

Česká zemědělská univerzita v Praze

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2023

Bc. Michal MAREK

**Česká zemědělská univerzita v Praze**  
**Technická fakulta**

**Vliv zvyšování výkonu na emise vznětového motoru**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Autor práce: Bc. Michal Marek

© 2023 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Marek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Vliv zvyšování výkonu na emise vznětového motoru

Název anglicky

Influence of power performance on diesel engine emissions

---

Cíle práce

Cílem práce je analyzovat a experimentálně ověřit vliv zvyšování výkonu na tvorbu emisí vznětového motoru.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce
4. Přehled řešené problematiky
5. Vlastní zpracování
6. Výsledky a diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů
9. Přílohy

**Doporučený rozsah práce**

50 stran včetně obrázků a tabulek

**Klíčová slova**

nafta, výkon, emise

---

**Doporučené zdroje informací**

HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals. New York: McGraw-Hill, c1988. ISBN 007028637X.

HROMÁDKO, J. Spalovací motory : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

REMEK, B. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STROJNÍ FAKULTA. Experimentální měření v dopravní technice. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03057-1.

VLK, F. Dynamika motorových vozidel : jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5273-6.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2022/2023 LS – TF

**Vedoucí práce**

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vozidel a pozemní dopravy

---

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2022

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 09. 03. 2022

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv zvyšování výkonu na emise vznětového motoru vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne.....

.....

Bc. Michal Marek

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu Ing. Jakubu Maříkovi, Ph.D. za odborné vedení při psaní diplomové práce a ochotu odborné literatury a školení v oblasti vstříkovacích systémů vznětových motorů.

Na závěr bych chtěl poděkovat mému strýci Vítu Markovi za možnost ověření některých parametrů na nákladních vozidlech Volvo. Panu Ing. Vítu Markovi za cenné připomínky a pomoc v průběhu zpracování práce.

# **Vliv zvyšování výkonu na emise vznětového motoru**

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce s názvem Vliv zvyšování výkonu na emise vznětového motoru popisuje problematiku tvorby a systémy snižující emise ve výfukových plynech u vznětových motorů. První polovina diplomové práce se věnuje teoretické části. Zde se nachází 5 kapitol, které se věnují způsobu vzniku škodlivin spalovacího motoru, jízdním cyklům a legislativním předpisům. Dále jsou zde vysvětleny funkce a popisy konstrukčních prvků jednotlivých systémů redukce škodlivých složek výfukových plynů. Další kapitoly se zabývají metodikou měření emisí výfukových plynů, kde jsou popsány testovací postupy.

**Klíčová slova:** vznětový motor, emise, vstřikování, Common Rail

# **Influence of power performance on diesel engine emissions**

## **Abstract:**

This thesis titled Influence of power performance on diesel engine emissions describes the influence of creating and systems that reduce emissions in exhaust gases in diesel engines. The first half of the thesis is devoted to the theoretical part. There are 5 chapters dedicated to the formation of internal combustion engine pollutants, driving cycles and legislative regulations. Furthermore, the functions and descriptions of the structural elements of the individual systems for reducing harmful components of exhaust gases are explained here. Other chapters deal with the methodology of measuring exhaust gas emissions, where the test procedures are described.

**Keywords:** diesel engine, emission, injection, Common Rail



# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| 1. Úvod.....  | 1         |
| <b>2. Emise ve výfukových plynech spalovacího motoru.....</b>                       | <b>2</b>  |
| 2.1. Vznik škodlivin ve výfukových plynech .....                                    | 2         |
| 2.2. Složení výfukových plynů .....   | 2         |
| 2.2.1. Oxid uhelnatý (CO).....  | 3         |
| 2.2.2. Oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> ) .....                                       | 3         |
| 2.2.3. Oxidy dusíku (NO <sub>x</sub> ) .....  | 4         |
| 2.2.4. Uhlovodíky (HC).....   | 4         |
| 2.2.5. Pevné částice (PM).....  | 4         |
| <b>3. Emisní normy .....</b>  | <b>5</b>  |
| 3.1. Emisní předpisy pro vozidla do 3,5t.....                                       | 5         |
| 3.2. Emisní předpisy pro vozidla nad 3,5t .....                                     | 6         |
| 3.3. Jízdní cykly.....  | 7         |
| 3.3.1. Urban driving cycle (UDC).....   | 8         |
| 3.3.2. MVEG-A .....   | 9         |
| 3.3.3. New European Driving Cycle (NEDC).....                                       | 9         |
| 3.3.4. Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC) .....                  | 10        |
| 3.3.5. European Stationary Cycle (ESC).....   | 11        |
| 3.3.6. European Transient Cycle (ETC).....  | 12        |
| 3.3.7. European Load Response (ELR).....  | 12        |
| 3.3.8. World Harmonized Stationary Cycle (WHSC) .....                               | 13        |
| <b>4. Systémy snižující množství škodlivin ve výfukových plynech .....</b>          | <b>14</b> |
| 4.1. Recirkulace výfukových plynů vznětových motorů .....                           | 15        |
| 4.1.1. Systém zpětného vedení výfukových plynů bez chladiče spalin .....            | 15        |
| 4.1.2. Systém zpětného vedení výfukových plynů s chladičem spalin .....             | 17        |
| 4.1.3. Jednostupňový systém zpětného vedení výfukových plynů u nákladních vozidel . | 18        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.1.4.    | Dvoustupňový systém zpětného vedení výfukových plynů u nákladních vozidel.. | 20        |
| 4.2.      | Oxidační katalyzátor vznětových motorů.....                                 | 21        |
| 4.3.      | Filtry pevných částic.....  | 22        |
| 4.4.      | Selektivní katalytická redukce SCR .....                                    | 24        |
| 4.4.1.    | Vlastnosti AdBlue .....   | 25        |
| 4.4.2.    | Princip činnosti u nákladních vozidel .....                                 | 27        |
| 4.4.3.    | Princip činnosti u osobních vozidel .....                                   | 29        |
| 4.4.4.    | Chemická reakce .....   | 32        |
| <b>5.</b> | <b>Úpravy vznětových motorů a jejich vliv na emise .....</b>                | <b>32</b> |
| 5.1.      | Úpravy nejen osobních automobilů.....                                       | 32        |
| 5.2.      | Druhy úprav řídicích jednotek.....  | 33        |
| 5.3.      | Struktura řídicí jednotky.....  | 33        |
| <b>6.</b> | <b>Měření produkce emisí.....</b>   | <b>35</b> |
| 6.1.      | Metody měření koncentrace emisních složek.....                              | 35        |
| 6.1.1.    | Měření s využitím principu absorpce infračerveného záření .....             | 35        |
| 6.1.2.    | Měření s využitím principu absorpce ultrafialového záření.....              | 35        |
| 6.1.3.    | Měření s využitím chemické luminiscence .....                               | 35        |
| 6.1.4.    | Měření s využitím principu změny elektrické vodivosti vodíkového plamene .  | 36        |
| 6.1.5.    | Analyzátory na principu magnetických vlastností látek .....                 | 36        |
| 6.1.6.    | Opacimetrie .....   | 36        |
| 6.1.7.    | Přímé měření koncentrace.....   | 36        |
| <b>7.</b> | <b>Cíl práce.....</b>   | <b>37</b> |
| <b>8.</b> | <b>Experimentální měření.....</b>   | <b>38</b> |
| 8.1.      | Testovací vozidlo.....  | 38        |
| 8.2.      | Přístrojové zařízení .....  | 39        |
| 8.2.1.    | Válcová zkušebna Technické fakulty ČZU v Praze.....                         | 39        |
| 8.2.2.    | Emisní analyzátor VMK.....  | 39        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 8.2.3.     | Velikostní klasifikátor částic EEPS 3090..... | 40        |
| 8.2.4.     | Ředička vzduchu .....                         | 41        |
| 8.2.5.     | Ventilátor FILCAR AL-1500/C .....             | 41        |
| 8.3.       | Softwarové vybavení .....                     | 41        |
| 8.3.1.     | Diagnostický program SPVG.....                | 41        |
| 8.3.2.     | ControlWEB.....                               | 42        |
| 8.4.       | Návrh a ověření měření .....                  | 43        |
| <b>9.</b>  | <b>Výsledky měření.....</b>                   | <b>44</b> |
| <b>10.</b> | <b>Diskuze .....</b>                          | <b>56</b> |
| <b>11.</b> | <b>Závěr .....</b>                            | <b>57</b> |
| <b>12.</b> | <b>Literatura.....</b>                        | <b>58</b> |
| <b>13.</b> | <b>Seznam Obrázků.....</b>                    | <b>62</b> |
| <b>14.</b> | <b>Seznam Tabulek.....</b>                    | <b>63</b> |
| <b>15.</b> | <b>Seznam Grafů.....</b>                      | <b>63</b> |

## 1. Úvod

Automobilový průmysl se stal dnes již neodmyslitelnou součástí moderní doby. Jak roste počet obyvatel, zvyšuje se také počet aut a potřeba cestovat nebo přepravovat osoby nebo věci. Tím roste i objem vypouštěných výfukových plynů. Ty obsahují řadu látek, které jsou člověku nebezpečné a mají i neblahý dopad na životní prostředí. Ze strany vládních a mezinárodních organizací po celém světě je tak snaha emisní zatížení do maximální možné míry redukovat pomocí mezinárodních předpisů a nařízení, které musí konkrétní mobilní prostředky splňovat. Z nich je zřejmé postupné zpřísnování emisních limitů.

U vznětových motorů, jejichž nejčastějším palivem je pořád motorová nafta fosilního původu, jsou nejzávažnějšími a nejhůře odstranitelnými plynné oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a pevné částice (PM). Snížení obsahu škodlivin ve výfukových plynech je možné zajistit aktivními prvky na motoru při jeho spalování. Tím je omezena tvorba škodlivin již přímo ve zdroji. Aby bylo dosaženo splnění požadavků na produkované škodliviny z výfukových plynů musí být používány pasivní prostředky. Kromě oxidačních katalyzátorů a filtrů pevných částic se k likvidaci škodlivin ve výfukovém traktu motoru používají SCR systémy, které využívají vstřikování vodného roztoku močoviny (AdBlue) do výfukového potrubí.

V dnešní době je používání vodného roztoku močoviny u většiny typů nákladních i osobních automobilů běžnou praxí. Je to pro majitele výdaj z hlediska tankování, ale taktéž se jedná o výdaj z hlediska servisních činností. Řidič tento vodný roztok tankuje do vozidla, aby splnil emisní předpisy. Při této činnosti je však nutné dbát na čistotu při tankování, oprava systému SCR není levnou záležitostí.

## 2. Emise ve výfukových plynech spalovacího motoru

V posledním desetiletí se mezi základní požadavky na vývoji nových typů spalovacích motorů automobilů stala snaha omezovat nepříznivé účinky na životní prostředí. Na začátku se jednalo zejména o odstraňování nadměrného hluku, který se řeší už od počátku 20. století. Následně o snižování kouřivosti vznětových motorů z důvodu bezpečnosti, která je dnes formulovaná v řadě předpisů nebo norem. Tyto normy a předpisy omezují nejen vlastní produkci škodlivin při provozu vozidla, ale i ve výrobním procesu a v poslední době už i stanovují pravidla nutná pro ekologicky přijatelnou likvidaci starých vozidel, které už nesplňují požadavky podle aktuálních norem a předpisů. [17]

### 2.1. Vznik škodlivin ve výfukových plynech

Zvyšující se spotřeba energie, která je kryta především energií obsaženou ve fosilních palivech učinila kritický problém pro kvalitu ovzduší. Kvalita vzduchu, který dýcháme závisí na celé řadě faktorů jako jsou emise z průmyslu, domácností, elektráren, ale významnou roli hrají také výfukové plyny produkované motorovými vozidly. Ve vyspělých zemích to představuje asi 20 % celkových emisí. [1]

Činnost spalovacího motoru má negativní vlivy na stav našeho okolí, které se dají shrnout do několika základních bodů:

- škodlivé plynné emise
- hluk
- vibrace
- kontaminace vody a půdy

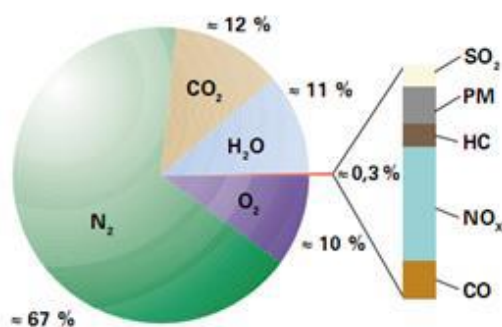
Na produkci škodlivin má vliv mnoho faktorů např. konstrukce motoru, technický stav vozidla, uspořádání motoru, technika a technologie činností jednotlivých systémů. Škodlivé emise vznikají převážně ve formě výfukových plynů v důsledku netěsnosti například mezi pístem a válcem – odvětrání klikové skříně (20 %), z vypařování paliva a motorového oleje (12 %). Při spalování směsi paliva a vzduchu, který obsahuje kromě potřebného kyslíku i velké množství dusíku (78,03 %), vznikají kromě produktů ze spáleného paliva i díky vysoké teplotě sloučeniny dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Velký obsah sloučenin dusíku ( $\text{NO}_x$ ) vzniká při spalování chudých směsí ( $\lambda > 1$ ). Největší podíl  $\text{NO}_x$  vzniká při  $\lambda = 1,1 \div 1,2$ . [34]

### 2.2. Složení výfukových plynů

Výfukové plyny jsou komplexní chemickou směsí látek, které jsou produkovány spalováním uhlovodíkových paliv ve spalovacích motorech. Dílčí prvky této směsi vznikají

chemickou reakcí převážně kyslíku s dalšími složkami obsaženými v palivu. Množství výfukových zplodin vycházející z výfukového potrubí závisí na mnoha faktorech, zejména na typu a kvalitě paliva, tvaru spalovacích prostor, způsobu tvoření směsi, typu a stavu spalovacího zařízení a na typu použitého zařízení ke snížení emisí.

Mezi nejvýznamnější složku výfukových plynů patří dusík ( $N_2$ ). Při dokonalém spalování vznik oxid uhličitý ( $CO_2$ ) a voda ( $H_2O$ ). V reálném procesu však spalovací motor nespaluje dokonale a vytváří i složky nedokonalého spalování, především oxid uhelnatý ( $CO$ ), nespálené uhlovodíky ( $HC$ ), oxidy dusíku ( $NO_x$ ), oxidy síry ( $SO_x$ ) a makroskopické pevné látky ( $PM$ ). [1] [5]



Obrázek 1 - Složení výfukových plynů vznětových motorů [5]

$N_2$  – dusík,  $O_2$  – kyslík,  $H_2O$  – voda,  $CO_2$  – oxid uhličitý,  $CO$  – oxid uhelnatý,  $NO_x$  – oxidy dusíku,  $SO_2$  – oxid siřičitý,  $HC$  – uhlovodíky,  $PM$  – pevné částice (Particulate Matter)

### 2.2.1. Oxid uhelnatý ( $CO$ )

Oxid uhelnatý vzniká nedokonalým spalováním v bohatých směsích vzduch/palivo v důsledku nedostatku vzduchu. Přestože oxid uhelnatý vzniká také během provozu s přebytkem vzduchu, jeho koncentrace jsou minimální a pramení z krátkých období bohatého provozu nebo špatnému poměru směsi vzduch/palivo. Oxid uhelnatý je plyn bez zápachu a chuti. U lidí inhibuje schopnost krve absorbovat kyslík, což vede k udušení. [1] [5]

### 2.2.2. Oxid uhličitý ( $CO_2$ )

Při úplném spalování se uhlovodíky v chemických vazbách paliva přeměňují na oxid uhličitý ( $CO_2$ ). Zde opět podíl závisí na provozních podmínkách motoru. Množství přeměněného oxidu uhličitého ve výfukových plynech je přímo úměrné spotřebě paliva. Jediným způsobem, jak snížit emise oxidu uhličitého při používání standardních paliv, je tedy snížení spotřeby paliva. [1] [4]

### 2.2.3. Oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ )

Tvorba této škodliviny je důsledkem vedlejší reakce dusíku, který je dopraven do spalovacího prostoru v nasávaném vzduchu a kyslíku. Vznikají při vysokých teplotách a tlacích ve spalovacím prostoru. Množství oxidů dusíku klesá u vznětových motorů s rostoucím součinitelem přebytku vzduchu. Největšího maxima dosahuje při hodnotách 1,6 – 1,8, kdy tato hranice odpovídá největší bohatosti směsi u vznětových motorů. U vznětových motorů se obsah snižuje například optimalizací spalovacího procesu nebo pomocí recirkulace spalin. [2] [4]

### 2.2.4. Uhlovodíky (HC)

Jsou důsledkem předčasně ukončených oxidačních procesů ve spalovacím prostoru motoru tzv. zhašecích zónách (vysoký součinitel přebytku vzduchu, nízká teplota hoření v blízkosti stěn), nebo jako produkt tepelných krakovacích a dalších chemických reakcí. [4]

### 2.2.5. Pevné částice (PM)

Problematika emisí pevných částic je primárně spojena právě se vznětovými motory. Pevné částice jsou z chemické podstaty téměř čistý uhlík a jedná se o nežádoucí produkt nedokonalého spalování uhlovodíků. Jejich tvorba při procesu spalování je zapříčiněna nedostatkem kyslíku při spalování nebo příliš rychlým ochlazováním spalin. Hlavním problémem je složení částic. Základem jsou tuhé částice, na které se dále nabalují nespálené zbytky paliva a motorového oleje. [2] [4]

### 3. Emisní normy

Již v 70 letech 20. století přišla snaha o vytvoření norem, které by pomohly snížit obsah látek znečišťující atmosféru. Se zvyšujícím se počtem automobilů na silnicích bylo znečišťování ovzduší výfukovými plyny aut stále zřetelnější. V USA byl pro součásti, které se podílejí na obsahu emisí ve výfukových plynech, vyvinut a zaveden diagnostický systém, který má název OBD I (On - Board - Diagnose). Od roku 1985 se začal používat novější systém OBD II. Pro Evropu upravený systém OBD II se nazývá EOBD (Euro - On - Board - Diagnose). Ten byl ve státech Evropské unie zaveden na počátku roku 2000, a to nejdříve jen pro zážehové motory. Vznětové motory však následovaly vývoj v emisních limitech hned za benzínovými motory. [9]

#### 3.1. Emisní předpisy pro vozidla do 3,5t

V rámci předpisu Evropské hospodářské komise (EHK) 15.01 přijatý v České republice roku 1972 byly v západní Evropě poprvé stanoveny limity pro emise výfukových plynů automobilů, a to na základě městského jízdního cyklu. Tyto mezní hodnoty se až do zavedení normy EHK 15.04, která vstoupila v platnost v roce 1982, postupně zpříšňovaly. Koncem osmdesátých let byl předpis nahrazeno novou vyhláškou EHK 83. Ta se stala základem i pro dnes platné předpisy. Původní znění vstoupilo v platnost v roce 1989 a v ČR od roku 1991.

Na počátku devadesátých let tak v rámci jednotné legislativy ve státech Evropské unie vychází nové emisní předpisy, jejichž základem je právě EHK 83, ale nazvány již podle EU. Tyto emisní předpisy jsou spíše známější pod názvem EURO a číslo revize předpisu. Současně vstoupil v platnost nový evropský jízdní cyklus (NEDC) pro osobní automobily. Tento jízdní cyklus se skládá z městského jízdního cyklu a cyklu jízdy mimo město. EURO 3 zpříšnilo limitní hodnoty škodlivých emisí výfukových plynů o požadavky na zkušební proces měření výfukových plynů. Odpadla zejména 40sekundová fáze běhu motoru naprázdno. Emisní norma EURO 4 platí povinně pro vozidla kategorie M1 a N1 od 1. ledna 2005 pro schvalování typu a od 1. ledna 2006 pro nové registrace vozidel. V porovnání s emisní normou EURO 3 předepisuje v podstatě poloviční emise škodlivin ve výfukových plynech. Stanovuje pro různé kategorie vozidel automobilů různé limitní hodnoty. Během životnosti vozidla je povoleno určité zhoršování emisního chování, vyjádřené faktorem zhoršení, který se liší podle typu škodlivé látky, s koeficientem obvykle 1,1. Při měření oxidu uhličitého se bere v úvahu, že nový automobil spotřebovává více paliva než automobil zaběhnutý (hodnoty



produkce CO<sub>2</sub> a spotřeby paliva jsou spojené, vyšší CO<sub>2</sub> = vyšší spotřeba paliva). Proto se používá faktor náběhu s hodnotou 0,92.

V současnosti jsou již také přísnější normy pro emise výfukových plynů EURO 5 (od 1. září 2009) a EURO 6 (povinně od r. 2014). [6] [11]

| Předpis     | Platnost | Zkušební cyklus | CO   | HC | HC + NO <sub>x</sub> | NO <sub>x</sub> | PM     | PN                   |
|-------------|----------|-----------------|------|----|----------------------|-----------------|--------|----------------------|
|             |          |                 | g/km |    |                      |                 |        |                      |
| Euro 1      | 7.1992,  | NEDC            | 2,72 | -  | 0,97                 | -               | 0,14   | -                    |
| Euro 2, IDI | 1.1996   |                 | 1    | -  | 0,7                  | -               | 0,08   | -                    |
| Euro 2, DI  | 1.1996   |                 | 1    | -  | 0,9                  | -               | 0,1    | -                    |
| Euro 3      | 1.2000   |                 | 0,64 | -  | 0,56                 | 0,5             | 0,05   | -                    |
| Euro 4      | 1.2005   |                 | 0,5  | -  | 0,3                  | 0,25            | 0,025  | -                    |
| Euro 5a     | 9.2009   |                 | 0,5  | -  | 0,23                 | 0,18            | 0,005  | -                    |
| Euro 5b     | 9.2011   |                 | 0,5  | -  | 0,23                 | 0,18            | 0,0045 | 6,0*10 <sup>11</sup> |
| Euro 6      | 9.2014   | WLTP            | 0,5  | -  | 0,17                 | 0,08            | 0,0045 | 6,0*10 <sup>11</sup> |

Tabulka 1 - Povolené množství škodlivin osobních vozidel do 3,5 t v Evropské unii [12]

### 3.2. Emisní předpisy pro vozidla nad 3,5t

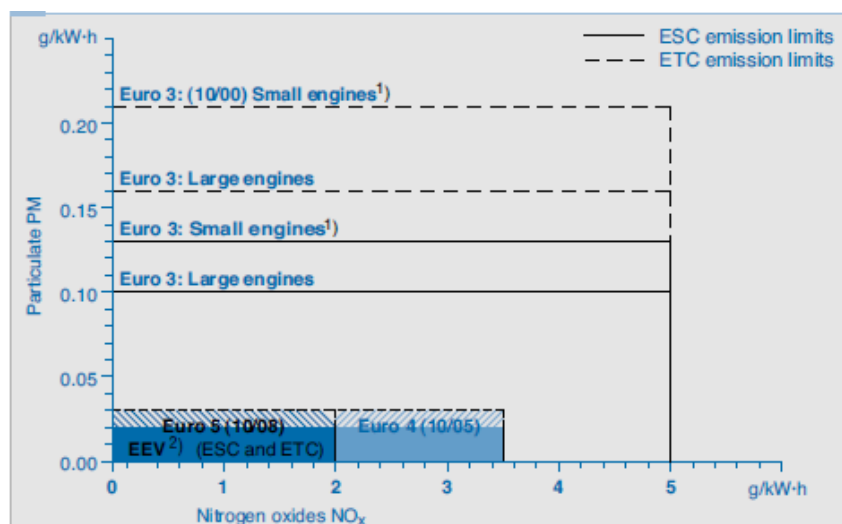
Od zavedení norem Euro se limity oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) pro těžké motory snížily o 95% a limity pro částice (PM) byly sníženy o 97 %. Pro vozidla nad 3.5 tuny jsou emisní limity označovány římskými číslicemi. Emisní limity pro nákladní vozidla a autobusy jsou udávány v g/kWh narozdíl od vozidel do 3,5 t ke jsou v g/km. Úroveň emisního limitu Euro 3 platí pro všechna nová typová schválení motorů od října 2000 a také pro všechna sériově vyráběná vozidla od října 2001. Emise jsou měřeny během 13-stupňového evropského cyklu ustáleného stavu (ESC) a kouřivost v doplňkovém Evropském testu odezvy na zatížení (ELR). Vznětové motory, které jsou vybaveny systémem selektivní katalytické redukce nebo filtrem pevných částic, musí být také testovány v dynamickém evropském přechodném cyklu (ETC). Evropské testovací cykly se provádějí s motorem v chodu při provozní teplotě. [1]

Již v roce 1999 orgány EU stanovily emisní limity Euro 4 a 5 pro nákladní vozidla a autobusy a termíny jejich zavedení, přestože Euro 5 se měla stát normou pro všechna nově registrovaná vozidla až v říjnu 2008. Už ale v oznámení zákonodárců EU o emisních zákonech z roku 1999, byla zahrnuta další nepovinná emisní norma tzv. „EEV“, což znamená Environmentally enhanced vehicle (vozidlo šetrné k životnímu prostředí. Až do příchodu normy Euro 4 v letech 2005/6 byla norma EEV z velké části ignorována. Důvodem z velké části bylo, že se všemi technologiemi a systémy bylo nedosažitelné s dieslovým pohonem snížit emise pod požadovanou úroveň. Ale s pokročilejším elektronickým řízením motoru (zejména palivového systému) a dostupnosti filtrů pevných částic mohly být požadavky

normy EEV splněny. Nejnovější a nejprísnejší aktuálně platná norma je od 1. ledna 2013 Euro VI. [13]

| Předpis  | Platnost       | Zkušební cyklus | CO    | HC   | NO <sub>x</sub> | PM    | Kouřivost<br>m <sup>-1</sup> |
|----------|----------------|-----------------|-------|------|-----------------|-------|------------------------------|
|          |                |                 | g/kWh |      |                 |       |                              |
| Euro I   | 1992,<br><85kw | ECE R-49        | 4,5   | 1,1  | 8               | 0,612 | -                            |
|          | 1992,<br>>85kw |                 | 4,5   | 1,1  | 8               | 0,36  | -                            |
| Euro II  | 1.1996         |                 | 4     | 1,1  | 7               | 0,25  | -                            |
| Euro III | 1.2001         | ESC & ELR       | 2,1   | 0,66 | 5               | 0,1   | 0,8                          |
| Euro IV  | 1.2005         |                 | 1,5   | 0,46 | 3,5             | 0,02  | 0,5                          |
| Euro V   | 1.2008         |                 | 1,5   | 0,46 | 2               | 0,02  | 0,5                          |
| EEV      | 10.1999        |                 | 1,5   | 0,25 | 2               | 0,02  | 0,15                         |
| Euro VI  | 1.2013         | WHSC            | 1,5   | 0,13 | 0,4             | 0,01  |                              |

Tabulka 2 - Emisní limit pro autobusy a nákladní vozidla [12]



Obrázek 2 - Emisní limity EU pro dieselová užitková vozidla [1]

### 3.3. Jízdní cykly

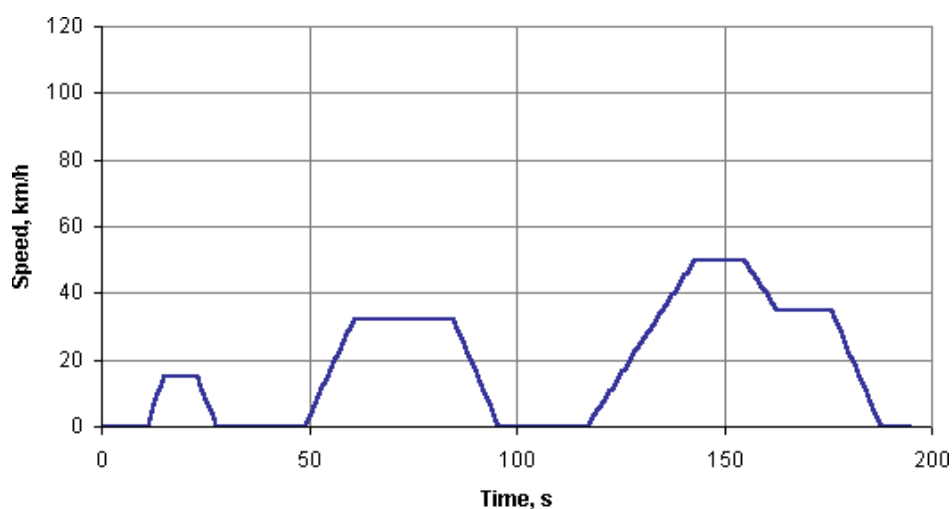
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, tak jsou v dnešní době v platnosti poměrně přísné normy a předpisy. Uplatňuje se také měření v reálném provozu. Pokud vozidlo nesplní podmínky homologačních testů nemůže být prodáváno na trzích, které požadují homologační test. Rozdíly mezi laboratorním a skutečným měřením mohou být opravdu velké. Kromě klimatických podmínek se na rozdíl podepisuje samotná podstata obou měření – laboratorní měření je přesně definováno a reálná jízda zahrnuje proměnlivost, která plně odpovídá požadavkům provozu.

