

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Vliv použití HHO plynu na emise a spotřebu
vznětového motoru**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce:

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Autor:

Bc. Jan Rulf

Studijní obor:

Silniční a městská automobilová doprava

Praha 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jan Rulf

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Vliv použití HHO plynu na emise a spotřebu vznětového motoru

Název anglicky

Influence of HHO gas on emissions and fuel consumption in CI engine

Cíle práce

Analýza využití HHO plynu a jeho vliv na emise a spotřebu paliva ve vznětovém motoru.

Metodika

1. Úvod
2. Současný stav sledované problematiky – emise spalovacích motorů, užití vodíku ve spalovacích motorech
3. Cíl práce
4. Metodika práce – úprava vznětového motoru pro provoz s HHO generátorem, návrh matice měření
5. Praktická část práce
6. Výsledky a diskuse
7. Závěr

Doporučený rozsah práce

40-50

Klíčová slova

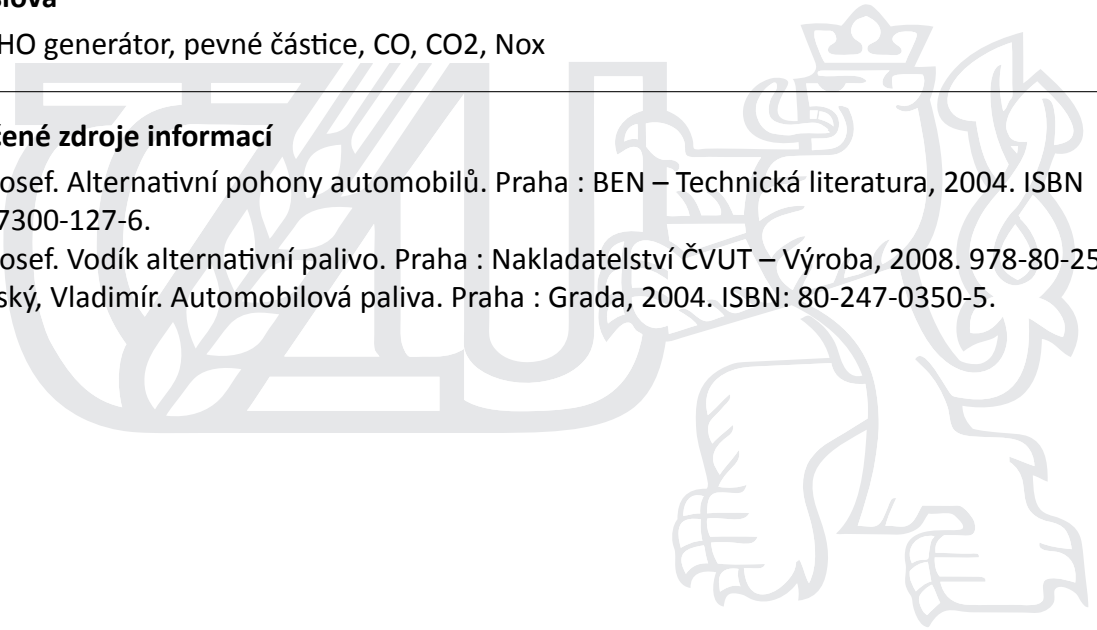
Vodík, HHO generátor, pevné částice, CO, CO₂, Nox

Doporučené zdroje informací

Kameš, Josef. Alternativní pohony automobilů. Praha : BEN – Technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-127-6.

Kameš, Josef. Vodík alternativní palivo. Praha : Nakladatelství ČVUT – Výroba, 2008. 978-80-254-1689-0.

Matějovský, Vladimír. Automobilová paliva. Praha : Grada, 2004. ISBN: 80-247-0350-5.



Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2019

Čestné prohlášení

"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv použití HHO plynu na emise a spotřebu 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., 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. Jan Rulf

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svým rodičům za dlouhodobou podporu při studiu. Stejně tak poděkování patří Ing. Petru Jindrovi, Ph.D. za připomínky při zpracování této práce a pomoc při měření.

Abstrakt: Cílem této diplomové práce je analýza vlivu volně prodejného generátoru HHO plynu na emise a spotřebu vznětového spalovacího motoru.

Rešeršní část je zaměřena na popis jednotlivých emisních složek vznětového motoru a jejich vznik. Informace jsou podány i o možnostech redukce těchto emisí. Současně se zabývá elektrolytickým procesem štěpení vody na vodík a kyslík a charakteristikou vodíku jako plynu využitelného v dopravě.

Praktická část popisuje instalaci generátoru na konvenční vůz. Dále popisuje měření homologačních jízdních cyklů a srovnává konvenční pohon s použitím HHO generátoru v závislosti na produkci emisí, spotřebu paliva, ale i výkon motoru.

Klíčová slova: Vodík, HHO generátor, Pevné částice, CO, CO₂, NO_x

Influence of HHO gas on emissions and fuel consumption in CI engine

Abstract: The goal of this diploma thesis is to analyse how over-the-counter generator of HHO gas impacts emissions and fuel consumption of the CI engine.

The theoretical part of the thesis is aimed at the description of composition of the emissions of the CI engine. Information regarding potential possibilities of reducing those emissions is presented as well. Furthermore, the thesis is focused on electrolytic dissociation of water to hydrogen and oxygen and description of hydrogen as gas usable in transport.

The practical part solves installation of the HHO generator at a conventional vehicle. Moreover, this part analyzes a measurement of homologation cycles for light-duty vehicles and compares conventional vehicle setting with usage of HHO generator depending on emissions production, fuel consumption and also the output engine power.

Keywords: Hydrogen, HHO generator, Dense particles, CO, CO₂, NO_x

Obsah

1	Úvod	- 8 -
2	Přehled současné problematiky	- 9 -
2.1	Emise	- 9 -
2.2	Druhy emisí vznětových motorů	- 9 -
2.3	Prostředky pro snižování emisí.....	- 16 -
2.4	Měření emisí vozu	- 26 -
3	Cíl práce	- 28 -
4	Metodika práce	- 29 -
4.1	Použitý typ vozidla a generátor HHO plynu	- 29 -
4.2	Použité měřicí přístroje, software a příslušenství.....	- 30 -
4.3	Matice měření	- 34 -
5	Praktická část práce	- 35 -
5.1	Instalace HHO generátoru na vůz.....	- 35 -
5.2	Zpracování produkce plyných emisí.....	- 36 -
5.3	Zpracování produkce pevných částic	- 37 -
5.4	Zpracování spotřeby paliva vozu.....	- 38 -
5.5	Zpracování vnější výkonové charakteristiky	- 38 -
6	Výsledky	- 40 -
6.1	Výsledky v jízdním cyklu WLTC3	- 40 -
6.2	Výsledky ve vnější otáčkové charakteristice	- 45 -
7	Diskuze	- 46 -
8	Závěr	- 48 -
9	Bibliografie	- 49 -
10	Seznam obrázků	- 52 -
11	Seznam tabulek	- 53 -
12	Seznam zkratk	- 54 -
13	Přílohy	- 55 -

1 Úvod

Od doby exponenciálního nárůstu lidské populace na planetě Zemi se lidstvo potýká s problematikou kvality ovzduší, které lze datovat do začátku průmyslové revoluce. Pohodlnější způsob života a technologický pokrok vede ke značnému čerpání přírodního bohatství a jeho následnému zužitkování. V podstatě veškerá lidská činnost za sebou zanechává takzvanou uhlíkovou stopu a průmyslové čerpání daných zdrojů jen zrychluje její růst. V průběhu let tak docházelo k navyšování exhalací z průmyslové výroby, dopravy a obecně lidské činnosti. Současně jsou zaznamenávány změny průměrné teploty a celkové změny podnebí. Jejich změna se tak připisuje právě uhlíkové stopě.

V současné době, kdy se začínají řešit změny klimatu na globální úrovni, jsou velmi řešenou záležitostí exhalace ze spalovacích motorů, převážně z osobních automobilů, jejichž rozvoj na dnešní úroveň umožnil vynález motoru s vnitřním spalováním.

Pro omezení produkce emisí jsou dnes zaváděny restriktivní směrnice určující maximální množství škodlivých látek, které může vůz vypouštět do ovzduší. Dříve snadno řešitelné problémy, ať už drobnými konstrukčními zásahy nebo úpravami softwarového ovládání motoru, se postupem času dostávají na hranici fyzikálních zákonů.

Řešení problematiky omezení exhalací ze spalovacích motorů však samozřejmě neznamená obcházení fyzikálních zákonů, ale důkladný výzkum ve všech odvětvích. Od prvního spalovacího motoru dospěly konstruktéři k mnoha úpravám a stejně tak budou další následovat. Nemusí se konkrétně jednat přímo o opatření ovlivňující samotný motor, ale o přídavné zařízení, jako například z historie přidání turbodmychadla nebo filtru pevných částic. Kromě trendu takzvaných biopaliv využívajících obnovitelnost jejich zdroje nastupují nová progresivní řešení, jako například přídavné systémy pro úpravu směsi dopravované do válce. Jedním z těchto řešení je takzvaný HHO generátor, který pomocí elektrické energie rozkládá vodu na vodík a kyslík, které mohou být využity na obohacení palivové směsi. Vodík je velmi hořlavý a kyslík podporuje hoření. Jeho použití by tak mohlo mít značný potenciál v řešení snížení spotřeby fosilního paliva.

2 Přehled současné problematiky

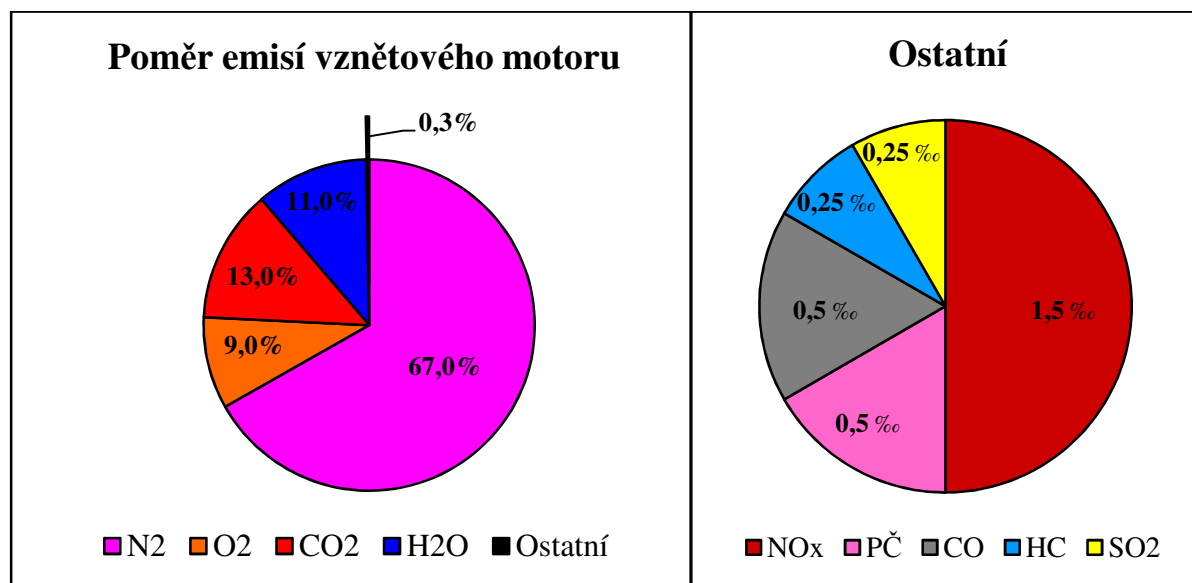
2.1 Emise

Emise označuje množství znečišťujících příměsí dostávajících se z určitého zdroje do ovzduší. Může se jednat o znečištění světelné, radioaktivní, znečištění plynnými emisemi či pevnými částicemi. Vyjadřuje se v hmotnostních nebo objemových jednotkách. (1)

Pro automobilový průmysl jsou v poslední době pod drobnohledem emise odcházející z výfukové soustavy. Světelné a hlukové znečištění produkované automobilovou dopravou je v případě řešené práce možné považovat za zanedbatelné. Z výfukové soustavy vozu však nevycházejí pouze emise plynné, může se jednat i o pevné částice.

2.2 Druhy emisí vznětových motorů

Každý spalovací motor produkuje různé množství emisí v různém složení. Vznětový motor na rozdíl od zážehového pracuje téměř vždy s chudou směsí, což minimalizuje produkci oxidu uhelnatého. Obrázek 1 však ukazuje, že tato produkce není zcela eliminována.



Obrázek 1: Průměrný poměr emisí vznětového motoru (2)

Jakékoliv používané palivo v konvenčních spalovacích motorech je směsí uhlovodíků. Tato směs je ve spalovacím prostoru smísená s atmosférickým vzduchem a vlivem spalování přechází na jinou látku. Obrázek 1 ukazuje, jak se směs uhlovodíků s kyslíkem v reakci mění na různé oxidy. Stejně tak se mění atmosférický dusík za zvýšených teplot na oxidy dusíku. Vlivem spalování také vznikají pevné částice v podobě sazí. Podrobněji je charakteristika jednotlivých emisních složek popsána v kapitolách níže.

2.2.1 Oxid uhelnatý

Chemický vzorec	CO
Molární hmotnost:	28,010 g·mol ⁻¹
Skupenství (při 20 °C, 10 ⁵ Pa):	plynné
Dolní mez výbušnosti se vzduchem:	10,9 % obj.
Horní mez výbušnosti se vzduchem:	74,0 % obj.
Dolní mez výbušnosti se vzduchem:	126 mg·dm ⁻³
Horní mez výbušnosti se vzduchem:	870 mg·dm ⁻³
Hustota plynu (0 °C, 10 ⁵ Pa):	1,234 kg·m ⁻³
Bod tání:	-205,1 °C
Bod varu (101,235 kPa):	-191,55 °C
Kritická teplota:	-140 °C
Teplota vznícení:	605 °C
Výhřevnost:	10 MJ·kg ⁻¹
1 ppm:	1,145 mg·dm ⁻³
Barva; pach:	bezbarvý; bez chuti a zápachu
Samozápalnost:	není
Rozpuštnost ve vodě (při 15 °C)	0,035 dm·dm ⁻³

Tabulka 1: Základní vlastnosti oxidu uhelnatého (3) (4)

Hlavním účinkem oxidu uhelnatého na lidský organismus je blokáda krevního barviva hemoglobinu tvorbou karboxyhemoglobinu (COHb), jež není schopen dodávat kyslík buňkám, což vede k dušení. Akutní otrava nastává při náhlém a velkém zvýšení koncentrace CO ve vdechovaném vzduchu bleskově a způsobuje smrt v řádu sekund. Slabší expozice se projevuje nejčasněji bolestmi hlavy, pocitem stisknutí hlavy ve spáncích, bušením krve v hlavě a tlakem na prsou. Ti, kteří přežili otravu popisují stav myslí, kdy si uvědomují, že jsou otráveni, že by měli vyjít na čerstvý vzduch, ale nemají k tomu sílu ani vůli. Obvykle si postižení na otravu a různě dlouhou dobu, která ji předcházela, nepamatují. Při otravě se může dostavit žaludeční nevolnost, bolest břicha, zvracení a mohou se dostavit i halucinace. Při těžké otravě upadá postižený do bezvědomí. Bezvědomí je hluboké, s nepravidelným dýcháním a tachykardií. Na CO jsou mladší lidé citlivější než staří, muži více než ženy. Obzvláště citlivé jsou těhotné ženy. (4)

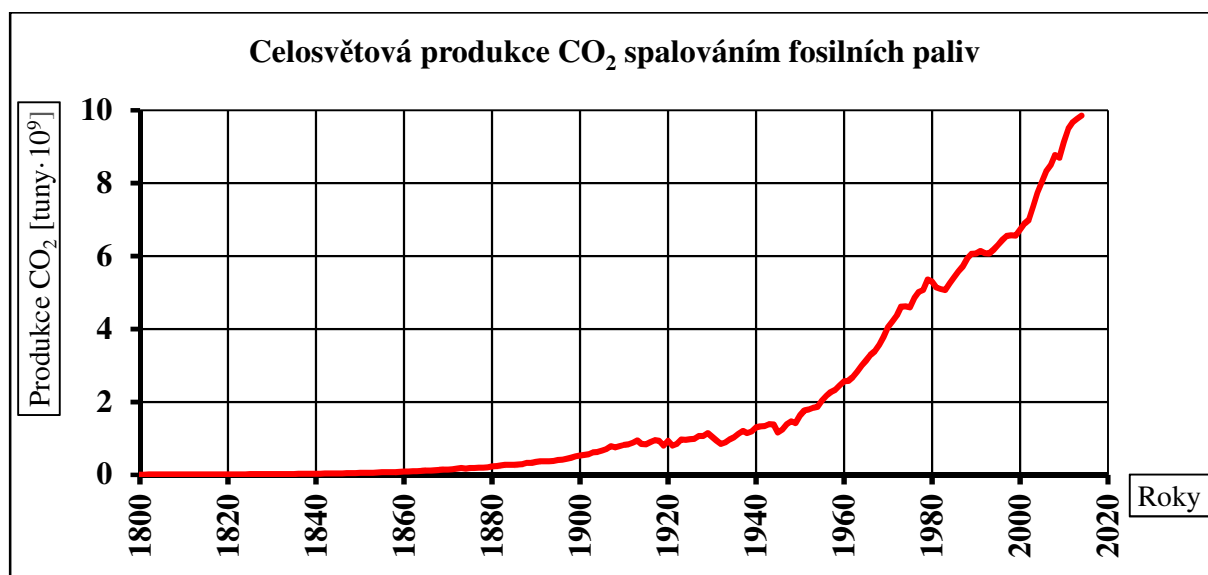
2.2.2 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je v posledních letech označován jako jeden z hlavních viníků trendu globálních změn klimatu. Působí totiž jako radiační clona mezi Zemí a okolním vesmírem, čímž zamezuje vyzařování tepla. Radikální nárůst produkce oxidu uhličitého lidskou činností prezentuje obrázek 2. (5)

