



**FAKULTA STROJNÍ  
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY  
V PLZNI**

Studijní program: Konstruování strojů a technických zařízení

Číslo studijního programu: N0715A270017

Studijní specializace: Konstruování vozidel a manipulačních zařízení

# TECHNICKÉ MOŽNOSTI VYUŽITÍ H<sub>2</sub> V POHONU VOZIDEL

## Diplomová práce

Autor práce: Bc. Adam Petráš

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam PETRÁŠ**  
Osobní číslo: **S22N0031P**  
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**  
Specializace: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**  
Téma práce: **Technické možnosti využití H<sub>2</sub> v pohonu vozidel**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Cílem diplomové práce je technický návrh ve využití vodíku v pohonu silničních vozidel. Technické řešení by mělo obsahovat specifikaci požadavků s ohledem na správnou funkčnost a respektování potřebných norem i předpisů. Technický návrh by měl obsahovat rozbor technických možností jednotlivých řešení a technické zpracování konceptu řešení. U výsledného technického řešení provést komplexní zhodnocení parametrů.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Vypracování rešerše včetně systematického popisu funkce.
2. Vypracování rozboru technických parametrů.
3. Vypracování vybrané technické varianty řešení.
4. Zhodnocení vybraného technického návrhu.

Konzultant: Ing. Jiří Kořínek (KKS – FST)

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VALA, M. Teorie a konstrukce silničních vozidel I. Univerzita Pardubice, Pardubice, 2003
- [2] VLK, F. Stavba motorových vozidel. Brno: Vlk, 2005
- [3] ŘAŠA, J., ŠVERCL, J.: Strojnické tabulky. Scientia, Praha, 2004
- [4] SHIGLLEY, J., E., MISCHKE, C., R., BUDYNAS, R., G. Konstruování strojních součástí. VUT v Brně, Brno, 2010
- [5] Podkladový materiál, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Josef Formánek, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Zdeněk Chval, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval/a samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v Seznamu použitých zdrojů, který je součástí této práce a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Plzni dne:

-----  
podpis autora

## Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu doc. Josefu Formánkovi za jeho ochotu, trpělivost a vstřícnost při řešení této práce. Jeho rady a připomínky byly velmi nápomocné. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za veškerou podporu, kterou mi v průběhu studia poskytovali.

## Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na technický návrh pohonu vozidla s využitím vodíku jako paliva. Obsahuje rešerši týkající se problematiky vodíku jako chemického prvku, jeho výroby, skladování a zásobovací infrastruktury včetně nových technologií v experimentální fázi. Jsou popsány požadavky na technická zařízení dopravní infrastruktury a možnosti jejího rozvoje. Dále je součástí práce rozbor možností získávání energie z vodíku pro pohon vozidel jako je vodíkový spalovací motor (HICE), vodíkový palivový článek nebo HHO generátor a jejich vzájemné porovnání. Následuje volba nejvhodnější varianty pro další zpracování. Uvedeny jsou i poznatky týkající se produkce emisí při spalování vodíku. Praktická část práce se zabývá úpravou čtyřdobého pístového zážehového spalovacího motoru pro spalování vodíku. Jsou zde navrženy potřebné úpravy komponent motoru včetně volby materiálů a povrchových úprav s ohledem na vodíkovou křehkost a rozdíly ve spalovacím procesu oproti spalování konvenčních fosilních paliv, jako jsou vyšší teplota a rychlost hoření, nižší iniciační energie nebo vyšší teplota samovznícení. Důraz je kladen na eliminaci samozápalů a zpětných šlehnutí do prostoru sání. Největší pozornost je věnována palivové soustavě upraveného motoru. Navržený pohon využívá vodík v plynném stavu, stlačený v zásobníku na 70 MPa. Palivový systém vychází z technologie Common rail. Další kapitoly jsou věnovány výpočtu mechanické práce a teoretického efektivního výkonu, jakožto i stechiometrického poměru směsi vodíku se vzduchem. V poslední části je proveden technický návrh vstřikovače pro přímé vstřikování vodíku o tlaku 20 MPa. Jsou uvedeny možnosti ovládání vstřikovacího ventilu a provedena volba vhodné koncepce. Návrh je posléze doplněn o analytické výpočty, pevnostní analýzu metodou konečných prvků, vytvoření 3D modelů a části výkresové dokumentace v softwaru Siemens NX.

## Klíčová slova

Vodík; vozidlo; motor; vstřikovač; palivo; návrh; emise; HICE; CAD; MKP; model; jehla; tryska; elektromagnet; výpočet; analýza

## Abstract

This diploma thesis focuses on the technical design of a vehicle propulsion system using hydrogen as fuel. It contains research on hydrogen as a chemical element, its production, storage and supply infrastructure, including new technologies in the experimental phase. The requirements for the technical equipment of the transport infrastructure and the possibilities for its development are described. These also includes an analysis of the possibilities of obtaining energy from hydrogen for vehicle propulsion, such as the hydrogen internal combustion engine (HICE), the hydrogen fuel cell or the HHO generator, and a comparison between them. This is followed by the selection of the most suitable option for further work. The findings regarding the emission production from hydrogen combustion are also presented. The practical part of the thesis deals with the modification of a four-stroke reciprocating spark-ignition internal combustion engine for hydrogen operation. The necessary modifications of the engine components are proposed, including the choice of materials and surface treatments with respect to hydrogen embrittlement and differences in the combustion process compared to the combustion of conventional fossil fuels, such as higher combustion temperature and velocity of the flames, lower initiation energy or higher autoignition temperature. Emphasis is placed on the elimination of spontaneous combustion and backfiring into the intake manifold. Most attention is paid to the fuel system of the modified engine. The proposed propulsion system uses hydrogen gas, compressed in a tank to 70MPa. The fuel system is based on common rail technology. Further chapters are devoted to the calculation of mechanical work and theoretical effective power, as well as stoichiometric ratio of the hydrogen-air mixture. In the last part, the technical design of an injector for direct injection of hydrogen at 20MPa is carried out. The options for controlling the injection valve are presented and the selection of a suitable concept is made. The design is then complemented by analytical calculations, finite element strength analysis, creation of 3D models and part of the drawing documentation in Siemens NX software.

## Key words

Hydrogen; vehicle; engine; injector; fuel; design; emissions; HICE; CAD; FEM; model; needle; nozzle; electro-magnet; calculation; analysis

## Obsah

1	Úvod.....	12
2	Základní vlastnosti vodíku .....	13
3	Způsoby získávání vodíku .....	14
3.1	Parní reformování zemního plynu .....	14
3.2	Parciální oxidace uhlovodíků .....	15
3.3	Zplyňování uhlí .....	15
3.4	Výroba vodíku z biomasy.....	16
3.5	Termochemické štěpení vody .....	16
3.6	Elektrolýza vody .....	16
3.7	Světová produkce vodíku .....	18
4	Zásobovací infrastruktura .....	19
4.1	Metody skladování .....	20
5	Využití vodíku jako paliva .....	21
5.1	Vodíkový spalovací motor .....	21
5.2	Vodíkový palivový článek.....	24
5.3	HHO generátor .....	24
5.4	Produkce emisí při spalování vodíku .....	26
5.5	Porovnání palivového článku a vodíkového spalovacího motoru.....	27
6	Vozidla využívající vodíkový spalovací motor jako zdroj energie.....	28
6.1	BMW 750hL.....	28
6.2	BMW Hydrogen 7 .....	30
6.3	Mercedes-Benz Unimog U430.....	34
6.4	Mazda RX-8 Hydrogen RE.....	35
7	Příprava směsi vodíku se vzduchem.....	38
8	Mechanická práce a výkon spalovacího motoru .....	41
8.1	Vliv záměny benzínu a vodíku na mechanickou práci a efektivní výkon .....	42
9	Úpravy zážehového spalovacího motoru pro provoz na vodík.....	45
9.1	Píst.....	45
9.2	Pístní kroužky .....	46
9.3	Válec.....	46



9.4	Hlava válců .....	47
9.5	Rozvod motoru a ventily .....	48
9.6	Zapalovací svíčka .....	49
9.7	Výfuková soustava .....	49
9.8	Zásobník paliva a palivová soustava .....	50
10	Volba varianty ovládání vstřikovacího ventilu .....	52
10.1	Princip funkce elektromagnetického vstřikovače .....	53
11	Konstrukční návrh vstřikovacího ventilu .....	56
11.1	Návrh trysky .....	56
11.2	Návrh jehly a pružin.....	59
11.3	Návrh těla ventilu .....	63
11.4	Kontrolní MKP analýza.....	64
11.4.1	Tryska.....	64
11.4.2	Jehla.....	65
11.4.3	Tělo ventilu .....	66
11.5	Návrh sestavy vstřikovače .....	68
12	Závěr .....	72

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Elektrolýza vody.....	17
Obrázek 2 - Graf podílu surovin na produkci vodíku v roce 2021 .....	18
Obrázek 3 - Potřebná iniciační energie k zažehnutí směsi vodíku se vzduchem .....	23
Obrázek 4 - Schéma implementace HHO generátoru do automobilu .....	25
Obrázek 5 - Graf závislosti množství emisí NO <sub>x</sub> na koeficientu $\lambda$ .....	26
Obrázek 6 - BMW 750hL [12].....	28
Obrázek 7 - BMW Hydrogen 7 [36].....	30
Obrázek 8 - Křivky výkonu a točivého momentu vodíkového motoru 6,0l V12 .....	31
Obrázek 9 - Vodíkové komponenty ve vozidle BMW Hydrogen 7.....	33
Obrázek 10 - Mercedes-Benz Unimog U430 [18] .....	34
Obrázek 11 - Mazda RX-8 Hydrogen Re [20].....	35
Obrázek 12 - Wankelův spalovací motor Mazdy RX-8 Hydrogen RE .....	36
Obrázek 13 - Schéma pomocných systémů motoru Mazdy RX-8 Hydrogen RE.....	37
Obrázek 14 - Graf horních a dolních mezí hořlavosti za atmosférických podmínek .....	39
Obrázek 15 - Graf závislosti mezi hořlavostí na teplotě a směru šíření plamene.....	40
Obrázek 16 - p-V diagram čtyřdobého zážehového spalovacího motoru .....	41
Obrázek 17 - Porovnání výkonu různých koncepcí vodíkového motoru s motorem benzínovým .....	43
Obrázek 18 - Nádrž na uchování vodíku pod tlakem 70MPa z polymeru a karbonového kompozitu....	50
Obrázek 19 - Schéma elektromagnetického vstřikovače a princip funkce.....	54
Obrázek 20 - Průběh proudu v elektromagnetu, zdvihu jehly a vstřikovaného množství [9].....	55
Obrázek 21 - Model trysky vstřikovače v řezu a v trimetrickém pohledu .....	59
Obrázek 22 - Navržený tvar jehly s působícími silami .....	60
Obrázek 23 - 3D model těla ventilu v trimetrickém pohledu a v řezu.....	63
Obrázek 24 – Výsledky napětí z MKP analýzy trysky, trimetrický pohled.....	64
Obrázek 25 – Výsledky napětí z MKP analýzy trysky, osový řez .....	65
Obrázek 26 - Výsledky napětí z MKP analýzy jehly.....	66
Obrázek 27 - Výsledky napětí z MKP analýzy těla ventilu .....	67
Obrázek 28 - Sestava vstřikovače v řezu .....	68
Obrázek 29 - Dosed jehly do sedla trysky .....	69
Obrázek 30 - Tryska s vložkou vedení jehly, jehlou a stavěcími čepy.....	70

Obrázek 31 - Render sestavy vstřikovače..... 71

## Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
AISI	Americký institut pro železo a ocel
FST	Fakulta strojní
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
MKP	Metoda konečných prvků
HICE	Vodíkový spalovací motor
FCEV	Elektromobil s pohonem palivovými články
CAD	Počítačově vytvářený design
ccm	Kubický centimetr
LFL	Spodní mez zápalnosti
UFL	Horní mez zápalnosti
OHC	Ventilový rozvod motoru s jedním vačkovým hřídelem v hlavě válce
DOHC	Ventilový rozvod motoru se dvěma vačkovými hřídeli v hlavě válce
Nikasil	Metoda nanášení niklové povrchové vrstvy na hliníkovou slitinu
SCR	Selektivní katalytická redukce
EGR	Recirkulace výfukových plynů
ppm	Počet částic na milion
CNG	Stlačený zemní plyn
MEA	Ethanolamin
DMEA	Dimethylethanolamin
SAE	Sdružení odborníků na automobilový, letecký a dopravní průmysl
MPI	Vícebodové nepřímé vstřikování paliva

## 1 Úvod

Pohonné ústrojí je jádrem každého vozidla a má zásadní vliv na jeho jízdní a dynamické vlastnosti. Technické možnosti využití vodíku (H<sub>2</sub>) v pohonu vozidel představují klíčový aspekt budoucího vývoje v oblastech dopravy a energetiky. Vodík jakožto nejllehčí a nejhojnější prvek ve vesmíru nabízí slibnou alternativu k fosilním palivům zejména díky své vysoké energetické hustotě a schopnosti produkovat energii bez emisí skleníkových plynů. Tato práce se zaměřuje na současné technologie a inovace spojené s využitím vodíku k pohonu vozidel, zkoumá výhody a nevýhody vodíkového pohonu a analyzuje jeho potenciál v kontextu udržitelné dopravy.

Vodíková technologie se v posledních desetiletích vyvíjí rychlým tempem, přičemž hlavními oblastmi výzkumu a vývoje jsou kromě pohonů také produkce a skladování vodíku. Produkce vodíku se stále více zaměřuje na udržitelné zdroje, jako je elektrolyzér poháněný obnovitelnou energií, čímž se snižuje ekologická stopa celého procesu. Nicméně implementace vodíkového pohonu v širším měřítku čelí několika výzvám. Mezi hlavní patří náklady na výrobu a distribuci vodíku, potřeba vybudovat rozsáhlou infrastrukturu pro jeho skladování a dopravu a technické komplikace spojené se specifickými vlastnostmi vodíku, které jsou výrazně odlišné od kapalných fosilních paliv. Přes tyto překážky řada automobilových výrobců a technologických společností investuje do vývoje vodíkových vozidel a infrastruktury, což naznačuje rostoucí důvěru v tuto technologii.

Tato práce se věnuje přehledu technologií a řešení, které umožňují efektivní využití vodíku v pohonu vozidel a analyzuje aktuální výzvy a budoucí perspektivy tohoto odvětví. V rešeršní části budou zkoumány možnosti výroby vodíku, jeho skladování a distribuce. Dále budou zkoumány druhy vodíkových pohonů, bude provedeno jejich porovnání z hlediska efektivity, emisí a složitosti implementace a výroby. Zvolená varianta bude dále zpracována včetně rešerše vozidel využívajících daný vodíkový pohon. Cílem práce je vytvoření technického návrhu vybraného pohonu pro vozidlo. Nejkritičtější součásti budou podrobeny výpočtům a pevnostní analýze metodou konečných prvků. Také budou doplněny o 3D modely a výkresovou dokumentaci včetně volby materiálů. K tvorbě CAD dat, simulací a výkresů bude použit software Siemens NX.

## 2 Základní vlastnosti vodíku

Vodík, jehož anglický název a chemická značka H vychází z latinského hydrogenium, je lehký bezbarvý plyn s absencí chuti a zápachu. Je netoxický a nezpůsobuje korozi. V pozemských podmínkách je tvořen dvouatomovými molekulami H<sub>2</sub>. Vyznačuje se schopností hořet pouze s oxidačním prostředkem, jako je kyslík a jeho plamen je v atmosféře neviditelný. Za pokojové teploty je stabilní, slučuje se pouze s fluorem. Ovšem za vyšších teplot se stává bouřlivě reaktivním s kyslíkem a halogeny. Tyto reakce jsou však podmíněny inicializací pomocí jiskry. Významné jsou jeho sloučeniny se sírou, dusíkem, kyslíkem a uhlíkem, jelikož jsou základem života na zemi. Uhlovodíkové řetězce jsou pak základem fosilních paliv. Vodík tvoří speciální typ chemické vazby, která se nazývá vodíkový můstek a je příčinou odlišných vlastností sloučenin. Nejsilnější podoba této vazby se nachází ve sloučenině s kyslíkem ve formě vody (H<sub>2</sub>O), která má díky této zvláštní vazbě anomální fyzikální vlastnosti, jakými jsou bod varu, tání aj. Mezi dvěma atomy vodíku je vazba kovalentní. [10, 12]

### 3 Způsoby získávání vodíku

Obecně je vodík nejvíce zastoupeným prvkem, tvoří 75 % hmotnosti vesmíru a až 90 % jeho objemu. V zemské kůře se však téměř nevyskytuje samostatně, ale pouze ve sloučeninách. Jeho koncentrace je zde 0,88 hmotnostních a 15,5 objemových procent. Existuje celá řada metod, kterými jej lze extrahovat. Na jedné straně jsou to chemické procesy, při kterých se štěpí uhlovodíky na menší a jednodušší molekuly a na straně druhé elektrolýza, která pomocí elektrické energie získává atomy vodíku z vody. Jako ekonomicky nejvýhodnější varianta výroby vodíku se jeví parní reformování. Níže jsou popsány některé z metod výroby vodíku používané v současné době. [3, 10]

#### 3.1 Parní reformování zemního plynu

Tento proces spadá do první výše zmíněné kategorie a probíhá tak, že se horká vodní pára mísí s metanem, který s ní endotermicky reaguje. Výstupem je oxid uhličitý, vodík a oxid uhelnatý, který vstupuje do další reakce s vodní parou za opětovného vzniku vodíku a oxidu uhličitého. Tato reakce je exotermická a probíhá za nižší teploty. Chemické rovnice vypadají následovně:

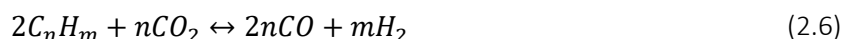
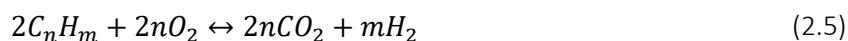
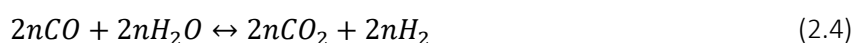


Metan se pro tuto výrobu získává ze zemního plynu a z technologického hlediska lze výrobu vodíku parním reformováním popsat následujícími kroky: [1, 2, 3, 10]

- Zemní plyn se odsiřuje adsorpcí na ZnO
- V trubkovém reaktoru iniciuje niklový katalyzátor reformování metanu vodní párou za teploty 800-870 °C a tlaku 2,2-2,9 MPa. Reakce probíhá podle rovnice (2.1). Složení výstupního plynu je přibližně 76,7 % H<sub>2</sub>, 12 % CO, 10 % CO<sub>2</sub> a 1,3 % CH<sub>4</sub>
- Následuje vysokoteplotní konverze CO, popsaná rovnicí (2.2). Ta je spuštěna katalyzátorem Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> při teplotě blízké 370 °C.
- Reakce CO s vodní párou je pak dokončena nízkoteplotní konverzí při teplotě 200-215 °C pomocí katalyzátoru CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ve výstupním plynu se nachází už pouze 0,3 % CO. Zastoupení ostatních plynů je: 77 % H<sub>2</sub>, 18 % CO<sub>2</sub>, 4,7 % CH<sub>4</sub>
- Snížení obsahu CO<sub>2</sub> se dosahuje tzv. vypíráním pomocí horkého roztoku K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> nebo jinými činidly (MEA, DMEA aj.). Výstupní plyn poté obsahuje už 98,2 % H<sub>2</sub>, obsah CO<sub>2</sub> je snížen na stopové množství 0,01 % a o zbytek složení se dělí CO (0,3 %) a CH<sub>4</sub> (1,5 %)
- Poslední čistící fází je metanizace pomocí niklového katalyzátoru. Zbylé oxidy uhlíku se hydrogenují na metan.
- Obvyklé složení na výstupu je pak: 98,2 % H<sub>2</sub> a 1,8 % CH<sub>4</sub>

## 3.2 Parciální oxidace uhlovodíků

Tato metoda používá jako suroviny kapalné i plynné produkty zpracování ropy. Pomocí ní lze zpracovávat i těžké ropné frakce jako například mazuty, propanové asfalty a další. Díky této vlastnosti se jedná o druhý nejvíce používaný způsob výroby vodíku ve světě. Zpracování různých druhů uhlovodíků je umožněno díky vysoké teplotě (1300-1430 °C) a nepřítomnosti katalyzátoru. Nevýhodou této metody je fakt, že spolu s oxidem uhličitým vzniká při procesu i oxid uhelnatý. V procesu probíhá mnoho reakcí současně. Jejich rovnice jsou následující:



Základem parciální oxidace jsou rovnice (2.3) a (2.4). Všechny výše uvedené reakce jsou vratné. Exotermní oxidační reakce, zejména (2.3) a (2.5), produkují dostatek tepla, aby pokryly endotermní reakce procesu (2.6) a (2.8). Pokud surovina dodávaná do procesu obsahuje sírné sloučeniny, jsou v reakci přeměněny na H<sub>2</sub>S a COS. Plyn na výstupu pak kromě nich obsahuje oxid uhelnatý a uhličitý, uhlík, vodu a vodík. Vedlejším a velmi nežádoucím produktem jsou saze, které nejvíce vznikají při zpracování těžkých ropných frakcí. [1, 2, 3, 10]

## 3.3 Zplyňování uhlí

Jedná se o zavedenou technologii, jejíž princip je podobný výše uvedené metodě parciální oxidace ropných reziduí. Zplyňuje se buď vzduchem s vodní parou nebo kyslíkem za podobně vysokých teplot (okolo 1300 °C), čímž v krátkých reakčních časech vzniká syntézní plyn. Ten se posléze ochlazuje, filtruje se z něj popel a prachové částice, vypírají se sloučeniny chloru, vodní parou se konvertuje oxid uhelnatý a pomocí adsorpce se odstraňují sírné sloučeniny. Poté se separuje vyrobený vodík, jehož cena je vyšší, porovnáme-li ji s cenou vodíku vyráběného parní reformací. Pro dosažení vysoké teploty, která zaručí vysokou konverzi uhlíku je totiž nutno spálit velké množství uhlí, což se pojí i s vysokou spotřebou kyslíku. [1, 2, 3, 10]



### 3.4 Výroba vodíku z biomasy

Jelikož má biomasa jako surovina na výrobě vodíku jen velmi malý podíl, řádově setiny procenta světové produkce, a nejeví se do budoucna příliš perspektivně, budou metody získávání vodíku z ní rozebrány jen velice stručně.

Prvním způsobem je parní reformování biomasy. V podstatě se jedná o stejnou technologii jako je parní reformování zemního plynu, ovšem s tím rozdílem, že zde vystavení suroviny vodní páře předchází pyrolýza, při které je biomasa zplyňována na metan, vodík a oxid uhelnatý. Poté už je proces téměř stejný. Pyrolýzou a párou takto lze zpracovat široké spektrum surovin zahrnující i komunální odpad a odpad z potravinářského průmyslu, oleje a samozřejmě zemědělskou biomasu.

Alternativou, výhodnou zejména u biomasy s vysokým obsahem vody, kterou by bylo nutné před pyrolýzou ještě vysoušet, jsou biotechnologické procesy. Ty jsou založené na činnosti bakterií, přeměňujících organické látky na vodík. Jmenovitě jsou to pak přímá a nepřímá fotobiologická výroba vodíku. [1, 2, 3, 10]

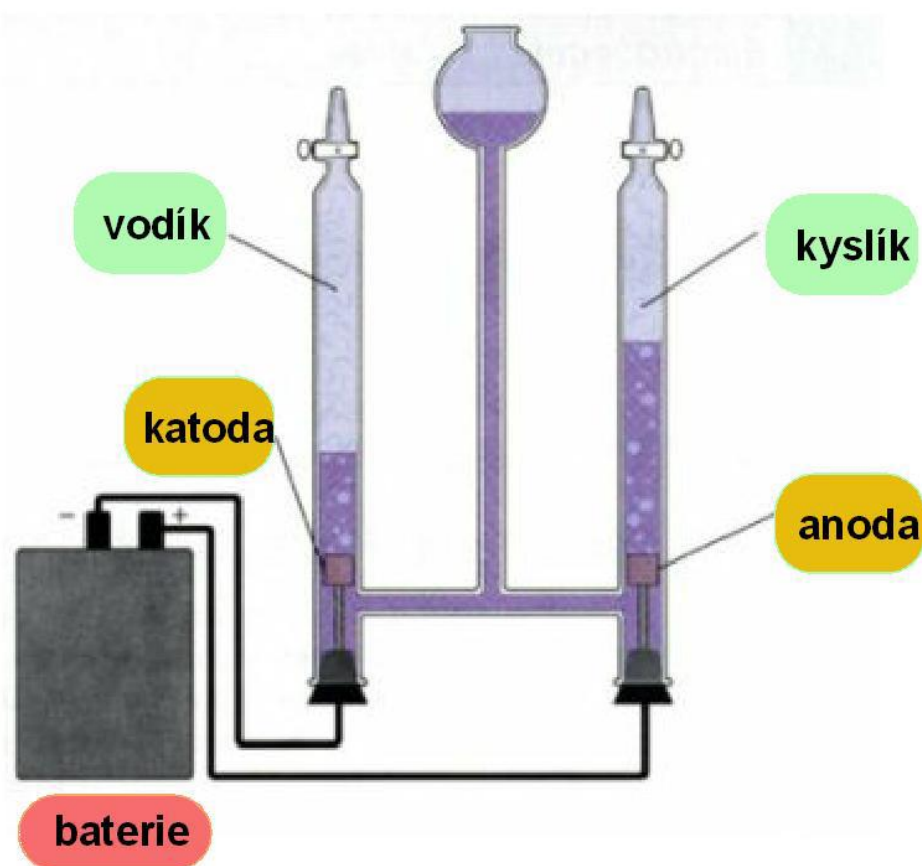
### 3.5 Termochemické štěpení vody

Vedle elektrolýzy existuje ještě další způsob, jak vodu rozdělit na vodík a kyslík, a tím jsou termochemické cykly, při kterých dochází k sérii chemických reakcí iniciovaných teplem. Existují též i hybridní cykly, kde je využit vliv tepla a elektrické energie. Typickým příkladem termochemického štěpení vody je hybridní cyklus kyseliny sírové, který vyvinula firma Westinghouse. Série reakcí probíhá v tomto pořadí. První je vysokoteplotní cyklus podle rovnice (2.10). Při teplotě vyšší než 900 °C je rozkládána kyselina sírová. Její produkty jsou pak zpracovány v následujícím nízkoteplotním cyklu za vlivu elektrické energie. Děj za teploty 25-100 °C, při kterém již získáváme výsledný produkt – vodík, popisuje rovnice (2.11). [1, 2, 3, 10]



### 3.6 Elektrolýza vody

Rozdílem elektrolýzy od předchozích výše popsaných metod je ten, že surovinou pro výrobu není fosilní palivo, či biomasa, ale pouze voda. Ta je rozkládána na plynný vodík a kyslík působením stejnosměrného elektrického proudu. Nedochozí k žádné katalyzované nebo vysokoteplotní reakci a ekologie tohoto procesu tak závisí čistě na zdroji elektrické energie použité pro napájení elektrolyzéru. Průběh je z chemického hlediska velmi jednoduchý. Souhrnná reakce je popsána rovnicí (2.12). Tu lze rozdělit na disociaci vody na ionty OH<sup>-</sup> a H<sup>+</sup> za napětí 1,85 – 2,05 V a dále děj na katodě podle rovnice (2.13) a reakci na anodě – rovnice (2.14). Na kladné elektrodě se oxidují anionty OH<sup>-</sup>. Na záporné pak probíhá redukce vodíkových kationtů H<sup>+</sup>. Schéma procesu je znázorněno na obrázku 1 [13].