Jako prostředek k zajištění objektivního posouzení testovaných vozidel pro homologaci se zvolili jízdní cykly. Jízdní cyklus je souhrn podmínek, které musí vozidlo splnit při měření. Jedná se především o podmínky zrychlení, maximální rychlosti, časového trvání zkoušky atd. Při tom se zároveň měří množství vypouštěných škodlivin, které se musí pohybovat v předepsaných limitech.

Existují dva základní druhy jízdních cyklů. Prvním jsou modální jízdní cykly, které nevycházejí ze skutečných jízdních podmínek na vozovce - zahrnují rovnoměrné zrychlení a konstantní rychlosti (např. NEDC cyklus). Druhým druhem jsou přechodové jízdní cykly, které se více blíží skutečným jízdním podmínkám díky mnoha změnám rychlostí (např. WLTC cyklus). [24]

### 3.3.1. Urban driving cycle (UDC)

Do roku 1996 bylo pro ověřování plnění emisních norem vozidel praktikován postup podle směrnice Rady Evropského hospodářského společenství 70/220/EHS. Měření se provádí v laboratorních podmínkách na válcovém dynamometru se setrvačником a brzdou. Proveďte se bez přerušení zkouška trvající celkem třináct minut, skládající se ze čtyřikrát opakovaného zkušební cyklu, který tato norma určila tzv. UCE 15. UDC měl za úkol simulovat jízdu v městském prostředí. Z toho důvodu je maximální dosahovaná rychlost při tomto testu  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  a jeho tendencí byla simulace jízdy v městském provozu. Je charakterizován nízkou rychlostí vozidla, nízkým zatížením motoru a nízkou teplotou výfukových plynů. [25] [28]



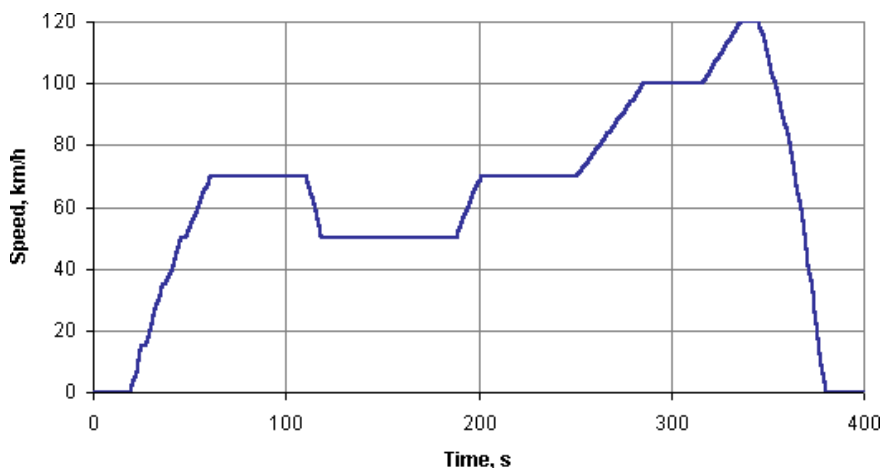
Obrázek 3 - Grafické znázornění rychlostního profilu cyklu ECE 15[28]

### 3.3.2. MVEG-A

V roce 1996 bylo na základě směrnice EHS 90/C81/01 přistoupeno ke změně homologační metodiky. Nová metodika stanovila nový a první ryze evropský testovací cyklus MVEG-A. Ten se skládal z testovacího cyklu UDC, ke kterému byl přidán mimoměstský jízdní cyklus External Urban Driving Cycle (EUDC).

Segment EUDC byl přidán po čtvrtém cyklu ECE, aby zohlednil agresivnější, vysokorychlostní jízdní režimy. Maximální rychlost cyklu EUDC je 120 km/h. Byl také definován alternativní cyklus EUDC pro vozidla s nízkým výkonem s maximální rychlostí omezenou na 90 km/h.

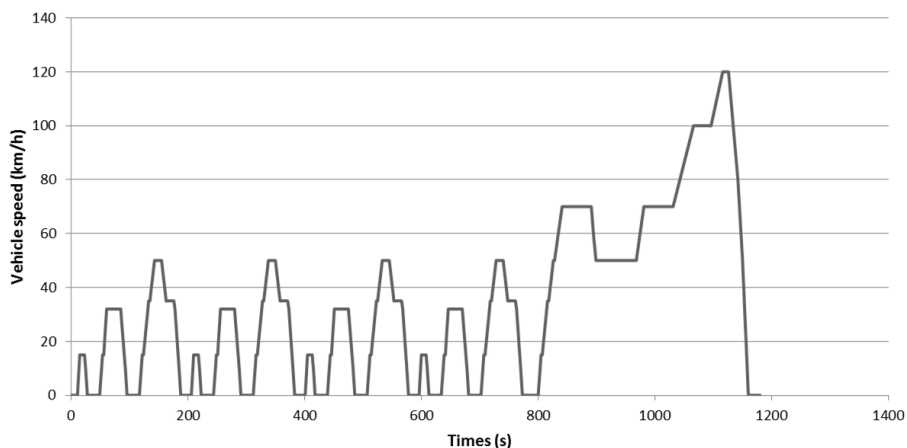
Cyklus MVEG-A probíhal tak, že po nastartování bylo vozidlo ponecháno 40 sekund v chodu na volnoběh. Následně byla provedena jízda podle UDC a hned vzápětí jízda podle EUDC, kdy bylo dosahováno maximální rychlosti 120 km·h<sup>-1</sup>. S jedním vozidlem je možné otestovat všechny druhy karoserie daného typu vozu (sedan, hatchback, MPV apod.) pomocí pouhé změny koeficientu dle tabulek. [28]



Obrázek 4 - Grafické znázornění rychlostního profilu cyklu EUDC [28]

### 3.3.3. New European Driving Cycle (NEDC)

Se zavedením Emisní normy EURO 3 v roce 2000 došlo k úpravě a spojení částí předchozího cyklu a vznikl nový, nazývaný jako New European Driving Cycle (NEDC). Bývá také označován jako cyklus MVEG- B. Z tohoto byla vyřazena volnoběžná část před započítáním testování, která sloužila k zahřátí motoru, ale cyklus začínal po nastartování vozidla. Stejně jako tomu bylo u zkoušky MVEG-A začíná NEDC čtyřmi opakujícími se částmi simulující městskou část bez přerušení, po které následuje část simulující mimoměstskou jízdu. Pro méně výkonná vozidla zůstala možnost zvolit variantu s maximální rychlostí v mimoměstské části 90 km/h namísto 120 km/h. Délka testu zůstala 1 180 sekund.



Obrázek 5 - Grafické znázornění rychlostního profilu cyklu NEDC [28]

Emise jsou odebírány v průběhu testovacího cyklu metodou konstantního objemu (CVS) a následně analyzovány. následně vyjádřeny v g/km pro každou ze znečišťujících látek. Výsledky měření jsou spotřeba paliva a měřené emise v g/km pro každou znečišťující látku.

Pro dosažení cílů EU o snižování emisí CO<sub>2</sub> se proto výrobci automobilů snaží uvést automobily na trh s nejnižšími emisemi CO<sub>2</sub>. V některých případech to ovšem vedlo až k manipulaci se schválením typu u některých výrobců automobilů - skandál Dieseldgate z roku 2015. Navíc už existovala shoda, že testovací cyklus NEDC je již zastaralý, z většina postupu byla vyvinuta v 70. letech v době, kdy na emise nebyly tak vysoké nároky. [28]

#### 3.3.4. Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC)

S emisní normou Euro 6c a všemi novějšími se k homologaci vozidel do 3,5 t začala používat metodika Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure (WLTP). WLTP nahrazuje evropský postup pro schvalování typu lehkých užitkových vozidel založený na NEDC, přičemž přechod z NEDC na WLTP proběhl v letech 2017–2019.

Metodika WLTP se skládá z testu v laboratorních podmínkách na válcovém dynamometru se setrvačником a brzdou, který je označován jako Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle (WLTC), a z metodiky Real Driving Emissions (RDE) pro měření produkce NO<sub>x</sub> v reálném provozu. [26] [27]

Metodika WLTP zahrnuje tři testovací třídy WLTC - WLTC Class 1, WLTC Class 2 a WLTC Class 3, které se od sebe liší podle poměru výkon ku hmotnosti testovaného vozidla neboli Power to Mass Ratio (PMR) [W·kg<sup>-1</sup>]. Třída WLTC Class 3 je ještě rozdělena podle maximální rychlosti vozidla, kdy vozidla s maximální rychlostí do 120 km·h<sup>-1</sup> jsou testována

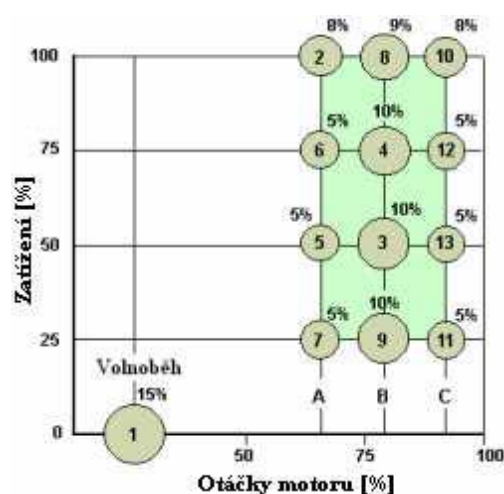
dle třídy WLTC Class 3a a vozidla s maximální jízdní rychlostí větší nebo rovnou 120 km·h<sup>-1</sup> jsou testována dle třídy WLTC Class 3b viz. tabulka 3. [27]

| Třída WLTC | PMR [W·kg <sup>-1</sup> ] | v <sub>max</sub> [km·h <sup>-1</sup> ] |
|------------|---------------------------|--|
| Class 3b   | PMR > 34                  | ≥120                                   |
| Class 3a   |                           | <120                                   |
| Class 2    | 34 ≥ PMR > 22             | -                                      |
| Class 1    | PMR ≤ 22                  | -                                      |

Tabulka 3 - Testovací třídy WLTC [27]

### 3.3.5. European Stationary Cycle (ESC)

S příchodem emisní normy Euro III začal platit pro všechna nová schválení typu motorů od října 2000 a také pro všechna sériově vyráběná vozidla od října 2001 nový zkušební cyklus ESC, ETC a ELR. U tohoto stacionárního se zkouší samotný motor instalovaný na dynamometru v uspořádání odpovídajícímu zástavbě ve vozidle. Vyznačuje se vysokými průměrnými koeficienty zatížení a velmi vysokými teplotami výfukových plynů. Test se skládá z měření emisí při ustálených režimech ve třinácti bodech, kde se postupně mění otáčky a zatížení přesně podle předepsaných 13 bodů. Každému bodu je normou přiřazena váha, která se zahrne spolu s příslušnými hodnotami naměřených emisních složek a zatížení do stanovených výpočtů měrných emisí v g/kWh. Nevýhodou tohoto cyklu je v tom, že se měří pouze samotný motor, a tak jsou výsledky proti reálným hodnotám v provozu ve vozidle zkreslené. [12]



Obrázek 6- Průběh testu ESC [12]

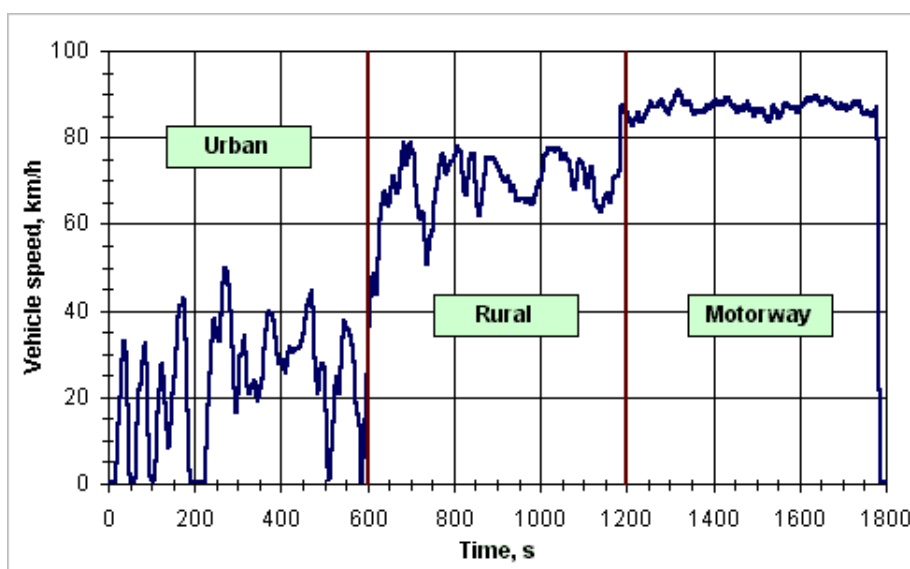
| Fáze | otáčky   | zátěž [%] | váha [%] | doba [min] |
|------|----------|-----------|----------|------------|
| 1    | volnoběh | 0         | 15       | 4          |
| 2    | A        | 100       | 8        | 2          |
| 3    | B        | 50        | 10       | 2          |
| 4    | B        | 75        | 10       | 2          |
| 5    | A        | 50        | 5        | 2          |
| 6    | A        | 75        | 5        | 2          |
| 7    | A        | 25        | 5        | 2          |
| 8    | B        | 100       | 9        | 2          |
| 9    | B        | 25        | 10       | 2          |
| 10   | C        | 100       | 8        | 2          |
| 11   | C        | 25        | 5        | 2          |
| 12   | C        | 75        | 5        | 2          |
| 13   | C        | 50        | 5        | 2          |

Tabulka 4 - Parametry testu ESC [12]

### 3.3.6. European Transient Cycle (ETC)

Spolu s ESC nahradili předchozí testovací cyklus R-49 a byly používány až do normy Euro V. Vznětové motory, které byly vybaveny „pokročilými systémy“ pro regulaci emisí (např. katalyzátor NO<sub>x</sub> nebo filtr pevných částic), musely být také testovány v dynamickém evropském přechodovém cyklu (ETC). Jedná se o zkušební cyklus, založený na skutečných silničních měřeních v provozu. Test je složen ze 3 částí a délka trvání celého cyklu je 1800 sekund. Každá část má 600 sekund.

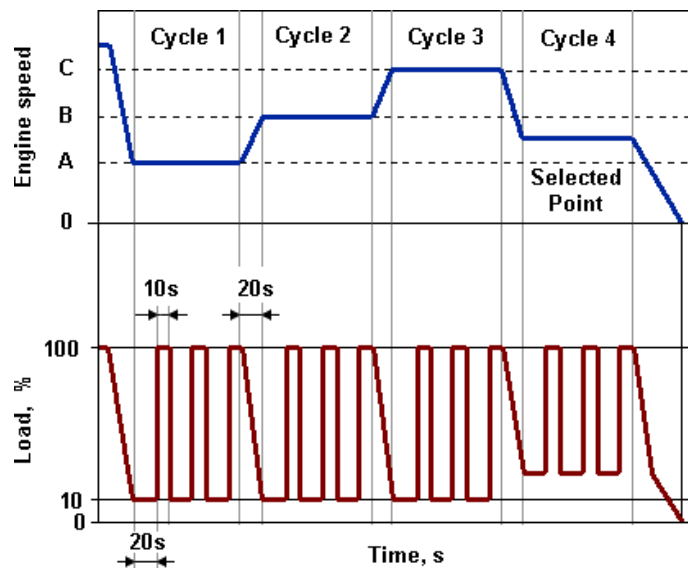
- a) městská část – první část jízdního cyklu s maximální rychlostí 50 km/h a častými rozjezdy
- b) mimoměstská část – druhá část jízdního cyklu s výraznou akcelerací a průměrnou rychlostí 72 km/h,
- c) dálniční část – třetí část cyklu s průměrnou rychlostí 88 km/h. [12] [6] [1]



Obrázek 7 - Průběh testu ETC [12]

### 3.3.7. European Load Response (ELR)

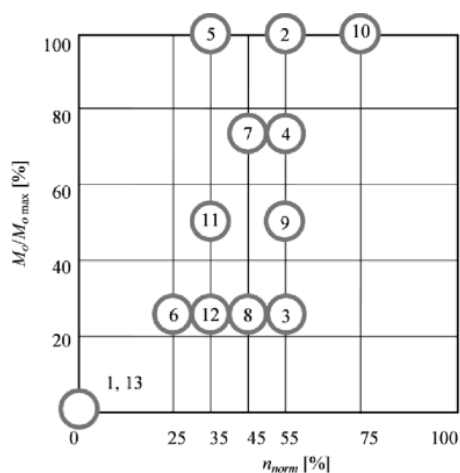
Test obsahuje tři sekvence různého stupně zatížení (mezi 10% - 100%) pokaždé při různých otáčkách motoru definovaných jako u cyklu ESC, tj. A (cyklus 1), B (cyklus 2) a C (cyklus 3), následovaný cyklem 4, který je volitelný v mezích otáček mezi A a C a dolní zatížení se pohybuje mezi 10 % a 100 %. Důvodem tohoto měření je zjištění kouřivosti, data jsou během celého cyklu ELR a finální hodnoty jsou výsledkem speciálního algoritmu. Za prvé se zjišťuje průměrná hodnota kouřivosti postupně v každé sekundě celého cyklu. Ve druhém kroku je zjišťována nejvyšší průměrná hodnota kouřivosti v každém ze tří zátěžových cyklů pro každý režim otáček. Konečná hodnota kouřivosti se stanoví jako vážený průměr ze středních hodnot při otáčkách. [12]



Obrázek 8 - Průběh testu ELR [12]

### 3.3.8. World Harmonized Stationary Cycle (WHSC)

S normou Euro VI se zavedl nový testovací cyklus definovaný globálním technickým předpisem (GTR) č. 4 GTR se vztahuje na celosvětově harmonizovaný postup certifikace pro těžký provoz (WHDC) pro výfukové emise motoru. Byly vytvořeny dva testovací cykly, testovací cyklus v ustáleném stavu s teplým startem (WHSC) a přechodový testovací cyklus (WHTC) s požadavky na studený i teplý start, pokrývající typické jízdní podmínky v EU, USA, Japonsku a Austrálii. Jedná se o statický test na dynamometru v ustáleném stavu, tedy takový, kde se otáčky i točivý moment testovaného motoru počítají na základě standardních hodnot těch parametrů stanovených legislativou. Celkem obsahuje 11 fází (plus dvě fáze volnoběhu). Při srovnání oproti ESC jsou průměrné rychlosti a zatížení (a tím i výkony) nižší, což ovlivňuje emise znečišťujících látek. [12] [37]



| Fáze | $t_i$ [s] |
|------|-----------|
| 1    | 210       |
| 2    | 50        |
| 3    | 250       |
| 4    | 75        |
| 5    | 50        |
| 6    | 200       |
| 7    | 75        |
| 8    | 150       |
| 9    | 125       |
| 10   | 50        |
| 11   | 200       |
| 12   | 250       |
| 13   | 210       |

Obrázek 9 - Průběh WHSC [12]

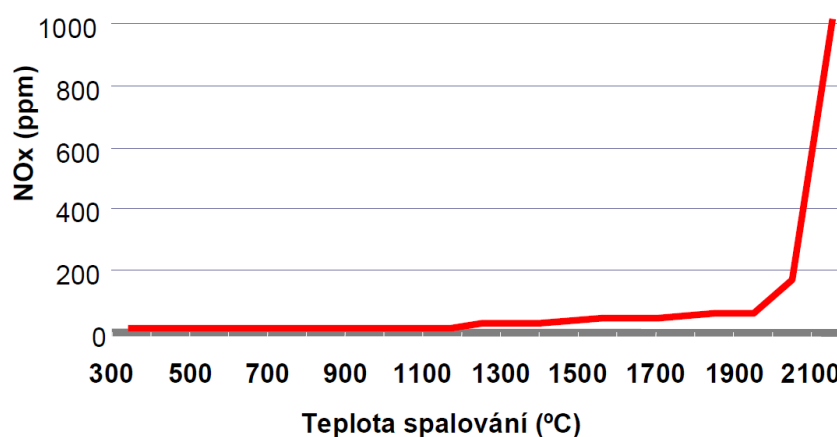
Tabulka 5 - Parametry testu WHSC [12]



## 4. Systémy snižující množství škodlivin ve výfukových plynech

Úprava charakteristik motoru vždy s sebou nese problematiku týkající se dodržení stanovených limitů danými emisními normami. Z principu vyplývá, že výrobci musí dávat přednost snižovat množství emisí před maximalizací výkonových parametrů motoru. Tento rozpor tak dává možnost nárustu výkonu, ale většinou má za následek také nárůst emisí. Vzhledem k tomu, že dieselové motory vždy pracují s přebytkem vzduchu, produkují ze své podstaty mnohem menší množství CO a HC než benzínové motory. Hlavní důraz je proto kladen na emise NO<sub>x</sub> a pevných částic. Oba tyto typy emisí lze snížit o více než 90 % použitím moderních akumulčních katalyzátorů NO<sub>x</sub> a filtrů pevných částic, aby bylo dosaženo shody s těmito normami. [1] [2]

Oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) ve výfukových plynech vzrůstají s rostoucími spalovacími teplotami, které jsou zejména u motorů s přímým vstřikem velmi vysoké. Následující křivka zobrazuje teplotní hranici, od které se oxidy dusíku tvoří ve velkém množství, a je tak nevhodné tuto hranici překračovat. [10]



Obrázek 10 - Vliv teploty spalování na tvorbu NO<sub>x</sub> [10]

V rámci vývoje vozidla se řeší problematika snižování emisí, jak u vznětových motorů, tak i u benzínových motorů v následujících třech oblastech:

1. Snižování spotřeby paliva - dosahováno snížením odporu vzduchu vozidla, hmotností vozidla, systémem řízení motoru, odzdušněním palivové nádrže a zpětným vedením výfukových plynů
2. Čištění výfukových plynů, případně jejich opětovné použití - Vzhledem ke dnešním konstrukcím spalovacího prostoru uvnitř motoru, jeho spolehlivého a přesného řízení probíhají tyto úpravy a redukce emisí mimo spalovací prostor ve výfukovém traktu

spalovacího motoru pomocí oxidačního katalyzátoru, EGR, keramických vložek, filtru pevných částic a selektivní katalytické redukce. Kombinací těchto systémů je dosaženo emisní normy, kterou má vznětový motor splňovat.

3. Kontrola činnosti systémů, které mají vliv na složení výfukových plynů - zajištěna signalizací kontrolky emisí na přístrojovém panelu vozidla. Pokud dojde k nesprávné činnosti komponentů, které mají vliv na emise motoru, může také dojít ke snížení výkonu vozidla, či dokonce k zastavení motoru. [4] [5]

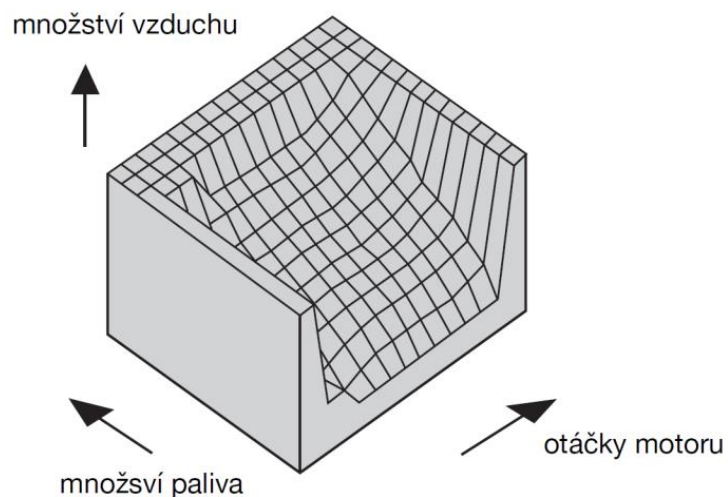
#### 4.1. Recirkulace výfukových plynů vznětových motorů

Preciznost přípravy a tvorby směsi je dnes na vysoké úrovni, co se týče splnění požadavků. Mezi základní požadavky je začleněn co nejkratší čas pro přípravu paliva v přesném množství a pod požadovaným tlakem. Dalším důležitým prvkem je příprava kvalitního a čistého vzduchu ve správném čase a množství. Ovšem tyto základní parametry, byť precizně připravené, nestačí ke splnění dnešních přísných emisních limitů. K výsledným hodnotám dle aktuálních emisních norem je za potřebí dodatečná úprava spalin. U dnešních moderních mobilních prostředků je celá řada provedení recirkulace výfukových plynů, a proto se zaměřím na systémy, které se používají u vznětových motorů osobních a nákladních vozidel.

