

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta



Účinek plynu HHO na výkon a emise zážehového motoru

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Autor práce: Bc. Václav Vondrášek

PRAHA 2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Václav Vondrášek

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Účinek plynu HHO na výkon a emise zážehového motoru.

Název anglicky

Effect of HHO gas on power and emission SI engine.

Cíle práce

Cílem práce je určit vliv plynu HHO, přidávaného do sání, na výkon a emise zážehového motoru.

Metodika

- 1 Úvod
- 2 Přehled řešené problematiky
- 3 Cíl práce
- 4 Metodika práce
- 5 Praktická část práce
- 6 Výsledky a diskuse
- 7 Závěr

Doporučený rozsah práce

40-50

Klíčová slova

plyn HHO, spotřeba, CO₂, CO, NO_x, PM

Doporučené zdroje informací

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA, – HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.

HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

VLK, F. *Koncepce motorových vozidel : koncepce vozidel, alternativní pohony, komfortní systémy, řízení dynamiky, informační systémy*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000. ISBN 80-238-5276-0.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2018

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 30. 09. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Účinek plynu HHO na výkon a emise zážehového 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 20.2.2019

Bc. Václav Vondrášek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Jindrovi, Ph.D. za odborné rady a připomínky při zpracování této práce. Dále děkuji celé mé rodině za věcnou a emocionální podporu během celého mého studia.

Abstrakt:

V této diplomové práci jsou shrnuty možnosti využití vodíku jako paliva jak pro přímé spalování v pístových motorech, tak pro využití v palivových článcích, a také obohacování konvenčních paliv vodíkem. Důraz je kladen na shrnutí účinků vodíku jako paliva a jako prvku, u kterého existuje předpoklad pro zlepšení účinnosti motoru a snížení produkce škodlivých emisí. Je zde také blíže popsána možnost výroby vodíku společně s kyslíkem (plyn HHO) na palubě vozidla a jeho použití pro zlepšení parametrů motoru.

V praktické části práce je pak účinek plynu HHO prakticky vyzkoušen na motoru 1.2 HTP (kód motoru AWY) umístěném na brzdovém stanovišti. Naměřené výsledky jsou následně vyhodnoceny a okomentovány.

Klíčová slova: plyn HHO; spotřeba; CO₂; CO; NO_x; PM

Effect of HHO gas on power and emission SI engine**Summary:**

This thesis summarizes the possibilities of using hydrogen as a fuel for both direct combustion in piston engines and for use in fuel cells, as well as the enrichment of conventional fuels with hydrogen. Emphasis is placed on summarizing the effects of hydrogen as a fuel and as a prerequisite for improving engine efficiency and reducing harmful emissions. There is also described in greater detail the possibility of producing hydrogen together with oxygen (HHO gas) on board the vehicle and using it to improve engine parameters.

In the practical part of the thesis, the HHO gas effect is practically tested on the 1.2 HTP engine (engine code AWY) located at the brake station. The measured results are then evaluated and commented on.

Key words: gas HHO; consumption; CO₂; CO; NO_x; PM

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Přehled řešené problematiky.....	3
2.1	Vlastnosti vodíku jako paliva	3
2.1.1	Obecné vlastnosti vodíku.....	5
2.1.2	Obsah energie	8
2.1.3	Vlastnosti vodíku při spalování	8
2.2	Možnosti použití vodíku jako paliva	11
2.2.1	Motory s vnitřním spalováním čistého vodíku a vzduchu.....	11
2.2.2	Palivové směsi s plynným vodíkem a jejich spalování v motoru.....	13
2.2.3	Palivové články.....	19
2.3	Plyn HHO	22
2.3.1	Vlastnosti HHO.....	22
2.3.2	Výroba HHO.....	23
3	Cíl práce.....	26
4	Metodika práce	27
4.1	Popis zařízení.....	27
4.1.1	Motor	27
4.1.2	Popis měřicího stanoviště a motorové brzdy	27
4.1.3	Popis emisního analyzátoru	29
4.1.4	Popis a schéma zapojení sady vyvíječe HHO.....	29
5	Praktická část práce	32
5.1	Příprava na měření.....	32
5.2	Postup měření	34
6	Výsledky a diskuze	35
7	Závěr	40
	Seznam použité literatury	41
	Seznam obrázků.....	45
	Seznam tabulek.....	46

Seznam zkratek

KVPD	Katedra Vozidel a Pozemní Dopravy
V/P	Vzduch/Palivo
HICE	Hydrogen Internal Combustion Engine
SI	Spark Ignition
CI	Compression Ignition
SI-DI	Spark Ignition - Direct Injection
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
EGR	Exhaust Gas Recirculation
P	výkon motoru
Δm	rozdíl naměřených hmotností paliva
mp	měrná spotřeba paliva
t	délka vyhodnocovaného cyklu

1 Úvod

V dnešní době by bylo těžké si představit život bez automobilů. Pomocí nich se přepravujeme do práce i za rekreací, převážíme těžké náklady a používáme je pro zábavu v podobě nejrůznějších automobilových závodů. Používání automobilů je ovšem ale i spojeno s řadou negativních dopadů na naše okolí i celý svět. Na jedné straně jsou přeplněná města se stále houstnoucí dopravou a na straně druhé je to spalování uhlovodíkových paliv vyráběných z ropy (tedy z neobnovitelného zdroje), kterými je dnes poháněna převážná většina všech automobilů. I přes tlak světových vlád na výrobce automobilů, aby je vyráběli stále ekologičtější, je produkce škodlivých emisí stále vysoká. V dnešní době se má za to, že ekologičnost spalovacích motorů se blíží k hranici technických možností.

Výrobci jsou tak nuceni emisní předpisy různě obcházet (kauza Dieselgate) nebo přejít k alternativním zdrojům energie, jako například k energii elektrické. Ve snaze o snížení emisí spalovacích motorů mají výrobci tři možnosti. Buď mohou zlepšit proces spalování (zde ale zákonitě dojde ke zvyšování CO_2 , tedy skleníkového plynu) nebo emise upravovat pomocí přídavných zařízení (katalyzátorů výfukových plynů, systém STOP-START) nebo se mohou zaměřit na používání čistších paliv, tedy paliv s nižším obsahem uhlíku.

Jednou z možností, jak snižovat emise pomocí zlepšování spalovacího procesu, by mělo být přidávání plynu HHO (tedy plynu získaného rozpadem vody na jednotlivé molekuly, který bývá také nazýván Brownův plyn, hydroxy atd.) do vzduchu nasávaného motorem. Tento plyn je získáván elektrolýzou vody přímo ve vozidle a pro jeho výrobu jsou v dnešní době prodávány montážní sady určené pro toto použití. Na stránkách prodejců těchto autosad jsou deklarovány přímo kouzelné účinky na snížení spotřeby paliva a tvorby emisí, zvýšení výkonu a také vyčištění karbonových úsad a zlepšení chodu celého motoru.

V teoretické části se zaměřím zejména na možnosti využití vodíku jako paliva v automobilech, teorii výroby plynu HHO a vlivy tohoto plynu na spalovací proces.

Toto téma bylo vybráno z toho důvodu, že na českém i světovém internetu lze najít mnoho prodejců zařízení pro výrobu plynu HHO, která stojí řádově tisíce korun a jejich

deklarované účinky se zdají na první pohled být přinejmenším přehnané. Prodejci zařízení ale tvrdí, že jejich zařízení je namontováno ve velkém množství vozů a mají na provozní vlastnosti významný pozitivní vliv.

Pro účely zhotovení této diplomové práce tedy byla sada na výrobu plynu HHO zakoupena přes webové stránky www.autonavodu.cz (dnes návštěvníka přesměruje na h2i.cz) a zapojena na zážehový motor ze Škody Fabie 1.2 HTP, který je umístěn v prostorách KVPD.

2 Přehled řešené problematiky

Teoretická část se formou literární rešerše zaměřuje na shrnutí stávajících poznatků v oblasti použití vodíku jako paliva pro pohon automobilů. Jsou zde stručně, ale úplně popsány účinky vodíku na spalovací proces, použití vodíku v palivových článcích a obtíže spojené s rozšířením vodíku, jakožto čisté náhrady za uhlovodíková paliva. Ze zjištěných účinků vodíku na spalovací proces se v praktické části vycházelo i při posuzování použití vodíku jako příměsi (ve formě malého množství plynu HHO vyráběného přímo ve vozidle).

2.1 Vlastnosti vodíku jako paliva

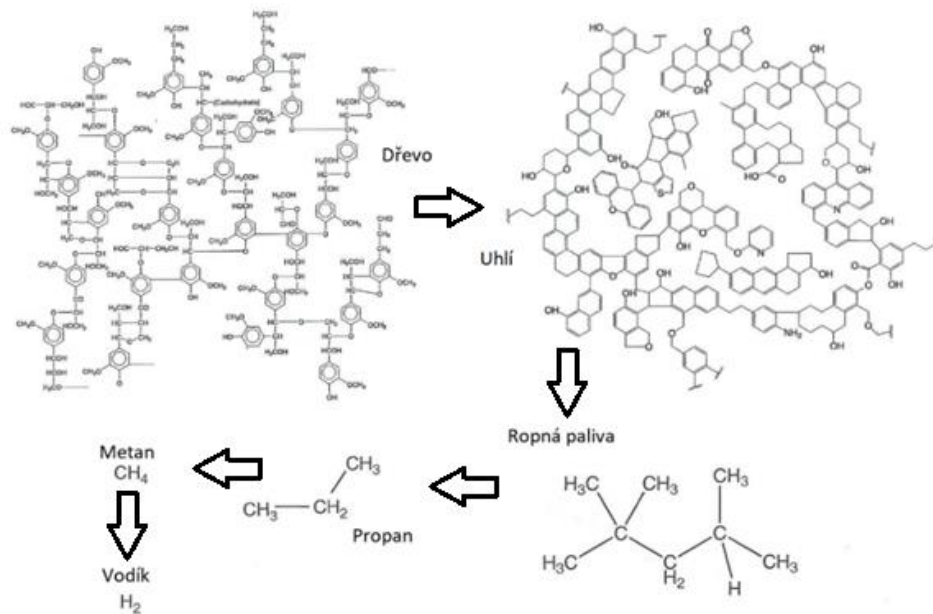
Při pohledu do historie uplynulých 2000 let, lze si všimnout, že používání paliv celou dobu směřuje k čistějším zdrojům: dřevo – uhlí – ropná paliva – propan – metan. Z toho je patrné, že se molekuly paliv postupně zmenšovaly, obsahovaly méně uhlíku a více vodíku, jak je vidět na obr. 1. Další krok by tedy měl logicky směřovat k vodíku, který má potenciál vyřešit rizika spojená se spalováním uhlovodíkových paliv. Tyto rizika představuje zejména vytváření skleníkových plynů a zdravý škodlivých emisí. Při reakci s kyslíkem může vodík uvolňovat energii při spalování v motoru nebo elektrochemickou přeměnou v palivovém článku. Jedinou emisí využívání vodíku je voda (resp. vodní pára) a NO_x . [1]

Vodík by mohl být vyráběn z vody použitím velkého množství zdrojů energie zahrnující sluneční, větrnou, nukleární, biomasu, petrolej, zemní plyn a uhlí. Jelikož obnovitelné zdroje energie (slunce, vítr nebo biomasa) jsou dostupné ve všech částech světa, mohli by mít všechny země přístup k vodíkovému palivu. Před tím, než bude moci k velkému rozšíření vodíku jako paliva dojít, budou muset být vyřešeny klíčové technologické výzvy, které představuje zejména cenově výhodná produkce a skladování vodíku. [1]

Z hlediska dlouhodobé perspektivy se vodík dříve jevil jako jediná možná náhrada uhlovodíkových paliv pro pístové spalovací motory. V dnešní době se začínají projevovat jeho hlavní nevýhody, které jsou spojeny zejména s jeho výrobou a se skladováním vodíku ve vozidle. V přírodě se samotný vodík nevyskytuje a je nutné ho vyrábět. Většina světové

produkce vodíku pochází z fosilních paliv a vodík tak neplní základní požadavek spojený s využíváním obnovitelných zdrojů energie. Samozřejmě, že lze vodík vyrábět i za pomoci energie z obnovitelných zdrojů, bohužel tento podíl je v současné době příliš malý. [2]

Obr. 1 Vývoj paliv [1]



Využití vodíku k pohonu automobilů lze rozdělit na dvě možnosti. První představuje přímé spalování vodíku v pístovém motoru a druhou možností je použití vodíku v palivových článcích. [2] Na budoucnost přechodu z uhlovodíkových paliv na vodík mají odborníci po celém světě různé názory. Někteří věří, že vodíková ekonomika (ekonomika, kde je kromě elektřiny hlavním nosičem energie vodík) má vážné, možná i fatální nedostatky, zatímco ostatní to považují za správnou cestu k relativně nezávislé energetické budoucnosti. [3]

Klíčovým kritériem pro ideální palivo je jeho nevyčerpatelnost, čistota, jednoduchost využití a nezávislost na cizí kontrole. Vodík má všechny tyto vlastnosti a je hodnocen a celosvětově propagován jako příznivá náhrada za benzín, topný olej, zemní plyn a ostatní paliva používaná pro dopravní a nedopravní aplikace. Podobně jako elektřina je vodík vysoce kvalitní nositel energie, který může být použit jako vysoce efektivní a bezemisní nebo nízkemisní při koncovém použití. Bylo technicky předvedeno, že vodík lze použít pro dopravu, vytápění a generování energie a může nahradit současná paliva ve všech jejich

současných aplikacích. [4] Vodík může být produkován použitím velkého množství materiálů, zdrojů a výrobních procesů. V současnosti jsou nejrozšířenější dvě základní technologie, a to reformace zemního plynu a elektrolýza vody. [1]