Chemický vzorec:	CO ₂
Molární hmotnost:	44,01 g·mol ⁻¹
Skupenství (při 20 °C, 10 ⁵ Pa):	plynné
Hustota plynu (0 °C, 10 ⁵ Pa):	1,951 kg/m ³
Bod tání:	-56,6 °C
Bod varu (101,235 kPa):	-78,5 °C
Kritická teplota:	31,01 °C
Poměrná hustota plynu (vzduch = 1):	1,529
1 ppm:	1,81 mg·m ⁻³
Hustota tuhého CO ₂ (20 °C; 101,325 kPa):	1,2 - 1,5 kg·dm ⁻³
Barva; pach:	bezbarvý; bez zápachu až lehce nakyslý
Rozpustnost ve vodě (20 °C):	1,74 g·dm ⁻³

Tabulka 2: Základní vlastnosti oxidu uhličitého (3) (4)

CO₂ je nehořlavý a hoření nepodporuje. CO₂ je za normálního tlaku a teploty plyn, slabě dráždivý nosí sliznici. Plynný CO₂ je podstatně těžší než vzduch, proto se při zplynění kapalného CO₂ do volného ovzduší usazuje u země, stejně tak při sublimaci tuhého CO₂ se během jeho skladování hromadí u země a pod úrovní terénu, odkud vytěsňuje vzduch. Kapalný CO₂ je čirá kapalina, která musí být skladována za snížené teploty. Za normální teploty a tlaku se prudce odpařuje a mění v plyn. Zbývá kapalina se při tom ochladí tak, že se přemění na suchý led. Přímý kontakt s kapalným CO₂ způsobuje omrzliny. Pevný CO₂ je bílá tvrdá hmota, která se získává expanzí kapalného CO₂ a stlačováním vytvořeného sněhu lisováním. Za normálního tlaku zvolna sublimuje na plyn o teplotě -78,5 °C, čímž snižuje teplotu svého okolí. (4)



Obrázek 2: Vývoj celosvětové produkce oxidu uhličitého vlivem spalování fosilních paliv (6)

CO₂ není toxický, ale účinkuje jako dusivý plyn, a to především snižováním parciálního tlaku kyslíku ve vzduchu. Koncentraci CO₂ 5 000 ppm ve vzduchu je možno dýchat řadu hodin bez následků. Koncentrace CO₂ 20 000 ppm je hranicí, které se je schopno lidské tělo přizpůsobit. Koncentrace CO₂ 30 000 ppm zřetelně zvyšuje frekvenci dechu a zároveň jej prohlubuje, stoupá tep i krevní tlak. Koncentrace CO₂ 50 000 ppm vyvolává zvracení, hypertenzi a dezorientaci, trvá-li expozice déle způsobí překyselení organismu a bezvědomí. Koncentrace CO₂ 70 000 – 100 000 ppm vedou k bezvědomí v řádu minut a vyšší koncentrace usmrcují. Přežije-li postižený otravu, bývá i po těžkém stavu rychle zotaven a následky jsou většinou přechodné. (4)

2.2.3 Uhlovodíky

Vznik nespálených uhlovodíků je způsoben předčasně zastavenou reakcí hoření, případně nezapálením směsi. Jedná se tak o produkt chemické reakce, která byla zastavena a celá oxidace paliva neproběhla do konce. Nejčastější příčinou tohoto nedokonalého spálení paliva je nižší teplota určitých částí válce (zhášecí prostor). Celkově vznik nespálených uhlovodíků znamená nevyužití potenciálu paliva dopraveného do válce, jelikož jeho energie nebyla zcela přeměněna na práci. (7)

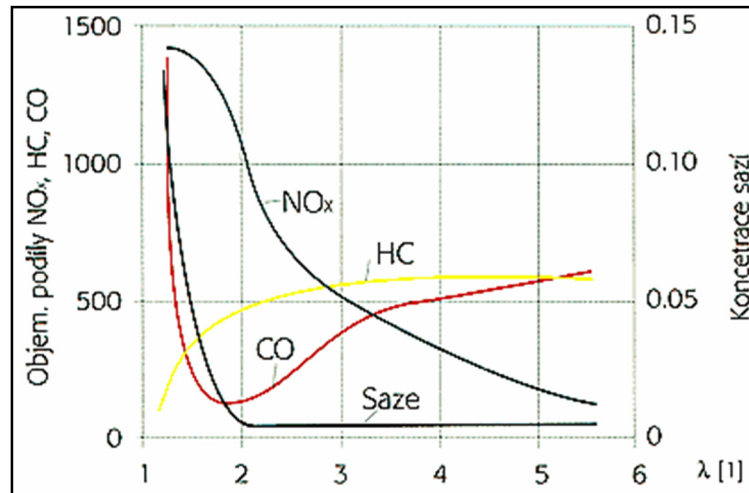
Další možností vzniku je přílišná bohatost směsi (kdy není možné vlivem nedostatku kyslíku dokonalé prohoření celé směsi), závada v zapalovací soustavě (netěsnost válce, čímž vzniká nedostatečná komprese), anebo vadná žhavicí svíčka.

Pro lidské zdraví jsou nejvíce nebezpečné polycyklické aromatické uhlovodíky. 3,4-benzpyren se řadí mezi karcinogeny. Současně se zde také vyskytuje formaldehyd, který je dráždivý. Problematika vzniku uhlovodíků je také velmi ovlivněna stylem jízdy, kdy byly měřeny až patnáctinásobné hodnoty emisí uhlovodíku při jízdě v reálném provozu oproti laboratorním testům. (8) (9)

2.2.4 Pevné částice

Vznik pevných částic ve spalovacím motoru je způsoben spalováním organických, případně anorganických látek. Původně existoval předpoklad, že pevné částice vznikají pouze u vznětových motorů, ale u zážehových motorů vznikají také, za předpokladu použití přeplňování, které je stále častější konstrukční úpravou.

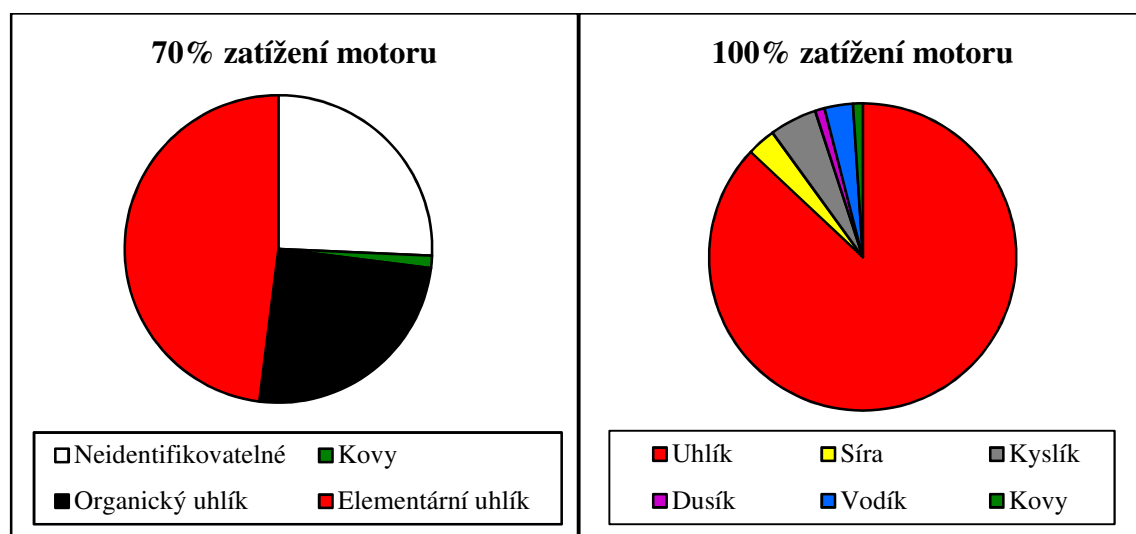
Pevné částice vznikají primárně při nedostatku vzduchu. Emise pevných částic úzce souvisí s kvalitou rozprášení dávky paliva při vstřiku do válce. Vznětový motor teoreticky nikdy nepracuje s nedostatkem vzduchu, ale v rámci menších částí válce, kde je hůře rozprášeno palivo, k němu může dojít. Průběh koncentrace pevných částic v závislosti na množství přebytku vzduchu λ zobrazuje obrázek 3.



Obrázek 3: Množství emisních složek vznětového motoru v závislosti na přebytku vzduchu (5)

Jádro částice se skládá z pevného uhlíku. Celkové složení pevné částice dále tvoří organický uhlík, dusík, sulfát a případně voda. (5)

Složení pevných částic se také mění v závislosti na zatížení motoru. Obrázek 4 prezentuje grafy představující podíl složek, z nichž se skládají pevné částice v závislosti na zatížení motoru.



Obrázek 4: Graf složení pevných částic v závislosti na zatížení motoru (10)

2.2.5 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku, v automobilovém průmyslu všeobecně označovány NO_x , se primárně v rámci kontroly emisí nerozlišují na konkrétní druh oxidu a jsou restriktivně monitorovány jako celek. Vznikají v následujících pěti variantách, ovšem v rámci přístrojového vybavení (kapitola 4.2.2) jsou řešeny jen tři nejvýznamnější varianty.

- Oxid dusný – významný z hlediska emisí spalovacích motorů
- Oxid dusnatý – významný z hlediska emisí spalovacích motorů
- Oxid dusitý
- Oxid dusičitý – významný z hlediska emisí spalovacích motorů
- Oxid dusičný

2.2.5.1 Oxid dusný

Chemický vzorec:	N_2O
Molární hmotnost:	$44,013 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Skupenství (při $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 10^5 Pa):	plynné
Hustota plynu ($0 \text{ }^\circ\text{C}$, 10^5 Pa):	$1,978 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Bod tání:	$-102,4 \text{ }^\circ\text{C}$
Bod varu ($101,235 \text{ kPa}$):	$-88,48 \text{ }^\circ\text{C}$
Kritická teplota:	$36,43 \text{ }^\circ\text{C}$
1 ppm:	$1,84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Barva; pach:	bezbarvý; nasládlý
Rozpustnost ve vodě (při $15 \text{ }^\circ\text{C}$):	$754 \text{ cm}^3\cdot\text{dm}^{-3}$

Tabulka 3: Základní vlastnosti oxidu dusného (4)

Oxid dusný jako jediný ze zástupců oxidů dusíku nemá na člověka dráždivé vlastnosti. Při vdechnutí bez příměsí kyslíku tak dochází k prostému dušení. V nižších koncentracích působí opojně a může se používat k lehčím narkózám ve směsi s 10-65 % kyslíku. (4)

2.2.5.2 Oxid dusnatý

Chemický vzorec:	NO
Molární hmotnost:	30,006 g·mol ⁻¹
Skupenství (při 20 °C, 10 ⁵ Pa):	plynné
Hustota plynu (0 °C, 10 ⁵ Pa):	1,323 kg·m ⁻³
Bod tání:	-163,3 °C
Bod varu (101,235 kPa):	-151,7 °C
Kritická teplota:	-93 °C
Stabilita:	se vzduchem rychle oxiduje na NO ₂
1 ppm:	1,23 mg·m ⁻³
Barva; pach:	bezbarvý, štiplavý
Rozpustnost ve vodě (při 15 °C):	67 mg·dm ⁻¹

Tabulka 4: Základní vlastnosti oxidu dusnatého (4)

Oxid dusnatý je jedovatý plyn, který za normálních okolních podmínek rychle oxiduje na oxid dusičitý. S vodou tvoří žíravé kyseliny, které způsobují rychlou korozi některých kovů. Přímé působení oxidu dusnatého má vliv na nervovou soustavu a projevuje se celkovou slabostí, závratěmi a bolestmi hlavy. (4)

2.2.5.3 Oxid dusičitý

Oxid dusičitý je jedovatý plyn podílející se na vzniku kyselých dešťů. Při styku se vzdušnou vlhkostí totiž reaguje na kyselinu dusičitou (HNO₃). Ta i při nízkých koncentracích způsobuje poleptání sliznic hrtanu. Následkem se dostavuje pocit dušení a kašel. (5) (9)

Chemický vzorec:	NO ₂
Molární hmotnost:	46,006 g·mol ⁻¹
Skupenství (při 20 °C, 10 ⁵ Pa):	pevné
Hustota pevné látky (0 °C, 10 ⁵ Pa):	1449 kg·m ⁻³
Bod tání:	-11,2 °C
Bod varu (101,235 kPa):	21,2 °C
Kritická teplota:	157,8 °C
1 ppm:	1,88 mg·m ⁻³
Barva; pach:	bezbarvý; nasládlý
Rozpustnost ve vodě:	zcela rozpustný

Tabulka 5: Základní vlastnosti oxidu dusičitého

2.2.6 Oxidy síry

Vznik oxidů síry je podmíněn prezencí sloučenin síry v palivu. Při spalování vzniká primárně oxid siřičitý (SO₂). Při běžné koncentraci je pro člověka neškodný, ve zvýšené koncentraci způsobuje otoky hrtanu. S vodou tvoří žíravé kyseliny, které způsobují rychlou korozi některých kovů za tvorby extrémně hořlavého H₂. (9)

Chemický vzorec:	SO ₂
Molární hmotnost:	64,06 g·mol ⁻¹
Skupenství (při 20 °C, 10 ⁵ Pa):	plynné
Hustota plynu (0 °C, 10 ⁵ Pa):	2,888 kg·m ⁻³
Bod tání:	-75,5 °C
Bod varu (101,235 kPa):	-10 °C
Kritická teplota:	158 °C
Barva; pach:	bezbarvý; dráždivý
Rozpustnost ve vodě při 15 °C:	32,79 dm ³ ·dm ⁻³
1 ppm:	2,62 mg·m ⁻³

Tabulka 6: Základní vlastnosti oxidu siřičitého (4) (11)

Vzhledem k tomu, že oxidy síry poškozují filtry pevných částic, je síra považována za nežádoucí příměs paliva a v současné době se prodává nafta s maximálním obsahem síry 0,1 ‰. Daný obsah síry se neustále zmenšuje a emise oxidů síry je možné považovat za zanedbatelné. Nicméně maximální povolená koncentrace v ovzduší je pro člověka 5 ppm, přičemž k vážnému poškození zeleně dochází již při koncentraci 1–2 ppm. (5) (11)

2.2.7 Ostatní emise

Ostatními emisemi rozumíme látky, jež vycházejí z výfukové soustavy vozidla, ale nejsou primárně problematické. Jedná se tak o čistý dusík, který vstupuje do spalovacího procesu z atmosférického vzduchu, dále potom vodní pára vznikající kondenzací na teplých částech celé soustavy. Přebytečný kyslík, jež se nepodařilo zužít ve spalovacím prostoru pro reakci s palivem, stejně jako dusík pouze prochází spalovacím prostorem a výfukovou soustavou.

2.3 Prostředky pro snižování emisí

Konstruktéři pozemních vozidel využívají mnoho řešení pro snížení výše uvedených emisí. Vzhledem k faktu, že je velmi těžké ovlivnit spalovací proces, a tedy složení jednotlivých příměsí emisí, používají se primárně řešení pro celkovou redukci spotřebovaného paliva. To má za následek celkový pokles emisí. Jedná se o změnu hmotnosti vozidla, úpravu jeho aerodynamického odporu a využívání lepších technologií majících za následek snížení pasivních odporů.

Když jsou již vyčerpána ekonomicky přijatelná řešení výše uvedeného, nastupují další možnosti redukce emisí jako jsou opatření před motorem, u motoru a za motorem. Patří mezi ně přeplňování motoru turbodmychadly, recirkulace výfukových plynů do spalovacího prostoru (například EGR ventilem) nebo mechanické síto pevných částic.

