání proudí zpět do motoru. Při malém zatížení motoru pak probíhá pouze mírné ochlazování spalin. Ale při větším zatížení už dochází k velkému ochlazování. Množství navracených výfukových plynů se pohybuje v rozmezí od 40 % do 10 % a závisí na velikosti otáček a zatížení motoru [61].

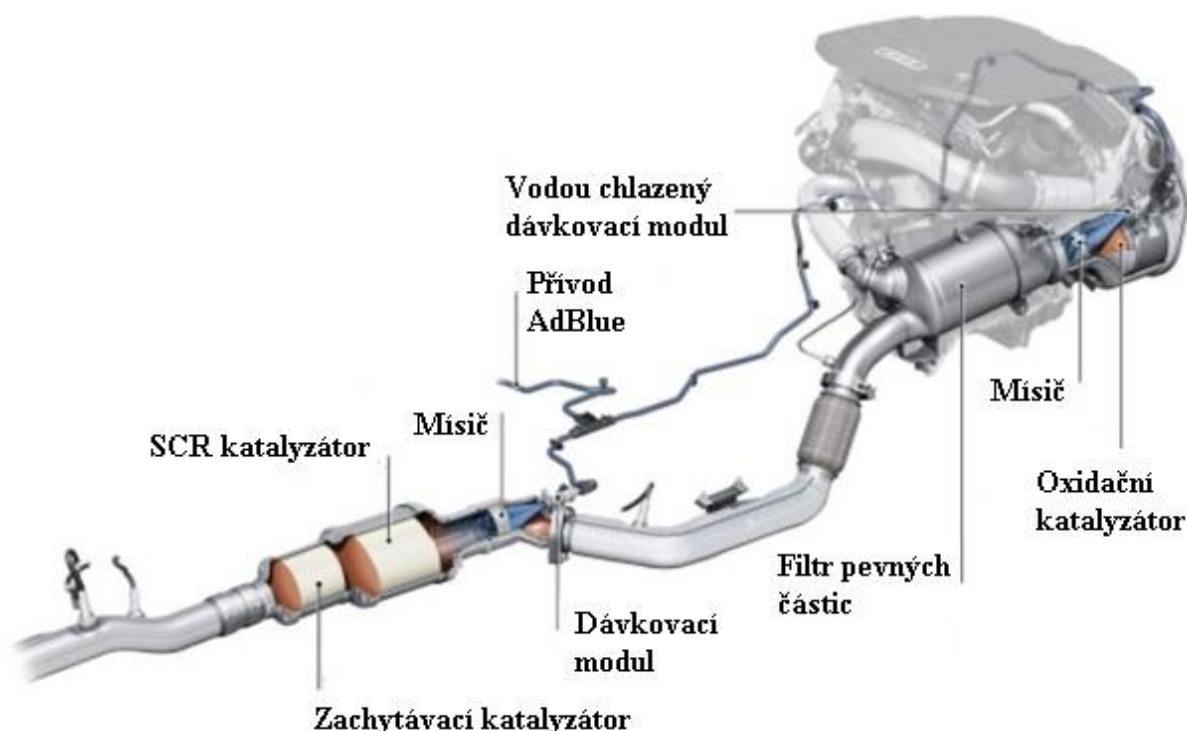
Oxidační katalyzátor je umístěn bezprostředně za motorem. To umožňuje jeho rychlé ohřátí na provozní teplotu a správnou funkci. Za ním se nachází první dávkovací modul, který vstřikuje močovinu (AdBlue) do mísiče, kde se mísí s výfukovými plyny. Výfukové plyny dál putují potrubím do systému označeného jako SCRF. Jedná se o filtr pevných částic, který má v sobě integrovanou technologii SCR [62]. Dochází zde ke snížování množství NO<sub>x</sub> a PM.

Pod systémem SCRF se nachází druhý dávkovací modul. Tento modul mají pouze motory 40d. Dále je zde umístěn SCR katalyzátor, který má na sobě povlak bránící úniku zbytkového amoniaku [61]. Výfukové potrubí je zakončeno tlumičem hluku. V celém výfukovém systému se nachází několik snímačů měřící oxidy dusíku. Z hodnot poskytnutých těmito snímači se pak určuje množství vstřikované močoviny. Za SCR katalyzátorem je umístěn částicový snímač, který kontroluje správnou funkci filtru pevných částic.

## 6.2 EMISNÍ SYSTÉM AUDI Q5

Obrázek 26 ukazuje konstrukci emisního systému automobilu Audi Q5 40 TDI quattro. Výrobce u tohoto vozu udává průměrnou spotřebu paliva okolo 5,4 l/100 km a produkci CO<sub>2</sub> při kombinované jízdě (město a mimo město) 139 až 143 g/km [63]. Vozidlo je vybaveno motorem 2.0 TDI o výkonu 140 kW využívajícím vstřikovací systém Common-Rail [64]. Vůz splňuje normu Euro 6 [65].

Konstrukce celého emisního systému je velmi podobná koncepci z kapitoly 6.1. Na začátku výfukového potrubí se nachází oxidační katalyzátor, je opět umístěn co nejbližže motoru z důvodu rychlého dosažení provozní teploty. Za katalyzátor je dávkovacím modulem vstřikována močovina, protože vozidlo využívá filtr pevných částic s integrovanou technologií SCR. Na konci výfukového systému je namontován SCR katalyzátor se zachytávacím katalyzátorem. Zachytávací katalyzátor je zde proto, aby zabraňoval úniku zbylého amoniaku [58].