2.1.1 Obecné vlastnosti vodíku

Teoreticky mohou vodík a elektrina uspokojit všechny energetické potřeby lidstva a vytvořit tak energetický systém, který by byl trvalý a nezávislý na jiných zdrojích energie. [5] Vodík má unikátní vlastnosti, což z něj dělá téměř ideálního nositele energie. [6] Je to například fakt, že může být vyroben elektrickou energií a přeměněn na ni zpět při relativně vysoké účinnosti, může být vyroben z vody, je to kompletně obnovitelné palivo, může být uskladňován v plynném a kapalném skupenství nebo jako hydrid kovů, může být přemísťován na velké vzdálenosti prostřednictvím potrubí nebo tankerů, může být měněn do jiných forem energie více možnostmi a s vyšší efektivitou než kterékoliv jiné paliva (např. katalytickým spalováním, elektrochemickou přeměnou, hydridováním). Nemusí také způsobovat zátěž pro životní prostředí, jelikož může být vyráběn, skladován, přepravován a používán téměř bez jakýchkoliv škodlivých látek, skleníkových plynů a jiných nežádoucích efektů. Ve vodíkové ekonomice by byla elektrina a vodík vyráběny ve velkých množstvích z dostupných zdrojů energie a používány všude, kde se nyní používají fosilní paliva. [3]

Jelikož je atom vodíku ze všech nejmenší a je to nejlehčí prvek v přírodě, představuje jeho skladování velký problém. Zatímco elektrochemická reakce vodíku v palivových článcích je považována za nejčistší a nejefektivnější způsob využití vodíku, panuje zde předpoklad, že je to zatím technologie daleké budoucnosti. V současnosti je tato technologie příliš drahá a její aplikace neskladná. V současnosti se tedy spíše nabízí použití vodíku jako paliva pro spalování v motorech hlavně z důvodu nutnosti snižování emisí. [7]

2.1.1.1 Fyzikální vlastnosti

Atom vodíku je nejlehčí prvek, jelikož se jeho nejčastější izotop skládá z jenom jednoho protonu a jednoho elektronu. Atomy vodíku snadno tvoří molekuly H_2 , které jsou menší ve srovnání s většinou ostatních molekul. Molekulární forma vodíku je bezbarvá, bez zápachu a bez chuti a je zhruba 14krát lehčí než vzduch. Ve vzduchu se také rozpouští rychleji, než jakýkoliv jiný plyn. Při chlazení vodík zkapalní při $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ztuhne

při $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fyzikální vlastnosti vodíku jsou shrnuty v tab. 1. Běžný vodík má hustotu $0,09\text{ kg/m}^3$. Je to tedy nejlehčí známý plyn. Vodík v pevném stavu má vyšší elektrickou vodivost než všechny ostatní známé pevné prvky. Plynný vodík má také jednu z největších tepelných kapacit ($14,4\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$). Další z důležitých vlastností vodíku je relativně vysoká rozpustnost v kovech. [1]

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vodíku [1]

Molekulární hmotnost	2.01594	
Hustota plynu při $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 1 atm.	0,08987	kg/m^3
Hustota pevného vodíku při $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$	858	kg/m^3
Hustota kapalného vodíku při $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$	708	kg/m^3
Teplota tání	$-259\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Teplota varu při 1 atm.	$-253\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Kritická teplota	$-240\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Kritický tlak	12,8	atm
Kritická hustota	31,2	kg/m^3
Skupenské teplo tání při $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$	58	kJ/kg
Skupenské teplo varu při $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$	447	kJ/kg
Tepelná vodivost při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,019	$\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C})$
Viskozita při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.00892	$\text{g}/\text{m}\cdot\text{s}$
Tepelná kapacita (C_p) plynu při $25\text{ }^{\circ}\text{C}$	14,3	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$
Tepelná kapacita (C_p) kapaliny při $-256\text{ }^{\circ}\text{C}$	8,1	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$
Tepelná kapacita (C_p) pevného skupenství při $-259,8\text{ }^{\circ}\text{C}$	2.63	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$

Některé vysokopevnostní oceli jsou náchylné k vodíkové křehkosti. Dlouhodobé vystavení vodíku, obzvláště při vysokých teplotách a tlacích, může způsobit, že ocel ztratí svou pevnost, což může vést k poruše. K tomuto ale nemá sklon velká část jiných konstrukčních materiálů, takže se tomuto lze vyhnout jeho správnou volbou. [3]

2.1.1.2 Chemické vlastnosti

Při běžných teplotách není molekula vodíku reaktivní, tedy pokud není nějak aktivována. Na druhou stranu atom vodíku je chemicky velmi reaktivní, a proto se v přírodě nevyskytuje v chemicky nevázané formě. Aby došlo k disociaci molekul vodíku na jednotlivé atomy, jsou potřeba velmi vysoké teploty. V přírodě je většina vodíku vázána k atomům kyslíku nebo uhlíku. Pro získání čistého vodíku z přirozených sloučenin je tedy nutné dodat energii. Vodík je tedy vhodné považovat za prostředek použitelný ke skladování a přenášení energie derivované z primárního zdroje energie. [1]

Atomy vodíku jsou silné redukční činidlo, a to i při pokojové teplotě. Umí reagovat například s oxidy a chloridy mnoha kovů pro získání kovů čistých. Vodík má schopnost redukovat také soli jako dusitany, dusičnany a kyanidy sodíku a draslíku, a měnit tím sloučeniny do kovového stavu. Reaguje s množstvím prvků kovových i nekovových. Vodík také reaguje s organickými sloučeninami, se kterými utváří komplexní směs produktů, například při reakci s ethylenem produkují atomy vodíku C_2H_6 a C_4H_{10} . Když vodík reaguje s kyslíkem při spalování nebo elektrochemické přeměně pro vytvoření energie je výsledným produktem vodní pára. Při pokojové teplotě je tato reakce neměřitelná a pomalá, ale může být urychlena katalyzátorem, jako je platina nebo elektrická jiskra. [1]

Z bezpečnostního hlediska jsou následující vlastnosti, při porovnání s konvenčními palivy, nejdůležitější:

- Rozpustnost – Vodík se ve vzduchu rozkládá oproti jiným plynným palivům mnohem rychleji. Při difuzním koeficientu ve vzduchu $0,61 \text{ cm}^2/\text{s}$ je rychlost rozpouštění jeho největší předností.
- Vztlak – Vodík ve vzduchu stoupá rychleji než methan, propan nebo páry benzínu.
- Barva, zápach, chuť a toxicita – Vodík je bezbarvý, bez zápachu, bez příchuti a je netoxický, podobně jako metan.
- Hořlavost – Hořlavost vodíku je funkcí jeho koncentrace a je mnohem větší než u metanu a ostatních paliv. Vodík hoří málo viditelným plamenem. Limity zápalnosti vodíku ve vzduchu a dalších oxidantech záleží na zápalné energii, teplotě, tlaku a přítomnosti dalších látek. Tato hodnota ve vzduchu se u vodíku pohybuje mezi 4–75 obj%, u metanu ve vzduchu 4,3–15 obj% a u benzínu ve vzduchu mezi 1,4–7,6 obj%.
- Zápalná energie – Když se koncentrace vodíku pohybuje v hořlavém rozsahu, může být vodík zapálen velmi nízkou energií, a to 0,02 mJ. Pro srovnání je tato hodnota pro benzin 0,24 mJ a pro metan 0,28 mJ při stechiometrickém poměru.
- Výbušnost – Stlačený vodík je výbušný při velkém rozsahu koncentrací. Naopak je málo výbušný, pokud není stlačen, podobně jako je tomu u ostatních paliv.

- Rychlost plamene – Vodík má vyšší rychlost šíření plamene (1,85 m/s) než ostatní paliva (páry benzínu – 0,42 m/s, metan – 0,38 m/s).
- Teplota plamene – Teplota plamene směsi vodík – vzduch (2207 °C) je teplejší než směsi metan – vzduch (1917 °C) a studenější než benzin – vzduch (2307 °C) při stechiometrickém poměru. [1]

2.1.1.3 Palivové vlastnosti

Vodík je hořlavý v širokém spektru teplot a koncentrací. Ačkoli je jeho výbušná účinnost vskutku výjimečná a vítaná pro palivo budoucnosti, tak na druhou stranu představuje tato vlastnost závažné technologické výzvy, jako bezpečnost při produkci, skladování a přepravě. Při reakci s kyslíkem uvolňuje vodík energii explozivně ve spalovacím motoru nebo bezhlučně v palivovém článku za vzniku vody jakožto jediného vedlejšího produktu. Vodík má s konvenčními palivy některé vlastnosti shodné, a některé rozdílné a jsou blíže popsány dále. Je zde ale ještě mnoho otázek, které musí být zodpovězeny, než bude vodík moci sloužit jako universální energetické médium. [8]

2.1.2 Obsah energie

Vodík má na jednotku hmotnosti největší energetický obsah v porovnání se všemi ostatními palivy. Tato hodnota je při porovnání vodíku (140,4 MJ/kg) s např. benzinem (48,6 MJ/kg) je téměř trojnásobná. Naproti tomu při porovnání energetického obsahu na jednotku objemu, je situace opačná. Vodík má v kapalné formě 8,491 MJ/m³ a benzin 31,150 MJ/m³. Malá objemová hustota vodíku představuje problém se skladováním obzvláště v automobilovém průmyslu a jiných mobilních aplikacích. Pro dosažení velkého dojezdu je potřeba velký zastavěný objem, kam by bylo možné uložit dostatečné množství vodíku. Porovnání vodíku s ostatními palivy po energetické stránce je znázorněno v tab. 2. [1]

2.1.3 Vlastnosti vodíku při spalování

Díky vysoké rozpustnosti, malé viskozitě a unikátním chemickým vlastnostem je výbušnost vodíku poněkud odlišná od ostatních paliv. Jednotlivé výbušné vlastnosti jsou následující:

Tab. 2 Porovnání energetických hodnot vodíku a ostatních paliv [1]

Palivo	Jednotka	Metan	Propan	Oktan	Metanol	Vodík	Benzin	Nafta
Horní výhřevnost	MJ/kg	50.0	45.6	47.9	18.0	119.9	44.5	42.5
Dolní výhřevnost	MJ/kg	55.5	50.3	15.1	22.7	141.6	47.3	44.8
Stechiometrický poměr vzduch/palivo	-	17.2	15.6	0.31	6.5	34.3	14.6	14.5
Rozsah zápalnosti	%	5-15	2,1-9,5	0,95-6,0	6,7-36,0	4,0-75,0	1,3-7,1	0,6-5,5
Teplota plamene	°C	1914	1925	1980	1870	2207	2307	2327
Minimální zápalná energie	MJ	0.30	0.30	0.26	0.14	0.017	0.29	
Samozápalná teplota	°C	540-630	450	415	460	858	260-460	180-320

Široký rozsah zápalnosti

Směs vodíku se vzduchem je zápalná při koncentracích 4-75 % (což je mnohem širší rozsah než u např. benzínu – 1-7,6 %) a je výbušný při koncentracích 15-59 %. Nicméně pro motory s vnitřním spalováním je smysluplnější definovat rozsah zápalnosti pomocí směšovacího poměru λ definovaného jako hmotnostní poměr skutečného poměru palivo/vzduch ku poměru stechiometrickému (to je poměr, kdy dojde ke spálení veškerého paliva i kyslíku). Potom je rozsah zápalnosti vodíku $0,1 < \lambda < 7,1$ a benzínu $0,1 < \lambda < 4$, což indikuje že spalovací motor na vodík je přizpůsobitelný operování i při velmi chudých směsích. [9] Operace motoru při chudých směsích je dobrá z hlediska měrné spotřeby paliva, jelikož se teoreticky spálí kompletně. Další výhodou je, že celková teplota spalování je obecně nižší s vodíkem než s benzinem, což snižuje emise NO_x. [1]

Nízká zápalná energie

Množství energie potřebné pro zapálení vodíku je 0,02 mJ, což je desetkrát méně, než potřebuje benzin (0,24 mJ). Malá zápalná energie umožňuje vodíkovému motoru zajistit okamžité zapálení i pro chudé směsi. Naneštěstí, nízká zápalná energie znamená, že teplé plyny nebo teplá místa ve spalovacím prostoru mohou sloužit jako zdroje samozápalu, což vytváří problémy se samozápaly a zpětnými zášlehy do sání. Prevence vzniku teplých míst je jedna z výzev spojených s provozem vodíkového motoru. [1]

Malá zhášecí vzdálenost

Vodík má menší (0,64 mm) zhášecí vzdálenost než benzin (~2 mm). To má za následek, že vodíkový plamen se ke stěně válce přiblíží více než plamen ostatních paliv.

