

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SPALOVÁNÍ VODÍKU V PÍSTOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORECH

HYDROGEN COMBUSTION IN RECIPROCATIN PISTON ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ANTONÍN FORBELSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Forbelský Antonín

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Spalování vodíku v pístových spalovacích motorech

v anglickém jazyce:

Hydrogen Combustion in Reciprocating Piston Engines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Uvedení principu činnosti spalování vodíku v pístových spalovacích motorech. Přehled vodíkových automobilů.

Seznam odborné literatury:

- [1] VLK, František. Vozidlové spalovací motory. 1. vyd. Brno: Vlk, 2003. 580 s.
- [2] VLK, František. Příslušenství vozidlových motorů 1. vyd. Brno: Vlk, 2002. 338 s.
- [3] VLK, František. Alternativní pohony motorových vozidel 1. vyd. Brno : Vlk, 2004. 250 s.
- [4] Internet, propagační materiály výrobců automobilů, odborná periodika určená široké veřejnosti

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

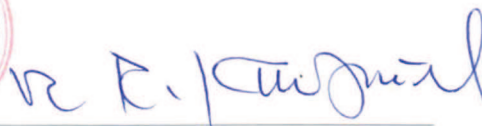
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 21.10.2008

L.S.



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

V bakalářské práci jsem se zaměřil na shrnutí dostupných faktů týkajících se vodíkových spalovacích motorů. V práci je uvedena stručná historie vodíkových motorů. Hlavní část práce tvoří popis specifik konverze konvenčního spalovacího motoru na vodíkový motor a stručný přehled vozidel poháněných vodíkovým spalovacím motorem. Závěr práce obsahuje zamyšlení nad budoucností této technologie.

klíčová slova: vodík, vodíkový spalovací motor, vodíkový pohon, alternativní palivo, hybridní pohon

Annotation

In the thesis I focused on the summary of the facts available concerning hydrogen combustion engines. The work gives a brief history of hydrogen engines. The main part consists of a description of the specifics of the conversion of conventional internal combustion engine into hydrogen engine, and a brief overview of vehicles powered by hydrogen internal combustion engine. In conclusion, the work includes consideration of the future of this technology.

keywords: hydrogen, hydrogen internal combustion engine, hydrogen propulsion, alternative fuel, hybrid propulsion

Bibliografická citace

FORBELSKÝ, A. *Spalování vodíku v pístových spalovacích motorech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce, pana Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím uvedených zdrojů.

V Brně, dne 2. května 2009

Antonín Forbelský

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za trpělivost, vstřícné jednání a odborný dohled nad mojí prací.

Obsah

Úvod	11
1. Historie vodíkových spalovacích motorů	13
2. Vodík a jeho vlastnosti	15
2.1 Vysoká výhřevnost	15
2.2 Nízká hustota	15
2.3 Široký rozsah hořlavosti	15
2.4 Nízká iniciační energie	16
2.5 Malá vzdálenost hašení.....	16
2.6 Vysoká teplota samovznícení	16
2.7 Vysoká rychlost šíření plamene.....	16
2.8 Vysoká difuzivita.....	16
3. Spalování vodíku	19
3.1 Způsob využití energie z vodíku	19
3.2 Palivová směs	20
3.3 Problémy při spalování vodíku v pístových motorech	22
3.4 Palivové systémy	22
3.4.1 Central injection	22
3.4.2 Port injection	22
3.4.3 Přímé vstřikování.....	23
3.5 Systémy zapalování	24
3.6 Odvětrávání klikové skříně.....	24
3.7 Termodynamická účinnost	25
3.8 Emise	25
3.9 Výkon motoru.....	26
3.10 Vodíkové palivové nádrže	26
4. Přehled vozidel poháněných HICE.....	29
4.1 Mazda	29
4.2 BMW	33
4.3 Ford.....	37
5. Budoucnost vodíkových spalovacích motorů.....	39
Závěr.....	41
Přehled použitých informačních zdrojů:.....	43
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	47

Úvod

V novém tisíciletí se díky růstu automobilové dopravy a ztenčování zásob ropy zvyšuje potřeba nalezení nového paliva. V současnosti jsou postupně zaváděna alternativní paliva, jako například bionafta, LPG (liquefied petroleum gas) nebo CNG (compressed natural gas), která jsou spalována v upravených konvenčních spalovacích motorech. K jejich přednostem, oproti ropným palivům, patří ekologičtější provoz nebo nižší cena. Tato alternativní paliva ale nemají dostatečný potenciál trvale nahradit benzín a naftu.

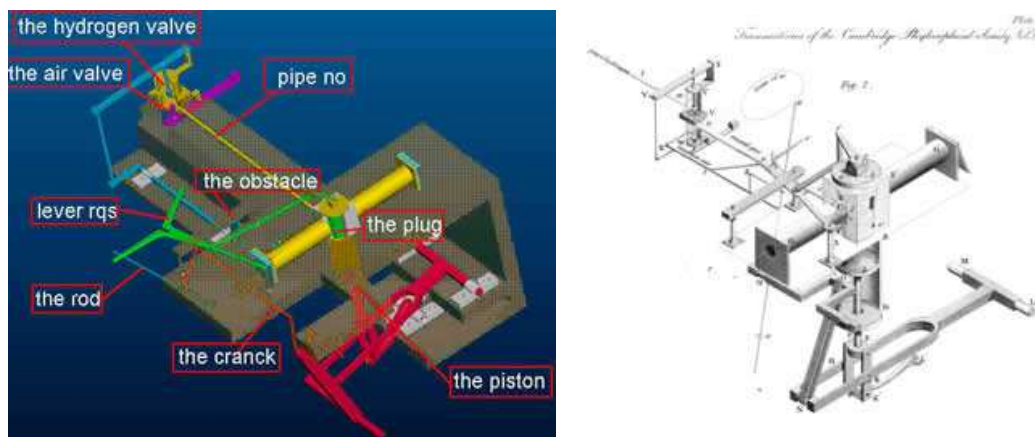
Vodík, oproti výše uvedeným alternativním palivům, má schopnost stát se palivem a nositelem energie nového tisíciletí. K rozsáhlému využití jej předurčují nejen jeho vlastnosti, ale i hojnost jeho výskytu na Zemi. Vodík je také obnovitelným zdrojem, při jehož spalování nebo použití v palivovém článku nevznikají v ideálním případě žádné škodlivé emise.

Cílem bakalářské práce je popsat využití vodíku ve spalovacích motorech. V první kapitole jsou stručně shrnuty dějiny vodíkových spalovacích motorů. Druhá kapitola se zabývá vlastnostmi vodíku podstatnými pro jeho využití ve spalovacím motoru. V třetí kapitole je podán zevrubný popis modifikace konstrukce konvenčního zážehového motoru na vodíkový spalovací motor. Čtvrtá kapitola je věnována automobilkám, které vyvíjejí vodíkový spalovací motor, a jejich přístupu k této technologii. V této kapitole jsou popsána jednotlivá vozidla poháněná tímto motorem. V poslední kapitole je nastíněn předpokládaný vývoj využití vodíku k pohonu vozidel.

1. Historie vodíkových spalovacích motorů

Dějiny motoru spalujícího vodík sahají do počátků 19. století. Roku 1806 sestrojil François Isaac de Rivaz pístový spalovací motor s elektrickým zapalováním. Jako palivo použil směs vzduchu a plynného vodíku. Tento motor je pokládán za první spalovací motor a byl roku 1808 patentován. Nedočkal se ale žádného dalšího využití a rozšíření (viz [9]).

Dalším, kdo zkonstruoval motor spalující vodík, byl reverend W. Cecil, který v roce 1820 zveřejnil svoji knihu *On the application of hydrogen gas to produce a moving power in machinery*. Zde popisuje motor, který je poháněn pomocí atmosférického tlaku a podtlaku vzniklého explozí po smíchání vodíku a vzduchu. Při ní vzniká dusík, který je vpuštěn do prostoru mnohem většího a jeho tlak je asi 6krát menší než tlak atmosférický. Během sání se píst pohybuje dolů a těsně před dosažením dolní polohy dochází k explozi směsi a následný vzniklý podtlak umožňuje atmosférickému tlaku pohybovat pístem nahoru do výchozí polohy a konat práci. Tento motor byl vůbec prvním, který použil vodík jako palivo. Ačkoliv motor fungoval, přesto se vakuové motory v praxi nikdy neujaly. Princip činnosti tohoto motoru lze lépe pochopit z animace, která se nachází na webovských stránkách University of Cambridge (viz [24]).



Obr. 1 Vakuový motor spalující vodík [24]

O dalších šedesát let později Nicolaus August Otto, vynálezce Ottova cyklu, údajně používal jako palivo svého motoru syntetický plyn tvořený více jak z 50% vodíkem. Otto také experimentoval s využitím benzínu jako paliva. Práce s ním se mu však zdála příliš nebezpečná a komplikovaná, a tak se vrátil k experimentům s plynnými pohonnými hmotami. Až s příchodem karburátoru se stal benzín prakticky a bezpečně používaným palivem a zájem o jiná paliva ochabnul.