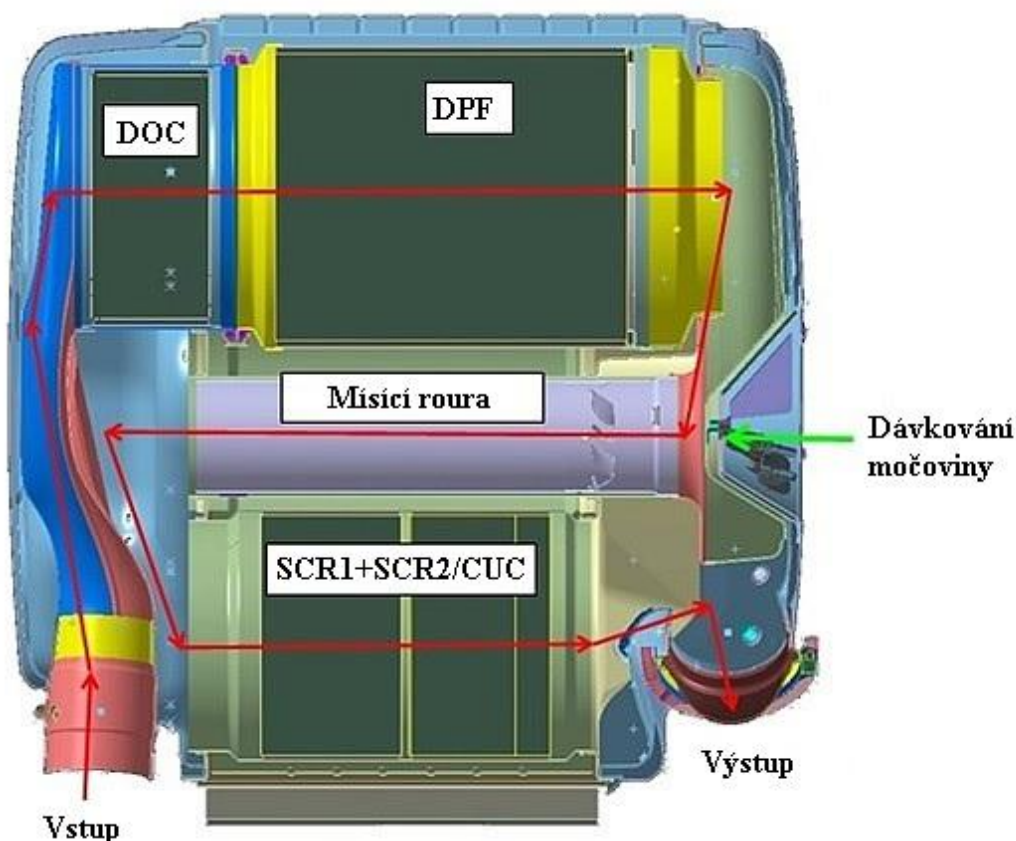
Obrázek 26 Emisní systém Audi Q5 40 TDI quattro; upraveno a převzato z [63]

### 6.3 EMISNÍ SYSTÉM IVECO

Tato práce se sice zabývá emisními systémy osobních vozidel, ale je zde pro porovnání uvedena i konstrukce emisního systému autobusů a nákladních vozů IVECO. Technologie snižující škodlivé látky ve výfukových plynech použité v těchto dopravních prostředcích jsou totiž stejné jako v osobních vozidlech se vznětovým motorem.

Autobusy a nákladní vozy IVECO používají motory Tector a Cursor. Tyto motory se ještě dělí do kategorií podle zdvihového objemu. Výkonnější z nich je právě Cursor a v nejvyšší kategorii C13 se svým zdvihovým objemem 13 litrů dosahuje výkonu 412 kW (560 koňských sil) [66].

Obrázek 27 ukazuje konstrukci emisního systému. Jednotlivé komponenty tohoto systému jsou poskládány ve stejném pořadí, jako to mají osobní vozidla. Jediný rozdíl je v SCR katalyzátoru, ten je rozdělen na dvě části. K druhé části je pak přiřazen clean-up catalyst (CUC). CUC je označení pro katalyzátor, který zabraňuje úniku amoniaku ven z výfukového potrubí [67]. Všechny tyto součásti jsou uzavřeny do jedné nádoby, která je osazena snímačem diferenčního tlaku,  $\text{NO}_x$  senzorem, dvěma snímači teploty a snímačem pro kontrolu přítomnosti amoniaku na konci výfukového potrubí. Tato vozidla pak splňují emisní normu Euro 6 [66].



Obrázek 27 Emisní systém IVECO; upraveno a převzato z [66]



## 7 ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Vznětové motory produkují hned několik škodlivých látek a ty je třeba eliminovat. Protože se v motorové naftě nachází čím dál tím menší množství síry, není potřeba řešit emise spojené s touto látkou, jsou téměř zanedbatelné. Zbývá tedy redukovat množství CO, HC, PM a NO<sub>x</sub>. V posledních letech se ale v emisních normách Euro objevil požadavek na redukcí skleníkového plynu CO<sub>2</sub>.

Škodlivé látky ve výfukových plynech lze efektivně snižovat například kvalitou spalování, konstrukcí samotného motoru nebo kvalitou vstřikování. Ovšem výše uvedené emisní systémy při správné funkci škodliviny eliminují téměř úplně.

Prvním uvedeným emisním systémem je zpětná recirkulace spalin. Tento systém umožňuje návrat spalin zpět do sacího potrubí a spalovacího prostoru. Díky tomu se sníží teplota spalování a tím se sníží i tvorba oxidů dusíku NO<sub>x</sub>. Do válce může být ale navracena jen část spalin. Kdyby se teplota spalování příliš snížila, zapříčinilo by to nárůst produkce nespálených uhlovodíků HC.