Menší zhášecí vzdálenost také může zvýšit tendenci motoru ke zpětným zášlehům do sání, jelikož může plamen směsi vodík–vzduch snáze (než plamen uhlovodíkových směsí) proniknout téměř zavřeným sacím ventilem. [1]

Samozápalná teplota

Samozápalná teplota představuje minimální teplotu potřebnou k zahájení samovolného výbuchu zápalné směsi bez vnějšího zdroje zapálení (např. jiskry). Pro vodík je samozápalná teplota poměrně vysoká (585 °C). To dělá zapálení směsi vodík – vzduch pouze samotným teplem obtížnější. Samozápalné teploty různých paliv jsou ukázány v tab. 2. Samozápalná teplota mimo jiné také udává, jaký může být maximální kompresní poměr motoru. Vysoká samozápalná teplota vodíku tedy umožňuje používat motory s vyšším kompresním poměrem oproti motorům na uhlovodíková paliva. U spalovacích motorů obecně platí, že čím vyšší kompresní poměr, tím vyšší tepelná účinnost motoru. Nevýhodou vyšší samozápalné teploty vodíku je, že je obtížnější ho zapálit kompresním způsobem u vznětových motorů. [1]

Vysoká rychlost šíření plamene

Při stechiometrickém poměru má rychlost šíření vodíkového plamene hodnotu 3,46 m/s, což je téměř o řád rychlejší než u benzínu 0,42 m/s. Čím je ale směs chudší, tím je šíření plamene pomalejší. [1]

Vodíková křehkost

Dlouhodobé vystavení některých materiálů (zejména kovových) vodíku způsobuje tzv. vodíkovou křehkost, což může vést k netěsnostem nebo i ke fatálním selháním. Známé faktory, které mají vliv na rychlost a závažnost vodíkové křehkosti, jsou následující: koncentrace a čistota vodíku, tlak, teplota, typ nečistot, velikost napětí a průběh napětí v materiálu, jeho složení, velikost zrna, mikrostruktura a tepelné zpracování. Vliv může mít také vlhkost obsažená ve vodíkové směsi. [1]

Úniky vodíku

Díky své nízké hustotě a vysoké rozpustnosti se vodík rozptyluje ve vzduchu mnohem rychleji než benzin, což je výhodné ze dvou hlavních důvodů. Zaprvé je díky tomu

dosaženo dobrého promísení směsi paliva a vzduchu. Zadržuje, když k úniku vodíku dojde nechtěně, rychle se rozprostře v okolním vzduchu. Tím je nebezpečí použití vodíku sníženo. Na druhou stranu je ale vodík také díky své rozpustnosti obtížnější udržet v nádobách v porovnání s ostatními plyny. Úniky kapalného vodíku se vypaří velmi rychle, jelikož je bod varu tekutého vodíku extrémně nízký. Takovéto úniky vodíku představují riziko zejména proto, že v místě změny skupenství vodíku v plynné, tedy v místě rozptýlu do vzduchu, hrozí nebezpečí výbuchu nebo požáru. Malá velikost molekul vodíku také zvyšuje pravděpodobnost úniku. [1]

Poměr palivo/vzduch

Stechiometrický poměr, tedy hmotnostní poměr vzduch/palivo (V/P) pro spálení veškerého paliva, je pro vodík 34:1, což je mnohem více než 15:1 pro benzinu. Jelikož je vodík při okolních podmínkách plynným palivem, zaplní spalovací prostor mnohem lépe než kapalné palivo. Díky širokému spektru zápalnosti vodíku mohou fungovat vodíkové motory při poměrech V/P od 34:1 do 180:1. Dalším aspektem je, že nižší objemová energetická hustota plynného vodíku vede ke 20% snížení výkonu motoru v porovnání s motorem na benzin, protože stechiometrická směs vodíku se vzduchem obsahuje o 20 % méně energie než stejný objem benzínové směsi se vzduchem. [1]

2.2 Možnosti použití vodíku jako paliva

Vodík, jakožto nositel energie, může být využit několika způsoby, včetně spalování v pístovém motoru s vnitřním spalováním, tryskovém nebo raketovém motoru, spalování s čistým kyslíkem pro výrobu páry, katalytickým spalováním pro výrobu tepla nebo elektrochemickou přeměnou do elektřiny (pomocí palivových článků). [3]

V této kapitole jsou popsány možnosti použití vodíku jako paliva pro pohon vozidel, a také vyjmenovány a popsány aspekty s tím spojené.

2.2.1 Motory s vnitřním spalováním čistého vodíku a vzduchu

Plynná paliva obecně jsou z hlediska přípravy zápalné směsi výhodnější než paliva kapalná. Umožňují lepší promísení a snadnější dodržení směšovacího poměru paliva se vzduchem, a tím i snížení obsahu škodlivin ve výfukových plynech. Nesmývají olejový film ze stěn válce a neředí olej v klikové skříni motoru. Mají lepší antidekonační vlastnosti

než kapalná paliva. Jejich nevýhodou bránící většímu rozšíření je především obtížnější skladování a distribuce a malá energetická hustota vyžadující větší zastavěný objem pro umístění zásobníků paliva při jejich použití ve vozidle. Zpřísnující se požadavky na čistotu výfukových plynů však působí na snahu o vyšší využití plyných paliv v provozu motorových vozidel [2]

Vodík může být použit přímo jako palivo v motoru s vnitřním spalováním podobně jako benzin u zážehového motoru. Díky nízkému požadavku na energii jiskry a širokému spektru zápalnosti směsi je vodík výborným kandidátem na použití v zážehovém motoru. [10] Díky své vysoké samozápalné teplotě, minimální prodlevě v zapálení a vysoké rychlosti plamene má HICE (Hydrogen Internal Combustion Engine) ve srovnání s benzinovým menší tendenci ke klepání. Vodík má tedy větší oktanové číslo (výzkumnou metodou >120) než benzin (91-99). [1] HICE také nabízí spalování bez emisí CO₂ a HC, a také používání chudších směsí, což vede ke snížení emisí NO_x (přibližně o jeden řád). [3] Vodík nemůže být samostatně použit ve vznětovém motoru, jelikož je samozápalná teplota vodíku příliš vysoká. Diesellové motory by tedy musely být dovybaveny zapalovací svíčkou nebo by do něj muselo být vstříkováno malé množství nafty, aby došlo k zapálení směsi (tzv. pilotní zápal). [1]

Samozápaly a klepání

Díky nižší zápalné energii vodíku, širšímu poli zápalnosti a menší zhášecí vzdálenosti jsou samozápaly závažným problémem HICE při porovnání s benzinovým zážehovým motorem. Samozápaly jsou obvykle způsobeny teplými místy ve spalovacím prostoru, jako například na zapalovací svíčce, na výfukovém ventilu nebo na uhlíkové usazenině. [11] Mísení vodíku se vzduchem v sacím potrubí zase způsobuje zpětné zášlehy a klepání, obzvláště při větších ztíženích. Samozápalům může být předcházeno optimalizací konstrukce motoru, konkrétně nalezením a odstraněním potenciálních teplých míst, použitím zapalovací svíčky se správnou tepelnou hodnotou, snižováním teploty chladicí kapaliny a optimalizací vstřikovacího systému. Klepání motoru je stanoveno inherentním limitem pro maximální kompresní poměr, který může být na dané palivo použit. [1]

Výkon vodíkového motoru

Teoretický maximální výstupní výkon HICE závisí na poměru vzduch/palivo a na použité metodě vstřikování, je ale ovlivněn také plnicí účinností a hustotou energie v palivu. Stechiometrický poměr pro vodík je 34:1, z čehož vyplývá, že vodík zabere 29 % spalovacího prostoru a zanechá 71 % pro vzduch. Výsledný obsah energie je tedy menší než u benzinového motoru a výstupní výkon je maximálně cca 85 %. Nicméně při použití palivového systému s přímým vstřikem paliva, kdy je spalovací prostor naplněn 100 % vzduchem a následně je tam vstříknut vodík, může HICE dosáhnout o 15 % více výstupního výkonu než benzinový motor při stejných rozměrech. [1]

Na druhou stranu je při stechiometrickém poměru velmi vysoká spalovací teplota, což má za následek vznik velkého množství emisí škodlivých NO_x . Jelikož je hlavním cílem použití vodíku snižování škodlivých emisí, nebývají HICE konstruovány na provoz při stechiometrickém poměru. Místo toho se používá cca dvojnásobné množství vzduchu, což snižuje emise oxidů dusíku téměř na nulu. Zvýšení podílu vzduchu ve směsi na dvojnásobnou hodnotu má ale za následek, že je ve srovnání s benzinovým motorem o stejném objemu, maximální produkovaný výkon téměř poloviční. Aby se tato nevýhoda snížila, tak se HICE konstruují jako motory o větším objemu nebo se doplňují turbodmychadly a kompresory. Ovšem fakt, že má HICE celkovou účinnost cca 45 % oproti 25 % benzinového motoru je závažný argument pro snahu je používat. [1]

2.2.2 Palivové směsi s plynným vodíkem a jejich spalování v motoru

Vodík může být použit v spalovacím motoru jako přídavek k uhlovodíkovým palivům s řadou výhod. Při používání s plynnými palivy mohou být vodík a primární palivo uloženy ve stejné nádrži. Pro použití s kapalnými palivy může být vodík uložen samostatně a přidán v plynném stavu do spalovacího prostoru těsně před zažehnutím. Obohacování konvenčních paliv vodíkem má na spalovací motory efekty popsané dále. Motory, ve kterých se používá směs primárního paliva a vodíku, pracují spolehlivě při větším rozsahu teplotních a okolních podmínek, nemají problémy se studeným startem a mají vysokou účinnost (navýšení až o 25 %). Komerčně dostupná směs známá jako Hythane obsahuje 20 % vodíku a 80 % zemního plynu. Při tomto poměru není nutné dělat v motoru na zemní plyn žádné zásahy a snížení emisí dosahuje až 20 %. Při přidávání vodíku do benzinových motorů

dochází díky možnosti použití chudší směsi (zbyde více kyslíku na oxidaci) a díky menšímu obsahu uhlíku dojde k výraznému snížení emisí CO. Výše jmenované vlastnosti vodíku (nízká zápalná energie a vysoká rychlost plamene) zlepšují všechny důležité charakteristiky spalovacího motoru, dochází tedy ke snižování emisí a spotřeby paliva a ke zvyšování účinnosti. Ovšem jak už bylo popsáno výše, obsah vodíku v palivu snižuje kvůli své nižší energetické hustotě na jednotku objemu také výstupní výkon. [1]

Za předpokladu, že je obohacení vodíkem provedeno správně, může zlepšit spalování a zvětšit limity pro zapalitelnost směsi. Obohacování vodíkem může být kromě klasických motorů s vnitřním spalováním prováděno také u turbín nebo hořáků. Přínos obohacování závisí na typu spalovacího procesu, charakteristice směsi, konstrukci konkrétního motoru, operačních parametrech a druhu primárního paliva. Obohacování vodíkem může být použito u různých motorů s vnitřním spalováním, včetně zážehových (SI), vznětových (CI), zážehových s přímým vstříkem (SI-DI), vznětových s homogenním plněním spalovacího prostoru (HCCI) nebo vznětových s předpřipravenou směsí (PCCI). [3] Tato práce se zabývá primárně obohacování směsi plynem HHO (tedy směsí plynného vodíku a kyslíku při stechiometrickém poměru) zážehových motorů a porovnání s obohacováním vodíkem je provedeno v kapitole 2.3.

Jak bylo řečeno již dříve, přidání vodíku do spalovacího procesu umožní spalování chudších směsí, což zvyšuje teplotní účinnost a snižuje emise vypouštěné motorem. Zvýšení účinnosti je příčinou zvětšení poměru měrného tepla, rychlost spalování, sníženou rozdílností mezi spalovacími cykly a ztrátami ze škrcení klapkou. Snižování emisí obohacováním vodíkem je způsobeno úplnějším spálením, což snižuje zbytkové uhlovodíky (HC), možnost spalování chudších směsí, což vede ke snížení tvorby oxidu uhelnatého (CO) a oxidů dusíku (NO_x). [3] Tyto dva vlivy jsou v dalších podkapitolách blíže popsány a vysvětleny.

Problémy při obohacování vodíkem mohou představovat významné snížení výkonu, zpětné zášlehy do sání nebo samozápaly vedoucí ke klepání. Používání jakéhokoliv plynného paliva v motoru s tvorbou směsi před spalovacím prostorem snižuje výstupní výkon, při porovnání s kapalným palivem, kvůli většímu objemu vzduchu rozptýlenému v plynu. [3]

Výsledný efekt z obohacování vodíkem záleží na kombinaci operačních a konstrukčních parametrů. Tato závislost na kombinaci velkého množství proměnných vede k velkému počtu možných stavů. V závislosti na tom existují výsledky výzkumů, kde má obohacování pozitivní, zanedbatelný nebo i negativní vliv. Velice časté zjištění například je, že pokud nebyly změněny parametry (směšovací poměr, časování předstihu a kompresní poměr), v závislosti na množství přidaného vodíku, dojde ke zhoršení parametrů motoru. Z těchto důvodů musí být provedeno ještě mnoho pokusů, aby se více porozumělo vlivům změn různých parametrů na obohacování vodíkem. [3]

2.2.2.1 Vliv na účinnost

Obohacování vodíkem mění tepelnou účinnost motoru. V některých případech ji může snížit a v jiných ji může zvýšit až o 50 %. To závisí na operačních podmínkách a konstrukci motoru. [3] V této podkapitole jsou popsány účinky jednotlivých vlivů na účinnost spalovacích motorů.

Zvýšená generace volných radikálů

Spalování vodíku má vliv na produkci volných radikálů. Skladba radikálů v systému reakcí vodík-uhlík je určena kinetickými vlastnostmi reakcí obsahující prvky H, O, OH a H₂O₂. [12]

Koncentrace těchto látek má významný efekt na spalovací proces a celkovou rychlost reakce. Čím vyšší je jejich koncentrace, tím lépe je umožněno používání chudších směsí a zvětšuje se tím i tolerance zředění vlivem EGR (recirkulace výfukových plynů), což má za následek zvětšení uvolněného tepla a rychlost hoření. [3]

Zvýšení rychlosti plamene a úplnější spálení

Jak již bylo zmíněno výše, jedna ze zajímavostí vodíku je jeho vysoká rychlost šíření plamene. U směsí paliv s vodíkem lze pozorovat zvyšování rychlosti plamene se zvyšováním obsahu vodíku. Jeho vysoká rozpustnost, vysoká tepelná kapacita a produkce většího množství volných radikálů přispívají ke zvyšování rychlosti šíření plamene. U motorů zajišťuje vyšší rychlost šíření plamene jeho rozšíření do většího objemu spalovacího prostoru, než se otevře výfukový ventil. To snižuje výskyt částečného spálení nebo nespálení směsi a zlepšuje celkové prohoření. [13]

Zvětšení limitu chudosti a zředění směsi

Když uvažujeme spalovací proces bez přidávání vodíku, lze říci, že chudší směs (po určitou hranici) vede ke zvýšení účinnosti motoru, jelikož se ve spalovacím prostoru nachází více kyslíku potřebného pro úplnější spálení paliva. Provozování u hranice chudosti ale celkovou účinnost opět snižuje, protože se snižuje rychlost uvolňování tepla. Limit chudosti směsi je dán vlastnostmi paliva a také konstrukcí motoru. Jelikož má vodík stechiometrický poměr mnohem vyšší než jiná paliva, tak se jeho přidáním limit chudosti posune, což vede k dalšímu zvýšení účinnosti. Zvýšení limitu chudosti nemá lineární trend, ale vždy bude ležet někde mezi limitem chudosti vodíku a primárního paliva. Přidání i malého množství vodíku může limit chudosti významně posunout. [14]