Od té doby se vodík jako palivo ujal pouze ve vesmírném cestování, a to hlavně díky svému výhodnému poměru energetické kapacity a hmotnosti.

2. Vodík a jeho vlastnosti

Vodík je nejlehčím, nejjednodušším a nejrozšířenějším prvkem vyskytujícím se v přírodě na Zemi i ve vesmíru. Objevil jej r. 1776 Henry Cavendish. Pro využití vodíku k pohonu automobilů jsou podstatné následující vlastnosti (viz [11], [14]):

- vysoká výhřevnost
- nízká hustota
- široký rozsah hořlavosti
- nízká iniciační energie
- malá vzdálenost hašení
- vysoká teplota samovznícení
- vysoká rychlost šíření plamene
- vysoká difuzivita

2.1 Vysoká výhřevnost

Důležitou vlastností vodíku je výhřevnost, která se u plynů vyjadřuje:

- buď jako uvolněná energie z jednoho m^3 (pro vodík $10,7MJ \cdot m^{-3}$)
- nebo jako energie získaná z jednoho kilogramu (v případě vodíku $119MJ \cdot kg^{-1}$).

Ve srovnání s výhřevností benzínu ($44,5MJ \cdot kg^{-1}$) je výhřevnost vodíku téměř třikrát větší.

2.2 Nízká hustota

Vodík má velmi nízkou hustotu ($0,0899kg \cdot m^{-3}$), což způsobuje problémy při použití vodíku pro pohon automobilů.

Přestože má vodík téměř třikrát větší výhřevnost z jednotky hmotnosti než benzín, kvůli velmi nízké hustotě se zvyšuje jeho spotřeba. K dosažení srovnatelného výkonu s motorem spalujícím benzín by měl mít vodíkový motor větší zdvihový objem.

Aby byl zajištěn dostatečný jízdní dosah automobilu na vodík, je třeba kvůli kombinaci nízké hustoty a vyšší spotřeby vodíku vybavit automobil nádrží, která je schopná uchovávat velké množství vodíku.

2.3 Široký rozsah hořlavosti

Ve srovnání s ostatními palivy má vodík širokou oblast, ve které je hořlavý. Díky tomu lze vodík spalovat v širokém rozmezí poměru vzduch/palivo (v angličtině air/fuel ratio – A/F ratio) a tedy i jako velmi chudou směs. Chudá směs je taková, ve které je A/F ratio větší než ideální. To umožňuje značnou úsporu paliva ve chvíli, kdy není požadován velký výkon.

Navíc dochází k poklesu spalovacích teplot a tím se značně omezí vznik emisí, jako například oxidů dusíku (NO_x). Jedná se o velmi ekologický chod motoru. Chudá palivová směs umožňuje snadný start motoru. Při příliš chudé směsi dochází z důvodu poklesu spalovacích teplot nejen ke ztrátě výkonu ale i k značně nestabilnímu spalování. Tyto jevy lze do jisté míry ovlivnit konstrukcí spalovacího prostoru.

2.4 Nízká iniciační energie

Vodík má o řád menší energii nutnou k zapálení směsi než například benzín (0,02mJ oproti 0,29mJ). Díky tomu je možné spalovat velmi chudou směs a ke vznícení směsi dochází téměř okamžitě.

Nízká iniciační energie ale s sebou přináší také značné komplikace. Velkým problémem je předčasné zapálení směsi od rozžhavených částí motorů, například od výfukového ventilu, nebo od zbytkových spalin. Může přitom také nastat tzv. zpětný zášleh přiváděného paliva. Řešení problémů způsobených nízkou iniciační energií vodíku je jednou z velkých výzev při konstrukci vodíkového spalovacího motoru.

2.5 Malá vzdálenost hašení

Vodík má oproti benzínu menší vzdálenost hašení (0,64mm), což je vzdálenost od povrchu válce, při které dochází k uhašení plamene. Stěna válce je tedy více tepelně namáhána. Zvyšuje se také riziko zpětného zášlehu do sacího potrubí.

2.6 Vysoká teplota samovznícení

Díky vysoké teplotě samovznícení lze použít vysoký kompresní poměr. Směs vodíku a vzduchu lze stlačit více než směs benzínu a vzduchu u konvenčních motorů, aniž by došlo k předčasnému samovznícení paliva. Dosáhneme tím lepší tepelné účinnosti cyklu a tím i vyššího výkonu motoru. Vysoká teplota samovznícení však na druhou stranu značně omezuje použití vodíku jako paliva pro vznětové motory.

2.7 Vysoká rychlost šíření plamene

Oproti benzínu je rychlost šíření plamene při spalování vodíku řádově vyšší, což celý proces spalování přibližuje k termodynamicky ideálnímu cyklu motoru. Zvyšuje se tak termodynamická účinnost cyklu. Při spalování chudé směsi rychlost šíření plamene znatelně klesá.

2.8 Vysoká difuzivita

Vodík má velmi vysokou difuzivitu, která je způsobena velmi malou velikostí molekul vodíku. Schopnost vodíku rozptýlit se ve vzduchu je podstatně větší než u benzínu a je výhodná ze dvou důvodů.

Za prvé usnadňuje tvorbu homogenní směsi paliva a vzduchu, což s sebou přináší lepší hoření směsi. Za druhé, pokud dojde k úniku vodíku do okolního prostředí, vodík se rychle rozptýlí do okolí a nedojde k ohrožení cestujících.

Vysoká difuzivita s sebou přináší i komplikace. Způsobuje například vodíkovou křehkost materiálů, zapříčiněnou pronikáním vodíkových molekul do některých kovových materiálů. Je tedy nutné použití speciálních materiálů, které jsou vůči tomuto jevu imunní. Vodík kromě vodíkové křehkosti způsobuje také oduhličení oceli, a to při vyšších tlacích a nižších teplotách. Dochází ke snížení pevnosti oceli a její houževnatosti.

3. Spalování vodíku

3.1 Způsob využití energie z vodíku

V 21. století, stejně jako ve století předchozím, dochází neustále ke značnému nárůstu automobilové dopravy, což má za následek větší spotřebu ropných paliv a rostoucí produkci emisí i přes zpřísnování emisních norem. Hledá se tedy nový obnovitelný zdroj, který by pokud možno neprodukoval žádné emise. Jako ideální se jeví právě vodík, který lze obecně využít ke skladování energie a k jejímu následnému využití, například k pohonu automobilu.

Existují dva přístupy, jak získat energii uloženou do vodíku. Prvním je spalování vodíku namísto benzínu v konvenčních spalovacích motorech, v angličtině označováno jako *hydrogen internal combustion engine* (HICE). Druhým způsobem je získání energie z vodíku ve formě elektrické energie, což probíhá v palivových článcích.

V odborné veřejnosti převládá názor, že budoucnost patří palivovým článkům. K jejich nesporným výhodám patří vysoká účinnost a nulové emise při provozu vozidla. Navíc je výzkumu palivových článků a jejich využitelnosti v praxi věnována velká pozornost. Hnací motorem výzkumu jsou automobilky, které již do dnešního dne vyrobily množství prototypů, které tuto technologii využívají. Širšímu rozšíření těchto vozidel brání mimo jiné neexistující infrastruktura vodíkových čerpacích stanic.

Ke spalování vodíku se dnes používají upravené konvenční čtyřtákní zážehové pístové motory. Spalovací motor pracuje v kruhovém ději, který je popsán Ottovým cyklem. Pracovní oběh čtyřdobého spalovacího motoru se skládá ze 4 fází:

1. **Sání**

Píst se pohybuje z horní úvratě do dolní. Těsně po dosažení horní úvratě se uzavírá výfukový ventil. Během pohybu pístu do dolní úvratě je do válce dopravena nová palivová směs otevřeným sacím ventilem.