2.3.1 Fyzikální vlastnosti vozidla

Jedná se o konstrukční opatření spočívající v úpravě trvale měnící fyzikální vlastnosti vozu jako je jeho hmotnost nebo velikost čelní plochy.

2.3.1.1 *Odpor valení*

Odpor valení je síla působící proti pohybu vozu vznikající při deformaci pneumatiky při styku s podložkou. Při styku pneumatiky s podložkou vzniká plocha, kde v přední části dochází ke stlačení pláště. Odpor valení je ovlivněn druhem podložky, což ovlivňuje hodnotu součinitele odporu valení, a huštěním pneumatiky, kdy větší deformace pláště vede ke zvýšení součinitele odporu valení. Výpočet odporu valení:

$$F_{\text{val}} = G \cdot f \qquad 2.3.1.1.1$$

Kde:

- F_{val} : Síla působící proti pohybu vozu [N]
- G : Tíha vozu [N]
- f : Součinitel odporu valení [-]

Jak je vidět na vzorci, dosáhneme nižšího odporu valení, a tedy nižší spotřeby paliva optimálně huštěnou pneumatikou, pneumatikou vhodnější konstrukce nebo změnou hmotnosti vozu. Součinitel odporu valení se nyní orientačně pohybuje v hodnotách 0,015 - 0,03 na upravených cestách. (12)

2.3.1.2 Aerodynamický odpor vozidla

Aerodynamika je vědní obor řešící obtékání vzdušín kolem těles. Obtékáním vzdušín kolem tělesa vzniká odpor prostředí. V odporu prostředí jsou tak v automobilovém průmyslu zahrnuty v závislosti na rychlosti tlak vzduchu na celkovou plochu karoserie a tření vzduchu.

Odpor prostředí působící proti směru pohybu vozu lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$F_V = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S_x \cdot \rho \cdot v^2 \quad 2.3.1.2.1$$

Kde:

- F_V : Síla vzniklá odporem působícím proti pohybu vozu [N]
- c_x : Součinitel odporu vzduchu [-]
- S_x : Čelní plocha vozu [m²]
- ρ : Hustota vzduchu [kg·m⁻³]
- v : Rychlost vozu [m·s⁻¹]

Dle vzorce je jasné, že konstrukčně jsou ovlivnitelné pouze dvě veličiny, a to čelní plocha vozu a součinitel odporu vzduchu. Součinitel odporu vzduchu se může konstrukčně vylepšit například zakrytíváním podvozku, čímž se dosáhne plynulejšího proudění vzduchu pod vozidlem. Čelní plochu vozu je možné zmenšit na úkor pohodlí posádky vozu snížením vnějších rozměrů dle vzorce 2.3.1.2.2. (13)

$$S_x = (0,8 - 0,95) \cdot \check{s}_v \cdot v_v \quad 2.3.1.2.2$$

Kde:

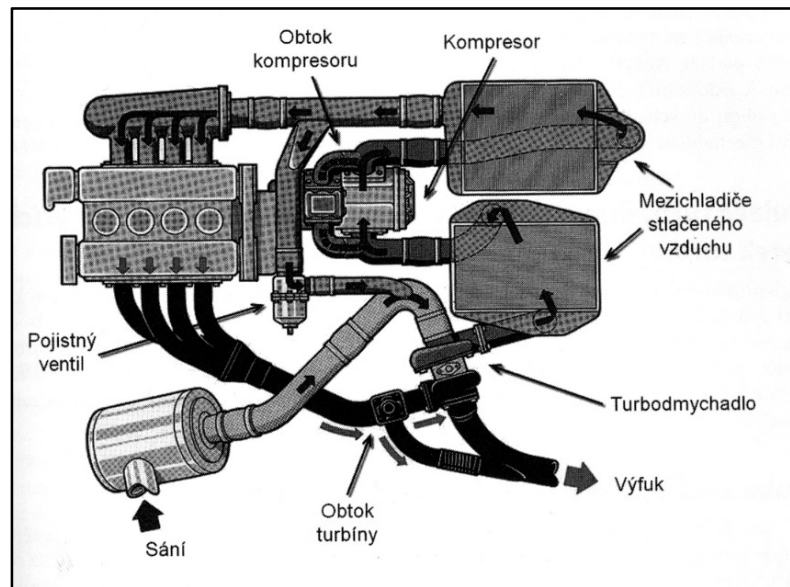
- \check{s}_v : Šířka vozu [m]
- v_v : Výška vozu [m]

2.3.2 Opatření před motorem

Jedná se o veškerá opatření upravující tvorbu směsi (například přeplňování). Primárním faktorem pro snížení emisí je změna směšovacího poměru. Změnou směšovacího poměru je možné dosáhnout díky chudé směsi nižšího obsahu oxidu uhelnatého v emisích, nicméně graf (viz obrázek 3) ukazuje, že naopak stoupají jiné emise.

Princip přeplňování spočívá ve využití turbodmychadla nebo kompresoru. Vzduch do válce tak není dopraven jen podtlakem vznikajícím při pohybu pístu do dolní úvrati, ale je navíc vtlačován vnějším zařízením. Tím se do pracovního prostoru dostává větší množství vzduchu

a je možné buď dosáhnout stejnou dávkou paliva chudší směsí, nebo stejně bohaté směsí větším množstvím paliva než u motorů nepřepřlňovaných. Schéma přepřlňování motoru je vidět na schématu (obrázek 5). Zde dochází ke dvojnásobnému přepřlňení. První stupeň je poháněn výfukovými plyny a dochází k prvnímu stlačení, následně je vzduch předchlazen v prvním mezichladiči. Druhý stupeň je zajištěn v kompresoru, který je poháněn mechanicky od hřídele motoru. Následuje druhé mezichlazení stlačeného vzduchu a jeho doprava do sání motoru. (14)



Obrázek 5: Schéma přepřlňování vznětového motoru (14)

2.3.3 Opatření u motoru

Jedná se o konstrukční opatření upravující průběh spalovacího procesu ve válci.

2.3.3.1 Vnitřní recirkulace

Pro vnitřní recirkulaci výfukových plynů se využívá momentu, kdy jsou otevřeny oba ventily (sací i výfukový) zároveň. Jedná se o takzvané překrytí výfukového a sacího ventilu v okamžiku výměny náplně válce. Při výfuku se tak spaliny nedostávají ven z válce jen výfukovým ventilem, ale z části i sacím. To způsobí že část spálené směsi je v sacím potrubí a při dalším nasávání čerstvé směsi je směs zředěna právě tímto množstvím spalin. Zvýšený obsah spalin ve válci má za následek snížení teploty hoření a tím snížení produkce emisí NO_x . (5)

2.3.3.2 Vnější recirkulace

Pomocí zpětného vedení výfukových plynů (EGR ventilem) je dosahováno snížení teploty hoření. Dané snížení teploty má za následek snížení emisí NO_x. Tím ale pro změnu vzrůstá podíl nespálených uhlovodíků. Při nižších zatíženích motoru je možné recirkulovat velké množství výfukových plynů, v podstatě až na hranici kouřivosti. (5)

2.3.3.3 Konstrukce spalovacího prostoru

Omezením zhášecích zón spalovacího prostoru je možné snížit produkci uhlovodíků. Zhášecí prostor je místo ve válci, kde dochází k místnímu snížení teploty, čímž není umožněno kompletní prohoření vstřikovaného paliva. Pro zamezení vzniku těchto zón se volí menší spalovací prostor. (5)

2.3.4 Opatření za motorem

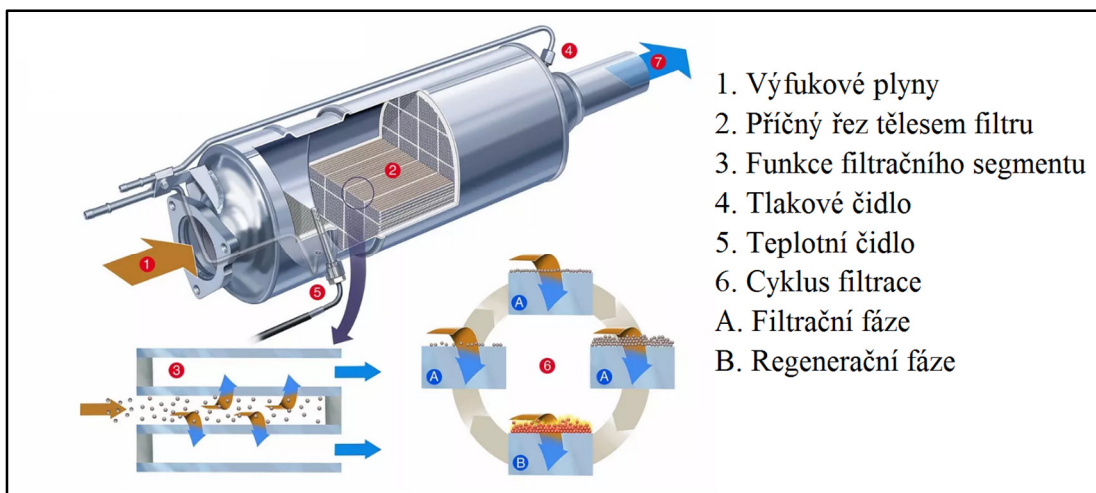
Konstrukční opatření za motorem mají za úkol snížit množství vypouštěných emisí z již proběhlého spalovacího procesu.

2.3.4.1 Oxidační katalyzátor

Oxidační katalyzátor má za úkol přeměnit nespálené uhlovodíky a oxid uhelnatý na oxid uhličitý a vodu pomocí oxidační reakce. Stejně tak snižuje i množství pevných částic. (15)

2.3.4.2 Filtr pevných částic

Zařízení se umísťuje primárně za oxidační katalyzátor. Svoji konstrukcí zachycuje pevné částice na principu mechanického síta na porézní strukturu filtru tvořenou oxidem křemičitým. Konstrukce filtru je viditelná na schématu, viz obrázek 6. Daný proces pochopitelně není možné opakovat trvale, a proto je nutné v průběhu provozu filtr pravidelně regenerovat – čistit. Regenerace filtru probíhá zvýšením teploty v prostoru filtru pevných částic. Toto navýšení teploty může probíhat jako aktivní regenerace (zásah řídicí jednotky) nebo jako pasivní regenerace (obecně při jízdě při vyšším zatížení). (5)



Obrázek 6: Konstrukce a funkce filtru pevných částic (16)

2.3.4.3 *Selektivní katalytická redukce*

Jedná se o dodatečnou chemickou reakci spalin s dodávaným katalyzátorem. Druh katalyzátoru se může různit. Primárně jsou k dispozici dvě varianty – roztok amoniaku nebo roztok močoviny a vody. Aerosol výše zmíněných roztoků je pomocí trysky vypuštěn proti proudu toku výfukových plynů, čímž dojde k promísení a následné chemické reakci. NO_x se tímto redukuje na dusík a vodu. (5)

2.3.5 **Nekonstrukční opatření pro snižování emisí**

Nekonstrukčním opatřením pro snížení produkce emisí nebo pro snížení uhlíkové stopy může být použití alternativních obnovitelných paliv, jež nevyžadují konstrukční zásahy upravující palivovou soustavu. Příkladem tohoto nekonstrukčního opatření je v dnešní době aditivace motorové nafty.

Může se jednat například o zlepšovače hoření, které vlivem snížení povrchového napětí kapaliny umožňují snížení průměru kapek vstřikovaného paliva. Dané snížení průměru dovoluje palivu lépe prohořet a vozu snížit kouřivost a omezit případné zanášení filtru pevných částic.

2.3.6 **Progresivní opatření pro snižování emisí**

Tento trend zaujímají hlavně hybridní pohony automobilů. Hybridní pohon znamená kombinaci několika zdrojů energie, jako například spalovací motor a akumulátor či palivový článěk. Vzhledem k účinnosti spalovacího motoru (30-40 %) a elektromotoru (90 %) je v budoucnu předpokládán značný vývoj podobných technologií, který je však omezen problematikou uchování potřebné energie pro provoz elektromotorů. (17)

2.3.6.1 Full hybrid

Hybridní vozy schopné pohybu pouze na elektrický pohon, případně schopné využívat i kombinaci spalovacího motoru. Vůz je vybaven děličem výkonu starajícím se o přepínání jednotek k pohonu. Spalovací motor ve full hybrid vozech bývá menší konstrukce v porovnání s konvenčními vozy stejné třídy. Podkategorií full hybridů je takzvaný plug-in hybrid, který je oproti full hybridu vybaven akumulátory, které je možné dobít i z elektrorozvodné sítě. (17)

2.3.6.2 Power assist hybrid

Primární pohonnou jednotkou je zde spalovací motor, v případě zvýšení zátěže na motor (například při akceleraci) se připojí elektromotor. Připojení elektromotoru (většinou umístěného mezi motorem a převodovkou) je podmíněno nabitím akumulátorů, které jsou dobíjeny primárně při brzdění, kdy elektromotor funguje zpětně jako generátor. Jízda čistě na elektromotor nebývá možná z důvodu jeho nízkého výkonu. (17)

2.3.6.3 Micro hybrid

Zvláštní postavení může zaujímat takzvaný micro hybrid, který nevyužívá elektrickou energii přímo k pohybu vozu, ale k omezení provozu spalovacího motoru. Do skupiny micro hybridů je možné zařadit vozy se start & stop systémem, jež umožňuje vypnutí spalovacího motoru během stání vozidla, kdy motor pracuje na volnoběžné otáčky s nulovou účinností. Akumulátor vozu však dále pohání ostatní spotřebiče ve voze. (17) (18)

2.3.7 Dodatečné úpravy konvenčního vozidla

Dodatečnou úpravou může být následný zásah do vozidla po jeho koupi. Všeobecně může jít o softwarové úpravy řídicích jednotek pro úpravu tvorby směsi. V rámci zážehových motorů se může jednat o přestavbu na LPG. Vzhledem ke koncepci práce se tato kapitola bude zabývat pouze možností dodatečné instalace HHO generátoru na konvenční vozidlo se vznětovým motorem.

2.3.7.1 Vodík

Vodík je ve vesmíru vůbec nejčastěji se vyskytující prvek. Na Zemi je po kyslíku a křemíku třetím nejčastěji se vyskytujícím prvkem. To může dávat mylnou představu o jeho snadné dostupnosti, ovšem samostatný vodík se jako prvek na Zemi téměř nevyskytuje. Téměř vždy je vodík vázán ve sloučeninách, z nichž je většinou velmi obtížné ho extrahovat. (3)

Vodík je vysoce hořlavý a snadno vznětlivý plyn, jenž společně se vzdušným kyslíkem tvoří výbušnou směs v širokém koncentračním rozmezí (viz tabulka 7). Zajímavostí také je, že při expanzi vodíku dochází k navyšování jeho teploty (na rozdíl od většiny ostatních plynů),

což může způsobit samovznícení expanzním teplem. Tento jev popisuje v závislosti na teplotě Joule-Thompsonův koeficient. Stejně tak tento jev komplikuje skladování v kapalně podobě, protože je nutné při zkvalňování v závislosti na tomto koeficientu měnit technologický proces (nejdříve je potřeba pro ochlazení pod určitou hodnotu plyn stlačovat a následně teprve expandovat). (3)

Chemický vzorec:	H ₂
Elektronová konfigurace:	1s ¹
Molární hmotnost:	2,016 g·mol ⁻¹
Oxidační číslo:	-1,1
Teplota vznícení:	510 °C
Dolní mez výbušnosti se vzduchem:	4 % obj. (3,4 mg·dm ⁻³)
Horní mez výbušnosti se vzduchem:	77 % obj. (63 mg·dm ⁻³)
Dolní mez výbušnosti s kyslíkem:	4 % obj.
Horní mez výbušnosti s kyslíkem:	95 % obj.
Výhřevnost:	120,04 MJ·kg ⁻¹
Inverzní teplota:	-68,15 °C
Bod tání:	-259,2 °C
Bod varu:	-252,87 °C
1 mg·dm ⁻³ :	12 225 ppm
1 ppm:	0,0817 mg·m ⁻³
Barva; pach:	bezbarvý; bez chuti a zápachu
Vhodné hasivo:	voda, suchý prášek, pěna
Zvláštní upozornění:	možnost samovznícení expanzním teplem
Rozpustnost ve vodě (při 20 °C):	1,93 mg·dm ⁻³
Podmínky, kterých je nutno se vyvarovat:	teploty nad 50 °C
Látky, s nimiž výrobek nesmí přijít do styku:	oxidanty

Tabulka 7: Fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku (3) (19) (20) (21)

V dopravě je nyní pro snižování uhlíkové stopy využíváno více alternativních zdrojů energie, jak plyných, tak kapalných. Tabulka 8 srovnává vodík s nejpoužívanějšími běžnými a alternativními palivy.