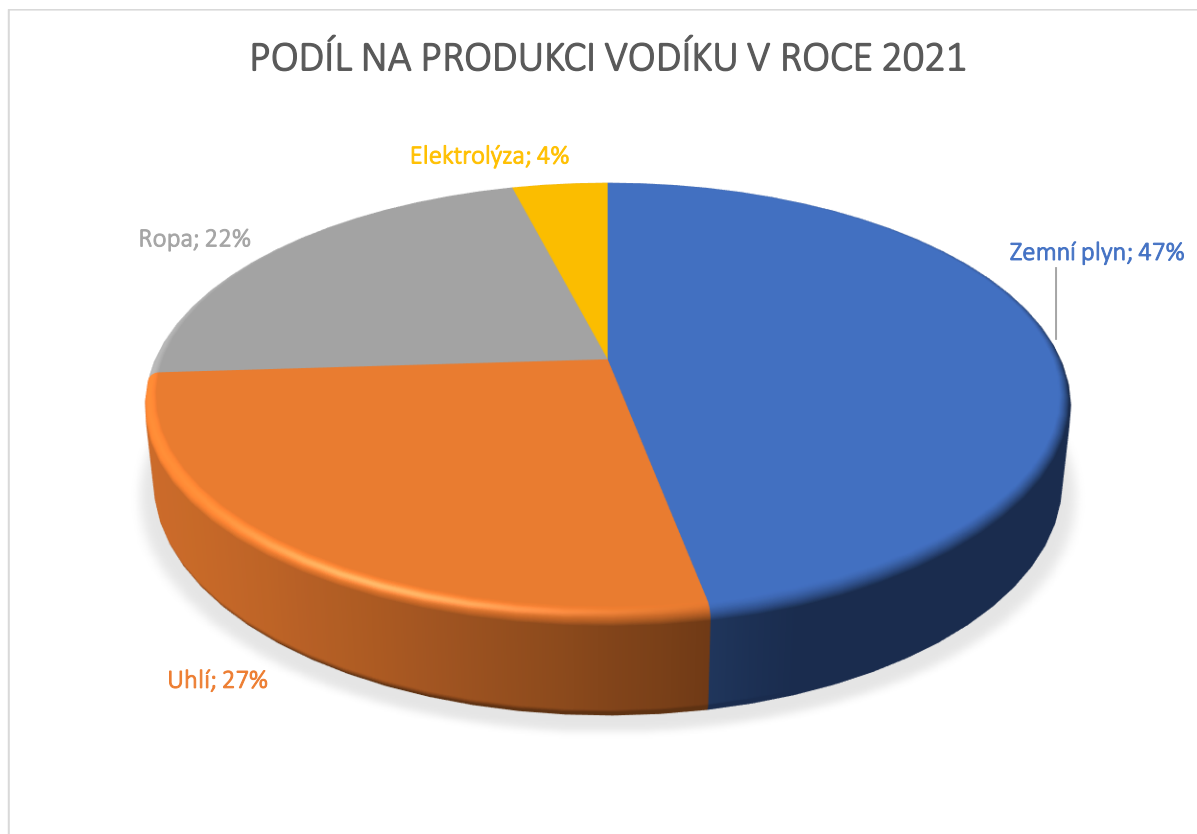


Obrázek 1 - Elektrolýza vody

Z hlediska ekologie je obzvláště výhodné vyrábět vodík pomocí elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů nebo v jaderných elektrárnách, čímž je eliminována uhlíková stopa. Proces elektrolýzy je možné dále zefektivnit, pokud je kromě energie elektrické přivedena také energie tepelná. Poté hovoříme o tzv. vysokoteplotní elektrolýze či termolýze, která probíhá při velmi vysoké teplotě kolem 2500 °C. Samotný děj pak probíhá v parním prostředí, což na povrchu elektrod umožňuje snadnější překonání aktivační bariéry. Tím se zvyšuje celková účinnost a snižuje se spotřeba elektrické energie. [1, 2, 3, 10]

### 3.7 Světová produkce vodíku

V současné době se na světě ročně vyrobí okolo 70 milionů tun vodíku. Z toho pouze 4 % tvoří výroba pomocí elektrolýzy. Zbývajících 96 % vyrobeného vodíku vzniká zpracováním fosilních paliv. Prognózy předpokládají, že s rostoucím podílem vodíku na dopravě a energetice jeho poptávka poroste a v roce 2050 bude dosahovat až 500 milionů tun za rok. Přičemž cílem je snížit cenu ekologických způsobů získávání vodíku, a tím zvětšit jejich podíl na celkové produkci. Z grafu na obrázku 2 [11] jsou patrné podíly jednotlivých zdrojů vodíku. Data pochází z konce roku 2021. [10, 11]



Obrázek 2 - Graf podílu surovin na produkci vodíku v roce 2021

## 4 Zásobovací infrastruktura

Vodík je v dnešní době stále poměrně drahým médiem z důvodu komplikací vyskytujících se při jeho distribuci a uložení. Disponuje sice vysokým energetickým obsahem vztaženým na jednotku hmotnosti, jeho hustota je však velmi nízká. Z toho důvodu vzniká nutnost jej stlačovat, aby bylo možné jej dopravovat a uchovávat v přijatelně velkém objemu.

Prvním způsobem dopravy k místu spotřeby je přepravovat vodík v plynném stavu s využitím potrubních sítí stejně jako v případě přírodních plynů. Potrubí a armatury jsou při průchodu vodíku vystaveny difuzi vodíku do matrice materiálu, který následně křehne a může docházet k vytváření prasklin. Intenzita a rychlost difuze je také závislá na velikosti tlaku proudícího média. Velmi tedy záleží na druhu oceli použité k výrobě potrubí a technologii jejího svaření. Vyšší nároky jsou kladeny i na těsnění a další pomocné prvky potrubí. Další úpravy oproti síti pro přírodní plyny by musely prodělat kompresorové stanice. Jelikož na jednotku objemu vodík obsahuje pouze třetinu energie v porovnání s dnes již využívanými plyny ve spalovacích motorech, je potřeba přepravit jej třikrát takové množství. Tomu je tedy nutné uzpůsobit přepravní výkon kompresoru, s čímž samozřejmě souvisí i jeho zástavbový prostor.

Druhou možností je přeprava vodíku ve zkapalněné formě. Zde je možné s výhodou využít silniční infrastruktury a dopravu realizovat pomocí nákladních vozidel. Nevýhodou této možnosti jsou však vyšší náklady na zkapalnění vodíku.

Zajímavou alternativu představuje možnost vyrábět vodík elektrolýzou přímo v místě odběru, čímž by odpadla nutnost přepravy a komplikace s ní spojené. Výroba vodíku by mohla být realizována přímo na čerpacích stanicích a využívat elektrickou energii zejména z přebytků v síti nebo získanou metodami šetrnými k životnímu prostředí opět přímo v místě odběru nebo v jeho bezprostřední blízkosti.

Další lokální metodu, kterou už řada výrobců testovala, představuje palubní výroba vodíku přímo ve vozidle. Možné suroviny jsou kromě benzínu zemní plyn a metanol. Tyto dvě látky s sebou však nesou řadu komplikací se skladováním či samotným procesem na palubě vozu. Přeměna zemního plynu na vodík je podstatně komplikovanější a zařízení, které by ji provádělo by bylo objemnější s množstvím speciálních komponent. Navíc by distribuce musela být zabezpečena potrubním vedením, jelikož doprava zemního plynu v tlakových nádobách je neekologická. Metanol se projevuje agresivně vůči těsnění a dalším komponentám a je částečně toxický. Mimo to je výrazně slabším nositelem energie. Je v něm obsažena zhruba jen polovina energie, kterou obsahuje benzín, který se tak jeví jako vhodnější palivo z těchto dvou možností. Ani ten však nelze použít bez úprav. Běžný automobilový benzín obsahuje určité množství síry, které by pro potřeby transformace na vodík muselo být redukováno nebo by bylo nutné použití syntetického benzínu, jehož výroba je však nákladná. Síra je také důvod, proč by vodík nebylo možné vyrábět z motorové nafty. Její obsah v naftě je ještě větší než v běžném benzínu.

Ačkoliv palubní systém výroby vodíku pracuje s fosilními produkty, v porovnání s jejich spalováním v pístovém motoru je mnohonásobně ekologičtější. Množství emisí CO<sub>2</sub> je při konverzi na vodík pouze zlomkem množství vznikajícím při spalování. Kromě nich nejsou do ovzduší vypouštěny saze, oxidy dusíku ani sloučeniny síry. Na druhou stranu, toto zařízení pracuje s teplotami přes 800 °C, což vyžaduje značnou pozornost při návrhu a konstrukci a zejména při volbě materiálů a jejich povrchových úprav. [1, 2, 3]

## 4.1 Metody skladování

Nejběžnější metody skladování vodíku jsou přímo vázány na způsoby přepravy. Jedná se buďto o uchování ve vysokotlaké nádobě ve formě stlačeného plynu, stejně jako se uchovává například CNG, nebo v kryogenním zásobníku jako super-chladná kapalina. V případě uchování vodíku v plynné formě bývá v nádobě stlačen pod tlakem 35 nebo 70 MPa. Na stlačení vodíku na 35 MPa se spotřebuje ekvivalent asi 30 % energie obsažené v samotném palivu. Teplota v kryogenní nádobě musí být udržována na hodnotě 20,4 K (-253 °C), aby se minimalizovaly ztráty vypařováním. Korektně navržený kontejner na zkapalněný vodík dosahuje při přetlaku 0,6 MPa hodnot rychlosti odpařování mezi 2–5 % skladovaného množství za den. Pokud by i přesto byl vodík v automobilu uchováván v takové nádobě, musela by mít oproti benzínové nádrži větší objem, aby byl zajištěn stejný dojezd vozidla jako v případě benzínového motoru. Kromě toho je na zkapalnění vodíku potřeba ekvivalent přibližně 40 % energie uchované v palivu.

Nové technologie daly vzniknout dalším alternativám ke konvenčním způsobům skladování. Jeden z principů je založen na schopnosti některých kovových materiálů navázat na sebe pod tlakem vodík a vytvořit s ním hydrid, který je poté opět rozložen za pomoci přivedeného tepla, přičemž se plynný vodík z matrice kovu opět uvolňuje. Pokud je vodík navázán na aktivní uhlík, mluví se o takzvané adsorpci. Ta však probíhá za značně nižších teplot než tvorba kovových hydridů. Na jednotku objemu je možné těmito principy uskladnit více vodíku než v kryogenní nádobě. Nevýhody však tkví ve vysoké ceně, vyšší hmotnosti a neschopnosti rychlé reakce na potřeby odběru. Odpovědí na hmotnostní nároky by mohla být variace na adsorpci pomocí karbonových nanotrubic a nanovláken, které mají výjimečně vysokou afinitu k vodíku. Svazky nanotrubic jsou schopny pojmout vodík až do kapacity 6,5 % své hmotnosti. Pro srovnání s nádrží na zkapalněný vodík, zásobník používající uhlíkové nanotrubice by při hmotnosti 50 kilogramů umožnil automobilu s vodíkovým spalovacím motorem dojezd přibližně 620 km. [1, 2, 3]

## 5 Využití vodíku jako paliva

Vodík je nejlehčí prvek v periodické tabulce s nejmenší velikostí atomu, přesto je při smíchání s kyslíkem a zapálení schopný uvolnit značné množství energie. Technicky vzato však vodík není palivo, ale je stejně jako elektřina nositelem (akumulátorem) energie. Jeho využití k pohonu vozidel v čisté formě je možné jednak jako palivo pro spalovací motor (HICE), jednak přeměnou na elektrickou energii ve vodíkovém článku (FCEV). Porovnání těchto variant bude provedeno v podkapitole níže. V obou z těchto případů je vedlejším produktem přeměny energie voda. Z toho důvodu bývá vodík považován za bezemisní zdroj energie, což ovšem nemusí být zcela pravda. Při některých způsobech jeho výroby může docházet k produkci znečišťujících látek a při spalování v pístovém motoru odchází do výfukového potrubí kromě vody též malé množství uhlovodíků vznikajících díky přítomnosti mazacího oleje na stěnách válce. Toto množství je však v porovnání s emisemi klasických spalovacích motorů na fosilní paliva zanedbatelné. Zmíněných vlastností se s výhodou využívá přimícháváním vodíku do metanu, kde už při 10 % koncentraci výrazně snižuje emise oxidu uhelnatého a uhlovodíků. [1, 2, 3]

### 5.1 Vodíkový spalovací motor

Vývoj pístových spalovacích motorů, jejichž palivem je vodík, má svůj původ již ve dvacátých letech minulého století. Od té doby experimentovali s aplikací této technologie různí světoví výrobci automobilů i jiných dopravních prostředků. Nejdále se v současné době nachází německá automobilka BMW, která se vývoji v oblasti spalování vodíku věnuje souvisle již více než 40 let.

Pro motor spalující vodík není potřeba žádná dodatečná úprava spalin, pokud se využívá běhu v režimu s přebytkem vzduchu, tedy chudou směsí. Hlavní emisní složkou je v tomto případě pouze pára, která může obsahovat stopové množství uhlovodíků vznikajících přítomností mazacího oleje ve spalovacím prostoru. Směs vodíku se vzduchem se spálí i při výrazně chudším poměru než směs benzínu se vzduchem, což při částečném zatížení motoru znamená výrazně sníženou spotřebu. Nadbytečný vzduch také snižuje teplotu spalování a plamen je díky němu teplotně udržován pod kritickou mezí, nad níž by mohlo dojít k samovznícení směsi. Další výhodou nižší teploty hoření směsi tkví v zabraňování vzniku emisí oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>), které jsou společně s uhlíkovými oxidy (CO<sub>x</sub>) nejvýznamnější škodliviny produkované motory na benzín a naftu. Jejich množství vypouštěné do ovzduší je dnes silně regulováno emisními normami. Vodíkové motory tak v režimu chudé směsi pracují v podstatě bez emisí. [1, 2, 3]

V následující tabulce 1 [10, 23] jsou porovnány vlastnosti různých paliv pro spalovací motory.

Tabulka 1 - Srovnání vlastností vodíku s ostatními palivy

	Vodík	Benzín	Nafta	Metan
Teplota difuzního plamene ve vzduchu [K]	2400	1300	N/A	1800
Rychlost laminárního hoření stechiometrické směsi [m/s]	1,91	0,3 – 0,45	0,3-0,45	0,396
Teplota samovznícení [°C]	510	230	210	537
Iničiační energie [mJ]	0,017	0,96	N/A	0,28
Výhřevnost [MJ/kg]	119	42,7	41,9	50
Spalné teplo [MJ/kg]	141,9	47,3	44,8	55,5
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	0,0838	750	840	0,657

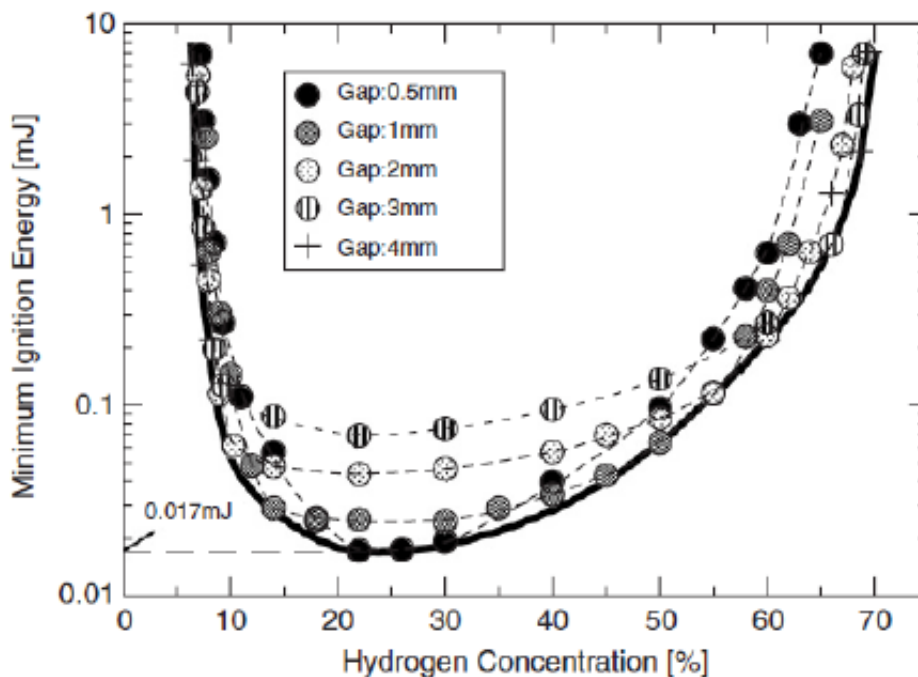
Teplotní účinnost, na rozdíl od objemové, je u vodíkového motoru lehce vyšší než u benzínového motoru. Z tabulky výše je patrné, že byť je výhřevnost vodíku vztažená na jednotku hmotnosti násobně vyšší než u ostatních paliv, jeho hustota je velmi malá. Tudíž benzín v sobě při atmosférickém tlaku nese větší množství energie na jednotku objemu. Proto je nutné vodík stlačovat, aby se zvýšila objemová koncentrace jeho energetického potenciálu. Spalné teplo je pojem označující množství tepla uvolněného dokonalým spálením jednotky paliva za stálého tlaku a kapalného stavu vody na výstupu z reakce. Výhřevnost paliva naproti tomu předpokládá na konci děje vodu ve stavu plynném, a je tedy od spalného tepla snížena o její výparné teplo.

Vodík má oproti benzínu a naftě vyšší teplotu samovznícení. Konkrétně dosahuje za běžných podmínek přes 510 °C. U benzínu je to pak 230 °C a u nafty 210 °C. Převedením na odolnost proti klepání vykazuje vodík u chudých směsí oktánové číslo vyšší než 130. Tato vlastnost znemožňuje jeho využití ve vznětových motorech. Ovšem v motorech zážehových lze díky ní dosáhnout vyššího kompresního poměru (14,5:1 i více), se kterým se zvyšuje i tepelná účinnost spalovacího cyklu.

Malá velikost atomů vodíku velmi úzce souvisí i s jeho schopností difuzivity. Ta přináší dva základní důsledky pro chování vodíku v sacím potrubí a ve spalovacím prostoru. Klady dopadem je snadné smíchání se vzduchem do výsledné zápalné směsi, což přináší lepší homogenitu směsi a rovnoměrnější hoření. Naopak negativní dopad má difuzivita na kovové komponenty přicházející do styku s vodíkem. Malé atomy snadno proniknou do krystalografické mřížky a způsobují křehnutí materiálu. U ocelových dílů také dochází k oduhličení povrchu, což má za následek další úbytek houževnatosti a pevnosti. Silná difuzivita umožňuje průnik vodíku do klikové skříně přes pístní kroužky. S ním se do prostoru klikového mechanismu mohou dostat i vodní páry, které jsou produktem spalovacího procesu. Přítomnost vodíku a těchto par by měla za následek degradaci olejové náplně a snížení životnosti mechanismu motoru. Proto je nutné věnovat náležitou pozornost návrhu odvětrávání klikové skříně.

Velkou bezpečnostní výhodou je nízká hustota plynného vodíku, která je za atmosférického tlaku pouze 0,0838 kg/m<sup>3</sup>. Způsobuje totiž vysoký vztlak v okolní atmosféře. Dojde-li k úniku, rozptýlí se vodík do vzduchu a stoupá velmi rychle směrem vzhůru. Páry uhlovodíkových paliv jsou díky řádově vyšší hustotě schopny vytvářet hustá mračna, která představují vysoké požární riziko. Rozšířená představa o tom, jak je vodík velkou bezpečnostní hrozbou, která je v povědomí zejména díky katastrofě lodi Hindenburg v roce 1937, tedy není zcela oprávněná. Ve srovnání s dnes běžnými palivy není vodík ani více ani méně nebezpečný, má zkrátka své odlišnosti a specifika. Stále je při manipulaci s ním a jakýmkoli jinými hořlavými látkami důležitá opatrnost a dodržování bezpečnostních zásad.

Vodík má velice nízkou iniciační energii, která je potřebná k zažehnutí jeho směsi se vzduchem. Ve svém minimu v okolí stechiometrické koncentrace jde pouze o 0,017 mJ. Naproti tomu benzín při své stechiometrické koncentraci vyžaduje k zážehu 0,96 mJ, což je o řád vyšší hodnota. Pokud by byl vodík spalován při přibližně stechiometrickém poměru se vzduchem, byly by nároky na zapalovací soustavu a zejména na svíčku podstatně nižší než u klasických zážehových motorů. Ovšem z grafu na obrázku 3 [23] je možné pozorovat strmý nárůst potřebné iniciační energie při snižující se koncentraci vodíku ve směsi. Na spodní hranici zápalnosti se hodnota dostává až k 10 mJ. Tudíž motory pracující s chudou směsí musejí být vybaveny srovnatelně nebo více výkonnou zapalovací soustavou. Názorným příkladem je Wankel od Mazdy pracující s velmi malou koncentrací vodíku ve směsi. Výrobce v případě tohoto motoru přistoupil k použití dvou zapalovacích svíček. Budou-li pominuty nároky na zapalovací soustavu, má nízká iniciační energie i negativní důsledky. Jsou jimi předčasné zážehy, v nejhorších případech až tendence ke zpětným šlehnutím do sacího potrubí. Zažehnutí mohou způsobit horká místa v blízkosti sacího otvoru, jiskry vznikající mechanicky při rychlém zavírání ventilů nebo také částice katalyzátoru. Dobrou cestou k redukci těchto nežádoucích flashbacků se zdá být recirkulace výfukového plynu zpět do spalovacího prostoru a také stratifikované přímé vstřikování paliva do válce při kompresním zdvihu. Tyto technologie jsou dnes již běžně využívány u klasických spalovacích motorů na fosilní paliva.



Obrázek 3 - Potřebná iniciační energie k zažehnutí směsi vodíku se vzduchem



Po zažehnutí směsi je pro účinnost stěžejním faktorem i rychlost následného hoření. Čím vyšší je, tím více se skutečný oběh blíží k ideálnímu termodynamickému cyklu, a roste tím jeho účinnost. Tento fakt je pro spalování vodíku velmi příznivý, jelikož rychlost laminárního hoření dosahuje u stechiometrické směsi 1,91 m/s. To je o řád vyšší hodnota než rychlost benzínového plamene. Se snižováním koncentrace paliva ve směsi tato rychlost klesá. Proto je zřejmé, že největší rozdíl v účinnosti lze pozorovat právě při stechiometrickém poměru. Popsaná výhoda se nejvíce projevuje ve vyšším spektru otáček motoru, kdy je rychlost pístu nejvyšší a časový interval mezi jednotlivými expanzními zdvihy je nejnižší.

Hodnoty teplot a rychlosti hoření uvedené v tabulce 1 jsou ideálními hodnotami naměřenými za atmosférického tlaku a volného laminárního šíření plamene. Ve spalovacím prostoru se ovšem nachází velmi odlišné podmínky. Jelikož se jedná o uzavřený prostor s velmi dynamicky se měnícími parametry teploty a tlaku, je velmi obtížné určit, jakým způsobem zde reakce budou probíhat. Plamen zde zpravidla nemívá laminární charakter, ale přechází v turbulentní. Stejně tak se díky kompresi zvyšuje i teplota hoření. Při expanzi se prostor válce zážehového motoru na benzín ohřívá až na 2200 K, přičemž teplota difuzního plamene benzínu je jen 1300 K. Lze tedy předpokládat, že teplota hoření vodíku v pístovém motoru bude též podstatně vyšší než 2400 K. Navíc má vodík malou hasicí vzdálenost, hoření tedy probíhá daleko blíže ke stěnám spalovacího prostoru, než dojde ke zhašení plamene. Při návrhu bude díky těmto vlastnostem nutno brát zřetel na značně zvýšené teplotní namáhání komponent, stejně jako je tomu u vznětových motorů. [10, 23, 25, 26, 32]

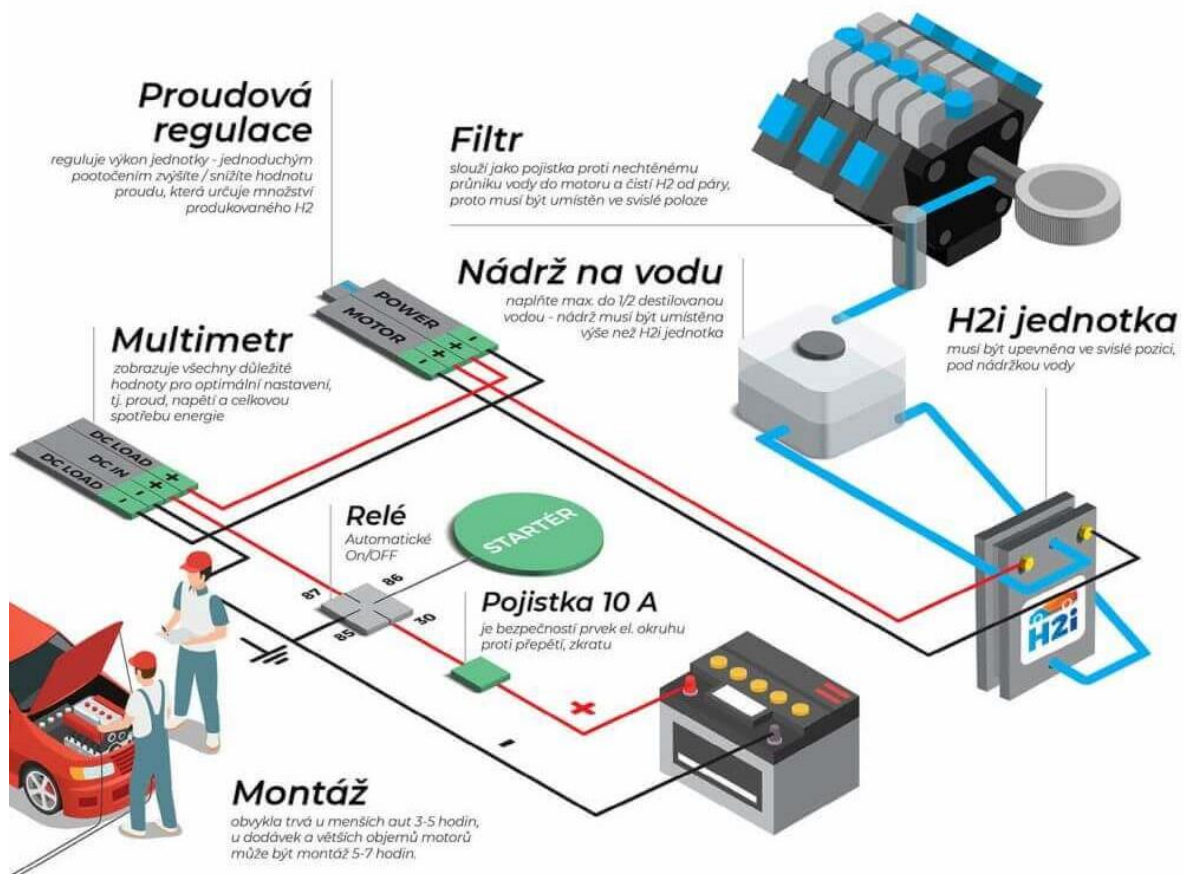
## 5.2 Vodíkový palivový článek

Principem funkce vodíkového palivového článku je elektrochemická reakce vodíku a kyslíku. Jejimi produkty jsou elektrická energie a voda. Palivový článek sestává ze dvou elektrod a membrány, která umožňuje průchod iontů. Elektrody jsou vyrobeny z uhlíku a je na nich nanesen katalyzátor reakce, nejčastěji platina. Membrána je vyrobena z polymerní fólie. Na anodě se atomy vodíku dělí na protony a elektrony. Uvolněné protony prochází skrze membránu na katodu, zatímco elektrony odchází anodou ve formě elektrické energie. Na katodě následně dochází k reakci protonů vodíku s kyslíkem za vzniku vody a tepla. Jedná se o reverzní děj k elektrolýze, který umožňuje vyrábět elektrickou energii k pohonu přímo na palubě vozidla. Účinnost tohoto procesu je až 60 %. Elektromotory, které přeměňují elektrickou energii na rotační pohyb kol vozidla, musejí být schopny reagovat na potřeby změny rychlosti udávané řidičem přestavěním polohy plynového pedálu. Z toho vyplývá, že je na vinutí elektromotoru nutné přivádět různé hodnoty proudu, jejichž změna musí být dostatečně rychlá. Tomu ovšem výstupní charakteristika palivového článku není schopna vyhovět. Z toho důvodu musí být vozidlo poháněné vodíkovým palivovým článkem vybaveno ještě trakčními akumulátory, které jsou schopny skladovat přebytečnou energii z článku při nízké spotřebě, a naopak tuto energii rychle vydat při potřebě akcelerace. Jednou z hlavních nevýhod palivových článků je jejich vysoká cena. Potřeba akumulátoru cenu FCEV ještě zvyšuje, a kromě ní zvyšuje také hmotnost. [33, 34]

## 5.3 HHO generátor

HHO generátor je zařízení, které produkuje vodíkový plyn HHO, též zvaný Brownův plyn, což je směs plynného vodíku a kyslíku. Základním komponentem těchto generátorů je titanový vodíkový článek, který vyrábí výše zmíněný plyn vysokofrekvenční elektrolýzou z destilované vody. Ten obsahuje několik elektrod (většinou 4 až 6), mezi které se dělí přiváděné napětí. Vytvořený plyn pak prochází ve formě bublin přes nádrž se zásobou vody a směřuje do výstupu.