Právě nespálené uhlovodíky redukuje oxidační katalyzátor. Pomocí oxidace a přebytečného kyslíku se oxid uhelnatý a již zmíněné uhlovodíky přeměňují na oxid uhličitý a vodní páru. Jeho nevýhodou je, že ke své funkci vyžaduje určitou teplotu. Proto je umístován co nejbližší motoru, aby se rychle ohřál na provozní teplotu a vyřešil se tak problém při studených startech. Dokud není dosažena požadovaná teplota, oxidační katalyzátor pracuje s velmi nízkou účinností.

Dále se ve výfukovém systému nachází filtr pevných částic. Tento filtr zachytává většinu pevných částic, které následně vypaluje. U vozidel se vznětovým motorem však nelze často běžnou jízdou docílit potřebné teploty pro vypálení, proto je nutné po určitých intervalech filtr regenerovat. Zvýšení teploty lze docílit dodatečným vstříknutím nafty do výfukového potrubí.

Pro redukcí oxidů dusíku ovšem nestačí samotná recirkulace. Po přijetí normy Euro 6 bylo nutné přijít s nějakou novou technologií. Touto technologií je SCR katalyzátor. Aby tento katalyzátor plnil svoji funkci, je nutné použít redukční činidlo AdBlue, které se skládá z amoniaku a vody. Tento systém je pak schopný redukovat množství NO<sub>x</sub> až o 80 %. Funkce selektivní katalytické redukce bývá často integrována přímo do filtru pevných částic. Tím se sníží počet komponent ve výfukovém systému a protitlak, který katalyzátory a filtry vytvářejí. Protitlak spalin má totiž negativní vliv na výkon a průměrnou spotřebu paliva.

Jedinou složku, kterou zatím nejsme schopni výrazně redukovat, zůstává CO<sub>2</sub>. Oxid uhličitý je přímo úměrný spotřebě paliva. Jeho množství je možné ovlivnit zmenšením zdvihového objemu motoru nebo snížením vstřikovaného množství paliva. Pro eliminaci CO<sub>2</sub> neexistuje žádný emisní systém. Touto cestou se nejspíše bude ubírat další vývoj emisních systémů.

## 8 NÁVRH VLASTNÍ KONCEPCE EMISNÍHO SYSTÉMU

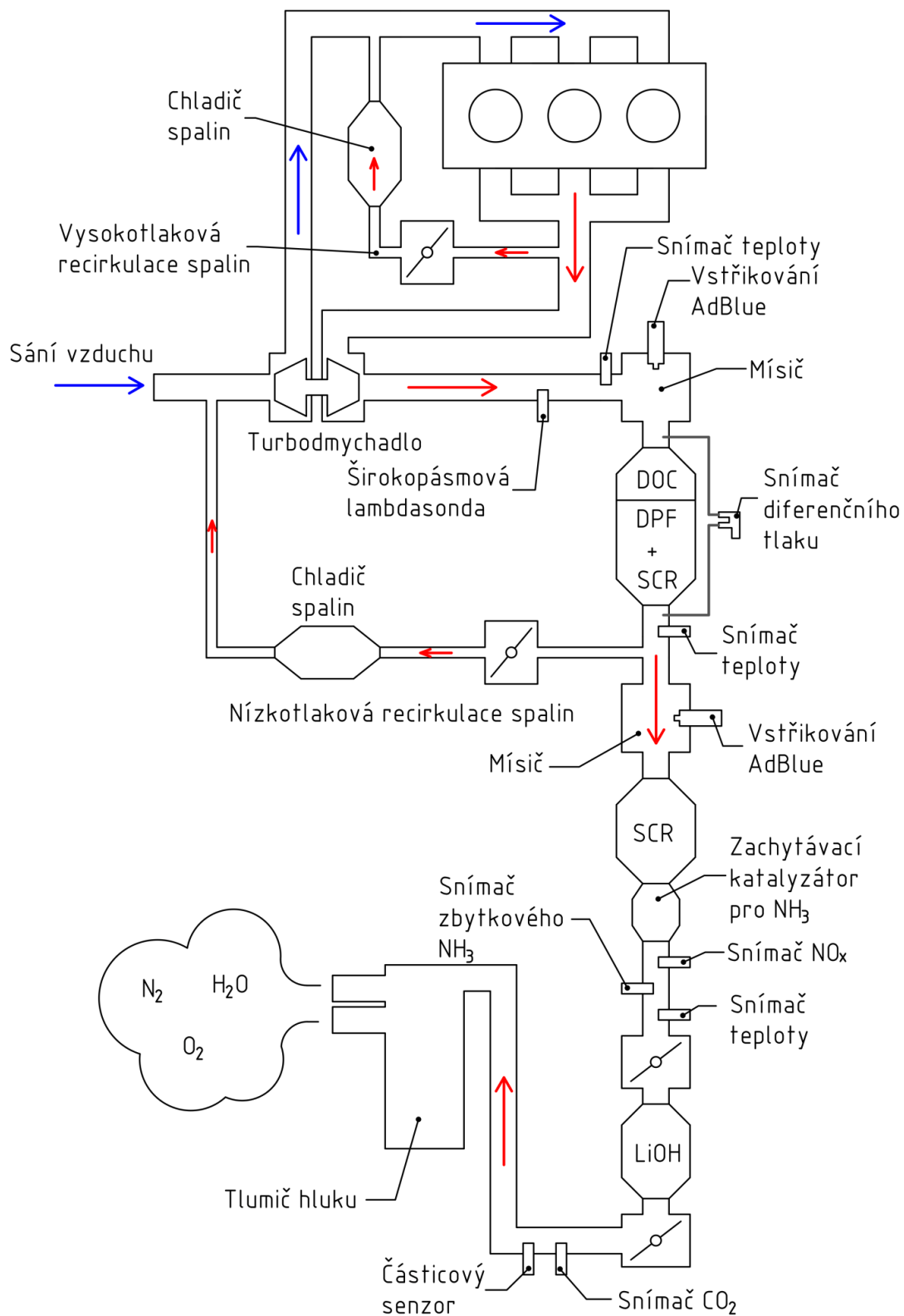
Prvotní návrh vznikl s použitím technologií, které snižují množství škodlivin v námořní dopravě. Tyto systémy jsou v podstatě totožné s těmi, co dnes využívají osobní automobily [68]. Lodě využívají ještě odsiřovače [68], které u osobního automobilu nejsou zapotřebí, jelikož množství síry v motorové naftě je minimální a emise spojené s touto složkou jsou zanedbatelné [2]. Komponenty, jako jsou oxidační katalyzátor, filtr pevných částic a SCR katalyzátor ale nelze z emisního systému vypustit.