##### 4.1.1. Systém zpětného vedení výfukových plynů bez chladiče spalin

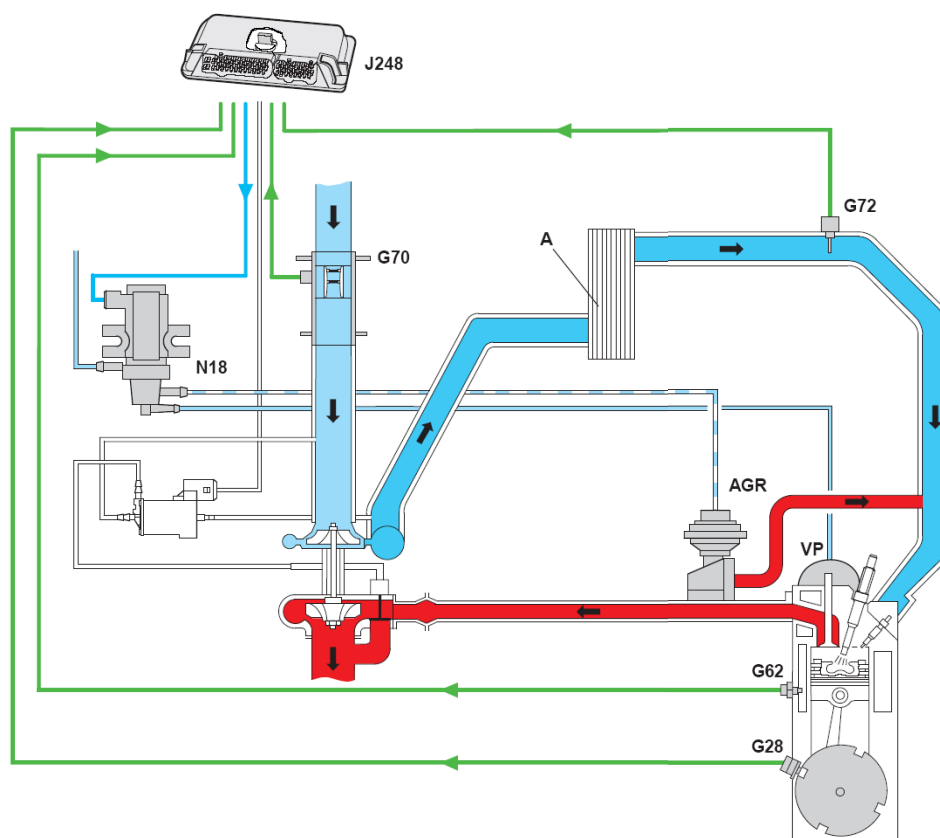
Při smíchání části výfukových plynů s nasávaným čerstvým vzduchem dochází ke snížení obsahu kyslíku v nasávaném vzduchu a tím i ke snížení spalovacích teploty. Při velkém objemu přisávaných spalin, nebo při velkém zatížení motoru by mohlo vlivem recirkulace spalin dojít ke zvýšení kouřivosti motoru. Proto je recirkulace spalin funkční jen při zahřátém motoru, kdy je teplota vyšší než 50 °C, a to při volnoběžných a nižších otáčkách zhruba do 3000 min<sup>-1</sup> a při částečném zatížení.

Rozsahy provozních režimů recirkulace spalin (teplota motoru, otáčky a zatížení) jsou zadány do datových polí recirkulace spalin v řídicí jednotce. Tato datová pole obsahují také nejmenší nutnou hmotnost vzduchu pro každý provozní stav motoru v závislosti na otáčkách, množství paliva a teplotě motoru (viz obr. 11). [7] [8]



Obrázek 11 - Datového pole recirkulace spalin vznětového motoru 1.9 TDI AGR [8]

Na obrázku 12 je zobrazen systém recirkulace spalin vznětového motoru 1.9 TDI AGR od výrobce vozidel značky Škoda.



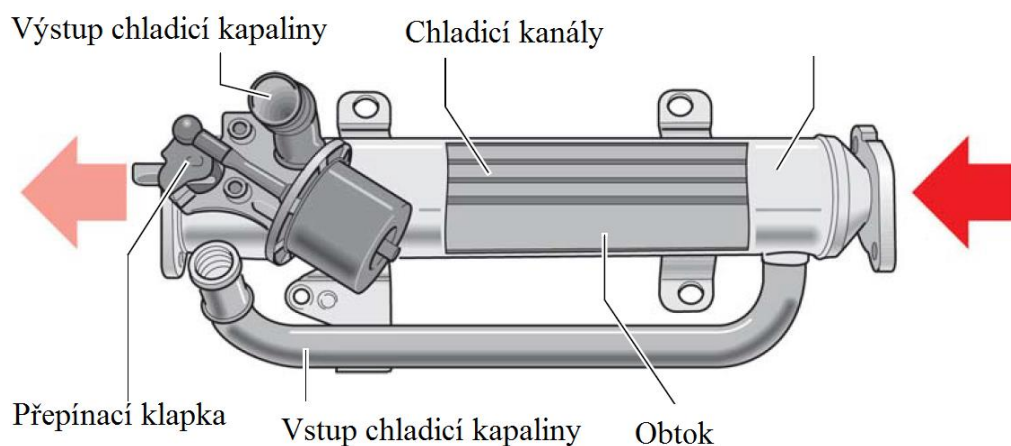
Obrázek 12 - Schéma zpětného vedení výfukových plynů [8]

A – chladič plnicího vzduchu, AGR – mechanický ventil pro zpětné vedení výfukových plynů, G28 – snímač otáček motoru, G62 – čidlo teploty chladicí kapaliny, G70 – snímač množství nasávaného vzduchu, G72 – snímač teploty nasávaného vzduchu, J248 – řídicí jednotka motoru 1,9 TDI, N18 – elektromagnetický ventil pro zpětné vedení výfukových plynů, VP – vakuová pumpa

#### 4.1.2. Systém zpětného vedení výfukových plynů s chladičem spalin

Funkce tohoto systému je obdobná jako u systému bez chladiče viz kapitola 4.1.1. Jako u předchozího systému bez chladiče spalin se množství zpětně vedených výfukových plynů reguluje podle pole charakteristik v řídicí jednotce motoru. Výfukové potrubí prošlo určitými konstrukčními změnami. Tento systém je navíc osazen chladičem výfukových plynů a širokopásmovou lambda sondou. Hlavní změna oproti systému bez chladiče spalin je provedena před umístěním filtru pevných částic, kde je zakomponována širokopásmová lambda sonda. Ta se využívá jako korekční hodnota k regulaci množství recirkulovaných výfukových plynů. [22]

Úkolem chladiče recirkulace výfukových plynů je, aby chlazením zpět přiváděných výfukových plynů dále poklesly spalovací teploty a bylo možné přivádět zpět větší množství výfukových plynů. [22]

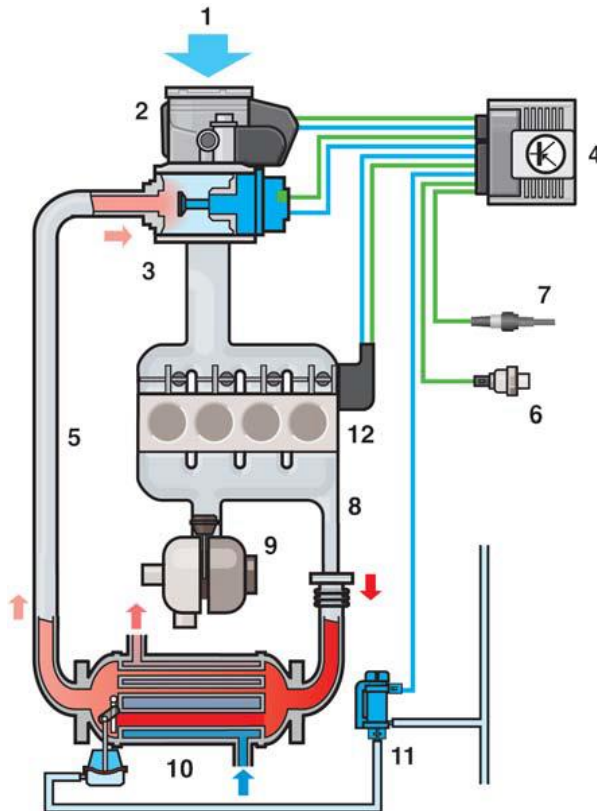


Obrázek 13 - Chladič výfukových plynů [22]

Kvůli omezení emisí  $\text{NO}_x$  je motor vybaven nízkoteplotní recirkulací výfukových plynů. Při zavřeném regulátoru chlazení je do chladiče recirkulace výfukových plynů přiváděna studená chladicí kapalina přímo z chladiče motoru. V důsledku takto vznikajícího velkého poklesu teploty lze nazpět přivádět větší množství výfukových plynů. Ve fázi ohřevu motoru tak mohou dále klesnout spalovací teploty a následkem toho i emise oxidů dusíku. [22]

Aby se docílilo co nejdříve provozní teploty motoru a katalyzátoru, tak je chladič recirkulace výfukových plynů připojitelný pomocí elektropneumatický ventilu N345. Chladič výfukových plynů se připojuje při teplotě chladicí kapaliny nad  $35\text{ }^\circ\text{C}$ . Při teplotě chladicího

zařízení pod 34 °C je chlazení výfukových plynů vypnuto tzn. klapka v chladicím potrubí je uzavřená a obtok je otevřen. Neochlazené výfukové plyny jsou odváděny do sacího potrubí.

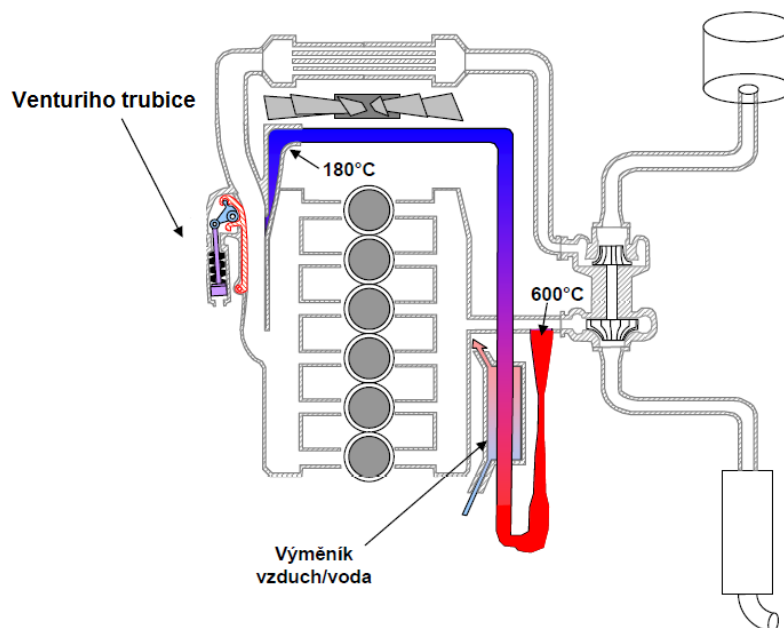


Obrázek 14 - Schéma systému recirkulace výfukových plynů s chladičem spalin [22]

1 - nasávaný vzduch, 2 - ovládací jednotka škrticí klapky J338 s potenciometrem škrticí klapky G69, 3 - ventil recirkulace výfukových plynů s potenciometrem recirkulace výfukových plynů G212 a ventilem recirkulace výfukových plynů N18, 4 - řídicí jednotka motoru J623, 5 - přívodní potrubí výfukových plynů, 6 - snímač teploty chladicí kapaliny G62, 7 - lambda sonda G39, 8 - výfukové potrubí, 9 – turbodmychadlo, 10 - chladič výfukových plynů, 11 - přepojovací ventil chladiče recirkulace výfukových plynů N345, 12 - motor klapky sacího potrubí V157 s potenciometrem klapky sacího potrubí G336

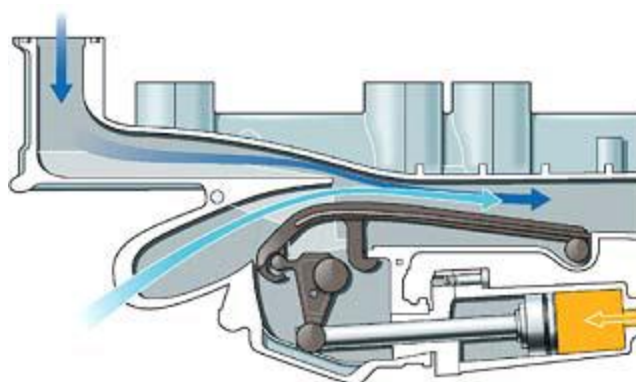
#### 4.1.3. Jednostupňový systém zpětného vedení výfukových plynů u nákladních vozidel

Jednostupňový EGR ventil je vybaven výměníkem vzduch-voda pro chlazení výfukových plynů před vstupem do sacího systému. Na obrázku 15 je znázorněno schéma jednostupňového systému, který dokáže teplotu výfukových plynů výrazně ochladit. [10]

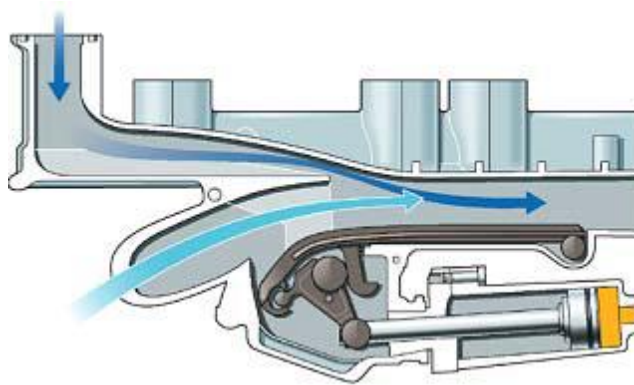


Obrázek 15 - Schéma jednostupňové recirkulace výfukových plynů [10]

Tlak působící v kolektoru sacího potrubí je mírně vyšší než v kolektoru výfukového potrubí, je proto nutné doplnit systém, který zajistí proudění recirkulujících plynů. Použito je v tomto případě princip Venturiho trubice. Zmenšením průřezu v místě směšování plynů, dochází k akceleraci plynů umožňující proudění do sacího potrubí. Výsledkem je vytvoření podtlaku v přívodním potrubí od výfuku. Tento efekt je využíván pouze pod hodnotou  $1500 \text{ min}^{-1}$  motoru. Nad touto hodnotou ( $1500 - 2100 \text{ min}^{-1}$ ) je proud vzduchu dostatečný pro nasávání výfukových plynů. Na obrázcích 16 a 17 je vidět činnost Venturiho ventilu, který reguluje průřez potrubí pro výfukové plyny vedené do sacího systému motoru.



Obrázek 16 - Aktivace Venturiho ventilu při otáčkách motoru  $1000 - 1500 \text{ min}^{-1}$  [10]



Obrázek 17 - Deaktivace Venturiho ventilu při otáčkách motoru 1500 – 2100 min<sup>-1</sup> [10]

Pro omezení turbulencí vznikajících ve výfukovém potrubí, je potrubí výfukových plynů vybaveno systémem tlumení. Plyny procházejí nejprve do potrubí o malém průměru (redukce) ještě před vstupem do expanzní komory. Na konci je akční člen, který ovládá škrticí klapku, která více či méně zužuje profil potrubí. Tento systém je označován jako ventil EGR u nákladních vozidel Scania. [10]

EGR je aktivní mezi 1000 a 2100 min<sup>-1</sup>. Dva snímače otáček, umístěné na setrvačnicku motoru, měří otáčky motoru. EGR je aktivní při teplotě chladicí kapaliny mezi 60 a 100 °C, kterou měří snímač na výstupu z bloku motoru. Porovnání informací ze snímače hmotnostního průtoku a dvojitého snímače tlaku a teploty vzduchu umožňuje přesně znát a regulovat objem výfukových plynů recirkulujících do sacího potrubí. Snímač atmosférického tlaku zajišťuje deaktivaci EGR ventilu podle nadmořské výšky.

Na základě všech těchto informací, řídí jednotka EMS aktivaci ventilu EGR. Ovládání akčního členu Venturiho trubice a ventilu EGR je zajištěno pneumaticky prostřednictvím elektromagnetického ventilu, který je ovládán elektricky řídicí jednotkou motoru. Tento systém se používá u nákladních vozidel se vstřikováním PDE (Pumpe Düse Einheit), které splňují normu EURO 4. [10]

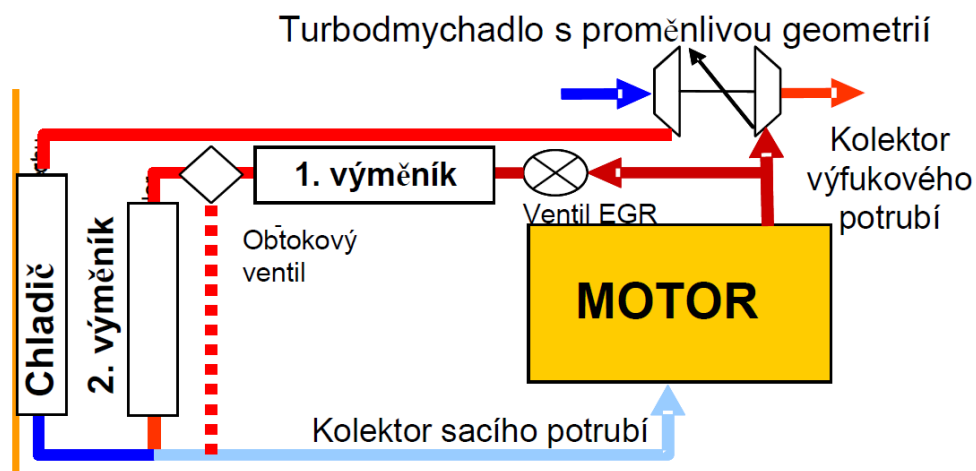
#### 4.1.4. Dvoustupňový systém zpětného vedení výfukových plynů u nákladních vozidel

Tento systém vychází z jednostupňového systému zpětného vedení výfukových plynů. První změna je u výměníku vzduch/voda. Tento výměník je zkonstruován na větší rozměry než v předešlém systému. Ovšem stále je využíván pro cirkulaci plynů. Vstřikovací tlak je u motorů XPI zvýšený kvůli zlepšení výkonosti motoru, spalování a omezení tvorby částic. Maximální tlak dosažený ve válci motoru XPI se blíží hodnotě 18 MPa. Zvýšení tlaku ve

spalovacím prostorem vyvolává zvýšení teploty, což podporuje tvorbu  $\text{NO}_x$ . Kvůli omezení škodlivin, systém EGR ochlazuje výfukové plyny, použitím výměníku voda/voda a novým výměníkem vzduch/vzduch.

Pokud teplota klesne pod  $0^\circ\text{C}$ , je chladič vzduch/vzduch EGR deaktivován, aby nedocházelo k zamrznutí výměníku.

Hlavním důvodem použití dvou stupňů chlazení je z důvodu splnění normy Euro 5. U této normy musejí motory oproti normě Euro 4 omezit mezní hodnotu oxidů dusíku z 3,5 na 2,0 g/kWh. [21]



Obrázek 18 - Schématické znázornění dvoustupňového systému recirkulace výfukových plynů [21]

#### 4.2. Oxidační katalyzátor vznětových motorů

Oxidační katalyzátor je součástí výfukových systémů diesellových motorů od doby, kdy byly zavedeny předpisy omezující množství škodlivých emisí vypouštěných do životního prostředí z diesellových motorů. Poprvé byly použity v roce 1967 pro vnitřní vysokozdvížné vozíky a podzemní důlní vozidla, kde byla kvalita ovzduší pro pracovníky hlavním problémem [15]. Primární funkce je oxidace CO a nespálených uhlovodíků na vodní páru a oxid uhličitý. Obsah oxidů dusíků  $\text{NO}_x$  téměř neovlivňuje. [17]

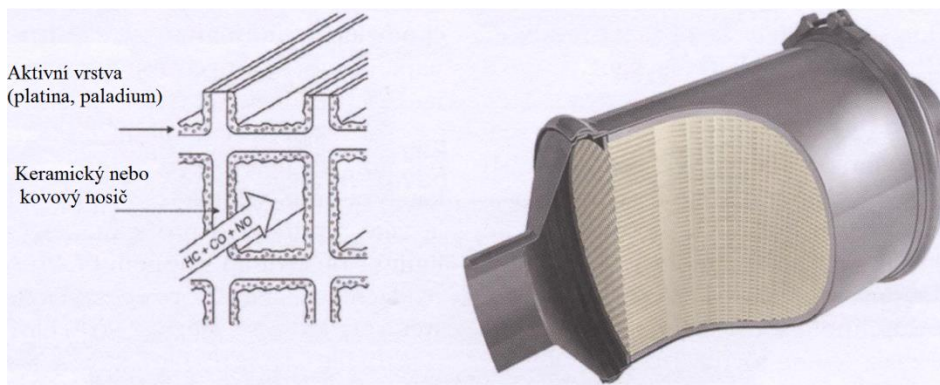
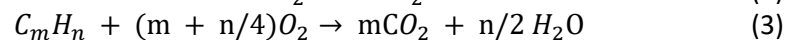
V důsledku přebytku kyslíku ve výfukových plynech probíhají oxidační procesy v tomto katalyzátoru velmi účinně. HC i CO oxidují už při teplotách nad  $160^\circ\text{C}$ . Jako drahé kovy se pro oxidaci používají platina a částečně palladium. Protože oxid uhelnatý a uhlovodíky ulpívají také na pevných částicích, přeměňují se i tyto škodlivé látky. Při použití oxidačního katalyzátoru však nemohou být významně sníženy emise pevných částic. Účinkem



katalyzátoru se však pevné částice stávají asi o 30 % lehčími, protože se na nich přemění usazené uhlovodíky a oxid uhelnatý. [16]

Kvůli vyššímu poměru vzduchu/paliva nejsou třicestné katalyzátory používané pro benzinové motory se stechiometrickým spalováním schopny efektivně fungovat s výfukovými plyny dieselových motorů. Pro vznětové motory proto musely být vyvinuty zcela nové koncepce následného ošetřování výfukových plynů, protože samotné snižování škodlivých emisí opatřeními na motoru už nestačila. Jako nejčastější kombinace pro snížení emisí vznětových motorů se do nedávna nabízela kombinace zpětného vedení výfukových plynů a oxidačního katalyzátoru. Hlavním důvodem použití oxidačního katalyzátoru je omezení zápachu z nafty a rovněž omezení pevných částic. Tento katalyzátor se nepoškodí, pokud bude vozidlo pracovat na naftu s vyšším obsahem síry. Pro dodržení limitních hodnot stanovených normami Euro 2 až Euro 3 to bylo ještě dostatečné, pro dosahování hodnot normy Euro 4 a vyšších to však už nestačí. Proto je nutné používat u vyšších norem Euro filtr pevných částic. [15] [16] [18]

Chemické reakce v oxidačním katalyzátoru:



Obrázek 19 - Schéma systému s oxidačním katalyzátorem [16]

### 4.3. Filtry pevných částic

Pro dodatečné snižování emisí pevných částic u vznětových motorů se v současné době používají zejména filtry pevných částic (DPF). Důvod použití je patrný z tabulky 3, kde je vidět omezení pevných částic dle norem EURO (viz kapitola 4.1 tabulka 1 - 4).

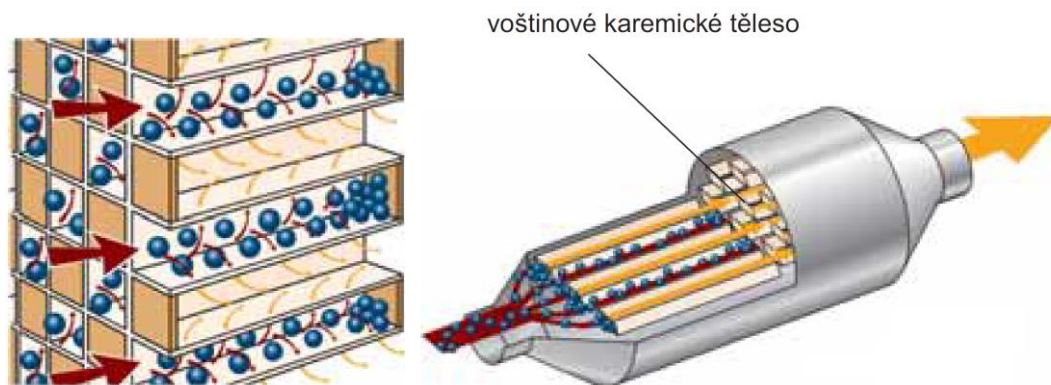
Keramické filtry pevných částic se skládají z voštinové struktury vyrobené z karbidu křemíku nebo Cordieritu, která má velké množství paralelních, většinou čtvercových kanálek.