Současné HHO generátory používané v automobilech jsou malá zařízení, do kterých je elektrická energie přiváděna z palubní akumulátorové baterie. Je tedy využito napětí 12 nebo 24 V, v závislosti na typu a výkonu vozu. Montují se jako dodatečná zařízení k zážehovým a vznětovým spalovacím motorům za účelem snížení emisí a spotřeby paliva. Schéma zapojení je na obrázku 4 [16]. Plyn vyvíjený generátorem, který se spouští společně s motorem, je přiváděn do sacího potrubí přímo za vzduchový filtr. Dále se mísí se směsí paliva a vzduchu, vodík na sebe navazuje uhlovodíky z fosilního paliva a dochází k dokonalejšímu spalování. To je způsobeno skutečností, že plamen hořícího vodíku má ve srovnání s plamenem hořícího benzínu či nafty desetinásobnou rychlost. Směs ve válci je tedy spálena rychleji a efektivněji, což vede v konečném důsledku ke snížení spotřeby, emisí a zvýšení výkonu. Dalším přínosem je nejen snížení kouřivosti a zanášení motoru, ale i vyčištění komponent ve spalovacím prostoru od karbonizace a celkově kultivovanější projev motoru, tedy snížená hlučnost a vibrace. To má příznivý vliv na další komponenty automobilu, zejména v přenosové soustavě výkonu jako jsou převodovka a dvoumotový setrvačnick. Výhody, které přináší přimíchávání vodíku do směsi, byly potvrzeny mnoha studiemi publikovanými SAE International (sdružení odborníků na automobilový, letecký a dopravní průmysl).



Obrázek 4 - Schéma implementace HHO generátoru do automobilu

Množství plynu, které by měl daný HHO generátor vyvíjet, je dáno empirickým vztahem. Ten uvádí, že na jeden litr zdvihového objemu je do motoru potřeba přivádět zhruba 0,15 l plynu za minutu. Pokud by byla tato hodnota překročena, došlo by ke snížení účinnosti. Takové množství v praxi odpovídá přibližně 2,5 A napájecího proudu pro HHO generátor.

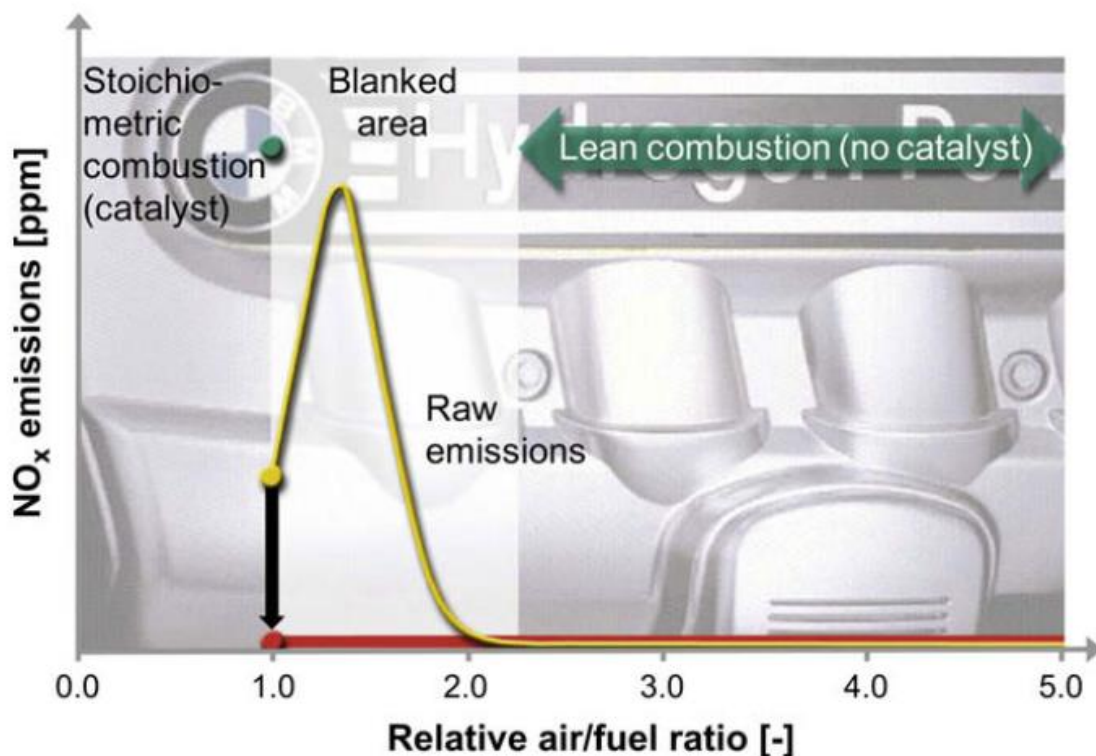
Existují dva typy vodíkových článků, které mohou být zdrojem Brownova plynu, a to buď suchý, nebo mokrá. Suchý článek má název podle toho, že na rozdíl od mokrého nejsou plátové elektrody zcela ponořeny v elektrolytu, ale je mezi nimi pouze voda, která je štěpena. Ta vyplňuje volný prostor mezi elektrodami, zatímco ostatní části článku jsou udržovány v suchých podmínkách. Suchý článek při provozu uvolňuje méně tepla, tudíž má menší energetické ztráty a disponuje vyšší účinností. Při stejné produkci plynu je tedy potřeba menší odběr elektrického proudu z akumulátoru.

Kdyby byl HHO generátor jediným zdrojem paliva ve vozidle, nebylo by nutné skladovat v něm vodík v tlakové či kryogenní nádobě. Toto řešení však není technicky proveditelné. [14, 15, 16]

#### 5.4 Produkce emisí při spalování vodíku

Hlavní emisí při spalování vodíku je vodní pára. Jak již bylo zmíněno výše, vyskytuje se v ní i stopové množství nespálených uhlovodíků pocházejících z hoření maziva ulpívajícího na stěně spalovacího prostoru a též oxidů uhlíku nasávaných ze vzduchu. Zemská atmosféra však obsahuje kromě kyslíku také 78 % dusíku. Ten za vysokých teplot při spalování reaguje za vzniku oxidů NO<sub>x</sub>, které jsou jedinou kritickou škodlivinou produkovanou spalovacími motory na vodík.

Množství oxidů dusíku ve výfukových plynech je závislé na poměru směsi vzduchu s vodíkem, tedy na koeficientu přebytku vzduchu  $\lambda$ . Pokud směs obsahuje ideální množství vzduchu, aby došlo k dokonalému spálení paliva, je hodnota koeficientu  $\lambda = 1$ . Jedná se o takzvaný stechiometrický poměr. Pokud je ve směsi přebytek vzduchu je  $\lambda > 1$ . Tato směs se nazývá chudá. Pracuje-li motor naopak s nedostatkem vzduchu, potažmo přebytkem paliva, je  $\lambda < 1$ . Pro tyto hodnoty koeficientu se používá pojem bohatá směs. Závislost množství produkovaných emisí NO<sub>x</sub> na součiniteli  $\lambda$  je znázorněno v grafu na obrázku 5 [35].



Obrázek 5 - Graf závislosti množství emisí NO<sub>x</sub> na koeficientu  $\lambda$

Z grafu je zřejmé, že při chudé směsi s koeficientem  $\lambda > 2$  jsou emise oxidů dusíku nulové. Při poklesu součinitele pod tuto mez se množství emisí exponenciálně zvyšuje na maximum, které je při hodnotě  $\lambda \approx 1,3$ . Poté směrem ke stechiometrickému poměru opět klesá. Z toho vyplývá, že při vysokém zatížení motoru je vhodné pracovat se stechiometrickou směsí, při které se vzniklé emise NO<sub>x</sub> redukují v třicetném katalyzátoru. V oblasti nízké zátěže je z emisního pohledu výhodné se vyhnout rozmezí  $1 < \lambda < 2$  a spalovat směs o poměru větším než 2. Vodík má při spalování velmi široký rozsah koeficientu přebytku vzduchu. To znamená, že může být zažehnuta i velmi chudá směs a je tedy využitelné i toto pásmo hodnot součinitele  $\lambda$ . Pro srovnání, směs benzínu se vzduchem má mez zápalnosti na hodnotě  $\lambda \approx 1,6$ . Pokud by byl přebytek vzduchu ve směsi s benzínem ještě vyšší, nedošlo by při výboji jiskry na zapalovací svíčke k zážehu. [35, 38]

## 5.5 Porovnání palivového článku a vodíkového spalovacího motoru

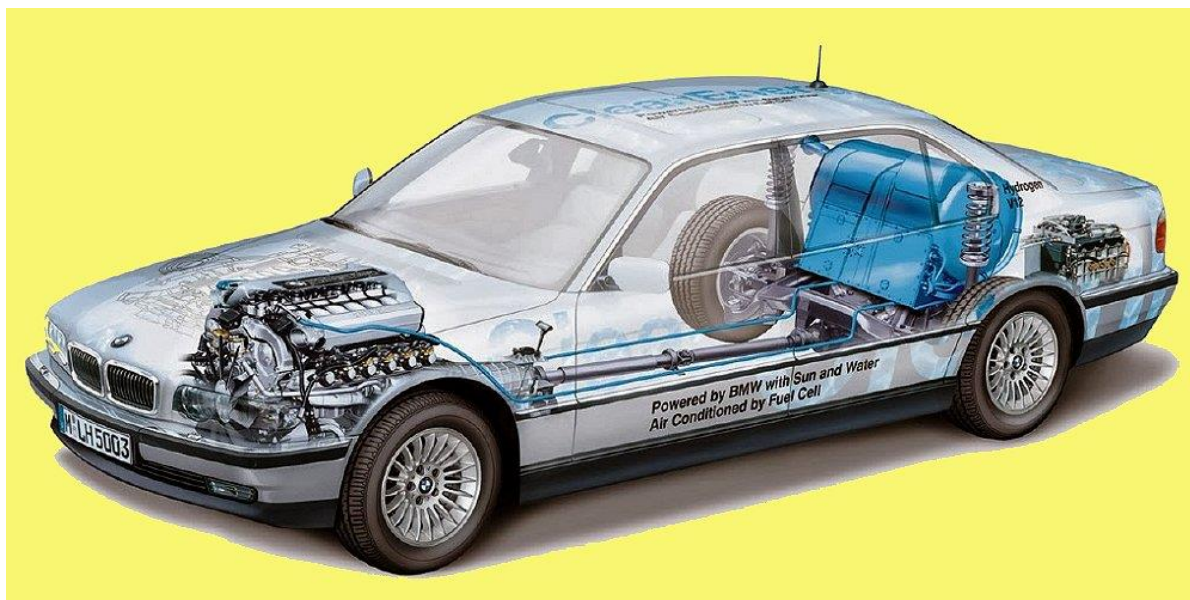
Pohon vozidla pomocí elektromotoru získávajícího energii z vodíkového palivového článku má jednu značnou výhodu oproti technologii spalování vodíku v pístovém motoru, a to vyšší účinnost procesu. Zatímco při spalování vodíku se při započtení všech ztrát v motoru dosahuje mírně přes 40 % tepelné účinnosti, palivový článek je schopen v ideálních podmínkách pracovat s účinností až 60 %. Jeho provoz je navíc bez jakýchkoli škodlivých emisí. Tento signifikantní rozdíl však vyvažuje řada nevýhod a technických komplikací spojených s touto technologií. Pro pohon vozidla je velmi důležitá rychlost reakce na potřebu akcelerace, a tedy pružnost pohonného agregátu. Zatímco spalovací motor na změnu polohy plynového pedálu reaguje s dostatečnou rychlostí, změna množství palivovým článkem produkované elektrické energie je velmi pomalá. Proto je nutné pohon doplnit ještě o vysokonapěťový akumulátor, který dokáže překlenout dobu, během které dochází k pozvolnému zvyšování produkce energie v palivovém článku. S tím je spojené další zvýšení hmotnosti vozidla a nevýhody spojené s bateriemi. Vodíkový spalovací motor, stejně jako motory na fosilní paliva, dokáže pracovat při širokém spektru podmínek okolního prostředí jako jsou teplota, vlhkost, prašnost, nadmořská výška a jiné. Další významná nevýhoda palivových článků je cena zařízení. Ta je dnes stále násobně vyšší než cena pístového motoru a výrazně zvyšuje celkovou cenu vozidla. Spalovací motory jsou známou technologií vyvíjenou již přes století a jejich technická vyspělost je na vysoké úrovni, zato automobily s vodíkovými články jsou ve stádiu prototypů a experimentů. Znalost výrobních technologií, na které jsou vybaveny výrobní haly po celém světě, rozšířenost vybavených servisů a zaškolených techniků, to vše jsou další aspekty mluvící ve prospěch spalovacích motorů poháněných vodíkem. Ty jsou díky mnoha ohledům vhodnější a neporovnatelně rychleji a snadněji aplikovatelnou alternativou řešení emisních požadavků než elektromobily, ať už s akumulací elektrické energie pomocí lithiových baterií, nebo její výrobou ve vozidle pomocí palivových vodíkových článků.

Z těchto důvodů byl pro další postup práce zvolen vodíkový motor s vnitřním spalováním (HICE). Technický návrh se bude konkrétně věnovat úpravě zážehového pístového motoru na benzín pro provoz na vodík, jelikož není potřeba tento druh pohonu znovu vyvíjet, ale stačí jej pouze upravit tak, aby vyhovoval rozdílným vlastnostem vodíku proti benzínu.

## 6 Vozidla využívající vodíkový spalovací motor jako zdroj energie

Níže jsou popsány příklady vozidel poháněných vodíkovým spalovacím motorem.

### 6.1 BMW 750hL



Obrázek 6 - BMW 750hL [12]

Tento automobil, uvedený v roce 2000 německou automobilkou BMW, byl vybaven dvanáctiválcovým motorem se zdvihovým objemem 5,4 l. Motor byl upraven tak, aby mohl pracovat na dva druhy paliva, a to samotný vodík a benzín. Vodík byl uchováván v kryogenním stavu při  $-253\text{ °C}$  ve 140 l nádrži značky Linde a vstřikován metodou MPI (Multi-point injection) od značky Bosch. Při provozu čistě na vodík mělo vozidlo výkon 150 kW a dojezd 350 km. Po vyčerpání vodíkové nádrže došlo k automatickému přepnutí na provoz na benzín, což umožnilo dojezd dalších 600 km při zvýšeném výkonu 240 kW. Záměna paliva byla možná také manuálně pomocí přepínače v kokpitu. Přesné parametry vozu jsou uvedeny v následující tabulce 2 [12].

Tabulka 2 - Parametry vozu BMW 750 hL

Typ motoru	V12 OHC (48 ventilů) bez přeplňování
Zdvihový objem (vrtání; zdvih; komprese)	5379 cm <sup>3</sup> (85 mm; 79 mm; 10,0)
Maximální výkon (vodík / benzín)	150 kW / 240 kW (při 5000 ot/min)
Maximální točivý moment (vodík / benzín)	N/A / 490 Nm
Převodovka	Automatická pětistupňová
Typ automobilu	Čtyřdveřový pětimístný sedan
Koncepce	Motor podélně vpředu, pohon zadních kol
Rozvor náprav	3070 mm
Rozchod kol	1552/1568 mm
Vnější rozměry (délka, šířka, výška)	5124 mm, 1862 mm, 1425 mm
Pohotovostní hmotnost	2100 kg
Maximální rychlost (vodík / benzín)	226 km/hod / 250 km/hod
Zrychlení 0-100 km/hod (vodík / benzín)	9,6 s / 6,6 s
Spotřeba paliva (vodík / benzín)	40 l (≈2,8 kg) /100 km / 20 l/100 km
Zavěšení kol	Vpředu McPherson, vzadu Multi-link
Brzdy	Kotoučové, vpředu ventilované

Motor 5,4 l V12 byl již pátou generací vodíkového motoru vyvíjeného v mnichovském centru automobilky. Tento vůz se jako první dočkal malosériové výroby a byl velmi úspěšný na světové události Clean energy world tour v roce 2001. Další zajímavostí o tomto modelu je absence akumulátorové baterie. Elektrická energie potřebná jednak pro provoz motoru, ale také pro komfortní spotřebiče, byla vyráběna vodíkovým článkem o výkonu 5 kW a napětí 42 V. Například klimatizace tak mohla být v provozu i při vypnutém motoru a v tomto stavu automobil neprodukoval žádné emise. Navíc automobil splňoval všechny parametry mezinárodních předpisů na bezpečnost. Vodíková nádrž prošla celou řadou testů. Mezi ně patřily i nárazové zkoušky, které dokázaly, že je minimálně stejně bezpečná jako nádrž benzínová. Tento fakt zajišťoval bezpečnostní systém, který udržoval za jakýchkoli podmínek tlak v kryogenním zásobníku pod 0,4 MPa.

BMW s tímto automobilem vyvinulo i nový způsob tankování kapalného vodíku a tankovacího robota, který dokázal pracovat plně automaticky. Tento způsob byl nejen bezpečnější, ale také rychlejší. Naplnění nádrže pomocí tohoto robota proběhlo za pouhé 3 minuty, což se značně přibližuje době tankování fosilních paliv u běžné čerpací stanice. [2, 12]

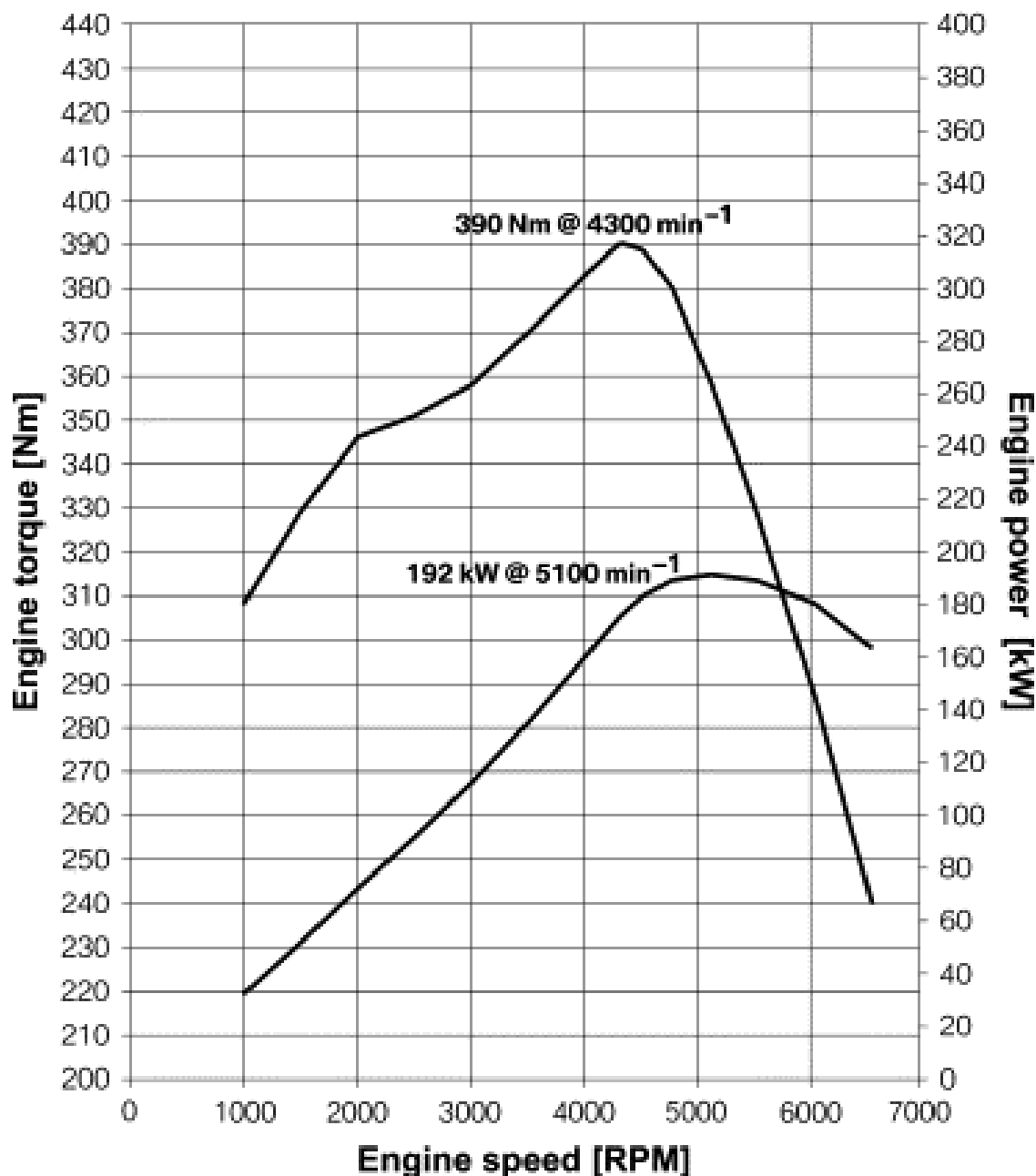
## 6.2 BMW Hydrogen 7



Obrázek 7 - BMW Hydrogen 7 [36]

Dalším a daleko proslulejším představitelem automobilu spalujícího vodík od značky BMW je model Hydrogen 7. Nejednalo se pouze o evoluci výše popsaného BMW 750hL, nýbrž o úplně nový koncept, kterým se BMW snažilo demonstrovat schopnost nasazení této technologie do reálného provozu a představit ji veřejnosti. Necelá stovka vyrobených vozů prošla kompletním vývojovým a testovacím procesem jako jakákoli jiná řada sériově vyráběných vozů této bavorské značky. Cílem bylo nasbírat data z reálného využívání automobilu, a tak byl tento luxusní sedan dodán několika ambasadorům, kteří jej měli představovat a testovat. Byly též osloveny různé nezávislé instituce, aby vozy prověřily. Příkladem je emisní a spotřební test Argonské národní laboratoře. V jejich centru pro dopravní výzkum zkoušeli vodíkové automobily podle standardů FTP-75, které zahrnují jízdy v menších rychlostech na kratší tratě i se studenými starty, městský provoz a dále i dálniční jízdní cyklus. Výsledkem byla spotřeba vodíku 3,7 kg/100 km (což energeticky odpovídá zhruba 13,8 l benzínu na 100 km) podle FTP-75 a 2,1 kg/100 km při dálničním testu (energetický ekvivalent 7,8 l benzínu na 100 km). Emisní testy potvrdily teoretické předpoklady. Bylo zaznamenáno pouze stopové množství nespálených uhlovodíků vznikajících z hoření maziva na stěnách spalovacího prostoru. Hodnoty emisí oxidů uhlíku byly na úrovni množství v nasávaném vzduchu. Oxidů dusíku vznikalo pouze velmi malé množství, které bylo ve voze regulováno speciálním katalyzátorem. Dále automobil prošel i bezpečnostními nárazovými testy podle normy EURO NCAP.

Motor upravený na spalování vodíku opět vycházel z benzínového vidlicového dvanáctiválce, ovšem tentokrát s vyšším zdvihovým objemem 6,0 l. Výsledné křivky výkonu a točivého momentu jsou zobrazeny v grafu na obrázku 8 [37]. Hodnoty maximálního výkonu 192 kW ( $\approx 260$  koňských sil) dosahoval motor při 5100 otáček za minutu. Nejvyšší točivý moment 390 Nm byl dosažen při 4300 ot/min. Po dynamické stránce to znamenalo zrychlení z 0 na 100 km/hod za 9,5 sekundy a maximální rychlost elektronicky omezenou na 230 km/hod.