Zvětšení EGR má za následek snížení rychlosti plamene a snížení velikosti uvolněného tepla. Zvětšování EGR vede ke zvyšování účinnosti až k hranici limitu tolerance EGR, kde se účinnost začne snižovat vlivem zvětšování rozdílu mezi cykly, snížením rychlosti uvolňování tepla nebo nedokonalým spalováním. Stejně jako u chudosti směsi obohacování vodíkem tento trend nemění, ale posouvá hraniční limit, což umožňuje zvyšování účinnosti touto cestou. [3]

Účinek na rozdílnost mezi cykly

Při obohacování vodíkem bylo zjištěno, že se snižují rozdíly mezi jednotlivými motorovými cykly u mnoha rozdílných motorů a paliv při chudých nebo zředěných směsích (vlivem EGR). Časování předstihu zapálení směsi a další parametry jsou nastaveny na průměrný cyklus při daných provozních parametrech (zatížení motoru, otáčky...), takže zmenšením rozdílnosti mezi cykly se sníží počet „neprůměrných“ cyklů, což vede ke zvýšení celkové účinnosti motoru. [13]

Odolnost proti klepání

V jednotlivých výzkumech existují nesrovnalosti ohledně názoru, zda obohacování vodíkem zvyšuje oktanové číslo a zlepšuje odolnost proti klepání. Jedinečné vlastnosti vodíku, jako je vysoká rychlost plamene, nízká zápalná energie a vysoká teplota samovznícení může někdy vést ke spalování s akustickou prezentací podobnou klepání motoru. Tato problematika přesahuje rozsah této práce, protože se liší pro různá paliva,

konstrukce motoru a formu přivádění vodíku. Pro zážehové benzínové motory ale platí, že ochuzením a zředěním směsi umožněným přidáním vodíku se zvýší odolnost vůči klepání. [3]

2.2.2.2 Vliv na emise

Pro snižování emisí spalovacích motorů existuje několik strategií. Hlavní strategie představují dodatečné zpracování a snižování bohatosti a ředění zápalné směsi. Nejčastější metoda dodatečného zpracování výfukových plynů pro zážehové motory je použití třícestného katalyzátoru, což pro efektivní snížení emisí NO_x , HC a CO potřebuje směs blízkou stechiometrické. Alternativou pro dodatečné zpracování výfukových plynů představuje snížení tvorby emisí pomocí snižování bohatosti směsi pro docílení úplnějšího spalování (toto platí pro určitou hranici). [3] Metod pro docílení lepšího spalování za účelem snížení emisí NO_x zpravidla představuje optimalizaci časování předstihu, konstrukci spalovacího prostoru a zvyšování turbulence ve spalovacím prostoru. Vyšší turbulence vede ke zvýšení přenosu tepla do stěny válce a pokles podtlaku při sání, což má za následek snížení plnicí a tepelné účinnosti. [15] Obohacování vodíkem je ale alternativou pro zvyšování turbulence při spalování chudších a zředěnějších směsí. [3]

Účinek na tvorbu oxidů dusíku NO_x

Obohacování vodíkem při stechiometrických směsích může zvýšit teplotu spalování, což vede ke zvýšení NO_x . [14] Při obohacování vodíkem je tedy zapotřebí snižovat bohatost směsi (to obohacování vodíkem umožňuje, jak již bylo několikrát zmíněno), což vede ke snižování teploty ve spalovacím prostoru a také k výraznému snižování tvorby NO_x . [3]

Vliv na emise oxidu uhelnatého CO

V literatuře se objevují různé názory na vliv tvorby emisí CO při obohacování stechiometrických směsí vodíkem. Výsledek je zřejmě závislý na typu primárního paliva, konstrukci motoru a provozních podmínkách. Jelikož ale vodík umožňuje snížení bohatosti směsi, vyskytuje se při spalování přebytek kyslíku, takže by mělo vést ke snižování emisí CO. [3]

Vliv na emise nespálených uhlovodíků HC

Obohacování stechiometrických směsí vodíkem vede k mírnému snížení emisí HC. [14] Je to vysvětlováno úplnějším spalováním díky menší zhášecí vzdálenosti a lepšímu šíření vodíkového plamene do štěrbin mezi dnem pístu (nad prvním pístním kroužkem) a válcem. V této štěrbině se ale může nacházet olejový film, který může být vodíkovým plamenem také spálen, což naopak může vést opět k nárůstu emisí HC. Dále zde hraje roli faktor, že při obohacování vodíkem lze snížit bohatost směsi, což má za následek i snížení emisí HC. [3] Naproti tomu, při překročení limitu chudosti, může docházet k nezapaření paliva, neúplnému nebo částečnému spalování, což vede k výraznému zvýšení produkce HC. [13]

Vliv na emise pevných částic PM

Obohacování vodíkem vede ke snížení emisí pevných částic v důsledku menšího obsahu uhlíku ve směsi, zlepšení úplnosti spalování a možností spalování chudších směsí. U zážehových motorů s nepřímým vstřikem paliva je produkce PM téměř nulová, takže v praktické části nebudou PM měřeny.

Dodatečné snižování emisí

Pro dodatečné snižování emisí u zážehového automobilového motoru se nejčastěji používají třicestné katalyzátory. V třicestném katalyzátoru dochází k redukci NO_x na N_2 pomocí CO nebo HC, a také k oxidaci CO a HC na CO_2 a H_2O pomocí malého množství zbytkového kyslíku ve výfukovém potrubí. Pro efektivní práci musí být třicestný katalyzátor zahřátý na teplotu kolem $500\text{ }^\circ\text{C}$ a výfukové plyny musí obsahovat malý přebytek kyslíku. Při dodržení těchto požadavků může být dosaženo až 85% dodatečného snížení výfukových emisí. Jelikož je ale při obohacování vodíkem výhodnější pracovat s chudšími směsmi, zpomaluje příliš vysoký obsah kyslíku redukci NO_x . To ovšem nebrání ke snižování emisí oxidačním katalyzátorem, kde může při dostatečné teplotě být dosaženo účinnosti až 99 % pro emise CO a až 95 % pro emise HC. Je zde ale důležité brát v úvahu, že při používání chudých směsí a směsí zředěných vlivem EGR, může dojít ke snížení teploty výfukových plynů, což může mít za následek nedostatečné zahřátí katalytického konvertoru. [3]

2.2.2.3 Potenciální nevýhody při obohacování vodíkem

Samozápaly a zpětné zášlehy

V zážehovém vodíkovém motoru může k samozápalům a zpětným zášlehům do sání docházet poměrně jednoduše při nedostatečném chlazení válců motoru nebo při neoptimalizovaném časování ventilů [16]. Při obohacování vodíkem k těmto nechtěným efektům může docházet spíše při vysokých koncentracích vodíku a při nízkých koncentracích by neměly nastávat vůbec. To je minimalizováno ještě tím, že je snaha používat chudší směsi. [14]

Snížení výkonu

Použití plynného paliva smíchaného před spalovacím prostorem snižuje výkon motoru v porovnání s použitím kapalných paliv, kvůli většímu objemu spalovacího prostoru zabranému vzduchem rozprostřeným v plynném palivu. [14] Z tohoto důvodu, i když je poměr paliva a vzduchu blízký stechiometrickému, tak při obohacování paliva vodíkem dochází ke snížení výkonu. Toto snížení závisí na množství přidávaného vodíku a na rozdílu množství energetické hustoty stechiometrické směsi vodík-vzduch a primární palivo-vzduch. Zvýšení účinnosti spojené s obohacováním vodíkem částečně kompenzuje snížení výkonu, což může mít za následek celkové snížení nebo zvýšení v závislosti na konkrétním případě. [3]

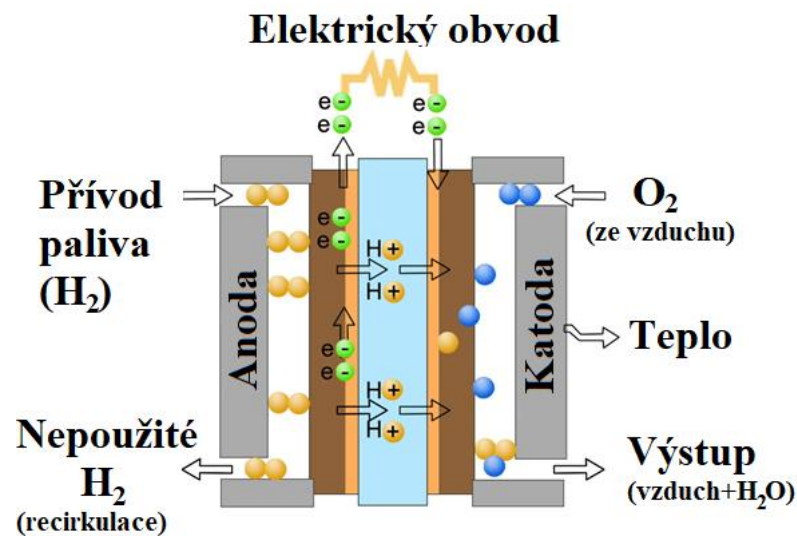
2.2.3 Palivové články

Vedle přímého spalování vodíku ve spalovacím motoru má největší potenciál pro masové využívání vodíku jako paliva pro pohon vozidel výroba elektrické energie v palivových člancích. Palivové články přeměňují chemickou energii vodíku na energii elektrickou a tepelnou, a to bez spalování. Palivový článek se skládá z dvou elektrod: Katody (pozitivní) a anody (negativní) spojených elektrolytem, jak je patrné z obr. 2. Vodík a kyslík proudí anodou a katodou, což má za následek elektrochemickou reakci (1) a (2) s teoretickým elektrochemickým potenciálem 1,23 V ($0,40 \text{ V}_{\text{vodík}} + 0,83 \text{ V}_{\text{kyslík}}$). Elektrody mají dvě role:

1. poskytnout elektronům vedení,
2. poskytnout nezbytný povrch počátečnímu uložení molekul na přerod do atomů (např. elektrokatalyzátor ke snížení aktivační energie) před převodem elektronů. [1]



Obr. 2 Princip palivového článku [17]



Pro získání většího napětí jsou jednotlivé palivové články kombinovány do „stohů“ (angl. stacks), což je provedeno spojením každého článku k dalšímu tak, aby bylo zabráněno odebrání proudu z rohu elektrody, ale umožněno z celé plochy elektrody. Mezi články je vložen bipolární plátek, který slouží pro jejich spojení. Provozování stohu článků potřebuje pro svou správnou funkci zabezpečit řízení tepla, vzduchu, vodíku a vody pomocí pump, větráků a kontroly. [1]

Typy palivových článků

Existuje šest různých typů palivových článků, které jsou se svými základními vlastnostmi zobrazeny v tab. 3. [1]

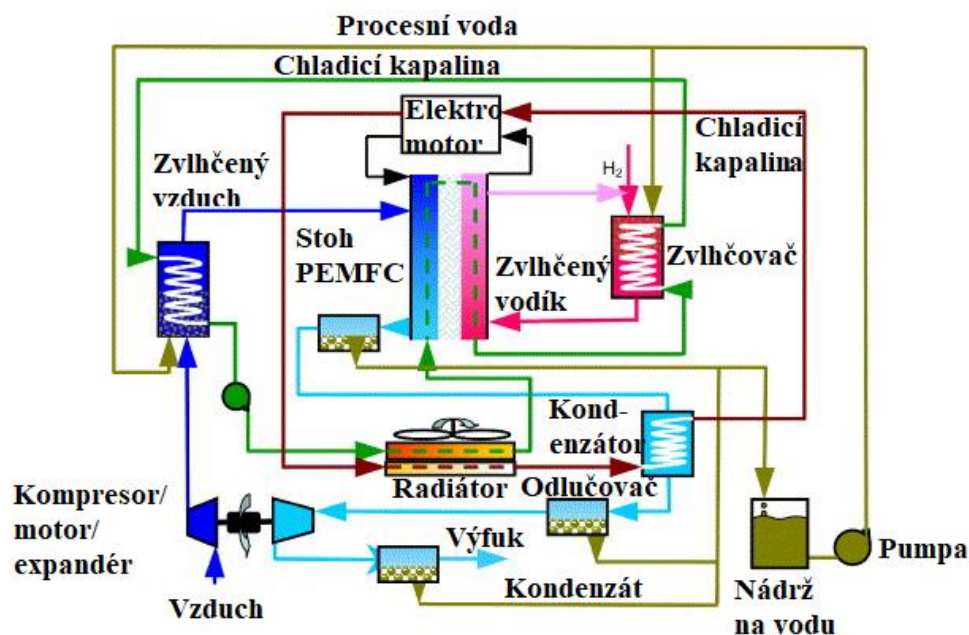
Tab. 3 Srovnání typů palivových článků [1]

	Elektrolyt	Operační teplota (°C)	Účinnost (%)	Typické výkony (kW)	Možnosti uplatnění
AFC	Hydroxid draselný	60-90	45-60	<20	Ponorky, vesmírné lodě
DMFC	Polymerní membrány	60-130	40	<10	Přenosné aplikace
MCFC	Směs uhličitánů	650	45-60	>1	Elektrické stanice
PAFC	Kyselina fosforečná	200	35-40	>50	Elektrické stanice
PEMFC	Polymerní membrána	80	40-60	<250	Vozidla, malá stacionární
SOFC	Keramika	1000	50-65	>200	Elektrické stanice

Pro pohon automobilů se nejvíce hodí palivový článek PEMFC díky své relativně nízké operační teplotě (80 °C), vysoké výkonové hustotě, pružné změně na požadavek výkonu a rychlé přípravě na použití. [18] Membrána je vyrobena z tenkých (12-20 μm) sulfatovaných fluoro-polymerových plátů, které se chovají jako elektrolyt a umožňují průchod pouze iontům vodíku. Membrána je z obou stran pokryta rozprášenými (kolem 0,3 mg/cm²) částicemi kovové slitiny (převážně platiny), která se chová jako katalyzátor. Na obr. 3 je znázorněné schéma zapojení PEMFC pro aplikaci v automobilu. [19] Aby mohl tento palivový článek uspokojit výkony požadované v automobilovém průmyslu, pracuje při 2,5 atm. a 80 °C při celkové účinnosti systému 50 %. Stlačený vodík a vzduch jsou zvlčeny na 90% relativní vlhkosti při teplotě stohu článků použitím procesní vody a tepla. [1]

Největšími překážkami pro použití palivových článků pro výrobu elektrické energie na pohon automobilů je jejich relativně vysoká cena a nízká životnost. Při srovnání s cenou používaných spalovacích motorů (kolem 25–35 \$/kW) je cena současných palivových článků odhadována pětikrát větší. Největší podíl na ceně mají platinový katalyzátor, membrána a bipolární pláty. Automobilové palivové články také budou muset být podobně spolehlivé a mít podobnou životnost jako spalovací motory (5 000 hodin nebo 300 000 ujetých kilometrů) při všech možných zatíženích a jejich střídání. Palivové články také budou muset být použitelné při všech okolních teplotách běžných na Zemi (-40 až 40 °C). Na vývoji se ovšem pořád pracuje, nedávno bylo například dosaženo snížení potřebného množství použité platiny. [1]

Obr. 3 Schématické zapojení PEMFC v automobilu [19]



2.3 Plyn HHO

Plyn HHO, nazývaný také hydroxy, oxyhydrogen nebo Brownův plyn (podle vynálezce suchého vyvíječe plynu Yulla Browna) je směsí plyného vodíku a kyslíku zastoupených v poměru 2:1 získaného elektrolýzou vody. [20]

V této podkapitole jsou popsány vlastnosti tohoto plynu, jeho vlivy na spalovací proces při smíchání s konvenčními palivy (zejména s benzinem), a také jak lze plyn HHO vyrábět ve vozidle. Tento teoretický popis je v praktické části diplomové práce vyzkoušen na skutečném motoru.