Tabulka 8 ukazuje, že vodík má výrazně nejvyšší výhřevnost v přepočtu na kilogram. Při pohledu na hustotu je ovšem zřejmé, že zde dochází k problému, jak uchovat značné objemové množství vodíku v relativně malých zástavbových prostorech vozů. Při stlačení vodíku na tlak 35 MPa je navíc zapotřebí přibližně 30 % energie obsažené ve stlačovaném vodíku. Z tohoto

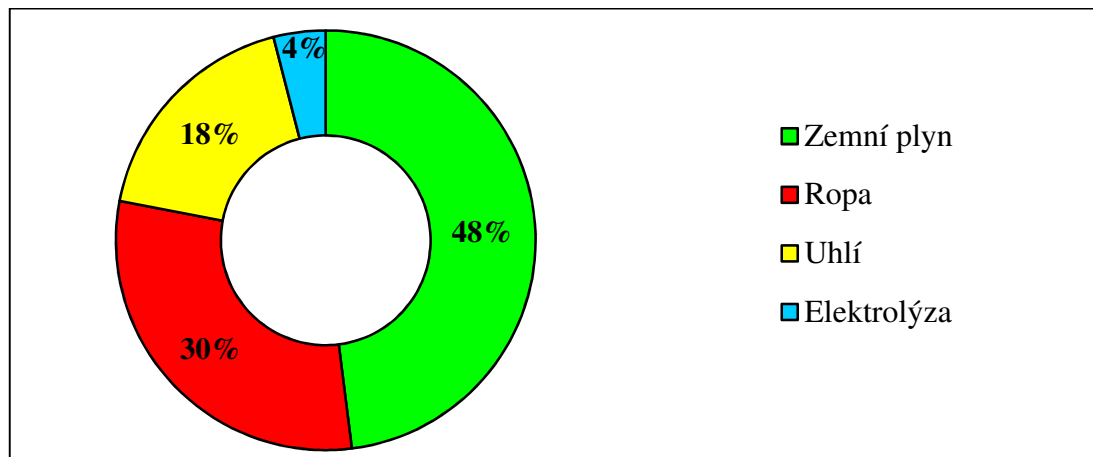
důvodu se jeví HHO generátor jako velmi vhodný, protože vodík s velmi malou hustotou není třeba nijak skladovat. Veškerý generovaný vodík se kontinuálně spotřebovává a není potřeba žádná dodaná energie na jeho stlačování nebo zkapalňování. (22)

	Vodík	Nafta	MEŘO	Benzín	LPG	CNG
Chemické složení	H ₂	cca C _x H _{l,9x}	cca C ₁₉ H ₃₅ O ₂	cca C _x H _{l,8x}	cca C _x H _{2,6x}	CH ₄
Hustota [kg/m ³] (při 15 °C)	0,0899	842	870–890	720–775	510–580	678
Výhřevnost [MJ/kg]	119,6	42,5	38,5	42–43,5	46,44	50
Výhřevnost [MJ/l] při 15 °C	0,0108	35,6	34,3	31–32,9	0,098	0,04
Teplota vznícení	510	250	300	246	460	650
Teplota plamene [K]	2400	1100	1372	1300	1700	1957
Bod varu [°C]	-253	160–360	320–360	30–210	-5– -17,7	-162
Výparné teplo [kJ/kg]	454	180	260	290	300	555
Mez hořlavosti [hm. %]	0,1–7,14	0,6–6,5	0,6–6,5	0,7–7	1,5–9	5–15
Energie jiskry [MJ]	0,02	-	-	0,24	0,26	0,3
Stechiometrický poměr	34,33	14,6	13,2	14,7	15	17,2

Tabulka 8: Srovnání vodíku s ostatními palivy (23)

2.3.7.2 Výroba vodíku

Jak ukazuje obrázek 7 vodík je aktuálně vyráběn v drtivé většině z neobnovitelných zdrojů, což je zcela v rozporu s myšlenkou použití vodíku jako obnovitelného paliva. (17)



Obrázek 7: Procentuální podíl výroby vodíku (17)

2.3.7.3 *Elektrolýza vody*

Elektrolýza je elektrochemický jev, při němž se elektrická energie mění v chemickou energii, jejími pochody se zabývá odvětví fyzikální chemie, konkrétně elektrochemie. Obecnou podobu elektrolýzy popisuje rovnice 2.3.7.3.1. (24)

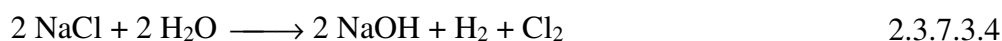


Elektrolýza probíhá pomocí dvou elektrod ponořených do elektrolytu. Elektrolyt je roztok, který umožňuje vedení elektrického proudu a elektroda je vodič, která je ve styku s nekovovou částí obvodu – elektrolytem. Během elektrolýzy dochází k disociaci, což je jev, při kterém se při rozpouštění elektrolytu rozpadají složitější molekuly (H_2O) na jednodušší fragmenty, ale elektricky nabitě ($\text{H}^+ + \text{OH}^-$). Disociace vody probíhá za působení stejnosměrného proudu procházejícího elektrodami. Zjednodušeně tak disociaci vody popisuje rovnice 2.3.7.3.2, která se současně využívá k výpočtům. Skutečný děj ale probíhá složitěji, neb samostatný iont H^+ nemůže existovat. Skutečný děj tak popisuje rovnice 2.3.7.3.3.



Během elektrolýzy může dojít k nevyžádanému přepětí, což je jev, při kterém dochází k reakcím na elektrodě při vyšším napětí, než jaké odpovídá výpočtu. Je způsobeno zpomalením některých procesů na elektrodě.

Při elektrolýze v HHO generátoru je nutné se vyhnout znečištění elektrolytu, především solemi chloridů. Jsou-li přítomny chloridy, dochází na anodě k vývinu chloru, který následně působí korozní škody v motoru (rovnice 2.3.7.3.4), především ve styku s hliníkem a jeho slitinami.



Účinnost elektrolýzy samotné je asi 70 %. Fyzikálně-chemický výzkum v tomto směru, dává reálnou šanci zvýšit účinnost elektrolýzy až na 90 % (vliv teploty, katalytických aktivit a materiálů elektrod). Celková účinnost elektrolýzy se však pohybuje okolo hodnoty 30 %. (24)

Jako elektrolyt se užívá roztok hydroxidu draselného (KOH), nebo hydroxidu barnatého ($\text{Ba}(\text{OH})_2$). Elektrolyzér může pracovat za atmosférického tlaku 0,1 MPa nebo při tlaku 3 MPa. Přestože je teoretická spotřeba elektrické energie na výrobu 1 m³ vodíku 2,8 kWh, její skutečná hodnota je vzhledem ke ztrátám kolem 5 kWh.

Pro orientaci literatura uvádí množství vodíku generovaného elektrolýzou. Proud 1 ampér vyloučí za sekundu 0,0105 mg vodíku a 0,0829 mg kyslíku. I v elektrolytech je proud úměrný napětí na elektrodách a platí zde Ohmův zákon ($U=I \cdot R$). Kde R je odpor elektrolytu, který závisí nejen na druhu a koncentraci roztoku, ale i na velikosti a tvaru zaujímaného prostoru a také na velikosti a poloze elektrod. (25)

2.3.7.4 Použití vodíku ve spalovacích motorech

Díky snadné zápalnosti vodíku a jeho nízké teplotě samovznícení je možné jej jako palivo využít ve vznětových motorech. Princip je obdobný jako u provozu zážehového motoru na plynná paliva – například LPG. Současně se také analyzují možnosti využití duálního palivového systému, kde je do běžného vznětového motoru přimícháván vodík do sání. Prezence vodíku ve spalovacím prostoru potom může svými vlastnostmi ovlivnit rychlost spalování a teplotu hoření a zajistit tak dokonalejší prohoření směsi. Tabulka 9 zobrazuje výsledek testování jednoválcového vznětového motoru s objemem 825 cm³, kde byly porovnávány různé palivové systémy. Teoretický výstupní výkon při použití pouze nafty je 9 kW. Vodík v sání může mít různý vliv na výkon způsobený rychlostí vznícení směsi. Pro dosažení ideálního vznícení směsi je nutné nasátou směs přehřívát, a to až na 827 °C. (26)

	Přímý vstřík nafty a vodík v sání	Přímý vstřík vodíku
Výstup hřídele [%]	33,9	42,8
Chladicí systém [%]	31,2	17,3
Výfukové plyny [%]	34,9	39,9
Výkon na hřídeli [kW]	8,95	10,28

Tabulka 9: Energetická bilance vznětového motoru s různými palivovými systémy (26)

Vodík je ale ve spalovacím motoru také možno využít nejen jako palivo, ale i aditivum pro čištění, literatura také uvádí, že vodík je možné použít pro čištění karbonových usazenin v motoru. (27)

2.4 Měření emisí vozu

Měření emisí vozů na území Evropské unie probíhalo, a i nadále probíhá dle zkušebních cyklů. Během těchto cyklů je zaznamenávána produkce emisí, jež musí být v rámci tolerance, viz tabulka 10. Jízdní cyklus je jasně definovaný ujetou vzdáleností za čas a současně dosažení potřebné rychlosti za čas (pro názornost viz obrázek 8). Dle legislativy Evropské unie platí, že od 1. 9. 2018 musejí být všechny nové typy vozů testovány podle tzv. WLTP. Tato metodika nahradila dříve využívaný jízdní cyklus NEDC (New European Driving Cycle), který byl ze značné části převzat z měřících cyklů 70. let a neodrážel tak aktuální realitu jízdního profilu.

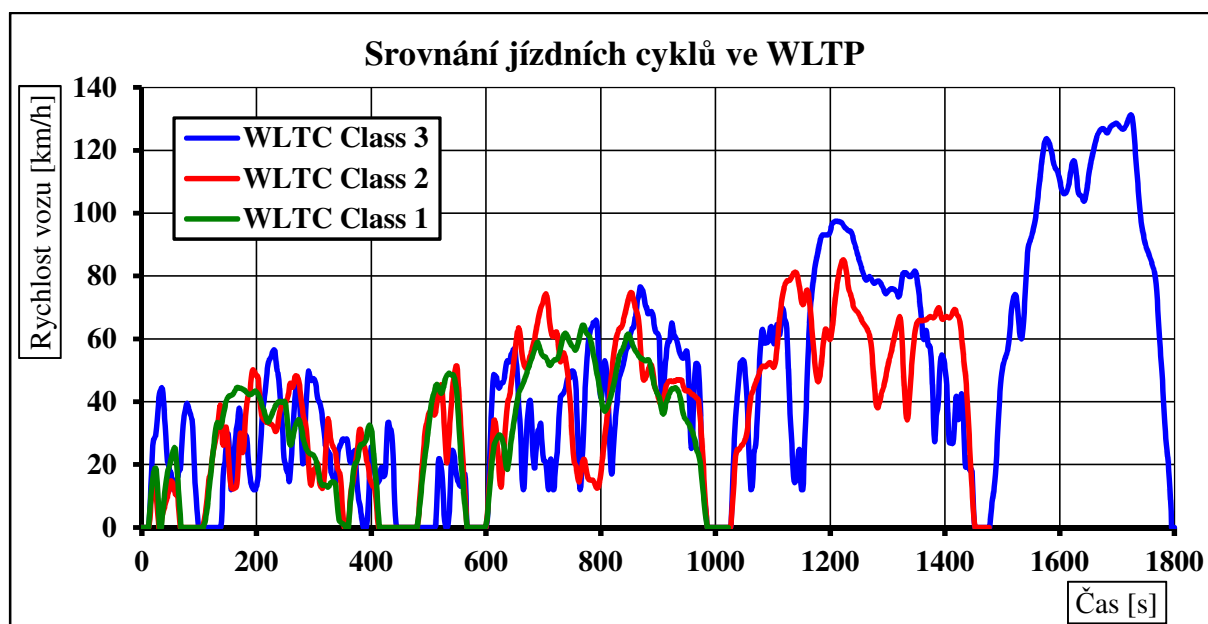
		CO	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
Norma	Rok zavedení	g/km				#/km
Euro I	1992	2,72	0,97	-	0,14	-
Euro II	1996	1,0	0,7 - 0,9	-	0,08 - 0,1	-
Euro III	2000	0,64	0,56	0,5	0,05	-
Euro IV	2005	0,5	0,3	0,25	0,025	-
Euro V a	2009	0,5	0,23	0,18	0,005	-
Euro V b	2011	0,5	0,23	0,18	0,005	6·10 ¹¹
Euro VI b-d	2014–2020	0,5	0,17	0,08	0,005	6·10 ¹¹

Tabulka 10: Přehled emisních norem v Evropské unii (28)

2.4.1 WLTP

WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) je celosvětově unifikovaný postup měření emisí a spotřeby osobních vozů a lehkých užitkových vozů. Od WLTP se očekává reálnější zjištění hodnot spotřeby a produkce emisí, jež se v reálném provozu od katalogových listů často značně lišily. Celkově se tak od původního testovacího evropského cyklu liší navýšením celkové ujeté vzdálenosti, průměrné rychlosti ale i maximální rychlosti. WLTP také rozděluje testované vozy do třech kategorií, podle poměru výkonu k hmotnosti vozu. Jedná se o takzvané Power/Weight ratio, kde $PWr = \text{výkon vozu} / \text{pohotovostní hmotnost}$.

- Kategorie 1 – vozy s nízkým poměrem $PWr \leq 22$
- Kategorie 2 – vozy s poměrem $PWr \leq 34$
- Kategorie 3 – vozy s poměrem $PWr > 34$



Obrázek 8: Graf porovnání kategorií jízdních cyklů (29)

3 Cíl práce

Uvedená problematika produkce emisí vznětových motorů klade na konstruktéry a výzkumná centra automobilových koncernů značné požadavky na jejich redukci, a to jak z hlediska morálně – zdravotního, tak převážně z důvodů současné legislativy. Většina konvenčních řešení již byla vícekrát zkoušena i aplikována. V současnosti se dostávají do popředí i méně účinná řešení. Ve snaze minimalizovat uhlíkovou stopu a minimalizovat emise je za potřebí zkusit a případně aplikovat jakékoliv řešení.

Cílem této práce je:

- Navržení matice měření
- Montáž generátoru HHO plynu na konvenční vozidlo
- Měření a vyhodnocení vlivu HHO generátoru na produkci emisí
- Měření a vyhodnocení vlivu HHO generátoru na spotřebu vozu
- Měření a vyhodnocení vlivu HHO generátoru na výkon motoru

Z těchto cílů tak vycházejí možné hypotézy:

1. Produkované množství HHO plynu z namontovaného generátoru nebude mít znatelný vliv ani na produkci emisí, spotřebu ani na výkon motoru.
2. Produkované množství HHO plynu minimálně sníží výkon motoru a současně zvýší spotřebu paliva a produkci oxidu uhličitého.
3. Produkované množství HHO plynu se pozitivně projeví na produkci nespálených uhlovodíků, ale současně se zvýší produkce oxidů dusíku.
4. Produkované množství HHO plynu se pozitivně projeví na produkci pevných částic

4 Metodika práce

4.1 Použitý typ vozidla a generátor HHO plynu

Vozidlo pro měřicí účely bylo použito ze školního vybavení, stejně tak HHO generátor byl zakoupen nově jako součást vybavení Katedry vozidel a pozemní dopravy.

4.1.1 HHO generátor

Použitý generátor plynu je HHO generátor DCT212 volně dostupný na e-shopu <http://www.h2shop.cz>. V nabídce e-shopu je několik generátorů podobných vlastností, lišících se převážně napájecím napětím, výkonem, a tedy i produkcí plynu. Základní údaje o generátoru (tabulka 11) a ilustrační fotografie (obrázek 9) jsou uvedeny níže.

Technické údaje:

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	2x 12 V
Rozměry	200x200x110mm
Elektrody	316L 0,8mm
Výroba plynu	180 dm ³ ·hod ⁻¹ při 30 A

Tabulka 11: Základní technické údaje o HHO generátoru



Obrázek 9: HHO generátor osazený na testovaném vozidle (30)

4.1.2 Typ vozu

Testovaným vozem byla Škoda Roomster. Vůz je osazen tříválcovým vznětovým motorem s přímým vstřikem paliva a turbodmychadlem s variabilní geometrií lopatek.