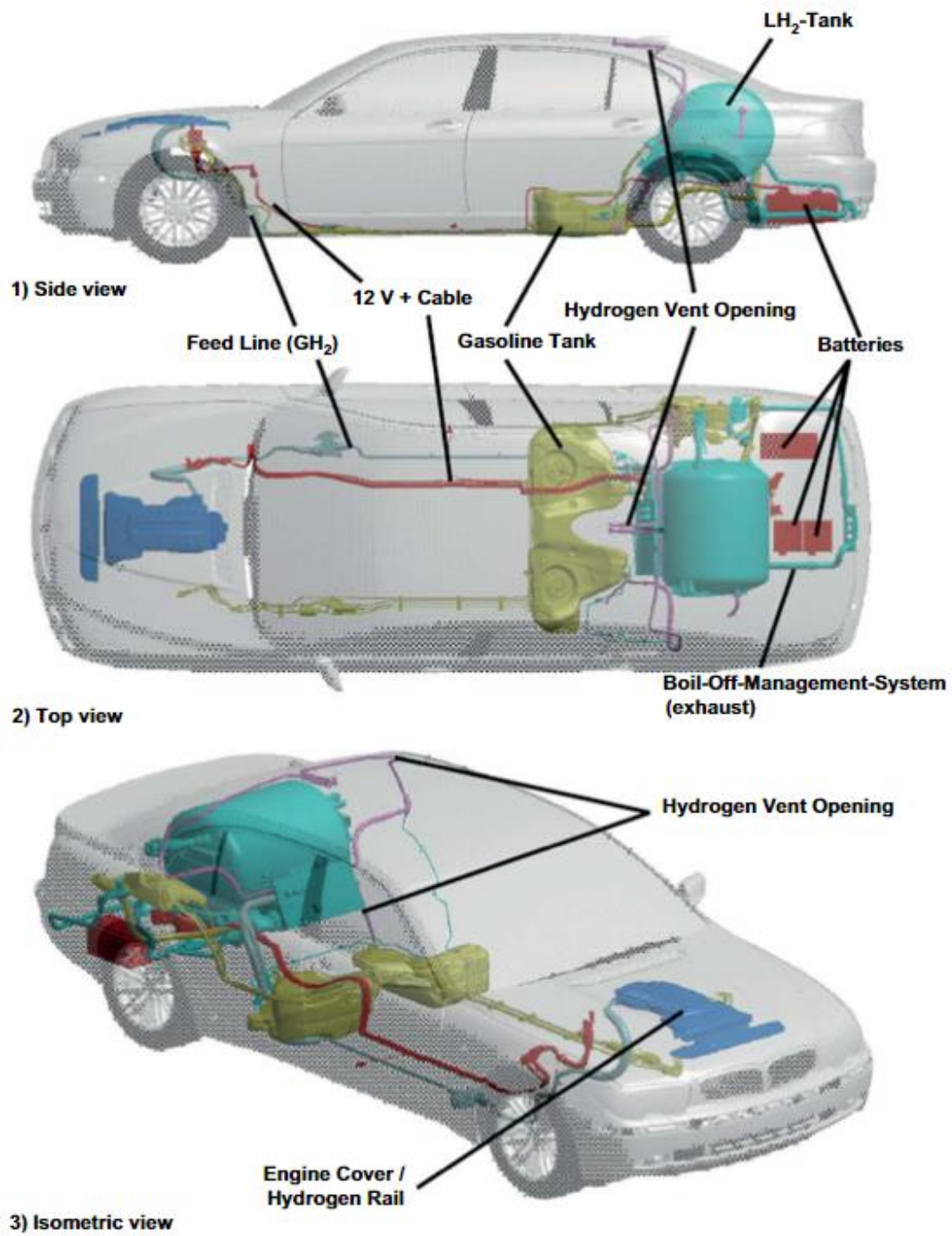
Obrázek 8 - Křivky výkonu a točivého momentu vodíkového motoru 6,0l V12



Zásoba vodíku byla v automobilu uložena v kryogenní nádrži umístěné za zadními sedačkami. Nádrž sestávala ze dvou ocelových plátů o tloušťce 2 mm oddělených 30 mm super-izolační vakuovou vrstvou. Spojení mezi ocelovými vrstvami bylo tvořeno spojovacími částmi vyrobenými z uhlíkových vláken. Podle BMW měla tato mezivrstva stejný izolační účinek jako polystyrenová izolace o šířce 17 metrů a snižovala tepelný prostup na absolutní minimum. Až 8 kg tekutého vodíku bylo v zásobníku udržováno při teplotě – 250 °C a tlaku 0,3 - 0,5 MPa. Přístupu tepla však nelze zamezit úplně, proto stále docházelo k malému nárůstu tlaku v nádrži, který způsoboval odpařování vodíku. O to, aby nedošlo k překročení maximálního povoleného tlaku v nádrži, který činí 0,51 MPa, se staral systém řízeného odpařování. Již odpařený vodík byl odpuštěn takzvaným „boil-off ventilem“. Poté byl zředěn průchodem Venturiho trubící a oxidační reakcí v katalyzátoru přeměněn na vodní páru. Nádrž i její pomocná výstroj byly testovány v extrémních podmínkách. Během validace bezpečnosti byly komponenty palivové soustavy vystaveny plamenům, výstřelům ze zbraně, masivnímu mechanickému poškození i ztrátě vakua v izolační mezivrstvě. Při žádném z těchto zkoušek se neprojevovaly problémy. Vodík z nádrže přes ventily bezpečně pomalu unikal dokonce i při obklopení zásobníku plameny o teplotě přesahující 1000 °C po dobu 70 minut.

Při jízdě byl vodík z nádrže odebírán v plynném stavu stálým kontrolovaným procesem odpařování, kdy byl uvnitř vytvářen plynový polštář pod definovaným tlakem. Před smícháním se vzduchem do zápalné směsi byl tento plynový vodík přehříván pomocí dvou spolupracujících tepelných výměníků. Jeden z nich odebíral teplo z chladicího okruhu motoru a druhý využíval přesně definované množství tepla na přehřátí vodíku proudícího do sání a též do nádrže. Vodík o správné teplotě byl poté dopraven do sacího potrubí, kam byl velmi přesně dávkován vstřikovacemi ventily, které byly schopny reagovat a měnit množství přiváděného vodíku pro spalování v řádu zlomku sekundy. Při provozu na vodík bylo tedy použito nepřímé vstřikování. Pokud bylo ovšem řídicím systémem nebo řidičem přepnuto na benzínový provoz, bylo použito vstřikování přímé. Efektivní plnění spalovacího prostoru a výměnu směsi podporoval plně variabilní řídicí systém ventilů Valvetronic a řízení vačkových hřídelů double-Vanos. Jedná se o technologie umožňující změnu nastavení poloh otevírání a zavírání sacích i výfukových ventilů vzhledem k úhlu natočení klikové hřídele, jinak také nazývané jako proměnné časování ventilů. Díky nim dokázala řídicí jednotka velmi spolehlivě regulovat chod motoru v obou režimech, i přes rozdíly spalovacího procesu benzínu a vodíku. Umístění vodíkových komponent v automobilu je patrné z obrázku 9 [37].

[2, 3, 35, 36, 37]



Obrázek 9 - Vodíkové komponenty ve vozidle BMW Hydrogen 7

### 6.3 Mercedes-Benz Unimog U430



Obrázek 10 - Mercedes-Benz Unimog U430 [18]

Mercedes-Benz Unimog nespadá do kategorie osobních automobilů, nýbrž se jedná o užitkový nákladní automobil. Tento konkrétní model uvedený do testovacího provozu na konci roku 2023 se stará o sekání trávy a údržbu silnic v Německu. Upravený řadový šestiválcový motor má zdvihový objem 7,7 l, výkon 213 kW a nejvyšší točivý moment 1001 Nm. V porovnání s původními hodnotami 220 kW a 1200 Nm při provozu na motorovou naftu se jedná jen o velmi malý pokles. Jádrem palivové soustavy je nádrž, která má kapacitu 14 kg vodíku stačeného na 70 MPa. Vodík je tudíž ve vozidle skladován v plynném stavu a je ho dle Mercedesu dostatek pro osmihodinový provoz. Vedení BMW se snažilo modelem Hydrogen 7 dokázat, že automobil s vnitřním spalováním vodíku je možné využívat v každodenním běžném provozu. Tento model je prezentací skupiny Daimler, že vodíkový spalovací motor je dostatečně výkonný i pro těžké aplikace v nákladních automobilech. Unimog vznikl v rámci projektu WaVe, na kterém od roku 2021 spolupracuje se značkou Mercedes-Benz 18 dalších partnerů. Cílem tohoto projektu je právě vývoj vodíkového spalovacího motoru pro středně těžké aplikace. Vedení projektu věří, že právě tento segment, a zejména speciální aplikace vozidel jako je Unimog na údržbu silnic, je klíčový pro budoucí použití vodíku jako zdroje energie pro pohon vozidel a že spalování vodíku je v této oblasti nejefektivnější náhradou spalování fosilních paliv. [17, 18, 19]

## 6.4 Mazda RX-8 Hydrogen RE



Obrázek 11 - Mazda RX-8 Hydrogen Re [20]

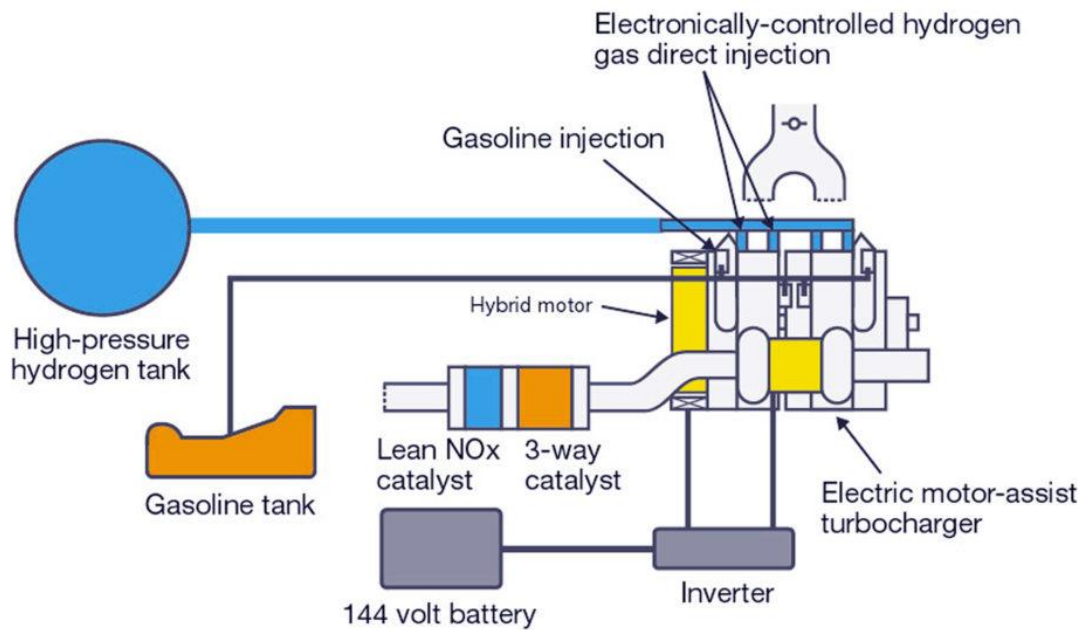
Kromě Německých automobilek na vodíkovou budoucnost sází i Japonská Mazda. Tamější konstruktéři však vodík neaplikovali do pístového motoru, ale do jejich ikonického Wankelu. Konkrétně pro úpravu vybrali přeplňovaný motor Renesis 1,3 l R2, tedy konstrukci se dvěma rotory, každého o objemu 654 kubických centimetrů produkujících dohromady výkon 80 kW a 140 Nm točivého momentu. Tyto hodnoty byly značně nižší než 154 kW a 222 Nm, což jsou maxima při přepnutí chodu na benzín. Maxima točivého momentu jsou uvedena v obou režimech při 5000 ot/min. Výkon byl na kola tohoto čtyřmístného sportovního kupé přenášen přes pětistupňovou manuální nebo čtyřstupňovou automatickou převodovku a dostačoval ke zrychlení z 0 na 100 km/hod za 10 sekund při vodíkovém provozu a 7,2 sekundy při provozu na benzín. Maximální rychlost byla shodná a elektronicky omezená na 170 km/hod. Vodík natlakovaný na 35 MPa uchovávala nádrž v zadní části vozu vyrobená z hliníku a uhlíkových vláken. Do objemu 110 litrů bylo možné natankovat až 2,4 kg vodíku, což dostačovalo na dojezd 100 km. K přepnutí na nádrž s benzinem o objemu 61 l docházelo automaticky po spotřebování vodíku nebo manuálním přepnutím pomocí tlačítka.

Motor s rotujícím pístem se ukázal být velmi vhodný pro spalování vodíku hned z několika důvodů. Prvním je oddělený sací a expanzní prostor. Na rozdíl od čtyřdobého pístového motoru, kde se všechny 4 fáze oběhu odehrávají na jednom místě, má Wankelův motor komoru tvaru epitrochoidy, v níž rotující trojúhelníkový píst odděluje prostory, ve kterých dochází k jednotlivým dějům. Pro vizualizaci je níže přiložen řez popisovaného motoru (obrázek 12 [20]). Na něm je v pístem odkryté levé horní části komory vidět sací otvor a nad ním v nejvyšší části vstřikovač. Na pravé straně jsou ohraničeny dva malé prostory – nahoře kompresní prostor a následně expanzní prostor dole, které jsou doplněny dvěma zapalovacími svíčkami. Poslední je výfuková část komory vlevo dole s otvorem pro odvod spalin do výfukového potrubí. V praxi to znamená, že sání, komprese, expanze i výfuk mají svou část komory, ve které opakovaně probíhají. Tudíž prostor, kde dochází k nasávání vzduchu, nemá tak vysokou teplotu, jelikož v něm neprobíhá hoření. Nevznikají zde tedy horká místa (tzv. hot spoty), jež podstatně zvyšují nebezpečí samovznícení a zpětných šlehnutí, k nimž je vodík díky snazší zápalnosti náchylný.



Obrázek 12 - Wankelův spalovací motor Mazdy RX-8 Hydrogen RE

Druhou značnou výhodou je velký prostor po obvodu spalovací komory umožňující umístění duálního přímého vstřikování. Plyný vodík má nižší objemovou koncentraci energie, tudíž je nutné vstřikovat jej větší množství než benzínu, který byl zde stejně jako u výše zmíněných automobilů od BMW sekundárním palivem pro upravený motor. Ten byl kromě sofistikovaného vstřikování vybaven celou řadou pomocných systémů. Jejich kooperaci znázorňuje schéma na obrázku 13 [20]. Posílený 144 V okruh napájel jednak elektromotor sekundující samotnému spalovacímu motoru, tak i malý elektromotor pohánějící turbodmychadlo v pásmu nízkých otáček, kdy výfukové plyny neměly dostatek energie pro jeho uvedení do pohybu. Dobíjení akumulátoru pomáhaly rekuperační brzdy získávající energii při zpomalování vozidla. Mazda RX-8 Hydrogen RE byla tedy na svou dobu ukázkou velmi sofistikované hybridní technologie s duálním palivovým systémem, kterým Japonská automobilka prokázala svou technickou vyspělost. [20, 21, 22]



Obrázek 13 - Schéma pomocných systémů motoru Mazdy RX-8 Hydrogen RE

## 7 Příprava směsi vodíku se vzduchem

Pro přípravu teoreticky dokonalé směsi je potřeba určité množství vzduchu dané slučovacími rovnicemi. Ze vzorce pro oxidaci vodíku bylo získáno množství kyslíku potřebné k jeho ideálnímu spálení. To bylo dále pomocí hodnoty jeho koncentrace v zemské atmosféře přepočítáno na množství vzduchu označené  $L_t$ . Rovnice dokonalého spálení vodíku je formována následovně podle vzorce 7.1. [5]



Relativní atomová hmotnost vodíku je 1,00797 g/mol. U kyslíku je její hodnota 15,9994 g/mol. [10] Z rovnice je patrné, že do reakce vstupuje s kyslíkem dvojnásobek atomů vodíku. Vynásobí-li se poměr atomových hmotností a poměr množství atomů, pak vychází množství kyslíku  $L_o$  na 1 kg vodíku dle rovnice 7.2. [5]

$$L_o = \frac{1}{2} * \left( \frac{15,9994}{1,00797} \right) = 7,9364 \text{ kg} \quad (7.2)$$

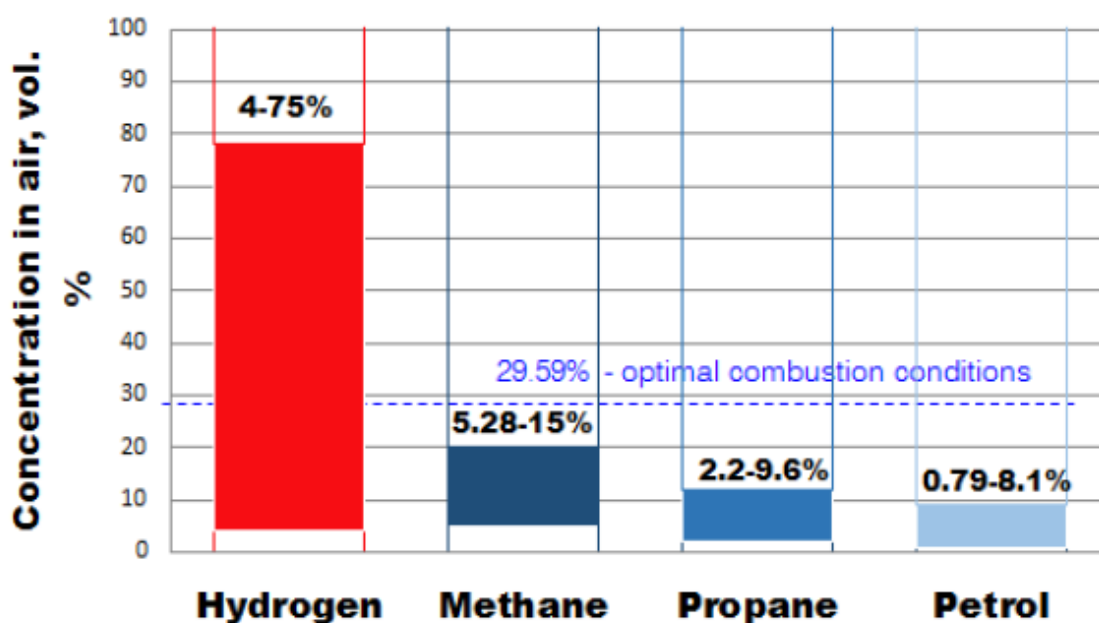
V atmosféře je však obsaženo pouze 21 % kyslíku. Zbýlých 79 % zaujímá dusík a malé množství oxidu uhličitého a dalších plynů, jejichž podíl byl zanedbán a pro výpočet byla uvažována pouze přítomnost N<sub>2</sub>. Relativní atomová hmotnost dusíku je 14,0067 g/mol. [10] Množství vzduchu pro dokonalou směs  $L_t$  se vypočte následovně podle rovnice 7.3.

$$\begin{aligned} L_t = L_o + L_N &= L_o + \left( \frac{L_o}{\frac{15,9994}{0,21}} * 0,79 * 14,0067 \right) = 7,9364 + 26,1375 \\ &= 34,0739 \text{ kg} \end{aligned} \quad (7.3)$$

K teoreticky dokonalému spálení 1 kg vodíku je za ideálních podmínek potřeba přibližně 34 kg vzduchu, což je více než dvojnásobné množství ve srovnání se 14,8 kg potřebnými pro spálení 1 kg automobilového benzínu. Převedeno na objemové jednotky je vodík v ideální směsi zastoupen 29,59 % objemu zaujatého prostoru.

Ve skutečnosti je vzduchu do spalovacího prostoru nutno dopravit více než udává tento poměr. Důvodem je, že nedochází k dokonalému promíchání všeho vzduchu s palivem. Zavádí se takzvaný součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ , který udává poměr mezi množstvím přivedeného vzduchu a teoretickým množstvím vzduchu potřebného k dokonalému spálení daného množství paliva. Ideální hodnota lambda se pak volí dle druhu paliva a kvality jeho rozprášení a promísení se vzduchem. Čím vyšší je homogenita směsi paliva a vzduchu, tím menší přebytek vzduchu je potřeba. Například plynná paliva se se vzduchem mísí snáze než paliva kapalná, jejich ideální poměr  $\lambda$  bude tedy blíže k hodnotě 1. Díky nedokonalé výměně obsahu válce v pístovém motoru do směsi dále vstupují zbytky zplodin z předchozího expanzního zdvihu, které mají také vliv na směšovací poměr. Ovšem jejich množství a složení je velmi obtížné určit, proto do výpočtu nejsou zahrnuty. Ve spalovacím procesu pak reaguje pouze množství vzduchu  $L_t$  a přebytečný zůstatek  $(\lambda - 1) * L_t$  se pouze ohřeje a nevstupuje do reakce. [5]

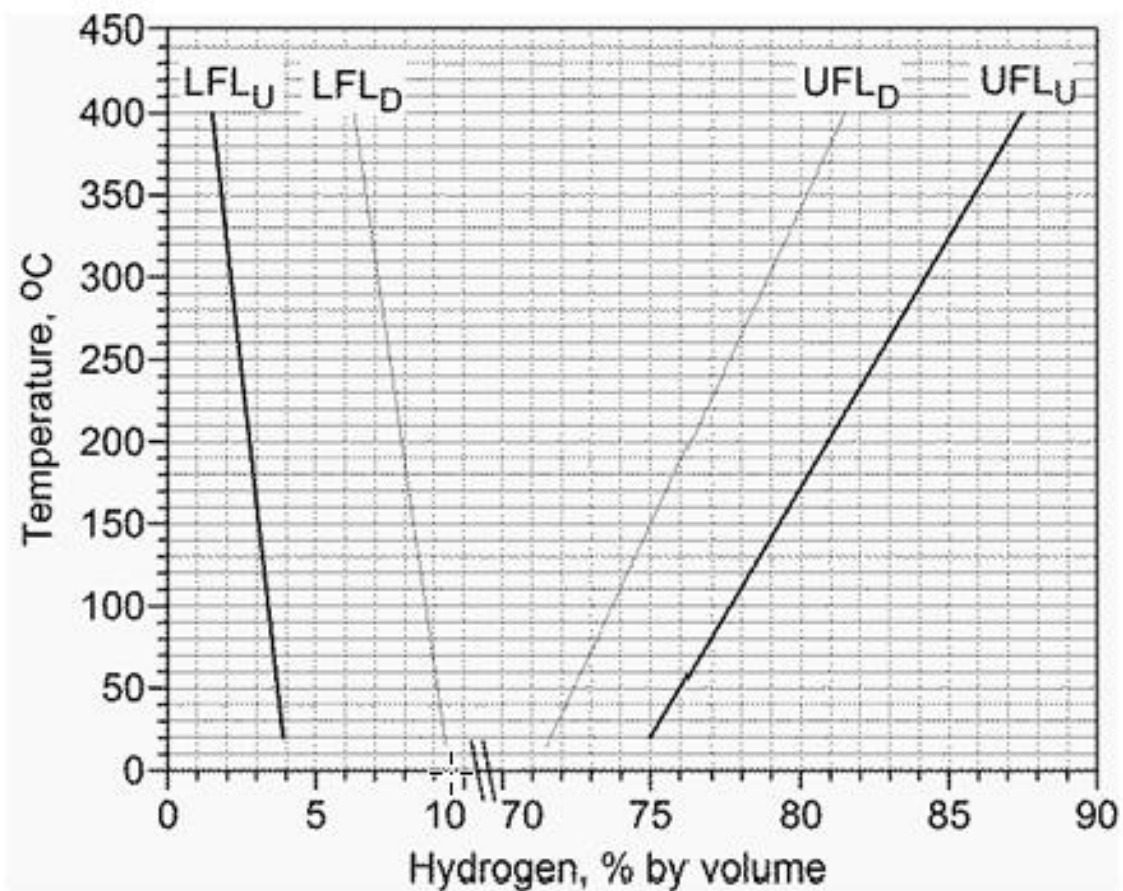
Kromě stechiometrického poměru jsou důležité další dvě hranice, a to horní (UFL) a dolní (LFL) mez hořlavosti. Udávají se v objemových procentech zastoupení hořlavé látky ve vzduchu. Vodík má mimořádně široké rozpětí těchto mezí. Díky tomu je při jeho směšování se vzduchem možné využívat velmi širokého rozpětí koeficientu lambda. V praxi je s výhodou využívána oblast mezi stechiometrickým poměrem a dolní mezí hořlavosti (LFL) z důvodu nízké spotřeby paliva a nízké produkce emisí. Porovnání hodnot za atmosférických podmínek je vyobrazeno v grafu na obrázku 14 [23].



Obrázek 14 - Graf horních a dolních mezí hořlavosti za atmosférických podmínek

Stejně jako je tomu u teplot hoření a rychlosti plamene, i na tyto meze má vliv teplota a tlak okolního prostředí. S rostoucí teplotou se oblast zápalnosti směsi zvětšuje, u tlaku je tomu právě naopak. Dalším faktorem, který má významný vliv na rozpětí hořlavosti, je směr šíření plamene. Pokud hoření probíhá směrem vzhůru, je rozmezí výrazně širší než v případě, kdy plamen postupuje směrem dolů. Závislost mezi LFL a UFL na teplotě a směru plamene je vykresleno v grafu na obrázku 15. [23]





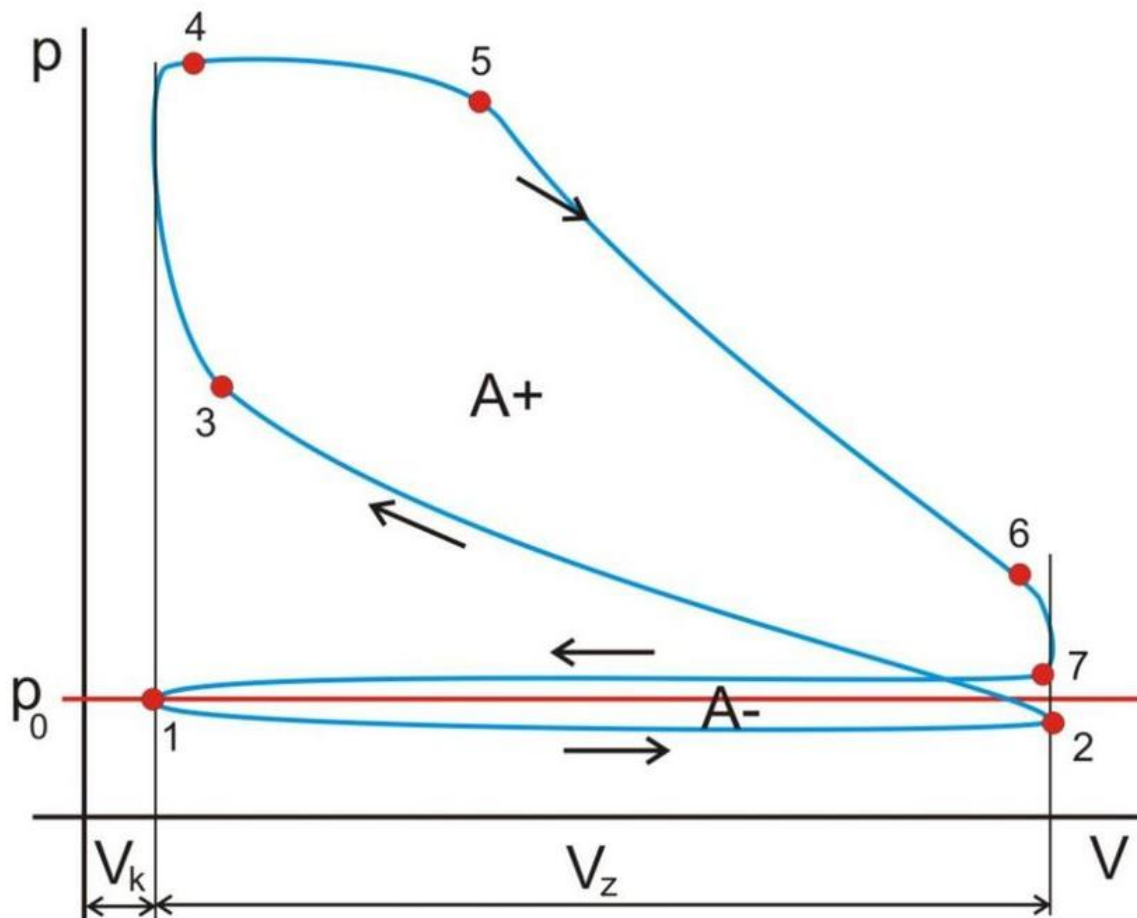
Obrázek 15 - Graf závislosti mezi hořlavostí na teplotě a směru šíření plamene

## 8 Mechanická práce a výkon spalovacího motoru

Vykonaná mechanická práce je jedním ze základních výpočetních parametrů motoru. Vyjadřuje mechanickou energii pístu, která vzniká tlakem plynů ve spalovacím prostoru na jeho dno za jeden oběh cyklu motoru. Protože její velikost je závislá na indikovaném tlaku ve válci, bývá též nazývána jako práce indikovaná. Určit ji lze integrací součinu právě indikovaného tlaku a diferenciální změny objemu spalovacího prostoru. Pro praktický výpočet je vhodné převést diferenciál objemu na nekonečně malý přírůstek natočení klikového hřídele, obvykle značený řeckým písmenem  $\alpha$  (viz rovnice 8.1). Důvod je velmi prostý. U většiny změn veličin je v případě spalovacích motorů zvykem uvádět je v závislosti na natočení klikového hřídele.

$$A = \int p * dV = \int p(\alpha) * \frac{dV}{d\alpha} d\alpha \quad (8.1)$$

Hodnota mechanické práce je též rovna ploše, kterou v p-V diagramu uzavírá křivka zaznamenávající průběh cyklu ve spalovacím prostoru. Na obrázku 16 [24] je patrná jak oblast s kladnou prací A<sup>+</sup> mezi částmi křivky, které popisují kompresní a expanzní zdvih, tak oblast s prací zápornou A<sup>-</sup>. Při sacím zdvihu klesá tlak níže než při výfukovém zdvihu a dojde k překřížení křivky. V této fázi cyklu se práce spotřebovává a je tedy záporná.