2.3.1 Vlastnosti HHO

Při hledání kvalitních zdrojů o fyzikálních a chemických vlastnostech plynu HHO lze nalézt na mnoho odlišných názorů. V některých zdrojích je uvedeno, že se plyn HHO chová odlišně a nečekaně při porovnání se směsí čistého vodíku a kyslíku ($O_2 + H_2$), tedy že se např. teplota jeho plamene pohybuje od 150 do 9000 °C při různých podmínkách nebo že se v plynu nacházejí kromě molekulárních vazeb také vazby magnetické, což má za příčinu rozdíl mezi očekávanou 11,3 g/mol a naměřenou molekulární hmotností 12,3 g/mol a jsou

zde uváděny také další anomálie. [21] Někteří vědci s něčím z toho souhlasí a tyto teorie prohlubují [22], zatímco jiní [23] [24] to vyvrací a tvrdí, že se jedná o nepodložené závěry a že vlastnosti plynu HHO dosahují shodných vlastností se směsí $H_2 + O_2$ při stechiometrickém poměru. [25]

V této diplomové práci se při vytváření závěrů vychází z teorie, že má plyn HHO na spalovací proces stejný vliv, jako obohacování paliv čistým plynným vodíkem (uvedeno v kapitole 2.2.2.). Toto tvrzení lze obhájit tím, že množství kyslíku obsaženého v nasátém vzduchu je výrazně větší než množství kyslíku vytvořeného vyvíječem.

Při vytváření závěrů je nutné stále myslet na to, že množství HHO, které je možné na palubě vozidla průběžně vyrábět, je velice malé (desetiny až jednotky %) oproti obohacování vodíkem popsaném v kapitole 2.2.2., které je v řádu i několik desítek % energetického obsahu paliva.

2.3.2 Výroba HHO

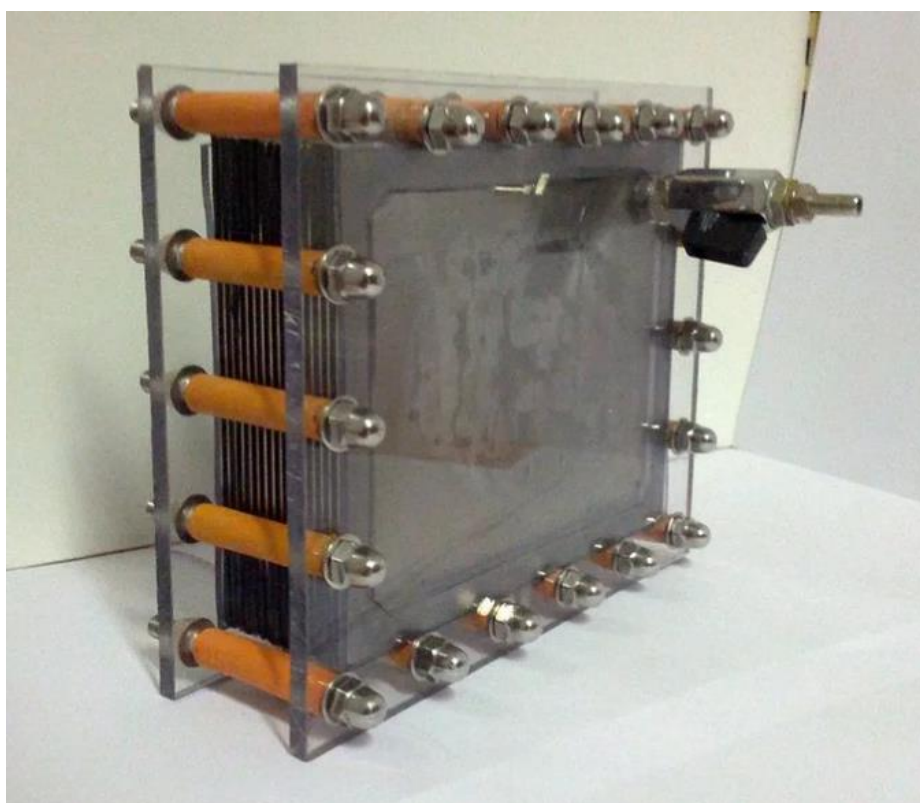
Plyn HHO se získává elektrolýzou destilované vody, do které je přidán prostředek pro zvýšení její elektrické vodivosti, prováděnou ve vyvíječi plynu (nesprávně nazývaném také jako palivový článek). Existují dva typy vyvíječů – suchý a mokrá. Mokrá vyvíječ dostal své jméno tak, že všechny komponenty, které se přímo podílí na elektrolýze jsou celé ponořené ve vodě. Častěji se ale při použití v automobilech setkáme se suchým vyvíječem plynu, který se vyznačuje tím, že se voda nachází pouze v dutinách uvnitř vyvíječe. [26]

Mokré vyvíječe mají oproti suchým výhody jako větší produkce plynu, stabilita, jednoduchá údržba a jednoduchá výroba. Jejich nevýhodami ale je, že potřebují více elektrického proudu a vytvářejí více tepla. Hlavními výhodami suchých vyvíječů je potřeba menšího množství elektrického proudu a je kompaktnější, což je u použití v automobilech důležité. [27]

Suchý vyvíječ se skládá z několika elektrod. Konkrétní počet elektrod může být různý, ale vyvíječ musí obsahovat minimálně jednu katodu (-) a jednu anodu (+). Elektrody se většinou konstruují v konfiguraci $+ \cdot N -$ nebo $+ \cdot N - x \cdot N +$. Písmenem N jsou značeny ocelové pláty, které nejsou připojené k elektrickému napětí (někteří autoři je nazývají jako neutrální elektrody), a písmenem x je značen neurčitý počet. Výrobci vyvíječů plynů

doporučují po určitých intervalech (10–15 tis. najetých km) měnit polaritu elektrod, aby se předcházelo jejich znečištění. Elektrody jsou nejčastěji vyráběné z proděravěných plátů nerezové oceli 316L (někteří výrobci deklarují použití plátů s obsahem titanu) oddělených gumovými pláty, které také těsní elektrody po jejich obrysu. Tyto ocelové a gumové pláty jsou vloženy mezi uzávěry (většinou plastové), které jsou stažené svorníky. V uzávěrech jsou osazení pro připojení hadic na odvod plynu a přívod vody. Příklad takového vyvíječe lze vidět na obr.4.

Obr. 4 Vyvíječ plynu HHO [26]



Elektrolýza je elektrochemický proces, při kterém dochází ke změně elektrické energie na chemickou. Elektrolýza vody je nejčistší způsob výroby vodíku, ale je také energeticky nejnáročnější. Ve vyvíječi dochází k tzv. alkalickému způsobu elektrolýzy. Jelikož je vhodné používat vodu destilovanou (kvůli zabránění tvorby úsad na elektrodách), je nutné zvýšit vodivost vody (zvýšit obsah iontů) pomocí vhodné látky. Možností je zde několik, ale nejvýhodnější se jeví použít KOH (hydroxid draselný), protože se při reakci nespotřebovává. Reakce potom probíhá podle rovnice (3), (4) a (5). [28]



Hydroxid draselný KOH je ve vodě velmi dobře rozpustný a při elektrolýze nevytváří žádné usazeniny. Při manipulaci s ním je nutné být velmi opatrný, jelikož se jedná o silnou žiravinu. Rozpuštěný ve vodě má také silné korozivní účinky. Při určité koncentraci také působí proti zamrznání vody, jak je znázorněno v tab. 4. [29]

Tab. 4 Závislost bodu mrzutí vody na obsahu KOH [30]

% KOH v H ₂ O	Bod mrzutí °C
0	0
10	-3.7
20	-8.3
30	-14.2
40	-22.1
50	-33.1

3 Cíl práce

Cílem praktické části práce bylo zjistit účinek plynu HHO na výkonové a emisní parametry zážehového motoru. Měření proběhne na motoru z automobilu Škody Fabia 1.2 HTP na měřicím stanovišti v dílnách KVPD TF, kde je motor instalován na zkušebně. V kapitole 6 „Výsledky a diskuze“ bude provedené měření vyhodnocené a provedené porovnání s očekávanými, která vyplívají z teoretické části této práce. V případě, že výsledky měření budou v rozporu s teoretickou částí, budou učiněny závěry, proč k tomu došlo.

Přínosem práce by mělo být potvrzení nebo vyloučení vhodnosti koupě a používání vyvíječe plynu HHO.

4 Metodika práce

V této kapitole je blíže popsána pohonná jednotka, na které probíhalo celé měření, měřicí stanoviště, analyzátor výfukových emisí. Je zde také popis a schéma zapojení použitého vyvíječe plynu HHO.

4.1 Popis zařízení

4.1.1 Motor

Celé měření probíhalo na zážehovém motoru AWY, který se v letech 2002–2007 montoval do Škody Fabia. Hlavní parametry tohoto motoru jsou shrnuty v tab. 5.

Tab. 5 Parametry měřeného motoru [KVPD TF ČZU]

Kód motoru	AWY (BRD)
Konstrukce	3-válcový řadový 2 ventily na válec
Obsah	1 198 cm ³
Vrtání	76,5 mm
Zdvih	86,9 mm
Kompresní poměr	10,3 : 1
Max. výkon	40 kW při 4750 min ⁻¹
Max. točivý moment	106 Nm při 3000 min ⁻¹
Řídící jednotka motoru	Simos 3PD (vícebodové vstřikování)
Předepsané palivo	bezolovnatý benzin okt. Č. 95
Emisní norma	EU4

4.1.2 Popis měřicího stanoviště a motorové brzdy

Měření bylo provedeno na brzdovém stanovišti katedry Vozidel a pozemní dopravy, na kterém byl umístěn výše uvedený spalovací motor. Zatěžování spalovacího motoru bylo prováděno pomocí vířivého dynamometru obr. 5, jehož bližší technické údaje jsou uvedeny v tab. 6.

Obr. 5 Vířivý dynamometr [KVPD TF ČZU]



Tab. 6 Tabulka hodnot brzdového stanoviště [KVPD TF ČZU]

Dynamometr	
Typ	V125
Provedení	IP23/ICW37
Otáčky (1/min)	300 - 2500 – 8000
Točivý moment (Nm)	134 - 478 - 149,5
Výkon (kW)	4,2 - 125 – 125
Průtok vody (l/s)	0,9
Budící napětí (V)	91
Budící proud (A)	1,7
Tlak vody (kPa)	90
Hmotnost (kg)	550
ČSN	350 000
Rok výroby	1986
Tenzometr	
Jmenovité zatížení (kN)	2
Sloučená chyba (% j.z.)	0,5
Reprodukovatelnost (%)	0,05

Měření spotřeby paliva probíhalo tak, že byla nádrž s benzinem umístěna na váze. Při měření tedy byl spolu s točivým momentem, otáčkami a časem měřen hmotnostní úbytek paliva, z čehož se poté dopočetla měrná spotřeba paliva m_p .

4.1.3 Popis emisního analyzátoru

Pro měření výfukových emisí byl použit Spektrální analyzátor Matrix MG-5, pomocí kterého byla zaznamenána koncentrace složek vypovídajících o spalovacím procesu. Bylo měřeno: NO₂, N₂O a NO jako zástupci NO_x, dále CO₂, CO a CH₄ jako zástupce nespálených uhlovodíků. Jeho technické parametry jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Parametry použitého emisního analyzátoru [KVPD TF ČZU]

Parametr	Hodnota
Spektrální rozsah	650 - 5000 cm ⁻¹
Rychlost skenování	až 32 spekter/s při Ds=4 cm ⁻¹ až 5 spekter/s při Ds=0,5 cm ⁻¹
Rozlišení	lepší než 1 cm ⁻¹
Přesnost měření vlnové délky	lepší než 0,01 cm ⁻¹
Fotomertrická přesnost	lepší než 0,1% T
Interferometr	RocksolidTM, s permanentním zaostřováním
Detektor	MCT
A/D převodníky	24b
Délka měřící cely	2 m
Příkon pro vyhřívání cely	220 W
Příkon spektrometru	65 W
Interface	Ethernet
Software	OPUS spectroscopy software

4.1.4 Popis a schéma zapojení sady vyvíječe HHO

Použitý vyvíječ plynu HHO byl pořízen přes webové stránky www.autonavodu.cz 1.10.2018. Balení zakoupené montážní sady pro motory do 2,5 l obsahovalo:

- a) Vyvíječ plynu vlastní konstrukce, který je na obr. 6 a obr. 7
- b) Digitální multimetr a PWM regulátor
- c) Nádobu na vodu s vyříznutými závity na našroubování kolínek
- d) Zpětný ventil a filtr, který lze koupit v obchodech na autopříslušenství
- e) Montážní a spojovací materiál běžně dostupný v různých obchodech.