Tloušťka stěn kanálu je typicky 300 až 400  $\mu\text{m}$ . Velikost kanálu je určena hustotou buněk. Hustota buněk činí v závislosti na typu filtru typicky 100 – 300 cpsi (Channels per Square Inch). Sousední kanály jsou na každém konci uzavřeny keramickými zátkami, aby výfukové plyny pronikly skrz porézní keramické stěny. Když částice sazí procházejí stěnami, jsou difúzí transportovány do stěn pórů (uvnitř keramických stěn), kde přilnou (filtrace v hloubce). Jak se filtr stále více nasycuje sazemi, vytváří se na povrchu stěn kanálů (na straně protilehlé ke vstupním kanálům) vrstva sazí. To poskytuje vysoce účinnou povrchovou filtraci pro následující operace fáze. [1]

V současné době jsou vyvinuty dva systémy filtru pevných částic - systém s aditivem a bez aditiva. U systému bez aditiv je filtr pevných částic blíže k motoru. Umístění těchto filtrů je z konstrukčního hlediska vyřešeno tak, že filtr pevných částic je umístěn hned za turbodmyčadlem. Díky kratší vzdálenosti filtru pevných částic od motoru je teplota výfukových plynů potřebná ke spálení částic dostatečně vysoká a v případě potřeby může být ještě zvýšena řídicí jednotkou motoru. Systémy s aditivem jsou používány u automobilů s filtrem pevných částic, který je umístěný z konstrukčních důvodů dále od motoru. Vzhledem k dlouhé cestě výfukových plynů od motoru k filtru pevných částic může být dosažena teplota potřebná ke spalování částic sazí jen přidáním aditiva. Tyto aditiva snižují zápalnou teplotu odfiltrovaných pevných částic asi na 400 °C. Během regenerací je pak možné díky nim zapálit saze při mnohem nižších teplotách, než by tomu bylo bez jejich přispění. Vozidla Peugeot a Citroen používala nejprve aditivum na bázi oxidu ceru a v novějších systémech na bázi oxidu železa s obchodním názvem Eolys. Skupina Volkswagen používá přísadu na bázi oxidu železa s obchodním názvem Satacen 25. Nevýhodou tohoto systému spalování sazí je velká tvorba popela a rychlejší zaplnění filtrů. DPF filtry používající aditiva tak mají výrazně kratší živostnost než systémy bez aditiv. [32] [33]

Bez ohledu na materiál filtru pevných částic – keramiku nebo slinutý kov – je nutné materiál čas od času zbavit usazených částic, tzn. musí být regenerován. Rostoucí množství sazí usazených ve filtru postupně zvyšuje protitlak výfukových plynů. Regenerace musí být provedena přibližně každých cca 300 až 800 kilometrů. Regenerace trvá asi 10 až 15 minut. Systému s aditivou to zabere o něco méně času. Také záleží na provozních podmínkách motoru. Filtr se regeneruje pomocí spálením sazí, které se provozem nashromáždily ve filtru. Částicová uhlíková složka může oxidovat pomocí kyslíku trvale přítomného ve výfukových plynech nad teplotou cca. 600°C za vzniku netoxického CO<sub>2</sub>. K takto vysokým teplotám dochází pouze při provozu motoru na jmenovitý výkon. V běžném provozu vozidla lze této

teploty dosáhnout jen vzácně. Z tohoto důvodu musí být přijata opatření ke snížení teploty spalování sazí a/nebo zvýšení teploty výfukových plynů. [1] [33]

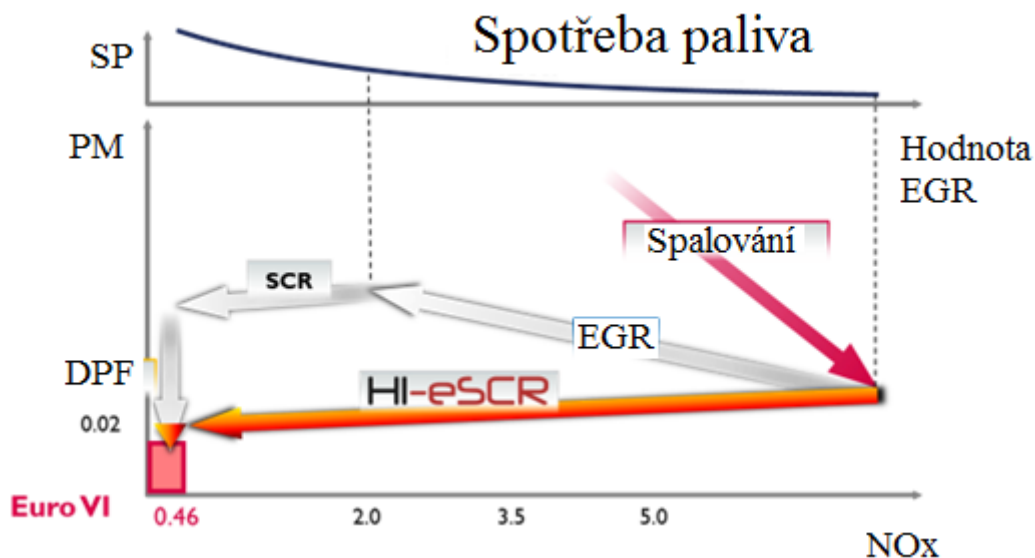


Obrázek 20 - Schéma filtru pevných částic [33]

#### 4.4. Selektivní katalytická redukce SCR

S cílem přizpůsobit motory novým emisním limitům mají konstruktéři, při přechodu z normy Euro 3 na Euro 4/5, popřípadě aktuální Euro 6, dvě možnosti. První řešení je systém EGR a druhým řešením je SCR.

Například Společnost Iveco zvolila systém EGR pro lehkou řadu a systém SCR pro střední a těžkou řadu vozidel. Dlouhá léta byly tyto systémy (SCR a EGR) analyzovány, zkoušeny a bylo zjištěno, že systém SCR je výhodnější pro motory s velkým obsahem válců a velkým výkonem, zatímco systém EGR je vhodnější pro motory používané jako „light duty“ (lehké). Další společnosti jako Mercedes, Daf, Volvo a Renault se rozhodly pro stejné řešení, zatímco společnosti Scania a MAN původně vsadily na systém EGR na celou výrobní řadu, avšak se stále přísnějšími emisními normy musely taky přejít na technologii SCR. Zejména společnost Scania a MAN, která nejdříve zvolila systém EGR pro motory splňující Euro IV, následně pak musela přejít k řešení SCR a pro dosažení limitů Euro V a Euro VI. [19] Společnost Iveco je jediná, která dokázala splnit emisní limit Euro 6 bez systému EGR a používá HI – eSCR technologii. Technické řešení vyplývá z obrázku 21.



Obrázek 21 - Technická řešení pro Euro VI [19]

Systémem EGR není možno dostat parametry motoru na takovou úroveň, aby byly co nejnižší hodnoty pevných částic. EGR sice sníží podstatnou část  $\text{NO}_x$ , ale zase zvýší hodnotu pevných částic. Pokud je ovšem omezeno množství pevných částic na minimum, tak rapidně vzrostou hodnoty  $\text{NO}_x$ , a proto je nutné zavést systém SCR.

Technologie SCR je založena na zpracování výfukových plynů přidáváním roztoku AdBlue. Tento roztok je vsřikován do výfukových plynů dříve, než projdou katalyzátorem. Naftové motory byly vyvinuty pro efektivnější úroveň spalování a jejich řídicí jednotky vypočítávají optimální množství roztoku AdBlue, které má být vsřiknuto, podle aktuálního zatížení a otáček motoru. [19]

#### 4.4.1. Vlastnosti AdBlue

AdBlue je roztok močoviny -  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  ve vodě -  $\text{H}_2\text{O}$ . AdBlue obsahuje 32,5 % močovinných krystalů a 67,5 % deionizované vody. Jde o čirou kapalinu se slabým zápachem po amoniaku. Kapalina je nehořlavá a při běžné manipulaci je nezávadná. Má však vysoce korozivní účinky na kovy, zejména měď a hliník. [20]

Společnost Volvo a Iveco povoluje k použití v systému SCR pouze roztok AdBlue, který splňuje požadavky normy ISO 22241-1 (dříve DIN – 70070). Používání roztoku AdBlue, který není schválen dle této uvedené normy, může trvale poškodit systém SCR. Také dojde k negativnímu ovlivnění výkonu motoru a současně hrozí riziko poškození dalších součástí motoru. [19] [20]

|                 |  |
|-----------------|--|
| Složení         | Roztok močoviny v deionizované vodě (destilované)  |
| Koncentrace     | 32,5 % ± 0,8 %   |
| Vlastnosti      | Bezbarvá kapalina. Nehořlavá. Nezávadná při běžné manipulaci. Močovina obsažená v roztoku se pomalu rozkládá na amoniak a oxid uhličitý. Rozklad probíhá rychleji při vyšších teplotách. |
| Fyzikální údaje | Bod mrznutí – 11 °C<br>Hustota (20 °C) 1 090 kg*m <sup>-3</sup><br>pH ~ 9 x<br>Rozklad na čpavek v plynné podobě při 200 °C  |

Tabulka 6 - Charakteristika AdBlue - ISO 22241-1 (dříve DIN-70070) [20]

Protože roztok AdBlue zamrzá při teplotě -11 °C, je nádrž opatřena topným hadem s chladicí kapalinou z motoru a na rámu v blízkosti nádrže je elektromagnetický ventil, který slouží k regulaci přítoku chladicí kapaliny. Také hadice mezi nádrží a jednotkou čerpadla jsou elektricky vyhřívány. Snímač teploty vysílá signál do řídicí jednotky, takže čerpadlo se nemůže spustit předtím, než začne proudit roztok AdBlue. Standardní systém vydrží odtávání až do teploty -40 °C. Systém AdBlue se odčerpá, když se vypne zapalování, aby se zabránilo jeho poškození v důsledku roztažení v případě zamrznutí. Mezi nádrží AdBlue a jednotkou čerpadla je zapojena sací trubka. Sdružený snímač teploty a hladiny nádrže AdBlue je připojen k řídicí jednotce. Hodnota snímače hladiny se zobrazuje na přístrojovém panelu vozidla.

Spotřeba AdBlue se liší podle jízdních podmínek, a pokud hladina v nádrži klesne asi na 10 % jejího objemu, zobrazí se hlášení upozorňující na nutnost doplnění. Nádrž je požadována za prázdnou, jestliže její hladina klesne na cca 5 litrů AdBlue. Pokud k tomu dojde, potom se do řídicí jednotky motoru odešle kód závady a na přístrojové desce se zobrazí výstražné hlášení, že je nádrž prázdná. [20]



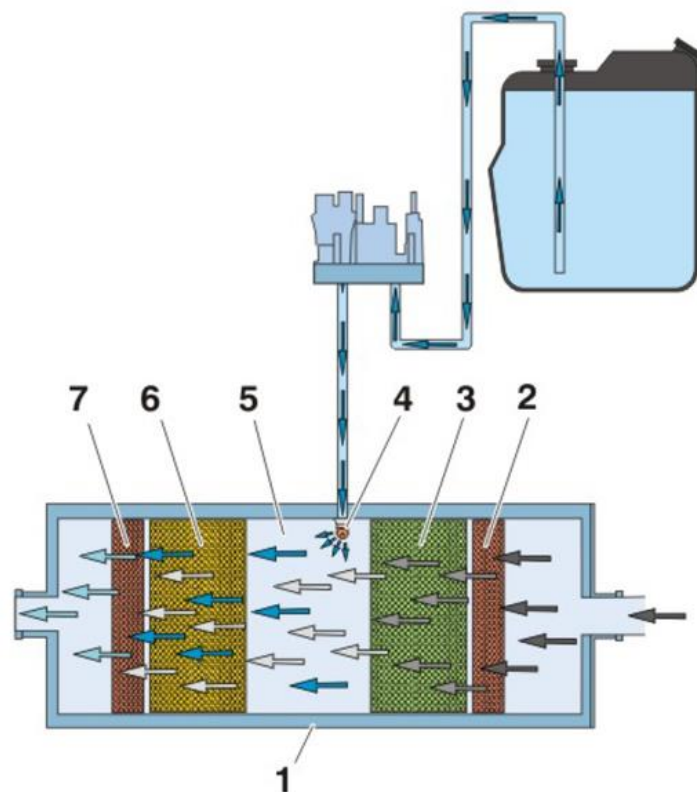
Obrázek 22 - Plastová nádrž AdBlue s topným hadem. [20]

#### 4.4.2. Princip činnosti u nákladních vozidel

Systém monitoruje teploty v nádrži AdBlue, okolního vzduchu a v čerpadle. Pokud zjistí nízkou teplotu (studené klima), systém před spuštěním ostatních systémů projde fází zahřání. Jsou-li přiměřeně splněny všechny podmínky, pak po nastartování motoru, tj. po spuštění čerpadla, systém přejde do režimu zvyšování tlaku. V režimu zvyšování tlaku je AdBlue čerpadlem nasáváno z nádrže. Vzduch v systému je vypuzen přes jednosměrný ventil (s omezovačem ve zpětném směru) a krátkým otevřením dávkovacího ventilu. Čerpadlo běží na plné otáčky až do 2 barů, a poté převezme řízení regulátor tlaku a provádí regulaci tlaku v systému až do 5 barů změnou otáček motoru čerpadla. K udržení stabilního tlaku v systému dávkovacím ventilem trvale cirkuluje nadměrný průtok. Tlak lze udržet na hodnotě 5 barů změnou otáček motoru čerpadla způsobenou konstrukcí jednosměrného ventilu (s omezovačem ve zpětném směru).

Jakmile je v systému dosažen cílový tlak, systém přejde do normálního provozního režimu a je připraven k zahájení vstřikování AdBlue do výfukového potrubí. Výfukové plyny, před tím, než jsou vypuštěny, procházejí tlumičem (1), který zahrnuje jako první systém DOC (2). Systém DOC zoxiduje oxid uhelnatý a uhlovodíky, generuje teplo pro aktivní regeneraci a vytváří vhodnou směs plynů pro katalyzátor SCR. Výfukové plyny pokračují částicovým filtrem (3), který zachytí pevné částice. Poté následuje jemně rozptýlené reakční činidlo (AdBlue), které je vstříknuto tryskou (4) a smíšeno s výfukovými plyny ve směšovací komoře (5). Teplota výfukových plynů však musí být větší než 200 °C. ECM reguluje vstřikovaný

objem. Tato hodnota je přenesena do ACM, která řídí dávkovací ventil. Vstříkovací tryska pracuje na pevné frekvenci 4 Hz a vstříkované množství je regulováno různou dobou otevření vstříkovací trysky. Takto směs projde SCR katalyzátorem (6). Tento katalyzátor je keramická konstrukce s velkým počtem malých kanálků, jež jsou pokryty aktivní látkou. Díky vysoké teplotě výfukových plynů způsobí rozklad roztoku AdBlue a v katalyzátoru proběhne chemická reakce, při které jsou plyny přeměněny na neškodný dusík a vodu. Výfukové plyny, před tím, než opustí tlumič (1), procházejí ještě systémem ASC (7), kde je provedena oxidace veškerého zbývajících čpavku. Jednotka ECM provádí veškeré strategické výpočty vztahující se ke vstříkování reakčního činidla (AdBlue) a odesílá požadavky do jednotky ACM, jež ovládá čerpadlo, ventil chladicí kapaliny a vzduchový ventil (v jednotce čerpadla), aby za všech provozních podmínek bylo zajištěno přesné načasování vstříku a optimální snížení emisí. Čidlo  $\text{NO}_x$  měří obsah oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) ve výfukových plynech. Pokud nebudou dosaženy povolené emisní úrovně, na displeji se rozsvítí kontrolka a v řídicí jednotce motoru se uloží kód závady. [20]



Obrázek 23 - Princip činnosti SCR u nákladních vozidel [20]

- 1 - tlumič výfukového systému, 2 - DOC, 3 - částicový filtr, 4 - tryska pro reakční činidlo AdBlue, 5 - směšovací komora, 6 - SCR katalyzátor, 7 – ASC

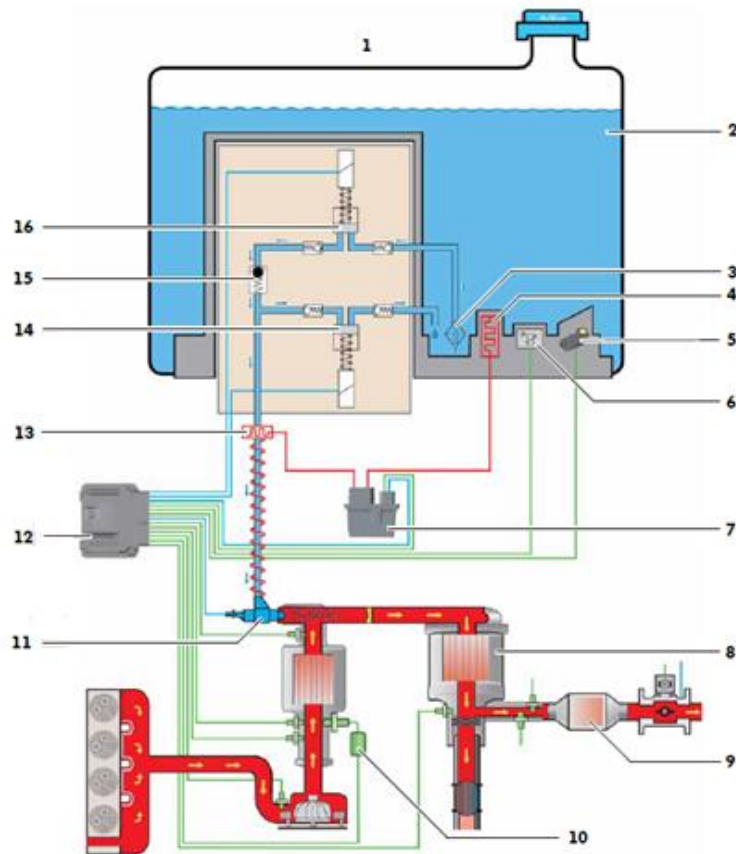
#### 4.4.3. Princip činnosti u osobních vozidel

Nádrž na redukční činidlo je umístěna vzadu vpravo pod podlahou vozidla. Plnicí hrdlo pro plnění nádrže redukčního činidla je umístěno vedle plnicího hrdla palivové nádrže. Čerpadlo je integrované do nádrže redukčního činidla a čerpá redukční činidlo do vstřikovače. Množství vstřikovaného množství závisí na obsahu oxidů dusíku ve výfukových plynech. Řídicí jednotka motoru používá k nastavení množství dobu otevírání vstřikovačů a frekvenci otevírání. Řídicí jednotka motoru používá tato data k výpočtu tlaku AdBlue v systému SCR.

Modul čištění výfukových plynů se skládá z oxidačního katalyzátoru a filtru pevných částic. Filtr pevných částic je tvořen voštinovým keramickým tělesem se soustavou kanálků. Povrchová vrstva redukčního katalyzátoru je tvořena zeolitem s obsahem mědi. Jedinečnost spočívá v tom, že prostorové uspořádání atomů vytváří kanálky a dutiny konstantních rozměrů. V těchto kanálcích se mohou zachytávat látky tuhého, kapalného a plynného skupenství. Tyto prvky slouží k urychlení procesu redukce oxidů dusíku. Redukční katalyzátor je tedy integrován do společného tělesa s filtrem pevných částic. Těsné umístění má tu výhodu, že redukční katalyzátor po studeném startu rychle dosáhne provozní teploty přibližně při teplotě 200 °C. Kromě toho je provozní teplota udržována déle i při nízkém zatížení motoru. Redukční katalyzátor také zabraňuje úniku přebytečného čpavku do venkovního vzduchu. Řídicí jednotka motoru využívá snímač NO<sub>x</sub> ke sledování účinnosti systému SCR. [29] [31]

Vstříknutý redukční prostředek je strháván proudem výfukových plynů a směšovačem rovnoměrně mísen do výfukových plynů. Směšovač je umístěn v modulu čištění výfukových plynů mezi oxidačním katalyzátorem a redukčním katalyzátorem. AdBlue musí být před vstupem do katalyzátoru SCR zcela odpařen. Čím je jeho rozptýlení rovnoměrnější, tím vyšší je účinnost redukčního katalyzátoru. [31]





Obrázek 24 - Schéma SCR systému u osobních vozidel [31]

1 - Nádrž na redukční činidlo, 2 - Redukční činidlo, 3 – Filtr, 4 - Vyhřívání nádrže redukčního činidla, 5 - snímač hladiny redukčního činidla, 6 - Snímač teploty pro redukční činidlo, 7 - Řídicí jednotka vyhřívání redukčního činidla, 8 - Filtr pevných částic, 9 - Redukční katalyzátor, 10 - snímač NO<sub>x</sub> s řídicí jednotkou pro snímač NO<sub>x</sub>, 11 - Vstřikovač redukčního činidla, 12 - Řídicí jednotka motoru, 13 - Vyhřívání potrubí redukčního činidla, 14 - Čerpadlo zpětného toku redukčního činidla, 15 Regulátor tlaku, 16 - Čerpadlo redukčního činidla

Pokud řídicí jednotka motoru detekuje chybu v systému SCR nebo nedostatečnou účinnost prostřednictvím snímače NO<sub>x</sub>, zobrazí se ve displeji panelu přístrojů varovná informace, která indikuje poruchu v systému SCR. Pokud poklesne hladina redukčního prostředku v nádrži pod určitou úroveň, která přepočtem vychází na dojezd 2400 km, je řidič vyzván třemi stupni výstrahy k doplnění prostředku AdBlue. V tomto stavu se již neberou v úvahu hodnoty naměřené ultrazvukovým snímačem hladiny, dojezd se stanovuje již jen podle výpočtového modelu. Pokud není chyba v systému SCR odstraněna ve zbývajícím rozsahu, nelze motor po vypnutí zapalování nastartovat. [29] [31]

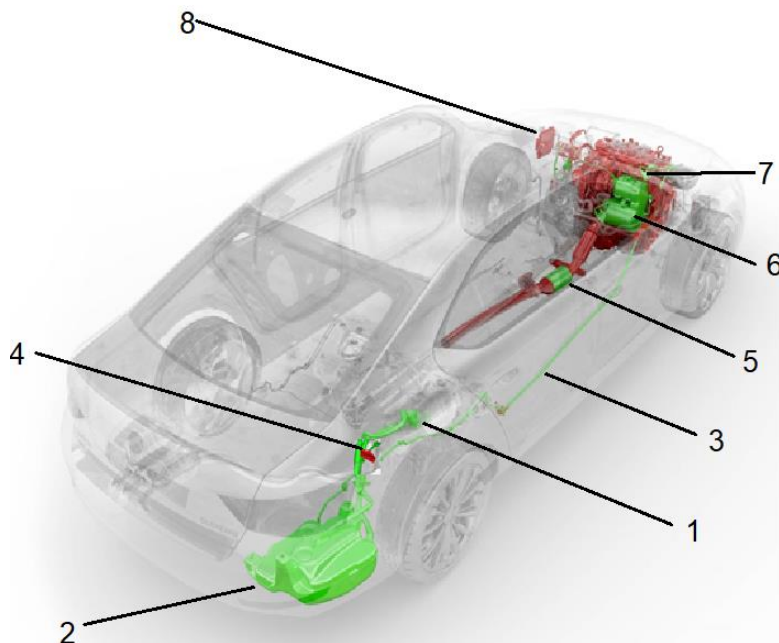
S emisní normou Euro 6d začal koncern Volkswagen používat procese dvojitého dávkování. Pro dvojitě dávkování používá Volkswagen ne jeden, ale dva systémy selektivní katalytické redukce (SCR). První katalyzátor SCR nejbližší motoru se rychle zahřeje, takže po

nastartování motoru začne rychle pracovat a dosáhne špičkového výkonu, když je vozidlo v pohybu a pracuje při nízkém zatížení, zatímco katalyzátor ve spodní části karoserie se projeví při vůz je v provozu při vysokém zatížení – například na dálnicích nebo při tažení přívěsu. Zvýšená účinnost dávkovacího procesu znamená, že spotřeba AdBlue zůstává na stejné úrovni, přestože bylo vstříknuto dvakrát. Větší vzdálenost od motoru znamená snížení teploty výfukových plynů před druhým katalyzátorem přibližně až o 100 °C. Výsledkem je, že jeden z katalyzátorů vždy pracuje v optimálním teplotním rozsahu v závislosti na provozním režimu vozidla, aby se usnadnila mimořádně účinná dodatečná úprava výfukových plynů. [30]

Druhý SCR katalyzátor tzv. Sperrkat (záchytný kat.) plní dva úkoly:

- 1) oxid uhelnatý (CO) se v něm mění na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), oxid uhelnatý vzniká při regeneraci DPF
- 2) zbylý amoniak ze systému SCR se rozkládá na vodu (H<sub>2</sub>O) a čistý dusík (N) [29]

Současná měření emisí RDE (Real driving emissions) od nezávislých institutů potvrzují, že při porovnání nových motorů 2.0 TDI Evo s dvojitým dávkováním s předchozí generací modelů SCR jsou hladiny NO<sub>x</sub> sníženy přibližně o 80 %. Tedy hluboko pod limity normy Euro 6d. [30]



Obrázek 25 - Schéma systému SCR s dvojitým dávkováním [29]

1 - plnicí hrdlo AdBlue, 2 - nádrž s čerpadly redukčního prostředku AdBlue, 3 - vedení AdBlue s výhřevem (dvoudílné), 4 - výkonová elektronika ovládání výhřevu čerpadla nádrže AdBlue a vedení AdBlue, 5 - SCR katalyzátor (SCR2) „Sperrkat“, 6 - Modul čištění výfukových plynů (DOC, DPF, SCR1), 7- vstříkovací ventil AdBlue, 8 - ŘJ motoru

#### 4.4.4. Chemická reakce

Je-li vstříknuta dávka AdBlue do prostoru směšovače, dojde nejprve vlivem teploty horkých výfukových plynů k odpaření vody, zbylá močovina se opět vlivem tepla tzv. termolýzou nejprve rozloží na čpavek (amoniak  $\text{NH}_3$ ) a kyselinu isokyanatou ( $\text{HNCO}$ ).

Na cestě k redukčnímu katalyzátoru na tzv. trase hydrolýzy mezi vstřikovacím ventilem redukčního prostředku a redukčním katalyzátorem se redukční prostředek rozkládá na čpavek ( $\text{NH}_3$ ) a oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Účinnost systému SCR je měřena snímačem  $\text{NO}_x$ .