Cílem druhého návrhu bylo zajistit redukci množství  $\text{CO}_2$ , protože nejnovější euro normy už obsahují limity regulující množství této složky výfukových plynů. V uhelných elektrárnách dochází k separaci oxidu uhličitého ze spalin, plyn je následně odváděn do podzemní zásobárny [69]. Ovšem nebylo by jednoduché toto realizovat v osobním automobilu. Celý systém by vyžadoval velký zástavbový prostor a tlakovou nádobu, do které by se separovaný oxid uhličitý odváděl. Proces odlučování  $\text{CO}_2$  je velmi složitá záležitost a po naplnění nádoby by pak bylo nutné jeho odčerpání.

Finální návrh obsahuje kompaktnější řešení problému s  $\text{CO}_2$ . Je zde použita technologie, která v dieselových ponorkách slouží k čištění vzduchu. Princip je jednoduchý, znečištěný vzduch prochází skrz nádobu s hydroxidem lithným ( $\text{LiOH}$ ) nebo směsí hydroxidu sodného ( $\text{NaOH}$ ) a oxidu vápenatého ( $\text{CaO}$ ). Oxid uhličitý se na tyto látky váže, směs je ale nutné pravidelně měnit [70].

Obrázek 28 zobrazuje návrh celého systému. Tento systém využívá technologie uvedené výše v práci. Koncepte obsahuje nízkotlakovou i vysokotlakovou recirkulaci spalin, dále se zde nachází oxidační katalyzátor spojený se systémem SCRF (DPF+SCR), což je filtr pevných částic, ve kterém probíhá selektivní katalytická redukce. Všechny tyto součásti jsou uloženy v jedné nádobě a umístěny co nejbližší motoru, aby se co nejrychleji dosáhlo provozní teploty katalyzátoru a aby se pevné částice dostatečně vypalovaly. Ve výfukovém potrubí je použito dvojité vstřikování AdBlue pro efektivnější eliminaci  $\text{NO}_x$ . Je zde také druhý SCR katalyzátor a katalyzátor zabraňující úniku zbytkového amoniaku. Na konci výfuku je pak umístěna nádoba s práškovým hydroxidem lithným. Nádoba je umístěna až na konci potrubí, protože jsou zde spaliny chladnější. Hydroxid lithný má totiž teplotu tavení pouze  $462\text{ }^\circ\text{C}$  [71], kdyby byla tato hodnota překročena, došlo by k zatavení nádoby a k ucpání celého výfukového systému. Z obou stran jsou k tomuto systému přidány klapky, které se vždy po vypnutí motoru zavřou a utěsní nádobu naplněnou  $\text{LiOH}$ , aby nedocházelo k rychlé degradaci směsi tím, že na sebe bude hydroxid vázat oxid uhličitý z okolí. Výfukové potrubí je také osazeno snímači, které jsou potřebné pro správné řízení všech systémů.

Takovýto systém je spíše utopickou koncepcí. Jeho provoz a údržba, by byly kvůli časté výměně směsi  $\text{LiOH}$ , tak nákladné, že by ho nebylo možné využívat v běžně dostupných vozidel.



Obrázek 28 Schéma vlastní koncepce emisního systému

## ZÁVĚR

Na úvod práce jsou uvedeny složky výfukových plynů vznikající spalováním uhlíkových paliv vznětovými motory. Je zde vysvětlen způsob jejich měření a jsou zde shrnuty povolené limity pro jednotlivé složky.

Dále jsou v práci popsány emisní systémy, které snižují množství škodlivin ve výfukových plynech. Prvním takovým systémem, který má nemalý podíl na eliminaci oxidů dusíku, je zpětná recirkulace spalin. Při opětovném spalování výfukových plynů totiž dochází ke snižování teploty spalování a tím i ke snížení emisí  $\text{NO}_x$ . Ovšem zpět lze vrátit maximálně 40 % výfukových plynů. Při překročení tohoto množství už by docházelo k nárůstu produkce nespálených uhlovodíků. Další emisní systémy jsou pak umístěny přímo ve výfukovém potrubí za motorem. V bezprostřední blízkosti motoru se nachází oxidační katalyzátor, ve kterém za neustálého přísunu zbytkového kyslíku, oxidují nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý na vodní páru a oxid uhličitý. Za katalyzátorem je umístěn filtr pevných částic. V pórovitých stěnách filtru se zachytávají pevné částice a zároveň se při regeneraci také vypalují. Nejnovější technologií pro snižování škodlivin je SCR katalyzátor. Při použití reakčního činidla AdBlue, skládajícího se z destilované vody a amoniaku, dochází v tomto katalyzátoru k eliminaci oxidů dusíku až o 80 %. V práci je také podrobně popsána konstrukce a princip činnosti těchto systémů a také je vysvětlen princip jejich řízení a vliv na spotřebu paliva.