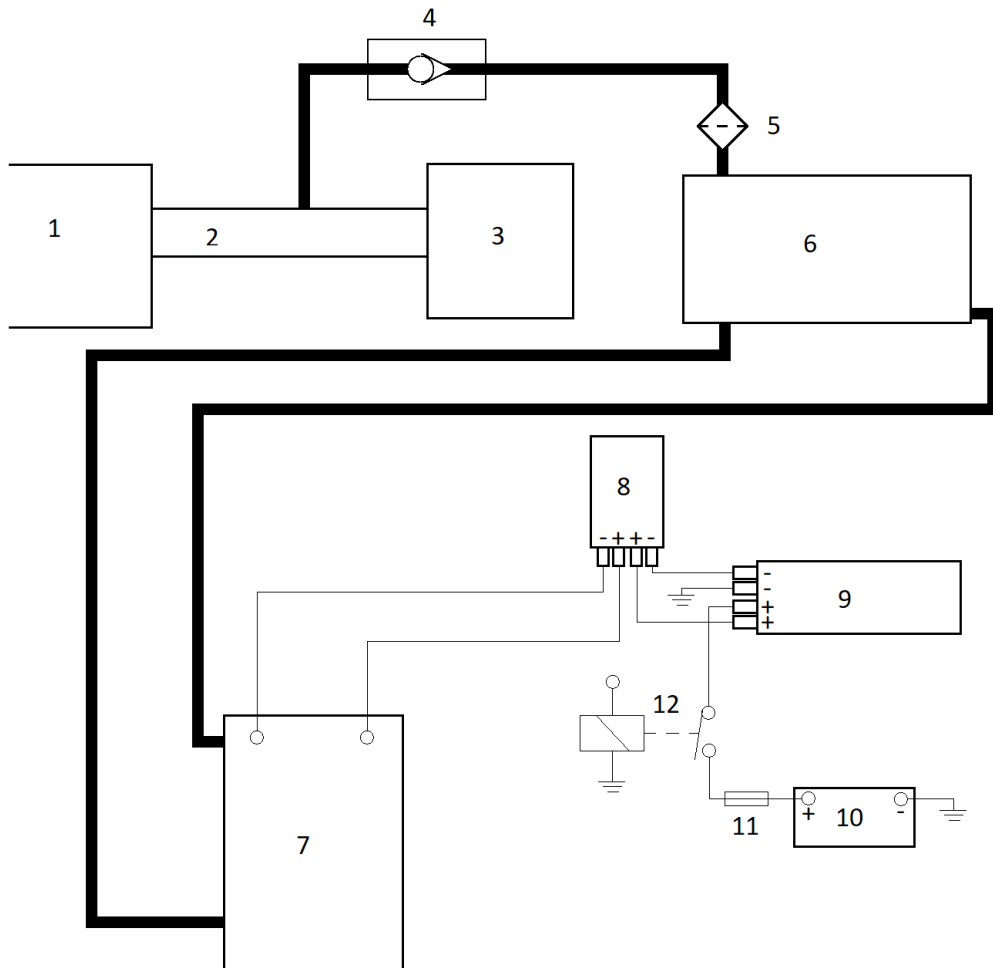
Obr. 6 Vyvíječ HHO z boku [Vlastní]



Obr. 7 Vyvíječ HHO ze předu [Vlastní]



Obr. 8 Schéma zapojení vyvíječe HHO [Vlastní]



Legenda:

- | | |
|------------------------|-------------------------|
| 1. Sání motoru, | 8. PWM regulace, |
| 2. Sačí potrubí, | 9. Digitální multimetr, |
| 3. Škrticí klapka, | 10. Akumulátor, |
| 4. Zpětný ventil, | 11. Nožová pojistka, |
| 5. Odlučovač vlhkosti, | 12. Relé, |
| 6. Nádoba s vodou, | — Hadice, |
| 7. Vyvíječ plynu HHO, | — El. vodič. |

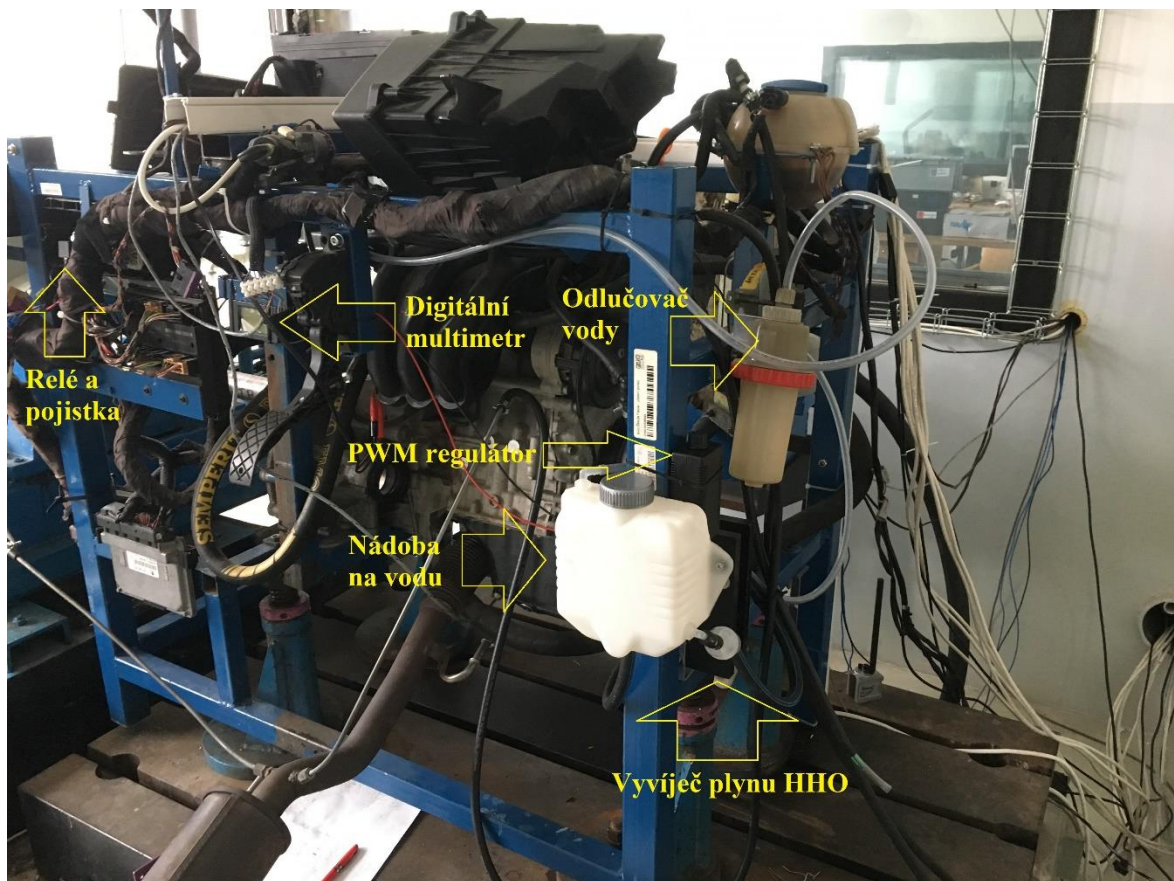
Celá zakoupená autosada byla zapojena dle schématu znázorněného na obr. 8, který jsem odvodil ze svých vědomostí.

5 Praktická část práce

5.1 Příprava na měření

Sada HHO byla připevněna na rám motoru, jak je vidět na obr. 9 a propojena hadicemi a elektrickými vodiči (které byli součástí balení) podle schématu na obr. 8.

Obr. 9 Fotografie umístění komponentů vyvíječe plynu HHO [Vlastní]



Po dokončení montáže byla provedena zkouška funkce a několik sekund po spuštění motoru se sám zastavil. Jak bylo po krátkém hledání příčiny objeveno, došlo k nasátí asi půl litru vody motorem. Motor byl tedy bezdemontážně vysušen (demontovány byly pouze svíčky, motor byl protáčen na prázdno a vyfoukáván stlačeným vzduchem), odpojen vyvíječ HHO a zaslepen jeho přívod. Poté byl motor bez problémů spuštěn. K nasátí vody došlo z důvodu, že při prvním zapojení byla nádrž na vodu v úrovni sacího potrubí a také byl plyn z nádrže do sání přiváděn bočním vyústěním namísto z horního. Tato chyba zapojení byla způsobena tím, že k zakoupené autosadě HHO nebylo připojeno schéma zapojení, takže muselo být odvozeno z fotek na webových stránkách prodejce. Nikde ovšem nebylo zjištěno,

že musí být HHO odváděno z horního vývodu, ale téměř všude byl text: „HHO probublává nádobou“. Tím bylo míněno, že HHO „probublává“ z vyvíječe plynu do nádoby na vodu. Nicméně po vyřešení tohoto nedostatku byl motor spuštěn i s vyvíječem (vypnutým) a k nasátí vody již nedošlo.

Po prvních zkouškách funkce motoru bylo patrné, že soustava při použití není vzduchotěsná a při provozu by tedy do sání kromě HHO byl přisáván i okolní vzduch. To je nežádoucí, jelikož by tento „falešný vzduch“ byl přisáván až za senzorikou měřící množství nasávaného vzduchu (zde MAP senzor), takže by ECU neměla možnost na toto reagovat.

Systém přisával vzduch zejména ve spoji plastových kolínek, které byly našroubovány do závitů ve vyvíječi a v nádobě na vodu. Na závit byla namotána teflonová páska. Po zjištění, že zde dochází k netěsnostem byla kolínka přilepena pomocí epoxidové pryskyřice. Dalším zdrojem netěsnosti bylo víčko nádoby na vodu, které bylo také přetěsněno. Poté, co byl celý systém přetěsněn byl do vody v nádrži přidán hydroxid draselný (KOH) v poměru 20 g KOH na 500 ml vody, aby se zvětšila elektrická vodivost vody.

Dále byl k motoru připojen analyzátor emisí a bylo provedeno první orientační měření. Při tomto měření byl motor provozován nejdříve s vypnutým vyvíječem HHO a po uplynutí pár minut byl vyvíječ zapnut a nastaven na proud 10 A, kde byl udržován po celou dobu měření. Okamžitě se v průhledné nádobě začaly objevovat bubliny. Po ověření správné funkce se přešlo k ostrému měření, podle kapitoly 5.2. Objemové množství vyráběného plynu HHO činilo $1,2 \text{ l/min}^{-1}$.

Množství vyráběného plynu závisí na mnoha parametrech vyvíječe a elektroinstalace, ale při provozu se odvíjí pouze od jeho momentálního příkonu. Regulací alternátoru je palubní napětí udržováno na téměř konstantní hodnotě kolem 13,8 V. Dodávaný proud byl nastaven pomocí PWM regulace na hodnotu 10 A. Při této hodnotě, jak bylo experimentální metodou zjištěno, bylo vyvíjeno množství $1,2 \text{ l/min}^{-1}$ plynu HHO.

5.2 Postup měření

Měření točivého momentu, otáček, spotřeby paliva a emisí bylo prováděno statickou metodou, kde se postupovalo podle tab. 8. Každý bod byl udržován po dobu pěti minut, přičemž prvních 2,5 minuty bylo vymezeno na ustálení cyklu a data z druhých 2,5 minuty byla zpracována a vyhodnocena. Měřené cykly byly vybrány podle toho, co umožnily parametry motoru.

Tab. 8 Přehled měřených cyklů [Vlastní]

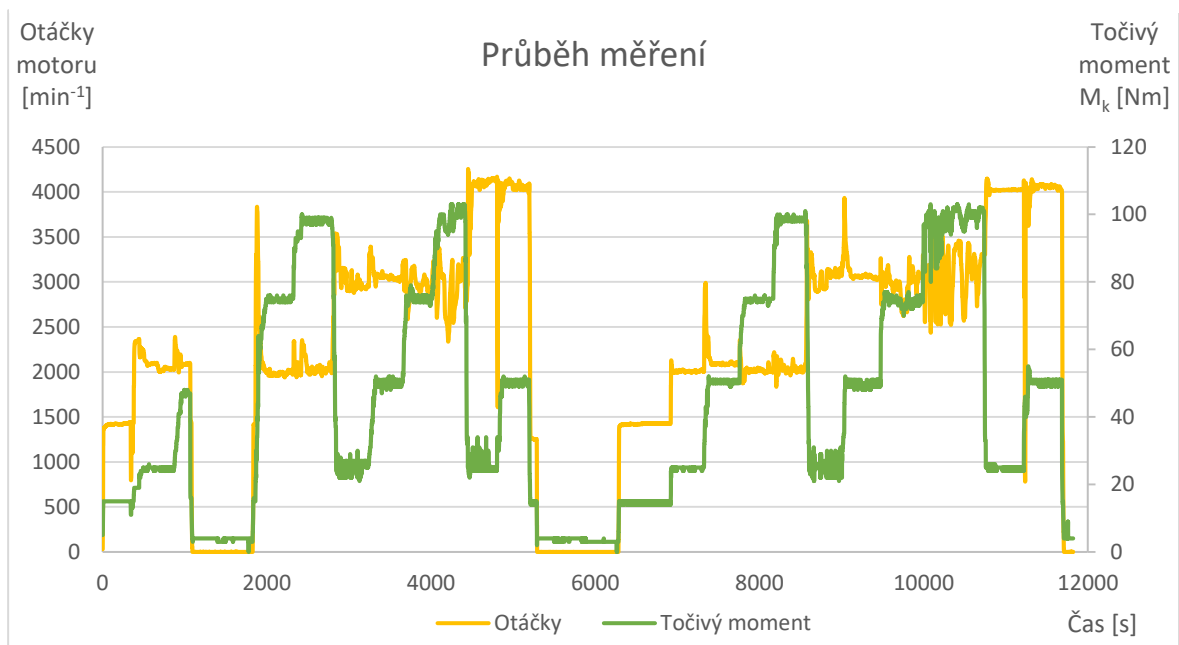
Cyklus	Otáčky [min^{-1}]	Točivý moment [Nm]
bez HHO	1400	15
	2000	25
	2000	50
	2000	75
	2000	100
	3000	25
	3000	50
	3000	75
	3000	100
	4000	25
	4000	50
s HHO	1400	15
	2000	25
	2000	50
	2000	75
	2000	100
	3000	25
	3000	50
	3000	75
	3000	100
	4000	25
	4000	50

6 Výsledky a diskuze

Naměřené hodnoty byly v programu Microsoft Excel 2017 zpracovány do grafů. V grafech jsou porovnávány průměrné hodnoty měrné spotřeby paliva m_p obr. 11, oxidu uhličitého CO_2 obr. 12, oxidu uhelnatého CO obr. 13 a oxidů dusíku NO_x obr. 14, pro každý měřený cyklus dle tab. 8. Přítomnost nespálených uhlovodíků HC zaznamenána nebyla.