Obrázek 16 - p-V diagram čtyřdobého zážehového spalovacího motoru

Alternativně lze práci vykonanou pístem spočítat jako teplo přivedené v palivu  $Q_p$  snížené o indikovanou účinnost  $\eta_i$  (rovnice 8.2). Ta je dána součinem tří dílčích účinností, které vychází ze Sankeyova diagramu. První z nich je účinnost chemická  $\eta_{ch}$ , která popisuje dokonalost spálení směsi. Čím méně potenciálně uvolnitelného tepla zůstane v palivu bez přeměny na mechanickou energii, tím vyšší je tato účinnost. K dalšímu snížení tepla převedeného na mechanickou práci dochází odvedením jeho části výfukovým ventilem. Tuto ztrátu reprezentuje účinnost  $\eta_v$ . Odlišnost skutečného p-V diagramu od teoretického způsobuje mimo jiné i teplo odvedené stěnami válce. Jedná se tedy o další snížení skutečně využitého tepla vyjádřené účinností  $\eta_z$ .

$$A = Q_p * \eta_i = Q_p * \eta_{ch} * \eta_v * \eta_z \quad (8.2)$$

Ze znalosti mechanické práce je možné dopočítat indikovaný výkon jednoho válce podle vzorce 8.3. Malé  $n$  v této rovnici značí otáčky motoru. Pokud se jedná o čtyřdobý motor, je třeba otáčky vydělit dvěma, jelikož expanzní zdvih probíhá jen jednou za dvě otáčky klikového hřídele.

$$P_i = A * n \quad (8.3)$$

Mechanická práce slouží také k určení mechanické účinnosti motoru. Ta je rovna podílu skutečné výstupní práce na klikovém hřídeli a indikované práce tlaku působícího na píst. [6, 8]

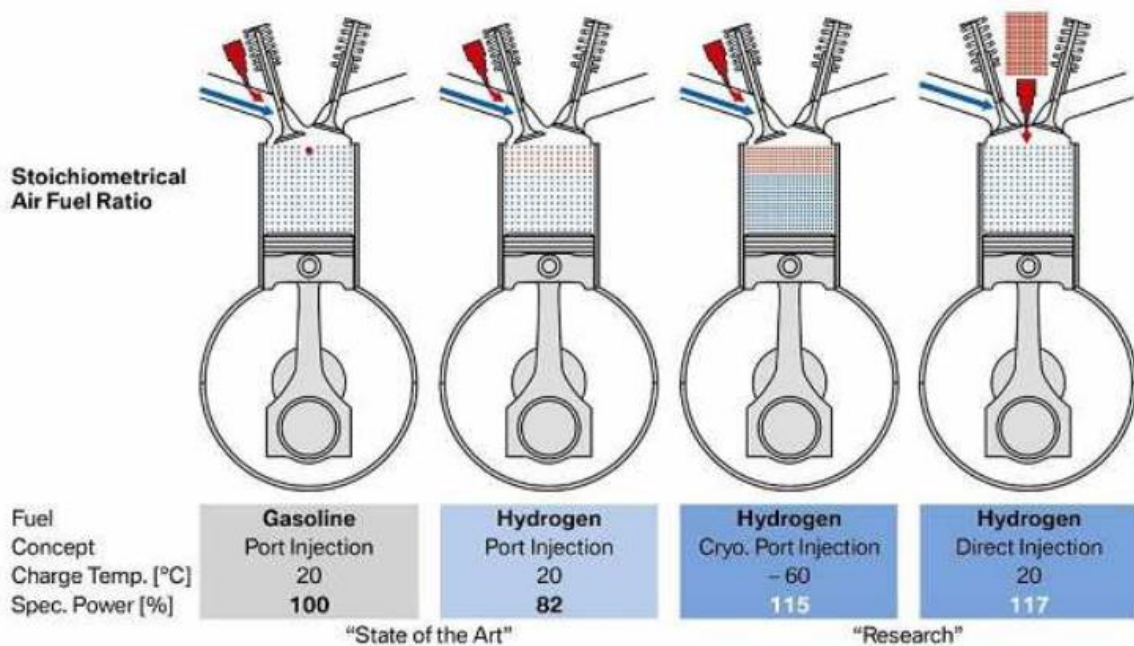
## 8.1 Vliv záměny benzínu a vodíku na mechanickou práci a efektivní výkon

Pokud by do spalovacího prostoru bylo za jeden cyklus motoru přivedeno takové množství vodíku, které by hmotnostně odpovídalo množství přivedeného benzínu, výsledkem by díky rozdílu výhřevnosti, která je ekvivalentem energetické kapacity paliva, byla téměř trojnásobná mechanická práce. Díky velmi nízké hustotě vodíku toto však není snadno dosažitelné. Dopravě vodíku do spalovacího prostoru je věnována pozornost v návrhu úprav spalovacího motoru v následujících kapitolách.

Pro srovnání tedy bude nyní uvažováno takové množství vodíku, aby jeho potenciálně uvolněné teplo bylo stejné jako u daného množství benzínu. Podmínka je tedy, že  $Q_p$  je u obou paliv totožné. Výsledná mechanická práce v takovém případě bude závislá pouze na hodnotách dílčích účinností. Jak již bylo zmíněno výše, vodík má velmi malé atomy a díky tomu je schopný velmi snadno difundovat a rozptýlovat se. Zásadním důsledkem pro spalovací proces je výborné smíchání se vzduchem do homogenní směsi a díky tomu dokonalejší spalování zvyšující chemickou účinnost procesu. Na zvýšení účinnosti  $\eta_z$  bude mít velmi příznivý vliv násobně vyšší rychlost hoření, která přibližuje skutečný p-V diagram tomu ideálnímu a dojde k lepšímu vyplnění křivky oběhu. Naopak vyšší teplota hoření a menší zhášivá vzdálenost se na této účinnosti projeví negativně zvýšením tepla přecházejícího do stěn válce. Na druhou stranu, vyšší teplota hoření je teoreticky výhodná, jelikož z termodynamiky plyne, že práce vykonaná při expanzním zdvihu popsáném izoentropickou (adiabatickou) změnou je přímo úměrná rozdílu teplot na začátku a na konci děje.

Pokud do uvažování bude zahrnutý ještě navíc vliv stechiometrického poměru, kdy je na hmotnostní jednotku vodíku pro získání ideální směsi potřeba přivést více než dvojnásobné množství vzduchu v porovnání s ideální směsí stejné hmotnosti benzínu, pak je již velmi obtížné určit, který z těchto dvou motorů bude vykazovat vyšší hodnotu mechanické práce. Výzkumné hodnoty však naznačují, že je vodík v tomto směru efektivnějším palivem.

Na obrázku 17 [25] je porovnán nepřímo vstřikovaný benzínový motor s vodíkovými motory s různými typy vstřikování. Pro srovnání zde byl použit indikovaný výkon, který je přímo úměrný mechanické práci a zde je uveden v procentuálních hodnotách. Právě zážehový motor na benzín (na obrázku úplně vlevo) byl stanoven jako etalon a má hodnotu 100 %. Napravo od něj je možné vidět motor na vodík, využívající stejnou technologii vstřikování, avšak do sacího potrubí palivo přes vstřikovač proudí v plynném stavu za nízkého tlaku. Právě díky tomu je hodnota jeho výkonu pouze 82 %. Dále napravo je vyobrazen koncept nepřímého vstřikování vodíku v kryogenním stavu, kde je již podstatně vyšší hustota přiváděného paliva a hodnota výkonu dosahuje 115 % výkonu etalonového motoru. Úplně vpravo na obrázku je současně nejmodernější koncept, a to přímé vstřikování plynného vodíku. Tato technologie dosahuje podle experimentálních hodnot ještě o dvě procenta vyššího indikovaného výkonu než předchozí varianta. [25]



Obrázek 17 - Porovnání výkonu různých koncepcí vodíkového motoru s motorem benzínovým

Tyto předpoklady potvrdil i výzkum provedený týmem na Malajské univerzitě [26], kde byla provedena termodynamická analýza čtyřválcového zážehového motoru o zdvihovém objemu 2000 kubických centimetrů. Jejich výsledky byly konzistentní i s dalšími výzkumy publikovanými v časopise International Journal of hydrogen energy. Uvažovaný motor měl čtvercový poměr zdvihu k vrtání a podmínky na začátku komprese byly stanoveny na přibližně atmosférický tlak 100 kPa a teplotu 30 °C. Rovnice pro výpočet vycházely z ideálního Ottova cyklu a porovnávanými palivy byly chemicky idealizovaný benzín C<sub>8</sub>H<sub>16</sub> a vodík H<sub>2</sub>. Výzkumníci zde pro zjednodušení počítali se 100 % chemickou účinností, čímž byl vodík poněkud znevýhodněn, jelikož chemická účinnost jeho spálení je vyšší než u benzínu. I přesto při 3000 otáčkách za minutu vykázal vodíkový motor při kompresním poměru 14,5:1 o 34 % vyšší výkon než benzínový motor s kompresním poměrem 8:1. Jelikož byly motory porovnány při stejných otáčkách, je zřejmé, že ve stejném poměru byly i hodnoty točivého momentu, konkrétně 436 Nm u vodíku a 325 Nm u benzínu. Mezi výsledky tohoto výzkumu patří i hodnota středního efektivního tlaku. Stejně jako u předchozích parametrů, i zde je patrný značný rozdíl. Hodnota tlaku při spalování vodíku byla totiž 2,74 MPa, přičemž u benzínové varianty dosáhla pouze 2,04 MPa. Díky tomuto údaji je možné vypočítat teoretický efektivní výkon motoru (rovnice 8.4). Pro výpočet byl zvolen stejný objem motoru jako ve výzkumu, tedy 2 litry. Pro maximální výkon bylo uvažováno 5000 otáček za minutu. Jedná se o běžnou hodnotu, při které moderní zážehové motory dosahují svého maximálního výkonu. Navrhovaný motor byl uvažován jako čtyřdobý, proto hodnota  $\tau = 4$ .

$$P_{eteor} = \frac{V_z * p_e * n}{30 * \tau} = \frac{2 * 2,74 * 5000}{30 * 4} = 228, \bar{3} kW \quad (8.4)$$

Vypočtená hodnota je idealizovaná a je platná pouze za předpokladu homogenní stechiometrické směsi, 100 % chemické účinnosti spalování a dalších idealizací, které byly použity při určení středního efektivního tlaku. Mechanické ztráty také nebyly brány v úvahu. Reálná hodnota výkonu takového motoru při 5000 otáčkách za minutu tak bude snížena o tyto vlivy a lze ji určit pouze fyzickým experimentálním testem na motorové brzdě. Pokud by byl znám i střední indikovaný tlak, bylo by možné vypočítat mechanickou práci, indikovaný výkon a při porovnání s vypočtenou hodnotou výkonu efektivního určit efektivní účinnost.

## 9 Úpravy zážehového spalovacího motoru pro provoz na vodík

V kapitole 4.1 bylo popsáno chování vodíku ve spalovacím motoru a důsledky jeho vlastností na proces spalování i na komponenty motoru. Některé z nich bude nutné změnit či upravit tak, aby byly schopny spolehlivě dlouhodobě fungovat po zamýšlené výměně paliva.

Jednou ze základních úprav motoru jako celku je nutnost posílit chladicí okruh. Důvodem jsou vyšší teploty hoření vodíku, a tedy nutnost odvádět větší množství tepla, aby nedošlo k přehřátí komponent v přímém kontaktu se spalovacím prostorem. Dále také prevence před vznikem horkých míst, které by mohly způsobit nežádoucí zapálení směsi paliva se vzduchem a v nejhorším případě i zpětné zášlehy do sacího potrubí. V rámci této prevence byla zvolena technologie přímého stratifikovaného vstřikování paliva, která je z hledu bezpečnosti proti flashbackům výrazně vhodnější než nepřímé vstřikování. Dalšího snížení rizika nežádoucích zápalů lze dosáhnout snížením spalovací teploty pomocí recirkulace spalin, kdy je část výfukových plynů přes tzv. EGR ventil přivedena do sání, a tím zpět do spalovacího prostoru. Tyto plyny se již nemohou podílet na spalování, a tak se snižuje jeho teplota. Tento efekt je výhodný i z pohledu konstrukce, kdy dojde ke snížení tepelného namáhání komponent motoru a též ke snížení produkce emisí NO<sub>x</sub> při stechiometrickém poměru směsi, jelikož oxidy dusíku vznikají zejména za vysokých spalovacích teplot.

Zvýšení kompresního poměru na 14:1 nepředstavuje z technického hlediska téměř žádný problém. Již v minulosti byly konstruovány vznětové motory dokonce s vyššími kompresními poměry. Ve spojitosti s touto změnou je nutné zpevnit části klikového mechanismu, jelikož naroste jak kompresní, tak expanzní tlak. Ten bude mít také díky vyšší rychlosti hoření vodíku strmější náběh a lze předpokládat, že motor bude mít tvrdší chod. Stále se však jedná o nižší tlaky, než jaké vznikají při spalování motorové nafty. Do klikového mechanismu může díky vyšší difuzivitě vodíku pronikat větší množství plynů. Je tedy důležité, aby byl dostatečně dimenzován odvodušňovací ventil a další komponenty odvětrávání klikové skříně. Celkově se pevnostní nároky na komponenty vodíkového motoru nachází na pomezí mezi benzínovou a dieselovou alternativou.

Návrhy specifických úprav jednotlivých komponent včetně volby materiálů jsou popsány v následujících podkapitolách. Ostatní komponenty spalovacího motoru nepotřebují žádné dodatečné úpravy.

### 9.1 Píst

Píst tvoří pohyblivou stěnu uzavírající spalovací prostor ve válci. Zachycuje tlak plynů, který vzniká při spalování a přenáší vzniklou sílu přes pístní čep na ojnici. Dno pístu je jedno z nejvíce exponovaných míst v motoru. Působí na něj kromě tlaku spalin i jejich vysoká teplota. Píst musí být schopen přijaté teplo předat dál do stěn válce nebo chladicímu oleji. Velmi vhodnými a nejčastěji používanými materiály pro výrobu pístů jsou slitiny hliníku. Jejich výhodou je zejména nízká hustota. U pístu se vyžaduje co nejnižší hmotnost, jelikož se jedná o pohyblivý díl a počítá se do setrvačných hmot. Další vhodnou vlastností je dobrá tepelná vodivost, která umožňuje rychlý odvod tepla. [6, 7, 8]

Pro vodíkový motor se kvůli vyšším teplotám spalování jeví jako vhodné použít slitiny AlSi18CuNi nebo AlSi25CuNi, které se používají při vyšším tepelném namáhání pístu. Podle výzkumu [29] působí proti vodíkové křehkosti jako výborná bariéra povlak niklu nebo některé druhy nitridových povlaků jako TiN či TiAlN. Niklové povlaky byly v automobilové technice používány již v minulém století a vodík má v niklu velmi nízký difuzní koeficient. Nitridy titanu jsou dobře známy v technologii obrábění, kde se využívají ke snížení opotřebení nástrojů a prodloužení jejich životnosti. Maximální pracovní teplota až 800 °C je možná v případě použití TiAlN, jehož vrstva je nejúčinnějším blokátorem difuze vodíku.

Nutností pro píst v navrhovaném motoru je dostatečné nastříkování chladícího oleje zespodu na vnitřní stranu dna pístu pro co nejvyšší odvod tepla z tohoto místa, které je vystavené velmi vysokým teplotám při spalování vodíku.

## 9.2 Pístní kroužky

Těsnící pístní kroužky již názvem napovídají svůj účel, kterým je primárně utěsnit píst ve válci, a tím společně s ním oddělit spalovací prostor od prostoru klikové skříně. Zároveň realizují odvod tepla z pístu do stěny válce. Stírací pístní kroužky stírají přebytečný olej ze stěny válce, avšak ponechávají nezbytný tenký olejový film zajišťující kluzné vlastnosti. [6, 7, 8]

Při spalování vodíku vznikají vyšší tlaky než při spalování benzínu, a tak je kladen vyšší nárok i na těsnící kroužky. V krajním případě by bylo nutné opět podobně jako u vznětových motorů zvýšit jejich počet. Požadavek na vyšší těsnost není vyvolán pouze tlakem spalin, ale i snahou co nejvíce zabránit pronikání malých atomů vodíku a vodních par do klikové skříně.

Typickým materiálem pro pístní kroužky je litina. Používá se buď šedá, či tvárná a v případě většího namáhání kroužků i s globulárním grafitem. Litina sama o sobě není díky vysokému obsahu uhlíku tak náchylná k vodíkové křehkosti. Tento proces v ní sice probíhá pomaleji a nemá tak velký vliv na mechanické vlastnosti materiálu, ovšem k jejich částečné degradaci stále dochází. [28] Proto je i zde nutné základní materiál opatřit ochranným povlakem, na který je kladen další zásadní požadavek, a to dobré kluzné vlastnosti pro snížení ztrát třením při pohybu pístu ve válci. Oběma těmito nárokům vyhovuje tenká cínová vrstva, která má nejen výborné kluzné vlastnosti a usnadňuje záběh, ale je také velmi efektivní jako bariéra proti difuzi vodíku.

## 9.3 Válec

Válec vytváří ohraničující stěnu spalovacího prostoru, zároveň odvádí teplo a předává jej chladicímu médiu a slouží zejména k vedení pístu. Z toho vyplývají požadavky kladené na jeho materiál. Jsou jimi dobrá tepelná vodivost a odolnost, dobré kluzné vlastnosti a otěruvzdornost, tvarová stálost spojená s malou tepelnou roztažností a dostatečná pevnost. [6, 7, 8]

Spalování vodíku k tomu přidává ještě vyšší nároky spojené s tepelným a tlakovým namáháním a potřebu odolnosti proti vodíkovému křehnutí. Těmto nárokům nejlépe vyhovují dvě řešení. Prvním z nich je odlití celého bloku motoru včetně válců v jednom kuse z hliníkové slitiny. Poté následuje obrobení válcových otvorů, nanesení niklové povrchové vrstvy metodou Nikasil a dokončovací operace honováním. Druhé řešení je použití litinových válcových vložek s ochrannou kluznou vrstvou niklu nebo nitridu titanu na vnitřním průměru. Vložky válců se konstrukčně řeší jako suché nebo mokré podle toho, jestli jsou v přímém kontaktu s chladicí kapalinou. Pro vyšší nárok na rychlý odvod tepla je vhodnější varianta mokré vložky, kterou se dosahuje účinnějšího chlazení. Tudíž je blok vodíkového motoru vhodné řešit variantou mokrých vložek. V obou případech je využito výhod niklové vrstvy jako blokátoru proti nežádoucím účinkům vodíku a zároveň jako odolné kluzné plochy. V metodě Nikasil jsou v niklu přítomny krystaly karbidu křemíku, které ještě zvyšují odolnost proti otěru.

## 9.4 Hlava válců

Hlava válců uzavírá spalovací prostor shora. Tvoří buď celý kompresní prostor, nebo jeho větší část, a tudíž definuje jeho tvar a velikost. Jako nejvhodnější tvar kompresního prostoru se ukázal kulový, kde má plamen od centrálně umístěné svíčky nejkratší dráhu, což má pozitivní vliv na účinnost spalování. Tento tvar se často upravuje do střechovitého prostoru, kvůli usazení ventilů, kdy není možné dodržet přesný tvar polokoule. Pro spalování je též výhodné konstrukci hlavy upravit tak, aby vznikla antidetonační štěrbina. Takto se nazývá úzký prostor, který vzniká mezi nejnižší plochou hlavy válce a pístem v horní úvratí. Právě pohybem pístu směrem vzhůru k horní úvratí se z tohoto prostoru vytlačuje směs paliva se vzduchem, a způsobuje tak víření ve spalovacím prostoru spojené s lepším promícháním směsi a jejím rychlejším spálením.

Stejně jako předchozí popsané komponenty je válcová hlava vystavena vysokým teplotám a zachycuje spalovací tlak, který vyvozuje i značné mechanické namáhání. Platí na ni tedy stejné základní požadavky, jako jsou malá tepelná roztažnost, naopak dobrá tepelná vodivost a odolnost vysokým teplotám, tuhost a tvarová stálost. Jako základní materiál se nabízí dvě alternativy – litina nebo hliníková slitina stejně jako pro blok motoru. Litina je sice pevnější a odolá i vyšším teplotám, díky čemuž se často využívá u vznětových motorů, ovšem její velkou nevýhodou je vysoká hustota. Hliníková slitina má podstatně nižší hmotnost a též lépe vede teplo. [6, 7, 8]

U hliníkové alternativy je proti škodlivému působení vodíku možné opět využít metodu Nikasil. Povrchová úprava niklovou vrstvou nebo vrstvou z TiN či TiAlN je možná u obou variant základního materiálu.

Odlišným specifickým hlavy válců jsou její další funkce nezbytné pro chod motoru. Patří mezi ně vytvoření prostoru pro průchod ventilů a vedení jejich pohybu včetně dosedací plochy, případné uložení vačkových hřídelů (pro uspořádání rozvodů OHC a DOHC), správné umístění a upevnění zapalovací svíčky a samozřejmě průchod pro přívod vzduchu (případně jeho směsi s palivem) a odvod spalin. V hlavě se tedy nachází ústí sacích a výfukových kanálů. Právě v nich je potřeba vytvořit dostatečně pevnou dosedací plochu pro sedla ventilů, která je odolná proti opotřebení a tvorbě okují. Z těchto důvodů se do hlavy válců lisují prstencová sedla z litiny nebo vysoce legovaných ocelí. [6, 7, 8]



Pro tento případ jsou velmi vhodné austenitické nerezové oceli, které mají vysokou odolnost proti vodíkové křehkosti [27, 28]. Nejvyšší odolnost vykazuje titanem stabilizovaná ocel s označením AISI 321 (ekvivalent 1.4541 = X6CrNiTi18-10). Při zkoumání materiálů vhodných na výrobu potrubí pro distribuci vodíku bylo zjištěno, že nikl má příznivý vliv na odolnost proti vodíkovému křehnutí nejen jako ochranná vrstva, ale i jako legující prvek v oceli. Do 1 % koncentrace výrazně snižuje energii vrstvení poruch, čímž brání vzniku trhlin způsobených difuzí vodíku a zachovává plasticitu materiálu [30]. Pro případ litiny i niklem legované oceli se přímo nabízí využití povlaku TiAlN, který spojuje výhody jak odolnosti proti opotřebení a vysoké tepelné odolnosti, tak účinné dodatečné bariéry proti difuznímu pronikání vodíku do materiálu.

## 9.5 Rozvod motoru a ventily

Úkolem rozvodu motoru je řízení výměny obsahu válců, tedy okamžiky otevření a uzavření sacího a výfukového kanálu pomocí ventilů. V dnešní době je již standardem použití čtyřventilového rozvodu, tedy dvou větších sacích a dvou menších výfukových ventilů na jeden válec. Uspořádání rozvodu je nejčastěji DOHC (Double Over Head Camshaft), kdy jsou přímo v hlavě válce uloženy dvě vačkové hřídele, jedna pro ventily sací a druhá pro výfukové. Vyším standardem je hydraulicky nastavované proměnné časování ventilů v závislosti na otáčkách motoru. [6, 7, 8]

Tělesa ventilů jsou značně namáhanými díly motoru. Dřík ventilu je střídavě v počtu tisíců cyklů za minutu zatěžován tahem a tlakem, což klade nároky na pevnost materiálu a zároveň jsou požadovány dobré kluzné vlastnosti povrchu a jeho odolnost proti opotřebení kvůli kontaktu s vedením v hlavě válce. Talíř ventilu je namáhán na ohyb a je od něj z důvodu dosedání do sedla ventilu též požadována odolnost proti opotřebení a tvorbě okují. Navíc na něj přímo působí tlak a teplota spalin v pracovním prostoru válce, je tedy nutná jeho dostatečná žáruvzdornost a odolnost proti chemické korozi. Na celé těleso ventilu je kladen požadavek na dobrou tepelnou vodivost. Sací ventily jsou chlazeny proudem studeného nasávaného vzduchu. Jejich teplotní exponovanost je tedy nižší a některé z těchto požadavků nejsou tak vysoké. Naopak přes výfukové ventily proudí ven ze spalovacího prostoru horké výfukové plyny, tudíž jsou za provozu daleko více ohřívány. Pro rychlejší odvod tepla do vrchní části tělesa ventilu, která je chlazená v hlavě válce, se výfukové ventily konstruují jako duté. Dutina sahající z talířku až do horní části dříku je ze 60 % naplněna sodíkem, který má teplotu tání 97 °C a velmi dobrou tepelnou vodivost, kterou po zkapalnění při smýkání v dutině způsobeném pohybem ventilu využívá k rychlejšímu předávání tepla mezi spodní a horní částí ventilu. [6, 7, 8]

Stejně jako pro sedla ventilů v hlavě válce, tak i na výrobu těles samotných ventilů je velmi vhodná ocel 1.4541. Kromě výše popsaných vlastností disponuje i žáruvzdorností až do 850 °C a zároveň si udržuje houževnatost i při teplotách pod bodem mrazu [30], což je výhodné pro studené starty motoru v zimním období. U benzínových motorů se nejvíce exponované části ventilů tepelně zpracovávají, nebo se na ně nanáší vrstva slinutého karbidu pro snížení opotřebení. [7] V případě vodíkového motoru je ideálním ochranným povlakem tepelně velmi odolná vrstva TiAlN, která nejen zajistí tyto vlastnosti, ale vytvoří i ochranu proti vodíkovému prostředí.

## 9.6 Zapalovací svíčka

Hlavním účelem zapalovací svíčky je ve správný čas zažehnout směs paliva se vzduchem, a zahájit tak její hoření. Správné nastavení okamžiku zážehu (předstih) je zásadní pro správné spalování a co nejúčinnější využití energie paliva. Svíčka musí být dostatečně utěsněna, aby kolem ní při expanzním tlaku neunikaly spaliny z pracovního prostoru válce. Zároveň její část, která je umístěna v kompresním prostoru, musí odolávat vysokým teplotám a chemickým vlivům paliva a spalin. [6, 7, 8]

Jelikož se elektrody běžných svíček vyrábějí z niklových slitin [7], není pro potřeby vodíkového motoru nutné volit jiný materiál. Nikl je sám o sobě odolný vůči negativním účinkům vodíku. Jedinou možnou změnou tak zůstává aplikace dvou svíček místo jedné pro motory pracující s velmi chudou směsí vodíku se vzduchem. Při stechiometrické koncentraci vodíku ve směsi je potřebná iniciační energie velmi malá, dokonce o řád nižší než u směsi benzínu se vzduchem. S narůstajícím přebytkem vzduchu však potřebná iniciační energie strmě stoupá a jedna svíčka by již nemusela být dostačující pro spolehlivé zažehnutí.

## 9.7 Výfuková soustava

Základní činností výfukové soustavy je bezpečný odvod výfukových plynů z motoru k zadní straně vozidla bez jejich úniku do kabiny vozidla. Současně s tím dochází k tlumení hluku vznikajícího rázovým odvodem spalin ze spalovacího prostoru. Při otevření výfukového ventilu jsou horké plyny ve válci stále pod tlakem a bez tlumiče hluku by docházelo k hlasitým třesknutím. Dalším neméně důležitým úkolem je úprava výfukových plynů, aby do okolního ovzduší odcházelo co nejmenší množství škodlivin, které je dané legislativou. To vše by mělo probíhat s co nejmenším omezením proudění výfukových plynů, které by způsobilo snížení výkonu motoru. [6, 7, 8]

Rozdíl konstrukce výfukového potrubí pro motor spalující vodík je zejména v úpravě spalin. V kapitole 5.3 jsou popsány emise vznikající při spalování vodíku a principy jejich vzniku. Je patrné, že oproti spalinám z fosilních paliv, výfukové plyny z vodíkového motoru neobsahují žádné oxidy uhlíku. Katalyzátor integrovaný do výfukového potrubí tedy není nutné konstruovat jako třícestný, ale pouze jako dvoucestný. V jedné z jeho částí dochází k redukci NO<sub>x</sub> na dusík, přičemž se uvolňuje kyslík a ve druhé k oxidaci HC na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O, přičemž se kyslík naopak spotřebovává. Pro další snížení koncentrace oxidů dusíku, které jsou produkovány při stechiometrickém poměru směsi vodíku se vzduchem je vhodné zařadit technologii SCR (Selective Catalytic Reduction).