2. **Komprese**

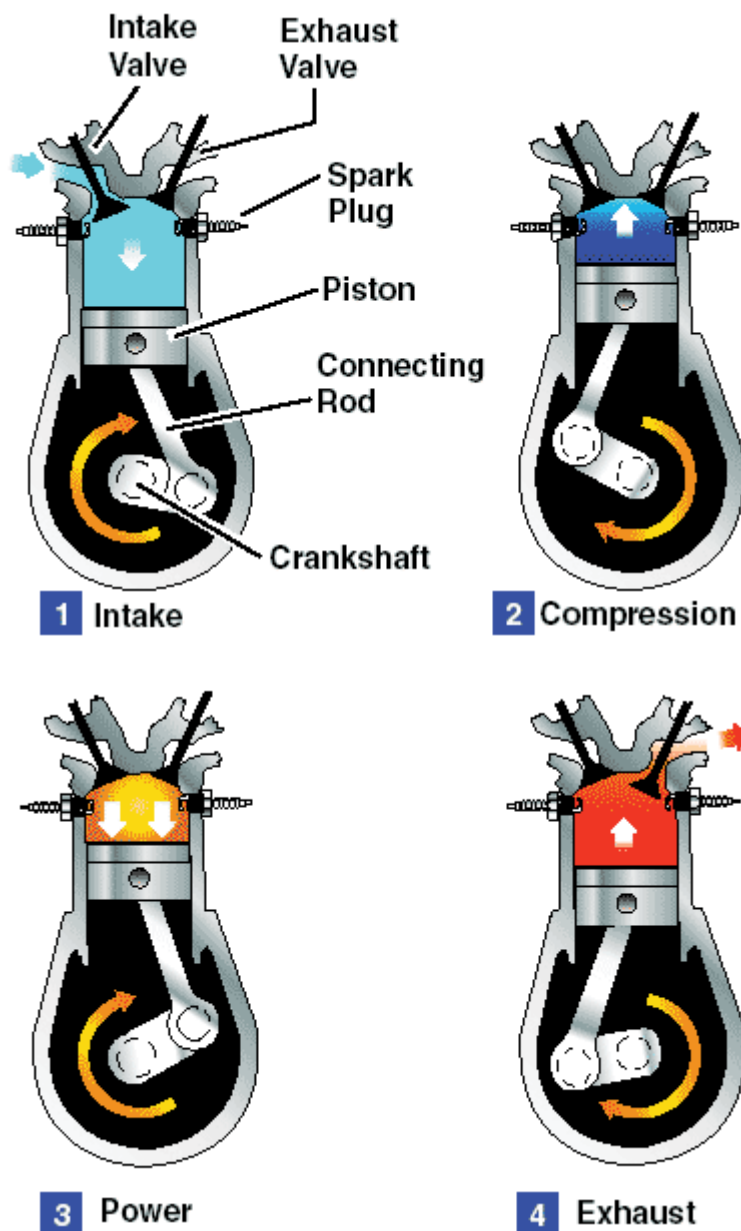
Píst se pohybuje z dolní úvratě do horní. Když se píst nachází v dolní úvratě, dochází k uzavření sacího ventilu. Těsně před dosažením horní úvratě dochází k zapálení směsi od svíčky.

3. **Expanze**

Píst se pohybuje z horní úvratě do dolní úvratě poháněn tlakem spalin paliva. Píst koná práci, která je převáděna na klikovou hřídel. Těsně předtím, než píst dosáhne dolní úvratě, je otevřen výfukový ventil.

4. **Výfuk**

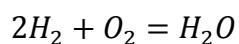
Píst se pohybuje z dolní úvratě do horní a vytlačuje zplodiny do výfukového potrubí. Krátce před dosažením horní úvratě je otevřen sací ventil, což napomáhá odvodu spalin z válce



Obr. 2 Fáze pracovního oběhu [23]

3.2 Palivová směs

Palivová směs je charakterizovaná pomocí poměru vzduch/vodík (A/F ratio). K nalezení ideálního poměru je třeba vycházet z chemické reakce spalování vodíku, která probíhá podle následující rovnice (viz [11]):



Protože v motoru se spaluje směs vodíku a vzduchu, je třeba do výpočtu poměru směsi zahrnout i dusík, který je ve vzduchu velmi výrazně zastoupen.

Postupně vyjadřujeme:

Počet molů N_2 ve vzduchu:

$$= 1 \text{ mol } O_2 \times (79\% N_2 \text{ ve vzduchu} / 21\% O_2 \text{ ve vzduchu}) = 3,762 \text{ mol } N_2$$

Počet molů vzduchu:

$$= O_2 + N_2 = 1 + 3,762 \text{ mol} = 4,762 \text{ mol vzduchu}$$

Hmotnost O_2 :

$$= 1 \text{ mol } O_2 \times 32 \text{ g / mol} = 32 \text{ g}$$

Hmotnost N_2 :

$$= 3,762 \text{ mol } N_2 \times 28 \text{ g / mol} = 105,33 \text{ g}$$

Hmotnost vzduchu:

$$= \text{hmotnost } O_2 + \text{hmotnost } N_2 = 32 \text{ g} + 105,33 \text{ g} = 137,33 \text{ g}$$

Hmotnost H_2 :

$$= 2 \text{ mol } H_2 \times 2 \text{ g / mol} = 4 \text{ g}$$

Stechiometrický poměr vzduch / palivo (A / F) pro vodík a vzduch je:

A / F ratio založené na hmotnosti:

$$= \text{hmotnost vzduchu} / \text{hmotnost paliva} = 137,33 \text{ g} / 4 \text{ g} = 34,33:1$$

A / F ratio založené na objemu:

$$= \text{objem (mol) vzduchu} / \text{objem (mol) paliva} = 4,762 / 2 = 2,4:1$$

Procento spalovací komory obsazené vodíkem pro stechiometrickou směs:

% H_2 :

$$= \text{objem (mol) } H_2 / \text{celkový objem směsi (mol)} =$$

$$= \text{objem } H_2 / (\text{objem vzduchu} + \text{objem } H_2) = 2 / (4,762 + 2) = 29,6\%$$

Z předchozích výpočtů je zřejmé, že stechiometricky ideální A/F poměr pro spalování vodíku a vzduchu je asi 34:1 hmotnosti.

Pokud srovnáme A/F poměr vodíkové palivové směsi s A/F poměrem benzínové palivové směsi, který je roven 14,7:1, vidíme, že je přibližně dvakrát větší.

Protože je vodík plynné palivo, zaujímá ve spalovacím prostoru asi 30% objemu, zatímco kapalný benzín pouhých 1-2%.

3.3 Problémy při spalování vodíku v pístových motorech

Největším problémem použití vodíku jako paliva v pístovém spalovacím motoru je předčasné vznícení směsi paliva. U vodíku je tento problém způsoben nízkou iniciační energií, širokým rozsahem hořlavosti a krátkou vzdáleností uhasnutí plamene. K zapálení směsi nedochází jiskrou od svíčky v ideálním okamžiku ale dříve, což má za následek hrubý a neefektivní chod motoru. Může také dojít k zpětnému zášlehu do přívodního palivového systému a tím k jeho poškození.

Nejčastější příčiny předčasného zapálení směsi jsou vznícení paliva od horkých míst, například od zapalovací svíčky nebo od výfukového ventilu. Dále k předčasnému zapálení směsi a zášlehu dochází, pokud dojde k časovému překrytí mezi otevřením sacích a výfukových ventilů.

3.4 Palivové systémy

Vhodnou konstrukcí a volbou palivového systému lze eliminovat nebo značně omezit předčasné zapálení směsi a komplikace tímto vzniklé. Palivové systémy lze rozdělit do tří hlavních typů: central injection, port injection a direct injection.

3.4.1 Central injection

Nejjednodušším způsobem dodávání vodíkového paliva do motoru je prostřednictvím karburátoru nebo centrálního systému vstřikování. Palivová směs je tvořena na jediném místě v sacím potrubí v průběhu sací fáze cyklu motoru. Tlak vstřikovaného vodíku nemusí být tak velký jako u následujících systémů. Lze navíc využít modifikovaného centrálního systému vstřikování paliva u stávajících benzínových motorů.

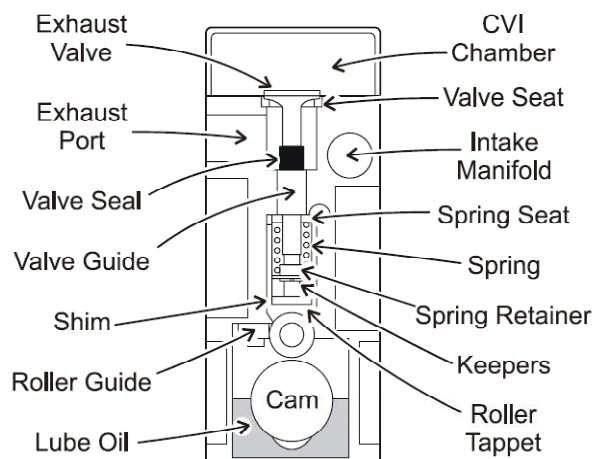
Nevýhodou centrálního vstřikování je větší náchylnost k předčasnému zapálení směsi. Tento systém vstřikování také neposkytuje takový výkon jako třeba systém přímého vstřikování vodíku.

3.4.2 Port injection

Tento způsob tvorby palivové směsi je zdokonalením předešlého systému. Palivová směs opět vzniká v sacím potrubí, tentokrát ale na více místech, před každým sacím ventilem. Tvorba směsi probíhá chvíli po začátku sacího zdvihu, aby mohl čistý vzduch ještě vytlačit spaliny a ochladil horká místa, čímž se značně omezí možnost předčasného vznícení směsi.