Ve srovnání s ostatními technikami  $\text{DeNO}_x$  je  $\text{NH}_3$ -SCR nejúčinnější, především díky použití katalyzátoru, který zvyšuje selektivitu reakce a tím snižuje množství vedlejších produktů. V redukčních katalyzátorech se uskutečňuje redukce oxidů dusíku. Znamená to, že při redukčním procesu oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) odevzdávají svoje molekuly kyslíku. V redukčním katalyzátoru reagují oxidy dusíku ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) se čpavkem ( $\text{NH}_3$ ) na dusík ( $\text{N}_2$ ) a vodu ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Správný poměr mezi  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$  ve výfukových plynech, který je zapotřebí pro redukční proces, se vytváří v oxidačním katalyzátoru. Povrchová vrstva oxidačního katalyzátoru je přizpůsobena systému SRC. [29] [36]

## 5. Úpravy vznětových motorů a jejich vliv na emise

Nejllepšími motory pro tyto úpravy jsou přepřínované motory s přímým vstřikem paliva. V nich se skrývá největší potenciál, nejčastěji jsou již vybaveny regulovatelným turbodmychadlem a plně elektronicky řízeným vstřikovacím systémem - konkrétně systémy sdruženého vstřikovače UIS a Common Rail. U těchto motorů není problémem úpravou navýšit výkon o 20 – 40%. V řídicí jednotce se nastaví vyšší plnicí tlak, a tím pádem se do spalovacího motoru dostane více vzduchu. Větší množství vzduchu k sobě potřebuje i větší množství vstříknutého paliva, které je řízeno elektronicky a snadno ho lze přidat právě úpravou v řídicí jednotce. Aby větší množství paliva a vzduchu stihlo shořet před horní úvrátí musí se také zvětšit úhel předstřiku paliva. Toto lze označit jako obecný princip úpravy vznětového motoru, ve skutečnosti jde ale o složitější proces, protože moderní řídicí jednotky mají v sobě desítky někdy až stovky map s nejrůznějšími závislostmi, které se musí upravit.

### 5.1. Úpravy nejen osobních automobilů

Úprava charakteristik spalovacího motoru jsou možné nejen u osobních automobilů, ale u všech spalovacích motorů. V dnešní době je tak možná úprava jak vodní skútrů, motocyklů, dodávek, tak i nákladních automobilů, autobusů nebo traktorů. Firmy lákají své

zákazníky tím, že slibují snížení spotřeby paliva. To je hlavně u vozidel s vysokým denním nájedem kilometrů velkým pozitivem. U těchto vozidel je i malé snížení nákladů za palivo ušetřit ročně velké množství peněz a návratnost úpravy je tak velmi rychlá. V neposlední řadě je pak i pohodlí řidiče v krizových situacích, když potřebuje dostatečný výkon.

## 5.2. Druhy úprav řídicích jednotek

Možností úprav lze rozdělit do několika kategorií dle různých hledisek. Základem je vždy úprava motormanagementu. Jakou možnost zvolit závisí vždy na požadavcích. Většina si vybaví především zvýšení výkonu. Řada majitelů pak naopak očekává snížení spotřeby paliva vozidla. Vzhledem k rychlému vývoji vozidel vznikají i nové možnosti úprav řídicích jednotek je rozhodující i rok výroby automobilu.

Nejstarší metoda výměnou chipu v řídicí jednotce vyžaduje její vyjmutí z vozidla. Důvodem je fakt, že chip je nepřepisovatelný a nelze v něm změnit data. *„V mnoha případech to bývá nutností, nicméně důvodem může být i větší pohodlí a možnost pracovat v čistějším prostředí u stolu. Složitost při vyjímání chipu je dána tím, zda je pouze osazen v patici nebo připájen.“* [2]

Modernější metoda, tzv. „flashování“, využívá standart OBD. U vozidel od roku 2000 je tento předpis pro tuto diagnostiku již povinný. Další omezení je, že vozidla musí být vybavena s paměťovými prvky typu flash (EEPROM, EPROM, PROM atd.) v řídicí jednotce motoru. Tento postup má samozřejmě mnoho výhod. Předně je to zkrácení doby úpravy a minimální riziko. Současně další výhodou je jednoduchost načtení výchozího datového souboru z řídicí jednotky do počítače přes diagnostickou zásuvku. Tento způsob využívají dnes i samotné automobilky při aktualizaci vad softwaru v nutných případech. [2]

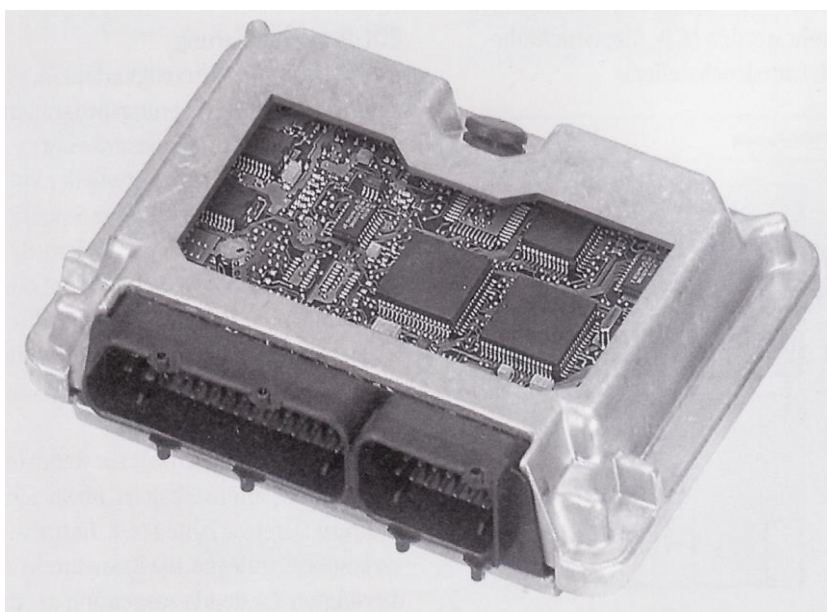
Tyto dvě metody jsou nejrozšířenější a u běžných vozidel i nejefektivnější. Jako další druh úprav se používá powerbox, který přímo neupravuje data v řídicí jednotce motoru a u speciálních vozidel lze praktikovat výměnu celého motormanagementu.

## 5.3. Struktura řídicí jednotky

Řídicí jednotka je tvořena deskou tištěného spoje s elektrickými díly, která se nachází v plastové nebo kovové skříni (pouzdrě). Přes více pólový konektor řídicí jednotky je zajištěn přívod elektrického proudu, signálů od senzorů a akčních členů včetně komunikace s ostatními řídicími jednotkami. Všechny výkonové koncové stupně je tak možné integrovat

přímo do řídicí jednotky na desku plošných spojů. Chlazení samotných koncových stupňů, které ovládají akční členy je zajištěno odvodem tepla přes obal řídicí jednotky.

Většina elektronických součástek je prováděna technologií, která je označována SMD (Surface Mounted Devices), tj. povrchově sestavené konstrukční díly. Tento koncept poskytuje mimořádně efektivní využití prostoru v obalech s nízkou hmotností. [38]



*Obrázek 26 - Příklad struktury řídicí jednotky ME Motronic [38]*

Rozvoj přinesla digitální technika se vstupem mikrokontrolérů. Celkové řízení motorů bylo implementováno do univerzálního polovodičového čipu, který bylo možné osadit na desku plošného spoje. U systémů řízených mikrokontroléry se vlastní logika řízení nachází ve volně programovatelné polovodičové paměti.

Aby bylo možné provádět komunikaci uvnitř samotné řídicí jednotky, musí periferní stavební prvky spolupracovat s mikrokontrolerem a musí s ním komunikovat. Veškerá komunikace se uskutečňuje přes datovou sběrnici. Mikrokontroler vypisuje pro adresovou sběrnici RAM konkrétní adresu, kde se má číst obsah paměti. Přes datovou sběrnici jsou pak příslušná data přenášena. Pro dřívější automobilové aplikace postačovala 8bitová topologie sběrnice. To znamenalo, že datová sběrnice obsahovala 8 linek, které dohromady mohly přenášet 256 hodnot současně. Pokud se využije 16bitová datová sběrnice, tak je možné oslovovat až 65 536 adres. Komplexní systémy dnes vyžadují 16 nebo dokonce 32bitové datové vedení. Aby se ušetřila spotřeba materiálu, zejména datových vodičů a pinů, může být datová a adresová sběrnice souhrnně v multiplexním systému tzn. adresy a data jsou odesílány stejnými linkami, ale jsou vzájemně posunuté s ohledem na čas. [38]

## 6. Měření produkce emisí

Samotné měření produkovaných emisí můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Při homologační testech se typově schvalují nové nebo nově registrované vozy. Druhá skupina měření jsou při emisních kontrolách. Jedná se o pravidelné emisní kontrola v rámci technické kontroly vozidla. Rozdíl v těchto základních typech měření je nejen v legislativně a statutárním zajištění, ale také v metodice měření, úrovni emisních limitů, potřebné měřicí technice a v konečném důsledku i finanční nákladnosti měření. [3]

### 6.1. Metody měření koncentrace emisních složek

#### 6.1.1. Měření s využitím principu absorpce infračerveného záření

Metoda absorpce infračerveného záření je označována NDIRA (Non Dispersive Infrared Analyser), nebo někdy jen NDIR. Využívá skutečnosti, že při průchodu elektromagnetického záření vrstvou plynu je část energie záření plynem pohlcena. Pro zjištění přítomnosti individuálního plynu v analyzované směsi platí, že závislost absorpčního koeficientu na vlnové délce záření je individuální vlastností plynů, které obsahují v molekule alespoň dva různé atomy. Je vhodný ke kontrole produkce HC a k měření koncentrace CO a CO<sub>2</sub>. Dnešní verze umožňují simultánní měření koncentrace různých složek. Při měření může nastat problém, jestliže se špičky amplitudy jednotlivých složek plynů překryjí. [11] [23]

#### 6.1.2. Měření s využitím principu absorpce ultrafialového záření

Realizováno optickým analyzátozem, který využívá schopnost absorpce ultrafialového záření se molekulami NO<sub>x</sub> a využívá se tak pro měření těchto koncentrací. Rozdíl dopadajících záření generuje napětí mezi detektory, které je lineárně úměrné funkci koncentrace měřené složky plynu. Jeho nevýhodou je použití plynové výbojky jako zdroje záření s dutou katodou, protože její náplň je během provozu přístroje spotřebována. [11]

#### 6.1.3. Měření s využitím chemické luminiscence

Je realizováno chemiluminiscenčním analyzátozem (CLA). Chemická luminiscence se využívá především pro stanovování množství emitovaných NO<sub>x</sub>. Využívá chemickou reakci, kdy se spolu se vzorkem spalin přivádí do reaktoru ozón (O<sub>3</sub>). Emise jsou snímány fotonásobičem, z něhož jdou výstupní signály. Ty se dále zpracovávají elektronicky. [11] [23]

#### 6.1.4. Měření s využitím principu změny elektrické vodivosti vodíkového plamene

Princip analyzátoru je nazýván plamenoionizační (FID – Flame Ionization Detector). Založen na principu nárustu proudu iontů v plamenu, které jsou snímány dvojicí elektrod v závislosti na průtočném množství uhlíku. Metoda je tak vhodná pro měření koncentrace emisí HC, ale je také částečně citlivá i na množství O<sub>2</sub>. [11]

#### 6.1.5. Analyzátor na principu magnetických vlastností látek

Magnetické metoda je založena na skutečnosti, že kyslík má z plynů nejvyšší permeabilitu, a proto je tato metoda využívána pro jeho měření. Hlavní součástí těchto analyzátorů je permanentní magnet nebo elektromagnet. Ten vtahuje látky s vysokou permeabilitou do svého magnetického pole. Využívá se tudíž hlavně ke stanovování koncentrace kyslíku ve vzorku. [11] [23]

#### 6.1.6. Opacimetrie

Princip opacimetrie spočívá v prosvícení výfukových plynů viditelným světlem. Měření je podíl světla dopadajícího a vyzářeného zdrojem. Nutno konstrukčně se vypořádat s nebezpečím zanášením povrchu zdroje a čidla povlakem částic, jehož opacita by zkreslila údaj přístroje. Při provozu přístroje je optická dráha většinou souosá se vzduchovou trubicí. Přívod výfukových plynů je uzavřen na vstupu a jen během vlastního měření se překlápí optická dráha do osy měřicí trubice, do které jsou současně puštěny testované emise. Po odečtu hodnoty se držák se žárovkou a čidlem překlápí do polohy, kde intenzivní omývání čistým vzduchem udržuje povrch rozhodujících prvků přístroje bez úsad (a přísun výfukových plynů se opět uzavře). [11] [23]

#### 6.1.7. Přímé měření koncentrace

Gravimetrické měření obsahu pevných částic spočívá ve zvážení čistého filtračního elementu, který je ze skelných vláken potažených teflonem. Jeho hmotnost se zjistí přesně na laboratorní váze a následně se instaluje do držáku a po celou dobu měření jím prochází vzorek spalin. Po ukončení měření je filtrační element opět zvážen. Hmotnostní koncentrace částic se stanoví jako podíl hmotnosti zachycených částí a objemu vzduchu proteklého elementem. [11] [23]

## 7. Cíl práce

Cílem diplomové práce na téma „Analýza vybraných parametrů ovlivňující množství emisí spalovacího motoru“ je popis konstrukce a fungování spalovacího motoru, produkce emisí a jejich měření, popis měřících metod, vývoj a historie legislativních norem.

Hlavním cílem práce je analýza naměřených hodnot a zjištění vlivu úpravy na množství produkovaných emisí.



## 8. Experimentální měření

### 8.1. Testovací vozidlo

Jako testovací vozidlo bylo vybráno Volkswagen Bora s motorem 1.9 TDi o výkonu 74kW se 6ti stupňovou manuální převodovkou.



Obrázek 27 – Testovací vozidlo na válcové zkušebně

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Značka                         | Volkswagen                                 |
| Obchodní označení              | Bora                                       |
| Datum výroby                   | 27.2.2003                                  |
| Motor                          | 1.9 TDi                                    |
| Typ vstřikování                | Sdružená vstřikovací jednotka (Pumpe Düse) |
| Emisní norma                   | Euro 3, D4                                 |
| Max. výkon                     | 74kW při 4000 ot./min.                     |
| Max. točivý moment             | 240 Nm při 1800 ot./min.                   |
| Převodovka                     | 6ti stupňová manuální DRW                  |
| Korigovaný součinitel absorpce | 0,8 m <sup>-1</sup>                        |

|                        |               |
|------------------------|---------------|
| CO <sub>2</sub> emise  | 143 g/km      |
| Kompresní poměr        | 19            |
| Zdvih                  | 95,5 mm       |
| Vrtání                 | 79,5 mm       |
| Maximální rychlost     | 188 km/h      |
| Spotřeba - město       | 6,8 l / 100km |
| Spotřeba - mimo město  | 4,4 l / 100km |
| Spotřeba - kombinovaná | 5,3 l / 100km |

*Tabulka 7 - Technické parametry Volkswagen Bora 1.9 TDi*

## 8.2. Přístrojové zařízení

Veškerá měření byla uskutečněna v prostorách KVPD TF ČZU s přístrojovým a softwarovým vybavením katedry, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 8.2.1. Válcová zkušebna Technické fakulty ČZU v Praze

Tato válcová zkušebna určena ke zkoušení vozidel do 3,5t s jednou hnanou nápravou se skládá ze dvou řetězem propojených dvojic válců s protiskluzovým povrchem, elektromagnetické lamelové spojky, dvou elektromotorů a frekvenčního měniče. Na jedné straně válců se nacházejí připojitelné setrvačníky, které mají za úkol simulovat setrvačnou sílu vozidla. Na druhé straně je na jeden válec připojen stejnosměrný elektromotor o maximálním výkonu 56 kW, který simuluje odpor vzduchu. Tímto motorem mohou být válce poháněny, např. při zjišťování pasivních odporů vozidla. Ke druhému válci je připojena vířivá brzda, která má maximální výkon 125 kW. S její pomocí se provádí statická měření výkonu na obvodu hnacích kol vozidla. Každá dvojice válců je opatřena optickým snímačem napojeným na sběrač dat, který poskytuje po vyhodnocení okamžité hodnoty obvodových rychlostí a zrychlení.

### 8.2.2. Emisní analyzátor VMK

Emisní analyzátor VMK slouží k detekci plynných složek emisí, konkrétně CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO a O<sub>2</sub>. Analyzátor pracuje na principu nedisperzního infračerveného analyzátoru (NIDR), jehož princip byl popsán výše. Vzorkovací frekvence přístroje je 1 Hz. Lze ho použít pro kontinuální měření v laboratorních podmínkách, tak i pro měření v provozu.

Na zadní straně analyzátoru je umístěn filtr zachytávající nežádoucí složky, částice a kondenzát, přes který do analyzátoru proudí vzorek výfukových plynů. Kondenzát je spolu s částí výfukových plynů spodní části filtru odčerpáván. Před každým měření je analyzátoru

nutné nastavit nulovou hladinu koncentrace plynů. Tento proces trvá pár minut a provádí se pomocí tzv. nulovacího plynu, kterým může být například vzduch nebo dusík.

### 8.2.3. Velikostní klasifikátor částic EEPS 3090

Velikostní klasifikátor částic EEPS 3090 detekuje pevné částice ve výfukových spalinách. Funguje na principu detekce částic za využití magnetických vlastností detekovaných částic. Tyto částice vstupují do analyzačního přístroje. Nejdříve jsou nabity mají svůj vlastní elektrostatický náboj a reagují s elektrostatickým polem přístroje v detekční komoře. Zde jsou elektrodami shodného náboje odpuzovány k obvodu detekční komory k elektrometrum, kde jsou detekovány. Velikost interakce je závislá na velikosti nabité částice. Každá částice s určitou velikostí má náboj o určité velikosti. Je tak možné zjistit počet emitovaných částic a jejich velikostní spektrum.

Umožňuje měřit velikost částic od 5,6 do 560 nm při 10 Hz a umožňuje vizualizovat dynamické chování emisí částic, např. při testovacích cyklech, při kterých se měří ze studeného startu, nebo regenerace filtru pevných částic (DPF), to vyžaduje zařízení na měření velikosti částic, které dokáže rychle reagovat.



Obrázek 28 - Měřící zařízení EEPS

#### 8.2.4. Ředička vzduchu

K dosažení výsledků měření bez šumů, které jsou způsobeny nedostatkem plynu nasávaného do velikostního klasifikátoru částic, je nutné testovaný vzorek zředit a doplnit do něj chybějící množství vzduchu. Vzorek se míchá podle předem nastaveného objemového poměru. Nasávaný ředící vzduch je proveden přes HEPA filtr. Pro toto konkrétní měření byla použita sestava tvořená řídicím modulem Testo MD19-3E, vyhřívacím členem TSI Rotating Disk Thermodiluter 379020A a HEPA filtrem TSI HEPA Capsule Filter #1602051 s průtokoměrem TSI 4100 Series.

#### 8.2.5. Ventilátor FILCAR AL-1500/C

Pro zajištění chlazení vozidla na válcové zkušebně během měření, bylo nutné zajistit funkčnost náporového chlazení vozidla externím ventilátorem. K tomu posloužil radiální odsávací ventilátor FILCAR AL – 1500/C. Tento ventilátor je synchronizovaný se softwarem ControlWeb.

### 8.3. Softwarové vybavení

#### 8.3.1. Diagnostický program SPVG

Česká společnost SPVG Systems s.r.o. se zabývá vývojem specializovaného diagnostického nástroje, zaměřeného na vozy značek Volkswagen, Škoda, Audi a Seat. Tento nástroj pod značkou SPVG (dříve SuperVAG) kromě diagnostických funkcí umožňuje také práci s klíči, čtení tajného čísla PIN, učení klíčů a dálkových ovladačů, situace všech ztracených klíčů, test signálu dálkových ovladačů, zobrazení stavu imobilizéru, čtení a zápis sériové paměti EEPROM, práce s tachometry, reaktivace airbagu, klonování řídicích jednotek, čtení a zápis paměti FLASH EEPROM a úprava souborů paměti FLASH EEPROM.



*Obrázek 29 – Diagnostická sada SPVG [39]*

### 8.3.2. ControlWEB

Prostřednictvím tohoto programu je ovládána válcová zkušebna a externí chladicí ventilátor. V programovacím prostředí tohoto programu vytvořil pověřený zaměstnanec KVPD rychlostní profily jízdních cyklů.

#### 8.4. Návrh a ověření měření

Pokusné měření produkce emisí spalovacího motoru na válcové zkušebně bylo realizováno s výše popsaným testovacím vozidlem a s využitím výše vyjmenovaného vybavení. Veškerá měření probíhaly 16.2.2023. K eliminaci vlivu teplot na výsledky měření byla vždy sledována teplota vzduchu v hale KVPD, která byla 20 °C. Z toho samého důvodu byla sledována teplota motoru prostřednictvím teploty chladicí kapaliny. Na začátku každého měření se její teplota pohybovala v rozmezí 85–90 °C.

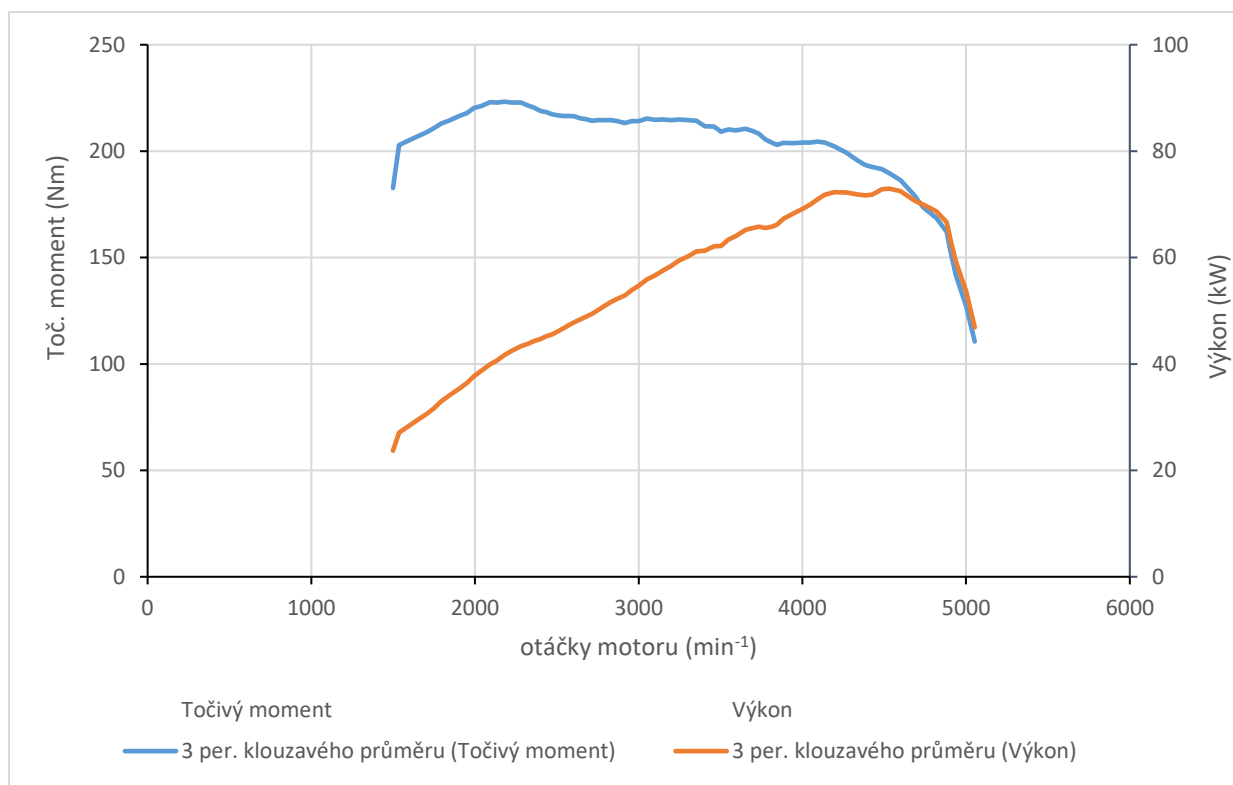
Z důvodu eliminace rizika kontaminace motorové nafty nečistotami byla bezprostředně před zahájením měření na vozidle provedena výměna motorového oleje, filtru motorového oleje, filtru vzduchu a filtru paliva. Před přípravou samotného měření proběhla inspekce vozidla. Ta spočívala především v kontrole tlaku pneumatik na hodnotu předepsanou výrobcem a kontrole zaznamenaných závad v paměti OBD. Dále byla provedena zkouška funkčnosti všech měřících přístrojů. Vozidlo bylo proti vyjetí z válců zkušebny jištěno dvěma vázacími kurtami vpředu a dvěma vzadu. Nosnost každé použité kurty byla 5 t.

Měření výkonu motoru probíhalo na válcové zkušebně KVPD. Jednalo se o statické měření výkonu, kdy byl motor vozidla při zařazeném čtvrtém rychlostním stupni a plném sešlápnutí pedálu akcelérátoru vytočen do maximálních otáček. Po ustálení otáček byl postupně navyšován brzdící moment vířivého dynamometru. S rostoucím brzdícím výkonem otáčky postupně klesaly až na hodnotu volnoběžných otáček. Program ControlWEB zaznamenával otáčky válců zkušebny a brzdící moment. Data v řídicí jednotce byly upraveny pomocí programu SPVG.