Tento systém následného zpracování výfukových plynů funguje na principu vstřikování směsi močoviny a destilované vody (obchodní název AdBlue) do výfukového potrubí, kde chemickou reakcí s oxidy dusíku vytváří čpavek, který je dále v samostatném katalyzátoru rozložen na dusík a vodu. Systém SCR je dnes již dobře znám z dieselových motorů, kde je využíván za účelem splnění emisních norem již několik let. [39]

S těmito úpravami je možné provozovat vodíkový spalovací motor i v režimu stechiometrické směsi, a podstatně tak zvýšit jeho výkon. Tento fakt potvrdil i experimentálně upravený benzínový motor o zdvihovém objemu 2 litry, který byl postaven na Pekingské univerzitě. Použito bylo přímé vstřikování vodíku pod tlakem 14 MPa a motor byl přeplňován turbodmychadlem. Motor při testování dosáhl maximálního výkonu 120 kW při 4400 otáčkách za minutu. Díky přímému vstřikování a selektivní katalytické redukci ve výfukovém potrubí se podařilo udržet v celém provozním spektru emise NO<sub>x</sub> pod 20 ppm při teplotní účinnosti 42,1 % [32].

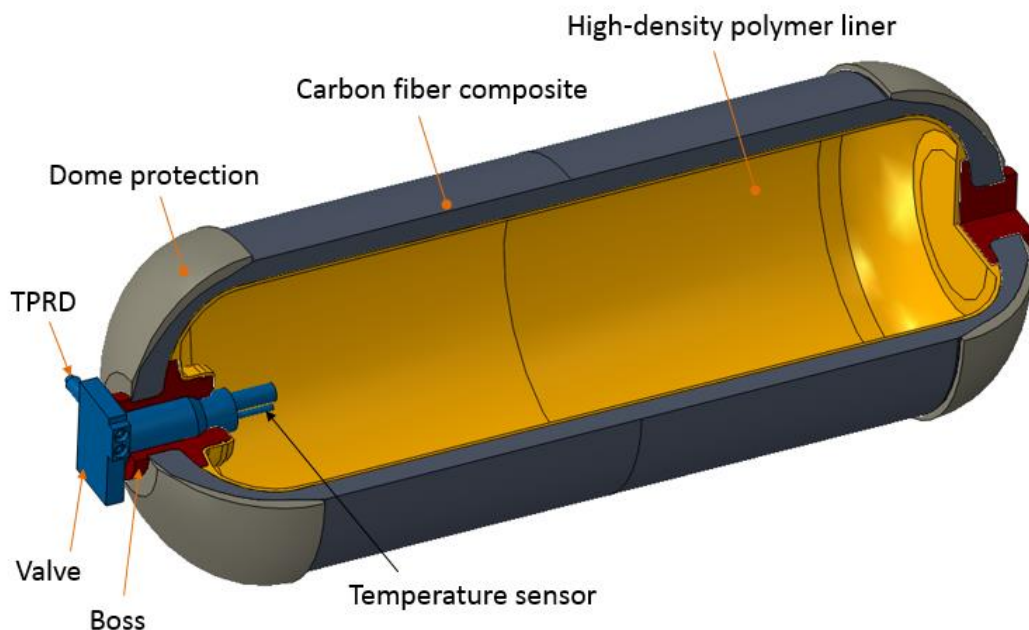
Jelikož do výfukového potrubí již neproudí vodík, ale pouze jeho spaliny, do jejichž výčtu kromě již zmíněných nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku spadá pouze vodní pára, není nutná záměna konstrukčních materiálů tohoto uzlu. Všechny tyto látky jsou totiž běžně obsaženy i ve výfukových plynech benzínového motoru.

## 9.8 Zásobník paliva a palivová soustava

Tato důležitá součást motorového příslušenství podléhá při úpravě motoru z benzínu na vodík bezesporu největším změnám. Celá benzínová palivová soustava včetně nádrže musí být odstraněna a nahrazena kompletně novým systémem. Proto je palivové soustavě v této práci věnována největší pozornost.

Technickým ideálem skladování vodíku ve vozidle by byl zásobník se svazky karbonových nanotrubic, které na sebe navazují vodík díky vysoké afinitě. Takový zásobník by byl nejlehčí a vyžadoval by nejméně zástavbového prostoru, ovšem tato technologie je zatím bohužel pouze ve fázi vývoje a experimentů. Proto bylo pro tuto přestavbu zvoleno uchování vodíku ve vysokotlaké nádrži.

Oproti kryogennímu zásobníku má výhodu v jednodušší konstrukci. Stlačený plyný vodík není nutno uchovávat při extrémně nízké teplotě 20,4 K, a nádoba tedy nevyžaduje ani tepelnou izolaci. Při uchování v kapalném stavu se vodík kvůli nedokonalosti izolace stále odpařuje a dochází k jeho ztrátám, jelikož je nutné ho z kryogenní nádrže odvádět, aby v ní nevzrostl tlak a poté ho katalytickou reakcí přeměnit na vodu, čímž dojde k jeho znehodnocení. Navíc se na zkapalnění vodíku spotřebuje zhruba o třetinu více energie než na jeho stlačení. Z provozních důvodů je tedy pro vozidla vhodnější variantou tlaková nádoba s vodíkem stlačeným na 70 MPa. Moderní technologie umožnily výrazné snížení hmotnosti samotných nádrží. Poslední generace již úplně postrádají kovové části nádob. Vnitřní plášť bývá vyroben z termoplastického polymeru a je ovinut karbonovým kompozitem, který přenáší většinu zatížení způsobeného vnitřním tlakem uchovávaného média. Tvar nádoby bývá nejčastěji válcový. Konstrukce uvažované nádrže je zobrazena v řezu na obrázku 18. [31, 37]



Obrázek 18 - Nádrž na uchování vodíku pod tlakem 70MPa z polymeru a karbonového kompozitu

Zatímco u předchozích komponent přibližovaly některé úpravy zážehový motor tomu vznětovému, palivová soustava se zde bude spíše podobat systémům ve vozidlech využívajících ke svému pohonu stlačený zemní plyn CNG. Pro tankování do nádrže je potřeba plnicí ventil s konektorem na připojení tankovací pistole a vysokotlaké potrubí vedoucí palivo do tlakové nádoby. Nádrž musí být vybavena pojistným ventilem, který řídí její plnění a odběr vodíku a chrání zásobník odpouštěním plynu, pokud dojde k překročení maximálního přípustného tlaku. Otevírání a zavírání přívodu plynu směrem k motoru zajišťuje elektromagnetický ventil, na který je připojena další část vysokotlakého potrubí. Tlak vodíku má hodnotu maximálního přípustného tlaku nádrže od vstupu do pojistného ventilu po celé cestě až po regulační ventil na konci vysokotlakého potrubí vedoucího od nádrže k motoru. Právě regulační ventil snižuje tlak paliva na hodnotu vstřikovacího tlaku, která je v řádu desetin až nižších desítek megapascalů v závislosti na typu vstřikování. Pro případ této práce byl zvolen vstřikovací tlak 20 MPa. V tomto stavu je již vodík přiveden ke vstřikovačům a je připravený na dávkování do válců.

Volba vstřikovacího systému je velmi zásadní pro chod motoru. Pokud je vodík mísen se vzduchem již v sacím potrubí, hrozí nebezpečí zpětných šlehnutí plamenů směrem zpět za sací ventil. Z bezpečnostních důvodů je tedy nutné vyřadit dávkování paliva karburátorem a centrální i vícebodové nepřímé vstřikování.

Rozvoj spalovacích motorů a tlak na snižování jejich emisí s moderními metodami elektronicky řízených vstřikovačů umožnily vývoj přímého vstřikování paliva u zážehových motorů. To disponuje řadou dalších výhod, jako je úspora paliva a jeho přesnější dávkování, jelikož nedochází k jeho ulpívání na stěnách sacích kanálů. Ve spojitosti s tím je snadnější i spouštění motoru za studena. Také dochází k lepšímu promíchání paliva se vzduchem. Přímé vstřikování umožňuje provoz motoru jak při stechiometrickém poměru, tak v režimu s vrstvenou chudou směsí a přepínání mezi nimi. Při jeho použití se zvyšuje množství recirkulovaných výfukových plynů, které je možné přivést zpět do válce, což dále zvyšuje odolnost proti detonaci. Tuto výhodu dokáže ještě umocnit přeplňování motoru pomocí turbodmyhadla nebo kompresoru. [9]

Navrhovaná koncepce rozdělení paliva pro přímé vstřikování vodíku vychází ze systému Common rail, jehož charakteristickou součástí je právě tlakový zásobník (rail). Ten je umístěn za regulačním ventilem a jsou k němu připojeny jednotlivé vstřikovače. Jeho úkolem je udržovat dostatek paliva pod konstantním tlakem pro vstřikování. Na rozdíl od railu pro kapalná paliva, tento nemusí kompenzovat tlakové pulsy, jelikož tlak paliva je zde plynule snižován regulačním ventilem, kdežto kapalná paliva jsou tlakována čerpadlem, které nemá konstantní výstupní tlak, a způsobuje tak tlakové rázy. Fluktuace tlaku způsobená otevíráním a zavíráním vstřikovacích ventilů je pak tlumena stlačitelností plynu v zásobníku.

Poslední a zároveň nejdůležitější součástí palivové soustavy jsou vstřikovače. Jejich funkce je naprosto klíčová pro správný chod motoru a množství emisí produkovaných při spalovacím procesu. Proto jsou následující kapitoly věnovány právě jejich návrhu.

## 10 Volba varianty ovládání vstřikovacího ventilu

Tato část práce se zabývá konstrukčním řešením vysokotlakého vstřikovače pro přímý vstřik vodíku do pracovního prostoru válce. Nejprve bylo třeba rozhodnout jakým principem bude vstřikovač ovládán. Pro zvolený systém vstřikování je nutné použít elektronicky řízené otevírání vstřikovacích ventilů.

U elektronického principu řízení je množství vstřikovaného paliva regulováno dobou otevření ventilu. Elektronická řídicí jednotka sbírá signál ze snímače na klikovém hřídeli, na základě kterého zná jeho otáčky a úhel natočení klikového hřídele. To jsou rozhodující parametry pro sekvenci vstřikování, které je řízeno vysláním signálu k jednotlivým vstřikovačům. Pohyb akčního členu ventilu je následně realizován dvěma možnými způsoby.

### 1. Elektromagneticky

Změna polohy řídicího ventilu vstřikovače a s tím spojené otevření trysky jsou realizovány přívodem proudu na cívku elektromagnetu. Ten vytvoří magnetické pole, které přitáhne kovovou kotvu a tím dojde k přestavění polohy ventilu.

### 2. Piezoelektricky

K pohybu aktuátoru dochází využitím principu inverzního piezoelektrického jevu, kdy je na piezoelektrické krystaly přivedeno napětí, a tím dojde k jejich deformaci v axiálním směru. Přes spojovací člen je tento pohyb následně převeden na pohyb šoupátka řídicího ventilu.

Piezoelektrický princip ovládání má tyto výhody:

- Čtyřnásobná rychlost otevření ventilu
- Přesnější dávkování paliva
- Možnost několikanásobného vstřiku s krátkými intervaly
- Menší potřebný zástavbový prostor
- Nižší hmotnost
- Nižší hlučnost

Elektromagnetický princip má následující výhody:

- Konstrukčně jednodušší
- Pohyb kotvy je ve stejném směru jako pohyb jehly ventilu
- Není potřeba mechanismu na převod zdvihu aktuátoru
- Nižší potřebný tlak ve zpětném vedení
- Delší životnost
- Nižší cena

[9]

Z výše uvedených výhod jednotlivých typů ovládání je zřejmé, že piezoelektrický vstřikovač je bezpochyby sofistikovanější, avšak též složitější a dražší. I při velkém množství vrstvených piezo elementů dosahuje aktuátor zdvihu pouze 0,04 mm [9], což je pro přestavení šoupátka řídicího ventilu nedostačující. Je tedy potřeba mezi zmíněné prvky zařadit ještě mechanismus, který svým převodem umožňuje zvětšit dráhu pohybu. Při použití kapalného paliva bývá tento mechanismus řešen jako hydraulický spojovací člen využívající jako médium samotné palivo ve zpětné větvi vstřikovacího ventilu. [9] Pokud je ovšem palivem stlačitelné médium jako vodík, nelze tento způsob převodu použít. Alternativou by byl pákový mechanismus. Ten by ovšem zvětšil zástavbový prostor vstřikovače, zvýšil mechanické ztráty, a mechanická vazba by při tak velkém počtu cyklů mohla vést k poruchám a dalšímu snížení životnosti vstřikovače.

Možnost vícenásobného vstřiku je výhodná, pokud je potřeba vstřik rozdělit do několika částí, jako je tomu u vznětových motorů. Pro přímé vstřikování u zážehového motoru je svou rychlostí dostačující elektromagnetický ventil, a to i při režimu chudé směsi, kdy je palivo vstřikováno v krátkém okamžiku před koncem kompresního zdvihu.

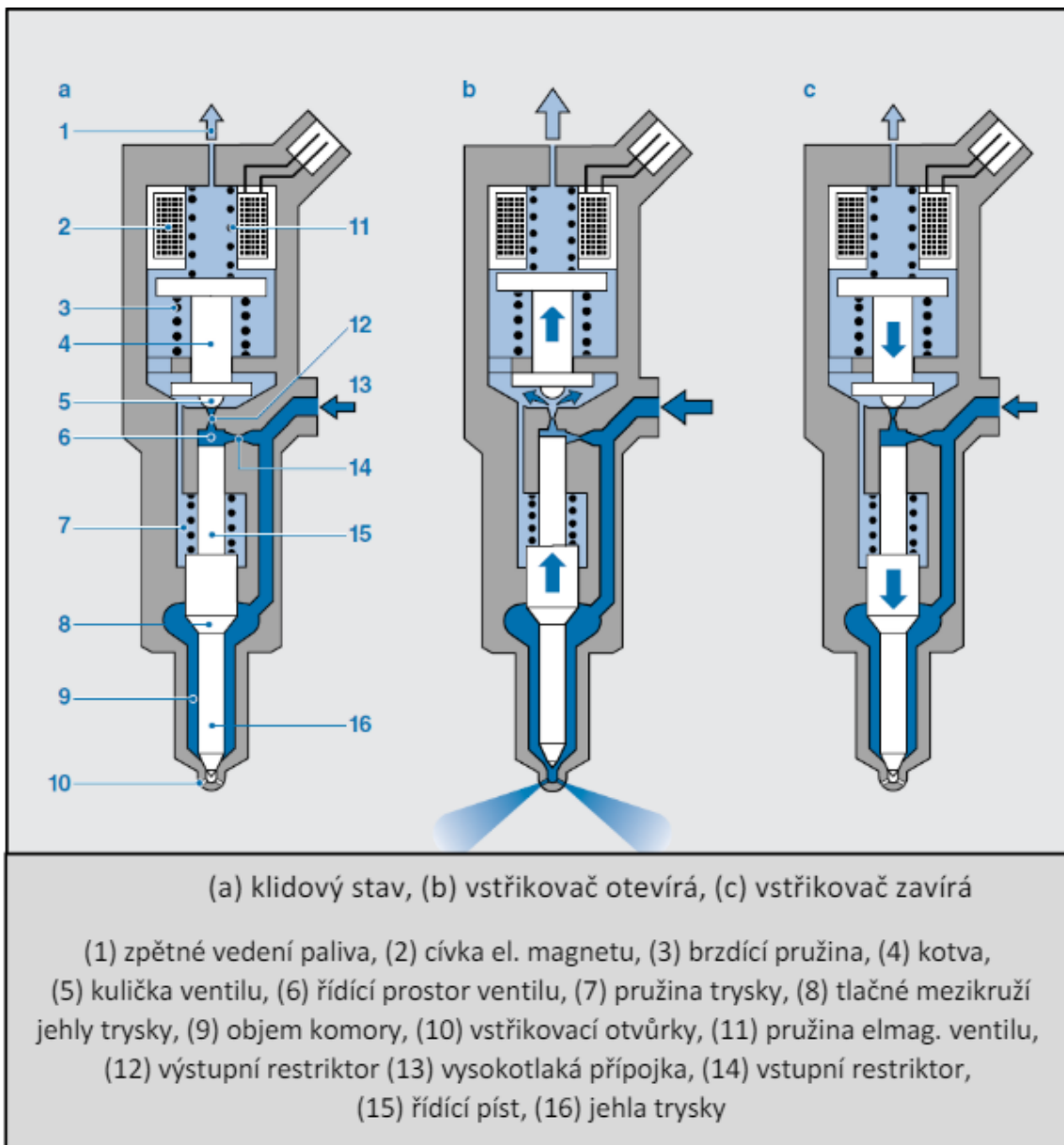
Z těchto důvodů a také kvůli nižší ceně bylo pro další postup vybráno elektromagnetické ovládání vstřikovače.

## 10.1 Princip funkce elektromagnetického vstřikovače

V klidovém stavu není na cívku elektromagnetu přiváděn žádný proud, vstřikovač tedy nemá žádnou spotřebu elektrické energie. Na kotvu nepůsobí žádná přitažlivá síla a pružina elektromagnetického ventilu přitlačuje kuličku řídicího ventilu do sedla. Řídicí ventil je uzavřen a síla od tlaku paliva na vrchní plochu řídicího pístu společně se silou pružiny trysky překonává sílu od tlaku paliva na tlačné mezikruží jehly trysky. Rozdíl těchto sil se rovná velikosti přitlačné síly jehly do sedla ventilu. Díky této síle je ventil držen v uzavřeném stavu a palivo, které je do vstřikovače z railu přiváděno vysokotlakou přípojkou, je zabráněno proudit do spalovacího prostoru. Tento stav je na obrázku 19 [9] zobrazen vlevo jako stav „a“.

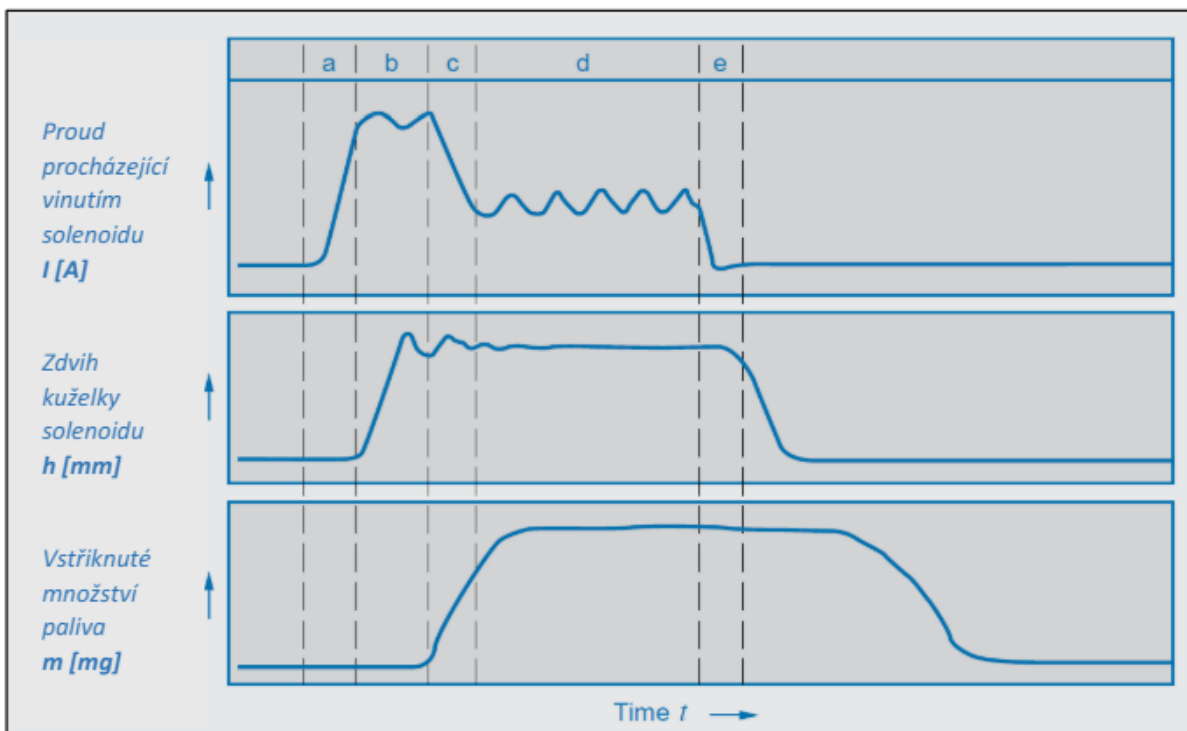
Stav „b“ znázorňuje okamžik, kdy řídicí jednotka vyšle signál, a tím otevře přívod proudu do cívky elektromagnetu. Vzniklá magnetická síla přemůže pružinu ventilu a kotva je přitahována směrem vzhůru k cívce. Tím dojde k odlenutí kuličky ze sedla a otevření řídicího ventilu. Palivo začne přes výstupní restriktor unikat z řídicího prostoru a díky omezenému přítoku vstupním restriktorem dojde k poklesu tlaku nad řídicím pístem. Síla na tlačném mezikruží se stává větší než součet sil působící proti ní, jehla vstřikovače se zdvihá, čímž otevírá trysku pro průchod paliva z objemu komory ke vstřikovacím otvorům, které rozprašují palivo do prostoru válce. Palivo, které projde výstupním restriktorem je odváděno zpětným vedením. Rozdíl škrtících průřezů v restriktorech určuje rychlost otevírání trysky.

Vpravo na obrázku 19 je znázorněn proces zavírání ventilu. Nejprve je uzavřen přívod proudu do elektromagnetu. Kotva již není přitahována magnetickou silou, pružina ventilu jí tlačí zpět dolů, až dojde k dosednutí kuličky do sedla, a tím k uzavření řídicího ventilu. Palivo již nemůže dále unikat přes výstupní restriktor a tlak v řídicím prostoru narůstá až do vyrovnání s tlakem na přívodu do vstřikovače. Tím se navrací původní silové poměry z klidového stavu a jehla trysky pohybem dolů uzavírá trysku vstřikovače. Poté se cyklus znovu opakuje.



Obrázek 19 - Schéma elektromagnetického vstřikovače a princip funkce

Z pohledu elektroniky je pro rychlé otevření vstřikovače potřebný velký proudový a napěťový impuls. Proud musí rapidně narůst na hodnotu okolo 20 A, čemuž pomůže zvednutí napětí pomocí kondenzátoru na cca 50 V. Po vyčerpání energie z kondenzátoru zůstává proud stejný, ale napětí klesá na hodnotu akumulátoru. Jakmile je kotva přitažena k elektromagnetu, je možné snížit jeho napájecí proud na zhruba poloviční hodnotu, která stačí k udržení kotvy v horní poloze a zároveň nedochází k nadměrnému zahřívání cívky. Pro zavření ventilu vstřikovače stačí pouze vypnout napájení elektromagnetu. V tu chvíli se stejně jako při poklesu proudu na udržovací hodnotu uvolní energie. Ta je akumulována do kondenzátoru zvyšujícího napětí při zahájení otevírání ventilu. Průběh proudu v cívce elektromagnetu a na něm závislé průběhy zdvihu jehly ventilu a vstřikovaného množství v závislosti na čase jsou vyobrazeny v diagramu na obrázku 20. [9]



Obrázek 20 - Průběh proudu v elektromagnetu, zdvíhu jehly a vstříkovaného množství [9]



## 11 Konstrukční návrh vstřikovacího ventilu

Tato část práce se zabývá konkrétním konstrukčním návrhem řešení elektromagnetického vstřikovače pro čtyřválcový motor s přímým vstřikováním vodíku o zdvihovém objemu dva litry. Navrhovaný vstřikovač bude napájen z tlakového zásobníku paliva neboli railu a elektrická energie bude k elektromagnetu přiváděna přes konektor se dvěma piny. Základním parametrem navrhovaného vstřikovače je vstřikovací tlak paliva, který má hodnotu 20 MPa.