Na obr. 10 je znázorněn průběh otáček motoru a točivého momentu v závislosti na čase při sběru dat. Zde je potřeba zdůraznit, že byla zpětně zjištěna porucha sběru dat při měření cyklu $2000 \text{ min}^{-1} 50 \text{ Nm}$ bez HHO. Při vyhodnocování dat z tohoto zatížení s HHO ale bylo zjištěno, že se motor choval podle trendu všech hodnot okolních cyklů, takže nebylo provedeno opravné měření. Nicméně hodnoty pro cyklus $2000 \text{ min}^{-1} 50 \text{ Nm}$ s HHO nebyly zařazeny, aby nenarušily jednotvárnost grafů a nepůsobily zmatečně.

Obr. 10 Průběh otáček motoru a točivého motoru při měření [Vlastní]



Při pohledu na graf na obr. 10 si také na první pohled lze všimnout kolísání otáček a točivého momentu v některých cyklech. Obzvláště výrazné je to u cyklů $3000 \text{ min}^{-1} 100 \text{ Nm}$, protože motor v tomto režimu pracoval na hranici svých možností. Výkyvy ve tvaru špiček se vyskytují zejména při přechodu mezi cykly a jsou způsobeny mechanismem nastavování zatížení a otáček motoru. To se provádělo v počítačovém programu, kde se manuálně pomocí posuvníků nastavovalo otevření škrticí klapky a proud budicího vinutí vířivého dynamometru (motorové brzdy).

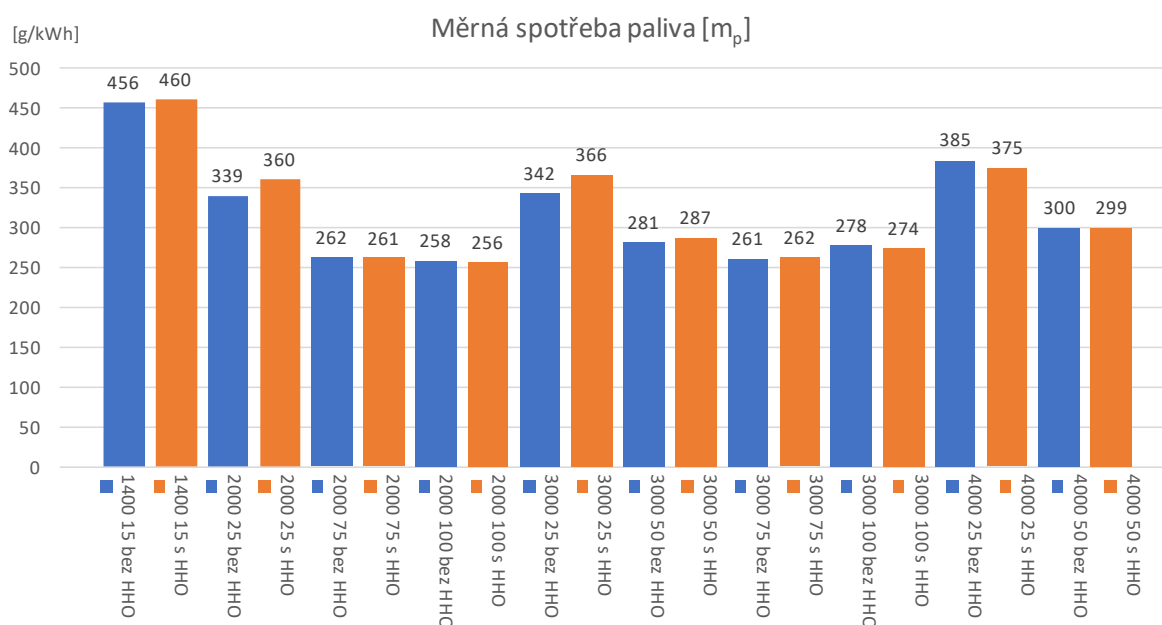
Všechny výše jmenované zdroje nepřesnosti měření ale byly minimalizovány pomocí výběru vhodného (stabilizovaného a nejméně zvlněného) úseku 2,5 minuty, což při vzorkovací frekvenci jeden vzorek za sekundu představuje 150 hodnot na jeden cyklus. Z toho byla vypočítána průměrná hodnota, která se od jmenovité hodnoty (tedy požadované hodnoty cyklu) odchylovala ve dvou případech do 5 %, a u ostatních do 3 %.

Hodnota výkonu motoru byla vypočítávána a zaznamenávána přímo softwarem použitý pro řízení motorové brzdy. Měrná spotřeba paliva m_p byla vypočítána pomocí vzorce (6),

$$m_p = \frac{\Delta m_m \cdot 3600}{P \cdot t \cdot 1000} \quad (6)$$

kde Δm_m je rozdíl hmotnosti paliva v nádrži mezi začátkem a koncem vyhodnocované části cyklu, P je výkon motoru a t je délka vyhodnocovaného cyklu (zde 150 s). Konstanty slouží k převodu na jednotky [g/kWh]. Porovnání měrné spotřeby u jednotlivých cyklů je znázorněno na obr. 11, kde jsou jednotlivé cykly seřazeny vzestupně zleva doprava vždy střídavě nejprve bez přidání HHO (modře) a poté s přidáním HHO (oranžově); stejně jsou řazeny hodnoty v grafech znázorňující množství jednotlivých složek výfukových emisí.

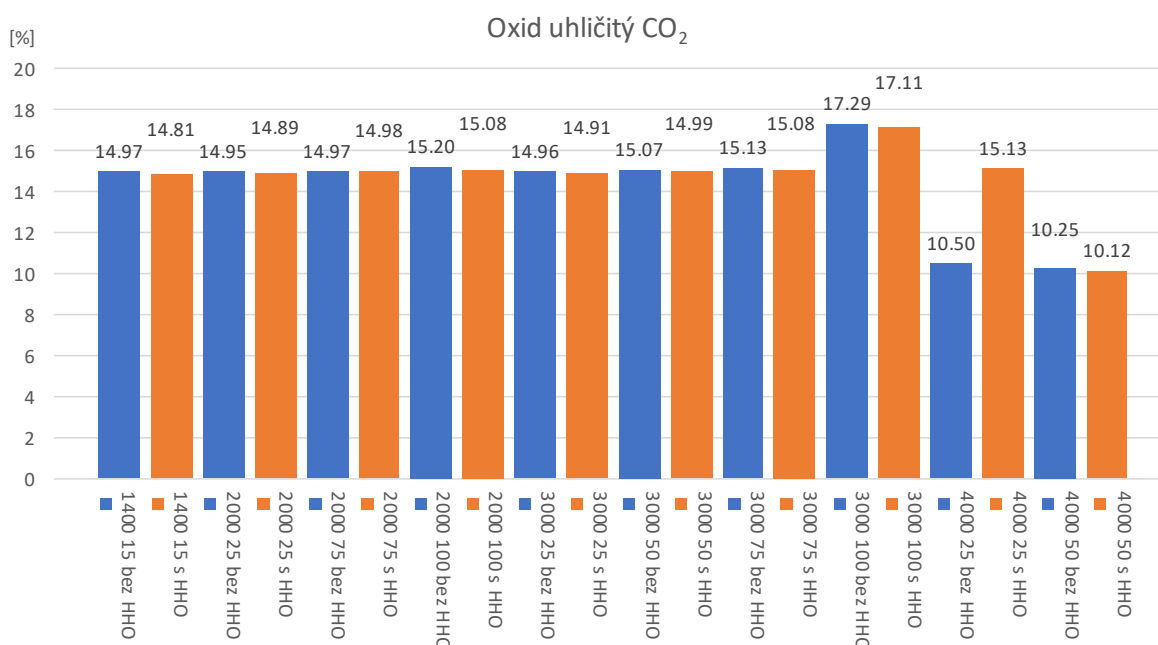
Obr. 11 Graf měrné spotřeby m_p benzínu při jednotlivých cyklech [Vlastní]



Při pohledu na zjištěné množství měrné spotřeby je patrné, že až na výjimky je vliv HHO mírně negativní. To nespĺňuje očekávání, protože obohacování vodíkem by dle teoretické části této práce mělo zvýšit účinnost motoru, což by se projevilo na snížení měrné spotřeby. Lze to vysvětlit tak, že při každém cyklu je pro zlepšení účinnosti zapotřebí jiné množství HHO, aby se vyvážilo zvýšení zatížení alternátoru, který vyrábí elektrickou energii potřebnou pro elektrolýzu. Tomu napovídá i zlepšení v cyklech při vyšších otáčkách. Největšího snížení (2,6 %) měrné spotřeby bylo dosaženo při cyklu 4000 min⁻¹ 25 Nm. Naproti tomu nejvýznamnější zhoršení (7 %) se projevilo v cyklu 3000 min⁻¹ 25 Nm.

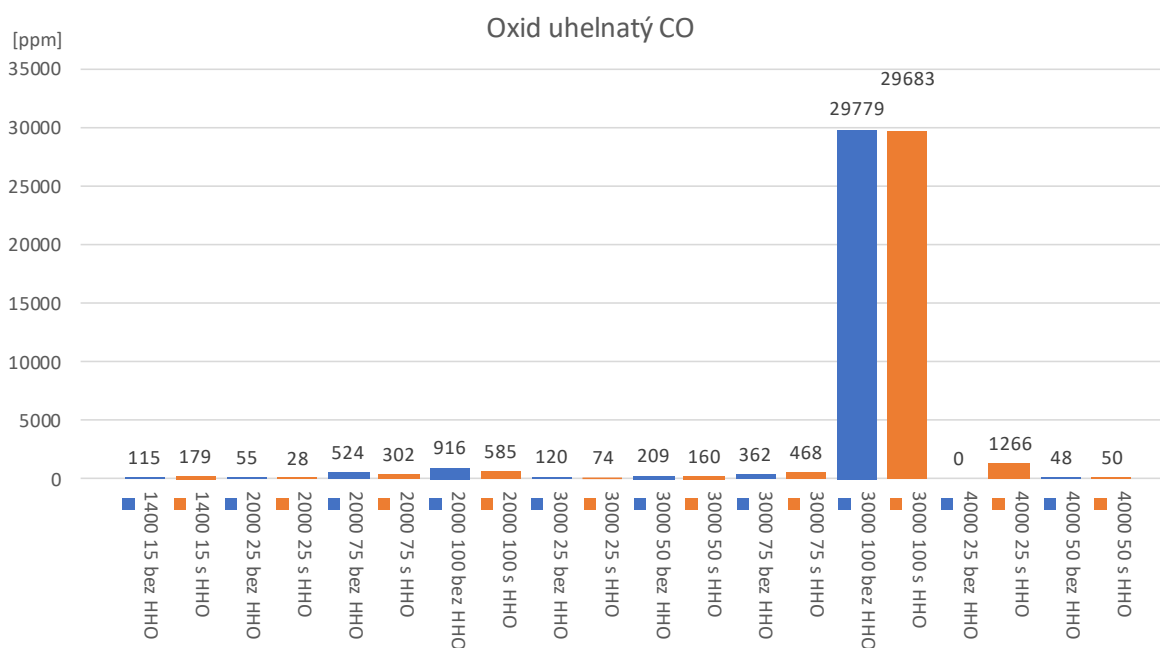
Na obr. 12 jsou znázorněny naměřené emise **oxidu uhličitého CO₂**. Pro lepší přehlednost byla data převedena z ppm (parts per million) na procenta. Emise CO₂ jsou produktem dokonalého spalování (ale také skleníkový plyn) uhlovodíkových paliv a množství jejich produkce se tedy odvíjí od spotřeby paliva a dokonalosti spalování. Při obohacení paliva o HHO by se tedy měla tato hodnota snížit, k čemuž skutečně došlo u všech vyhodnocovaných cyklů, kromě u 2000 min⁻¹ 75 Nm, kde došlo k zanedbatelnému nárůstu o 0,01 %, a u 4000 min⁻¹ 25 Nm, kde došlo k výraznému nárůstu o 4,63 %. Tento nárůst je ale v podstatě pozitivní, jelikož se při tomto cyklu nevytvářely produkty nedokonalého spalování (CO, NO_x), jak je patrné z dalších grafů.

Obr. 12 Graf produkce oxidu uhličitého CO₂ při jednotlivých cyklech [Vlastní]



Emise **oxidu uhelnatého CO** jsou znázorněny na obr. 13. CO u spalovacích motorů provozovaných na uhlovodíková paliva vzniká při spalování směsí chudých na kyslík. Z grafu znázorňujícího produkci CO při jednotlivých cyklech je patrné, že u několika cyklů došlo ke zlepšení téměř o polovinu, u jiných došlo k mírnému zhoršení, a mezi cykly 4000 min⁻¹ 25 Nm bez HHO a s HHO došlo k nárůstu z 0 na 1266 ppm z celkového objemu vypouštěných plynů. Vysoké hodnoty téměř 30 000 ppm u cyklu 3000 min⁻¹ 100 Nm jsou známkou, že při takto vysokých otáčkách a téměř plnému zatížení nebylo v motoru přítomné dostatečné množství kyslíku.