Na závěr práce je popsán návrh vlastní koncepce. Tento systém měl být inspirován technologiemi z jiných odvětví průmyslu. Nakonec byla použita technologie pro čištění vzduchu, která má za cíl snižovat množství oxidu uhličitého. Koncepce také obsahuje všechny emisní systémy, které jsou v práci popsány, protože moderní automobil se spalovacím motorem by bez nich nebyl schopen splnit stávající emisní limity. Ovšem tuto koncepci není možné využít v běžných vozidlech, protože vyžaduje neustálou údržbu, tudíž by byl provoz velmi nákladný.

Jelikož je automobilový průmysl neustále tlačěn ke snižování emisí, bude v dohledné době přijata emisní norma Euro 7. Tato norma bude mít velmi přísné limity, které bude obtížné splnit. Jedním z možných řešení je přechod na syntetická paliva, která by neměla tak vysoké emise spojené s oxidem uhličitým. Druhou možností je nová technologie Freevalve, kterou vyvíjí švédská firma Koenigsegg ve spolupráci s čínskou firmou Qoros. Tato technologie umožňuje úplné odstranění vačkových hřídelů a rozvodového mechanismu motoru. Ventily jsou otevírány pneumaticky a následně hydraulicky zavírány. Celý systém je ovládán elektronicky, což je obrovská výhoda, oproti mechanickému řešení. Dalším řešením by mohlo být úplné nahrazení spalovacích motorů elektrickými. Toto sebou ovšem přináší i velké množství problémů, například nedostatek nabíjecích stanic a malou kapacitu baterií. Je ale také nutné si uvědomit, odkud se elektrická energie, pro dobíjení elektromobilů, získává. Aby při její výrobě nedocházelo k většímu znečištění, než při spalování uhlíkových paliv.

Všechny cíle uvedené v zadání bakalářské práce byly splněny.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KOŽOUŠEK, Josef. Spalovací Motory. Brno: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
- [2] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER. Spalovací motory: Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada Publishing, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [3] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů - QTS, Emise výfukových plynů: Termomechanika online [online]. In: . 23.10.2021, s. 139 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://docs.google.com/presentation/d/1Cy\\_Ez77V8zewjAORrESiX\\_xbk7vRbTH87b2h2KWfNVY/edit#slide=id.gcf159955da\\_0\\_118](https://docs.google.com/presentation/d/1Cy_Ez77V8zewjAORrESiX_xbk7vRbTH87b2h2KWfNVY/edit#slide=id.gcf159955da_0_118)
- [4] ČAPPO: ČESKÁ ASOCIACE PETROLEJÁŘSKÉHO PRŮMYSLU A OBCHODU. ČAPPO: ČESKÁ ASOCIACE PETROLEJÁŘSKÉHO PRŮMYSLU A OBCHODU [online]. Praha 9, 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/aktuality-a-media/aktuality/vyvoj-spotreby-pohonných-hmot-v-cr-v-roce-2019>
- [5] MAJEWSKI, W. Addy a Hannu JÄÄSKELÄINEN. What is Diesel Fuel: DieselNet Technology Guide. What is Diesel Fuel: DieselNet Technology Guide [online]. 2020, 2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://dieselnet.com/tech/fuel\\_diesel.php](https://dieselnet.com/tech/fuel_diesel.php)
- [6] Frakční destilace surové ropy. Webchemie: Ropa [online]. 2019 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.webchemie.cz/clanky/chemie-jasne/13-ropa.html>
- [7] NW Fuel Injection Service. NW Fuel Injection Service [online]. 2017, 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://nwfuel.ca/part1-diesel-fuel-characteristics/>
- [8] MUNROE, Don. Diesel Fuel Properties. Calgary, 2016. Dostupné také z: [https://mdec.ca/2016/S6P3\\_monroe.pdf](https://mdec.ca/2016/S6P3_monroe.pdf)
- [9] JÄÄSKELÄINEN, Hannu. Fuel Property Testing: Ignition Quality: DieselNet. Fuel Property Testing: Ignition Quality: DieselNet [online]. 2007, 2007 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://dieselnet.com/tech/fuel\\_diesel\\_ignition.php](https://dieselnet.com/tech/fuel_diesel_ignition.php)
- [10] AL IBRAHIM, Emad a Aamir FAROOQ. Prediction of the Derived Cetane Number and Carbon/Hydrogen Ratio from Infrared Spectroscopic Data [online]. 2021, 35(9), 8141-8152 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/acs.energyfuels.0c03899
- [11] Vliv cetanového čísla na průběh hoření. SlideToDoc [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/tmata-pednek-spalovac-motory-1-spalovac-motor-jako-3/>