### 11.1 Návrh trysky

Nejprve bylo potřeba navrhnout potřebný průřez trysky pro zajištění dopravy dostatečné dávky paliva do spalovacího prostoru. Maximální vstřikovaná dávka paliva byla určena pomocí měrné efektivní spotřeby paliva a efektivního výkonu. Výpočet měrné spotřeby paliva je uveden v rovnici 11.1.  $H_u$  značí výhřevnost paliva a  $\eta_e$  efektivní účinnost motoru. Ta byla odhadnuta na základě experimentů [28]. Efektivní výkon je určen v rovnici 11.2. V kapitole 8.1 byla vypočtena jeho teoretická hodnota, kterou bylo pro potřeby výpočtu množství paliva nutné snížit o vliv mechanické účinnosti  $\eta_{mech}$ . Její hodnota byla zvolena stejná jako pro klasický zážehový motor. Z těchto dvou vypočtených hodnot bylo následně v rovnici 11.3 určeno maximální vstřikované množství paliva na jednu dávku. Otáčky  $n$  byly uvažovány stejné jako u výpočtu teoretického efektivního výkonu, tedy 5000 za minutu a počet válců  $i_v$  je 4. Maximální doba vstřiku paliva byla spočtena v rovnici 11.4 z výše zmíněných otáček a úhlu vstřiku  $\phi_v$ , který byl při maximálním množství vstřikovaného paliva stanoven na 90°.

$$m_{pe} = \frac{3600}{H_u * \eta_e} = \frac{3600}{119 * 0,42} = 72,029g * kW^{-1} * h^{-1} \quad (11.1)$$

$$P_e = P_{eteor} * \eta_{mech} = 228,3 * 0,9 = 205,5kW \quad (11.2)$$

$$m_{vmax} = \frac{P_e * m_{pe}}{i_v * 60 * n} = \frac{205,5 * 72,029}{4 * 60 * 5000} = 0,01233g \quad (11.3)$$

$$\tau_{max} = \frac{\phi_v}{6 * n} = \frac{90}{6 * 5000} = 3 * 10^{-3}s \quad (11.4)$$

Z upravené rovnice ideálního plynu (11.4) byla určena hustota vodíku při 20 MPa a 20 °C potřebná pro následný výpočet rychlosti proudění plynu odvozeného ze Saint Venant-Wantzelovy rovnice (11.5). Jedná se o idealizovanou hodnotu výstřikové rychlosti z trysky. Ve výpočtu byla použita adiabatická konstanta  $\kappa$ , specifická plynová konstanta  $r$ , termodynamická teplota  $T$  a poměr kompresního tlaku  $p_k$  ku tlaku paliva  $p$ . Kompresní tlak vychází ze zvoleného kompresního poměru 14:1. Z aerodynamického hlediska však není v trysce možné dosáhnout vyšší rychlosti, než je rychlost zvuku pro daný plyn při daných podmínkách, jelikož by došlo k takzvanému aerodynamickému ucpání trysky. Výpočet této rychlosti pro vodík při podmínkách ve vstřikovači je popsán rovnicí 11.7. Ještě předtím bylo však nutné určit hodnotu hustoty vodíku  $\rho$  pro dané podmínky (rovnice 11.6). Pro její stanovení je potřeba znát hodnoty nejen teploty a tlaku, ale též molární plynové konstanty  $R$  a molární hmotnosti  $M$ .

$$\begin{aligned}
 w_{id} &= \sqrt{\frac{2 * \kappa}{\kappa - 1} * r * T * \left(1 - \left(\frac{p_k}{p}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)} \\
 &= \sqrt{\frac{2 * 1,41}{1,41 - 1} * 4116,07 * 293,15 * \left(1 - \left(\frac{1,4}{20}\right)^{\frac{1,41-1}{1,41}}\right)} \\
 &= 2114,02 \text{ m} * \text{s}^{-1}
 \end{aligned} \tag{11.5}$$

$$\rho = \frac{p * M}{R * T} = \frac{20 * 10^6 * 2,016 * 10^{-3}}{8,31 * 293,15} = 16,551 \text{ kg} * \text{m}^{-3} \tag{11.6}$$

$$c = \sqrt{\kappa * \frac{p}{\rho}} = \sqrt{1,41 * \frac{20 * 10^6}{16,551}} = 1305,306 \text{ m} * \text{s}^{-1} \tag{11.7}$$

Z výše uvedených výsledků je patrné, že idealizovaná výstupní rychlost je vyšší než rychlost zvuku ve vodíku za daných podmínek, skutečná rychlost v trysce  $w_s$  se tak rovná právě rychlosti zvuku. V tuto chvíli již byly stanoveny všechny potřebné parametry pro samotný výpočet průřezu otvoru trysky. Do kalkulace v rovnici 11.8 byl zahrnutý i průtokový koeficient zohledňující odpory proti proudění v trysce. Z plochy průřezu je poté snadné určit průměr hlavního otvoru trysky v místě dosedu jehly (rovnice 11.9) a následně tří otvorů vstupujících do spalovacího prostoru (rovnice 11.10).

$$S_t = \frac{m_{vmax}}{\rho * \tau_{max} * w_s * \mu_t} = \frac{0,01223 * 10^{-3}}{16,551 * 3 * 10^{-3} * 1305,306 * 0,6} = 3,145 * 10^{-7} \text{ m}^2 \tag{11.8}$$

$$d_t = \sqrt{\frac{4 * S_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,3145}{\pi}} = 0,6328 \text{ mm} \tag{11.9}$$

$$d_o = \sqrt{\frac{4 * S_t}{3 * \pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,3145}{3 * \pi}} = 0,3653 \text{ mm} \tag{11.10}$$

Další návrhový výpočet vychází z teorie silnostěnných tlakových nádob a byla pomocí něj určena minimální tloušťka stěny. Pro jednoduchost výpočtu byla tryska uvažována jako otevřená silnostěnná válcová nádoba o vnitřním poloměru největšího vývrtu v těle trysky. Pro redukované napětí v takové nádobě bez vnějšího přetlaku platí vztah v rovnici 11.11. Okrajové podmínky jsou uvedeny v rovnicích 11.12 a 11.13. Je zřejmé, že nejvyšší napětí se bude nacházet v působišti tlaku paliva  $p$ , tedy na poloměru  $r_1$ . Výpočet tečného napětí v tomto místě popisuje rovnice 11.14. Pro trysku byl zvolen materiál X6CrNiTi18-10 s mezí kluzu  $\sigma_k = 250 \text{ MPa}$  a bezpečnost  $k = 1,5$ . V rovnici 11.15 bylo z těchto dvou hodnot určeno dovolené napětí. Rovnice 11.16 obsahuje dosazení do pevnostní podmínky a určení vnějšího poloměru je po úpravě provedeno v rovnici 11.17. Výsledná tloušťka stěny byla spočtena v rovnici 11.18.

$$\sigma_{red} = \sigma_t - \sigma_r \quad (11.11)$$

$$\sigma_r(r_1) = -p_1 \quad (11.12)$$

$$\sigma_r(r_2) = 0 \quad (11.13)$$

$$\sigma_t(r_1) = D_1 + p_1 = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + p_1 \mid p_2 = 0 \quad (11.14)$$

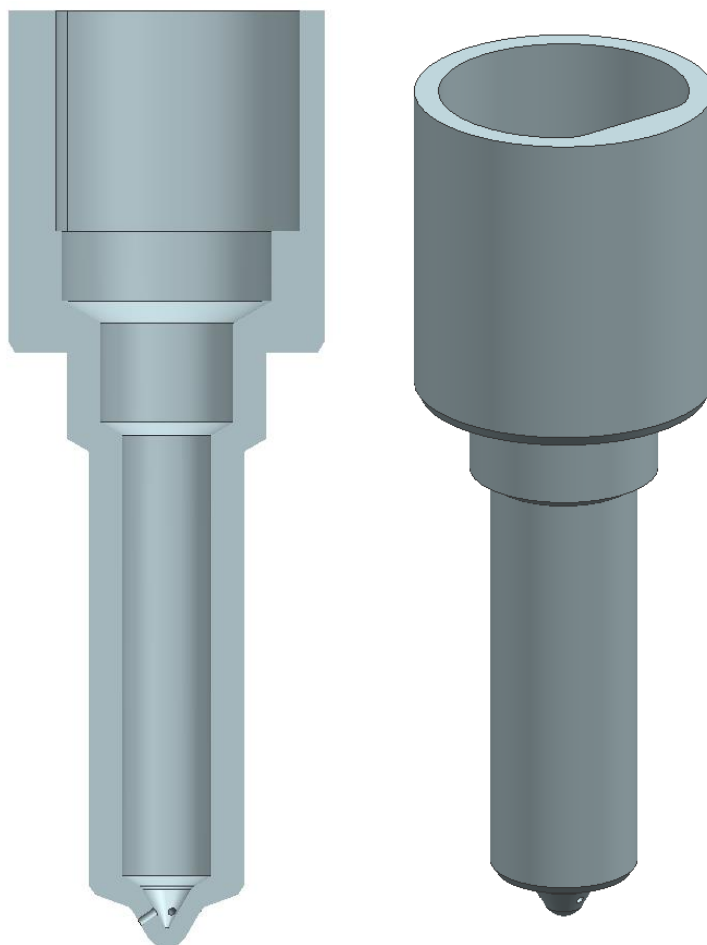
$$\sigma_D = \frac{\sigma_K}{k} = \frac{250}{1,5} = 166, \bar{6} MPa \quad (11.15)$$

$$\sigma_{red} = \frac{2 * p_1 * r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \leq \sigma_D \quad (11.16)$$

$$r_2 \geq \sqrt{\frac{\sigma_D * r_1^2}{\sigma_D - 2 * p_1}} = \sqrt{\frac{166, \bar{6} * 4,75^2}{166, \bar{6} - 2 * 20}} = 5,449 mm \quad (11.17)$$

$$t_{min} = r_2 - r_1 = 5,449 - 4,75 = 0,699 mm \quad (11.18)$$

Z výše vypočtených hodnot bylo následně možné postavit model trysky, který je zachycen v řezu vlevo na obrázku 21. Ve spodní části je velmi jemně obrobená a lapovaná kuželová plocha pro dosed trysky, jejíž průřez v hladině vrtaných otvorů odpovídá vypočtené hodnotě. Na vnitřní povrchy bude též nanesen povlak TiAlN, který zabrání difuzi vodíku do krystalografické mřížky austenitické oceli a v sedle jehly zajistí odolnost proti opotřebení. Samotné otvory, které jsou vyvrtané po obvodu po 120° mají průměr 0,4 mm, tedy lehce zvýšený oproti výpočtu. Důvodem je další možné zvýšení průtokových odporů rozdělením proudu do tří částí. Ve vrchní části trysky se nachází tvarový otvor pro jednoznačné umístění vložky vedení jehly. Tvar otvoru je vidět v trimetrickém pohledu na obrázku 21 vpravo.



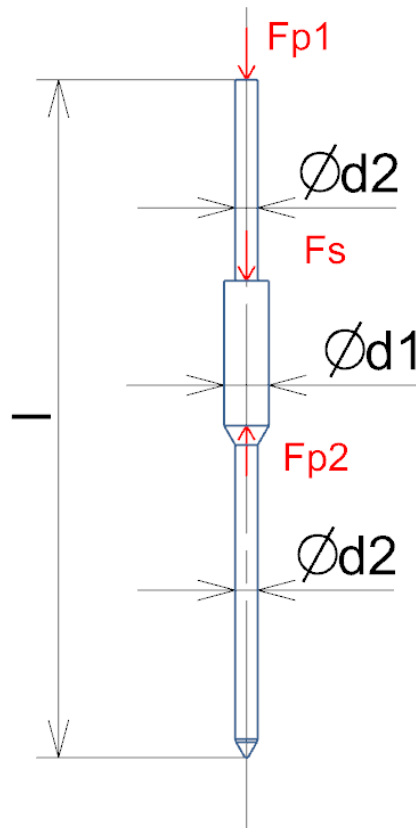
Obrázek 21 - Model trysky vstřikovače v řezu a v trimetrickém pohledu

## 11.2 Návrh jehly a pružin

Po modelu trysky následoval návrh jehly ventilu. Její špička byla navržena tak, aby přesně uzavírala sedlo obrobené do dna trysky. Povrch špičky jehly, který dosedá do dna trysky, bude také jemně obroben a po nanesení povlaku z TiAlN lapován pro dosažení těsnosti a správné funkce vstřikovače. Obrázek 22 znázorňuje navržený tvar jehly a jsou zde zakresleny i působící silové účinky. Síla  $F_{p2}$  je vyvozena tlakem média na plochu šikmého mezikruží. Sílu  $F_s$  vyvozuje pružina jehly, která má dosedací plochu v místě horního osazení. Síla  $F_{p1}$  je na jehlu přenesena z pístu řídicího ventilu, na který shora působí síla od tlaku paliva v řídicím ventilu. Zvolené rozměry jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 - Navržené rozměry jehly

Rozměr	Jednotky	Velikost
d1	mm	4
d2	mm	2
l	mm	60



Obrázek 22 - Navržený tvar jehly s působícími silami

Výpočet síly  $F_{p2}$  popisuje rovnice 11.19. Bylo zvoleno, že průměr pístu řídicího ventilu, na který působí tlak média, bude roven průměru  $d_2$  jehly. Síla  $F_{p1}$  byla vypočtena v rovnici 11.20.

$$F_{p2} = p * S_2 = p * \frac{\pi * (d_1 - d_2)^2}{4} = 20 * \frac{\pi * (4 - 2)^2}{4} = 62,832N \quad (11.19)$$

$$F_{p1} = p * S_1 = p * \frac{\pi * d_2^2}{4} = 20 * \frac{\pi * 2^2}{4} = 62,832N \quad (11.20)$$

Síly od tlaku plynného vodíku mají stejnou velikost a opačnou orientaci, jsou tedy v rovnováze. Síla přitlačující jehlu do sedla trysky v případě zavřeného řídicího ventilu je tedy rovna síle pružiny jehly. Následné výpočty popisují návrh pružiny o průměru  $D_s$  3 mm na sílu 10 N. Materiál byl zvolen C85E. Jedná se o ušlechtilou uhlíkovou ocel na tenké pružiny s dovoleným napětím v krutu  $\tau_{DK} = 300$  MPa. Modul pružnosti v krutu  $G$  má hodnotu 78,5 GPa a stoupání pružiny s bylo zvoleno 1 mm.

$$d_{steor} = \sqrt[3]{\frac{5 * F_{steor} * D_s}{2 * \tau_{DK}}} = \sqrt[3]{\frac{5 * 10 * 3}{2 * 300}} = 0,63mm \quad (11.21)$$

$$F_s = \frac{\pi * d_s^3 * \tau_{DK}}{8 * D_s} = \frac{\pi * 0,6^3 * 300}{8 * 3} = 8,482N \quad (11.22)$$

$$n = \frac{s * G * d_s^4}{8 * F * D_s^3} = \frac{1 * 7,85 * 10^4 * 0,6^4}{8 * 8,482 * 3^3} = 5,553 \quad (11.23)$$

V rovnici 11.21 byl proveden návrhový výpočet průměru drátu pružiny. Pro další výpočet byla zvolena hodnota  $d_s = 0,6$  mm. Rovnice 11.22 pak určila velikost skutečné síly pružiny a následně byl v rovnici 11.23 vypočten potřebný počet činných závitů. V rovnici 11.24 byla z rovnováhy sil ve svislém směru formulována podmínka pro zdvih jehly. Rovnice 11.25 popisuje redukovaný tlak média, na který musí poklesnout tlak v řídicím ventilu po jeho otevření, aby došlo ke zvednutí trysky a vstříknutí paliva.

$$F_{p2} > F_s + F_{p1} \rightarrow F_{p1} < F_{p2} - F_s \quad (11.24)$$

$$p_{red} < \frac{F_{p2} - F_s}{S_1} = \frac{F_{p2} - F_s}{\frac{\pi * d_2^2}{4}} = \frac{62,832 - 8,482}{\frac{\pi * 2^2}{4}} = 17,3MPa \quad (11.25)$$

V tuto chvíli byly známy všechny silové účinky na jehlu vstřikovače, a tak mohla být provedena výpočtová kontrola navržených rozměrů. Jelikož se jedná o dlouhou tenkou součást, kontrola proběhla pomocí výpočtu na vzpěr. Byla provedena idealizace, kdy jehla byla uvažována jako tyč kruhového průřezu o nejmenším průměru, tedy  $d_2$  o délce  $l$ . Kritická síla byla určena jako součet všech tří působících sil. Kritéria výpočtu jsou tak výrazně přísnější, než je tomu ve skutečnosti, jelikož je uprostřed jehly její tvar rozšířen a je zde navíc v kontaktu s vedením. Do výpočtu ovšem není zahrnut vliv tlaku média na napětí v jehle. Tato idealizace měla za cíl pokrýt i tento vliv a výsledky budou dále ověřeny pomocí MKP analýzy. Vzhledem k uložení se jedná o druhý typ vzpěru, tedy konstanta  $n = 1$ . Modul pružnosti v tahu pro ocel E je roven 210 GPa a mez úměrnosti  $\sigma_u$  materiálu X6CrNiTi18-10 je rovna 250 MPa.

$$\lambda_m = \sqrt{\frac{n \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_u}} = \sqrt{\frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{250}} = 91,05 \quad (11.26)$$

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{l}{\sqrt{\frac{J_{min}}{S}}} = \frac{l}{\sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot d_2^4}{64}}{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}}}} = \frac{4 \cdot l}{d_2} = \frac{4 \cdot 60}{2} = 120 > \lambda_m \rightarrow \text{Eulerova teorie} \quad (11.27)$$

$$F_{krit} = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{l^2} = \frac{1 \cdot \pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi \cdot 2^4}{64}}{60^2} = 452,175N \quad (11.28)$$

$$k = \frac{F_{krit}}{F} = \frac{F_{krit}}{F_s + F_{p1} + F_{p2}} = \frac{452,175}{8,482 + 62,832 + 62,832} = 3,371 \quad (11.29)$$

Nejprve byl určen mezní štíhlostní poměr (rovnice 11.26) a následně ten skutečný (rovnice 11.27). Skutečný poměr vyšel vyšší než mezní, tudíž výpočet kritické síly byl proveden podle Eulerovy teorie (rovnice 11.28). Finální určení bezpečnosti, která je vyšší než tři, a tedy plně dostačující, popisuje rovnice 11.29.

Podobně jako pružina jehly byla navržena i pružina ventilu. Síla, kterou musí překonat, je dána tlakem paliva ve výstupu z restriktoru na kuličku řídicího ventilu a je vypočtena v rovnici 11.30. Teoretická síla pro návrh pružiny byla následně ještě zdvojnásobena, aby pružina zajistila dostatečné přitlačení kuličky do sedla ventilu, a tedy jeho spolehlivé uzavření (rovnice 11.31). Materiálové charakteristiky jsou stejné jako u prvního výpočtu pružiny a stoupání bylo opět zvoleno 1 mm. Průměr  $D_s$  má hodnotu 2 mm.

$$F_k = p \cdot S_k = p \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} = 20 \cdot \frac{\pi \cdot 0,3^2}{4} = 1,414N \quad (11.30)$$

$$F_{steor} = F_k \cdot 2 = 1,414 \cdot 2 = 2,818N \quad (11.31)$$

$$d_{steor} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot F_{steor} \cdot D_s}{2 \cdot \tau_{DK}}} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 2,818 \cdot 2}{2 \cdot 300}} = 0,361mm \quad (11.32)$$

$$F_s = \frac{\pi \cdot d_s^3 \cdot \tau_{DK}}{8 \cdot D_s} = \frac{\pi \cdot 0,4^3 \cdot 300}{8 \cdot 2} = 3,77N \quad (11.33)$$

$$n = \frac{s \cdot G \cdot d_s^4}{8 \cdot F \cdot D_s^3} = \frac{1 \cdot 7,85 \cdot 10^4 \cdot 0,4^4}{8 \cdot 3,77 \cdot 2^3} = 8,329 \quad (11.34)$$

V rovnici 11.32 byl vypočten průměr drátu pro uvažovanou sílu. Skutečný průměr drátu použitý pro výpočet skutečné síly pružiny v rovnici 11.33 byl zvolen 0,4 mm. Rovnice 11.34 pak určila počet činných závitů pružiny.

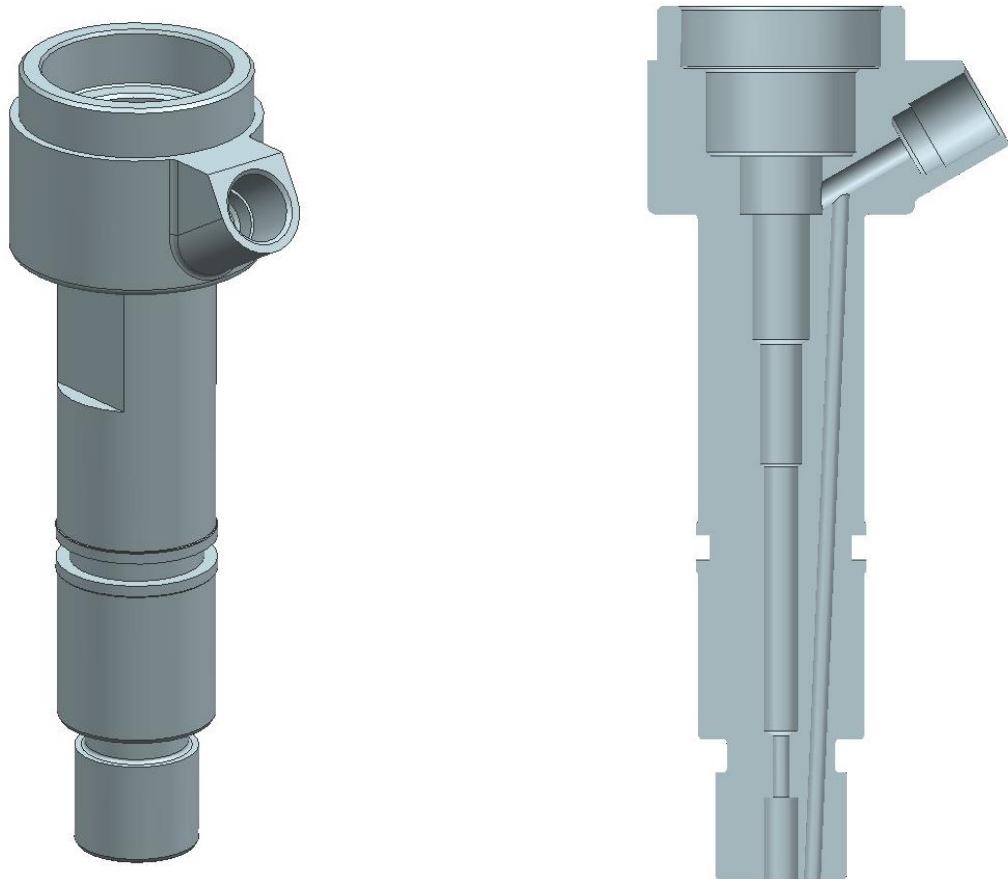
### 11.3 Návrh těla ventilu

Pro minimální tloušťku stěny těla ventilu byl proveden stejný výpočet jako u trysky (kapitola 11.1). Uvedeny jsou již pouze výsledné vztahy, v rovnici 11.35 pro vnější poloměr a 11.36 pro tloušťku stěny. Poloměr vrtání pro tlakové médium byl stanoven na 1 milimetr a materiál byl zvolen opět shodný X6CrNiTi18-10.

$$r_2 \geq \sqrt{\frac{\sigma_D * r_1^2}{\sigma_D - 2 * p_1}} = \sqrt{\frac{166,6 * 1^2}{166,6 - 2 * 20}} = 1,147mm \quad (11.35)$$

$$t_{min} = r_2 - r_1 = 1,147 - 1 = 0,147mm \quad (11.36)$$

3D model těla ventilu je na obrázku 23. Jedná se o velmi komplikovaný díl, který je takto koncipovaný jako odlitek s následným obrobením. Jediné neobrobené plochy jsou největší vnější průměr a obvod nálitku vstupního konektoru pro vedení paliva z railu. Pokud by nebylo možné použít technologii tlakového lití, existuje alternativa v podobě obrobení z kruhového polotovaru. V tomto případě by byl největší vnější průměr pro zjednodušení obráběcích operací navýšen tak, aby obsáhl i zde zobrazený náliček a dosedací plocha konektoru by byla obrobena šikmo dovnitř.



Obrázek 23 - 3D model těla ventilu v trimetrickém pohledu a v řezu



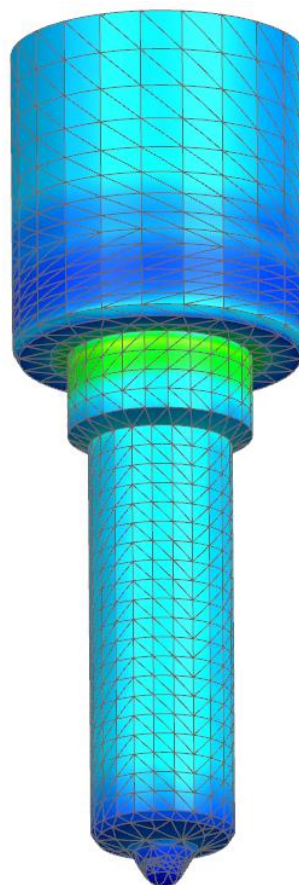
## 11.4 Kontrolní MKP analýza

Analýza metodou konečných prvků byla provedena v prostředí programu Siemens NX pomocí řešiče Simcenter Nastran pro lineární statiku. S její pomocí byly zkontrolovány nejvíce exponované součásti, pro jejichž návrh byl proveden analytický výpočet, tedy tryska, jehla a tělo ventilu. Vzhledem ke geometrii součástí byla vždy zvolena 3D tetraedrální síť s prvky typu CTETRA 10, které mají 10 uzlových bodů. Simulace byla provedena za účelem zjištění napětí v součásti a bezpečnosti proti mezi kluzu daného materiálu.

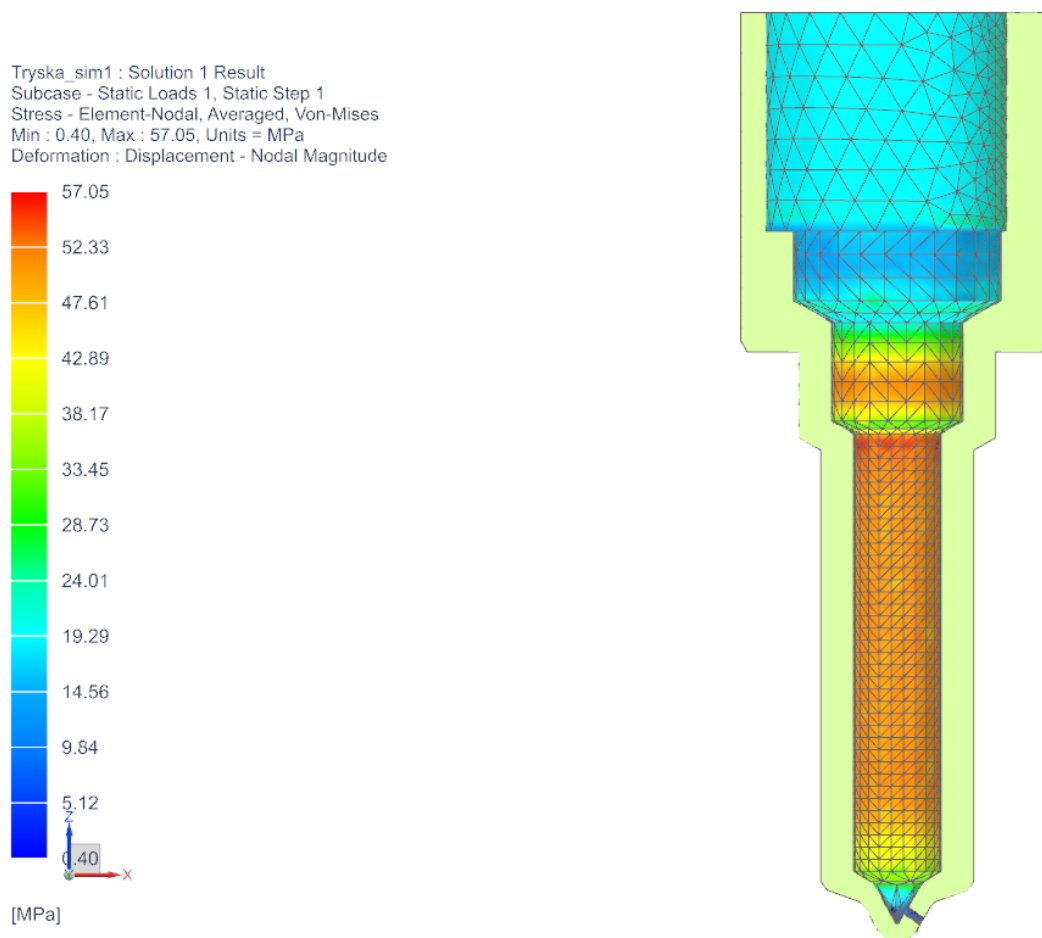
### 11.4.1 Tryska

Pro simulaci byl jako zatěžující účinek uvažován hydrostatický tlak vodíku o velikosti 20 MPa na vnitřní stěny trysky. Vazby byly navrženy tak, aby simulovaly účinek převlečné matice připevňující trysku k tělu ventilu. Velikost elementů byla zvolena 2,37 mm a bylo použito automatické síťování. Výsledky MKP analýzy trysky jsou na obrázcích 24 a 25. Nejvyšší napětí se podle předpokladu nachází na vnitřní stěně pláště a po zprůměrování má hodnotu 57,05 MPa. Bezpečnost vůči mezi kluzu je tedy 4,382 a tryska pevnostně vyhovuje danému zatížení. Odchyłka od analytického výpočtu je způsobená navýšením tloušťky stěn, které jsou navíc různé, oproti vypočtené minimální hodnotě. Další vliv na odchyłku má samozřejmě značná idealizace návrhového výpočtu.