Parametr	Hodnota
Objem motoru:	1422 cm ³
Maximální výkon:	59 kW při 4000 min ⁻¹
Maximální točivý moment:	195 Nm při 2200 min ⁻¹
Exhalační norma:	EURO 4
Spotřeba paliva (kombinace):	5,2 dm ³ na 100 km
Emise CO ₂ :	135 g·km ⁻¹
Převodový poměr IV. rychlostního stupně:	0,97
Převodový poměr diferenciálu:	3,389

Tabulka 12: Základní parametry testovaného vozidla

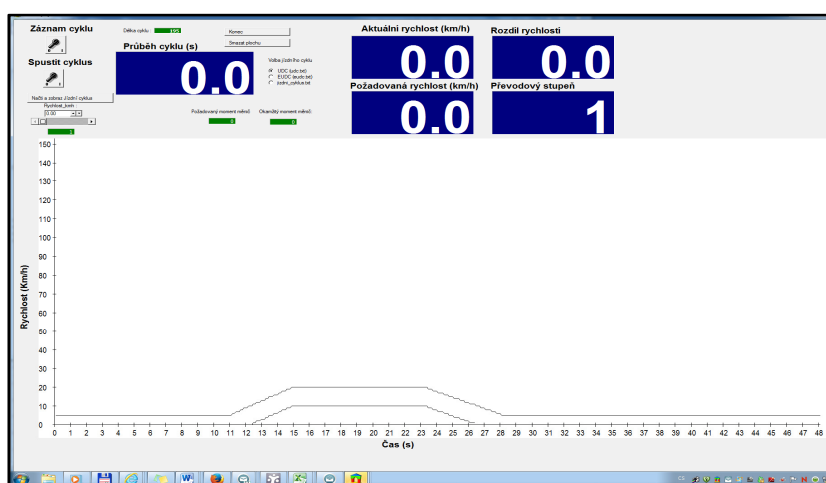
4.2 Použité měřicí přístroje, software a příslušenství

4.2.1 Válcová zkušebna

Jedná se o modernizovanou válcovou zkušebnu firmy Schenck, typ S3604/GS56 z roku 1983 určenou pro homologaci vozidel do 3 500 kg. Zkušebna se skládá ze dvou vzájemně řetězem propojených válců. Jeden z válců je opatřen protiskluzovým povrchem pro zlepšení adhezních podmínek. K válcům je možné připojit sadu setrvačnicků, které mají za úkol simulovat různou hmotnost vozidla. Různou kombinací připojených setrvačnicků lze simulovat odlišné hmotnosti vozidel. Z druhé strany jsou k válcům připojeny brzdové systémy. Na hlavní hřídel je připojen stejnosměrný elektrický motor o výkonu 56 kW, který vytváří simulaci odporu vzduchu. K druhému válci byla dodatečně připojena vířivá brzda o výkonu 125 kW, jež slouží pro účely statického měření výkonu. Celá válcová zkušebna je ovládána pomocí elektronického systému Datalab od firmy Moravské přístroje a.s. Podrobně technické informace o válcové zkušebně zobrazuje tabulka 13.

Parametr	Hodnota
DC motorgenerátor	Maximální brzdný výkon 56 kW
	Maximální brzdný moment 305 Nm
	Maximální otáčky 3000 min ⁻¹
Vířivý dynamometr	Maximální brzdný výkon 125 kW
	Maximální brzdný moment 478 Nm
	Maximální otáčky 8000 min ⁻¹
Válce zkušebny	Dva válce, sloužící k přenosu energie mezi vozidlem a zkušebnou
	Obvod válců 1145 mm
Setrvačníky zkušebny	Základní simulovaná hmotnost 680 kg
	Přídavné hmotnosti: 900 kg, 450 kg, 225 kg, 120 kg, 112,5 kg.

Tabulka 13: Základní technické parametry válcové zkušebny



Obrázek 10: Ukázka softwaru pro simulaci jízdy v měřícím cyklu

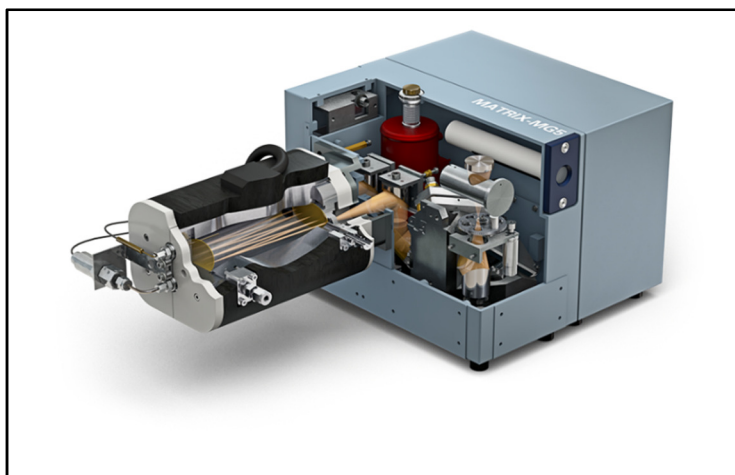
Obrázek 10 představuje ukázkou softwaru ControlWeb, vytvořeného zaměstnanci Katedry vozidel pozemní dopravy České zemědělské univerzity určeného pro simulaci jízdního cyklu. Na vodorovné ose je čas, který se kontinuálně posouvá. Na svislé ose je potom rychlost vozidla. Dvě rovnoběžné čáry v prostoru grafu definují limity rychlosti, ve kterých se má řidič během jízdy nacházet. Aktuální rychlost vozu je v tomto prostředí realizovaná černým bodem.

4.2.2 Analyzátor plynných emisí

Plynné emise (CO, CO₂, NO_x, HC, CH₄) byly analyzovány spektrálním analyzátozem Matrix MG – 5 (tabulka 14, obrázek 11).

Parametr	Hodnota
Rozlišení:	Lepší než 1 cm ⁻¹
Rychlost skenování:	5-32 spekter·s ⁻¹
Spektrální rozsah:	650-5000 cm ⁻¹
Délka měřicí cely:	2 m
Příkon vyhřívání cely:	220 W
Příkon spektrometru:	65 W
Připojení:	Ethernet

Tabulka 14: Technické parametry analyzátoru plynných emisí Midac I1801-E



Obrázek 11: Spektrální analyzátor Matrix MG - 5 (31)

4.2.3 EEPS velikostní klasifikátor pevných částic

Množství pevných částic ve výfukových plynech bylo analyzováno pomocí částicového analyzátoru TSI EESP 3090. Tento analyzátor rozděljuje pevné částice do několika velikostních spekter. Samotné počítání pevných částic probíhá až po jejich zředění. Technické parametry a obrázek analyzátoru viz tabulka 15 a obrázek 12.

Parametr	Hodnota
Velikostní rozsah částic:	5,6-560 nm
Rozlišení:	32 kanálů
Vzorkovací frekvence:	10 Hz
Průtok vzorku:	10 dm ³ ·min ⁻¹
Teplota vzorku:	10-52 °C
Provozní teplota:	0-40 °C
Autokorekce tlaku:	70-103 kPa

Tabulka 15: Technické parametry částicového analyzátoru TSI EESP 3090



Obrázek 12: Částicový analyzátor TSI EESP 3090 (32)

4.2.4 Diagnostický systém vozu

Pro okamžitou komunikaci s řídicí jednotkou vozidla byl použit diagnostický software VAG-COM VCDS. Tento program slouží pro diagnostiku, čtení naměřených hodnot a sledování funkce akčních členů. Diagnostický software v průběhu měření zaznamenává v závislosti na čase otáčky motoru a hodnotu průtoku vzduchu určenou čidlem MAF potřebnou pro zpracování v kapitole 6.

4.2.5 Náporový ventilátor

Mechanický ventilátor pro chlazení vozidla připojeného na válcovou zkušebnu je nutný. Primární ventilátor chladicí soustavy vozu není schopný uchlazení stojící vozidlo na válcové zkušebně při měření vnější výkonové charakteristiky. Před vozidlo se tak umísťuje náporový ventilátor (tabulka 16). Jedná se o modifikovanou verzi odsávacího ventilátoru Filcar AR – 1500/C umístěného na mobilní konstrukci.

Parametr	Hodnota
Výkon motoru:	11 kW
Napájecí napětí:	400 V
Maximální průtok vzduchu:	12 000 m ³ /h
Regulace průtoku vzduchu:	3 800 – 12 000 m ³ /h
Hmotnost:	203 kg

Tabulka 16: Základní parametry náporového ventilátoru

4.3 Matice měření

Matice měření je pro přehlednost znázorněna graficky, viz obrázek 13.



Obrázek 13: Schéma matice měření

Měření bude probíhat dle matice ve dvou krocích. Vůz se umístí na válcovou zkušebnu a proti pohybu se zajistí mimo ruční brzdou také pásovými úvazy. Před kapotu vozu bude též umístěn náporový ventilátor pro zlepšení chlazení. Jako první proběhne ohřátí motoru, převodovky a pneumatik při několika zkušebních jízdách dílčích částí cyklu. Po seznámení se s odlišnostmi chování vozu na válcové zkušebně se zahájí sběr dat z analyzátorů, palubní diagnostiky a z válcové zkušebny. V první části bude vůz změřen v konvenčním uspořádání ve třech po sobě jdoucích jízdách cyklu WLTC C3. Následně bude provedeno měření vnější výkonové charakteristiky, které bude sloužit k porovnání vlivu HHO generátoru na výkon motoru, který sice není řešen v rámci zadání diplomové práce, ale jeho případně změněná hodnota bude vedle hodnot produkce emisí zajímavým výstupem. Po odměření konvenčního uspořádání se na vůz připojí HHO generátor. Do sání za váhu vzduchu se umístí výstupní hadice vedoucí HHO plyn a napájení generátoru bude připojeno na akumulátor vozu přes pojistku 30 A.

5 Praktická část práce

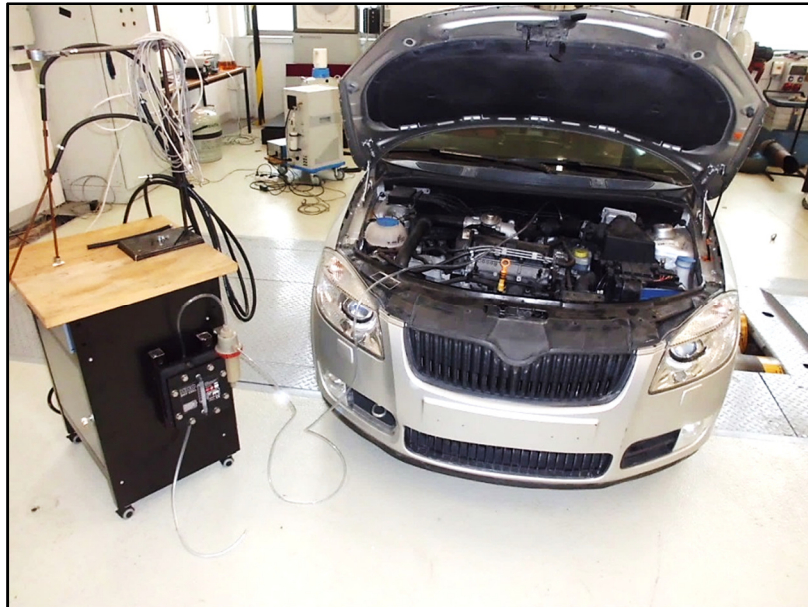
5.1 Instalace HHO generátoru na vůz

Instalace HHO generátoru na konvenční vozidlo je vcelku jednoduchá, vyžaduje pouze základní dílenské vybavení. Pro připojení výstupní hadičky s plynem je zapotřebí vytvořit otvor v sání a důkladně jej zatěsnit. Zvolené místo bylo určeno za váhou vzduchu, aby plyn směs pouze obohacoval a jeho objem a hmotnost tak byla při výpočtech zanedbána. Vyrvání otvoru proběhlo do plastové příruby sání po její demontáži, protože bylo nutné jí důkladně vyčistit od padajících špon z vrtání, které by mohly kontaminovat spalovací prostor. Pro připojení do plastu byla zvolena šroubovací mosazná spojka hadic (detail napojení viz obrázek 14). Utěsnění v místě připojení potom proběhlo epoxidovou pryskyřicí. Takto upravené sání bude možné i v budoucnu využívat jako konvenční vůz použitím prosté záslepky na spojce hadic, aby bylo zamezeno nasávání falešného vzduchu.



Obrázek 14: Detail připojení výstupu z HHO generátoru do sání motoru za váhou vzduchu (autor)

HHO generátor se sice může jevit jako kompaktní zařízení, ovšem umístit jej do konvenčního vozidla přesně vertikálně, a ještě se zásobníkem kapaliny pro elektrolýzu může být problém. Bylo proto rozhodnuto, že pro účely měření bude generátor umístěn vedle vozu na mobilní konstrukci (obrázek 15), která může v budoucnu sloužit k připojení na různé testované vozy. Napájení generátoru bylo řešeno přímo z palubního akumulátoru. Pro roztok elektrolytu byl zvolen hydroxid draselný (KOH) v ředícím poměru 6 g KOH na 1 dm³ destilované vody. Daný ředící poměr uvádí literatura jako nejvhodnější. (33)



Obrázek 15: Vůz připravený na válcové zkušební s připojeným HHO generátorem (autor)

5.2 Zpracování produkce plynných emisí

Produkce plynných emisí bude zpracována pomocí přepočtu z množství nasávaného vzduchu určeného palubní diagnostikou (viz kapitola 4.2.4) v závislosti na koncentraci plynných částic ve výfukové soustavě (kapitola 4.2.2).

$$m_{XY_z} = \frac{\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{\text{MAF}}{M_m} \cdot C_{XY_z} \cdot M_{XY_z} \cdot dt}{d} \quad 5.2.1.1.1$$

Kde:

- m_{XY_z} : Hmotnostní tok škodlivé látky na 1 km [$\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$]
- t_{start} : Počáteční čas měřicího cyklu = 0 [s]
- t_{end} : Konečný čas cyklu = 1800 [s]
- MAF: Okamžitá hmotnost nasávaného vzduchu [$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$]
- M_m : Molární hmotnost vzduchu = 28,96 [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]
- C_{XY_z} : Koncentrace škodlivé látky ve výfukových plynech [%]
- M_{XY_z} : Molární hmotnost škodlivé látky = viz například tabulka 2 [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]
- d: Vzdálenost ujetá při jízdě = 23,266 [km]

Současně je možné provést kontrolní výpočet určením objemu vzduchu nasátého do válce a přepočtu z ppm na gramy v rámci dané objemové jednotky dle vzorce 5.2.1.1.2. Tento výpočet ale může být zatížen drobnou nepřesností při převodu z hmotnosti vzduchu na objem

a současně při násobení hodnotou hmotnosti 1 ppm, kde není k dispozici v literatuře dostatek desetinných míst pro přesné vypočtení. Tento druh výpočtu je tak dobré provést ne pro prezentaci výsledků, ale pro kontrolu hlavního výpočtu.

$$XY_z = \frac{\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} V_{\text{MAF}} \cdot C_{\text{XY}} \cdot \delta}{d} \quad 5.2.1.1.2$$

Kde:

- XY_z : Produkce počítané emisní složky [$\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$]
- t_{start} : Počáteční čas měřicího cyklu = 0 [s]
- t_{end} : Konečný čas cyklu = 1800 [s]
- V_{MAF} : Objem nasátého vzduchu [m^3]
- C_{XY} : Koncentrace počítané emisní složky ve výfukových plynech [ppm]
- δ : Přepočtový koeficient z ppm [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] (viz například tabulka 1)
- d : Vzdálenost ujetá při jízděm cyklu = 23,266 [km]

5.3 Zpracování produkce pevných částic

Produkce pevných částic byla změřena jako absolutní četnost ve zředěné dávce výfukových plynů. Částicový analyzátor TSI EESP 3090 byl během měření nastaven na ředící poměr 1:200. Výsledné hodnoty výpočtu je tak zapotřebí na závěr ještě vynásobit ředícím poměrem. Celkový výpočet je potom dle vzorce 5.3.1.1.1.

$$\# = \frac{\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{\text{MAF}}{M_m} \cdot V_m \cdot 200 \cdot C_{\text{pm}} \cdot dt}{d} \quad 5.3.1.1.1$$

Kde:

- $\#$: Počet pevných částic vyprodukovaných na 1 km [ks.]
- t_{start} : Počáteční čas měřicího cyklu = 0 [s]
- t_{end} : Konečný čas cyklu = 1800 [s]
- MAF : Okamžitá hmotnost nasávaného vzduchu [$\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$]
- M_m : Molární hmotnost vzduchu = 28,96 [$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$]
- V_m : Molární objem vzduchu = 22,4 [$\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$]
- C_{pm} : Počet částic v měřeném vzorku [$\# \cdot \text{cm}^{-3}$]

5.4 Zpracování spotřeby paliva vozu

Spotřeba vozu bude měřena nepřímou metodou, a to pomocí přepočtu z plyných emisí v poměru na objem nasávaného vzduchu v závislosti na obsahu uhlíku v palivu.

$$m_{\text{paliva}} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{\text{MAF}}{M_m} \cdot C_{\text{CO}_2} \cdot \frac{M_c}{m_{\text{cp}}} \cdot dt \quad 5.4.1.1.1$$

Kde:

- m_{paliva} : Hmotnostní spotřeba paliva za cyklus [g]
- t_{start} : Počáteční čas měřicího cyklu = 0 [s]
- t_{end} : Konečný čas cyklu = 1800 [s]
- MAF: Okamžitá hmotnost nasávaného vzduchu [g]
- M_m : Molární hmotnost vzduchu = 28,96 [g·mol⁻¹]
- C_{CO_2} : Koncentrace oxidu uhličitého ve výfukových plynech [%]
- M_c : Molární hmotnost uhlíku = 12,0107 [g·mol⁻¹]
- m_{cp} : Hmotnostní podíl uhlíku v palivu = 0,863 [-]

Veškeré výpočty v kapitole 5.2 - 5.4 jsou integrovány dle času. Rozlišení „dt“ je rovno jedné sekundě. Numerická integrace byla provedena v programu MS Excel, kde v rámci jedné sekundy proběhlo vypočtení v rámci daného řádku. Použité analyzátory však používají různou vzorkovací frekvenci, předně tak bylo nutno všechna data převést do tabulky se stejným časovým rozlišením rovným jedné sekundě. Normalizované datové sady tak bylo dosaženo aproximací datových bodů prostřednictvím lineární interpolace. Ruční vyhledávání a zpracování by bylo velmi náročné vzhledem k množství dat (6 měření po cca 1900 řádcích). Byl proto vytvořen krátký script (viz příloha) v programovacím jazyce Kotlin a jeho funkcí byla data upravena na potřebné časové rozlišení.