Obr. 13 Graf produkce oxidu uhelnatého CO při jednotlivých cyklech [Vlastní]

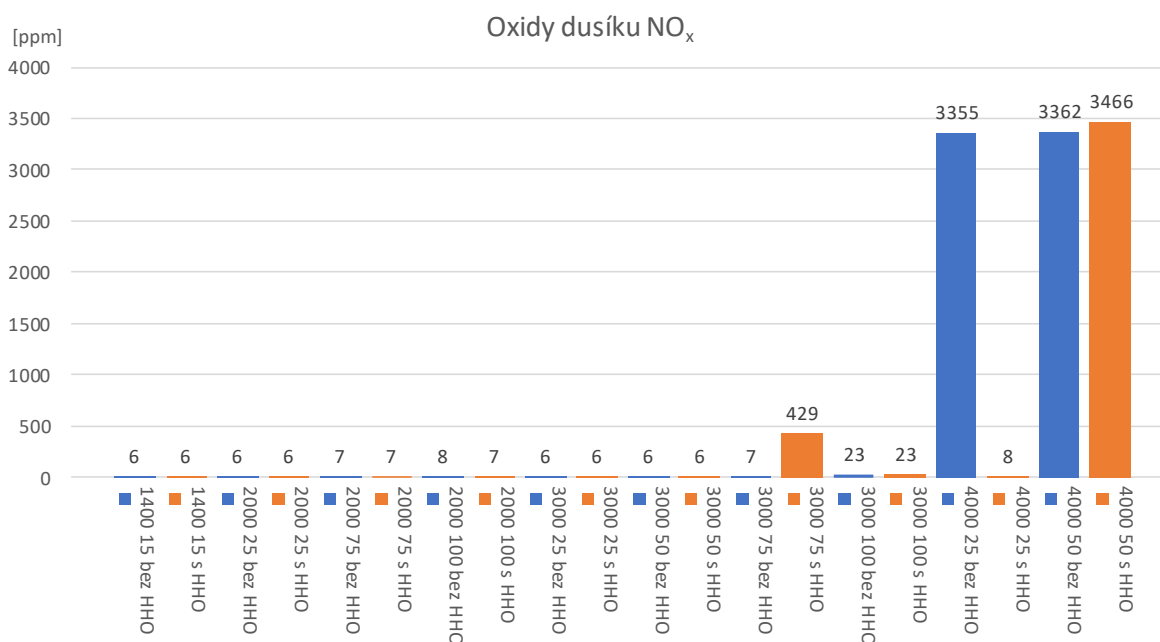


Při celém měření, tedy i vedle vyhodnocovaných cyklů, nebyla zjištěna žádná přítomnost **nespálených uhlovodíků HC**. Očekávání bylo takové, že by mohly být přítomny alespoň při přechodu na vyšší točivý moment a otáčky. Jelikož při záznamu jiných složek emisí nenastal žádný problém, tak lze usoudit, že byly všechny uhlovodíky skutečně spáleny nebo následně zpracovány v třicestném katalyzátoru a tyto škodlivé látky se nedostaly k emisnímu analyzátoru a ani do ovzduší.

Emise směsi **oxidů dusíku NO_x** jsou znázorněny v grafu na obr. 14. Zde byly u většiny cyklů naměřeny hodnoty velmi nízké a vliv přidání HHO zde není znatelný. Naopak při cyklu 3000 min⁻¹ 75 Nm lze pozorovat po přidání HHO nárůst NO_x téměř

62násobný. Příčinou toho by mohl být nárůst teploty spalování v tomto cyklu, jak vyplývá z teoretické části, ale vzhledem k tomu, že u vyššího zatížení jsou porovnávány hodnoty opět stejné, tak se nabízí vysvětlení spíše z důvodu chyby měření. U obou cyklů při 4000 min⁻¹ 50 Nm je velký nárůst NO_x nejspíše způsoben nárůstem teploty spalování spojeným s velikostí zatížení a otáček. Podobný nárůst lze pozorovat i u cyklu 4000 min⁻¹ 25 Nm bez HHO, kde k tomu zřejmě ještě přispěla obtížnost udržení cyklu na jmenovitém zatížení, což se projevilo v kolísání po celou dobu cyklu, jak je patrné z obr. 10. Při pohledu na tento graf si nelze nevšimnout významného poklesu produkce NO_x u cyklu 4000 min⁻¹ 25 Nm s HHO, ale je třeba vzít úvahu možnost, že ke zlepšení ve skutečnosti nedošlo a bylo pouze špatně provedené měření cyklu 4000 min⁻¹ 25 Nm bez HHO, čemuž by napovídalo i výrazné odchýlení od trendu u ostatních vyhodnocovaných hodnot.

Obr. 14 Graf produkce oxidu uhelnatého CO při jednotlivých cyklech [Vlastní]



7 Závěr

V teoretické části práce byly vyjmenovány a přiblíženy možnosti použití vodíku jako paliva vozidel. I přes velké výhody, které vodík oproti jiným palivům a zdrojům energie přináší, dosud nedošlo k jeho velkému rozšíření. To by totiž představovalo na jedné straně vytvoření zcela nové infrastruktury a na straně druhé ještě musí dojít ke zdokonalení ukládání dostatečného množství vodíku ve vozidlech a v případě použití vodíku na výrobu elektrické energie v palivových článcích je zapotřebí snížit náklady na výrobu a prodloužit jejich životnost. Výzkum v těchto oblastech ale stále pokračuje, takže je možné, že se jednou bude vodík jako čisté a obnovitelné palivo pro vozidla ve větší míře používat.

V teoretické části byl kladen důraz na shrnutí vlivů obohacování paliv vodíkem. Byla zde také popsána možnost výroby plynu HHO pomocí elektrolýzy přímo ve vozidle a jeho následné přidávání do sacího traktu motoru. Toto bylo také prakticky vyzkoušeno a vyhodnoceno.

Přidání HHO přineslo až na výjimky u všech měřených cyklů drobné změny. U měrné spotřeby paliva m_p byl kromě výjimek zjištěn mírný nárůst, zatímco u emisí oxidu uhelnatého CO a oxidu uhličitého CO₂ se projevil mírný pokles. Emise oxidů dusíku NO_x zůstali beze změny s výjimkou dvou cyklů, které byly pravděpodobně ovlivněny chybou měření.

Dle mého názoru založeného na zjištěných skutečnostech může mít používání vyvíječů plynu HHO ve vozidlech celkově mírně pozitivní vliv na spotřebu paliva i emise za předpokladu, že výrobci těchto zařízení budou dodávat sady pro konkrétní typy motorů, na kterých byly vyzkoušeny a vytvořeny datové mapy pro řízení množství vyráběného plynu podle otáček a zatížení. Dále by k tomu museli dodávat i elektroniku, která by upravila řízení motoru podle aktuálního přidávaného množství plynu HHO (hlavně na ochuzení směsi). Volný prodej autosad vyvíječů plynu HHO je také spojen s rizikem neodborné montáže, což může jednoduše vést ke zničení motoru nebo k jiným nepříjemnostem v podobě poleptáním roztokem KOH, nutnosti dolévání destilované vody do systému a nutnost vypouštění roztoku KOH s vodou při silných mrazech. Je také potřeba vzít v úvahu, že autosady vyvíječů plynů nejsou homologované pro silniční provoz a provoz takto upraveného automobilu je postihnutelný zákonem.

Seznam použité literatury

- [1] GUPTA, Ram. *Hydrogen fuel: production, transport, and storage*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-4575-8.
- [2] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.
- [3] SHERIF, S., D. GOSWAMI, Elias STEFANAKOS a Aldo STEINFELD. *Handbook of Hydrogen Energy*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4200-5447-7.
- [4] The Hydrogen Economy: Opportunities, Cost, Barriers and R&D Needs. *National Research Council and National Academy of Engineering*. Washington: National Academies Press, 2004.
- [5] BOCKRIS, J.O'M., T.N. VEZIROGLU a D. SMITH. *Solar hydrogen energy: The Power to Save the Earth*. London: Optima, 1991.
- [6] VEZIROGLU, T.N. a F. BARBIR. *Hydrogen: The wonder fuel*. *Int. J. Hydrogen Energy*, 1992, **17**(6), 391-404 s.
- [7] YILMAZ, Ali, Erinc ULUDAMAR a Kadir AYDIN. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, **35**(20), 11366-11372. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.07.040. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910013595>
- [8] SZKLO, W a R SCHAEFFER. Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries. *Energy*. 2007, **32**, 1075-1092.

- [9] WHITE, C.M. a R.R. STEEPER. The hydrogen fueled internal combustion engine: A technical review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006, **31**, 1292-1305.
- [10] DAS, L.M. Hydrogen engines: A view of the past and a look into the futurw. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1990, **15**, 425-443.
- [11] MOHAMMADIA, A. Perfomance and combustion charakteristics of a direct SI hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007, **32**, 296-304.
- [12] ZHAO, Z., A. KAZAKOV a F.L. DRYER. *An update comprehensive kinetic model of hydrogen combustion: International Journal of Chemical Kinteics*. 2004, **36**(10), 566-575 s.
- [13] HEYWOOD, J. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [14] JAMAL, Y a M WYSZYNSKI. On-board generation of hydrogen-rich gaseous fuels—a review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1994, **19**(7), 557-572. DOI: 10.1016/0360-3199(94)90213-5. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0360319994902135>
- [15] KARIM, G., I. WIERZBA a Y. AL-ALOUSHI. *Methane-hydrogen mixtures as fuels: International Journal of Hydrogen Energy*. 1996, **21**(7), 625-631 s.
- [16] VERHELST, S., S. VERSTRAETEN a R. SIERENS. A comprehensive overview of hydrogen engine design features. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*. 2007, **221**(8), 911-920.
- [17] *More about fuel cells* [online]. Montpellier: Université de Montpellier, b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.spinam.eu/fc.html>

- [18] WEE, J.H. Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. *Renewable Sustainable Energy Review*. 2007, **11**, 1720-1738.
- [19] AHLUWALIA, R.K. a X. WANG. Direct hydrogen fuel cell systems for hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*. 2005, **139**, 152-164.
- [20] Brown's gas. *Eagle-Research* [online]. New York: Eagle-Research, 2017 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://www.eagle-research.com/browngas/whatisbg/watergas.php>
- [21] SANTILLI, R. A new gaseous and combustible form of water. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2006, **31**(9), 1113-1128. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2005.11.006. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319905003344>
- [22] CLOONAN, M. A chemist's view of J.M. Calo's comments on: "A new gaseous and combustible form of water" by R.M. Santilli (Int. J. Hydrogen Energy 2006. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, **33**(2), 922-926. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.11.009. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319907006611>
- [23] CALO, J. Comments on "A new gaseous and combustible form of water," by R.M. Santilli (Int. J. Hydrogen Energy 2006: 31(9), 1113–1128). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007, **32**(9), 1309-1312. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.11.004. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319906005581>
- [24] KADEISVILI, J. Rebuttal of J.M. Calo's comments on R.M. Santilli's HHO paper. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, **33**(2), 918-921. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.10.030. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319907006350>

- [25] SUBRAMANIAN, Balaji a Saleel ISMAIL. Production and use of HHO gas in IC engines. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, **43**(14), 7140-7154. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.120. ISSN 03603199. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319918305871>
- [26] BAGN, Jamie. Dry cell Electrolyser. *Instructables* [online]. San Rafael, CA: Autodesk, 2013 [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.instructables.com/id/Dry-Cell-Electrolyser/>
- [27] ISMAIL, Tamer, Khaled RAMZY, M.N. ABELWHAB, Basem ELNAGHI, M. ABD EL-SALAM a M.I. ISMAIL. Performance of hybrid compression ignition engine using hydroxy (HHO) from dry cell. *Energy Conversion and Management*. 2018, **155**, 287-300. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.10.076. ISSN 01968904. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890417310087>
- [28] Elektrochemické procesy. *VSCHT* [online]. Praha: VSCHT, b.r. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: https://web.vscht.cz/~paidarm/ACHP/prezentace/ACHP_e3.pdf
- [29] Hydroxid draselny. *CZ Promech, s. r. o.* [online]. Bohumín: CZ Promech, 2017 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.czpromech.cz/chemikalie/62-hydroxid-draselny>
- [30] *Electrolyte concentrations* [online]. Hydrogen Electrolysis, 2016 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: http://hho4free.com/electrolyte_concentrations.html

Seznam obrázků

Obr. 1 Vývoj paliv [1].....	4
Obr. 2 Princip palivového článku [17].....	20
Obr. 3 Schématické zapojení PEMFC v automobilu [19]	22
Obr. 4 Vyvíječ plynu HHO [26]	24
Obr. 5 Vířivý dynamometr [KVPD TF ČZU]	28
Obr. 6 Vyvíječ HHO z boku [Vlastní].....	30
Obr. 7 Vyvíječ HHO ze předu [Vlastní]	30
Obr. 8 Schéma zapojení vyvíječe HHO [Vlastní].....	31
Obr. 9 Fotografie umístění komponentů vyvíječe plynu HHO [Vlastní]	32
Obr. 10 Průběh otáček motoru a točivého motoru při měření [Vlastní]	35
Obr. 11 Graf měrné spotřeby mp benzínu při jednotlivých cyklech [Vlastní]	36
Obr. 12 Graf produkce oxidu uhličitého CO ₂ při jednotlivých cyklech [Vlastní]	37
Obr. 13 Graf produkce oxidu uhelnatého CO při jednotlivých cyklech [Vlastní].....	38
Obr. 14 Graf produkce oxidu uhelnatého CO při jednotlivých cyklech [Vlastní].....	39

Seznam tabulek

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vodíku [1]	6
Tab. 2 Porovnání energetických hodnot vodíku a ostatních paliv [1]	9
Tab. 3 Srovnání typů palivových článků [1].....	21
Tab. 4 Závislost bodu mrzutí vody na obsahu KOH [30].....	25
Tab. 5 Parametry měřeného motoru [KVPD TF ČZU]	27
Tab. 6 Tabulka hodnot brzdového stanoviště [KVPD TF ČZU]	28
Tab. 7 Parametry použitého emisního analyzátoru [KVPD TF ČZU]	29
Tab. 8 Přehled měřených cyklů [Vlastní]	34