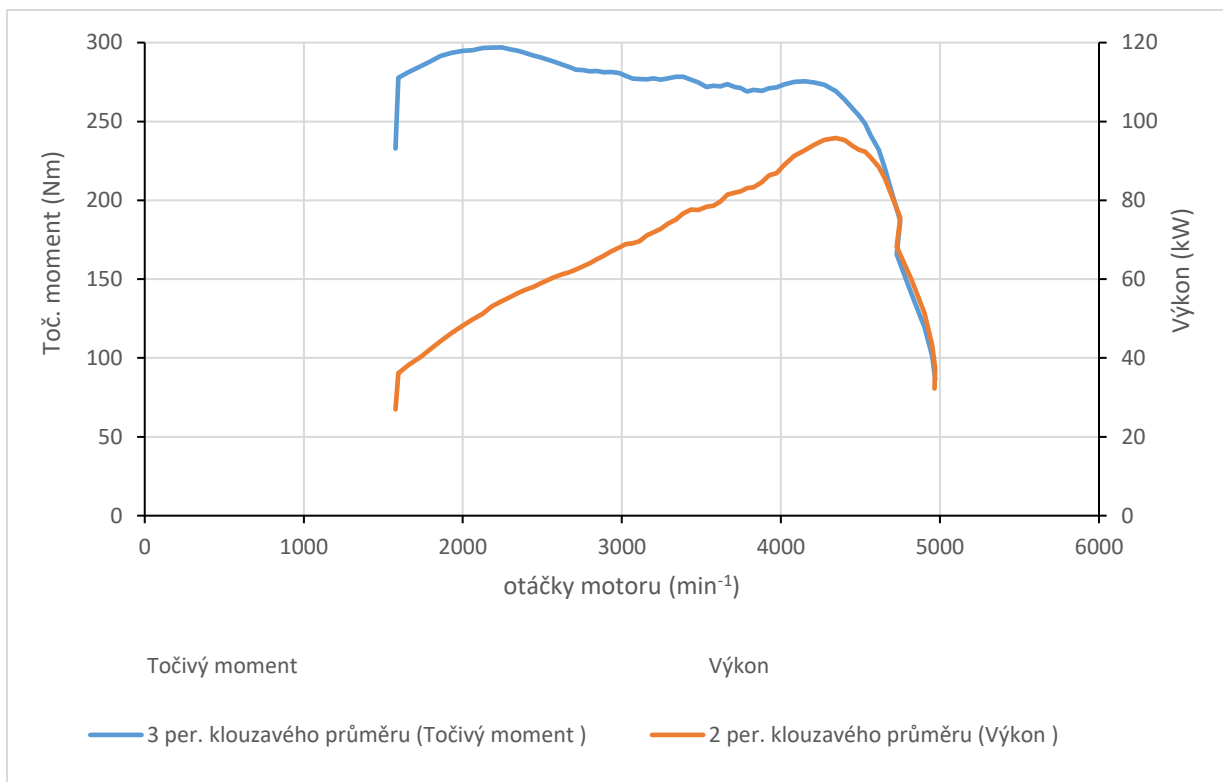
Válcová zkušebna je ovládána prostřednictvím počítače s programem ControlWEB. Do výfuku vozidla byly vloženy sondy měřících přístrojů VMK a EEPS, kdy v případě EEPS byl před vstupem do analyzátoru sledovaný vzorek ještě upravován za pomoci ředičky. Veškeré odpadní výfukové plyny byly z prostoru měřícího stanoviště odváděny odsávacím systémem. Údaje o okamžitých hodnotách otáček motoru, rychlosti jízdy byly zjišťovány z OBD jednotky vozidla, ke které byl prostřednictvím datového kabelu s OBD konektorem připojen notebook s programem SPVG. Měření produkce emisí probíhalo během jízdního cyklu WLTP třídy 3 bylo pokaždé třikrát opakováno. Výsledná data produkce emisí jsou tak průměrnou hodnotou ze tří odjetých cyklů. Celkem tedy bylo odjeto šest měřících cyklů WLTP. Plynné emisní složky byly zjišťovány pomocí emisního analyzátoru. Získaná data byla následně zpracována do vnější otáčkové charakteristiky motoru v programu MS Excel.

## 9. Výsledky měření

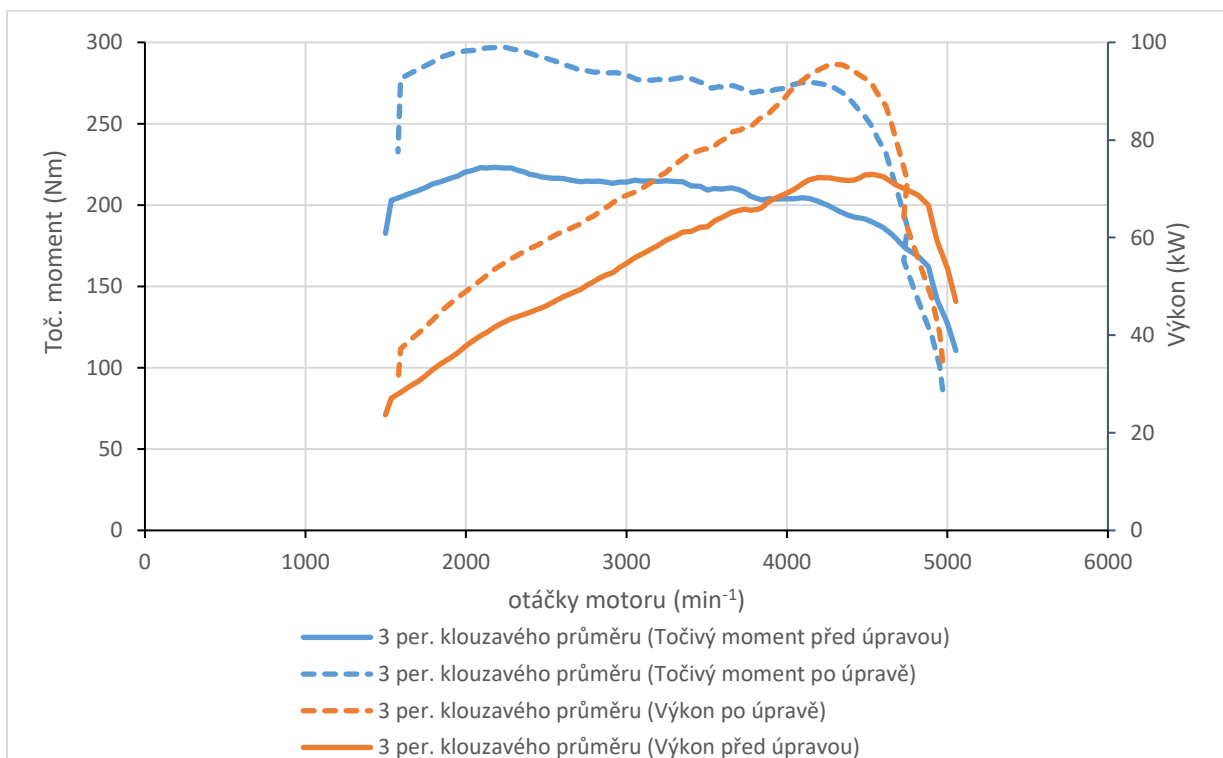
Experimentálním měřením se zjistilo, že s originálním softwarem je výkon 73,4 kW při 4599 ot./min. a točivý moment 224,3 Nm při 2180 ot./min. S upraveným softwarem jsme dosáhli výkonu 96kW při 4402 ot./min, což je nárůst u výkonu o více než 30 % oproti parametrům udávanými výrobcem. Po úpravě dosáhl točivý moment hodnoty až 296 Nm při 2348 ot/min, to je tedy nárůst o téměř 32%, který není rozhodně nezanedbatelný a v provozu jasně znatelný. Úpravou se povedlo křivku krouticího momentu částečně zlepšit oproti původní, výkonová křivka zůstala téměř stejná. Z výkonového hlediska úpravu hodnotím kladně, je zde vidět, že tyto úpravy jsou vhodné pro přeplňované vznětové spalovací motory s přímým vstřikováním paliva a zároveň velmi oblíbené.



Graf 1 - Výkonové charakteristiky před úpravou

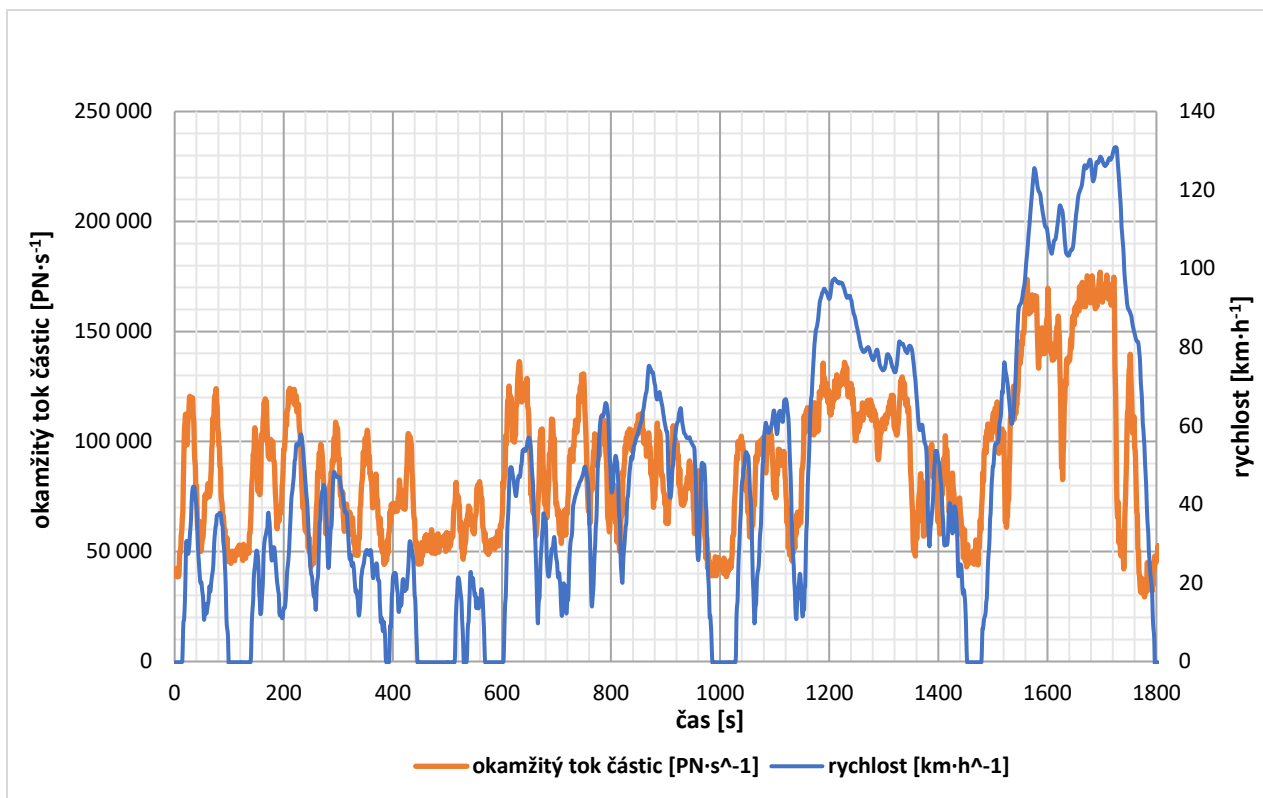


Graf 2 - Výkonové charakteristiky po úpravě

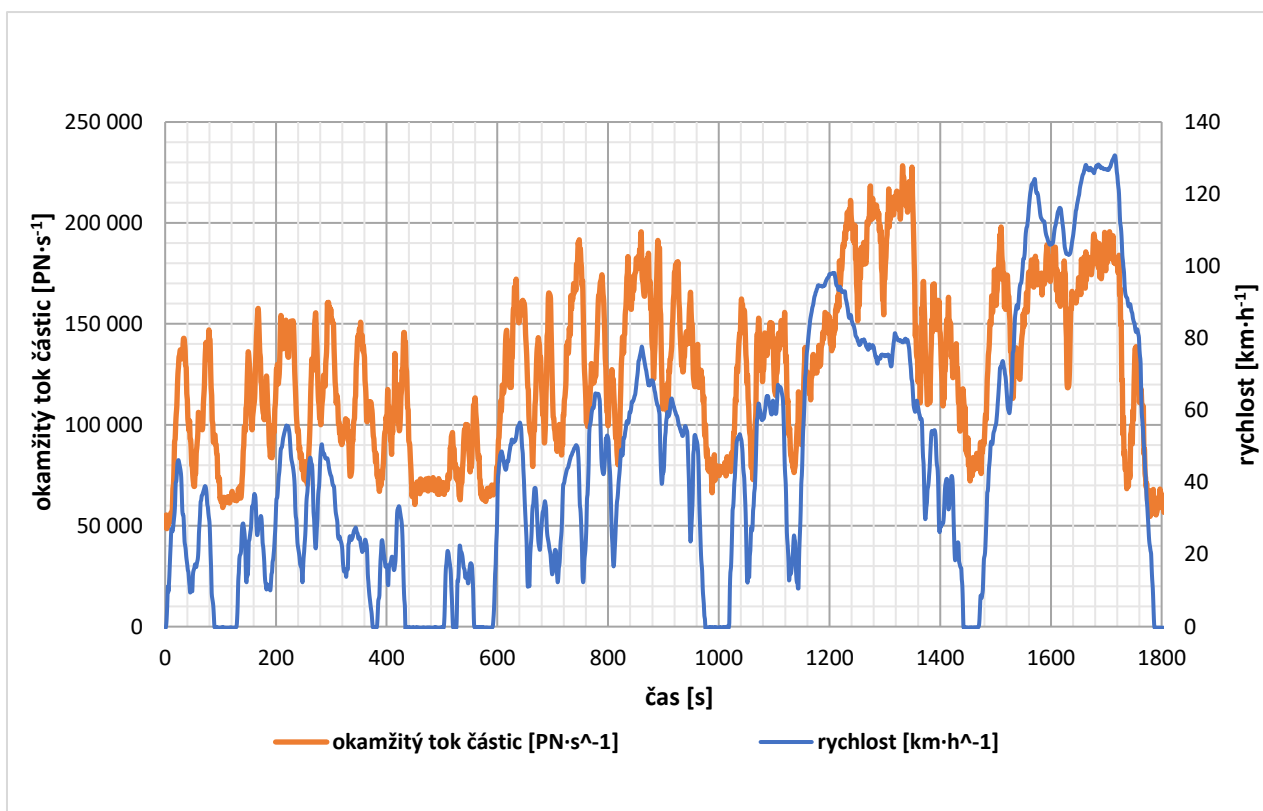


Graf 3 - Porovnání výkonových charakteristik

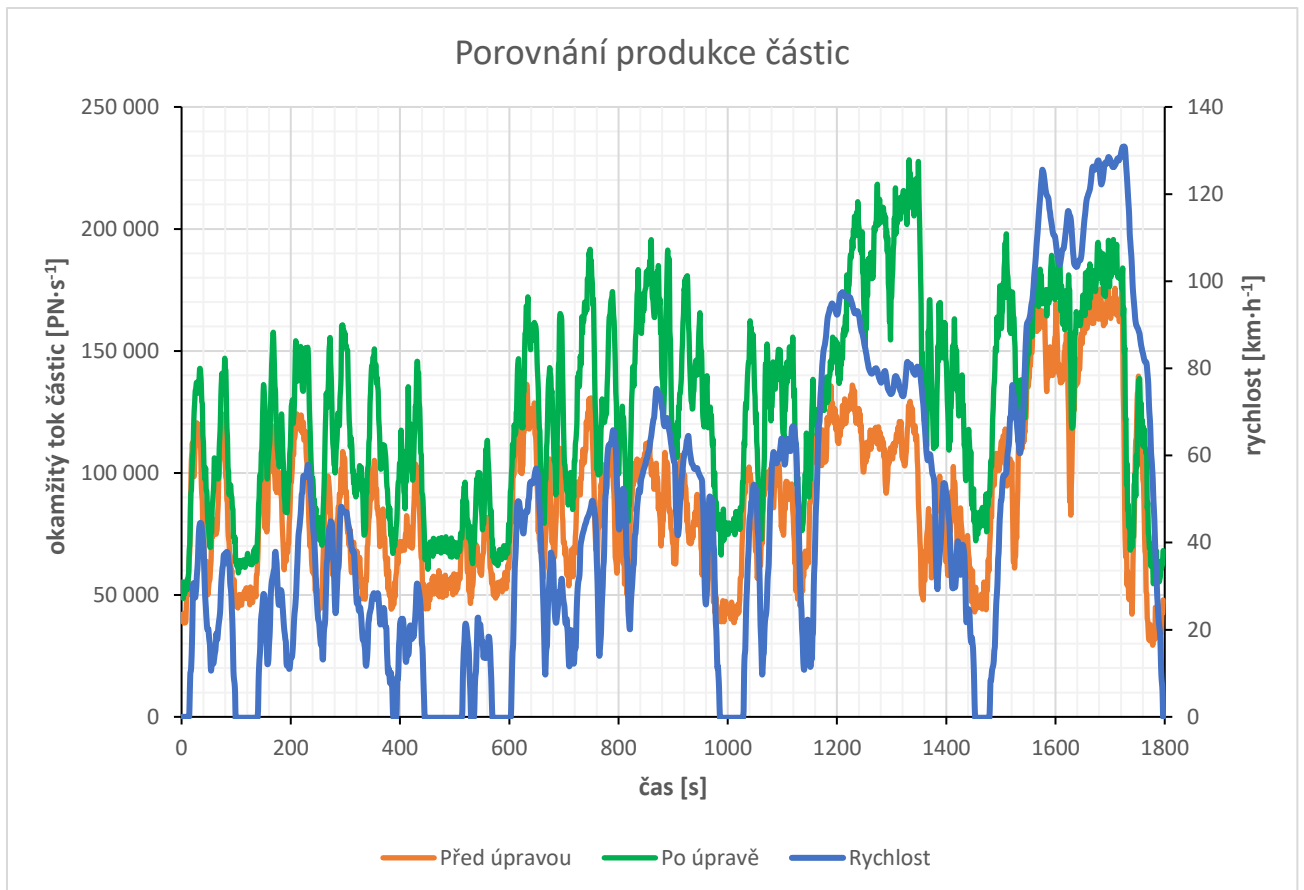




Graf 4 - Produkce pevných částic před úpravou



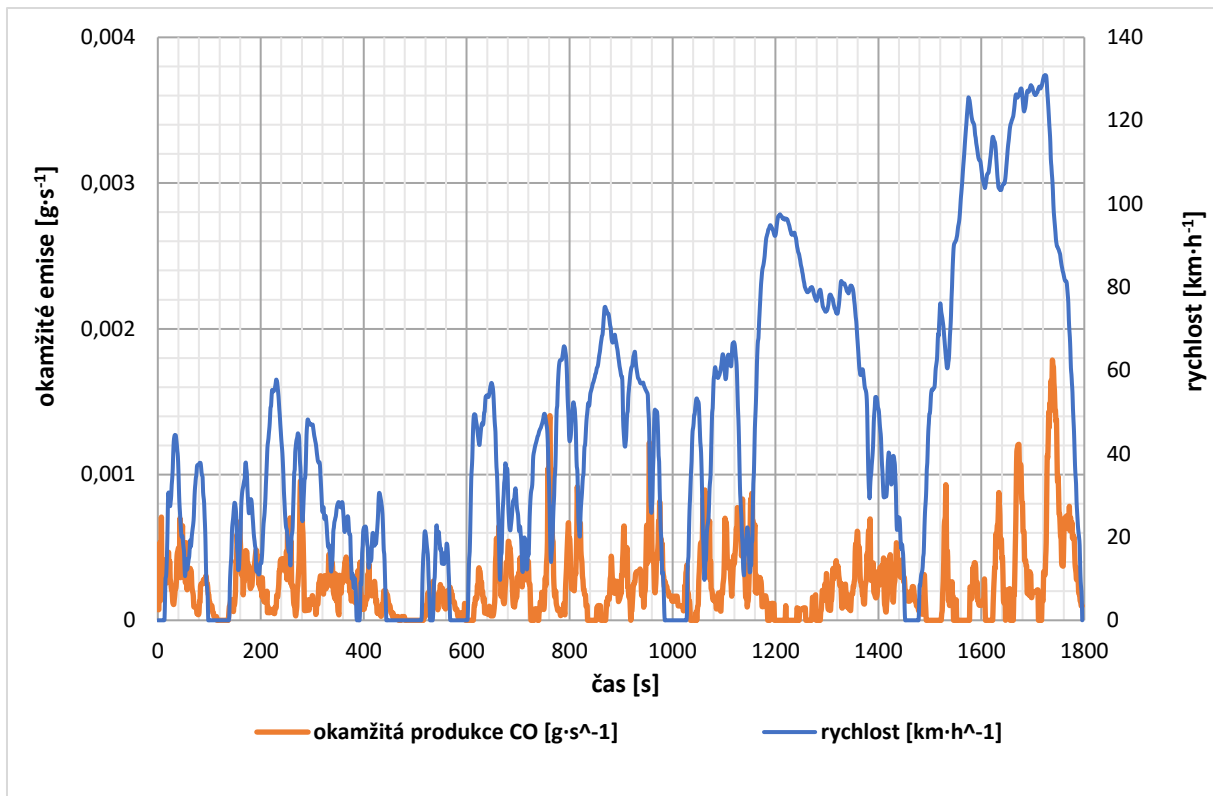
Graf 5 - Produkce pevných částic po úpravě



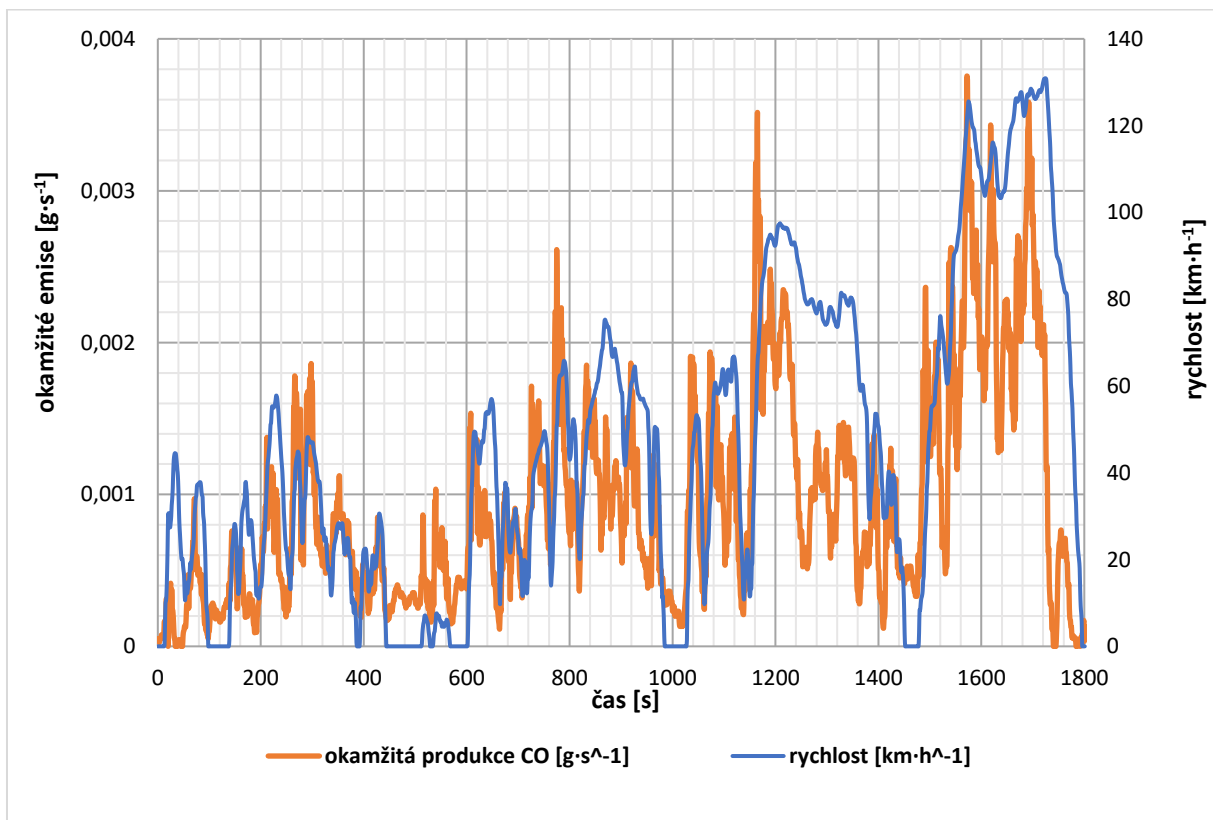
Graf 6 - Porovnání produkce pevných částic

V Grafu 6 můžeme vidět, že u 23,194km dlouhého cyklu po úpravě vzrostl celkový počet naměřených částic o více jak 42% na 228 301 283, čili 9 843 118,19 částic na km. Před úpravou byla celková hodnota naměřených částic 160 338 933, tedy 6 912 948,75 částic na kilometr. Tak vysoká změna produkce může být zapříčiněna velkým množstvím vstříknutého paliva, pro který je nedostatek kyslíku ke spálení.

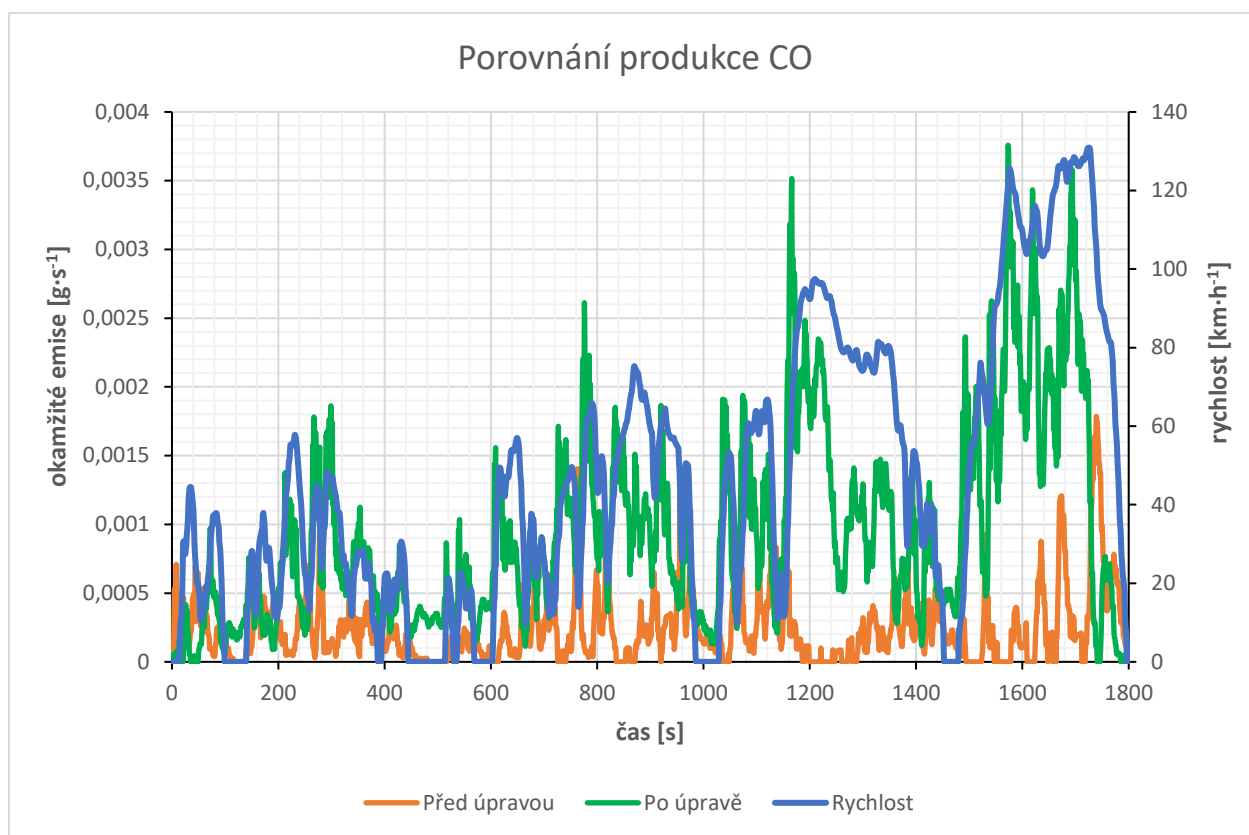
Na následujících grafech jsou zobrazeny průběhy objemových koncentrací jednotlivých složek emisí výfukových plynů v závislosti na časovém průběhu jízdního cyklu. Jak již bylo popsáno, tak k reálnější simulaci běžného provozu je grafické porovnání provedeno při jízdním cyklu WLTC.