- [12] ČAPPO: ČESKÁ ASOCIACE PETROLEJÁŘSKÉHO PRŮMYSLU A OBCHODU. ČAPPO: ČESKÁ ASOCIACE PETROLEJÁŘSKÉHO PRŮMYSLU A OBCHODU [online]. Praha 9, 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/aktuality-a-media/aktuality/zmeny-parametru-motorove-nafty-podle-casovych-obdobi>
- [13] NAIK, S.N., Vaibhav V. GOUD, Prasant K. ROUT a Ajay K. DALAI. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, 14(2), 578-597. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.10.003
- [14] LAURIN, Josef. BIOM.cz: Rostlinné oleje jako motorová paliva. BIOM.cz: Rostlinné oleje jako motorová paliva [online]. Praha 1, 2018, 2018 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/rostlinne-oleje-jako-motorova-paliva>
- [15] PULLEN, James a Khizer SAEED. An overview of biodiesel oxidation stability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, 16(8), 5924-5950 [cit. 2022-05-16]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.06.024
- [16] YONTAR, Ahmet Alper. Injection parameters and lambda effects on diesel jet engine characteristics for JP-8, FAME and naphtha fuels. *Fuel*. 2020, 271. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.117647
- [17] CNG4you: Vlastnosti CNG. CNG4you: Vlastnosti CNG [online]. Praha, 2011, 2011 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/bezpecnost/vlastnosti-cng.html>
- [18] UNIVERSAL TECHNICAL INSTITUTE: CNG VS. LPG VS. LNG FUEL: UNDERSTANDING THE DIFFERENCES. UNIVERSAL TECHNICAL INSTITUTE: CNG VS. LPG VS. LNG FUEL: UNDERSTANDING THE DIFFERENCES [online]. 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.uti.edu/blog/diesel/cng-lpg-lng-fuel>
- [19] Innogy: CNG a LNG. Jezděte ekologicky a šetřete i svou peněženku. Innogy: CNG a LNG. Jezděte ekologicky a šetřete i svou peněženku [online]. 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.innogy.cz/o-innogy/innogy-magazin/magazin-prehled-clanku/cng-a-lng-jezdete-ekologicky-a-setrete-i-svou-penezenku/>
- [20] KALEEMUDDIN, S., S. SHAIKH a S. BHATTACHARYA. Experimental study on two-cylinder direct injection diesel engine for BS-III emission compliant. *Innovations in Fuel Economy and Sustainable Road Transport*. Elsevier, 2011, 2011, 211-228. ISBN 9780857092137. Dostupné z: doi:10.1533/9780857095879.5.211
- [21] Závislost emisí na směšovacím poměru lambda. SlidePlayer [online]. 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1915312/>
- [22] BRADY, R.N. Internal Combustion (Gasoline and Diesel) Engines. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2013, 2013. ISBN 9780124095489. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.01056-3
- [23] GSCHIEDLE, Rolf. Příručka pro automechanika. 3. přepracované vydání. Haan-Gruiten, Německo: Europa-Sobotáles cz, 2007. ISBN 978-3-8085-2163-2.

- [24] Dělený spalovací prostor. SlidePlayer [online]. 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11422791/>
- [25] Nedělený spalovací prostor. SlidePlayer [online]. 2021, 2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11422791/>
- [26] Vstříkovací systém Common Rail. In: ELUC [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1469>
- [27] ŠMERDA, Tomáš, ČUPERA. Jiří. Emise vznětového motoru a systém SCR. Mechanizace zemědělství: Odborný časopis pro zemědělskou a lesnickou techniku. Praha: Profi Press s.r.o, 2011(7): 6. ISSN 0373-6776.
- [28] DieselNet: EU: Cars and Light Trucks. DieselNet: Emission Standards [online]. © 1997 - 2022 ECOpoint [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [29] AECC: CURRENT EU LEGISLATION. AECC: CURRENT EU LEGISLATION [online]. Brussels: © 2020 AECC, 2020, 09/2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.aecc.eu/legislation/light-duty-vehicles/>
- [30] Development of post-Euro 6/VI emission standards for cars, vans, lorries and buses. 2020. Dostupné také z: <https://ec.europa.eu/growth/sectors/automotive/environment-protection/emissions>
- [31] MACHALOVÁ, Milena. Metodický postup měření emisí vozidel. Praha, Ministerstvo dopravy, Odbor provozu silničních vozidel, 2019. Dostupné také z: <https://www.mdcz.cz/getattachment/Dokumenty/Ministerstvo/Vestniky-dopravy/Vestniky-dopravy-2019/Vestnik-dopravy-10-2019/Methodicky-postup-mereni-emisi-18-9-2019.pdf.aspx>
- [32] ŠKODA AUTO. EOBD – Další krok k ochraně a zachování naší atmosféry
- [33] ŠKODA AUTO. Emise ve výfukových plynech
- [34] SOKOLOWSKI, Damian. New European Driving Cycle. In: GAMMA Technologies: Virtual Real Driving Emissions (vRDE) Part 1: New Technologies Inspire New Emissions Tests [online]. Illinois: © Gamma Technologies, 2017, 31. 3. 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.gtisoft.com/wp-content/uploads/2017/03/vRDE-Part-1-Figure-1.png>
- [35] GIS, Maciej, Mateusz BEDNARSKI a Piotr WIŚNIEWSKI. COMPARATIVE ANALYSIS OF NEDC AND WLTC HOMOLOGATION TESTS FOR VEHICLE TESTS ON A CHASSIS DYNAMOMETER. Journal of KONES Powertrain and Transport. Warsaw, Poland: Sciendo, 2018, 25(3), 8. ISSN 1231-4005. Dostupné z: doi:10.5604/01.3001.0012.4331
- [36] DieselNet: EU: Cars and Light Trucks: RDE Testing. DieselNet: EU: Cars and Light Trucks: RDE Testing [online]. © 1997 - 2022 ECOpoint [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