Tryska\_sim1 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Static Step 1  
Stress - Element-Nodal, Averaged, Von-Mises  
Min : 0.40, Max : 57.05, Units = MPa  
Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



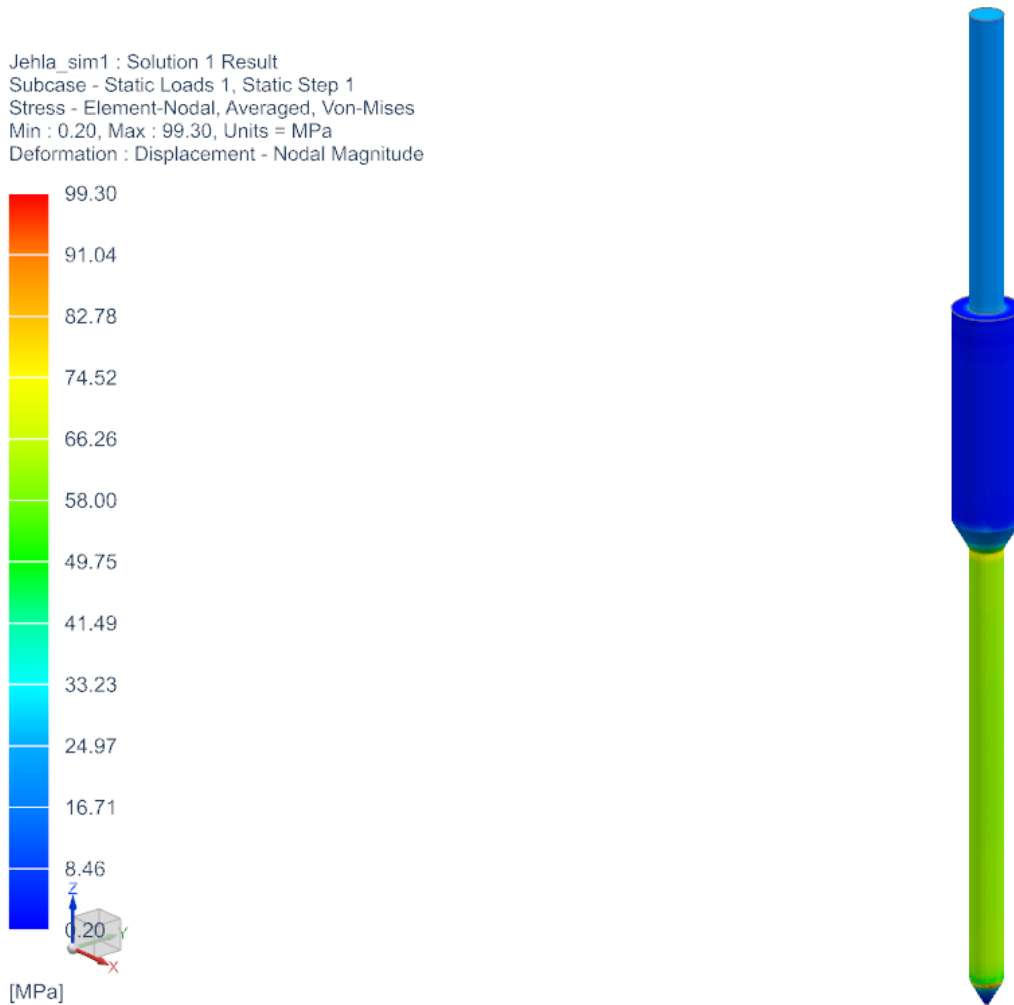
Obrázek 24 – Výsledky napětí z MKP analýzy trysky, trimetrický pohled



Obrázek 25 – Výsledky napětí z MKP analýzy trysky, osový řez

#### 11.4.2 Jehla

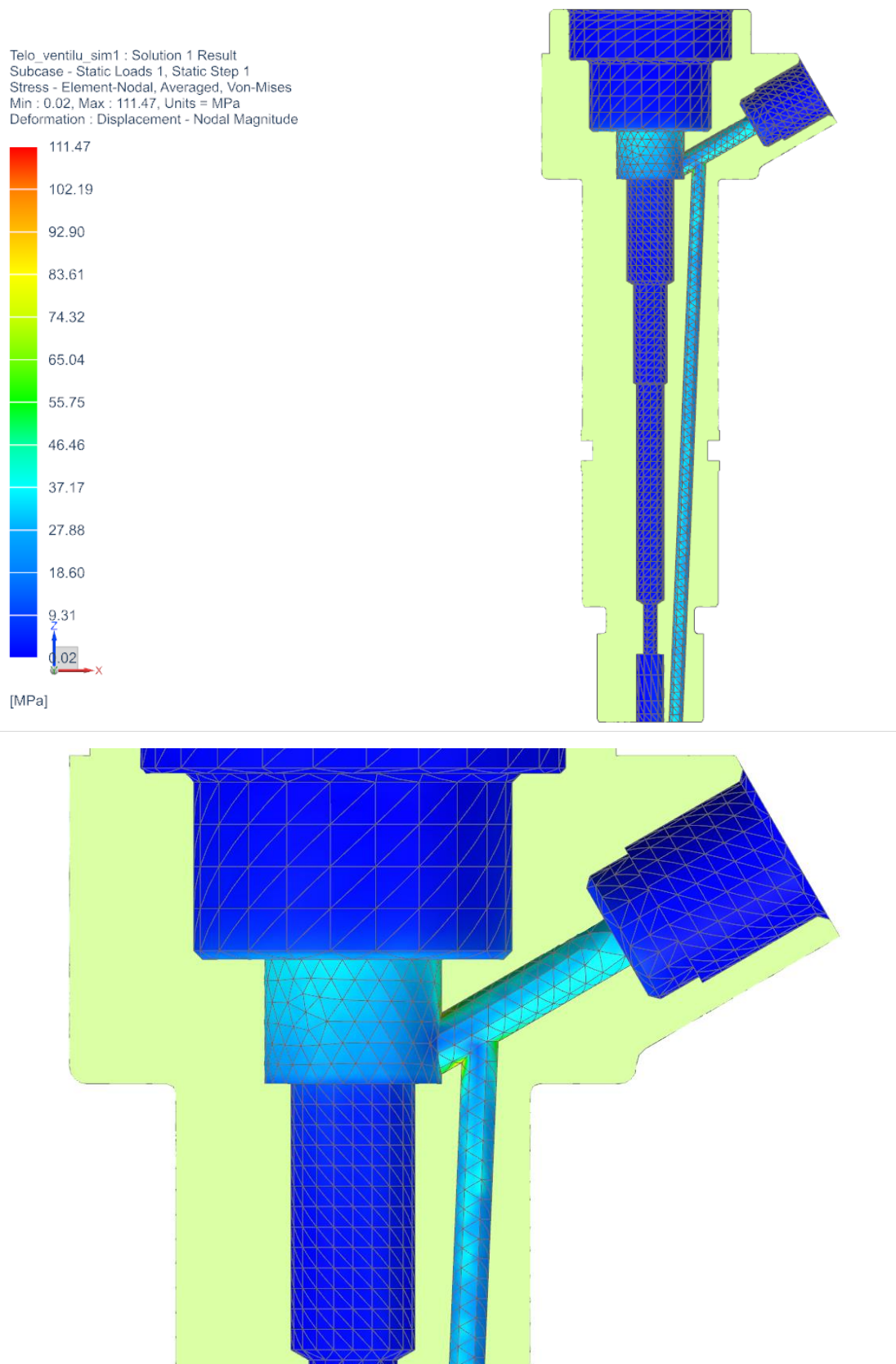
U jehly byla situace se okrajovými podmínkami výpočtu poněkud složitější. Kromě tlaku vodíku ve spodní části až po kuželové mezikruží zde působí síla od pružiny na kolmé osazení a síla od pístu řídicího ventilu na vrchní plochu. Vazby byly umístěny na plochu spodního dosedu jehly a dále na největším průměru jehly, který je v kontaktu s vedením. Velikost elementů pro automatické síťování byla nastavena na 2,15 mm. Výsledné napětí je znázorněno na obrázku 26. Nejvíce exponovaným místem je spodní část mezi vedením a dosedem jehly. Nejvyšší napětí dosahuje hodnoty 99,3 MPa a bezpečnost vůči mezi kluzu má hodnotu 2,518. Rozdíl výsledků s výpočtovou kontrolou je dán faktem, že v analytickém výpočtu nebyl uvažován tlak média, ale pouze napětí na vzpěr. I přesto navržené rozměry jehly podle výsledku simulace vyhovují s dostatečnou bezpečností.



Obrázek 26 - Výsledky napětí z MKP analýzy jehly

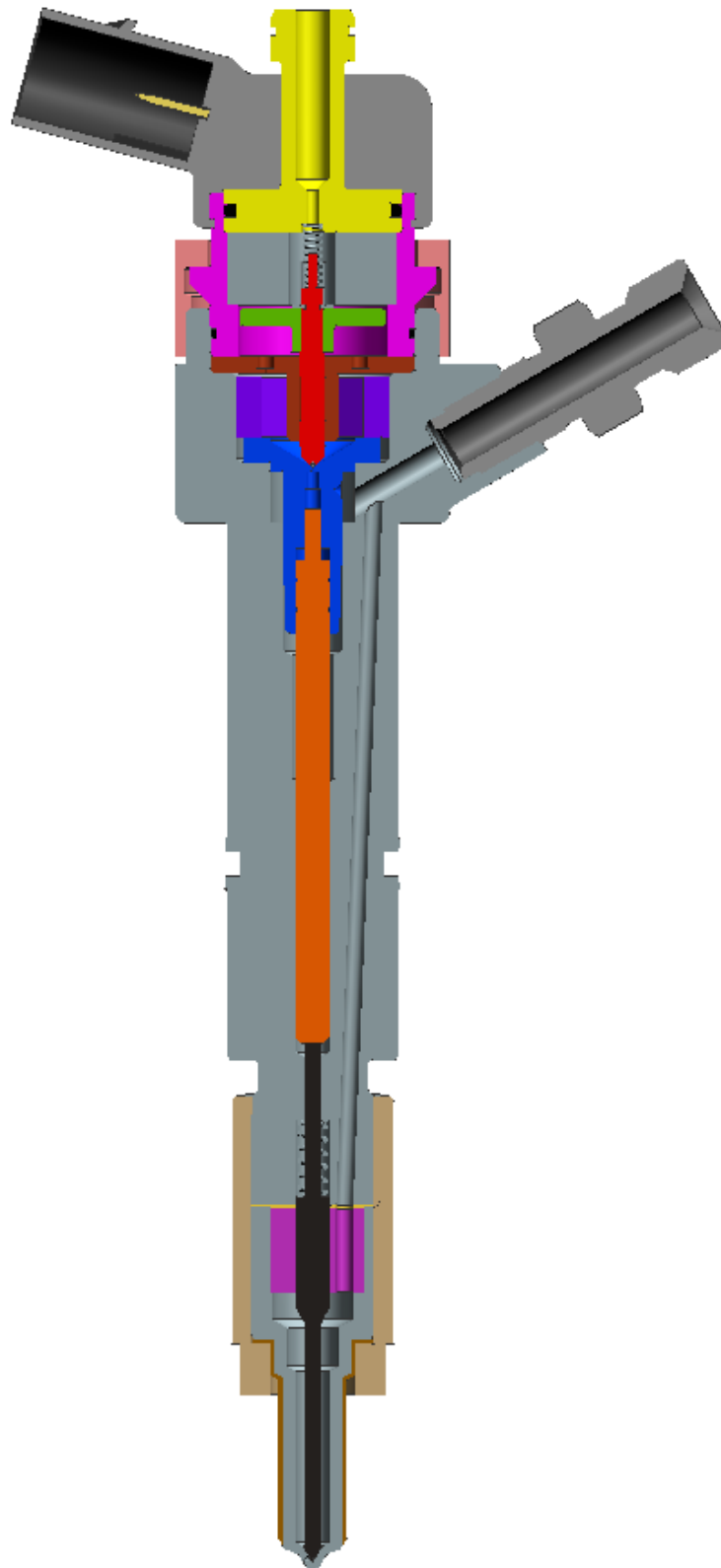
### 11.4.3 Tělo ventilu

Z pohledu nastavení simulace bylo tělo ventilu nejjednodušší, jelikož jediným uvažovaným zatížením byl tlak média proudícího z ústí konektoru dolů do trysky. Ostatní silové účinky jako síla pružiny jehly v její dosedací ploše byly vzhledem k jejich malé velikosti v poměru k velikosti rozměrů těla zanedbány. Vazba na vnějším obroběném povrchu tělesa představuje upevnění vstřikovače v hlavě válce. Velikost rozměrů se promítla i do nastavené velikosti 3D elementů, která činí 5,37 mm. Ve většině délky palivového kanálu se napětí pohybuje pod hranicí 50 MPa. V detailu ve spodní části obrázku 27 je patrné, že špičky napětí se nachází na ostrých hranách na spojnicích šikmo vrtaných otvorů. Nejvyšší napětí má hodnotu 111,47 MPa. Z technologických důvodů by bylo velmi složité tyto ostré hrany zaoblit nebo srazit. I v těchto místech koncentrátorů napětí je však bezpečnost vyšší než 2. Její nejnižší hodnota je přesněji 2,243, a tak lze konstatovat, že tělo ventilu pevnostně vyhovuje.



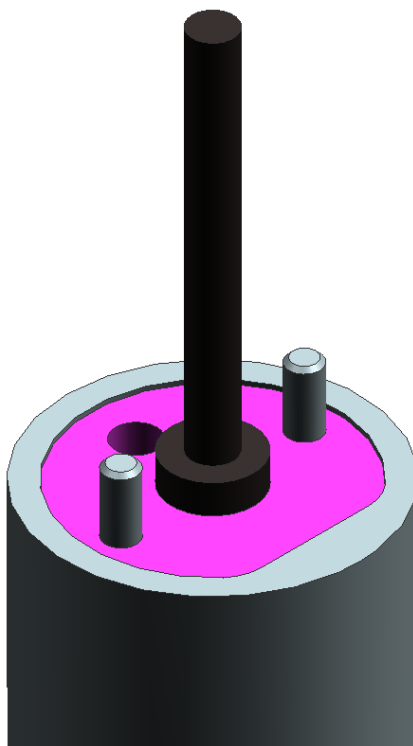
Obrázek 27 - Výsledky napětí z MKP analýzy těla ventilu

## 11.5 Návrh sestavy vstřikovače



Obrázek 28 - Sestava vstřikovače v řezu





Obrázek 30 - Tryska s vložkou vedení jehly, jehlou a stavěcími čepy

Tělem ventilu prochází šikmo vrtaný otvor pro vedení tlakového média, který ústí v kanálu od konektoru přívodu paliva. Spojení konektoru s tělem je provedeno pomocí závitů. Přívodní kanál pak ústí k řídicímu ventilu, který je vyobrazen modře. Palivo v řídicím ventilu tlačí na píst řídicího ventilu (v řezu oranžově), který vzniklou sílu přenáší na jehlu ventilu. Řídicí ventil je upevněn pomocí purpurové vložky, která má vnitřní otvor opatřen šestihranem a závit na jejím vnějším průměru je zašroubován do těla ventilu. Výstupní restriktor uzavírá keramická kulička, přitlačovaná do sedla osou kotvy, na kterou shora působí síla pružiny ventilu. Též je s ní pomocí pojistného třmenového kroužku spojena kotva elektromagnetu. Přes osu kotvy je částečně převlečen i rukáv pružiny zajišťující její dosed na osazení osy. Její vedení zajišťuje hnědý díl se čtyřmi otvory pro průchod odpadního paliva z řídicího ventilu. Ten je do těla ventilu přitlačován fialovým dílem nesoucím elektromagnet. Ve vnějším průměru zmíněného dílu se nachází drážka pro o-kroužek zabraňující úniku paliva po jeho vnějším obvodu. Nad elektromagnetem se nachází žlutě vyznačená součást sloužící jako vrchní dosed pro pružinu ventilu a zároveň jako odvod odpadního paliva. Na její vrchní části je konektor s drážkou pro těsnění a samotná součást je na středním průměru utěsněna opět o-kroužkem. Následně je zastříknuta plastem, který tvoří tělo elektrického konektoru. Celý tento komplet je k tělu ventilu připevněn pomocí matice, která má na obrázku růžovou barvu.

Kompletní sestava vstřikovače v trimetrickém pohledu je na obrázku 31. Pro vytvoření tohoto renderu bylo použito Advanced studio v prostředí programu Siemens NX. Konkrétní rozměry, specifikace a zvolené materiály součástí jsou uvedeny ve výkresové dokumentaci přiložené k této práci.



Obrázek 31 - Render sestavy vstřikovače



## 12 Závěr

Cílem této diplomové práce byl technický návrh pohonu vozidla, jehož palivem je vodík. V úvodní části byla provedena rešerše vlastností vodíku, způsobů jeho výroby, skladování a přístupů k vytvoření zásobovací infrastruktury. Byly popsány požadavky na technická zařízení dopravní infrastruktury a možnosti jejího rozvoje. Následně byly zkoumány jednotlivé způsoby využití vodíku k pohonu vozidel a specifika jeho využití jako paliva. Jedna z podkapitol byla věnována emisím vznikajícím při spalování vodíku. Zvážena byla i varianta nasazení HHO generátoru jako samostatného zdroje paliva, které by se z vody vyrábělo přímo ve vozidle, avšak tato varianta se ukázala jako technicky neproveditelná. V závěru této kapitoly bylo provedeno srovnání palivového článku a vodíkového spalovacího motoru v rámci jejich vhodnosti k pohonu vozidel a budoucnosti jejich využití v automobilovém průmyslu. Z tohoto srovnání vyšla lépe druhá varianta, a tak se práce nadále zabývala technickým návrhem úpravy zážehového pístového spalovacího motoru na vodík.

Nejprve byla zpracována rešerše vozidel, k jejichž pohonu byl takový motor již využit. Pro zadané parametry byl poté vypočten efektivní výkon motoru a také stechiometrický poměr směsi vodíku se vzduchem. Následně byly zkoumány rozdíly spalování vodíku a benzínu v prostoru válce, na jejichž základě byly navrženy možnosti potřebných úprav součástí motoru. Zejména při volbě materiálu byl brán zřetel na negativní účinky vodíku na kovové součásti. V rámci ochrany proti vodíkové křehkosti bylo nutné změnit povrchové úpravy tak, aby vytvářely účinnou bariéru proti vnikání vodíkových atomů do mřížky základního materiálu a nežádoucím dopadům této difuze. Implementací technologie SCR do výfukového potrubí a recirkulace spalin pomocí EGR ventilu byl umožněn provoz motoru i za stechiometrického poměru paliva a vzduchu téměř bez emisí. Motor v tomto režimu poskytuje výrazně vyšší výkon než při spalování chudých směsí.

Největším úpravám byla podrobena palivová soustava motoru. Byla zvolena varianta přímého vstřikování paliva. Doprava vodíku přímo do spalovacího prostoru je obzvláště výhodná z hlediska bezpečnosti proti samozápalům a zpětným šlehnutím do sacího potrubí. Společně s recirkulací spalin takřka eliminují šanci na vznik tohoto fatálního problému, který byl jednou ze základních překážek k rozmachu vývoje a výroby vodíkových spalovacích motorů. Bylo určeno, že vodík bude ve vozidle skladován v plynném stavu pod tlakem 70 MPa. Tlaková nádoba využívá již vyvinuté technologie použití polymerů a kompozitu jako základních materiálů, čímž se značně snižuje hmotnost vodíkové nádrže. Řešení rozvodu paliva pak vychází ze systému Common rail, kdy je palivo o vstřikovací tlaku 20 MPa udržováno v tlakovém zásobníku. Ve sledu součástí palivové soustavy jsou jako poslední členy řazeny vstřikovače. Jejich funkce je naprosto klíčová pro správný chod motoru a množství emisí produkovaných při spalovacím procesu. Konkrétní konstrukční návrh pak byl věnován právě vstřikovacímu ventilu pro přímé vstřikování paliva.

V poslední části bylo nejprve nutné rozhodnout, jakým způsobem bude ve vstřikovači ovládán pohyb jehly. Zejména pro svou spolehlivost a nižší cenu bylo zvoleno elektromagnetické ovládání. Dalším krokem bylo určení potřebného průřezu trysky pro dopravu dostatečného množství paliva do válce. Pro nejvíce namáhané součásti vstřikovače byly posléze provedeny analytické výpočty a navržené rozměry byly podrobeny kontrole pevnostní analýzou pomocí metody MKP. Kompletní sestava vstřikovače pak byla zpracována ve formě 3D CAD modelů. Posléze byl vytvořen výrobní výkres jehly a výkres sestavy vstřikovače.

Takto navržený vstřikovač je připraven k výrobě a montáži do motoru, kde by byla experimentálně otestována jeho správná funkčnost.

Upravený zážehový motor představuje do budoucna vynikající alternativu k elektrickému pohonu v rámci řešení klimatické krize, snižování produkce skleníkových plynů a jiných škodlivých emisí. Pro jeho nasazení do výroby je potřeba pouze malých změn v již zaběhlých výrobních závodech pro spalovací motory, a tak by přechod na jeho výrobu byl relativně snadný a rychlý. Jedinou překážkou je zatím omezená zásobovací infrastruktura a dosud nerozvinutá a často ne příliš ekologická výroba vodíku. Pokud by ovšem bylo investováno do výroby vodíku z obnovitelných zdrojů a úprav již stávajících zásobovacích řetězců, stalo by se z vodíku dostupné, efektivní, a hlavně velmi ekologické palivo pro pohon vozidel.

## Reference

### Knižní publikace:

- [1] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 80-239-1602-5.
- [2] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [3] RILEY, Q. Robert. *Alternative cars in the 21st Century*. Second edition. Warrendale: SAE International, 2004. ISBN 0-7680-0874-3.
- [4] VÁVRA, P. a kol., *Strojnické tabulky pro SPŠ strojnické*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1983.
- [5] KOŽOUŠEK, Josef., *Teorie spalovacích motorů*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1971.
- [6] KOŽOUŠEK, Josef., *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1983.
- [7] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [8] MACEK, Jan a SUK, Bohuslav. *Spalovací motory I*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02085-1.
- [9] LANDHÄUBER, Felix; HANÁK, Stanislav. *Systém vstřikování s tlakovým zásobníkem Common Rail pro vznětové motory*. 1. české vydání. Praha: Robert Bosch, 2005. 95 s. ISBN 80-903132-7-2.

### Internetové publikace:

- [10] Základní informace k vodíku a jeho výroba [online]. [cit. 2023-11-22]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [11] Global hydrogen production [online]. [cit. 2023-12-8]. Dostupné z: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- [12] BMW 750hL [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: [https://auta5p.eu/muzea/museum\\_autovision\\_2016/mav\\_58.php](https://auta5p.eu/muzea/museum_autovision_2016/mav_58.php)
- [13] Elektrolýza vody - obrázek [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.zsletohrad.cz/eu/chemie/pokus10.htm>
- [14] Facts about HHO [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://www.hho-1.com/hydrogen-hho-facts/>
- [15] HHO aneb vodík v autě: Zázrak, nebo dokonalé placebo? [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://svetmotoru.auto.cz/clanek/technika/3732/hho-aneb-vodik-v-aute-zazrak-nebo-dokonale-placebo.html>
- [16] Informace o HHO generátorech a schéma integrace do automobilu [online]. [cit. 2023-12-14]. Dostupné z: <https://h2i.cz/technologie-vyroby-vodik-u-s-h2i-jednotkou/>

- [17] Mercedes-Benz Unimog U430 – oficiální stránky Mercedes [online]. [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://special.mercedes-benz-trucks.com/en/unimog/unimog-wave.html>
- [18] Unimog pro budoucnost. Mercedes-Benz testuje drsného pracanta s motorem na vodík [online]. [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/unimog-pro-budoucnost-mercedes-benz-testuje-drsneho-pracanta-s-motorem-na-vodik-151030>
- [19] WaVe project [online]. [cit. 2024-02-14]. Dostupné z: <https://wave.cvc-suedwest.com/en/english/>
- [20] Mazda's Hydrogen RX-8 RE [online]. [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://greencarjournal.com/dont-miss/mazdas-hydrogen-rx-8-re/>
- [21] This Forgotten Mazda RX-8 Concept Could Run on Hydrogen or Gasoline [online]. [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://www.thedrive.com/news/this-forgotten-mazda-rx-8-concept-could-run-on-hydrogen-or-gasoline>
- [22] Mazda Starts Leasing Rotary Hydrogen Vehicles [online]. [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://newsroom.mazda.com/en/publicity/release/2006/200602/060215.html>
- [23] Vlastnosti vodíku z hlediska bezpečnosti [online]. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: [https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L2\\_HyResponder\\_Level1\\_CZ.pdf](https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L2_HyResponder_Level1_CZ.pdf)
- [24] p-V diagram čtyřdobého zážehového spalovacího motoru [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8663967-19-a-20-pistove-spalovaci-motory-zazehove-a-vznetove-19-and-20-petrol-and-diesel-pistone-combustion-engines.html>
- [25] Porovnání výkonu benzínového a vodíkového motoru při stechiometrickém poměru [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-35061-1\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-35061-1_7)
- [26] Fauzan, Ir Ts Dr Mohd Faizal & Saidur, R. (2017). *Comparative thermodynamics analysis of gasoline and hydrogen fuelled Internal Combustion Engines*. International Journal of Advanced Scientific Research and Management. 2. [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/315360385\\_Comparative\\_thermodynamics\\_analysis\\_of\\_gasoline\\_and\\_hydrogen\\_fuelled\\_Internal\\_Combustion\\_Engines/citations](https://www.researchgate.net/publication/315360385_Comparative_thermodynamics_analysis_of_gasoline_and_hydrogen_fuelled_Internal_Combustion_Engines/citations)
- [27] Chen, Y., Zhao, S., Ma, H., Wang, H., Hua, L., Fu, S. *Analysis of Hydrogen Embrittlement on Aluminum Alloys for Vehicle-Mounted Hydrogen Storage Tanks: A Review*. Metals 2021, 11, 1303. [online]. [cit. 2024-04-23]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/met11081303>
- [28] Jiaying Liu, Mingjiu Zhao, Lijian Rong. *Overview of hydrogen-resistant alloys for high-pressure hydrogen environment: on the hydrogen energy structural materials*. Clean Energy, Volume 7, Issue 1, February 2023. [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/ce/zkad009>
- [29] Ailing Wang, Xiaoran Tian, Shuaihua Wang, Xiao Xing, Jianguo Liu, Gan Cui, Yi Zhang. *Study of the nickel concentration effect on toughness and hydrogen embrittlement resistance of pipeline steel*. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 100176, ISSN 2667-1433. [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100176>
- [30] Vlastnosti oceli 1.4541 (X6CrNiTi18-10; ČSN 17 248; AISI 321) [online]. [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.boden.cz/cs/sortiment/dodavany-sortiment/x6crniti18-10-1-4541-17248-nerezova-zaruvzdorna-ocel/>

- [31] Physical Hydrogen Storage [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [32] Ling-zhi Bao, Bai-gang Sun, Qing-he Luo, Jin-cheng Li, Ding-chao Qian, He-yang Ma, Ying-jun Guo. *Development of a turbocharged direct-injection hydrogen engine to achieve clean, efficient, and high-power performance*. Fuel, Volume 324, Part B, 2022, 124713, ISSN 0016-2361. [online]. [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124713>
- [33] Vodíkový palivový článek - pohon budoucnosti? [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vodikovy-palivovy-clanek-pohon-budoucnosti>
- [34] Palivový článek [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/palivovy-clanek>
- [35] Thomas Wallner, Henning Lohse-Busch, Stephen Gurski, Mike Duoba, Wolfgang Thiel, Dieter Martin, Thomas Korn. *Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles*. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 33, Issue 24, 2008, ISSN 0360-3199. [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.067>
- [36] BMW Hydrogen 7 – přichází doba vodíková [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/bmw-hydrogen-7-prichazi-doba-vodikova-13285>
- [37] BMW INTRODUCES WORLD'S FIRST HYDROGEN-DRIVE LUXURY PERFORMANCE CAR FOR EVERYDAY USE - THE BMW HYDROGEN 7 [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0012215EN/bmw-introduces-world-s-first-hydrogen-drive-luxury-performance-car-for-everyday-use-the-bmw-hydrogen-7?language=en>
- [38] Yaodong Du, Xiumin Yu, Jinlong Wang, Haiming Wu, Wei Dong, Jiaqi Gu. *Research on combustion and emission characteristics of a lean burn gasoline engine with hydrogen direct-injection*. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 4, 2016, ISSN 0360-3199. [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.025>
- [39] Jak funguje systém SCR pro snižování emisí u diesellových motorů? [online]. [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/aktuality/jak-funguje-system-scr-pro-snizovani-emisi-u-dieselovych-motoru.html>