5.5 Zpracování vnější výkonové charakteristiky

Vnější výkonová charakteristika se zpracovává z vícestupňového měření. V první části se zařadí jeden zvolený rychlostní stupeň. V rámci přenosu točivého momentu na válce se spíše volí vyšší stupeň, aby se jednalo o převodování na vyšší otáčky a nižší točivý moment. Následně se vůz rozjede na maximální rychlost daného převodu až do regulátoru / omezovače otáček. Po dosažení těchto maximálních otáček se postupně zvyšuje zátěž na válce v podobě navyšování točivého momentu na vířivém dynamometru. Při postupném zvyšování momentu

dochází k postupnému poklesu otáček. Při poklesu pod kritickou mez (ideálně volnoběžné otáčky) je měření ukončeno.

Výsledkem jsou data, která udávají hodnotu maximálního točivého momentu v závislosti na otáčkách válců. Tyto hodnoty je však nutné přepočítat pomocí převodového poměru mezi koly vozu a válci zkušebny. Stejně tak je potřeba přepočítat převodový poměr v závislosti na zařazeném rychlostním stupni a převodovém poměru diferenciálu (tabulka 12).

K výsledným přepočteným hodnotám redukováným na převodový poměr je ještě třeba dopočítat ztrátový moment. Vzhledem k tomu, že válcová zkušebna měří výkonové parametry na kolech, je třeba přičíst moment ztrácející se v převodovém ústrojí a mezi koly dle vzorce 5.5.1.1.1. Tento ztrátový moment je řešen vyřazením převodového stupně a roztočením válců zkušebny DC motor generátorem. Při konkrétní rychlosti je vždy při ustáleném režimu odečten potřebný moment na pohánění. Měření se opakuje při různých rychlostech pro minimálně pět bodů. Z těchto bodů je poté možné vytvořit závislost pasivních ztrát na rychlosti vozu. Změřené body se následně proloží křivkou, vytvoří se rovnice trendu a výpočtem se interpolují a extrapolují data pro celou vnější výkonovou charakteristiku (obrázek 23). Následně je dopočten výkon motoru dle přepočteného točivého momentu a aktuální hodnoty otáček klikové hřídele, přepočtené na úhlovou rychlost dle vzorce 5.5.1.1.2 a 5.5.1.1.3.

$$M_{\text{motoru}} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \frac{M_{\text{válce}} + M_{\text{ztrátový}}}{i} \quad 5.5.1.1.1$$

$$P_{\text{motoru}} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} M_{\text{motoru}} \cdot \omega \quad 5.5.1.1.2$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad 5.5.1.1.3$$

Kde:

- t_{start} : Začátek měření [s]
- t_{end} : Konec měření [s]
- M_{motoru} : Výsledný točivý moment motoru [Nm]
- $M_{\text{válce}}$: Změřený točivý moment na válcích zkušebny [Nm]
- $M_{\text{ztrátový}}$: Ztrátový moment [Nm]
- i : Převodový poměr [-]
- P_{motoru} : Výsledný točivý moment motoru [Nm]
- ω : Úhlová rychlost klikové hřídele [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]
- f : Frekvence otáčení klikové hřídele [s^{-1}]

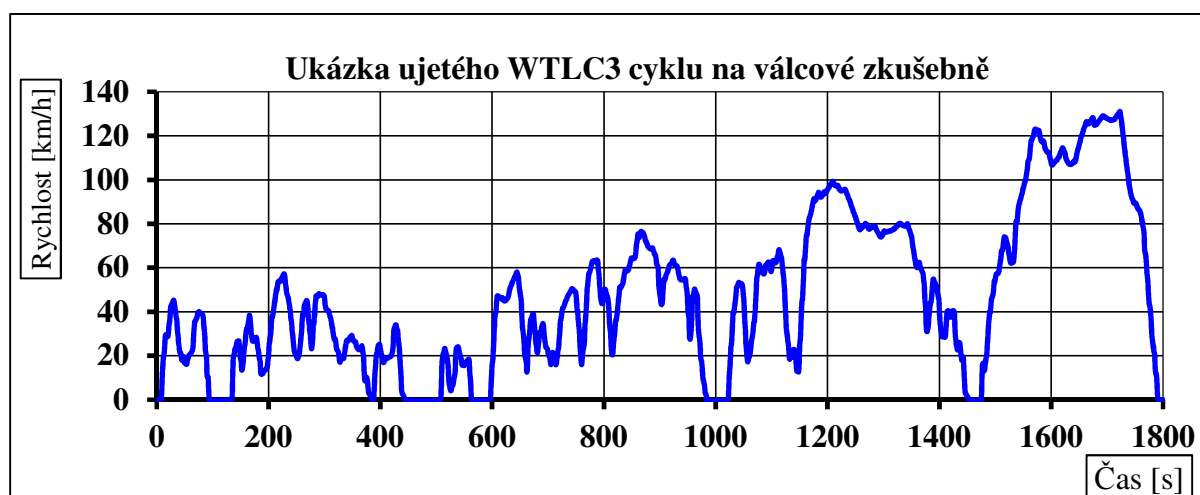
6 Výsledky

6.1 Výsledky v jízdním cyklu WLTC3

Výsledky byly zpracovány následovně:

- Průměrná spotřeba paliva za jízdní cyklus
- Průměrná produkce plynných emisí na 1 km cyklu
- Průměrná produkce pevných částic na 1 km cyklu

Průměrně zjetý cyklus WLTC3 v rámci měření autorem na válcové zkušebně prezentuje obrázek 16, pro srovnání je možné ho porovnat s oficiálním tvarem křivky, kterou ukazuje obrázek 8.



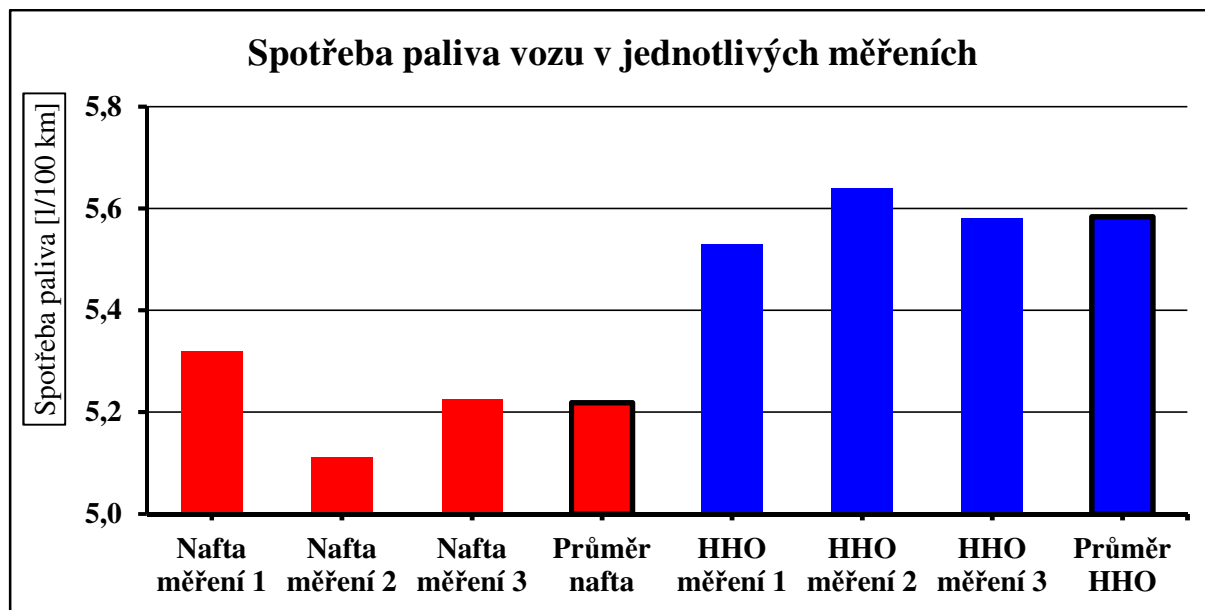
Obrázek 16: Graf průměrně zjetého WLTC3 cyklu na válcové zkušebně

6.1.1 Spotřeba

Spotřeba paliva byla řešena jako celková průměrná spotřeba. Spotřeba paliva byla měřena nepřímou metodou. Nejednalo se tedy hmotnostní vážení úbytku paliva v soustavě. Spotřeba paliva byla řešena přepočtem z produkce emisí dle vzorce 5.4.1.1.1.

Průměrná spotřeba paliva			
	Nafta	HHO	Nárůst
	[l/100 km]	[l/100 km]	[%]
Měření 1	5,32	5,53	-
Měření 2	5,11	5,64	-
Měření 3	5,23	5,58	-
Průměr	5,22	5,58	6,9 %

Tabulka 17: Výsledky spotřeby paliva



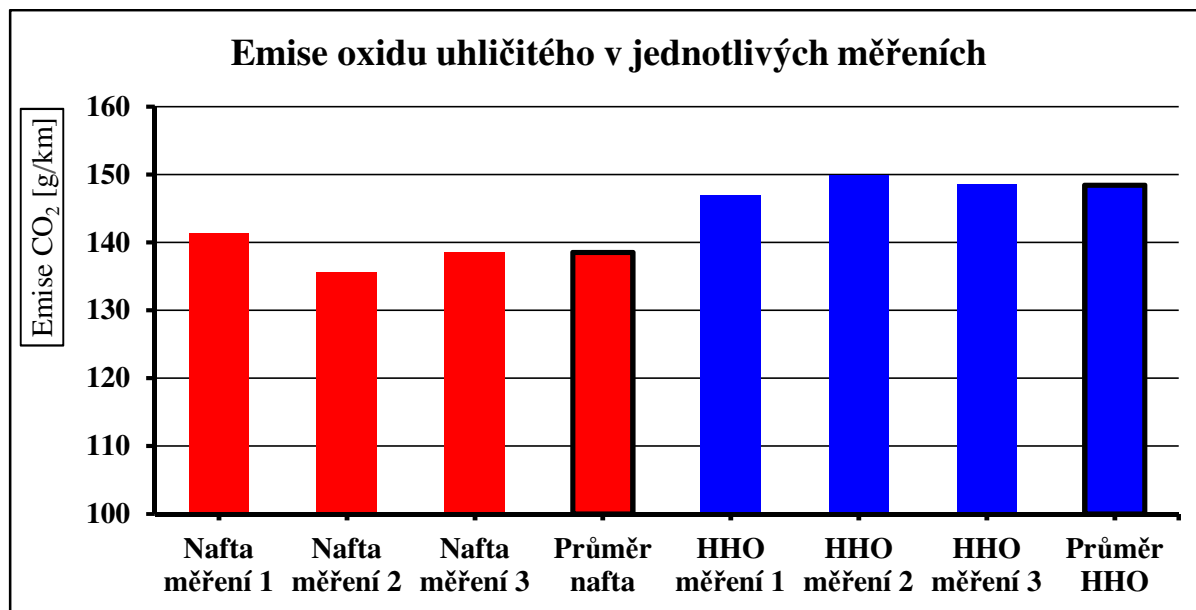
Obrázek 17: Graf spotřeby paliva testovaného vozu v různých měřeních

6.1.2 Produkce plynných emisí

Produkce plynných emisí byla řešena jako průměrná hmotnostní produkce za 1 km cyklu dle metodiky měření WLTP C3. Produkce emisí byla měřena spektrálním analyzátozem Matrix MG – 5 viz kapitola 4.2.2. Výpočet probíhal pomocí vzorce 5.2.1.1.1. Výsledky dle vzorce 5.2.1.1.2 nejsou uvedeny, protože sloužily pouze ke kontrole.

Průměrná produkce CO₂			
	Nafta	HHO	Nárůst
	[g/km]	[g/km]	[%]
Měření 1	141,3	146,9	-
Měření 2	135,7	149,9	-
Měření 3	138,6	148,5	-
Průměr	138,5	148,4	7 %

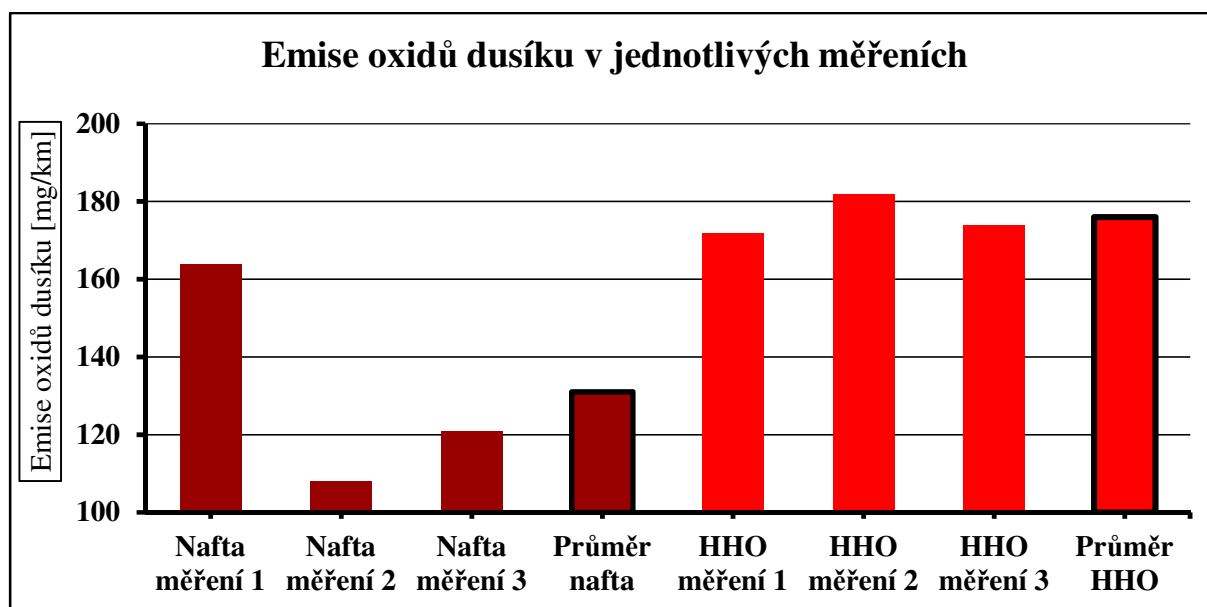
Tabulka 18: Výsledky produkce CO₂



Obrázek 18: Graf produkce emisí oxidu uhličitého testovaného vozu

Průměrná produkce NO _x			
	Nafta	HHO	Nárůst
	[mg/km]	[mg/km]	[%]
Měření 1	164	172	-
Měření 2	108	182	-
Měření 3	121	174	-
Průměr	131	176	34 %