- [37] ŠKODA AUTO. Vznětový motor 2,0 l/103 kW 2V. Filtr pevných částic (DPF)
- [38] CHO, Insu, Yumin LEE a Jinwook LEE. Investigation on the Effects of Internal EGR by Variable Exhaust Valve Actuation with Post Injection on Auto-ignited Combustion and Emission Performance. *Applied Sciences*. 2018, 8(4). ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app8040597
- [39] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Oxford, UK: Elsevier, 1995. ISBN 978-0-340-56822-4.
- [40] ŠKODA AUTO. Motory 1,6 l TDI a 2,0 l TDI se systémem vstřikování common rail.
- [41] VANĚK, A. Subaru Dobřany. Subaru Dobřany [online]. Dobřany: Subaru Dobřany, 2011, 11.3.2012 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.subarudobransy.cz/technika/lambda.html>
- [42] OKUBO, Masaaki a Takuya KUWAHARA. Principle and design of emission control systems. *New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines*. Elsevier, 2020, 2020, 53-143. ISBN 9780128123072. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-812307-2.00003-1
- [43] SEO, Jigu, Boseop YUN, Juwon KIM, Myunghwan SHIN a Sungwook PARK. Development of a cold-start emission model for diesel vehicles using an artificial neural network trained with real-world driving data. *Science of The Total Environment*. 2022, 806. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151347
- [44] TAN, Pi-Qiang, Xiao-Feng ZHANG, Zhi-Yuan HU a Di-Ming LOU. Study of the Particulate Purification Efficiency of Diesel Oxidation Catalyst and Catalyzed Diesel Particulate Filter. *Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering* [online]. Paris, France: Atlantis Press, 2015, 2015, - [cit. 2022-05-16]. ISBN 978-94-6252-113-1. Dostupné z: doi:10.2991/icadme-15.2015.140
- [45] Autolexicon.net: DPF (Diesel Particulate Filter). Autolexicon.net: DPF (Diesel Particulate Filter) [online]. autolexicon.net, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/dpf-diesel-particulate-filter/>
- [46] Vše pro citroeny: Jaké aditivum pro FAP?. Vše pro citroeny: Jaké aditivum pro FAP? [online]. Velké Meziříčí: Citroeny.eu [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.citroeny.eu/clanky/jake-aditivum-pro-fap.html>
- [47] Emissions Analytics: DPF Regeneration Mysteries. Emissions Analytics: DPF Regeneration Mysteries [online]. Emissions Analytics, 2013 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.emissionsanalytics.com/news/dpf-regeneration-mysteries>
- [48] ŠKODA AUTO. Vznětový motor 2,0 l/125 kW TDI CR. 02/2009
- [49] Delphi Technologies: Making sense of your sensors: DPF differential pressure sensor. Delphi Technologies: Making sense of your sensors: DPF differential pressure sensor [online]. BorgWarner [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.delphiautoparts.com/gbr/en/resource-center/making-sense-your-sensors-dpf-differential-pressure-sensor>



- [50] Delphi Technologies: Making sense of your sensors: Exhaust gas temperature sensor. Delphi Technologies: Making sense of your sensors: Exhaust gas temperature sensor [online]. BorgWarner [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.delphiautoparts.com/gbr/en/resource-center/making-sense-your-sensors-exhaust-gas-temperature-sensor>
- [51] Hella Gutmann Solutions: Mega Macs 56. Hella Gutmann Solutions: Mega Macs 56 [online]. Zruč nad Sázavou: © 2022 Hella Gutmann Solutions [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://cz.hella-gutmann.com/cs/workshop-solutions/diagnostika/mega-macs-56/>
- [52] Particulate filter emulator SK-09: Setting and installation manual Abbreviated. Dostupné také z: <https://sdsauto.com/downloads/Sk-09-DPF-emulator-en-sokr.pdf>
- [53] MAJEWSKI, W. Addy. DieselNet Technology Guide: Selective Catalytic Reduction. DieselNet Technology Guide: Selective Catalytic Reduction [online]. ECoPoint, 2005, 05/2005 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://dieselnet.com/tech/cat\\_scr.php](https://dieselnet.com/tech/cat_scr.php)
- [54] KNIGHT, Becca. Hartridge: 3 Differences between DOC, DPF, and SCR filters. Hartridge: 3 Differences between DOC, DPF, and SCR filters [online]. United Kingdom: Hartridge, 2017, 09/2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://www.hartridge.com/blog/3-differences-between-doc-dpf-and-scr-filters>
- [55] TotalEnergies: What is SCR technology?. TotalEnergies: What is SCR technology? [online]. 2021, 03/2021 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://change4blue.com/en/vehicles-adblue/what-is-scr-technology/>
- [56] Steve Sorensen Mechanical: Selective Catalytic Reduction SCR – Adblue. SteveSorensenMechanical: Selective Catalytic Reduction SCR – Adblue [online]. Queensland: Steven Sorensen Mechanical, 2020, 08/2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://stevesorensenmechanical.com.au/blog/selective-catalytic-reduction-scr-adblue/>
- [57] Diesel technology forum: WHAT IS SCR?. Diesel technology forum: WHAT IS SCR? [online]. Diesel Technology Forum [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/what-is-scr>
- [58] Newsroom: Innovative twin dosing reduces NOx emissions by approx. 80 percent. Newsroom: Innovative twin dosing reduces NOx emissions by approx. 80 percent [online]. Wolfsburg (Germany): Volkswagen, 2019, 08/2019 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/innovative-twin-dosing-reduces-nox-emissions-by-approx-80-percent-5281>
- [59] SAJDL, Jan. Systém vstřikování Adblue. Autolexicon.net: AdBlue [online]. autolexicon.net [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/adblue/>
- [60] Standard: Diesel Nitrogen Oxide (NOx) Sensors. Standard: Diesel Nitrogen Oxide (NOx) Sensors [online]. Long Island City: Standard Motor Products [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.standardbrand.com/en/products/diesel/diesel-components/diesel-nitrogen-oxide-nox-sensors>