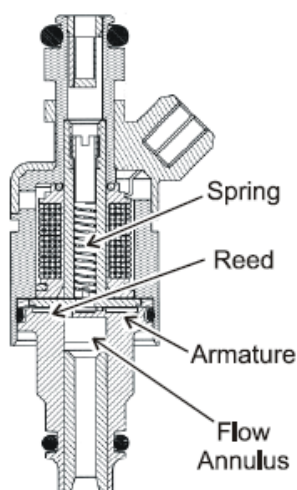
Vstupní tlak u port injection vstřikovačů je vyšší než u central injection, avšak menší než u přímého vstřikování vodíku. Používají se dva typy vstřikovačů:

- s konstantním objemem vstřiku (*constant volume injection* - CVI), kde je pomocí ventily ovládáno množství paliva a čas jeho vstřiku



Obr. 3 Vstřikovač konstantního množství paliva (CVI) [11]

- s elektronicky řízeným vstřikem (*electronic fuel injection* - EFI), které umožňuje vstřikovat proměnné množství paliva a také upravovat časování vstřiku. Tím je možné dosáhnout optimálních podmínek spalování.



Obr. 4 Elektronicky řízený vstřikovač (EFI) [11]

3.4.3 Přímé vstřikování

Nejsofistikovanějším palivovým systémem je přímé vstřikování paliva. Ke vstřiku paliva dochází při kompresním zdvihu pístu. Sací ventil je uzavřen a palivo je vstříknuto přímo do válce. Tak je zamezeno předčasnému zapálení směsi a také zpětnému zášlehu. Výkon motoru s přímým vstřikováním paliva je oproti centrálnímu vstřiku asi o 42% vyšší a o 20% vyšší než výkon motoru spalujícího benzín. Palivo je vstřikováno pod vyšším tlakem než u předchozích metod.

Z důvodu zkrácení času ke smíchání vodíku a vzduchu je třeba dbát na to, aby směs po vstříknutí byla co nejvíce homogenní a nedocházelo tak ke vzrůstu emisí. Pokud by směs byla značně nehomogenní, hodnota emisí by v tomto případě byla mnohem vyšší než u předchozích vstřikovacích systémů. Homogenní směsi lze dosáhnout také použitím více vstříků paliva během jednoho kompresního zdvihu.

3.5 Systémy zapalování

Nízká iniciační energie vodíku umožňuje použití již stávajících zapalovacích systémů benzínových zážehových motorů. Při použití velmi chudých směsí, u kterých je rychlost plamene značně snížena, by jedna svíčka nemusela být dostatečná, a tak se preferuje vybavit vodíkové motory dvěma svíčkami na válec.

Důležité je přesné načasování zapálení směsi paliva vzhledem k rychlému hoření vodíku. Zapalovací svíčky pro vodíkové motory by měly mít rychlý odvod tepla ze špičky svíčky, aby nedocházelo k předčasnému zapálení paliva právě od tohoto rozžhaveného konce svíčky. Kromě toho je třeba používat materiály, které nereagují s vodíkovým palivem. Například nelze použít svíčky s platinovou špičkou, které jsou dnes běžné u zážehových benzínových motorů, protože platina funguje jako katalyzátor některých reakcí vodíku.

3.6 Odvětrávání klikové skříně

U vodíkových motorů je odvětrávání klikové skříně ještě důležitější než u stávajících benzínových motorů. Důvodem je stejně jako u benzínových motorů prosakování nespáleného paliva z válce přes pístní kroužky do prostoru klikové skříně. Kvůli nižší hustotě vodíku a jeho potřebné nižší iniciační energii je třeba zaručit dobré odvětrávání prostoru klikové skříně. Zapálení vodíku nahromaděného v těchto prostorách by mohlo způsobit kromě značného hluku i požár vozidla.



Obr. 5 Ventil pro odvětrávání klikové skříně [11]

Kromě nespáleného paliva mohou do klikové skříně pronikat výfukové plyny. Ty u vodíkového motoru obsahují značné množství vodních par. Jejich vysrážení na stěnách skříně a jejich následné smíchání s olejovou náplní skříně může postupně zhoršovat mazací schopnost oleje. To by mělo za následek větší opotřebení součástí a jejich sníženou životnost. Abychom vysrážení vody zamezili, je opět nutné zabezpečit dobrou ventilaci klikové skříně.

3.7 Termodynamická účinnost

Vodíkový spalovací motor pracuje na principu Ottova cyklu. Jeho teoretická účinnost je závislá na kompresním poměru a Poissonově konstantě κ a je dána rovnicí (viz[11]):

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1}}$$

Z rovnice tedy vyplývá, že čím je vyšší kompresní poměr nebo Poissonova konstanta, tím je teoretická termodynamická účinnost vyšší.

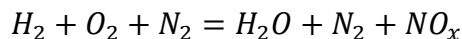
Ve vodíkovém motoru, obzvláště při provozu na chudší směs, je možné dosáhnout vyššího kompresního poměru $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$ než u benzínového motoru.

Také Poissonova konstanta κ je pro vodík vyšší než pro benzín (1,4 oproti 1,1). Tedy motor spalující vodík má vyšší teoretickou účinnost než motor spalující benzín.

U soudobých automobilů spalujících pouze vodíkové palivo je uváděna účinnost kolem 42%, což je asi o 10% vyšší hodnota než u motorů spalujících benzín. Pro motor, který je schopen spalovat jak benzín tak vodík, je z konstrukčních důvodů účinnost mezi těmito hodnotami.

3.8 Emise

Jak již bylo uvedeno, spalování vzduchu s vodíkem probíhá podle této rovnice (viz[11]):



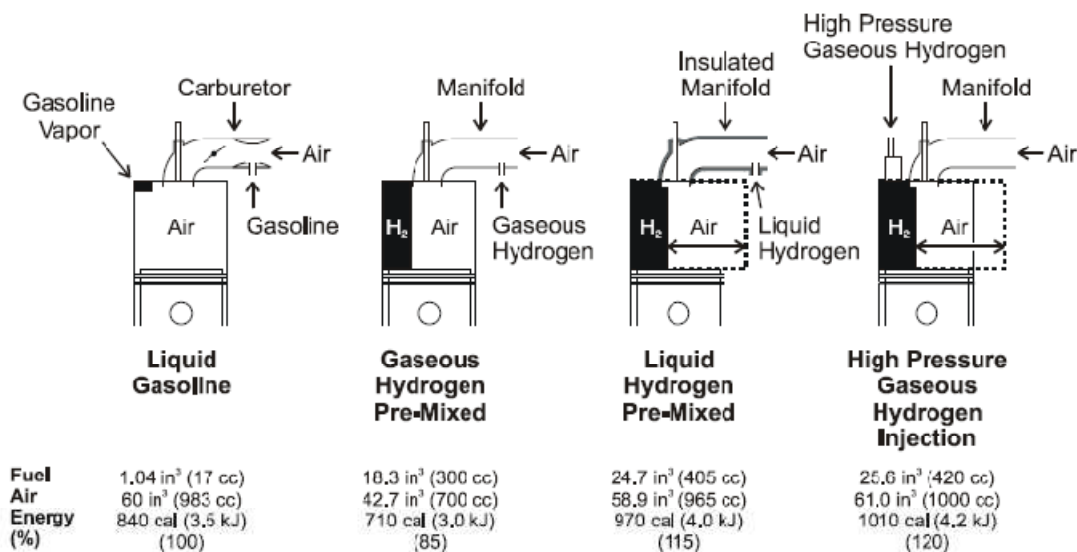
NO_x jsou oxidy dusíku, které vznikají při spalování palivové směsi za vysokých teplot. Reakce dusíku a kyslíku, při které vznikají oxidy dusíku, je možná pouze za vysokých teplot spalování. Množství NO_x závisí na A/F poměru, kompresním poměru motoru, otáčkách motoru a načasování zapálení směsi. Kromě oxidů dusíku se také ve výfukových plynech může objevit stopové množství oxidů uhlíku (CO_x), které vzniká hořením oleje prosáklého do prostoru válce motoru.

V závislosti na provozních podmínkách je schopen vodíkový motor produkovat jak téměř nulové emise, tak i velké množství oxidů dusíku.

3.9 Výkon motoru

Hodnota maximálního výkonu motoru spalujícího vodík je závislá na A/F poměru a na použité metodě vstřikování paliva. Teoreticky ideální hmotnostní A/F poměr je 34:1. Při tomto poměru vodík zaujímá ve válci 29% prostoru a vzduch zbývajících 71%. Pro srovnání, benzín jakožto kapalina zaujímá ve válci pouze asi 1-2% objemu a výkon tohoto motoru je vyšší než výkon motoru spalujícího vodík. To platí při použití systémů vstřikování vodíku *Central injection* a *Port injection*, kde palivová směs vzniká před vstupem do válce. V tom případě je dosaženo asi 85% výkonu oproti benzínovému motoru. Použijeme-li přímé vstřikování paliva, dochází ke vstřiku paliva do válce plně naplněného vzduchem v čase, kdy jsou sací ventily uzavřené. Tím lze dosáhnout maximálního výkonu až o 15% vyššího než u motoru spalujícího benzín.