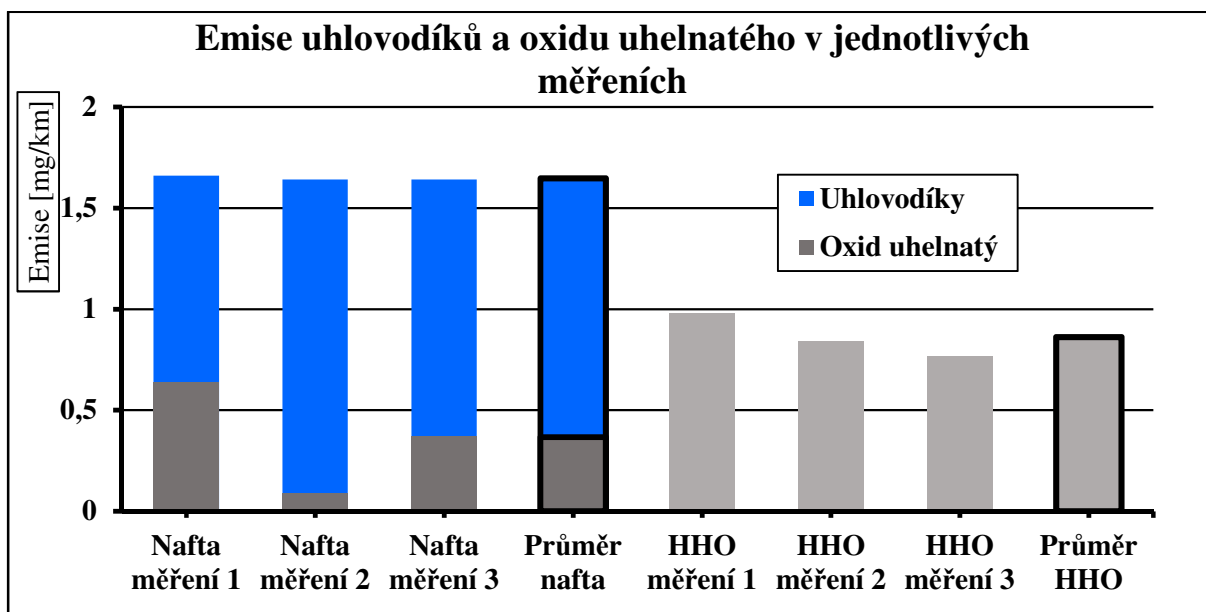
Tabulka 19: Výsledky produkce NO_x



Obrázek 19: Graf emisí oxidu uhelnatého a oxidů dusíku testovaného vozu

Průměrná produkce HC				Průměrná produkce CO			
	Nafta	HHO	Nárůst		Nafta	HHO	Nárůst
	[mg/km]	[mg/km]	[%]		[mg/km]	[mg/km]	[%]
Měření 1	1,66	0	-	Měření 1	0,64	0,98	-
Měření 2	1,64	0	-	Měření 2	0,09	0,84	-
Měření 3	1,64	0	-	Měření 3	0,37	0,76	-
Průměr	1,65	0	-100 %	Průměr	0,37	0,86	135 %

Tabulka 20: Výsledky produkce HC a CO



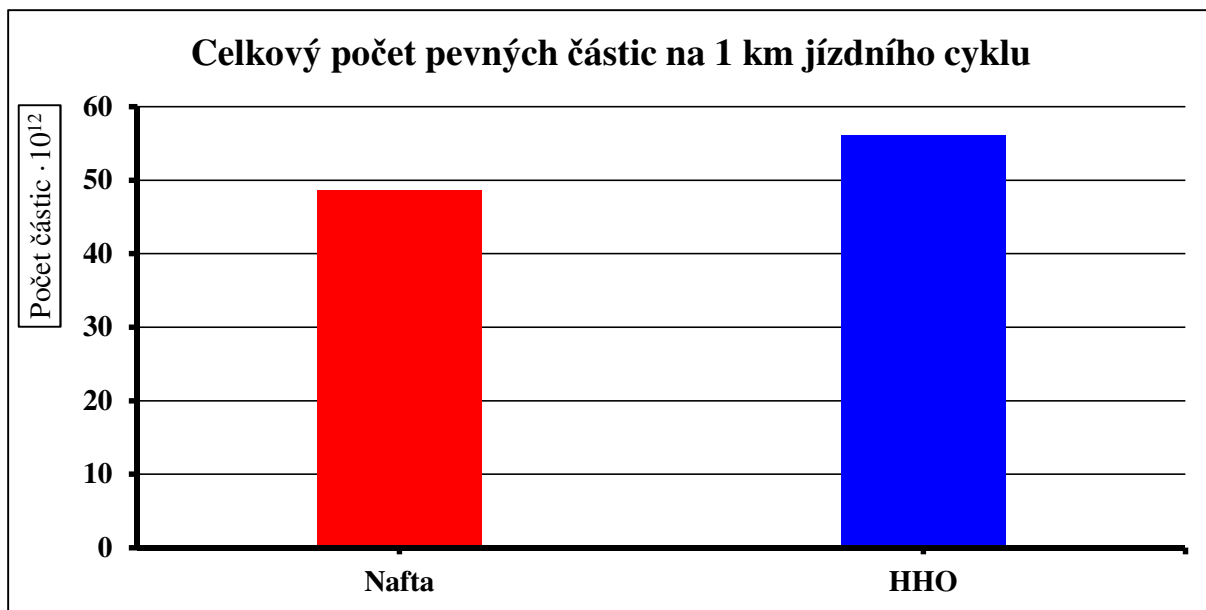
Obrázek 20: Graf emisí uhlovodíků testovaného vozu

6.1.3 Produkce pevných částic

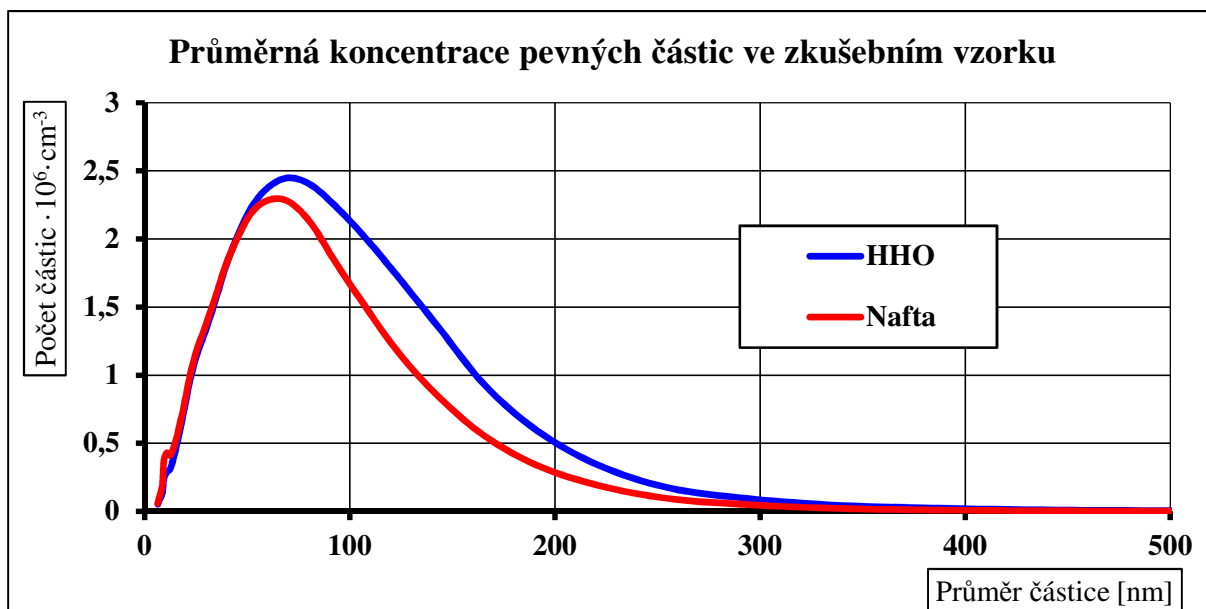
Produkce pevných částic byla po exportování dat z analyzátoru přepočtena na skutečné hodnoty pomocí vzorce 5.3.1.1.1.

Průměrná produkce pevných částic			
	Nafta	HHO	Nárůst
	[#/km]	[#/km]	[%]
Měření 1	$5,12 \cdot 10^{13}$	$5,35 \cdot 10^{13}$	-
Měření 2	$4,69 \cdot 10^{13}$	$5,77 \cdot 10^{13}$	-
Měření 3	$4,8 \cdot 10^{13}$	$5,71 \cdot 10^{13}$	-
Průměr	$4,87 \cdot 10^{13}$	$5,61 \cdot 10^{13}$	15 %

Tabulka 21: Výsledky produkce pevných částic



Obrázek 21: Graf celkového počtu pevných částic na 1 km

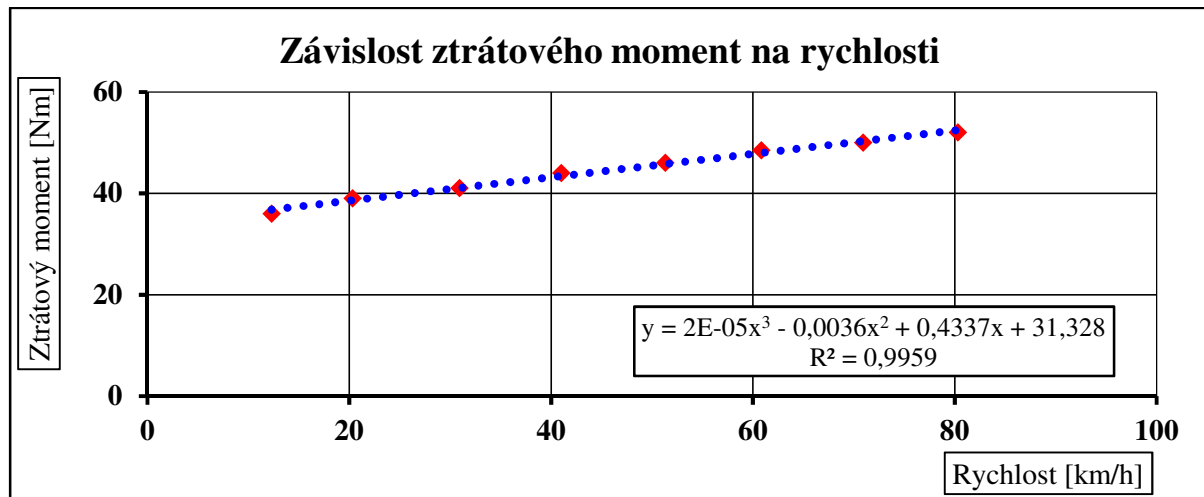


Obrázek 22: Graf průměrné koncentrace pevných částic za jízdní cyklus

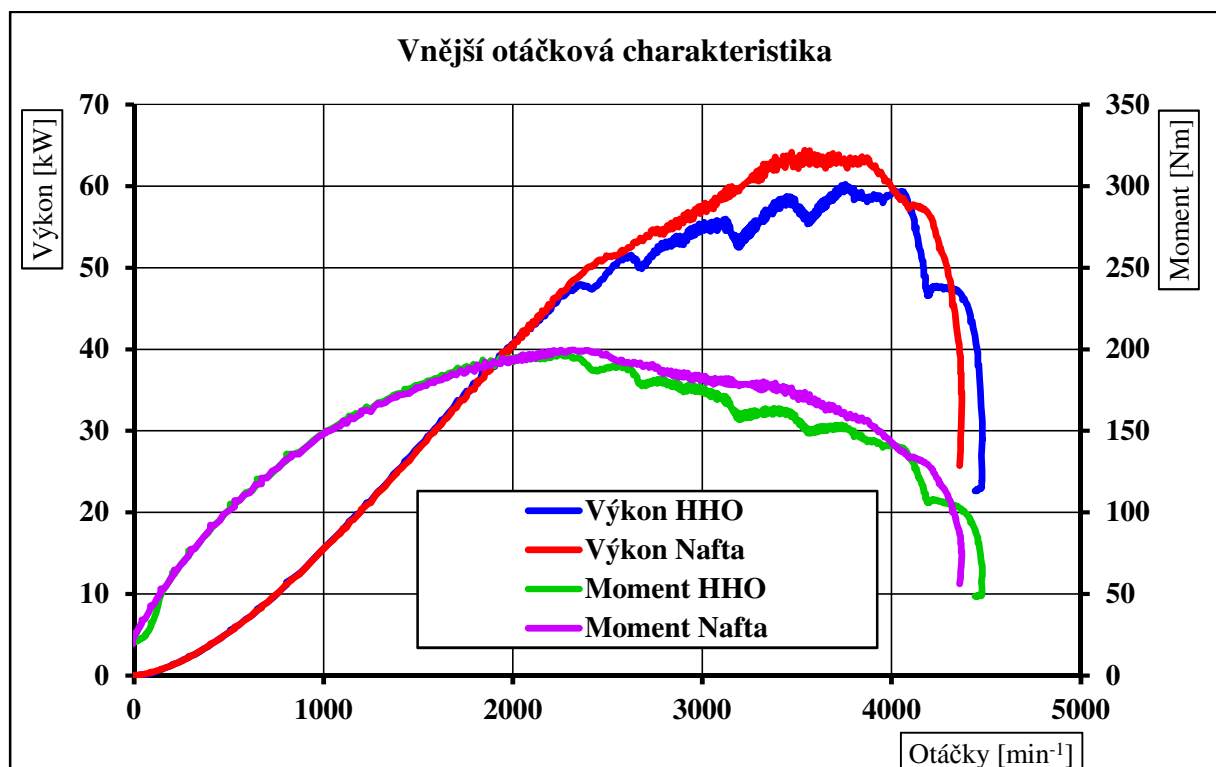
6.2 Výsledky ve vnější otáčkové charakteristice

Vnější otáčková charakteristika				
		Nafta	HHO	Nárůst
Výkon	[kW]	64,4	60,2	-6,5 %
Moment	[Nm]	199,6	197,4	-1,1 %

Tabulka 22: Výsledky vnější otáčkové charakteristiky



Obrázek 23: Závislost ztrátového momentu na rychlosti vozu



Obrázek 24: Graf vnější otáčkové charakteristiky testovaného vozu

7 Diskuze

Výsledky zobrazené v grafu vnější otáčkové charakteristiky byly úmyslně ponechány jako čáry přímo spojující jednotlivé body měření. Ačkoliv pro všeobecnou prezentaci například obchodního charakteru by bylo vhodné proložit data buď spojnici trendu polynomu vhodného stupně nebo spojnici trendu klouzavého průměru, ovšem pro účely analyzování výsledků bude vhodnější ponechat přesná data. Na křivce výkonu při použití konvenčního uspořádání (červená barva) vidíme v oblasti maximálního výkonu drobné zvlnění, které může být způsobeno nepřesnostmi měření, případně zásahy řídicí jednotky. Na modré křivce, zobrazující použití obohacené směsi o plyn z HHO generátoru jsou viditelné znatelné propady, tyto propady je možné přiřknout zvyšování zátěže na palubní síť vozu. Vinu na tomto zvyšování zátěže má právě HHO generátor, jemuž během měření znatelně kolísaly hodnoty odběru proudu. Tato zátěž se potom projeví na potřebě alternátoru odebrat vyšší výkon z klikové hřídele. Všeobecně lze označit měření za odpovídající fyzikálním zákonům, kdy připojená zátěž na klikovou hřídel nedokáže generovat potřebnou energii pro pokrytí této zátěže. Všeobecně literatura uvádí nárůst výkonu, nebo alespoň účinnosti motoru při použití vodíku pro obohacení směsi, nicméně všechny experimenty využívaly externích zdrojů pro tvorbu plynu, nebo již měli plyn zvlášť uchovaný. (26) (33)

Zvýšení emisí oxidů dusíku zaznamenala i jiná literatura (34), současně však uvádí snížení emisí oxidu uhelnatého, zvýšení točivého momentu a snížení spotřeby. Zmíněné testování však opět probíhalo s obohacováním směsi vodíkem z vnějšího zdroje, tedy za jiného testového kritéria, shoda těchto měření je tak pouze co se týče navýšení produkce oxidů dusíku.

Zvýšení produkce oxidů dusíku tak lze připsat vodíku jako obohaciteli paliva při použití ve spalovacím motoru.

Zajímavé je naprosté omezení produkce emisí nespálených uhlovodíků při obohacení směsi HHO plynem. Literatura (33) uvádí pokles produkce uhlovodíků pouze okolo 50 %. V celém měření při připojeném HHO generátoru se však nevyskytnula jiná hodnota než 0 ppm. Diskutabilní tak je, zda redukci uhlovodíků způsobila vyšší spotřeba paliva způsobená potřebou HHO generátor napájet nebo obohacení směsi. Pro ověření uvedené skutečnosti by bylo zapotřebí provést měření v několika dalších režimech, konkrétně zaměřených na rozdíl napájení HHO generátoru z externích zdrojů a napájení z palubní sítě.

Hypotézu číslo 1 je tak možné zamítnout vzhledem k faktu, že připojení HHO generátoru ke konvenčnímu vozu mělo během měření znatelný vliv jak na spotřebu paliva (nárůst o 6,9 %), tak na produkci emisí.

Hypotézu číslo 2 je možné přijmout. Za současného snížení výkonu motoru o 6,5 % (pokles z 64,4 na 60,2 kW) došlo k nárůstu spotřeby paliva a současně k zvýšení produkce oxidu uhličitého, jež je produktem dokonalého spálení paliva.

Hypotézu číslo 3 je možné přijmout, protože produkce nespálených uhlovodíků po připojení HHO generátoru klesla na nulu. Současně se ale zvýšila produkce oxidů dusíku o 34 %.