- [61] DieselNet: Conference report: 41st International Vienna Motor Symposium. DieselNet: Conference report: 41st International Vienna Motor Symposium [online]. Vídeň: ECOpoint, 2020, 04/2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/news/2020/04vms.php>
- [62] JM: Selective Catalytic Reduction Filter® (SCR®). JM: Selective Catalytic Reduction Filter® (SCR®) [online]. © Johnson Matthey [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://matthey.com/en/products-and-services/mobile-emissions-control/diesel-applications/scr-technology>
- [63] Audi MediaCenter: Audi Q5 40 TDI. Audi MediaCenter: Audi Q5 40 TDI [online]. AUDI, 2020, 06/2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.audi-mediacycenter.com/en/photos/detail/audi-q5-40-tdi-91699>
- [64] UltimateSPECS: Audi Q5 (FY) 40 TDI Quattro Specs. UltimateSPECS: Audi Q5 (FY) 40 TDI Quattro Specs [online]. Ultimate Specs [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Audi/114093/Audi-Q5-\(FY\)-40-TDI-Quattro.html](https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Audi/114093/Audi-Q5-(FY)-40-TDI-Quattro.html)
- [65] CarExpert: 2020 AUDI Q5 40 TDI QUATTRO SPORT SPECIFICATIONS. CarExpert: 2020 AUDI Q5 40 TDI QUATTRO SPORT SPECIFICATIONS [online]. CarExpert, 2020, 2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.carexpert.com.au/audi/q5/2020-40-tdi-quattro-sport-3a9ca799>
- [66] Caille Nicolas. AFTER TREATMENT SYSTEM EURO 6. Vénissieux: IVECO IRISBUS, 3. 11. 2009.
- [67] Iveco PRESS ROOM: Iveco HI-SCR system: the most efficient Euro VI technology. IvecoPRESS ROOM: Iveco HI-SCR system: the most efficient Euro VI technology [online]. © Iveco - A CNH INDUSTRIAL COMPANY [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.iveco.com/en-us/press-room/kit/Pages/New-Eurocargo-HI-SCR.aspx>
- [68] OKUBO, Masaaki a Takuya KUWAHARA. Operation examples of emission control systems. New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines [online]. Elsevier, 2020, 2020, 145-210 [cit. 2022-05-16]. ISBN 9780128123072. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-812307-2.00004-3
- [69] EHLIG-ECONOMIDES, Christine a Michael J. ECONOMIDES. Sequestering carbon dioxide in a closed underground volume. Journal of Petroleum Science and Engineering [online]. 2010, 70(1-2), 123-130 [cit. 2022-05-16]. ISSN 09204105. Dostupné z: doi:10.1016/j.petrol.2009.11.002
- [70] PERSSON, O. a L. WADSO. INDOOR AIR QUALITY IN SUBMARINES [online]. 2002, 2002 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: [https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7571.pdf?fbclid=IwAR0bP8mMCl4roEuBTcUm6T0tdJk7zfTpOf1yt\\_Ppxe3MJt3FVQigRd8J4o](https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7571.pdf?fbclid=IwAR0bP8mMCl4roEuBTcUm6T0tdJk7zfTpOf1yt_Ppxe3MJt3FVQigRd8J4o)
- [71] American Elements: Lithium Hydroxide. American Elements: Lithium Hydroxide [online]. American Elements, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.americanelements.com/lithium-hydroxide-1310-65-2>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

AGR	[-]	Abgasrückführung	Zpětná recirkulace spalin
CČ	[-]	Cetanové číslo	
CN	[-]	Cetane number	Cetanové číslo
CNG	[-]	Compressed natural gas	Stlačený zemní plyn
CO	[-]	Oxid uhelnatý	
CO <sub>2</sub>	[-]	Oxid uhličitý	
CUC	[-]	Clean-up catalyst	Čistící katalyzátor
CVS	[-]	Constant volume sampling	Válcová zkušebna pro měření emisí
DEF	[-]	Diesel exhaust fluid	Močovina / AdBlue
DI	[-]	Direct injection	Přímé vstřikování
DOC	[-]	Diesel oxidation catalyst	Oxidační katalyzátor
DPF	[-]	Diesel particulate filter	Filtr pevných částic
ECU	[-]	Engine control unit	Řídicí jednotka motoru
EGR	[-]	Exhaust gas recirkulation	Recirkulace výfukových plynů
EU	[-]	Evropská unie	
FAP	[-]	Filtre à particules	Filtr pevných částic
H <sub>2</sub> O	[-]	Voda / Vodní pára	
HC	[-]	Nespálené uhlovodíky	
IDI	[-]	Indirect injection	Nepřímé vstřikování
LNG	[-]	Liquified natural gas	Zkapalněný zemní plyn
MEŘO	[-]	Methylester řepkového oleje	
MIL	[-]	Malfunction indicator light	Kontrolka motoru
N <sub>2</sub>	[-]	Dusík	
NEDC	[-]	New european driving cycle	Nový evropský jízdní cyklus
NO	[-]	Oxid dusnatý	
NO <sub>2</sub>	[-]	Oxid dusičitý	
NO <sub>x</sub>	[-]	Oxidy dusíku	
NTC	[-]	Negative temperature coefficient	Negativní teplotní koeficient
O <sub>2</sub>	[-]	Kyslík	
PEMS	[-]	Portable emission measurement system	Přenosný měřicí systém emisí
PM	[-]	Pevné částice	
PSA	[-]	Francouzský automobilový koncern	

PTC	[-]	Positive temperature coefficient	Pozitivní teplotní koeficient
RDE	[-]	Real driving emissions	Měření emisí ve skutečném provozu
SCR	[-]	Selective catalytic reduction	Selektivní katalytická redukce
SCRf	[-]	Selective catalytic reduction filter	Filtr s integrovanou selektivní katalytickou redukcí
SO <sub>2</sub>	[-]	Oxid siřičitý	
VIN	[-]	Vehicle identification number	Identifikační číslo vozidla
V <sub>k</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	Objem kompresního prostoru	
V <sub>z</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	Pracovní objem válce	
WLTP	[-]	Worldwide harmonized light-duty vehicles test procedure	Celosvětově sjednocený zkušební postup testování
ε	[-]	Kompresní poměr	
λ	[-]	Směšovací poměr	