Graf 7 - Produkce CO před úpravou

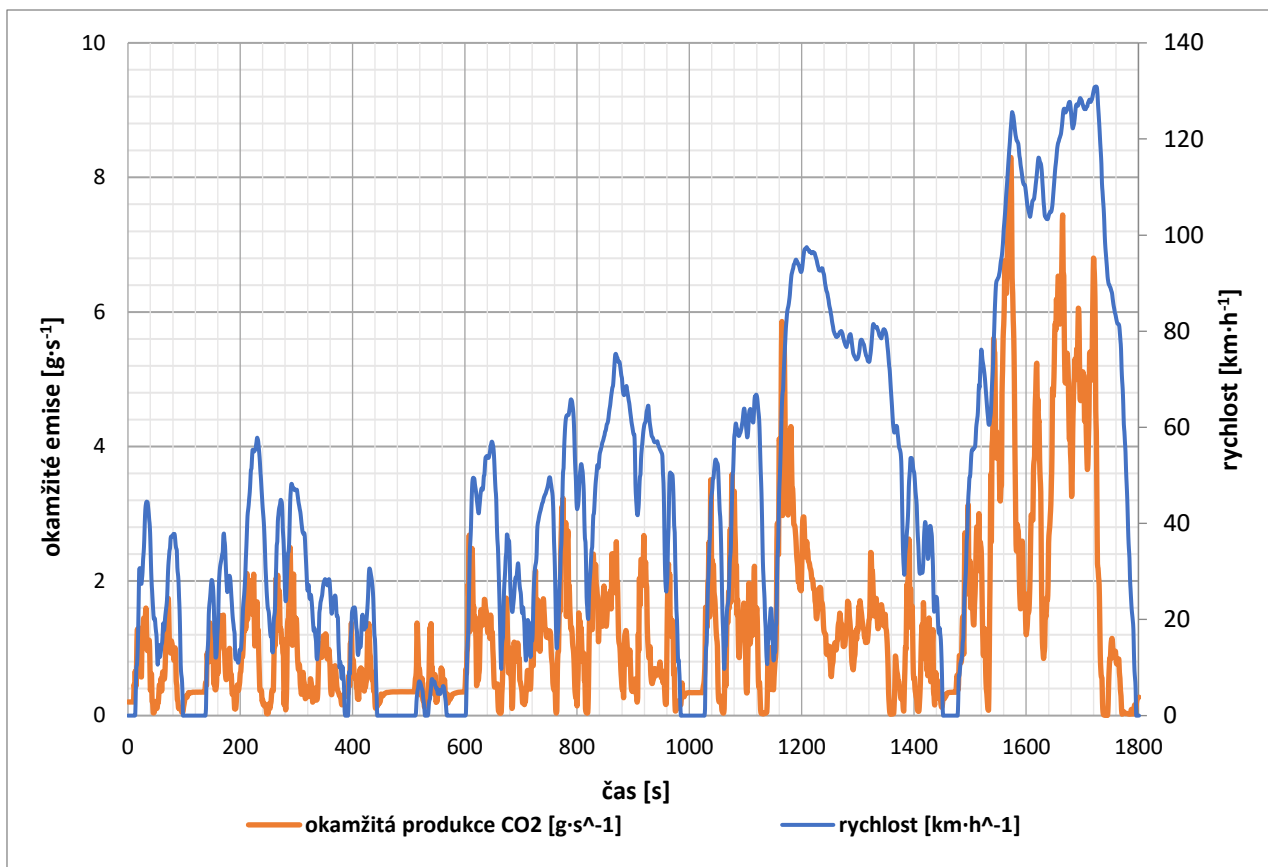


Graf 8 - Produkce CO po úpravě

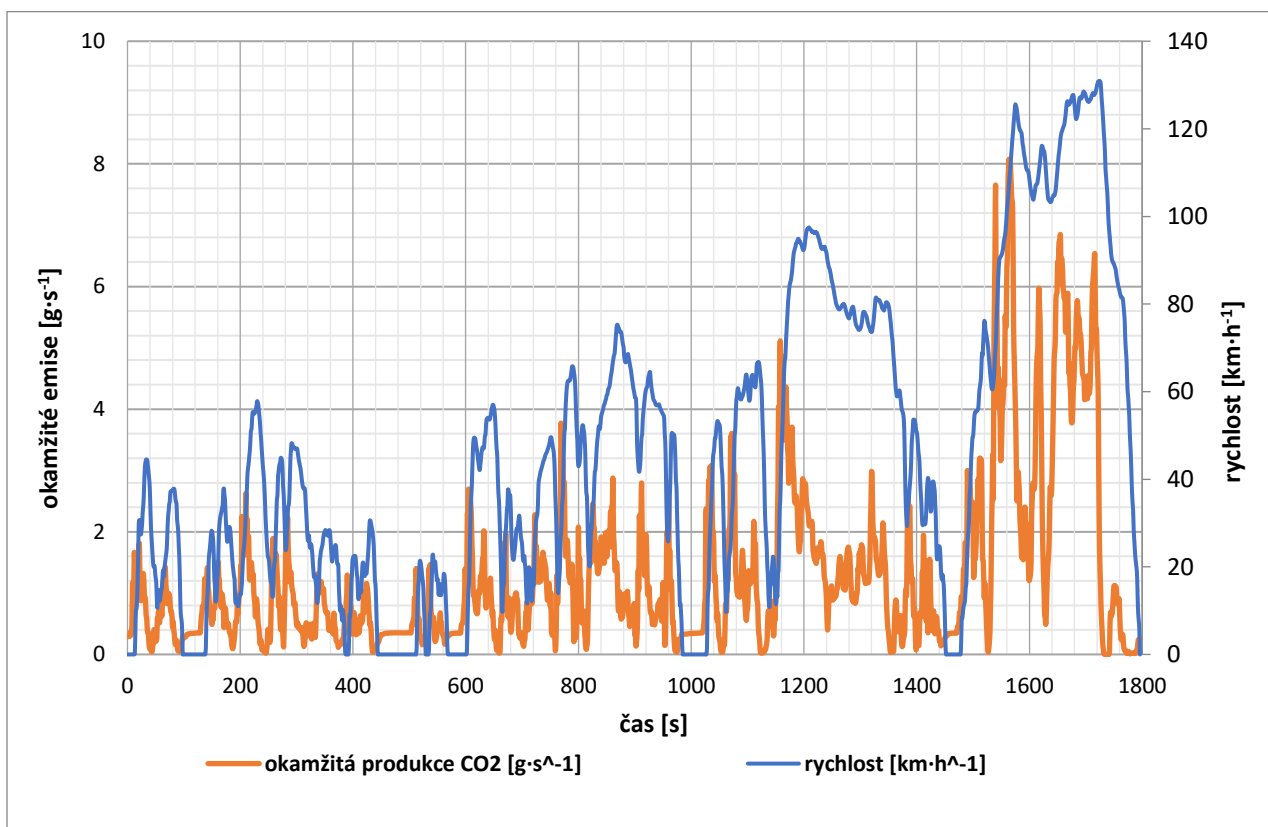


Graf 9 - Porovnání produkce CO

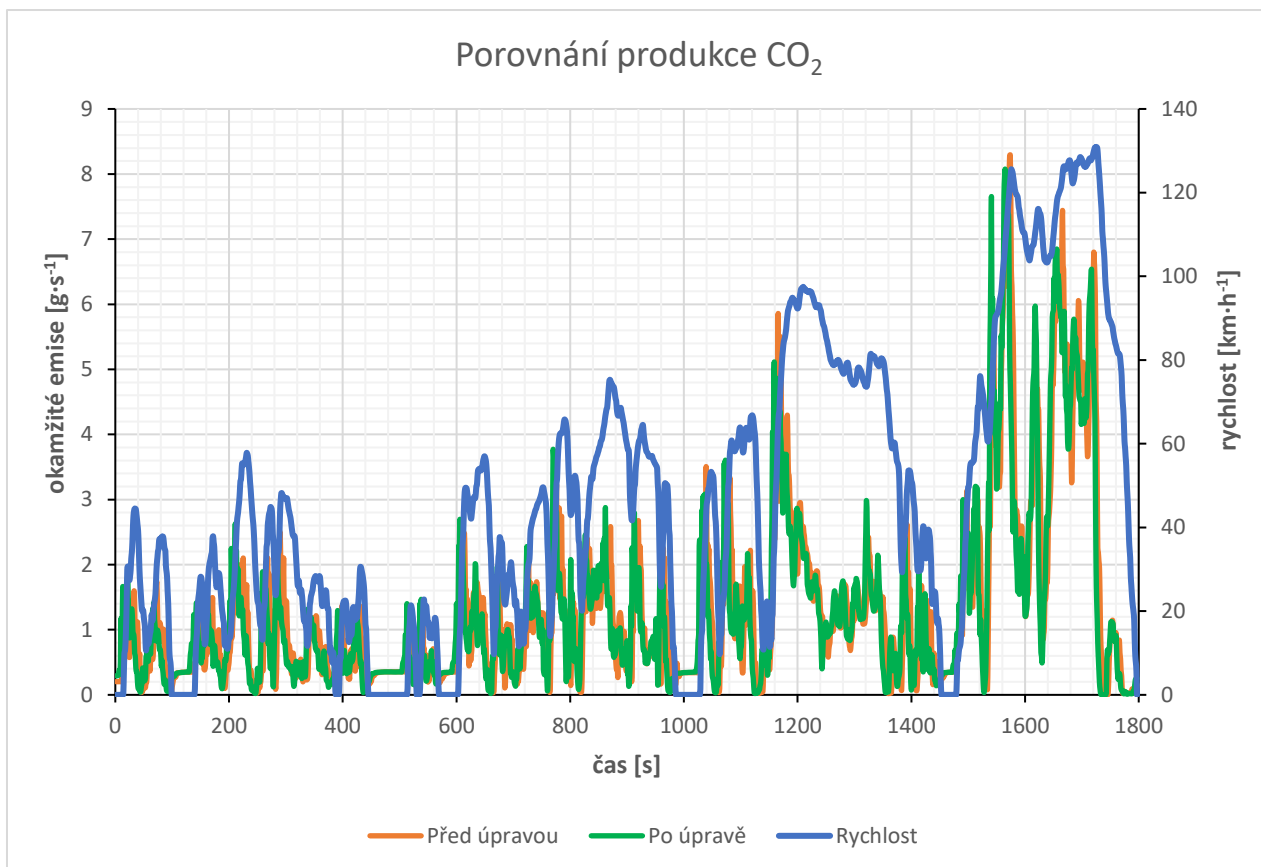
Na grafech jsou zobrazeny průběhy koncentrací oxidu uhelnatého a následně i srovnání v závislosti na čase zkušební cyklu WLTC. Před úpravou vozidlo dosahovalo průměrné produkce CO 0,01874 g/km. Po úpravě tato produkce vzrostla téměř čtyřikrát až na hodnotu 0,07325 g/km. Je zde patrné, že vyšších hodnot koncentrací oxidu uhelnatého dosahovalo vozidlo po úpravě. Nejvyšších koncentrací vozidlo dosahovalo v oblasti se středním a velmi vysokým zatížením. Důvodem by mohlo být spalování bohaté směsi zvláště v oblasti s velmi vysokým zatížením. Spalováním velmi bohaté směsi při nedostatku kyslíku dochází k nedokonalé oxidaci oxidu uhelnatého na oxid uhličitý.



Graf 10 - Produkce CO<sub>2</sub> před úpravou

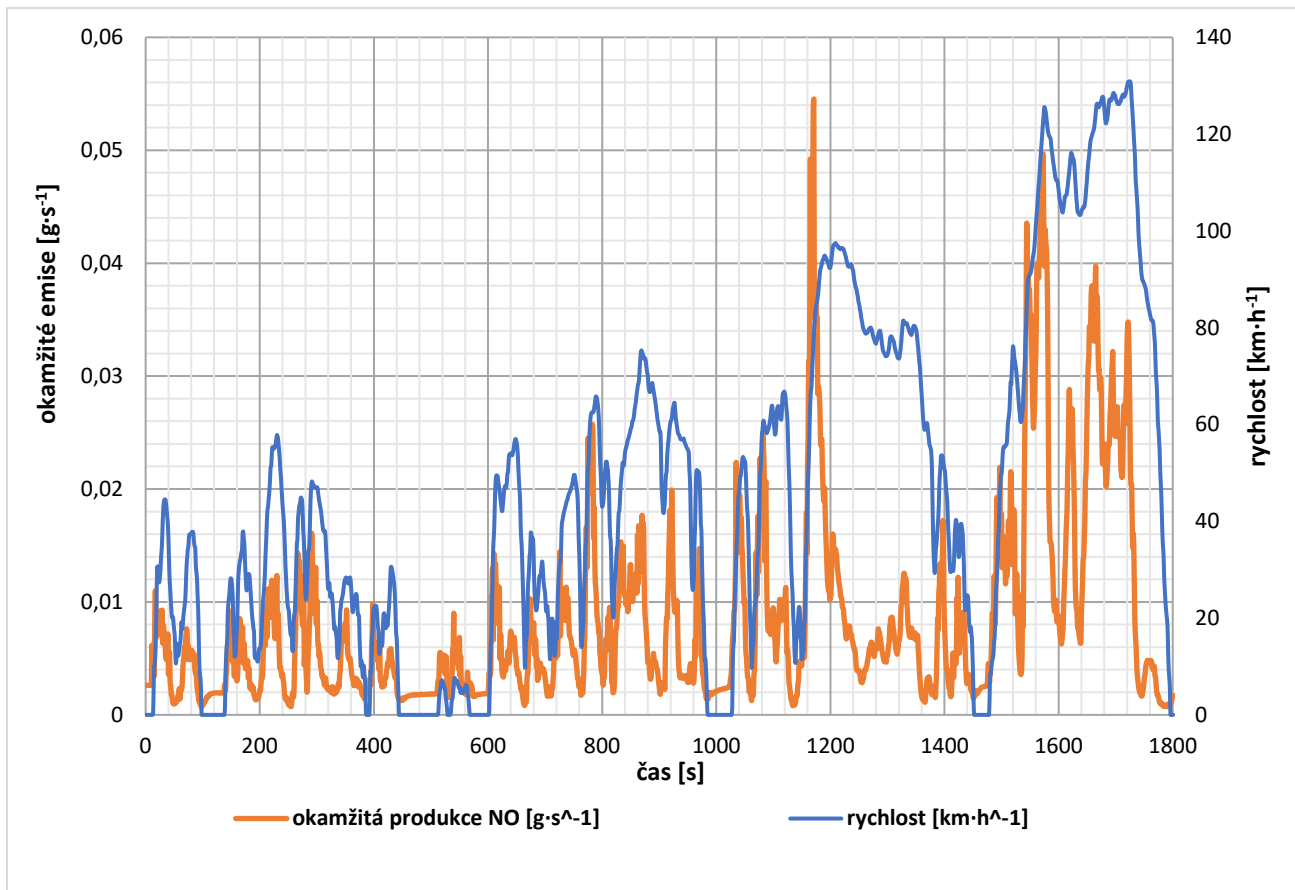


Graf 11 - Produkce CO<sub>2</sub> po úpravě

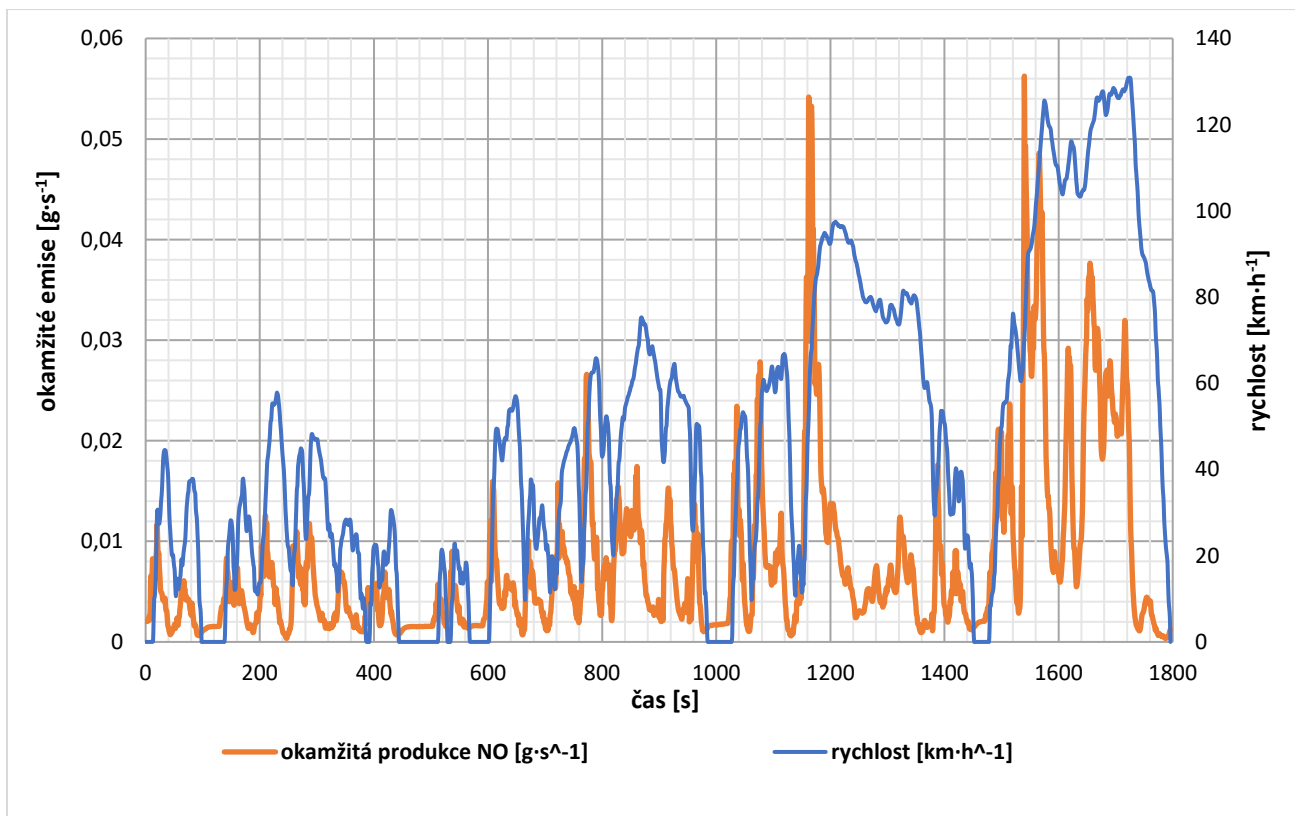


Graf 12 - Porovnání produkce CO<sub>2</sub>

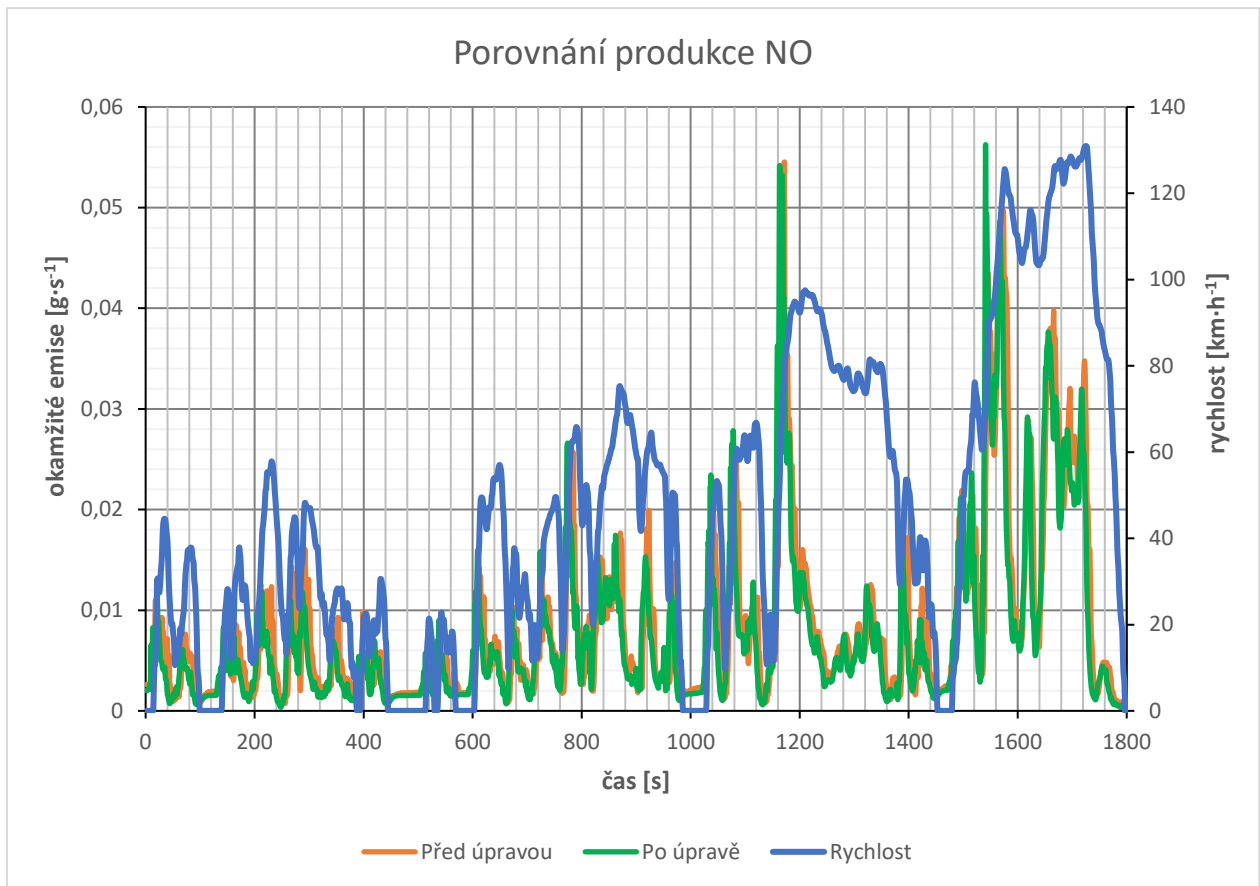
Průběhy koncentrací oxidu uhličitého před a po úpravě a následné porovnání, které zobrazují předcházející grafy ukazují, že úprava nemá na složku CO<sub>2</sub> téměř žádný vliv. Při porovnání výrobce, který udával maximální hodnotu emisí CO<sub>2</sub> 143 g/km, tak změřená průměrná hodnota před úpravou činila 101,9 g/km a po úpravě 100,8 g/km.



Graf 13 - Produkce NO před úpravou



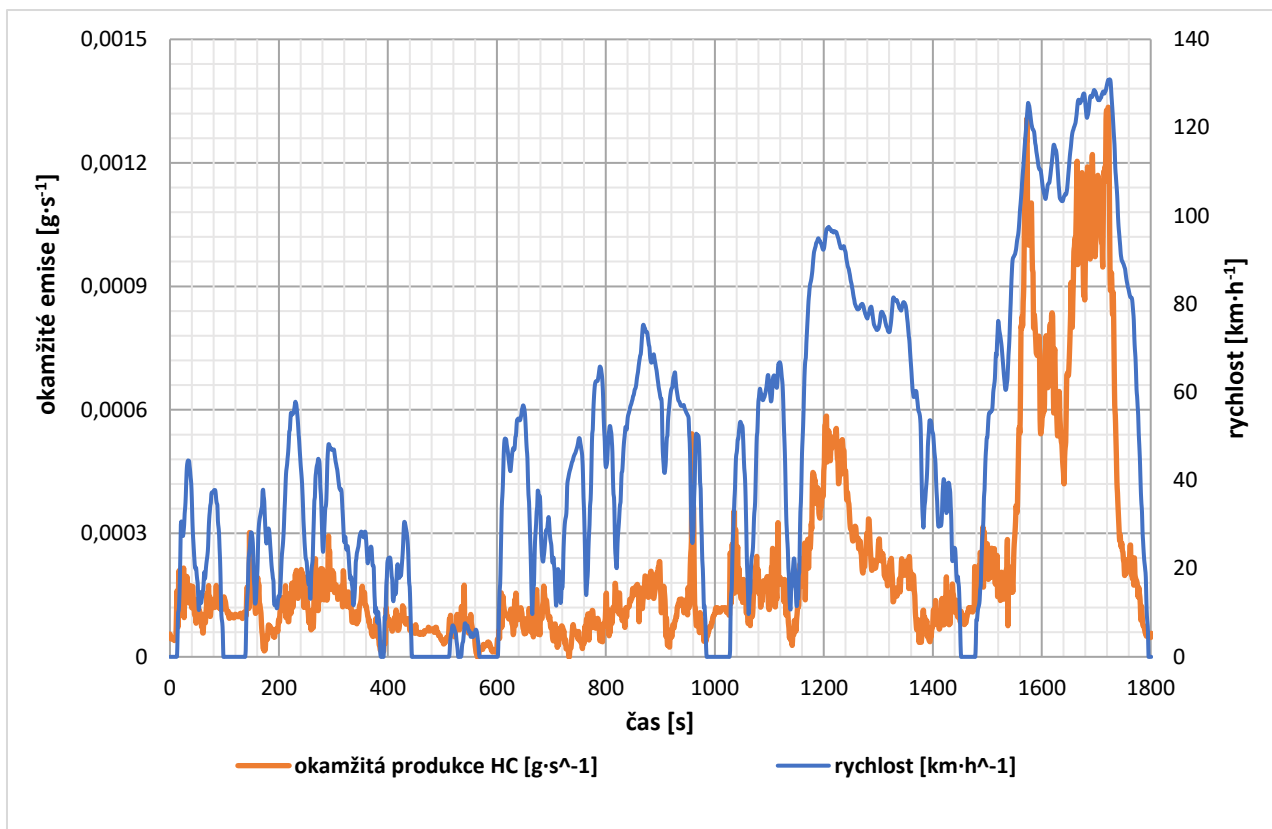
Graf 14 - Produkce NO po úpravě



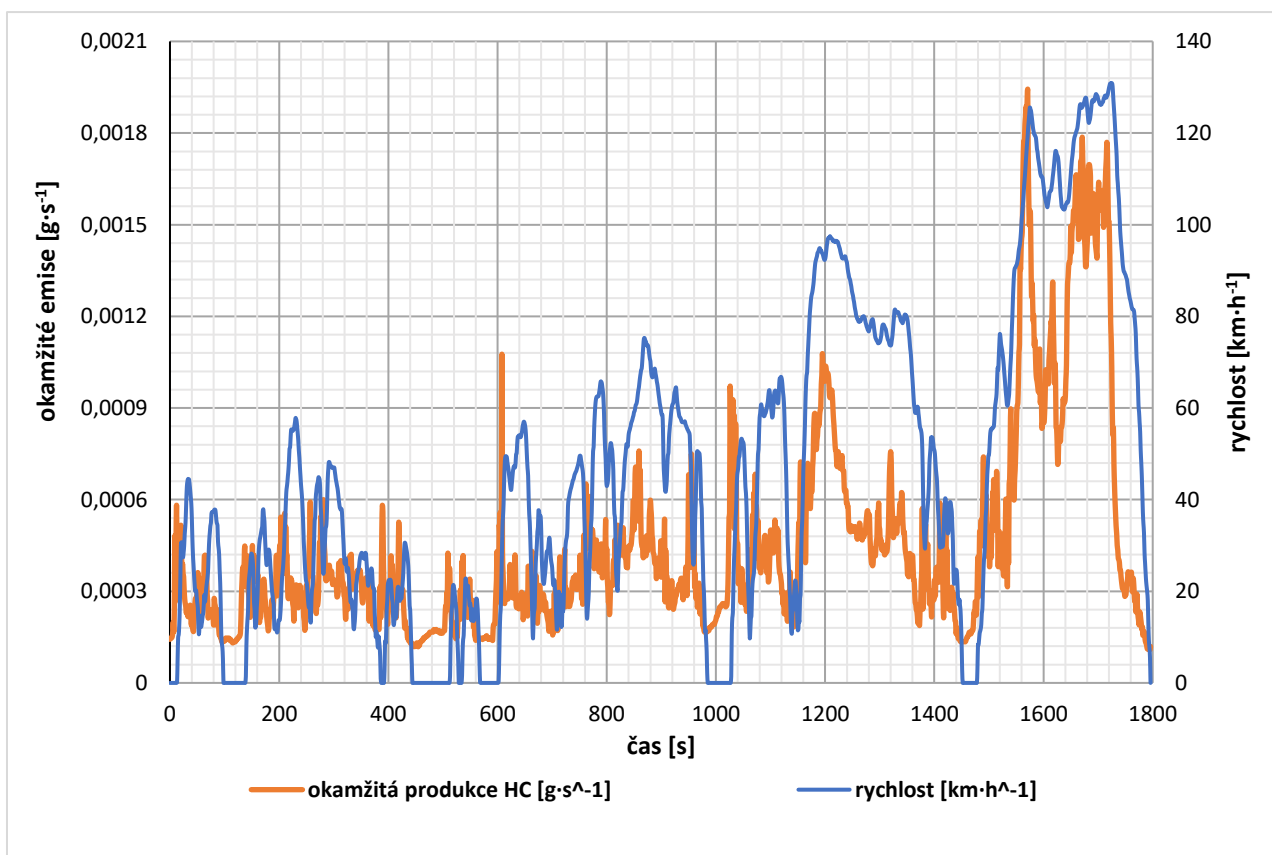
Graf 15 - Porovnání produkce NO

Průběhy koncentrací oxidu dusnatého před a po úpravě a následné porovnání, které zobrazují předcházející grafy ukazují, že úprava výkonu nemá na složku NO téměř žádný vliv. Špičky s vyšší koncentrací NO, které jsou oblastech s vyšším zatížením motoru jak před úpravou, tak i po úpravě lze spojit s vysokými spalovacími teplotami.