Nevýhodou spalování vodíkové palivové směsi je, že při ideálním stechiometrickém A/F poměru dochází k vysokým spalovacím teplotám, což má za následek vysokou produkci NO_x . Protože vodík jako palivo je volen právě i kvůli ekologickému provozu, tak jsou takto vysoké emise nežádoucí. Z toho důvodu spalujeme ve vodíkovém motoru chudší směs, při které nedochází téměř ke vzniku oxidů dusíku. To má ovšem za následek pokles výkonu. Vodíkové motory tak mají menší výkon vztahený na objem motoru než benzínové motory. Výkon vodíkového motoru lze také zvýšit přeplňováním pomocí turbodmychadel.



Obr. 6 Spalovací prostor, porovnání vodíku a benzínu [11]

3.10 Vodíkové palivové nádrže

K zajištění potřebného jízdního dosahu vozidla je třeba uchovávat v nádrži automobilu velké množství vodíku. To je způsobeno nízkou hustotou vodíku a jeho vyšší spotřebou. Vodík lze v nádrži skladovat stlačený, zkapalněný nebo v pevné fázi ve formě hydridů.

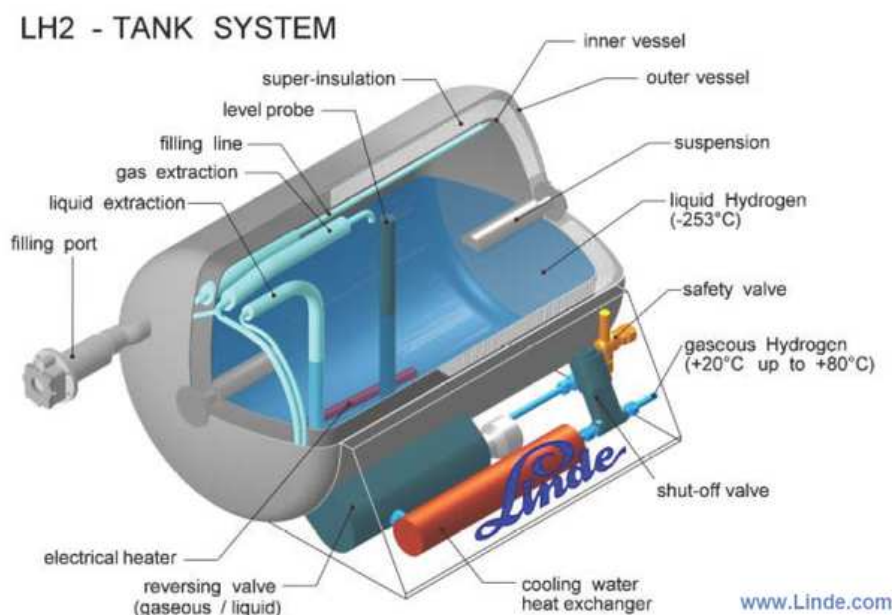
V současné době se stlačený vodík uchovává v automobilových nádržích pod tlakem 35MPa. Při této hodnotě se energetický obsah vodíku pohybuje okolo 3MJ/l. Při stlačování vodíku ztrácíme asi 10-15% energie vodíkem uchovávaném. V dnešní době je snaha

uskladnit ve vozidle co nejvíce vodíku, proto se vyvíjí nádrže schopné uchovávat vodík pod tlakem až 70MPa.



Obr. 7 Nádrže na stlačený vodík (Chevrolet Silverado) [5]

Zkapalněný vodík obsahuje až o 75% víc energie než vodík stlačený při tlaku 70MPa. K udržení vodíku v kapalném skupenství je třeba jej v nádrži skladovat při teplotě -253°C . Proto je nutné jej uchovávat ve speciální nádrži, která je velmi dobře izolována, většinou pomocí vakua v mezeře mezi pláští nádrže. Vodík je třeba v nádrži i ochlazovat. Pokud se vodík ohřeje na teplotu varu, dochází k jeho odpařování a k jeho ztrátě, neboť je třeba nahromaděný plynný vodík odpouštět. Takto u soudobých nádrží ztrácíme asi 1% paliva denně, když automobil není v provozu (viz [2]).



Obr. 8 Nádrž na kapalný vodík od firmy Linde [5]

Posledním způsobem uchování vodíku je jeho skladování v pevné fázi ve formě hydridů. Hydridy vodíku na bázi lehkých kovů jsou schopny v sobě absorbovat velké množství vodíku. Vyrábějí se za vysokých teplot a tlaků syntézou plynného vodíku s lehkými kovy jako jsou hořčík, hliník, vápník, lithium nebo sodík. Tyto hydridy jsou za běžných teplot zcela stabilní, ovšem za vyšších teplot (150-200°C) dochází k jejich rozpadu a uvolňuje se z nich vodík. Za běžných teplot jsou tedy zcela bezpečné. V dnešní době se vývoj soustřeďuje na hydridy s nízkou teplotou rozpadu a se schopností uchovat v sobě velké množství vodíku (viz [27]).



Obr. 9 Nádrž na skladování hydridů [12]

4. Přehled vozidel poháněných HICE

Hlavními průkopníky technologie spalování vodíku v pístových motorech jsou automobilky BMW, Mazda a Ford. Uvedení výrobci již řadu let představují prototypy, na kterých prezentují výsledky svého výzkumu. Snaží se také ukázat, že tato technologie má relativně blízko do sériové produkce.

4.1 Mazda

Mazda, na rozdíl od ostatních výrobců vodíkových spalovacích motorů, použila k přestavbě na vodík Wankelův motor, který jako jediná automobilka usilovně vyvíjí a používá v sériových motorech.

Historie vodíkových vozidel Mazda je stručně popsána v následující tabulce (viz[15]):

Tab.1

1991	Vytvořen první vodíkový rotační motor vozidla HR-X
1992	Proběhl první test pohon golfového vozíku s palivovým článkem
1993	Vytvořen druhý vodíkový rotační motor, použit ve studii HR-X2
1993	Proveden první test vozidla MX-5 vybaveného vodíkovým rotačním motorem
1995	V Japonsku proběhl první veřejný silniční test vozidla s vodíkovým rotačním motorem
1997	Vytvořen vodíkový prototyp Demio FC-EV
2001	Vytvořen prototyp Premacy FC-EV a proveden jeho veřejný silniční test v Japonsku
2003	Vytvořen prototyp RX-8 Hydrogen RE používající vodíkový rotační motor
2004	Obdržení MLIT oprávnění pro silniční provoz vozu RX-8 Hydrogen RE
2006	Spuštěno komerční pronájem RX-8 Hydrogen RE v Japonsku (osm modelů bylo dodáno do konce roku 2006)
2007	Podpis dohody o poskytování vozů RX-8 Hydrogen RE pro norský národní vodíkový projekt Hynor
2008	V Norsku zahájeny veřejné silniční testy RX-8 Hydrogen RE pro validaci vozidla
2009	V Japonsku zahájen komerční pronájem Premacy Hydrogen RE Hybrid

Důležitým mezníkem ve vývoji vodíkových vozidel firmy Mazda byl model, který se představil na Tokijském autosalonu v roce 2003. Vychází ze sériového sportovního modelu poháněného dvourotorovým Wankelovým motorem *Renesis*, který získal prestižní titul *International Engine of the Year 2003*. Model *RX-8 Hydrogen RE* je vybaven dvoupalivovým systémem *Dual-Fuel*, u něhož byly navíc přidány oproti benzínovému motoru dva vstřikovače vodíku přímo do rotorových komor. V roce 2004 začaly jízdní zkoušky, které vedly k získání oprávnění pro provoz na běžných silnicích. A v roce 2006 bylo spuštěno komerční pronajímání těchto vozů (viz[17]).