Hypotéza 4 byla zamítnuta, protože produkce pevných částic při testování vozu po osazení HHO generátorem neklesla, naopak vzrostla průměrně o 15 %. Jednalo se pouze o zvýšení produkce, velikostní koncentrace částic zůstala prakticky nezměněna.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývala, jakým způsobem ovlivní volně prodejný generátor HHO plynu emise a spotřebu konvenčního vozu se vznětovým motorem. V rešeršní části byla představena současná problematika vzniku emisí u vznětových motorů, možnosti jejich snížení a legislativní problematika v rámci homologačního procesu nových vozů. Informace byly podány i o funkci generátoru HHO plynu, jenž vyrábí plyn pomocí elektrolýzy vody napájeným z palubní sítě vozu. Praktická část potom řešila navržení matice měření, připojení generátoru na vůz a samotné měření. Měření proběhlo v rámci nového homologačního procesu WLTP, konkrétně WLTC3. Praktická část byla doplněna o naměření a zpracování vnější výkonové charakteristiky vozu, pro ukázkou ovlivnění maximálního výkonu motoru připojeným generátorem.

Výsledková část (viz kapitola 6) byla prezentována převážně v podobě grafů, které přehledně zobrazují průběh změn při měřeních, současně však byly uvedeny i tabulky s konkrétními hodnotami. Zpracované výsledky potvrdily primární předpoklad, že připojení dalšího spotřebiče na palubní síť nemůže mít pozitivní vliv na spotřebu paliva. Spotřeba paliva vzrostla průměrně o 6,9 %. Současně samozřejmě vzrostla produkce oxidu uhličitého, jakožto produktu dokonalého spálení paliva. Zajímavostí byla kompletní eliminace emisí uhlovodíků za současného vzrůstu produkce oxidů dusíku. Daná skutečnost byla nejspíše způsobena zvýšením teploty spalování vlivem vyšší spotřeby paliva.

Celkově je tak možné shrnout výsledky tak, že byly vyvráceny hypotézy číslo 1 a 4 a přijaty byly hypotézy 2 a 3. Celkově by se dalo měření označit za úspěšné. V klíčových bodech se shoduje jak se základními zákony fyziky, tak i s běžně prováděným měřením výkonových a emisních parametrů spalovacích motorů.

Pro budoucí použití tohoto generátoru by bylo vhodné sledovat méně často řešené emisní složky výfukových plynů, společně s rozdílem obsahu vodíku ve výfukových plynech pro určení, kolik dodaného vodíku z plynu skutečně chemicky reaguje s některými jinými složkami. Současně by také bylo vhodné pro případné další testování využít externí zdroj napájení HHO generátoru pro zamezení výkonových výkyvů během cyklu a současně eliminovat zvýšení spotřeby fosilního paliva. V případě, že by i nadále během takto modifikovaného testu, bez navýšení dávky paliva došlo k redukci uhlovodíků, jednalo by se o podnět pro další zkoumání vlivu HHO plynu na spalovací motor.

9 Bibliografie

1. **Linhart, Jiří a kolektiv.** *Slovník cizích slov pro nové století.* Litvínov : Dialog, 2002.
2. **Lemon, Scott a Miller, Adam.** Electric Vehicles in New Zealand: from Passenger to Driver? *Technical Report.* 2013.
3. **Greenwood, N. N. a Earnshaw, A.** *Chemie prvků. svazek I.* Praha : Informatorium, 1993. ISBN 80-85427-38-9.
4. **Marhold, Josef.** *Přehled průmyslové toxikologie.* Praha : Avicenum, 1980.
5. **Hromádko, Jan.** *Spalovací motory.* Praha : Grada, 2011. 978-80-247-3475-0.
6. www.cdiac.ess-dive.lbl.gov. [Online] Lawrence Berkeley National Laboratory. [Citace: 6. Únor 2019.] https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/tre_glob_2014.html.
7. **Šmerda, Tomáš, Čupera, Jiří a Fajman, Martin.** *Vznětové motory vozidel.* Brno : CPress, 2013. 978-80-264-0160-5.
8. **Vojtíšek-Lom, Michal, Pechout, Martin a etc.** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and their genotoxicity in exhaust emissions from a diesel engine during extended low-load operation on diesel and biodiesel fuels. *Atmospheric Environment.* 2015, Sv. 109.
9. **Riedl, Ota a Vondráček, Vladimír.** *Klinická toxikologie.* Praha : Avicenum, 1980. 08-075-80.
10. **Sharma, M, Agarwal, AK a Bharathi, KVL.** Characterization of exhaust particulates from diesel engine. *Atmospheric Environment.* 2005, stránky 3023-3028.
11. **Greenwood, N. N. a Earnshaw, A.** *Chemie prvků, svazek II.* Praha : Informatorium, 1993. Schemický ISBN 80-85427-38-9.
12. **Vlk, František.** *Dynamika motorových vozidel.* Brno : Nakladatelství a vydavatelství vlk, 2000. ISBN 80-239-0024-2.
13. **Matějka, Rostislav.** *Vozidla silniční dopravy I.* Bratislava : Alfa, 1990. ISBN 80-05-00392-7.
14. **Zdeněk, Jan a Ždánský, Bronislav.** *Výkladový automobilový slovník.* Brno : Computer Press, 2007.

15. **Gscheidle, Rolf.** *Příručka pro automechanika.* Praha : Sobotáles, 2001. ISBN 80-58920-76-X.
16. www.garaz.cz. [Online] Seznam.cz. [Citace: 24. Únor 2019.] <https://www.garaz.cz/clanek/nejvetsi-problem-ojetin-v-cesku-filtr-pevnych-castic-2290?mol-gallery--selected=21630>.
17. **Hromádko, Jan.** *Speciální spalovací motory.* Praha : Grada Publishing, a.s., 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
18. www.kfz-tech.de. [Online] H. Huppertz. [Citace: 4. Březen 2019.] http://www.kfz-tech.de/Engl/Biblio/Hybrid_E-Antrieb/HybridBegriffe.htm.
19. **Remy, Heinrich.** *Anorganická chemie I. díl.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1971.
20. **Bína, Jaroslav et. al.** *Malá encyklopedie chemie.* Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1976.
21. **Tuček, Vít et. al.** *Vodík.* Praha : Česká asociace technických plynů, 2004.
22. www.hytep.cz. [Online] Česká vodíková technologická platforma, 17. Květen 2007. [Citace: 13. Listopad 2016.] <http://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-skladovani-vodiku-i>.
23. **Matějovský, Vladimír.** *Automobilová paliva.* Praha : Grada, 2004. ISBN: 80-247-0350-5.
24. **Subramanian, Balaji a Ismail, Saleel.** Production and use of HHO gas in IC engines. *International journal of hydrogen energy.* 2018, 43, stránky 7140-7154.
25. **Horák, Zdeněk a Kroupa, František.** *Fyzika - Příručka pro vysoké školy technického směru.* Praha : SNTL, 1981. 04-017-81.
26. **Gomes Antunes, Jorge et. al.** An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2009, 15, stránky 6516–6522.
27. **Shou-Pin, Yu et. al.** Integration of low-pressure hydrogen storage cylinder and automatic controller for carbon deposit removal in car engine. *International journal of hydrogen energy.* 2016, 41, stránky 21795-21801.

28. [www.dieseln.net.com](http://www.dieseln.net.com/standards/eu/ld.php). [Online] ECOpoint Inc. [Citace: 24. Únor 2019.]
<https://www.dieseln.net.com/standards/eu/ld.php>.
29. www.circabc.europa.eu. [Online] © United Nations Economic Commission for Europe. [Citace: 11. Březen 2019.] https://circabc.europa.eu/sd/a/fc2cd20e-9e56-4e2b-a1b4-74184a211d6c/20140205_Test%20Procedures%20PHEV_NEDC_WLTP_v1.xls.
30. www.h2shop.cz. [Online] Atthero s.r.o., 1. Leden 2015. [Citace: 2. Únor 2019.]
<http://www.h2shop.cz/index.php?p=h2-shop&skupina=5&articleID=85>.
31. www.bruker.com. [Online] © Copyright Bruker 2019. [Citace: 11. Březen 2019.]
https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/1-Products/Infrared_Spectroscopy/Gas_Analysis/MATRIX-MG/MATRIX-MG5_Rendering.png.
32. www.tsi.com. [Online] TSI Incorporated. [Citace: 14. Únor 2019.]
<http://www.tsi.com/engine-exhaust-particle-sizer-spectrometer-3090/>.
33. **EL-Kassaby, Mihamed a et.all.** Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions. *Alexandria Engineering Journal*. 2016, Sv. 55, stránky 243-251.
34. **Ozcanli, Mustafa a et.all.** Using HHO (Hydroxy) and hydrogen enriched castor oil biodiesel in compression ignition engine. *International journal of hydrogen energy*. 2017, Sv. 42, stránky 23366-23372.

10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Průměrný poměr emisí vznětového motoru	- 9 -
Obrázek 2: Vývoj celosvětové produkce oxidu uhličitého vlivem spalování.....	- 11 -
Obrázek 3: Množství emisních složek vznětového motoru	- 13 -
Obrázek 4: Graf složení pevných částic v závislosti na zatížení motoru	- 13 -
Obrázek 5: Schéma přeplňování vznětového motoru	- 19 -
Obrázek 6: Konstrukce a funkce filtru pevných částic	- 21 -
Obrázek 7: Procentuální podíl výroby vodíku	- 24 -
Obrázek 8: Graf porovnání kategorií jízdních cyklů.....	- 27 -
Obrázek 9: HHO generátor osazený na testovaném vozidle.....	- 29 -
Obrázek 10: Ukázka softwaru pro simulaci jízdy v měřícím cyklu.....	- 31 -
Obrázek 11: Spektrální analyzátor Matrix MG - 5	- 32 -
Obrázek 12: Částicový analyzátor TSI EESP 3090	- 33 -
Obrázek 13: Schéma matice měření.....	- 34 -
Obrázek 14: Detail připojení výstupu z HHO generátoru do sání	- 35 -
Obrázek 15: Vůz připravený na válcové zkušební s připojeným HHO generátorem	- 36 -
Obrázek 16: Graf průměrně zjetého WLTC3 cyklu na válcové zkušební.....	- 40 -
Obrázek 17: Graf spotřeby paliva testovaného vozu v různých měřeních.....	- 41 -
Obrázek 18: Graf produkce emisí oxidu uhličitého testovaného vozu	- 42 -
Obrázek 19: Graf emisí oxidu uhelnatého a oxidů dusíku testovaného vozu	- 42 -
Obrázek 20: Graf emisí uhlovodíků testovaného vozu	- 43 -
Obrázek 21: Graf celkového počtu pevných částic na 1 km	- 44 -
Obrázek 22: Graf průměrné koncentrace pevných částic za jízdní cyklus.....	- 44 -
Obrázek 23: Závislost ztrátového momentu na rychlosti vozu	- 45 -
Obrázek 24: Graf vnější otáčkové charakteristiky testovaného vozu	- 45 -

11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní vlastnosti oxidu uhelnatého	- 10 -
Tabulka 2: Základní vlastnosti oxidu uhličitého	- 11 -
Tabulka 3: Základní vlastnosti oxidu dusného.....	- 14 -
Tabulka 4: Základní vlastnosti oxidu dusnatého.....	- 15 -
Tabulka 5: Základní vlastnosti oxidu dusičitého.....	- 15 -
Tabulka 6: Základní vlastnosti oxidu siřičitého	- 16 -
Tabulka 7: Fyzikálně-chemické vlastnosti vodíku.....	- 23 -
Tabulka 8: Srovnání vodíku s ostatními palivy.....	- 24 -
Tabulka 9: Energetická bilance vznětového motoru	- 26 -
Tabulka 10: Přehled emisních norem v Evropské unii	- 27 -
Tabulka 11: Základní technické údaje o HHO generátoru.....	- 29 -
Tabulka 12: Základní parametry testovaného vozidla	- 30 -
Tabulka 13: Základní technické parametry válcové zkušebny	- 31 -
Tabulka 14: Technické parametry analyzátoru plyných emisí Midac I1801-E	- 32 -
Tabulka 15: Technické parametry částicového analyzátoru TSI EEPS 3090.....	- 32 -
Tabulka 16: Základní parametry náporového ventilátoru	- 33 -
Tabulka 17: Výsledky spotřeby paliva.....	- 40 -
Tabulka 18: Výsledky produkce CO ₂	- 41 -
Tabulka 19: Výsledky produkce NO _x	- 42 -
Tabulka 20: Výsledky produkce HC a CO.....	- 43 -
Tabulka 21: Výsledky produkce pevných částic.....	- 43 -
Tabulka 22: Výsledky vnější otáčkové charakteristiky.....	- 45 -

12 Seznam zkratek

#	Četnost
λ	Součinitel přebytku vzduchu
CNG	Stlačený zemní plyn
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
HC	Uhlovodíky
CH ₄	Metan
LPG	Zkapalněný zemní plyn
MAF	Mass air flow
MEŘO	Metylester řepkového oleje
N ₂ O	Oxid dusný
NEDC	New European Driving Cycle
NO	Oxid dusnatý
NO ₂	Oxid dusičitý
NO _x	Oxidy dusíku
ppm	Částice na milion
SO ₂	Oxid siřičitý
WLTC	Worldwide harmonized light vehicles test cycle
WLTP	Worldwide harmonized light vehicles test procedure

13 Přílohy

13.1 Ukázka scriptu pro zpracování dat

```
Kotlin
import java.io.File

fun main() {
    Val Lines = File("c:\\Users\\PC\\Desktop\\input.txt")
        .readLines()
        .map {
            it.split(";").let {
                Data(
                    sec(it[0]),
                    it[1].toInt(),
                    it[2].toInt(),
                    it[3].toInt(),
                    it[4].toInt(),
                    it[5].toInt(),
                    it [6].toInt()
                )
            }
        }

    println ("Lines: ${lines.size}")
    val linesWithoutDuplicities = mutableListOf<Data>()
    var lastline: Data? = null
    val include = { data: Data ->
        linesWithoutDuplicities.Add (Data)
        lastline = Data
    }
    lines.forEach { current ->
        lastline?.also { last ->
            if (last.date == current.date) {
                last.avg (current)
            } else {
                include (current)
            }
        }
        } ?: include(current)
    }
    println ("LinesWithoutDuplicities: ${linesWithoutDuplicities.size}")

    val finalLines = mutableListOf<Data>()
    lastline = Null
    val includeFinale = { current: Data ->
        finalLines.Add (current)
        lastline = current
    }
    linesWithoutDuplicities.forEach { current ->
        lastline?.also { last ->
            Val dif = current.Date - last.Date
            if (dif > 1) {
                finalLines.addAll (last.expand(current, dif))
                lastline = current
            }
        }
    }
}
```

```

        } else {
            includeFinale (current)
        }
    } ? : includeFinale(current)
}
println ("Final lines: ${finalLines.size}")
val result = finalLines.map { it.toString() }.joinToString("\n")
File("c:\\Users\\PC\\Desktop\\output.txt").writeText (result)
}

data class Data(val date: Int, var a: Int, var b: Int, var c: Int, var d: Int, var e: Int, var f: Int) {
    fun avg(another: Data) {
        a = listOf(a, another.a).Average().toInt()
        b = listOf(b, another.b).Average().toInt()
        c = listOf(c, another.c).Average().toInt()
        d = listOf(d, another.d).Average().toInt()
        e = listOf(e, another.e).Average().toInt()
        f = listOf(f, another.f).Average().toInt()
    }

    fun expand(last: Data, dif: Int): List<Data> {
        val aDiff = (last.a - a).toDouble() / dif
        val bDiff = (last.b - b).toDouble() / dif
        val cDiff = (last.c - c).toDouble() / dif
        val dDiff = (last.d - d).toDouble() / dif
        val eDiff = (last.e - e).toDouble() / dif
        val fDiff = (last.f - f).toDouble() / dif
        return (1 until dif).map { idx ->
            Data(
                date + idx,
                (a + aDiff * idx).toInt(),
                (b + bDiff * idx).toInt(),
                (c + cDiff * idx).toInt(),
                (d + dDiff * idx).toInt(),
                (e + eDiff * idx).toInt(),
                (f + fDiff * idx).toInt()
            )
        }.plus(last)
    }

    override fun toString(): String {
        return "${fromSec(date)};$a;$b;$c;$d;$e;$f"
    }
}

fun sec(strDate: String): Int {
    Val arr = strDate.Split(":")
    return arr[0].toInt() * 3600 + arr[1].toInt() * 60 + arr[2].toInt()
}

fun fromSec(intDate: Int): String {
    Val h = intDate / 3600
    Val Min = (intDate - h * 3600) / 60
    Val Sec = intDate - h * 3600 - Min * 60
    return "$h:$min:$sec"
}

```