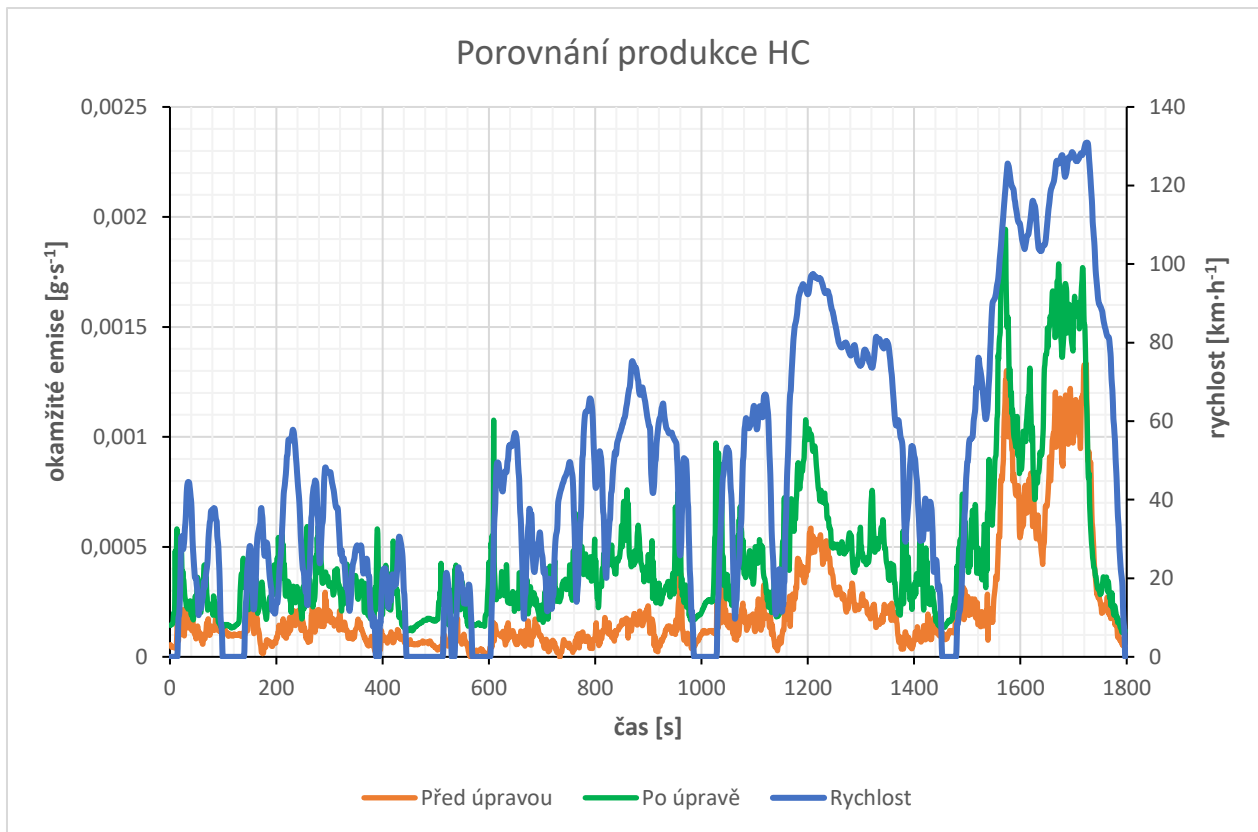




Graf 16 - Produkce HC před úpravou



Graf 17 - Produkce HC po úpravě



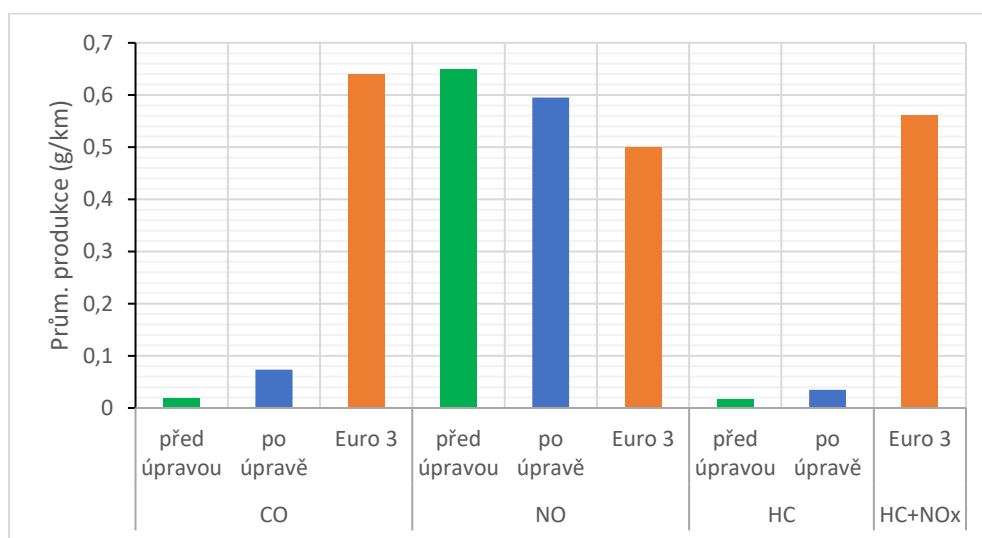
Graf 18 - Porovnání produkce HC

Graf znázorňuje porovnání průběhu koncentrací nespálených uhlovodíků před a po úpravě v závislosti na čase. Průměrná hodnota produkce HC před úpravou byla naměřena  $0,01665 \text{ g/km}$ . Po úpravě se tato průměrná hodnota zvýšila téměř o 210% na  $0,03496 \text{ g/km}$ . Ve nízkém zatížení motoru jsou tyto koncentrace porovnatelné. Ve středním a vyšším zatížení však po úpravě pozorujeme nárůst koncentrací HC, kvůli vstřikování většího množství paliva. Spalováním bohaté směsi palivo nestihne celé zoxidovat z důvodu nedostatku kyslíku a část tak vychází se spalinami do ovzduší.

## 10. Diskuze

Z výsledných hodnot praktické části byly vyvozeny závěry, které byly porovnány v této kapitole s odbornými podklady. Z experimentu vyplývá, že nejvyšší podíl na vzniku emisí má akcelerace. Vzhledem k výsledkům naměřených dat vyplývá, že vliv úpravy na emise vznětového motoru je spíše negativní. Cílem úpravy je dostat do motoru co nejvíce vzduchu zvýšením plnicího tlaku turbodmychadla. Zároveň s tím je ale nutné zvýšit požadavek na množství vstříkovaného paliva. Tento poměr se vzhledem k emisím dá navyšovat pouze do určité míry, po překročení tohoto poměru s větším množstvím vstříknutého paliva se výrazně zvyšuje kouřivost motoru, a tedy i emise.

Při porovnání limitů normy Euro 3, pro které je vozidlo schváleno a jejichž limitní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1 vyplývá, že vozidlo nespĺňuje po letech provozu a opotřebením limitní hodnoty  $\text{NO}_x$ , které jsou 0,5 g/km. Naměřené hodnoty NO před úpravou byly 0,65 g/km a po úpravě 0,6 g/km. Vozidlo tedy nespĺňuje ani limitní hodnotu HC a  $\text{NO}_x$ , která je normou daná na 0,56 gramů na kilometr. To ovšem nejsou veličiny, které by se měřili na stanici technické kontroly při měření emisí, kde se měří pouze kouřivost.



Graf 19 – Porovnání průměrné produkce složek výfukových plynů na 1 km

V roce 2017 došlo ke změně zákona č. 56/2001 Sb. o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích, který obecně zakazuje jakékoli úpravy, nad rámec původního schválení vozidla, pokud tyto úpravy nejsou homologované. Patří tak zde např. okenní fólie, odstraňování filtrů pevných částic, deaktivace systémů SCR, ale právě také různé úpravy řídicích jednotek. V praxi odhalit takovou úpravu je ale velmi obtížné. Policie nemá vybavení, kterým by takovou úpravu na vozidle mohla zjistit.

## 11. Závěr

Téma diplomové práce jsem si vybral z několika důvodů. Hlavním důvodem výběru tohoto tématu byl blízký přístup ke zkoumané problematice. V teoretické části diplomové práce byly popsány základní teoretické poznatky pro pochopení praktické části této práce. Jedná se zejména o složení výfukových plynů včetně vzniku jednotlivých složek a škodlivosti na lidské zdraví. Zaměřil jsem se zde také na komplexní popis homologačního testování jízdních cyklů jak u osobních, tak i nákladních vozidel z pohledu produkce emisí. Z práce vyplývá, že dlouho používaný NEDC cyklus neodpovídal požadavkům, a tak byl z mnoha důvodů následně nahrazen cyklem WLTC a testováním ve skutečném provozu. Dále teoretická část popisuje jednotlivé systémy, které mají vliv na snižování (v případě nefunkčnosti zvyšování) škodlivých složek ve výfukových plynech. Systém selektivní katalytické redukce se dnes již používá u mnoho mobilních prostředků jako jsou osobní vozidla, lehká užitková a nákladní vozidla, zemědělská a stavební technika, ale i lodní a železniční technika. V další kapitole jsou rozděleny a charakterizovány druhy úprav řídicích jednotek a je popsán je způsob řízení moderních spalovacích motorů včetně struktury řídicích jednotek a jak se úprava provádí.

V praktické části jsme na testovacím voze dosáhli nárustu výkonových parametru přes 30 %. Negativem je zvýšení složek emisí CO, HC a také počtu produkovaných částic, které jsme měřili před a po úpravě pomocí WLTC cyklu. Ostatní měřené složky emisí výfukových plynů, tzn. CO<sub>2</sub> a NO, zůstaly téměř beze změny po úpravě. Tento vůz ověřil důvod, proč jsou oblíbené přeplňované vznětové spalovacích motoru s přímým vstřikem paliva pro tyto úpravy.

Tato diplomová práce splnila veškeré cíle a může být tak podkladem pro další výzkum v oblasti emisí vznětových motorů nejen u osobních ale i u nákladních vozidel, kde se s těmito úpravami můžeme taky už běžně setkat.

Otázkou zůstává, co přinese norma Euro 7, resp. Euro VII, která má začít platit v roce 2025 pro osobní, resp. v roce 2027 pro nákladní vozidla a zavádění bezemisních vozidel od roku 2035. Tato norma zatím nemá přesnou podobu a klade nové požadavky i na elektrická vozidla, jako je např. aplikace OBM (On-Board-Monitoring), životnost akumulátorů, měření emisí z brzd a otěr pneumatik. Norma Euro 7 by měla také zvýšit požadavky na emisní trvanlivost. V současné době musí vozy Euro 6 splňovat emisní požadavky 100 000 km nebo 5 let. S emisním limitem Euro 7 musely být plněny až 200 000 km nebo 10 let.

## 12. Literatura

- [1] Reif, Konrad, Diesel Engine Management, Systems and Components, 2014, ISBN 978-3-658-03980-6
- [2] RŮŽIČKA, Bronislav. Jak na chiptuning. Brno: Computer Press, 2008. ISBN 978-80-251-2096-5. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:129e4330-1c85-11e8-a0cf-005056827e52>
- [3] HROMÁDKO, Jan, 2011. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [4] Bauer F. 2013. Praha: Profi Press, s.r.o., 2013. stránky 10-12. ISBN 978-80-86726-52-6.
- [5] ŠKODA AUTO a.s. 2002. Učební pomůcka 43. *Emise*. 2002.
- [6] VLK, František. *Diagnostika motorových vozidel*. 1. vydání. Brno: Vlastním nákladem, 2006. 444 s. ISBN 80-239-7064-X.
- [7] RŮŽIČKA, Antonín a Zdeněk PETRÁS. *Elektronické vstřikování vznětových motorů EDC 1.3.3*. Praha: Robert Bosch, c1998.
- [8] ŠKODA AUTO a.s. 2000. Učební pomůcka 16. *Vznětový motor 1.9TDI 66 kW*. 2000. str. 41
- [9] ŠKODA AUTO., 2004. Učební pomůcka 39. *Euro On Board Diagnose*. Praha : ŠKODA AUTO, 2004. str. 34.
- [10] Centrum vzdělávání SCANIA CER. 2008. Technické školení T05. *Vstřikování nafty Bosch*. Rudná u Prahy : Scania Czech Republic s.r.o., 2008. stránky 1-220.
- [11] TAKÁTS, M. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha: ČVUT Praha, 1997. 111 s. ISBN 80-01-01632-3.
- [12] DieselNet [online]. 2010 [cit. 2022-9-20]. Dostupné z: <http://www.dieselnets.com/standards/eu/ld.php>.
- [13] <https://www.automotiveworld.com/articles/82896-the-eev-emission-standard-a-stepping-stone-to-euro-6/>

- [14] VLK, František. Příslušenství vozidlových motorů. Brno: František Vlk, 2002. ISBN 80-238-8755-6.
- [15] Heck, R.M.; Farrauto, R.J. Catalytic Air Pollution Control. Van Nostrand Reinhold: New York, NY, 1995.
- [16] AUTOEXPERT. 2009. Praktická dílna. *SNIŽOVÁNÍ EMISÍ SPALOVACÍCH MOTORŮ*. Praha: Autopress, s. r. o., 2009. stránky 1-100.
- [17] Jan Z., Žďánský B. 2010. *Automobily 4 Příslušenství*. Brno : Avid s.r.o. Brno, 2010, str. 197.
- [18] SCANIA, CUMINS., 2011. TECHNICKÉ ŠKOLENÍ. *Elektronická regulace vstřikování Scania/Cumins*. Praha : SCANIA, CUMINS, 2011. str. 229.
- [19] PRODUCT ADACEMY IVECO. 2007. Kurz: ME17. *Systém DENOXTRONIC 2*. Vysoké Mýto : PRODUCT ADACEMY IVECO, 2007. stránky 4 - 28.
- [20] VOLVO TRUCK., 2011. IMPACT 3.0. *Selektivní katalytická redukce*. Brno : VOLVO TRUCK, 2011. str. 29.
- [21] Centrum vzdělávání SCANIA CER. 2009. Technické školení T05. Vysokotlaké vstřikování paliva XPI. Rudná u Prahy : Scania Czech Republic s.r.o., 2009. stránky 2-88.
- [22] VOLKSWAGEN AG,. Motor 2,0 l TDI se vstřikovacím systémem common rail: Samostudijní program 403, Servisní školení. 2007. Wolfsburg.
- [23] PAPOUŠEK, Miroslav a Pavel ŠTĚRBA. Diagnostika spalovacích motorů. 2., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2007. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-1697-5.
- [24] ROMAIN, Nicolas. The different driving cycles. *Car-engineer.com* [online]. c2018, 01-5- 2013 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>
- [25] *Směrnice Rady ze dne 20. března 1970 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se opatření proti znečištění ovzduší plyny zážehových motorů motorových*

vozidel. In: L 76. Brusel, 1970, 70/220/EHS. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=CS>

[26] QUARTIER, Dieter. Do you know your Euro 6 from your 6c and 6d-TEMP?. Fleeteurope [online]. 2018 [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: <https://www.fleeteurope.com/fr/new-energies-taxation-and-legislation/europe/features/do-you-know-your-euro-6-your-6c-and-6d-temp?a=DQU04&t%5B0%5D=Energy&t%5B1%5D=Funding&curl=1>

[27] Emission Test Cycles: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC). Dieselnet.com [online]. c1997-2020, 2019.01 [cit. 2022-09-21]. Dostupné z: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>

[28] Emission Test Cycles: ECE 15 + EUDC / NEDC. Dieselnet.com [online]. c1997-2020, 2013-07 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: [https://dieselnet.com/standards/cycles/ece\\_eudc.php](https://dieselnet.com/standards/cycles/ece_eudc.php)

[29] Dieselové motory EU6. Mladá Boleslav. Škoda Auto, 2018

[30] Twin dosing reduces emissions [online]. Wolfsburg: Volkswagen, 2020 [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/stories/twin-dosing-reduces-emissions-5750>

[31] Self-study Programme 540, SCR Exhaust Gas Treatment in the Passat 2015, Design and Function

[32] ADITIVA FILTRŮ PEVNÝCH ČÁSTIC [online]. Nová Hradečná, okr. Olomouc: DPF-CAT Systems [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.dpf-cat.cz/ADITIVA-DPF>

[33] ŠKODA AUTO., 2006. Učební pomůcka 60. *Vznětový motor 2.0TDI s filtrem pevných částic*. Praha : ŠKODA AUTO, 2006. str. 48.

[34] Hlavňa V., Kučuka P. 2000. *Dopravný prostriedok jeho motor*. Žilina : Žilinská univerzita v Žilíně, 2000. stránky 48-55. ISBN 80-7100-665-3.

[35] SAJDL,J., 2010. DPF (Diesel Particulate Filter). [online]. Dostupné z:<  
<http://cs.autolexicon.net/articles/dpf-diesel-particulate-filter>

[36] RS. A Cleaner and Safer Future with SCR. ATZautotechnology [online]. 2004, 4(4), 28-30 [cit. 2023-02-06]. ISSN 1616-8216. Dostupné z: doi:10.1007/BF03246833

[37] MERKISZ, Jerzy, Jacek PIELECHA a Stanisław RADZIMIRSKI. New Trends in Emission Control in the European Union [online]. Cham: Springer International Publishing, 2014 [cit. 2023-03-07]. Springer Tracts on Transportation and Traffic. ISBN 978-3-319-02704-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-02705-0

[38] REIF, Konrad, ed. Automotive Mechatronics [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015 [cit. 2023-02-08]. ISBN 978-3-658-03974-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-03975-2

[39] SPVG Systems [online]. Brno: SPVG Systems, 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://www.spvgsystems.com/>



### 13. Seznam Obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 - Složení výfukových plynů vznětových motorů [5] .....                                      | 3  |
| Obrázek 2 - Emisní limity EU pro dieselová užitková vozidla [1] .....                                 | 7  |
| Obrázek 3 - Grafické znázornění rychlostního profilu cyklu ECE 15[28].....                            | 8  |
| Obrázek 4 - Grafické znázornění rychlostního profilu cyklu EUDC [28] .....                            | 9  |
| Obrázek 5 - Grafické znázornění rychlostního profilu cyklu NEDC [28] .....                            | 10 |
| Obrázek 6 - Průběh testu ESC [12]... .....  | 11 |
| Obrázek 7 - Průběh testu ETC [12].....  | 12 |
| Obrázek 8 - Průběh testu ELR [12].....  | 13 |
| Obrázek 9 - Průběh WHSC [12] .....  | 13 |
| Obrázek 10 - Vliv teploty spalování na tvorbu NO <sub>x</sub> [10] .....                              | 14 |
| Obrázek 11 - Datového pole recirkulace spalin vznětového motoru 1.9 TDI AGR [8] .....                 | 16 |
| Obrázek 12 - Schéma zpětného vedení výfukových plynů [8] .....  | 16 |
| Obrázek 13 - Chladič výfukových plynů [22].....   | 17 |
| Obrázek 14 - Schéma systému recirkulace výfukových plynů s chladičem spalin [22] .....                | 18 |
| Obrázek 15 - Schéma jednostupňové recirkulace výfukových plynů [10] .....                             | 19 |
| Obrázek 16 - Aktivace Venturiho ventilu při otáčkách motoru 1000 – 1500 min <sup>-1</sup> [10].....   | 19 |
| Obrázek 17 - Deaktivace Venturiho ventilu při otáčkách motoru 1500 – 2100 min <sup>-1</sup> [10] .... | 20 |
| Obrázek 18 - Schématické znázornění dvoustupňového systému recirkulace výfukových plynů [21] .....    | 21 |
| Obrázek 19 - Schéma systému s oxidačním katalyzátorem [16].....                                       | 22 |
| Obrázek 20 - Schéma filtru pevných částic [33] .....  | 24 |
| Obrázek 21 - Technická řešení pro Euro VI [19].....   | 25 |
| Obrázek 22 - Plastová nádrž AdBlue s topným hadem. [20] .....   | 27 |
| Obrázek 23 - Princip činnosti SCR u nákladních vozidel [20] .....                                     | 28 |
| Obrázek 24 - Schéma SCR systému u osobních vozidel [31].....  | 30 |
| Obrázek 25 - Schéma systému SCR s dvojitým dávkováním [29] .....                                      | 31 |
| Obrázek 26 - Příklad struktury řídicí jednotky ME Motronic [38] .....                                 | 34 |
| Obrázek 27 – Testovací vozidlo na válcové zkušebně.....   | 38 |
| Obrázek 28 - Měřící zařízení EEPS .....   | 40 |
| Obrázek 29 – Diagnostická sada SPVG [39] .....  | 42 |

## 14. Seznam Tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 - Povolené množství škodlivin osobních vozidel do 3,5 t v Evropské unii [12]..... | 6  |
| Tabulka 2 - Emisní limit pro autobusy a nákladní vozidla [12].....                          | 7  |
| Tabulka 3 - Testovací třídy WLTC [27] .....   | 11 |
| Tabulka 4 - Parametry testu ESC [12] .....  | 11 |
| Tabulka 5 - Parametry testu WHSC [12] .....   | 13 |
| Tabulka 6 - Charakteristika AdBlue - ISO 22241-1 (dříve DIN-70070) [20].....                | 26 |
| Tabulka 7 - Technické parametry Volkswagen Bora 1.9 TDi .....                               | 39 |

## 15. Seznam Grafů

|  |    |
|--|----|
| Graf 1 - Výkonové charakteristiky před úpravou.....                        | 44 |
| Graf 2 - Výkonové charakteristiky po úpravě .....                          | 45 |
| Graf 3 - Porovnání výkonových charakteristik .....                         | 45 |
| Graf 4 - Produkce pevných částic před úpravou .....                        | 46 |
| Graf 5 - Produkce pevných částic po úpravě.....                            | 46 |
| Graf 6 - Porovnání produkce pevných částic .....                           | 47 |
| Graf 7 - Produkce CO před úpravou .....                                    | 48 |
| Graf 8 - Produkce CO po úpravě.....  | 48 |
| Graf 9 - Porovnání produkce CO .....                                       | 49 |
| Graf 10 - Produkce CO <sub>2</sub> před úpravou .....                      | 50 |
| Graf 11 - Produkce CO <sub>2</sub> po úpravě.....                          | 50 |
| Graf 12 - Porovnání produkce CO <sub>2</sub> .....                         | 51 |
| Graf 13 - Produkce NO před úpravou .....                                   | 52 |
| Graf 14 - Produkce NO po úpravě .....                                      | 52 |
| Graf 15 - Porovnání produkce NO .....                                      | 53 |
| Graf 16 - Produkce HC před úpravou .....                                   | 54 |
| Graf 17 - Produkce HC po úpravě.....                                       | 54 |
| Graf 18 - Porovnání produkce HC .....                                      | 55 |
| Graf 19 – Porovnání průměrné produkce složek výfukových plynů na 1 km..... | 56 |