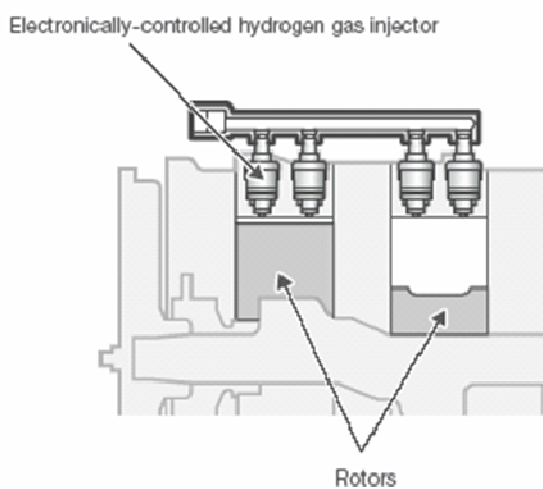
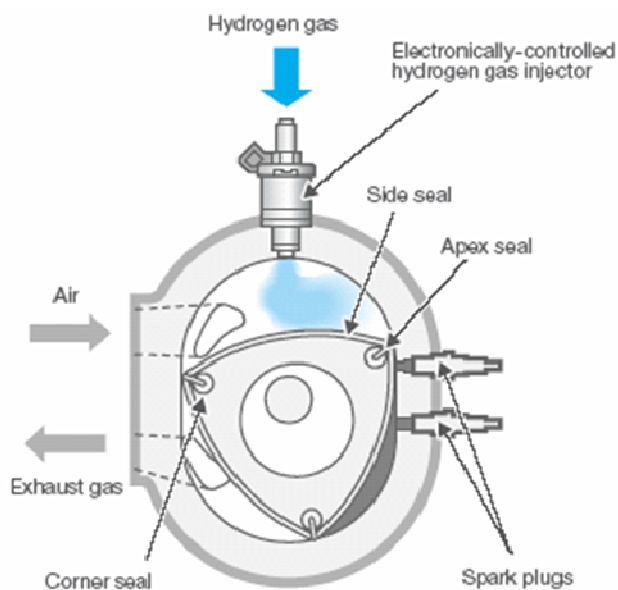


Obr. 10 Mazda RX-8 Hydrogen RE [22]

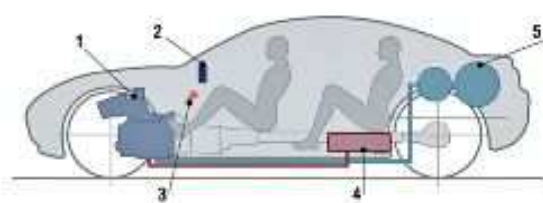
Využití Wankelova motoru ke spalování vodíku má výhodu například i v tom, že zde nedochází k zpětnému zášlehu do sacího potrubí, protože sací a spalovací prostor jsou od sebe odděleny rotujícím pístem. Při modifikaci konvenčního motoru na vodíkový spalovací motor museli inženýři od Mazdy upravit polohu, počet a velikost sacích a výfukových otvorů. Dále museli snížit hmotnost rotačních pístů a vybavit motor zcela novými vstřikovači paliva. Ty jsou vždy dva na spalovací prostor a provádí několik vstřiků vodíku během jednoho zdvihu, aby do spalovacího prostoru dodaly potřebné množství vodíku (viz [18]).

Tab.2 Základní technické údaje vozu Mazda RX-8 Hydrogen RE

Motor	dvourotorový RENESIS Hydrogen 13B Dual-Fuel
Objem motoru	2x 654 cm ³
Výkon na vodík	80 kW
Točivý moment na vodík	140 Nm
Výkon na benzín	154 kW
Točivý moment na benzín	222 Nm
Převodovka	čtyřstupňová samočinná
Objem benzínové nádrže	61 l
Objem vodíkové nádrže při tlaku 35MPa	110 l
Rozvor náprav	2700 mm
Délka vozu	4435 mm
Šířka vozu	1770 mm
Výška vozu	1340 mm
Pohotovostní hmotnost	1460 kg
Jízdní dosah na vodík	100 km
Jízdní dosah na benzín	550 km



Obr. 11 Motor RENESIS Hydrogen 13B Dual-Fuel [18]



- 1 – rotační motor RENESIS
- 2 – ukazatel zásoby vodíku
- 3 – přepínač vodík/benzin,
- 4 – sériová nádrž benzínu
- 5 – vysokotlaké nádrže vodíku

Obr. 12 Příčný řez vozem Mazda RX-8 Hydrogen RE [17]

Momentálně nejnovějším přírůstkem k vozům spalující vodík je model *Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid*, který používá stejný motor jako model *RX-8 Hydrogen RE*. Jedná se o hybridní vozidlo, které kombinuje elektromotor a vodíkový rotační motor. Vodíkový rotační motor slouží pouze k výrobě elektrické energie, kterou k pohonu kol využívá elektromotor. Tento hybridní systém zvyšuje dojezd při spalování vodíku na 200 km, což je dvakrát více než u modelu *RX-8 Hydrogen RE*. (viz[15])

Mazda také zahájila projekt komerčního pronájmu tohoto vozidla. První vozy budou dodány v průběhu roku 2009. Mazda se tak stala první automobilkou na světě, která komerčně pronajímá vodíkové hybridní vozidlo

Tab.3 Základní technické údaje vozu *Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid*:

Původní model	Mazda Premacy
Celková délka	4565 mm
Celková šířka	1745 mm
Celková výška	1620 mm
Motor	dvourotorový motor RENESIS Hydrogen 13B Dual-Fuel
Elektromotor	Střídavý synchronní motor
Maximální výkon	110 kW
Generátor	Střídavý synchronní generátor
Baterie	Lithium-iontová (Li-ion)
Kapacita míst	pět
Palivo	vodík a benzín
Vodíková nádrž	tlaková nádrž (35 MPa)



Obr. 13 Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid [16]

4.2 BMW

Automobilka BMW zvolila konvenčnější přístup než Mazda a ke spalování vodíku upravuje klasické pístové motory, které používá ve svých vodíkem poháněných modelech.

Jedním z nich je *BMW Hydrogen 7*, což je upravený model řady 7. Tento vůz je prvním nadstandardním automobilem s pohonem jak na benzín, tak na vodík. Kvůli vývoji softwaru, nastavení a zabezpečení řídicích jednotek vodíkového motoru, muselo být vyvinuto zcela nové softwarové testovací prostředí *HIL (Hardware-in-the-loop)*. Díky němu bylo možné stávající model řady 7 upravit na vodíkem poháněný vůz, který si zachovává typické jízdní vlastnosti vozů BMW. Systém *HIL*, který byl použit pro *Hydrogen 7*, se následně upravil a využil i v jiných řídicích jednotkách běžných vozů BMW (viz [3]).



Obr. 14 BMW Hydrogen 7 [3]

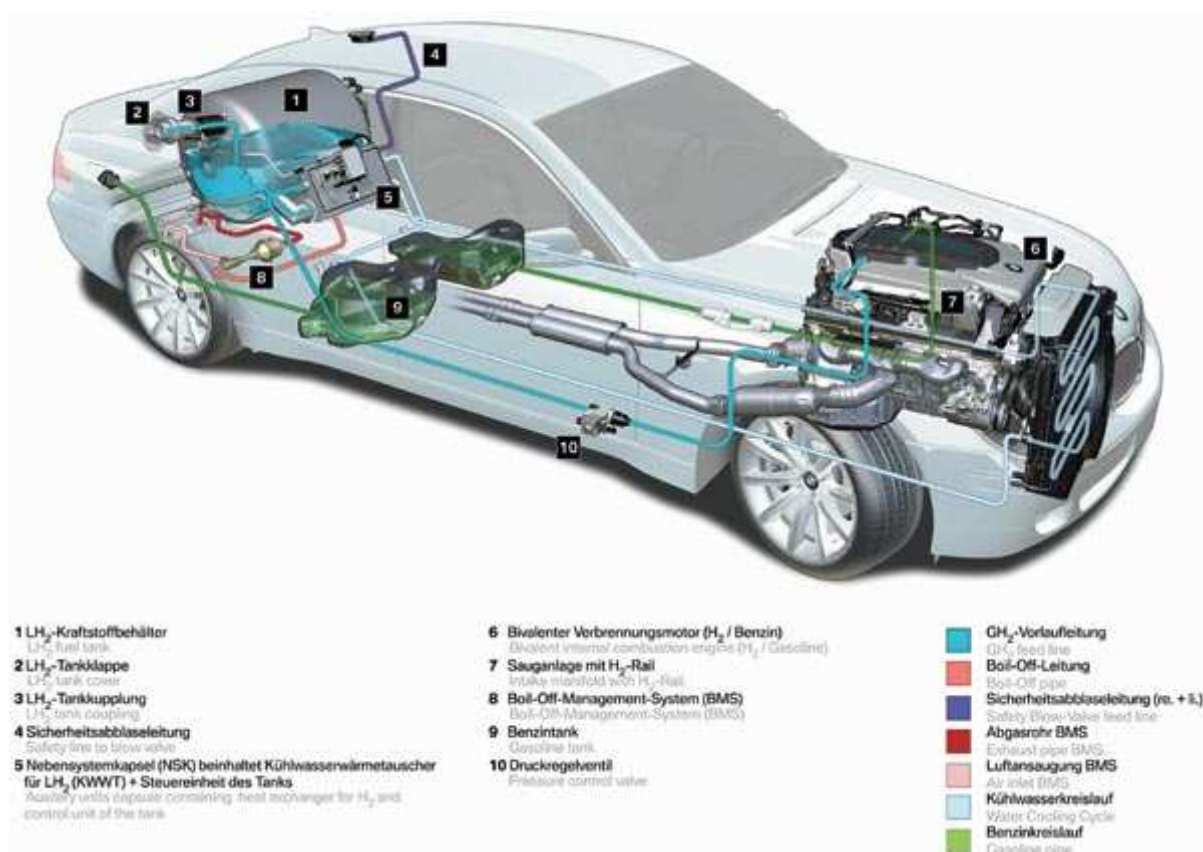
Model *BMW Hydrogen 7* má dvanáctiválcový čtyřdobý spalovací motor s válci uspořádanými do písmene V o objemu 5 972 cm³. Tento motor s dvoupalivovým systémem poskytuje celkový výkon až 260 koní. Proměnné sání a nastavitelné vačkové hřídele pro sání a výfuk na obou blocích motoru umožňují využít bezklapkové plnění válců *Valvetronic*. Vůz má rozměry 5018 mm na délku, 1710 mm na šířku, 1405 mm na výšku, rozvor 3070 mm a hmotnost 2400 kg.

Při chodu na benzínové palivo dochází k přímému vstřikování benzínu do válce, zatímco při chodu na vodík je směs připravena mimo válec. Vodíková nádrž je zkonstruována jako kryo-kontejner a její speciální izolace odpovídá 17 m pěnového polystyrenu. Během cesty ke vstřikovacím ventilům se vodík zahřívá a přechází do plynného skupenství. Nádrž o objemu 168 l dokáže pojmout až 8 kg tekutého vodíku, což je hodnota odpovídající benzínové nádrži o objemu 30 l. Vozidlo má tak dojezd na vodík 200 km a dalších 500 km na benzínový pohon.

Nádrž na vodík je ochlazována, ale i přesto teplo z okolí má vliv na tlak v nádrži během jízdy. Stálý tlak se udržuje řízeným odpařováním vodíku. Celý tento proces je řízen kontrolérem nádrže *CleanEnergy*. Při dosažení kritických hodnot kontrolér zareaguje a informuje řidiče o stavu systému.

Od počátečního návrhu až po dynamický testovací provoz probíhají všechny testy s použitím počítačových modelů. Testy *HIL* zaručují shodu skutečných zařízení s modely. Nejvyšší rychlost, které je *Hydrogen 7* schopen dosáhnout, činí 230 km/h. Z nuly na stovku to pak stihne za 9,5 sekundy. Systém řízení motoru *Hydrogen 7* se skládá ze dvou kontrolérů, kde každý řídí jeden blok motoru.

Automobil jako takový je neprodejný. Ve speciálním programu si ale můžete automobil *BMW Hydrogen 7* zapůjčit do pronájmu a veřejně ho používat. Zákazníkům se dodalo už kolem stovky automobilů.

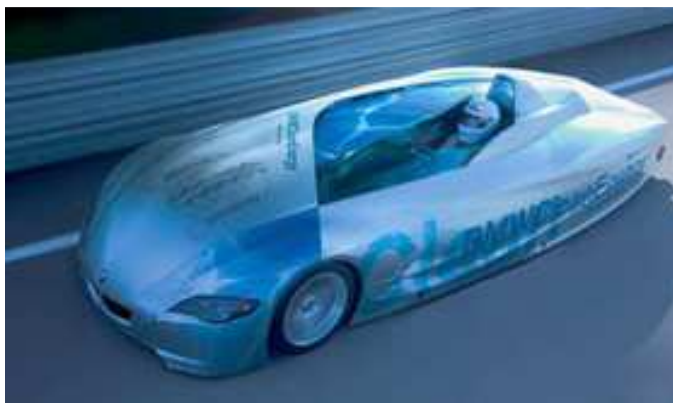


Obr. 15 Řez vozem BMW Hydrogen 7 [3]



Obr. 16 Dvanáctiválcový vodíkový spalovací motor z vozu BMW Hydrogen 7 [3]

Dalším z vodíkem poháněných vozů je prototyp *BMW H2R*. Jedná se o vůz sestrojený k překonání různých rychlostních rekordů mezi vozy s vodíkovým pohonem. Vůz je poháněn stejnou pohonnou jednotkou jako *BMW Hydrogen 7*. Stavba prototypu trvala pouhých 10 měsíců. Na hliníkovém rámu je posazená karbonová karosérie s vynikajícím koeficientem odporu vzduchu $C_x=0,21$. Motor upravený na vodík dodává výkon 210 kW. Úpravy motoru spočívají ve změně spalovacího prostoru v hlavách a speciální vodíkové vstříky. Model *H2R* není na rozdíl od jiných vodíkových prototypů BMW dvoupalivové vozidlo, jezdí pouze na vodík (viz [19]).



Obr. 17 BMW H2R [19]

Prototypu *H2R* se podařilo překonat 9 rychlostních rekordů a dosáhnout maximální rychlost 302,4 km/h a z nuly na sto zrychlit asi za 6 vteřin (viz [4]).

Tab.4 Přehled rekordů držených vozem *BMW H2R*

	čas	maximální rychlost
1 kilometr s letmým startem:	11,993 s	300,190 km/h
1 míle s letmým startem:	19,912 s	290,962 km/h
1/8 míle se startem z klidu:	9,921s	72,997 km/h
1 míle se startem z klidu:	14,933 s	96,994 km/h
1 kilometru se startem z klidu:	17,269 s	104,233 km/h
1 míle se startem z klidu:	36,725 s	157,757 km/h
10 mil se startem z klidu:	221,052 s	262,094 km/h
1 kilometr se startem z klidu:	26,557 s	135,557 km/h
10 kilometrů se startem z klidu:	146,406 s	245,892 km/h



Obr. 18 BMW H2R bez karoserie [19]

4.3 Ford

Automobilka Ford využívá a vyvíjí jak palivové články, tak i upravuje své spalovací motory k provozu na vodík.

V roce 2003 představili vůz *H₂ICE Ford Focus*, se kterým urazili při silničním testování více jak 1500 km. Vůz byl poháněn čtyřválcovým šestnáctiventilovým přeplňovaným motorem o objemu 2,3 l a vybaven pětistupňovou manuální převodovkou. Tento motor byl poprvé představen ve studii *H₂RV*. Automobil má jízdní dosah asi 240 km a maximální výkon 88 kW. Vůz jel schopen zrychlit z 0-100 km/h za 12 s. Hmotnost vozu je 3350 kg (viz [10]).



Obr. 19 Ford *H₂RV* [6]

Dalším vodíkem poháněným vozidlem od automobilky Ford je *H₂ICE Shuttle Bus*. Jedná se o přestavěný sériový model *Ford E-450*, na jehož šasi bylo umístěno tělo autobusu. Tento autobus byl poháněn přeplňovaným motorem 6,8 l *Triton V-10*, který byl upravený pro spalování vodíku. Motor poskytuje maximální výkon 140 kW v rozmezí otáček 2600-3600. Model *H₂ICE Shuttle Bus* byl představen poprvé v roce 2004. Autobus je schopen pojmout 12 cestujících včetně řidiče a samozřejmě i jejich zavazadla. Ford uvádí jízdní dosah asi 240 km, což záleží ale na zatížení vozu (viz [7], [8]).



Obr. 20 Ford H₂ICE Shuttle Bus [1]



Obr. 21 Vodíkový spalovací motor 6,8 l Triton V [1]

5. Budoucnost vodíkových spalovacích motorů

V automobilovém průmyslu je v oblasti vodíkového pohonu hlavní pozornost soustředěna na palivové články a jejich použitelnost v sériových modelech. Technologie palivových článků je v dnešní době již na úrovni, kdy by mohla být použita v praxi.

Hlavním problémem zavedení vodíkových technologií je neexistující infrastruktura nejen vodíkových čerpacích stanic, ale především zařízení pro výrobu vodíku v množství, které by pokrylo případnou spotřebu vodíku. Navíc v současné době neexistuje ani vhodná technologie k efektivní výrobě vodíku. Vodík se dnes vyrábí buď elektrolýzou nebo například z ropy.

Avšak i v této oblasti jde vývoj kupředu a přechod z fosilních paliv na vodík je zřejmě nevyhnutelný. Prvním krokem při zavádění vodíkových technologií do automobilů by mohl být motor schopný spalovat jak benzín, tak i vodík. Díky němu by tato technologie mohla proniknout i do sériové výroby, aniž by byla omezována špatnou infrastrukturou vodíkových čerpacích stanic. Při spalování vodíku dochází k výraznému snížení emisí vozidla, čímž by mohlo v obydlených lokalitách dojít ke zlepšení kvality ovzduší. V kombinaci s hybridními technologiemi, které se již v současné době zavádějí, by došlo ke snížení celkové spotřeby paliva a tudíž i celkových nákladů na provoz vozidla.

I když hlavní roli při pohonu vodíkových automobilů budou nejspíš hrát palivové články, bude mít i vodíkový spalovací motor své využití. Palivové články se vyznačují vysokou účinností a nulovými emisemi při provozu vozidla. K jejich nedostatkům však patří neschopnost dodat okamžitě potřebný výkon a problém jim činí také provoz za nízkých teplot. Hybridní uspořádání palivových článků a vodíkového spalovacího motoru by tyto nedostatky odstranilo. Hybridní technologie také umožňuje rekuperaci energie a vozy poháněné tímto systémem by byly velmi úsporné.

Závěr

V bakalářské práci se snažím předložit celkový pohled na spalování vodíku v pístových motorech a popsat specifika této technologie. Zaměřil jsem se na shrnutí faktů týkajících se konstrukčních změn motoru, které je nutné učinit při přestavbě konvenčního motoru na motor vodíkový. Tato přestavba není v dnešní době nijak zvlášť technologicky náročná.

Vycházel jsem především ze studijních materiálů k přednášce *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies* [11], kde jsem našel souhrn podstatných faktů týkajících se problematiky vodíkového spalovacího motoru.

Vodík je v celé bakalářské práci srovnáván s benzínem, aby lépe vynikly jeho přednosti ale i nedostatky. Hlavní předností vodíku oproti benzínu je skutečnost, že patří mezi obnovitelné zdroje energie. Vodíkový spalovací motor při ideálních spalovacích podmínkách neprodukuje žádné emise znečišťujících látek. Zároveň však může poskytovat srovnatelný výkon se soudobým benzínovým motorem.

Spalování vodíku v pístových motorech má uplatnění jak v relativně blízké budoucnosti při přechodu z fosilních paliv na vodík, tak i v budoucnosti vzdálené, i když jí zřejmě budou dominovat vodíkové palivové články. Technologii využití vodíku ve spalovacích motorech se oproti palivovým článkům věnuje malá pozornost, a to jak ve vývoji, tak i v odborné literatuře, přestože má své nesporné výhody. Je škoda nevyužít dobře známou a propracovanou technologii spalovacího motoru i v oblasti vodíkového pohonu.

Spalování vodíku není mrtvou technologií a její využití může přinést v budoucnu v kombinaci s technologií palivových článků výborné jízdní vlastnosti a zároveň úsporný provoz.

Přehled použitých informačních zdrojů:

- [1] BLANCO, S. *Two Ford hydrogen H2ICE buses arrive at Detroit Metro airport* [on-line]. Vydáno: 17.3.2008 [citováno 2009-04-11].
Dostupné z: <<http://www.autobloggreen.com/2008/03/17/two-ford-hydrogen-h2ice-buses-arrive-at-detroit-metro-airport/>>
- [2] *BMW Hydrogen 7* [on-line]. Vydáno: 13.2.2009 [citováno 2009-04-10].
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_7>
- [3] *BMW Hydrogen 7* [on-line]. Vydáno: 25.9.2008 [citováno 2009-04-10].
Dostupné z: <<http://www.carmotor.cz/magazin/pages/BMW-Hydrogen-7,719.html>>
- [4] *BMW: tři sta na vodík* [on-line]. Vydáno: 24.9.2004 [citováno 2009-04-10].
Dostupné z: <http://auto.idnes.cz/ak_aktual.asp?c=A040924_154258_autosalonp_fdv>
- [5] *ETEC-Roush Hydrogen ICE Silverado Truck* [on-line]. Vydáno: 21.9.2006 [citováno 2009-04-30]. Dostupné z:
<http://www.etecevs.com/hydrogen_ICE_vehicles/HICE_conversion.php>
- [6] *Ford Focus H2RV 2003 Hydrogen Hybrid Research Vehicle* [on-line]. [citováno 2009-04-26]. Dostupné z: <<http://www.hyts.hu/index.php?s=tgal&tid=396&marka=ford>>
- [7] *Ford H2ICE Shuttle Bus* [on-line]. Vydáno: 24.9.2004 [citováno 2009-04-11].
Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2004/09/ford_hsub2subic.html>
- [8] *Ford power products introduces hydrogen internal combustion engines to industrial marketplace* [on-line]. Vydáno: 24.2.2005 [citováno 2009-04-11]. Dostupné z:
<http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=20332&make_id=trust>
- [9] *François Isaac de Rivaz* [on-line]. Vydáno: 5.4.2009 [citováno 2009-04-10].
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Francois_Isaac_de_Rivaz>
- [10] *H2ICE Ford Focus proves the viability of hydrogen internal combustion technology* [on-line]. Vydáno: 23.9.2003 [citováno 2009-04-11].
Dostupné z: <http://media.ford.com/article_display.cfm?article_id=16375>
- [11] *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies* [on-line]. Vydáno: 1.12.2001 [citováno 2009-04-10].
Dostupné z:
<http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/h2_manual.html>
- [12] *Hydrogen fuel systems* [on-line]. [citováno 2009-04-30].
Dostupné z: <<http://www.switch2hydrogen.com/h2.htm>>
- [13] *Hydrogen internal combustion engine vehicle* [on-line]. Vydáno: 2.4.2009 [citováno 2009-04-10].
Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_internal_combustion_engine_vehicle>

- [14] KOTEK, L. *Specifika analýzy rizik vodíku* [on-line]. Vydáno: květen 2006 [citováno 2009-04-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31466>
- [15] *Mazda Begins Commercial Leasing of World's First Hybrid Rotary Hydrogen Vehicle* [on-line]. Vydáno: 25.3.2009 [citováno 2009-04-10]. Dostupné z: <http://www.japancorp.net/article.asp?Art_ID=21211>
- [16] *Mazda Gets Clearance to Lease World's First Hydrogen Hybrid* [on-line]. Vydáno: 25.3.2009 [citováno 2009-04-25]. Dostupné z: <<http://wot.motortrend.com/6498309/auto-news/mazda-gets-clearance-to-lease-worlds-first-hydrogen-hybrid/index.html>>
- [17] *Mazda RE Hydrogen - Jedeme na vodík !* [on-line]. Vydáno: 2.11.2008 [citováno 2009-04-10]. Dostupné z: <<http://www.automotorevue.cz/auto/technika/mazda-re-hydrogen-jedeme-na-vodik.html>>
- [18] *Mazda to Lease Rotary H₂ICE, Add Mild Hybrid Support* [on-line]. Vydáno: 15.10.2004 [citováno 2009-04-18]. Dostupné z: <http://www.greencarcongress.com/2004/10/mazda_to_lease_.html>
- [19] *Motory V12 a pohon vodíkem* [on-line]. [citováno 2009-04-10]. Dostupné z: <<http://www.bmw-tuning.cz/?page=technika&clanek=motory-V12-a-pohon-vodikem>>
- [20] PESLAR, J. *Vodík – perspektivní palivo pro pohon vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Rauscher, CSc.
- [21] REMEŠ, J. *Paliva pro spalovací motory*. Brno: Masarykova univerzita v Brně, Pedagogická fakulta, 2008. 29 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Jindřiška Svobodová Ph.D.
- [22] *RX-8 Hydrogen RE* [on-line]. Vydáno: 13.10.2006 [citováno 2009-04-25]. Dostupné z: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/env/hybrid/img/rx8_hre2_top.jpg>
- [23] *The aircraft powerplant* [on-line]. Vydáno: 2006 [citováno 2009-04-30]. Dostupné z: <<http://www.free-online-private-pilot-ground-school.com/aircraft-powerplant.html>>
- [24] *The Rev. W. Cecil's Engine* [on-line]. Vydáno: 2002 [citováno 2009-04-10]. Dostupné z: <<http://www.eng.cam.ac.uk/DesignOffice/projects/cecil/engine.html>>
- [25] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2003. 580 s. ISBN 80-238-8756-4
- [26] VLK, František. *Příslušenství vozidlových motorů*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2002. 338 s. ISBN 80-238-8755-6

[27] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004. 250 s. ISBN 80-239-1602-5

[28] *Zamyšlení nad budoucím rozvojem automobilů poháněných vodíkem* [on-line].

Vydáno: 13.7.2008 [citováno 2009-04-21].

Dostupné z: <<http://www.hytep.cz/?loc=article&id=27>>

Přehled použitých zkratk a symbolů

LPG	liquefied petroleum gas – zkapalněný ropný plyn
CNG	compressed natural gas – stlačený zemní plyn
A/F ratio	poměr vzduch/palivo
NO _x	oxidy dusíku
HICE	hydrogen internal combustion engine - vodíkový spalovací motor
H ₂	molekula vodíku
O ₂	molekula kyslíku
N ₂	molekula dusíku
H ₂ O	molekula vody
CVI	constant volume injection - vstřík konstantního objemu
EFI	electronic fuel injection - elektronicky řízené vstříkávání
κ	Poissonova konstanta
η^{th}	teoretická účinnost
CO _x	oxidy uhlíku
HIL	hardware-in-the-loop
C _x	koeficient odporu vzduchu